

Magyarország célba ér



Készült  
a HEFOP 3.3.1-P.-2004-0900152/1.0 azonosítójú  
„A Felsőoktatás szerkezeti és tartalmi fejlesztése”  
című pályázat keretében.  
Konzorciumvezető: Pannon Egyetem



Környezetmérnöki Tudástár  
Sorozat szerkesztő: Dr. Domokos Endre



6. kötet

# Környezetvédelmi műszaki technológiák

Szerkesztő: Dr. Horváth Géza

Pannon Egyetem – Környezetmérnöki Intézet

**Magyarország célba ér**



Készült  
a HEFOP 3.3.1-P.-2004-0900152/1.0 azonosítójú  
„A Felsőoktatás szerkezeti és tartalmi fejlesztése”  
című pályázat keretében.

Konzorciumvezető: Pannon Egyetem



**Környezetmérnöki Tudástár**  
Sorozat szerkesztő: Dr. Domokos Endre

**6. kötet**

**Környezetvédelmi műszaki technológiák**

Szerkesztő: Dr. Horváth Géza

Szerzők:

Balázs Tibor

Barótfi István

Gulyás Lajos

Halász János

Horváth Géza

Majerik Viktor

Marosvölgyi Béla

Patkó István

Réti Tamás

Szeifert Ferenc

Tőrös Szilárd

Tungler Antal

Vincze Lászlóné

ISBN: 978-615-5044-31-1

2. javított kiadás – 2011

Első kiadás: 2008

Veszprém

Pannon Egyetem – Környezetmérnöki Intézet

# Környezetmérnöki Tudástár

eddig megjelent kötetei

01. Környezetföldtan
02. Környezetgazdálkodás
03. Talajvédelem, talajtan
04. Egészségvédelem
05. Környezeti analitika
06. Környezetvédelmi műszaki technológiák, technológiai rendszerek modellezése, ipari technológiák és szennyezéseik
07. Környezettan
08. Földünk állapota
09. Környezeti kémia
10. Vízgazdálkodás-Szennyvíztisztítás
11. Levegőtisztaság-védelem
12. Hulladékgazdálkodás
13. Zaj- és rezgésvédelem
14. Sugárvédelem
15. Természet- és tájvédelem
16. Környezetinformatika
17. Környezetállapot-értékelés, Magyarország környezeti állapota, monitorozás
18. Környezetmenedzsment rendszerek
19. Hulladékgazdálkodás II.
20. Környezetmenedzsment és a környezetjog
21. Környezetvédelmi energetika
22. Transzportfolyamatok a környezetvédelemben
23. Környezetinformatika II.
24. Talajtan és talajökológia
25. Rezgési spektroszkópia

## Felhasználási feltételek:

Az anyag a Creative Commons „Nevezd meg!-Ne add el!-Így add tovább!” 2.5 Magyarország Licenc feltételeinek megfelelően szabadon felhasználható.



**Nevezd meg!** — A szerző vagy a jogosult által meghatározott módon fel kell tüntetned a műhöz kapcsolódó információkat (pl. a szerző nevét vagy álnévét, a Mű címét).



**Ne add el!** — Ezt a művet nem használhatod fel kereskedelmi célokra.



**Így add tovább!** — Ha megváltoztatod, átalakítod, feldolgozod ezt a művet, az így létrejött alkotást csak a jelenlegivel megegyező licenc alatt terjesztheted.

További felhasználás esetén feltétlenül hivatkozni kell arra, hogy

"Az anyag a HEFOP 3.3.1-P.-2004-0900152/1.0 téma keretében készült a Pannon Egyetemen."

Részletes információk a következő címen találhatóak:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/hu/>



# Tartalomjegyzék

<b>Tartalomjegyzék.....</b>	<b>5</b>
<b><i>Alapismeretek .....</i></b>	<b>13</b>
<b>Bevezetés.....</b>	<b>16</b>
<b>Mértékegység, dimenziók, dimenzióanalízis.....</b>	<b>16</b>
<b>Fázisegyensúlyok, rendszerek, egységek szabadsági foka.....</b>	<b>22</b>
Egykomponensű rendszer fázisegyensúlya .....	23
Többkomponensű rendszer fázisegyensúlya.....	27
<b>Extenzív mennyiségek áramai, hajtóerői .....</b>	<b>33</b>
Konvektív áram .....	34
Vezetékes áram.....	35
Átadási áram.....	38
<b>Megmaradási tételek áramló rendszerekben .....</b>	<b>42</b>
Tömeg-mérlegegyenlet .....	44
Komponens-mérlegegyenlet .....	45
Impulzus-mérlegegyenlet .....	46
<b>Kétfázisú műveletek .....</b>	<b>47</b>
Hajtóerő és munkavonal kétfázisú műveleti egységekben .....	48
Átviteli egység fogalma.....	50
Egyensúlyi egység fogalma .....	51
<b>Tartózkodási időeloszlások .....</b>	<b>52</b>
A tartózkodási idő eloszlás és sűrűségfüggvénye .....	52
A sűrűségfüggvény meghatározása és kiértékelése .....	55
Impulzusfüggvény (Dirac- $\delta$ gerjesztés) .....	55
Egységugrás függvény (HEAVISIDE-függvény) .....	56
Válaszfüggvények kiértékelése .....	57
Különböző geometriájú berendezések tartózkodási idő eloszlása .....	59
Ideáli cső (dugószerű áramlás) .....	59
Lamináris áramlású cső.....	60
Turbulens áramlású cső .....	62
Visszakeveredékes áramlású cső .....	63
Áramlás töltetet tartalmazó csőben .....	66
Cső recirkulációval .....	67
Tökéletesen kevert üst .....	68
Tökéletesen kevert üstkaskád .....	69
<b>Hidraulikus műveletek .....</b>	<b>73</b>
Hidraulikus műveletek .....	75
A fluidumok áramlása .....	75
A fluidum áramlás alapegyenletei .....	79
A fluidum áramlása csőben, a Hagen-Poiseuille-egyenlet .....	80
A fluidum áramlás energiatétele, a Bernoulli egyenlet .....	82
A súrlódási nyomásvesztés számítása .....	83
Energia veszteségek csővezetékben, a módosított Bernoulli egyenlet .....	87
A fluidumok szállítása, a szivattyú teljesítményszükséglete.....	88
Fluidumok keverése.....	89
Gázok keverése .....	90
Folyadékok keverése .....	91
Ülepítés.....	94
Az Ülepítés hidrodinamikája .....	94

Az Ülepedési sebesség és az ülepedő részecske átmérőjének számítása .....	97
Áramlás töltött oszlopon .....	98
A töltött oszlop jellemzői .....	98
Nyomásesés töltött oszlopon .....	101
Fluidizáció és pneumatikus szállítás .....	102
A fluidizáció jelensége .....	102
A fluidizáció kvantitatív leírása .....	104
A pneumatikus szállítás .....	105
Szűrés .....	105
Centrifugálás.....	108
<b>Vegyipari technológiák és szennyezéseik.....</b>	<b>111</b>
<b>Bevezetés (a szerves kémiai technológiákhoz).....</b>	<b>111</b>
Szelektív reakciók a szerves kémiában .....	112
Szakaszos és folyamatos eljárások .....	113
<b>A szerves vegyipar .....</b>	<b>114</b>
A szerves vegyipar nyersanyagai, alapanyagai és közbülső termékei .....	116
A szerves vegyipari alapfolyamatok .....	119
Nitrálás.....	120
Szulfonálás .....	122
Alkilezés .....	123
Acilezés .....	124
Halogénezés.....	126
Hidrolízis – hidratálás.....	127
Oxidáció .....	129
Észterezés .....	131
Kemo- és regio szelektív nagyipari homogén katalitikus eljárások .....	133
Fémorganikus kémiai alapok .....	133
Olefinek oxidációja – Wacker szintézis .....	135
Hidroformilezési technológiák.....	137
Ecetsav szintézis.....	141
Karbonilezésen alapuló további nagyipari eljárások.....	143
Ecetsavanhidrid szintézis .....	143
Vinilacetát szintézis.....	144
Adipisav szintézis .....	144
Lánchosszabítási (homologálási) reakciók .....	144
Alkil-fenil-karbamátok előállítása .....	145
A homogén katalitikus szintézisek gazdaságossági szempontjai .....	145
<b>A finomkémiai ipar .....</b>	<b>145</b>
Biotechnológiai eljárások .....	146
Enantioszelektív homogénkatalitikus eljárások.....	150
Heterogénizált homogén katalizátorok .....	153
<b>Tenzidek - mosószeripar .....</b>	<b>154</b>
A tenzidek lebontása, a szennyvizek kezelése.....	156
<b>Növényvédőszer-ipar.....</b>	<b>156</b>
A növényvédőszer-ipar szennyvizei .....	159
<b>Élelmiszeripar.....</b>	<b>159</b>
Cukorgyártás.....	159
Csokoládégyártás.....	160
Húsipari eljárások .....	162
A húsfeldolgozás technológiája .....	162
Húskészítmények gyártástechnológiája.....	163
A húsipari szennyvizek .....	164
A zöldség- és gyümölcsfeldolgozás technológiái .....	164

Téjfeldolgozás, sajtgyártás .....	165
A téjfeldolgozás szennyvízei és tisztítása .....	168
A savó felhasználása .....	168
A HACCP rendszer .....	169
<b>Ipari technológiák és szennyezéseik .....</b>	<b>171</b>
<b>A technológia fogalma és tárgya .....</b>	<b>171</b>
Az ipari technológia fogalmának eredete és tartalma .....	171
Know-how .....	171
High-tech .....	171
A technológia, mint tudomány .....	172
A technológia alaptörvényei .....	172
A technológiai életciklus törvénye .....	172
A költségparaméter és csökkenésének törvénye .....	173
A léptékhatás törvénye .....	173
Az optimális gyártási méret .....	173
Méretnövelési (Scale up) faktor .....	173
Az ipari termelőegységek felépítése .....	174
A termelést kiszolgáló infrastrukturális alapszolgáltatások .....	174
A folyamatábrák .....	174
Az elvi folyamatábra (vázlat) .....	175
A részletes technológiai folyamatábra .....	175
A technológiai mérlegek .....	176
Mérleg összefüggések .....	179
A technológiai folyamatok hatékonyságnak mérőszámai .....	181
Az ipari technológiák és a fenntartható fejlődés .....	183
A szennyezés csökkentésének elvi és technológiai lehetőségei .....	184
Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) .....	184
Best Available Techniques (BAT) .....	184
BAT Referencia Dokumentumok (BREF) .....	185
BREF dokumentumok felépítése .....	185
A tiszta technológiák .....	186
A csővégi tisztítás (End-of-pipe) .....	186
A tiszta és tisztább technológiák (Clean and cleaner technologies) .....	186
A tisztább termelés stratégiája: .....	186
A hulladékmentes technológiák (Zero waste) .....	187
Környezettchnológiai variánsok beruházási és üzemeltetési költségeinek viszonya .....	188
<b>Metallurgia .....</b>	<b>189</b>
A metallurgia fogalmának eredete és tartalma .....	189
A fémek (metals) .....	189
A Földkéreg szerkezete .....	189
Fémek a természetben .....	190
Fémek és tulajdonságaik .....	190
A fémek fizikai tulajdonságai .....	191
Fémek metallurgia csoportosítása .....	191
Ötvözetek (alloys) .....	192
Ötvöző anyagok .....	192
Ötvözet struktúrák .....	192
Fontosabb ötvözetek .....	192
Ércek előkészítése feldolgozásra .....	193
Teleptani alapfogalmak .....	193
Ércek elválasztása a meddőttől .....	193
Ércdúsítási módszerek .....	193
A metallurgiai eljárások .....	197
A metallurgia fő folyamatainak sorrendje .....	197
A metallurgia módszerei .....	197

<b>Vasgyártás .....</b>	<b>197</b>
Vasalapú szerkezeti anyagok .....	197
A vas.....	198
A nyersvas (pig iron).....	198
A nyersvasak osztályozása .....	198
Az acél (steel).....	198
Az acélok osztályozása .....	199
Szén-vas ötvözetek állapotábrája .....	199
Vas-szén ötvözetek állapotábrája és a széntartalomtól függő acélfajták .....	200
Nyersvasgyártás.....	201
Nyersvasgyártás alapanyagai és funkcióik.....	201
Vasérc keletkezése .....	201
A fontosabb vasérc és mangánérc:.....	201
Mangánérc .....	202
Kohókokszt előállítása nagyhőmérsékletű szénlepárlással, (kigázosítással).....	202
Kohókokszt (coke) előállításának elve.....	202
A nagyhőmérsékletű szénlepárlás folyamatai: .....	203
A fekete kőszén száraz lepárlásának termékei: .....	204
A kohókokszt .....	205
A kamragáz (koksztgáz) .....	205
A gázvíz.....	205
A kőszénkátrány .....	205
A koksztgyártás fontosabb technológiai berendezései .....	206
A KOKSZGYÁRTÁS TECHNOLÓGIÁJA .....	207
Szénelőkészítés .....	208
Kokszolás művelete.....	208
Kokszoltás .....	208
Vegyüzem .....	209
Technológiai vízkezelés .....	210
A kokszolómű környezeti hatásai .....	210
A keletkező emissziók .....	210
A káros környezeti hatások csökkentése .....	211
A vas előállításának elméleti alapjai .....	213
Levegőelőmelegítés .....	214
Salakképző anyagok.....	215
A salakképzés célja .....	215
Salakképző anyagok .....	215
A salak (slag) szerepe a nagyolvasztóban .....	215
A salakok minőségének megítélése .....	215
Kohósalakok felhasználása .....	216
Gyártástechnológiák és berendezések .....	217
A nagyolvasztók szerkezete és működése .....	220
A nagyolvasztó üzem és részei.....	221
A nyersvas feldolgozása, vasöntés, acélgyártás.....	225
Vasöntés.....	225
Acélgyártás .....	226
Az acél előállításának elméleti alapjai .....	226
Nyersvas szállítása és tárolása .....	226
A folyékony vas előkezelése.....	226
S és P mentesítés alapjai .....	227
Acél előállítása oxigén konverterben .....	227
Oxigén-konverteres acélgyártási eljárások .....	228
Konverteres acélgyártás környezeti hatásai .....	230
Másodlagos metallurgiai kezelés .....	230
Környezeti ügyek .....	232
Elektroacélgyártás (Electric Steelmaking) .....	232
A kohó üzeme .....	233

A vas- és acélgégyártás környezet hatásai .....	235
A technológiai helyek szerint .....	235
Az anyagok körforgása az acéliparban.....	237
<b>Energiaipar.....</b>	<b>238</b>
Erőművek.....	238
Az erőművek környezeti hatásai .....	244
Szálló por leválasztás .....	245
Kénoxid emisszió csökkentés .....	246
NOx emisszió csökkentés .....	248
Primer denox technikák .....	248
Szekunder denox technikák .....	250
<b>Kőolajfinomítók .....</b>	<b>251</b>
Finomítói termékek .....	253
Desztilláció.....	253
Finomítói struktúrák.....	258
A kőolajfeldolgozás környezeti hatásai .....	258
A „buborék” koncepció.....	259
<b>Szervetlen vegyipar .....</b>	<b>262</b>
Nitrogénipar .....	262
Ammónia szintézis .....	262
Ammónia szintézis környezeti hatásai .....	269
Salétromsavgyártás.....	269
A salétromsav gyártás környezeti hatásai.....	271
Karbamid.....	273
A karbamid gyártás környezeti hatásai .....	274
Kénsavgyártás.....	275
A kénsavgyártás környezeti hatásai .....	276
Műtrágyák .....	278
A műtrágyagyártás környezeti hatásai .....	279
A klór-alkáli elektrolízis.....	280
Elektrolízis technológiák .....	281
A klór-alkáli elektrolízis környezeti hatásai.....	284
<b>Építőanyag ipar .....</b>	<b>285</b>
Építőipari kötőanyagok.....	285
Cementgyártás.....	285
A cementgyártás környezeti hatásai .....	287
Égetett mész előállítása .....	292
A mészégetés környezeti hatásai .....	292
Kerámiaipar .....	294
A kerámia gyártás környezeti hatásai .....	297
Üvegipar .....	299
Az üveggyártás környezeti hatásai.....	303
<b>Papíripar .....</b>	<b>306</b>
Papírgyártás környezeti hatásai.....	308
<b>Az energia fogalma, tulajdonságai .....</b>	<b>309</b>
Energia a természetben.....	309
Az energia megjelenési formái .....	310
Primer energiahordozók.....	312
Az energia átalakítása .....	315
Tüzelőanyag nemesítés, üzemanyaggyártás.....	316
Hőtermelés .....	316
Villamosenergia-termelés.....	316
Szekunder energiahordozók .....	317

Villamosenergia .....	317
Távhő .....	318
Energia, az ember és fejlődés .....	318
<b>Energia és környezet .....</b>	<b>320</b>
<b>Az energiafelhasználás .....</b>	<b>324</b>
Az energia-felhasználás jellemzői .....	324
Energiafelhasználás Magyarországon .....	325
Az energetikai hatékonyság mutatói .....	328
Energetikai rugalmasság .....	330
Gazdasági hatékonyság .....	331
Egyedi és vezetékes energiaellátás .....	332
Energiafogyasztók .....	332
Energiarendszerek .....	333
Földgázellátó - hálózat .....	334
Folyékony energiahordozók .....	334
Villamosenergia-rendszer .....	335
Távhőrendszer .....	335
Energetikai folyamatok veszteségei .....	336
Mennyiségi veszteségek, mennyiségi hatások .....	336
Az irreverzibilitás okozta veszteségek .....	337
<b>A biomassa mint energiahordozó, és annak energetikai hasznosítása .....</b>	<b>338</b>
Energiatermelés primer biomassából, égetéssel .....	345
A biogáztermelési és hasznosítási alaptermotechnológiák .....	348
<b>Szélenergia .....</b>	<b>355</b>
Szélenergia átalakításának fizikai korlátja .....	356
Szélerőmű szerkezeti felépítése .....	358
A szélerőmű működése .....	360
<b>Geotermikus energia .....</b>	<b>362</b>
Alapfogalmak .....	362
Magyarország geotermikus adottságai .....	362
Geotermikus energia hasznosítása .....	363
Geotermikus energia közvetlen felhasználása .....	363
Elektromos áram termelése .....	365
Száras gőzzel működő erőmű .....	366
Kigőzöltötött gőzzel működő erőmű .....	366
Kettős ciklusú erőmű .....	366
Földhő hasznosítása hőszivattyúval .....	367
<b>Vízenergia .....</b>	<b>369</b>
A vízenergia hasznosítása Magyarországon .....	370
Vízenergia hasznosításának elmélete .....	370
Vízfolyások mozgási energiájának hasznosítása .....	371
Óceánok, tengerek hullámzásának kinetikai energiáját hasznosító erőművek .....	372
Felszíni vizek helyzeti energiájának hasznosítása .....	373
Duzzasztóműves erőművek .....	373
Szivattyús – tározós erőmű .....	376
Nagyeesű vízfolyásokra telepített erőművek .....	376
<b>Gáz-folyadék, gőz-folyadék eljárások .....</b>	<b>380</b>
<b>A gáz-folyadék és gőz-folyadék eljárásokról és környezetvédelmi szerepükről általában .....</b>	<b>380</b>
<b>Gáz-folyadék, gőz-folyadék egyensúlyok .....</b>	<b>380</b>
Gáz-folyadék egyensúlyok .....	380
Gőz-folyadék egyensúlyok .....	382

Gőz-folyadék egyensúlyok számítása .....	385
Egyensúlyi arány, relatív illékonyság .....	387
Nem-idealitás és számítása.....	388
<b>Abszorpció és készülékei .....</b>	<b>390</b>
Anyagátbocsátás az abszorpció során, az abszorpció mechanizmusa .....	390
Az abszorbens kiválasztása .....	392
Egyfokozatú abszorpció .....	392
Többfokozatú abszorpció .....	393
Nagymennyiségű gáz abszorpciója .....	394
Az egyensúlyi egységek száma .....	395
Töltött oszlopok jellemzése: átviteli egységek, HTU, NTU, HETP .....	397
Az abszorpció folyadékárama, minimális folyadékáram .....	400
Egyenáramú abszorpció.....	402
Abszorpció készülékei, abszorberek .....	403
Deszorpció, az abszorbens regenerálása .....	405
<b>Desztilláció és készülékei .....</b>	<b>407</b>
Folyamatos egyensúlyi desztilláció .....	407
Szakaszos egyensúlyi desztilláció.....	410
Vízgőz-desztilláció.....	411
<b>Rektifikálás és készülékei.....</b>	<b>412</b>
A rektifikálás elve.....	412
A rektifikálás megvalósítása .....	413
A rektifikálás számítása .....	416
Biner zeotrop elegyek rektifikálása.....	416
Többkomponensű és azeotrop elegyek rektifikálása.....	430
A rektifikálás készülékei.....	430
Tányéros oszlopok .....	432
Töltött oszlopok .....	437
Rektifikáló oszlopok tervezése.....	439
<b>Szárítás.....</b>	<b>440</b>
<b>Szilárd – gáz rendszerek.....</b>	<b>440</b>
Szilárd anyag szárítása .....	440
A szárító közeg jellemzői .....	440
A száradási folyamat.....	442
Szorpciós és deszorpciós izotermák, hiszterézis .....	442
Száradási sebesség.....	443
A konvekciós szárítás .....	445
Egyfokozatú szárítás ábrázolása i-x diagramon .....	446
Többfokozatú szárítás .....	447
Szárítás füstgáz-levegő keverékével .....	447
Szárítás részleges recirkulációval .....	448
A konvektív szárítás kinetikája .....	449
Szárító berendezések.....	451
Kontakt szárítás .....	456
Szárítás hőszigeteléssel .....	457
Adszorpciós műveletek .....	458
Fagyasztva szárítás.....	460
Nagyfrekvenciás szárítás.....	462
<b>Folyadék-gáz rendszerek .....</b>	<b>462</b>
<b>A környezetvédelmi technológiák gépészeti elemei, technológiai folyamatok monitorozása .....</b>	<b>464</b>
<b>Szennyvíztisztítási technológia.....</b>	<b>464</b>

<b>Szennyvíztisztítási technológia gépészeti berendezései .....</b>	<b>465</b>
Fizikai szennyvíztisztítás berendezései .....	465
Kő- és kavicsfogó.....	466
Rácsok .....	466
Homokfogók .....	468
Zsírfgók .....	469
Ülepítők .....	470
Biológiai szennyvíztisztítás berendezései .....	473
Csepegtetőtestes szennyvíztisztítók .....	474
Eleveniszapos szennyvíztisztítás .....	477
Fertőtlenítés berendezései .....	482
Szennyvíziszapok kezelésének berendezései .....	484
Iszapsűrítés berendezései.....	485
Iszapkondicionálás .....	489
Kémiai kondicionálás .....	490
Biokémiai kondicionálás.....	490
Szennyvíziszapok víztelenítése. ....	492
<b>Szennyvíztisztítási technológia monitorozása .....</b>	<b>494</b>
<b>Reaktorok.....</b>	<b>495</b>
<b>Reagáltatási műveletek, kémiai reaktorok .....</b>	<b>495</b>
A kémiai reaktorok általános jellemzése .....	496
<b>A reaktorok anyag és energiamérlegei .....</b>	<b>498</b>
A folyamatos csőreaktorok anyag- és energiamérlege .....	502
A folyamatos tankreaktor anyag- és energiamérlege .....	503
A folyamatos reaktorkaszád anyagmérlege.....	505
<b>A gyakorlatban használt reaktorok fő típusai .....</b>	<b>506</b>
<b>Technológiai rendszerek modellezése.....</b>	<b>522</b>
<b>A mérnöki feladat osztályok .....</b>	<b>522</b>
<b>Az alkalmazott rendszermodellek csoportosítása .....</b>	<b>524</b>
<b>Az a priori modellezés technika .....</b>	<b>526</b>
A technológia struktúrája .....	526
A technológia, mint műveleti egységek hálózata .....	528
A technológiai rendszer hierarchikus modellezése .....	532
<b>A poszteriori modellezés technika.....</b>	<b>538</b>
Rendszermodellek .....	540
Paraméter identifikáció .....	542
<b>Irányított reaktor vizsgálata (esettanulmány).....</b>	<b>543</b>
<b>Irodalomjegyzék.....</b>	<b>548</b>
<b>Ábrajegyzék .....</b>	<b>553</b>
<b>Táblázatjegyzék.....</b>	<b>561</b>



## Alapismeretek

Dr. Horváth Géza, Pannon Egyetem  
Majerik Viktor, Pannon Egyetem

### Jelmagyarázat

Latin betűk:

a	Hőmérséklet-vezetési együttható, $m^2/s$ Gyorsulás, $m/s^2$
A	Felület, $m^2$
c	Koncentráció, $mol/m^3$
$c_p$	Állandó nyomáson vett fajhő, $J/mol K$
D	Diffúziós állandó, $m^2/s$
E	Tartózkodási idő sűrűségfüggvény, $1/s$
Eu	Euler-szám
F	Erő, N Fázisok száma Tartózkodási idő eloszlás sűrűségfüggvény
Fr	Froude-szám
g	Nehézségi gyorsulás, $m/s^2$
G	Forrás/nyelő
H	Henry-állandó Entalpia, J HEAVISIDE-függvény
I	Áram Belső koreloszlás sűrűségfüggvény
j	Áramsűrűség
K	Független komponensek száma
KP	Kritikus pont
L	Hosszúság, mint alapmennyiség, m
m	Tömeg, g
M	Tömeg, mint alapmennyiség, g Momentum
N	Mólszám, mol Kaszád elemszáma Teljesítmény, W
p	Nyomás, Pa
P	Valószínűség
Pe	Peclet-szám
r	Reakciósebesség, $mol/m^3s$ Sugár, m
R	Egyetemes gázállandó, $J/mol K$ Sugár, m Recirkuláció
Re	Reynolds-szám
Sz	Szabadsági fokok száma
t	Idő, s
T	Hőmérséklet, K Idő, mint alapmennyiség, s
u	Térfogatkitöltési hányados

v	Moláris térfogat, m <sup>3</sup> /mol
	Sebesség, m/s
V	Térfogat, m <sup>3</sup>
$\dot{V}$	Térfogatáram, m <sup>3</sup> /s
W	Koreloszlás függvény
x	Móltört
	Helykoordináta, m
	Független változó
y	Móltört
	Helykoordináta, m
	Függő változó
z	Helykoordináta, m
<b>Görög betűk:</b>	
$\alpha$	Hőátadási tényező, J/m <sup>2</sup> sK
$\beta$	Komponensátadási tényező, m/s
$\gamma$	Impulzusátadási tényező, kg/m <sup>2</sup> s
$\Gamma$	Intenzív állapotjelző
$\delta$	Arányossági tényező
	Filmvastagság
	Impulzusfüggvény
$\varepsilon$	Átadási tényező
	Ürestérfogati hányad
$\zeta$	Dimenziómentes távolság
$\eta$	Dinamikai viszkozitás, kg/ms
$\theta$	Dimenziómentes idő
$\Theta$	Hőmérséklet, mint alapmennyiség, K
$\lambda$	Hővezetési tényező, J/msK
$\mu$	Kémiai potenciál, J/mol
	Centrális momentum
$\nu$	Sztöchiometriai állandó
$\Pi$	Buckingham-féle dimenziómentes szám
$\rho$	Sűrűség, kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	Szórás
$\tau$	Nyíró,- vagy csúsztatófeszültség, N/m
$\upsilon$	Kinematikai viszkozitás, m <sup>2</sup> /s
$\Psi$	Extenzív mennyiség
	Operátor
$\omega$	Fajlagos felület, m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
$\Omega$	Felület, m <sup>2</sup>

**Alsó Indexek:**

c	Kritikus
eff	Effektív
f	Folyadékoldali koncentrációval kifejezett
F	Folyadékfázis
g	Gázoldali koncentrációval kifejezett
G	Gázfázis
i	Komponens

imp	Impulzus
kond	Kondukción
konv	Konvekcion
max	Maximum
min	Minimum
q	Hő
S	Egyensúlyi
t	Hármaspont
ü	Üres
x	Helykoordináta
y	Helykoordináta
z	Helykoordináta

Felső indexek:

*	Határfelület
0	Tiszta komponensre vonatkoztatott
$\alpha$	Fázis
$\beta$	Fázis
$\varphi$	Fázis

## Bevezetés

Az emberiség fejlődésének van egy olyan értelmezése, miszerint ez a fejlődés az ember és a környezet viszonya alapján négy nagyobb szakaszra osztható.

Az első szakasz egy olyan kapcsolat, ami a „környezeti javak” közvetlen használatával jellemezhető. Ezen időszakban – részben az alacsony népsűrűség, részben a szerény fogyasztás (csak a minimális szükségleteknek megfelelő) mellett – a környezet nehézség nélkül regenerálódhatott. Ebben a korban az emberek vándoroltak egyik helyről a másikra. Néhány év múlva esetleg visszatértek egy már ismert területre, akkorra az már regenerálódott.

A második szakasz, amikor az első szakasz azonos „technikai és életviteli” körülményei között egy megnövekedett számú népesség próbálta magát eltartani. Ekkor már a terhelés miatt a teljes környezet képtelen volt a regenerációra. Ez az időszak egyértelműen az élethez szükséges javak hiányával jellemezhető. Hasonló jelenségekkel most is találkozhatunk földünk különböző okok miatt fejlődésre képtelen térségeiben.

A harmadik szakasz azzal jellemezhető, hogy az emberiség és a környezet között egy kooperáció alakul ki, sok visszacsatolással. Ez hatással van az emberiség ellátására és egyre több ismerettel rendelkezik azokról a kölcsönhatásokról, amelyek egyrészt a környezet különböző szegmensei, másrészt a gazdasági fejlődés feltételei között léteznek. Az iparilag fejlett és felelősen gondolkozó országok a gazdasági aktivitás magas szintje, a nagy fajlagos energia felhasználás (területegységre számítva) és a technológiai eszköztár figyelembe vételével igyekeznek olyan társadalompolitikát folytatni, aminek eredményeként életképes gazdaság alakul ki a fenntarthatóság peremfeltétele mellett.

A negyedik fázis egy kialakuló jövőkép, amelyben az ember és környezet kölcsönhatását kiterjesztik a Földön kívüli térségekre is. Sokat várnak a high-tech alkalmazásoktól, hiszen ezek anyag és energiaszükséglete általában lényegesen alacsonyabb.

Az utóbbi két fázishoz szükséges egy új tudásrendszer kialakítása, aminek alapja az, hogy a környezet továbbá nem egy limitáló faktor lesz. Limitáló faktornak az emberi tudást tekintjük és a növekedés határát a határok tudományos megalapozottságú növekedése váltja fel.

A jegyzet, amit az olvasó kezében tart, összefoglalóan ismerteti azokat a mérnöki ismereteket, amelyek jó eséllyel felhasználhatók ezen a területen, azaz az előbb idézett tudásrendszer műszaki alapjait jelentik.

## Mértékegység, dimenziók, dimenzióanalízis

Ahhoz, hogy mérnöki értelemben valamiről beszélhessünk, ismerni kell azokat a *mennyiségeket*, amelyek leírják az adott objektumot vagy folyamatot. A vegyészmérnöki és környezetmérnöki tudományban mennyiségek alatt valamely fizikai tulajdonság mérhető jellemzőjét értjük. Mérés során a mérendő mennyiséget annak konvencionálisan egységnyi értékével hasonlítjuk össze. A mérés eredményeként tehát egy számot kapunk, amelyet *mérőszámnak* nevezünk. A vizsgált fizikai mennyiség ennek a mérőszámnak és a mértékegységnek a szorzataként áll elő:

**1. képlet.**  $Mennyiség = Mérőszám * Mértékegység$

Egy rendszer leírásához olyan mennyiségeket használunk, amelyek egyértelmű függvényei a rendszer állapotának, ezek az ún. *állapotjelzők*. Az állapotjelzők egy része függ a rendszer méretétől, avval arányosan változik. Ezeket *extenzív állapotjelzők*nek nevezzük, ide tartozik maga a tömeg, a térfogat, az entrópia, a belső energia stb. Ha két rendszert egyesítünk, azok extenzív mennyiségei összeadódnak, additívak. Az állapotjelzők másik csoportja független a rendszer méretétől és nem additív a fenti értelemben. Ezek az ún. *intenzív állapotjelzők*, mint a nyomás, hőmérséklet, koncentráció, sebesség stb.

Ahhoz, hogy valami mennyiség lehessen, ki kell hogy elégítse az ún. Carnap kritériumokat:

- Mértékegysége legyen
- Egyenlőség feltételét meg tudjuk adni
- Kisebb-nagyobb reláció megadása
- Zéruspont
- Skálatörvény

A fizikai mennyiségek egy részét egyenletekkel definiáljuk. Ha összesen  $k$  egyenletünk van, amiben  $n$ -féle mennyiség szerepel, akkor  $n-k$  mennyiség definiálatlan marad. Ezt az  $n-k$  mennyiséget *alaplammennyiség*nek nevezzük (lásd: 1. táblázat)

**1. táblázat. A mérnöki tudományok alaplammennyiségei (generáló elemek).**

Tudomány	Dimenziója	Jele
Geometria	hossz	L
Kinetika	idő	T
Mechanika	tömeg	M
Hőtan	hőmérséklet	$\Theta$
Villamosságtan	villamos töltés	e
Fénytan	fényerősség	-

A fizikai mennyiségek szabad *Abel-féle* csoportot alkotnak. Ez azt jelenti, hogy a csoport elemeiből kiválasztható véges számú *generáló elem* ( $C_1, C_2, \dots, C_q$ ), amelyek egész kitevős szorzatával a csoport bármely tagja meghatározható.

**2. képlet.**  $X = C_1^{\alpha_1} C_2^{\alpha_2} \dots C_q^{\alpha_q} = \prod C_i^{\alpha_i}$

A szabad jelző arra utal, hogy a generáló elemek között nincs semmilyen összefüggés. Csoporton olyan elemek összességét értjük, amelyekre teljesülnek az alábbi feltételek:

- I. Csoporton értünk egy  $S$  (nem üres) halmazt, amelynek elemei között kapcsolat van, amely az  $S$  halmaz  $A, B$  elempárjához egyértelműen a halmaznak egy  $C$  elemét rendeli. Ezt a kapcsolatot rendszerint szorzásként jelöljük.

**3. képlet.**  $AB = C$

- II. Az összekapcsoló művelet (szorzás) asszociatív, azaz fennáll az alábbi összefüggés:

**4. képlet.**  $(AB)C = C(AB)$

- III. Létezik az egységelem (1), amely a csoport bármelyik elemével szorozva ismét ugyanazt az elemet szolgáltatja

**5. képlet.**  $(1)A = A$

- IV. Létezik az inverz elem, vagyis a csoport bármelyik eleméhez található egy olyan elem, amelyet megszorozva a kiválasztottal, éppen az egységelemet kapjuk.

**6. képlet.**  $A^{-1}A = (1)$

A csoportalkotásnak csak ez a négy kritériuma van. Ezen kívül a fizikai mennyiségek még tovább menően az alábbi három követelményt is kielégítik:

V. A szorzás kommutatív. Tehát:

**7. képlet.**  $AB = BA$

Azokat a csoportokat, amelyek ezt a követelményt kielégítik, kommutatív vagy Abel-féle csoportoknak nevezzük.

VI. Az egységelemtől különböző elemek mind végtelen rendűek. Tehát a csoport bármely ( $A$ ) elemére igaz hogy

**8. képlet.**  $A^m \neq (1)$

ahol  $m$  egy tetszőleges természetes szám.

Azokat a *generátorrendszereket* amelyekre igaz, hogy maximális számú független elemet tartalmaznak és minimális számú generáló elemből állnak *bázisrendszereknek*, vagy röviden *bázisoknak* nevezzük. A minimális számú generáló elem azt jelenti, hogy bármelyik elem elhagyása esetén a bázis elveszti generátorrendszer tulajdonságát, vagyis ebben az esetben a csoport valamennyi eleme nem lenne előállítható. Ugyanakkor a bázis maximális számú független elemet tartalmaz, mert ha még lenne független elem, amelyet nem vettünk be a bázisba, akkor éppen ez a független elem nem lenne generálható.

*Dimenzió* alatt az alaplmenntiségek hatványszorzatát értjük, ahol a kitevő pozitív, vagy negatív egész szám, vagy nulla. A sebesség dimenziója például  $L \cdot T^{-1}$ , SI mértékegysége m/s. A dimenzió felfogható általánosított mértékegységként is: egy adott dimenziójú mennyiséghez több mértékegység is rendelhető (pl.: a sebesség megadható m/s-ban, km/h-ban stb) egy mértékegység azonban csak egy dimenzióhoz rendelhető hozzá.

A rendszer tulajdonságainak leírása történhet dimenziómentes csoportok segítségével is, ez az ún. *dimenzióanalízis*. A módszer alapja a *Buckingham-féle  $\Pi$  tétel*, amely kimondja, hogy  $n$  mennyiség között fennálló *dimenzionálisan homogén* egyenletet át lehet alakítani ( $p=n-m$ ) dimenziómentes hatványszorzat közötti összefüggésé, ahol  $m$  az előforduló alaplmenntiségek számát jelöli. Vagyis az

**9. képlet.**  $y = \Psi(x_1, x_2, \dots, x_n)$

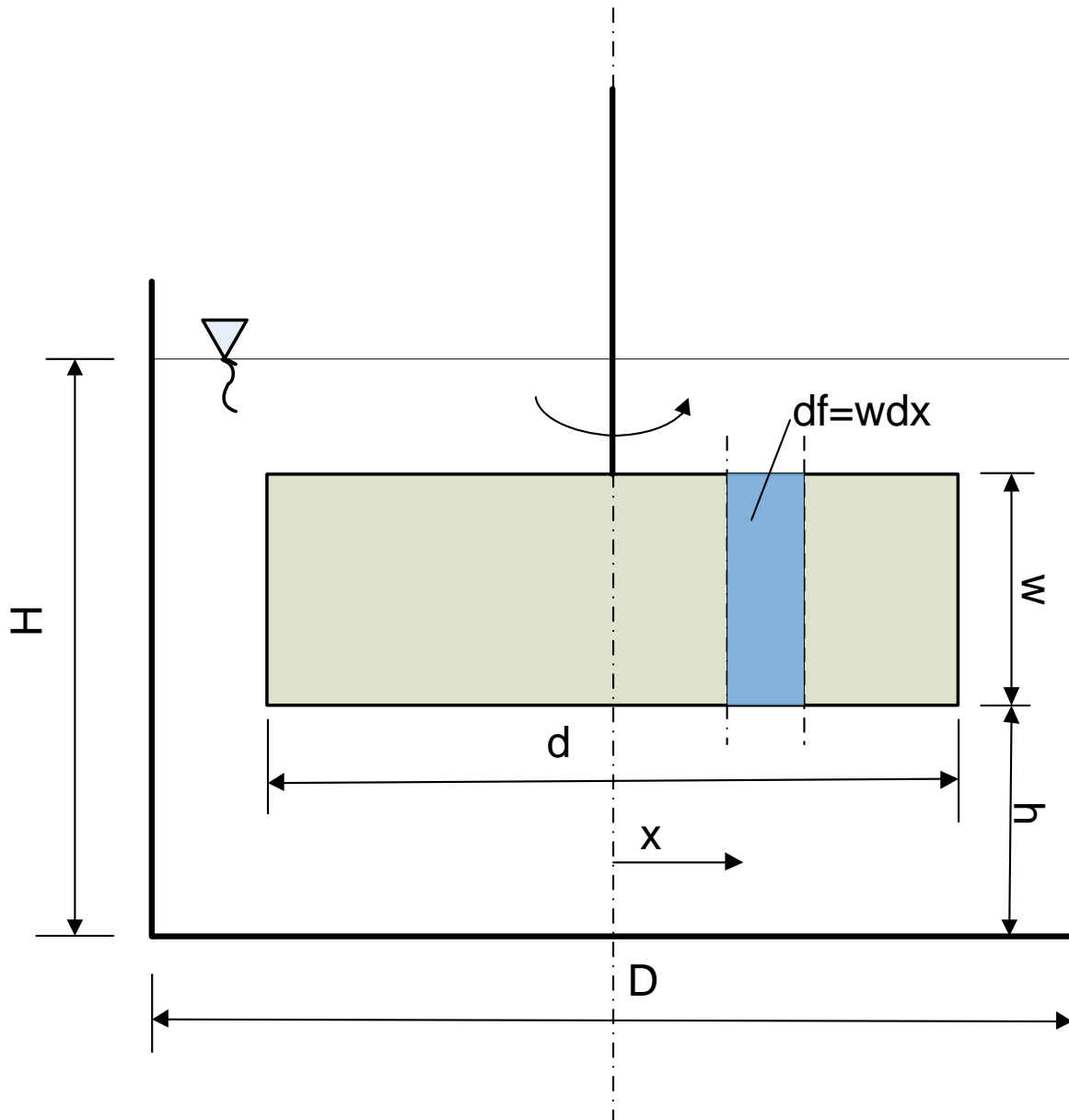
összefüggés az alábbi alakra transzformálható:

**10. képlet.**  $\Pi = \Psi'(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_p)$

ahol  $y$  a függő változót,  $x_1, x_2, \dots, x_n$  a független változókat,  $\Psi$  függvénykapcsolatot,  $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_p$  pedig a dimenziómentes mennyiségeket jelöli. Egy egyenlet akkor

tekinthető dimenzióalan homogénnek, ha az a benne szereplő mennyiségek mértékegységeitől függetlenül igaz.

A dimenzióanalízist jobb megértése érdekében tekintsünk egy gyakorlati példát. Vizsgáljuk meg hogyan függ a keverő teljesítményszükséglete a rendszer dimenziómentes jellemzőitől.



**1. ábra. Propeller keverő.**

***D: készülék átmérője, d: keverő elem átmérője, h: keverő elem távolsága az edény aljától, w: keverő elem vastagsága, H: folyadék magassága a készülékben.***

A keverő  $df$  felületére ható erő kétféleképpen is felírható: a közegellenállással és a nyomóerővel:

**11. képlet.** 
$$dF = c\gamma \frac{v^2}{2g} df = \Delta p * df$$

**12. képlet.**  $c\rho \frac{v^2}{2} df = \Delta p * df$

**13. képlet.**  $v = 2\pi n$

Az elem teljesítményszüksége egyenlő az időegység alatt végzett munkával:

**14. képlet.**  $dN = dF * v = c\rho \frac{v^3}{2} df = c\rho \frac{(2\pi n)^3}{2} x^3 w dx$

Integrálva a teljes keverőre:

**15. képlet.**  $N = 2 \left[ c\rho \frac{(2\pi)^3}{2} n^3 w \int_0^{d/2} x^3 dx \right]$

**16. képlet.**  $N = 2c\rho \frac{(2\pi)^3}{2} n^3 w \frac{(d/2)^4}{4}$

**17. képlet.**  $N = \xi \rho n^3 d^5 = \int_0^d dF * v = \Delta p w dv$

**18. képlet.**  $w = a * d$

**19. képlet.**  $\xi = \frac{\Delta p a d^2 v}{\rho d^5 \left( \frac{v}{\pi d} \right)^3} \approx \frac{\Delta p}{\rho v^2}$

**20. képlet.**  $N = f(d, n, \rho, \eta, g)$

**21. képlet.**  $N = konst. (d^a n^b \rho^c \eta^e g^f)$

Az egyes változók dimenziói:

$$[d] = L$$

$$[n] = T^{-1}$$

$$[\rho] = ML^{-3}$$

$$[\eta] = ML^{-1}T^{-1}$$

$$[g] = LT^{-2}$$



A dimenziómátrix a következőképpen írható fel:

$$\begin{array}{l} d \quad n \quad \rho \quad \eta \quad g \\ [M] \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \\ [L] \quad 1 \quad 0 \quad -3 \quad -1 \quad 1 \\ [T] \quad 0 \quad -1 \quad 0 \quad -1 \quad -2 \end{array}$$

Mivel az alapmennyiségek száma  $m=3$ , a változók száma  $n=5$ , a keverő teljesítményszükséglete legalább  $p=n-m=2$  dimenziómentes változóval fejezhető ki.

**22. képlet.**  $M^1 L^2 T^{-3} = konst. L^a T^{-b} M^c L^{-3c} M^e L^{-e} T^{-e} L^f T^{-2f}$

M-re

**23. képlet.**  $1 = c + e$

L-re

**24. képlet.**  $2 = a - 3c - e + f$

T-re

**25. képlet.**  $-3 = -b - e - 2f$

Három egyenletből álló öt ismeretlenes egyenletrendszer. Tekintsük  $e$ -t és  $f$ -et határozottnak.

**26. képlet.**  $c = 1 - e$

**27. képlet.**  $b = 3 - 2f - e$

**28. képlet.**  $a = 2 + 3(1 - e) + e - f = 5 - f - 2e$

**29. képlet.**  $N = konst. * d^{(5-f-2e)} n^{(3-2f-e)} \rho^{(1-e)} \eta^e g^f$

**30. képlet.**  $N = konst. * (d^5 n^3 \rho) (d^{-2} n^{-1} \rho^{-2} \eta)^e (d^{-1} n^{-2} g)^f$

**31. képlet.**  $\frac{N}{d^5 n^3 \rho} = konst. * \left( \frac{d^2 n \rho}{\eta} \right)^{-e} \left( \frac{dn}{g} \right)^{-f}$

**32. képlet.**  $Re = \frac{vd}{\nu} = \frac{\pi \rho d^2}{\eta}$

**33. képlet.**  $Fr = \frac{\text{tehetetlenségi erő}}{\text{nehézségi erő}} = \frac{v^2}{gl} = \frac{\pi^2 dn^2}{g}$

$$34. \text{ képlet. } Eu = \frac{\text{nyomó erő}}{\text{tehetetlenségi erő}} = \frac{\Delta p}{\rho v^2} = \frac{\Delta p}{\rho d^2 n^2}$$

$$35. \text{ képlet. } \Delta p = \frac{\text{erő}}{\text{felület}} = \frac{\text{munka}}{\text{út}^3} \approx \text{munka}$$

$$36. \text{ képlet. } Eu_k = \frac{\text{munka/út}^3}{\rho d^2 n^2} = \frac{\text{munka}}{\rho d^5 n^2} = \frac{\text{munka/idő}}{\rho d^5 n^2 / \text{idő}} = \frac{N}{\rho d^5 n^3}$$

$$37. \text{ képlet. } \xi = Eu_k = \text{konst.} * Re_k^{-e} * Fr^{-f}$$

Alacsony fordulatszámnál  $Fr \sim 1$ . A keverő ellenállási tényezője:

$$38. \text{ képlet. } Eu_k = \text{konst.} * Re_k^{-e}$$

$$39. \text{ képlet. } \xi = \text{konst.} * Re^a * Fr^b \left(\frac{H}{d}\right)^g \left(\frac{h}{d}\right)^j \left(\frac{w}{d}\right)^k \left(\frac{D}{d}\right)^l \dots$$

Geometriailag hasonló szerkezetek esetén  $H/D$ ,  $h/d$ ,  $w/d$  és  $D/d$  konstansok.

## Fázisegyensúlyok, rendszerek, egységek szabadsági foka

Ha egy rendszer tulajdonságai függetlenek a helykoordinátáktól, akkor a rendszert *homogénnek* nevezzük. Ha a rendszernek van legalább egy olyan tulajdonsága, ami függ a helytől, és az egy folytonos függvényvel leírható, akkor *inhomogén* rendszerről beszélünk. Ha a fenti függvénynek szakadása van a rendszer határain belül, akkor a rendszerünk *heterogén*. A heterogén rendszerek u.n. *fázisokból* állnak, amelyek a termodinamikai rendszer azonos fizikai és kémiai paraméterekkel rendelkező részeinek összessége. Egy fázis lehet *folytonos*, vagy *diszperz*, attól függően, hogy egyetlen összefüggő közegként, vagy kis részekre osztva (*diszpergálva*) van jelen. Attól függően, hogy a rendszert egy, vagy többféle molekula alkotja, beszélhetünk *egykomponensű* és *többkomponensű* rendszerről. A termodinamikában komponensek száma alatt általában a független komponensek számát értjük, ami nem más, mint a kémiaiilag különböző anyagok számának és az ezekre vonatkozó megkötések számának a különbsége. A legtöbb esetben megkötés alatt a komponensek között lehetséges független reakciókat értjük (olyan reakciók, amelyek nem állíthatók elő más reakciók lineáris kombinációjaként), de más kapcsolatok is csökkenthetik a független komponensek számát pl.: az elektroneutralitás elve elektrolit oldatokban. A komponensek száma tehát nem más, mint az alkotórészeknek az a minimális száma, amelyből tetszőlegesen összetételű rendszer építhető fel.

Egy fázist jellemez a halmazállapota de egy rendszer azonos halmazállapotú részei (folyékony és szilárd) állhatnak több fázisból. A fázishatárra jellemző, hogy egyes fizikai és/vagy kémiai tulajdonságot leíró függvénynek (pl.: kémiai potenciál, sűrűség, stb.) szakadása van, ugyanakkor az egymással érintkező fázisok között hő, impulzus és komponenstranszport mehet végbe. Ezek a transzportfolyamatok minden esetben

átadást jelentenek. Ha egy heterogén rendszert magára hagyunk, a fázisok között hő, impulzus és komponensátadás megy végbe mindaddig, míg a rendszer egyensúlyba nem kerül. A rendszer mérete nincs hatással az egyensúlyra, ezért azt intenzív állapotjelzőkkel jellemezzük. A termikus egyensúly feltétele, hogy minden egyes fázis azonos hőmérsékletű legyen:

**40. képlet.**  $T^\alpha = T^\beta = \dots = T^\varphi$

A mechanikai egyensúly feltétele, a nyomás állandósága:

**41. képlet.**  $p^\alpha = p^\beta = \dots = p^\varphi$

Anyagátadási-, vagy komponensegyensúlyról akkor beszélhetünk, ha minden egyes komponensre külön-külön igaz, hogy kémiai potenciálja megegyezik az  $\alpha$ ,  $\beta$  ...  $\varphi$  fázisokban:

**42. képlet.**  $\mu_i^\alpha = \mu_i^\beta = \dots = \mu_i^\varphi$

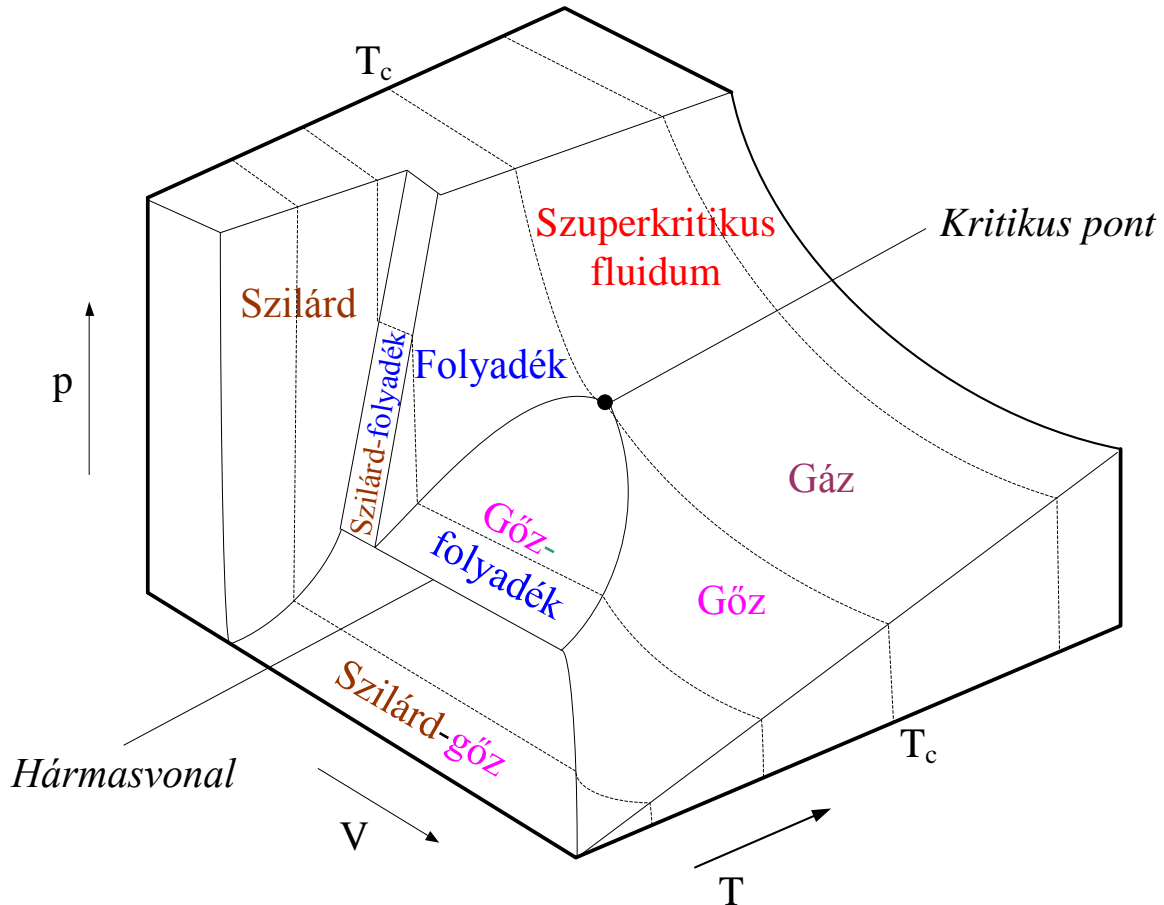
A kémiai potenciál függ a hőmérséklettől, a nyomástól, és a fázis összetételétől, ezért egy zárt rendszer nyomását és hőmérsékletét változtatva befolyásolhatjuk a rendszert alkotó fázisok számát és jellegét.

Azon intenzív állapotjelzők számát, amelyeket szabadon megváltoztathatunk anélkül, hogy az egyensúlyi rendszert alkotó fázisok száma megváltozna a rendszer *szabadsági fokának* nevezzük. A szabadsági fokot úgy határozzuk meg, hogy a rendszert leíró intenzív állapotjelzők számából levonjuk a köztük lévő függvénykapcsolatok számát. A következő fejezetekben egykomponensű és többkomponensű rendszerek fázisegyensúlyait és szabadsági fokait tárgyaljuk.

## Egykomponensű rendszer fázisegyensúlya

Az 2. ábra egy egyszerű egykomponensű rendszer p-v-T diagramja látható. Egyszerű alatt azt értjük, hogy az anyagnak egyetlen szilárd halmazállapotú módosulata létezik. A jobb kezelhetőség érdekében p(v,T) felület helyett a fenti diagram p-v és p-T vetületeit szokták használni (3. ábra és 4. ábra) ezek közül is a leggyakrabban használt forma a p-T diagram, vagy fázisdiagram. A diagramról leolvasható, hogy adott hőmérsékleten és nyomáson mely halmazállapot a termodinamikailag stabil. A szilárd, folyadék és gőz fázisokat elválasztó oladási, párolgási és szublimációs görbe azokat a pontokat köti össze, ahol az egymással határos fázisok egyensúlyban vannak, egymás mellett léteznek. A fenti három görbe a fázisdiagram egy kitüntetett pontjában, az úgynevezett *hármaspontban* találkozik. A hármaspontban a három fázis egymással egyensúlyban van. A p-v-T és a p-v diagrammon a hármaspontnak a *hármasmvonal* felel meg. A fázisdiagram másik kitüntetett pontja a párolgás görbét lezáró úgynevezett *kritikus pont*. A kritikus pontot meghatározó *kritikus nyomás* ( $p_c$ ) és *kritikus hőmérséklet* ( $T_c$ ) felett az anyag *szuperkritikus fluid* állapotban van, amely állapot fizikai és kémiai tulajdonságait tekintve átmenetet képez a gáz és a folyadék között. Ezt szemlélteti a 2. táblázat is, ahol nagyságrendileg hasonlítottuk össze a fluidumok néhány jellemző fizikai tulajdonságát. A szuperkritikus fluid állapot egyik sajátossága, hogy az eddig leírt halmazállapotoktól eltérően a szuperkritikus tartományt nem határolja éles fázishatár. Folyadék és gázfázisból egyaránt át lehet lépni szuperkritikus

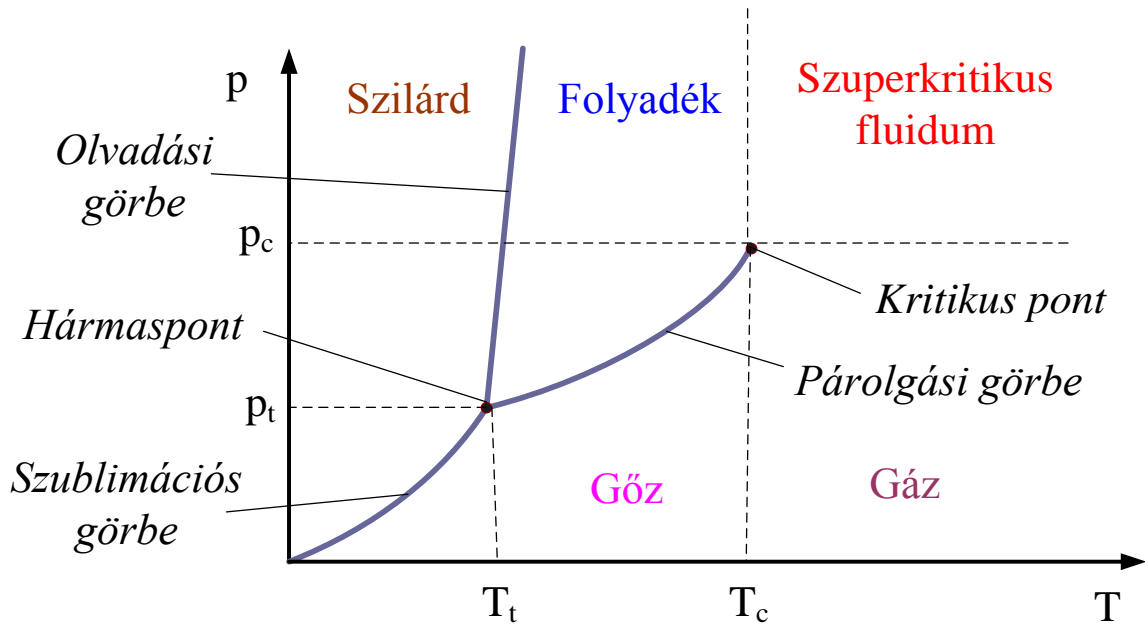
fluid állapotba anélkül, hogy kétfázisú rendszer alakulna ki, noha az anyag egyik másik tulajdonsága (pl.: sűrűség, viszkozitás, dielektromos állandó, stb.) ugrásszerű változáson megy keresztül. Ezt a változást szemlélteti az 5. ábra, amely a széndioxid sűrűségét, viszkozitását és öndiffúziós állandóját ábrázolja a nyomás függvényében 35 °C-on azaz a kritikus hőmérséklet felett.



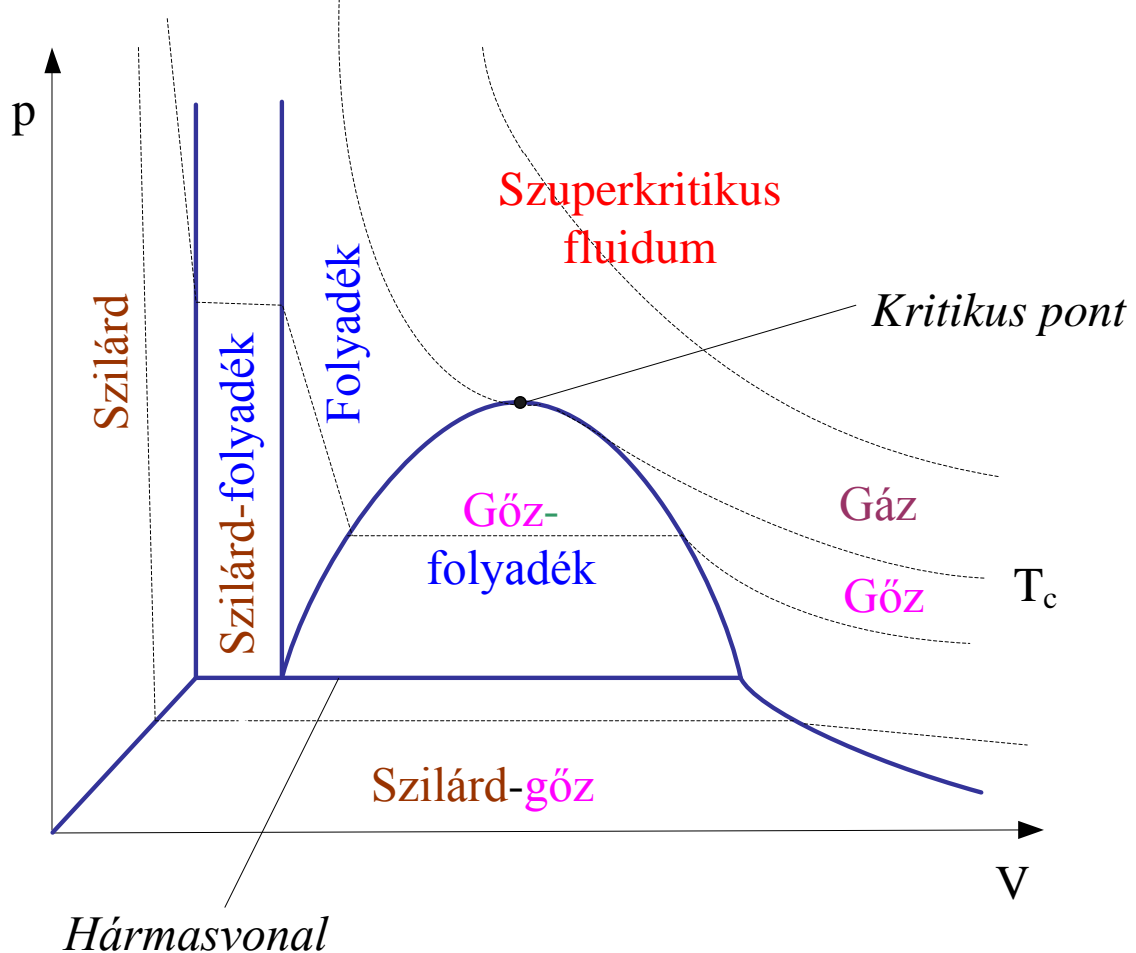
2. ábra Egykomponensű rendszer  $p$ - $v$ - $T$  diagramja.

Egy egyfázisú, egykomponensű rendszer jellemezhető a nyomással, hőmérséklettel, moláris térfogattal és a kémiai potenciállal. Ezek közül az intenzív állapotjelzők közül a kémiai potenciál és a moláris térfogat leírható a nyomás és hőmérséklet függvényeként, utóbbiak az úgynevezett állapotfüggvények. A négy állapotjelzőből kettőt megválasztva az összes többi tulajdonság adódik. Egy egyfázisú, egykomponensű rendszer szabadsági foka tehát  $4 - 2 = 2$ .

Amennyiben a rendszer két-, vagy háromfázisú, úgy a fázisonként vett négy állapotjelzőből a fizikai kémiai összefüggéseken túl le kell vonni fázisegyensúlyból adódó megkötések számát is, amit a 3. táblázat foglaltunk össze.



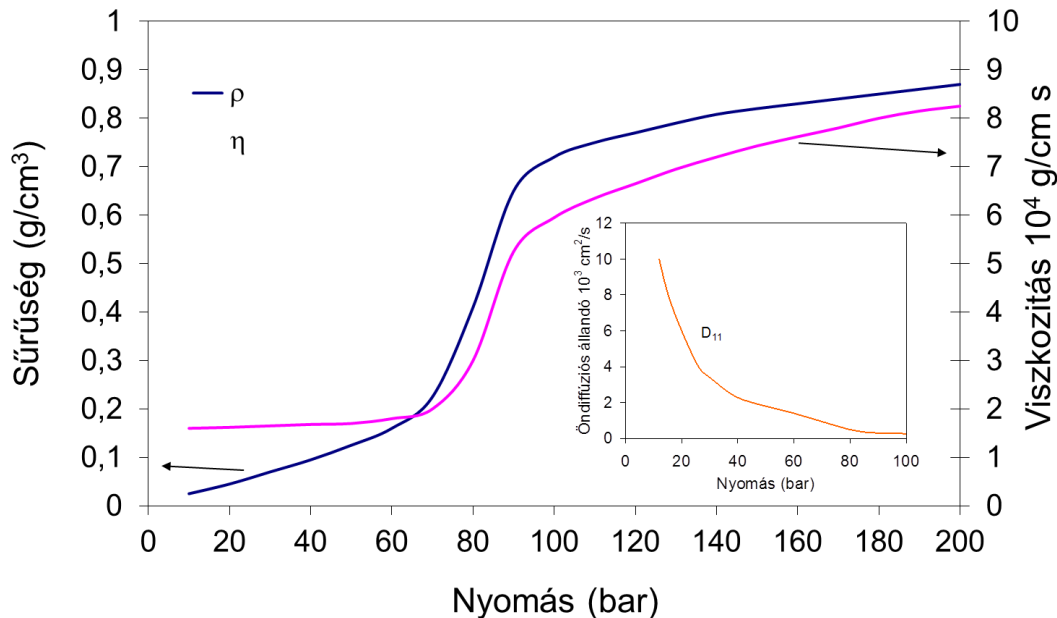
3. ábra Egykomponensű rendszer  $p$ - $T$  diagramja.



4. ábra Egykomponensű rendszer  $p$ - $v$  diagramja.

**2. táblázat. A különböző fluidumokra jellemző diffúziós állandó, sűrűség és viszkozitás értékek.**

	$D_{12}$ [cm <sup>2</sup> /s]	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\eta$ [g/cm s]
Gáz	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>
Szuperkritikus fluidum	10 <sup>-5</sup>	0,2-1	10 <sup>-4</sup> -10 <sup>-3</sup>
Folyadék	10 <sup>-6</sup>	1	10 <sup>-2</sup>



**5. ábra. A széndioxid sűrűsége, viszkozitása és öndiffúziós állandója a nyomás függvényében 35 °C-on.**

**3. táblázat. Többfázisú rendszerek szabadsági foka**

Leíró tulajdonságok	Szám
$p^\varphi, T^\varphi, \mu^\varphi,$	$3 \cdot F$
Fizikai kémiai összefüggések	
$\mu^\varphi = f(p, T)$	$- F$
Fázisegyensúly	
$p^\alpha = p^\beta = \dots = p^\varphi$	$- (F - 1)$
$T^\alpha = T^\beta = \dots = T^\varphi$	$- (F - 1)$
$\mu^\alpha = \mu^\beta = \dots = \mu^\varphi$	$- (F - 1)$
Szabadsági fokok száma	$3 - F$

Bármilyen egykomponensű rendszer szabadsági foka megadható az alábbi egyenlettel:

**43. képlet.**  $Sz = 3 - F$

ahol Sz a szabadsági fokok száma és F a fázisok száma. A fenti egyenletet Josiah Willard Gibbs amerikai fiziko-kémikus után *Gibbs-féle fázisszabálynak*, vagy *fázistörvénynek* szokták hívni. A Gibbs-féle fázisszabály értelmében az egyfázisú rendszerek *bivariánsak*, tehát két állapotjelzőjük szabadon választható. Az olvadási,

párolgási vagy szublimációs görbén elhelyezkedő kétfázisú rendszerek *univariánsak*, szabadsági fokuk  $3 - 2 = 1$ . A hármas pontban a szabadon választható paraméterek száma nullára csökken, az ilyen rendszert *invariánsnak* nevezzük. Ez azt jelenti, hogy bármely állapotjelzőt megváltoztatva egy fázis eltűnik. A fenti egyenletből következik az is, hogy egyensúlyi állapotban egy egykomponensű rendszer háromnál több fázisban nem lehet jelen egyidejűleg, mert a szabadsági fokok száma nem lehet negatív.

## Többkomponensű rendszer fázisegyensúlya

Többkomponensű rendszerek egyértelmű leírásához a nyomáson és hőmérsékleten túl az összetételt is meg kell adnunk. Az erre a célra leggyakrabban használt intenzív állapotjelző a móltört.  $K$  darab komponens esetén ez fázisonként  $K - 1$  változót jelent, mivel a móltörtek összege minden fázisban egyet kell, hogy adjon. Az egykomponensű rendszerektől eltérően itt a komponensegyensúly feltétele, vagyis a kémiai potenciálok egyenlősége minden egyes komponensre külön-külön teljesül, ami  $K^*(F - 1)$  megkötést jelent.

### 4. táblázat. Többkomponensű többfázisú rendszerek szabadsági foka

Leíró tulajdonságok	Szám
$p^\varphi, T^\varphi, x_i^\varphi, \mu_i^\varphi$	$F^*(2K + 2)$
Fizikai kémiai összefüggések	
$\sum x_i^\varphi = 1$	- $F$
$\mu_i^\varphi = f(p, T, x_j)$	- $F^*K$
Fázisegyensúly	
$p^\alpha = p^\beta = \dots = p^\varphi$	- $(F - 1)$
$T^\alpha = T^\beta = \dots = T^\varphi$	- $(F - 1)$
$\mu_i^\alpha = \mu_i^\beta = \dots = \mu_i^\varphi$	- $K^*(F - 1)$
Szabadsági fokok száma	$K + 2 - F$

A Gibbs-féle fáziszabály többkomponensű rendszerek vonatkozó alakja tehát:

**44. képlet.**  $Sz = K + 2 - F$

ahol  $K$  a független komponensek száma. Ha  $K$ -ba egyet helyettesítünk, a fázistörvény egykomponensű rendszerre vonatkozó alakját kapjuk vissza.

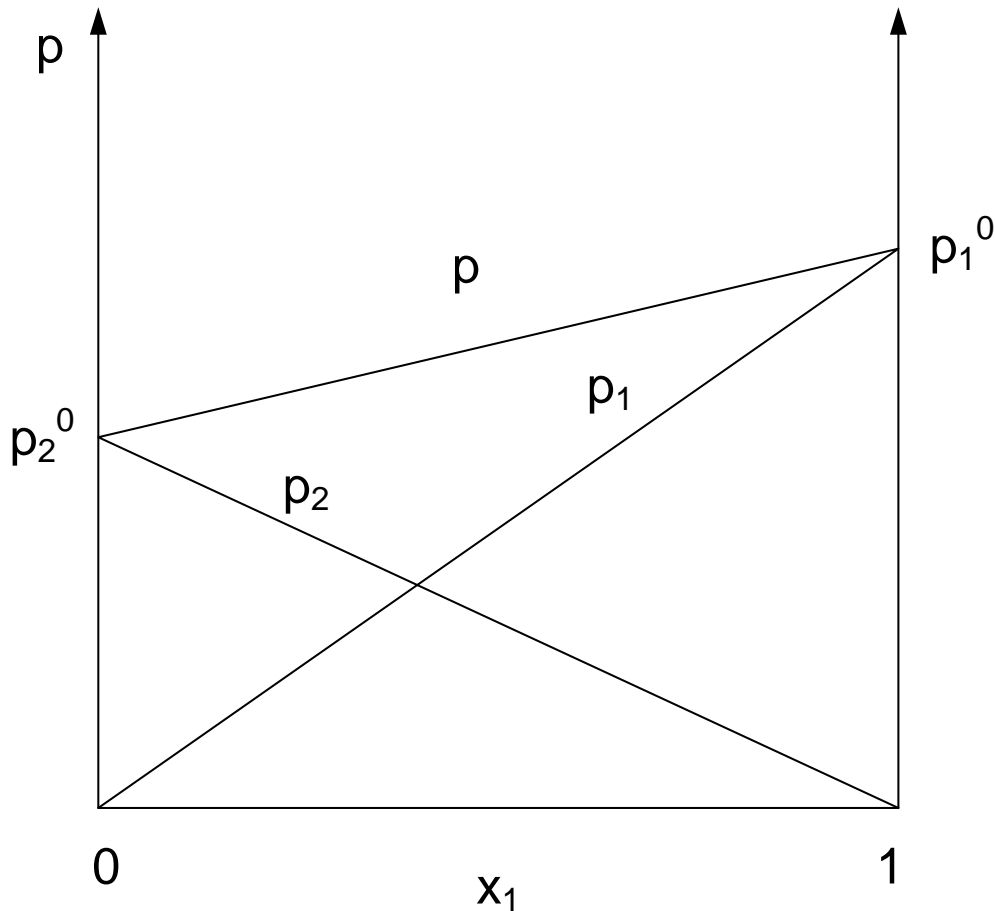
Ha egy kétkomponensű rendszer (*biner elegy*) szabadsági fokait vizsgáljuk, a fázisok számának függvényében láthatjuk, hogy egy fázis esetén a szabadsági fok három, tehát szabadon megválaszthatjuk a nyomást, a hőmérsékletet és összetételt. Kétfázisú biner rendszerek szabadsági foka kettő, azaz a fenti paraméterek közül már csak kettő választható szabadon, a harmadik ezekből adódik. Ideális elegyknél, ha a nyomás és a hőmérséklet közül egyiket rögzítjük, a másik kifejezhető az összetétel lineáris függvényeként. Gőz-folyadék egyensúlynál állandó hőmérsékleten a rendszer nyomását a *Rault törvény* írja le:

**45. képlet.**  $p = p_1 + p_2 = x_1 p_1^0 + x_2 p_2^0 = x_1 (p_1^0 - p_2^0) + p_2^0$

ahol  $p_1$  és  $p_2$  a két komponens parciális gőznyomása,  $p_1^0$  és  $p_2^0$  a tiszta komponensek gőznyomása,  $x_1$  és  $x_2$  pedig a folyadékfázisbeli móltörtök, vagyis az elegy gőznyomása nem más, mint a tiszta komponensek gőznyomásának móltörtökkel súlyozott összege. A komponensek parciális gőznyomása kifejezhető a gázfázisbeli móltörtökkel is, ez az ún. *Dalton-törvény*:

**46. képlet.**  $p_i = y_i p$

A 6. ábra egy ideális elegy gőznyomását ábrázolja az illékonyabb komponens móltörtjének függvényében.

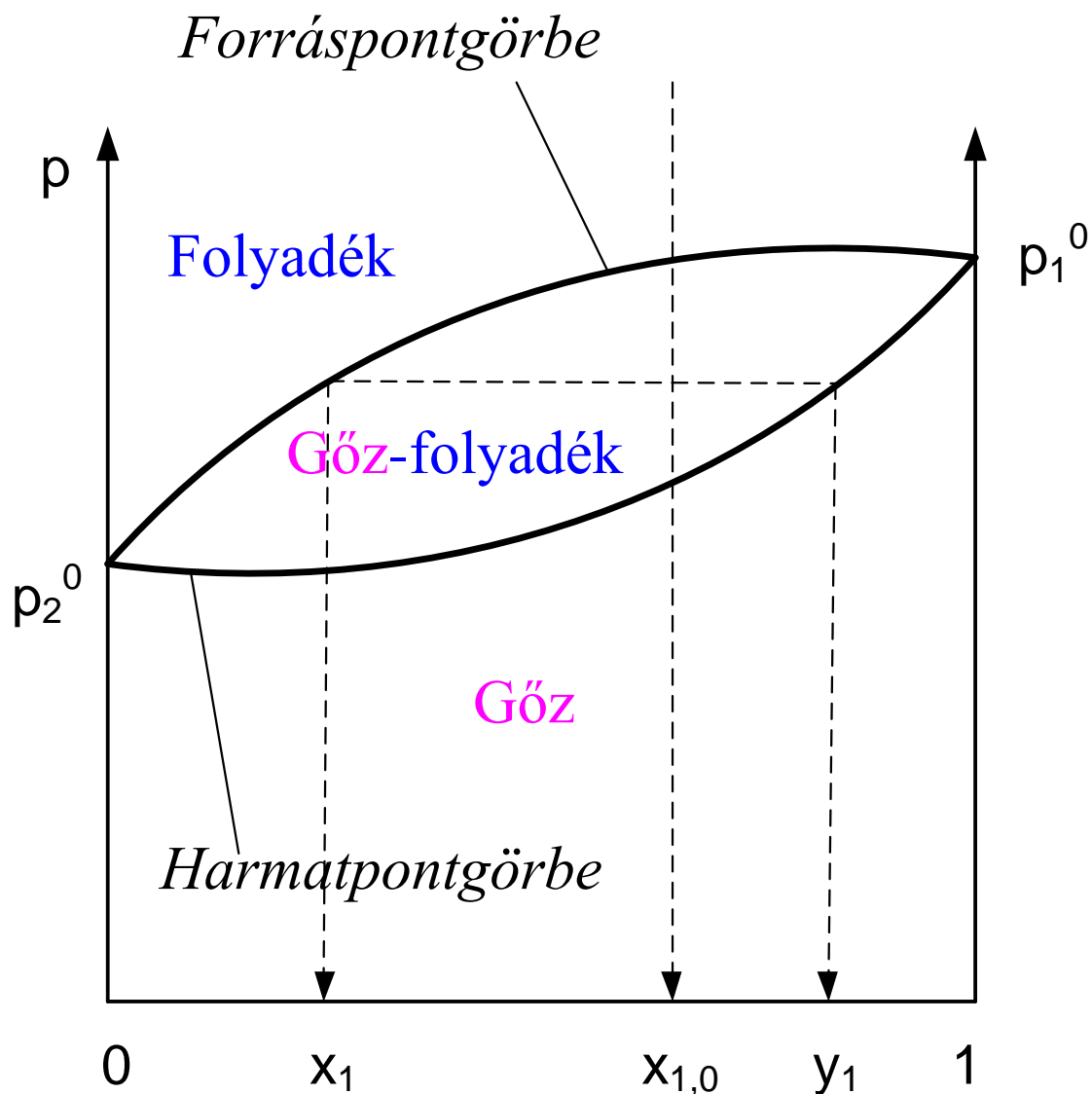


**6. ábra** Ideális elegy p-x diagramja.

Hasonló összefüggés írható fel az ideális elegyek szublimációs gőznyomásra, olvadáspontjára, stb. Ideális elegyként azonban csak a „rokon”, tulajdonságait, szerkezetét tekintve hasonló vegyületek viselkednek. Az ideálistól eltérő elegyeket valósnak vagy *reálisnak* nevezzük. A 7. ábra egy reális elegy p-x diagramja látható, amelyen feltüntettük gőzfázisbeli összetételt is. Folyadékfázisból kiindulva a nyomás csökkenésével az adott összetételhez tartozó forráspontig egyfázisú a rendszer. A forráspont és a harmatpont között kétfázisú a rendszer. A folyadékfázis összetételét a *forráspontgörbe*, a gőzfázis összetételét a *harmatpontgörbe* határozza meg, a két fázis arányát *emelő-szabállyal* határozhatjuk meg:

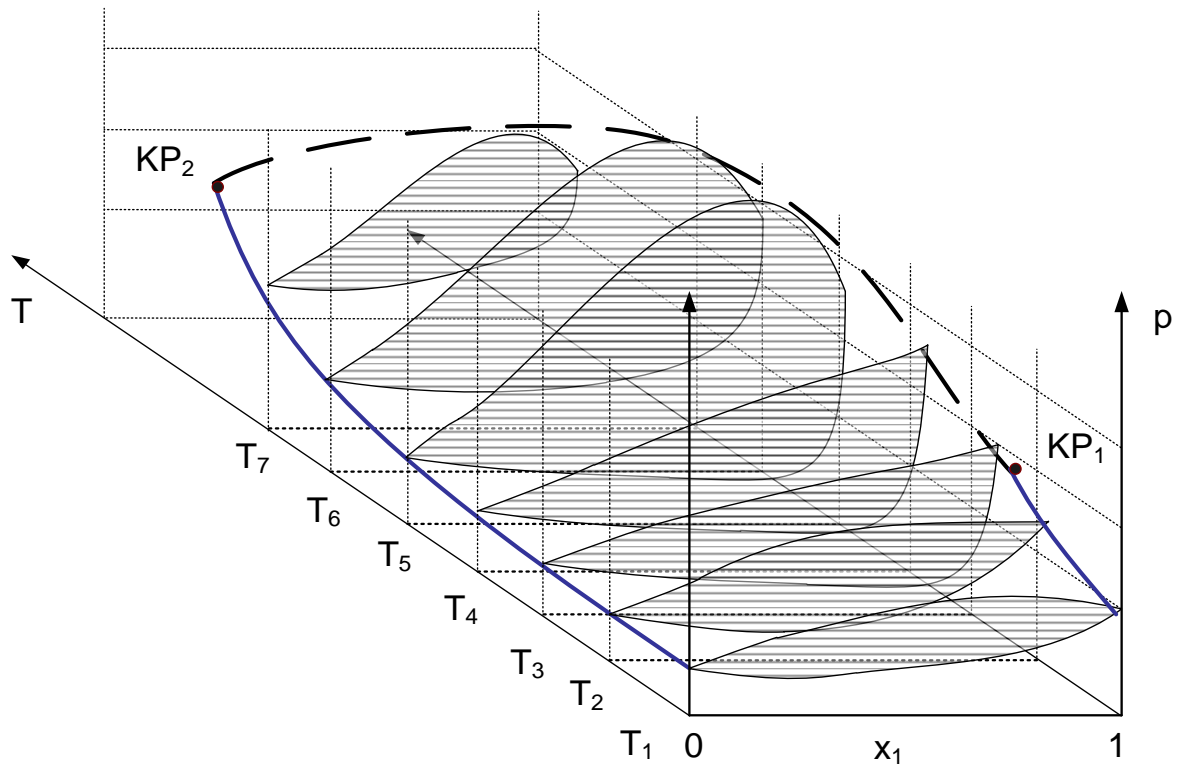


47. képlet.  $\frac{N_F}{N_G} = \frac{y_1 - x_{1,0}}{x_{1,0} - x_1}$



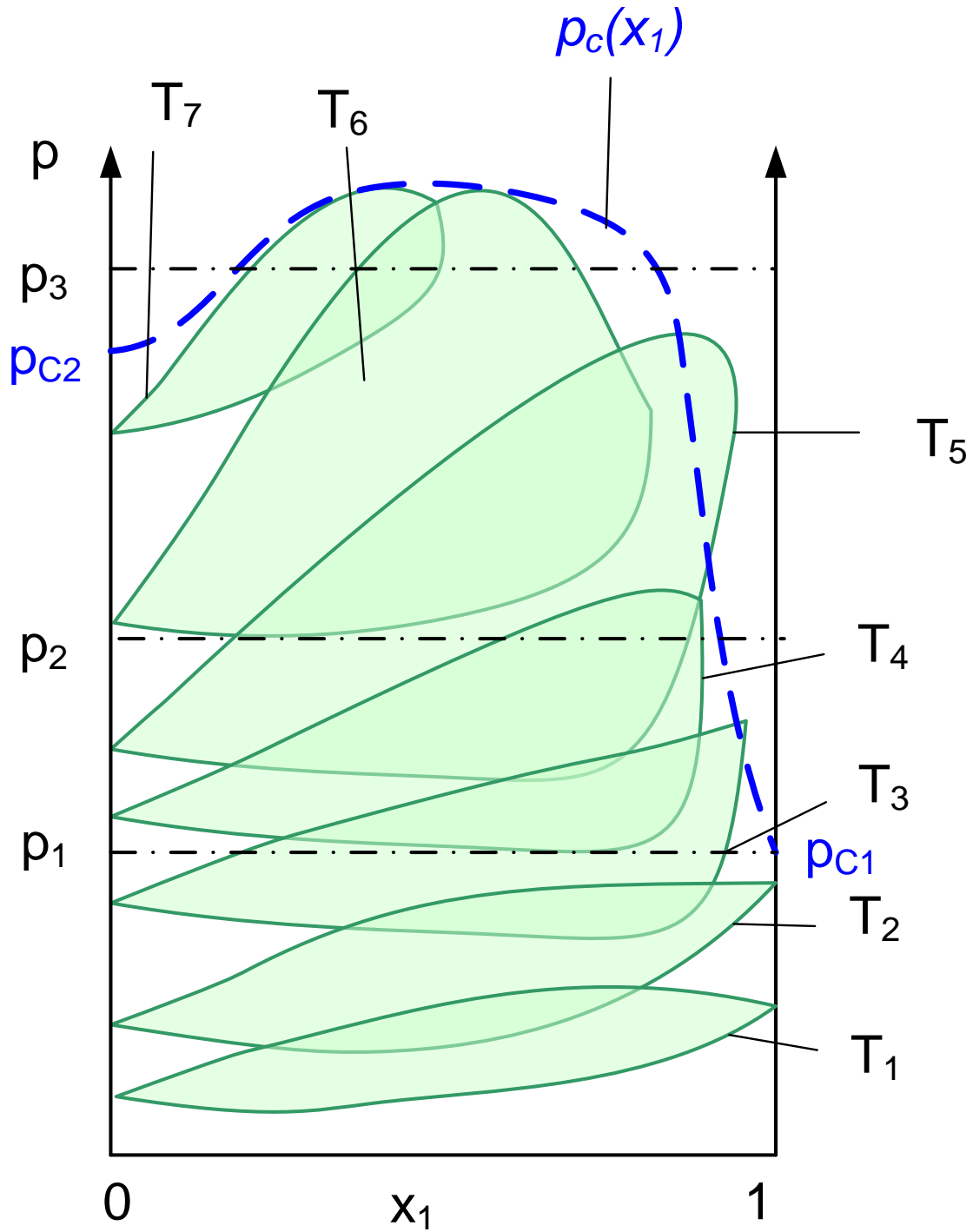
**7. ábra Reális elegy p-x diagramja.**

Biner (általában többkomponensű) elegyek kritikus pontja függ az összetételtől. A 8. ábra egy I. típusú reális elegy p-x-T fázisdiagramját ábrázolja. A kritikus pontokat szaggatott vonallal jelöltük. A 9. ábra és 10. ábra a p-x-T fázisdiagram állandó hőmérsékleten és állandó nyomáson vett metszetei. Az egyes metszetek hőmérséklet és nyomásviszonyai a következők:  $T_1 < T_2 < T_{c1} < T_3 < T_4 < T_5 < T_6 < T_7 < T_{c2}$ ;  $p_1 < p_{c1} < p_2 < p_{2c} < p_3$ . Viselkedésük (p-T diagram, 11. ábra) alapján 7 csoportba sorolhatók a biner elegyek ezek közül az itt bemutatott, I. típusú rendszer a „legegyszerűbb”.

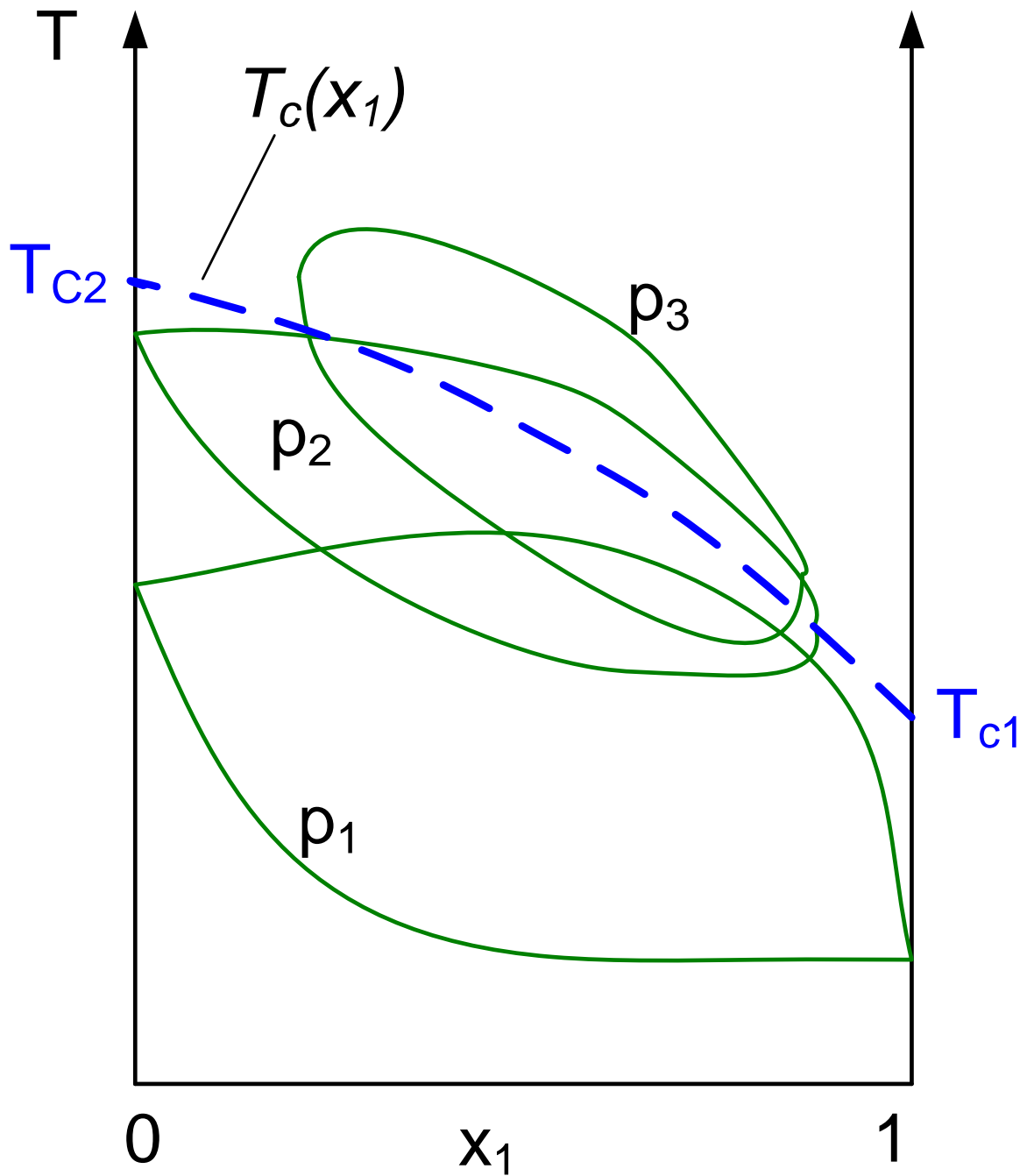


**8. ábra** *Reális elegy  $p$ - $x$ - $T$  fázisdiagramja.*

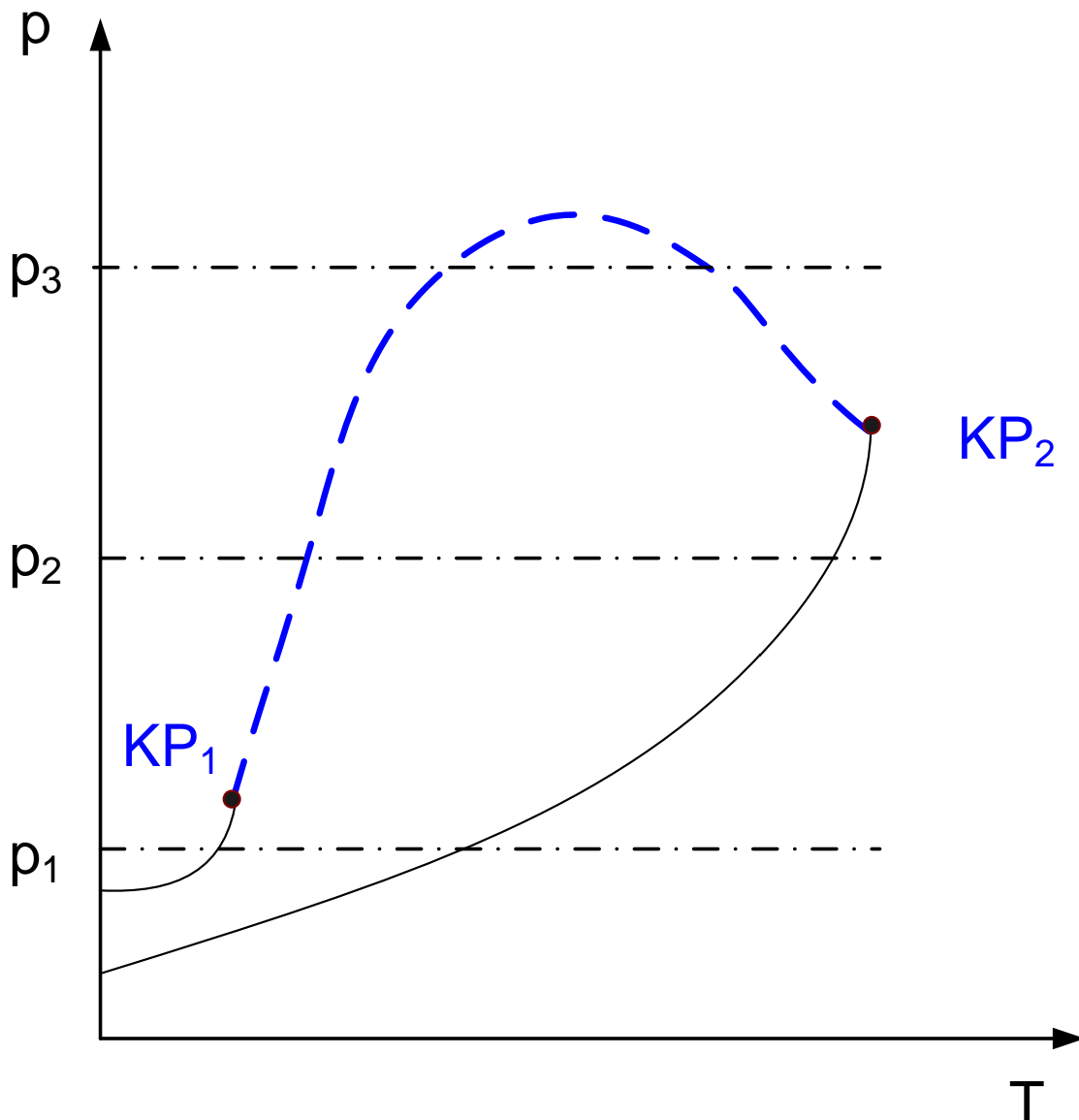
Szilárd fázisban korlátlanul elegyedő rendszerek szublimációs és oladási görbéje a 7. ábra hasonló. A korlátozottan, vagy egymással nem elegyedő rendszerekre itt nem térünk ki.



9. ábra Reális elegy  $p$ - $x$  diagramja.



10. ábra Reális elegy  $T$ - $x$  diagramja.



11. ábra Reális elegy  $p$ - $T$  diagramja.

## Extenzív mennyiségek áramai, hajtóerői

Extenzív mennyiségek azok, amelyek függenek a rendszer méretétől, avval egyenesen arányosak. Ilyen mennyiség a térfogat, a tömeg, a belső energia, az entalpia, az entrópia, az impulzus, stb. Extenzív mennyiségek árama alatt ezen mennyiségek térbeli elmozdulását, egy adott felületen időegység alatt áthaladt mennyiségét értjük.

48. képlet.  $I_{\Psi} = \frac{\partial \Psi}{\partial t}$

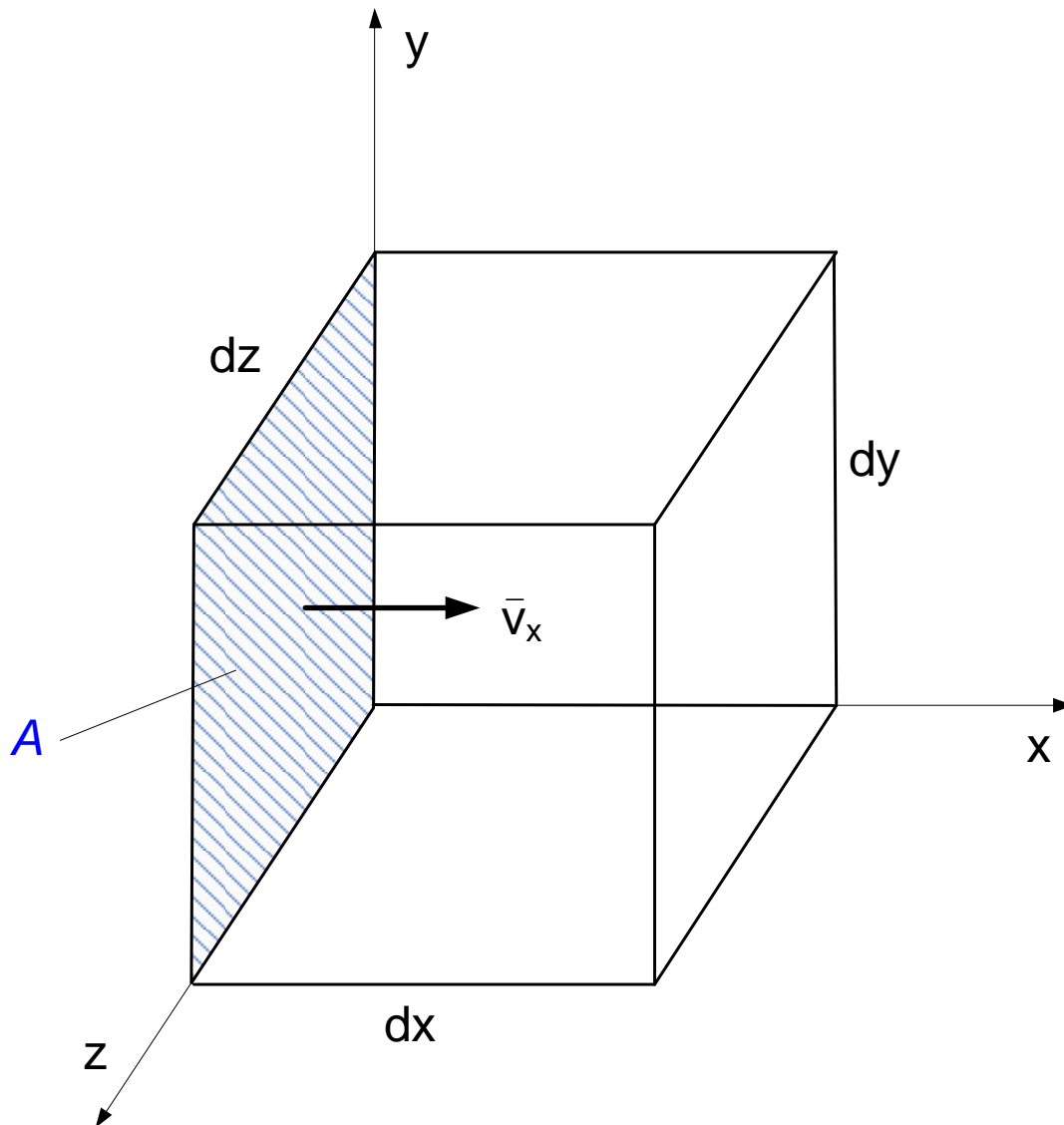
Az áram tehát egy [extenzív mennyiség]\*[idő]<sup>-1</sup> dimenziójú, skalár mennyiség. Bizonyos esetekben az áram mellett az *áramsűrűséget* használják, ami nem más, mint az áramlás irányára merőleges egységnyi felületen áthaladó áram. Az áramsűrűség tehát vektoriális mennyiség, dimenziója: [extenzív mennyiség]\* $T^{-1}$ \* $L^{-2}$ .

**49. képlet.**  $\bar{j}_\Psi = \frac{1}{A} \frac{\partial \Psi}{\partial t}$

Mechanizmusa alapján az extenzív mennyiségek transzportja az alábbi három folyamat valamelyikébe sorolható: *konvekció, vezetés és átadás.*

### Konvektív áram

Az extenzív mennyiségek nem csak arányosak a tömeggel, de az áramló fluidumokkal együtt, a tömeghez „kötötten” vándorolnak a rendszerben. Tekintsünk egy  $dx \, dy \, dz$  élhosszúságú kockával körülhatárolt térfogatelemet, amely az  $x$  tengellyel párhuzamosan halad  $dt$  idő alatt  $dx$  távolságot megtéve.



**12. ábra Konvektív áram.**

Tudjuk, hogy az intenzív állapotjelzők az extenzív állapotjelzők sűrűségeként is megadhatók:

**50. képlet.**  $\Gamma = \frac{d\Psi}{dV}$

Az A felületen keresztülhaladó extenzív mennyiség:

**51. képlet.**  $I_{\Psi,x} = \frac{\Gamma dV}{dt}$

Az A felületre merőleges áramsűrűség a megfelelő intenzív állapotjelző és a sebesség A felületre merőleges komponensének szorzata:

**52. képlet.**  $\vec{j}_{\Psi,x} = \frac{I_{\Psi,x}}{A} = \frac{\Gamma}{dy dz dt} dx dy dz = \Gamma \vec{v}_x$

Általános alakja:

**53. képlet.**  $\vec{j}_{konv.} = \Gamma \vec{v}$

Konvektív tömeg áramsűrűség:

**54. képlet.**  $\vec{j}_{m,konv.} = \rho \vec{v}$

Konvektív komponens áramsűrűség:

**55. képlet.**  $\vec{j}_{i,konv.} = c_i \vec{v}$

Konvektív hő áramsűrűség:

**56. képlet.**  $\vec{j}_{q,konv.} = \rho c_p T \vec{v}$

Konvektív impulzus áramsűrűség:

**57. képlet.**  $\vec{j}_{imp,konv.} = \rho \vec{v} \circ \vec{v} = \rho \begin{bmatrix} v_x v_x & v_x v_y & v_x v_z \\ v_y v_x & v_y v_y & v_y v_z \\ v_z v_x & v_z v_y & v_z v_z \end{bmatrix}$

## Vezetéses áram

A konvektív árammal ellentétben a vezetéses vagy *konduktív* áramot nem külső behatás hozza létre, hanem a fázis inhomogén volta. Ha a tér két pontján a közeg valamely intenzív tulajdonsága eltér, a rendszerben olyan spontán folyamat indul el, amely a különbség megszüntetésével növelik a rendszer entrópiáját. Ez a folyamat az intenzív tulajdonságból származtatott extenzív mennyiség áramát jelenti, amely arányos az intenzív tulajdonság különbségével, azaz a hajtóerővel, iránya pedig megegyezik az intenzív állapotjelző gradiensének irányával.

A vezetéssel áramsűrűséget a fenomenológiai egyenletek írják le:

$$58. \text{ képlet. } \vec{j}_{kond.} = -\delta \text{ grad } \Gamma$$

A műveleti egységek leírásához szükséges extenzív mennyiségek: a komponens, a hő és az impulzus vezetéssel áramai a következő alakba írhatók fel:  
Komponensvezetés vagy diffúzió:

$$59. \text{ képlet. } \vec{j}_{i,kond.} = -D_i \text{ grad } c_i = -D_i \left\{ \frac{\partial c_i}{\partial x} \quad \frac{\partial c_i}{\partial y} \quad \frac{\partial c_i}{\partial z} \right\}$$

A 59. képlet. egyenlet egydimenziós alakja a Fick I. törvény:

$$60. \text{ képlet. } \vec{j}_{i,kond.} = -D_i \frac{\partial c_i}{\partial x}$$

ahol  $D_i$  az  $i$ -edik komponens diffúziós állandója [m<sup>2</sup>/s]. A negatív előjel azt fejezi ki, hogy a diffúzió a nagyobb koncentrációjú hely felől a kisebb koncentrációjú hely felé viszi az anyagot.

Hővezetés:

$$61. \text{ képlet. } \vec{j}_{q,kond.} = -a \text{ grad } (\rho c_p T) = -a \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (\rho c_p T) \quad \frac{\partial}{\partial y} (\rho c_p T) \quad \frac{\partial}{\partial z} (\rho c_p T) \right\}$$

ahol  $a$  a hőmérséklet-vezetési együttható [m<sup>2</sup>/s]. Mivel  $\rho c_p$  kis hőmérséklettartományban állandónak tekinthető, kiemelhetjük:

$$62. \text{ képlet. } \vec{j}_{q,kond.} = -a \rho c_p \text{ grad } T = -\lambda \text{ grad } T$$

ahol  $\lambda$  a hővezetési tényező [J/msK]. A 62. képlet. egyenlet egydimenziós alakja a Fourier I. törvény:

$$63. \text{ képlet. } \vec{j}_{q,kond.} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}$$

Impulzus áramsűrűség:

$$64. \text{ képlet. } \vec{j}_{imp,kond.} = -\nu \text{ Grad } (\rho \vec{v})$$

ahol  $\nu$  a kinematikai viszkozitás [m<sup>2</sup>/s]. Állandó sűrűségű fluidum esetén  $\rho$  kiemelhető.

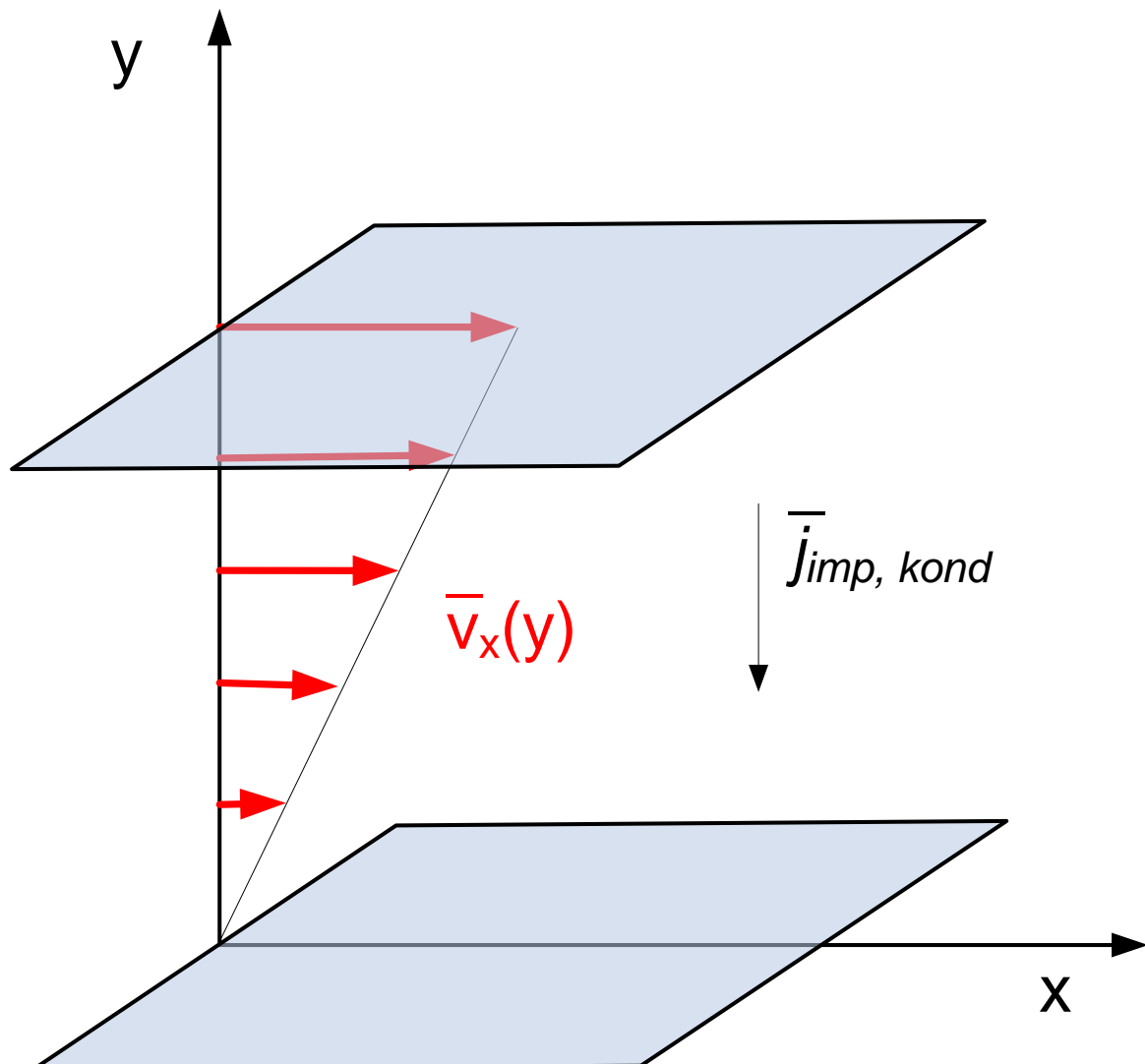


65. képlet.  $\vec{J}_{imp,kond.} = -\nu \rho \text{Grad } \vec{v} = -\eta \text{Grad } \vec{v} = -\eta \begin{Bmatrix} \frac{\partial v_x}{\partial x} & \frac{\partial v_x}{\partial y} & \frac{\partial v_x}{\partial z} \\ \frac{\partial v_y}{\partial x} & \frac{\partial v_y}{\partial y} & \frac{\partial v_y}{\partial z} \\ \frac{\partial v_z}{\partial x} & \frac{\partial v_z}{\partial y} & \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{Bmatrix}$

ahol  $\eta$  a dinamikai viszkozitás [kg/ms].

Newton súrlódási törvénye szerint egy áramló fluidum áramlásra merőleges irányú impulzusáram sűrűsége a nyíró,- vagy csúsztatófeszültség ( $\tau$ ):

66. képlet.  $\vec{J}_{imp,kond.}^{x,y} = \tau = -\nu \frac{\partial \rho \vec{v}_x}{\partial y} = -\eta \frac{\partial \vec{v}_x}{\partial y}$



13. ábra Nyírófeszültség.

A negatív előjel itt is azt jelenti, hogy a nagyobb sebességű rétegből adódik át impulzus a kisebb sebességűbe.

## Átadási áram

Több vegyipari művelet épül egymással nem, vagy csak korlátozottan elegyedő fázisok érintkeztetésére. Az eddig tárgyalt konvektív és vezetési áram csak a fázisok határán belül érvényes. A fázisok határán az intenzív tulajdonságokat leíró függvényeknek törése, vagy szakadása van, így nem differenciálhatók.

A fázisok közötti komponens,- hő- és impulzus transzport egy harmadik mechanizmussal, az úgynevezett *átadással* megy végbe. Az átadási áram arányos az átadási felülettel, a hajtóerővel és egy arányossági tényezővel:

**67. képlet.**  $I_{\text{átadás}} = A \cdot \varepsilon \cdot \Delta \Gamma$

ahol  $\varepsilon$  az átadási tényező,  $\Delta \Gamma$  a hajtóerő. Az átadási áram iránya mindig merőleges az átadási felületre, iránya a nagyobb  $\Gamma$  felől a kisebb felé mutat.

Az átadás mechanizmusát leíró modellek közül a legismertebb a *kétfilmelméletet*, amelynek az alapjait Lewis és Withman dolgozták ki 1924-ben. A modell több egyszerűsítő feltételt tesz. Az egyszerűsítő feltételek gáz-folyadékfázis közötti komponensátadásra megfogalmazva a következők:

1. A két fázis határán mindkét oldalon egy-egy film alakul ki. A film laminárisan áramlik, benne a komponensek diffúzióval mozognak.
2. Az átadás stacionárius, a filmben nincs felhalmozódás.

**68. képlet.**  $\left(\frac{\partial c}{\partial t}\right)_{\text{Film}} = 0$

A koncentráció a határfelülettel párhuzamos de az áramlás irányára merőleges irányban nem változik a két filmben.

**69. képlet.**  $\left(\frac{\partial c}{\partial y}\right)_{\text{Film}} = 0$

3. A fázisok belseje tökéletesen kevert. A megoszló komponens konvekcióval jut el a filmig.

**70. képlet.**  $\left(\frac{\partial c}{\partial x}\right)_{\text{Fázis}} = 0$

4. A fázishatáron a folyadék és a gázkoncentráció egymással egyensúlyban vannak.

**71. képlet.**  $c_F^* = HRT c_G^* = H' c_G^*$

5. A Henry-törvény érvényes.

$$72. \text{ képlet. } c_{SF} = H' c_G$$

6. Kémiai reakció nem játszódik le.

Stacioner állapotban a komponens áramsűrűség azonos a két fázisban és a két filmben.

$$73. \text{ képlet. } \vec{J}_{\text{átadás}} = \vec{J}_{\text{konv.}}^G = \vec{J}_{\text{kond.}}^G = \vec{J}_{\text{kond.}}^F = \vec{J}_{\text{konv.}}^F$$

$$74. \text{ képlet. } \vec{J}_{\text{kond.}}^G = D_G \frac{c_G - c_G^*}{\delta_G} = \beta_{gG} (c_G - c_G^*)$$

$$75. \text{ képlet. } \vec{J}_{\text{kond.}}^F = D_F \frac{c_F^* - c_F}{\delta_F} = \beta_{fF} (c_F^* - c_F)$$

ahol  $\beta_{gG}$  a gázoldali koncentrációval kifejezett gázoldali komponensátadási tényező,  $\beta_{fF}$  ennek folyadékoldali megfelelője. A határfelületre jellemző  $c_G^*$  és  $c_F^*$  gyakorlatban nem mérhető mennyiségek, ezért helyettük a másik fázissal egyensúlyban lévő  $c_{SG}$  és  $c_{SF}$  koncentrációkat használjuk:

$$76. \text{ képlet. } \vec{J}_{\text{kond.}}^G = \beta_G (c_G - c_{SG})$$

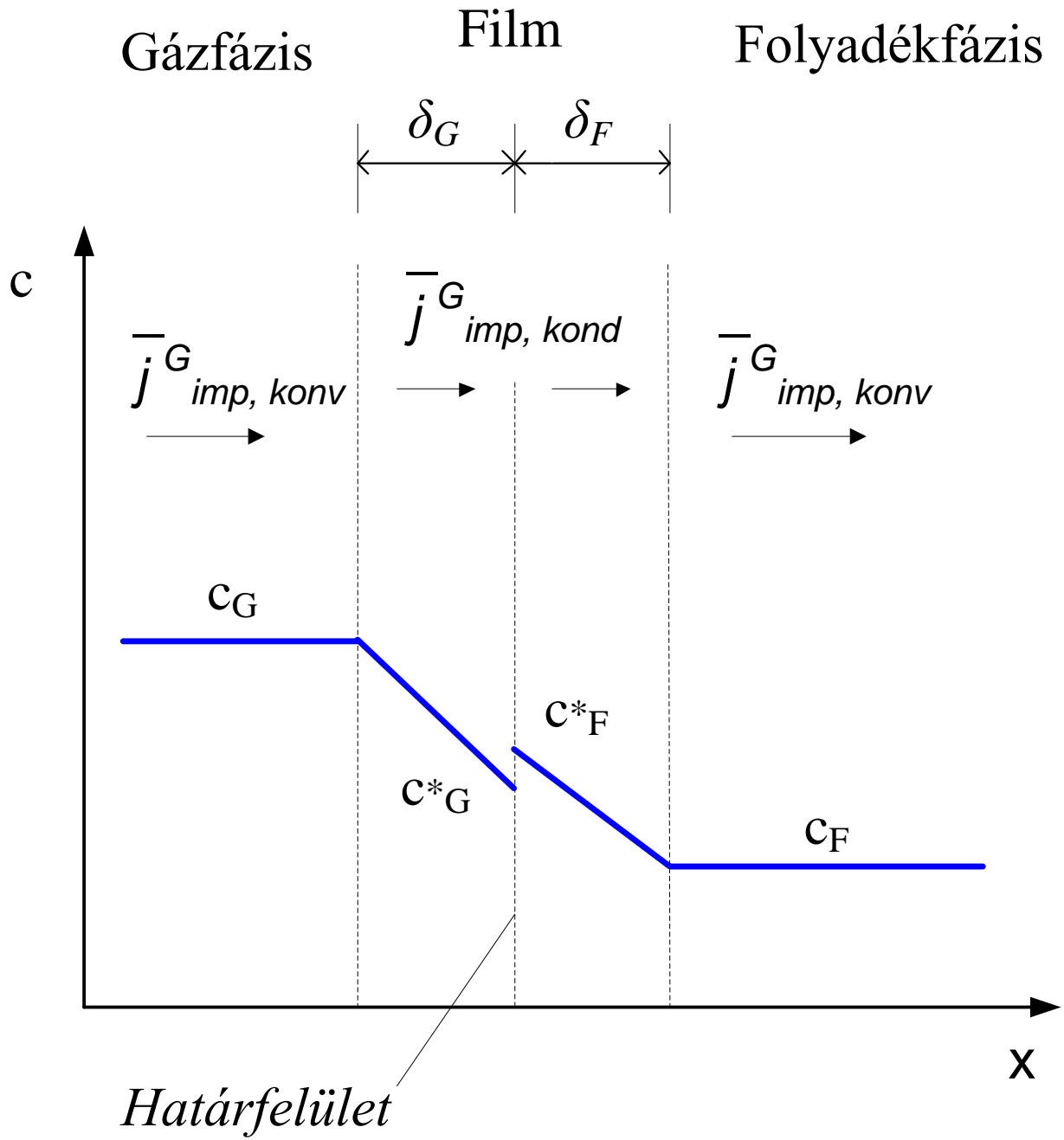
$$77. \text{ képlet. } \vec{J}_{\text{kond.}}^F = \beta_F (c_{SF} - c_F)$$

ahol  $\beta_G$  a gázoldali,  $\beta_F$  a folyadékoldali teljes átadási tényező:

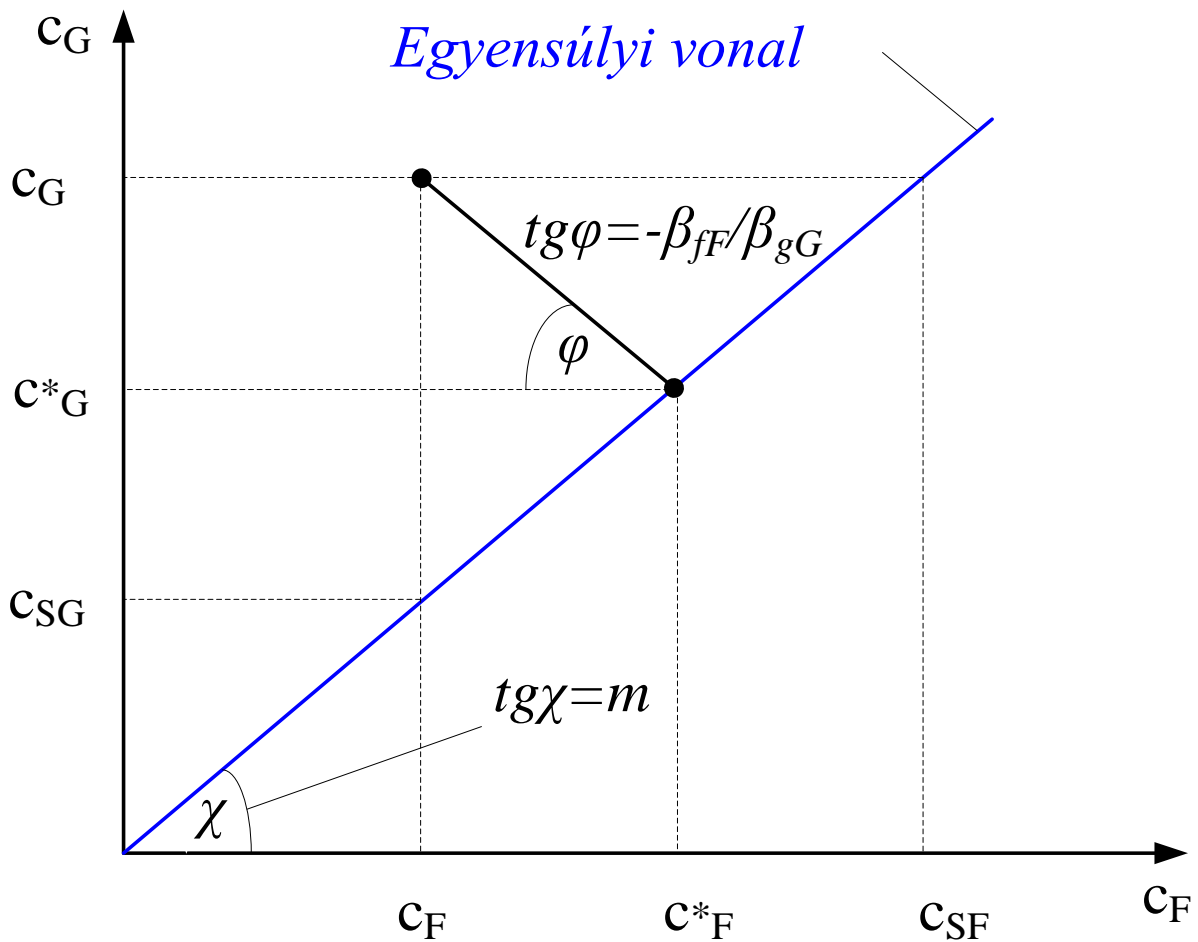
$$78. \text{ képlet. } \frac{1}{\beta_G} = \frac{1}{\beta_{gG}} + \frac{m}{\beta_{fF}}$$

$$79. \text{ képlet. } \frac{1}{\beta_F} = \frac{1}{\beta_{fF}} + \frac{1}{m\beta_{gG}}$$

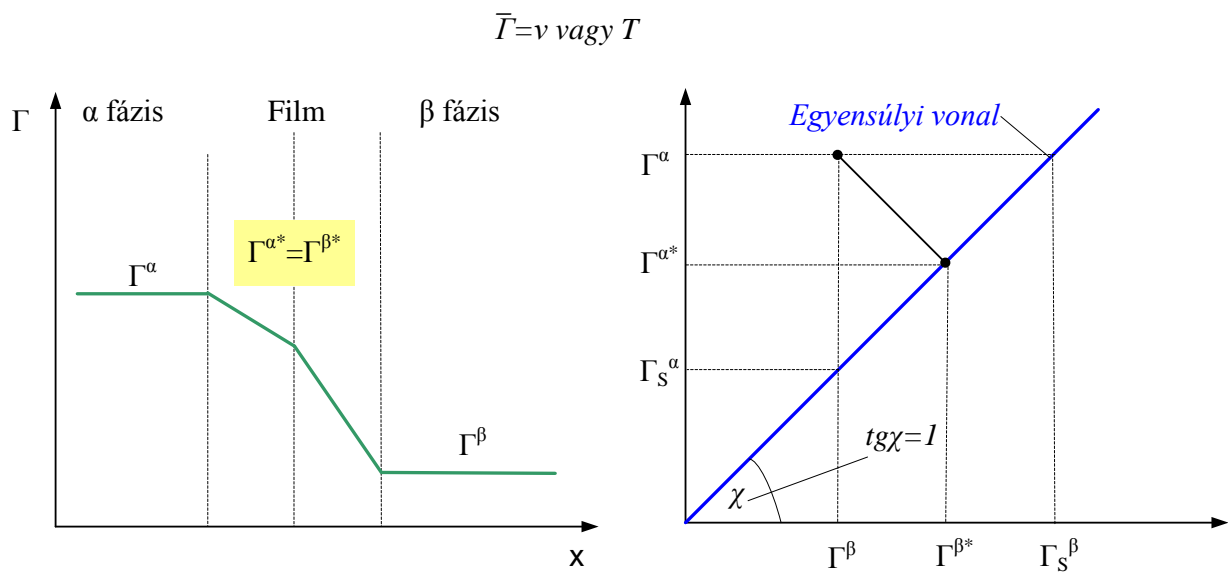
Hő,- és impulzusátadásnál a hajtóerő a fázisok közötti hőmérséklet ill. sebességkülönbség ( $m=1$ ,  $\Gamma^{\alpha*} = \Gamma^{\beta*}$ ).



14. ábra Kétfilmelmélet



15. ábra Koncentrációviszonyok a kétfilmelmélet szerint.



16. ábra Kétfilmelmélet hő- és impulzusátadásra.

Komponensátadás:

$$80. \text{ képlet. } \vec{j}_{i, \text{átadás}} = \beta^\alpha (c_i^\alpha - c_{iS}^\alpha) = \beta^\beta (c_{iS}^\beta - c_i^\beta)$$

Hőátadás:

$$81. \text{ képlet. } \vec{j}_{q, \text{átadás}} = \alpha (T^\alpha - T^\beta)$$

Impulzusátadás:

$$82. \text{ képlet. } \vec{j}_{imp, \text{átadás}} = \gamma (\vec{v}^\alpha - \vec{v}^\beta)$$

ahol  $\beta$  a komponensátadási tényező [m/s],  $\alpha$  a hőátadási tényező [J/m<sup>2</sup>sK] és  $\gamma$  az impulzusátadási tényező [kg/m<sup>2</sup>s].

Az eddig tárgyalt mennyiségeket, azok áramát, sűrűségét és áramsűrűségét az 5. táblázat foglaltuk össze.

5. táblázat. Konvektív, vezetési és átadási áram összefoglaló táblázata.

	Mennyiség g	Mennyiség		Áramsűrűség		
		Árama	Sűrűség e	Konvektív v	Vezetés	Átadás
Általános	$\Psi$	$I_\Psi = \frac{\Psi}{t}$	$\Gamma = \frac{\Psi}{V}$	$\Gamma \vec{v}$	$-\delta \text{ grad } \Gamma$	$\varepsilon \Delta \Gamma$
Tömeg	$m$	$I_m = \frac{m}{t}$	$\rho = \frac{m}{V}$	$\rho \vec{v}$	$-D \text{ grad } \rho$	$\beta' \Delta \rho$
Komponen- s	$n_i = \frac{m_i}{M_i}$	$I_i = \frac{n_i}{t}$	$c_i = \frac{n_i}{V}$	$c_i \vec{v}$	$-D_i \text{ grad } c_i$	$\beta^\varphi (c_i^\varphi - c_{iS}^\varphi)$
Hő (entalpia)	$Q = mc_p T$	$I_q = \frac{mc_p T}{t}$	$\rho c_p T$	$\rho c_p T \vec{v}$	$-a \text{ grad } (\rho c_p T)$ $-\lambda \text{ grad } T$	$\alpha (T^\alpha - T^\beta)$
Impulzus	$\vec{I} = m\vec{v}$	$\vec{I}_{imp} = \frac{m\vec{v}}{t}$	$\rho \vec{v}$	$\rho \vec{v} \circ \vec{v}$	$-\nu \text{ Grad } (\rho \vec{v})$ $-\eta \text{ Grad } \vec{v}$	$\gamma (\vec{v}^\alpha - \vec{v}^\beta)$

## Megmaradási tételek áramló rendszerekben

Egy műveleti egység leírásához az intenzív állapotjelzők hely és időfüggését, valamint a rendszer egy extenzív tulajdonságát kell megadnunk. Bármely intenzív állapotjelző térbeli és időbeli változása leírható a hozzá kapcsolódó extenzív mennyiség mozgásával, felhalmozódásával, keletkezésével vagy eltűnésével.

$$83. \text{ képlet. } \text{belépő mennyiség} - \text{kilépő mennyiség} + \text{keletkezés} - \text{eltűnés} = \text{felhalmozódás}$$

Ezen összefüggések analitikus leírását összefoglalóan *mérlegegyenleteknek* nevezzük.

Bizonyos extenzív mennyiségekre *megmaradási törvények* írhatók fel, ami azt jelenti, hogy az adott mennyiség nem tűnik el, és nem keletkezik. Ilyen *megmaradó mennyiség* például a tömeg, az energia vagy az elektromos töltés. A megmaradó mennyiségekre felírható mérlegegyenlet a következő alakra egyszerűsödik:

**84. képlet.** *belépő mennyiség - kilépő mennyiség = felhalmozódás*

A *tömegmegmaradás törvényének* értelmében a belépő és a kilépő tömegáram különbsége növeli, vagy csökkenti a térfogatelem tömegét.

Analóg módon értelmezhető az *energiamegmaradás törvénye* is, az energiának azonban számos megjelenési formája van, amelyek közül több (pl.: potenciális, kinetikus, elektromos energia, munkavégzés) elhanyagolható. A hő-mérleg felírásánál gyakorlatban megelégszünk az entalpiával és a hő-árammal.

Attól függően, hogy egy jól-definiált felülettel körülvett véges térfogatra, vagy egy infinitézimálisan kis térfogatra (és/vagy infinitézimálisan rövid időre) írjuk fel, megkülönböztetünk *integrális* (globális) és *differenciális* (lokális) *mérlegegyenletet*. Integrális mérlegegyenlet írható fel például egy műveleti egység ki és belépő áramaira, vagy egy technológiára. Extenzív mennyiségek integrális mérlege a következő általános egyenlettel írható le:

$$85. \text{ képlet. } \oint_{\Omega} (\vec{j}_{\Gamma, \text{konv}} + \vec{j}_{\Gamma, \text{kond}}) d\vec{\Omega} + \int_V G dV = - \frac{\partial}{\partial t} \int_V \Gamma dV$$

A differenciális alak a készülék egy pontjára, egy végtelenül kicsi térfogatelemére (vagy időintervallumra) vonatkozik.

A mérlegegyenlet felírásakor két lehetőség közül választhatunk:

- a fluidummal együtt mozgunk, azaz a fluidumhoz rögzített koordinátarendszert használunk. Ez a *Lagrange-féle tárgyalásmód*.
- vagy helyhez kötött koordinátarendszert használunk és az adott térfogatelem állapotjelzőit határozzuk meg az idő függvényében figyelmen kívül hagyva azt a tényt, hogy a fluidumot alkotó molekulák folyamatosan be és kilépnek a kontrollfelületen. Ez az *Euler-féle tárgyalásmód*, amit mi is használni fogunk.

A 17. ábra egy egyfázisú műveleti egység egy adott pontján áthaladó extenzív mennyiségek áramát ábrázolja. Az egyszerűség kedvéért egy derékszögű koordinátarendszerbe felvett  $dx$   $dy$   $dz$  élhosszúságú kockával körülhatárolt térfogatelemre írjuk fel az általános mérlegegyenletet, de bármilyen szabálytalan térfogatelemre igaz az összefüggés.

Minden tagot figyelembe véve az alábbi egyenlet írható fel:

$$86. \text{ képlet. } A \frac{\partial \Gamma_{v_x}}{\partial x} dx + A \frac{\partial \Gamma_{v_y}}{\partial y} dy + A \frac{\partial \Gamma_{v_z}}{\partial z} dz - \delta A \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial x^2} dx - \delta A \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial y^2} dy - \delta A \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial z^2} dz + VG = -V \frac{\partial \Gamma}{\partial t}$$

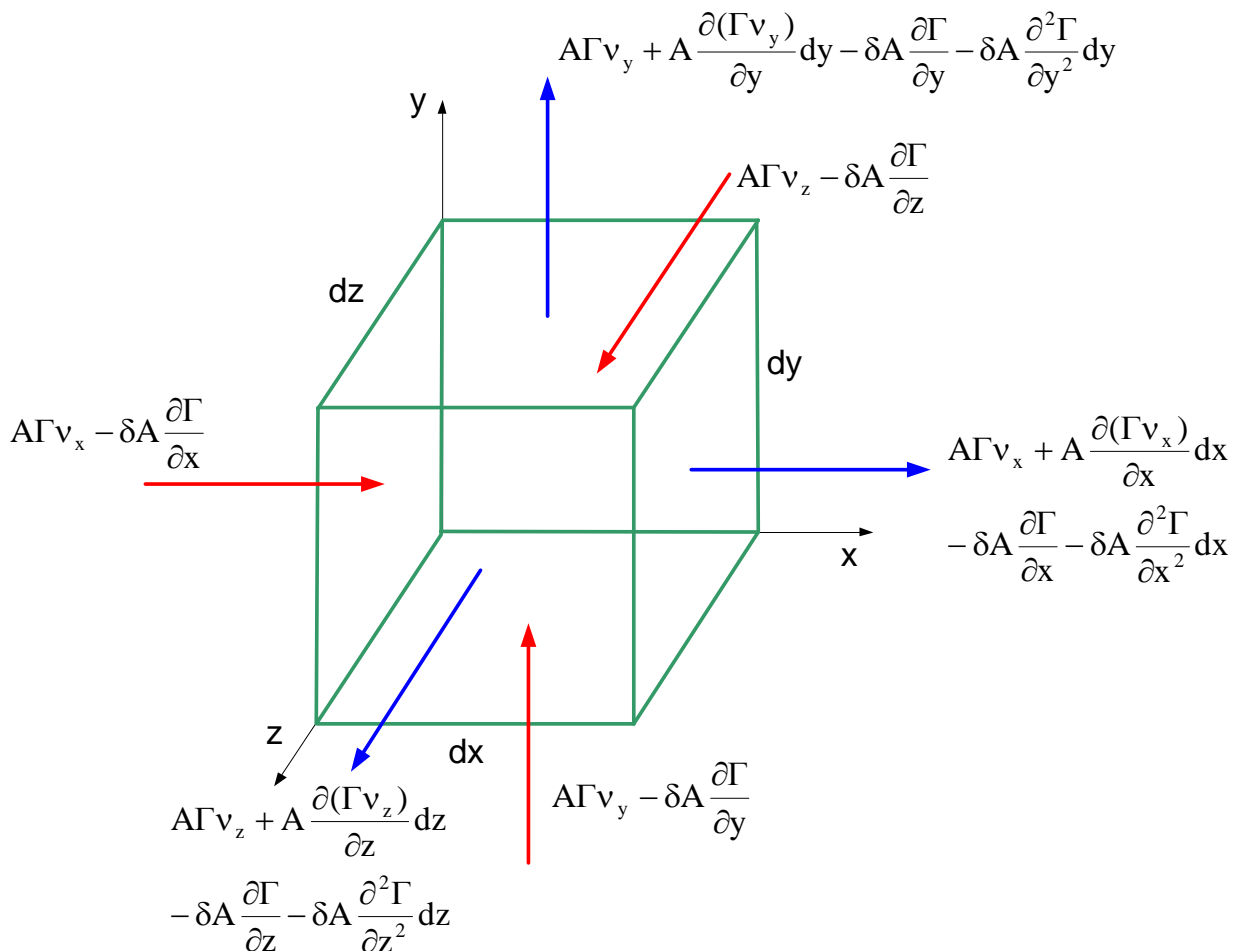
Egyszerűsítés után:

$$87. \text{ képlet. } \frac{\partial \Gamma_{v_x}}{\partial x} + \frac{\partial \Gamma_{v_y}}{\partial y} + \frac{\partial \Gamma_{v_z}}{\partial z} - \delta \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial x^2} - \delta \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial y^2} - \delta \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial z^2} + G = - \frac{\partial \Gamma}{\partial t}$$

**88. képlet.**  $div(\Gamma \vec{v}) - div(\delta grad \Gamma) + G = -\frac{\partial \Gamma}{\partial t}$

A fenti egyenlet a *Damköhler-egyenlet* általános alakja. Az egyes tagok jelentése:

$div(\Gamma \vec{v})$	<i>konvekció</i>
$div(\delta grad \Gamma)$	<i>vezetés</i>
$G$	<i>forrás/nyelő</i>
$\frac{\partial \Gamma}{\partial t}$	<i>lokális megváltozás</i>



17. ábra *Differenciális mérleg egyfázisú rendszerben.*

## Tömeg-mérlegegyenlet

A tömegmegmaradás törvény kimondja, hogy az anyag (fluidum) nem tűnik el, és nem keletkezik ezért nincs se forrása, se nyelője. A teljes tömegmérleg felírásakor figyelmen kívül hagyható a vezetéses tag, és többfázisú rendszer esetén az átadási tag is, mert ezekkel a komponens-mérlegegyenletben számolunk el és a fő tömeg



konvektív áramához képest elhanyagolhatók. Így a teljes tömegmérleg csak a konvektív áramot és a lokális megváltozást tartalmazza:

$$89. \text{ képlet. } \operatorname{div}(\rho \vec{v}) = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$$

$$90. \text{ képlet. } \rho \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + v_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + v_y \frac{\partial \rho}{\partial y} + v_z \frac{\partial \rho}{\partial z} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$$

A fenti egyenletet  *folytonossági tétel*nek is nevezik.

Ha az áramlás stacioner, az egyenlet jobb oldala, a lokális változás nulla lesz:

$$91. \text{ képlet. } \operatorname{div}(\rho \vec{v}) = \rho \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + v_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + v_y \frac{\partial \rho}{\partial y} + v_z \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0$$

A tömeg-mérlegegyenlet tovább egyszerűsödik, ha a közeg sűrűsége állandó (a vizsgált térfogatelemen belül nincs nyomás vagy hőmérsékletváltozás, illetve a nyomásváltozás megengedett, ha a fluidum összenyomhatatlan). Ekkor a sűrűség parciális deriváltjai rendre nullát adnak és az egyenlet  $\rho$ -val egyszerűsíthető.

$$92. \text{ képlet. } \operatorname{div} \vec{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

## Komponens-mérlegegyenlet

A teljes tömeg-mérlegegyenlet mellett a műveleti egység modellezéséhez, vagy megtervezéséhez a komponensekre egyenként is fel kell írunk a mérlegegyenletet. Mivel kémiai reakció révén a komponensek egymásba átalakulhatnak, a mérlegegyenletben szerepel a forrás tag.

$$93. \text{ képlet. } \operatorname{div}(c_i \vec{v}) - \operatorname{div}(D_i \operatorname{grad} c_i) + G_i = -\frac{\partial c_i}{\partial t}$$

$$94. \text{ képlet. } G_i = \sum_j v_{ij} r_j$$

ahol  $r_j$  a  $j$ -edik reakcióra jellemző *reakciósebesség* (mol/m<sup>3</sup>s).  $v_{ij}$  az  $i$ -edik komponens  $j$ -edik reakcióra vonatkozó *sztoichiometriai állandója*.  $v_{ij}$  reagensekre pozitív, reakciótermékekre negatív egész vagy tört szám lehet az egyenlet felírásától függően. Ha a fluidum két fázisból tevődik össze a komponens-mérlegegyenlet mindkét fázisra fel kell írunk.

$$95. \text{ képlet. } Vu^\alpha \operatorname{div}(c_i^\alpha \vec{v}^\alpha) - Vu^\alpha \operatorname{div}(D_i^\alpha \operatorname{grad} c_i^\alpha) + V\omega\beta^\alpha (c_i^\alpha - c_{is}^\alpha) + Vu^\alpha G_i^\alpha = -Vu^\alpha \frac{\partial c_i^\alpha}{\partial t}$$

$$96. \text{ képlet. } Vu^\beta \operatorname{div}(c_i^\beta \vec{v}^\beta) - Vu^\beta \operatorname{div}(D_i^\beta \operatorname{grad} c_i^\beta) + V\omega\beta^\beta (c_i^\beta - c_{iS}^\beta) + Vu^\beta G_i^\beta = -Vu^\beta \frac{\partial c_i^\beta}{\partial t}$$

Egyszerűsítés után:

$$97. \text{ képlet. } \operatorname{div}(c_i^\alpha \vec{v}^\alpha) - \operatorname{div}(D_i^\alpha \operatorname{grad} c_i^\alpha) + \frac{1}{u^\alpha} \omega\beta^\alpha (c_i^\alpha - c_{iS}^\alpha) + G_i^\alpha = -\frac{\partial c_i^\alpha}{\partial t}$$

$$98. \text{ képlet. } \operatorname{div}(c_i^\beta \vec{v}^\beta) - \operatorname{div}(D_i^\beta \operatorname{grad} c_i^\beta) + \frac{1}{u^\beta} \omega\beta^\beta (c_i^\beta - c_{iS}^\beta) + G_i^\beta = -\frac{\partial c_i^\beta}{\partial t}$$

A 95. képlet.-98. képlet. egyenletek a Damköhler-egyenlet átadási taggal kibővített változata az ún. *Benedek-László mérlegegyenlet*. Az egyenletben szereplő  $u^\alpha$  és  $u^\beta$  az  $\alpha$  és a  $\beta$  fázis térfogatkitöltési hányadosa:

$$99. \text{ képlet. } u^\alpha = \frac{V_\alpha}{V} = 1 - u^\beta$$

A két fázis között az átadási áram jelenti a kapcsolatot.

$$100. \text{ képlet. } V\omega\beta^\alpha (c_i^\alpha - c_{iS}^\alpha) = -V\omega\beta^\beta (c_i^\beta - c_{iS}^\beta)$$

## Hő-mérlegegyenlet

A gyakorlatban használt hőmérleg az energiamérleg egy egyszerűsített változata, amely csak az entalpiát és a hőáramot veszi figyelembe. Az entalpia a hőmérséklet és a nyomás függvénye, az esetek többségében azonban figyelmen kívül hagyható a nyomás hatása, a hőmérsékletfüggést pedig az állandó nyomáson vett fajhővel ( $c_p$ ) fejezhetjük ki.

$$101. \text{ képlet. } \operatorname{div}(\rho c_p T \vec{v}) - \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + \frac{1}{u^\phi} \omega \alpha \Delta T + G_q = -\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t}$$

Az egyenletben szereplő átadási áram két fázis közötti, vagy a fluidum és a készülék fala közötti hőátadást jelenti ( $u^\phi=1$ ). A kémiai átalakulások (kémiai reakció, vagy fázisátalakulás ha globális hőmérleget írunk fel) során felszabaduló, vagy elvitt hő forrásként, vagy nyelőként jelenik meg ( $G_q$ ):

$$102. \text{ képlet. } G_q = \sum_j r_j \Delta H_{Rj}$$

## Impulzus-mérlegegyenlet

Az egyfázisú rendszer impulzusmérlege a következő formában írható fel:

$$103. \text{ képlet. } \operatorname{Div}(\rho \vec{v} \circ \vec{v}) - \operatorname{Div}(\eta \operatorname{Grad} \vec{v}) + G_{imp} = -\frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t}$$

Az egyenletben szereplő  $G_{imp}$  impulzusforrás a gyorsító erőt és a nyomásgradienst foglalja magában.

$$104. \text{ képlet. } G_{imp} = \operatorname{grad} p - \rho \vec{a}$$

A 104. képlet. egyenletet behelyettesítve a 103. képlet. egyenletbe az ún. Navier-Stokes egyenletet kapjuk:

$$105. \text{ képlet. } \frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} \rho v_x v_x \\ \rho v_y v_x \\ \rho v_z v_x \end{bmatrix} + \frac{\partial}{\partial y} \begin{bmatrix} \rho v_x v_y \\ \rho v_y v_y \\ \rho v_z v_y \end{bmatrix} + \frac{\partial}{\partial z} \begin{bmatrix} \rho v_x v_z \\ \rho v_y v_z \\ \rho v_z v_z \end{bmatrix} - \frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} \eta \frac{\partial v_x}{\partial x} \\ \eta \frac{\partial v_y}{\partial x} \\ \eta \frac{\partial v_z}{\partial x} \end{bmatrix} - \frac{\partial}{\partial y} \begin{bmatrix} \eta \frac{\partial v_x}{\partial y} \\ \eta \frac{\partial v_y}{\partial y} \\ \eta \frac{\partial v_z}{\partial y} \end{bmatrix} - \frac{\partial}{\partial z} \begin{bmatrix} \eta \frac{\partial v_x}{\partial z} \\ \eta \frac{\partial v_y}{\partial z} \\ \eta \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{\partial p}{\partial z} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \rho \cdot a_x \\ \rho \cdot a_y \\ \rho \cdot a_z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \rho v_x}{\partial t} \\ \frac{\partial \rho v_y}{\partial t} \\ \frac{\partial \rho v_z}{\partial t} \end{bmatrix}$$

Állandó sűrűség és viszkozitás (newtoni fluidum) mellett  $\rho$  és  $\eta$  kiemelhető. Ha nem hat más erőter csak a gravitáció,  $\vec{a}$  gyorsulás helyett számolhatunk a  $\vec{g}$  nehézségi gyorsulással. A Navier-Stokes egyenlet nabla operatorral felírt alakja:

$$106. \text{ képlet. } \vec{v} \nabla \vec{v} - \nu \nabla^2 \vec{v} + \frac{1}{\rho} \nabla p - \vec{g} = -\frac{\partial \vec{v}}{\partial t}$$

Heterogén rendszerek leírásánál az egyenlet kibővíthető az átadási taggal:

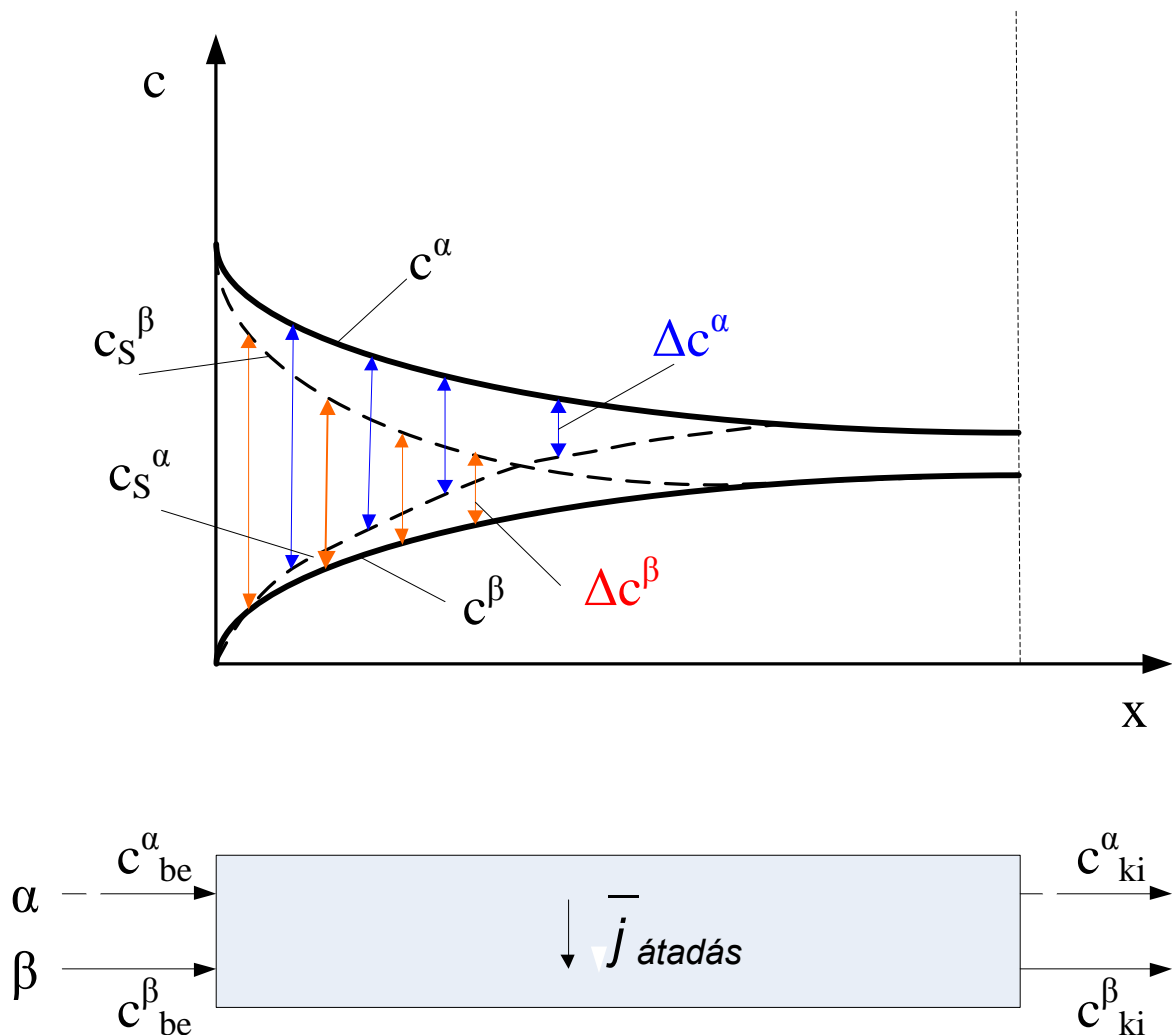
$$107. \text{ képlet. } \vec{v} \nabla \vec{v} - \nu \nabla^2 \vec{v} + \omega \gamma \Delta \vec{v} + \frac{1}{\rho} \nabla p - \vec{g} = -\frac{\partial \vec{v}}{\partial t}$$

## Kétfázisú műveletek

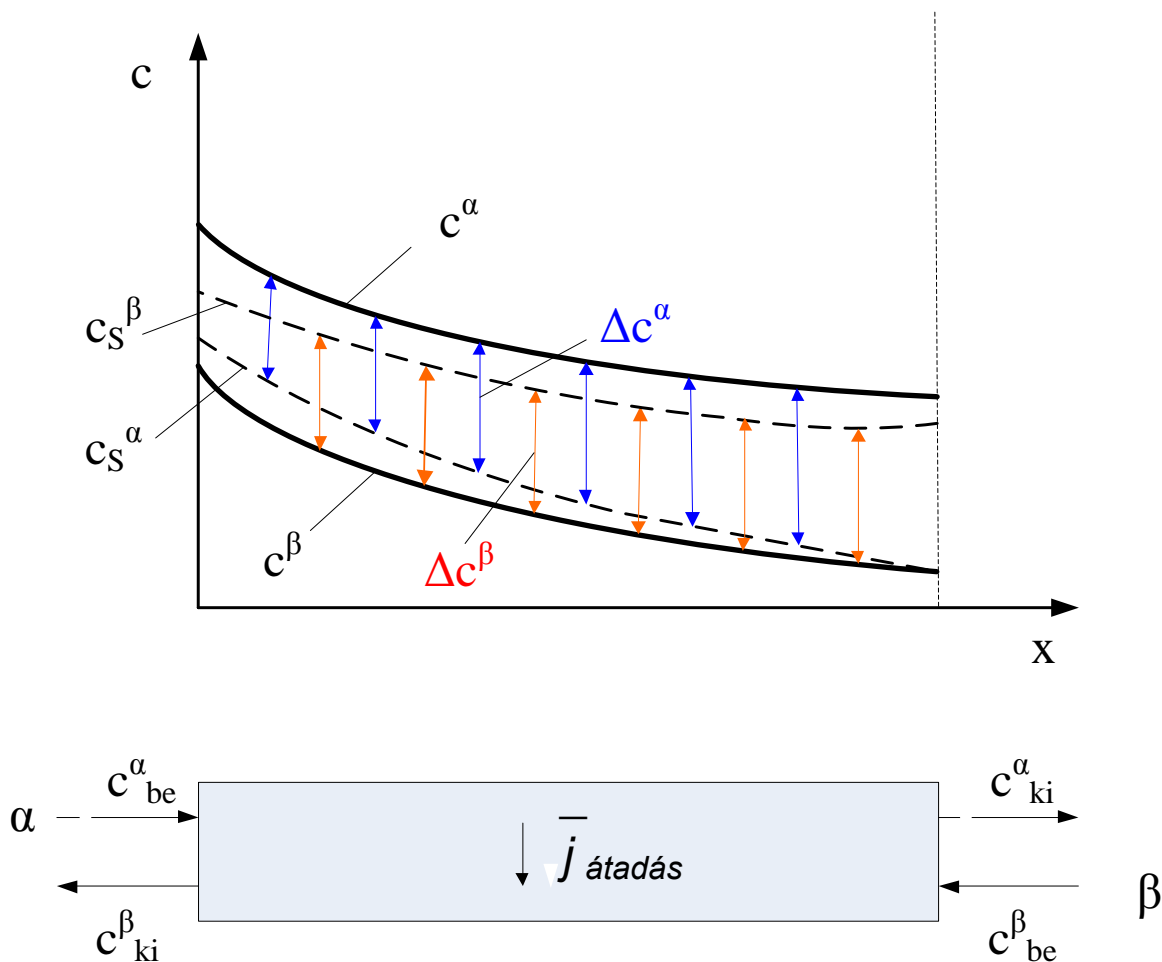
Két egymással érintkező fázis között komponens, hő és impulzus átadás megy végbe mindaddig, míg az egyensúly be nem áll. A kétfázisú műveletek célja azonban a legtöbb esetben nem a hő, vagy impulzus csere - noha ezek is végbemennek - hanem egy vagy több komponens átvitele egyik fázisból a másikba. Azokat a kétfázisú műveleteket, ahol az átadott komponens kémiai reakcióban nem vesz részt összefoglalóan diffúziós műveleteknek nevezzük.

## Hajtóerő és munkavonal kétfázisú műveleti egységekben

Kétfázisú folyamatos működésű műveleti egységek lehetnek egyen- és ellenáramúak. Egyenáramú műveleti egységekben a hajtóerő folyamatosan csökken, ahogy a két fázis halad előre (lásd: 18. ábra). Szélső esetben a hajtóerő a készülék egy pontján nullára csökken és a két fázis egyensúlyba kerül, ezen a ponton túl nincs átadás. Ellenáram esetén az ellentétes irányú mozgásból adódóan a főbb intenzív állapotjelzők (koncentráció, hőmérséklet) tendenciája ellentétes (lásd: 19. ábra). A hajtóerő növekedhet, csökkenhet, vagy változatlan lehet az egész készülék hossza mentén. Jól beállított műveleti paraméterek mellett sehol sem áll be az egyensúly, így az ellenáramú készülék sokkal hatékonyabb, mint az azonos paraméterekkel rendelkező egyenáramú.



18. ábra Hajtóerő és koncentrácioprofil egyenáramú műveleti egységekben.



19. ábra Hajtóerő és koncentrácioprofil ellenáramú műveleti egységekben.

Ha igaz, hogy a készülék stacioner állapotban működik, nem játszódik le kémiai reakció és a diffúziós tag elhanyagolható a konvektív mellett (diszpergált fázisra minden esetben igaz) akkor a differenciális mérlegegyenletek a következő formában írhatók fel:

$$108. \text{ képlet. } Vu^\alpha \operatorname{div}(c_i^\alpha \vec{v}^\alpha) + V\omega\beta^\alpha (c_i^\alpha - c_{is}^\alpha) = 0$$

$$109. \text{ képlet. } Vu^\beta \operatorname{div}(c_i^\beta \vec{v}^\beta) + V\omega\beta^\beta (c_i^\beta - c_{is}^\beta) = 0$$

Az átadás során a határfelületen nem halmozódik fel az adott komponens, ezért a fenti egyenletekben szereplő átadási áramok egyenlők, amiből következik, hogy a konvektív tagok is egyenlők:

$$110. \text{ képlet. } Vu^\alpha \operatorname{div}(c_i^\alpha \vec{v}^\alpha) = Vu^\beta \operatorname{div}(c_i^\beta \vec{v}^\beta)$$

Feltéve, hogy a fluidum összenyomhatatlan és a koncentráció csak az oszlop hossza mentén változik, radiális irányba nem:

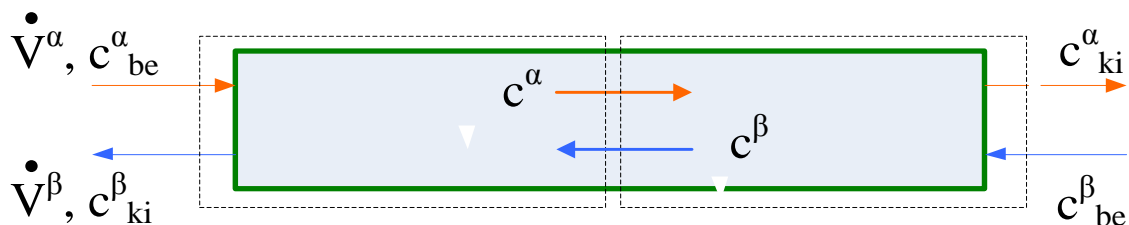
$$111. \text{ képlet. } \dot{V}^\alpha \frac{\partial c_i^\alpha}{\partial x} = \pm \dot{V}^\beta \frac{\partial c_i^\beta}{\partial x}$$

A sebességvektorok irányától függően, egyenáram esetén a negatív előjel, ellenáram esetén a pozitív előjel a mérvadó. A fenti egyenletet integrálva kapjuk a *munkavonal egyenletet* (lásd: 20. ábra):

$$112. \text{ képlet. } \dot{V}^\alpha (c_i^\alpha - c_{i,be}^\alpha) = \pm \dot{V}^\beta (c_i^\beta - c_{i,ki}^\beta)$$

vagy

$$113. \text{ képlet. } \dot{V}^\alpha (c_{i,ki}^\alpha - c_i^\alpha) = \pm \dot{V}^\beta (c_{i,be}^\beta - c_i^\beta)$$



20. ábra Ellenáramú műveleti egység integrális mérlege.

## Átviteli egység fogalma

Differenciális fázisérintkeztetésű készülékekben rendszerint elhanyagolható a visszakeveredés. Így az alábbi összefüggésből indulhatunk ki:

$$114. \text{ képlet. } -\frac{dc_i^\alpha \dot{V}^\alpha}{dx} = A\omega\beta^\alpha (c_i^\alpha - c_{iS}^\alpha)$$

A változók szeparálása után integráljuk mindkét oldalt:

$$115. \text{ képlet. } -\int_{c_{i,be}^\alpha}^{c_{i,ki}^\alpha} \frac{dc_i^\alpha}{c_i^\alpha - c_{iS}^\alpha} \cdot \frac{\dot{V}^\alpha}{A\omega\beta^\alpha} = \int_0^L dx$$

Az egyenletben szereplő tagok jelentése:

$$-\int_{c_{i,be}^\alpha}^{c_{i,ki}^\alpha} \frac{dc_i^\alpha}{c_i^\alpha - c_{iS}^\alpha} = \text{Átviteli egységyszám (ÁESZ}^\alpha)$$

$$\frac{\dot{V}^\alpha}{A\omega\beta^\alpha} = \text{Átviteli egységmagasság (ÁEM}^\alpha)$$

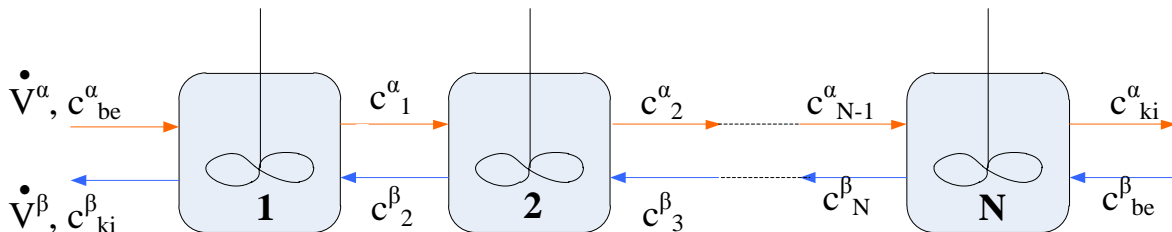
$$\int_0^L dx = L = \text{Oszlop magasság}$$

**116. képlet.**  $\dot{A}ESZ^\alpha \cdot \dot{A}EM^\alpha = L$

Az átadási, vagy átviteli egység a kétfázisú műveleti egység azon része, amelyben egy fázis be és kilépő koncentrációjának különbsége az adott részre jellemző átlagos hajtóerővel egyenlő. Az átviteli egységyszám megmutatja, hogy egy fázisban bekövetkező koncentrációváltozás hányszorosa az átlagos hajtóerőnek. Ha az egyensúlyi összefüggés ( $c_{is}^\alpha = f(c_i^\beta)$ ) ismert az  $\dot{A}ESZ$  analitikusan módon is meghatározható, ellenkező esetben a numerikus, vagy grafikus integrálásra van szükség. A legelterjedtebb grafikus módszer a *Baker-módszer*.

## Egyensúlyi egység fogalma

Az integrális fázisérintkeztetésű műveleti egységek tökéletesen kevert egységeket jelentenek, amelyekben az intenzív állapotjelzők függetlenek a helytől. Ezek lehetnek egy vagy többfokozatúak attól függően, hogy a nem elegyedő fázisokat egyszer érintkeztetjük egymással, vagy a kilépő fázisokat szétválasztás után újra meg újra összekeverjük (lásd: 21. ábra).



**21. ábra** Többfokozatú ellenáramú műveleti egység.

Ha a tartózkodási idő elég hosszú, a fázisok egyensúlyba kerülnek. Azon műveleti egységeket - vagy egy műveleti egységek azon részét - amelyből kilépő áramok egymással egyensúlyban vannak *egyensúlyi egység*nek, vagy *egyensúlyi tényék*nek nevezük. Az egyensúlyi egység hasonló szerepet tölt be az integrális fázisérintkeztetésű készülékekben, mint az átviteli egység a folytonos fázisérintkeztetésűekben, a két fogalom azonban nem összetévesztendő. Az egyensúlyi egység a műveleti egységen belül általában fizikailag is elkülönül (pl.: tányéros készülékek). Az oszlopnak azt a hosszát, amelyre teljesül az egyensúlyi egység kritériuma *egyensúlyi egységmagasságnak* (EEM) nevezük. Az átviteli egységhez hasonló módon az oszlop teljes magassága az *egyensúlyi egységyszám* (EESZ) és az *egyensúlyi egységmagasság* szorzataként számítható:

**117. képlet.**  $EESZ \cdot EEM = L$

Az egyensúlyi egységyszám meghatározása történhet analitikusan (Kremser-egyenlet) vagy grafikusán (lelépcsőzés, McCabe - Thiele)

## Tartózkodási időeloszlások

A műveleti egységek egy részében (pl.: kétfázisú integrális fázisérintkeztetésű műveleti egységek) tudatosan törekszünk az egyensúlyi állapot elérésére, aminek technikai vagy gazdaságossági tényezők szabnak határt. Más műveleti egységekben ez egyáltalán nem cél, sőt az egyensúlyi állapot elkerülendő (pl.: konszekutív reakció, ahol a cél valamelyik köztitermék). Mindkét típusnál - de az utóbbinál kiemelten - fontos hogy egy molekula, vagy fáziselem mennyi időt tölt a műveleti egységben. A műveleti egységeket időbeli viselkedésük alapján két csoportba sorolhatjuk: léteznek *szakaszos* és *folyamatos* műveleti egységek.

Egy szakaszos berendezésekben minden molekula vagy fáziselem azonos ideig tartózkodik mivel a töltés és ürítés időtartama általában elhanyagolható a művelet időtartamához képest. A szakaszos műveleteket általában üstszerű berendezésekben valósítják meg intenzív keverés mellett. Az intenzív keverés azért szükséges, hogy minden molekulának azonos környezetet biztosítsunk és ezáltal homogén végterméket kapjunk. Az ilyen, ún. *tökéletesen kevert üstök* intenzív állapotjelzői időben változnak viszont függetlenek a helykoordinátáktól: koncentráció, nyomás és hőmérséklet szempontjából makroszkópicusan izotrópnak tekinthetők.

$$118. \text{ képlet. } \frac{\partial \Gamma}{\partial t} \neq 0$$

$$119. \text{ képlet. } \nabla \Gamma = 0$$

Evvel ellentétben a folyamatos működésű műveleti egységek intenzív állapotjelzői stacioner állapotban nem függenek az időtől.

$$120. \text{ képlet. } \frac{\partial \Gamma}{\partial t} = 0$$

Geometriáját tekintve egy folyamatos műveleti egység lehet üstszerű, vagy csőszerű. Azonban bármilyen geometriájú is a berendezés nem lehet pontosan megmondani, mennyi időt tölt el egy molekula a készülékben, csak azt tudjuk megmondani milyen valószínűséggel lép ki egy adott időintervallumban. A tartózkodási idő tehát egy valószínűségi változó, amelynek van várható értéke, szórása, eloszlás- és sűrűségfüggvénye.

### A tartózkodási idő eloszlás és sűrűségfüggvénye

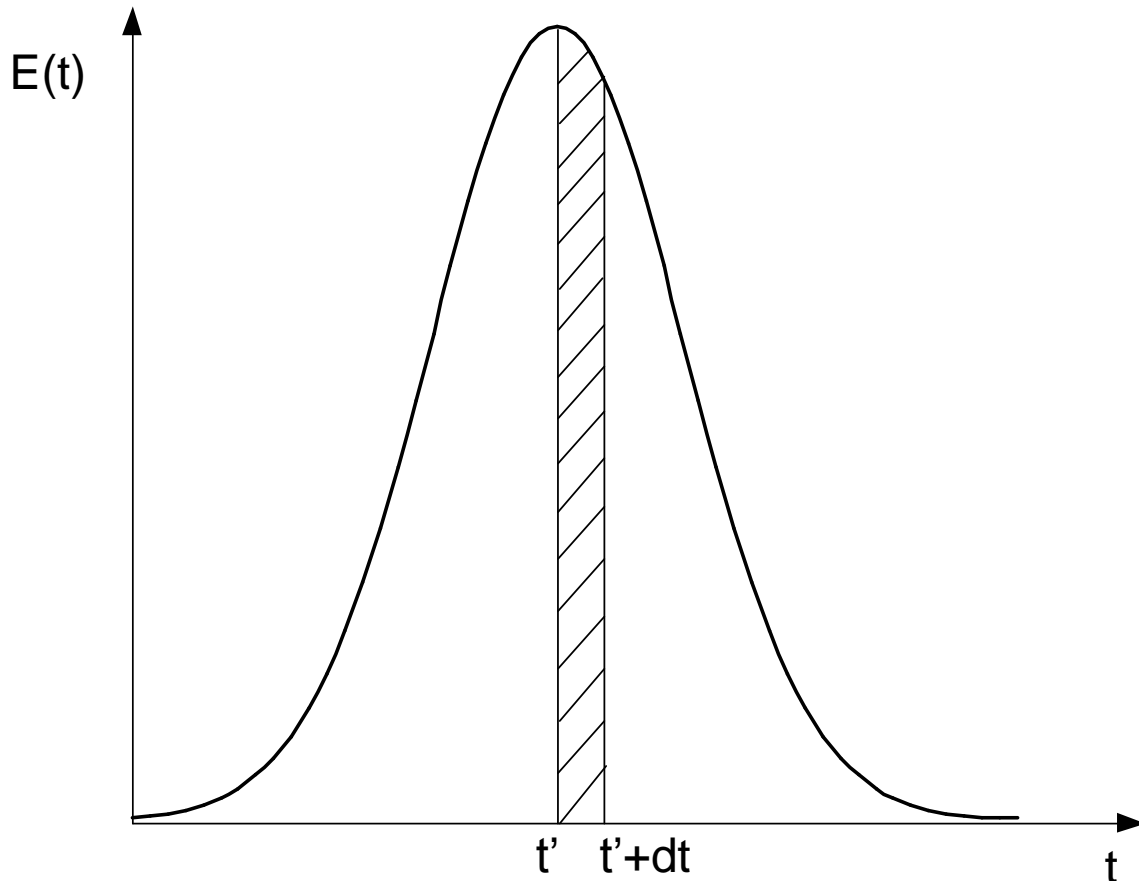
Annak a valószínűségét, hogy a kérdéses molekula a  $t'$  és a  $t'+dt$  intervallumban lép ki a *tartózkodási idő sűrűségfüggvény*  $E(t)$  integrálja adja meg  $E(t)dt$ :

$$121. \text{ képlet. } E(t)dt = P(t' < t < t'+dt)$$

ahol  $P$ , a valószínűség, 0 és 1 közötti értékeket vehet fel. Mivel végtelen hosszú idő elteltével biztosan kilép a kérdéses molekula:

$$122. \text{ képlet. } \int_0^{\infty} E(t)dt = 1$$





22. ábra Tartózkodási idő sűrűségfüggvény.

$E(t)$  dimenziója  $[\text{idő}]^{-1}$ , azonban létezik dimenziómentes alakja is, amit  $E(\theta)$ -val jelölnek, ahol  $\theta$  a dimenziómentes idő az eltelt idő ( $t$ ) és az átlagos tartózkodási idő ( $\bar{t}$ ) hányadosa:

123. képlet.  $\theta = \frac{t}{\bar{t}}$

A dimenziómentes alakra igazak az alábbi összefüggések:

124. képlet.  $E(\theta) = \bar{t}E(t)$

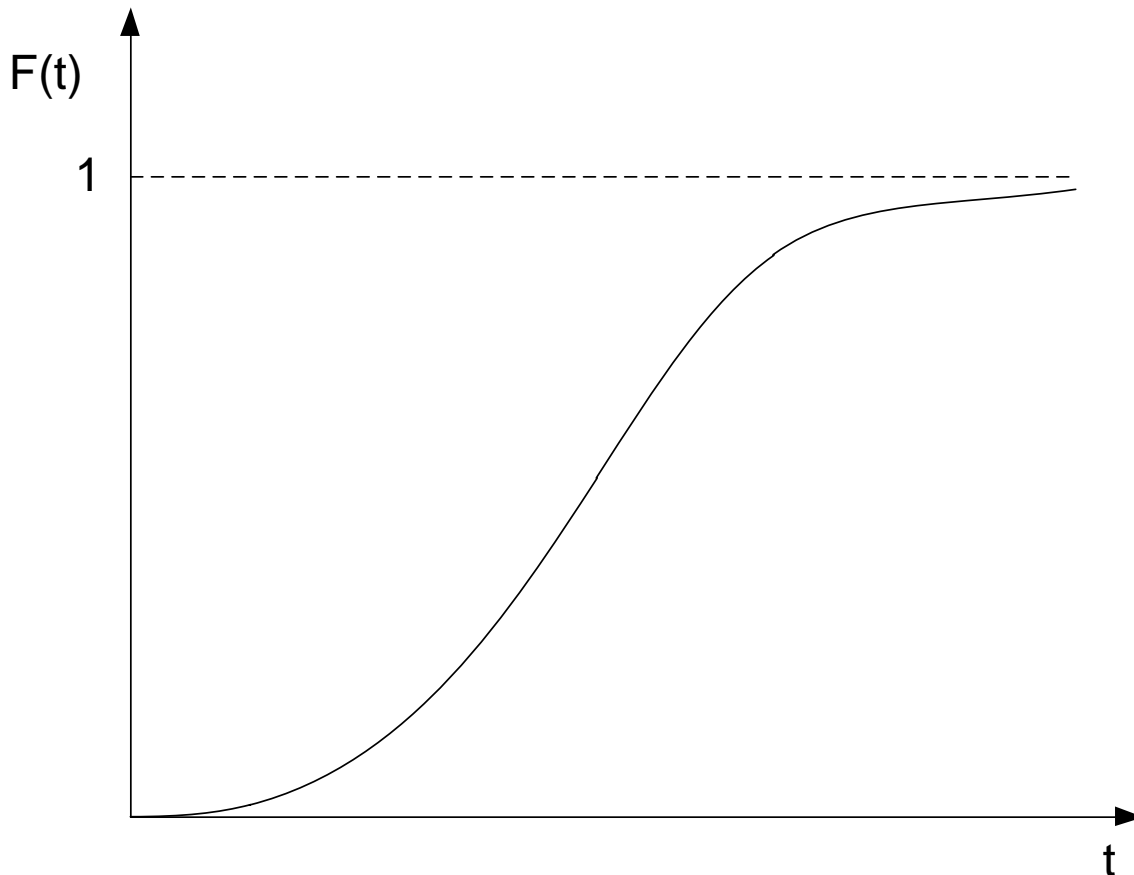
125. képlet.  $E(\theta)d\theta = E(t)dt$

A tartózkodási idő sűrűségfüggvény integrálja a tartózkodási idő eloszlásfüggvény, jele:  $F(t)$ .

126. képlet.  $F(t) = \int_0^t E(t)dt$

A tartózkodási idő eloszlásfüggvény valamely  $t'$  időponthoz tartozó értéke annak valószínűségét adja meg, hogy a kérdéses molekula, vagy fáziselem a  $t'$  időpontban már kilépett a berendezésből.  $F(t)$  egy egyhez tartó monoton növekvő függvény:

127. képlet.  $\lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = 1$



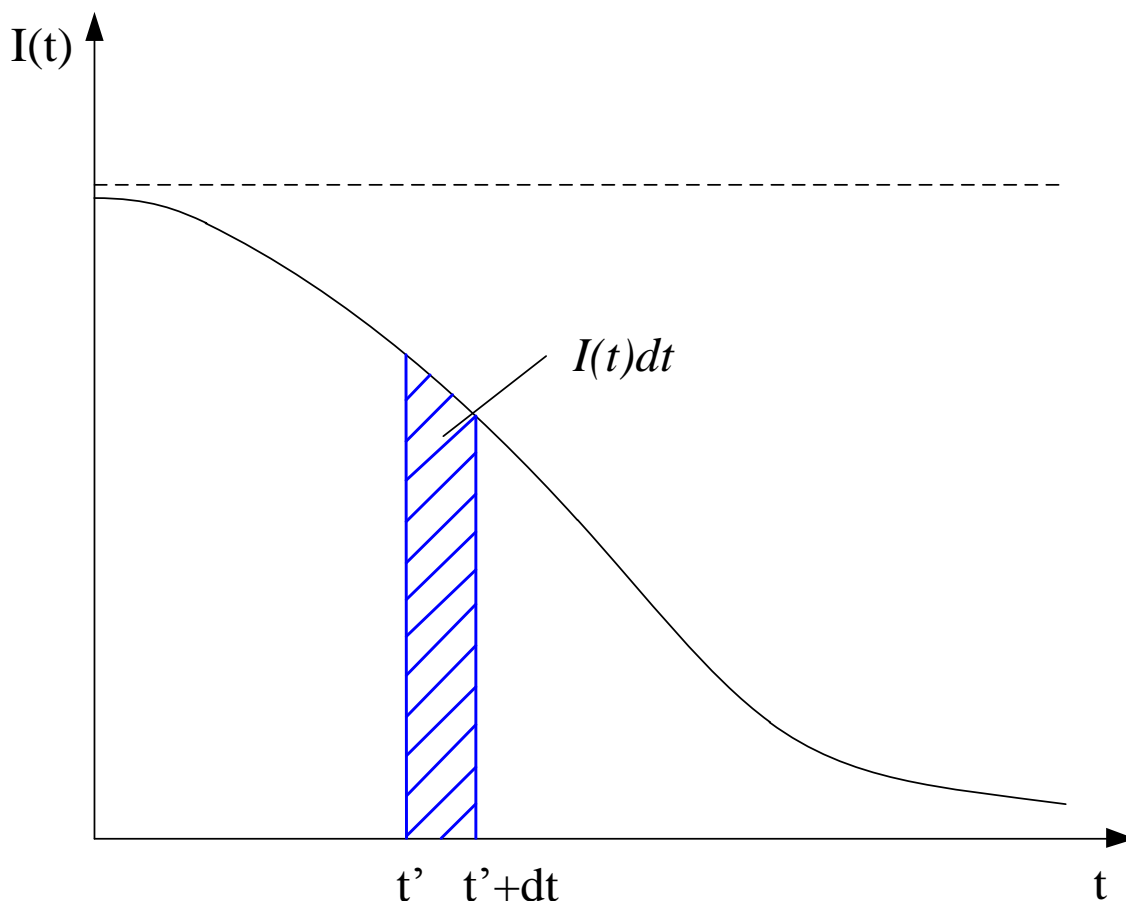
23. ábra Tartózkodási idő eloszlásfüggvény.

Az eloszlásfüggvénnyel ellentétben a *koreloszlás függvény* annak valószínűségét adja meg, hogy a kérdéses molekula, vagy fáziselem a  $t'$  időpontban még a berendezésben tartózkodik, jele  $W(t)$ .

128. képlet.  $W(t) = 1 - F(t)$

A reaktorban tartózkodó molekulák, fáziselemek koreloszlását a *belső koreloszlás sűrűségfüggvénnyel* ( $I(t)$ ) tudjuk jellemezni.  $I(t)dt$  a műveleti egységben tartózkodó molekulák azon hányadát adja meg amelyek kora  $t'$  és  $t'+dt$  intervallumba esik.

129. képlet.  $E(t) = -\bar{t} \frac{dI(t)}{dt}$



24. ábra Belső koreloszlás sűrűségfüggvény.

## A sűrűségfüggvény meghatározása és kiértékelése

A berendezések áramlástanai jellemzéséhez még kell határoznunk azok tartózkodási idő eloszlás sűrűségfüggvényét. Ehhez a betáplálási áramban valamilyen zavarást hozunk létre, és a kilépő áramban mérjük válaszjelet. A zavarás legtöbbször valamilyen jelzőanyag bevitelét jelenti. A jelzőanyag gyanánt olyan anyagot kell választani, amelyik jól oldódik a kérdéses fázisban, könnyen mérhető, nem lép reakcióba és nem adszorbeálódik a készülékben, valamint nem változtatja meg a fluidum áramlástanai tulajdonságait. A jelzőanyag bevitelének, vagy *gerjesztésnek* több módja van, ezek közül a legfontosabbak: impulzusfüggvény, egységugrás függvény, sinus-függvény, stb.

## Impulzusfüggvény (Dirac- $\delta$ gerjesztés)

Az impulzusfüggvény olyan egységnyi területű négyszögfüggvény, amelynek időtartama infinitézimálisan rövid.

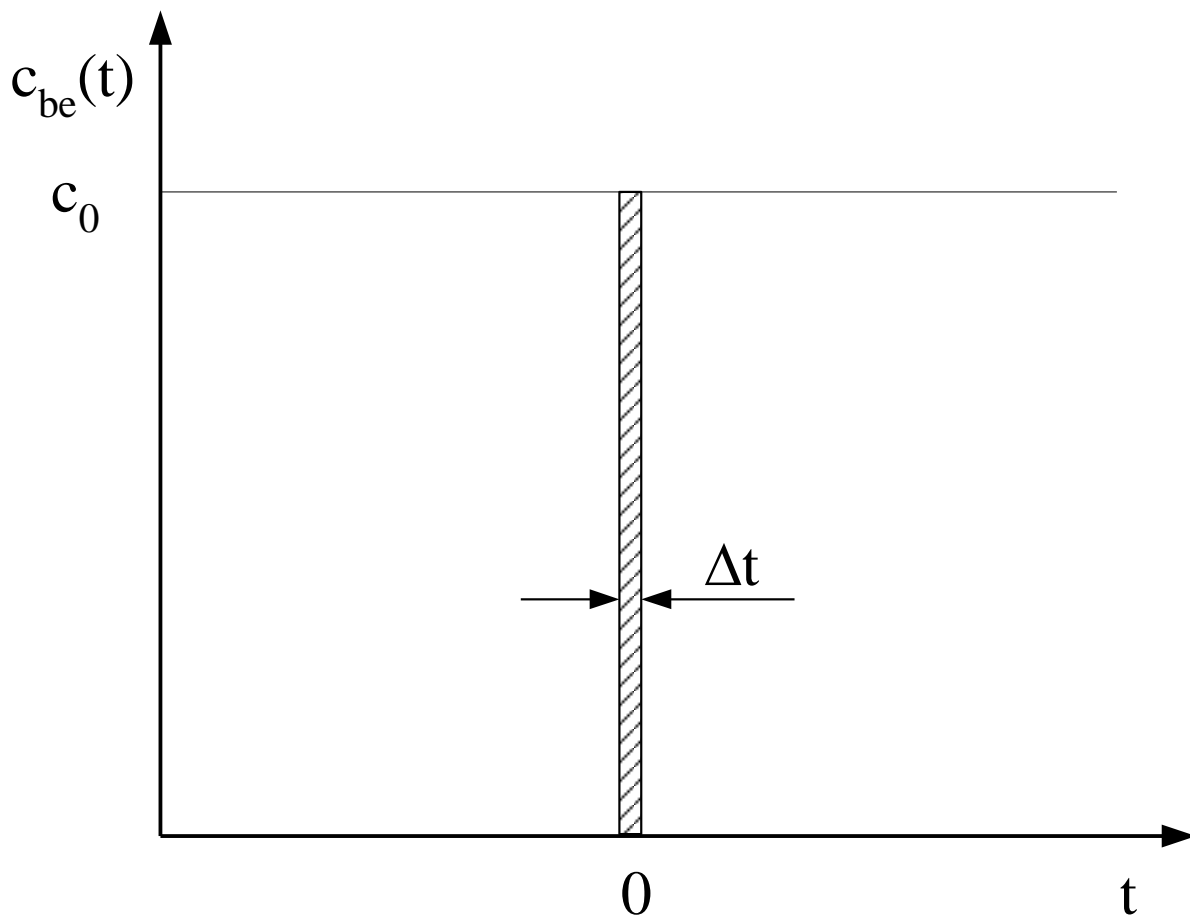
130. képlet. 
$$\delta(t) = \begin{cases} \infty, & t = 0 \\ 0, & t \neq 0 \end{cases}$$

**131. képlet.**  $\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1$

A gyakorlatban a Dirac- $\delta$  gerjesztés a jelzőanyag betáplálási áramba történő pillanatszerű injektálását jelenti.

**132. képlet.**  $\delta(t) = \begin{cases} c_0, & t < \Delta t \\ 0, & t > \Delta t \mid t < 0 \end{cases}$

ahol  $\Delta t$  tart 0-hoz.



25. ábra Impulzusfüggvény.

### Egységugrás függvény (HEAVISIDE-függvény)

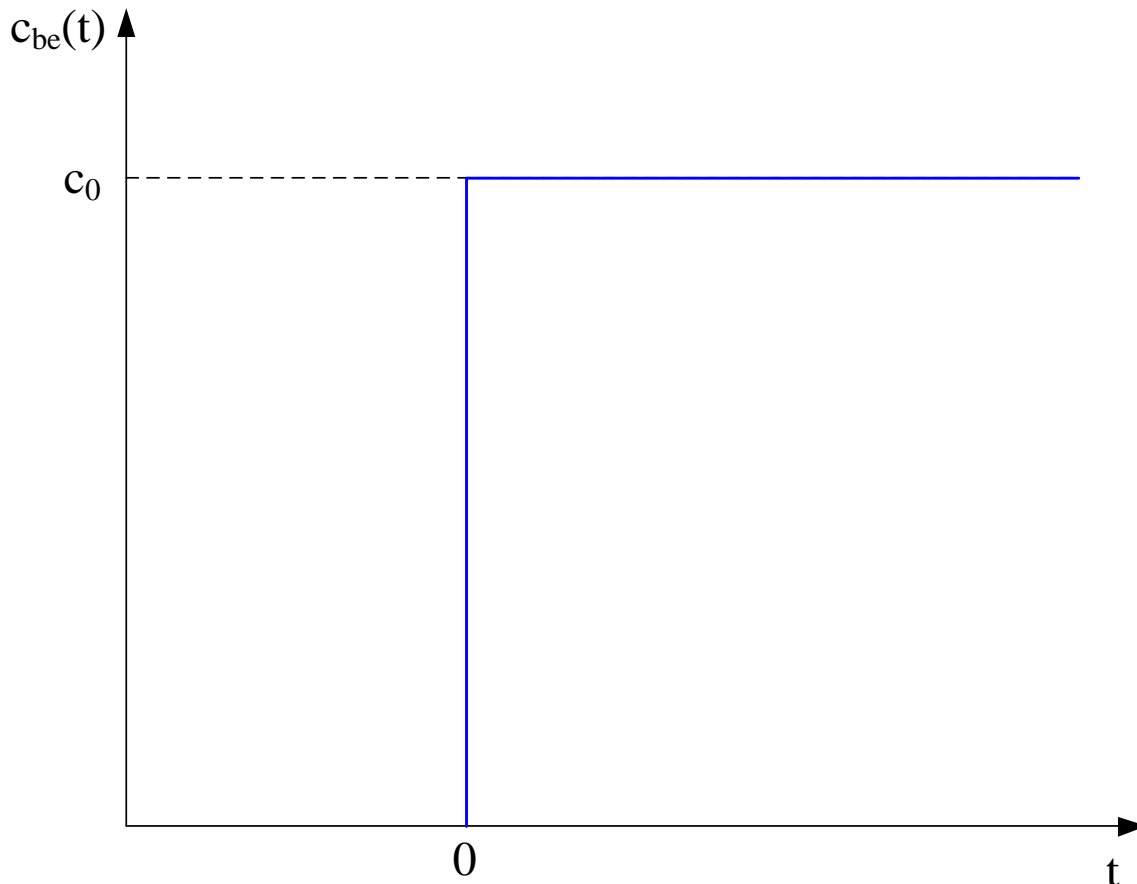
Az egységugrás, vagy lépcsős függvény az impulzusfüggvény integrálja.

**133. képlet.**  $H(t) = \int_{-\infty}^t \delta(t) dt$

**134. képlet.**  $H(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t > 0 \end{cases}$

Az egységugrás függvényt gyakorlatban úgy állítunk elő, hogy a jelzőanyagot a  $t=0$  pillanattól kezdődően folyamatosan tápláljuk be állandó koncentráció mellett:

$$135. \text{ képlet. } H(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ c_0, & t > 0 \end{cases}$$



26. ábra Egységugrás függvény.

## Válaszfüggvények kiértékelése

Ha a vizsgálat során impulzusfüggvényt használunk gerjesztés gyanánt, válaszfüggvényként a sűrűségfüggvényt kapjuk. A kísérlet során ismert mennyiségű jelzőanyagot injektálunk a berendezés betáplálási árambába a lehető legrövidebb idő alatt. Eközben folyamatosan mérjük és regisztráljuk a kilépő áram valamely, a jelzőanyag koncentrációjával arányos tulajdonságát (pl.: vezetőképesség, abszorbancia, pH stb). Az adatok feldolgozásának egyik módja, hogy egy általunk választott függvény paramétereit illesztjük a mérési pontokra, az esetek többségében azonban megfelelő modell hiányában ez nem lehetséges. Ilyenkor használjuk a *momentumok módszerét*.

A tartózkodási idő eloszlás sűrűségfüggvénynek az origóra ( $t=0$ ) vonatkoztatott  $n$ -edik kezdeti momentuma definíció szerint:

$$136. \text{ képlet. } M_n = \int_0^{\infty} t^n E(t) dt$$

ahol  $E(t)$  a jelzőanyag koncentrációjával kifejezve:

$$137. \text{ képlet. } E(t) = \frac{c(t)}{\int_0^{\infty} c(t) dt}$$

A bevitt jelzőanyag teljes mennyisége mólokban:

$$138. \text{ képlet. } N = \int_0^{\infty} \dot{V}c(t) dt$$

ahol  $\dot{V}$  a betáplálás és elvétel térfogatárama.

A nulladik momentum ( $M_0$ ) - a  $E(t)$  görbe alatti terület - az 122. képlet. szerint egy. Az első momentum ( $M_1$ ) nem más, mint az átlagos tartózkodási idő, amely az alábbi képlettel számolható:

$$139. \text{ képlet. } M_1 = \bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} tE(t) dt}{\int_0^{\infty} c(t) dt} = \frac{\int_0^{\infty} tc(t) dt}{\int_0^{\infty} c(t) dt}$$

A tartózkodási idő a molekula által bejárt út hosszával arányos. Annak átlaga a fluidum által kitöltött térfogattól és a betáplálási áram nagyságától függ, de semmit sem árul el az áramlási viszonyokról tehát a válaszfüggvény alakjáról. Ezért a tartózkodási idő várható értéke mellett meg kell vizsgálni annak *szórásnégyzetét* ( $\sigma^2$ ) is, ami nem más, mint a válaszfüggvény *második centrális momentuma* ( $\mu_2$ ):

$$140. \text{ képlet. } \mu_2 = M_2 - M_1^2 = \int_0^{\infty} (t - \bar{t})^2 E(t) dt$$

$$141. \text{ képlet. } \sigma^2 = \frac{\int_0^{\infty} (t - \bar{t})^2 c(t) dt}{\int_0^{\infty} c(t) dt} = \frac{\int_0^{\infty} t^2 c(t) dt}{\int_0^{\infty} c(t) dt} - \bar{t}^2$$

A szórásnégyzet dimenziómentes alakja:

$$142. \text{ képlet. } \sigma^2(\theta) = \frac{\sigma^2}{\bar{t}^2}$$

Egy mérés során meghatározott időközönként regisztráljuk a mért mennyiség számszerű értékét. Így a  $c(t)$  valójában nem egy folytonos függvény, hanem egy diszkrét adathalmaz ( $c_i$ ). Minél rövidebb a mintavételezési idő, annál jobban közelítünk

a valósághoz. Az átlagos tartózkodási idő és a szórásnégyzet képletében az integrálást szummázás váltja fel:

$$143. \text{ képlet. } \bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^{NDP} t_i c_i}{\sum_{i=1}^{NDP} c_i}$$

$$144. \text{ képlet. } \sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^{NDP} t_i^2 c_i}{\sum_{i=1}^{NDP} c_i} - \bar{t}^2$$

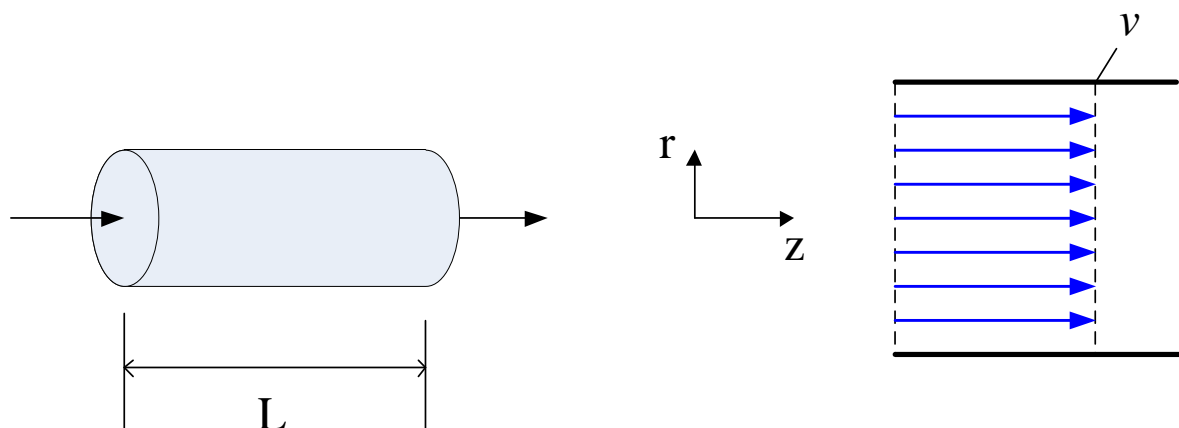
## Különböző geometriájú berendezések tartózkodási idő eloszlása

### Ideális cső (dugószerű áramlás)

Ideális esetben, a csőben áramló fluidum sebessége minden pontban azonos, ami azt jelenti, hogy minden molekulának azonos hosszúságú utat kell megtenni. Egy ideális, vagy dugószerű áramlású csőben nincs axiális keveredés (a fáziselemek előre vagy visszakeveredése, diffúziója gyakorlatilag nulla), radiális irányban azonban tökéletesen kevertnek tekinthető. Az ilyen típusú berendezések tartózkodási idejének nincs eloszlása, mert minden fáziselem pontosan ugyanannyi időt tölt a készülékben:

$$145. \text{ képlet. } \bar{t} = \frac{V}{\dot{V}} = \frac{L}{v}$$

ahol  $V$  a készülék térfogata,  $\dot{V}$  a betáplálási áram,  $L$  a készülék hossza és  $v$  a fluidum sebessége.

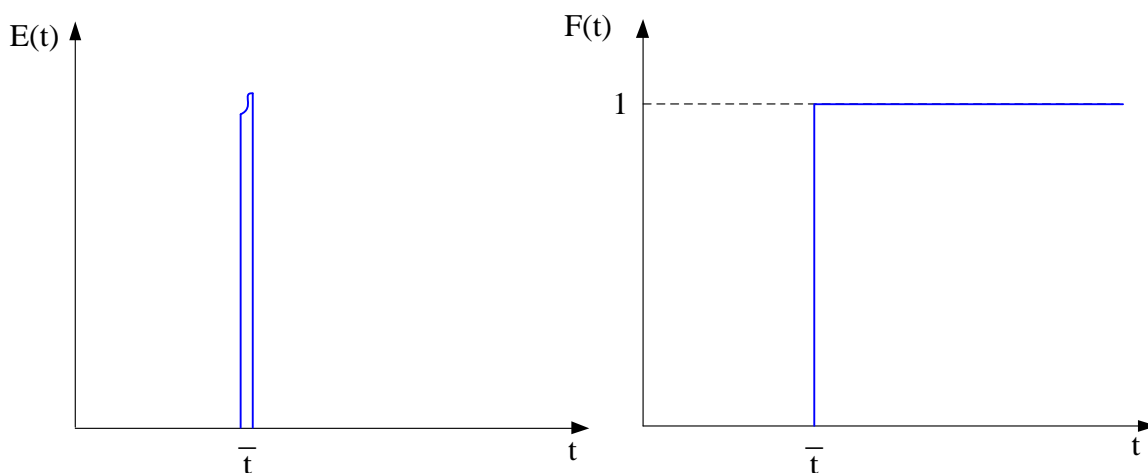


27. ábra *Dugószerű áramlás sebességprofilja.*

Bármilyen típusú vizsgálójelet használunk, a válaszfüggvény a vizsgálójel időben  $\bar{t}$ -gal „elcsúsztatott” másolata. A 28. ábra egy Dirac- $\delta$  jelre adott válasz látható, amely az alábbi egyenlettel írható le:

**146. képlet.**  $E(t) = \delta(t - \bar{t})$

A dugószerű áramlás - mint minden ideális állapot - csak megközelíthető, de el nem érhető. Kis sebességnél az áramlás lamináris, az axiális keveredés a koncentrikus rétegek eltérő sebességére vezethető vissza. A sebesség növelésével a sebességprofil közelít a dugószerű áramlás profiljához, nagy sebességnél azonban a kialakuló örvények okoznak visszakeveredést. A következő fejezetekben a reális csőre jellemző tartózkodási idő sűrűségfüggvényeket mutatjuk be.



**28. ábra** Dugószerű áramlású cső tartózkodási idő sűrűség- és eloszlásfüggvénye.

## Lamináris áramlású cső

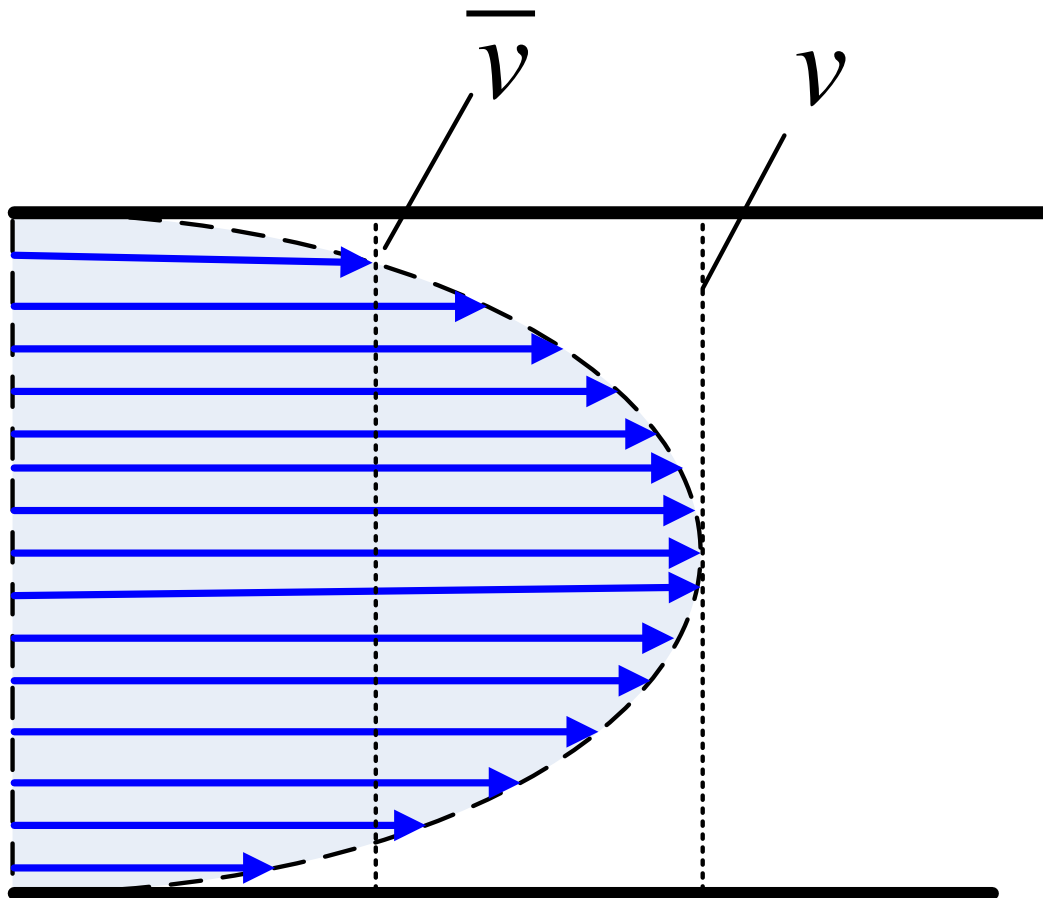
Laminárisan áramló fluidum sebességprofilja parabolikus: az áramlás sebesség a cső középvonalában a legnagyobb, a fal felé haladva fokozatosan csökken, a fal mellett a fluidum sebessége nulla. Ha feltételezzük hogy diffúziós keveredés elhanyagolható, a tartózkodási idő eloszlást kizárólag a sebességeloszlás határozza meg, amely a következő egyenlettel írható le:

**147. képlet.**  $v(r) = 2\bar{v} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right]$

ahol  $R$  a cső sugara,  $\bar{v}$  pedig az átlagsebesség, ami parabolikus sebességprofilnál a maximális sebesség fele.

**148. képlet.**  $\bar{v} = \frac{v_{\max}}{2}$





29. ábra Lamináris áramlás sebességprofilja.

A jelzőanyag egy része a cső középvonalán halad végig és  $t_{min}$  idő elteltével jelenik meg a kilépő áramban. Mivel  $t_{min}$  -t megelőzően nem léphet ki jelzőanyag, ezért  $E(t)=0$  minden  $t < t_{min}$  -re.

149. képlet. 
$$t_{min} = \frac{L}{v_{max}} = \frac{\bar{t}}{2}$$

A középvonaltól a fal felé haladva csökken a sebesség ( $dv$ ) és nő a tartózkodási idő ( $dt$ ). Annak valószínűségét, hogy a jelzőanyag a  $t+dt$  intervallumban lép ki, vagyis a sebessége  $v$  és  $v+dv$  közötti érték, az adott sebességű térfogatáram ( $dB=(2\pi r dr)v$ ) és a teljes térfogatáram ( $B=R^2\pi\bar{v}$ ) aránya határozza meg.

150. képlet. 
$$E(t)dt = \frac{d\dot{V}}{\dot{V}} = \frac{(2r\pi dr)v}{R^2\pi\bar{v}}$$

151. képlet. 
$$E(t) = \frac{2rv}{R^2\bar{v}} \frac{dr}{dt}$$

$$152. \text{ képlet. } \frac{v}{\bar{v}} = \frac{\bar{t}}{t} = 2 \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right]$$

a fenti egyenletet differenciálva:

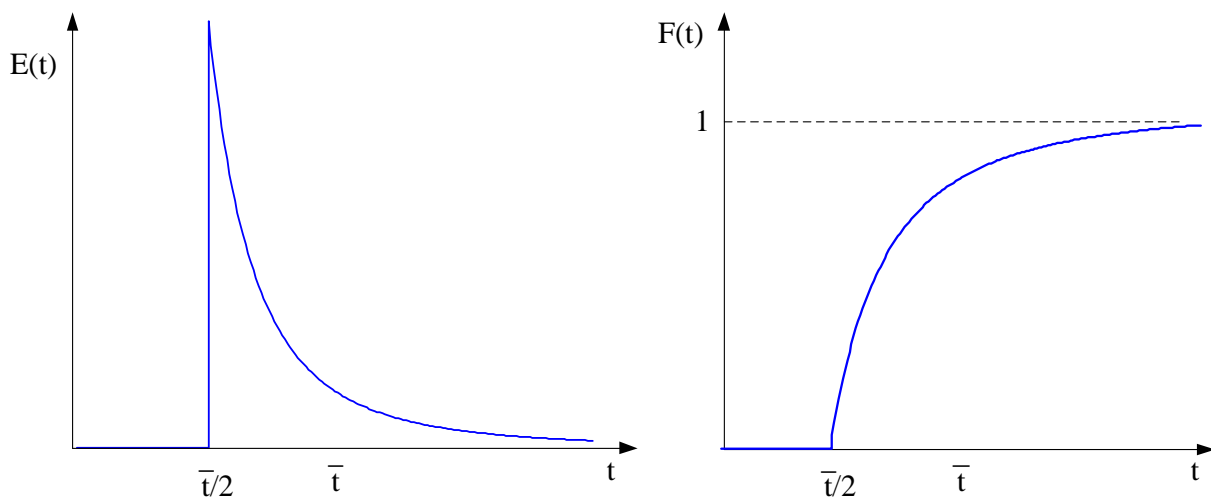
$$153. \text{ képlet. } -\frac{\bar{t}}{t^2} dt = -\frac{4r}{R^2} dr$$

innen

$$154. \text{ képlet. } \frac{dr}{dt} = \frac{t}{t^2} \frac{R^2}{4r}$$

E(t)-be visszahelyettesítve megkapjuk a lamináris áramlású cső tartózkodási idő sűrűségfüggvényét:

$$155. \text{ képlet. } E(t) = \begin{cases} 0, & t < \bar{t}/2 \\ \bar{t}^2, & t > \bar{t}/2 \\ 2t^3, & t > \bar{t}/2 \end{cases}$$

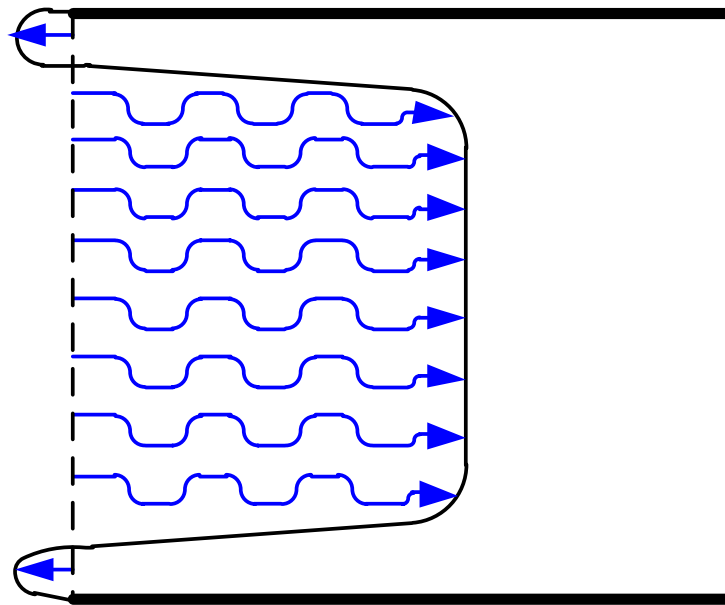


30. ábra Lamináris áramlású cső tartózkodási idő sűrűség- és eloszlásfüggvénye.

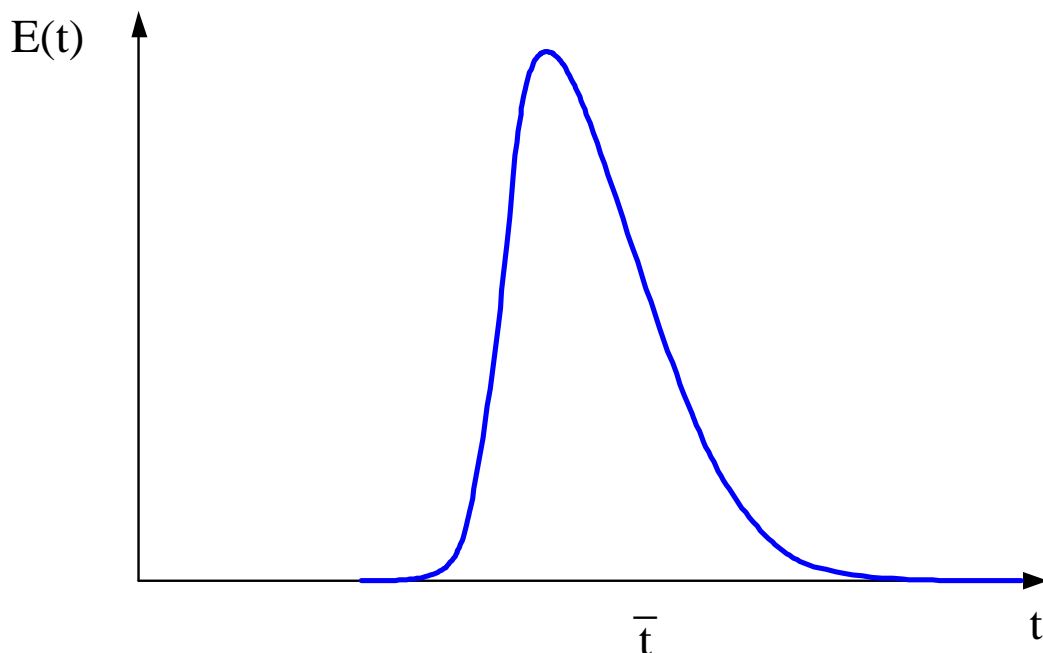
## Turbulens áramlású cső

Bizonyos Reynolds-szám felett az áramlás turbulensnek tekinthető. A 31. ábra a turbulens sebességprofil egy szélsőséges példáját ábrázolja. A fáziselemek áramlási sebessége rendszertelenül ingadozik egy közepes érték körül, mozgás iránya pillanatról pillanatra változik. A hullámvonallal jelölt sebesség vektor a turbulens tartományra jellemző áramvonalakat jelképezi. A fal mentén a fő tömeggel ellentétes irányú áramlás is kialakulhat. A visszakeveredés miatt az impulzusfüggvényre adott válaszfüggvény Gauss-görbéhez közelítő eloszlást mutat. Azonos térfogatáram

mellett a jelzőanyag később jelenik meg a cső végén, mint lamináris áramlásnál, de a fő tömege gyorsabban elhagyja a berendezést.



31. ábra Turbulens áramlás sebességprofilja.



32. ábra Turbulens áramlású cső tartózkodási idő sűrűségfüggvénye.

### Visszakeveredéses áramlású cső

Az eddig tárgyalt modelleknél feltételeztük, hogy a diffúziós áram elhanyagolható és az axiális keveredés kizárólag az áramlás jellegére, hidrodinamikájára vezethető vissza. A valóságban a két jelenség együttesen határozza meg az egység tartózkodási idő eloszlását, bár nem feltétlenül azonos súllyal. Az ilyen típusú rendszer modellezésekor az *axiális keveredési együttható* ( $D_{eff}$ ) bevezetésével a diffúziós tagba

„olvasztják be” a nem-ideális áramlásból származó keveredést. A cső  $d_z$  hosszúságú szakaszára felírható differenciális mérlegegyenlet állandó sűrűség és csőátmérő mellett a következő formába írható fel:

$$156. \text{ képlet. } D_{eff} \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - \bar{v} \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial c}{\partial t}$$

Az egyenlet dimenziómentes alakja az 123. képlet. és 137. képlet. figyelembevételével, valamint a  $\zeta = z/L$  dimenziómentes hosszúság bevezetésével a következő formába írható fel:

$$157. \text{ képlet. } \frac{1}{Pe'} \frac{\partial^2 E(\theta)}{\partial \zeta^2} - \frac{\partial E(\theta)}{\partial \zeta} = \frac{\partial E(\theta)}{\partial \theta}$$

ahol  $Pe'$  a *Peclet-szám* komponens-transzportra vonatkozó alakja, a konvektív áram és a visszakeveredés (vezetés) arányát kifejező dimenziómentes szám, szokás Bodenstein-számnak is nevezni ( $Bo$ ):

$$158. \text{ képlet. } Pe' = \frac{vL}{D_{eff}}$$

A fenti egyenlet megoldásához két perem és egy kezdeti feltételt kell megadnunk. Ha a készülék nem tartalmazott jelzőanyagot az injektálást megelőzően akkor az alábbi kezdeti feltételt adhatjuk meg:

$$159. \text{ képlet. } \theta \leq 0 \quad E(\theta) = 0$$

A peremfeltételek megadásánál már figyelembe kell vennünk, hogy a készülék előtt és után van-e axiális keveredés, vagyis hogy a készülék komponensátviteli szempontból *nyitott*, vagy *zárt*.

Tekintsünk egy mindkét végén nyitott rendszer. Az érvényes peremfeltételek a következők:

$$160. \text{ képlet. } \zeta \rightarrow -\infty \quad \frac{\partial E(\theta)}{\partial \zeta} = 0$$

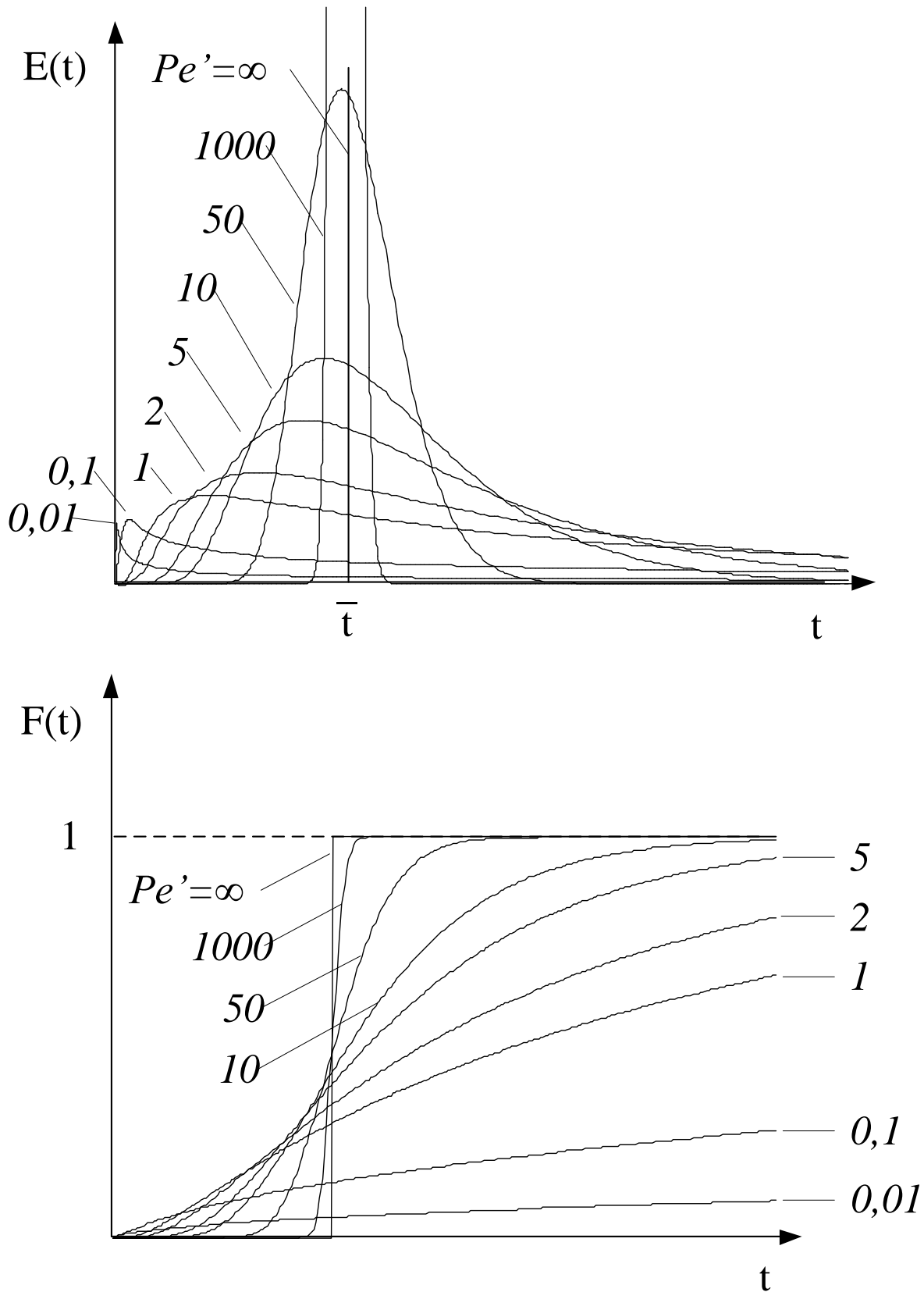
$$161. \text{ képlet. } \zeta \rightarrow +\infty \quad \frac{\partial E(\theta)}{\partial \zeta} = 0$$

ezek figyelembevételével a 157. képlet. egyenlet megoldása a dimenziómentes sűrűségfüggvény:

$$162. \text{ képlet. } E(\theta) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{Pe'}{\theta\pi}} \exp\left[-\frac{Pe'(1-\theta)^2}{4\theta}\right]$$

Ha a  $Pe'$  a végtelenhez közelít ( $vL \gg D_{eff}$ ) az axiális keveredés elhanyagolhatóvá válik a konvekció mellett, ami ideális dugószerű áramlást eredményez. Fordított esetben,

ha  $Pe'$  a nullához közelít ( $\nu L \ll D_{eff}$ ), a visszakeveredés a meghatározó és a rendszer tökéletesen kevert üstként viselkedik. Ezt szemlélteti a 33. ábra.

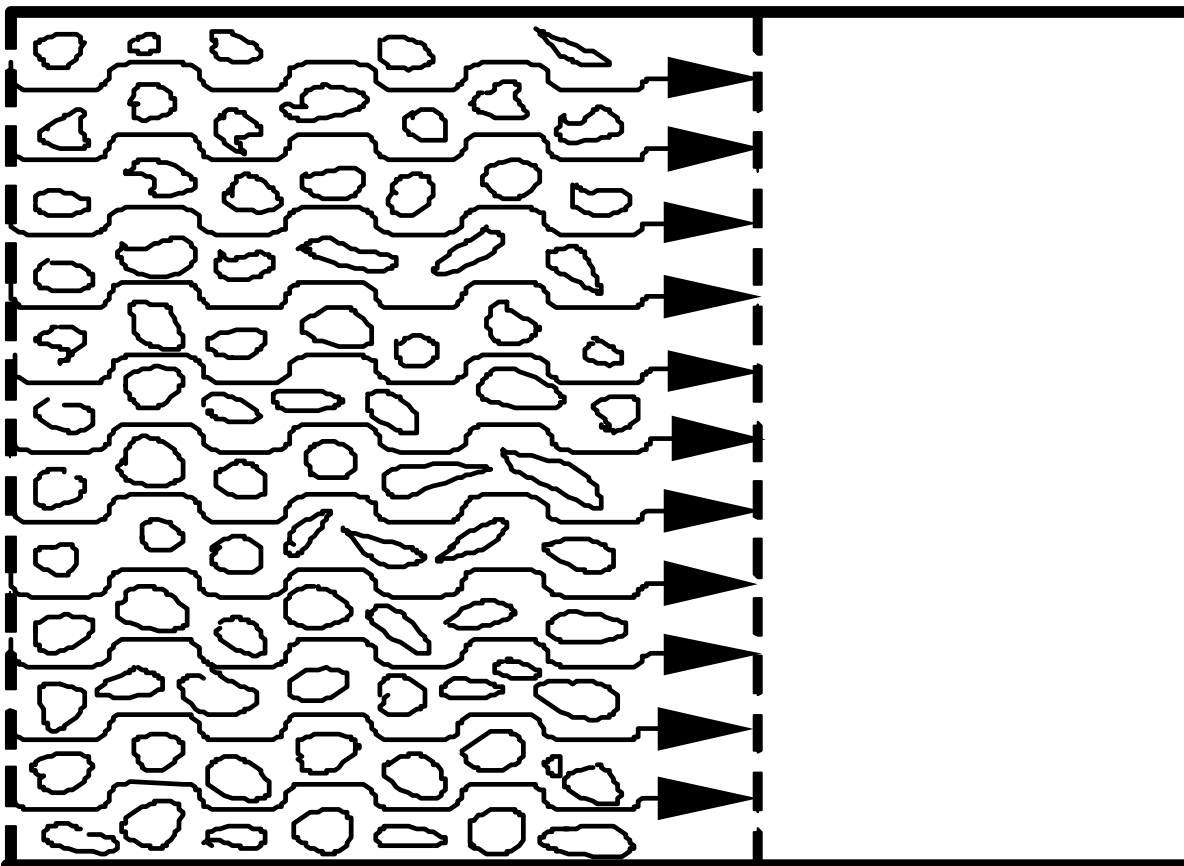


33. ábra Visszakeveredéssel áramlású cső tartózkodási idő sűrűség- és eloszlásfüggvénye a  $Pe'$  szám függvényében.

## Áramlás töltetet tartalmazó csőben

Sok vegyipari készülék tartalmaz valamilyen szilárd töltetet. Ezek egyik jellemző tulajdonsága az *ürestérfogati hányad*, ami az üres térfogat és a készülék térfogatának hányadosa:

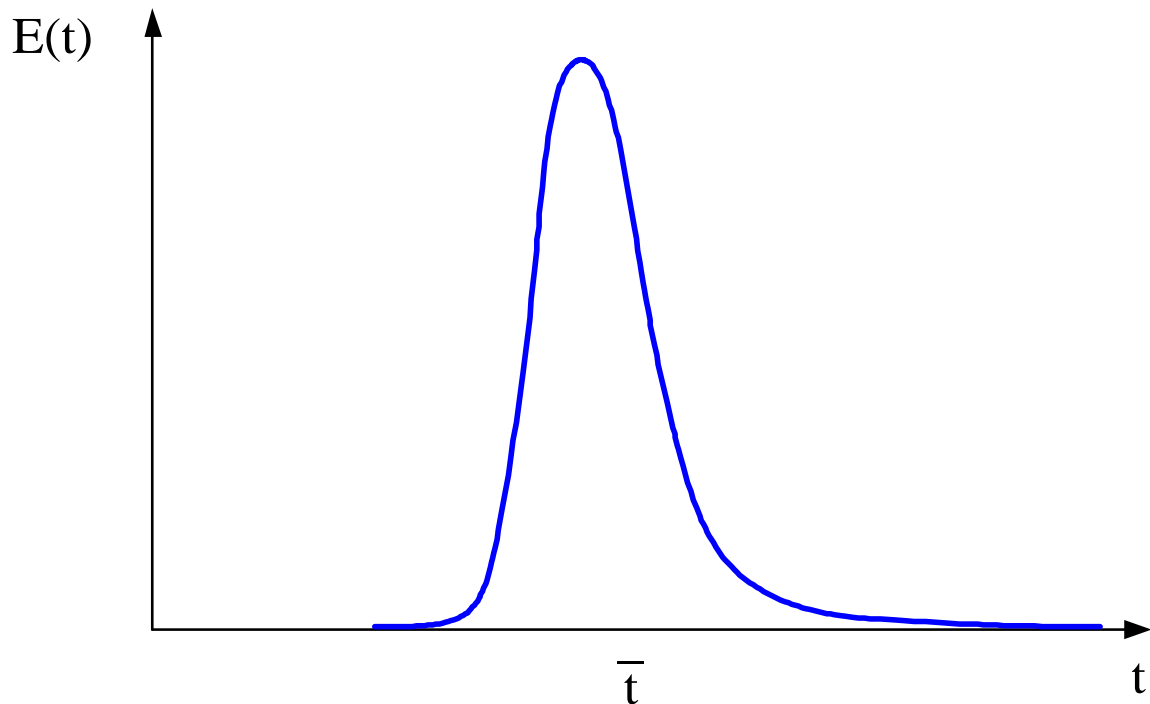
163. képlet.  $\varepsilon = \frac{V_{\dot{u}}}{V}$



34. ábra Töltetes cső sebességprofilja.

A töltet között áramló fluidum úgy halad, mintha a készülék sok párhuzamos csatornára lenne osztva. Egy-egy csatorna átmérőjét *hidraulikus átmérőnek* nevezzük, ez közelítőleg megegyezik a töltet méretével. A csatornák kialakulása miatt csökken a visszakeveredés mértéke, ezért azonos áramlási sebesség mellett a töltetes berendezések jobban megközelítik az ideális dugószerű áramlást, mint a töltet nélküli berendezések. Az ilyen típusú berendezések tartózkodási idő sűrűségfüggvénye szimmetrikusabb, jobban közelít a Gauss-görbéhez. Az átlagos tartózkodási idő az alábbi képlettel számítható:

164. képlet.  $\bar{t} = \frac{\varepsilon V}{\dot{V}} = \frac{\varepsilon L}{\bar{v}}$



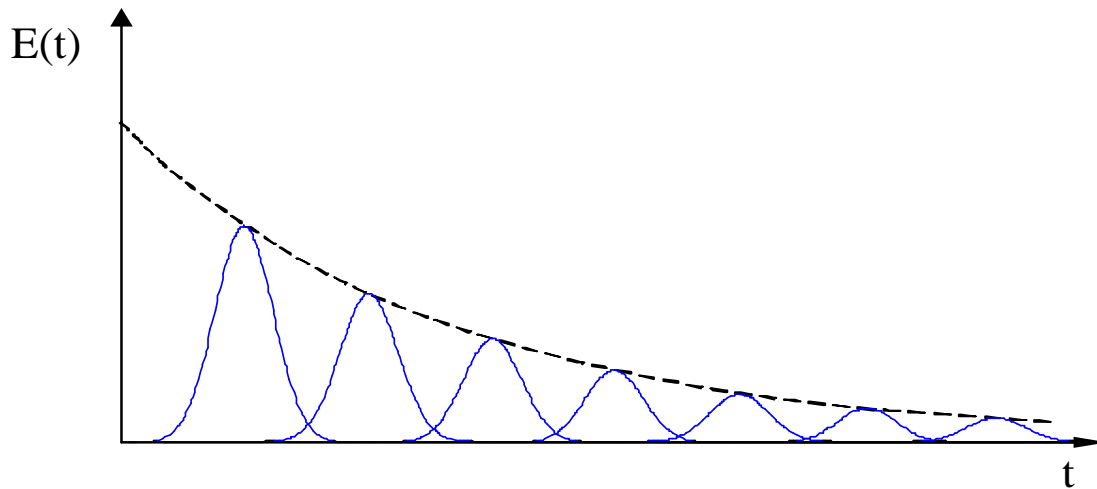
35. ábra Tartózkodási idő sűrűségfüggvény töltetes csőben.

### Cső recirkulációval

Bizonyos esetekben a reaktorból kilépő áram egy részét visszavezetik a reaktor elé, ami azt eredményezi, hogy a jelzőanyag egy része újra meg újra megjelenik a betáplálási áramban. Ha a recirkuláció mértéke elég nagy ( $R \rightarrow \infty$ ) a rendszer úgy viselkedik, mint egy tökéletesen kevert üst. A 37. ábra egy recirkulációs árammal ellátott reális cső tartózkodási idő sűrűségfüggvényét ábrázolja. Szaggatott vonallal jelöltük a tökéletesen kevert üstre jellemző válaszfüggvényt.



36. ábra Cső recirkulációs árammal.

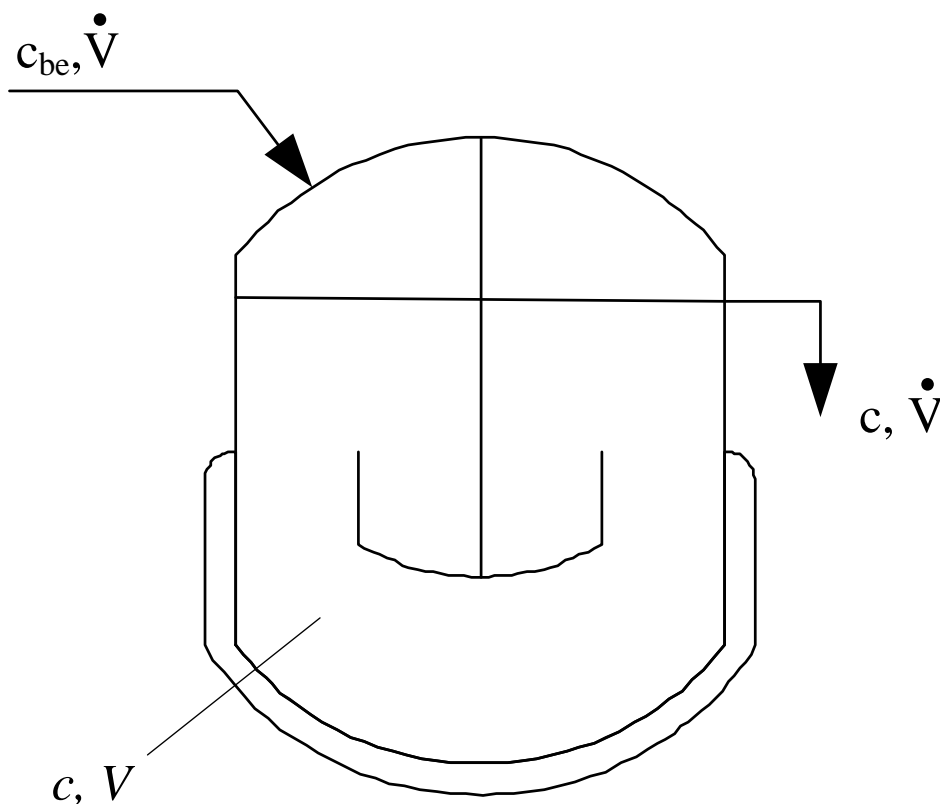


37. ábra Recirkulációs reális cső tartózkodási idő sűrűségfüggvénye.

### Tökéletesen kevert üst

Egy folyamatos üzemű, tökéletesen kevert üstben az intenzív állapotjelzők gradiense nulla, ezért csak a ki és belépő pontokra írható fel mérlegegyenlet:

165. képlet.  $V \frac{\partial c}{\partial t} = \dot{V}(c_{be} - c)$



38. ábra Tökéletesen kevert üst.

A fenti egyenletet átrendezzük és integráljuk:



$$166. \text{ képlet. } \int_0^c \frac{c}{c_{be} - c} dc = \frac{\dot{V}}{V} \int_0^t dt$$

$$167. \text{ képlet. } \frac{c}{c_{be}} = 1 - e^{-\frac{t}{\bar{t}}}$$

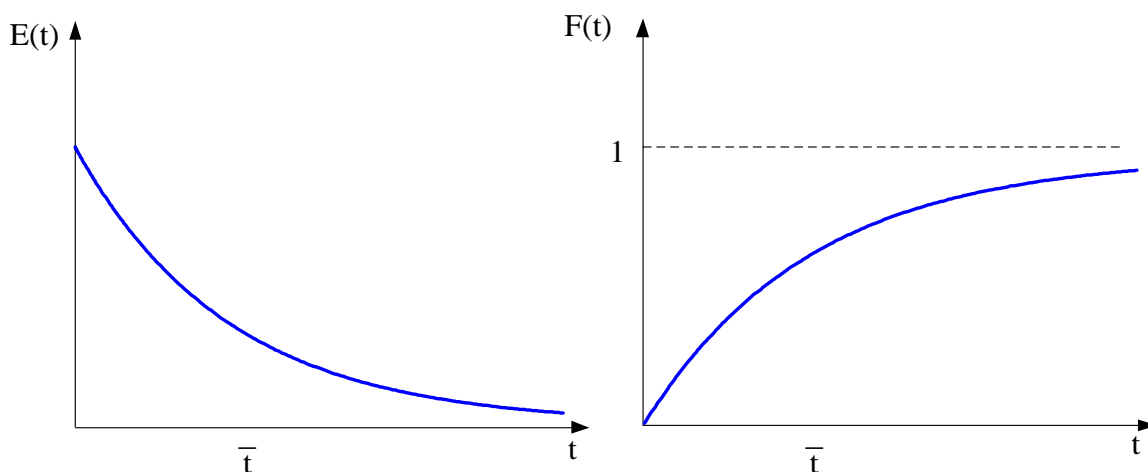
A fenti képlet bal oldala az egységugrás függvényre adott válasz, azaz a tökéletesen kevert üst tartózkodási idő eloszlásfüggvénye:

$$168. \text{ képlet. } F(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\bar{t}}}$$

Innen a tartózkodási idő sűrűségfüggvény és annak dimenziómentes alakja:

$$169. \text{ képlet. } E(t) = \frac{1}{\bar{t}} e^{-\frac{t}{\bar{t}}}$$

$$170. \text{ képlet. } E(\theta) = e^{-\theta}$$



39. ábra Tökéletesen kevert üst tartózkodási idő sűrűség- és eloszlásfüggvénye.

## Tökéletesen kevert üstkaszád

Több tökéletesen kevert üst sorbakapcsolásával ún. *üstkaszád*ot hozhatunk létre (40. ábra). Egy  $N$  elemű kaszkád  $i$ -edik elemére a 165. képlet. analógiájára a következő egyenlet írható fel:

$$171. \text{ képlet. } V_i \frac{\partial c_i}{\partial t} = \dot{V}(c_{i-1} - c_i)$$

Amennyiben azonos méretű üstöket kapcsolunk sorban, az átlagos tartózkodási idő megegyezik mindegyik üstre:

172. képlet.  $\bar{t}_i = \frac{V_i}{\dot{V}} = \frac{V}{N\dot{V}} = \frac{\bar{t}}{N}$

$\theta$  dimenziómentes idő bevezetésével:

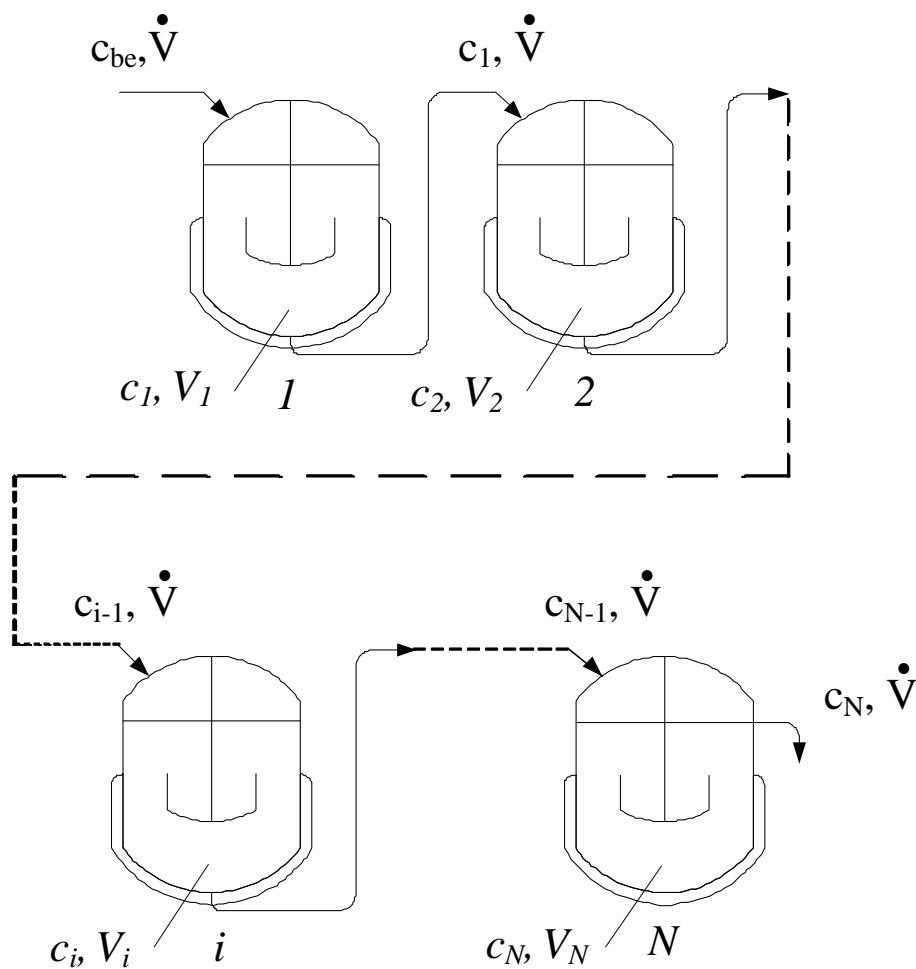
173. képlet.  $\theta = \frac{t}{\bar{t}_i N}$

174. képlet.  $\frac{1}{N} \frac{\partial c_i}{\partial \theta} = c_{i-1} - c_i$

A fenti egyenlet megoldás:

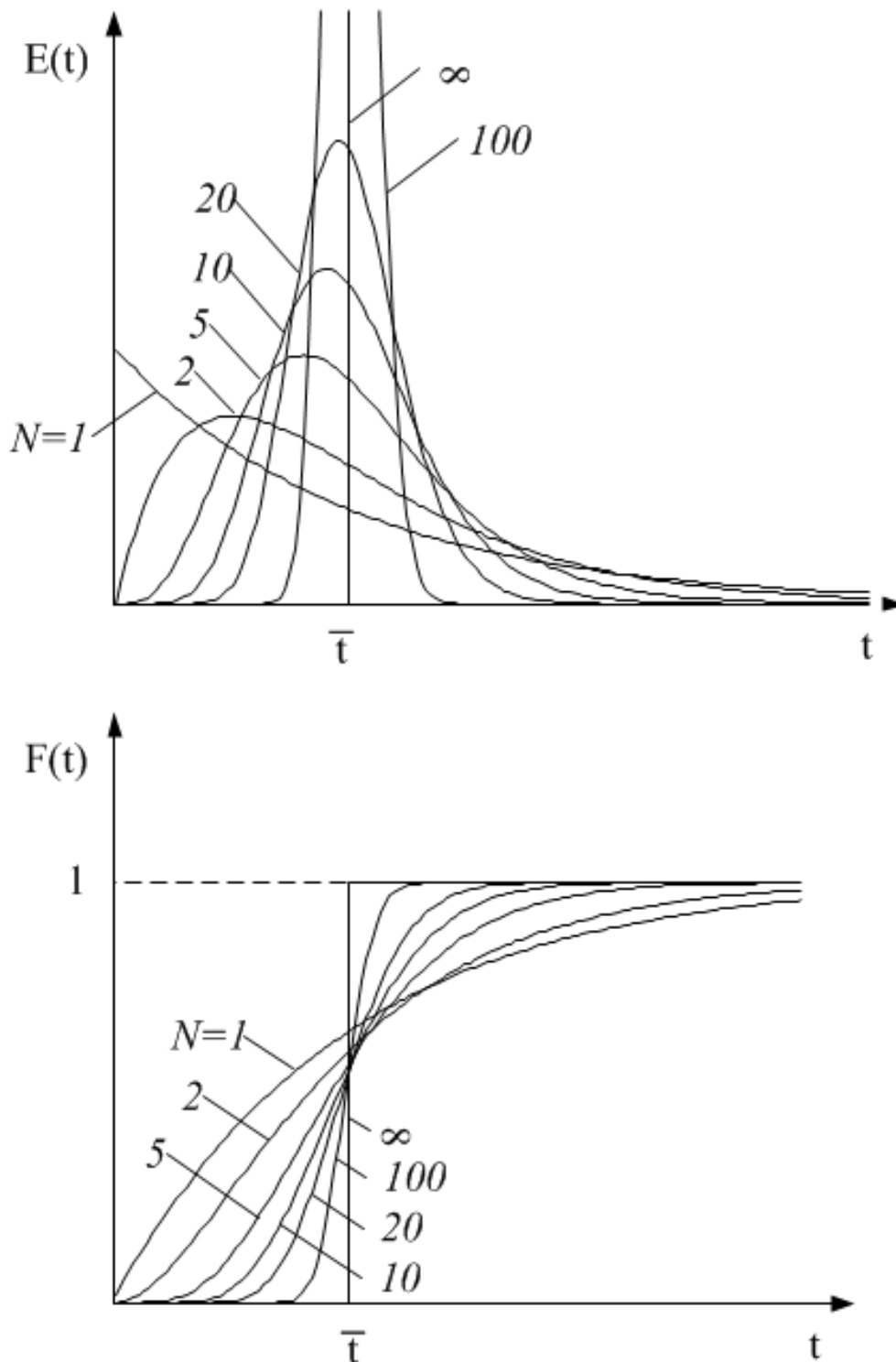
175. képlet.  $E(\theta) = N^N \theta^{N-1} \frac{e^{-N\theta}}{(N-1)!}$

176. képlet.  $F(\theta) = 1 - e^{-N\theta} \left[ \sum_{i=1}^N \frac{(N\theta)^{i-1}}{(i-1)!} \right]$

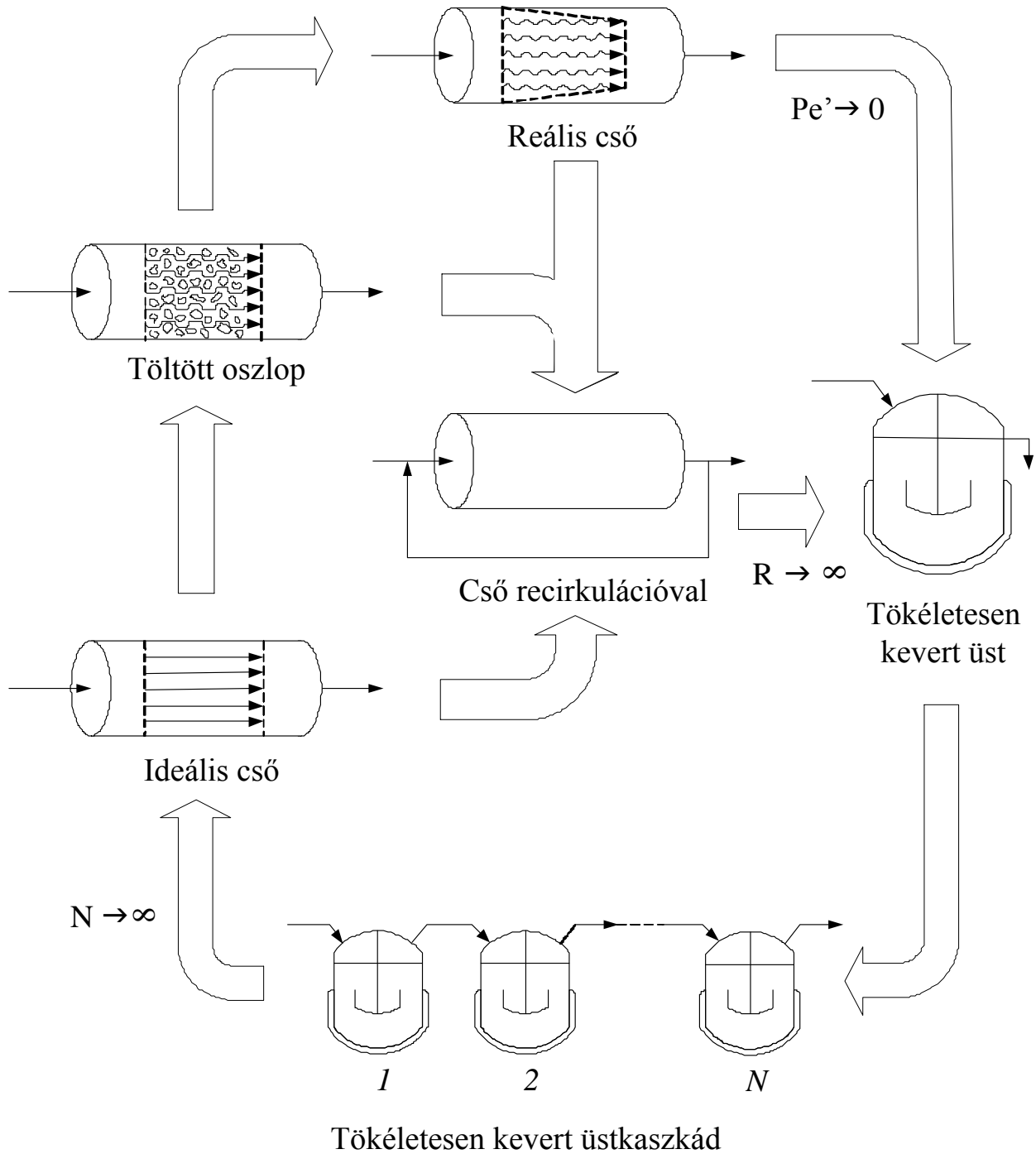


40. ábra Tökéletesen kevert üstkaszád.

A 41. ábra a tartózkodási idő eloszlás sűrűség- és eloszlásfüggvényt ábrázolja az elemszám függvényében. Jól látható, hogy ha  $N$  tart a végtelenbe, az eloszlás függvény impulzus függvénnyel írható le. Vagyis a dugószerű áramlás tartózkodási idő eloszlása jól modellezhető végtelen számú tökéletesen kevert üstből álló kaszáddal. A 42. ábra tartózkodási idő eloszlás szerint csoportosítottuk a főbb berendezés típusokat.



41. ábra Tökéletesen kevert üst tartózkodási idő sűrűség- és eloszlásfüggvénye.



42. ábra Vegyipari berendezések csoportosítása tartózkodási idő eloszlás szerint.

## Hidraulikus műveletek

Dr. Gulyás Lajos, Debreceni Egyetem

### Jelmagyarázat

Latin betűk:

A	Keresztmetszet, m <sup>2</sup>
a <sub>k</sub>	Kezdeti gyorsulás, m/s <sup>2</sup>
C	Szűrési állandó, Pas/m <sup>2</sup>
D	Átmérő, m
d	Keverőkar hossza, m
Eu	Euler-szám
F	Erő, N
f	Fanning-féle súrlódási tényező
f <sub>k</sub>	Közegellenállási tényező
Fr	Froude-szám
g	Nehézségi gyorsulás, m/s <sup>2</sup>
h	magasság, m
j	Centrifuga jelzőszáma
K	Fluidizációs szám
k	Nedvesített kerület, m
	Konzisztenciatényező
	Cső érdessége, m
	Konstans
L	Hosszúság, m
m	Tömeg, kg
ṁ	Tömegáram, kg/s
n	Folyási index
	Fordulatszám, 1/s
	Részecskeszám
p	Nyomás, Pa
P	Teljesítmény, W
R	Cső sugara, m
r	Sugár, m
Re	Reynolds-szám
S	Felület, m <sup>2</sup>
t	Idő, s
v	Sebesség, m/s
V	Térfogat, m <sup>3</sup>
ṽ	Térfogatáram, m <sup>3</sup> /s
w	Keverőlapát szélessége, m
W	Munka, J
x	Helykoordináta, m
y	Helykoordináta, m
z	Helykoordináta, m

Görög betűk:

α	Szűrőréteg fajlagos ellenállása,
γ	Impulzusátadási tényező, kg/m <sup>2</sup> s

$\varepsilon$	Átadási tényező, m/s Üres térfogati hányad
$\zeta$	Veszteségtényező
$\eta$	Dinamikai viszkozitás, Pas
$\lambda$	Csősúrlódási tényező
$\rho$	Sűrűség, kg/m <sup>3</sup>
$\tau$	Nyíró,- vagy csúsztatófeszültség, N/m <sup>2</sup>
$\nu$	Kinematikai viszkozitás, m <sup>2</sup> /s
$\nabla$	Nabla operátor
$\omega$	Fajlagos felület, m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> Szögsebesség, 1/s

Alsó Indexek:

b	Bruttó
c	Centrifugális
f	Fluidum Felhajtó
g	Gravitáció Nehézségi
h	Hidraulikus Magasságkülönbség Határ Hipotetikus
i	Iszap
k	Keveredés Karakterisztikus Konzisztencia Közegellenállás Kezdeti
L	Laboratórium
ny	Nyomó
0	Töltet előtti, üres
S	Felület
s	Súly Súrlódó
sz	Szivattyú
P	Plasztikus
LP	Lineár plasztikus
NP	Nemlineár plasztikus
p	Részecske
pa	Parabolikus
ü	Üres Ülepedés
v	Veszteség
V	Térfogat
V/S	Térfogat és felület aránya
max	Maximum
min	Minimum
x	Helykoordináta
y	Helykoordináta
z	Helykoordináta

## Hidraulikus műveltek

A folyadékokat és a gázokat (gőzöket) közös néven fluidumoknak nevezzük. Fluidumok áramlásával, keverésével, inhomogén elegyek szétválasztásával (ülepítés, szűrés, centrifugálás, stb.) kapcsolatos műveletek a hidrodinamika tárgykörébe tartoznak. Ezeket a folyamatokat az áramlástan egyenletei írják le amelyeket, az impulzus megmaradást leíró mérlegegyenletből származtatjuk. Az áramlástan törvényei azért fontosak, mert jelentősen meghatározzák az ipari készülékekben lejátszódó hő- és anyagátviteli folyamatokat, valamint a kémiai reakciók jellegét is.

## A fluidumok áramlása

Az áramló közeget, összenyomhatóság szempontjából két csoportba sorolhatjuk. Vannak olyan fluidumok, amelyeknek térfogata az áramlás során állandó, ezek a folyadékok, és jellemző rájuk, hogy inkompresszibilisek (összenyomhatatlanok). Vannak olyan fluidumok, amelyeknek térfogata az áramlás során változhat, ezek a gázok, és jellemző rájuk, hogy kompresszibilisek (összenyomhatók).

A fluidumok stacionárius (időben állandósult) áramlását az áramló közeg  $\dot{V}$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) térfogatáramával, az áramló közeg  $\dot{m}$  ( $\text{kg}/\text{s}$ ) tömegáramával, a fluidum átlagos áramlási sebességével  $v$  ( $\text{m}/\text{s}$ ), a fluidum sűrűségével  $\rho$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), és a fluidum áramláshoz rendelkezésre álló áramlási keresztmetszettel  $A$  ( $\text{m}^2$ ) jellemezhetjük. A fluidum átlagos áramlási sebességét a fluidum többi jellemzőivel az alábbi összefüggéssel adhatjuk meg:

$$8.1. \text{ képlet. } v = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{\dot{m}}{A\rho}$$

Az áramlás igen gyakran kör keresztmetszetű  $D$  átmérőjű csőben történik. Ebben az esetben az áramlási keresztmetszet  $A = D^2\pi/4$ , ekkor a (8.1) egyenlet:

$$8.2. \text{ képlet. } v = \frac{4\dot{V}}{D^2\pi} = \frac{4\dot{m}}{D^2\pi\rho}$$

A fluidumok áramlását áramvonalakkal szemléltetjük. Áramvonal a fluidum részecske mozgását leíró pályavonal, mely adott pillanatban, az áramló közeg minden pontjában az áramlás irányába mutat. Az áramlást a Reynolds számmal ( $Re$ -szám) jellemezzük, amelynek csőhidraulikában használt alakja:

$$8.3. \text{ képlet. } Re = \frac{vD\rho}{\eta} = \frac{vD}{\nu}$$

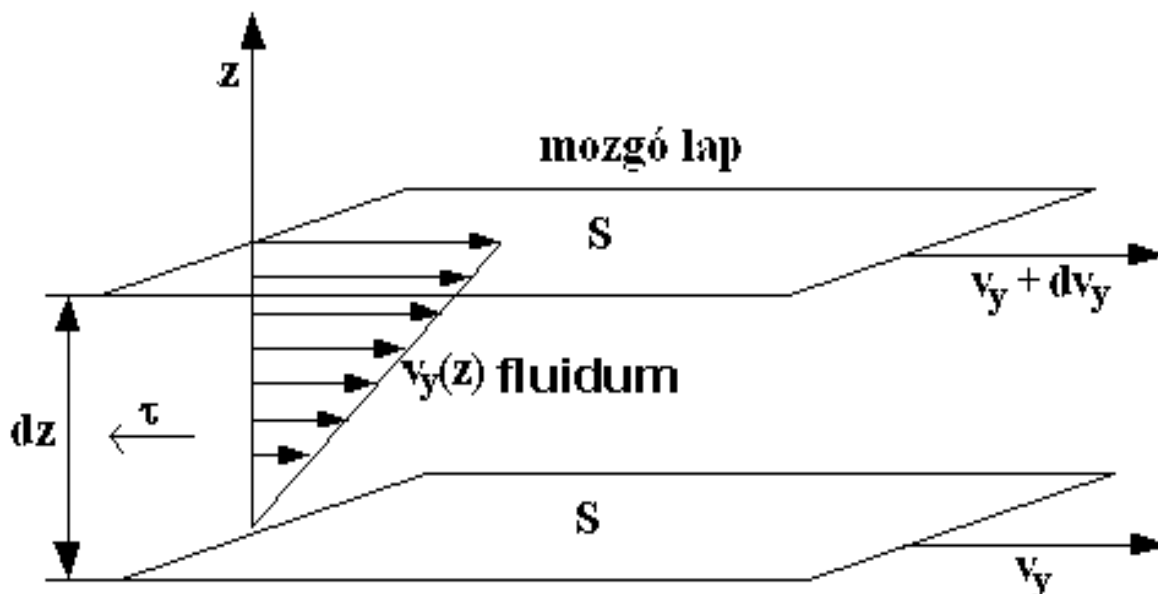
A  $Re$ -szám egy dimenzió nélküli mennyiség, egy áramló rendszerben, a tehetetlenségi erő és a belső súrlódó erő hányadosa, (módosított  $Re$ -szám azzal arányos), ahol  $\eta$  ( $\text{Pas}$ ) a fluidum dinamikus- és  $\nu$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) a fluidum kinematikus viszkozitása. Természetese, ha a (8.2) egyenletet behelyettesítjük a (8.3) egyenletbe, akkor a  $Re$ -számot kifejezhetjük a térfogatárammal, illetve a tömegárammal is. Az áramlás lamináris (réteges), ha a  $Re$ -szám egy adott kritikus érték alatt van. Lamináris

áramlásnál az áramvonalak teljes hosszukban elkülönülnek egymástól, és a fluidum részecskék párhuzamos trajektóriákon haladnak.

Ha a  $Re$ -szám túllépi egy kritikus értéket, akkor az áramlásnál a kezdeti instabil (átmeneti) szakaszban örvények keletkeznek, amelyek a  $Re$ -szám növelésével erősödnek, gyorsan szétterjednek a fluidumban, és az áramvonalakat szétzilálják. Az így létrejött elsődleges transzlációs mozgásra szuperponálódott örvénylést, turbulens (örvénylő, gomolygó) áramlásnak nevezzük. A tartózkodási időre, keveredési viszonyokra, anyag- és hőátadásra gyakorolt hatás szempontjából, az áramlás különösen jelentős, ha turbulens tartományban megy végbe. Turbulens áramlásnál a folyadék részecskék mozgása nem stacionárius, hanem kaotikus, amelynél az áramlás sebessége rendszertelenül ingadozik egy közepes érték körül. A lamináris és turbulens mozgás határa nem egy meghatározott érték, hanem egy tartomány, amit átmeneti tartománynak nevezünk, és nagysága az áramló folyadéktól is függ. Az átmeneti tartomány kezdetéhez, egy jellemző  $Re_{kr}$ , kritikus  $Re$ -számot rendelnek. Különböző hidrodinamikai műveletekben a kritikus  $Re$ -szám és az áramlástan tartomány nagyságrendekkel is különbözhet egymástól. A folyadékok áramlásakor mindig fellépnek rendezetlen mozgások. Ha a  $Re$ -szám a kritikus értéknél kisebb, akkor ezek a rendezetlen mozgások csillapítják egymást, ha a kritikus értéknél nagyobb, akkor erősítik egymást és gomolygó mozgás alakul ki. Ez az állapot az áramlás sebességétől függetlenül is kialakulhat, ha például a folyadék áramlásának útjába valamilyen betétet helyezünk, ami ezt a rendezetlen mozgást okozza, vagy azok csillapodását megakadályozza. A rendezetlen mozgás kialakulhat olyan esetekben is, amikor ezt a  $Re$ -szám értéke nem indokolja. Ezeket a jelenségeket úgy szokták figyelembe venni, hogy a  $Re$ -számot módosítják. Például, ha a folyadék olyan készüléken halad keresztül, amelyben mechanikus keverőt üzemeltetünk, nyilvánvalóan a  $Re$ -számtól függetlenül is kialakulhat a rendezetlen mozgás. Ebben az esetben olyan, módosított  $Re$ -számot vezetnek be, ahol a sebesség helyébe a mechanikus keverő kerületi sebességét veszik figyelembe.

A fluidumok áramlásakor a fluidumban nyírófeszültség lép fel. A nyírófeszültség a fluidum egy pontján átmenő, valamely síkhoz tartozó feszültségvektor síkba eső összetevője. A fluidum tehát olyan anyag, melyben nyírófeszültség hatására állandó deformáció jön létre. A valóságos fluidumok ellenállását ezzel a deformációval szemben konzisztenciának nevezzük. Gázokban és egyszerű (newtoni) folyadékokban, meghatározott statikus nyomáson és hőmérsékleten a konzisztencia állandó, és ezekben a közegekben a konzisztenciát viszkozitásnak nevezzük. A viszkozitás kvantitatív leírásához tekintsük a 43. ábra.





43. ábra. Nyírófeszültség és sebességeloszlás kialakulása két párhuzamos lap között

Legyen két  $S$  ( $m^2$ ) felületű folyadék- vagy gázréteg egymástól  $dz$  (m) távolságban. A felső réteg az alsóval párhuzamosan, és az alsóhoz viszonyítva  $y$  irányban  $dv_y$  (m/s) relatív sebességgel mozog. A mozgás fenntartásához szükséges  $F$  (N) erő gázban vagy newtoni folyadékokban:

8.4. képlet. 
$$F = -\eta S \frac{dv_y}{dz}.$$

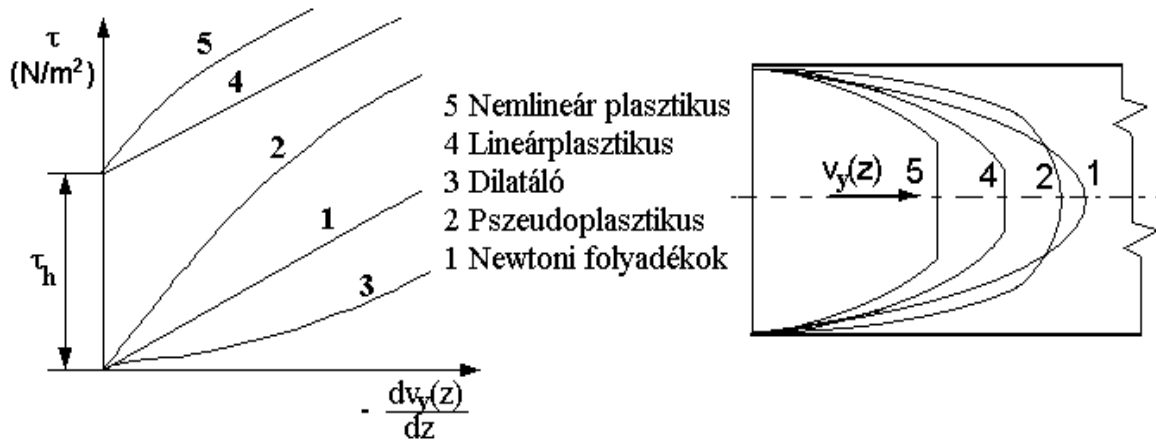
A (8.4) egyenletet Newton-egyenletnek nevezzük, és az egyenlet átrendezve a  $\tau$  ( $N/m^2$ ) csúsztató feszültséget (nyíró- vagy súrlódási feszültséget) kapjuk:

8.5. képlet. 
$$\tau = \frac{F}{S} = -\eta \frac{dv_y}{dz},$$

ahol a  $dv_y/dz$  a sebesség gradiense.

A viszkozitás ennek alapján az impulzus vezetőképességnek tekinthetjük, hasonlóan a hő vezetéshez, vagy a komponens diffúziójához. A newtoni folyadékok a (8.4) egyenlet szerint viselkednek. Ilyen folyadék a víz, vizes oldatok, szerves oldószerek, egyes olajok, glicerin, stb., de ezt a szabályt követik a gázok is.

A nemnewtoni folyadékokra jellemző, hogy a fluidum konzisztenciája nemcsak a hőmérséklettől és a nyomástól, hanem a nyírófeszültségtől is függ. Ha a fluidumok áramlásához szükséges csúsztatófeszültséget ábrázoljuk a  $-dv_y/dz$ , negatív sebesség gradiens függvényében, akkor az úgynevezett folyási, vagy reológiai görbéhez jutunk. A newtoni és nemnewtoni fluidumokra jellemző folyásgörbéket, és lamináris áramlásnál kör keresztmetszetű csőben kialakuló sebesség profilokat a 44. ábra mutatja.



44. ábra. A newtoni és a nemnewtoni folyadékok folyásgörbéi, és sebesség profiljai csőben

A 44. ábra (1. görbe) a newtoni fluidumokra jellemző nyírófeszültség és sebesség gradiens közötti összefüggés egyszerű arányosság, a függvény az origóból kiinduló egyenes. Az arányossági tényező a dinamikus viszkozitás, melynek értéke a sebesség gradienstől, a  $dv_y/dz$ -től független anyagi állandó. Nemnewtoni folyadékoknál a sebesség gradiens és a csúszató feszültség között többféle kapcsolat lehetséges. Pszeudoplasztikus- és a dilatáló folyadékoknál, (2. és 3. görbe) a nyírófeszültség és a sebesség gradiens aránya függ a  $\tau$  nagyságától. A sebesség gradiens és a csúszatófeszültség közötti kapcsolatot hatványfüggvény jellemzi:

8.6. képlet. 
$$\tau = -k \left( \frac{dv_y}{dz} \right)^n,$$

ahol  $k$  konzisztencia tényező és  $n$  folyási index, mindkettő anyagjellemző. Ha a hatványkitevő kisebb 1-nél, a mozgás megindításához nagy feszültség szükséges, mivel az origóban nagy az iránytangens, a fenntartásához viszont már kisebb, az iránytangens csökken. Ezek a pszeudoplasztikus folyadékok, és a legtöbb nemnewtoni folyadék ebbe a csoportba tartozik, például polimer oldatok, olvadékok, keményítő szuszpenziók, festékek, zselatin vagy a híg trágyák.

Ha a hatványkitevő 1-nél nagyobb, akkor a mozgás fenntartásához egyre nagyobb feszültség szükséges. Ezek a dilatáló folyadékok, mint például nagy mennyiségű szilárd szuszpenziót tartalmazó folyadékok, az ásványi porokat tartalmazó zagy, vagy egyes lakkok.

A Bingham féle plasztikus közegre jellemző, (4. és 5. görbe), hogy a folyás csak akkor indul meg, ha a csúszatófeszültség meghalad egy  $\tau_h$  határértéket. A plasztikus folyadékok is lehetnek lineárisak és nemlineárisak. Ha a  $\tau_h$  határérték fölött a csúszatófeszültség egyenesen arányos a sebesség gradienssel, mint a newtoni esetben, akkor a folyadék lineárpasztikus:

8.7. képlet. 
$$\tau = -\eta_p \frac{dv_y}{dz} + \tau_h,$$

ahol  $\eta_p$  a látszólagos vagy plasztikus viszkozitási együttható, és  $\tau_h$  a határfeszültség, mindkettő anyagjellemző. Például ilyen folyadék a víztisztító telep iszapjai, egyes agyag szuszpenziók, a folyékony beton, olajfesték, fogkrém, stb.

Bizonyos Bingham fluidumok nyírófeszültségének lefutása felfelé, vagy lefelé kis mértékben görbülhet. Ezek az úgynevezett nemlineárplasztikus folyadékok. A nemlineárplasztikus folyadékokra jellemző, hogy a csúsztatófeszültség mind a pszeudoplasztikus, mind a lineárplasztikus tulajdonságokat tükröz:

$$8.8. \text{ képlet. } \tau = -k \left( \frac{dv_y}{dz} \right)^n + \tau_h$$

Ilyen folyadék a bentonit, a tengeri eredetű iszapok, valamint a szennyvíztisztító telepek friss és fölös iszapja, sűrű szuszpenziók, paszták és zagyok, folyékony beton, olajfestékek stb.

Léteznek, az úgynevezett időfüggő newtoni folyadék, melyek közül a legfontosabb a tixotrop folyadékok. A látszólagos viszkozitás itt már nemcsak a sebesség gradienstől, hanem a nyírás idejétől is függ. A tixotrop folyadékok esetében az állandó nyírófeszültség ideje alatt a folyadék szerkezete felbomlik és a folyékonyság nő. A feszültség megszűnése után azonban a folyadék szerkezet fokozatosan helyreáll és a folyás megszűnik. Ide tartoznak az egyes festékfajták, a kefir és a tejtermékek. Vannak még az úgynevezett maxwelli fluidumok. Ebbe a csoportba tartoznak a rugalmas folyadékok. Ezek a folyadékok a nyírófeszültség hatására folynak, de a feszültség megszűnése után részben felveszik a szilárd test alakját. Ilyenek a műgyanták, bitumenek és a tésztakonvizisztenciájú anyagok.

A hidraulikus műveletek kvantitatív leírásához mindenekeelőtt meg kell ismerkednünk az áramlástan alapegyenleteivel.

## A fluidum áramlás alapegyenletei

Navier-Stokes egyenlet, az áramlástan alapegyenlete, ami a mozgásmennyiségre (impulzusra) adja meg a megmaradási tételt és Gibbs-féle vektor differenciálegyenlettel felírt alakja

$$8.9. \text{ képlet. } \rho \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{v} \nabla \bar{v} \right) = -\nabla p + \eta \nabla^2 \bar{v} + \rho \bar{g},$$

ahol  $p$  (Pa) a nyomást,  $t$  (s) az időt és  $\nabla$  a nabla vektort jelöli. A Navier-Stokes egyenletet, hasonlóan a Damköhler egyenletekhez, kibővítették az impulzus átadás taggal

$$8.10. \text{ képlet. } \text{Div} \{ \rho \bar{v} \circ \bar{v} \} + \text{Div} \{ -\eta \text{Grad} \bar{v} \} + \gamma \omega \Delta \bar{v} + \text{grad} p - \rho \bar{g} = -\frac{\partial(\rho \bar{v})}{\partial t},$$

ekkor megkapjuk a Benedek-László mérlegegyenlet impulzusra felírt alakját, ami a (8.9) egyenlettől általánosabb és a viszkózus folyadékok teljes áramlását fejezi ki. A (8.10) egyenletben  $\gamma$  (kg/m<sup>2</sup>s) az impulzus átadási tényezőt,  $\omega$  (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>) a fajlagos felületet,  $\Delta \bar{v}$  a sebességvektor különbségét jelöli. A (8.10) egyenlet is vektor differenciálegyenlet, egy másik alakban felírva, ahol a nagy kezdőbetűvel jelzett Div nem egyszerű divergencia, mert a kapcsos zárójelbe tett mennyiségek másodrendű tenzorok.

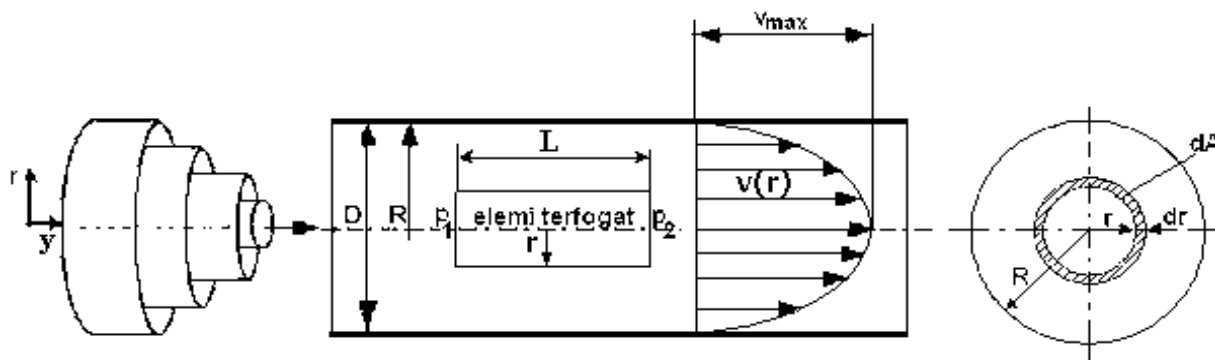
## A fluidum áramlása csőben, a Hagen-Poiseuille-egyenlet

A fluidumok igen gyakran kör keresztmetszetű csőben áramlanak. Folyadékok áramlása esetén a csőhidraulikában a lamináris és turbulens áramlás közötti átmeneti tartomány  $Re=2000-4000$  között van. Víz esetén kritikus Reynolds számnak  $Re_{kr} = 2320$  értéket fogadtak el, amely gyakran egyéb folyadékok esetén is elfogadható becslést ad.

A (8.10) egyenlet analitikusan csak néhány speciális esetben integrálható. Nézzük az impulzus áramnak azt az esetét, amikor a folyadék kis átmérőjű vízszintes csőben, kis sebességgel, stacionárius körülmények között laminárisan áramlik. Ekkor a (8.10) egyenletből tehetetlenségi erő (a konvektív tag) elhanyagolható a súrlódási erőhöz (a vezetési taghoz) képest. Átadás nem lévén, marad az impulzusforrást jelentő tagból a  $\text{grad } p$  és a vezetési tag, ami hengerkoordináta rendszerben:

$$8.11. \text{ képlet. } \frac{dp}{dz} = \eta \left[ \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dv_z}{dr} \right) \right]$$

A folyadék kör keresztmetszetű csőben áramlik, a különböző sebességű rétegek koaxiális hengerfelületeket alkotnak, amelyek egymással párhuzamosan haladnak. Tekintsünk a 45. ábra, ahol egy  $R$  sugarú vízszintes csőben, a folyadék laminárisan áramlik.



45. ábra. A newtoni fluidum lamináris áramlása kör keresztmetszetű csőben

Legyen a  $v(r)$  a lineáris áramlási sebesség, a cső tengelyétől számított  $r$  távolságban. A folyadék áramlását fékező  $F_s$  súrlódó erő, az  $L$  hosszúságú csőszakaszon, a (8.4) egyenlet alapján.

$$8.12. \text{ képlet. } F_s = -\eta(2r\pi L) \frac{dv}{dr}.$$

Ha az áramlás  $(p_1 - p_2)$  nyomáskülönbség hatására jön létre, akkor az áramlás hajtóereje:

$$8.13. \text{ képlet. } F_h = (p_1 - p_2) r^2 \pi.$$

Stacionárius esetben a két erő egymással egyenlő:

$$8.14. \text{ képlet. } -\eta(2r\pi L)\frac{dv}{dr} = r^2\pi(p_1 - p_2).$$

A változókat szétválasztva, és az integrálás határait kijelölve írhatjuk:

$$8.15. \text{ képlet. } -\int_v^0 dv = \frac{(p_1 - p_2)}{2\eta L} \int_r^R r dr.$$

Tekintve, hogy a cső falánál  $r = R$  helyen  $v(R) = 0$ , áramlási sebesség nulla, az integrálást elvégezve, megkapjuk az  $r$  sugár mentén fellépő  $v(r)$  sebesség eloszlását:

$$8.16. \text{ képlet. } v(r) = \frac{p_1 - p_2}{4\eta L} (R^2 - r^2) = \frac{(p_1 - p_2)R^2}{4\eta L} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right].$$

Azonos eredményt kapunk, ha a (8.11) egyenletet, az adott feltételek mellett kétszer integráljuk. A sebesség tehát parabolikus, és maximuma a cső tengelye mentén az  $r=0$  helyen:

$$8.17. \text{ képlet. } v_{\max} = v(0) = \frac{p_1 - p_2}{4\eta L} R^2 = \frac{p_1 - p_2}{16\eta L} D^2.$$

A csövön átfolyt folyadék,  $\dot{v}$  ( $m^3/s$ ) térfogatárama megadható a következő alakban:

$$8.18. \text{ képlet. } \dot{V} = \int_v d\dot{V} = \int_A v(r) dA.$$

Behelyettesítve a  $v(r)$ -t a (8.16) egyenletből, valamint figyelembe véve, hogy

$$8.19. \text{ képlet. } dA = 2\pi r dr,$$

az integrálást elvégezve kapjuk:

$$8.20. \text{ képlet. } \dot{V} = \int_0^v d\dot{V} = \int_0^R \frac{p_1 - p_2}{4\eta L} (R^2 - r^2) 2\pi r dr = \frac{\pi(p_1 - p_2)}{8\eta L} R^4 = \frac{\pi}{128\eta} \frac{(p_1 - p_2)}{L} D^4.$$

Az utóbbi összefüggést, melyet először Hagen, majd tőle függetlenül Poiseuille vezetett le azt mondja, hogy időegység alatt átfolyt fluidum térfogatárama, és természetesen a sűrűséggel szorozva a tömegárama, arányos a hosszúságegységre eső nyomáseséssel, és a cső átmérőjének negyedik hatványával.

A  $v$  átlagos lineáris sebességet a (8.20) egyenletből, a  $\dot{v}$  térfogatáram és az  $A = R^2\pi$  áramlási keresztmetszet hányadosával egyszerűen számíthatjuk:

$$8.21. \text{ képlet. } v = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{\pi(p_1 - p_2)R^4}{8\eta L} \frac{1}{R^2\pi} = \frac{p_1 - p_2}{32\eta L} D^2.$$

Összehasonlítva a (8.17) egyenlet a (8.21) egyenlettel, megállapíthatjuk, hogy lamináris áramlásnál az átlagsebesség a maximális áramlási sebesség fele

**8.22. képlet**  $v = \frac{v_{\max}}{2}$

A pszeudoplasztikus folyadékoknál, (8.6) egyenlet, lamináris áramláskor a sebességeloszlás összetettebb, a korábbi parabolikus newtonitól zömökebb. A  $v$  átlagsebesség, és a maximális sebesség közötti kapcsolat az  $n$  (folyási index) kitevőtől függ:

**8.23. képlet**  $v = v_{\max} \frac{n+1}{3n+1}$

Lineárpasztikus folyadékoknál, (8.7) egyenlet, az áramlás megindulásához  $\tau_h$  határfeszültségnél nagyobb feszültség szükséges. A csőtengely mentén kialakul egy olyan rész, ahol a feszültség ezt a határt nem éri el. A csőfaltól eddig a határig a sebesség nő a newtoni folyadékoknak megfelelően parabolikusan, a tengely környezetében azonban változatlan marad. Itt egy folyadékugó alakul ki, ami állandó sebességgel a merev testekhez hasonlóan mozog.

Nemlineárpasztikus folyadékoknál, (8.8) képlet, szintén kialakul egy merev testként mozgó folyadékugó. A dugón kívül azonban a sebességeloszlás már nem a newtoni parabolát követi, hanem annál zömökebb. A fentiek összegzéseként az egyes folyadéktípusok lamináris sebességprofiljait mutatja a 44. ábra. Az ábrán jól látszik a newtoni és a lineárpasztikus folyadékok karcsúbb parabolája, a zömökebb pszeudoplasztikus és nemlineárpasztikus sebességeloszlás, valamint a pasztikus folyadékok merev testként közlekedő dugója.

## A fluidum áramlás energiatétele, a Bernoulli egyenlet

Az áramlástan műveleteknél az egyik legfontosabb feladat az áramláshoz szükséges energia, illetve az áramláskor fellépő energiavesztés ismerete. A fluidum áramlás energia megmaradásának tanulmányozásához tételezzünk fel ideális, tökéletes newtoni fluidumot. Ezek olyan hipotetikus gázok vagy folyadékok, amelyek a nyírófeszültséggel szemben semmiféle ellenállást nem tanúsítanak, a viszkozitásuk nulla,  $\eta = 0$ , és sűrűségük állandó,  $\rho = \text{állandó}$ . Legyen továbbá stacionárius,  $dv/dt=0$ , impulzus átadás nélküli, (newtoni) folyadék, egyirányú  $v_x = v_z = 0$ ,  $v_y = v$ , és csak nehézségi erőterben  $g_x = g_y = 0$ ,  $g_z = -g$ , történő áramlás. Ekkor a (8.10) egyenletből egydimenziós konvektív és a forrás tag marad:

**8.24. képlet.**  $\rho v \frac{dv}{dy} = -\frac{dp}{dy} - \rho g.$

A (8.24) egyenletet átrendezve kapjuk a Bernoulli egyenlet differenciális alakját

**8.25. képlet.**  $\rho g dz + dp + \rho v dv = 0,$

amely általánosan érvényes kompresszibilis és inkompresszibilis fluidumokra is. A (8.25) egyenletet integrálva a Bernoulli egyenlethez jutunk:

**8.26. képlet.**  $z_1 \rho g + p_1 + \frac{v_1^2 \rho}{2} = \text{konst.}$

A Bernoulli egyenlet az áramló, nulla viszkozitású (súrlódásmentes) fluidum energia megmaradását fejezi ki. Ha a rendszer energetikailag zárt, nem ad le és nem vesz fel energiát, akkor az energia megmaradás értelmében az áramló fluidum összes mechanikai energiataralma állandó és három részre bontható, a magassági- (helyzeti-), a nyomási- és a sebességi (kinetikus) energiára. Az (8.26) egyenletet  $A_1$  és  $A_2$  keresztmetszetekre felírva kapjuk:

**8.27. képlet.**  $z_1 \rho g + p_1 + \frac{v_1^2 \rho}{2} = z_2 \rho g + p_2 + \frac{v_2^2 \rho}{2}.$

A (8.27) egyenlet az egységnyi térfogatú folyadék energia megmaradását adja, így a bennük szereplő fajlagos energiák nyomás dimenziójúak. Ha a (8.27) egyenlet minden tagját elosztjuk  $\rho$ -val

**8.28. képlet.**  $z_1 g + \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = z_2 g + \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2},$

akkor az így kapott egyenlet tagjai sebességnégyzet dimenziójúak, és az egységnyi tömegű fluidum energiáját jelölik. A (8.28) egyenlet gázok számítására is alkalmas. Végül ha a (8.27) egyenlet minden tagját elosztjuk  $\rho g$ -vel

**8.29. képlet.**  $z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g},$

akkor az így kapott egyenlet, az egységnyi súlyú (erő) folyadék energiáját jelöli, és a benne szereplő tagok hosszúság dimenziójúak. Ebben az értelemben beszélhetünk (geodéziai) magasságról, nyomómagasságról és sebességmagasságról.

## A súrlódási nyomásvesztés számítása

Gyakorlatban csak reális fluidumok léteznek. A reális fluidum áramlásakor a viszkozitás miatt fellépő külső- és belső súrlódó erőkkel szemben a fluidumnak munkát kell végezni. A súrlódási nyomásvesztés miatt a fluidum összes energiájának egy része irreverzibilisen hővé alakul, és a fluidum felmelegszik. Azért, hogy a Bernoulli egyenlet reális fluidumokra is érvényes legyen, Fanning és Darcy a (8.27) egyenletet kiegészítették egy  $\Delta p_v$  veszteségtaggal:

**8.30. képlet.**  $z_1 \rho g + p_1 + \frac{v_1^2 \rho}{2} = z_2 \rho g + p_2 + \frac{v_2^2 \rho}{2} + \Delta p_v.$

Nézzük meg, hogyan számíthatjuk a súrlódási nyomásvesztést, vagy  $\rho$ -val osztva a fajlagos energia veszteséget. Az áramló közeg impulzusa végső esetben kivándorol a cső falára, és csökkenti a közeg impulzuskészletét, ami nyomásának

csökkenésében nyilvánul meg. Legyen egy  $D$  átmérőjű  $L$  hosszúságú vízszintes cső,  $z_1 = z_2$ , valamint  $v_1 = v_2$ . Stacionárius esetben az áramláshoz szükséges nyomáskülönbség megegyezik a súrlódási nyomásvesztéssel. A súrlódási nyomásvesztés kiszámításához Fanning definiált egy  $f$  dimenziómentes mennyiséget, amit akkor kapunk meg, ha a jellemző  $F_k$  karakterisztikus erőt osztjuk az  $S$  súrlódó felület és fajlagos kinetikus energia szorzatával:

$$8.31. \text{ képlet } f = \frac{F_k}{S \left( \frac{\rho v^2}{2} \right)}$$

A (8.31) egyenletben a karakterisztikus erő, az áramlás fenntartásához szükséges  $F_h$  hajtóerő:

$$8.32. \text{ képlet. } F_k = F_h = (p_1 - p_2) \frac{D^2 \pi}{4},$$

és  $S$  súrlódó felület, a csőfal belső felületét adó,  $(D\pi)L$  palást felülete. Mindezek figyelembe vételével:

$$8.33. \text{ képlet. } f = \frac{F_k}{S \left( \frac{\rho v^2}{2} \right)} = \frac{(p_1 - p_2) \frac{D^2 \pi}{4}}{(D\pi)L \left( \frac{\rho v^2}{2} \right)} = \frac{(p_1 - p_2) D}{2L\rho v^2}$$

A (8.33) egyenletből a nyomáskülönbséget kifejezve, megkapjuk az áramláskor fellépő nyomásvesztéget, vagy az áramlás fenntartásához szükséges nyomáskülönbséget:

$$8.34. \text{ képlet. } \Delta p_v = 4f \frac{L}{D} \frac{\rho v^2}{2},$$

vagy, ha  $p$ -val osztjuk az egyenletet, akkor az áramláskor fellépő fajlagos energia vesztéget. A (8.34) egyenlet lamináris és turbulens áramlásra, valamint a newtoni és nemnewtoni fluidumokra egyaránt érvényes. Az energiavesztés csak áramló folyadék esetén fordulhat elő, így akár a súrlódás, akár a helyi hatások okozta vesztésről van szó, a vesztés számításához mindig a fajlagos kinetikus energiával, (sebességmagassággal) kell számolni. A csősúrlódási tényező nagyságát az áramló folyadék, az áramlás, valamint a cső jellemzői határozhatják meg. A súrlódási tényezőt a  $Re$ -szám függvényében dimenzióanalízis segítségével határozták meg, és az  $f = f(Re)$ , függvénykapcsolatot, az úgynevezett kritériális egyenleteket explicit, vagy implicit formában adják meg. A számítás eltérő lamináris és turbulens áramlás, valamint eltérő a különböző folyadéktípusok esetén is. A newtoni folyadékok áramlásakor vízre, hidraulikailag sima csövekre, az alábbi összefüggéseket adták meg:



$$8.35. \text{ képlet. } f = \begin{cases} \frac{16}{Re}, & \text{ha } Re > 2100 \quad (\text{lamináris}) \\ \frac{0,0791}{Re^{0,25}}, & \text{ha } 4000 < Re < 10^5 \quad (\text{turbulens}) \end{cases}$$

$$8.36. \text{ képlet } \sqrt{f} = 4,0 \lg(Re\sqrt{f}) - 0,4 \quad \text{ha } Re > 4000 (\text{turbulens})$$

A (8.35) egyenlet második tagja a Blasius formula, amit a turbulens mellett az átmeneti áramlás tartományban is alkalmaznak.

Lamináris tartományban az áramlaskor fellépő nyomásvesztés, közvetlenül a Hagen – Poiseuille egyenletből is megkapjuk, ha a (8.21) egyenletből kifejezzük a  $\Delta p_v = p_1 - p_2$  nyomáskülönbséget:

$$8.37. \text{ képlet. } \Delta p_v = \frac{32\eta Lv}{D^2}$$

A (8.37) egyenlet a lamináris áramlás alapegyenlete. Ha a számlálót is és a nevezőt is megszorozzuk  $2\rho v$ -vel, akkor a (8.34) egyenletet kapjuk:

$$8.38. \text{ képlet. } \Delta p_v = \frac{32\eta Lv}{D^2} \frac{2\rho v}{2\rho v} = \frac{64}{Re} \frac{L}{D} \frac{\rho v^2}{2} = 4f \frac{L}{D} \frac{\rho v^2}{2} = \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho v^2}{2}$$

A szakirodalomban a Fanning-féle  $f$  súrlódási tényező mellett a  $\lambda$  csőszűrlődési tényezőt is használják, ahol  $\lambda = 4f$ . Mindezek alapján a nyomásvesztést felbonthatjuk súrlódási és tehetetlenségi erőkől eredő részekre. A súrlódási erők lamináris tartományban lépnek fel, a termikus energiát változtatják meg. A nyomásvesztés az áramlási sebességgel is és a dinamikus viszkozitással is egyenesen arányos, (8.37) egyenlet. A tehetetlenségi erők, a turbulens tartományban Newton-törvény szerint közvetlenül a kinetikus energiát változtatják meg. A nyomásvesztés a sebességgel négyzetesen és a sűrűséggel egyenesen arányos, (8.34) egyenlet. A (8.35) és (8.36) összefüggések egyenes és csak simafalú csövekre érvényesek.

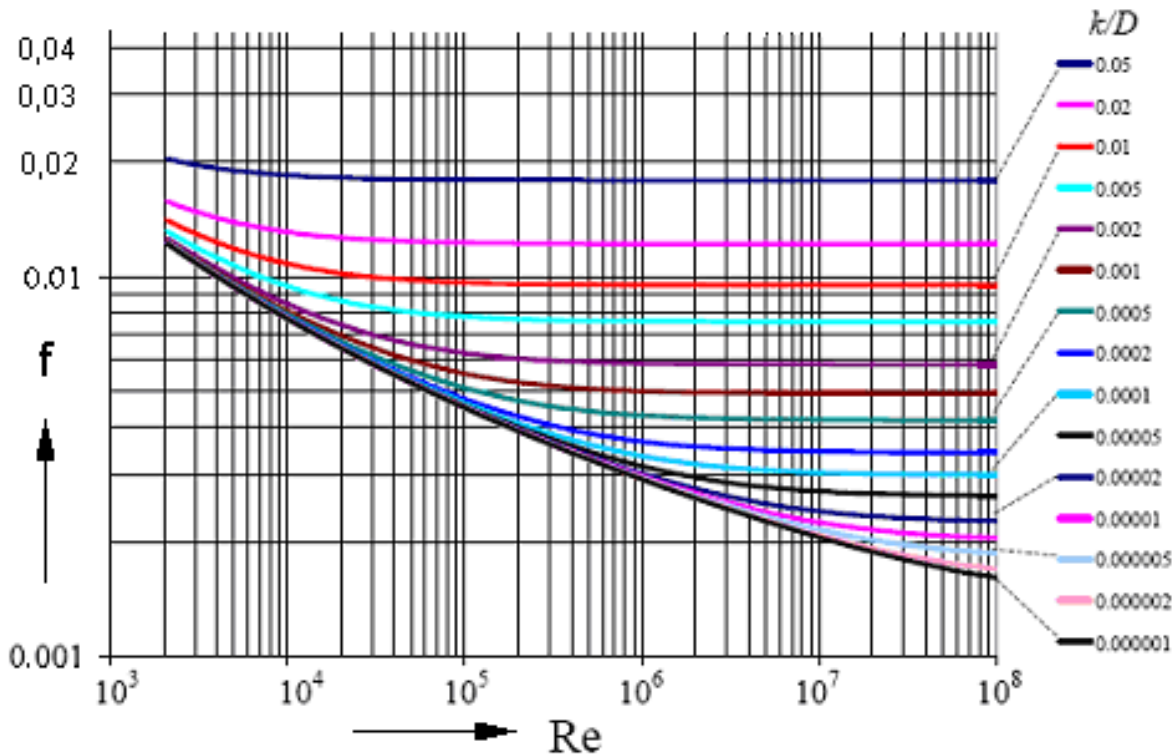
Turbulens áramlásnál, érdes falú csövekben, a súrlódási nyomásvesztés a  $Re$ -szám mellett a cső  $k/D$  relatív érdessége is befolyásolja,  $f = f(Re, k/D)$ , ahol  $k$  (m) a cső érdessége, a belső csőfal kiemelkedéseinek átlagértéke. Turbulens áramlás esetén vízre többféle elméletileg megalapozott tapasztalati képletet adtak meg. Például Colebrook szerint

$$8.39. \text{ képlet } \frac{1}{\sqrt{f}} = -4,0 \lg\left(\frac{4,67}{Re\sqrt{f}} + \frac{k}{D}\right) + 2,28, \quad \text{ha } Re > 4000,$$

vagy igen gyakran használják a Colebrook-White képletet

$$8.40. \text{ képlet } \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2,0 \lg\left(\frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,71D}\right)$$

Kifejlett turbulens áramlásnál, a relatív érdességtől függően,  $Re > 10^4-10^7$ , az  $f \approx$  konstans, és a súrlódási nyomásveszteség már csak  $k/D$  függvénye  $f = f(k/D)$ . A súrlódási nyomásveszteség az  $f = f(Re, k/D)$  függvényt gyakorlati jelentőségre való tekintettel igen sokféle méretű és anyagú csőre az áramlás széles tartományában megmérték és ábrázolták. A 46. ábra átmeneti- és turbulens tartományban a Colebrook szerinti, súrlódási tényező értékeit ábrázoltuk a  $Re$ -szám és a relatív érdesség függvényében.



46. ábra. Súrlódási tényező a  $Re$ -szám függvényében Colebrook szerint.

Néhány kereskedelemben kapható cső  $k$  érdessége méterben: Húzott cső  $1,5 \cdot 10^{-6}$  m, acélcső  $4,5 \cdot 10^{-5}$  m, öntöttvas cső  $2,5 \cdot 10^{-4}$  m, betoncső  $3,0 \cdot 10^{-4}$  m.

A pszeudoplasztikus folyadékoknál, mivel a tényleges viszkozitás nem definiálható, a  $\lambda = 4f$  súrlódási tényező számításához a (8.3) egyenlettel definiált  $Re$ -számban az  $n$  folyási indextől függő látszólagos viszkozitást kell szerepeltetni:

$$8.41. \text{ képlet } \eta_{pp} = k \left( \frac{v}{8D} \right)^{n-1} \left( \frac{3n+1}{4n} \right)^n$$

ahol  $k$  a konzisztencia tényező. Turbulens áramlás esetén a Blasius-féle sima csőre alkalmazható összefüggéshez hasonló  $4f = \lambda = a/Re^b$  képlet alkalmazható, és ekkor az  $a$  és  $b$  paraméterek az  $n$  hatványkitevő függvényei. Az  $n = 1$  esetén a Blasius összefüggést kapjuk.

Lineárpasztikus folyadékok lamináris áramlása esetén a súrlódási veszteség számításához a  $Re$ -számban szereplő látszólagos viszkozitás a tényleges pasztikus viszkozitáson túl a határfeszültség függvénye is:

$$8.42. \text{ képlet } \eta_{LP} = \eta_{pl} + \frac{\tau_h D}{6v}$$

A ritkán előforduló turbulens áramlás esetén a Blasius összefüggés alkalmazható, ekkor azonban nem a látszólagos, hanem az  $\eta_{pl}$  tényleges plasztikus viszkozitással kell számolni.

Nemlineárpasztikus folyadékoknál lamináris áramlás esetén a súrlódási veszteség számításához a Re-számban a látszólagos viszkozitás is kétféle folyadékjellemző ötvözeteként adható meg:

$$8.43. \text{ képlet } \eta_{NP} = \frac{\tau_h D}{8v} + k \left( \frac{v}{8D} \right)^{n-1} \left( \frac{3n+1}{4n} \right)^n$$

A turbulencia növekedésével a folyadék egyre inkább veszít a plasztikus jellegéből, így a pszeudopasztikus folyadékokra, illetve tovább erősödő turbulencia esetén a newtoni folyadékokra jellemző csősúrlódási tényező alkalmazható. Bármely esetet vizsgálják, a Re-számot csak a pszeudopasztikus közegre jellemző viszkozitással kell figyelembe venni, a határfeszültség itt nem játszik szerepet.

A két áramlás súrlódási nyomásvesztéseit összehasonlítva, megállapíthatjuk, hogy a  $\Delta p$ , lamináris áramlásnál egyenes arányban nő a viszkozitással (8.37) egyenlet, és független a sűrűségtől, ezért ezt az áramlást viszkózus áramlásnak is nevezzük. Kifejlett turbulens áramlás esetén, a  $\lambda$ , illetve az  $f$  közelítőleg állandó, így a  $\Delta p$  egyenes arányban nő a  $\rho$ -val, de független az  $\eta$ -tól. Mindkét esetben az átmérő növelésével a  $\Delta p$  csökken.

## Energia veszteségek csővezetékben, a módosított Bernoulli egyenlet

A (8.30) egyenletbe a (8.34) veszteségi tagot beírva, megkapjuk a módosított Bernoulli egyenletet, amivel a csővezetékben fellépő súrlódási nyomásvesztés, vagy a fajlagos energiavesztést tudjuk számolni:

$$8.44. \text{ képlet. } (z_1 - z_2)\rho g + p_1 - p_2 + \frac{(v_1^2 - v_2^2)\rho}{2} = 4f \frac{L}{D} \frac{v_2^2 \rho}{2} = \Delta p_v.$$

Ha a cső keresztmetszete állandó,  $v_1 = v_2 = v$ , akkor a (8.44) egyenlet

$$8.45. \text{ képlet. } (z_1 - z_2)\rho g + p_1 - p_2 = 4f \frac{L}{D} \frac{v^2 \rho}{2} = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2 \rho}{2} = \zeta \frac{v^2 \rho}{2}$$

alakú lesz, hol  $\zeta$  a veszteségtényező.

A módosított Bernoulli egyenletet, az áramló viszkózus folyadékok energia megmaradását fejezi ki. A súrlódási nyomásvesztés számításakor az egyenes cső mellett, minden beépített csőszerelvény (könyök, tolózár, szelep, szűkítés stb.) helyi energiavesztést okoz. Ezeknek a beépített csőszerelvényeknek a helyi ellenállását is figyelembe kell venni. A veszteségtényező elsősorban a szerelvény kialakításától függ, meghatározása elméleti úton általában nem lehetséges, nagysága nulla és

végtelen között változhat. Nagyságát az áramlás hirtelen, erőteljes megváltoztatása nagymértékben növeli, míg az íves, lekerekített, fokozatos változást okozó kialakítás kismértékben növeli. Számításoknál a helyi veszteségtényezőket hozzá kell adni a (8.45) egyenletben szereplő veszteségtényezőhöz. A helyi veszteségtényezőket figyelembe vehetjük a csőszerelvények úgynevezett ekvivalens csőhosszával is. A különböző csőszerelvények ekvivalens csőhossza a csőátmérő ismeretében nomogramokból határozhatók meg, vagy katalógusokban adják meg. Számításoknál itt úgy járunk el, hogy a csőidomok ellenállását, azonos ellenállású egyenes csőszakaszokkal, az úgynevezett egyenértékű csőhosszakkal helyettesítjük, ezeket hozzáadjuk az L egyenes csőhosszhoz, a számításokat a (8.45) egyenlet alapján elvégezhetjük.

Ha az áramlás nem kör keresztmetszetű csőben történik, akkor az úgynevezett  $D_h$  egyenértékű vagy hidraulikus csőátmérővel kell számolni, ahol a kör keresztmetszetű és a nem kör keresztmetszetű csőben az áramláskor fellépő csúsztató feszültség és az egységnyi csőhosszra eső nyomásveszteség hányadosa azonos. A hidraulikus átmérő definíció szerint:

$$8.46. \text{ képlet. } D_h = 4 \frac{A}{K},$$

ahol A az áramlás irányára merőleges keresztmetszet, K a nedvesített kerület.

## A fluidumok szállítása, a szivattyú teljesítményszükséglete

A fluidumok szállításához szükséges nyomáskülönbség létrehozható szivattyúval, ventilátorral, kompresszorral, ritkább esetben a fluidum szintmagasságának különbségével, vagy sűrűségének különbségével is. A (8.45) egyenlet segítségével számítani tudjuk azt a nyomáskülönbséget, ami adott fluidum áram csőben történő mozgathatásához szükséges. Egy szállítási feladatnál általában ismert a szállítandó fluidum  $\dot{V}$  térfogatárama, és a fluidum jellemzői ( $\rho$ ,  $\eta$ ). A feladat általában úgy merül fel, hogy milyen átmérőjű csővezeték, illetve milyen teljesítményű szivattyú szükséges a szállításhoz.

A szivattyú nettó teljesítménye P (W) a fluidum térfogatáramának és a szivattyú által biztosított nyomáskülönbség szorzata:

$$8.47. \text{ képlet } P = \dot{V} \Delta p_{sz}$$

A szivattyú által biztosított nyomáskülönbség a (8.45) egyenlet alapján, több tagból tevődik össze. A szivattyúnak le kell győznie a vezetékben a  $\Delta p_s$  súrlódási nyomásveszteséget, és a kifolyásnál elvesző  $\Delta p_k$  kinetikus tagot. A kettő összegét veszteségi tagnak is nevezik:

$$8.48. \text{ képlet } \Delta p_v = \Delta p_s + \Delta p_k = 4f \frac{L}{D} \frac{v^2 \rho}{2} + \frac{v^2 \rho}{2} = \left( 1 + 4f \frac{L}{D} \right) \frac{v^2 \rho}{2}.$$

A (8.48) egyenletben az L a cső hosszának és a csőszerelvények ellenállásából adódó egyenértékű csőhosszak összege.

Ha a fluidumot nem vízszintesen, hanem felfelé,  $h = z_2 - z_1$  magasságra szállítjuk, akkor a szivattyúnak le kell győznie a  $\Delta p_h = h\rho g$  nyomómagasságot, és ha a fluidumot eltérő nyomású térbe szállítjuk, ( $p_1 \neq p_2$ ), akkor a  $\Delta p_{ny} = p_2 - p_1$  nyomás különbséget. Mindezek alapján egy  $\dot{V}$  térfogatáramú fluidum szállításához szükséges szivattyú nettó teljesítmény szükséglete általános esetben:

$$8.49.képlet \quad P = \dot{V}\Delta p_{sz} = \dot{V}(\Delta p_v + \Delta p_h + \Delta p_{ny}) = \dot{V} \left[ \left(1 + 4f \frac{L}{D}\right) \frac{v^2 \rho}{2} + (z_2 - z_1)\rho g + p_2 - p_1 \right]$$

A szivattyú bruttó teljesítmény szükségletet megkapjuk, ha a (8.49) egyenlettel kiszámított nettó teljesítményt elosztjuk a szivattyú hatásfokával ( $\eta_{sz}$ ):  $P_b = P/\eta_{sz}$ .

A fluidum szállítás összes költsége a beruházási (csővezeték és a szivattyú ára) és a szivattyúzási költségek, valamint az egyéb költségek összege. Egy adott fluidum mennyiség elszállítását az összes költségek minimalizálásával kell megvalósítani. A csőátmérő akkor (közel) optimális, ha az egyes fluidumok áramlási sebessége a csőben a 6. táblázat megadott határok között van.

#### 6. táblázat. Fluidumok ajánlott áramlási sebességei

FLUIDUM	ÁRAMLÁSI SEBESSÉG (m / s)
Folyadék	0,5-3
Viszkózus folyadék	0,5-1
Gáz/gőz	8,0-15
Gáz/gőz nagy nyomáson	15-25
Telített vízgőz	20-30
Tútelített vízgőz	30-50
Városi gáz	1-5

A fluidumok áramlásánál fontos összefüggés a folytonossági tétel, ami az áramló fluidum anyagmegmaradását fejezi ki. A csővezetékben, stacionárius esetben a tömegáram állandó,  $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$ , amit a térfogatáram és a sűrűség szorzatával is megadhatunk  $\dot{V}_1 \rho_1 = \dot{V}_2 \rho_2$ . A térfogatáramokat az áramlási keresztmetszet és az átlagsebesség szorzatából kapjuk, így a tömegáram:  $A_1 v_1 \rho_1 = A_2 v_2 \rho_2$ . Amennyiben az áramló fluidum folyadék, összenyomhatatlan,  $\rho_1 = \rho_2$ , ekkor

$$8.50.képlet \quad A_1 v_1 = A_2 v_2$$

alakban kapjuk a folytonossági tételt.

## Fluidumok keverése

A keverésen két vagy több egymástól eltérő tulajdonságú anyagok kényszeráramlással történő egyesítését, homogenizálását értjük. A keverés addig tart, míg a különböző anyagi részecskék a rendszerben a megfelelő homogenitást, lehetőleg a tökéletes kevertségi állapotot el nem érik.

A kevert anyag lehet gáz, folyadék és szilárd halmazállapotú. A feladattól függően keverni lehet gázt gázzal, gázt folyadékkal, gázt szilárd anyaggal, folyadékot folyadékkal, folyadékot szilárd anyaggal és szilárd anyagot szilárd anyaggal.

A keverés célja a homogenizáláson túlmenően az anyagátadás-, a biológiai folyamatok-, a hőcsere elősegítése, valamint az emulziók és szuszpenziók készítése. Például az egyfázisú folyadékok keverésénél a keverés célja a fázison belüli koncentráció és hőmérsékletkülönbségek kiegyenlítése. Egy homogén fázisú kémiai reakciónál azért, hogy homogén végterméket kapjunk, minden fáziselemnek azonos minőségű környezetet kell biztosítani, ezért kevertetjük a fázist. Ha a keverés elég intenzív, akkor a fázisban a koncentráció és a hőmérséklet homogén eloszlású.

Folyadék-folyadék extrakciónál a két egymással nem elegyedő folyadékfázis sűrűségkülönbség szerint rétegződik. Ha a nehezebb folyadékfázist a könnyebb fázisban akarjuk diszpergálni, a komponensátadás meggyorsítása céljából, akkor keveréssel erős vertikális áramlást kell biztosítani.

A folyadéknál nagyobb sűrűségű szilárd szemcsék kiülepednek a tartály aljára. A vertikális folyadékáramlás a szilárd részecskéket magával ragadja. A mikro méretű szemcsék keverésével szuszpenzió állítható elő. Szilárd anyagok, sók oldási ideje jelentősen csökken keverés hatására. Keveréssel előidézett erős folyadékáram elszállítja a só felületén levő telített oldatot, lecsökkenti a lamináris határrejteget, amelyen keresztül az oldott anyag csak diffúzióval megy keresztül.

Viszkózus homogén folyadékok melegítésekor, a folyadékot a tartályban mozgatni kell, hogy ne alakulhasson ki a fal környezetében a folyadék tömegétől eltérő indokolatlanul magas hőmérséklet, ami károsíthatja az anyagot. Itt egy horizontális folyadékmozgatást kavarrással biztosítják.

A keverés megvalósítása elvileg két különböző módon történhet. Az egyik módszernél a keverés előtt a két összekeverendő rendszert felosztjuk kis mennyiségekre, és ezeket a kis mennyiségeket keverjük össze. A másik módszernél az egyik rendszer részeit felgyorsítjuk nagy sebességre, és bevezetjük ezzel a nagy sebességgel a másik rendszerbe. Ez az úgynevezett sugárkeverés. Gyakran alkalmazzák a két elv kombinációját is.

## **Gázok keverése**

A gázok keveredése önként végbemenő folyamat. Gázok homogenizálódása bizonyos idő eltelte után teljesen végbemegy. Vannak azonban nagy sebességgel lejátszódó kémiai reakciók, például az égés, metán parciális oxidációja acetilénre vagy szintézis gázzá stb., ahol szükségessé válik a gázok gyors keverése. Ebben az esetben nem elég a lassú keveredés, hanem gázkeverő berendezéseket kell beépíteni.

A keverés történhet úgy, hogy a kismennyiségekre való felosztás elvét, a sugárkeverés elvét vagy mindkét keverési elv együttesét alkalmazzuk. A kémiai technológiában alkalmazásra kerülő, viszonylag nagy térfogatot igénylő gázok keverését úgy valósítják meg, hogy a keverendő gáz útjába valamilyen töltetet helyeznek, rendszerint Rashig gyűrűket, és ily módon keverik össze a gázokat. Az igen gyors kémiai gázreakciónál (hidrogén és klór reakciója sósavvá, a metán parciális oxidációja oxigénnel acetilénre és szintézis gázzá) a gázok összekeverésére sugárkeverőket alkalmaznak.

## Folyadékok keverése

A folyadékok keverése során hőmérséklet és koncentráció kiegyenlítés a cél. Folyékony heterogén rendszerekben (szuszpenzió, emulzió) gravitációs rétegződés következhet be, de keveréssel a dinamikus egyensúlyi állapot biztosítható. A koncentráció csak addig azonos mindenütt, ameddig a folyadékot keverik.

A keverés megvalósításánál fontos tényező a folyadék viszkozitása. Newtoni folyadékok esetén ez azt jelenti, hogy a keverés magasabb hőmérsékleten kevésbé energiaigényes. Plasztikus vagy pszeudóplasztikus folyadékok viszkozitása függ a keverőnek a folyadékban való mozgásának sebességétől, azaz a folyadékban levő sebesség gradienstől. Plasztikus, Bingham folyadékok viszkozitása lassú keverés esetén nagy, de a sebesség növelésével csökken. Ez a jelenség arra mutat, hogy bizonyos minimális keverési sebesség betartása célszerű. Az invertált folyadékoknál a viszkozitás kis sebességeknél kicsi, de a sebesség gradiens növelésével ugrásszerűen nő. Ebben az esetben a keverés sebessége nem lehet túl nagy.

A folyadékok keverésére mechanikus keverőket használunk, amelyeket elektromos motor forgat. A keverésnél a legfontosabb mérnöki feladat keverő energiaszükségletének meghatározása.

A keverésnél impulzus áram lép fel, és az impulzusra felírt általános mérleg egyenletből három tag szerepel: konvekció + vezetés – forrás = 0

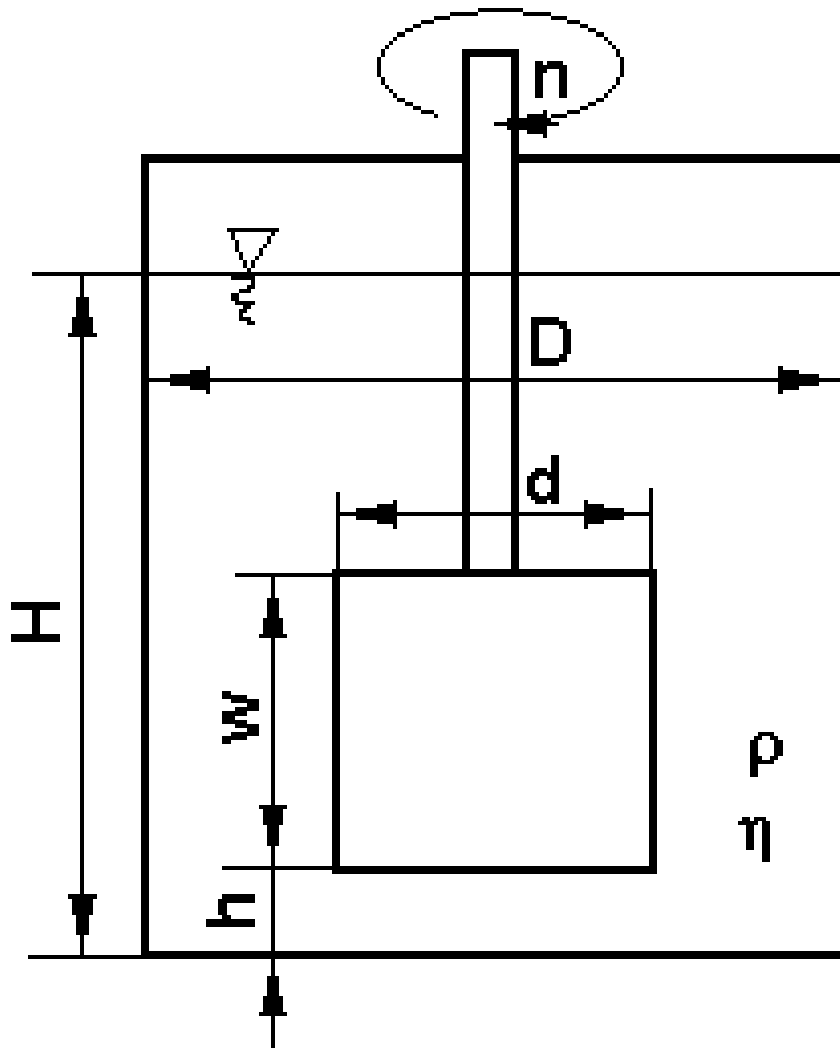
A forrás negatív előjelű, mert a kevert folyadék "nyeli el" a keverőelem impulzusát. Ha az egyenletet elosztjuk a konvektív taggal, akkor két dimenziómentes szám közötti összefüggéshez jutunk, amit dimenziómentes számokkal, Reynolds számmal és Euler számmal kifejezve:

$$8.51.képlet. \frac{1}{Re} = f(Eu).$$

A folyadékok keveréséhez szükséges teljesítmény számítását, vagyis a (8.51) egyenletben a dimenziómentes számok közötti összefüggést dimenzióanalízis segítségével határozták meg. Tételezzük fel, hogy a P teljesítményszükséglet a következő paraméterektől függ:

$$8.52.képlet. P = f(d, w, D, H, h, n, \rho, \eta, g),$$

ahol d a keverő átmérője, w a keverőlapát szélessége, D a tartály átmérője, H a nyugvó folyadék magassága a tartályban, h a keverő magassága a tartály aljától, n a keverő fordulatszáma,  $\rho$  a folyadék sűrűsége,  $\eta$  a folyadék viszkozitása, g a gravitációs gyorsulás. A keverő elvi rajzát a 47. ábra szemléltetjük.



47. ábra. A keverő elvi rajza

Ezen adatokból a teljesítményszükségletre a következő összefüggést kapjuk:

$$8.53.képlet. P = k' d^5 n^3 \rho \left( \frac{d^2 n \rho}{\eta} \right)^{-m} \left( \frac{dn^2}{g} \right)^{-n} \left( \frac{w}{d} \right)^c \left( \frac{D}{d} \right)^e \left( \frac{H}{d} \right)^f \left( \frac{h}{d} \right)^i,$$

ahol  $k'$  konstans jelöli. Ha a tervezendő készülékekre betartjuk a kísérleti készülékeknek megfelelő geometriai hasonlóságokat, vagyis  $w/d$ ,  $D/d$ ,  $H/d$ ,  $h/d$  azonosságokat, akkor ezek a  $k$  konstansban vonhatók össze, és a (8.53) egyenlet az alábbiak szerint egyszerűsödik:

$$8.54.képlet P = k d^5 n^3 \rho \left( \frac{d^2 n \rho}{\eta} \right)^{-m} \left( \frac{dn^2}{g} \right)^{-n}.$$

Nézzük meg a (8.54) egyenletben a zárójelben levő dimenziómentes mennyiségeket. A folyadék mozgása a keverést biztosító alkatrészhez (kar, lapát, propeller) képest



lehet nyugodtan áramló (lamináris áramlású) vagy a mozgó alkatrész mögött örvény keletkezhet (turbulens áramlású). Az áramlás jellegét a keverési  $Re_k$  számmal,  $Re_k$  jellemezzük, amit úgy kapunk, hogy a  $Re$ -számot definiáló (8.3) egyenletben a jellemző lineáris méret a keverő lapát  $d$  hossza (átmérője), és sebességet a keverőlapát kerületi sebességével adjuk meg,  $v = d\pi n$ , ahol  $n$  a keverő fordulatszáma. A  $\pi$  szorzót elhagyva, illetve a bevonva a (8.54) egyenlet  $k$  konstans szorzótényezőjébe, kapjuk a keverési  $Re$ -számot:

$$8.55.képlet \quad Re_k = \frac{vd\rho}{\eta} = \frac{nd^2\rho}{\eta}.$$

Megállapították, hogy  $Re_k < 50$  esetén a keverővel előidézett áramlás lamináris.

A (8.54) egyenlet másik zárójelben levő dimenziómentes mennyisége a keverési Froude szám, ami egy rendszeren belül a tehetetlenségi- ( $\rho v^2/2$ ) és a nehézségi erő ( $\rho gh$ ) viszonya. A  $\pi^2/2$  szorzót bevonva a (8.54) egyenlet  $k$  konstansába kapjuk:

$$8.56.képlet \quad Fr_k = \frac{v^2}{gh} = \frac{d^2 n^2}{gd} = \frac{dn^2}{g}.$$

A kísérletek azt mutatják, a  $Fr_k$  szám kitevője nulla, vagyis a teljesítmény független a  $Fr_k$  számtól mindaddig, míg a keverő nem kever levegőt a folyadékba, vagyis a keverésnél kialakult tölcser el nem éri a keverőlapátot. Ilyenkor a teljesítményszükséglet a következő összefüggéssel adható meg:

$$8.57.képlet \quad P = kd^5 n^3 \rho Re_k^{-m},$$

A keverő teljesítményét a keverési Euler szám,  $Eu_k$ , is tartalmazza. Az Euler szám a rendszeren belül az impulzus forrás és az impulzus konvekció hányadosa, az áramló fluidumban ható nyomó és tehetetlenségi erő viszonyának mérőszáma:

$$8.58.képlet \quad Eu_k = \frac{\Delta p d^2}{\rho v^2 d^2} = \frac{F}{\rho v^2 d^2} = \frac{Fd}{\rho v^2 d^3} = \frac{W}{\rho d^2 n^2 d^3} = \frac{W}{\rho n^2 d^5} = \frac{P}{\rho n^3 d^5}.$$

A (8.58) egyenletben a  $\Delta p d^2 = F$ , (az erő egyenlő a nyomás és a felület szorzata),  $W = Fd$ , (a munkát az erő és a lineáris méret szorzata adja)  $v^2 = d^2 \pi^2 n^2$ , (a kerületi sebesség négyzete) és  $P = Wn$  (a teljesítmény az időegység alatt elvégzett munka, amit a munka és a fordulatszám szorzatával adunk meg). Az  $1/\pi^2$  állandót beépítjük a  $k$  konstansba. Mindezek figyelembevételével a (8.51) egyenlet:

$$8.59.képlet \quad Eu_k = \frac{P}{\rho n^3 d^5} = \frac{k}{Re_k^m}.$$

Az egyenletben a  $k$  szorzót és az  $m$  kitevőt kísérletileg kell meghatározni, amelyek adott keverőtípusra, csak adott  $Re_k$  intervallumon belül állandó. Mérési eredményeket táblázatosan adják meg. Például kétlapátos keverőnél lamináris tartományban, ha

$Re_k < 50$ ,  $k = 111$  és  $m = 1$ , átmeneti és turbulens tartományban, ha  $Re_k > 50$ ,  $k = 14,3$  és  $m = 0,31$ . Anker keverőnél:  $k = 6,2$ , és  $m = 0,25$ . Propeller keverőnél  $k = 0,94$  és  $m = 0,05$ . Szokás a teljesítményszükséglet számítására  $Eu_k - Re_k$  diagramokat használni. A (8.59) egyenlet szerint a keverő teljesítményszükséglete  $P$  és az  $Eu_k$  - szám között egyenes arányosság van. Tehát az a keverő dolgozik a legkisebb teljesítményszükséglettel, amelynél a  $k$  konstans és az  $m$  kitevő értéke a legkisebb. Az előbb felsorolt keverők közül a propellerkeverő a legjobb.

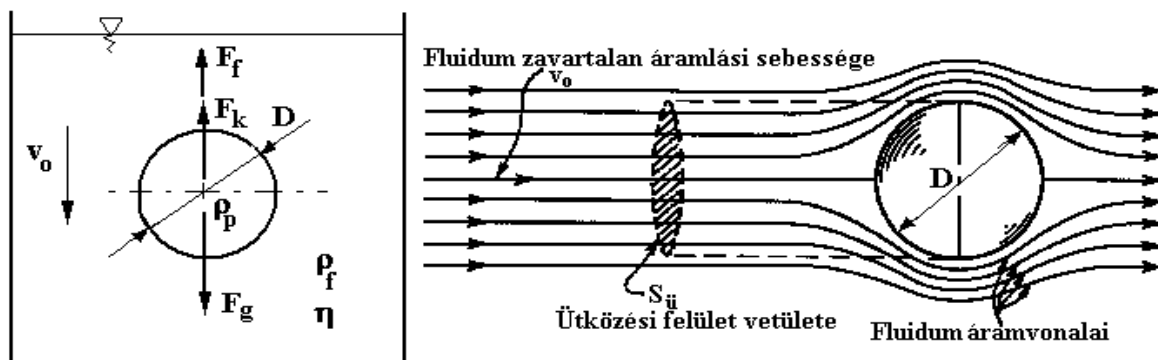
A keverés teljesítményszükségleténél mindig nagyobb a keverő teljesítményszükséglete, mivel a keverés beindításához eleve nagyobb teljesítmény szükséges, és a teljesítmény átvitel hatásfoka  $\eta < 1$ .

## Ülepítés

Az ülepítés eltérő sűrűségű komponensekből álló heterogén rendszerek (folyadék-szilárd, gáz-szilárd, gáz-folyadék, folyadék-folyadék) szétválasztására szolgáló művelet. Folyadékból vagy gázból portalanító kamrákban, ciklonokban, elektrosztatikus porleválasztókban kiülepítjük a szilárd szemcséket a fluidum tisztítása céljából. A kémiai reakciókban képződött csapadékot gravitációs erőterben ülepítjük. Ülepítő centrifugákban elválasztjuk a folyadéktól a szilárd anyagot, vagy folyadéktól a sűrűbb folyadékot (például a tejszeparálás). Emulziókat szétválaszthatunk sűrűség különbség alapján. Fordított ülepítés például a levegőbuborék felúsztatása a folyadékban.

### Az Ülepítés hidrodinamikája

Az ülepedő és a körüláramlott test hidrodinamikája között nincs elvi különbség. Az ülepedés vizsgálatát végezzük gravitációs erőterben és legyen a részecske gömb alakú, és a sűrűsége legyen nagyobb a közeg sűrűségénél, mint ahogy azt a 48. ábra mutatja.



48. ábra. Az Ülepítésnél fellépő erők és körüláramlott gömb áramvonalai

A gravitációs erőterben a részecskére hat az archimedesi súly,  $F_s$ , ami a gravitációs erő,  $F_g$  és a felhajtó erő,  $F_f$  eredője:

$$8.60.képlet \quad F_s = F_g - F_f = V\rho_p g - V\rho_f g = V(\rho_p - \rho_f)g.$$

ahol  $V$  a szilárd részecske térfogata,  $\rho_p$  a szilárd részecske sűrűsége,  $\rho_f$  a fluidum sűrűsége. Az archimedesi súly lefelé hat, mivel  $\rho_p > \rho_f$ . A lefelé mozgó részecskét a közeg visszatartja, mivel az ütközik és súrlódik a közeg molekuláival. Tehát a közegellenállási erő,  $F_k$  két részből tevődik össze, a felületre merőleges az ütközési vagy deformáló erők,  $F_{\ddot{u}}$  és a felülettel párhuzamos súrlódó erők,  $F_s$  összegéből:

$$8.61.képlet \quad F_k = F_{\ddot{u}} + F_s.$$

Az ütközési, vagy deformáló erő, az ütköző felület és a közeg dinamikus nyomásának szorzata:

$$8.62.képlet \quad F_{\ddot{u}} = S_{\ddot{u}} \frac{v^2 \rho_f}{2},$$

ahol  $S_{\ddot{u}}$  a részecskének az ülepedés irányára merőleges legnagyobb felülete, és  $v$  az ülepedő részecske sebessége. A súrlódó erő, a súrlódó felület és a súrlódási nyomásesés szorzata:

$$8.63.képlet \quad F_s = S_s f_s \frac{v^2 \rho_f}{2},$$

ahol  $S_s$  a súrlódó felület és  $f_s$  a súrlódási tényező, ami a (8.45) egyenletben levő  $\zeta$  veszteségtényezővel analóg. A súrlódási felületet általában nem tudjuk meghatározni, ezért az  $S_{\ddot{u}}$  ütközési felülettel fejezzük ki:

$$8.64.képlet \quad S_s f_s = S_{\ddot{u}} \frac{S_s}{S_{\ddot{u}}} f_s = S_{\ddot{u}} f_{\ddot{u}}.$$

Mindezek figyelembevételével a közegellenállási erő:

$$8.65.képlet \quad F_k = S_{\ddot{u}} \frac{v^2 \rho_f}{2} + f_{\ddot{u}} S_{\ddot{u}} \frac{v^2 \rho_f}{2} = (1 + f_{\ddot{u}}) S_{\ddot{u}} \frac{v^2 \rho_f}{2} = f_k S_{\ddot{u}} \frac{v^2 \rho_f}{2}.$$

ahol  $f_k = 1 + f_{\ddot{u}}$  a közegellenállási tényező. A (8.60) egyenletből a közegellenállási tényező:

$$8.66.képlet \quad f_k = \frac{F_k}{S_{\ddot{u}} \left( \rho \frac{v^2}{2} \right)},$$

ami a (8.30) egyenlettel definiált Fanning féle csősúrlódási tényezővel analóg. A közegellenállási tényezőt mérésekkel határozták meg az  $Re_{\ddot{u}}$ , ülepedési  $Re$ -szám függvényében. Az ülepedési  $Re$ -szám definíciója:

$$8.67.képlet. \text{Re}_{\ddot{u}} = \frac{v_0 D \rho_f}{\eta},$$

ahol  $v_0$  az ülepedési határsebesség. Az  $f_k = f_k(\text{Re}_{\ddot{u}})$  közegellenállási tényező számítására az alábbi kritériális egyenleteket adták meg:

$$8.68.képlet \ f_k = \begin{cases} 24/\text{Re}_{\ddot{u}} & \text{ha } \text{Re}_{\ddot{u}} < 0,6 \text{ (lamináris)} \\ 18,5/\text{Re}_{\ddot{u}}^{0,6} & \text{ha } 0,6 < \text{Re}_{\ddot{u}} < 600 \text{ (átmeneti)} \\ 0,44 & \text{ha } \text{Re}_{\ddot{u}} > 600 \text{ (turbulens)} \end{cases}.$$

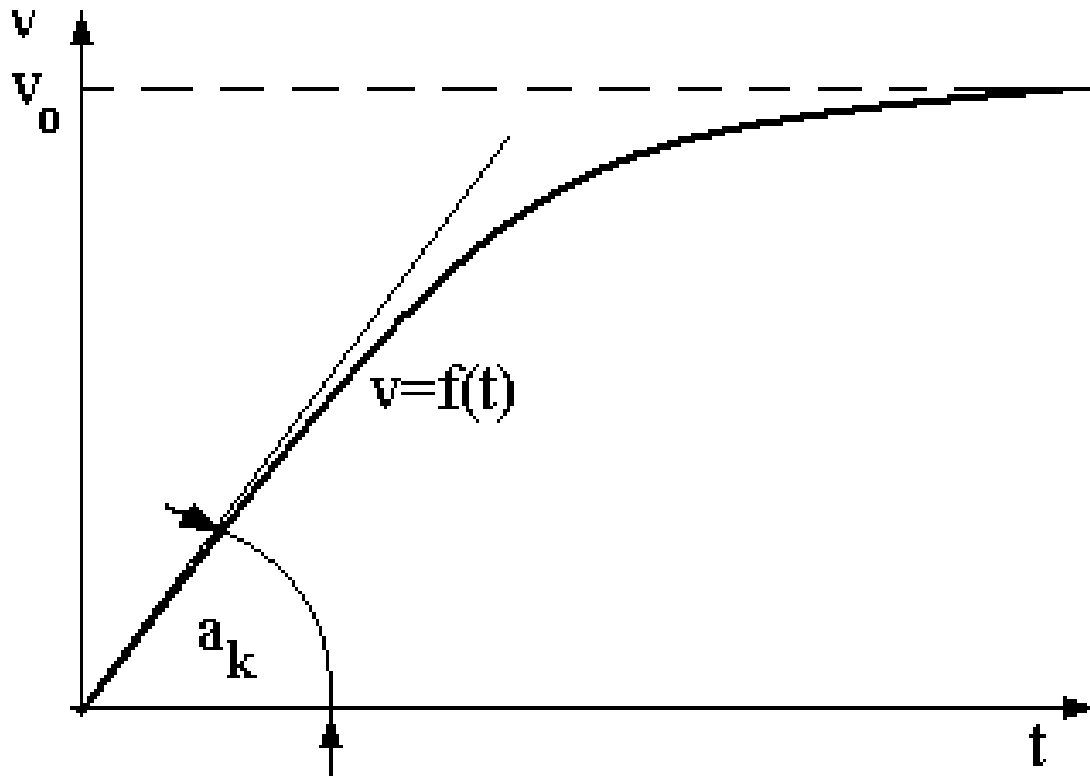
A (8.68) egyenletben láthatjuk, hogy ha a  $\text{Re}_{\ddot{u}} < 0,6$  lamináris,  $0,6 < \text{Re}_{\ddot{u}} < 600$  átmeneti, és  $\text{Re}_{\ddot{u}} > 600$  turbulens az áramlás. Az  $f_k$  közegellenállási tényező lamináris áramlás esetében a Stokes-törvény segítségével közvetlenül kiszámítható. Stokes-törvény szerint, egy gömb alakú részecske lamináris tartományban ülepszik, akkor a fellépő közegellenállási erő:

$$8.69.képlet \ F_k = 3D\pi\eta v$$

A (8.69) egyenletet behelyettesítjük a közegellenállási tényezőt definiáló (8.66) egyenletébe, kapjuk:

$$8.70.képlet \ f_k = \frac{F_k}{S_{\ddot{u}} \left( \rho_f \frac{v_0^2}{2} \right)} = \frac{3D\pi\eta v_0}{\frac{D^2\pi}{4} \left( \frac{\rho_f v_0^2}{2} \right)} = \frac{24\eta}{v_0 D \rho_f} = \frac{24}{\text{Re}_{\ddot{u}}}.$$

Amennyiben a részecske nagyobb sűrűségű a közegnél, és nulla kezdő sebességgel indul lefelé, akkor először gyorsulni fog. Az  $a_k$  kezdeti gyorsulása fokozatosan csökken, a sebesség mindaddig növekszik, amíg az archimedesi súly és a közegellenállási erő egyenlő nem lesz. Ettől kezdve a részecske a 49. ábra szerint egyenes vonalú egyenletes mozgással, állandó  $v_0$  ülepedési sebességgel halad.



49. ábra. Ülepedés instacionáris tartományban

Az ülepedő részecske gyakorlatilag igen rövid idő, kevesebb mint 1 másodperc, eléri, illetve megközelíti az ülepedési sebességet.

### Az Ülepedési sebesség és az ülepedő részecske átmérőjének számítása

A részecske akkor ülepszik állandó sebességgel, ha a részecskére ható erők eredője nulla, vagyis  $F_s = F_k$ . Gömb, vagy gömbnek tekinthető részecske esetén:

$$8.71.képlet. \frac{D^3 \pi}{6} (\rho_s - \rho_f) g = f_k \frac{D^2 \pi}{4} \frac{v_0^2}{2} \rho_f,$$

A (8.71) egyenletből az ülepedési sebesség:

$$8.72.képlet. v_0^2 = \frac{4}{3} D g \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \frac{1}{f_k},$$

és a közegellenállási tényező:

$$8.73.képlet. f_k = \frac{4}{3} D g \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \frac{1}{v_0^2}.$$

A (8.68) egyenletből a lamináris tartományban érvényes  $f_k = 24/Re_{\bar{u}}$  összefüggést behelyettesítve a (8.72) egyenletbe az ülepedési sebesség, (vagy  $v_0$  ismeretében a részecske átmérő), közvetlenül számolható:

$$8.74.képlet \quad v_0 = \frac{D^2(\rho_s - \rho_f)g}{18\eta_f}.$$

Az átmeneti tartományban az  $f_k = 18,5/Re_{\bar{u}}^{0,6}$  összefüggést a (8.68) egyenletbe helyettesítve, az ülepedési sebességet numerikusan iterációval vagy grafikonok segítségével oldhatjuk meg. Turbulens tartományban a newtoni közegellenállás szerint  $f_k = 0,44$  helyettesítéssel az ülepedési sebesség, (vagy a részecske átmérő) egyszerűen számolható.

## Áramlás töltött oszlopon

Számos eljárásnál találkozunk olyan készülékekkel, amelyekben folyadékok, vagy gázok áramolnak szilárd szemcsés rétegen, vagy szabályos elemekkel töltött oszlopokban, csövekben. Szemcsés réteget alkot a szűrőn kialakult csapadékréteg részecskéi, adszorbens szemcsék, katalizátor tabletták, ioncserélő gyanta szemcséi, szabályos tölteléktestek például Raschig gyűrű, stb.

Ha fluidum (folyadék vagy gáz) áramlik szilárd szemcsés rétegen keresztül, akkor a fluidum kitölti a szemcsés réteg közötti szabad teret, beborítja az egyes szilárd elemeket. Az áramlás szabálytalan csatornáknban történik, amelyek a szilárd elemek közötti üregek és pórusok között alakulnak ki. A szilárd töltet felületén, például rektifikálásnál és abszorpciónál két fázis gáz (gőz)-folyadék érintkezik egymással. Ebben az esetben a töltetet felületnövelés céljából alkalmazzák.

### A töltött oszlop jellemzői

Ha az 50. ábra bemutatott  $V$  ( $m^3$ ) térfogatú,  $A$  ( $m^2$ ) keresztmetszetű és  $L$  ( $m$ ) magasságú oszlopot (csövet), amelynek a térfogata  $V = A L$ , szilárd szemcsés anyaggal megtöltünk, akkor a rétegben minden részecske egymáson fekszik, és nincsen relatív elmozdulás a szilárd részecskék között. Az így előállott állapotot nyugvó állapotnak nevezzük. A töltet a szemcsehalmaz sűrűségének megfelelően összes térfogat kitölti. Az összes térfogat egy részét a szemcsék foglalják el  $V_p$  térfogattal, a másik része a szemcsék hézagai miatt üresen marad  $V_{\bar{u}}$  térfogattal. Az összes térfogat:  $V = V_p + V_{\bar{u}}$ . Ugyanez vonatkozik a töltött oszlop  $A$  keresztmetszetére is. A keresztmetszet egy részét a töltet foglalja el  $A_p$  keresztmetszettel, a másik része szabadon marad  $A_{\bar{u}}$  üres keresztmetszettel (átlagos áramlási keresztmetszet). A teljes keresztmetszet:  $A = A_p + A_{\bar{u}}$ .

Definiáljuk az  $\varepsilon$  fajlagos hézag térfogatot (porozitás vagy üres térfogati hányad):

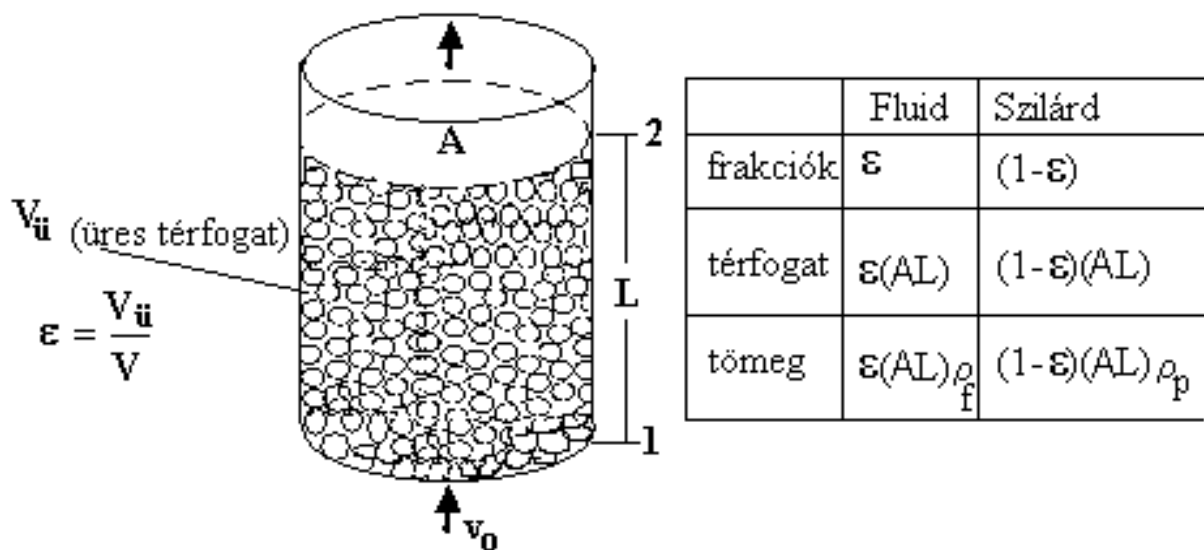
$$8.75.képlet \quad \varepsilon = \frac{V_{\bar{u}}}{V} = \frac{V - V_p}{V} = \frac{A_{\bar{u}}}{A} = \frac{A - A_p}{A},$$

és definiáljuk a töltet  $\omega$  fajlagos felületet, az egységnyi összes térfogatra eső töltet felület, valamint az  $\omega_p$ , az egységnyi töltet térfogatára vonatkoztatott töltet felületet:

$$8.76.képlet \quad \omega = \frac{S_p}{V} \quad \text{és} \quad \omega_p = \frac{S_p}{V_p}$$

ahol  $S_p$  a töltet felületét jelöli. Az  $\omega$  és az  $\omega_p$  közötti összefüggés:

$$8.77.képlet \quad \omega = \frac{S_p}{V} = \frac{S_p}{V} \left( \frac{V_p}{V_p} \right) = \frac{S_p}{V_p} \frac{V_p}{V} = \omega_p \frac{V - V_{\text{ü}}}{V} = \omega_p (1 - \varepsilon).$$



50. ábra. Töltött oszlop jellemzői

A töltetgyártó cégek mindig megadják katalógusban a töltet jellemzőit, köztük az  $\omega$  és  $\varepsilon$  értékeket. Az iparban leggyakrabban alkalmazott Raschig gyűrűk néhány méretére a jellemző adatokat a 7. táblázat foglaljuk össze.

7. táblázat. Raschig gyűrűk jellemző adatai

Raschig gyűrű mérete (mm)	Fajlagos töltetfelület $\omega$ ( $m^2/m^3$ )	Fajlagos hézagterfogat $\varepsilon$ ( $m^3/m^3$ )
Ø5x5x1,0	1000	0,62
Ø10x10x1,8	440	0,69
Ø15x15x2,0	310	0,71
Ø20x20x2,2	240	0,73
Ø50x50x5,0	95	0,79
Ø100x100x10,0	44	0,81

Gömb alakú részecskénél

$$8.78.képlet \quad \omega_p = \frac{nD^2\pi}{n\frac{D^3\pi}{6}} = \frac{6}{D},$$

ahol  $n$  a részecskék száma és  $D$  a gömb átmérője. Behelyettesítve a (8.77) egyenletbe:

$$8.79.képlet \quad \omega = \frac{6}{D}(1 - \varepsilon).$$

Sokszor a töltet nem gömb, vagy gömbnek tekinthető részecskehalmból áll. Ekkor a részecskék jellemzésére bevezették az ekvivalens (egyenértékű) gömbátmérőt, amit kétféleképpen definiáltak. Az egyik a  $D_{V/S}$ , a nem gömb alakú részecske térfogatának és felületének hányadosa egyezzen meg a gömb térfogatának és felületének hányadosával:

$$8.80.képlet \quad D_{V/S} = 6 \frac{V_p}{S_p}.$$

A másik definíció szerint, a részecskével azonos térfogatú gömb átmérője adja a  $D_V$  egyenértékű gömb átmérőjét:

$$8.81.képlet \quad D_V = \left( \frac{6V_p}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

A fluidum áramlási sebessége legyen a töltet előtt az üres csőben  $v_0$ , és a tölteten, az üres keresztmetszeten  $v_\varepsilon$ . Fejezzük ki a  $v_\varepsilon$ -t a jól mérhető  $v_0$  sebességgel. A (8.75) egyenletet figyelembe vételével, a kontinuitás tétel

$$8.82.képlet \quad \dot{V} = v_0 A = v_0 \frac{A_{\bar{u}}}{\varepsilon} = \frac{v_0}{\varepsilon} A_{\bar{u}} = v_\varepsilon A_{\bar{u}},$$

ahonnan

$$8.83.képlet \quad v_\varepsilon = \frac{v_0}{\varepsilon}.$$

A gömb alakú töltet fajlagos hézagterfogat is függ a gömb átmérőjétől ( $\varepsilon = 0,26-0,476$ ), a gyakorlatban  $\varepsilon = 0,4 \text{ m}^3/\text{m}^3$  értékkel számolhatunk.

A töltött cső üres keresztmetszete, amelyen keresztül a fluidum áramlik, rendkívül szabálytalan. A számításokhoz célszerű bevezetni a (8.46) egyenlettel definiált egyenértékű (hidraulikus) átmérőt, ahol az átlagos áramlási keresztmetszetet a (8.75) egyenletből  $A_{\bar{u}} = \varepsilon A = \varepsilon V/L$ , és az átlagos nedvesített kerület,  $K = F_p/L = \omega V/L$ .

Mindezek alapján:



$$8.84.képlet \quad D_h = 4 \frac{A}{K} = 4 \frac{\varepsilon A}{\frac{S_p}{L}} = 4 \frac{\varepsilon \frac{V}{L}}{\frac{V}{\omega L}} = 4 \frac{\varepsilon}{\omega} = 4 \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)\omega_p}$$

Gömb alakú részecskénél, a (8.79) egyenletet alapján a hidraulikus átmérő:

$$8.85.képlet \quad D_h = 4 \frac{\varepsilon}{\omega} = 4 \frac{\varepsilon}{\frac{6}{D}(1-\varepsilon)} = \frac{2}{3} \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)} D.$$

## Nyomáskereső töltött oszlop

Egy működő töltött oszlop fontos jellemzője az oszlopon fellépő nyomáskereső. Az áramlási tartományok jellemzésére és a súrlódási tényező  $f_p = f_p(Re)$  kiszámításához szükséges a  $Re_p$ ,  $Re$ -szám töltött oszlopon ismerete. Kiszámításához a (8.3) egyenletbe, írjuk be az aktuális értékeket, majd a  $v_\varepsilon$  helyébe a (8.83) egyenletnek megfelelően a  $v_0$ -t,  $D_h$  helyébe a gömb alakú részecskékre a (8.85) egyenletnek megfelelően a  $D$ -t:

$$8.86.képlet \quad Re_p = \frac{v_\varepsilon D_h \rho_f}{\eta} = \frac{v_0 D_h \rho_f}{\varepsilon \eta} = \frac{v_0}{\varepsilon} \frac{2}{3} \frac{\varepsilon D}{(1-\varepsilon)} \frac{\rho_f}{\eta} = \frac{2}{3} \frac{1}{(1-\varepsilon)} \frac{v_0 D \rho_f}{\eta},$$

A (8.86) egyenlettel definiált  $Re_p < 10$ , akkor a tölteten az áramlás lamináris,  $10 < Re_p < 1000$  tartományban az áramlás átmeneti, és  $Re_p > 1000$ , akkor az áramlás turbulens. Az oszlopon fellépő nyomáskereső kiszámításához induljunk ki a (8.34) összefüggésből, majd rendre helyettesítsük be a  $v_\varepsilon$  helyébe a (8.83),  $D_h$  helyébe a gömb alakú részecskékre a (8.85) összefüggést:

$$8.87.képlet. \quad \Delta p = 4f \frac{L}{D_h} \frac{\rho_f v_\varepsilon^2}{2} = 3f \frac{L(1-\varepsilon)\rho_f v_0^2}{D\varepsilon^3} = f_p \frac{\rho_f L(1-\varepsilon)v_0^2}{D\varepsilon^3}$$

ahol

$$8.88.képlet. \quad f_p = \begin{cases} \frac{150}{Re_p} & \text{ha } Re_p < 10 \quad (\text{lamináris}) \\ \frac{150}{Re_p} + \frac{7}{4} & \text{ha } 10 < Re_p < 1000 \quad (\text{átmeneti}) \\ \frac{7}{4} & \text{ha } Re_p > 1000 \quad (\text{turbulens}) \end{cases}$$

A (8.87) és (8.88) egyenletek alapján, lamináris tartományban  $Re_p < 10$ , és  $\varepsilon < 0,5$ , a nyomáskeresőt a Blake-Kozeny egyenlettel számíthatjuk

$$8.89. \text{ képlet. } \Delta p = \frac{150\eta L (1-\varepsilon)^2}{D^2 \varepsilon^3} v_0 = \frac{150 \rho_f L (1-\varepsilon)}{\text{Re}_p D \varepsilon^3} v_0^2,$$

erősen turbulens tartományban,  $\text{Re}_p > 1000$ , a Burke-Plummer egyenlettel

$$8.90. \text{ képlet. } \Delta p = \frac{7 \rho_f L (1-\varepsilon) \rho_f}{4 D \varepsilon^3} v_0^2.$$

A két egyenletet az átmeneti tartományban,  $10 < \text{Re}_p < 1000$ , egyesítette Ergun:

$$8.91. \text{ képlet. } \Delta p = \frac{150\eta L (1-\varepsilon)^2}{D^2 \varepsilon^3} v_0 + \frac{7 \rho_f (1-\varepsilon)}{4 D \varepsilon^3} v_0^2.$$

Az egyenletben jól látszik a felbontás súrlódási és tehetetlenségi erőkre. Az Ergun-egyenlet alkalmazható gázokra is, ekkor a ki- és bemenő gáz átlagos sűrűségével kell számolni.

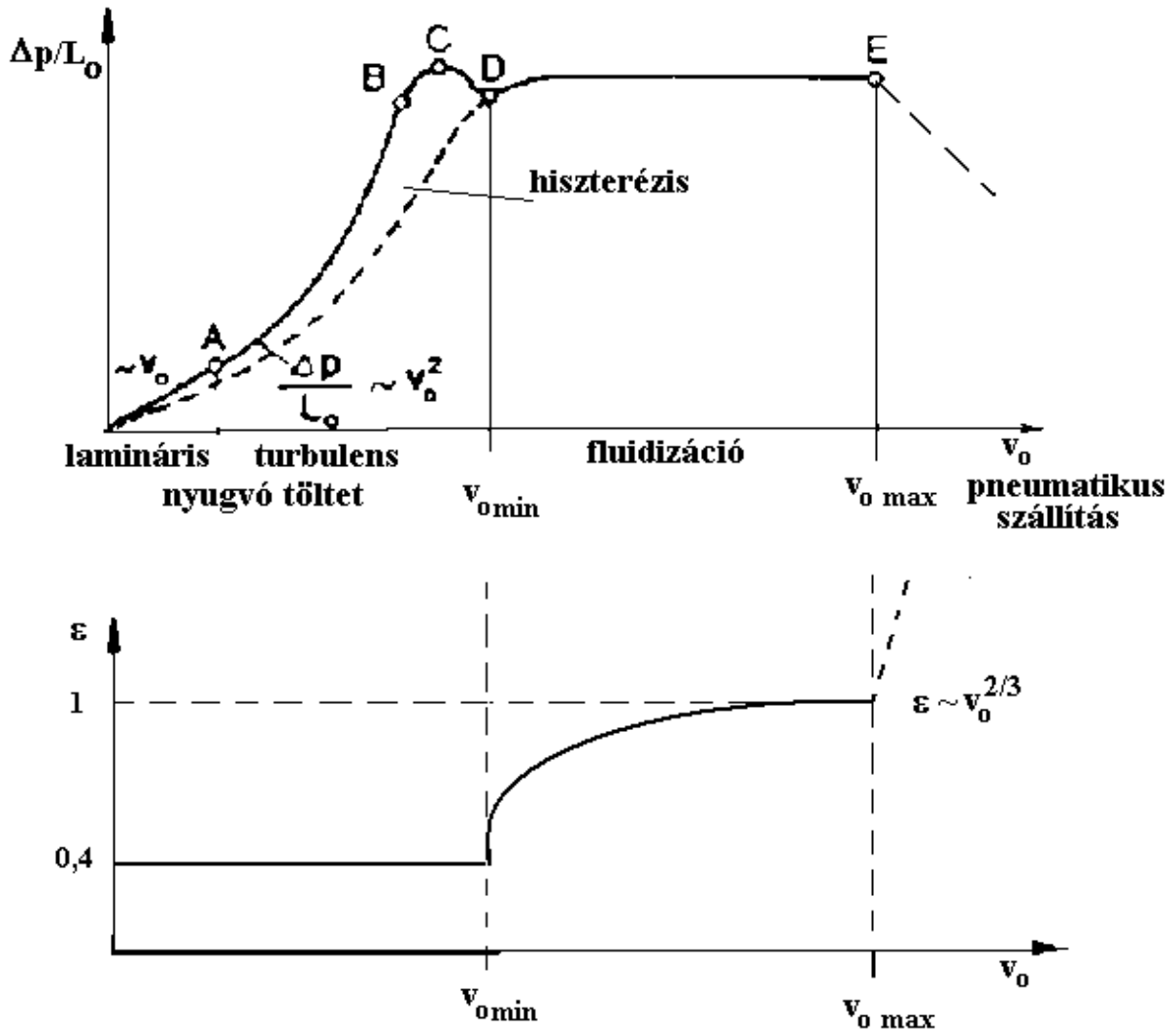
## Fluidizáció és pneumatikus szállítás

Ha gáz vagy folyadék, egy függőleges csőben kis lyukátmérőjű perforált lemezen (tartórácson) elhelyezett szemcsés rétegen áramlik alulról felfelé, akkor elegendően nagy sebességű fluidum áram esetén a szilárd részecskék lebegnek a fluidum áramban. Az így létrejövő réteget fluidizált rétegnek nevezik, és magát a műveletet fluidizációnak. A fluidizációt széles körben alkalmazzák az iparban, például szemcsés anyagok szárítására, pörkölésére, adszorpcióra, katalitikus reakciók végrehajtására, stb.

### A fluidizáció jelensége

Tekintsünk egy henger alakú edényt, amelyben valamilyen perforált lemezre  $L$  magasságú szilárd szemcsés anyagot helyezünk. Legyen a részecskék mérete lényegesen kisebb, mint a cső átmérője. A töltött csőben a felfelé áramló fluidum  $v_0$  áramlási sebességét növeljük, és közben mérjük a tölteten fellépő nyomásesést. Vezessük be a hézag nélküli redukált töltet magasságot,  $L_0 = (1-\varepsilon) L$ . Ábrázoljuk az egységnyi redukált töltet magasságra eső nyomásesést a  $\Delta p/L_0$  értékeket az áramlási sebesség függvényében, akkor az 51. ábra látható görbét kapunk.

Viszonylag nem nagy áramlási sebességek esetén a szemcsés réteg változatlanul marad, és jellemzői a fajlagos felület és a porozitás, az áramlási sebesség változásával sem változnak. Ekkor a fluidum egyszerűen átszűrődik a rétegen, viszont az áramló fluidum nyomásesése először a sebességgel egyenes arányban, majd nagyobb sebességnél (nagyobb  $\text{Re}$ -számnál) a sebesség négyzetének arányában nő (A pont).



51. ábra. Töltött oszlopon a nyomásesés és a porozitás a sebesség függvényében

Ez az összefüggés a felfelé irányuló fluidum áramlásban csak addig érvényes, míg az így számított súrlódási nyomásvesztés el nem éri a töltetnek egységnyi felületre eső archimedesi súlyát (B pont). Ebben a pillanatban a részecskék megmozdulnak, fellazulnak és kezdenek elrendeződni a legkisebb ellenállás irányában. A sebesség növelésével az ellenállás tovább nő, de kisebb mértékben, sőt egy maximum (C pont) után kissé csökken, mivel az elrendeződés (fellazulás) jobban csökkenti az ellenállást, mint ahogy a sebesség azt növeli. A D pont után már a sebesség növelésével a részecskék elválnak egymástól és a fluidumban egyenként lebegnek. A szilárd részecskéket a  $v_{0min}$ , kritikus sebességgel (minimális fluidizációs sebesség vagy a fluidizáció kezdeti sebessége) áramló fluidum áramlási ellenállása tartja fent, ami nem stabilis állapot. A gáz üres keresztmetszetre vonatkoztatott felfelé irányuló áramlási sebessége kisebb, mint a szilárd részecskék ülepedési sebessége. A gázsebesség nem elegendő ahhoz, hogy a teljes szilárd részt magával ragadja, és folyamatosan szállítsa. Ugyanakkor, ha a gázsebesség kellően nagy, a gázáramon belül örvénylő mozgás van, amely alkalmas a részecskék időszakos felemelésére. A részecskék tehát folyamatos emelkedések és esések sorozata. A szilárd és gázfázis össze van

keverve, és együttesen forrásban levő folyadék módjára viselkedik. A D pont tehát a fluidizáció kezdő pontja, és itt a sebesség  $v_{0\min}$ .

A sebesség növelésével a töltet magassága nő. A nyomásesés a hézagterefogat ( $\varepsilon$ ) állandó növekedése miatt állandó, mindaddig, míg a fellazulás el nem éri azt a mértéket, amelynél már az egyes részecskék olyan távol vannak egymástól, hogy egymásra nincs hatásuk. A fluidizáció az E pontban fejeződik be, itt a gázsebesség eléri a részecskék ülepedési sebességét,  $v_{0\max}$  (végső fluidizációs sebesség), elkezdődik a részecskék kihordása (pneumatikus szállítása). A fluidizációs tartományban a nyomásesés állandóságából következik, hogy a hézagterefogat növekedése és az üres oszlopra vonatkoztatott áramlási sebesség között a (8.87) egyenlet alapján  $v_0 \approx \varepsilon^{3/2}$  összefüggés áll fenn.

Folyadékkal történő fluidizáció esetén a sebesség növekedésével a fellazulás és a részecskék turbulens mozgása homogén fázist képez. Gázzal történő fluidizáció esetén, rendszerint nem lehet homogén fluidizált réteget kialakítani. A gáz csatornákat képez a szemcsés rétegben, illetve nagyobb buborékokat képezve lökdösődve hagyja el a fluidizált réteget.

A  $v_{0m}$  munkasebesség (amelynek értéke a fluidizációs tartományban a  $v_{0\min}$  és  $v_{0\max}$  között van) és a fluidizáció kezdeti sebességének hányadosát fluidizációs számnak ( $K = v_{0m}/v_{0\min}$ ) nevezzük. Az optimális fluidizációs számot kísérletileg kell meghatározni, és  $K = 2$  értéknél az esetek többségében már intenzív a keveredés.

## A fluidizáció kvantitatív leírása

Gravitációs erőterben a részecskékre hat a gravitációs erő és a felhajtó erő eredője, az archimedesi súly. A fluidizáció akkor kezdődik, a töltet akkor tud megmozdulni, ha a (8.60) egyenletnek megfelelően, a töltet ellenállásából származó erő megegyezik a töltet archimedesi súlyával:

$$8.92. \text{ képlet. } F_s = F_g - F_f = (1 - \varepsilon)\rho_p ALg - (1 - \varepsilon)\rho_f ALg = (1 - \varepsilon)(\rho_p - \rho_f)ALg.$$

A töltetet tartó A felületű rácsra nehezedő nyomás:

$$8.93. \text{ képlet. } \Delta p = \frac{F_s}{A} = L(1 - \varepsilon)(\rho_p - \rho_f)g.$$

Ez a nyomás megegyezik a (8.87) egyenlet szerint, a töltet ellenállásából adódó súrlódási nyomásvesztéssel:

$$8.94. \text{ képlet. } f_p \frac{L\rho_f}{D} \left( \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \right) v_0^2 = L(1 - \varepsilon)(\rho_p - \rho_f)g.$$

A (8.94) egyenlet érvényes a fluidizáció kezdőpontjában is:

$$8.95. \text{ képlet. } (\rho_p - \rho_f)g = f_p \frac{\rho_f}{D\varepsilon_{\min}^3} v_{0\min}^2,$$

ahol  $v_0 = v_{0\min}$ , fluidizáció kezdeti sebessége, és  $\varepsilon = \varepsilon_{\min}$ , a minimális szabad térfogati tényező. A  $v_{0\min}$ , és az  $\varepsilon_{\min}$ , a fluidizáció legfontosabb jellemzői. Fluidizációnál a súrlódási nyomásvesztés számítására legtöbb esetben az Ergun egyenletet használjuk. Írjuk be a (8.94) egyenletbe az Ergun által megadott súrlódási veszteséget, és gömbre, vagy gömbnek tekinthető részecskékre kapjuk:

$$8.96. \text{ képlet. } (\rho_p - \rho_f)g = \frac{\rho_f v_{0\min}^2}{D_p \varepsilon_{\min}^3} \left[ \frac{150(1 - \varepsilon_{\min})\eta}{D_p v_{0\min} \rho_f} + 1,75 \right] = \frac{\rho_f v_{0\min}^2}{D_p \varepsilon_{\min}^3} \left( \frac{150}{Re_{p\min}} + 1,75 \right).$$

A (8.96) egyenletben a  $Re_{p\min}$  a fluidizáció kezdőpontjában a Re-szám, Ha ismerjük az  $\varepsilon_{\min}$  értékét a fluidizáció kezdőpontján, akkor a minimális fluidizációs sebességet a (8.96) egyenletből számíthatjuk. Az  $\varepsilon_{\min}$  függ a részecskék alakjától. Gömb alakú részecskénél az  $\varepsilon_{\min}$  rendszerint 0,4-0,45 érték között van.

## A pneumatikus szállítás

Ha a felfelé áramló fluidum sebessége nagyobb, mint a fluid ágyban levő részecskék ülepedési sebessége, akkor a fluidum magával ragadja, kihordja, elszállítja a részecskéket. A kihordás pillanatában a nyomásesés a készülékben erőteljesen csökken amiatt, hogy a részecskék kikerülnek a készülékből ( $\varepsilon = 1$ ) és már nem kell azokat fenntartani. A  $v_0$  további növelésével ismét növekszik a nyomáskülönbség, az üres csőben fellépő súrlódás növekedése miatt. A pneumatikus szállítás fluiduma a gyakorlatban rendszerint levegő vagy víz. Ha a levegő sebessége  $v_{lev}$  és a részecske ülepedési sebessége  $v_{ü}$ , akkor a szállítási sebesség:  $v_{száll} = v_{lev} - v_{ü}$ . A tapasztalat alapján  $v_{lev} \approx 2v_{ü}$ .

A pneumatikus szállítás vízszintes csőben is megvalósítható, mert a turbulens áramlás gomolygása és a falról való visszaverődés megakadályozza a részecskék kiülepedését.

A pneumatikus szállítást elsősorban darabos, kristályos anyagok szállítására lehet alkalmazni. A gyakorlatban kétféle típus terjedt el. Vákuum szivattyút alkalmazva több helyről egy helyre, míg a kompresszoros pneumatikus szállításnál egy helyről több helyre szállítják az anyagot.

Meleg levegővel történő pneumatikus szállítás egyidejű szárítást is lehetővé tesz. Ha a szállított anyag adszorbens, akkor a folyamat során adszorpciót vagy deszorpciót is végre lehet hajtani.

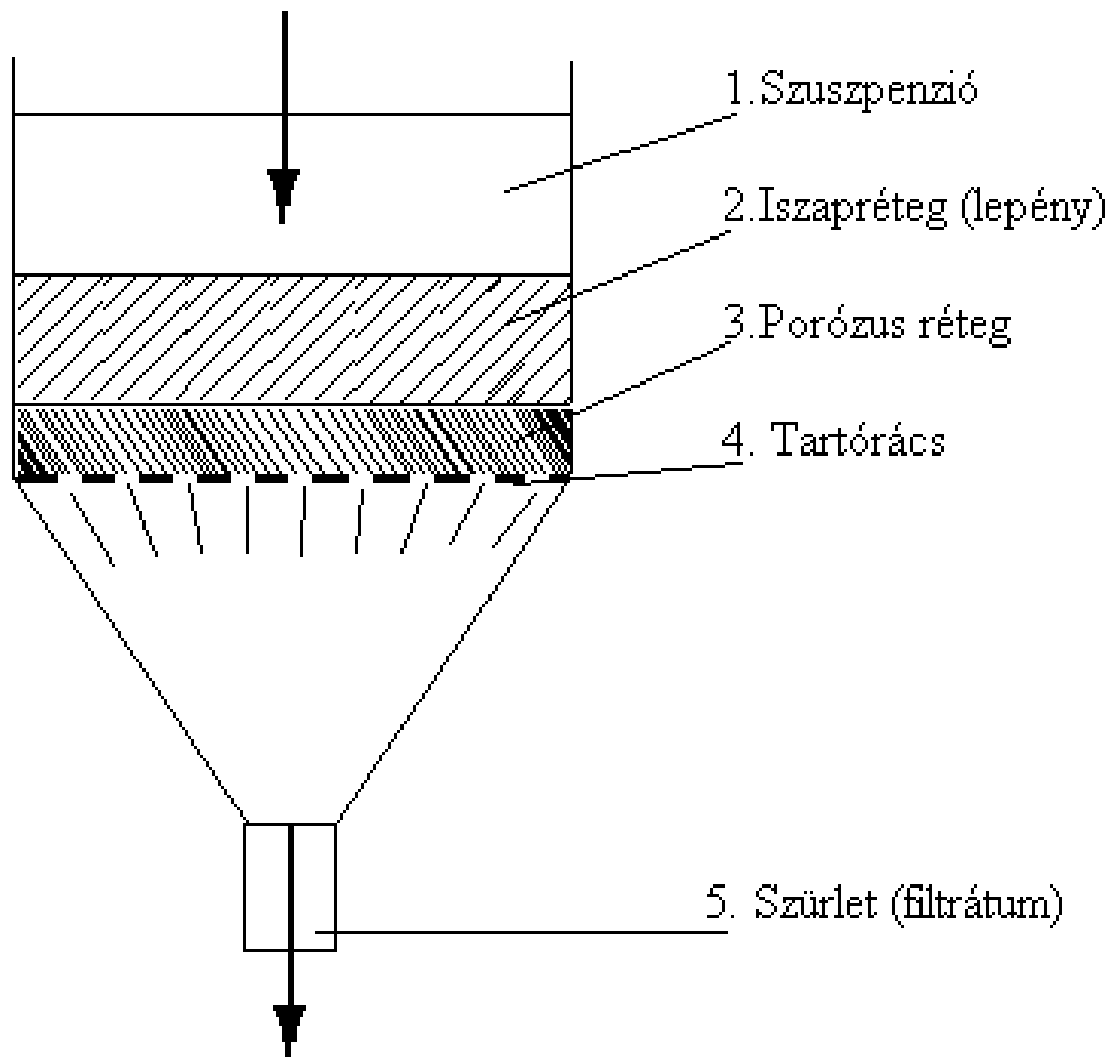
## Szűrés

A szűrés szilárd anyag elválasztása folyékony anyagtól oly módon, hogy a szilárd részecskéket, tartalmazó folyadékot (szuszpenziót) pórusos szűrő közegen (szűrőpapír, szűrővászon) engedjük át. A folyamatban a szilárd anyag, mint iszapréteg fennmarad a szűrő felületén, a folyadék a nyomáskülönbség hatására átáramlik a szűrő pórusain.

A nyomáskülönbséget előidézhetjük gravitációs úton, szivattyúval, vákuum szivattyúval, túlnyomás alkalmazásával. Amennyiben a szűrést a centrifugális erőter

kihasználásával szűrőcentrifugákban valósítjuk meg, akkor ezt az elválasztási műveletet centrifugálásnak nevezzük. A centrifugális erőterben a létrehozható nyomáskülönbség több százszor, vagy több ezerszer nagyobb, mint a gravitációs erőterben.

A szűrésnek két alapvető típusát különböztetjük meg, a felületi és a mélységi szűrést. A felületi szűrésnél valamilyen perforált lemezen, tartórácson porózus szűrő közeget (szűrőpapírt, szűrővásznat) helyeznek el, és a szűrőközeg felületén kivált szilárd anyag, szűrőlepeny a továbbiakban szűrőréteggént viselkedik. A mélységi szűrésnél kavicsot, homokot, koksztöltésű szűrőket használnak, és a szilárd anyag a töltet belsejében rakódik le. Például a talajon átszivárgó víz mélységi szűréssel tisztul. A szűrés elvi vázlatát az 52. ábra mutatjuk be.



**52. ábra.** A szűrés elvi rajza

A szűrés (szűrőrétegen való áramlás) az álló szilárd szemcsés rétegen történő folyadékáramláshoz hasonló jelenség. A folyadék itt felülről lefelé áramlik a szemcsés rétegen. A különbség az, hogy a szűrés folyamán az iszapréteg vastagsága nő, ami azt jelenti, hogy állandó nyomáskülönbség mellett, a növekvő ellenállás miatt a szűrlet térfogatárama csökken. Ha az iszapréteg összenyomhatatlannak tekinthető, akkor a szűrőréteg nagy ellenállású töltött réteggel számíthat, melynek pórusai között, a kialakult

kapillárisokban az áramlás lamináris. A szűrésnél a szűrőréteg előtt és után az áramlási sebesség állandó  $v_1 = v_2 = v_0$ , ekkor az energiaveszteség a (8.89) Blake-Kozeny-egyenlet szerint:

$$8.97. \text{ képlet. } \Delta p = \frac{150(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3 D^2} \eta L v_0 = \alpha \eta L v_0,$$

$$8.98. \text{ képlet. } v_0 = \frac{\Delta p}{\alpha \eta L} = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt}.$$

Szakaszos művelet esetén a szűrő teljesítményét számszerűen a szűrés  $v_0$  sebessége jellemzi, ami az egységnyi szűrőfelületen egységnyi idő alatt áthaladó szűrt folyadék  $V$  térfogatát jelenti. A (8.98) a Darcy-féle szűrés differenciálegyenlete, amely szerint a szűrés sebessége egyenesen arányos a  $\Delta p$  nyomáskülönbséggel, fordítottan arányos a szűrlet  $\eta$  dinamikus viszkozitásával, a szűrőréteg  $\alpha$  fajlagos ellenállásával, valamint az  $L_i$  iszapréteg vastagságával. A (8.98) egyenlet integrálásához szükség van a  $V(L_i)$  összefüggés ismeretére.

Belátható, hogy az  $L_i$  iszapréteg vastagsága egyenesen arányos a  $V$  szűrlet térfogatával és fordítottan arányos a szűrő felületével

$$8.99. \text{ képlet. } L_i = k \frac{V}{A},$$

ahol  $k$  arányossági tényező. A szűrőréteget a porózus szűrő anyag (pl. szűrővászon) és az iszapréteg alkotja. A porózus szűrő anyagnak is van ellenállása. Ezt az ellenállást a  $V_h$  ( $m^3$ ) hipotetikus szűrlettérfogat bevezetésével vesszük figyelembe.  $V_h$  az a szűrlettérfogat, amelynek áthaladásakor a szűrővászonnal megegyező ellenállású iszapréteg keletkezne, amelynek a vastagsága  $L_h$ :

$$8.100. \text{ képlet. } L_h = k \frac{V_h}{A}.$$

Tehát a szűrőréteg vastagsága  $L = L_i + L_h$ , ahol  $L_h$  állandó, és  $L_i$  a szűrés folyamán nő. Mindezek figyelembevételével a (8.98) egyenlet:

$$8.101. \text{ képlet. } \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta p A}{\alpha \eta (L_i + L_h)} = \frac{\Delta p A}{\alpha \eta k \left( \frac{V}{A} + \frac{V_h}{A} \right)} = \frac{A^2 \Delta p}{\alpha \eta k (V + V_h)} = \frac{A^2 \Delta p}{2C (V + V_h)}.$$

A egyenletben  $C$  (Pas/ $m^2$ ) a szűrési állandót jelöli. Ha feltételezzük, hogy a  $\Delta p$  konstans, akkor a (8.101) egyenlet integrálható, és a szűrési idő a  $C$  és a  $V_h$  ismeretében kiszámítható. A  $C$  és a  $V_h$  értékét kísérletileg kell meghatározni. Vegyük a (8.101) egyenlet reciprokát:

$$8.102. \text{ képlet. } \frac{\Delta t}{\Delta V} \approx \frac{dt}{dV} = \frac{2C}{A^2 \Delta p} V + \frac{2C V_h}{A^2 \Delta p}.$$

Amennyiben a  $\Delta t/\Delta V$  értékeit ábrázoljuk a  $V$  függvényében akkor egy egyenest kapunk. Az egyenes meredekségéből a  $C$  értékét, majd a tengelymetszetből a  $C$  ismeretében a  $V_h$  kiszámítható. A (8.102) egyenlet integrálásával kapjuk:

$$8.103. \text{ képlet. } t = \frac{C}{A^2 \Delta p} V^2 + \frac{2CV_h}{A^2 \Delta p} V.$$

egyenletet, amiből az adott térfogatú szűrlet keletkezéséhez szükséges szűrési időt, vagy a szűrő felületet számíthatjuk.

Amennyiben a  $C$  és a  $V_h$  értékeit laboratóriumi szűrési kísérletekből határoztuk meg, az üzemi berendezés számításánál figyelembe kell venni, hogy  $V_h$  hipotetikus szűrlettérfogat a laboratóriumi berendezés szűrőfelületére vonatkozik, mivel a  $V_h$  egyenesen arányos a felület nagyságával. Ekkor az üzemi berendezés szűrőfelületének vagy a szűrési idő számításánál a laboratóriumi körülmények között mért  $V_h$  hipotetikus szűrlettérfogatot meg kell szorozni az üzemi szűrő felületének  $A$  és a laboratóriumi szűrő felületének  $A_L$  hányadosával:

$$8.104. \text{ képlet. } t = \frac{C}{A^2 \Delta p} \left( V^2 + 2 \frac{A}{A_L} V_h V \right).$$

A szűrőberendezések lehetnek szakaszosak és folyamatosak. A szakaszos üzemű szűrők: Kavics vagy homokszűrők, nuccs szűrők, táskás szűrők, szűrőprések, melyek lehetnek keretes vagy kamrás, szűrőcentrifugák. A folytonos üzemű szűrők közül a leginkább elterjedt a vákuum dobszűrő, félfolyamatos és folyamatos üzemű szűrőcentrifuga.

## Centrifugálás

A szűrés és az ülepitési műveleteket meg lehet valósítani centrifugális erőterben is. Ebben az esetben a szétválasztás több százszor, vagy több ezerszer gyorsabb, mint gravitációs erőterben.

A centrifugákat csoportosíthatjuk: szakaszos és folyamatos üzemű szűrő- és ülepitő centrifugákra, valamint derítő- és emulzióbontó centrifugákra.

A centrifuga főbb részei: hajtómotor, telepalástú vagy perforált dob, amely készülhet hengeres vagy kúpos kivitelben. A centrifuga elhelyezkedése lehet függőleges vagy vízszintes.

A centrifugában, ha egy  $m$  tömegű anyag a tengely körül,  $\omega$  szögsebességgel, illetve  $n$  fordulatszámmal forog egy  $r$  sugarú körön, akkor a fellépő centrifugális erő:

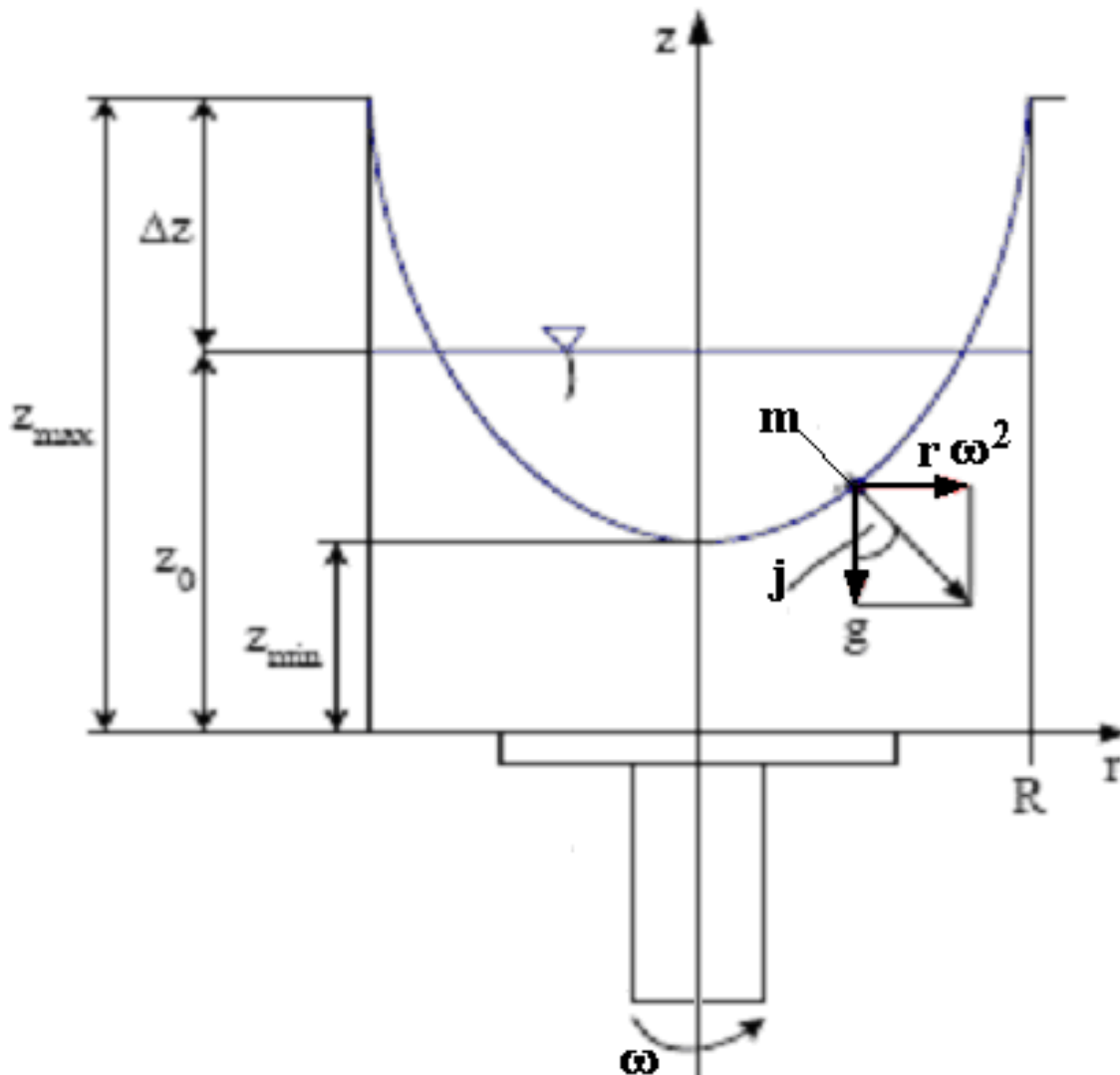
$$8.105. \text{ képlet. } F_c = m r \omega^2 = \frac{m v^2}{r} = \frac{m (2 r \pi n)^2}{r} = 4 \pi^2 n^2 r m.$$

A centrifugák  $j$  jelzőszáma egy szétválasztási tényező, ami a centrifugális  $F_c$  és nehézségi erő  $F_g$ , hányadosa:

$$8.106. \text{ képlet. } j = \frac{F_c}{F_g} = \frac{m r \omega^2}{m g} = \frac{4 \pi^2}{g} n^2 r \cong 4 n^2 r.$$



A centrifugális erőteret egy tengely körüli forgással tudunk létrehozni. A centrifugában folyadék van, ami a centrifuga dobbal együtt forog, akkor a folyadékfelszín egy forgási paraboloid, mint az az 53. ábra látható.



53. ábra. A centrifugában kialakuló folyadékfelszint

Felírva a  $m$  tömegű tömegpontra ható erőket egyensúlyi állapotban:

8.107. képlet.  $-gdz + r\omega^2 dr = 0$ .

Az integrálást a kijelölt határok között

8.108. képlet.  $\int_{z_{\min}}^{z_{\max}} dz = \frac{\omega^2}{g} \int_0^R r dr$ ,

elvégezve, egy parabola egyenletét adja, ami a térben forgás paraboloidot képez:

**8.109. képlet.**  $z_{\max} - z_{\min} = \frac{R^2 \omega^2}{2g} = \frac{v^2}{2g}$ .

A  $z_{\max}$  magasságú paraboloid  $V_{\text{pa}}$  térfogata:

**8.110. képlet.**  $V_{\text{pa}} = R^2 \pi \frac{z_{\max} - z_{\min}}{2}$ .

A gyakorlatban a függőlegesen elhelyezett centrifugáknál a fordulatszám akkora, hogy a nehézségi erő elhanyagolható a centrifugális erőhöz képest, ekkor a paraboloid alakú folyadékfelszínt egy kis nyílásszögű kúp- vagy egy henger palástjával helyettesíthető.

## Vegyipari technológiák és szennyezéseik

Réti Tamás, Chem-Bridge Kft.

Tungler Antal, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

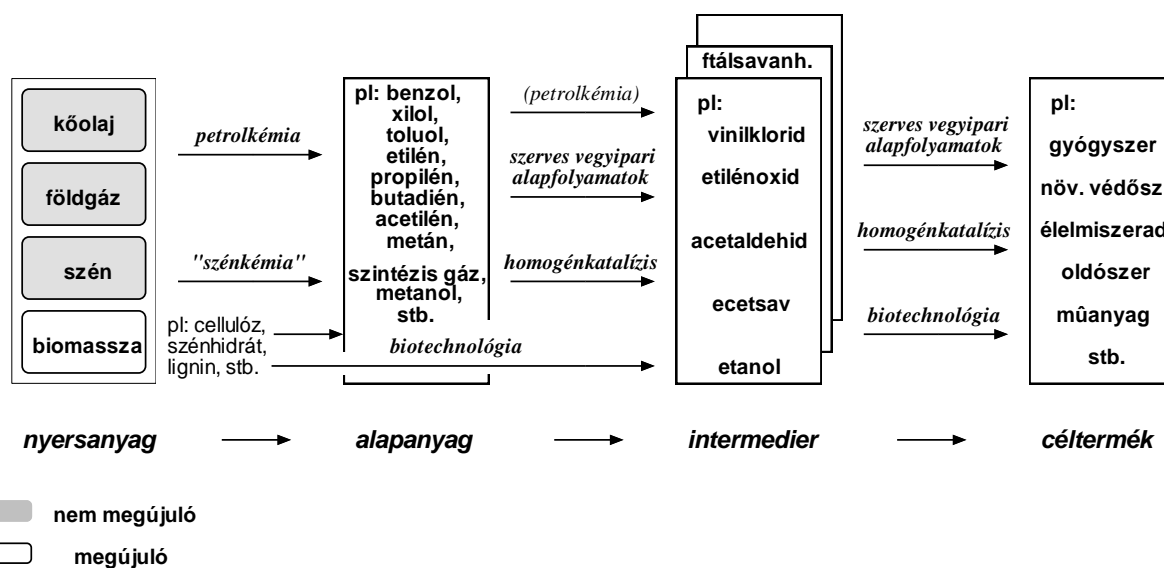
Tőrös Szilárd, Pannon Egyetem, Kémia Intézet, Szerves Kémia Intézeti Tanszék

### Bevezetés (a szerves kémiai technológiákhoz)

A szerves kémiai technológiák fogalmköre a kémiai technológiák részhalmaza.

A kémiai technológia a vegyipari termékek előállításával kapcsolatos reakciók vizsgálatával, gazdaságos ipari megvalósításával foglalkozó kémiai tudományág. Tárgyköréhez tartozik a gyártási helytől, az ipari fejlettségi színvonalától, a termék minőségétől és mennyiségétől függő optimális nyersanyagok kiválasztása, a termékhez vezető kémiai reakciók főbb jellemzőinek (hőmérséklet, nyomás, tartózkodási idő) megállapítása. A vegyipari gyakorlat tudománya; az eljárás tan, a művelet tan és a vegyipari géptan eredményeit is figyelembe véve elemzi az egyes eljárások kialakulását és fejlődési irányait.

A szerves kémiai technológia tárgyának tekintjük az 54. ábra szerint a szerves vegyipar területén az alapanyagoktól a céltermékekig tartó átalakítás teljes eszközrendszerét.



54. ábra. A szerveskémiai technológia tárgya

A szerves kémiai technológiák csoportosítása is többféle szempont szerint történhet. Kiindulhatunk a nyersanyagoktól (pl. a szerves vegyipar alapanyagainak, közbülső termékeinek előállítása), a módszerekből (szerves vegyipari alapfolyamatok, homogénkatalitikus eljárások) és a végtermékek szerinti csoportosításból (mosószeripar, növényvédőszer gyártása, műanyagok kémiai technológiája, stb.).

A szerves vegyiparhoz kapcsolódnak egyéb iparágak is (pl. gyógyszeripar, élelmiszeripar), de ezek abból a szempontból, hogy az alapanyagtól a végtermékig tartó gyártástechnológiai úton a kémiai átalakulások, vagy a fizikai változások a dominánsak, nagyon eltérőek.

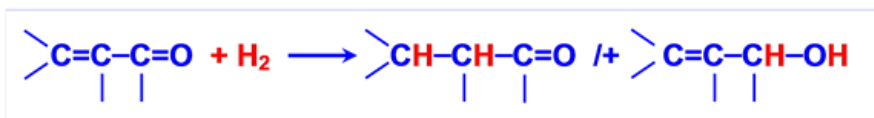
Mindezek, valamint a terjedelmi korlátok miatt jelen munkában csak egy szubjektív alapon történő, példázó jellegű megközelítést választhatunk.

A szerves kémiai technológiákra vonatkozik mindazon megállapítás, amely „A technológia fogalma és tárgya” című fejezetben szerepelt, de – a szerves anyagok tulajdonságai, a szerves kémiai reakciók sokrétősége miatt – bizonyos fogalmakkal ki kell egészítenünk ezt. Ilyen fogalom mindenek előtt a szelektivitás (55. ábra).

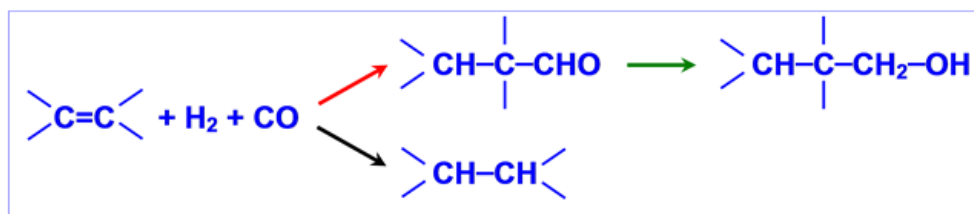
## Szelektív reakciók a szerves kémiában

kemoszelektív:

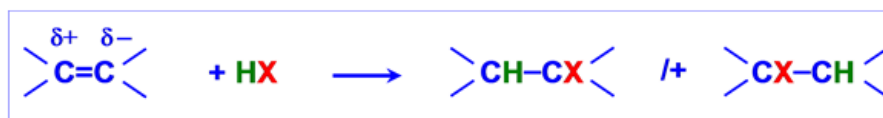
a)



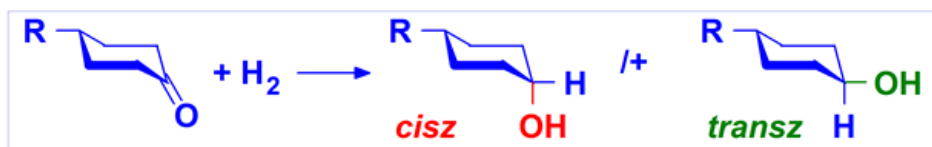
b)



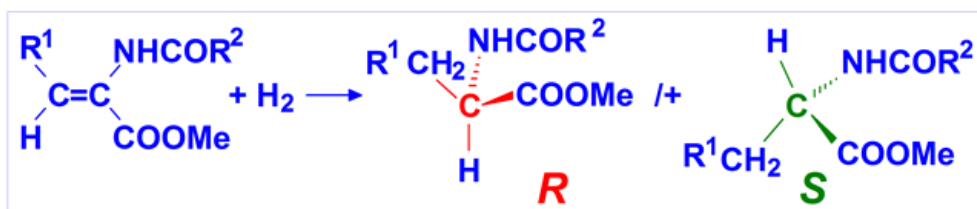
regioszelektív:



sztereoszelektív:



enantioszelektív:



55. ábra. A szelektív szintézisek egyes típusai

Egy szerves kémiai reakció lehet:

- kemoszelektív (*vagy több funkciós csoport közül csak az egyik alakul át, vagy több lehetséges reakció közül csak az egyik játszódik le*),
- regioszelektív (*szerkezeti izomerek keletkeznek, pl: olefinek HX addíciója*),
- sztereoszelektív (*cisz, transz vagy  $\alpha$ ,  $\beta$  geometriai izomerek keletkeznek*),
- enantioszelektív (*optikai izomerek - enantiomerek - keletkeznek*) és
- diasztereoszelektív (*több aszimmetriacentrumot tartalmazó vegyület keletkezik*).

Ha a szelektivitások felsorolt típusait áttekintjük, látható, hogy a lehetséges termékek közötti különbség egyre „kisebb”, egyre inkább csak a molekulák „finomszerkezetében” jelentkezik. Így természetes, hogy ha ezen szintézisek ipari megvalósítását vizsgáljuk, akkor amíg a kemoszelektív vagy regioszelektív reakciók esetén a szerves intermediereket több százezer tonnás nagyságrendben gyártó technológiákról beszélünk, addig az enantioszelektív szintézisek kapcsán a finomkémiai termékek, gyógyszerek világába jutunk.

## Szakaszos és folyamatos eljárások

A szerves kémiai reakciókat leggyakrabban üstreaktorban (szakaszos), vagy csőreaktorban (folyamatos) végzik.

Szakaszos technológiát alkalmaznak:

- ha a termelési kapacitás kisebb mint 500 t/év,
- szezonális és/vagy rövid élettartalmú termék esetében,
- kis sebességű reakciók esetén,
- nehezen kezelhető anyagok (pl.: zagyok) reakciójánál,
- gyorsan bomló, szennyeződésre érzékeny anyagok esetén,
- finomkémiai termékek, gyógyszerek, növényvédőszeresek esetében.

Folyamatos technológia ajánlott:

- ha a termelési kapacitás nagyobb mint 5000t/év,
- tartós, nagy kereslettel rendelkező termékek gyártásánál,
- olajipari, gázipari technológiák esetében.

(500 és 5000 t/év kapacitás között az adott céltermék és a piac jellemzői határozzák meg az előállítás módját.)

A szakaszos gyártás időben periodikusan ismétlődő részműveletekből áll:

- a kiindulási anyagok beadagolása,
- a reakció (művelet) elvégzése,
- a készülék kiürítése,
- a készülék kitisztítása.

Folyamatos gyártás során az egész gyártóberendezésen át gyakorlatilag állandó sebességgel áramlanak a folyamatban résztvevő anyagok, miközben olyan körülményeket biztosítunk, hogy a kívánt átalakulás lejátszódjék. A folyamat részei:

- a kiindulási anyagok elegyítése,
- az elegy felmelegítése,

- a reakció lejátszódása a tartózkodási idő alatt,
- a reakcióelegy lehűtése,
- a melléktermék(ek) elválasztása a termék(ek)től.

Folyamatos csőreaktor helyett használhatunk két vagy több egymás után elhelyezett szakaszos reaktort (kaszkádrendszer).

## A szerves vegyipar

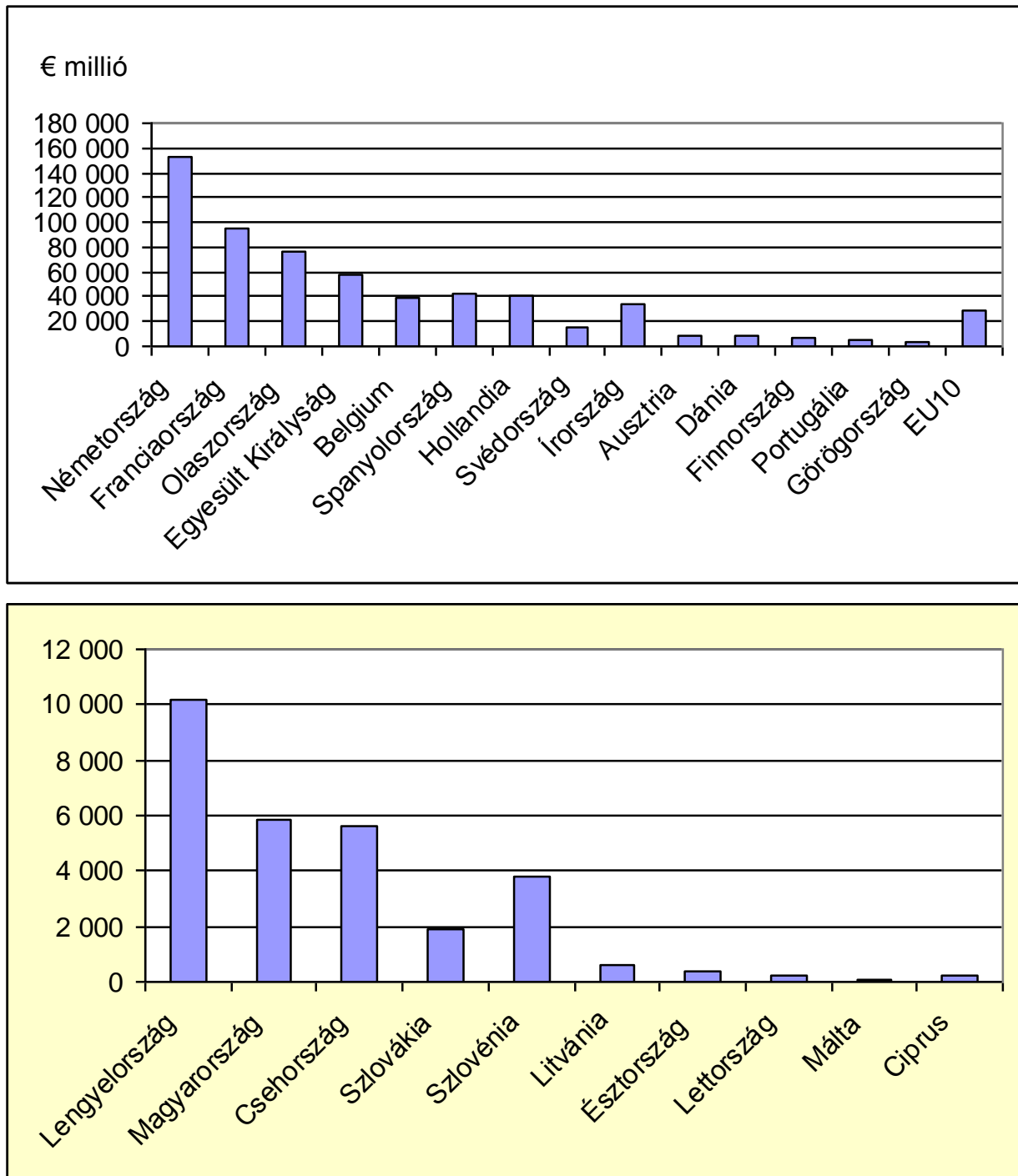
A szerves vegyipar a 20. században (és a 21. sz. elején is) a legnagyobb mértékben fejlődő iparágak egyike. Az EU-ban 2005-ben a vegyipar termelési értéke 613 billió € volt (2004-ben 580 billió €). A 2005. évi termelés országok szerinti megoszlását az 56. ábra -, a vegyiparnak az elmúlt 10 évben történt szektoronkénti növekedését pedig – 2000-hez, mint bázis évhez viszonyítva – a 8. táblázat tartalmazza.

8. táblázat. A vegyipar növekedése az EU-ban szektoronként 1995-2005 között

	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
ipar egésze	87,7	87,8	90,5	93,4	95,6	100,0	100,3	100,0	100,8	103,2	104,1
%-os növekedés		0,1	3,1	3,2	2,3	4,6	0,3	-0,2	0,8	2,4	0,9
petrolkémia	83,2	89,0	94,0	93,2	97,9	100,0	96,1	100,8	98,5	102,5	104,0
%-os növekedés		6,9	5,7	-0,9	5,0	2,2	-4,0	5,0	-2,3	4,1	1,4
műanyagok	78,8	81,4	88,9	88,9	94,0	100,0	95,6	95,0	92,5	95,0	97,9
%-os növekedés		3,3	9,2	0,0	5,8	6,4	-4,4	-0,6	-2,6	2,7	3,0
szervetlen anyagok	95,7	95,1	98,6	100,6	97,8	100,0	98,3	100,4	102,4	104,2	107,4
%-os növekedés		-0,7	3,7	2,1	-2,8	2,1	-1,6	2,1	2,0	1,7	3,1
gyógyszerek	79,0	81,8	85,1	89,5	95,4	100,0	111,1	119,8	127,3	132,3	136,8
%-os növekedés		3,6	4,0	5,1	6,6	5,1	10,7	7,8	6,3	3,9	3,5
finomkémiai termékek	88,9	89,0	94,8	93,9	95,2	100,0	96,5	96,2	95,5	99,3	98,1
%-os növekedés		0,1	6,6	-0,9	1,4	5,1	-3,5	-0,3	-0,8	3,9	-1,2
háztartási vegyiárúk	92,0	93,3	97,1	98,4	97,9	100,0	100,9	105,0	106,3	107,9	111,2
%-os növekedés		1,4	4,1	1,3	-0,5	2,2	0,9	4,1	1,3	1,5	3,0
vegyipar egésze	84,3	86,5	91,4	92,6	95,9	100,0	101,0	104,6	106,1	109,6	112,0
%-os növekedés		2,6	5,7	1,3	3,5	4,4	0,9	3,6	1,4	3,3	2,2
vegyipar gyógyszer nélkül	86,4	88,4	93,9	93,9	96,1	100,0	97,0	98,6	97,7	100,7	102,2
%-os növekedés		2,3	6,3	0,0	2,4	4,1	-3,0	1,6	-0,9	3,0	1,5

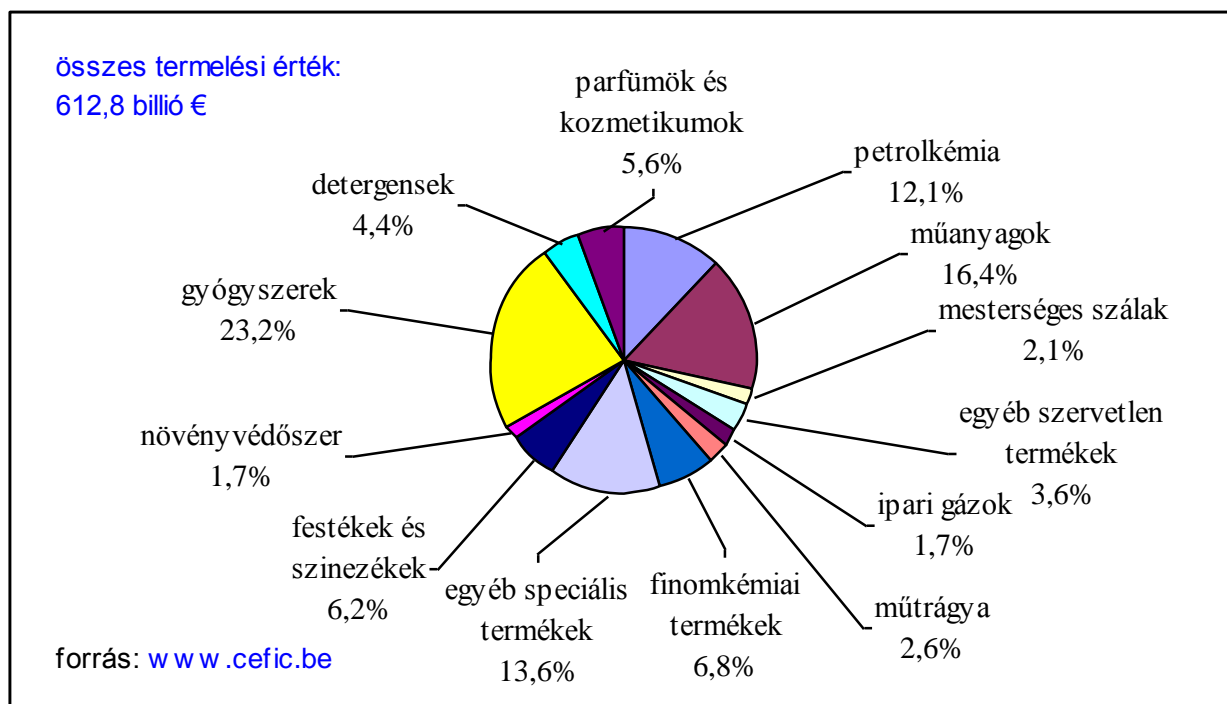
Forrás: [www.cefic.be](http://www.cefic.be)

A táblázat adataiból is jól látható, hogy a vegyiparon belül különösen jelentős mértékben fejlődött a gyógyszeripar, és 2005-ben már 23,2 %-os termelési értékkel a legnagyobb iparág (57. ábra).



56. ábra. Az EU vegyipari termelésének megoszlása 2005-ben országok szerint

Forrás: [www.cefic.be](http://www.cefic.be)



57. ábra. Az EU vegyiparának felosztása iparágak szerint

## A szerves vegyipar nyersanyagai, alapanyagai és közbülső termékei

A vegyiparban a nyersanyagok és az energia hozzáférhetősége és ára mindig döntően befolyásolja, alakítja a technológiákat. A szerves vegyipar egyike a legnagyobb energiafelhasználóknak, másfelől viszont döntően nem megújuló fosszilis nyersanyagokat használ fel egyre szélesebb körben termékeinek előállítására. A fejlesztési terveket – az energiatakarékos és hulladékszegény eljárások fejlesztésén túl – főleg arra kell koncentrálni, hogy hogyan lehet fokozni a nyersanyagellátás flexibilitását a vegyipar igényeinek kielégítésére.

Van ugyan lehetőség arra, hogy a szerves vegyipar alapanyagait és közbülső termékeit akár kőolajból, akár földgázból, vagy kőszén bázison, esetleg biomassza felhasználásával állítsuk elő (58. ábra - 60. ábra), de ennek ellenére hosszabb távon valószínű, hogy az energiaellátást úgy kell alakítani, hogy a vegyipar számára legvonzóbb nyersanyagbázist minél tovább meg lehessen tartani.

Prognosztizált becslések szerint kb. 2030-ig még a földgáz és a kőolaj marad a fő energiahordozó, mivel a technológiai átalakítások évtizedekben mérhető időt igényelnek.

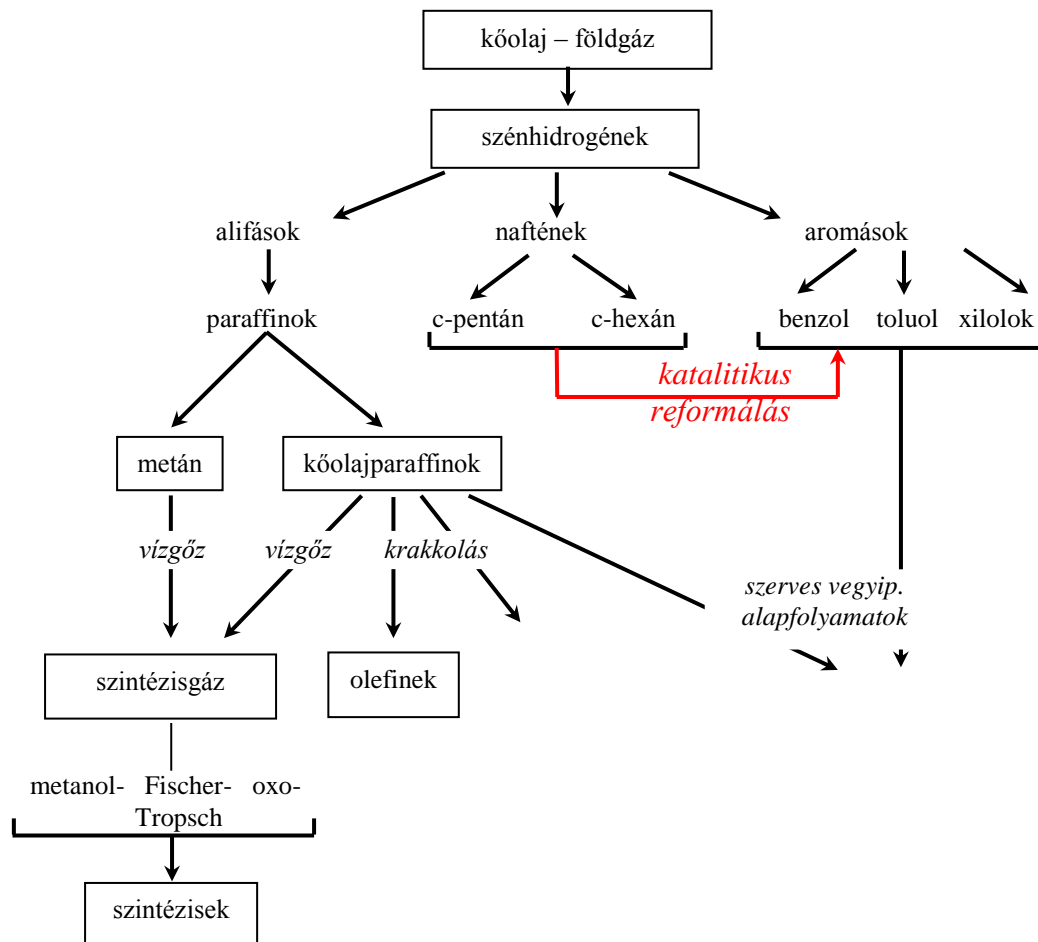
A jövőbeli kilátásokat nyersanyag-fajtánként külön-külön meg kell vizsgálni.

A kinyerhető becsült kőolajkészlet a világon  $520 \times 10^9$  t, ennek 65 %-a Közel-Keleten van. Változatlan felhasználást alapul véve kb. 42 évig elég.

Az újabb feltárások eredményeként a világ becsült földgázkészlete ( $374 \times 10^{12}$  m<sup>3</sup>) valamivel nagyobb az olajkészletnél, a legnagyobb része Kelet-Európában és Kínában található.



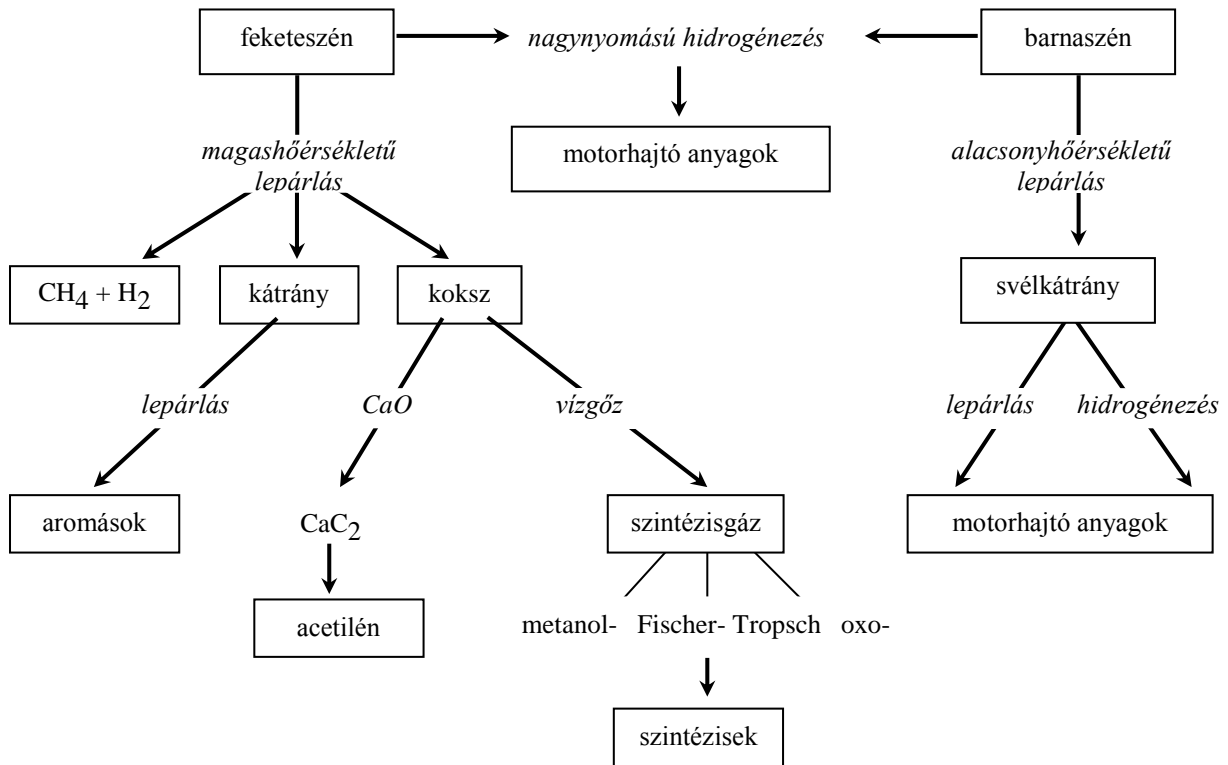
A készletek tekintetében a kőszén a legelterjedtebb és legjelentősebb fosszilis energiaforrás. A területi eloszlása kiegyenlített, ugyanakkor a kitermelése gazdasági okokból az utóbbi időszakban visszaszorult.



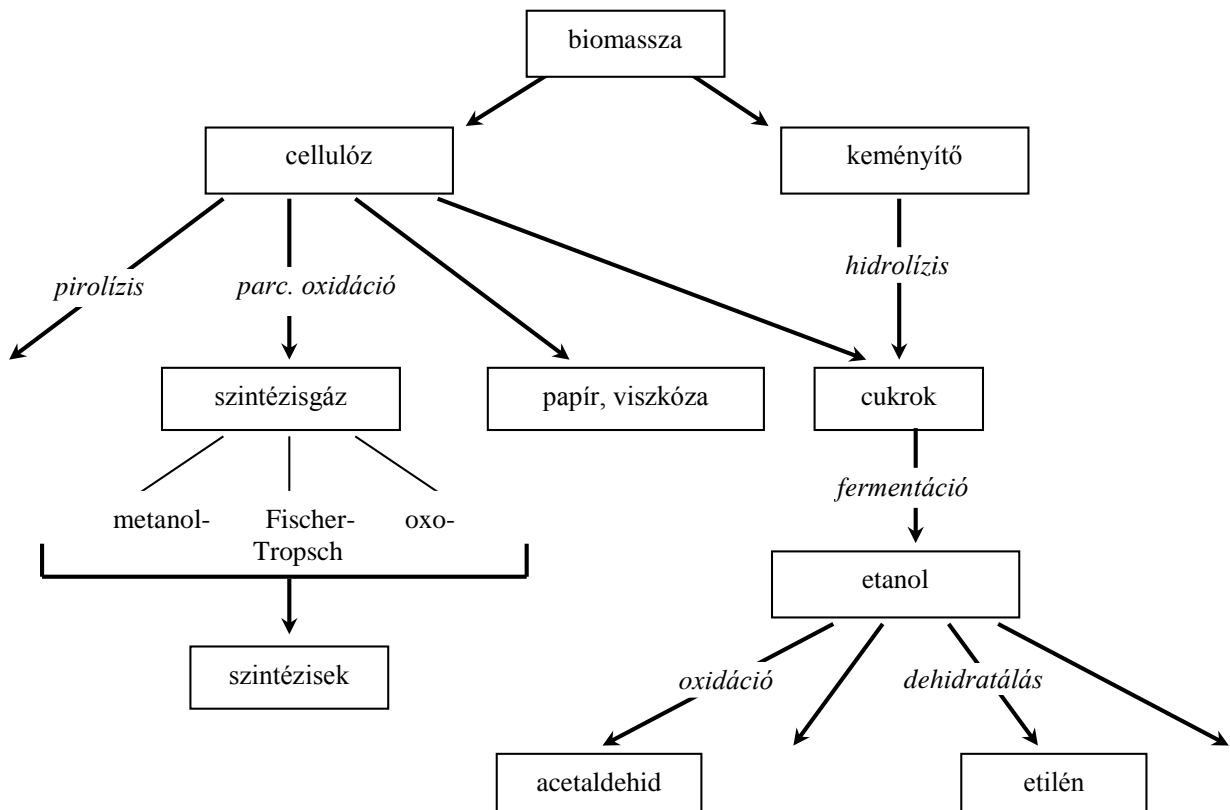
58. ábra. A kőolaj és földgáz, mint szerves vegyipari nyersanyag

Az elmúlt évtizedekben a szerves vegyipar igen jelentős fejlődését a széntekológiáról a kőolaj-technológiára való széles körű átállás biztosította.

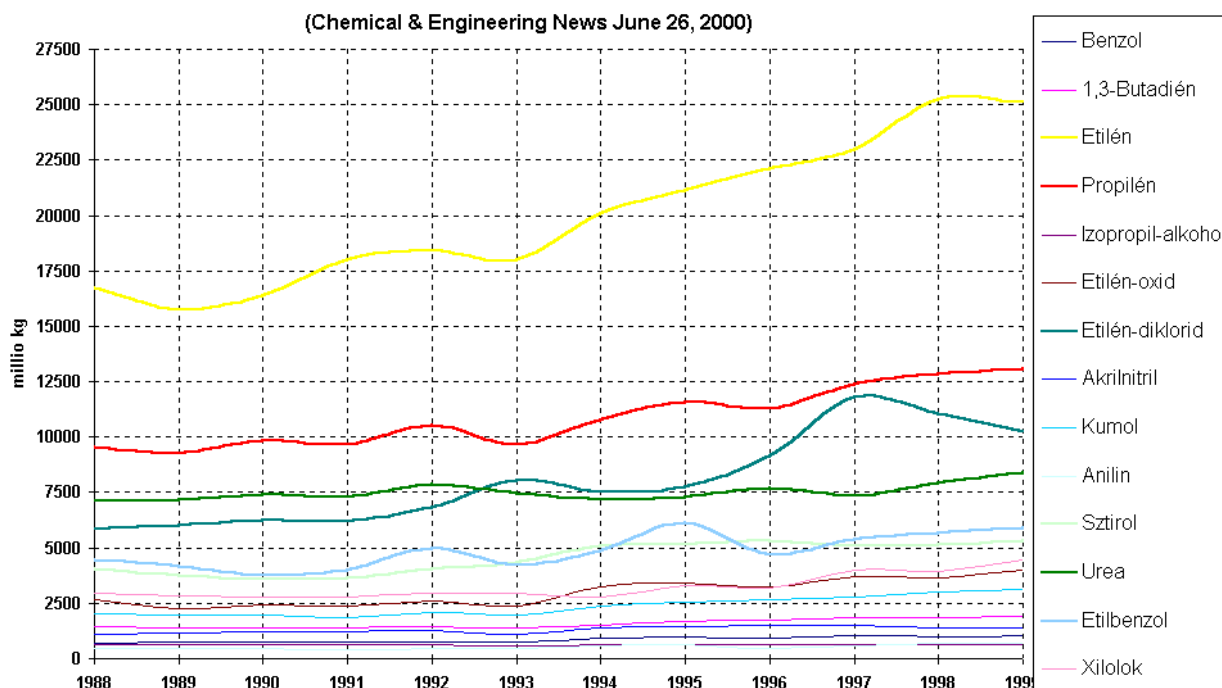
Az ipari szerkezet átalakítása azt eredményezte, hogy az acetilénről – mint alapanyagról – áttértek az olefinbázisra. Az etén és propén jelenleg is a legnagyobb volumenben termelt szerves vegyipari alapanyag (61. ábra).



59. ábra. A szén, mint szerves vegyipari nyersanyag



60. ábra. A biomassza, mint szerves vegyipari nyersanyag

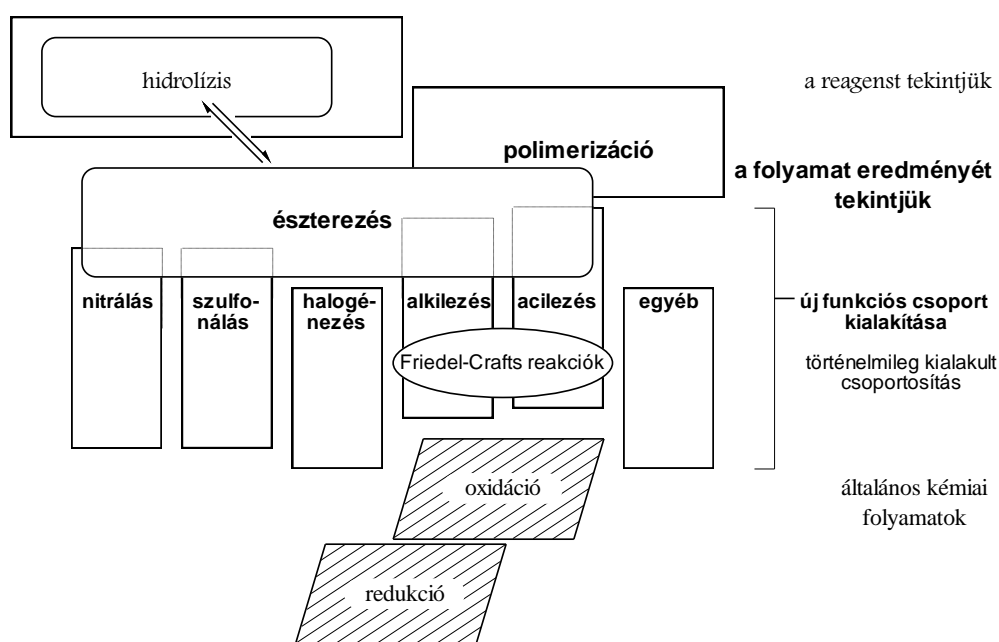


61. ábra. A szerves vegyipar egyes alapanyagainak termelése

## A szerves vegyipari alapfolyamatok

Az 1930-as években P. H. Groggins ismerte fel, hogy a szerves vegyipar szintézisei során kis számú lépés, ún. alapfolyamat összekapcsolásával állítják elő a sokféle közbülső vegyületet és végterméket. Így például hasonló lépéseket alkalmaznak a gyógyszerek, növényvédőszer, színezékek, stb szintézisére, bár más-más kiinduló anyagot használnak.

Ezen alapfolyamatokat többféle szempont szerint csoportosíthatjuk (62. ábra).



62. ábra. A szerves vegyipari alapfolyamatok

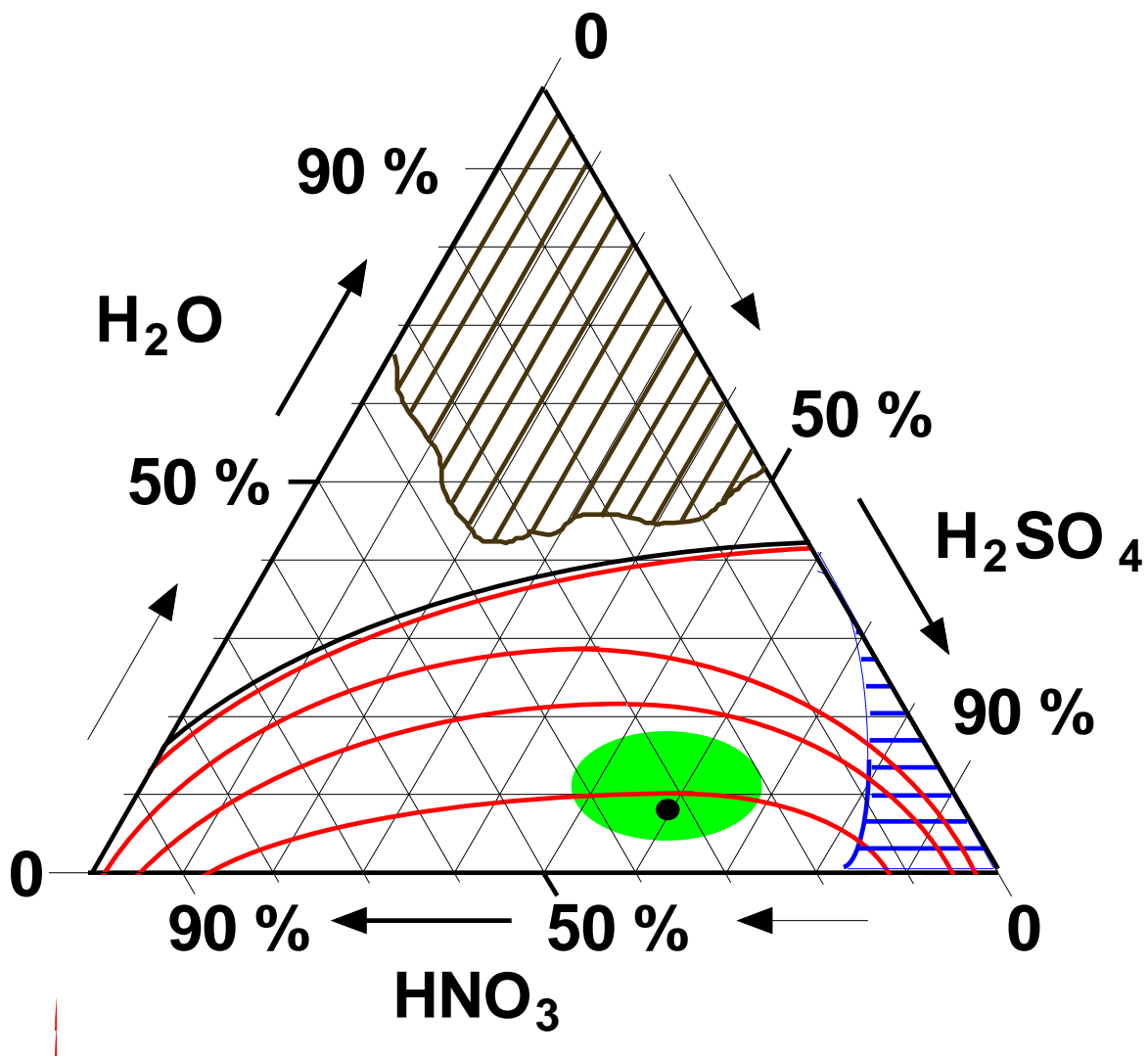
Az alapfolyamatok szisztematikus tárgyalását mellőzve a következőkben csak néhány példát és technológiát tekintünk át röviden.

## Nitrálás

A nitrálás az az eljárás, amelyben szerves vegyületbe  $-\text{NO}_2$  csoportot viszünk be úgy, hogy e csoport C- vagy N-atomhoz kapcsolódjék. A gyakorlatban a salétromsav-észterek előállítását is gyakran nitrálásnak nevezik, jóllehet ebben az esetben észteresítésről van szó (nitratálás).

A nitrálás gyakran alkalmazott alapfolyamat az intermedierek és végtermékek előállításában. Különösen fontosak a nitrovegyületek a műanyag-, a színezék- és a robbanószeriparban, de számos képviselőjük megtalálható az oldószerek, növényvédőszer, gyógyszerek és illatanyagok között is.

A gyakorlatban nagyobb jelentősége van az aromás vegyületek nitrálásának, amit általában folyadékfázisban, oldószer nélkül végeznek. A folyamat rendkívül exoterm. Nitrálószerként leggyakrabban kevertsavat alkalmaznak, amelynek összetételét háromszögdiagramban szokás ábrázolni (63. ábra).

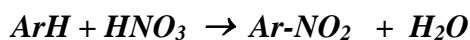


63. ábra. Kevert nitrálásav – háromszög diagram

A nitrálásnál a valódi reagens a nitrónium kation, amely a kevertsavból egyensúlyi folyamatban keletkezik.



A reakció során keletkező víz felhígítja a salétromsavat, így a nitrónium ion koncentráció lecsökken.

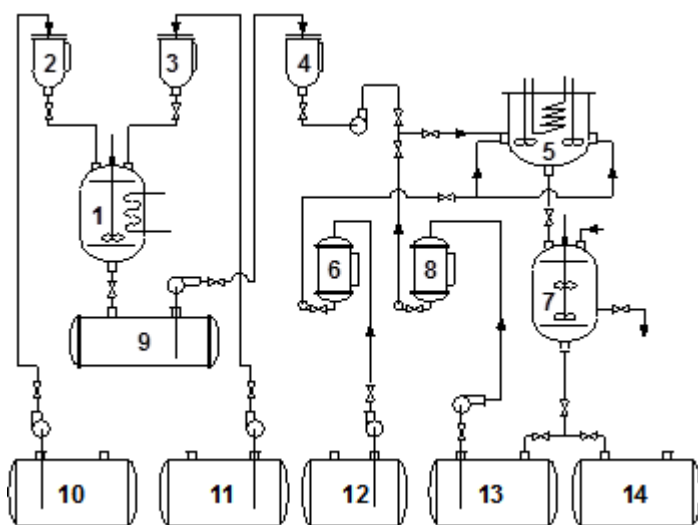


Például a benzol nitrálásához az ideálisnak mondható összetételű kevertsav 32 % HNO<sub>3</sub>-at, 60 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-at és 8 % vizet tartalmaz. Az ábrán a piros vonalak jelölik az azonos nitrónium-ion koncentrációjú pontokat. Az ábra alján a legnagyobb az ion koncentráció. A jobb alsó sarok a teljes ionizáció tartománya. A híg kevertsav (a háromszög felső része) rendkívül korrozív.

A nitrálás végén visszamaradó sav az ún. kimerült sav. Ha a reakciót megfelelő összetételű kevertsavval végezzük, a kimerült sav ideális esetben salétromsavat már nem tartalmaz. A kimerült sav a benne lévő kénsav és víz arányával jellemezhető, ez az ún. dehidratáló (DVS) érték.

A nitrálás integrális hője a reakcióhőből, a keveredési hőből, a hígítási hőből és kristályos termék esetén a kristályosodási hőből adódik össze. A felszabaduló hő a reakció kezdetén a legnagyobb, mert a reakció sebessége a nitrálás kezdetén a legnagyobb (a reakcióhő jelentős része ekkor szabadul fel, és a legtöbb víz is ekkor képződik).

A gyakorlatban azonban a kimerült sav mindig tartalmaz még néhány (2-3) % HNO<sub>3</sub>-at, és ez ad lehetőséget a szakaszos ipari nitrálás praktikus megvalósítására (64. ábra). Az eljárás kezdetén a 13-as tartályból kimerült savat vezetnek az 5-ös reaktorba, ahol elkezdődik a 12-es tartályból beadagolt benzol nitrálása. (A reakcióelegy hőkapacitása nagyobb, így nem kell nagyon intenzív hűtést alkalmazni.) Az eljárás későbbi szakaszában a nitrálást a 9-es ülepítőből származó „közti savval” folytatják és teszik a folyamatot teljessé.



- 1 keverős készülék
- 2-4 mérőedény
- 5 Hough-féle nitráló reaktor
- 6, 8 mérőedény
- 7 kikeverő készülék
- 9 nitrálásav ülepítő
- 10 kénsav tartály
- 11 salétromsav tartály
- 12 benzol tartály
- 13 kimerült sav tartály
- 14 nitrobenzol tartály

64. ábra. Benzol szakaszos nitrálása

A nitrálás során keletkező szennyezések a melléktermékek (pl. orto- és di-szubsztituált termékek a para céltermék mellett), és a hulladéksavak. Ez utóbbi felhasználása történhet (az előbbieken leírtak szerint) egy újabb adag nitrálás kezdetén; vagy nagyobb reakciókészségű vegyület nitrálására. Más esetekben a hulladéksavat denitrálják (a  $\text{HNO}_3$  eltávolítása vízgőzzel), majd a denitrált hulladéksavat szuperfoszfát műtrágya gyártáshoz használják.

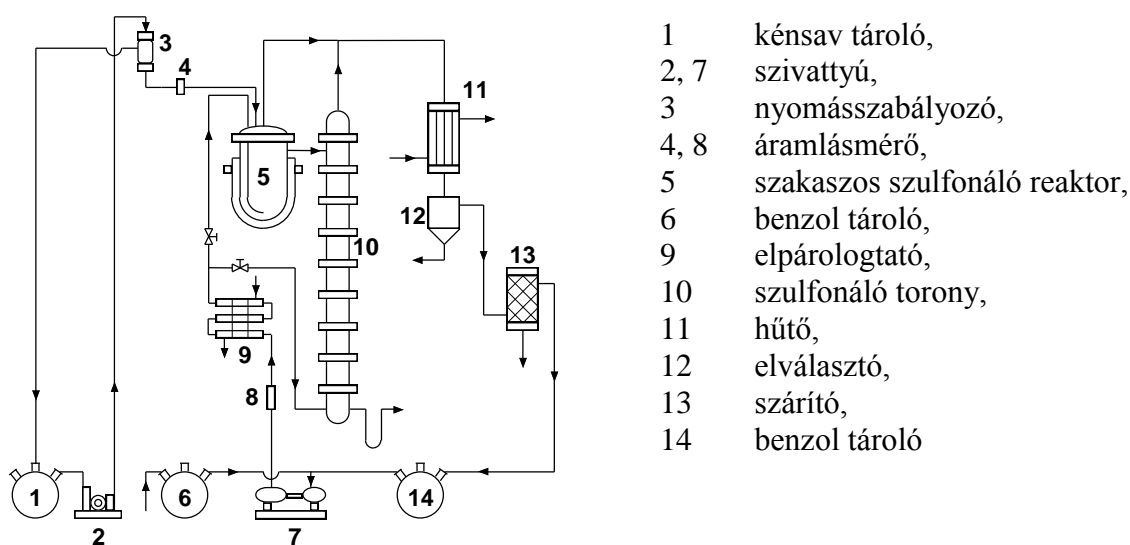
## Szulfonálás

Szulfonálásnak nevezzük azt a kémiai műveletet, amikor szulfonsav ( $-\text{SO}_3\text{H}$ ) csoportot viszünk be, vagy alakítunk ki egy szerves molekulában. A csoport bevitele addíciós vagy szubsztitúciós reakcióval, kialakítása pedig a molekulában már jelenlévő S-atom oxidációjával történhet. A szulfonsavak előállításának célja kettős lehet: vagy a molekula vízdoldhatóságának növekedését használjuk ki (felületaktív anyagok, gyógyszerek, színezékek előállítása), vagy hidrox-, nitro-, amino-, halogénvegyületek szintézisének intermediereként alkalmazzuk, kihasználva a szulfonsav csoport jó helyettesíthetőségét.

A szulfonálás is exoterm reakció, de – ellentétben a nitrálással – egyensúlyi folyamat. A legfontosabb szulfonálószer a kén-trioxid, a kén-trioxid hidrátjai (kénsav, óleum), a kén-trioxid komplexek, halogénszulfonsavak (pl:  $\text{ClSO}_3\text{H}$ ), a szulfaminsav, acil-szulfátok, alkil-szulfátok, valamint a szulfitek, biszulfitek, szulfuril-klorid ( $\text{SO}_2\text{Cl}_2$ ), a  $\text{SO}_2 + \text{Cl}_2$  (szulfoklórozás) és a  $\text{SO}_2 + \text{O}_2$  (szulfoxidáció).

Az ipari szulfonálások során használjuk a  $\pi$  értéket, amely megadja, hogy egy adott szulfonálandó vegyület szulfonálásához legalább milyen  $\text{SO}_3$  koncentrációjú szulfonálószerre van szükség.

A kéntrioxiddal való reakció nagyon intenzíven játszódik le, az eljárás nehezen szabályozható; a szubsztitúciós szulfonálások során (pl. kénsav esetén) viszont a kénsav felhígulását kell valamilyen módon megakadályozni. Erre egy példa a 65. ábra látható, Planovszkij és Kagan által kifejlesztett folytonos eljárás.



65. ábra. Benzol szulfonálása

Az eljárás során az első lépésben az elpárologtatott benzolgot a kénsavval az 5-ös szulfonáló reaktorban reagáltatják, ahonnan a még 30% nem reagált kénsav-tartalmú reakcióelegyet folyamatosan átvezetik a 10-es szulfonáló torony tetejére. A reakcióelegy a toronyban az ellenáramban bevezetett benzolggal tovább reagál. A keletkező víz a feleslegben lévő benzollal azeotrópot képez és távozik a torony tetején.

Az ipari szulfonálások során a legjelentősebb szennyeződések – és egyben veszteségforrásokat – a mellékreakciók (pl: oxidáció, dehidratálás, aromás vegyületek esetén szulfonképződés, nem kívánatos izomerek képződése, alkil-aromások esetében dezalkilezés, egyes nitril- illetve metoxi-csoportot tartalmazó vegyületek átalakulása stb), valamint az izomerek elválasztása során használt oldószermaradékok, anyalúgok jelentik.

## Alkilezés

Alkilezésnek (v. arilezésnek) nevezzük azokat a reakciókat, melyek során egy molekulára addíció vagy szubsztitúció útján alkil (vagy aril) csoportot kapcsolunk.

Az alkilezési reakciók csoportosíthatók az alkilezett atom minősége szerint:

- O-alkilezés (éterek előállítás),
- N-alkilezés (aminok előállítás),
- C-alkilezés (szén-szén kötés létrehozása),
- fém alkilezés (Grignard vegyületek, Al-alkil vegyületek).

Az alkilezés során a vegyületek zsírdékonysága növekszik. Gyógyszerek, lágyítók, műanyagipari segédanyagok, oldószerek, illatanyagok, műanyagipari monomerek állíthatók elő alkilezéssel.

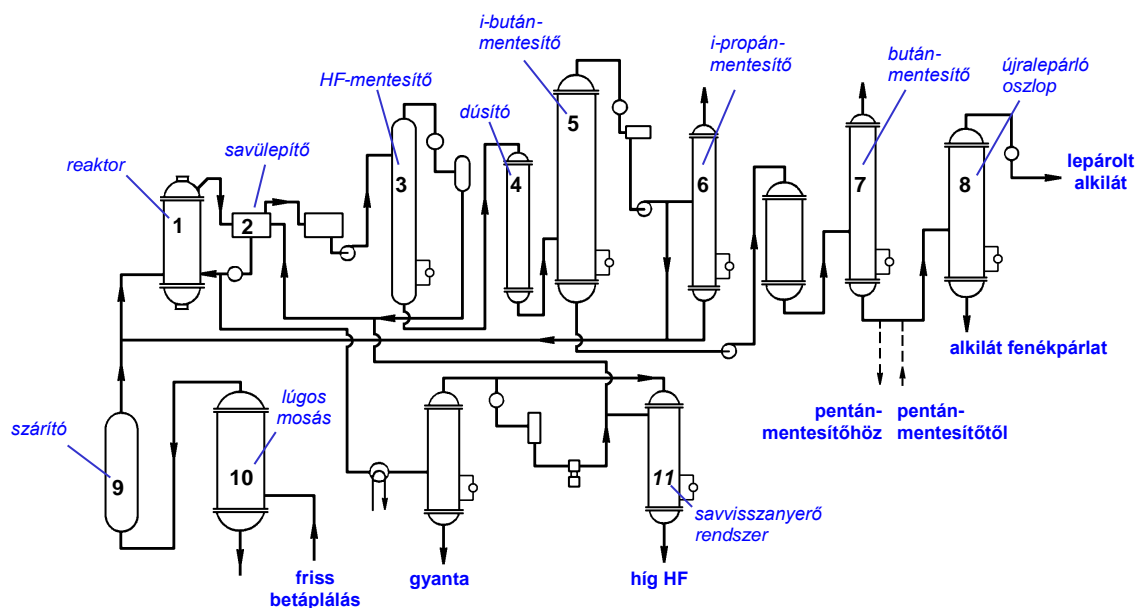
A legfontosabb alkilezőszerek az alkilhalogenidek (reakcióképességi sorrend:  $I > Br > Cl > F$ ), az olefinek (etén, propén, butén; a hosszabb, elágazó szénláncú olefinek könnyebben reagálnak), az alkoholok (O- és N-alkilezésre használhatók sav katalizátor jelenlétében), az oxisavészterek (dialkil-szulfát, alkil-nitrát, alkil-foszfát, arilszulfonsavas-alkilészter) és az oxirán-gyűrűs vegyületek.

Az alkilezések általában endoterm, egyensúlyi reakciók, végrehajtásukhoz melegítés szükséges. Az alkilezőszer felesleggel az egyensúly eltolható, de a „túlalkilezés” veszélye fennáll.

Az ipari alkilezésekre egy példa az izobután HF katalizátor jelenlétében végzett alkilezése izobuténnel (66. ábra).

Az eljárás célja nagy oktánszámú, elágazó láncú folyékony paraffinok előállítása. A termék zömében C8 izoparaffin, amelynek fő komponense az izooktán, a 2-metil-4,4-dimetil-pentán. A hőmérséklet emelése (– 24 °C + 32 °C között) kis hatással van a termelésre, a termék minőségére. A HF oldhatósága kicsi (kb. 1 %) a szénhidrogén termékben, így a katalizátort desztillációval könnyen el lehet távolítani: a 3-as oszlopból a HF-ot és a szénhidrogén egy részét fejpárlatként, a HF-mentes szénhidrogént fenéktermékként távolítják el.

A készülékben néhány at túlnyomás van, hogy a reaktánsok folyadékfázisban legyenek. Ha az izobután és a butén aránya 1,5 vagy ennél nagyobb, akkor a termék telített, és a reakció szelektív, mert visszaszorul az olefin dimerizációja.



66. ábra. HF katalizátoros alkilező üzem folyamatabrája

## Acilezés

Az acil csoport bevitelét a molekulába acilezésnek nevezzük. Az acilezési reakciók csoportosítása történhet azon atomok szerint, amelyekhez a reakció során acil csoportot kapcsolunk:

- O-acilezés (észterezés),
- N-acilezés (savamidoknak és származékainak képződése),
- C-acilezés (Friedel-Crafts reakciók) és
- S-acilezés (tioészterek előállítása).

Az acilezés célja lehet:

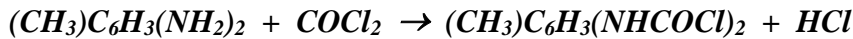
- új, a végtermék szempontjából lényeges tulajdonságok kialakítása (pl. az élettani hatással nem rendelkező karbamid bróm-acetil csoport bevitelével nyugtatóvá alakul),
- meglévő tulajdonságok fokozása (pl. a szalicilsav láz- és fájdalomcsillapító hatása acetilezéssel javul),
- a molekula reaktivitásának megváltoztatása (bizonyos csoportok védelme, vagy az irányító hatás megváltoztatása),
- tisztítás szempontjából előnyös tulajdonság biztosítása (pl. a D<sub>2</sub> vitamin dinitrobenzoátja jobban kristályosítható, mint a vitamin maga).

A fontosabb acilezőszerek a savhalogenidek (reakcióképességi sor: I > Br > Cl > F; hátrány a HX képződés miatti korrózió), a karbonsavak, a savanhidridek (hatékonyabbak, mint a karbonsavak; különösen a benzooesav-, ftálsav-, maleinsav- és borostyánkősav-anhidrideknek van jelentőségük), a ketén és diketén, az izocianátok, az izopropenil-acetát és a foszgén.

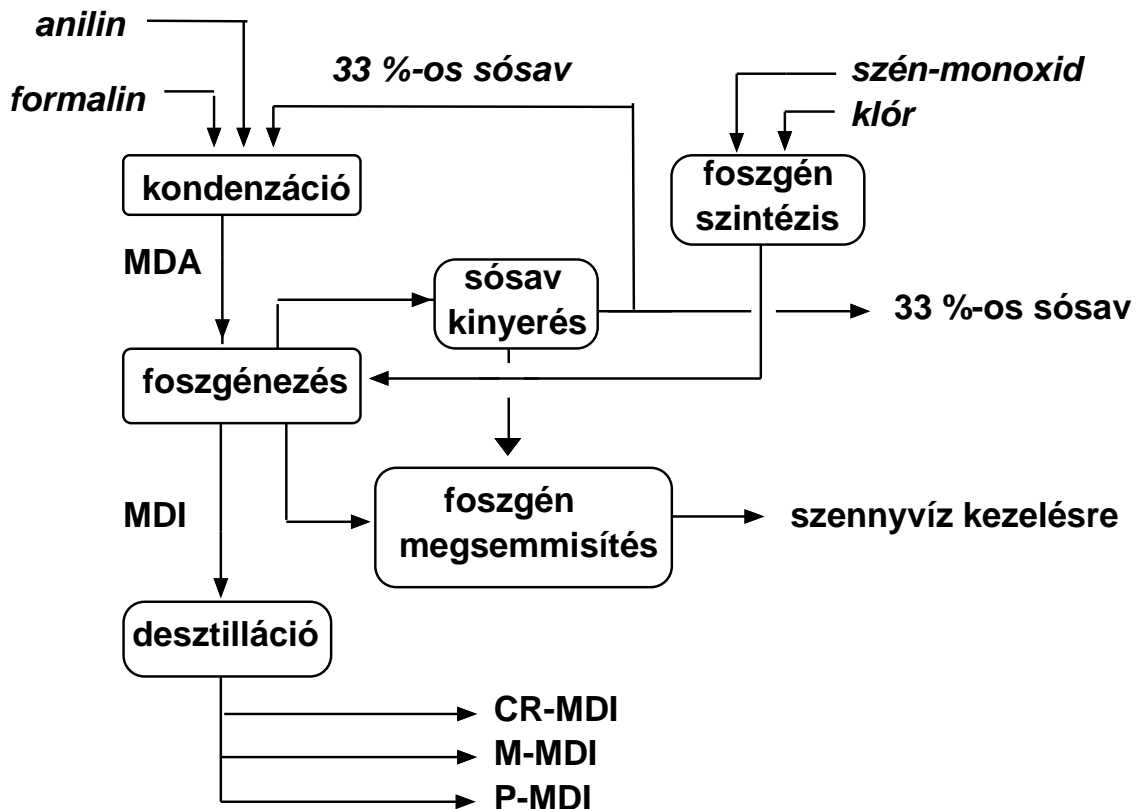
A foszgén színtelen, könnyen cseppfolyósítható, nagyon mérgező gáz. Szaga a dohos szénára emlékeztet, de rendkívül alattomos, már a szaglással érzékelhető koncentráció (5,6 ml/m<sup>3</sup>) felénél tüdőödémát okoz. Ugyanakkor nagy reakciókészsége



miatt számos szerves kémiai szintézisben előfordul, leginkább diizocianátok előállítására használják. Egyik ilyen vegyület a toluilén-diizocianát:

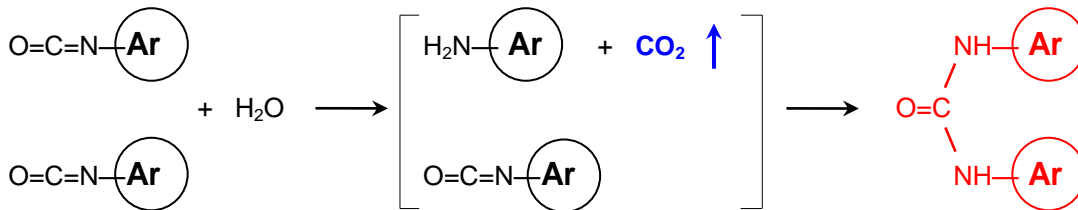
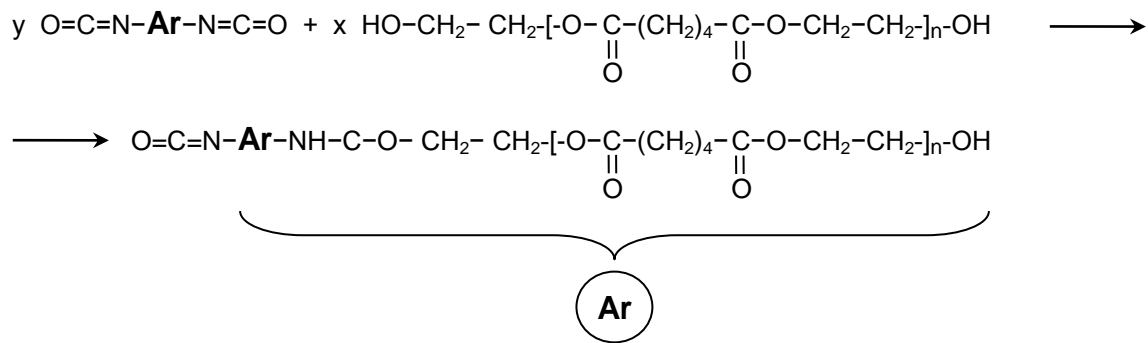


Az utóbbi időben alapvető törekvés a foszgén nélküli eljárások elterjesztése. A diizocianátok szintézisére foszgén mentes homogénkatalitikus módszert dolgoztak ki. A BorsodChem Rt.-nél kb. 10 éve egy japán foszgénes technológiát vezettek be, ami biztonságosnak mondható, mert a foszgén reagenst az eljáráson belül állítják elő (67. ábra).



67. ábra. MDI technológia sémája a BorsodChem Rt.-nél [9]

A diizocianátok a poliuretánok alapanyagai (68. ábra). Megkülönböztetjük a rugalmas- és a kemény poliuretán habokat. Az előbbieket főleg az autó és bútioripar használja és kiinduló anyaga a 2,4-toluidén-diizocianát (TDI). A kemény hab kitűnő hő és hangszigetelő, a bútior és építőanyagipar szerkezeti elemei. Egyik fő komponensük a hexametilén-diizocianát (HDI), a 4,4'-difetil-metán-diizocianát (MDI), egyes esetekben a polimetilén-polifenil-izocianát.

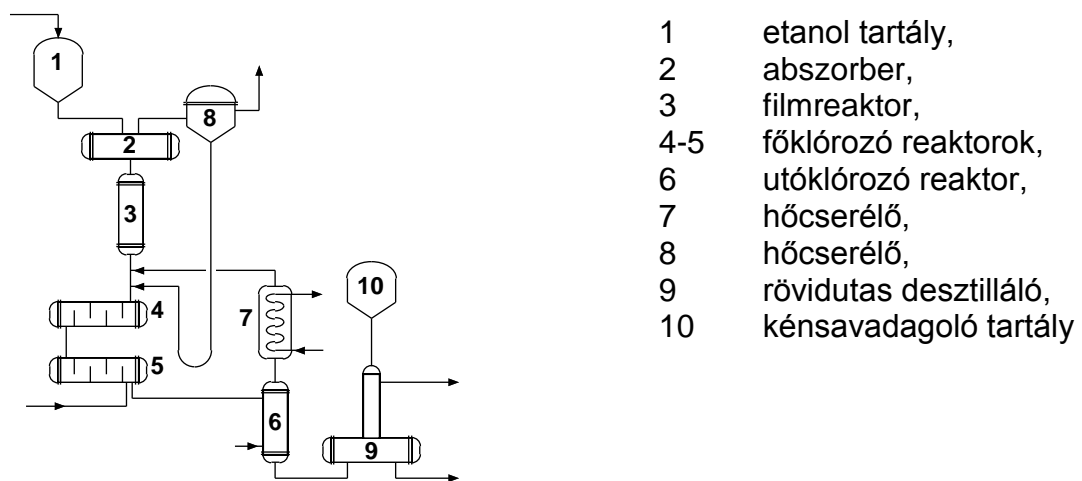


68. ábra. Poliuretán habok szerkezete

## Halogénezés

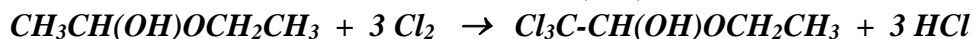
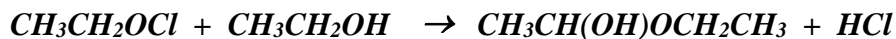
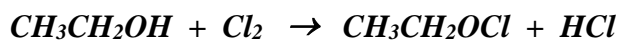
A halogénezés során a szerves vegyületekbe egy vagy több halogénatomot visznek be. A legfontosabb halogénezőszerek az elemi halogének, a hidrogén-halogenidek, a hipohalogenessavak (pl. HOCl), a kén halogénvegyületei (SOCl<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>, SCl<sub>2</sub>), a foszfor halogénvegyületei (PCl<sub>3</sub>, PCl<sub>5</sub>, POCl<sub>3</sub>), a foszgén és egyéb halogénezőszerek (BrI, ClI, ClCF<sub>3</sub>; CuCl<sub>2</sub>, FeCl<sub>3</sub>, SbCl<sub>4</sub>; CH<sub>3</sub>COCl).

A halogénezés célja lehet a molekula reakciókészségének megváltoztatása, vagy megfelelő tulajdonságú végtermék készítése (gyógyszer, tűzoltószer, oldószer, színezék, növényvédőszer). Technológiai példaként a klorál (69. ábra) és a monoklórecetsav (70. ábra) szintézisét mutatjuk be. Mindkettőnek a növényvédőszeriparban van különösen nagy jelentősége.



69. ábra. A klorál előállítása

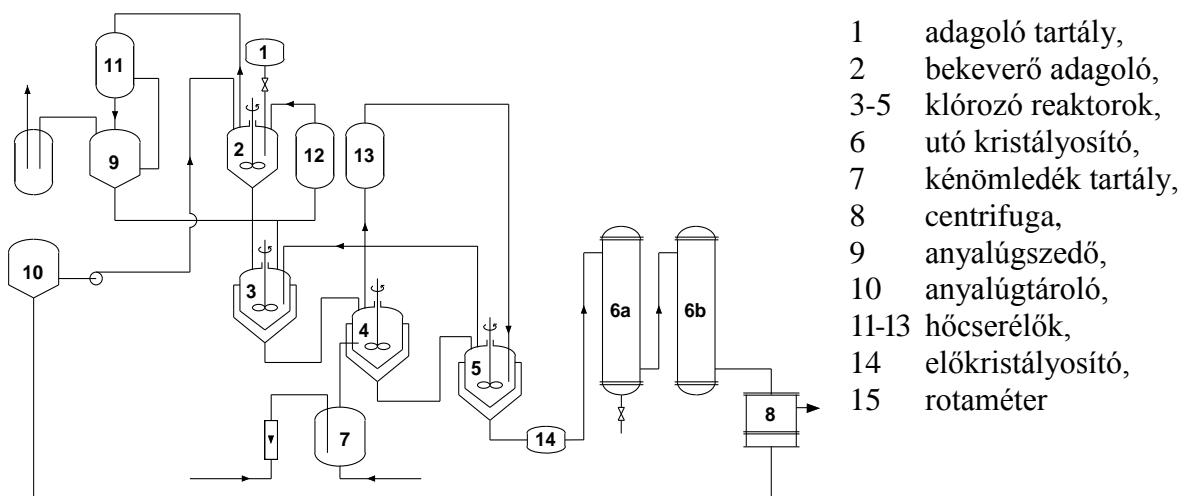
A klorál szintézis a Budapesti Vegyiművek technológiája. Az eljárás lényege, hogy az etanolt több lépésben, különböző hőmérsékleten (2 = 15-30 °C, 3 = 50 °C, 4 = 70 °C, 5 = 85 °C, 6 = 90 °C) klórozzák, majd a klórozott félcetárból kénsav alóli desztillációval nyerik ki a klorált.



Ezzel a technológiai megoldással sikerült minimálisra csökkenteni az első lépésben melléktermékként keletkező klór-etán mennyiségét, vissza lehetett szorítani a klorálhidrát képződését és növelni lehetett a reaktortérfogat hasznosítását.

Az ecetsav klórozási reakció már több mint száz éve ismert. Nehézséget a di- és triklórecetsav képződésének visszaszorítása jelenti.

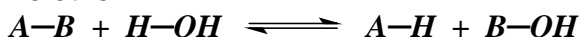
Jelen eljárás során az 1 adagolóból friss ecetsavat és a 10-es tárolóból recirkulált anyalúgot adagolnak a 2-es keverőn keresztül a 3-as számú első reaktorba. Az anyag továbbfolyik a sorbakapcsolt 4-es, majd 5-ös reaktorba. A klórt kénömléken átbuborékolatva (7) vezetik a 4-es reaktorba. A nyerstermék az elő-, majd utókristályosítókba kerül, majd a 8-as centrifugával választják el a terméket (88%, 98,6%-os tisztaságú ClCH<sub>2</sub>COOH).



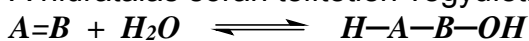
70. ábra. A monoklórecetsav előállítása

## Hidrolízis – hidratálás

A hidrolízis a vegyületek vizes bontása, mely során a szubsztrátumból két új vegyület keletkezik.



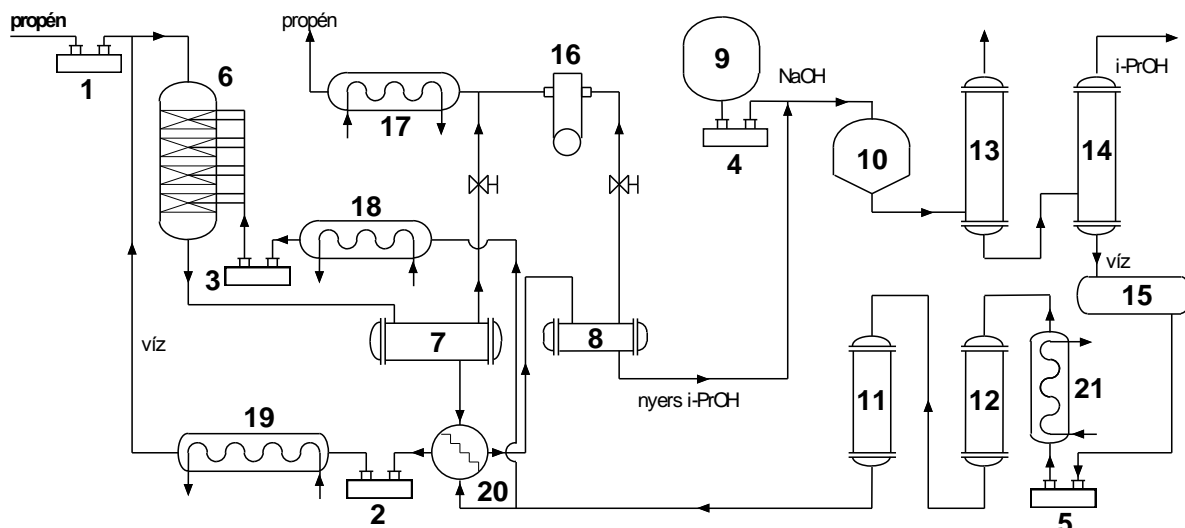
A hidratálás során telítetlen vegyületre víz addíció játszódik le.



A hidrolízis reakciókat csoportosíthatjuk a hidrolízis körülményei szerint, illetve a hidrolizálendő kötés jellege szerint. A reakció körülményei alapján megkülönböztünk:

- lúgos hidrolízist (a reakcióelegy katalitikus, vagy ennél nagyobb mennyiségben lúgot tartalmaz – ahol csak lehetséges, ezt használják),
- vizes hidrolízist (sem savas sem lúgos katalizátort nem tartalmaz – szerves fémvegyületek, alkoholátok, savhalogenidek, savanhidridek, laktonok),
- savas hidrolízist (a reakcióelegy katalitikus, vagy ennél nagyobb mennyiségben savat tartalmaz – észterek egy része, savamidok, nitrilek, acetálok, Schiff bázisok, oximok, hidrazonok)
- lúgos ömlesztést (majd 3 példát látunk rá a fenol előállítási eljárások között a következő, az oxidációt taglaló fejezet végén),
- enzimmel katalizált hidrolízist.

A hidratálásra gyakorlati példa az acetaldehid acetilénből -, vagy a glikol etilénoxidból való előállítása. Dehidratálással történik a tetrahydro-furán 1,4-butándiolból -, illetve a furfurolnak kukoricacsutka, fa hulladék hidrolízisekor keletkező pentozánból való szintézise. Technológiai példaként a 71. ábra az izopropilalkohol előállítását láthatjuk.



1-5	adagoló szivattyú,	10	semlegesítő,	16	komprimáló,
6	katalizátorágyas reaktor,	11-12	ioncserélő oszlopok,	17-19	hőcserélők,
7-8	szeperátor,	13-14	desztillálók,	20	hőcserélő,
9	lúgtároló,	15	vízelvezetés,	21	hőcserélő

**71. ábra. Izopropilalkohol előállítása propén hidratálásával**

A reakciót 4 párhuzamosan elhelyezett, rögzített katalizátorágyas reaktorban (6) végzik. A katalizátor divinil-benzollal térhálósított szulfonált polisztirol. A propén katalitikus hidratálása gáz-folyadékfázisú reakcióban, 130-150 °C-on, 60-100 at nyomáson megy végbe. A 6-os reaktorba betáplált 92 %-os propén egy része a reakcióból recirkulált, tisztított és töményített gáz. A víz egy része az alkohol tisztítóegységből elvezetett, ionmentesített víz. A reakcióhőt minden katalizátorágyról külön hűtőberendezéssel vezetik el. A nyers *i*-PrOH-t és át nem alakult gázt a (7) nagynyomású szeperátorba viszik, majd a (20) hőcserélőben lehűtik. A 8 kisnyomású szeperátorból távozó nem reagált gázt komprimálják (16) és egyesítik a nagynyomású nem reagált gázzal, majd hűtik. A nyers *i*-PrOH-t a lúgtárolóból adagolt NaOH oldattal semlegesítik, majd desztillálják (melléktermék: diizopropil-éter 3,5 %). A

fenéktermékből azeotróp desztillációval fejpárlatként nyerik a 87 %-os *i*-PrOH-t, melynek vízmentesítése benzollal, tisztítása aktívszenes kezeléssel történik.

Eredetileg a propén hidratálását kénsavval, folyadékfázisban valósították meg. Azon eljárás szerint a H<sub>2</sub>O addíciója propénre közvetve, kénsav-félészteren át megy végbe. A félésztert a második lépcsőben hidrolizálják, miután a kénsavat víz hozzáadásával vagy gőz bevezetésével 40 %-nál kisebb koncentrációig hígítják. A korábbi H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-as eljárást még a BP és a Shell alkalmazza. A Deutsche Texaco üzeme 1986-ig alkalmazta a kénsavas eljárást, majd áttért a közvetlen hidratálásra, savas ioncserélő jelenlétében.

## Oxidáció

Oxidációnak nevezünk minden olyan reakciót, amelynek során egy molekula oxigént vesz fel, hidrogént ad le, vagy elektront ad le. A legfontosabb oxidálószer:

- a molekuláris oxigén (levegő, tiszta O<sub>2</sub>),
- —O—O— kötést tartalmazó oxidálószer ( ),
- a változó vegyértékű fémek oxidjai,
- nemfémes elemekből levezethető oxidálószer (szeléndioxid, salétromsav),
- egyéb szerves oxidálószer (káliumpermanganát, káliumbikromát),
- szerves oxidálószer (nitrobenzol, dimetil-szulfoxid, N-bróm-szukcinimid, kinonok),
- szingulett oxigén (fény, szenzibilizátorok),
- elektrokémiai oxidáció.

Az első két esetben mindig használnak katalizátort, aminek a szerepe lehet:

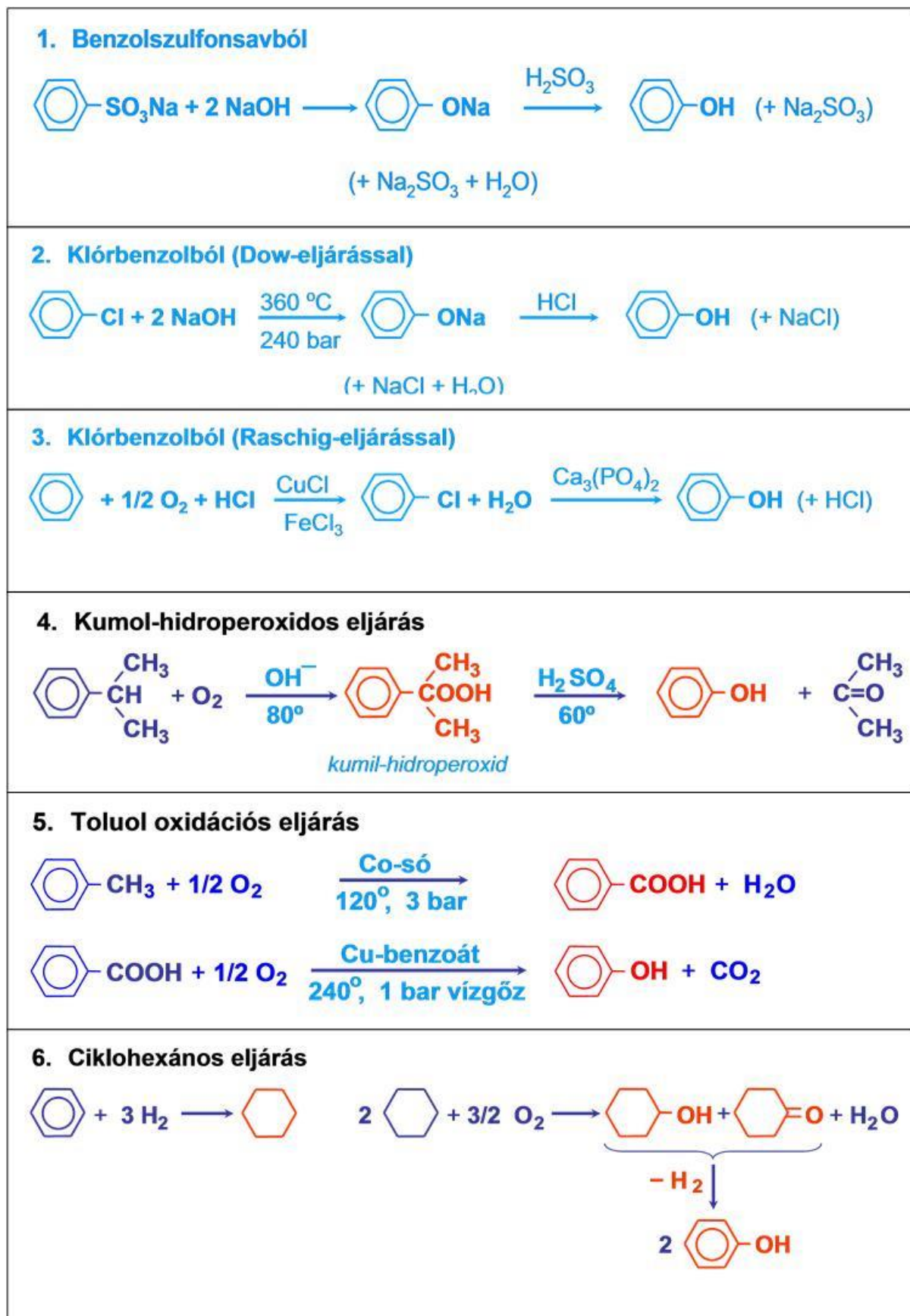
- a molekuláris oxigén aktiválása,
- az oxidáló ágens aktiválása,
- a szubsztrátum aktiválása,
- iniciátor gyök kialakítása,
- a hidroperoxid intermedierek lebontása.

Iparilag jelentős oxidációs eljárások:

- a paraffinok elszappanosítása,
- az alifás és cikloalifás szénhidrogének dehidrogénezése,
- az alkil-aromás vegyületek oxidációja,
- az aromás gyűrűk oxidálása,
- az aldehidek és ketonok oxidációja, valamint
- az olefinek oxidációja.

Ez utóbbiak közül részletesen tárgyaljuk majd a „Kemo- és regioszelektív nagyipari homogénkatalitikus eljárások” fejezetben a Wacker-szintézist.

Az USA-ban és Nyugat-Európában a második legnagyobb mennyiségben előállított benzolszármazék a fenol. A nagyipari szintű szintézisére összesen 6 módszert ismerünk (72. ábra), melyek közül három hidrolízis, három pedig indirekt módon végrehajtott oxidáció. Bár előállításának leggazdaságosabb útja elvileg a benzol direkt oxidációja lehetne, erre eddig nem sikerült technológiát kidolgozni, mert a fenol teljes oxidációja gyorsabb reakció, mint a benzol parciális oxidációja.



72. ábra. A fenol előállítási módszerei

Az említett módszerek értékelését a 9. táblázatfoglaltuk össze.

**9. táblázat. A fenol előállítási módszerek összehasonlítása**

<b>Klasszikus eljárás benzolszulfonsavból kiindulva:</b>	
előny:	kis beruházási költség, tiszta termék; kis kapacitású üzemben (4000t/év alatt) is gazdaságosan alkalmazható, ha a melléktermék Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> -ot értékesíteni tudják
hátrány:	nagy energiafogyasztás, nagy H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> - és NaOH- fogyasztás, szakaszos eljárás
<b>Dow/Bayer-eljárás:</b>	
hátrány:	nagymértékű korrózió, a klór és az energia magas ára
<b>Raschig/Hooker-eljárás:</b>	
előny:	melléktermékként kevés só keletkezik
hátrány:	többszörösen klórozott melléktermékek, szennyvíztisztítási problémák, jelentős beruházási költség, nagy energiafogyasztás
<b>Hock (kumul hidroperoxidos) eljárás:</b>	
a legismertebb, legjobban elterjedt technológia, gazdaságossága a melléktermékként keletkező acetone piaci árától függ	
<b>Dow/California Research (toluol oxidációs) eljárás:</b>	
előny:	egyszerű technológia, nagy hozam, kis beruházási költség, olcsó nyersanyag, kevés melléktermék
hátrány:	a káros melléktermékek miatt a katalizátorregenerálás nehéz
<b>Scientific Design (ciklohexános) eljárás</b>	
ott van jelentősége, ahol kaprolaktám gyártása is folyik	

A fenol legfontosabb felhasználási területei a fenolgyanták, ε-kaprolaktám, adipinsav, biszfenol-A, alkil-fenolok (nem ionos tenzidek), polikarbonátok, növényvédőszer, lágyítók, antioxidánsok szintézise.

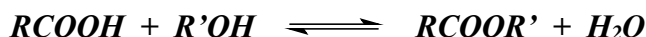
## Észterezés

Bizonyos megközelítés szerint minden reakciót, amellyel észter állítható elő, észterezésnek nevezhetünk. Az észterezési reakciók egy részét már az alkilezés, illetve acilezés tárgyalása kapcsán érintettük. A szintézis eljárások csoportosíthatók aszerint is, hogy a reakció melléktermék-képződéssel jár-e vagy nem (azaz addíció, vagy kondenzáció); illetve egyensúlyra vezető, vagy egyirányú.

Az észterezési reakciók jelentős részénél alkalmazunk katalizátort. Ez lehet HCl (laboratóriumban jól használható, de üzemben korrózió miatt kevésbé alkalmas), H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (számítani kell mellékreakciókra – dehidratálás, szulfonálás, izomerizáció), H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (kevésbé hatásos), aromás szulfonsav, ioncserélő gyanta, Lewis-savak.

Az ioncserélő gyanták alkalmazásának előnyei: a katalizátor könnyen eltávolítható, regenerálható, a szelektivitás általában nagyobb, a korrózió elhanyagolható, könnyen megoldható a folyamatos eljárás, kíméletes körülmények között lehet dolgozni. Hátrányuk, hogy drágábbak mint az ásványi savak, az alkalmazható hőmérséklet korlátozott (150 °C felett károsodik), a szerves közeg károsíthatja a katalizátort, mechanikus porlódás léphet fel.

Az egyensúlyi reakciók esetében alapvető technológiai kérdés, hogy hogyan lehet a terméképződés irányába eltolni a reakciót. A direkt észterezés során alkohol és karbonsav reakciója egyensúlyi folyamatban észtert és vizet ad.

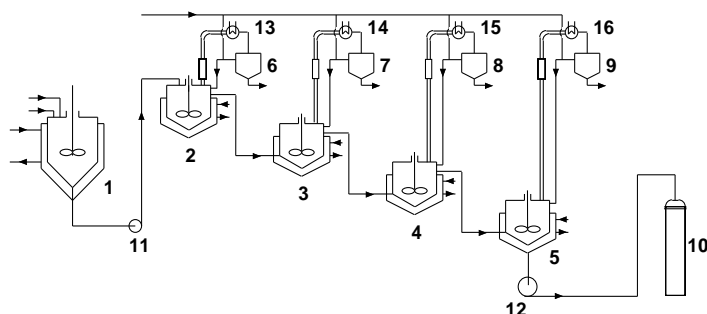


Az egyensúly eltolható alkoholfelesleg (vagy savfelesleg) alkalmazásával és/vagy az észter (vagy víz) eltávolításával. Laboratóriumban lehetőség van nagyobb mértékű alkohol-felesleg alkalmazására és a keletkező víz megkötésére (pl.  $CaCl_2$ -dal,  $H_2SO_4$ -val). Üzemi körülmények között a keletkező észter vagy víz folyamatos eltávolítása a jellemző, de ezt technikailag korlátozza az azeotróp elegyek (észter + víz + alkohol terner azeotróp, észter + víz biner azeotróp, észter + alkohol biner azeotróp, víz + alkohol biner azeotróp, víz + inert oldószer biner heteroazeotróp) keletkezése.

A karbonsavészterek legfontosabb felhasználási területei:

- oldószerek (pl. az ecetsav metil-, etil- és butil-észterei),
- extrahálószer (C<sub>6</sub>-C<sub>7</sub>-alkoholok észterei),
- szintetikus szálak (pl. poli-tereftálsav-észterek),
- műanyag, lakk nyersanyagok (poliészterek ftálsavanhidridből, maleinsavanhidridből),
- műanyaglágyítók (ftálsav dietil-, dibutil-, dioktil észtere),
- film, műselyem (acetil-cellulóz),
- gyógyszerek.

Az egyik legfontosabb műanyaglágyító, a *n*-dibutil-ftalát előállításánál (73. ábra) az első lépésben a ftálsavanhidrid és *n*-butil-alkohol gyors reakcióban félészterre alakul, majd ezt követi a lassúbb direkt észteresítés, ahol a keletkezett vizet inert oldószerrel, benzollal távolítjuk el azeotróp formában.



- 1-5 reaktorok,  
6-9 elválasztók,  
10 tárolótartály,  
11-12 szivattyú,  
13-16 azeotróp desztilláció

73. ábra. A *n*-dibutil-ftalát szintézis technológiája

Az 1-es reaktorba betáplált alkoholt és ftálsavanhidridet 130 °C-on fél órán át reagáltatják. A monoészteresítésként a 2-es reaktorba átszivattyúzzák a reakcióelegyet, valamint a keletkezett víz eltávolítására benzolt és katalizátorként *p*-toluolszulfonsavat adagolnak, a reaktor hőmérsékletét 145 °C-ra emelik. A keletkező víz heteroazeotróp formában kidesztillál a reaktorból, majd lehűtve a 6-os elválasztóba kerül, ahonnan a szerves fázist visszavezetik a reaktorba, a vizes fázist pedig eltávolítják. A 2-es reaktorból a 3-as majd a 4-es, 5-ös reaktorba kerül a reakcióelegy. Az 5-ös reaktorból a nyers termék a 10-es tárolóba jut, ahonnan további tisztításra kerül.

Az ily módon sorbakapcsolt szakaszos reaktorokat kaszkád reaktorsornak hívjuk, amelyben kvázi folyamatos eljárást lehet megvalósítani.



## Kemo- és regio szelektív nagyipari homogén katalitikus eljárások

Az 1970-es évek elejéig a szerves nagyipari eljárások során a nagy mennyiségben rendelkezésre álló olcsó nyersanyagot meglehetősen rossz hatásfokkal átalakították a kívánt petrokémiai céltermékké, a melléktermékeket pedig kidobták vagy elégették. A kőolajválság döböntette rá a világot, hogy az extenzív fejlődésnek megvannak a maga korlátai, a nyersanyagforrások kimerülnek. Ugyanerre az időszakra tehető az a felismerés is, hogy az élővilág, a biológiai körfolyamatok nem terhelhetők a végtelenségig a „természetidegen” szennyező anyagokkal, a vegyipari folyamatok melléktermékeivel. Így a gazdasági és környezetvédelmi megfontolások a szerves vegyipari technológiák fejlesztése tekintetében az alábbi két fő szempontot vetették fel:

- a szerves intermedierek előállítására egyéb nyersanyagforrásokon alapuló új, alternatív eljárásokat kell kidolgozni,
- nem pazarló, hulladékszegény technológiákat kell alkalmazni.

Az említett célok megvalósulását több tényező is elősegítette. A kőolajjal nem rendelkező országok közül például Németország már korábban is nagy erőfeszítéseket tett és jelentős eredményeket ért el a vegyiparának szénbázison történő felépítésére (pl. Fischer-Tropsch szintézis). Az átmenetifém-organikus komplexek felfedezése lehetővé tette a nagyszelektivitású homogén katalitikus szerves kémiai szintézisek kidolgozását.

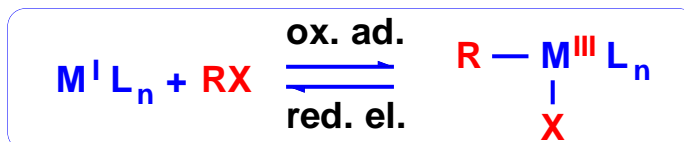
### Fémorganikus kémiai alapok

A homogén katalizátor a reagáló anyagokkal azonos fázisban (általában a reakcióelegyben oldva) fejti ki hatását. A katalizátor minden esetben diszkrét molekula, melyben a központi fématomot (átmeneti fém) bizonyos számú ligandum veszi körül, „stabilizálja”; és ezáltal mind a fém, mind a ligandum tulajdonságai alapvetően megváltoznak. A szubsztrátum és a reagensek is átmenetileg ligandumként kapcsolódnak a központi fémhez (ez biztosítja az aktiválásukat), és a fém koordinációs övezetében játszódnak le az elemi folyamatok (74. ábra).

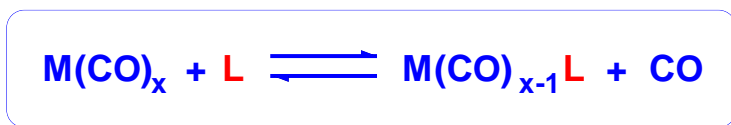
A ligandumok egy része (pl. a tercier foszfán) ugyan közvetlenül nem vesz részt a kémiai átalakulásokban, de segítségükkel a központi fém elektronellátottsága és sztérikus viszonyai tetszőlegesen beállíthatók. Ez biztosítja az ilyen típusú katalizátorok előnyeit, a nagyobb aktivitást (ezért enyhébb reakciókörülményeket lehet alkalmazni) és nagy szelektivitást.

Az átmenetifém-organikus vegyületekben az átmenetifém általában arra törekszik, hogy elektronszerkezetét a szabad d-pályák feltöltésével a következő nemesgázhéj konfigurációjára egészítse ki (18-elektron szabály). Az egyes ligandumok különböző számú elektront képesek átadni a központi fématomnak, és így az átmenetifém különböző számú ligandumot képes koordinálni. A központi fémhez kapcsolódó ligandumok számának meghatározásához nyújt segítséget a 10. táblázat.

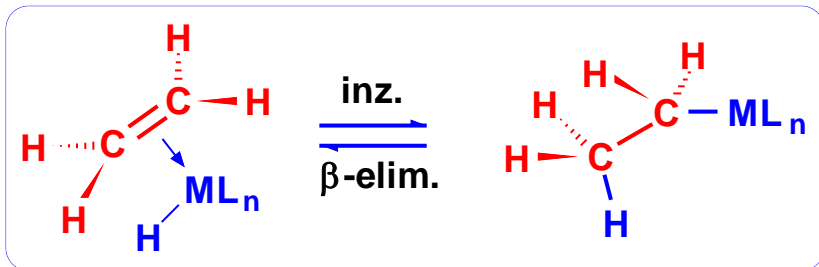
oxidatív addíció:  
reduktív elimináció:



szubsztitúció  
(ligandumcsere):



inzerció  
(beékelődés):  
 $\beta$ -elimináció:



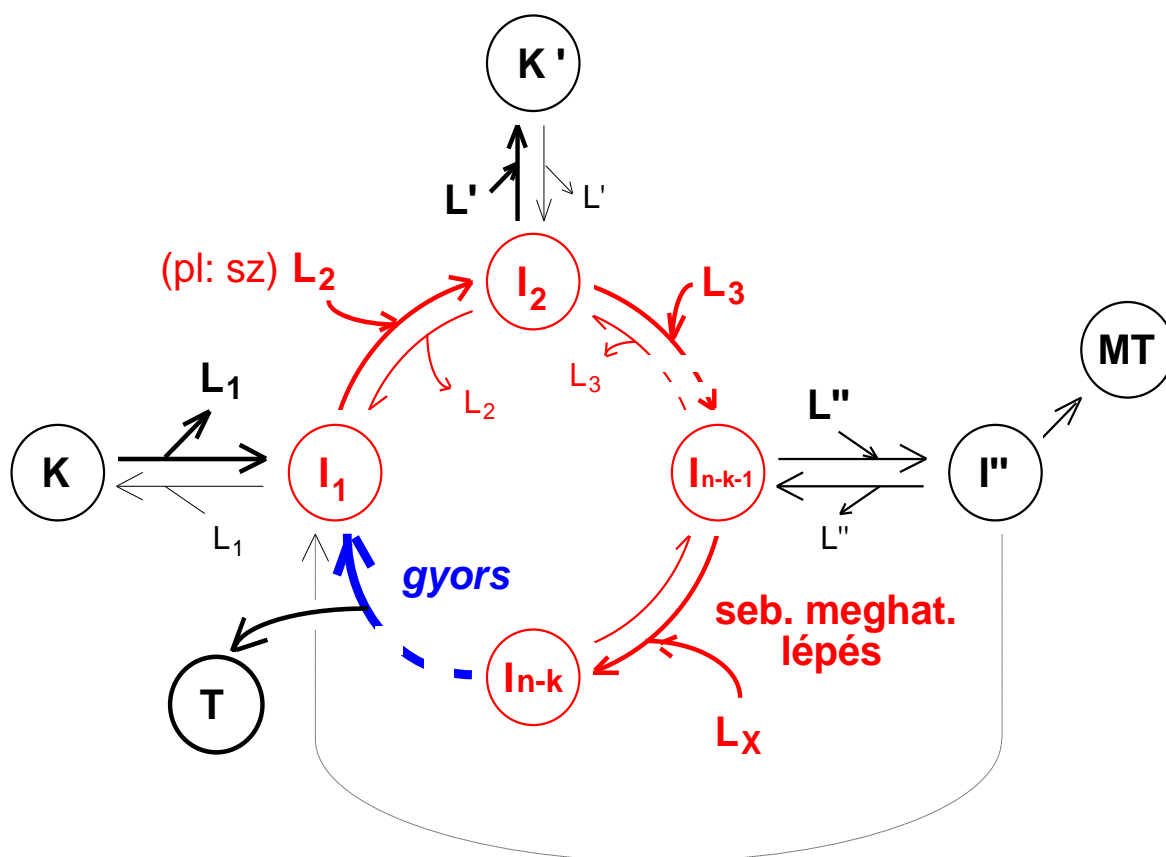
74. ábra. A homogénkatalitikus ciklusok elemi lépései

10. táblázat. Segéd táblázatok a 18-elektron szabályhoz

oxidációs fok	Ti Zr Hf	V Nb Ta	Cr Mo W	Mn Tc Re	Fe Ru Os	Co Rh Ir	Ni Pd Pt	Cu Ag Au
0	4	5	6	7	8	9	10	-
I	3	4	5	6	7	8	9	10
II	2	3	4	5	6	7	8	9
III	1	2	3	4	5	6	7	8
IV	0	1	2	3	4	5	6	7

Ligandum	Töltés	elektronok száma	ligandum	töltés	Elektronok száma
CO		2	acetilén		2 vagy 4
PR <sub>3</sub>		2	aromás		6
H	—	2	N <sub>2</sub>		2
R	—	2	RO	—	2 vagy 4
Halid	—	2	allil		2 vagy 4
Olefin		2	dién		2 vagy 4
R <sub>2</sub> S		2	RS	—	2, 4 v. 6
C <sub>5</sub> H <sub>5</sub>	—	6			

A homogén katalitikus reakciók egy általános sémáját a 75. ábra mutatjuk be.

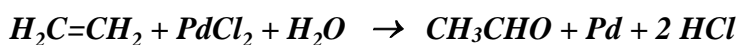


75. ábra. Egy általános katalitikus ciklus

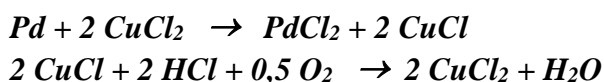
## Olefinek oxidációja – Wacker szintézis

A nagyipari kemoszelektív reakciókra első példaként az olefinek oxidációját vizsgáljuk.

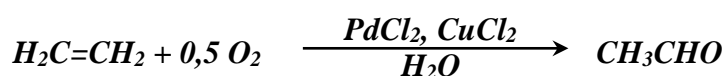
Az acetaldehid előállítására jelenleg világszerte alkalmazott etilén parciális oxidáció alapját Phillips 1894-ben figyelte meg: platinafém-sók sztöchiometrikus reakcióban etilént acetaldehiddé oxidálnak, miközben maguk fémmé redukálódnak.



Kb. 60 évnek kellett eltelnie ahhoz, hogy a Wacker cég a sztöchiometrikus reakcióból katalitikus reakciót fejlesszen és kidolgozza a nagyipari technológiát.

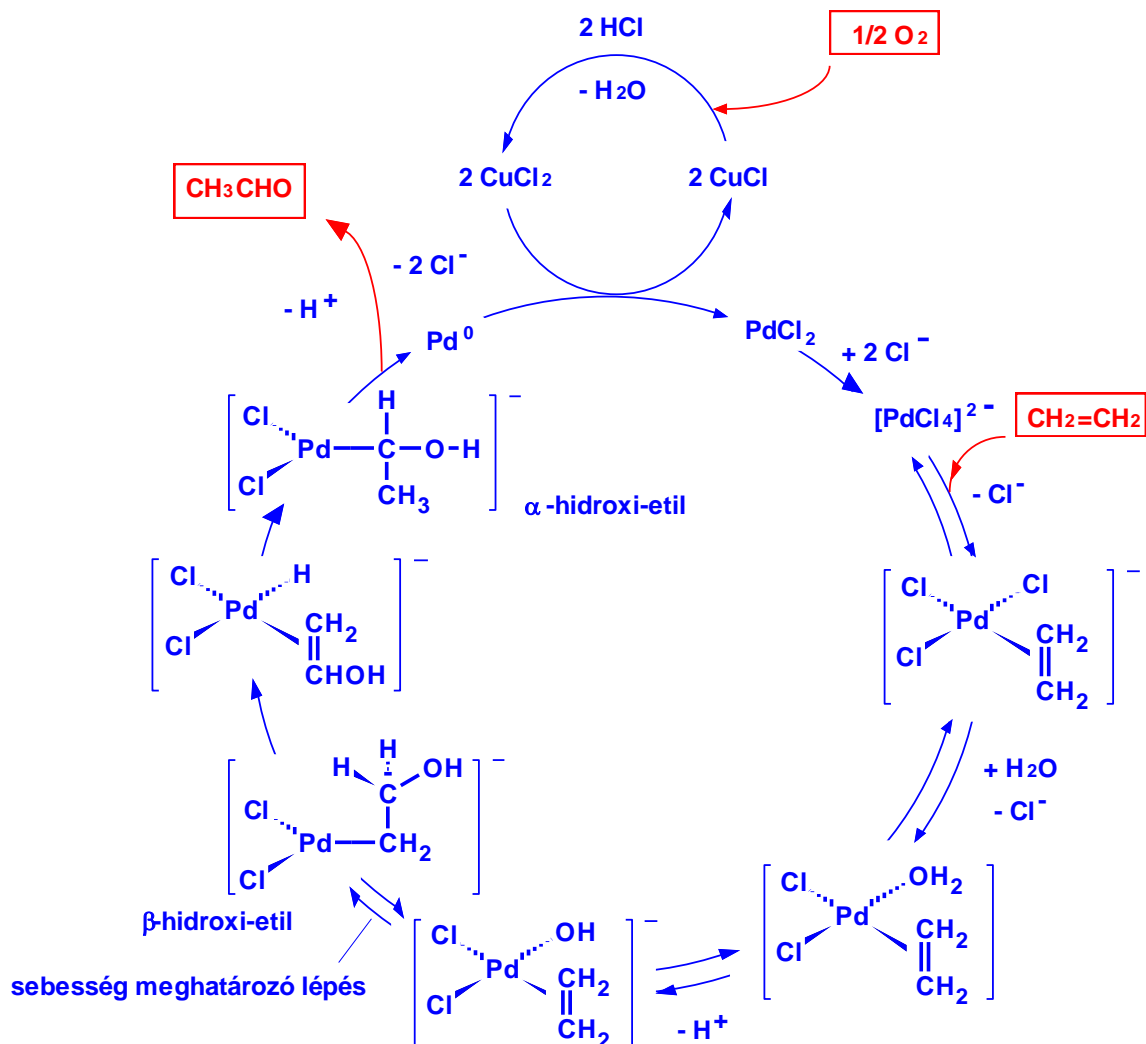


A bruttó reakció:



A reakció exoterm:  $\Delta H = - 243 \text{ kJ/mól}$ .

Maga a katalitikus folyamat (76. ábra) a Pd-hoz kapcsolódik, szerepe az etilén komplexbe vitele és a fém visszaoxidálása palládium(II)-vé. Erre a lépésre más oxidálószer is alkalmasak lennének, de a réztartalmú redoxi-rendszer azért előnyös, mert a réz(I) oxigénnel könnyen visszaoxidálható réz(II)-vé. A sósavtartalom beállításával a két összefüggő reakció sebessége befolyásolható, a savasság növelésével a regenerálást gyorsítani lehet



76. ábra. Wacker szintézis reakciómechanizmus

Az acetaldehid nagyipari előállítását kétfázisú (gáz/folyadék) rendszerben végzik. A gázhalmazállapotú komponenseket (etilén és levegő vagy oxigén) titánból készült, vagy azzal bélelt buborékolatós oszlopreaktorban reagáltatják a katalizátor vizes sósavas oldatával.

A kivitelezésnek két technológiai megoldását fejlesztették ki:

– Egylépcsős eljárás:

Ugyanabban a reaktorban egyidejűleg vezetik le a regenerálást és az oxidációt, az oxidálószer  $\text{O}_2$ . E megoldás szerint az etilént és az oxigént 3 bar nyomáson 120-130 °C hőmérsékleten buborékolatják át a katalizátoroldaton. Egyszeri áthaladáskor az etilén 35-45%-a alakul át. A felszabaduló reakcióhőt az acetaldehid és a víz egy

részének kidesztillálására hasznosítják. 1 tonna acetaldehidre 2,5-3,0m<sup>3</sup> víz kerül a reakciókörbe. Az inert gázok feldúsulása miatt a rendszert bizonyos időközönként le kellene fúvatni, de ez etilénvesztést okoz. Ennek elkerülésére tiszta etilénből és oxigénből indulnak ki.

– Kétlépcsős eljárás:

Két reaktorban, egymástól elkülönítve vezetik le a reakciót, illetve a regenerálást. Ebben az esetben levegő használható oxidálószerként. Az etilént a katalizátoroldattal 105-110 °C-on és 10 bar nyomáson reagáltatják, közel teljes konverzióval. Expandáltatás és az acetaldehid-víz elegy kidesztillálása után az oldatot a regeneráló reaktorba vezetik, ahol 100 °C-on és 10 bar nyomáson oxidálnak, majd a „friss” katalizátort visszavezetik a reaktorba.

Abban az esetben, ha oldószerként nem vizet, hanem más -OH csoport tartalmú vegyületet használnak, illetve etén helyett propén, vagy butén a kiindulási olefin, más fontos szerves vegyipari intermedierek állíthatók elő (11. táblázat).

**11. táblázat. Wacker szintézissel előállított szerves nagyipari alapanyagok**

kiindulási anyag	közeg	termék
Etén	H <sub>2</sub> O	acetaldehid
Etén	H <sub>2</sub> O + HCl	ClCH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> OH
Etén	H <sub>2</sub> O + HNO <sub>3</sub>	O <sub>2</sub> NOCH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> ONO <sub>2</sub>
Etén	H <sub>2</sub> O + CO	CH <sub>2</sub> =CHCOOH
Etén	CH <sub>3</sub> COOH	CH <sub>2</sub> =CHOAc
Etén	ROH	CH <sub>2</sub> =CHOR
Propén	H <sub>2</sub> O	acetón
butén-1 és butén-2	H <sub>2</sub> O	metil-etil-ke-ton

Az 1970-es évek közepére az etilén közvetlen oxidációja világszerte maximumot ért el, mintegy 2,6 x 10<sup>6</sup> t/év gyártó kapacitással. A 80-as években az etilén közvetlen oxidációja némileg visszaszorult, mert az ecetsav előállítására az acetaldehid oxidációja helyett a metanol karbonilezésén alapuló Monsanto eljárás terjedt el.

Várható, hogy a jövőben a CO/H<sub>2</sub>-elegyből egy lépésben előállítható acetaldehid fedezi majd a szükségletek fő részét.

**Hidroformilezési technológiák**

A regioszelektív nagyipari szintézisek közül részletesebben a hidroformilezést tekintjük át. A hidroformilezés – más néven oxo szintézis – telítetlen szénláncú vegyületek átmenetifém-organikus komplexekkel katalizált reakciója nagy nyomáson és magas hőmérsékleten CO + H<sub>2</sub> gázeleggyel, mely során formálisan H és CHO csoport addíciónálódik a C=C kettőskötésre. A reakciót 1938-ban Otto Roelen – a Ruhrchemie munkatársa – fedezte fel a Fischer-Tropsch szintézis kapcsán.

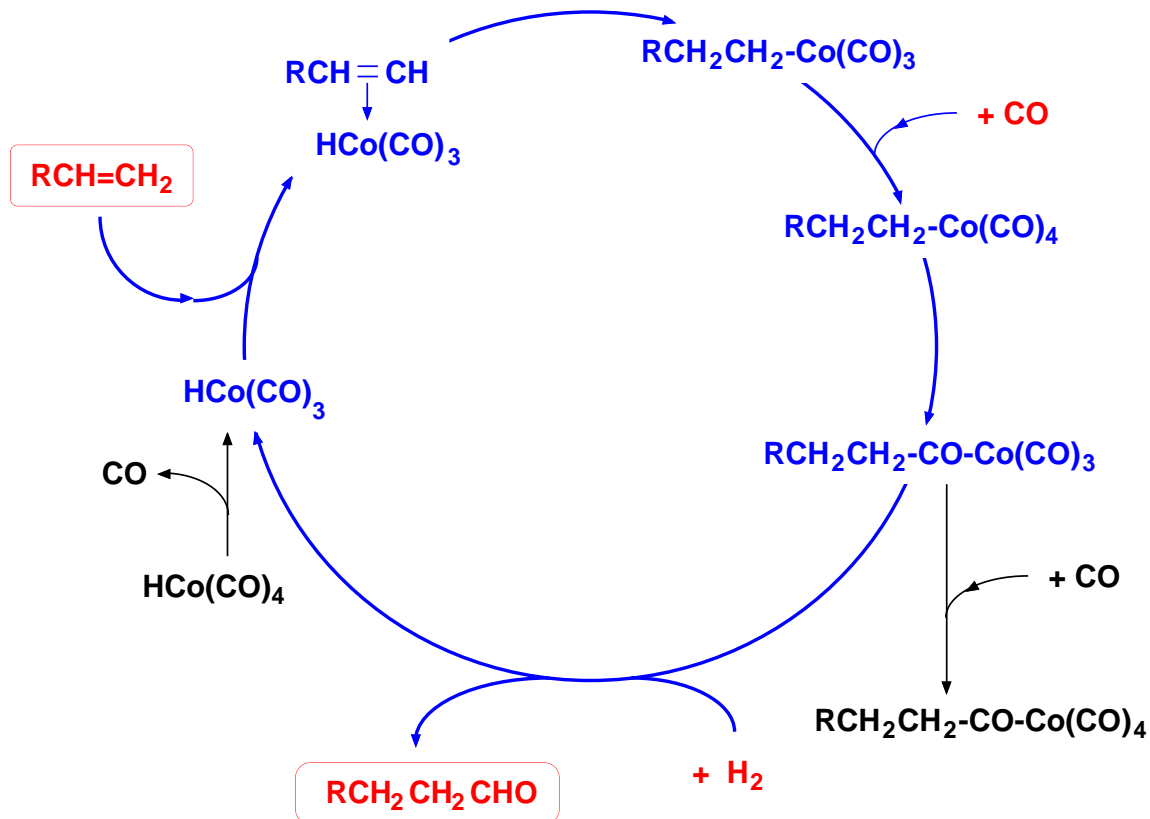
A C<sub>3</sub>-C<sub>15</sub> aldehidek több mint 90%-át hidroformilezéssel állítják elő. Ezek az aldehidek az alapjai a legtöbb aminnak, karbonsavnak és mindenekelőtt a legtöbb alkoholnak.

A legfontosabb hidroformilezési reakciók egyike a *n*-butanol és a 2-etil-hexanol gyártása propénből és szintézisgázból. A keletkező alkoholok ftálsavanhidriddel alkotott észterei a legfontosabb műanyaglágyítók. A 2-etil-hexanolt *n*-butiraldehidből

nyerik az aldol-dimerizációt követő dehidratálással és redukcióval. Tehát alapvető igény a propén hidroformilezési reakció nagy regioszelektivitása.

A propén hidroformilezését kezdetben a klasszikus kobalt-karbonil katalizátorral végezték (77. ábra). Ez az eljárás kb. 70-30%-ban szolgáltatja a *n*- illetve *i*-aldehidet. Természetesen meghatározták a reakció kinetikai egyenletét is:

$$-\frac{d[\text{olefin}]}{dt} = k \frac{[\text{olefin}] [p_{H_2}] [\text{Co-kat}]}{[p_{CO}]}$$



77. ábra. Heck-Breslow reakciómechanizmus

Eleinte – az 1970-es évekig – a melléktermékként keletkező *i*-aldehidet elégették, majd igyekeztek felhasználni, illetve visszaalakítani a kiindulási anyagokká. Ezt követően rátértek a katalizátor módosítására. Először a kobalt katalizátort bázikus tercier foszfánnal (pl.  $\text{PBU}_3$ ) stabilizálták. Ennek hatására a regioszelektivitás nő, a reakció alacsonyabb nyomáson végezhető, hiszen a kobalt komplexben tartásához nem kell a nagy  $\text{CO}$  nyomás, ugyanakkor a reakciósebesség csökken. Ezért emelni kell a hőmérsékletet, ami viszont a kemoszelektivitást rontja, az aldehid hidrogéneződése lép előtérbe. Ma már az új üzemeket inkább  $\text{PPh}_3$ -nal módosított  $\text{Rh}$ -katalizátorral látják el, mert a  $\text{Rh}$  aktivitása kb. 3 nagyságrenddel nagyobb és a regioszelektivitás is kedvezőbb (12. táblázat).

A ródiumos technológiák gazdaságosságát alapvetően a katalizátor visszanyerésének lehetősége határozza meg. A visszanyerés tökéletesítésének egyik módja a foszfánok vízzoldhatóvá tétele. Ezt oly módon valósítják meg, hogy a foszfánba vízzoldható (pl.  $-\text{COOH}$ ,  $-\text{NH}_2$ ,  $-\text{SO}_3\text{Na}$ , stb) funkciós csoportokat visznek be, és ezekkel képzik a

katalizátor komplexeket. A reakciót kétfázisú rendszerekben (pl. etilacetát + víz) hajtják végre. A reakcióelegyet intenzíven kevertetik, a határfelületen játszódik le a reakció. A reakció végén a fázisokat elválasztják, az egyikben van a termék, a másikban a katalizátor. Ezen az elven dolgozott ki egy új nagyipari technológiát a Rhone-Poulenc és Ruhrchemie közösen a propén hidroformilezésére. Katalizátor-ligandumként a  $PPh_3$  triszubsztituált változatát használják.

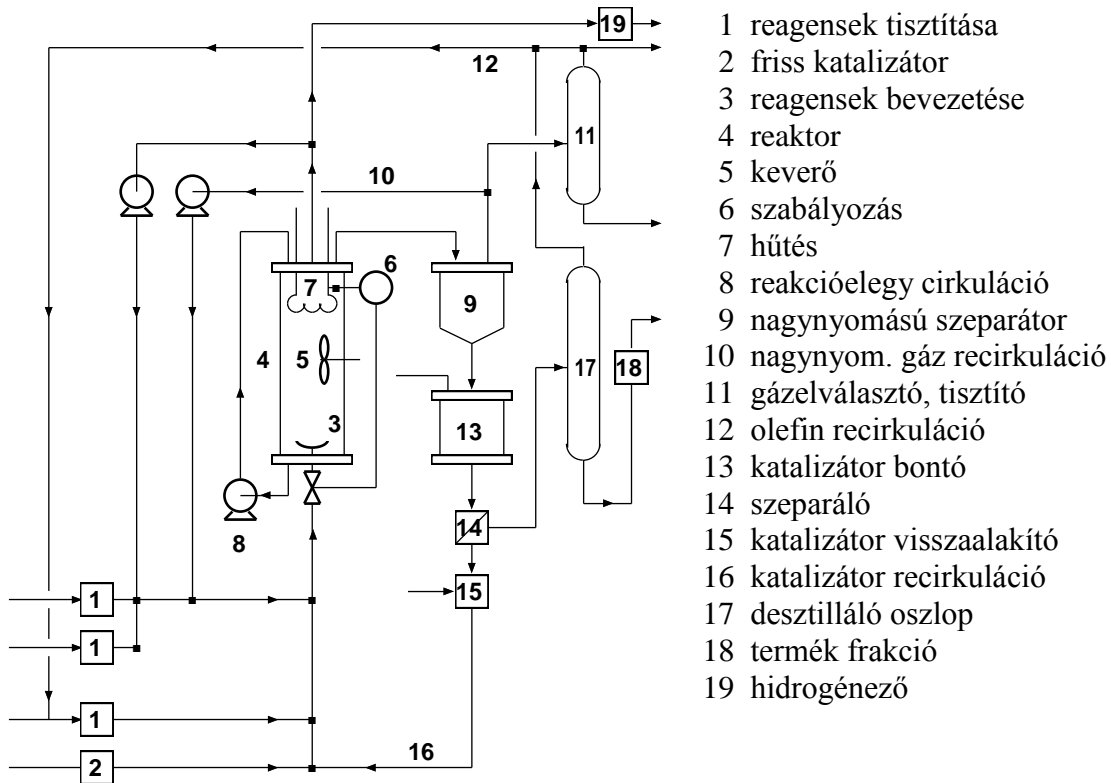
A hidroformilezési technológiák 3 fő részből állnak:

- a reakció kivitelezése (beleértve a katalizátor elkészítését),
- a katalizátor elválasztása (beleértve annak regenerálását),
- a termék izolálása.

Egy általános technológiai sémát a 78. ábra láthatunk.

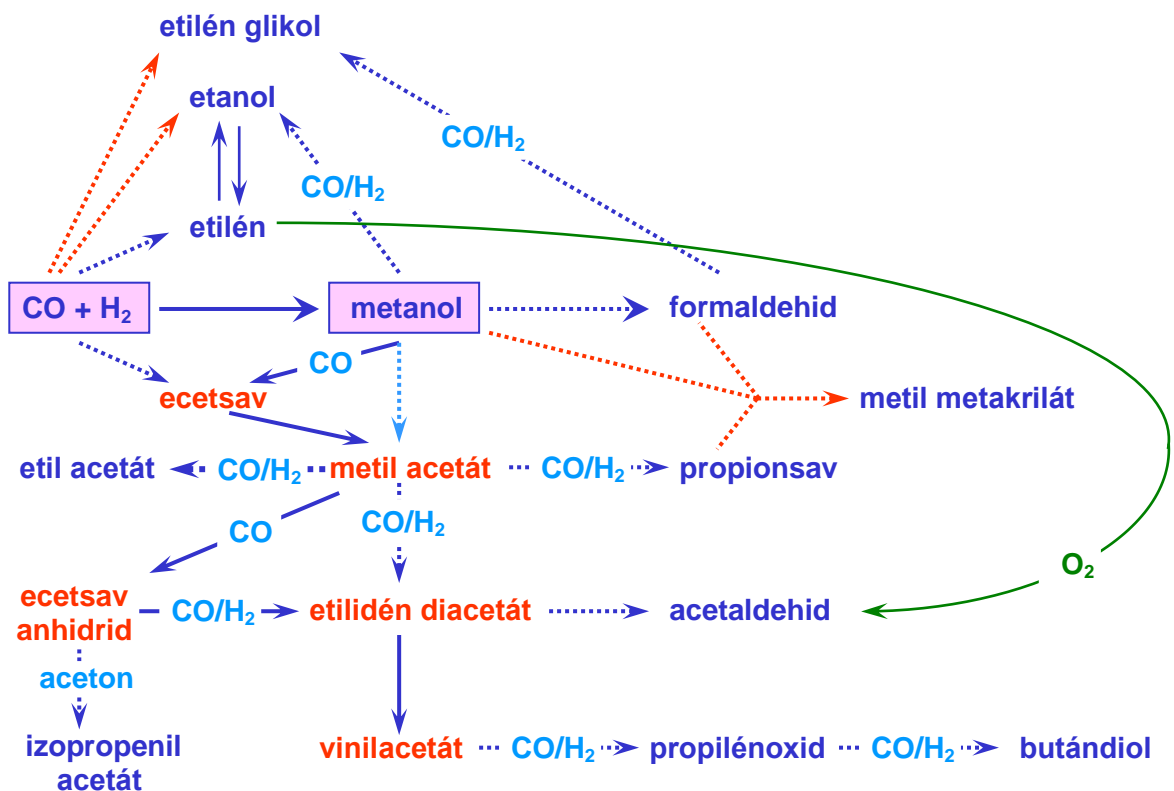
**12. táblázat. Az alapvető propilén-hidroformilező eljárások összehasonlítása**

átmeneti fém	Kobalt		ródiom		
	klasszikus	módosított	klasszikus	módosított	vízoldható
katalizátor	$HCo(CO)_4$	$HCo(CO)_3P R_3$	$HRh(CO)_4$	$HRh(CO)(PPh_3)_3$	$HRh(CO)(PmC_6H_4SO_3Na)_3$
cég	Ruhrchemie BASF	Shell	Ruhrchemie	Union Carbide Davy Powergas Ruhrchemie	Rhone-Poulenc Ruhrchemie
hőm., °C	100-160	160-200	100-140	60-120	80-130
P, bar	200-300	50-100	200-300	1-50	50
fém konc, %	0,1-1	0,6	$10^{-4}$ - $10^{-2}$	$10^{-2}$ - $10^{-1}$	$10^{-2}$
tart.idő,h	0,5-2	0,1-0,2	0,3-0,6	0,1-0,25	0,2-0,3
telített szh,%	5-8	8-10	1-2	1-4	1-2
főtermék	aldehid	alkohol	aldehid	aldehid	aldehid
N:izo arány	70:30	88:12	60:40	92:8	95:5



78. ábra. Általános technológiai séma a hidroformilezésre

A szén-monoxid illetve szintézis gáz vegyipari felhasználásának néhány további lehetőségét a 79. ábra foglaltuk össze.



79. ábra. Vegyipari termékek szintézis gázból



## Ecetsav szintézis

Az ecetsav igen nagy mennyiségben előállított szerves intermedier. Festékek, illatanyagok, cellulóz-acetát, műanyagok és műszálak gyártására, gumiparban és lakkiparban oldószerként, az élelmiszeriparban ízesítő- és konzerváló anyagként használják fel.

Előállítására számos hagyományos, petrokkémiai bázisú és CO alapú eljárás ismert:

- etanol oxidatív fermentációja,
- falepárlás,
- acetaldehid folyadékfázisú oxidációja levegővel vagy O<sub>2</sub>-vel,
- könnyűbenzin folyadékfázisú oxidációja katalizátor nélkül,
- bután folyadékfázisú oxidációja bizmut sók jelenlétében,
- metanol karbonilezése kobalt katalizátorral (BASF eljárás),
- metanol karbonilezése ródium katalizátorral (Monsanto eljárás),
- szintézisgázból előállított metil-formiát izomerizálása,
- a UCC és a Hoechst által kifejlesztett Rh-alapú heterogén katalitikus eljárás a szintézisgázból való közvetlen előállításra.

A metanol karbonilezésén alapuló módszerek közül a BASF-eljárás alapreakcióját 1913-ban figyelték meg. A technológiai megvalósításnak azonban két fontos előfeltétele volt:

- nagy mennyiségű olcsó szintetikus metanol kellett (1920 után a metanol az ipar számára már jelentős mennyiségben rendelkezésre állt),
- a korróziós problémák megoldása (az 50-es évek végére oldották meg: Hastelloy acél = Mo–Ni - ötvözet).

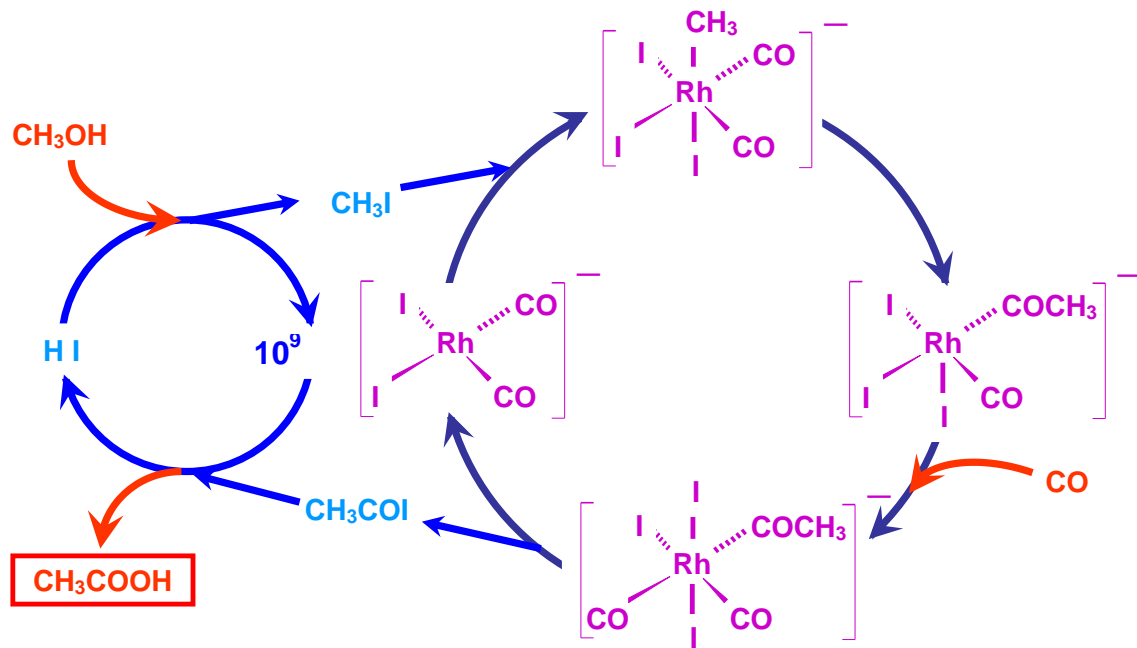
A BASF eljárás jellemzői:

- gyakorlatilag veszteségmentes katalizátorkezelés,
- 90 %-os szelektivitás metanolra, 70 %-os szénmonoxidra.
- melléktermékek: CO<sub>2</sub>, etanol, propanol, metil-acetát, dimetiléter, hangyasav, propionsav,
- a nyerstehermet 5 kolonnán desztillálva 99,8 %-os tisztaságú ecetsavat eredményez,
- szélsőségesen magas (680 bar) nyomást igényel.

Ennél lényegesen kedvezőbb körülmények között (200 °C-on és 10-30 bar CO nyomáson) végrehajtható – és ezért ma már a meghatározó technológia – a Monsanto eljárás. A reakció katalitikus ciklusát a 80. ábra láthatjuk. Igen meglepő, hogy a reakció sebessége nem függ sem a metanol, sem a CO koncentrációjától.

Kinetikai egyenlete:

$$-\frac{d[\text{CH}_3\text{OH}]}{dt} = k[\text{Rh}][\text{I}^-]$$



80. ábra. Ecetsav szintézis Monsanto eljárással

Az ecetsavgyártás jövőbeli fejlesztési lehetőségei:

- gazdaságos lehet a UCC és a Hoechst által kifejlesztett Rh-alapú heterogén-katalitikus eljárás a  $C_2$ -termékek szintézisgázból való közvetlen szintézisére,
- egyre nagyobb ipari jelentősége lehet az ugyancsak szintézisgázból előállított  $HCOOCH_3$  izomerizálásának.

## Karbonilezésen alapuló további nagyipari eljárások

A továbbiakban néhány más, ugyancsak nagyipari méretekben megvalósított homogén katalitikus karbonilezési eljárást (13. táblázat) tekintünk át röviden.

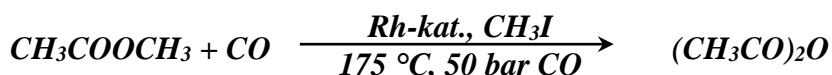
13. táblázat. Nagyipari homogén katalitikus szintézisek

termék	Cég
<b>ecetsavanhidrid</b> $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{CH}_3 + \text{CO} \rightarrow (\text{CH}_3\text{CO})_2\text{O}$	Tennessee Eastman/Halcon SD Group
<b>vinil acetát</b> $2 \text{CH}_3\text{CO}_2\text{CH}_3 + 2 \text{CO} + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{CO}_2\text{CH}=\text{CH}_2 + 2 \text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}$	Halcon SD Group
<b>adipinsav</b> $\text{CH}_2=\text{CHCH}=\text{CH}_2 + 2 \text{CO} + 2 \text{CH}_3\text{OH} \rightarrow \text{CH}_3\text{OOC}(\text{CH}_2)_4\text{COOCH}_3$	BASF
<b>dietyl oxalát</b> $2 \text{EtONO} + 2 \text{CO} \rightarrow (\text{CO}_2\text{Et})_2 + 2 \text{NO}$	Ube Industries/Union Carbide
<b>dimetil karbonát</b> $2 \text{CH}_3\text{OH} + \text{CO} + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{OC}(\text{OCH}_3)_2 + \text{H}_2\text{O}$	ENI
<b>polikarbonát</b> $n \text{CO} + n \text{HOC}_6\text{H}_4\overset{\text{CH}_3}{\underset{\text{CH}_3}{\text{C}}}\text{C}_6\text{H}_4\text{OH} + \frac{1}{2} n \text{O}_2 \rightarrow \left[ \text{OC}_6\text{H}_4\overset{\text{CH}_3}{\underset{\text{CH}_3}{\text{C}}}\overset{\text{O}}{\parallel}\text{C}_6\text{H}_4\text{OC} \right]_n + n \text{H}_2\text{O}$	General Electric
<b>propionsav</b> $\text{CH}_3\text{COOH} + \text{CO} + 2 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH} + \text{H}_2\text{O}$	Texaco Development Corp.
<b>alkil fenilkarbamát</b> $\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2 + \text{CO} + \text{EtOH} + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{C}_6\text{H}_5\text{NHCO}_2\text{Et} + \text{H}_2\text{O}$	Asahi Chem. Ind.
<b>alkil fenilkarbamát</b> $\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2 + 3 \text{CO} + \text{MeOH} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_5\text{NHCO}_2\text{Me} + 2 \text{CO}_2$	Catalytica Associates

### Ecetsavanhidrid szintézis

Az ecetsavanhidridet korábban az acetaldehid oxidációjával nyert ecetsavból állították elő, vagy az acetaldehiddel, vagy – az ugyancsak ecetsavból, annak termikus bontásával kapott – keténnel való reakciója útján.

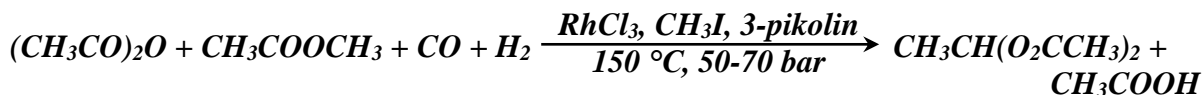
A Tennessee Eastman és a Halcon cég egy új, a Monsanto-féle ecetsav-szintézishez hasonló, teljesen szénbázison nyugvó homogén katalitikus eljárást dolgozott ki a metilacetát karbonilezésére.



A katalitikus ciklus kulcsintermedierje ezúttal is a  $[\text{Rh}(\text{CO})_2\text{I}_2]^-$  komplex.

## Vinilacetát szintézis

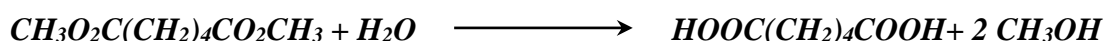
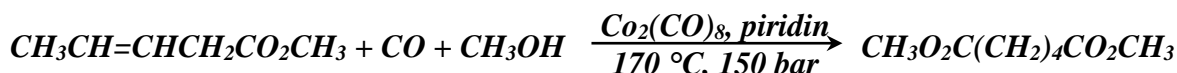
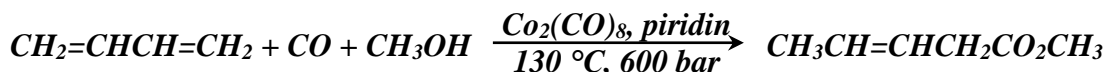
A vinilacetátot korábban (az 1960-as évekig) acetilénből gyártották. A 60-as évektől – amint azt már a Wacker-szintézisnél láttuk – az etilén oxidációján alapuló eljárás vált dominánssá. Az 1980-as évek elején a Halcon cég kidolgozta metanol alapon – az ecetsavanhidrid szintézis mellett – a vinilacetát előállításának is egy új technológiáját.



## Adipisav szintézis

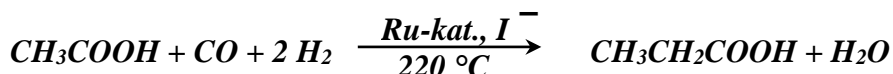
Az adipinsavat – ami a Nylon 66 gyártásának egyik alapanyaga – jelenleg a ciklohexán katalitikus oxidációja útján állítják elő.

A benzin pirolízise során mindig keletkezik melléktermékként butadién. Általában ennek a feldolgozása a cél. A butadién metoxi-karbonilezésére dolgozott ki egy homogén katalitikus nagyipari eljárást a BASF. (A metoxi-karbonilezés olefinek metanol jelenlétében végzett karbonilezése, mely során telített karbonsavészter keletkezik.) Az új eljárás során 2 lépésben dimetil-adipát keletkezik, melyből hidrolízissel nyerik az adipinsavat. Katalizátorként  $\text{Co}_2(\text{CO})_8$ -t, módosító adalékként pedig nitrogén-bázist, piridint használnak.

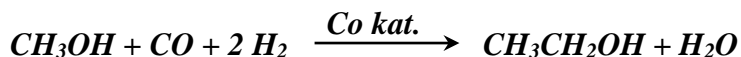


## Lánchosszabítási (homológálási) reakciók

A Texaco Development Corporation dolgozott ki egy új lánchosszabbítási technológiát, amely során ecetsavból állítanak elő propionsavat és a homológjait.

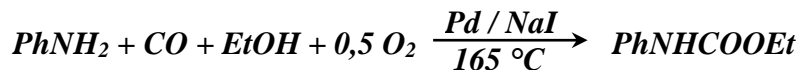


Alkoholok lánchosszabbítására is fejlesztettek ki hasonló homogén katalitikus eljárásokat. Pl:

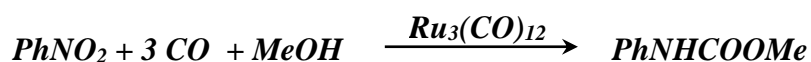


## Alkil-fenil-karbamátok előállítása

Az alkil-fenil-karbamátokból hevítéssel fenilizocianát ( $\text{Ph-N=C=O}$ ) nyerhető, ami a poliuretánhabok, műbőrök alapanyaga. Eddig a fenilizocianátot foszgénnel állították elő. Az elmúlt évtizedben kidolgozott két új eljárás lenne hivatott a korábban harci gázként is használt, rendkívül veszélyes foszgén alkalmazását kiváltani. A japánok (Asahi Chemical Industry) által kidolgozott módszer lényege az anilin oxidatív karbonilezése etanol jelenlétében. Az eljárás 96 %-os szelektivitású.



A másik módszer a nitrobenzol redukív karbonilezésén alapszik. A technológiát a Catalytica Associates cég fejlesztette ki. Katalizátorként  $\text{Ru}_3(\text{CO})_{12}$ -t használnak.



## A homogén katalitikus szintézisek gazdaságossági szempontjai

Felvetődik a kérdés, hogy miért nem terjedtek el már jobban a gyakorlatban is a homogén katalitikus technológiák. Az ilyen típusú eljárások gazdaságossága szempontjából a legalapvetőbb követelmény az aktív és szelektív katalizátor léte. Általában úgy vélik, hogy akkor megfelelő egy katalizátor, ha:

- szelektivitása nagyobb mint 95%,
- a katalizátor hatékonysága – azaz egy katalizátormolekula átlagosan hány szubsztrátum molekula átalakítását képes katalizálni (TON=„turnover number”) – eléri a 100 000 - 1 000 000 értéket,
- a katalitikus ciklus sebessége – azaz egy katalizátormolekula által időegység (általában egy óra) alatt végrehajtott katalitikus ciklusok száma (TOF=„turnover frequency”) – 500 felett van, és
- a katalizátornak több mint 99,9 % recirkuláltatható.

A nehézség általában az utolsó feltétellel van.

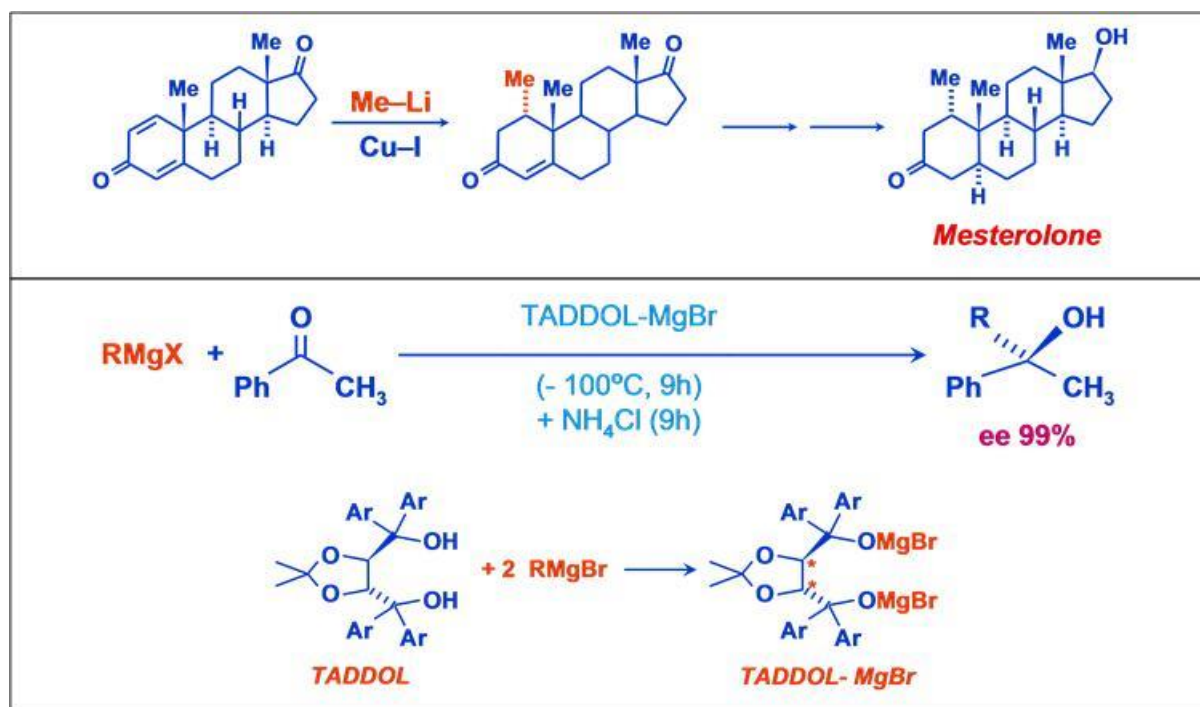
Ha van megfelelő katalizátor és technológia, akkor a szubsztrátum (és egyéb reagensek), valamint a termék(ek) árviszonyai a meghatározóak. A homogén eljárások elterjedését azonban a nagy beruházás-igényük is nehezíti. Általában a tőkeerős cégek képesek megvalósítani. Ezek a szintézisek nagyfokú műszerezettséget, és a technológiai folyamatok precíz betartását igénylik.

## A finomkémiai ipar

A finomkémiai ipar a vegyipar egy speciális területe, amely kis mennyiségű, nagyon drága vegyi anyagokat állít elő. Ide tartoznak egyes nagyértékű intermedierek, a gyógyszerek egy része, alkaloidák, növényi hatóanyagok. (Statisztikai szempontból a gyógyszeripar termékeit nem számítják a finomkémiai iparhoz.)

Finomkémiai termékeket többféle módon is előállíthatunk. Alkalmazhatunk biotechnológiai eljárásokat, nagyszelektivitású homogénkatalitikus módszereket vagy

éppen fémorganikus vegyületekkel végzett sztöchiometrikus reakciókat. Az utóbbiakra látunk példát a 81. ábra.



81. ábra. Gyógyszerhatóanyagok, finomkémiai intermedierek szintézise (sztöchiometrikus reakció fémorganikus reagensekkel)

A mesterolone az anabolikus szteroidok egyike.

## Biotechnológiai eljárások

A biotechnológia – bár elnevezésében újszerű – szinte egyidős az emberiséggel. Ősidők óta ismeretes az alkoholos erjesztés, a sajtok készítése, a kenyérelélesztés. Ezek mind hagyományos biotechnológiai eljárások voltak.

A XX. század második felének legkiemelkedőbb természettudományi alap kutatási eredményei a molekuláris biológiában születtek. Sikerült feltárni az élő szervezetek öröklődési folyamataiban történő beavatkozások lehetőségeit, és így a genetikai manipulációk, az anyagcsere-folyamatok irányíthatósága, a gén-, illetve fehérjemérnökség legújabb módszerei az anyagi termelés széles területén váltak alkalmazhatóvá. Ugyanekkor a biotechnológia nagyon megnövekedett szerephez jutott az „életminőség” javításában, főként a humán betegségek diagnosztizálásában és hatékonyabb gyógyításában, valamint a környezetvédelmi problémák javításában.

A biotechnológia – a IUPAC – meghatározása szerint – a biokémia, mikrobiológia és a műszaki tudományok együttes alkalmazása abból a célból, hogy a mikroorganizmusokat, szövettenyészeteket – vagy azok egy részét – közvetlenül ipari célra hasznosítsák.

A biotechnológia jellemzője, hogy az évenként megújuló nyersanyagforrás bázisán hagyományos eljárásokra épül, ipari gyakorlattá vált, komplex tudományterület;

mikrobiológiai, biokémiai és műszaki alapkutatót, alkalmazott kutatást és fejlesztést igényel. Az új technikák különösen nagy távlatokat kínálnak.

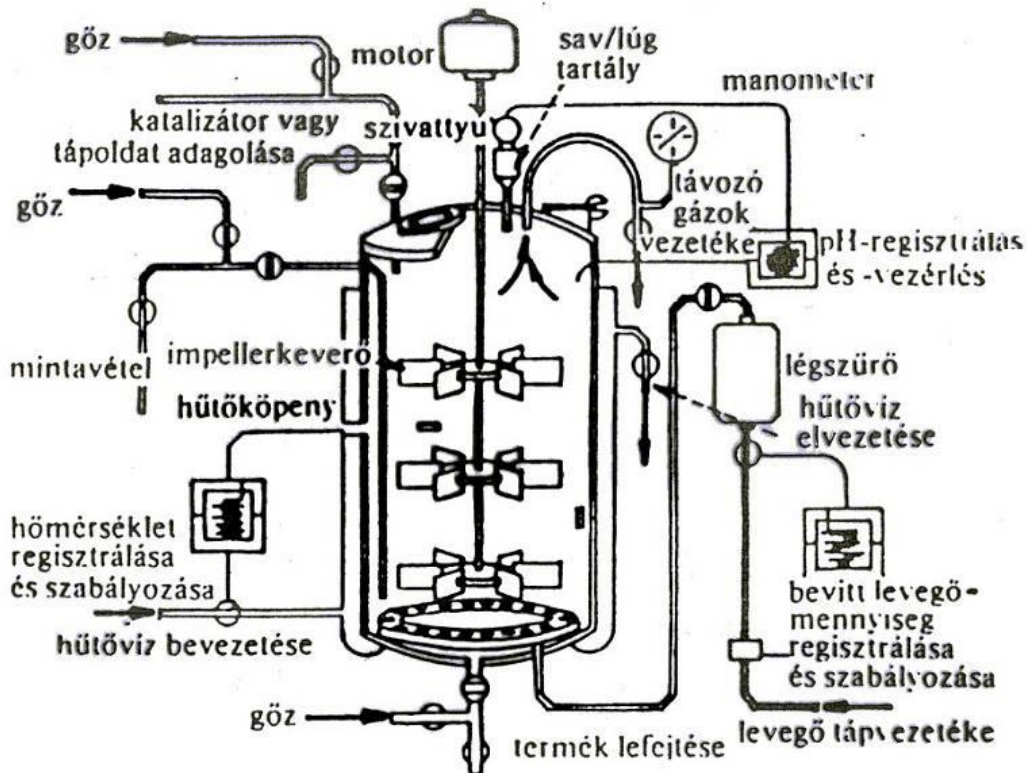
A biotechnológiai eljárások előnyei:

- bonyolult és költséges reakciók is könnyen elvégezhetők fermentációs úton,
- többlépcsős kémiai átalakítás egy fokozatban elvégezhető,
- hő-, sav- és lúgérzékeny anyagok is átalakíthatók mikrobiológiai úton,
- az új funkciós csoportok bevitele nagy szelektivitással, sztereospecifikusan történik.

hátrányai:

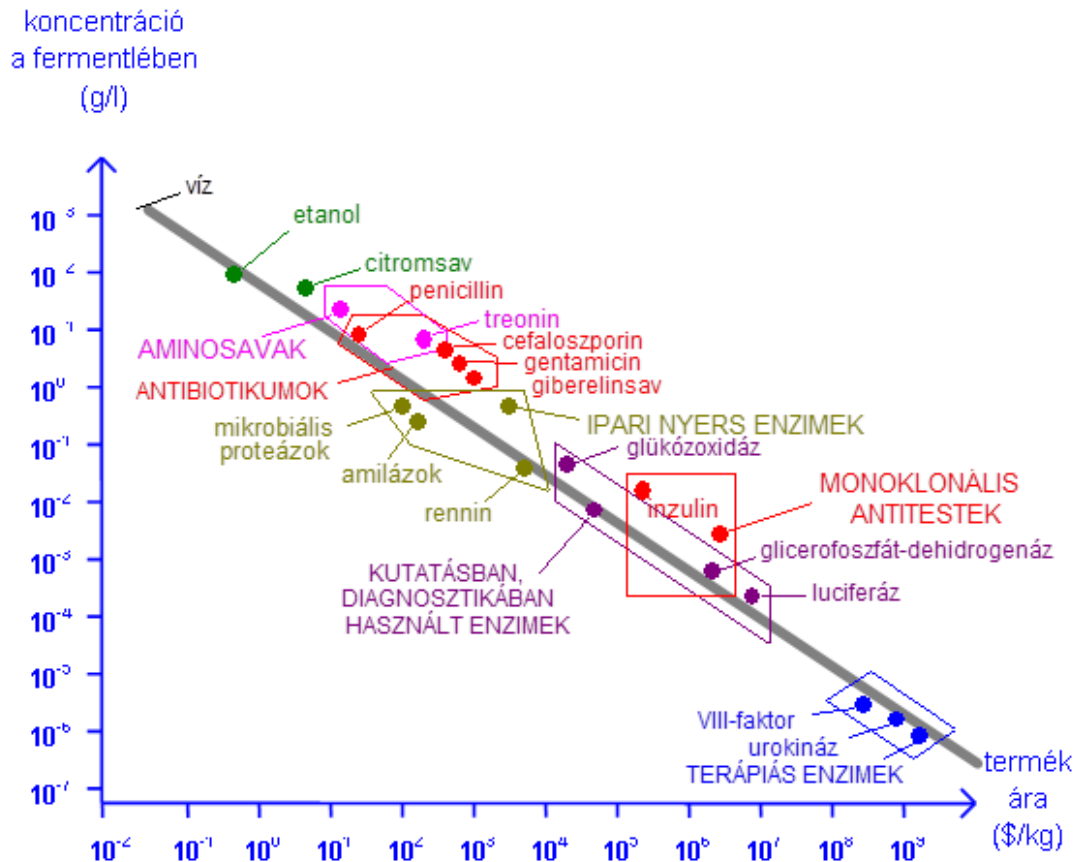
- kevesebb fajta technológiai lehetőség van a kivitelezésre mint a kémiai szintézisénél,
- különleges igények vannak a bioreaktorok konstrukciója tekintetében (82. ábra),
- a termék koncentrációja a reakcióelegyben rendkívül alacsony,
- a termékhez képest relatíve nagy koncentrációban vannak egyéb anyagok a reakcióterben.

A két utóbbi ok miatt igen nagy szerepe van a biotechnológiai eljárásokban a vegyészmérnöki tudományok eredményei felhasználásának, különösen a biokatalizátorok (pl. enzimek) rögzítésében, a reaktortechnika és az elválasztási műveletek alkalmazásában.



82. ábra. Szakaszos üzemű bioreaktor a járulékos szerelvényeivel

Éppen az elválasztási műveletek bonyolultsága miatt a biotechnológiai úton előállított termékek ára jól korrelál a fermentációban lévő hatóanyag koncentrációval (83. ábra).



83. ábra. Biotechnológiai termékek ára

A biokatalitikus eljárások során alkalmazott enzimeket a 14. táblázat szerint szokás csoportosítani.

14. táblázat. Az enzimek csoportosítása

<b>oxido-reduktázok</b>	redukciók, oxidációk katalízise (pl: dehidrogenázok)
<b>transzferázok</b>	csoportátvitel (pl: CO, CHO, acil, glikozil, foszfát, S-tart. csoport)
<b>hidrolázok</b>	hidrolitikus folyamatok (pl: észterek, glikozid, peptid, C-N kötés, savanhidrid)
<b>liázok</b>	nem hidrolitikus úton bontó enzimek, ill. szintetázok első csoportja (ATP-t nem igényelnek)
<b>izomerázok</b>	izomerizációs és racemizációs reakciók (molekulán belüli áterndeződés)
<b>ligázok</b>	szintetázok második csoportja (ATP-t igényelnek)

Technológiai szempontból külön kihívást jelent az enzimek hordozóhoz való rögzítése. A leggyakoribb megoldásokat a 15. táblázatfoglaltuk össze.



### 15. táblázat. Enzimek rögzítése

<p>az enzimeket vagy sejteket <b>vízoldhatatlan kötik</b> <b>mátrixokhoz</b> (pl.: poliszacharidok, proteinek, (fizikai adszorpcióval, szintetikus polimerek, szervesetlen anyagok) ionos- vagy kémiai kötéssel)</p>	
<p><b>két- vagy többfunkciós reagensek</b> segítségével az enzimek között <b>intermolekuláris</b> <b>keresztkapcsolatot</b> hoznak létre (pl.: glutáraldehid, diizocianát)</p>	
<p><b>"kapszulázás":</b></p>	<p>az enzimeket vagy aktív sejteket polimer mátrix cellájába, vagy félig áteresztő membránba zárják (pl.: kollagén, zselatin, cellulóz triacetát, poliakrilamid, poliuretán)</p>

Immobilizált biokatalizátorok alkalmazásával az alábbi eljárások terjedtek el legjobban:

- L-aminosavak előállítása acetyl-DL-aminosavakból,
- félszintetikus penicillin gyártás,
- fruktóz előállítása glükóz izomerizációjával,
- L-aszparaginsav előállítása,
- L-almasav előállítása,
- L-alanin előállítása,
- a laktóz hidrolízise.

A finomkémiai termékek között jelentős szerepet töltenek be az aminosavak (16. táblázat).

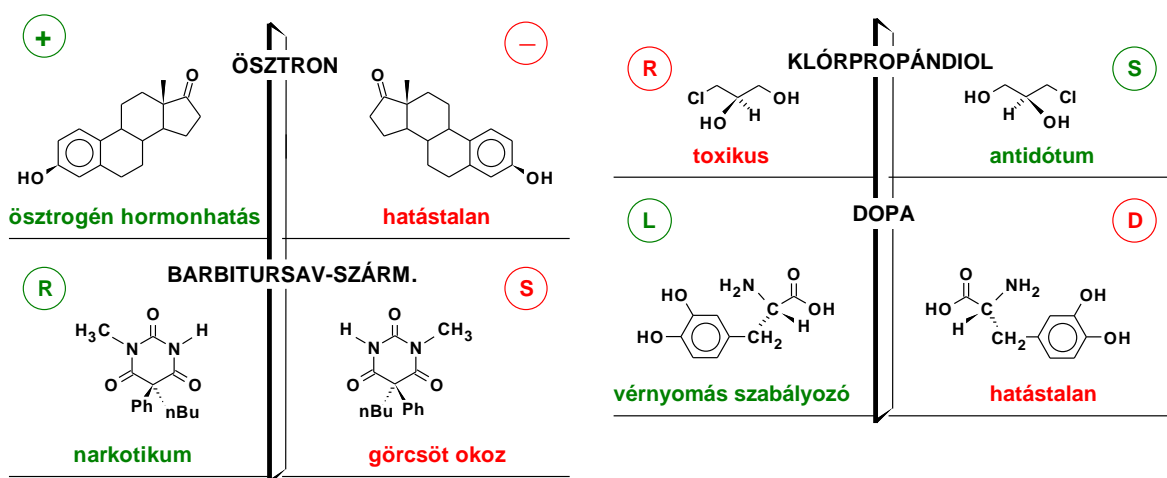
### 16. táblázat. A világ aminosav termelése

aminosav	termelés, t/év	termelési eljárás	felhasználás
L-alanin	10 - 50	rögzített enzimmal	aromajavítás
DL-alanin	50 - 200	kémiai szintézis	aromajavítás
L-arginin	200 - 300	direkt fermentáció, fehérje-hidrolizátumból	gyógyszerek (májbetegségekre)
L-aszparaginsav	500 - 1000	rögzített enzimmal	gyógyszerek, aromajavítás
L-aszparagin	10 - 50	fehérje-hidrolizátumból, kémiai szintézis	gyógyszerek
L-cisztein	100 - 200	fehérje-hidrolizátumból	antioxidáns, gyógyszerek
L-fenil-alanin	50 - 100	kémiai szintézis, direkt fermentáció	Infúzióoldatok, gyógyszerek
glicin	5000 - 6000	kémiai szintézis	édesítőanyag
L-glutaminsav	320000	direkt fermentáció, kémiai szintézis	aromajavítás
L-glutamin	300	direkt fermentáció	gyógyszerek
L-hisztidin	100 - 200	direkt fermentáció, fehérje-hidrolizátumból	gyógyszerek
L-izoleucin	10 - 50	direkt fermentáció	infúzióoldatok
L-leucin	50 - 100	fehérje-hidrolizátumból, direkt fermentáció	infúzióoldatok
L-lizin	40000	direkt fermentáció	takarmánykiegészítő
DL-metionin	70000	kémiai szintézis	takarmánykiegészítő
L-prolin	10 - 50	direkt fermentáció	infúzióoldatok
L-szerin	10 - 50	mikrobiális átalakítás	kozmetikum
L-tirozin	50 - 100	fehérje-hidrolizátumból, rögzített enzimmal	infúzióoldatok, L-DOPA szintézis
L-treonin	50 - 100	direkt fermentáció, kémiai szintézis	takarmánykieg.
L-triptofán	50 - 100	kémiai szintézis, rögzített enzimmal	infúzióoldatok
L-valin	50 - 100	direkt fermentáció	infúzióoldatok

## Enantioszelektív homogénkatalitikus eljárások

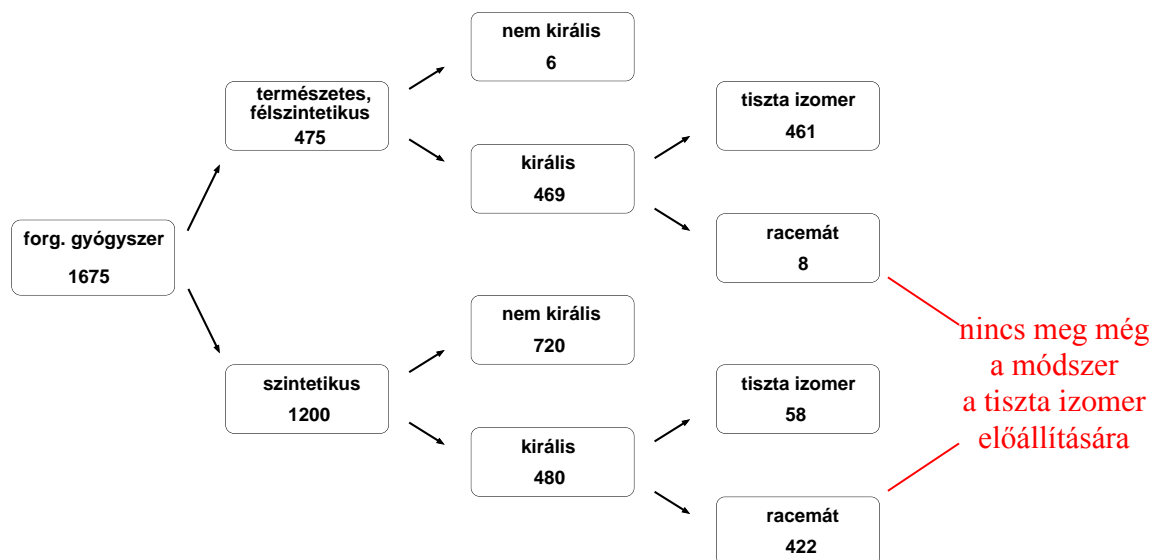
A korábbiakban (2. ábra) már láttuk, hogy a szelektív reakciók egyik típusa az enantioszelektív szintézis. Ilyenkor az enantiomerek – a közönséges reakciókkal ellentétben – nem 50-50%-ban keletkeznek, hanem valamelyik enantiomer képződése kedvezményezetté válik. Az enantiomerek (=optikai antipódok) királis (pl. aszimmetriás szénatomot tartalmazó) vegyületnek egymással fedésbe nem hozható, tükörképi szerkezetű izomerjei. (A „királis” jelző a görög „kheir” = kéz szóból származik.) Kémiai és fizikai tulajdonságaik – a forgatás irányának kivételével – megegyeznek.

Közismert, hogy az emberi szervezet legfontosabb építőkövei (a fehérjék, nukleinsavak, szénhidrátok) meghatározott optikai antipódokból épülnek fel, és így érthető, hogy a gyógyászatban használt aszimmetrikus vegyületek biológiai hatása is gyakran csak az egyik enantiomerhez kötődik (84. ábra).



84. ábra. Optikai izomerek eltérő hatása

Ennek alapján már nem meglepő, hogy a természetes, vagy félszintetikus alapú gyógyszerek hatóanyagainak döntő többsége tiszta izomer (85. ábra).



85. ábra. Gyógyszerhatóanyagok

Ezután már csak az a kérdés, hogy milyen úton lehet ilyen optikailag aktív vegyületekhez jutni. Vagy a racém módosulatból rezolválással választjuk el a kívánt enantiomert, vagy aszimmetrikus szintézis útján nyerjük. A leggazdaságosabb és egyben környezetkímélő eljárás az, ha az aszimmetrikus szintézist királis katalizátor jelenlétében végezzük. A királis katalizátor lehet egy enzim, vagy egy fémorganikus komplex. Az utóbbi esetben a fémkomplex kis mennyisége – optikailag aktív vegyülettel módosítva – királis információt hordoz, és visz át a katalitikus folyamatban keletkező termék nagy mennyiségére.

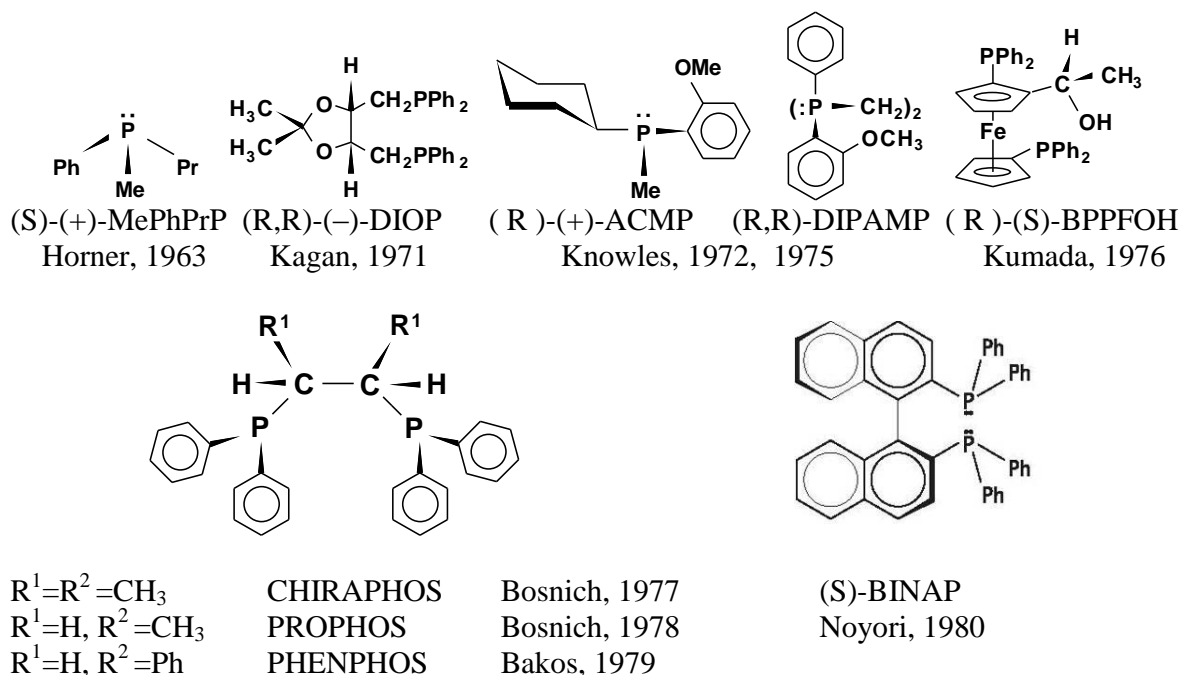
Az elmúlt évtizedekben igen nagyszámú katalitikusan aktív királis átmenetifém-organikus komplexet fedeztek fel, és így a nagy szelektivitású homogénkatalitikus reakciók az enantioszelektív szintézisek (hidrogénezés, hidroszililezés, hidroformilézés, hidrokáboxilézés, epoxidáció, ciklopropanálás, stb.) területén is döntő jelentőségűvé váltak. A legrészletesebben azonban a hidrogénezést vizsgálták. Ez alapvetően két okra vezethető vissza. Egyrészt 1965-ben Wilkinson felfedezett egy stabil, nagyon kiváló tulajdonságokkal rendelkező hidrogénező katalizátort, a  $Rh(PPh_3)_3Cl$ -ot; másrészt az aszimmetrikus hidrogénezés gyakorlati alkalmazásának lehetőségét nagyon hamar felismerték. Az első laboratóriumi kísérleteket követően alig néhány esztendő múlva a Monsanto-cég munkatársainak szabadalma alapján már az USA-ban megépült az első ródiumpatalizátor alapú termelő üzem az L-DOPA (vérnyomáscsökkentő, a Parkinson-kór gyógyszere) előállítására.

Az aszimmetrikus szintézis alapja tehát első közelítésben az, hogy a királis katalizátor különbséget tesz a prokirális vegyület két oldala között, azaz a fémkomplex nem egyforma valószínűséggel koordinálódik, és ezért az egyik optikai enantiomer túlsúlyban képződik. Ahhoz, hogy egy katalizátor királis legyen, elegendő az, hogy királis ligandumot tartalmazzon. Az enantioszelektív szintézisek legfontosabb problémája tehát a megfelelő szerkezetű királis ligandumok (főleg terciér foszfánok) biztosítása. Az elmúlt 3-4 évtizedben a világ különböző laboratóriumaiban mintegy 5-600 új, optikailag aktív foszfán szintézisét végezték el. A 86. ábra ezek közül mutatunk be néhányat.

A kutatók egy része arra törekedett, hogy foszfánjaikat természetes eredetű, tiszta enantiomerekből kiindulva szintetizálják. Az első ilyen foszfánt, a DIOP-ot Kagan állította elő borkősavból.

A hidrogénezési kísérletek eredményeiből megállapítható, hogy a reakciók optikai hozama függ a hidrogénezendő olefin szerkezetétől, de döntő jelentőségű a foszfán minősége. A legkiválóbb modellvegyületek azok – például az  $\alpha$ -acil-amino-fahéjsavszármazékok – , amelyek a katalizátor központi fématomjához több ponton képesek koordinálódni. A katalitikus folyamatok enantioszelektivitását a katalizátor és a szubsztrátum megfelelő „illeszkedése” határozza meg.

Nem mond ellen ennek Halpern azon későbbi felismerése sem, hogy a hidrogénezés kinetikailag kontrollált, azaz a termék kiralitását a kisebb koncentrációjú diasztereomer nagyobb reakciókészsége határozza meg.



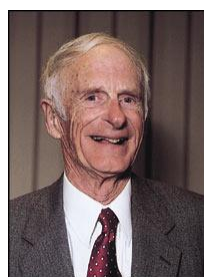
86. ábra. Királis foszfánok

Újabb átütő sikert hozott a nyolcvanas években Noyori munkássága. Új típusú atropizomer királis difoszfánt (BINAP) állított elő, amit Rh, illetve Ru-katalizátor komponensként a legkülönbélebb olefinek, illetve ketonok redukciójára lehet alkalmazni közel 100%-os enantioszelektivitással. Példaként többek között megemlíthetjük a gyulladáscsökkentő Naproxen-t, a fájdalomcsillapító Ibuprofen-t, az antibakteriális Levofloxacin-t, stb. A terület eredményeit, az újabban – részben a BINAP mintájára – előállított bifoszfánok, bifoszfinitek, bifoszfitek előállítását és hidrogénező katalitikus sajátságait kínai kutatók (Tang és Zhang) tanulmánya összefoglalja.

A homogénkatalitikus enantioszelektív reakciók ipari alkalmazása nem korlátozódik a hidrogénezésre, számos jelentős eredményt értek el az aszimmetrikus epoxidáció, dihidroxilezés (Sharpless), aminohidroxilezés, karbén inzerció, metatézis (Grubbs, Schrock) területén is (87. ábra).



Ryoji  
Noyori,  
2001



William S.  
Knowles,  
2001



K. Barry  
Sharpless,  
2001



Robert H.  
Grubbs,  
2005



Richard R.  
Schrock,  
2005

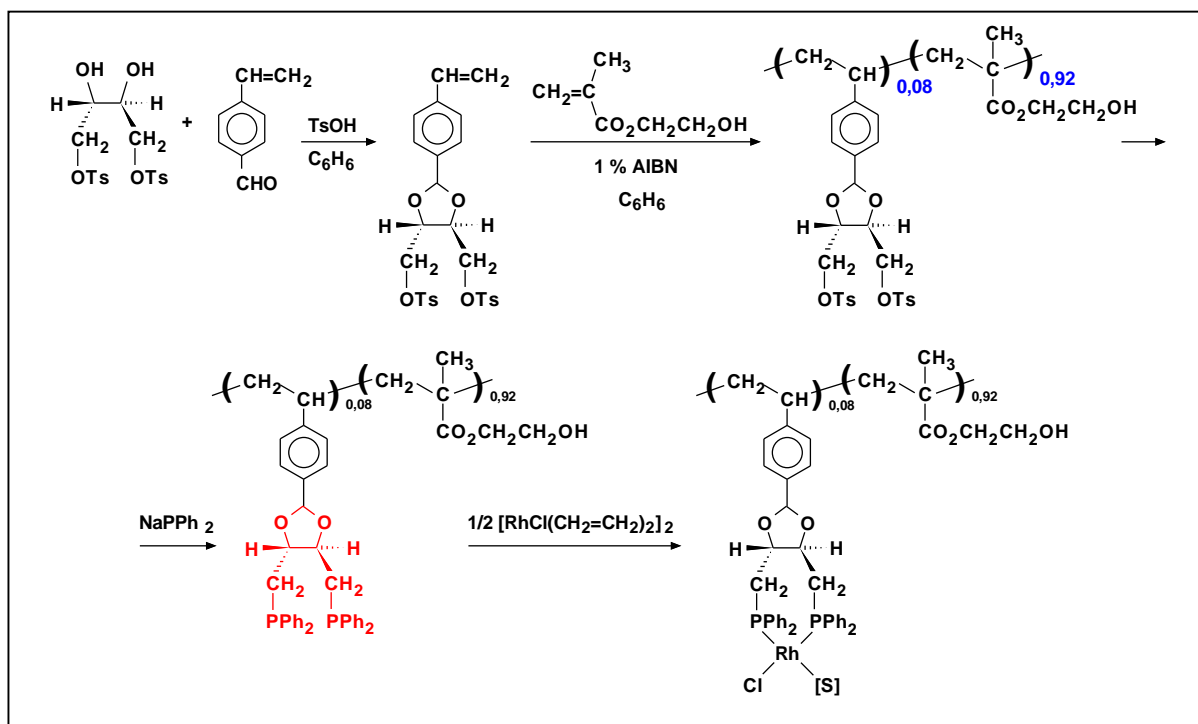
87. ábra. Nobel-díjasok a XXI. században a fémorganikus kémia területéről

## Heterogenizált homogén katalizátorok

A nagy szelektivitású homogén katalizátorok gyakorlati elterjedését elsősorban a nehéz regenerálhatóságuk nehezíti. Éppen ezért régóta igyekeznek a kutatók a homogén- és heterogén katalizátorok előnyös tulajdonságait egyesíteni, azaz az átmenetifém-organikus komplexeket valamilyen módon szilárd hordozóhoz rögzíteni. Ennek a rögzítésnek – az enzimek rögzítéséhez (15. táblázat) részben hasonló módon – három alapvető típusát különböztethetjük meg:

- a szilárd hordozó (pl.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , kerámia, egyéb szilikát stb) felületére fizikai adszorpcióval kötik,
- klátrátokat képeznek (agyagásványok rétegei között van a fém-komplex),
- a katalitikusan aktív molekulát kémiai kötással kapcsolják a hordozóhoz.

A 88. ábra az utóbbi módszerre mutatunk be egy megoldást, amellyel a DIOP „heterogenizált” változatát állították elő.



88. ábra. Heterogenizált, DIOP-tartalmú katalizátor előállítása

A szintézishez kopolimerként azért a vízoldható tulajdonságú hidroxietil-metakrilátot választották, mert így biztosítható, hogy a polimer ne merev, hanem kedvező tulajdonságú, nagyobb felületű, duzzadó legyen.

Az előállított heterogenizált homogén katalizátor enantioszelektivitása dehidroaminosavak hidrogénezése során azonos volt a homogén katalizátorok szelektivitásával, és aktivitása is csak kismértékben maradt el a homogén megfelelőjétől. Regenerálása nitrogén atmoszférában történő szűréssel egyszerűen megoldható.

A Thales Nanotechnológiai Rt. berendezése nyerte el a 2005. évi Ipari Innovációs Díjat. A H-Cube™ a világ első nagynyomású, folyamatos üzemmódú hidrogénező készüléke, amely kapszulába zárt nanostrukturált heterogén katalizátorokkal működik (89. ábra).



Forrás: <http://thalesnano.com/H-Cube>

**89. ábra. H-Cube™: nagynyomású, folyamatos üzemmódú mikro hidrogénező készülék**

A készülékben vízből történő folyamatos elektrolízis útján generált hidrogénnel játszódik le a reakció néhány perc alatt, maximum 100 °C-on és 100 bar nyomáson oly módon, hogy a reakcióelegy egy – a katalizátort tartalmazó – kapszulán megy keresztül. A reakciótermék 10 mg – 100 g tartományban állítható elő.

A Pannon Egyetem Szerves Kémia Intézeti Tanszékén ezen készülékkel végezzük legújabb kutatásaink egy részét.

## Tenzidek - mosószeripar

A tenzidek, felületaktív anyagok azok a vegyületek, amelyek vízben oldva nem homogénean oszlanak el, hanem koncentrációjuk az oldat felületén nagyobb, mint az oldat belsejében és ezáltal csökkentik az oldat felületi feszültségét.

A tenzideket régebben csak textíliák mosására, illetve textilsegédanyagként használták. Jelenleg már számos iparágban (gyógyszeripar, élelmiszeripar, konzervipar, gépipar, kőolajipar, bányászat, építőipar, fényképészet, kozmetikai ipar, textilipar, festékipar, növényvédőszer-ipar, vegyipar) és területen alkalmazzák nedvesítő, emulgeáló, diszpergáló, mosó, illetve tisztítóhatásukat hasznosítva.

Több ezer tenzidet ismerünk, de ezekből csak 100-200 körül van azon vegyületek száma, amit használnak, és csak 20-30 vegyületet gyártanak nagyobb mennyiségben. A tenzid molekulák két részből állnak: egy apoláris, hidrofób részből és egy poláris, hidrofil részből:

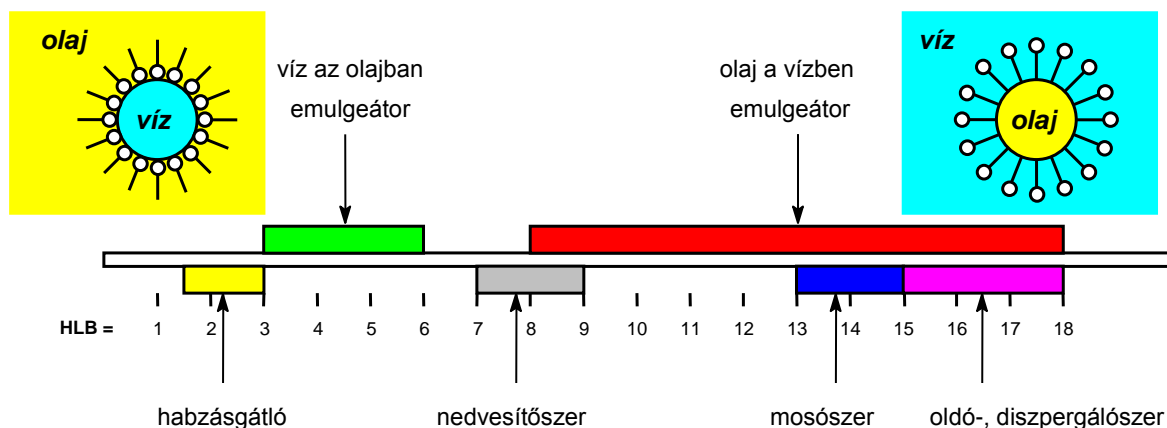


A gyakorlatban használt tenzideket 4 fő csoportba oszthatjuk (17. táblázat). Az anionos tenzidek csak lúgos, a kationos tenzidek pedig csak savas, illetve semleges közegben használhatók.

**17. táblázat. A szintetikus felületaktív anyagok csoportosítása**

<b>Anionaktív vegyületek</b>
Karbonsavak sói (szappanok)
Kénsav-észterek sói (pl: zsíralkohol-szulfátok)
Szulfonsavas sók (pl: alkil-naftalin-szulfonátok, dodecil-benzol-szulfonát)
Foszforsav-észterek sói (pl: di(etil-hexil)-foszforsavas nátrium)
<b>Kationaktív vegyületek</b>
Zsírsavak amino-alkil-észterei
Kvaterner ammóniumsók
<b>Amfoter felületaktív vegyületek</b>
Betainok ( $\alpha$ -klór-zsírsavak + trimetilamin kondenzáció)
<b>Nemionos felületaktív vegyületek</b>
Polialkoholok zsírsavval képzett di- és monoészterei
Zsírsav-alkanolamidok
Poli(etilén-glikol)-származékok

Griffin sokféle kísérlet és empirikus számítás alapján dolgozta ki a HLB (hydrophilic-lipophilic balance = hidofil-lipofil egyensúly) értékrendszert, melynek segítségével a tenzidek sorrendbe állíthatók (90. ábra).



**90. ábra. Tenzidek hidofil-lipofil egyensúlya**

A mosószereknek nagyon sok követelménynek kell egyidejűleg eleget tenniük. A mosás rendkívül összetett folyamat, mely során a tenzid molekuláknak a szennyvívő képessége, diszpergáló hatása, nedvesítő hatása, emulgeáló hatása, habzóképesége, habtartóssága, koncentrációhatásossága, kémiai ellenállóképessége, keményvíz állósága, vízzoldhatósága, színe, pH hatása, kiöblíthetősége cellulózból, kiöblíthetősége fehérje-szálanyagból, hatása az ember bőrére, stb mind-mind szerepet játszik.

A mosószemben lévő komponensek felsorolt tulajdonságai nagyon sokszor ellentétes tendenciájúak. Így nem csoda, hogy a mosóporhoz műanyag „bemérő poharat” adnak, hiszen a kompozíció optimális hatása csak egy adott koncentrációban biztosítható.



## A tenzidek lebontása, a szennyvizek kezelése

A legtöbb anionos és nem ionos tenzid ártalmatlan, ha alifás egyenesláncú. A kationos tenzidek kifejezetten károsak: már 0,05 mg/l koncentrációban elpusztítják a planktonokat és a fehérjét lebontó baktériumokat.

A szappangyártásnál növényi vagy állati zsírokat és olajokat szappanosítanak el lúgokkal. Szennyvíz keletkezik a zsír tisztításánál, a zsírbontásnál, a glicerintartalmú vizek raffinálásánál, a szappanosításnál, a reaktor mosásánál, valamint az egyéb kiszolgáló üzemek működtetésénél. A zsír előkészítésénél abszorbens maradványok, színtelenítő anyaggal szennyezett, enyhén lúgos szennyvizek keletkeznek. A zsír bontása katalitikusan nagy nyomáson és hőfokon zajlik le. Az itt képződő szennyvíz savas jellegű, cinket és kevés olajat tartalmaz. A többi folyamatnál az előzőekhez hasonló, de hígabb szennyvizek keletkeznek.

A szappangyártási szennyvizek általában magas hőmérsékletűek, így visszahűtésük rendkívül fontos. A zsírok „visszafogása” a tisztítás lényeges része. A zsírbontás savas szennyvizeit semlegesíteni kell, mely semlegesítéshez a szappanosítás lúgja használható fel. A cinksók kivonása szintén fontos teendő. A leválasztás utáni szennyvizek szervesanyag-tartalmát a biológiai tisztító egységben speciális baktériumok segítségével távolítják el.

A szintetikus mosószergyártó üzemek szennyvizeit a magas olaj- és zsírtartalom, az ingadozó szennyvíz mennyiség és minőség, a felhabzásra való hajlam és magas lebegőanyag-tartalom jellemzi. A szennyvizek tisztítási módszerei: a kiegyenlítés, a zsír-olajfogás, a vegyszeres üleptetés, majd végül a biológiai tisztítás.

A mesterséges zsírsav alapon álló gyártástechnológiáknál alkoholok, aldehidek, ketonok és savak kerülhetnek a szennyvízbe. A pH-beállítás és a paraffin-származékok eltávolítása után csepegtetőtestes vagy eleveniszapos technológiát lehet alkalmazni, a házi szennyvízzel való keverés esetén.

## Növényvédőszer-ipar

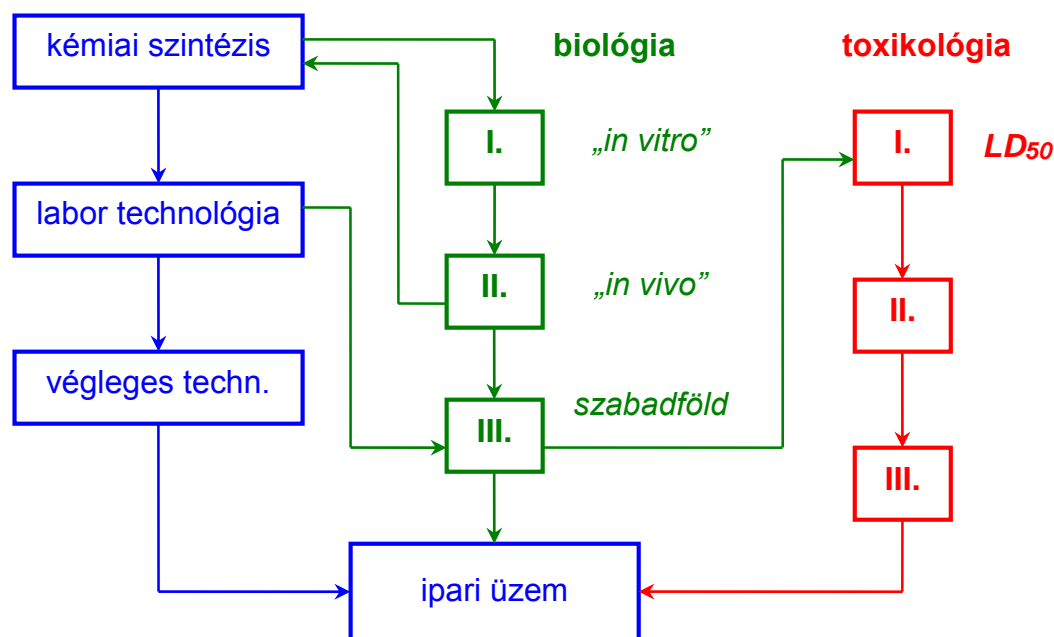
Talán ez az az iparág, amely a legszélsőségesebb indulatokat és vitákat váltja ki. Igen tiszteletreméltó a „zöldek” álláspontja, amikor a bio-termelést népszerűsítik, de az is tény, hogy amíg az emberiség 1/3-a az éhhalál szélén áll, addig nem lehet elvetni azokat a vegyszeres növényvédelemmel folytatott technológiákat, amelyek hozama lényegesen felülmúlja a vegyszermentes eljárásokét. (Persze az is elgondolkoztató, hogy milyen erkölcsi alapon áll az EU, amikor arra ösztönzi a gazdálkodókat, hogy ne termeljenek.)

Talán itt is, mint az élet oly sok más területén, érdemes a józan kompromisszumokat keresni. Kétségtelen, hogy a legtöbb növényvédőszer mérgező; de megfontolt, jól szabályozott és ellenőrzött használatuk elfogadható szintű kockázatot jelent.

Megkülönböztetjük a természetes alapú és a szintetikus növényvédőszereket. Az utóbbiak előállítását általában soklépéses szintézis útján történik. Nagyon gyakran előfordul, hogy az egyes lépések után a köztitermék csak bonyolult tisztítási műveletek után kerülhet felhasználásra.



Az új hatóanyagok kutatásának fázisait a 91. ábra mutatjuk be.



91. ábra. A növényvédőszer hatóanyag kutatás fázisai

Az ilyen kutatások rendkívül költségigényesek. A költségek legnagyobb részét a biológiai és toxikológiai vizsgálatok jelentik. Pozitív biológiai tesztek birtokában már a kutatás viszonylag korai szakaszában szükséges az új potenciális hatóanyagot szabadalmaztatni.

A növényvédőszer hatás szerinti csoportosítását a 18. táblázat, a hatóanyag szerinti áttekintést a 19. táblázat, a növényvédőszer összetételét pedig a 20. táblázat foglaltuk össze.

18. táblázat. A növényvédőszer csoportosítása hatás szerint

Rovarölőszer (inszekticidek)			
atkaölőszer	Akaricid	levéltetvek ellen	aficid
lárvaölőszer	Lárvicid	tojásölő szer	ovicid
fonalféreg irtó	Nematicid	Riasztószer	repellens
csalogató szer	Attraktáns		
Gombaölőszer (fungicidek)			
Gyomirtószer (herbicidek)			
fűfélékre ható	Graminacid	elszárító szer	deszikkáns
lombtalanító szer	Defoliáns	növekedésbénító	regulator
algák elleni szer	Algicid		
Kórokozók elleni szer			
baktériumokat ölő	Baktericid	vírusokat ölő	viricid
rágcsálókat irtó	Rodenticid	puhatestűeket irtó	limacid
sterilizáló szer	kemosterilláns		

A növényvédőszer engedélyeztetésével és használatával kapcsolatos jogi alapokat a növényvédelemről szóló 2000. évi 35. törvény szabályozza. Engedélyezést kizáró okok a teratogén, mutagén, karcinogén, blasztomogén hatás; a táplálékláncban való feldúsulás és az egy termelési ciklust meghaladó stabilitás (a monokultúras gyomirtószer kivételével). Magyarországon minden évben közzéteszik az engedélyezett növényvédőszer listáját ([www.neoland.hu](http://www.neoland.hu)).

**19. táblázat. A növényvédőszer csoportosítása hatóanyag szerint**

Inszezticidok	fungicidok	herbicidok
természetes eredetűek: piretroidok, rotenoidok, kvassziin, alkaloidok	szervetlen vegyületek: Cu, S és vegyületeik	szervetlen vegyületek fenol-származékok
	fémorganikus vegyületek	halogénezett fenolok
	polihalogén-alkánszulfenilek	fenoléterek
	ditioszénsav-származékok	alifás karbonsav-származékok
szervetlen vegyületek	klórozott és nitrált aromások	aromás karbonsav származékok
ásványolaj párlatok	o-fenilén-diaminok	savamidok
fenol-származékok	Karboxamidok	aromás aminok
klórozott szénhidrogének	Karboximidek	szénsav-származékok
szerves foszfor-vegyületek	pirimidin-származékok	karbamidok
karbamát alapú szerek	triazol vegyületek	heterociklusos vegyületek
	formamid-származékok	dipiridilek
	morfolin-származékok	triazin vegyületek
	savamid-származékok	uracilok
	szerves foszfor-vegyületek	szerves foszfor-vegyületek

A növényvédelmi eljárásokhoz a kémiai hatóanyagot megfelelő formába kell alakítani, ez a folyamat a növényvédőszer formálása.

**20. táblázat. A növényvédőszer összetétele**

<p><b>növényvédőszer</b> = <b>aktív hatóanyag</b> + <b>felületaktív anyagok</b>  + <b>hordozóanyag</b> + <b>Oldószer</b> + <b>kísérőanyagok</b></p>	<p>anionos: karboxilátok, szulfonátok, szulfátok, kationos: kvaterner ammóniumsók és foszfóniumsók, nem ionos: polietilén-glikol származékok</p>
	<p>dolomit, kréta, kaolin, CaCO<sub>3</sub>, gipsz</p>
	<p>víz vagy szerves (xilol, toluol, aceton, ciklohexanol)</p>
	<p>habzágátlók, csomósodásgátlók, emulzióképző anyagok, szuszpendálódást- vagy diszpergálódást elősegítő anyagok</p>

A növényvédőszer felhasználási forma szerint lehetnek: porozószer, permetezőszerek, granulátumok, vizes oldatok, emulziók, kol-készítmények, füstölőszer és gázosító szerek.

## A növényvédőszer-ipar szennyvízei

A növényvédőszer gyártása során számtalan termék készül, a keletkező szennyvizek minősége a gyártmánytól függő összetételű. Tartalmazza mind a szintézis alapanyagait, mind az intermediér termékeket, mind a végtermékeket. Üzemleállások, karbantartások idején egyéb anyagok is megjelennek a szennyvízben. A keletkező szennyvizek nagy toxicitása miatt a tisztításnál szinte minden módszer (redukció, oxidáció, koaguláció, hidrolízis; abszorpció, fordított ozmózis, ioncsere) előfordul. A változatos előtisztító egységet általában biológiai fokozat követi, mely lehet aerob vagy anaerob, vagy ezek kombinációja.

## Élelmiszeripar

A magyar mezőgazdaság termékeinek 75-80 %-át a hazai élelmiszeripar dolgozza fel. Az ide tartozó iparágakban – az eddig tárgyaltakkal ellentétben – nem a szerves vegyipari szintézisek útján történő termék-előállítás a jellemző, hanem az alapanyagoknak a nyersanyagokból való kinyerése, fizikai módszerekkel való átalakítása, tartósítása, feldolgozása a domináns.

## Cukorgyártás

A cukoripar hazai nyersanyagbázisa a cukorrépa. A cukorgyártás technológiájának (92. ábra) főbb lépései a cukorrépa mosása, szeletelése, a lényerés, létisztítás, szűrés, bepárlás, kristályosítás, centrifugálás és a cukor szárítása.

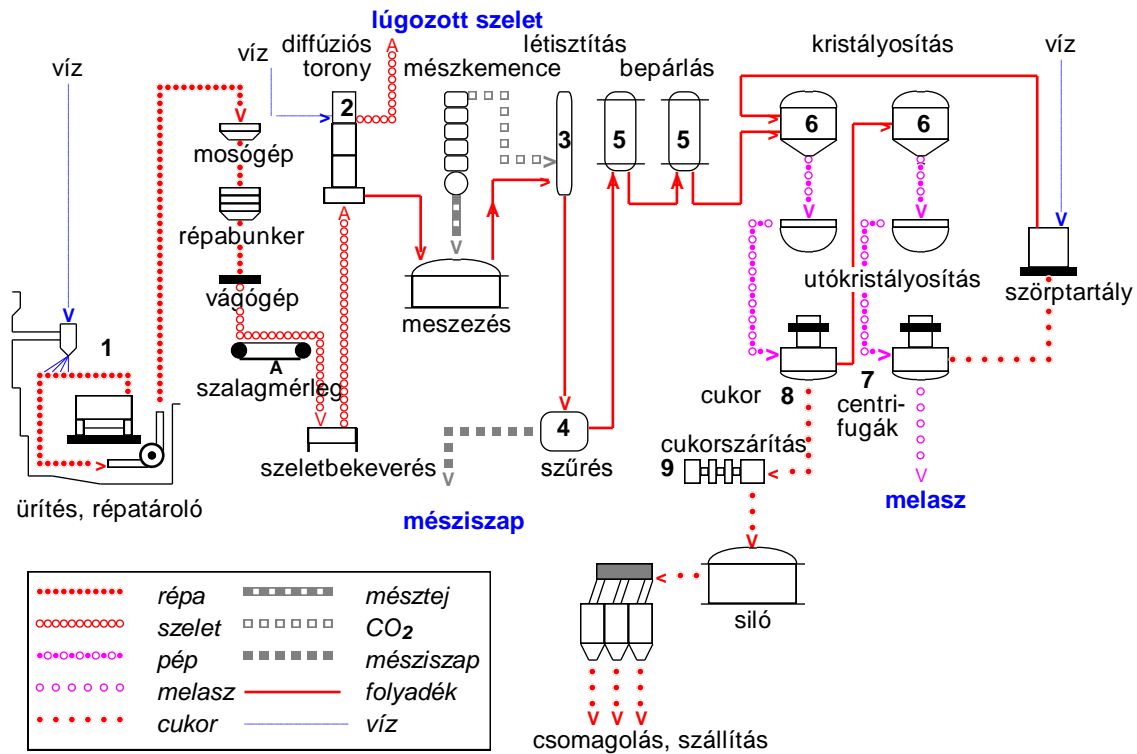
A cukorrépa mosása a répamosógépben történik. A mosott és víztelenített répa a vágógépre kerül. A répát a vágógépeken olyan szeletekre kell vágni, hogy belőlük a cukrot a legrövidebb időn belül, kevés vízzel, minél nagyobb mértékben ki lehessen nyerni. A vágógépek a répát, melynek cukortartalma 16 és 20% között van, szeletekre aprítják. A répában megtermett cukrot a lényerés során forró vízzel oldják ki. (Hőkezelés hatására a sejtfal protoplazma membránja áteresztővé válik, így a sejtben lévő cukor a lényeréshez használt vízbe, a víz a sejtbe hatol. Ez a diffúziós folyamat a koncentráció kiegyenlítődéig tart.) A lényerés zárt rendszerű torony diffúzorokban játszódik le. A cukrot a répaszeletekből ellenáramú forró vízzel (kb. 70 °C-on) oldják ki. Így nyerik a nyerslevet és a kilúgozott répaszeletet.

A nyerslé - sötét színű híg cukoroldat - a répában lévő cukor 98 %-át, valamint egyéb szerves és szervetlen anyagokat tartalmaz.

A létisztítás során a nyerslevet mézstejjel és széndioxiddal kezelik. A kicsapódó pektineket és a kalciumkarbonát csapadékot kiszűrik a léből. A mézstejes kezelést derítésnek, a széndioxidos kezelést pedig szaturációnak nevezik.

A szűrt, tiszta világos színű cukoroldat a híglé, amit bepárolnak, így nyerik a sűrűlét. A sűrűlében lévő cukrot, a még mindig sok nemcukor anyagtól többlépcsős kristályosítással különítik el, és kapják a cukorgyártás végtermékét, a kristálycukrot. A cukorkristályokat az oldat-maradéktól - szörptől - nagyfordulatú centrifugákban

választják szét. A kinyert kristálytisza fehér cukrot légáramban szárítják, hűtik, és silóban tárolják. Szaharóztartalma legalább 99,7%.



92. ábra. A cukorgyártás technológiai folyamata

A cukorgyártás melléktermékei a kilúgozott répaszelet, a mésziszap és a melasz. A diffúziós toronyban kilúgozott szeletet mechanikus préselés és melasz hozzáadása után szárítódobban szárítják, ezután préselik, és premixekkel, vitaminokkal takarmányként értékesítik. A szénsavazás után kiszűrt csapadék a mésziszap, amit szikkasztva talajjavításra lehet felhasználni. Az utolsó kristályosítási fokozat leválasztott szörpje a melasz (sűrűn folyó barna folyadék), ami még mindig kb. 50 % - de már nem kristályosítható - cukrot és sok egyéb hasznos anyagot (pl. aminosavakat) tartalmaz. A melasz a sütőélesztő- és takarmánygyártás, valamint az alkohol-előállítás értékes nyersanyaga.

A technológia vízigénye 10 millió m<sup>3</sup>-re tehető. A vízfelhasználás mintegy 70%-a technológiai, 30%-a hűtési célra használódik fel. A vízfelhasználás három alapvető vízkörre (mosás, diffúzió, bepárlás-kristályosítás) korlátozható. A gyártás hulladékainak zöme a mosóvíz-körben keletkezik. A cukoripar szennyvize reális kialakítás esetén nagymértékben csökkenthető. A szennyvizek döntő többsége (94%) élővízi befogadókba és csak 6%-a kerül újrafelhasználásra. A mechanikailag előkezelte vizek mezőgazdasági hasznosítása javasolható.

## Csokoládégyártás

A csokoládé alapanyaga a kakaóbab, a kakaófa termése (93. ábra). A kakaóbaból szárítás, pörkölés, hántolás, zúzás, őrlés után kakaótészta, kakaóport és kakaóvaját nyernek.

A csokoládé előállításának az a lényege, hogy az alapanyagul vett kakaótésztát, esetleg még kakaóvaját és cukrot vagy a tápláléérték fokozására alkalmas megengedett más anyagot (tejport, tejszint, mogyorót stb.), felületaktív anyagot (csak lecitint alkalmaznak), továbbá fűszert és egyéb járulékos anyagokat egymás között belsőleg eloszlatják.

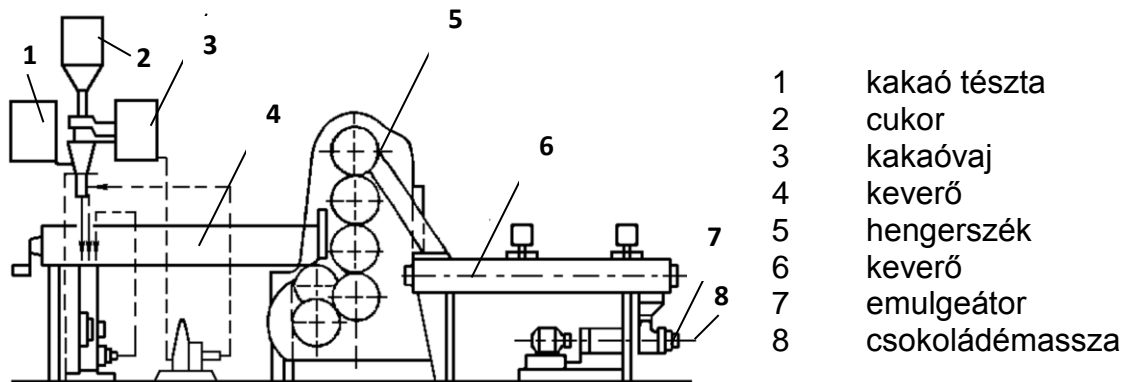


93. ábra. A *Theobroma cacao*, a csokoládé alapanyaga

A csokoládégyártás folyamata 4 fő szakaszból áll:

- nyers- és járulékos- anyagok keverése,
- hengerlés és simítás,
- finomítás, kenőgyúrás vagy érlelés,
- temperálás, formázás, hűtés.

Az első két szakasz végrehajtására folyamatos technológiát (94. ábra) is kidolgoztak.



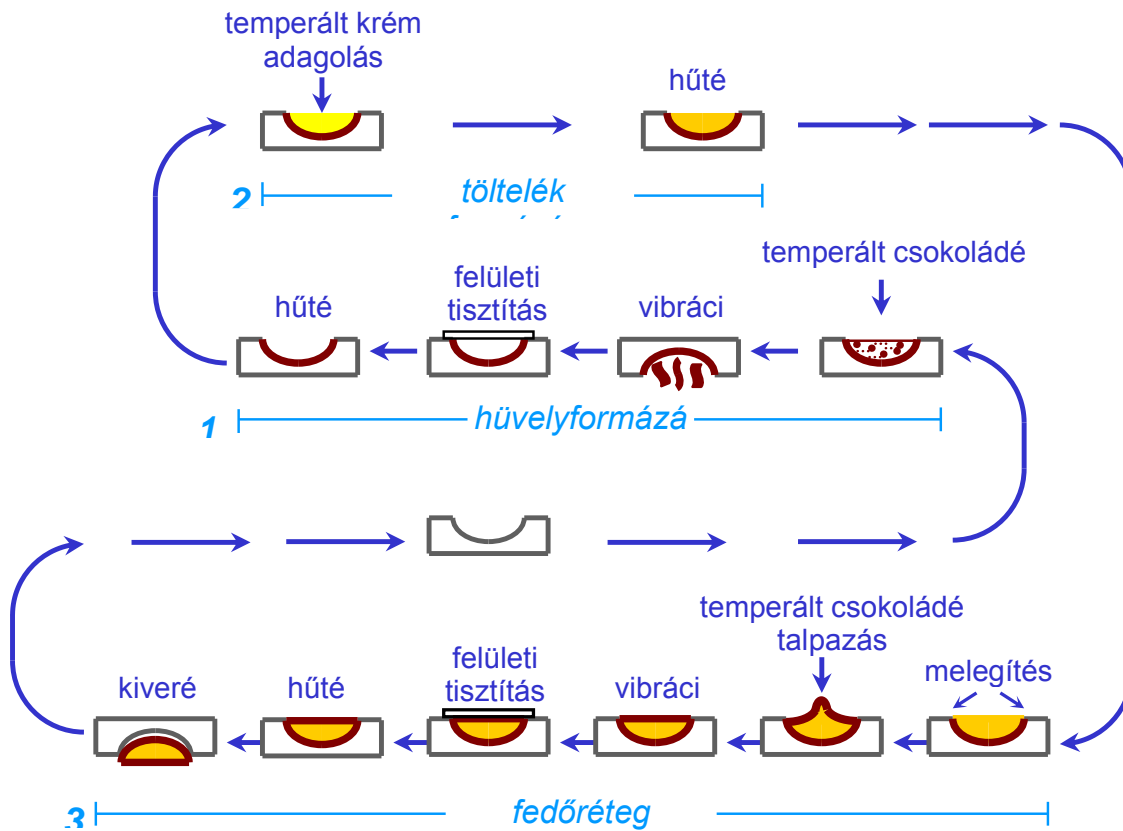
94. ábra. Folytonos üzemű csokoládémassza gyártó

Az olcsóbb csokoládéfajtákat a hengerlés után nagy tömbökbe öntik és néhány napon át meleg térben, olvadt állapotban tárolják: "érlelik". A jobb minőségű csokoládét kenőgyúrásnak (konsolásnak) vetik alá, azaz megfelelő gépekben 60-90 °C-on állandó hullámmozgásban tartják és a készülék falához dörzsölik.

Ezzel az eljárással elsősorban nem az anyag aprítását segítik elő, hanem a levegővel való érintkezés következtében a csokoládé állaga megváltozik; a kellemetlen, illó szaganyagok eltávoznak, és oxidációs folyamatok révén újabb aromakomponensek alakulnak ki, cseranyagok bomlanak le. Végeredményben a kakaó zamata tovább finomodik.

A jó minőségű csokoládék finomítása több napos művelet. A finomító eljárást a csokoládé fűszerezése fejezi be. Ezután a masszát melegen pihentetik, érlelik.

A csokoládé legnagyobb részét táblákban forgalmazzák. A táblákat formábaöntés útján készítik korszerű üzemekben. Az egész műveletsorozatot folytonos üzemű gépsorok végzik. A 95. ábra egy ilyen, töltött táblás csokoládégyártósor sémáját mutatjuk be.



95. ábra. „CAVEMIL” rendszerű csokoládékészítmény gyártósor vázlatja

## Húsipari eljárások

A húsiparban az utóbbi évtizedekben arra törekedtek, hogy termékeik jelentős hányadát feldolgozott állapotban, készítmények formájában forgalmazzák. A termékek előállításánál az ipar igyekszik figyelembe venni a korszerű, egészséges táplálkozás igényeit. Nem közömbös, hogy egy vágóállatnak milyen az egészségi állapota, milyen környezetben tartják, mivel etetik, milyen gyógyszerekkel kezelik, húsát milyen technológiával dolgozzák fel.

### A húsfeldolgozás technológiája

A húsfeldolgozás technológiájának főbb lépései az állatok előkészítése (mosása), elkábítása (elektromos úton vagy széndioxiddal), levágása, elvéreztetése, a vérfeldolgozás, tisztítás, a bőr lefejtése, az állat felbontása, hasítása.

A húsiparban alkalmazott tartósítási eljárásokat a 21. táblázat foglaltuk össze.

## Húskészítmények gyártástechnológiája

A késztermékeket az előállítási technológia szempontjából az alábbiak szerint csoportosíthatjuk:

- vörösáruk (pl: párizsi, virsli, krinolin, szafaládé),
- a felvágottfélék (pl: olasz, soproni, zalai),
- pácolt termékek (pl: parasztonka, húsvéti áruk),
- hőkezelt, pácolt termékek (pl: gépsonka, fóliás sonka),
- nyers, fermentált húskészítmények (pl: nyerskolbász),
- tartós szárazáruk (pl: Pick téliszalámi),
- starterkultúras nyerskolbászok,
- kenősáruk, hurkafélék, sajtok és aszpikos készítmények,

### 21. táblázat. Tartósítási eljárások a húsiparban

<b>Fizikai eljárások:</b>
hőkezelés vagy melegítés,
hőelvonás vagy hűtés-fagyasztás,
nedvességtartalom-csökkentés: szárítás,
fagyasztva szárítás (liofilezés), bepárlás,
besugárzás: ionizálás, ultraibolya sugárzás, ultrahangos kezelés, röntgen
<b>Kémiai eljárások:</b>
sózás,
pácolás,
füstölés,
kémiai tartósító szerek hozzáadása
<b>Biokémiai eljárások:</b>
antibiotikumok alkalmazása

A hagyományos nyerskolbász gyártásának főbb lépéseit a 96. ábra láthatjuk.



96. ábra. A hagyományos kolbász gyártási műveletei

## A húsipari szennyvizek

A húsipar szennyvize az élelmiszeripar egyik legtöbb gondot okozó anyaga. A húsipari üzemek, vágóhidak nagy részben településen belül létesültek, így közcsatorna esetén előtisztításra, más esetekben komplett, teljes körű szennyvíztisztításra van szükség. Az iparág által felhasznált víz 94%-a ivóvíz minőségű. A friss víz 70%-a technológiai felhasználást szolgál. A fajlagos szennyvízkibocsátás mértéke 17-23 m<sup>3</sup>/t élősúlyra vonatkoztatva.

A szennyvizek tisztítását, mechanikai tisztítóberendezések, kémiai és biológiai tisztítóegységek végzik. A kétlépcsős anaerob-aerob, illetve műanyag csepegtetőtest-eleveniszapos rendszerek számos kombinációja ismert, mely kombinációk célja a nagyhatékonyságú tisztítás mellett az energiatakarékosság. A szennyvíztisztító rendszer egyik gyakran alkalmazott eleme a flotáló medence, mely a szennyvízben lévő emulgeált zsír eltávolítását végzi.

A húsüzemek egyik fő törekvése a hulladékanyagok minél jobb hasznosítása. Jó példa erre a vérliszt előállítás. Az állati fehérje feldolgozó üzemek a vágóhidak hulladékanyagát, valamint az egyéb begyűjtött fehérje alapanyagot dolgozzák fel táppá.

## A zöldség- és gyümölcsfeldolgozás technológiai

A gyümölcsök és a zöldségek jelentős helyet foglalnak el az emberi táplálkozásban. Értékes anyagaik, kedvező étrendi hatásuk indokolja állandó, rendszeres fogyasztásukat. A növényi nyersanyagok, így a gyümölcs- és zöldségfélék is, friss állapotban csak az év egy bizonyos részében állnak rendelkezésre. Az egész évben történő egyenletes fogyasztást biztosítják a különböző tartósítási eljárások. A tartósítás segítségével megőrizhetők a nyersanyagok értékes anyagai, növelhető a fogyasztás időtartama, lehetővé válik a termékek tárolása, szállítása, értékesítése. Ezen túlmenően új, fogyasztásra nagyobb mértékben előkészített, magasabb feldolgozottságú élelmiszerek termelését vagy fogyasztásra közvetlenül alkalmas ételek előállítását is jelenti. A rendelkezésre álló tartósítási eljárások között az ősidők óta alkalmazottak (szárítás, sózás, savanyítás, erjesztés) mellett a legújabb módszerek (pl. ionozáló sugárzás) is megtalálhatók.

A zöldséget és gyümölcsöt feldolgozó konzervipar technológiai műveleteit a 22. táblázat foglaltuk össze.

22. táblázat. A zöldség- és gyümölcs tartósítóipar technológiai műveletei

Előkészítő műveletek	Tartósítási műveletek	Befejező technológiai műveletek
válogatás	tartósítás fizikai módszerekkel	töltés
osztályozás	<i>tartósítás hőkezeléssel</i>	légtelenítés és zárás
mosás	<i>aszéptikus technológia</i>	késztermék csomagolás
hámozás	<i>tartósítás hőelvonással</i>	
száreltávolítás	<i>tartósítás vízelvonással</i>	
mageltávolítás	<i>sugárzásos tartósítás</i>	
szűrkálás	tartósítás kémiai módszerekkel	



Előkészítő műveletek	Tartósítási műveletek	Befejező technológiai műveletek
apritás	biológiai tartósítás	
előfőzés	<i>tejsavas erjesztés</i>	
húztatás		
állományjavítás		
színrögzítés		
felöntölé készítés		
lényerési eljárások		

## Tejfeldolgozás, sajtgyártás

A tejipar termékeiről a 97. ábra láthatunk átfogó összeállítást. Ezúttal részletesebben a sajtgyártással foglalkozunk.

A sajt a tejnek, tejszínnek vagy ezek keverékének savanyítással vagy oltóanyag hozzáadásával nyert alvadékából savó elvonása útján előállított fehérjedús termék, amely frissen vagy rövidebb-hosszabb érlelés után fogyasztható. (E meghatározás szerint sajtnak tekinthetjük a túróféleségeket is.)

A sajt olyan átmeneti (komplex) diszperz rendszer (gél), amelyben a diszperziós közeg szerepét a víz, a diszperz rész szerepét pedig a fonalszerűen kapcsolódó parakazein, illetve bomlástermékei és a diszperziós közegben oldott anyagok (ásványi sók, laktátok, és egyéb szerves anyagok) töltik be.

A sajt készítés, a tej feldolgozásának legősibb módja, sokezer éves mesterség. A monda szerint a sajt készítés mestersége úgy jutott el az emberekhez, hogy Apollón és Küréné nimfa fiát, Arisztaioszt, a mirtusznimfák - Hermész gyermekei - megtanították, hogyan kell a tejet megalvasztani, sajtá érlelni,

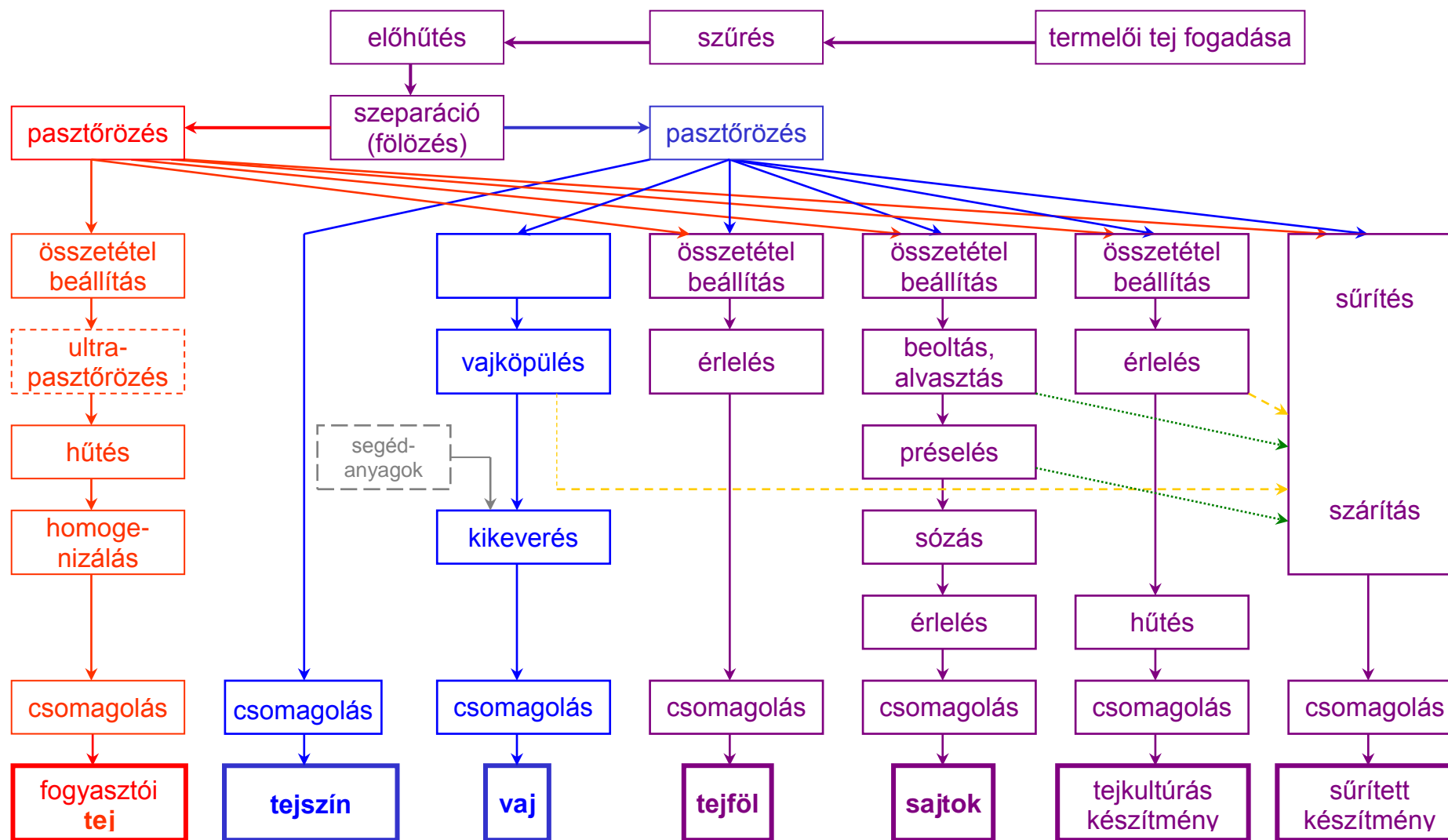
A sajtokat csoportosíthatjuk állományuk, zsírtartalmuk és szerkezetük szerint. Megkülönböztethetünk:

- kemény sajtokat (pl: parmezán, Pannónia és más ementálifélék, cheddar),
- félkemény sajtokat (pl: trappista, óvári, edami),
- lágy sajtokat (pl: Göcseji Csemege, csemege romadur, Lajta, Vadász, pálpusztai),
- friss sajtokat (pl: krémsajtok, túró, gomolyasajtok),
- nemes penésszel érőket (roafort, camembert) és
- ömlesztett sajtokat (pl: Medve sajt).

Lehetnek a sajtok:

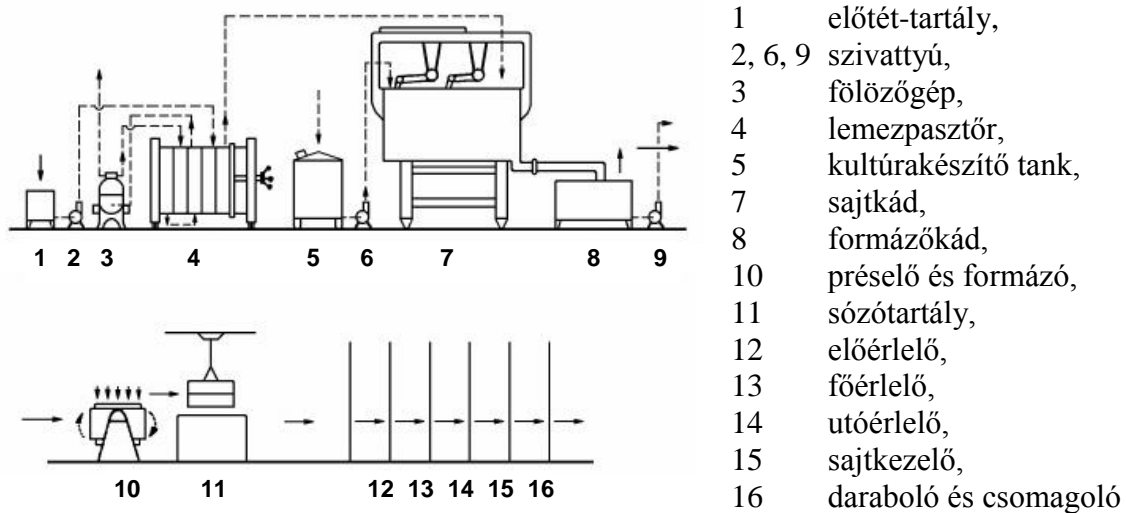
- nagy zsírtartalmúak (legalább 60%, pl: cheddar),
  - zsírosak (legalább 40%, pl: trappista),
  - félzsírosak (legalább 20%, pl: óvári), és
  - soványak (20% alatti - szárazanyagra vonatkoztatott – zsírtartalommal, pl: tolnai).
- Szerkezetük alapján pedig:
- szabályos, kerek lyukas sajtok (pl. ementáli, edami, trappista),
  - szabálytalan lyukazottságúak (pl. Óvári, Lajta, Göcseji Csemege),
  - lyukak nélküli, zárt tésztájú sajtok (pl. parmezán) és
  - nemes penésszel erezett vagy nemespenész-bevonatú sajtok (pl. márványsajt). A sajtok fontosabb alaparoma- és zamatanyagai szervesetlen nitrogénvegyületek (pl: ammónia), alkoholok (etilalkohol, n-propilalkohol, n-butilalkohol, izo-butilalkohol, glicerín), aldehidek (formaldehid, acetaldehid, propionaldehid, butiraldehid), ketonok (aceton, diacetil), savak (hangyasav, ecetsav, propionsav, vajsav, kapronsav, tejsav, prolin, metionin) és észterek (etilacetát, etilbutirát).

A sajtgyártás fontosabb műveletei a tej kiválasztása, tisztítása, a zsírtartalom beállítása, pasztőrözés, a kádtéj előkészítése, érlelése, a szintenyészet előkészítése, a tej alvasztása, az elősajtolás, a felvágás, az utómelegítés, utósajtolás, az alvadék mosása, formázása, réselése, sózása, hagyományos érlelése, csomagolása, tárolása.



97. ábra. A tejipar főbb termékei

Az ementáli sajt gyártásának technológiai sémáját a 98. ábra láthatjuk.



98. ábra. Az ementáli sajt gyártásának technológiája

## A tejfeldolgozás szennyvizei és tisztítása

A tejipar vízszennyezése: részben alapanyagból, részben a feldolgozás segédanyagaiból ered (biológiailag bontható szennyezés, sóterhelés).

A tej feldolgozás szennyvizei hígított tejnek, vagy tejtermékeknek tekinthetők, melyek kisebb mennyiségben felületaktív tisztító- és fertőtlenítőszerket, vízkezeléshez használt vegyszereket is tartalmaznak.

A technológiai vizeken túl az üzemek szennyvizébe kerülnek a szállítóeszközök mosó-, öblítővizei, esetenként a gyakorlatilag tiszta hűtővizek, sőt esetleg az üzem szociális szennyvize is.

## A savó felhasználása

A sajtok előállításánál keletkező savó a tejfeldolgozás legjelentősebb környezetszennyező hulladéka. Bár számos termék előállításának fontos alapanyaga, sőt közvetlen szárítása, porítása is gyakorlat, újrafelhasználásánál gondot jelent a viszonylag nagy sótartalma (12 g/liter).

Olcsó a tejsír szeparálása és a fehérjerész eltávolítása a savóból ultraszűréssel. A kinyerhető fehérje a sajtgyártásban hasznosítható.

A juhtejből készült sajt vagy túró gyártásakor jelentős mennyiségű – a tej 80-85 %-a – savó keletkezik. Igen értékes; 6,5 % szárazanyag tartalma 0,5-1,4 % zsírt, 1-1,5 % fehérjét, és ásványi sókat tartalmaz.

A savóban melegítés és tejsav/ecetsav hozzáadása után ismételt fehérjekiválás indul meg. Ez a zsendice, amit leszűrve kapjuk az ordát (ordavaj, ordasajt, ordakolbász). Az ordakészítés után visszamaradt sajt savó a kvasz és a kiszel nevű ital alapanyaga.

## A HACCP rendszer

A HACCP (Hazard Analysis Critical Control Points) rendszer nemzetközileg elfogadott, szisztematikus módszer az élelmiszerek biztonságának megteremtésére a lehetséges kockázatok, veszélyek megállapítása, értékelése és kezelése révén. A rendszer lényege az élelmiszer-biztonsági veszélyt okozó tényezők fellépésének megelőzése a gyártás folyamatában kijelölt kritikus pontokon történő kiemelt szabályozás útján.

A HACCP rendszernek igen lényeges jellegzetessége, hogy adott termékre, termékcsoporthoz, technológiára, az adott körülmények között kell a veszélyelemzést elvégezni és a rendszert kidolgozni. Ezért nem lehetséges egy általános, minden hasonló tevékenységet végző szervezetre alkalmazható rendszer dokumentáció kidolgozása, hanem minden esetben az egyedi adottságok, feltételek részletes vizsgálata szükséges (23. táblázat).

A HACCP alkalmazása az Európai Unió országaiban 1995. december 14. óta kötelező (93/43 EK direktíva). A magyar élelmiszer gyártók részére, valamint a vendéglátásban és a közétkeztetésben 2002. január 1.-től kötelező a HACCP rendszer alkalmazása.

### 23. táblázat. Egy HACCP rendszer kidolgozásának főbb lépései

<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>Projektindító</b> HACCP team kialakítása; a munkacsoport képzése; HACCP ismertető</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>HACCP termékek leírása</b> terméklista - termékek csoportosítása; segéd és/vagy adalékanyag lista - anyagok csoportosítása; csomagolóanyag lista - csomagolók csoportosítása; termék leírások, specifikációk elkészítése; termék alkotói és komponensei</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>HACCP technológiák folyamatábrái</b> termelés folyamatábráinak elkészítése termék csoportonként; termelés folyamatábráinak elkészítése termékenként; segéd és/vagy adalékanyagok érkeztetésének folyamatábrája; csomagolóanyagok érkeztetésének folyamatábrája</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>1. számú ellenőrzés</b> termelés folyamatábráinak ellenőrzése; segéd és/vagy adalékanyag érkeztetés folyamatábráinak ellenőrzése; csomagolóanyagok érkeztetésének folyamatábrájának ellenőrzése</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>HACCP technológiák veszélyelemzése, megelőző intézkedései</b> termelés technológiai, műveleti lépéseinek az elkészített folyamatára szerinti veszélyelemzése; segéd és/vagy adalékanyagok érkeztetésére elkészített folyamatára szerint a műveleti lépéseknél felmerülő veszélyek elemzése; csomagolóanyagok érkeztetésére elkészített folyamatára szerint a műveleti lépéseknél felmerülő veszélyek elemzése; veszélyek megelőzésére irányuló műveleti utasítások; veszélyek megelőzésére irányuló szabványosított intézkedések (angolul SOP)</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>HACCP kritikus szabályozási pontok (kszp) meghatározása</b> termelés technológiai, műveleti lépéseikhez tartozó veszélyek közül a kritikus szabályozási pontok meghatározása; segéd és/vagy adalékanyagok érkeztetésére elkészített folyamatára szerint a műveleti lépéseknél felmerülő veszélyek közül a kritikus szabályozási pontok meghatározása; csomagolóanyagok érkeztetésére elkészített folyamatára szerint a műveleti lépéseknél felmerülő veszélyek közül a kritikus szabályozási pontok meghatározása</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>2. számú ellenőrzés</b> veszélyelemzés ellenőrzése; kritikus szabályozási pontok ellenőrzése</li></ul>

<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>HACCP - kritikus limitek, előírt felügyelet</b> termelés technológiai, műveleti lépéseikhez tartozó kszp-hoz meghatározható <u>kritikus határértékek</u>, <u>előírt felügyelet</u> (felelős, eljárás, tevékenység, gyakoriság, dokumentálás) elkészítése; segéd és/vagy adalékanyagok érkeztetésére jellemző műveleti lépéseknél felmerülő kszp-hoz tartozó krit hat, el fel (f, e, t, gy, d) meghatározása; csomagolóanyagok érkeztetésére jellemző műveleti lépéseknél felmerülő kszp-hoz tartozó krit hat, el fel (f, e, t, gy, d) meghatározása</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>HACCP terv: javító eljárások, dokumentációk, igazoló eljárások</b> termelés technológiai, műveleti lépéseikhez tartozó kszp-hoz meghatározható <u>javító eljárások</u>, <u>dokumentációk</u>, <u>igazoló eljárások</u> (felelős, eljárás, tevékenység, gyakoriság); segéd és/vagy adalékanyagok érkeztetésére jellemző műveleti lépéseknél felmerülő kszp-hoz tartozó jav elj, dok, ig el (f, e, t, gy); csomagolóanyagok érkeztetésére jellemző műveleti lépéseknél felmerülő kszp-hoz tartozó jav elj, dok, ig el (f, e, t, gy).</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>3. számú ellenőrzés</b> HACCP terv helyszíni véglegesítése, üzembe helyezése; dokumentációk, csekk listák, ellenőrző lapok üzembe helyezése; az eddig elkészített dokumentációk lektorálása</li></ul>
<b>Élelmiszerbiztonsági oktatás</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>HACCP audit</b> HACCP dokumentáció ellenőrzése; belső felülvizsgálati jegyzőkönyv.</li></ul>

## Ipari technológiák és szennyezéseik

Tungler Antal, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Tőrös Szilárd, Pannon Egyetem  
Réti Tamás, Chem-Bridge Kft.

### A technológia fogalma és tárgya

#### Az ipari technológia fogalmának eredete és tartalma

A technológia fogalmát nehéz röviden és egyértelműen definiálni. A kifejezés a technika<sup>1</sup> és a logos<sup>2</sup> görög (τεχνολογια) szavak összevonásából származik.

A tágabb értelmű technológia fogalma az anyagi javak előállításával foglalkozó szakemberek számára: eszközök, módszerek, eljárások szerves összessége, amelyek segítségével tudatos átalakítások révén nyers-,<sup>3</sup> és alapanyagokból<sup>4</sup> (segédanyagokból) energiaráfordítással, tényleges szükségletek kielégítésére alkalmas ipari termék vagy energia állítható elő.

#### Know-how

A technológia, arra vonatkozó gyakorlati tudás, hogy mit, hogyan kell elkészíteni, elvégezni. Ez termékekben, valamint eljárási hardverek és szoftverek formájában ölt testet. A technológiának, mint ismeret- vagy tudásbázisnak legfontosabb része a know-how („tudni azt, hogyan”), amely azoknak az ismereteknek, gyártási eljárásoknak pontos, reprodukcióra képes leírása, amelyek valamilyen műszaki problémának korszerű megoldását adják. Ezáltal jelentős anyagi értéket képviselnek és áruként adhatók-vehetők.

A know-how, innovációk eredményeként létrejött szellemi, nem megfogható (intangibilis) vagyon, vagyoni értékű jog, amely az alkalmazó vállalatok egyik legfontosabb erőforrása. Védelméhez mindenkor komoly érdeke fűződik a jogtulajdonosnak. Innen a technológiai ismeretek, információk bizalmas, védett jellege, szemben az általános, már közismertnek vagy általánosnak (generikus) számító, egyéb műszaki közismeretekkel.

#### High-tech

Technológiai értelemben a legkorszerűbb tudományos és műszaki elveket és megoldásokat alkalmazó gyártási eljárás. Ezen ismereteknek különösen nagy a jelentősége a korszerű környezetkímélő eljárások és technológiák megvalósításában.

---

<sup>1</sup>technika: tágabb értelemben: bármely emberi tevékenységhez tartozó eszközök, eljárások, műfogások összessége, szűkebb értelemben: a termelőmunka eszközeinek és módszereinek összessége.

<sup>2</sup> logos: gondolat, ész, tudomány.

<sup>3</sup> nyersanyagok: a természetben előforduló és termelés céljára hasznosítható természeti erőforrások

<sup>4</sup> alapanyagok: gyártási eljárások kiindulási anyagai, amelyek lehetnek más folyamatok végtermékei.

A szakirodalom a technológiákat sokféleképpen osztályozza. A leggyakrabban alkalmazott besorolások: szakmai tartalom, és/vagy a termék lényegéhez való kapcsolódásuk szorossága szerint tesz különbséget a technológiák között.

A megvalósítás során az átalakítás és/vagy a gyártott termék jellege egyúttal a technológia csoportosítására is utal. Például, ha technológiában dominál a kémiai átalakítás, akkor vegyipari vagy kémiai technológia, ha pl. a termék élelmiszer, akkor élelmiszeripari technológia, ha elektromos áram, akkor a villamosenergia-ipari technológia a fogalom.

## A technológia, mint tudomány

A technológia az alkalmazott interdiszciplináris tudományok közé sorolandó. Hagyományos értelmezés szerint az ipari technológia abban különbözik a természettudománytól, hogy az ipari termelésben piacképes terméket, környezetkímélő módon kell előállítani. A piaci termék gyártásánál a költség és a minőség a két legfontosabb vezérlő tényező, ellentétben az alapkutatás orientáltságú természettudományokkal, amelyeknél a tudományos eredmény az elsődleges cél.

[Az alapkutatások költségeit a jól működő társadalom előbb megelőlegezi, majd azok alkalmazása után a megvalósítás hasznát rövidebb hosszabb időelteltével lefölözi].

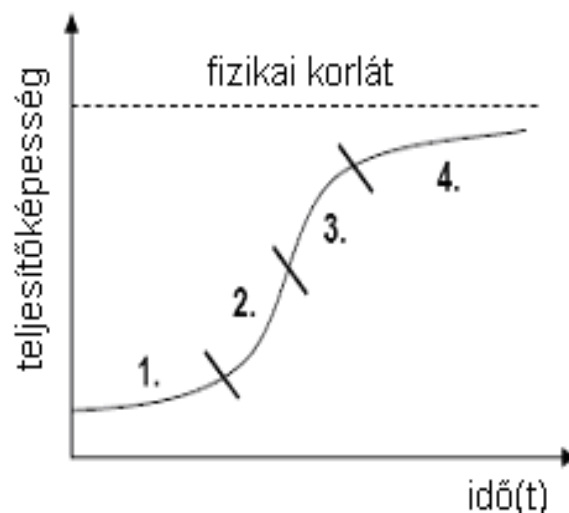
A modern felfogás szerint nem kell elhatárolni a két tudományágat, mivel az utóbbi években az alkalmazott természettudományok és a modern technológia (high-tech) számos területen hihetetlenül gyorsan és majdnem teljesen összefonódva fejlődnek.

## A technológia alaptörvényei

### A technológiai életciklus törvénye

Miként minden terméknek, úgy minden technológiai eljárásnak is megvan a maga jellegzetes életciklusa. A technológiai „életciklus S-görbe”, négy jellegzetes szakaszra bontható

1. szakasz: a teljesítőképesség lassan növekszik, mert a fejlesztők járatlan úton járnak.
2. szakasz: a teljesítőképesség gyorsan javul, mert már „kritikus tömegű” tudás gyűlt össze.
3. szakasz: a technológiai fejlődésnek lassulásával a gyorsaságnál fontosabbá válnak a költségek.
4. szakasz: egyre kevesebb lehetőség nyílik radikálisan új termék kifejlesztésére, mert a technológia megközelíti a teljesítőképességének fizikai korlátait.



### 99. ábra A technológiai életciklus törvénye



A technológiai életciklus különböző szakaszai szoros okozati összefüggésben állnak a következő törvényekkel.

### **A költségparaméter és csökkenésének törvénye**

Az ipari technológiáknak a gyakorlati tapasztalatok által bizonyított fejlődési törvényszerűsége, hogy az életciklus során a technológiai eljárások fejlesztésének és fejlődésének eredményeként a termelés önköltsége tendenciaszerűen csökken, úgy hogy tartósan egy minimumhoz közeledik. Függvény formában kifejezve:

*177. képlet.*

$$Y = a + be^{c\tau}$$

ahol:

**Y** = átlagár az idő [év] függvényében; **a** = Y értéke az aszimptotikus minimumnál;

**$\tau$**  = az idő [év]; **b** = pozitív konstans; **c** = negatív konstans; **e** = természetes alapú logaritmus alapja

Minden technológiai eljárásnak megvan egy előállítási költség minimuma és egy elviselhető költségmaximuma. Ezt a maximumot a termék mindenkor irányadó világpiaci ára határozza meg. Normális körülmények között, nem tekinthető alkalmazhatónak az olyan ipari eljárás, amely bár műszaki és környezeti szempontból kifogástalan terméket ad, de az előállítás összköltsége tartósan az eladási ár felett van. [Rendkívüli körülmények átmenetileg felülírhatják ezt a szabályt.]

### **A léptékhatás törvénye**

Minden technológiai eljárás az első kísérlettől a megvalósításig, egy fejlődési pályát fut be. A kívánt mennyiségű és minőségű termék előállítását teljesíteni képes üzemi eljáráshoz csak többlépcsős, tudatos fejlesztő munka eredményeként lehet eljutni.

Ennek fő állomásai (un. kulcs lépcsők): laboratóriumi kísérlet  $\Rightarrow$  kísérleti üzem  $\Rightarrow$  próbaüzem  $\Rightarrow$  nagyüzem.

A technológiai berendezések fizikai méreteinek változtatása (növelése/csökkentése), bizonyos határon túl, jelentős minőségi változásokkal jár. Ennek közérthető oka, hogy a térfogat a harmadik hatvány szerint, míg a felület a második hatvány szerint változik.

### **Az optimális gyártási méret**

Az optimális méret vagy (gyártási kapacitás) az a méret, amely a fennálló műszaki gazdasági körülmények között leggazdaságosabban képes a terméket tartósan előállítani.

### **Méretnövelési (Scale up) faktor**

A léptékhatás vagy méretváltoztatási tényező (scale up factor) jellemző érvényesülési területe, a technológiai méretnövelés következtében bekövetkező fajlagos beruházási költségváltozás.

Az összefüggés egyszerűsített formája:

### 178. képlet.

$$\frac{B_2}{B_1} = \left( \frac{K_2}{K_1} \right)^x$$

ahol:

$B_1$  és  $B_2$ : a kisebb, illetve a nagyobb üzem beruházási költsége,

$K_1$  és  $K_2$ : a kisebb, illetve a nagyobb üzem kapacitása azonos mértékegységben  
(Kt/év; t/d, stb.)

x: tapasztalati együttható, értéke 0,6-0,9 között változik

## Az ipari termelőegységek felépítése

Minden ipari üzem olyan rendszer, amely négyféle alapvető elemtípusból építhető fel. Az elemtípusok is funkciójuk és alkalmazásuk szerint két főcsoportba rendszerezhetők:

I. A technológiai folyamatokban felhasználásra kerülő anyagok fizikai és kémiai átalakítását végző termelő vagy műveleti egységek:

Allaktorok: a fizikai átalakításokat végző készülékek. (talajmarók, jövesztők, aprítógépek, szárítók, bepárlók, hűtők, desztillálók, mechanikai megmunkálásra szolgáló gépcsaládok)

Reaktorok: a kémiai átalakításokat végző készülékek. (kohók, kémiai reaktorok, elektrolizáló kádak, hulladékégetők, kazánok... stb.)

II. A technológiai folyamatokban a gyártás logisztikai kiszolgálását végző eszközök és berendezések:

Szállítóeszközök: pályához kötött és pályához nem kötött anyag és energiamozgató berendezések (csőhálózatok, járművek, konvektorok, szállítószalagok, kompresszorok, ventilátorok, szivattyúk... stb.)

Tároló berendezések: a kiindulási, félkész- és végtermékek tárolására szolgáló eszközök. (tartálparkok, raktárak és berendezéseik, lerakók, hányók... stb.)

## A termelést kiszolgáló infrastrukturális alapszolgáltatások

A négy legfontosabb alapszolgáltatás:

- víz (ivó-, technológiai- és hűtővíz),
- levegő (műszer és kompresszor),
- energiaszolgáltatás (gőz, villamos áram, földgáz fűtőolaj),
- informatikai infrastruktúra.

## A folyamatábrák

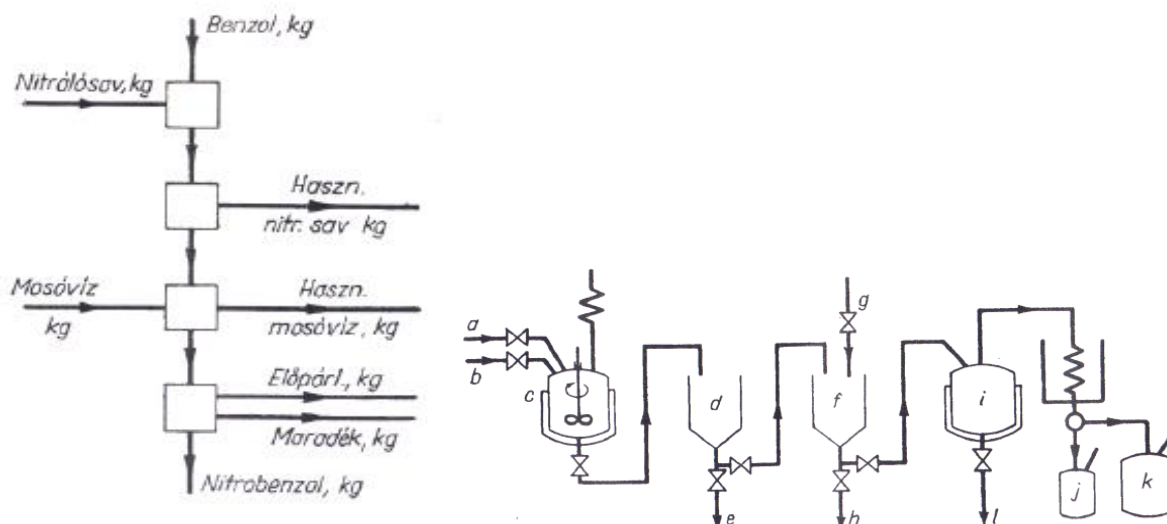
Az alapanyagtól a végtermékig tartó gyártás/termelés folyamatát egyezményes, szabványosított jelképekkel és jelölésekkel lehet szimbolizálni. A technológiai folyamatok ezen rajzos formáját folyamatábrának nevezik. A folyamatábrák az adott

gyártási eljárásban szereplő műveletek és folyamatok egymásutánját, egymáshoz való kapcsolódását szemléltetik.

A műszaki gyakorlat megkülönbözteti az elvi-, és a technológiai folyamatábrázolást. A folyamatokra lehet: vázlatos (az eljárásnak csak a jellemző mozzanatait szimbolizálja) és részletes (technológiai folyamatábra).

### Az elvi folyamatábra (vázlat)

Az elvi folyamatábrán az egyes műveletek sematikus (black box) (100. ábra), vagy egyezményes jelekkel kerülnek ábrázolásra, tekintet nélkül a technológiai folyamatban alkalmazott eszközök és berendezések típusára, alakjára, nagyságára, számára. Kiegészítő információként feltüntetésre kerül(het) a műveletek megnevezése, valamint az anyag és energia input-output lista. Ezen elvi vázlatok a legszükszavúbb, csak a technológiai folyamat alapszintű megértéséhez szükséges minimális közlést tartalmazzák. A folyamatok az elvi folyamatábrán balról jobbra felépítve kerülnek ábrázolásra. Az átalakulásban, feldolgozásban lévő anyag útját, az egységeket összekötő vastag vonalak reprezentálják. Az áramlás irányát a vonalakra rajzolt nyilak jelzik.



100. ábra Folyamatábra példák

### A részletes technológiai folyamatábra

Tartalmazza az alkalmazott gépeket és készülékeket, - szofisztikáltabb formában - akár lépték és színhelyesen. Feltüntetésre kerül a műveleti egységek egymáshoz való kapcsolódási rendszere, az egységekbe be és kilépő valamennyi anyag, valamint a legfontosabb műszaki és mennyiségi adatok.

A folyamatábra tartalmazza a főfolyamatot, továbbá az érthetőséghez szükséges mellékfolyamat(ok) kapcsolását. Párhuzamos berendezések a példányszám jelölésével, de csak egyszeresen kerülnek feltüntetésre.

A technológiai folyamatábra információt tartalmaz:

- \* kvantitatívan, az alapanyagok, közbenső termékek, segédanyagok minőségéről és mennyiségéről, azaz a technológiai folyamat teljes anyagforgalmáról,

- \* továbbá az alapanyagok, közbelső termékek, segédanyagok fizikai és termodinamikai állapotáról, amely egyben magában foglalja a technológiai folyamat energiaforgalmát,
- \* az egyes műveleti folyamatok, fázisok sorrendjéről, továbbá a fő és mellékfolyamatok kapcsolatáról,
- \* az alkalmazott gépek és készülékek típusáról, számáról, fontosabb műszaki paramétereiről.

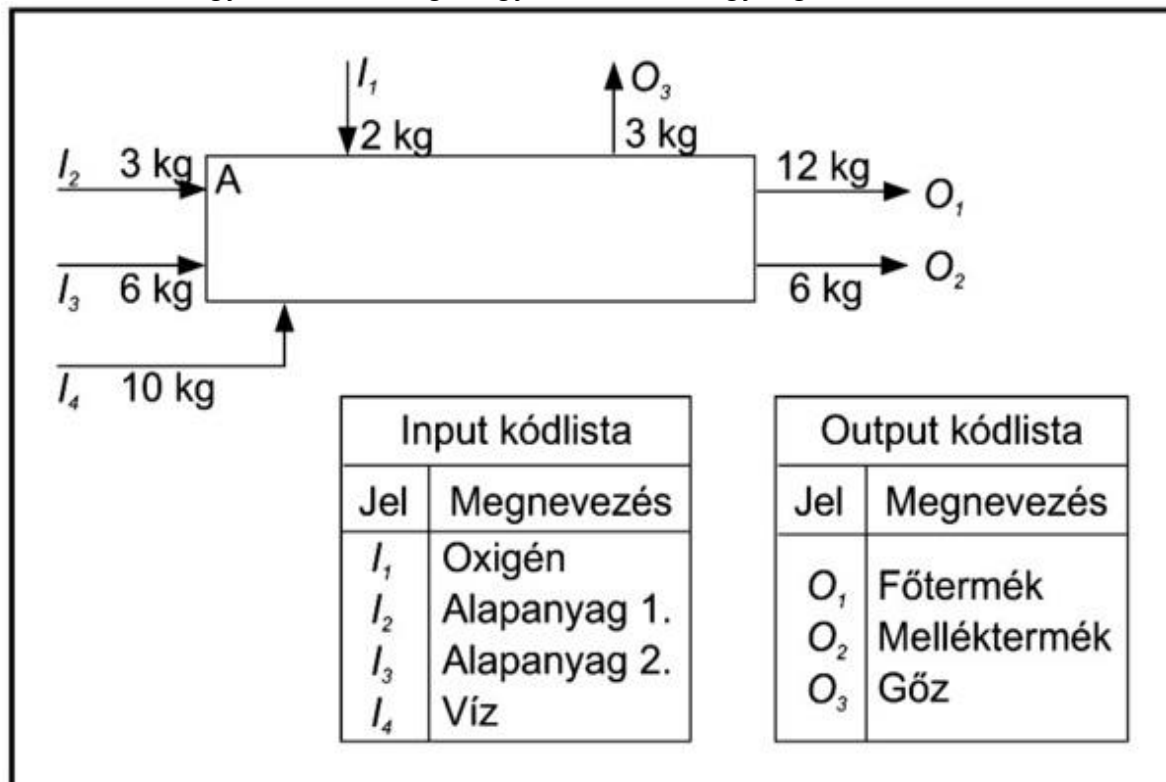
A technológiai folyamatára a legszorosabb kapcsolatban van a folyamatok anyag-, és energiaforgalmával, ezért az egyes eljárásokra jellemzően specifikus ismereteket hordoz.

### A technológiai mérlegek

Az anyag- és energiamérlegek mind a termelés hatékonysága, mind a környezetbe kibocsátott káros anyagok számbavétele szempontjából kiemelkedő fontosságúak. A technológiai folyamatábrák által jól reprezentálható a gyártási folyamat egyes, elkülönülő egységeihez tartozó input-output anyag-, energia-, mennyiségek vagy (folytonos üzemű egységeknél) áramok.

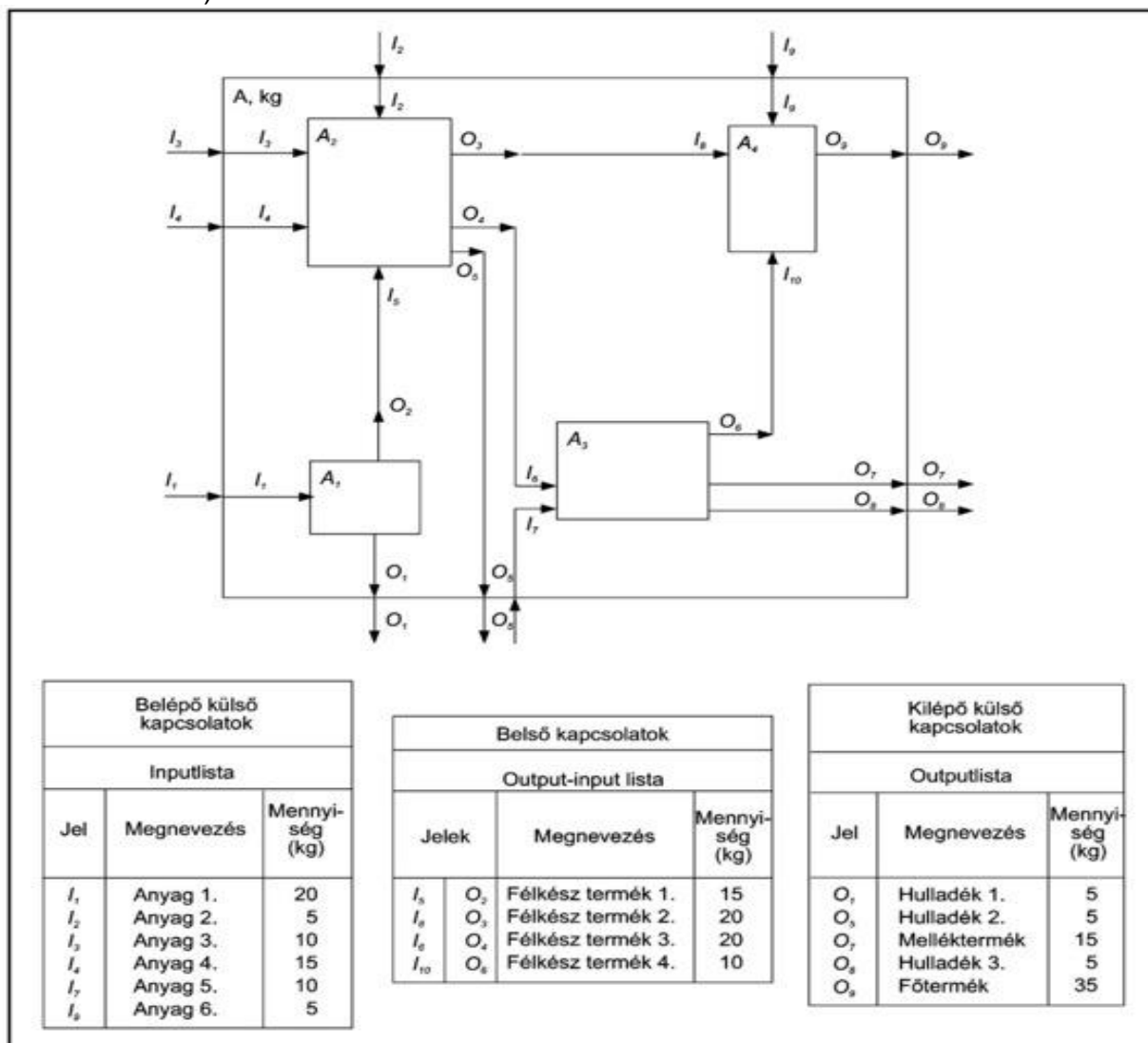
A tömeg és energia (hő) megmaradási tételek érvényessége alapján a be-, és kilépő anyag-, energia mennyiségek (áramok) mérlegszerű összevetése fontos mérnöki információk levonására ad lehetőséget. A vizsgálat tárgyát képező technológiára több szempont szerint készíthetünk tömeg és/vagy energia mérlegeket. Az anyagmérleg egy lehetséges formája az anyagforgalmi diagramok matematikai modellje: az Input-output Mátrix. Az érvényességi kör alapján elkészíthető:

- \* a gyártó technológia egy kiválasztott egysége:



101. ábra Technológiai mérleg I.

- \* a gyártó technológia több kiválasztott egységére (akár a teljes folyamatra is)

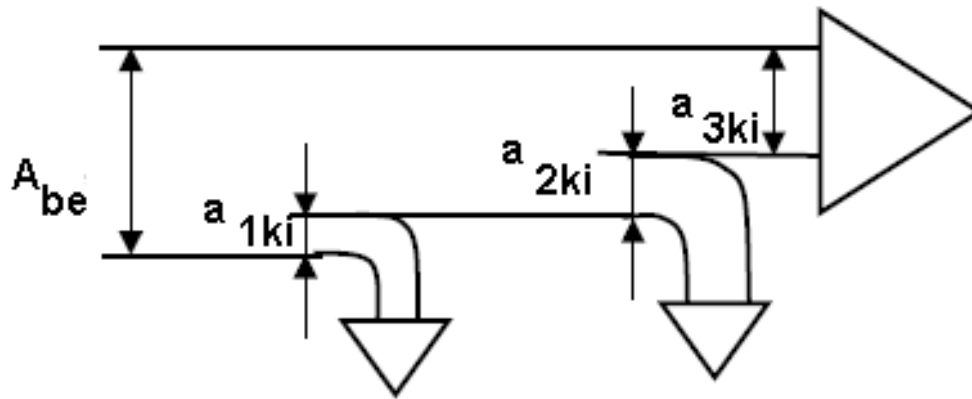


102. ábra Technológiai mérleg II.

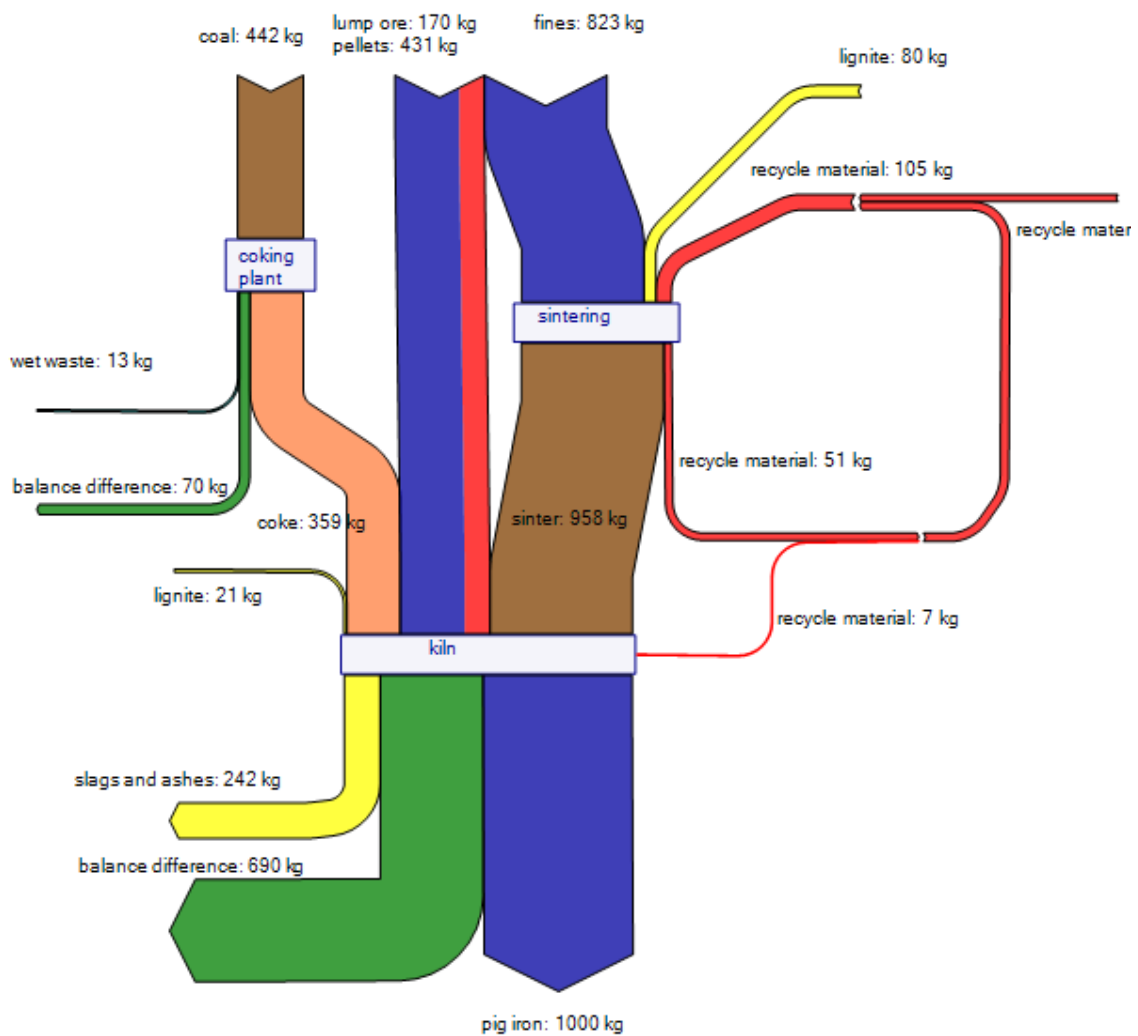
A mérlegek megjelenítésének szempontjából három jellegzetes főtípust különböztetünk meg:

- \* táblázatos forma
- \* táblázat és folyamatábra kombinációja (101. ábra, 102. ábra)
- \* Sankey-diagram (103. ábra)

Léteznek speciális megjelenítési formák az anyag-, és energiaáramok megjelenítésre, ilyen a Sankey-diagram, amely egy ún. nyílfolyammal reprezentálja az áramokat. A nyíltörzsek szélessége arányos az árammal. A nyílfolyam egyes elágazásai jól láthatóan mutatják be az elváló, illetve az egyesülő áramokat. Az anyag-, és energiamegmaradás azonosságainak megfelelően a nyilak kezdeti szélességének összege megegyezik a végső nyilak szélességének összegével.



$$A_{be} = a_{1ki} + a_{2ki} + a_{3ki}$$



Source: FFE, Ganzheitliche Bilanzierung von Grundstoffen und Halbzeugen, Teil III Metalle, 1999

<http://www.ffe.de/download/gabie/metalle.pdf>

### 103. ábra Sankey-diagram

## Mérleg összefüggések

I. A technológiai rendszerek egészére, bármely elemére és alrendszerére felírható általánosított tömegmérleg, amely szakaszos-üzemű egységeknél a kezdeti- és végállapotok tömegeire, állandósult állapotú folyamatos egységeknél tömegáramokra vonatkozik:

*179. képlet.*

$$\sum_{i=1}^k A_i = \sum_{j=1}^m T_j + \sum_{l=1}^n H_l$$

alapanyag = termék + hulladék

A képletben az i,j,l indexek a kiindulási, a termék és a hulladék komponenseire utalnak. Az indexek megkülönböztetésére csak több műveleti egység esetén van szükség.

II. Reális (különösen vegyipari) rendszerekben a belépő és a távozó bruttó anyagáramok (komponensáramok) mérésére van a leggyakrabban mód. Ezért a mérlegek készítésénél a komponensáramokat a megfelelő bruttó áramok, és a tömegkoncentrációk ismeretében számolhatjuk. Például:

*180. képlet.*

$$A_i = \sum a_i \cdot x_i,$$

ahol  $x_i$  a kiindulási anyag  $i$ -ik komponensének a tömegtörtje. [kg/o.  $x$  mol/kg = mol/o]

III. A technológiai folyamatok elemzésével megoldható a "tisztább technológiára" való átállás értékelése az input és output és belső újrahasznosítási hányadot tartalmazó anyagmérleg alapján.

Ehhez értelmezzük a hagyományos technológiai részfolyamatok ( $A^H$ ), a tiszta technológiák ( $A^T$ ) és az európai szabványokat tartalmazó ( $A^{EU}$ ) paraméterek mátrixait. Az értelmezés és leíró mátrix struktúra a következő:

*181. képlet.*

$$\underline{A}^H = \begin{array}{c} \text{Technológiai} \\ \text{részfolyamatok} \end{array} \begin{array}{c} \left[ \begin{array}{ccc} \text{Kibocsátások} & & \text{Belső} \\ \text{Emissziók} & \text{Hulladékok} & \text{újrahasznosítás} \\ \text{1..j..M1} & \text{1..j..M2} & \text{1..j..M3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{ij}^{H1} & a_{ij}^{H2} & a_{ij}^{H3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \text{N} & & \end{array} \right] \end{array}$$

$A^H$  - a hagyományos technológia anyagmérlegéből levezethető output és visszaforgatási hányadot összefoglaló mátrix.

*182. képlet.*

$$\begin{array}{ccc} \text{Kibocsátások} & & \text{Belső} \\ \text{Emissziók} & \text{Hulladékok} & \text{újrahasznosítás} \end{array}$$

$$\underline{A}^T = \begin{matrix} & & \text{Technológiai} \\ & & \text{részfolyamatok} \\ \begin{matrix} 1 \\ \vdots \\ i \\ \vdots \\ N \end{matrix} & \left[ \begin{array}{ccc} 1..j..M1 & 1..j..M2 & 1..j..M3 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{ij}^{T1} & a_{ij}^{T2} & a_{ij}^{T3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{array} \right] \end{matrix}$$

$\underline{A}^T$  - a tisztább technológia anyagmérlegéből levezethető output és visszaforgatási hányadot összefoglaló mátrix.

**183. képlet.**

$$\underline{A}^{EU} = \begin{matrix} & & \text{Technológiai} \\ & & \text{részfolyamatok} \\ \begin{matrix} 1 \\ \vdots \\ i \\ \vdots \\ N \end{matrix} & \left[ \begin{array}{ccc} \text{Kibocsátások} & & \text{Belső} \\ \text{Emissziók} & \text{Hulladékok} & \text{újrahasznosítás} \\ 1..j..M1 & 1..j..M2 & 1..j..M3 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{ij}^{EU1} & a_{ij}^{EU2} & a_{ij}^{EU3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{array} \right] \end{matrix}$$

$\underline{A}^{EU}$  - az EU előírásokat figyelembevevő összefoglaló mátrix.

A mátrix segítségével értelmezhetők a tisztább technológiák bevezetésével elért eredmények, illetve a környezeti hatások terén elért eredmények. Ehhez hatékonysági mutatót képezhetők:

Emisszió és hulladékcsökkentés a vizsgált, és átalakított technológiai folyamatnál:

**184. képlet.**

$$\eta = \frac{\Omega_1 \sum_{i=1}^N \xi_i \sum_{j=1}^{M1} v_j \frac{a_{ij}^{H1}}{a_{ij}^{T1}}}{2 * N * M1} + \frac{\Omega_2 \sum_{i=1}^N \xi_i \sum_{j=1}^{M2} v_j \frac{a_{ij}^{H2}}{a_{ij}^{T2}}}{2 * N * M2}$$

ahol:  $\sum_{i=1}^N \xi_i = 1$ , és  $\sum_{j=1}^{M1} v_j = 1$  súlyozási tényezők, amelyek az adott technológia és szennyezés szerepét különböztetik meg.

Visszaforgatás esetében:

**185. képlet.**



$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^N \xi_i \sum_{j=1}^{M3} v_j \left( 1 - \frac{a_{ij}^{M3}}{T^3} \right)}{N * M3}$$

ahol:  $\sum_{i=1}^N \xi_i = 1$ ,  $\sum_{j=1}^{M3} v_j = 1$  súlyozási tényezők a fentiek szerint.

A tisztább technológiára való törekvés érdekében elérendő célfüggvény:

**186. képlet.**

$$\eta + \alpha \Rightarrow \text{Max!}$$

alakban fogalmazható meg.

Ehhez kapcsolható az EU szabványokat tartalmazó mátrix elemeivel való összehasonlítás és az eltérés minimalizálása. Ezek analóg módon írhatók fel. A felsorolt minősítési rendszerek csak a technikai paraméterekre korlátozódnak.

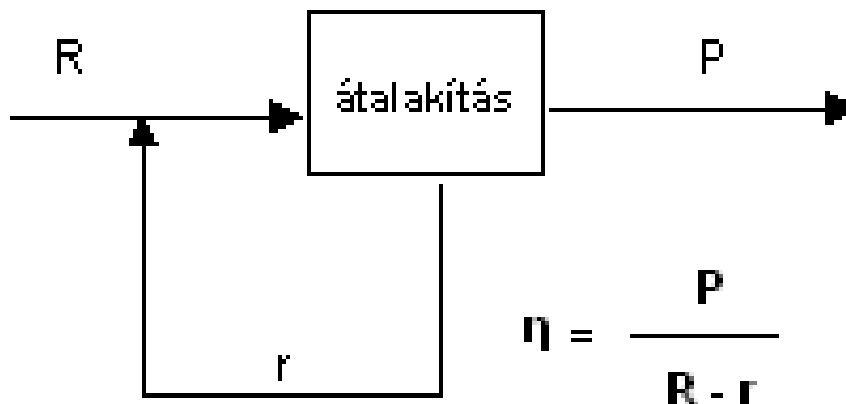
### A technológiai folyamatok hatékonyságnak mérőszámai

A terméket gyártó/előállító technológiai folyamatok hatékonyságának megállapítására (nem csak gazdaságossági megfontolásból) használatos több mérőszám közül kettőt kiemelünk:

- \* kitermelés
- \* konverzió

#### Kitermelés (Yield)

A kitermelés (szinonim fogalmak: hozam, kihozatal): százalékban fejezi ki azt, hogy a gyártott termék [**P**= product] mennyisége hányad része a gyártásba bevitt nyersanyagból [**R**= raw material], elméletileg előállítható mennyiségnek. Amennyiben a kiindulási anyag(ok) csak részben alakulnak át a gyártási folyamat során, és azok a termék(ek)től elválasztva újra felhasználhatók, úgy a termelés számításánál a folyamatba bevitt kiindulási anyag és az át nem alakult [**r** = return] és elválasztott kiindulási anyag mennyiségének különbségét kell alapul venni.

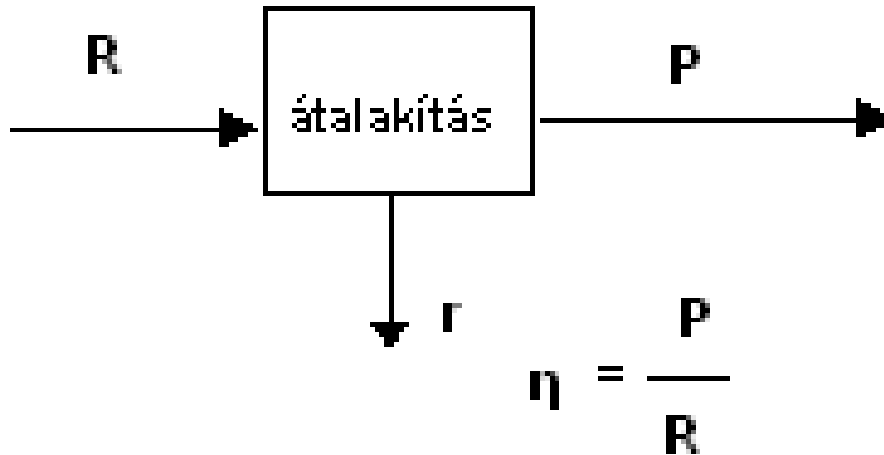


$$\eta = \frac{P}{R - r}$$

#### 104. ábra Kitermelés (Yield)

Konverzió

A konverzió (szinonim fogalma: átalakulás): százalékban kifejezi azt, hogy a technológiai folyamatban egyszeri áthaladás során, a bevezetett anyag [R] hányadrésze alakul át bármilyen más anyaggá vagy anyagokká [P]. A konverzió jelentheti az összes vagy csak a hasznos konverziót.



*105. ábra Konverzió*

## Az ipari technológiák és a fenntartható fejlődés

*[„A fenntartható fejlődés olyan fejlődés, amely biztosítani tudja a jelen szükségleteinek kielégítését anélkül, hogy veszélyeztetné a jövő generációk lehetőségeit saját szükségleteik kielégítésére. A fogalom a fenntartható gazdasági, ökológiai és társadalmi fejlődést egységben értelmezi.”  
(Our Common Future, 1987)*

*„A fenntartható fejlődés a folyamatos szociális jobblét elérése anélkül, hogy az ökológiai eltartóképességet meghaladó módon növekednénk. A növekedés azt jelenti, hogy nagyobbak leszünk, a fejlődés, pedig azt, hogy jobbak.”  
(Herman E. Daly)]*

A XXI. század társadalmainak és ezen belül az ipari technológiáknak a legnagyobb kihívást, a környezetvédelmi problémák mellett, az alapanyagok és az energiahordozók általában a természeti erőforrások véges rendelkezésre állása jelenti. Ma már senki számára nem lehet kétséges, hogy az ipari termelés jövője csak a fenntartható fejlődés keretei között képzelhető el.

Az elvárásokhoz igazodó, korszerű technológiák stratégiájának kulcseleme, a tevékenységéből származó környezeti káros hatások minimalizálása. Nemcsak betáplálás oldali, hanem beleértve a termékfelhasználás és az elhasznált, tovább nem használt termékek újrahasznosítását vagy megsemmisítését is jelenti.

A működő és megvalósítandó ipari technológiák korszerű, környezetcentrikus értékelésénél és minősítésénél egy dinamikus, többes szempontrendszert kell követni. Eszerint az egyes technológiai eljárásokban felhasználásra kerülő, megújuló-, vagy korlátosan megújuló energia és alapanyag erőforrások használata, mennyiben felel meg a fenntartható fejlődés azon követelményeinek, hogy:

- \* a megújuló természeti erőforrások felhasználásának mértéke kisebb vagy megegyező legyen a természetes vagy irányított regenerálódó (megújuló) képességük mértékével;
- \* a kimerülő erőforrások ésszerű felhasználási üteme, ne haladja meg a megújulókkal való helyettesíthetőségnek a lehetőségét, (ezt a *mindenkori technológiai haladás határozza meg*);
- \* a hulladékok keletkezésének mértéke/üteme kisebb vagy megegyező legyen a környezet szennyezés befogadó képességének mértékével, amit a mindenkori környezet asszimilációs kapacitása határoz meg.

A környezeti megfelelés szempontból általános érvényű számszerűsítés nélkül az alábbi kritérium listát kell folyamatosan szem előtt tartani:

- a technológiai folyamatból emisszió<sup>5</sup> révén ne kerüljön ki olyan por, füst, köd vagy véggáz szennyezés (v. gáznemű gyártási melléktermékek), amely által létrejött imisszió<sup>6</sup> káros a bioszférára,
- a tüzelőberendezések minél jobban közelítsék meg a tökéletes elégetést, a kibocsátott égéstermékek ne tartalmazzanak kormot, pernyét, és csak minimális CO, SO<sub>2</sub> és NO<sub>x</sub>-t.
- ne bocsássanak ki olyan szennyvizet vagy folyékony mellékterméket, hulladék anyagokat, melyek biológiai úton nem vagy csak rendkívül nehezen bonthatóak le,
- az eljárások szilárd melléktermékei (salak, meddő, kőzet, termelésközi hulladék, stb.) lehetőség szerint teljes körűen tovább feldolgozásra, hasznosításra kerüljenek.

## A szennyezés csökkentésének elvi és technológiai lehetőségei.

### Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC)

Az Európai Unió környezeti szabályozásának igen fontos eleme az ún. IPPC irányelv (Integrated Pollution Prevention and Control = Integrált szennyezés megelőzés és ellenőrzés”; 96/61/EC), amely a környezetnek, mint egységes egésznek a védelmét hivatott biztosítani.

A környezetszennyezés integrált megelőzéséről és csökkentéséről szóló, 96/61/EK tanácsi irányelvet (IPPC1 irányelv) 1999. október 30-tól kellett az Európai Unió valamennyi tagországának, a nemzeti jogrendjébe kötelezően átültetnie.

### Best Available Techniques (BAT)

A korábban – és nagyrészt még ma is – egységes, mindenkire vonatkozó határértékek meghatározásával történő szabályozást, bizonyos fokig felváltja az adott technológiák jellegének nagyobb mértékű figyelembevételével járó, ún. elérhető legjobb technikákon (Best Available Techniques = BAT) alapuló szabályozás. Definíciója az IPPC irányelv szerint a következő:

A legjobb, elérhető technikán értendők azok a hatékony és fejlett eljárások, módszerek, amelyek lehetővé teszik a szennyezés kibocsátás elkerülését, illetve – amennyiben ez nem lehetséges – csökkentését, azaz végeredményben – a környezetet, mint egységes egészet érő – káros hatások csökkentését.

A legjobb kifejezés a legmagasabb hatékonyságra utal, az elérhető pedig, azt jelenti, hogy az adott technológia iparilag bevezethető, tehát műszakilag és gazdaságilag egyaránt kivitelezhető.

Ma azokat a technológiákat nevezhetjük tisztának, amelyek kielégítik a BAT kritériumokat. Az elmúlt évtizedekben szinte minden iparágban jelentős erőfeszítések történtek, új környezetbarát technológiák kifejlesztésére és bevezetésére. A kutatás-

---

<sup>5</sup> emisszió: Környezetvédelemben **emisszió**nak nevezzük: az időegység alatt történő szennyező anyag kibocsátást [tömeg/időegység]

<sup>6</sup> **imisszió**: Az ökoszisztémába bejutó emissziók hatására kialakult szennyezőanyag koncentrációt imisszióknak nevezzük. [g/m<sup>3</sup>; ppm; ppb]. Az imisszió nem számítható az emissziók mechanikus összegzésével.

fejlesztési tevékenység soha nem tekinthető lezártnak, mindig újabb és újabb megoldások születnek.

Az elfogadható BAT termelési technológiáknak, a minőségi és a gazdaságossági kritériumok mellett, egyidejűleg az egyre szigorúbb környezetvédelmi elvárásoknak is meg kell felelni.

Egy adott létesítmény esetében a BAT nem szükségszerűen az alkalmazható legkorszerűbb, hanem gazdaságossági szempontból legésszerűbb, de ugyanakkor a környezet védelmét megfelelően magas szinten biztosító technikákat/technológiákat jelenti.

Ezen meghatározás figyelembe veszi, hogy a környezet védelme érdekében tett intézkedések költségei ne legyenek irreálisan magasak. Ennek megfelelően, a BAT például javasolhat többféle technikát ugyanazon ágazat létesítményeire, a szennyező-anyag kibocsátás mérséklésére, amely ugyanakkor az adott berendezés esetében az elérhető legjobb technológia.

Amennyiben a BAT alkalmazása nem elégséges a környezetvédelmi célállapot és a szennyezettségi határértékek betartásához, és emiatt a nemzeti vagy a nemzetközi környezetvédelmi előírások sérülnének, a BAT-nál szigorúbb intézkedések is megkövetelhetők.

Ma már csak az a technológia kerülhet megvalósításra, amely teljesíteni képes a kor elvárásainak megfelelő környezeti kritériumokat.

### **BAT Referencia Dokumentumok (BREF)**

BREF dokumentumok az elérhető legjobb technikákról szóló hiteles információk gyűjteménye. Nem céljuk az adott iparág 100%-os részletes feltárása, sokkal inkább egy olyan megbízható viszonyítási alap szolgáltatása, melynek alapján sikerrel és biztonsággal meghatározhatók a legjobb eljárások.

A dokumentumok tartalmazzák azokat az eljárásokat, amelyeket elő lehet írni az engedélyben (pl. kapcsolódó eljárások), azonban nem tartalmazza az Irányelv mellékletében megadott eljárások területének leírását és a kifejezések jogi értelmezését.

### **BREF dokumentumok felépítése**

- \* általános információ az adott iparágról,
- \* az iparágban használt gyártási és kapcsolódó eljárások,
- \* adatok a jelenlegi kibocsátásokról és felhasználásokról (nyersanyagok, energia és egyéb szolgáltatások),
- \* az engedélyek előírásaiban BAT-ként alkalmazható kibocsátás-csökkentési és egyéb eljárások részletes leírása. Ez a leírás kiterjed az adott technológia segítségével elérhető kibocsátási szintek bemutatására, a felmerülő költségek elemzésére, valamint a kibocsátások környezeti elemek közötti megoszlására, változására. Az elavultnak ítélt módszerek ismertetésére a BREF nem tér ki,

- \* a BAT elve szerinti technológiák, kibocsátások és fogyasztási szintek nagy vonalakban történő meghatározása, illetve a kibocsátások és fogyasztási szintek BAT-on alapuló engedélyekben javasolható értékei. Ezek az értékek azonban csak viszonyítási alapként, illetve ajánlásként szerepelnek, mivel a BREF nem ír elő szabott értékeket.

A BREF dokumentumok számításba veszik, továbbá adatokat közölnek az adott ipari tevékenységből származó, esetleges talaj-, illetve talajvízszennyezésekre, valamint ismertetik a megelőzés lehetséges módszereit is. Noha az ipari létesítmények helyszínét a tevékenység befejezése után "elfogadható állapotba kell visszaállítani". Az "elfogadható állapot" kifejezés nincs objektíven definiálva a BREF dokumentumokban, mivel országonként más és más az adott szennyező anyagokra vonatkozó határérték

## **A tiszta technológiák**

A „tiszta technológia” rendkívül tág fogalom. Ennek megfelelően csak egyedileg értelmezhető, hogy mi a viszonyítási alap, mert minden egyes ágazatban, minden egyes technológiában más a referencia alapja.

### **A csővégi tisztítás (End-of-pipe)**

A környezetvédelem jelenleg (előszeretettel) alkalmazott módszerei, a már megtermelt hulladékok és emissziók ártalmatlanítására koncentrálnak. A környezetkárosító kibocsátások csökkentésére az ún. "end-of-pipe" v. csővégi technológiák kerültek kifejlesztésre és alkalmazásra. Ebbe a körbe tartoznak a ma is elterjedten alkalmazott, szennyvíz- és levegőtisztítási megoldások. Ezek a technológiák sokszor a teljes gyártási folyamatnak csak egyes, a környezeti szempontból kritikus lépéseit érintik. Ugyanakkor tipikus gond, hogy amíg egyfajta szennyezést sikerül kiküszöbölni, helyette úja(bba)k keletkeznek, melyek adott esetben legalább akkora vagy nagyobb nehézséget okoznak, mint amelyet az eljárás révén elhárítottak (-és akkor még nem említettük a költségeket-). Gyakori példa, amikor a kis mennyiségű véggáz mosása eredményeként nagy mennyiségű veszélyes szennyvíz keletkezik. Ilyen és hasonló esetekben kérdéses, hogy az eredeti célkitűzés milyen hatékonysággal teljesült. A legtöbb esetben csak csővégi megoldásokkal nem lehet elérni a kitűzött célt, betartani a határértékeket.

### **A tiszta és tisztább technológiák (Clean and cleaner technologies)**

Ma már egyértelműen elfogadott vált az a szemlélet, amely szerint a környezetvédelem egyik legfontosabb alapelve a megelőzés. Az angol terminológiában gyakran hivatkoznak, hogy "the prevention is better and cheaper than cure".

Ezt a célt szolgálják az ún. tiszta, vagy – ahogy elterjedten nevezik – tisztább, más szóhasználattal környezetbarát technológiák.

A tisztább termelés nem egyszerűen a jelenséget kezeli, hanem megpróbál a probléma forrásához visszamenve megoldást találni, ezáltal lecsökkenteni a csővégi típusú kibocsátást.

### **A tisztább termelés stratégiája:**

A tisztább termelés stratégiája, hogy megakadályozza, de legalább is maximálisan csökkentse a környezetet szennyező anyagok keletkezését. Ennek érdekében a gyártási folyamatokat úgy kell kialakítani, hogy azok esetlegesen káros környezeti hatása a lehető legkisebb legyen. A tisztább termelés filozófiájának megvalósítása,

egyben a technológiák hatékonyságának növelését jelenti, úgy, hogy eközben az ember és környezetének veszélyeztetettsége jelentősen csökken.

E célok eléréséhez és/vagy kikényszerítéséhez megfelelően átfogó, ugyanakkor részletes, megelőző környezetvédelmi stratégiák folyamatos alkalmazására van szükség. A stratégiákban érvényesíteni szükséges:

folyamatok esetében a nyersanyagok hatékonyabb felhasználását, a veszélyes és mérgező anyagok kiváltását és az emissziók forrásuknál történő csökkentését,

termékek és szolgáltatások esetében a teljes életciklus során okozott környezetterhelés csökkentését, a nyersanyag kitermelésétől a végső ártalmatlanításig,

szolgáltatások esetében a környezeti szempontok beépítését már a szolgáltatások tervezésébe és kivitelezésébe.

A tisztább termelés megvalósítása természetesen többlet költségekkel jár. Elméletileg a többletkiadás megtérül(het) az egészségügyi társadalmi összköltségek, és a környezetvédelemmel kapcsolatos költségek csökkenése révén. Ezen megtakarítások azonban nem - (v. nem mindig) - az új technológiát bevezető gyártónál jelentkeznek. (Magyarán: nem lehet direkt módon kimutatni az egészségügyi kiadások elmaradását, valamint nem lehet nyereségként elfogadtatni, pl. az elmaradt bírságot.)

### **A hulladékmentes technológiák (Zero waste)**

A tisztább termelés deklarált célja, hogy megakadályozza a környezetet szennyező anyagok keletkezését, azaz elősegítse a környezet károsításának megelőzését.

A tisztább technológiák által elérhető legmagasabb szintű környezeti eredményt, a ma még idealisztikusnak tartott ún. ZERO WASTE technológiák képviselik. A legkorszerűbbnek minősíthető környezetszemléletű tervezési filozófiák alapelve, a totális technológiacsere, azaz olyan eljárások kidolgozása, amelyek alkalmazásával a gyártásból káros kibocsátás nem történik.

Ezen elvek maradéktalan gyakorlati megvalósításához szükséges elméleti tudás és technológiai eszközök a legtöbb esetben már rendelkezésre állnak. A széles körű megvalósulás és elterjedés útjában, szinte kizárólag gazdaságossági okok állnak.

A globális gazdasági versenyben az Európai Uniónak, a Kiotói Jegyzőkönyvön alapuló 87/2003/EK irányelve: Az üvegházhatású gázok kibocsátási egységei Közösségen belüli kereskedelmi rendszerének létrehozásáról (Emissions Trading Directives). A kibocsátás kereskedelem = szennyezés eladás, továbbá a hagyományos nyugat-kelet technológiatranszfer sem kényszeríti ki ma még kellően, a hulladékmentes technológiák mielőbbi gyors elterjedését.

A legjelentősebb javulásra a CO, CO<sub>2</sub> és a SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> emissziók területén lenne szükség. E szükségletet indokolja az alábbi táblázat:

**24. táblázat. Légszennyező anyagok eredete**

Légszennyező anyagok eredete [%]			
Légszennyező anyag	Természetes folyamatokból	Emberi tevékenység révén	Energia felhasználáshoz kapcsolódó emberi tevékenységen belül
kén-dioxid	55	45	90
nitrogén-oxidok	25	70	80
szén-monoxid	50	50	30-50
szén-dioxid	96	4	55-80
metán	40	60	15-40
szénhidrogének	95	5	55
rádióaktív anyagok	90	10	25

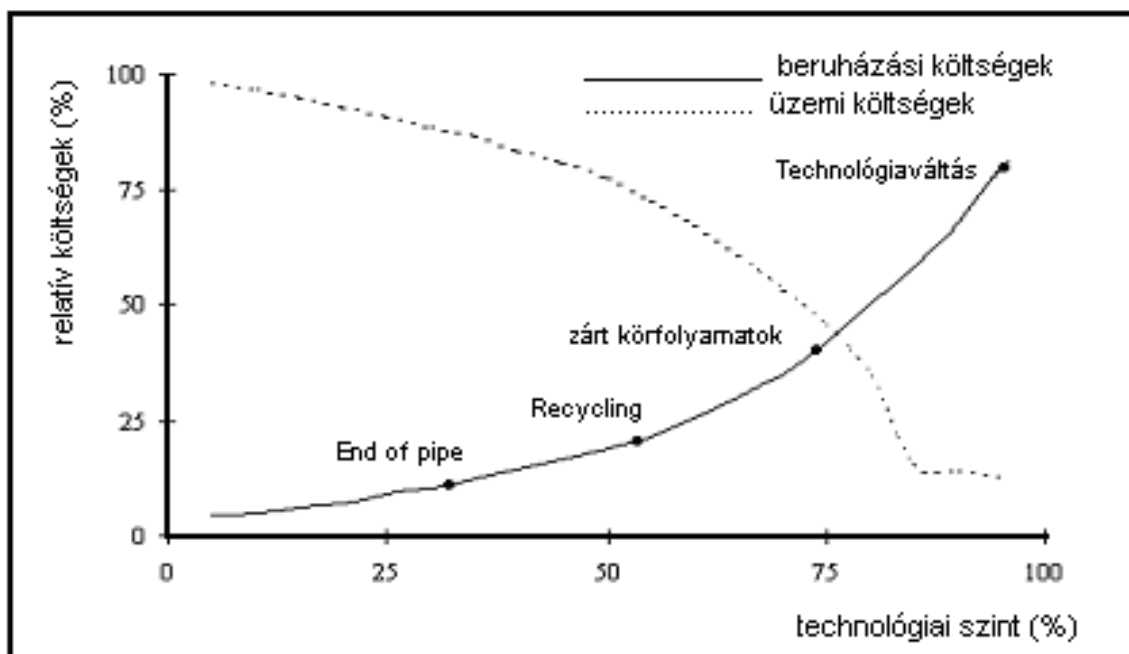
Prof. Dr. LÁNG I.: Környezetvédelem - fenntartható fejlődés

Ismert tény, hogy a legnagyobb tömegű veszélyes emissziót, a különböző oxidációs és/vagy redukciós folyamatok okozzák, amelyekben domináns a szénnek és a szénhidrogéneknek a felhasználása.

A káros kibocsátások jelentős mérséklése érdekében a hidrogén bázisú technológiák mielőbbi elterjesztése elkerülhetetlen lesz. A hidrogén alapú technológiák elterjedése várható az energetikában, tüzeléstechnikában, a belsőégésű motorok hajtóanyagainál, és a jelentősen szennyező nagyüzemi technológiákban, mint pl. a vas és acélgártás.

**Környezettchnológiai variánsok beruházási és üzemeltetési költségeinek viszonya**

Az egyes környezettchnológiai variánsok beruházási és üzemeltetési költségei jelentősen eltérnek. Ennek becsült arányait mutatja be az alábbi ábra.



Forrás: H. Kaiser Unternehmensberatung. In.: Umweltmagazin, Mai 1996. s. 60.

**106. ábra Környezettchnológiai variánsok beruházási és üzemeltetési költségeinek viszonya**



## Metallurgia

### A metallurgia fogalmának eredete és tartalma

Metallurgia (fémkohászat) a fémek érceiből való kinyerésével, hasznosítható formába alakításával (gyakran más fémek ötvözeteként is), és gyártásuk feltételeinek megteremtésével foglalkozó műszaki tudomány és eljárás. A metallurgia szó a görög *nyersfémet feldolgoz'* szóból ered.

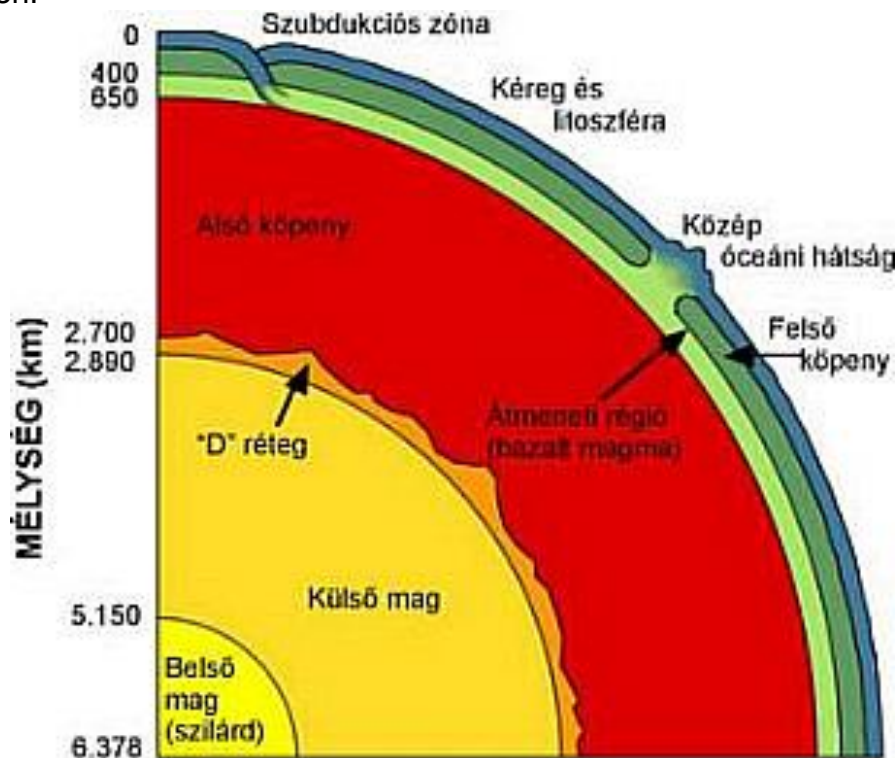
### A fémek (metals)

A természetben csak néhány fém (Au, Ag, Pt) fordul elő színállapotban, a többi csak vegyületek formájában található. A fémvegyületek rendszerint oxidok, szulfidok, karbonátok. A szulfátok csak az alkáli és földalkáli fémeknél, valamint az ólomnál, a halogénidok pedig az alkálifémeknél és az ezüstenél jelentősek.

A fémek vegyületeit nagyobb mennyiségben tartalmazó kőzeteket az **ércek** (*ores*). A gazdaságos feldolgozást lehetővé tevő minimális hatóanyag tartalom a különböző fémek esetében rendkívül változatos, pl. uránérceknél 0,05-1 % urántartalmat ( $U_3O_8$ ;  $UO_2$ ) is már kedvezőnek minősítenek.

### A Földkéreg szerkezete

A Föld belseje heterogén felépítésű, három, koncentrikusan elhelyezkedő rétegből áll: a külső kéreg alatt található a köpeny, az alatt, pedig a külső és belső mag helyezkedik el övszerűen.



107. ábra A Földkéreg szerkezete

A külső földkéreg 10-40 km vastagságú és viszonylag könnyű kőzetek alkotják. A földkéreg alatt található a **köpeny**, amely további három részre bontható: a szilárd, külső réteg a **litoszféra**, amelynek vastagsága nem éri el a 100 kilométert; alatta a képlékenyebb **asztenoszféra**, ez alatt az asztenoszféránál szilárdabb **mezoszféra** található.

A köpeny alatt található a 3.400 kilométer sugarú nagy sűrűségű vas-nikkel mag, amely szilárd belső részből és az azt körülvevő folyékony halmazállapotú anyagból áll.

## Fémek a természetben

A természetben előforduló 92 elemből 8 elem alkotja a földkéreg 99 tömeg %-át. Az 1 %-nyi 84 elem, melyek nagy része jelentős gazdasági értéket képvisel, telepképző folyamatokban dúsulhat. Ha ezek az elemek egyenletesen osztanánk el a földkéregben, esélyünk sem lenne a hasznosításukra.

A földkéreg felső, eddig már megkutatott (1,5 km vastagságú) szárazföldi rétegében leggyakrabban előforduló 15 elem között – az amfoter szilíciummal együtt – 9 fém található.

### 25. táblázat. Fémek a természetben

sorrend	elem	m/m%	sorrend	elem	m/m%
1.	O	49,5	9.	H	0,87
2.	Si	25,3	10.	<b>Ti</b>	0,48
3.	<b>Al</b>	7,52	11.	Cl	0,19
4.	<b>Fe</b>	4,8	12.	P	0,12
5.	C	3,4	13.	<b>Mn</b>	0,095
6.	Na	2,6	14.	Cu	0,08
7.	K	2,4	15.	S	0,06
8.	Mg	1,4			

## Fémek és tulajdonságaik

A fémek legfontosabb tulajdonsága a jó elektromos- és hővezetőképesség<sup>7</sup>, korrodálódási hajlam, valamint a nagy fényvisszaverő-képesség, amely a jellemző fémes fényt adja. A fémek egymással ötvözeteket képezhetnek, amelyek szilárd oldat jellegűek, s az ötvöző komponensek mennyiségétől függően igen nagymértékben

<sup>7</sup> A **hővezetőképesség** ( $\lambda$ ) az [anyag](#) azon tulajdonsága, hogy két egymással párhuzamos, egymástól 1 m távolságban ( $L$ ) levő sík rétege között egységnyi ( $1 \text{ m}^2$ ) felületen ( $A$ ) [másodpercenként](#) mekkora hőmennyiség ( $Q$ ) áramlik át 1  $\text{K}$  hőmérsékletkülönbség ( $\Delta T$ ) hatására.

$$\text{hővezetőképesség} = \text{hőmennyiség} \times \text{távolság} / (\text{felület} \times \text{hőmérséklet különbség})$$

$$\lambda = Q \times L / (A \times \Delta T)$$

Mértékegysége [SI]:  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , vagy  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

változó tulajdonságúak. Gyakorlati szempontokat tekintve nagy a mennyiségük, a szilárdságuk, szívósságuk, sokoldalú megmunkálhatóságuk és felhasználhatóságuk civilizációnk legfontosabb építő-, és szerkezeti anyagai közé teszik a fémeket.

### A fémek fizikai tulajdonságai

- \* **Fémfényűség.** A rájuk eső fénynek nagyobb részét visszaverik, csak kis részét nyelik el. Sima felületük tükrözők, finom poruk azonban nem fémfényű, hanem rendszerint fekete.
- \* **Színük.** általában szürkésfehér. Kivételt képez a rézcsoport két eleme, a Cu vörös, az Ag sárga színűnek látszik. A fémek színét sokszor befolyásolja a felületen kialakuló vékony oxidréteg, ezért mutat a króm kékes, az ólom sötétszürke színt.
- \* **Olvadáspont.** A fémek szobahőmérsékleten általában szilárdak, kivétel a higany. A szobahőmérséklethez több fémnek is közel áll az olvadáspontja (Cs), egyes fémeké viszont igen magas (Volfrám: 3380°C).
- \* **Forráspont.** Minden fémé magas, még a higanyé is majdnem 360°C.
- \* **Fizikai oldhatóság.** A fémek legfeljebb egymásban tudnak oldódni (amalgám), és szoros kivételként az alkálifémek és a berillium kivételével az alkáliföldfémek bizonyos más anyagokban (cseppfolyós ammóniában) oldódnak.
- \* **Rugalmasság.** Mérsékelt alakváltozással szemben a fémek rugalmasan viselkednek. A deformálhatóságból következik a fémekre jellemző kalapálhatóság, nyújthatóság (a nemfémek ridegek, ütésre törnek). Az egyes tömegpontokat egymáshoz nem kötik mereven közös elektronpárok, ütésre, nyomásra a rácspontok bármely síkban elcsúszhatnak, egy másik fémion helyét foglalják el, végül ugyanolyan kristályrács alakul ki (tisztá fémekre jellemző inkább). Ott, ahol más fémionok is jelen vannak (elegykristály), a rácssíkok elcsúszása akadályozott, ezek többé-kevésbé ridegek.
- \* **Vezetőképesség.** Jól vezetik mind az elektromos áramot, mind a hőt. Oka a fémrácsban szabadon elmozduló elektronok rendszere. A fémek elsőrendű vezetők, az áramot ugyanis az elektronok vezetik bennük, a rácspontokban lévő atomtörzsek a vezetésben nem vesznek részt. Magasabb hőmérsékleten a fémek elektromos ellenállása nagyobb. Igen alacsony hőmérsékleten egyes fémek esetében hirtelen erősen lecsökken az ellenállás, megnő a vezetőképesség, ez a szupravezetés jelensége.
- \* **Mágnesesség** (Diamágnesesség, paramágnesesség, ferromágnesesség)

### Fémek metallurgia csoportosítása

1. Vas és az acélötvöző fémek: [sűrűség >5 g/cm<sup>3</sup>.]  
Mn, Fe, Co, Ni, Cr, Mo, W, V, Ti...,
2. Könnyűfémek: [sűrűség <3 g/cm<sup>3</sup>.]  
Al, Ca, Mg, Be, Na, K...,
3. Nehéz nemvas fémek: [sűrűség > 7g/ cm<sup>3</sup>.]  
Cu, Zn, Cd, Hg, Sn, Pb, Sb, Bi...,
4. Nemesfémek (*noble metals*): [sűrűség >10 g/cm<sup>3</sup>.]  
Au, Ag, Pd, Pt, Rh....,
5. Színesfémek (*non-ferrous metal*): [sűrűség: > 4,5 g/ cm<sup>3</sup>.]  
Cu, Au, Cr, Bi, Cs, Ni, Pb, Sn, Zn, Hg,...

## Ötvözetek (alloys)

A ötvözeteknek nevezzük a fémek más fémmel vagy félfémmel alkotott szilárd fázisú elegyeit [szilárd oldatok], amelyekre jellemzően nem érvényes az állandó súlyviszonyok törvénye. Az ötvözetek lehetnek homogének (pl. ezüst-arany ötvözetek) és heterogének, az utóbbiak csiszolatában többféle fázis különböztethető meg (pl. az öntöttvasban ferrit, cementit és ausztenit).

### Ötvöző anyagok

Az ötvöző anyagok a szilárd oldatok tulajdonságait befolyásoló, és módosító anyagok. Ötvözéssel jelentősen megváltoztathatók a fémeknek fizikai és a kémiai sajátságai is.

### Ötvözet struktúrák

A legjelentősebb ötvözet struktúrák és azok főbb jellemzői az alábbiak:

Elnevezés	Szerkezet	Példa	Tulajdonságok
Szilárd oldat	Közel azonos méretű atomok alkotta tetszőleges arányú elegy.	Au – Ag Fe – Ni	Kisebb vezetőképesség, az ellenállás kisebb hőmérséklet-függése.
a.) szubsztitúciós			
b.) rácsközi	A nagyobb méretű atomok közé beékelődő kis atomok	fém és H, C, B, N, O	Keményebb, ridegebb, kisebb vezetőképesség, az ellenállás kisebb hőmérsékletfüggése
Vegyülettípusú ötvözet	Eltérő tulajdonságú fémek, vagy fém + nemfém közötti, nem sztöchiometrikus képletnek megfelelő anyagok (pl. Fe <sub>3</sub> C)		Kemények, ridegek
Eutektikus ötvözetek	Határozott összetételű elegykristályok (eutektikumok) + a főlösslegben lévő fém kristályai (mikrokristályos szerkezet)	Fe + grafit; szürke nyersvas	Igen alacsony olvadáspont

### 26. Táblázat Ötvözetek

### Fontosabb ötvözetek

A gyakorlatban teljesen tiszta fémeket csak ritkán használnak, általában csak különleges célokra. A legtöbb esetben különböző ötvözeteket alkalmaznak, ezeknek van nagyobb gyakorlati jelentősége. A jelentősebb ötvözetek teljes körű felsorolása meghaladja a terjedelmi korlátokat, ezért csak szemléltetés igényével soroljuk fel az alábbiakat:

1. vas-szén ötvözetek
  - \* gyengén ötvözött acélok
  - \* erősen ötvözött acélok
2. réz ötvözetek
  - \* sárgaréz: 20-45 % cink (Zn) tartalom
  - \* bronz: max. 14% ón (Sn) tartalom
  - \* ólombronz: 15-25-35 % ólom (Pb)
  - \* alpakka [újezüst]: 5-30% nikkal (Ni) és 13-35 % Zn

### 3. alumínium ötvözetek

- \* dúralumínium: Al (min.) 90% + Réz (Cu) 4 % + Mangán (Mn) 1-2% + szilícium (Si)

## Ércek előkészítése feldolgozásra

### Teleptani alapfogalmak

A Klark érték, egy adott elem átlagos földkéregbeli gyakorisága. A gyakoribb elemek klark értékét m/m %-ban [lsd. 2. táblázat], a ritkébbakét mg/kg-ban adják meg.

Az érctelepek a hasznosítható érces vagy nemérces ásványi nyersanyagot, illetve fosszilis energiahordozót (kőszén, kőolaj, földgáz) tartalmazó kőzettestek.

Az érc, olyan ásvány, illetve kőzet, amiből egy adott korban, a technológiai fejlettségtől függően, gazdaságosan fémet állítanak elő, mivel fémtartalma jóval meghaladja az adott fém Klark értékét. A fémek nagy többsége a földkéregben igen kis koncentrációban fordul elő, ezek speciális telepképző folyamatok során dúsulhatnak.

A műrevalóság, az érc gazdaságos feldolgozáshoz szükséges legkisebb, még elfogadható hatóanyag-tartalom. Elsősorban az érc koncentráció mértékétől függ (0,01-99%), de a bányászati, előkészítési és feldolgozás-technológiai, infrastrukturális és társadalmi-gazdasági tényezők is nagymértékben befolyásolják.

Néhány nagy gyakorlati értékű elem hozzávetőleges - jelenlegi - műrevalósági értéke: Al - 35%; Fe - 30%; Mn - 25%; Zn - 3%; Cu - 0,1 %, U - 0,01%.

A készletek kimerülésével arányosan változik (csökken) a műrevalósági megfelelés kritériuma is.

A meddő, a bányászat során az ércel együtt kitermelt, de nem hasznosítható anyag. A bányák illetve az előkészítő üzemek környezetében felhalmozott meddő képzí a környezet-, és tájromboló meddőhányókat.

A különböző, itt nem részletezett bányászati módszerekkel kinyert, érceket feldolgozásuk előtt fizikai és kémiai műveletekkel elő kell készíteni a további feldolgozásra.

### Ércek elválasztása a meddőtől

Az értékes komponenseket dúsítással el lehet/kell választani a meddőtől. A feldolgozást megelőző elválasztás szükségességét gazdaságossági és környezetvédelmi szempontok határozzák meg. A magas meddő tartalmú érceknek a kitermeléstől a feldolgozás helyéig történő szállítása gazdaságtalan. A bánya közelében elválasztott meddő, ha más jellegű tovább hasznosítása nem lehetséges, alkalmasan felhasználható a bánya rekultivációra.

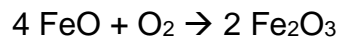
### Ércdúsítási módszerek

Az érceket előzetes fizikai előkészítő műveletekkel teszik kohósításra alkalmassá. A kohósításhoz szükséges optimális méret jellemzően a 10-100 mm szemcseméret. A

nagyobb méretű érc darabok, tömbök aprítása, **töréssel, őrléssel**, történik. Osztályozás után a méretalatti apróbb szemcséket és a porfrakciót darabosítani (agglomerálni) kell/lehet nagyobb darabokká. Az **agglomerálást** vagy **pelletezést (pelleting)** vagy más szóval szemcsésítést, brikettezéssel vagy **zsugorítással** végzik el. A pelletezést szinte kizárólag az ércbánya közvetlen közelében a szállítást megelőzően végzik el.

A kohóüzemekben a méretalatti ércporokat zsugorítással (**szinterezés**) teszik felhasználhatóvá. A zsugorítás esetén a hőkezelés az olvadáspontnál alacsonyabb hőmérsékleten történik, amelynél felületi összesülés következik be és CO<sub>2</sub>, valamint hidrátvíz távozásával kedvező porozitású és szilárdságú szemcse alakul ki.

Egyes ércek előzetes oxidáció (**pörkölés = roasting process**) révén válnak redukcióra alkalmas metallurgiai nyersanyagokká. Például:

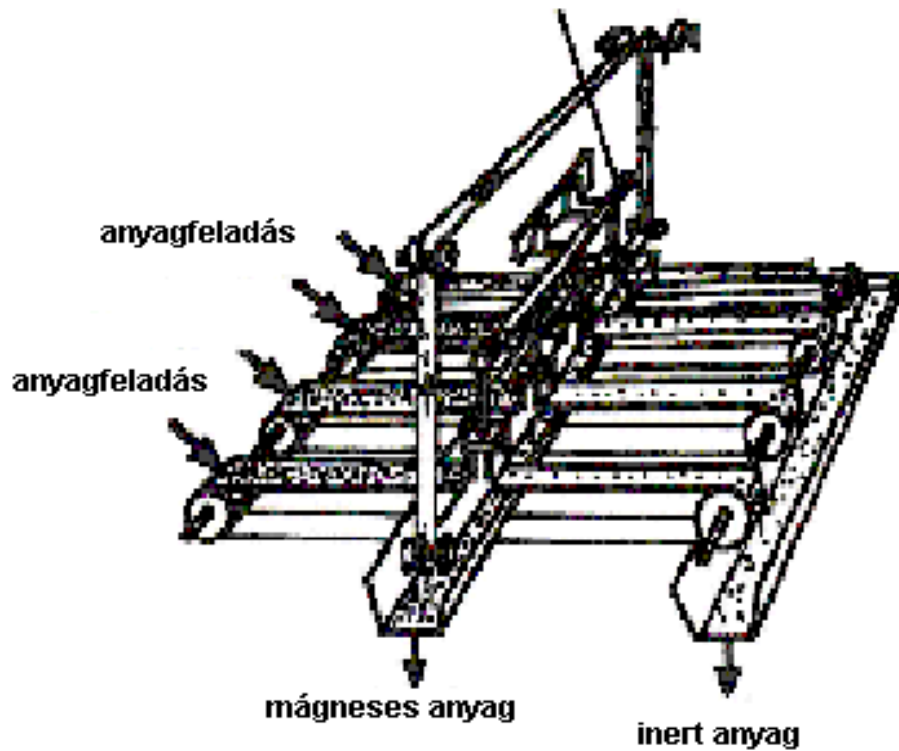


Általánosan az ércdúsító eljárásoknál (szérelés, flotálás, mágneses szeparálás) a bányából kinyert nyersanyagok meddőközet tartalmát csökkentik jelentősen. Az értékes komponensek száraz (**mágneses, szérelés = air flotation,**) és nedves (**szeparálás, flotálás = flotation**) dúsítási eljárásokkal<sup>8</sup> választhatóak el a kísérő meddőtől. A fizikai előkészítés egyes lehetséges megoldásait bemutató technológiai sémákat mutatják a következő ábrák:

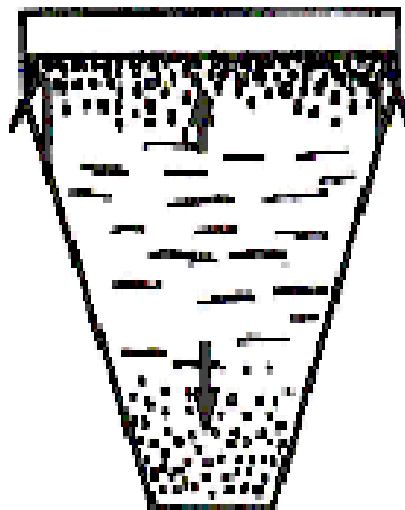
---

<sup>8</sup> elválasztási módszerek főbb elvi csoportjai: 1. fajsúlykülönbség alapján (sink and float).  
2. mágneses tulajdonságok alapján. 3. nedvesítő képesség különbség alapján

### elektromágneses szeparáció

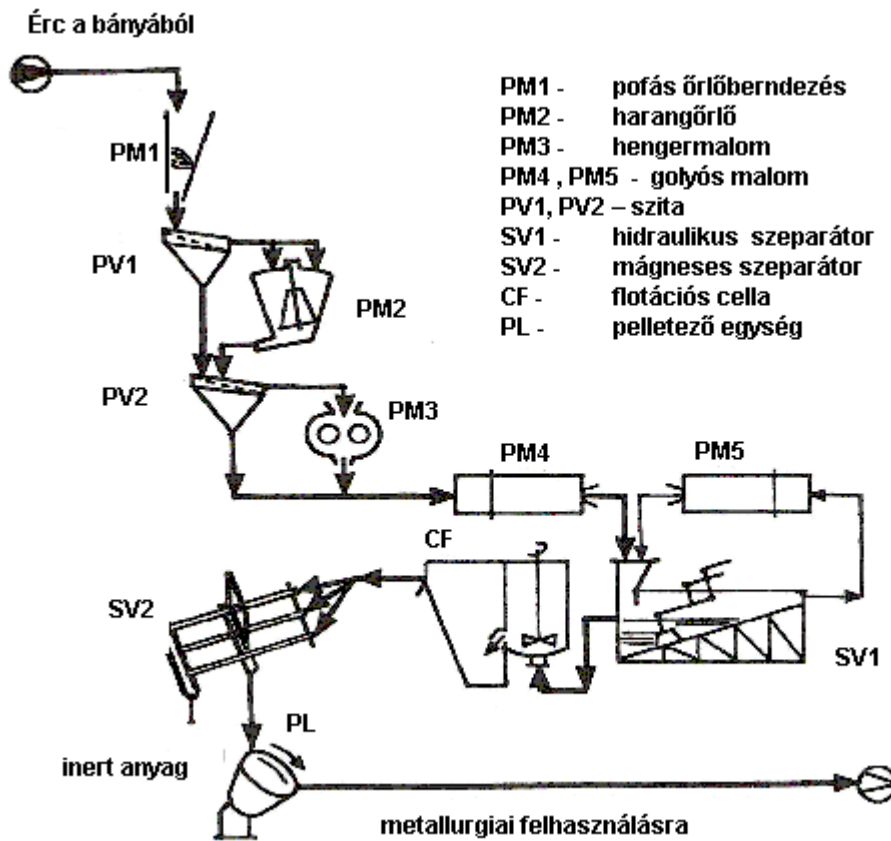


### "Shink and float" típusú elválasztás

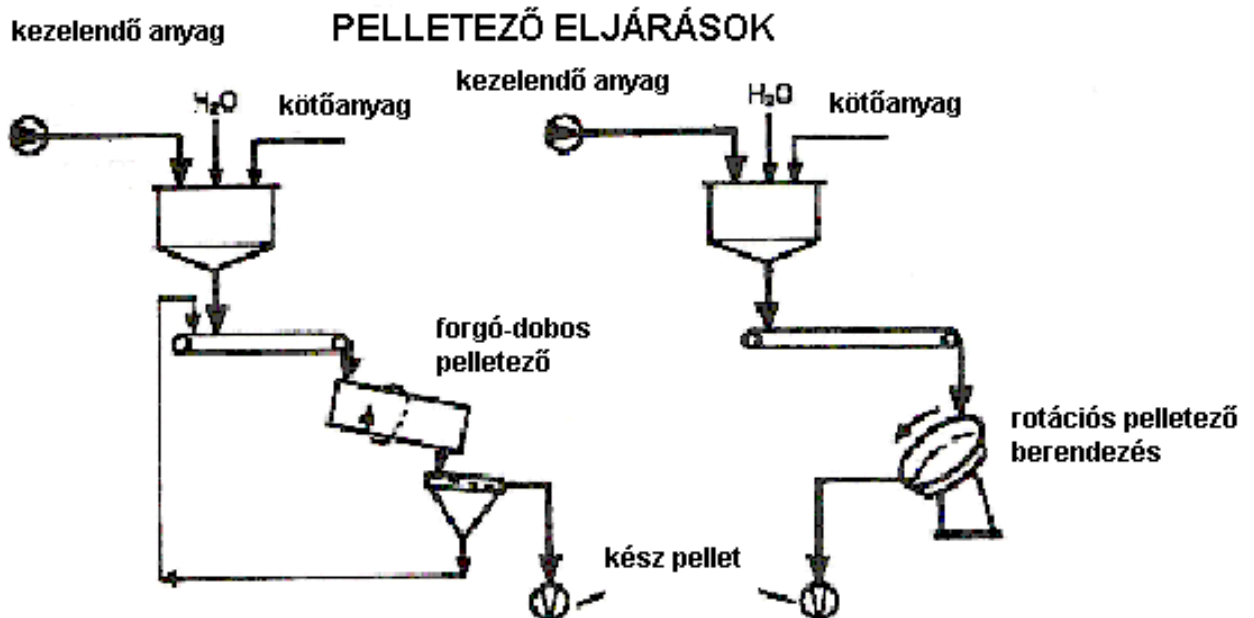


Hogogén vizes szuszpenzióban a meddő közet apró részecskéi a felszínre úsznak, míg az érc darabkák lesüllyednek.

108. ábra Ércdúsítási módszerek I.



109. ábra. Elvi folyamatábra: ásványi nyeresanyag metallurgiai előkészítése ipari feldolgozásra



110. ábra Pelletező eljárások

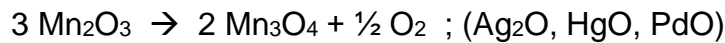
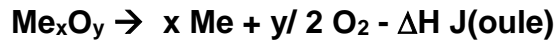


## A metallurgiai eljárások

### A metallurgia fő folyamatainak sorrendje

1. nyers fém előállítása redukcióval:

187. képlet.



2. nyers fém nemesítése,
3. raffinálás - nagytisztaságú fém (5/9; 9/9 stb.) előállítása.

### A metallurgia módszerei

- \* Pirometallurgia. A megolvasztáshoz és redukcióhoz szükséges magas hőmérsékletet és kémiai környezetet a szén (koks), földgáz és/vagy technológiai gázok, részleges elégetésével hozzák létre (pl. hagyományos vasgyártás).
- \* Elektrometallurgia. A magas hőmérsékletet elektromos ívfény, vagy indukció segítségével hozzák létre. (pl. elektroacél gyártás).
- \* Hidrometallurgia. A fémércek savas (lúgos) kilúgozásával fémsókat állítanak elő, amelyeket hidrogénnel (egyéb redukáló médiummal) végzett redukcióval alakítanak elemi fémmé.
- \* Hidroelektrometallurgia. Fémsók vizes oldataiból külső áramforrás segítségével választják le a fémet. (Speciális eset a cementálás – elektrolízis külső áramforrás nélkül -, pl. vizes rézszulfát oldatba merülő vasforgács feloldódik, és elemi réz válik ki!).
- \* Fémelőállítás olvadékelektrolízissel. A hidrogénnél negatívabb leválási potenciálú fémek vizes oldatból elektrokémiai módszerrel nem választhatók le, ezeket a fémeket olvadék elektrolitjaikból lehet előállítani (pl. alumínium előállítása timföld olvadékelektrolízisével, kriolit "oldószer"-ben).

## Vasgyártás

### Vasalapú szerkezeti anyagok

A vas és különböző ötvözetei képezik a korszerű szerkezeti anyag gyártás és felhasználás legfontosabb egyben legnagyobb mennyiségben alkalmazott nyersanyagait.

Vasötvözeteken általában azokat az anyagokat értjük, amelyeket nagyüzemi eljárásokkal gyártanak, nagy mennyiségben használnak fel és bennük a Fe aránya nagyobb, mint az egyéb alkotóké.

Az iparilag felhasznált vasalapú ötvözetek két nagy csoportra oszthatók: az öntöttvasakra és acélokra.

Felhasználási területeik új típusaik sok esetben átfedik egymást, általánosan azért megállapíthatjuk, hogy az acélok szívóssági tulajdonságai jobbak, mint az öntöttvasaké, ugyanakkor feldolgozásuk költségesebb, így drágább alapanyagok. A technológiák fejlődésének köszönhetően az öntöttvasakat egyre nagyobb területen használják.

## A vas

Kémiai jele: **Fe**.

A Földön csak vegyületei formájában fordul elő. Az elemi, "tiszta" (v. szín-) vas: ezüstszürke fényű, 1.535 °C hőmérsékleten olvadó, lágy, hidegen is jól alakítható fém (nyújtható, kovácsolható). Melegen hegeszthető. Nedvesség hatására közönséges hőmérsékleten is oxidálódik, az így képződő vasoxid-vashidroxid a rozsdá.

A technikai vasfélések több - kevesebb szén és tulajdonság módosító ötvöző anyagokat tartalmaznak.

Gyakorlati csoportosításuk:

### A nyersvas (pig iron)

Széntartalma magasabb, mint 1,7(2,03)%, olvadáspont: 1.150 -1.300 °C. A szénen kívül néhány százalék nagyságrendben szilíciumot és mangánt tartalmaz. Egyéb szennyezőanyagai: S és P (~0,1%). Egyes nyersvasak 2-2,5 % foszfort tartalmaznak.

### A nyersvasak osztályozása

Két fő típus van:

A **fehér nyersvas** (*cast iron = fehéröntvény*) max.1-2% Si-t tartalmaz, benne a szén vas-karbid ( $Fe_3C$ ) - cementit) formában van jelen. Törésfelülete fehér, rideg és kemény, nem kovácsolható, acélgártásra használják.

A **szürke nyersvas** (*ductile iron = lemezgrafitos szürkeöntvény*). A Si tartalom magasabb, mint 2%, a szén egy része grafit alakban van jelen. Valamivel szívósabb, ezért forgácsolható, de nem kovácsolható, elsősorban öntöttvas-árak készítésére alkalmas.

Speciális tulajdonságú vas az **elektrolitvas**:

Vas-klorid vagy vas-szulfát (vagy más vízoldható vas-só) oldatának elektrolízisének a katódon vas válik ki. Relatív nagy tisztaságú, de a hidrogéntartalom miatt rideg. (Nagy tisztaságú piroforos vasat lehet előállítani vas-oxalátnak hidrogénáramban 400 °C-on történő redukációjával. A piroforos vas cériummal ötvözve tűzkő néven ismeretes.)

## Az acél (steel)

Az acélok (szénacél, speciális acél) jól alakítható vasötvözetek, melyek nemzetközileg is elfogadott fogalmát a következőképpen határozták meg: túlnyomórészt vasat, a szénacéloknál általában 1,7(2,03) %-nál kevesebb korbont, valamint egyéb elemeket tartalmazó anyag. Az acélok nagy a mechanikai szilárdsággal rendelkező szívós és

rugalmas szerkezeti anyagok. Hidegen és melegen is jól megmunkálható, edzhetők, lágyíthatók. Olvadáspontjuk 1.400 -1.500°C.

### **Az acélok osztályozása**

Az acélokat, mint igen széles körben felhasznált alapanyagot többféle szempont alapján osztályozhatjuk.

#### A szénttartalom alapján:

megkülönböztetünk:

- keményacél: 1,7-0,5%,
- közepkemény-acél: 0,5-0,2%,
- lágycél: <0,2%.

#### Vegyi összetételük alapján:

megkülönböztetünk ötvözetlen és ötvözött acélokat:

Ötvözetlen acélnak számít az acél, amely a karbonon kívül nem tartalmaz szándékosan bevitt ötvözőt, ami az acél mechanikai vagy fizikai tulajdonságait befolyásolná.

Az ötvözött acélokban a mindig megtalálható elemekből a normális üzemben elérhető legkisebb mennyiségnél többet, vagy pedig ezeken kívül szándékosan hozzáadott további elemeket tartalmaz.

#### Az ötvözők mennyisége alapján:

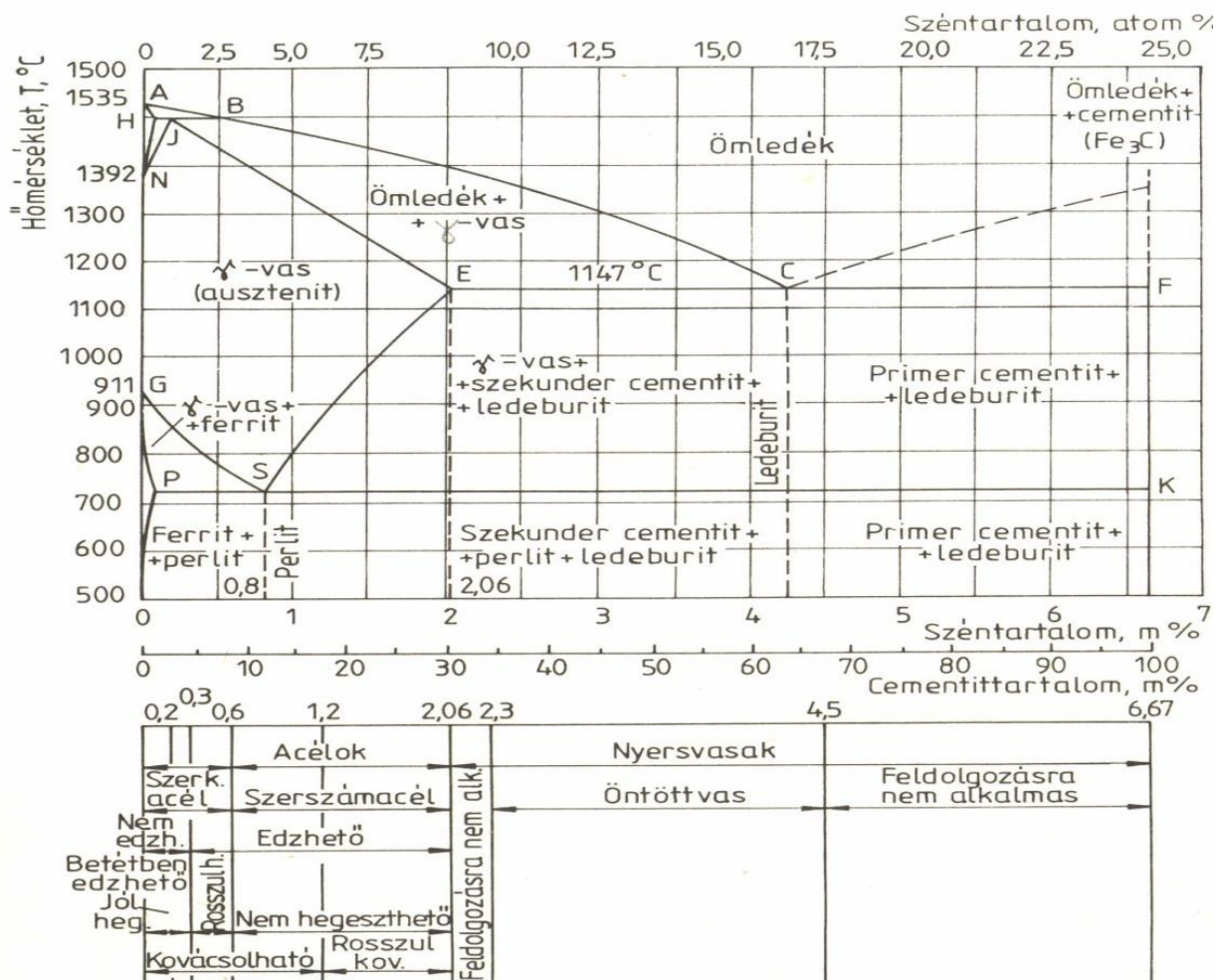
Különbözőfajta és mennyiségű ötvözőkkel az acél olyan tulajdonságait lehet megváltoztatni, mint a keménység, rugalmasság, hajlékonyság, szilárdság, hőállóság, savállóság, korróziómentesség.

A szénacélokban a szénttartalom csökkenésével a keménység csökken, a korrózióállóság nő. A speciális acélok különleges tulajdonságait az ötvözőelemek (Ni, Cr, Co, Mn, V, Ta,Ti) határozzák meg. Az ötvözött acélokban a nemesítő anyag minimális koncentrációja 5%. Ennek alapján megkülönböztetünk :

- \* gyengén ötvözött (max. 5-6% az összes ötvöző mennyisége),
- \* ötvözött (5-10% ötvözőanyag tartalom)
- \* erősen ötvözött (10% feletti ötvözőanyag tartalmú) acélokat.

### **Szén-vas ötvözetek állapotábrája**

A szén-vas ötvözetek állapotábráján (egyensúlyi diagramján) értelmezhetők azok a szövetszerkezeti (fázis) változások, amelyek a különböző széntartalmú közepes sebességgel hűtött (hevített) acélok tulajdonságait határozzák meg. A Fe-C egyszerűsített állapotábrából (111. ábr) megállapítható, hogy a tiszta vas 1.535 °C -on olvad (és dermed meg) és a rendszer széntartalmának növekedésével a dermedéspont az A-B-C vonal mentén fokozatosan csökken, a ledeburit összetételének megfelelően (4,25 % C) minimumértéket ér el, majd C-D vonal mentén nő. Az A-B-C-D vonal fölött a fém olvadt/ömladék állapotban van. A kikristályosodás során a szén a vas-szén ötvözetekben elemi szén és Fe<sub>3</sub>C (cementit) formájában van jelen.



111. ábra. Vas-szén ötvözetek állapotábrája és a széntartalomtól függő acélfajták

### Vas-szén ötvözetek állapotábrája és a széntartalomtól függő acélfajták

<b>Ferrit</b>	Majdnem tiszta vas, $\alpha$ -vas, leglágyabb szövetelem
<b>Cementit</b>	Vas-karbid ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), legkeményebb szövetelem, rideg, nehezen munkálható meg
<b>Perlit</b>	Cementitből és ferritből álló egységes lemezes szövet, jól megmunkálható
<b>Auszténit</b>	Nagy szén oldóképességű (max.2,6%), $\gamma$ -vas kristalit. $\alpha$ -vasból keletkezik GSE fölött.
<b>Ledeburit</b>	Auszténitből és cementitből álló 4,3% C tartalmú eutektikum. Kemény, rideg szövetelem. 723 °C alatt az auszténit elbomlik

A két formának megfelelően megkülönböztetünk grafit rendszert (Fe-C), amelyet stabilis rendszernek is nevezünk és karbid rendszert (Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$ ), amelyet metastabilis rendszernek nevezünk, mivel bizonyos körülmények között elemi szén választható le belőle. A vas-karbidba maximálisan 6,67% szén épülhet be, ha ennél kisebb széntartalmú olvadékot hűtünk színvas (ferrit) és  $\text{Fe}_3\text{-C}$  (cementit) válik ki. Az A-E.C.F

vonaltól a teljes rendszer szilárd halmazállapotban van jelen. A megszilárdult Fe-C ötvözetek szilárd fázisú átalakulásaival (edzés, lágyítás...) a metallográfia foglalkozik.

## Nyersvasgyártás

### Nyersvasgyártás alapanyagai és funkcióik

- \* **vasérc**, és **vas-oxid** tartalmú nagyipari melléktermékek: vastartalmuknál fogva biztosítják a gyártás alapanyag igényét;
- \* **kokszt**: a vas-oxidok kémiai redukciójára, és részben a szükséges magas hőmérséklet biztosítása;
- \* **előmelegített levegő**: a kokszt részleges elégetéséhez az oxigént biztosítja;
- \* **salakképző anyagok**: alkalmazásával az alapanyagokat kísérő szennyezők főként a salakkal távoznak a gyártó technológiai rendszerekből.

Gyakorlati adatok szerint 1 tonna nyersvas előállításának fajlagos anyagigénye: 3,2-4,5 tonna levegő, 1,5-2,5 tonna vasérc, 1-1,2 tonna kokszt, és 0,3-0,9 tonna mészkő.

### Vasérc keletkezése

A vas két vegyértékű állapotban, vízben oldódik. Oxigén jelenlétében három vegyértékűvé válik, ami viszont már oldhatatlan, ezért vegyületeket formálva kicsapódik. Az élet megjelenése előtt nem volt szabad oxigén a Földön, így a vas csak  $Fe^{2+}$  ionállapotban létezhetett, ami oldható volt. A kontinensekről a felszíni vizek által oldott két vegyértékű vas a tengerekbe szállítódott, és ott több százmillió évig halmozódott. A 3,8 milliárd évvel ezelőtt megjelent első fotoszintetizáló szervezetek (kéalgák) oxigént termeltek, amit az ott felgyülemlített hatalmas mennyiségű  $Fe^{2+}$  ion "fogyasztani" kezdte, és ásványok (hematit, sziderit, chamosit) formájában váltak ki.

### A fontosabb vasérc és mangánérc:

**Mánesvasérc:** közetani neve: magnetit, kémiai átlagos összetétele:  $(FeO \cdot Fe_2O_3) Fe_3O_4$ . Színe: fekete. Vasban a legdúsabb érc, (60-72,5%) máneses tulajdonságú, rendkívül tömör szerkezetű, ezért nehezen redukálható.

**Barnavasérc:** közetani neve: limonit, kémiai átlagos összetétele  $2Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$ . A legelterjedtebb vasércféleség, színe világossárgától sötétbarnaig terjed, vastartalma: 25-60%. Magyarországon a rudabányai készletek is ebbe a csoportba tartoznak.

**Vörösvasérc:** közetani neve: hematit, kémiai átlagos összetétele:  $Fe_2O_3$ . Színe: vörös. Előfordulási gyakoriságát tekintve a limonit után következik. Vastartalma nagyobb: 50-70%.

**Vaspát:** közetani neve: sziderit, kémiai átlagos összetétele:  $\text{FeCO}_3$ . Színe: fehér-világossárga. Eredeti vastartalma 30-48%, pörkölést követően 42-58%-ra dúsul.

**Kénkovand:** közetani neve: pirit, kémiai átlagos összetétele:  $\text{FeS}_2$ . színe: aranyárga. Magas kéntartalma miatt közvetlenül nem kohósítható. Pörkölés követően kapott vas-oxid (piritpörk) agglomerálással alakítva lesz felhasználható nyersanyag. Vastartalma: 25-46,6%.

**Vasban dús salakok, revék.** A vasgyártás és feldolgozás melléktermékeiként keletkeznek, és mint másodnyersanyagok kerülnek újrahasznosításra.

## Mangánércsek

A természetben a vasércsek fontos kísérői a mangánércsek, amelyek a vasötvözetek gyártásában fontos szerepet játszanak. Kohósítás folyamán a mangán tartalom 50-70%-a a nyersvasba kerül. A gyakorlatban használt speciális mangán-dús vasötvözetek: a tükörvas és a ferromangán.

Fontosabb mangánércsek:

**Barnakő:** közetani neve: piroluzit, kémiai átlagos összetétele:  $\text{MnO}_2$ .

Más előfordulási formái: braunit vagy pszilomelán ( $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ), hauszmannit ( $\text{Mn}_3\text{O}_4$ ) és mangánpát ( $\text{MnCO}_3$ ). Mangántartalmuk 15-55%, vastartalmuk: 5-20%. Magyarországon: Úrkút és Eplény környékén vannak a mangánbányák.

## Kohókoksiz előállítása nagyhőmérsékletű szénlepelárlással, (kigázosítással)

### Kohókoksiz (coke) előállításának elve

Előállítása, koksizológákban a szén szárazlepelárlásával történik. A szén koksizolása az a technológiai folyamat, amelynek során, szeneket zárt térben, levegőtől elzárta, magas hőmérsékletre hevítve (szén pirolízise) dolgoznak fel. A szén pirolízise során a szenet, oxigéntől elzárva hevítik, amikor gázok (kamragáz), folyékony termékek (kátrány és gázvíz) és szilárd maradék (koksiz) keletkezik abból. A gázvíz technológiai hulladék, míg a másik három értékes terméknek tekinthető.

A technológiai berendezésekben (koksizológák kamra) 1.150 - 1.350°C hőmérsékletű füstgázokkal 14 - 24 órán át közvetve hevítik a szenet.

Az alkalmazott technológia hőmérséklet alapján megkülönböztetünk: kishőmérsékletű (550-600 °C) és nagyhőmérsékletű (1.200 -1.300 °C), szénlepelárlást. Az előbbinek ma már kevés a gyakorlati jelentősége (világítógáz gyártás).

A koksizológákban, melegítés hatására a szén először meglágyul, majd képlékennyé válik. A benne lévő fizikai és kötött nedvesség valamint az illó anyagok eltávoznak, miközben azok polimerizálódnak és krakkolódnak. A nem illó anyagok porózus szerkezetű szilárd koksizsá sülnek össze. A szén magas hőmérsékletű pirolízisét karbonizációnak (*carbonisation*) hívják. A folyamat egyébként felfogható száraz desztillációként is.

A koksizáló kamrában visszamaradó termék a kohó-és öntödei koksiz. Ez a koksiz, mint elsődleges redukálószer kerül felhasználásra nagyolvasztóban, egyben olyan betétanyagként is funkcionál, amely úgy biztosítja a szükséges technológiai hőmérsékletet, hogy rajta keresztül a gázok cirkulálni tudnak a kohóban lévő anyagoszlopban.

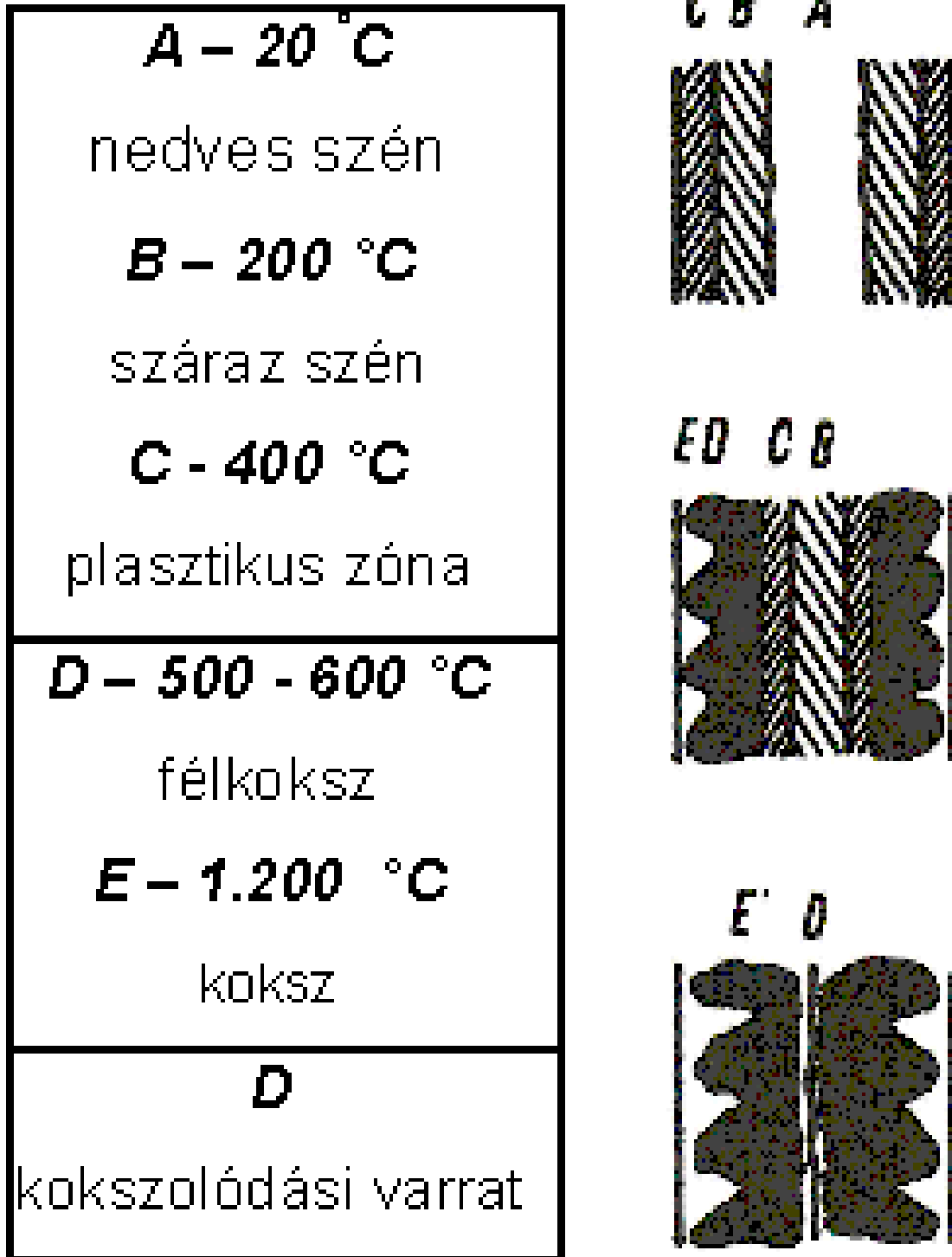
#### A koksizolásra kerülő szenek minősége

A kiindulási koksiz-szén minősége nagyban befolyásolja a keletkezett termékek mennyiségét és minőségét. A gyakorlatban a koksiz-szén minősége különböző minőségű és szemcseösszetételű szénfajták keverékéből áll. A nagyszilárdságú kohászati koksiz előállítására: megfelelő sülőképességű és plasztikus tulajdonságú, rövid lángú, zsíros feketekőszének (zsírkőszének) a megfelelőek, amelyek hamutartalma 7-9%-nál, víztartalma 6-8%-nál, kéntartalma 2-3%-nál nem lehet nagyobb. A koksizolásra alkalmas szeneknek legalább 15-35% gázosítható alkotórészt (illótartalom) kell tartalmazniuk. A koksizolás szempontjából lényeges összesülőképességet a szénben lévő bitumenitek mennyisége és minősége szabja meg.

#### **A nagyhőmérsékletű szénlepárlás folyamatai:**

Amikor a szeneket levegőtől elzárva hevítik a jellemzően az alábbi főfolyamatok játszódnak le:

- 150 °C –ig:** távozik a szénből a fizikailag kötött víz és gáz,
- 200-300°C:** megkezdődik a szén kémiai bomlása, szerkezeti víz, szén-dioxid, kénhidrogén, szénhidrogén gőzök, kilépése jelzi ezt,
- 350-450°C:** hőmérséklettartomány, a kátrányképződés miatt az egyik legfontosabb technológiai szakasz, ugyanis a koksizolásra kevésbé alkalmas szenek bitumene ilyenkor nem olvad meg, hanem elbomlik, és a keletkező gázok a koksizot felfújják, és az "porhanyós" lesz.  
A kátrányképződés mellett NH<sub>3</sub> is keletkezik, a gőzökkel együtt távozik.
- 350-420°C:** között a jól koksizolható szenek bitumenitje plasztikussá, "tésztaszerűvé" válik, amely további melegedésre megszilárdul, és keletkezik, az un. félkoksiz.
- 550–600°C:** a kátrányképződés megszűnik, és csak gázok távoznak: H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>. (a kishőmérsékletű lepárlás tartományának vége)
- 600-800°C:** között a hidrogénfejlődés kerül előtérbe és a már kialakult koksiz zsugorodni kezd. A termikus bomlás mellett másodlagos kémiai reakciók mennek végbe. Az alifás és naftén vegyületek aromizálódnak. A metán CH<sub>4</sub> = C + 2 H<sub>2</sub> szerint bomlik. (A krakk reakciók végeredményeként: a koksizban maradó vagy a kamra falára lerakódó elemi szén és H<sub>2</sub> keletkezik). Ezen a hőmérsékleten a még jelenlevő kátrány erősen tovább bomlik. H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, HCN, H<sub>2</sub>S és CS<sub>2</sub> fejlődés intenzifikálódik. A képződő kátrány sűrűn folyó, sötét színű aromás vegyületekből áll.
- 900-1200°C:** a kamra középsíkjában visszamaradó sűrű kátrányból és a félkoksizból egy úgynevezett koksizolási varrat (112. ábra) keletkezik, amely mentén a koksizolókamrából oldalról kitölt koksiztömeg két részre esik szét.



112. ábra Kocsaszolás

**A fekete kocszén száraz lepárlásának termékei:**

Egy átlagos minőségű kocszolásra alkalmas szénből átlagosan az alábbi mennyiségben keletkeznek termékek:



**27. táblázat. Kőszén összetétele**

	<b>Szén</b>	<b>Koksz</b>	<b>Kátrány</b>	<b>Gáz</b>	<b>Gázvíz</b>
<b>Hamutartalom</b>	8	8	-	-	-
<b>Víz</b>	4	-	-	-	4
<b>C</b>	72	56,5	5,5	10	-
<b>H</b>	5	0,5	0,5	3,5	0,5
<b>O</b>	9	1,0	0,5	3,5	4
<b>N</b>	1	0,3	0,1	0,4	0,2
<b>S</b>	1	0,7	-	0,3	-
<b>Összesen</b>	100 %	67%	6,6%	17,7%	8,7%

**A kohókoksz**

1 tonna szénből 650–800 kg koksz és kb. 350-500 m<sup>3</sup> kamragáz (kb. 150 - 200 kg) keletkezik. Azonban meg kell jegyezni, hogy a kokszhozam, illetve a kamragáz termelés és összetétel nagyban függ a szén összetételétől és a kokszolási időtől.

A kohókoksz minősége

A jó kohókoksz főbb jellemzői: ezüstszerű színű, nem olyan tömött, mint a gázkoksz, nyomószilárdsága legalább: 140-175 kg/cm<sup>2</sup> [800 N/cm<sup>2</sup>], hamutartalma legfeljebb 8-11 %, C-tartalma: legalább 89% (száraz kokszban), kis illóanyag tartalom: (max.1-1,5%), S-tartalma: <1%, nedvességtartalma: <6 %. Gyúléspontja: ~640 °C, fűtőértéke: legalább 30.000 kJ/kg legyen. Porozitása: 48-54 %, ömlesztett térfogatsúlya: 430-470 kg/m<sup>3</sup> értékek közé essen. 40 mm-nél kisebb darabokat ne tartalmazzon, dobszilárdsága (Micum-próba): pedig legalább 75-85 % legyen.

**A kamragáz (kokszgáz)**

Fő alkotói: H<sub>2</sub> ~ 50 tf%, CH<sub>4</sub> ~ 33 tf%, és kisebb mennyiségben C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, CS, COS, HCN, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, benzol és homológjainak, valamint naftalinnak és homológjainak gőzei. A kamragázok H<sub>2</sub>S tartalma 50 mg/Nm<sup>3</sup> -1.000 mg/Nm<sup>3</sup> között változik. Fűtőértéke: 21.000 KJ/Nm<sup>3</sup>. Kéntelenítést követően energiataralma gazdaságosan hasznosítható.

**A gázvíz**

Jelentős mennyiségű ammónia (ezért lúgos) mellett főként kénhidrogént (H<sub>2</sub>S), szén-dioxidot és fenolszármazékokat tartalmaz.

**A kőszénkátrány**

A keletkezett kőszénkátrány rendkívül értékes összetevői miatt fontos ipari nyersanyag. Mennyisége a kiindulási száraz szén ~4-6,5%-a. Összetételében aromán szénhidrogénekből és heterociklusos vegyületekből áll. Főként benzol és homológjai, többgyűrűs aromás kondenzált vegyületek, piridin és homológjai, a kinolin, valamint három- és többgyűrűs nitrogéntartalmú vegyületek és ezek homológjai, tiofén és többgyűrűs kéntartalmú vegyületek és homológjai.

### A kőszénkátrány feldolgozása

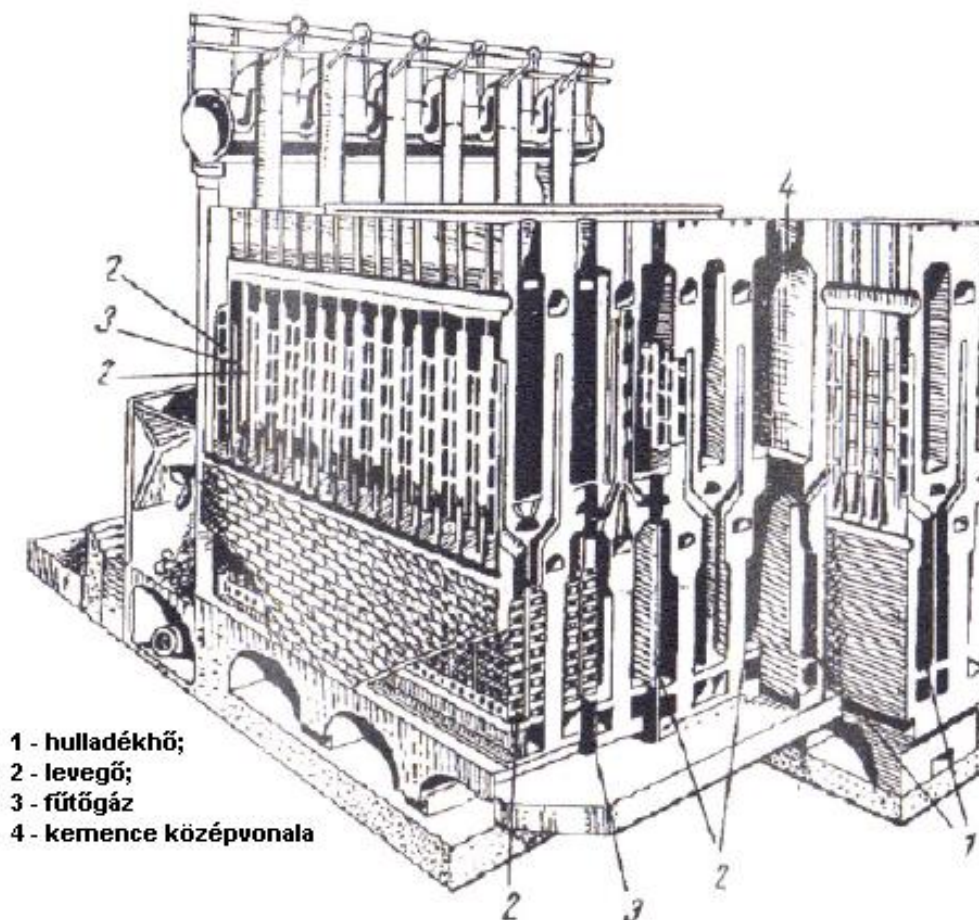
A feldolgozás frakcionált vákuumdesztillációval történik. A vákuumdesztilláció termékei könnyűolaj (80 -180 °C), közepolaj (180 - 230 °C), nehézolaj (230 - 270 °C), antracénolaj (>270 °C), a desztilláció maradéka a szurok.

## **A kokszyártás fontosabb technológiai berendezései**

A nagyhőmérsékletű kőszénleparlást kokszoló kamrakemencékben hajtják végre. A kokszolómű részei:

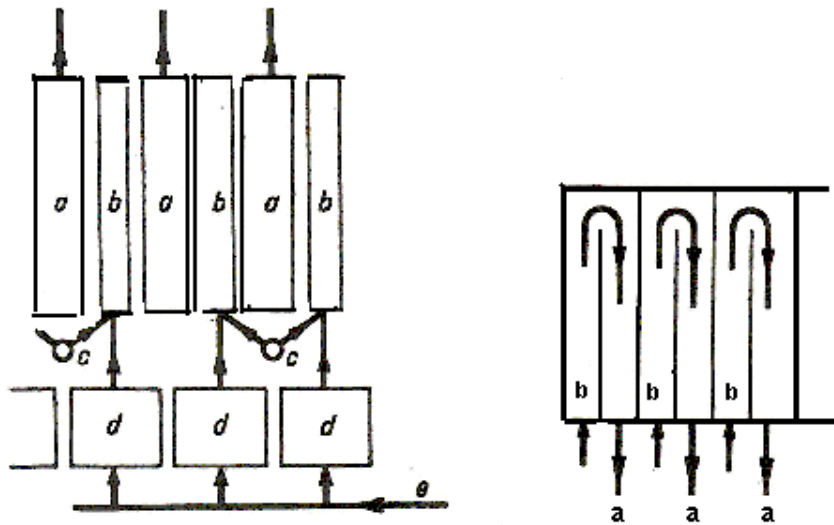
- \* kokszoló kamrák (lehetnek vízszintes vagy függőleges elrendezésűek)
- \* fűtőjáratok
- \* regenerátorok
- \* segédberendezések (anyagmozgatás és a környezetvédelem készülékei)

A kokszolókemencében a lepárló és fűtőkamrák egymás mellett helyezkednek el úgy, hogy egy kamrát két oldalról két fűtőjárat (fűtőfal) fog közre, amelyet technológiai gázzal fűtenek. A kamrák rendszerint szakaszos üzeműek és vízszintes elrendezésűek (113. ábra). Folyamatos üzemmódban függőleges elrendezésű kamrák üzemeltethetők.



**Kokszolókemence metszeti ábrája**

**113. ábra Kokszolókemence**



114. ábra A kokszoló kamrák elvi működését szemléltető séma:

A kamrakemencék energia-hatásfokának javítása a füstgázok maradó hőtartalmával regeneratív hőcserélőben a tüzeléshez szükséges levegőt (esetleg a gázt is) előmelegítik. A tüzelőtér függőleges falakkal szakaszokra van osztva.

Az egyenletes hőmérséklet elérése céljából az egyik járatban felfelé halad az égő gáz-levegő elegy, s ennek füstgáza a szomszédos járatban lefelé haladva lép ki a kamratérből, majd az előző ciklusban (a levegő előmelegítéskor) lehűlt regenerátort melegíti vissza (melegíti fel).

## A KOKSZGYÁRTÁS TECHNOLÓGIÁJA

E fejezet tárgyalásánál Az Európai Unió **96/61/EC** számú direktívájában: [European Commission (továbbiakban: **EC**) Integrated Pollution Prevention and Control (továbbiakban: **IPPC**) Best Available Techniques (**BAT**) Reference Document (továbbiakban: **BREF**) Production on of Iron and Steel [2001. December] (továbbiakban: **PIS**)] foglaltakat vettük irányadóan figyelembe.

Az összes információt tartalmazó IPPC BAT Referencia Dokumentum elérhető: <http://eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm>

A szakaszos üzemű kokszgyártás elvi folyamatrendszerét foglalja össze a 116. ábra.

A mai korszerű, metallurgiai kokszot előállító kokszolóművek, az ún. melléktermék-kinyeréses eljárásokat alkalmazzák, ahol a koksz, mint fő termék mellett termelődő kamragázokat a rendszerhez csatolt, kiegészítő technológiákban megtisztítják a szennyezőktől és kinyernek rendkívül értékes melléktermékeket.

A technológiai eljárás összetett folyamat, amelynek részei jól elhatárolhatók. A kokszolóműhöz tartozó fontosabb üzembrészek:

- \* szénelőkészítő,
- \* kokszolóblokk (szénadagolás, fűtés, kokszolás),
- \* kokszoltó (nedves-, v. szárazoltás), kokszkezelés és osztályozás,
- \* gáztisztító üzem (kamragáz összegyűjtése, kezelése),

- \* vegyi melléktermék hasznosító üzem (kátrány kinyerő és desztilláló, naftalin, benzol-toluol-xilol (BTX) kinyerő és szétválasztó).

### **Szénelőkészítés**

A szénelőkészítő üzemben a bányákból beszállításra kerülő különböző minőségű kokszolható kőszeneket fogadják, tárolják, az összeállítási előírás ("gyártási recept") szerint elegyítik, aprítják majd az üzemelő kokszolóblokkhoz tartozó, széntornyokba (vagy bunkerbe) töltik.

### **Kokszolás művelete**

A legelterjedtebben alkalmazott technológiákban a kokszgyártás recirkulációs elvű, regeneratív fűtésű multikamrás kemenceblokkban, történik. A kokszolási folyamat a kamrák töltésével kezdődik. A kokszolás előtt a széntornyból a szénelegyet a töltőgép tölcéséreibe engedik. Majd a töltőgép teleszkópos megoldással, a töltőnyílásokon keresztül, a soron következő üres kamrát betölti. A kamrába került szén a kamrák közötti fűtőfal hőjét átvéve fokozatosan felmelegszik, és a szén illóanyagai a központi gázgyűjtő rendszeren keresztül távoznak.

A kemenceblokkokat tisztított kamragázzal, torokgázzal vagy generátorgázzal (esetleg azok elegyével) fűtik. A betöltött szénelegy a megfelelő kigázosítási idő (16-24 óra) alatt és megfelelő hőmérsékleten (900 -1.200 °C) koksszá alakul át. A kamrákban lejátszódó bonyolult fizikai és vegyi folyamatok eredménye a szilárd koksz és a nyersgázok. A kokszolási folyamat végén a kamrát a gázgyűjtő rendszerrel leválasztják, a kamraajtókat leveszik, a kamrákból az izzó kokszot kitológép tolja ki a pajzskocsi vezetőkosarán keresztül, ezt követően 100°C alá hűtik.



**kokszolókamra  
blokk**



**kokszkitoló  
szerkezet**



**friss koksz**

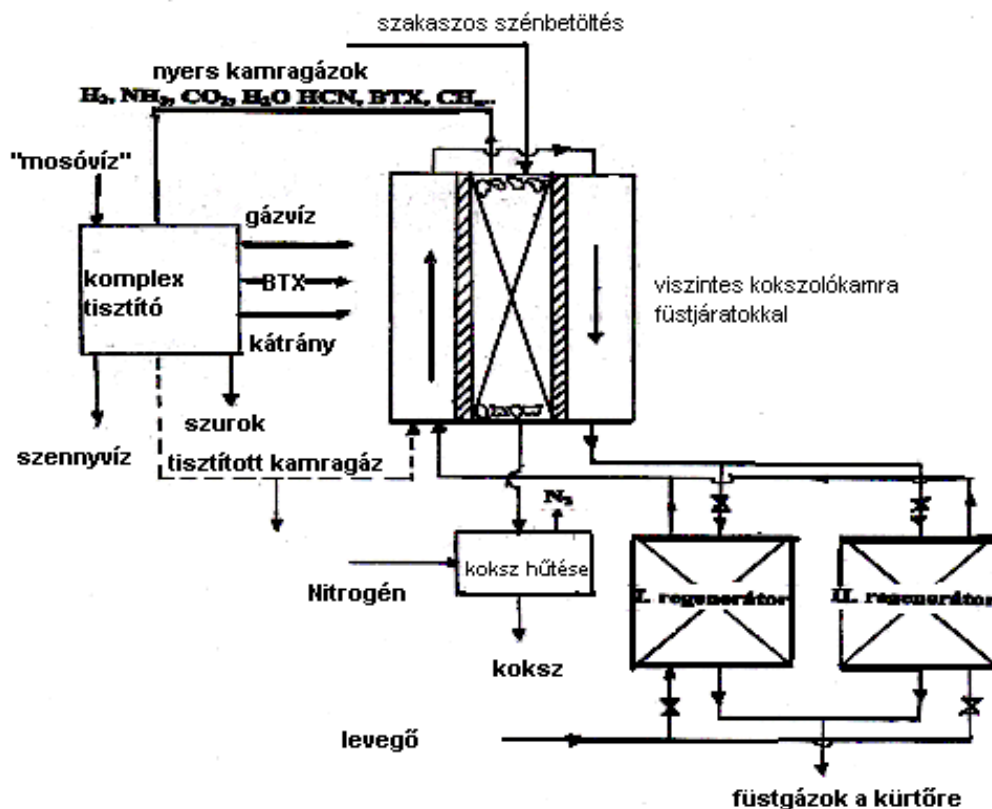
*115. ábra Kokszolás lépései*

### **Kokszoltás**

Az oltótornyban a kokszot nagy mennyiségű vízzel leoltják. A víznek az a része, ami nem párolog el, összegyűjthető és felhasználható a következő oltásnál, megelőzve ezzel az ipari szennyvíz kibocsátást.

A száraz kokszoltásként ismert módszernél az oltókocsi a forró kokszot egy függőleges oltókamrához viszi. Inert oltógáz (általában ipari nitrogén, ritkábban argon) cirkulál a levegőtől elzárt kamrában, így megakadályozva a koksz égését a hűtése

során. Az inert gázt hőcserélőben lehűtik, a hőenergia visszanyerése és újra felhasználás céljából.



116. ábra Kokszoltás

### Vegyí üzem

A vegyi üzem nem tartozik szorosan a kokszgyártási technológiához, ugyanakkor a technológia során keletkező kamragázok kezelésében fontos szerepet játszik. A vegyi üzem technológiailag az alábbi főbb részekre tagolható:

- \* Gázkondenzációs üzembrész
- \* Gáztisztító üzembrész
- \* Benzolkinyerő üzembrész

#### Gázkondenzációs üzem

A kemence üzemben keletkező 700-750 °C hőmérsékletű nyers kamragázt a gázgyűjtő csövekben öblítővíz bepermetezés hatására 80-85 °C-ra lehűl. A gázgyűjtő csőből a lehűtött, nyers kamragázt az exhausztor (gázelszívó berendezés) szeparátoron, előhűtőkön és elektromos kátrányleválasztókon keresztül szívja el, és szállítja további gáztisztításra.

#### Gáztisztító üzembrész

Az exhausztorból kilépő gáz utóhűtés után kénhidrogén- és ammóniamosó tornyokon halad át. A telített mosófolyadékból vízgőz desztillációval nyerik ki az ammóniát és a kénhidrogént. A kénhidrogén gőzök az előbontó reaktorba kerülnek, ahol parciális égetéssel beállítják a Claus-reakció sztöchiometriai arányát. A reakció gázokat katalitikus úton a Claus reaktorokban elemi kénné alakítják át. A kinyert ammóniát az ún. ammóniaégetőbe vezetik.



### Benzolkinyerő üzemrész

A kénhidrogén-, és ammóniaentesítést követően a kamragázból kátrányolaj felhasználásával, abszorpcióval nyerik ki a BTX (benzol-toluol-xilol) frakciót. A telített olajból vízgőzzel hajtják ki a kinyert anyagokat, melyet desztilláció követ. A végterméket nyersbenzolként értékesítik.

### **Technológiai vízkezelés**

A desztillációval történő ammóniaeltávolítás után a kilépő szennyvíz, különböző szerves (pl. fenolok) és szervesetlen vegyületeket (pl. maradék ammónia és cianidok) tartalmaz. Ezek a vegyületek negatív hatással vannak a befogadó vízére, közvetlen bevezetés esetén. A lepárló folyadékát ezért a bevezetés előtt rendszerint technológiai vízkezelő telepen kezelni szükséges. A koksoló üzem vízáramait foglalja össze a 117. ábra.

## **A koksolómű környezeti hatásai**

A koksolóblokk elvi távlati rajza a főbb szennyező-források bejelölésével a 118. ábra, a koksztitolás módszerét és ezen művelet környezetszennyezéseit a 119. ábra mutatja be.

Az egyes technológiai műveletek alatt kibocsátott szennyező anyagok mérése és meghatározása az esetek többségében nagyon nehéz, különösen olyan diffúz forrásoknál, mint a koksolóblokkok vagy szén és koksztároló depók. Ugyanakkor a koksolómű legszámottevőbb környezeti hatásai éppen ilyen nehezen mérhető módon jelentkeznek. Könnyebben meghatározhatók az emissziók azon esetekben, amelyeknél a szennyezőanyag kilépése kéményen, kürtőn vagy csővezetéken keresztül történik.

### **A keletkező emissziók**

#### Szénelőkészítő üzem

vasbuktató, előtörő, szénszállító szalagok, zárt szénraktár, nyitott szénraktár, szénadagoló bunkerek, finomtörők, keverő berendezés.  
Szennyező anyag a szénpor.

#### Koksolóblokk

széntorony, kamratöltés, koksztitolás.

Szennyező anyag a szén-, ill. kokszipor, valamint a füst.

Környezetvédelmi szempontból jelentős szennyezőforrás a kamratöltés, ahol 1 t szénre vetítve átlagban 1 kg szén-, ill. kokszipor, valamint füst kerül a levegőbe.

Koksztitoláskor képződő por- és füstmennyiség 1 t kocszra vetítve 0,15 kg.

#### Koksosztályozó üzem

koksziportalanítás, esetenként törés, osztályozás, bunkerbe adás, ürítés, anyagmozgatás.

Szennyező anyag a kokszipor.

#### Gáztisztító és mellékterméküzem

benzolmosás és -kiforrálás, a gáz kátrány- és naftalinmentesítés.

Szennyező anyag a kamragáztisztítás során a kén-dioxid, szénhidrogének, szerves és szervetlen illóanyagok.

### A káros környezeti hatások csökkentése

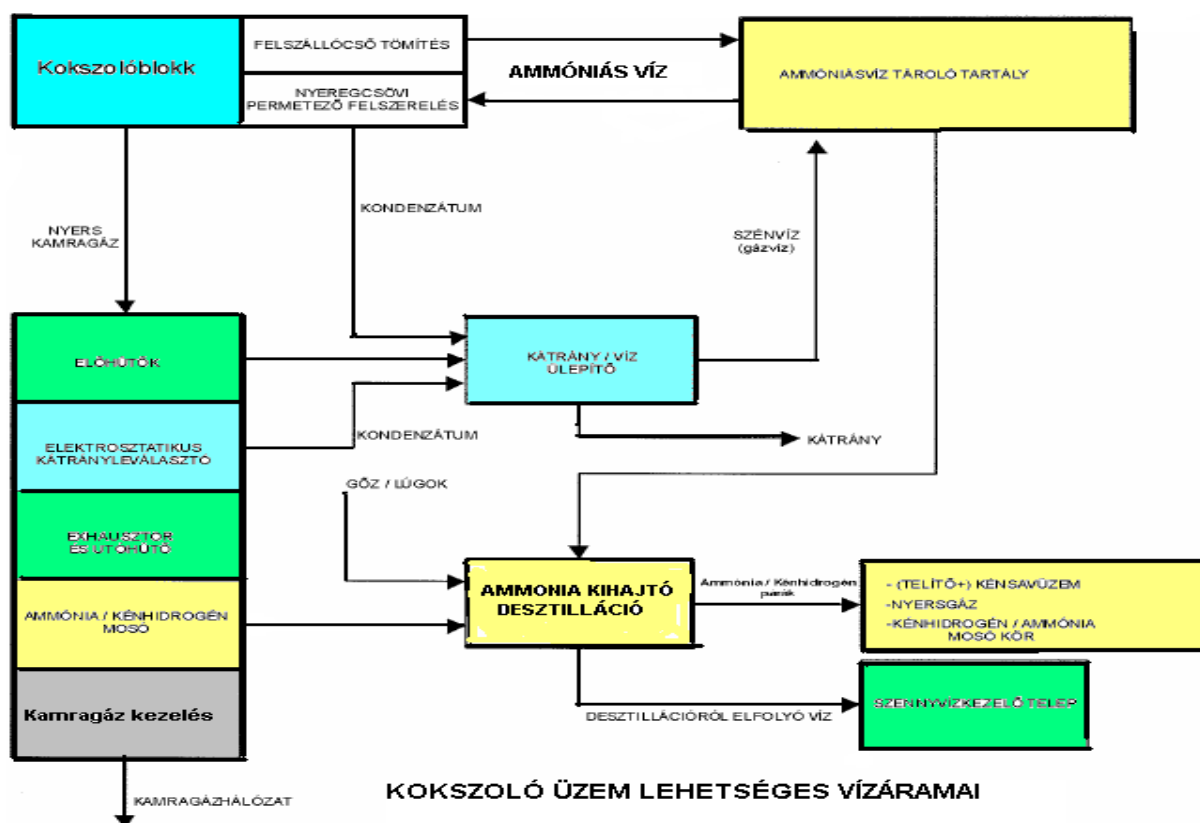
A technológia során a levegőbe történő emisszió minimalizálására kell törekedni. A keletkező káros szennyező anyagok közvetlen környezetbe jutása a technológiai berendezések hatékony tömítettségének biztosításával, burkolásával, elszívóernyők, helyi porelszívó, -leválasztó rendszerek kialakításával előzhető meg.

A **BREF** technológiai előírásainak alkalmazásával: a szilárd kocsz részecskék emissziójánál: < 5g / tonna érték érhető el.

Szennyvíz. Nagy jelentősége van a szennyvízkezelésnek. Egy kocszolómű naponta kapacitásától függően 1.200 – 4.000 m<sup>3</sup> erősen szennyezett, veszélyes hulladéknak minősülő, szennyvizet "állít elő".

A főbb szennyezők mennyiségi adatai 1 liter szennyvízre vonatkoztatva az alábbiak:

fenol	50 - 1.200 mg
rodanid	40 - 600 mg
cián(CN <sup>-</sup> )	10 - 100 mg
ammónia	200 - 1.200 mg
kénhidrogén	20 - 200 mg



117. ábra Kocszoló üzem vízármai

Ezek hatásos megtisztítása csak integrált, többfokozatú [nitrifikációs/denitrifikációs] biológiai szennyvízkezelés alkalmazásával lehetséges. A dunaújvárosi

kokszolóműben a negatív környezeti hatások hatékony kiküszöbölésére alkalmas szennyvízkezelési technológia az alábbi fázisokból áll:

- a/ Kémiai előtisztítás (ciánmentesítés, koloidképződéssel járó oxidációs és polimerizációs folyamatok, flokkulálószerke bekeverése, pehelyképződés irányítása)
- b/ Biológiai tisztítás (fenol-, és rodanid mentesítés aerob mikroorganizmusokkal).
- c/ Iszapkezelés (szervetlen iszap, biológiai fölös iszap, biológiai felúszó iszap kezelése). Az iszaptartályokból kikerülő sűrített iszapot a szénelőkészítő üzem hasznosítja.

A **BREF** ajánlása szerint elérendő tisztítási fok:

COD eltávolítás	> 90%
Szulfid	< 0.1 mg/l
PAH <sup>9</sup> (6 Borneff)	< 0.05 mg/l
CN <sup>-</sup>	< 0.1 mg/l
fenolok	< 0.5 mg/l
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> és NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> összesen	< 30 mgN/l
Szuszpendált szilárd anyagok	< 40 mg/l

Ezek a koncentrációk 0.4 m<sup>3</sup>/t kocsz specifikus szennyvízáramlásra vonatkoznak.

Kamragáz. Egy tonna kocsz előállítása során 500 m<sup>3</sup> nyers kamragáz is keletkezik. A melléktermékek eltávolítása előtt 1 m<sup>3</sup> nyers kamragáz az alábbi anyagokat tartalmazza:

kátrány	100 - 120 g
naftalin	6 - 8 g
ammónia	6 - 8 g
kénhidrogén	4 - 6 g
benzol	30 - 40 g
ciánhidrogén	1 - 2 g

A tisztítás folyamata négy fő lépésből áll:

- a/ primer tisztítás (hűtés, elektrosztatikus úton történő kátránytalanítás)
- b/ elszívás (exhausztorok felépítése, diffúzorok beiktatása, védelmi rendszerek)
- c./ ammónia- és kénhidrogén kinyerés (mosóvíz feldolgozás savtalanítással, tömény ammóniavíz előállítása, és deszorbeálás, ammóniaégetés és kéntermelés)
- d/ Naftalin, benzol és homológjainak (toluol és xilolok) kinyerése (benzolmentesítés és nyersbenzol előállítás)

A kocszoló-kemencékben keletkező gázok kéntelenítése, vagyis a H<sub>2</sub>S emisszió minimalizálása kiemelt fontosságú, és nemcsak magukban a kocszoló-kemencékben, hanem minden más olyan üzem esetében is, ahol a kamragázt felhasználják, mint tüzelőanyagot.

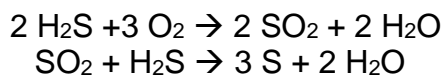
---

<sup>9</sup> PAH= Policiklikus aromás szénhidrogének



A kamragázból a kátrány- és naftalinmentesítés után az  $\text{NH}_3$ -t és a  $\text{H}_2\text{S}$ -t kimossák, majd a  $\text{H}_2\text{S}$  -ből pikkelyes ként gyártanak.

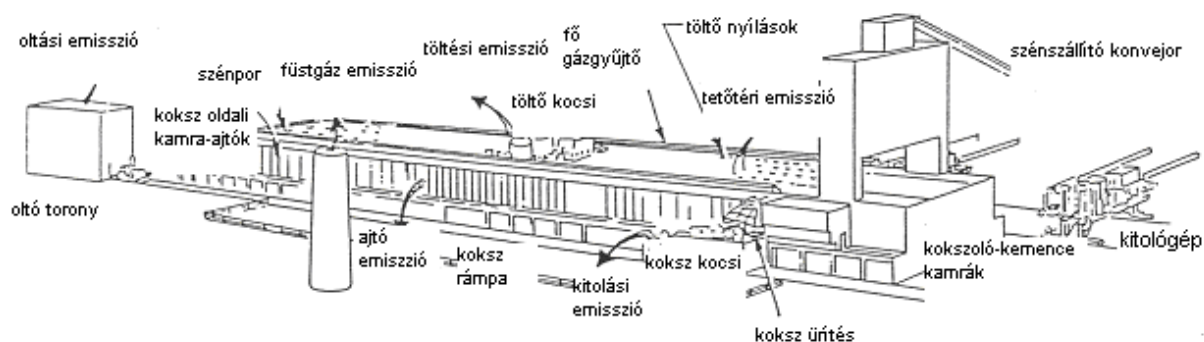
A ként leggyakrabban az ún. Claus-eljárással nyerik ki:



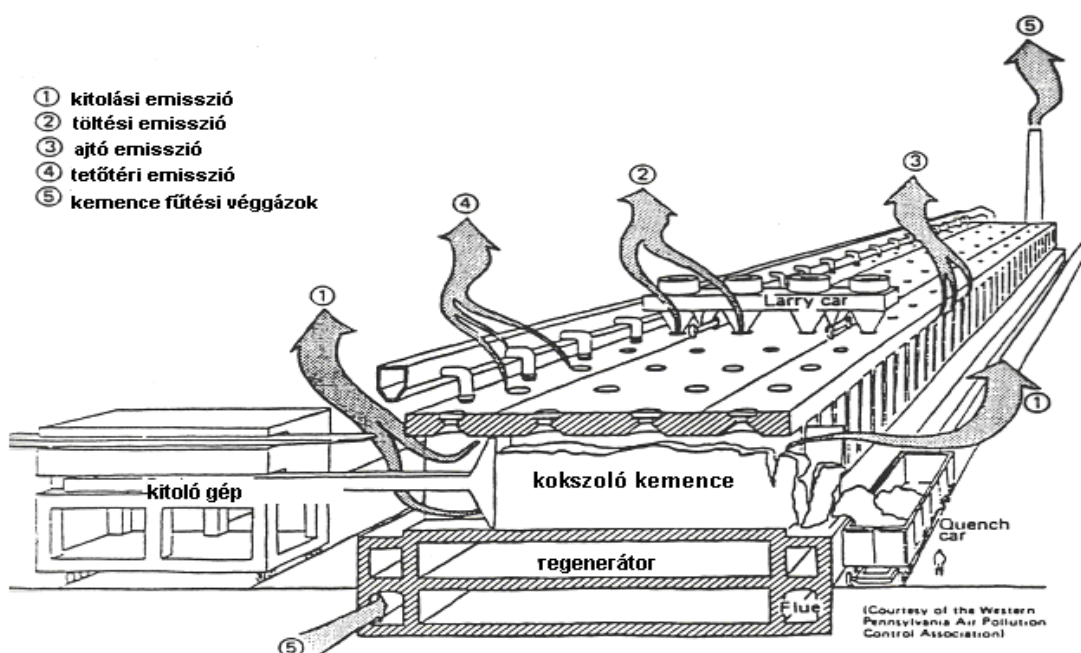
A **BREF** ajánlása szerint koksoló-kemencéből származó gázoknak az oxidatív kéntelenítést követő elérendő tisztítási foka:  $< 500 \text{ mg H}_2\text{S}/\text{Nm}^3$ .

A kinyert ammóniát kazánokban elégetik, és hasznosítható gőzt fejlesztenek.

A 118. ábra sematikus rajza egy koksolóblokknak, a főbb emisszió források feltüntetésével.



118. ábra. A koksológáz elvi távlati képe és szennyezési forrásai



119. ábra. Koksoló üzem emissziós forrásai

## A vas előállításának elméleti alapjai

A vasgyártás nyersanyagai a vasérc, a salakképző anyagok, a koks és a levegő. E négy nyersanyag kémiai és fizikai-kémiai kölcsönhatása vezet el a vasképződéséhez. A vasérc kémiai átalakítása alapvetően redukációs folyamat.

A nagyolvasztóba beadagolt nyersanyagok révén, számtalan elem vegyülete kerül be a rendszerbe. Ezen elemek oxidjai közül természetesen a vas-oxid a legfontosabb. Ha az elemeket az oxigénhez való kémiai affinitásuk sorrendjében írjuk fel, az alábbi sorozatot kapjuk:

H, C, Ca, Mg, Al, Si, S, P, Mn, **Fe**, Co, Ni, Zn, Pb, Cu, Hg, Au, Pt

Amennyiben az ércet kísérő meddő kőzetben a vastól jobbra felírt elemek (kobalttól (Co) a platináig (Pt)) oxidjai jelen vannak, azok előbb fognak redukálódni, mint a vas-oxid. Tehát ezek a szennyezések amennyiben jelen vannak, úgy a gyártás folyamán a vasba fognak kerülni (un. *maradó elemek*)

A vastól balra lévő elemek oxidjai (mangántól (Mn) a hidrogénig (H)) egyre nehezebben képesek redukálódni. A vas után legkönnyebben redukálható mangán (Mn) és foszfor (P) és kén (S) elemi állapotban bekerülnek a vasba. A P és S jelenléte a gyártott vas (nyersvas) tulajdonságait előnytelenül befolyásolják. Ezért a technológia későbbi folyamataiban gondoskodni kell az eltávolításukról, vagy mennyiségüknek a jelentős csökkentéséről.

A szilíciumtól (Si) balra lévő elemek (Al, Mg, Ca) viszont már nem kerülhetnek bele a vasba. A nagyolvasztóba adagolt vasércet kísérő meddő kőzetek ennek következtében főként kalcium (Ca)-alumínium (Al)-szilikát vegyületeket képeznek egymással, amelyek a képződő salak fő alkotórészei lesznek.

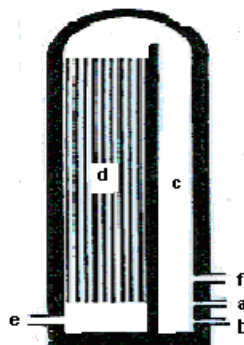
A rendszerben lévő szén (C) ötvözetet képez a vassal, amelynek mennyisége döntően befolyásolja a gyártott vas minőségét és annak tulajdonságait.

## Levegőelőmelegítés

A nagykohóba beadott kokszt elégetéséhez szükséges oxigénnek kb. 15 %-át az ércek oxigéntartalma fedezi. A vas megolvasztásához szükséges magas hőmérséklet eléréséhez szükséges a kohóba bevezetett levegő előzetes előmelegítése (ezt a hőmennyiséget nem a rendszerből kell fedezni). Erre a célra a vaskohászatban szinte kizárólagosan a Cowper-rendszerű regeneratív léghevítőt használják. (120. ábra).

A Cowper léghevítő regenerátor lemezköpennyel burkolt, tűzálló falazattal bélelt, samott rácsozatos vagy kerámiatöltetű 25-35 m magas torony. A kör vagy tojásdad szelvényű kamrába az **a** - helyen a torokgáz, a **b** -helyen a levegő lép be. Az elegy a **c** -aknában ég el és áthaladva az d samott-rácsozaton 900-1.000 °C -ra melegíti azt, majd **e**-helyen távozik.

Amikor a rácsozat eléggé felmelegedett, ellenkező **e**-irányból vezetik át a kohót „tápláló” levegőt, amely 800 °C hőmérsékleten a **f**-helyen hagyja el a kamrát.



120. ábra Levegőelőmelegítő

Mivel a Cowper típusú regeneráló léghevítők szakaszosan működnek egy nagyolvasztóhoz legalább 2-3 kamra szükséges. (Kettő váltakozva üzemel egy harmadikat, pedig új tűzálló béléssel látnak el.)

## Salakképző anyagok

### A salakképzés célja

A jó minőségű nyersvas előállításának feltétele, hogy nemkívánatos szennyezések ne kerüljenek bele a nagyolvasztóból csapolt vasba. Ezért a vasérc kísézőközeteit, szennyezőit, a kokszt hamualkotóit könnyen olvadt állapotú, a vastól fajsúly alapján elkülönülő, salakká kell a kohóban alakítani.

### Salakképző anyagok

Szükséges mennyiség 1 tonna nyersvashoz, az érc és a kokszt minőségétől függően kb. 0,4 -0,9 t.

A legjobb salakképző anyagok a tiszta mészkő (mészkő-limestone:  $\text{CaCO}_3$ ) és a ritkábban alkalmazott dolomit [ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ]. A salak olvadáspontjának közel meg kell egyeznie a nyersvas olvadáspontjával.

### A salak (slag) szerepe a nagyolvasztóban

A kohósalak nagy mennyiségben keletkezik, a fajlagos mennyiség: 0,5-1,1 t /1 t nyersvas. A salak a szennyezések eltávolításán túl többes funkciót is ellát:

- \* megvédi az olvadt fémet a visszaoxidálódástól (reoxidációtól),
- \* kémiaileg tisztítja a vasat, mert eltávolítja a kénszennyezés egy részét, (CaS oldódik a salakban)
- \* fizikailag tisztítja a megolvadt fémcseppek felületét, így azok könnyebben egyesülnek.

A kohóból kikerülő olvadt salakot „salak-kocsikon” viszik ki a salaktárolóra (**slag pit**).

### A salakok minőségének megítélése

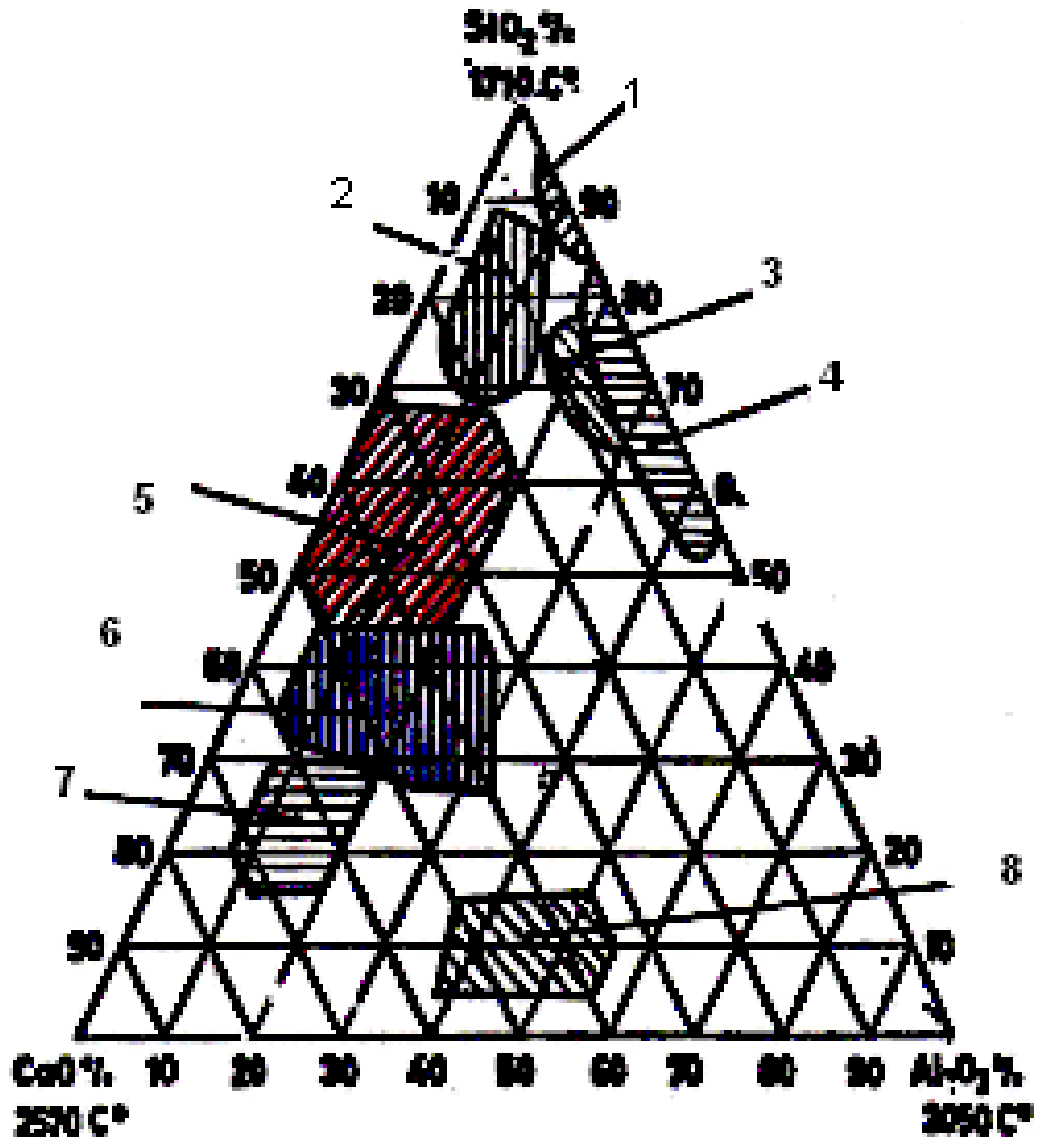
A salak fő alkotói: „kovasav” ( $\text{SiO}_2$ ), timföld ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), „mész” ( $\text{CaO}$ ), kisebb mennyiségben  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{BaO}$ .

A salakok minőségének megítélésére a **salakszámot**, a bázikus és savas alkotók viszonyszámát használják:

$$p = \frac{(\text{CaO} + \text{MgO})}{(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)} \times 100, (\%)$$

( $p \sim 100$  közömbös;  $p > 100$  bázikus;  $p < 100$  savas)

A háromalkotós ( $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ ) rendszerben előforduló salakvegyületek összetételéről és likvidusz felületeiről a Rankin-diagram ad tájékoztatást, amelyben a  $\text{CaO}$  csökkenti, a  $\text{SiO}_2$  és az  $\text{Al}_2\text{O}_3$  növeli az olvadáspontot. Mivel minden további alkotó csökkenti az olvadáspontot, a reális kohósalakok a (121. ábra) becsülhetőnél általában 100 –150 °C -al kisebb hőmérsékleteken olvadnak.

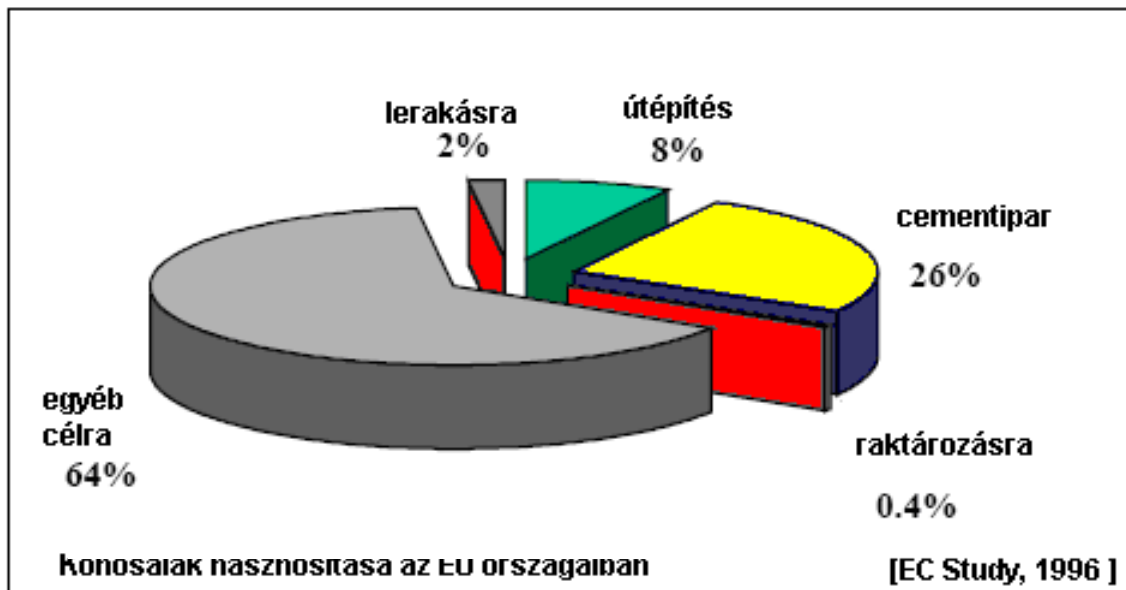


121. ábra. A kohósalakok, az üveg- és a kerámiaanyagok elhelyezkedése a  $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$  rendszerben:

1: kvarcit, 2: üveg, 3: porcelán, 4: samott, 5: savanyú nagyolvasztósalak, 6: nagyolvasztósalak, 7: portlandcement, 8: timföldcement

### Kohósalakok felhasználása

A nagy mennyiségben keletkezett kohósalak tartós elhelyezése (deponálása) jelentős környezeti veszélyforrás. A kiporzás csökkentésére korszerű üzemekben granulálják a salakot, majd így kerül tovább hasznosításra. Sokrétű felhasználásként hőszigetelő salakgyapot, cementgyártási adalék, habsalakként könnyűbeton komponens, üveggyári adalék, megőrölve talajjavító meszes műtrágya készül belőle. A salaktárolók anyagát útépitéseknél engedélyezik környezetkímélő módon felhasználni.

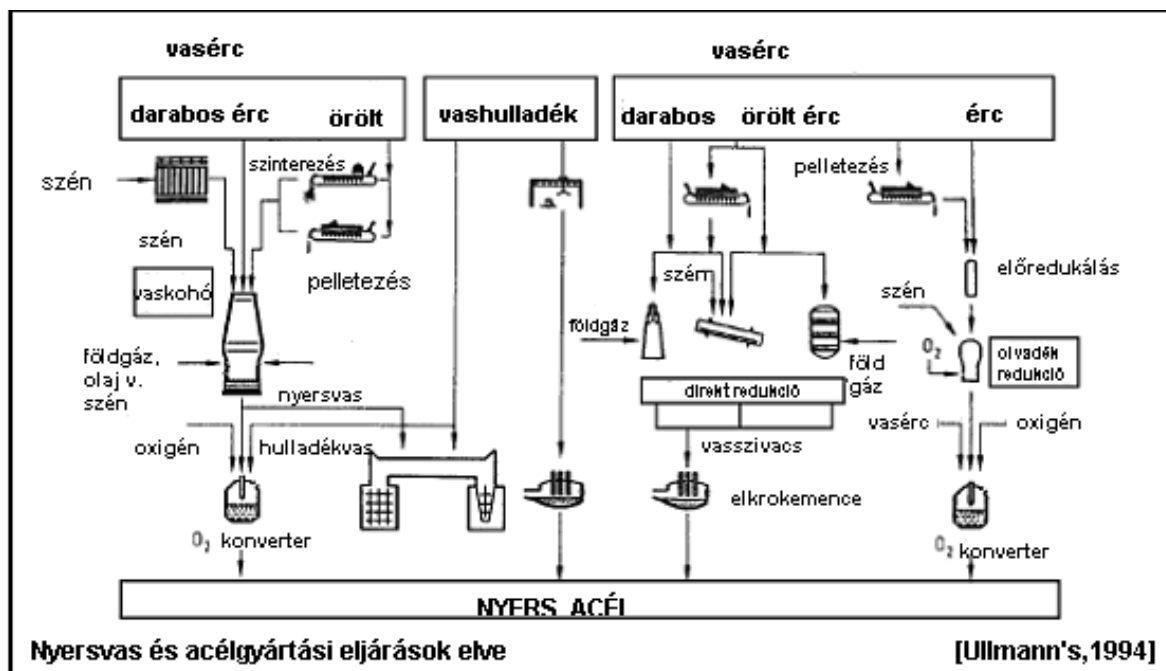


122. ábra. Kohósalakok hasznosítása az EU országokban

## Gyártástechnológiák és berendezések

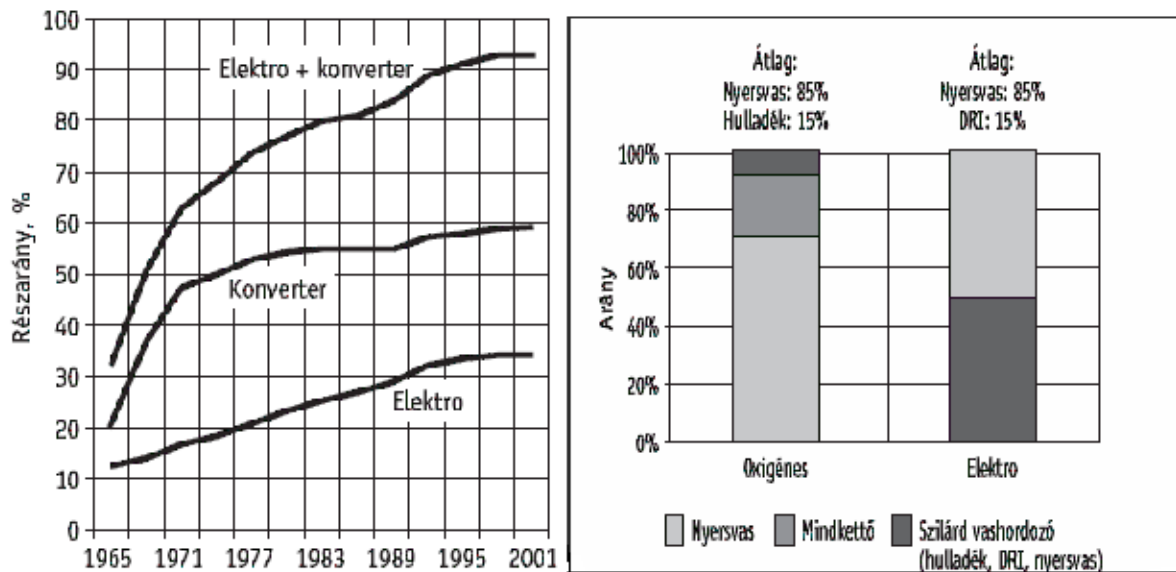
Jelenleg négy különböző, alapvető vas-acélgyártási eljárást alkalmaznak:

- \* Integrált vas-acélgyártás, amely a "klasszikus" nagyolvasztó (**Blast furnace**), és oxigén-konverteres (**Basic oxygen furnace**) acélgyártás kombinációja,
- \* vashulladék (**Scrap**) közvetlen olvasztása elektromos ívkemencében (**Electric arc furnace=EAF**),
- \* olvadék redukció
- \* Közvetlen redukció (**Direct reduced iron= DRI**)



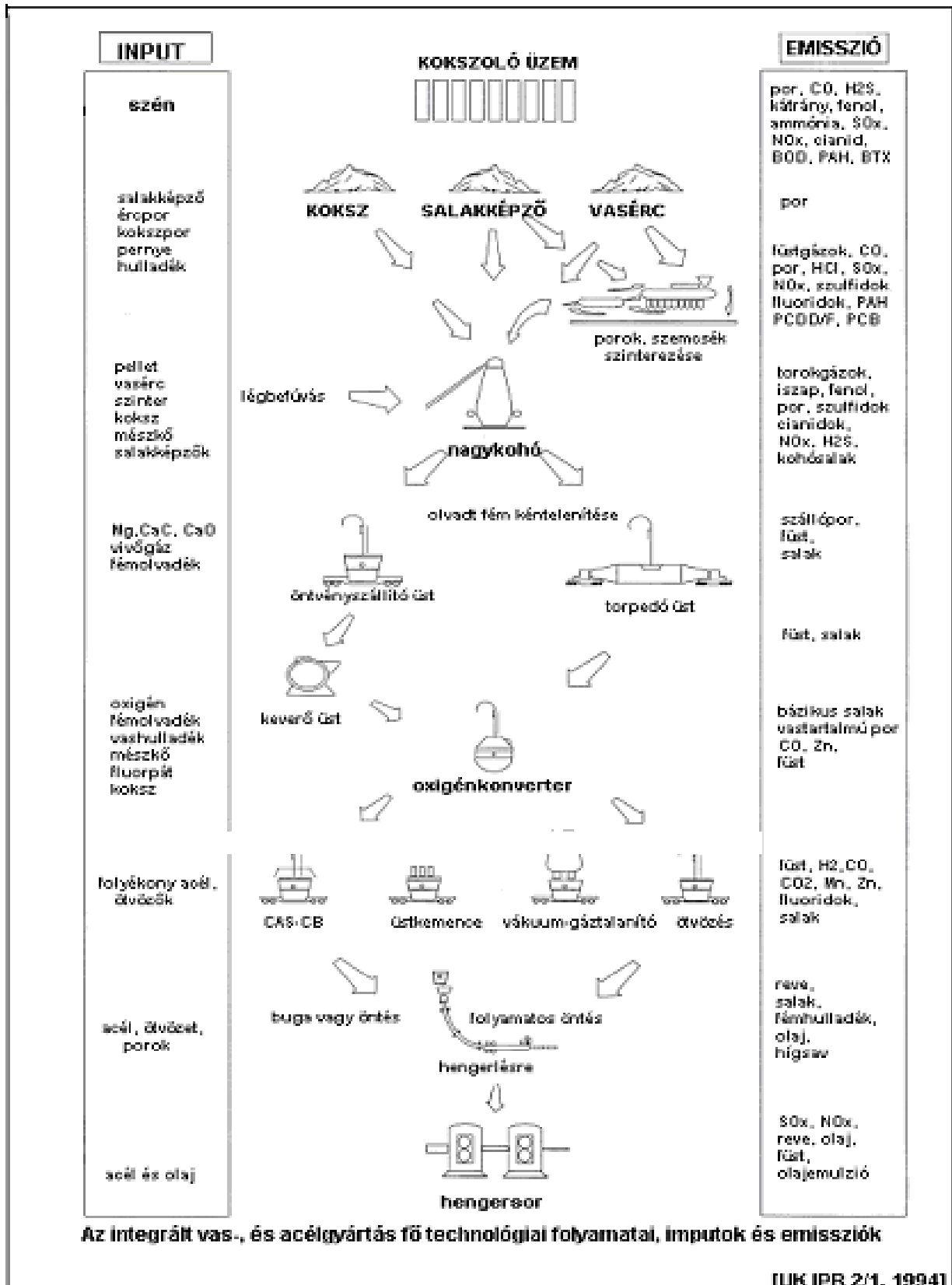
123. ábra. Nyersvas és acélgyártási eljárások elve

Az Európai Unió országaiban a nagyolvasztó-eljárást és az elektro-vasgyártási eljárások 65-35%-ban oszlanak meg. A világ összes vastermelésében az olvadék és közvetlen redukciós eljárások kb. 4 %-t tesznek ki [Hille,1977].



124. ábra Kohósalakok felhasználása

A jelenleg alkalmazott legnagyobb kapacitásokat jelentő integrált gyártás, komplex rendszere úgy értelmezendő, mint a különböző gyártóegységek közötti, egymással szorosan összefüggő anyag és energiaáramok rendszere. A legnagyobbak a zsugorító, pelletező, kokszgyártó, vaskohó, acélkonverter üzemegységek. A gyártás fő folyamatait és az azokat kísérő környezeti outputokat a 125. ábra foglalja össze.

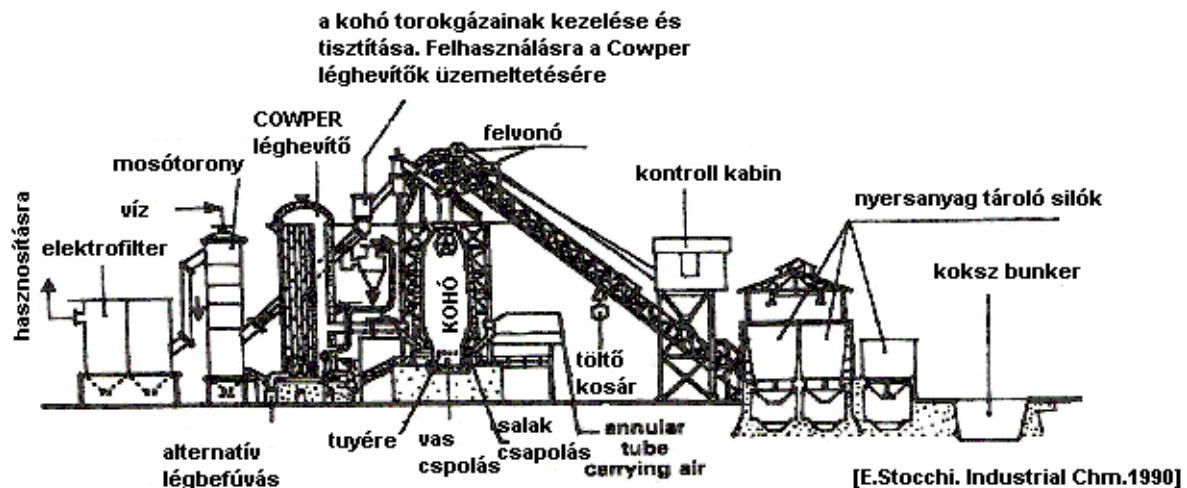


125. ábra. Az integrált vas-, és acélgártás fő technológiai folyamatai, inputok és emissziók

## A nagyolvasztók szerkezete és működése

A kohóba a pelletezett ércet, darabos mészkövet és a kokszot felül adagolják be egy alkalmasan kiképzett torokzáró-zsilip berendezésen keresztül. A lefelé süllyedő anyagoszlopban az alul befúvatott forró levegő (Cowper regenerátor kamrákban előmelegített) közreműködésével redukációs folyamatok játszódnak le, amelyek eredményeként a kohó alján nyersvas, közvetlen felette folyékony salak (sűrűsége ~ 3 g/cm<sup>3</sup>) gyűlik össze.

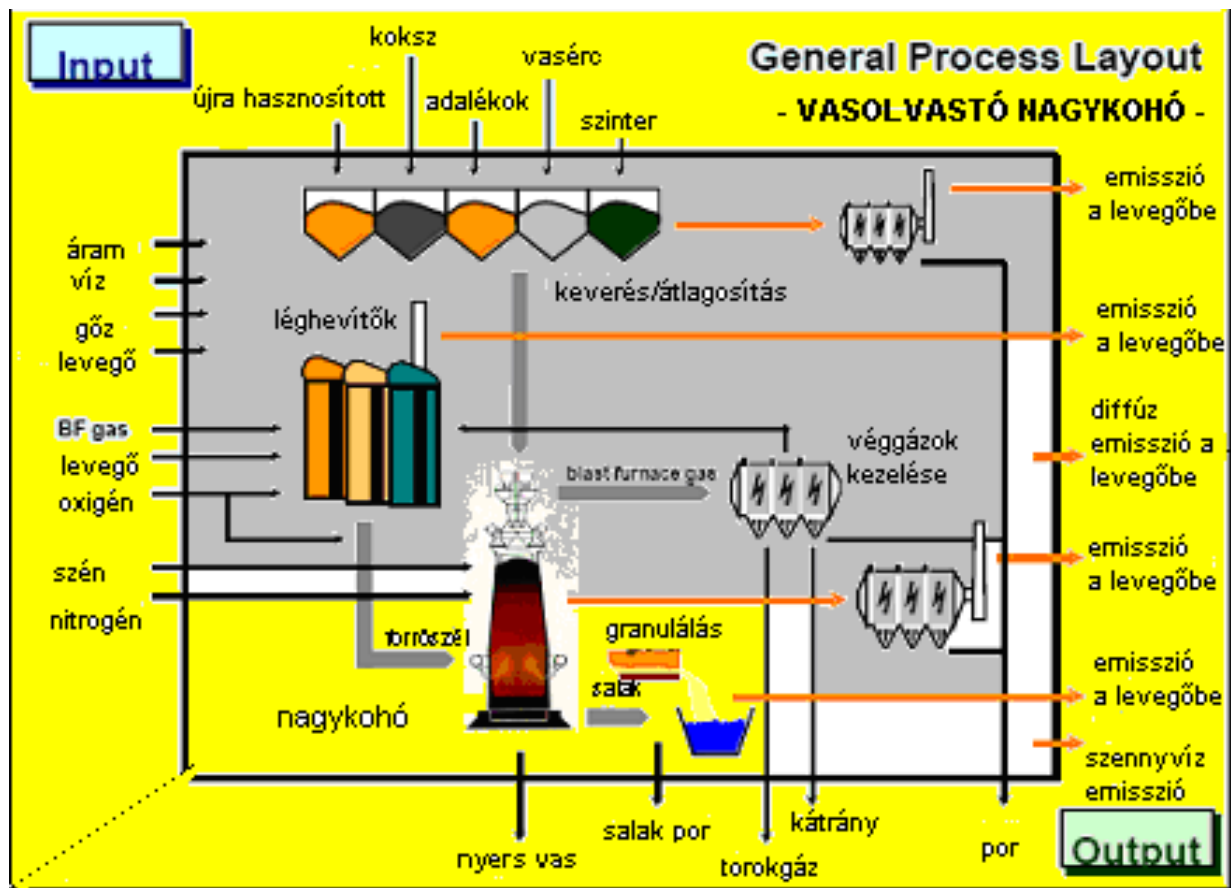
A nyersvasat és a salakot periodikusan lecsapolják. A szilárd anyagok tartózkodási ideje a kohóban – ami tulajdonképpen egy csúszóágyas reaktor – a méretektől függően 8-24 óra. A kohóban fejlődő éghető torokgázokat a léghevítők fűtésére szolgál, feleslegüket kazánokban égetik el, vagy gázmotorok hajtására használják fel. A nagyolvasztó és a hozzá közvetlenül csatlakozó berendezések panoráma elrendezési vázlatát a 126. ábra látható.



126. ábra Nagykohó és kiszolgáló egységeinek panoráma elrendezése

A nagyolvasztóban történő nyersvas előállítás technológia folyamatát, egyben a jelentős input-output anyagáramokat a 127. ábra foglalja össze.





127. ábra. Vasolvastó nagykohó

### A nagyolvasztó üzem és részei

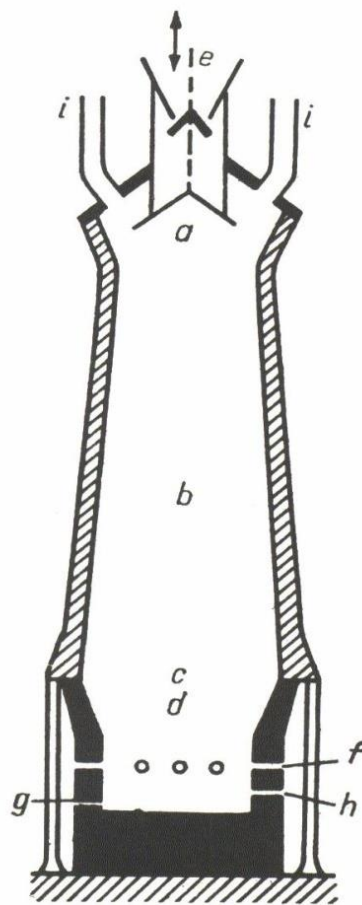
Az üzem alapvető berendezése a nagykohó, amely 20-70 m magas, speciálisan kialakított, tűzálló téglával bélelt aknáskemence.

A kohó különböző részeinek megjelölése és a részegységekben lejátszódó fontosabb reakciók a 128. ábra láthatók.

A végbemenő redukációs folyamatok két csoportra oszthatóak: a 400-1.000 °C tartomány az indirekt (vagy közvetett) redukációs zóna, ahol a szén-monoxid redukál és az 1.000 – 2.000 °C tartomány a direkt zóna, ahol a közvetlen a szén redukál.

Ennek magyarázata, hogy 1.800-2.000°C, hőmérsékleten a Boudouard diagram szerint (129. ábra) a szén-monoxidból már nem keletkezik szén-dioxid, ezért a **közvetett redukció** nem megy, a kohó ebben a részében csak elemi szénrel lehet redukálni (CO-ig!). A nyugaszban a lefelé haladó vasszivacs fokozatosan telítődik szénrel, és a nyugasz alján a salakkal közel azonos hőmérsékleten megolvad.

A nagyolvasztóban a Ni, Pb, Cu, Si és P tartalmú összetevők elemi állapotig redukálódnak és az ólom kivételével beoldódnak a nyersvasba. A megolvadt ólom fajsúlykülönbség alapján elválasztható és külön csapolható. A cink (Zn) 1.100 °C körül szintén redukálódik, de egyúttal el is párolog (a Zn forrpontja ~900 °C) és újraoxidálódik. A ZnO egy része a torokgázzal távozik, másik része az akna és a torok hidegebb részein lecsapódik, és üzemzavart okozhat.



**(a) Torok:** az adagolósilippel **(e)**. Hengeres rész, amelyen a szilárd anyagok adagolása és a torokgáz elvezetése történik.

**(b) Akna:** lefelé szélesedő csonka kúp alakú része a kohónak. 400-1.000 °C hőmérséklet határok között itt megy végbe a vasoxidok (vas) és a szénmonoxid közötti reakció, valamint a mészkő bomlása, a vízgőz és széndioxid „kiűzése”. Az itt keletkező fémvas szilárd halmazállapotú, szivacsos szerkezetű.

**(c) Szénpoha:** a kohó legszélesebb része. (10-20 m)

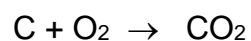
**(d) Nyugasz:** (nyugvó, szénfelvevő lejtő). A nagykohó lefelé szűkülő, csonka kúp alakú része.

**(f) Tuyéres** (fúvószint) 800-900 °C -ra előmelegített, 50 kPa túlnyomású levegő befúvatása.

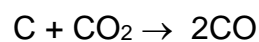
**(g) Medence**

**(h)** Salak elvétele

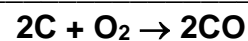
A fúvószinten (Tyéres) a fúvókasból (fúvószél-körvezeték) befújt forró levegő hatására a kokszt egy része gyorsan széndioxiddá ég el, amely **Boudouard reakcióban** (generátorgáz-reakció) ezt követően szén-monoxiddá alakul:



$$\Delta H = -406 \text{ KJ/mól}$$

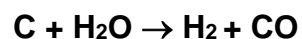


$$\Delta H = +160 \text{ KJ/mól}$$

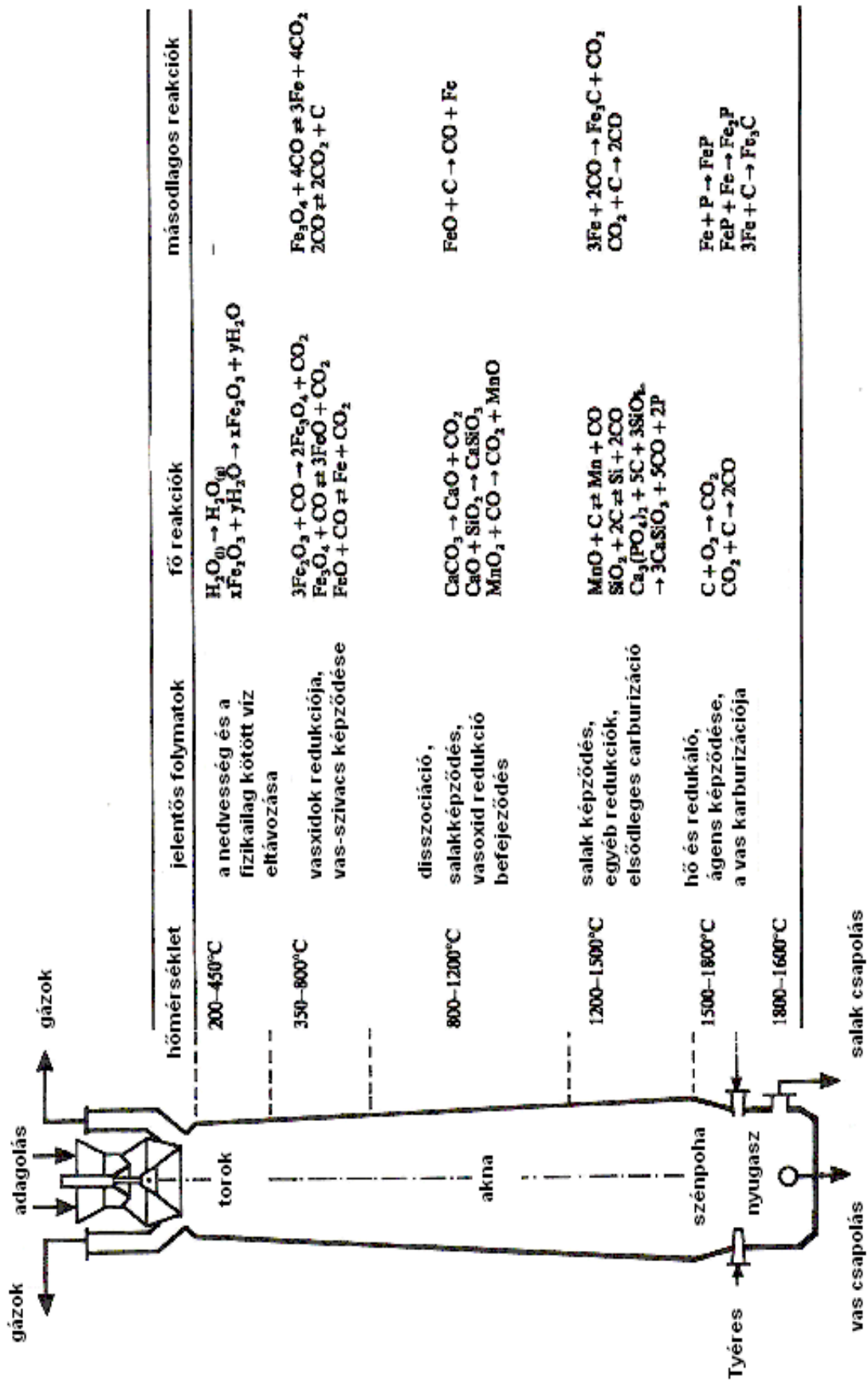


$$\Delta H = -246 \text{ KJ/mól}$$

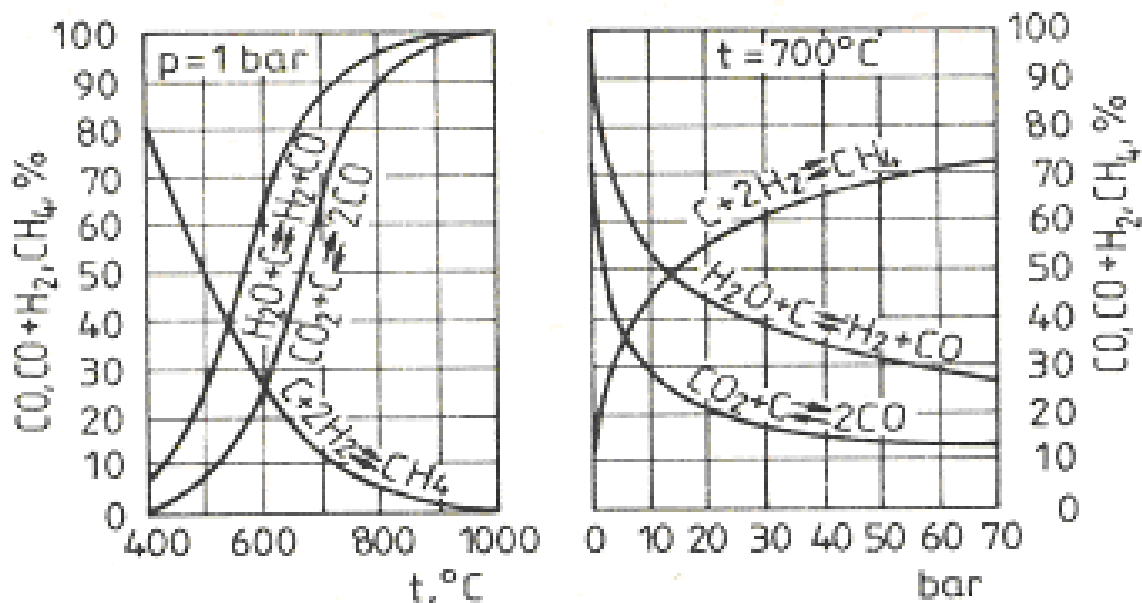
A levegő nedvességtartalmából hidrogén is keletkezik: (vízgázreakció)



$$\Delta H = -11,1 \text{ KJ/mól}$$



128. ábra Nagyolvasztó felépítése



A Boudouard-, a vízgáz- és a metánképződés reakciók egyensúlya a hőmérséklet és a nyomás függvényében

### 129. ábra Egyensúlyi reakciók a nagyolvasztóban

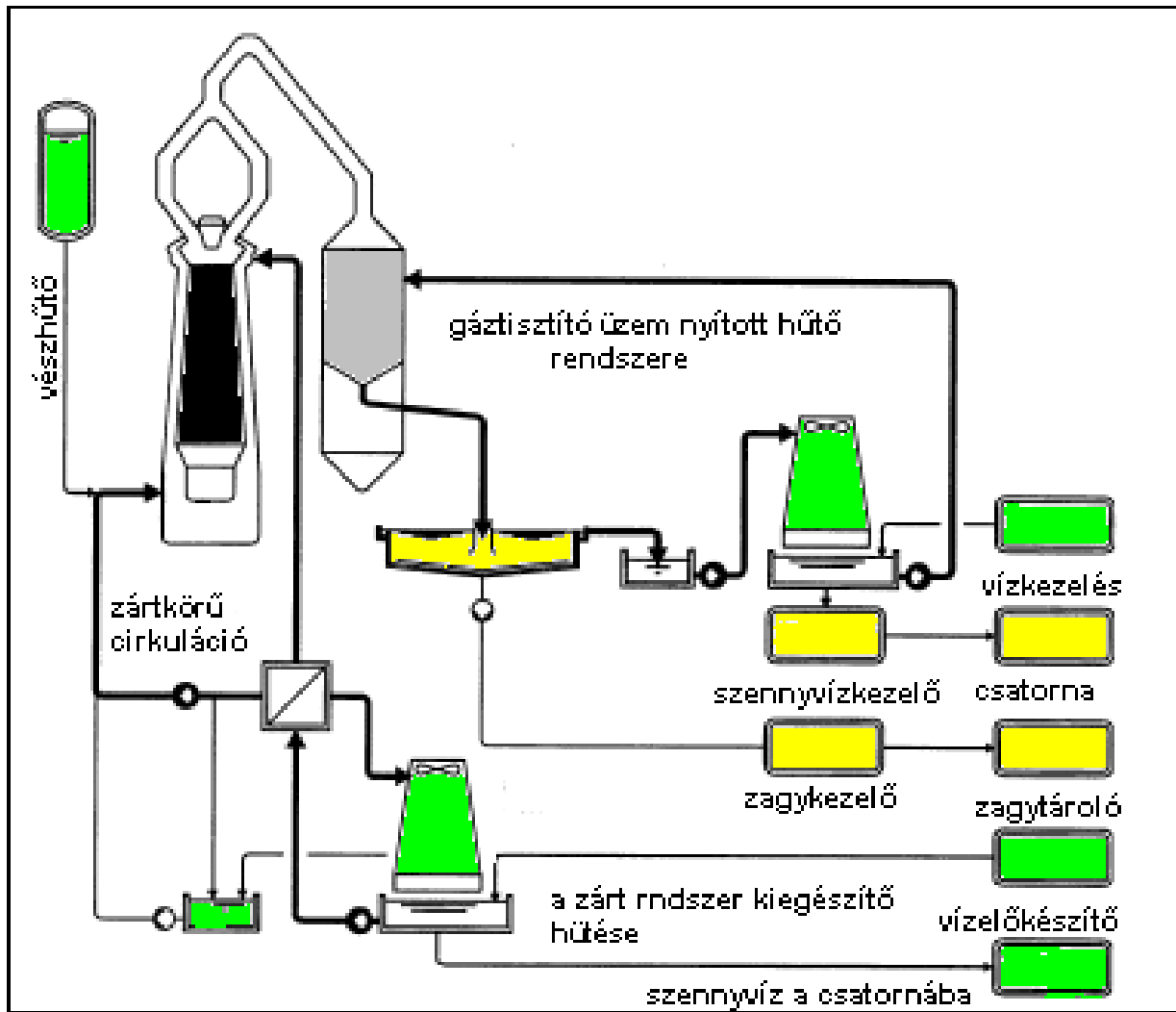
A nagyolvasztó üzemét állandóan ellenőrzik. Méri a forró levegő nyomását, hőmérsékletét, a nyersanyagok összetételét, a torokgázok nyomását és összetételét. A kémlelőnyílásokon figyelik az olvadékfázis állapotát. Ha a salak sötét színű, akkor a vas redukciója (így a mangán redukciója) nem játszódott le tökéletesen. A redukált mangán zöldes színűre „festi” a salakot. A nem redukálódott érc és a nehezen mozgó képlékeny salak elzárja a fúvókáknál a levegő útját, úgynevezett „medvék” alakulnak ki, s üzemzavar jöhet létre. (Az üzemzavar elhárítására tiszta oxigént fúvatnak be, ekkor kis térfogatban magas hőmérséklet alakul ki, a medve megolvad.)

A nagyolvasztóban a nyersanyagok alkalmas megválasztásával az acélgyártáshoz nélkülözhetetlen ferroszilícium és ferromangán is gyártható.

#### A kohóból távozó torokgázok:

Hőmérséklete: 200-400 °C, fűtőértéke: ~4000 kJ/Nm<sup>3</sup>), átlagos összetétele: 10-16 tf% CO<sub>2</sub>, 25-30 tf% CO, 52-56 % N<sub>2</sub>, 2-4 tf% H<sub>2</sub>, 1-3 tf% CH<sub>4</sub>.

A kohóból távozó gázok kezelését és az ehhez tartozó víz-, és zagyforgalmat mutatja be a 130. ábra.



130. ábra Torokgázok összetétele

## A nyersvas feldolgozása, vasöntés, acélgártás

### Vasöntés

A nagyolvasztóból időszakosan csapolt szürke nyersvasat ingadozó összetétele miatt nem dolgozzák fel közvetlenül formaöntött terméké. Amennyiben a feldolgozás helye nem közvetlenül a nagyolvasztó közelében van, úgy a csapolt nyersvasat homokágyba öntik, és lehűlés után kerül át az öntőde üzembe, ahol kúpoló kemencében újra olvasztják.

A kúpolóban történő újraolvasztáskor a különböző összetételű nyersvasakat összekeverik, adalékként öntési hulladékokat, visszagyűjtött öntöttvas- és acélhulladékot használnak, ezáltal a kívánt összetételű öntvényhez jutnak.

A kúpoló 5-20 m magas 1-3 m átmérőjű aknáskemence, amelybe a megolvasztandó vasanyagokat koksszal rétegezve adagolják be. A koksnak hőfejlesztő és C-tartalom beállító szerepe van, az égéstápláló levegőt 200-400 °C-ra melegítik elő. A kúpoló torokgázában 10-15 tf% CO<sub>2</sub> és 7-15% CO van.

A megolvadt vasat az előhődben gyűjtik, innét csapolják le a salakkal együtt. (A salak a koksztartalmú anyag tartalmának elsalakosítására beadott tiszta mészkő hatására keletkezik.)

Homogén összetételű igénylő, nagyméretű öntvényekhez rostélytüzelésű lángkemencékben ömlesztik meg a nyersvasat. A rostélyon elégetett hosszúlánggal égő kőszénen, olaj- és/vagy gáztüzeléssel „helyettesíthetik”.

Helyi feldolgozás esetén az olvadt vas mozgatása, folyékony állapotban ún. torpedó öntőüstökben (ladle) történik, mérettől függően 100-300 tonnás egységekben.

## Acélgyártás

A hagyományos acélgyártás szakaszos eljárás, amelynek fő meghatározó lépései:

- \* forró nyersvas szállítása és tárolása
- \* a nyers fém előkezelése (deszulfurizálás)
- \* oxidáció, frissítés
- \* másodlagos metallurgiai kezelés
- \* ötvöző elemek beadása, oldott FeO redukciója,

### Az acél előállításának elméleti alapjai

Az acélgyártás olyan finomítási eljárás, amely során a nyersvas széntartalmát 4-5%-ról 1 % vagy az alatti mértékre csökkentik le, az egyéb nem kívánatos szennyezőket (különösen: P, S, Si, Mn) oxidáció útján a technológiailag elérhető mértékben eltávolításra kerülnek. Ennek folyamán a szén, CO + CO<sub>2</sub> gázként távozik, a többi szennyező pedig a salakba kerül. Ezt a finomítási műveletet **frissítésnek** is nevezik.

#### Nyersvas szállítása és tárolása

A nyersvas a nagyolvasztóból az acélgyártó üzembe 100-300 tonna kapacitású, vasúti sínen mozgatott torpedó öntőüstökben, vagy szállító kocsikon kerül át. A torpedó üstök előnye a relatíve kis felületi hőveszteség, és a nagy szállítóképesség. Az üstök belső falazata korund, mullit vagy dolomit tűzálló téglából készül. A falazat anyagának helyes megválasztása része az acél premetallurgiai kezelésnek. Egy-egy falazat élettartama 150.000 - 400.000 tonna nyersvasban fejezhető ki.

A szállítást követően a nyersvas horizontálisan forgatott 1.500-2.000 t kapacitású, hőálló falazattal bélelt mixerbe kerül. A mixerekben tárolt nyersvas kiegyenlíti a szakaszos gyártás, és szállítás okozta ütemezési egyenetlenségeket. Egyben homogenizálja a különböző csapolásokból származó nyersvasak kémiai összetételét, továbbá közös hőmérsékleten tartja a tovább feldolgozásra kerülő nyersvasat.

#### A folyékony vas előkezelése

A klasszikus előkezelő eljárások magukban foglalják a kén, foszfor és szilícium tartalom csökkentését vagy szükség szerint a teljes mentesítést. Korszerű kohászati eljárásoknál már a nyersvas gyártás folyamán a mangán adagolásával is jelentősen csökkenthető a kén tartalom.

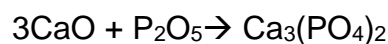
Az elvárt S tartalom < 0,001%. Ennek biztosítására számos egyedi eljárás és berendezés lett kidolgozva és alkalmazva. Európában a legelterjedtebb a kalcium-

karbid ( $\text{CaC}_2$ ) használata, amely a hosszú időn keresztül alkalmazott  $\text{CaCO}_3$ -t váltotta fel, elsősorban környezeti szempontok miatt ( $\text{CO}_2\uparrow$ ).

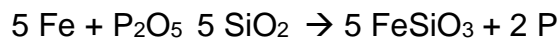
### S és P mentesítés alapjai

A vas és acélgyártási eljárásokban a műveleti berendezések a magas hőmérsékletekre tekintettel, hőálló falazattal vannak bélelve (*lined*). A falazat anyagának megválasztásánál figyelemmel kell lenni arra, hogy amennyiben a S mentesítésre kalcium-oxid vagy kalcium-karbid adalékot alkalmaznak, úgy a berendezéseket bázikus béléssel (magnezittégla) kell ellátni. Szilikatéglával való bélelés (savanyú bélés) esetén mészadalék nem alkalmazható.

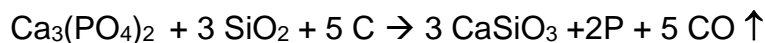
Az ilyen berendezésekben magas foszfortartalmú nyersvasak nem dolgozhatók fel, mert a foszforból keletkező  $\text{P}_2\text{O}_5$ -öt csak CaO-val lehet a salakba vinni az alábbiak szerint.



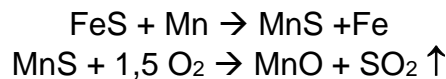
Mészhiány esetén a foszfor újra redukálódik:



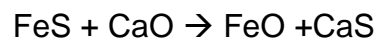
Nem kielégítő CaO-SiO<sub>2</sub> arány esetén (kovasav túlsúly) a kalcium-foszfát redukálódik:



A kéntelenítés elve savanyú közegben:



Bázikus közegben:



A végleges kénmentesítésre külön célberendezésekben kerül sor. Itt a beadagolt adalékok intenzív érintkeztetésének biztosításával érhető el a S tartalom megfelelő szintre történő csökkentés. A mai legkorszerűbb eljárásokban a kalcium-karbidot merülőlándzsán (*immersion lance*) keresztül vivőgáz ( $\text{N}_2$ , Ar) segítségével, miközben a kevertetés is biztosított. Ezen eljárás eredményeként a kén az olvadt fém tetején salak formájában gyűlik össze és attól jól elválaszthatóvá válik. Speciális minőségű acélok előállítására esetén a folyamatot megismételhetik.

Kéntelenítés utáni mérlegelést követően a nyersvas az acélgyártó konverterbe kerül.

### Acél előállítása oxigén konverterben

Minden ilyen eljárás alapja, hogy a konverterbe feldolgozásra kerülő vasban lévő szennyezések a bejuttatott levegő/oxigén hatására kiégetésre kerülnek. A kívánatos metallurgiai folyamatok az olvadt vas és levegő/oxigén intenzív érintkezése mellett mennek végbe (szélfrissítés). Az oxigén hatására a konverterben lejátszódó alábbi exoterm oxidációs folyamatok jelentős hőfelszabadulással járnak. Ennek okán az olvadék állapot fenntartásához nincs szükség külső hőbevitelre. A rendszer kiegyensúlyozott hőegyensúlyának biztosításra vashulladékot (általában un.

ócskavasat) vagy jó minőségű vasércet adagolnak a rendszerbe szükség és lehetőség szerint.

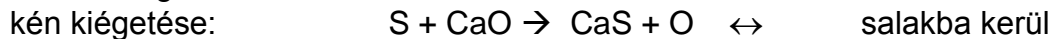
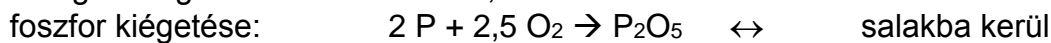
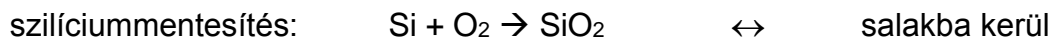
### Kémiai folyamatok

A fontosabb kémiai folyamatok, amelyek az oxidáció során lejátszódnak:

\* szénttartalom csökkentése:



\* kísérő, szennyező elemek csökkentése:



Néhány eljárásban a kiégetéshez, a befúvatott levegő/oxigén elegyében, földgázt is kevernek. A befúvatást speciális foszfor-bronzból készített, hűtött fúvókán (**Tuyère coolant**) keresztül végzik.

### **Oxigén-konverteres acélgyártási eljárások**

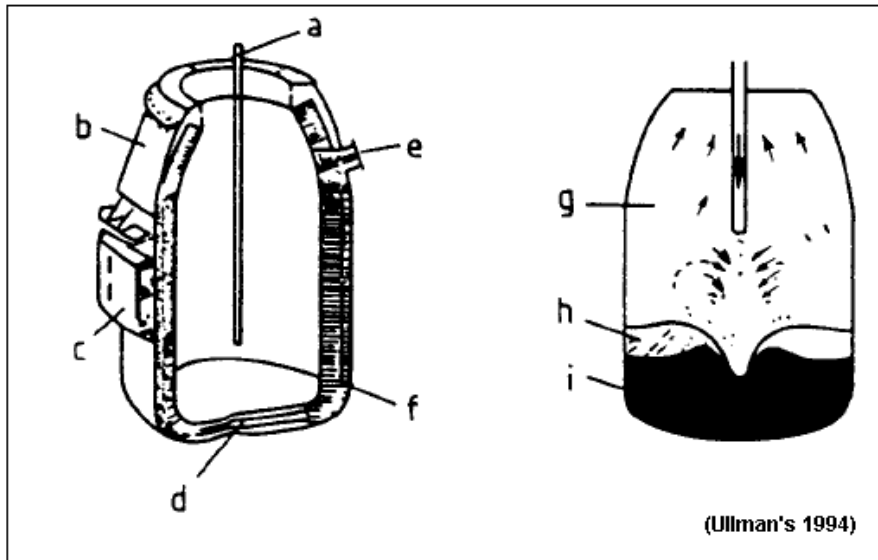
A konverteres acélgyártási eljárások, az ún. félig folyamatos eljárások közé tartoznak. Egy teljes gyártási ciklus az alábbi folyamatokat tartalmazza: vashulladék és olvad nyersvas adagolása, oxigén befúvatása, mintavételezés majd a megfelelő hőmérsékleten csapolás (**tapping**). A mai modern acélgyártó művekben 300 tonna acél adag előállítása kb. 30-40 perc alatt történik meg. A gyártási folyamatban az acél kívánt minőség elérésére és a megfelelő salak képzésére adalékokat alkalmaznak.

A konverter töltése és csapolás folyamata a konverter megdöntött állásában történik, az oxigén befúvatás szakaszában ismét függőleges állásba kerül.

Acél gyártására többféle típusú konvertert alkalmaznak. A leggyakrabban alkalmazott és legjobban bevált típus az ún. LD-konverterek (Linz-Donawitz). Ezek kiválóan alkalmasak az alacsony foszfor tartalmú nyersvasak feldolgozására. Magas foszfortartalmú nyersvasak esetében a módosított LD/AC eljárást alkalmazzák.

A konverter tűzálló béléssel ellátott körte alakú berendezés, amelybe vízhűtésű oxigén-lándzsa süllyed be. A lándzsán keresztül 99 %-os tisztaságú oxigén kerül az olvadt nyersvasba befúvatásra. A konverter és részei a 131. ábraláthatóak.

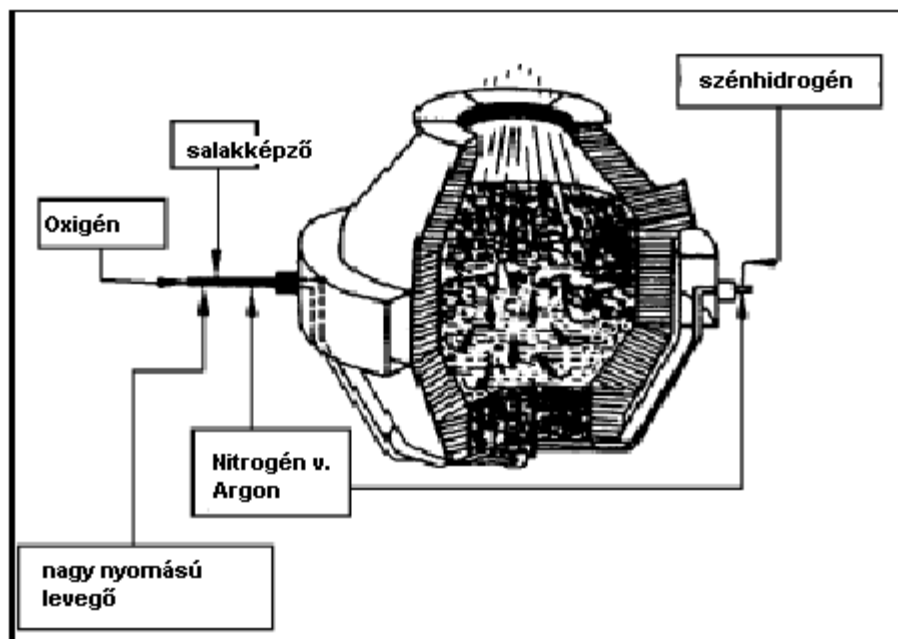




a - oxigén lándzsa; b - torok rész; c - tartóöv; d - konverter fenék; e - csapoló nyílás;  
f - tűzálló falazat; g - gáztér; h - salakréteg; i - olvadt fém

**131. ábra. Oxigén befúvásos acél-konverter**

Ismeretek más típusú konverterek is. Ezekben az oxigén befúvatás az olvadékba merülő fúvókákon keresztül, a reaktor aljáról történik. Ilyen reaktort alkalmazó legismertebbek eljárások az OBM (Oxigen-Bottom-Maxhutte) és a LWS (Loire-Wendel-Sprunch) eljárások. Egy ilyen konverter elrendezését mutatja a 132. ábra.



Ullmann's, [1994]

**132. ábra. OBM konverter keresztmetszete**

Az eljárásban alkalmazott oxigén mennyisége, az adagban (egyszeri betöltésre került anyagok kompozíciója) lévő szennyezők (C, Si, P, ...stb.) mennyiségétől függ.

A gyártási folyamat előrehaladását a konverterből vett minták folyamatos mérésével követik. Korszerű üzemekben a mintavételezés alatt sem szünetel a befúvatás. Az állandó minőséget, a folyamatok standardizálásával és/vagy dinamikus

folyamatszabályozással és követéssel (számítógépes irányítással) biztosítják. Ezek megvalósításával a minőségen túl a termelékenység is javult, tovább a korábbiakhoz képest jelentősen csökkent a csapoláskori gáz emisszió.

Amikor a konverterben az acél minősége megfelelő, leállítják a levegő befúvatást és a nyersacél csapolásra kerül, üstökbe.

Az olvadt acélt a másodlagos metallurgiai kezelés után, az öntőgépekhez szállítják át.

A konverterben lejátszódó exoterm oxidációs reakciók megemelik az olvadt vas hőmérsékletét. A folyamatokhoz a szükséges 1.600 -1650 °C hőmérsékletet vashulladék, vasérc adagolásával biztosítják. A konverterbe egy-egy adaghoz általában 10-20%, de esetenként akár 40 % vashulladékot adagolnak be. Az adagolt mennyiséget több szempont is befolyásolja. Legjelentősebbek: a nyersvasnál alkalmazott premetallurgiai eljárás, a vashulladék piaci ára, a gyártandó vas minősége, és a csapolási hőmérséklet.

### **Konverteres acélgyártás környezeti hatásai**

A konverterbe történő oxigén befúvatásakor a keletkező gázok nagy mennyiségben tartalmaznak szén-monoxidot. Több üzemben alkalmaznak megoldást a konverter gázok kinyerésére, majd azok energetikai célú hasznosítására.

Az oxigén befúvatásos eljárás során a vashulladék adagolásakor, a nyersvas betöltésekor, fúvatás során, a salak és az acél csapoláskor, jelentős mennyiségű egyéb finom szemcsés füst-, és porszennyeződés képződik. Minden gyártó törekszik arra, hogy ezek emissziós hatását a minimálisra szorítsa le.

A gyártás során képződött salakot kihűlése után megőrlik, és mágneses szeparációval a hasznosítható fémrészeket visszanyerik belőle. A salak nagy kopásállósági tulajdonsága miatt jól hasznosítható útépitéseknél.

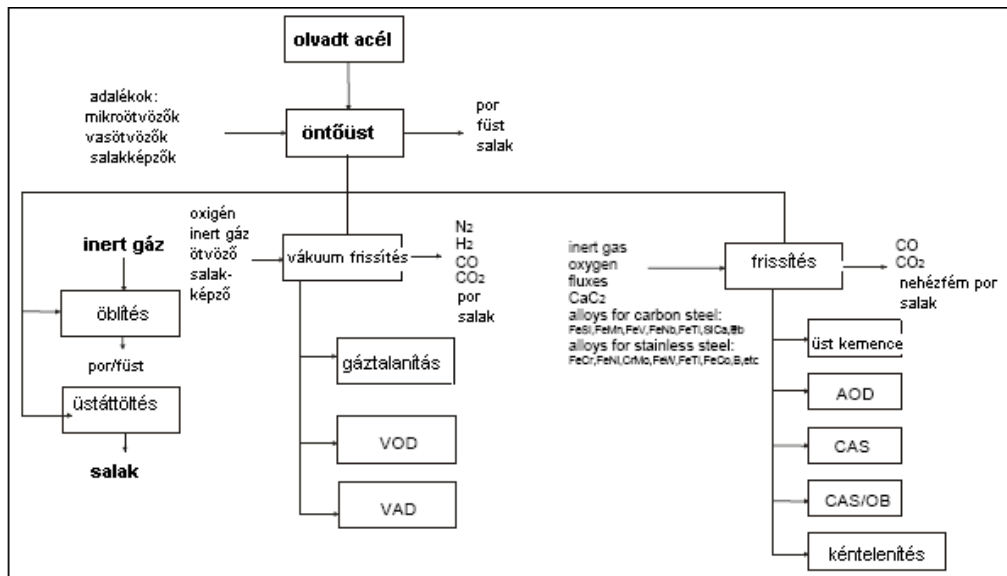
### **Másodlagos metallurgiai kezelés**

A konverteres oxidációt rendszerint több különböző metallurgiai műveletet magában foglaló utókezelés követ. Ezeket összefoglalóan a másodlagos metallurgiai kezelések, amelyeket azért dolgoztak ki, mert eleget kívánnak tenni a folyamatosan növekvő minőségi kívánalmaknak, továbbá a termelékenység jelentős növelése érdekében a metallurgiai finomítási folyamatok áthelyezésére a konverterből.

A másodlagos kezelések főbb céljai a következők:

- \* keverés és homogenizálás,
- \* az acél lehűtésének időbeli hozzáigazítása az öntési technológia követelményeihez,
- \* kémiai komponens tartalom finom beállítása,
- \* maradék oxigén kivonása (deoxidálás),
- \* nem kívánatos gázok (H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>) eltávolítása,
- \* nem fémes zárványok eltávolítása,

A fontosabb másodlagos folyamatokról nyújt áttekintést a 133. ábra



**Magyarázat:** VOD = vákuum-oxigén-szénmentesítés; VAD = vákuum-ív-gáztalanítás; AOD = Argon-oxigén-szénmentesítés; CAS = összetétel beállítása argon buborékkoltatással; CAS/OB = CAS + oxigén befúvatás

### 133. ábra Másodlagos metallurgiai kezelési folyamatok

Az egyik legfontosabb lépés a vákuumkezelés. Ennek része a precíziós dekarburizáció, és deoxidáció, amikor kb. 50 Pa nyomáson kerül eltávolításra, az acélban lévő melegen oldódott hidrogén, nitrogén, oxigén és a maradék szén. A "dekarburizáció" eljárás az, amikor az olvadt acélból kivonásra kerülnek a fúvatási ciklusban melegen benne oldódott gázok. Az eljárás révén az acél oxigén és nitrogén tartalma külön-külön, 0,0002%-ra csökkenthető.

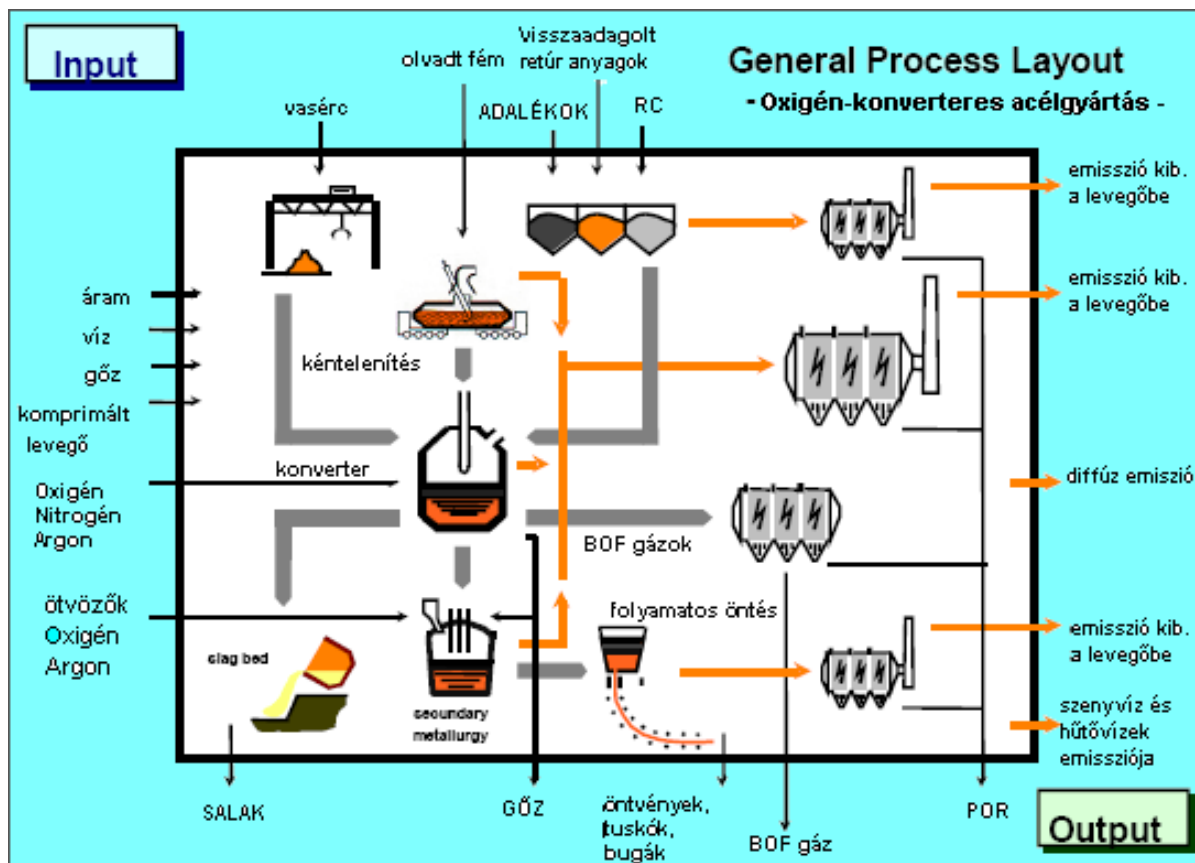
Az egyedi követelmények függvényében nagy tisztaságú vashulladék adagolásával beállítható a szükséges hőmérséklet. Az ötvöző komponensek az olvadáshoz történő hozzáadása történhet szilárd por, vagy tekerített huzal formában.

Az adagolási műveletek végső befejezése előtt próbavételes eljárásban meghatározzák az acél oxigéntartalmát, és szükség szerint beállítják deoxidánsok adagolásával. E műveletek közben por és gáz keveréke száll fel az üstből, amelyet mozgatható füstelszívó berendezéssel szívhatnak el.

Az olvadék vákuumban történő gáztalanítása a technológiától függően lehet folytonos vagy kisebb részletekben végzett szakaszos.

A szükséges vákuum előállítása víz/vagy gőzsugár alkalmazásával történik, amely 1 tonna folyékony acélra számítva kb. 5 m<sup>3</sup> vízfelhasználást okoz.

A konverteres acélgyártás technológiai folyamat elrendezését és a fő input-output anyagáramokat a 134. ábra foglalja össze.



134. ábra. Oxigén-konverteres acélgártás

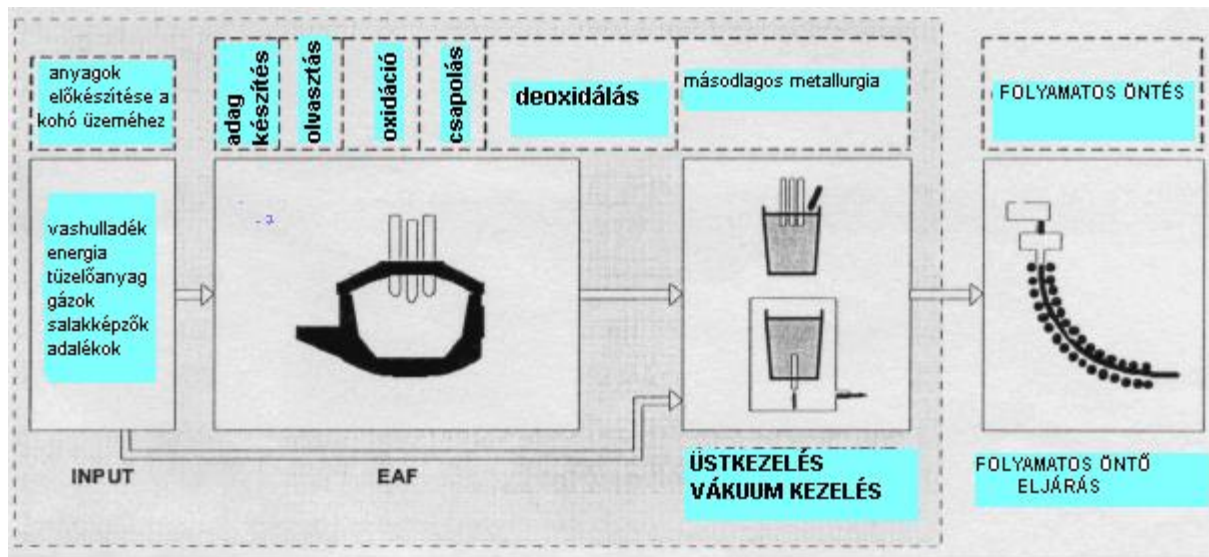
## Környezeti ügyek

### Elektroacélgártás (Electric Steelmaking)

A korszerű acélgártásban egyre nagyobb szerepet kapnak a vastartalmú anyagok (vashulladék) megolvasztásában az elektromos ív(fény)kemencés (**Electric Arc Furnace=EAF**) eljárások. Az EU teljes acélgártásának ma közel 40%-a ezen a módon valósul meg, úgy néhány országban (Spanyolország, Olaszország) már ma az elektroacélgártás mennyisége meghaladja a hagyományos konverteres előállítás mennyiségét.

Az EAF eljárás nyersanyaga (betétanyaga) mindaz a vashulladék, amely az acélműben ("visszajáró hulladék"), acél feldolgozó üzemekben (pl. autógyárak), végfelhasználóknál ("feldolgozó hulladék"), valamint a használatban előregedett és kiselejtezett berendezések ("amortizációs hulladék"). Egyre nagyobb mennyiségben kerül felhasználása az alacsony hőmérsékleten, 700-900 °C-on, vasércből gyártott alacsony szén és ötvöző elemet tartalmazó direkt-redukált vas (**DRI**) közkeletű néven a "vasszivacs".

EAF eljárás áttekintő folyamatait a 135. ábra mutatja.



Overview of the processes related to electric arc furnace steelmaking - [D Rentz, 1997]

**135. ábra. Az EAF eljárás áttekintő folyamatai**

Az EU-ban nagytömegben gyártott acélok kb. 85%-a alacsony ötvözöttségű, közönséges szénacél. A többi magas ötvözöttségű, rozsdamentes acélok.

Az alacsony ötvözöttségű szénacél gyártása az alábbi főbb műveletekből tevődik össze:

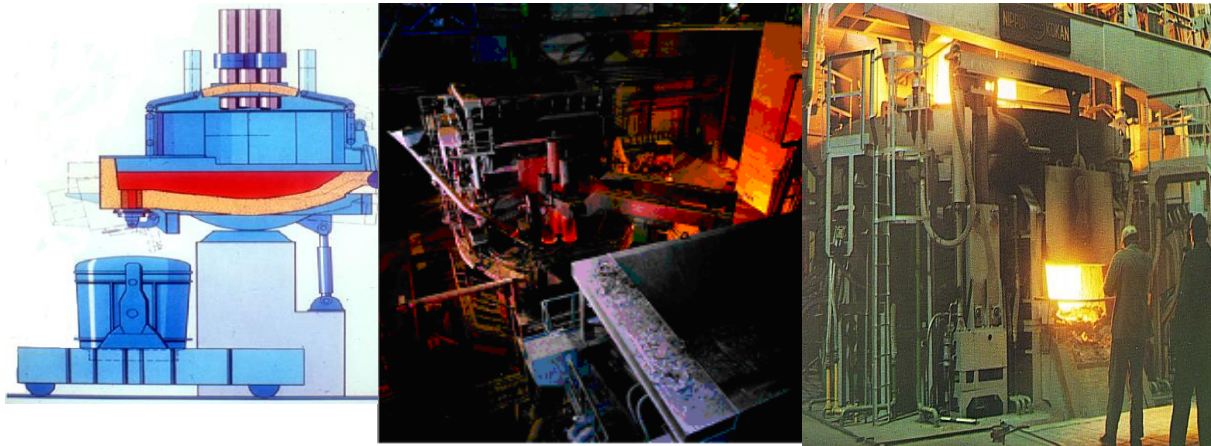
- \* nyersanyag kezelése és raktározása
- \* kohó betöltése előmelegített/előmelegítetlen vashulladékkal
- \* az adag megolvasztása ívkemencében
- \* acél-, és salakcsapolás,
- \* üstkemence kezelés a minőség beállítására,
- \* salakkezelés,
- \* folyamatos öntés.

**A kohó üzeme**

A technológiában a vashulladék előmelegítése a gyártás során képződött véggázok energiájának hasznosítását szolgálja elsősorban. Az energiahasznosítása előnye mellett, jelentős a képződő gáz emisszió, amelynek kezelése külön eljárást igényel.

Töltés

Töltés előtt a kemence tető félre van fordítva és elektródok felső állapotba vannak felhúzva. A vashulladékot mészkővel és/vagy dolomittal keverve töltőkosárba rakják. Esetenként darabos szenet is adagolnak hozzá. Ennek viszont következménye lesz, az aromás és poliaromás szénhidrogén emissziója. Kezdetben a vashulladék 50-60%-a kerül beadagolásra az első kosárral. Ezt követően lezárják a fedelet, és az elektródákat lesüllyesztik az adag felszínéhez 20-30 mm közel. Az eljárásban a 2 vagy 3 szénelektrod nyúlik az adag fölé, és az elektródvégek és az olvadék között kialakuló ív melege olvasztja meg és tartja a kívánt technológiai hőmérsékleten. Amikor az első rész megolvadt, betöltésre kerül a maradék töltet is.



### *136. ábra Acélkohó*

Az olvasztás kezdeti fázisában egyre több helyen alkalmaznak oxigén és/vagy gáz befúvatást. Ennek szerepe elsősorban a termelékenység növelése, de szerepe van a kén, foszfor, mangán, szilícium szennyezők eltávolításában is.

Az oxigén adagolás hatására jelentősen megnő a CO, CO<sub>2</sub> gázok és finom vasoxid szemcsék (füst) imissziója a kemencéből. Utóégetéssel a CO tartalom radikálisan lecsökkenthető (< 0,5 tf%). Argon vagy más inert-gáznak az olvadékba történő befúvatásával biztosítható szükség esetén a keverés és hőkiegyenlítés. Ez a megoldás előnyösen segíti az optimális fém-salak egyensúly kialakulását is.

#### Csapolás

Azokban az üzemekben, ahol nincs külön választva a másodlagos metallurgia, ott az ötvöző komponenseket közvetlenül a csapolás előtt adagolják be. Ennek hatására a csapoláskor fokozott füstkiáramlás történik az üzem légtérébe.

#### Másodlagos metallurgia

E műveletekre az ún. kezelőüstökben kerül sor és a folyamatok a csapolástól az ötvözés befejezéséig tartanak. A műveletek nagyban hasonlítanak/megegyeznek az oxigénkonverteres eljárásnál ismertekkel.

#### Salakkezelés

A salakcsapolását jelentős por és füst kiáramlása kíséri. A forró salak kihordására speciális kaparó-berendezést alkalmaznak. A salak lehűtése technológiai üzemépületen kívül, vízpermettel történik, majd ezt követően őrlésre kerül. A benne lévő hasznosítható fémrészek és visszanyerésre kerülnek. A salak törése/őrlése porszennyezést okoz.

A gyártás technológiai folyamatok befejeztével az acél, öntésre és feldolgozásra kerül.



## A vas- és acélgyártás környezet hatásai

### A technológiai helyek szerint

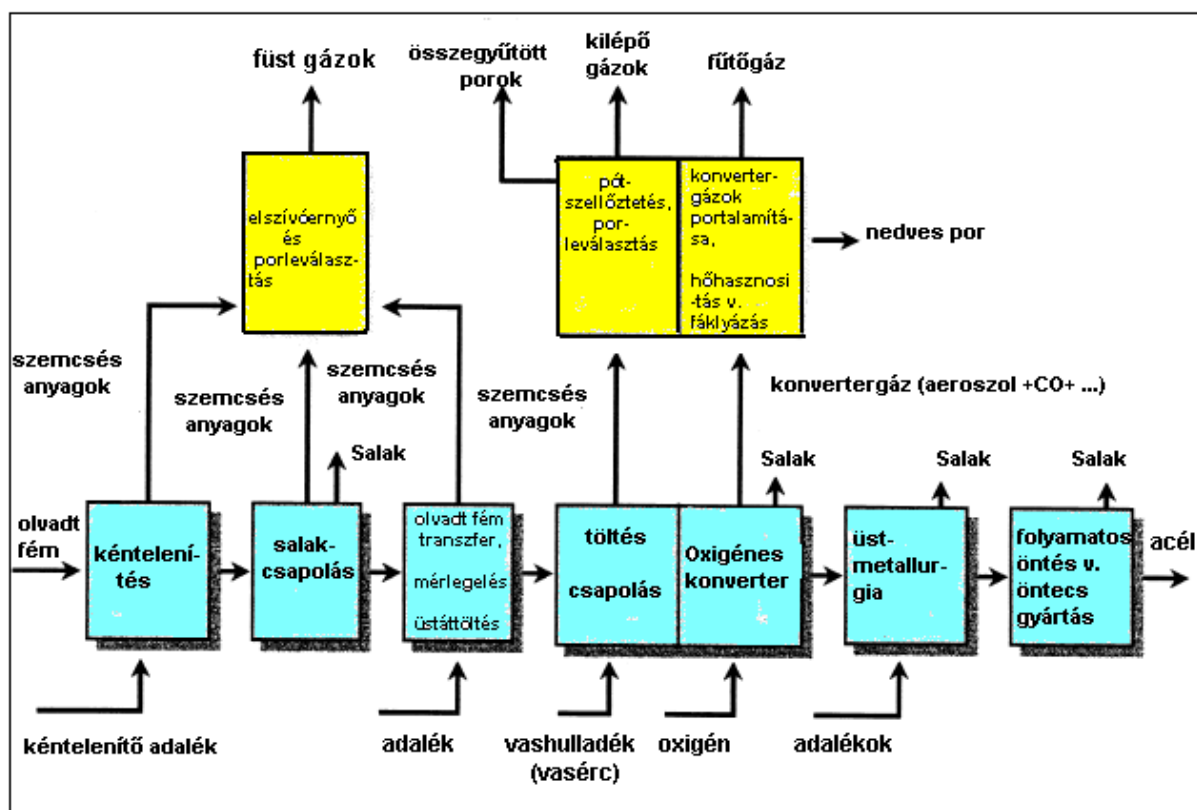
Ércelőkészítő üzem (vagonürítő, ércosztályozó, érc tárolótér, koks- és mészkőtároló, mészkőtörő, koks- és mészkőőrölő). Jellemző szennyező az érc-, szén-, mészkő- és kokszipor, jelentős a zajszennyezés.

Darabosító üzem: (elegyátlagosító, betétkészítő bunker, elegykeverő, darabosító-csarnok). Szennyező anyagok: koks-, mész- és ércpor, füstgázok, hulladék hő, s kisebb zajszennyezés.

Nagyolvasztóművek: Torokgázok. További szennyező hatások: nagykohó adagolásánál, nyersvas és kohósalak-csapolásánál, öntési műveleteknél, salaktöréseknél jelentős por-, füstgáz- és hőszennyezés lép fel.

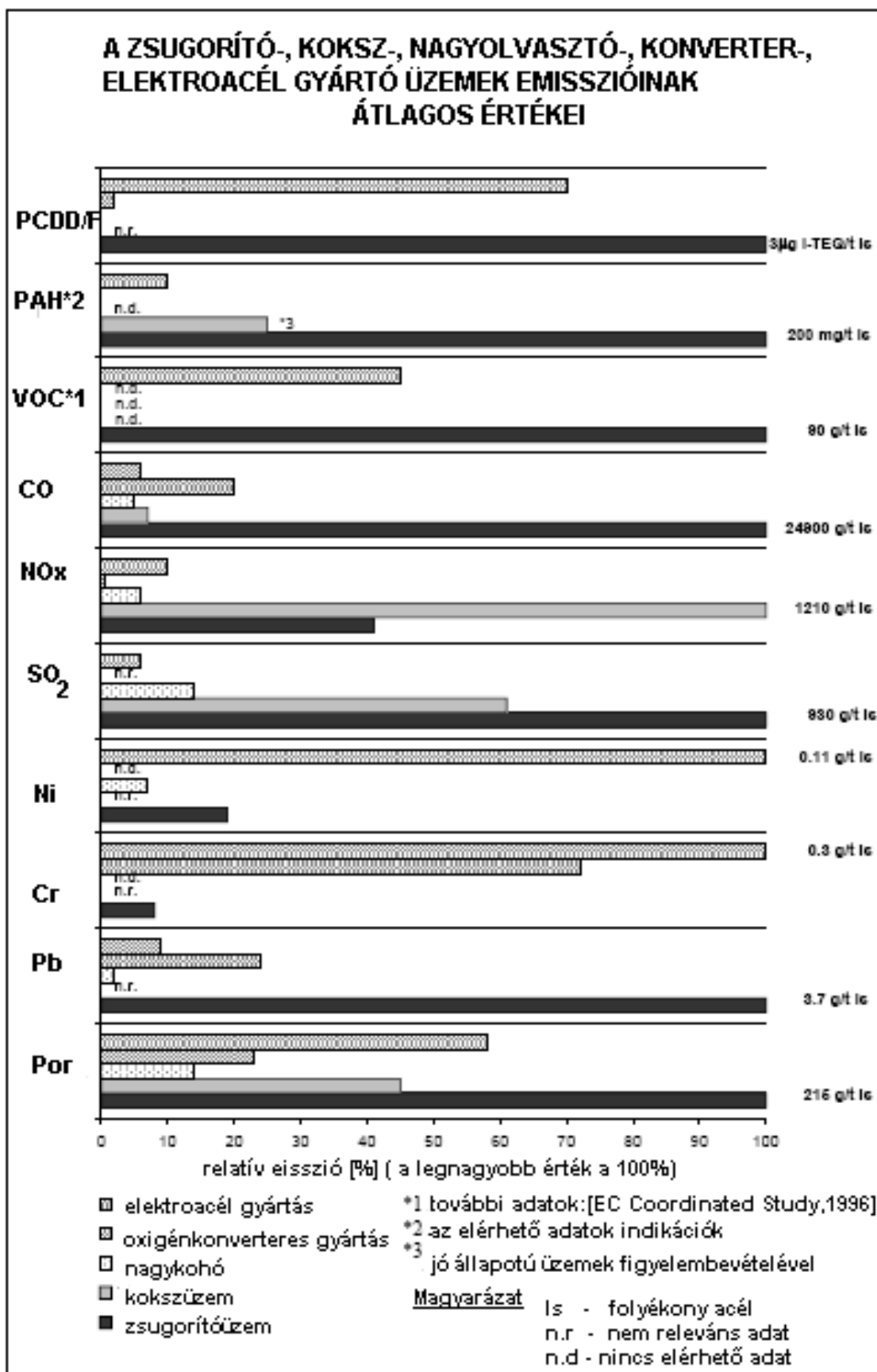
Acélmű: A konvertereknél az intenzívebb reakciók hatására füstgázok por, SO<sub>2</sub> és fém-aeroszol (vörös füst) szennyezése jelentős. Pl. egy 80 tonnás oxigén konverterben 1.600–1.650 °C hőmérséklet alakul ki 30-40 m<sup>3</sup>/(h.t) fajlagos oxigénbefúvás és 2,5 óra átlagos műveleti idő mellett. A távozó konvertergáz 5.000-6.000 m<sup>3</sup>, összetétele 60 tf% CO és 40 tf% CO<sub>2</sub>. A művelet során 12-15 kg Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aeroszol távozik a légtér felé.

A technológiai folyamat egyes szakaszaiban képződő emissziókat mutatja be a 137. ábra.



137. ábra A technológiai folyamat egyes szakaszaiban képződő emissziók

A kibocsátásra kerülő kiemelt szennyezők relatív emissziójának értékeit mutatja be a 138. ábra.



138. ábra. A kibocsátásra kerülő kiemelt szennyezők relatív emissziójának értékei



Az acélöntödében olajos-revés hűtővizek kezelésével kell számolni.

Zaj és hőszennyezés:

A nagy termelőkapacítások, berendezésméretük miatt a kombinát zajszennyezése igen jelentős és a környezetnek átadott hőmennyiség következtében a létesítmény környezete – a tereptani adottságoktól befolyásolt módon – sajátos mikroklíma létrejöttét mutatja.

## **Az anyagok körforgása az acéliparban**

Az acélipar jellemzője és technológiai erőssége az anyagok körforgása. A fogyasztókkal együttműködve újra feldolgozza az elhasznált vas- és acéltermékeket (az amortizált hulladékot):

1 tonna vashulladék felhasználásával 1,5 tonna vasércet és 0,5 tonna fűtőanyag (szenet, kokszt, olajat) takarítható meg, és 1 tonnával kevesebb szén-dioxiddal terhelődik a légkör.

Belső körforgásban használja fel a vizet.

1960-ban 1 tonna acél gyártásához 150 m<sup>3</sup> vízre volt szükség, ami többé-kevésbé szennyezve hagyta el a gyárat, 2005-ben már csak 25-30 m<sup>3</sup> víz szükséges ugyanarra a célra, de tisztítás után ennek is 80-90%-a visszatér a rendszerbe.

A kokszolókamrákban és a metallurgiai folyamatokban keletkező éghető gázokat felfogják, tisztítják, és fűtőanyagként vezetik vissza a körforgásba.

Hasznosítják a füstgázok érzékelhető hőjét.

Az eredmény az energia egy részének megtakarításában mutatkozik meg.

## Energiaipar

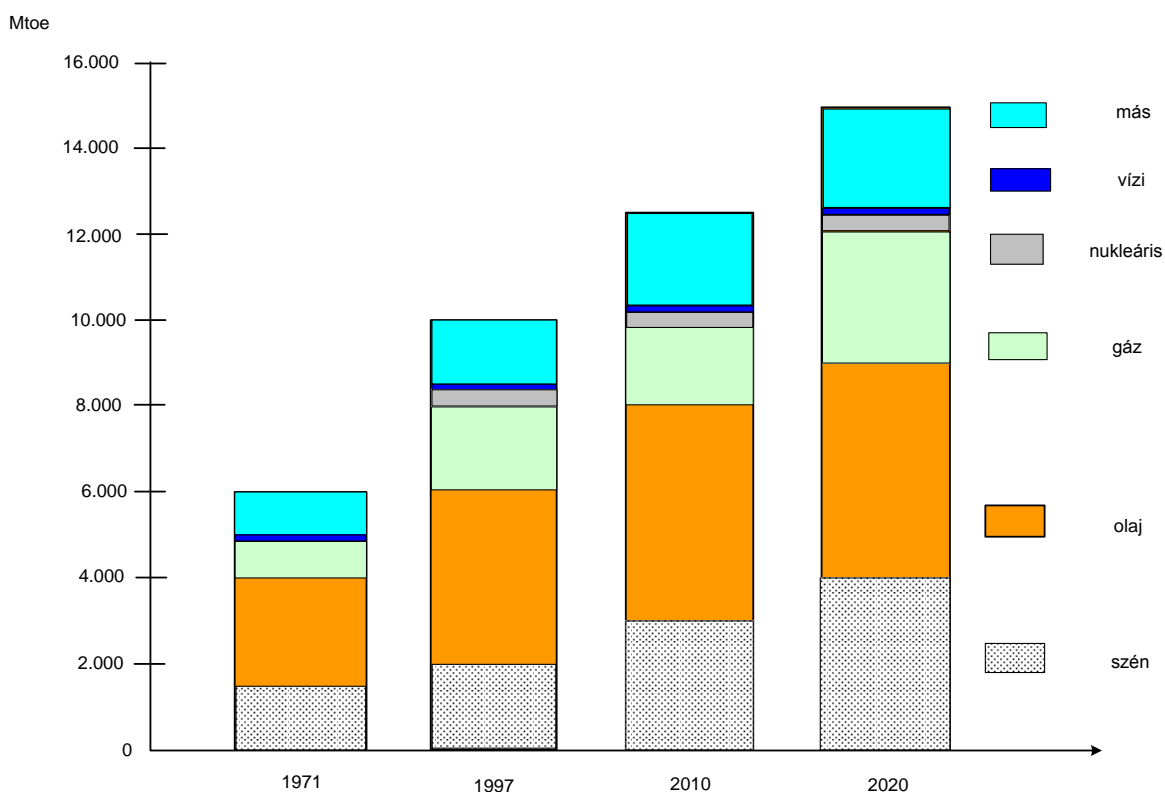
Dr. Tungler Antal, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

### Erőművek

A tüzelés az energia fő forrása, az energia pedig a modern társadalom egyik fő hajtóereje, ugyanakkor a környezetszennyezés elsődleges oka. A legnagyobb tüzelőberendezések az erőművekben vannak, ezeket az energia igényeknek és követelményeknek megfelelően működtetik, egyrészt mint közműveket, másrészt mint nagy ipari energiaszolgáltató műveket, amelyek energiát szolgáltatnak elektromos áram, mechanikai energia, gőz vagy hő formájában a lakosságnak és az ipari technológiák részére.

Műszakilag a tüzelés a tüzelőanyag és az oxidálószer önfenntartó, exoterm reakciója, ami kémiai reakciók és fizikai folyamatok sorozatán alapul, végeredménye víz és széndioxid, amik a legstabilabb reakció termékek.

Az erőművekben sokféle tüzelési technikát alkalmaznak, szilárd anyagok elégetése megvalósítható por alakban, fluid ágyban, vagy darabosan, rostély használatával. A folyékony és gáznemű tüzelőanyagokat kazánokban, motorokban és gázturbinákban lehet eltüzelni. A legfontosabb tüzelő anyagok a szén, a kőolajtermékek, a földgáz, valamint a legrégebben alkalmazott, a fa. Az oxidálószer leggyakrabban a levegő



139. ábra. A teljes primer energia termelés Mtoe-ben (kőolajjegyenérték, 1 Mtoe = 16,3 GJ)

\*\* A más tartalmazza a geotermális, szél stb energiatermelést. Forrás: International Energy Agency, [www.iea.com](http://www.iea.com).

Az alkalmazott rendszer kiválasztása a rendelkezésre álló tüzelőanyag, a gazdasági, technikai, hálózati, környezeti és helyi tényezők függvénye. Az elektromos áramot általában úgy állítják elő, hogy kazánban gőzt fejlesztenek, amivel turbinát hajtanak, ezzel pedig az áramtermelő generátort. A teljes rendszer hatásfokát termodinamikai tényezők határozzák meg, a gőzt a turbina után ugyanis kondenzáltatni kell.

Egyes folyékony és gáznemű tüzelőanyagokat el lehet közvetlenül tüzelni turbinákban vagy belsőégésű motorokban, amelyekkel generátort hajtanak. Ezek előnye, hogy a változó energiaigényekhez jobban igazodnak.

Az energia SI mértékegysége 1 J. azaz egy joule.

Egyéb mértékegységei:

1 cal (kalória)= 4,1868 J

1 kcal= 4186,8 J

1 Btu (British thermal unit)= 1055,05 J

1 thermie= 4,184E6 J

1 ft.lbf= 1,35582 J

1 kJ= 1000 J

1 MJ= 1E6 J

1 LEh (lóerőóra)= 2,6845E6 J

1 kWh= 3,6E6 J

1 MWh= 3,6E9 J

1 eV (elektron volt)= 0,16021E-18 J

1 erg= 1E-7 J

1 Quad=1015 BTU


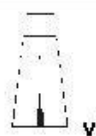







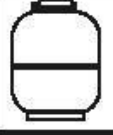
A legtöbb tüzelőberendezés a környezetünkben meglévő, éghető anyagokból nyer használható energiát, a fosszilis tüzelőanyagok a legfontosabbak. Elégetésükkel lényeges, egyes esetekben jelentős környezeti hatást gyakorolnak, emisszió történik a levegőbe, a vizekbe és a talajba egyaránt, ezek közül a légnemű szennyezők alkotják a manapság leginkább aggodalomra okot adó környezeti hatásokat.

A tüzelési folyamatok emissziói több tényezőtől függenek, az üzemanyag típusától, összetételétől, a tüzelőszervezettől, az adalékanyagoktól. Az emissziókat nem-szennyező és szennyező csoportokba osztályozzák, az elfogadható emisszióhoz tartozik a széndioxid (CO<sub>2</sub>) és a víz (H<sub>2</sub>O), a nem-kívánatos emisszió az el nem égett tüzelőanyag, a nitrogénoxidok (NO, NO<sub>2</sub>, és N<sub>2</sub>O, összefoglaló jelöléssel NO<sub>x</sub>), a kén oxidok (SO<sub>2</sub> és SO<sub>3</sub>, vagy SO<sub>x</sub>), a tökéletlen égés termékei (TÉT), ide tartozik a szénmonoxid (CO) is, valamint az el nem égett szénhidrogének. További termékei a tökéletlen égésnek az illékony szerves anyagok, aromás, többgyűrűs szénhidrogének (PAH) és részecskék (szilárd karbon vagy korom). Az égés melléktermékei lehetnek a formaldehid, a halogénezett szénhidrogének, egyes fémvegyületek. Ezek ugyan kis mennyiségűek, de a hatásuk a városi környezetben jelentős lehet a nagy mennyiségű tüzelés, továbbá a kibocsátott anyagok légkörre gyakorolt hatása (üvegház hatás) és reakciói miatt.

**28. táblázat. Energia konverziós faktorok**

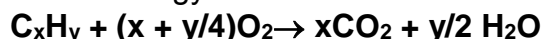
cél ⇒	TJ	Gcal	Mtoe	MBtu	GWh
forrás ↓	szorozni kell				
TJ	1	238,8	$2,388 \times 10^{-6}$	974,8	0,2778
Gcal	$4,1868 \times 10^{-3}$	1	$10^7$	3,968	$1,163 \times 10^{-3}$
Mtoe	$4,1868 \times 10^4$	$10^7$	1	$3,968 \times 10^7$	11630
MBtu	$1,0551 \times 10^{-3}$	0,252	$2,52 \times 10^{-8}$	1	$2,931 \times 10^{-4}$
GWh	3,6	860	$8,6 \times 10^{-5}$	3412	1

**29. táblázat. A különböző energiahordozók részesedése a világ energiatermelésében**

 <b>BIOMASSZA</b> megújuló fűtés, vill. energia termelés, szállítás	<b>3.6%</b>	 <b>KŐOLAJ</b> nem-megújuló vill. energia termelés, gyártás, szállítás	<b>38.2%</b>
 <b>VIZIENERGIA</b> megújuló Electricity	<b>3.5%</b>	 <b>SZÉN</b> nem-megújuló vill. energia termelés, gyártás,	<b>22.5%</b>
 <b>GEOTERMÁLIS ENERGIA</b> megújuló fűtés, vill. energia termelés	<b>0.3%</b>	 <b>FÖLDGÁZ</b> nem-megújuló fűtés, gyártás, vill. energia termelés	<b>22.0%</b>
 <b>NAPENERGIA</b> megújuló világítás, fűtés, vill. energia termelés	<b>&gt;0.1%</b>	 <b>URÁN</b> nem-megújuló vill. energia termelés	<b>8.0%</b>
 <b>SZÉLENERGIA</b> megújuló vill. energia termelés	<b>&gt;0.1%</b>	 <b>PROPÁN</b> nem-megújuló gyártás, fűtés	<b>1.8%</b>

A hagyományos tüzelés speciálisan kialakított reaktorokban történik, ezek a kemencék, amiken belül vannak az égető kamrák, amik ellenállnak a nagy hőmérsékletnek. A belső égésű motorok esetén az égető kamra a henger, a gázturbinákban ezt a feladatot a különleges ötvözetből készült csövek látják el. A nem-hagyományos tüzelés esetén a folyamatok a láng hőmérsékleténél lényegesen alacsonyabb hőmérsékleten zajlanak, például a tüzelőanyag cellákban 80°C-on, szemben a hidrogén láng 2000°C-os hőmérsékletével, a katalitikus égetőkben ez a hőmérséklet 800°C lehet.

A hagyományos tüzelés gáz fázisú reakció, ami lángban játszódik le, a tüzelőanyag oxigénnel reagál az alábbi reakcióegyenlet szerint:



Az oxigént a levegő adja, ami kb. 21 % O<sub>2</sub>-t és 79 % N<sub>2</sub>-t tartalmaz. Ez a nitrogénes hígítás csökkenti a láng hőmérsékletét, de egyben az NO<sub>x</sub> szennyezés forrása is.

A lángok kétfélék lehetnek: előkevert lángok és diffúziós lángok. Példaként az előbbire említhetjük a gáztűzhelyek kék lángját, az utóbbira a gyertyalángot. A kevert lángokban a tüzelőanyagot és az oxidálószeret molekuláris szinten összekeverik, így a

reaktánsok molaránya a légefelesleg tényezővel ( $\lambda$ ) jellemezhető. A  $\lambda > 1$  esetén a levegő feleslegben van, emiatt a hatásfok kisebb, mert a többlet levegőt is fel kell melegíteni a láng hőmérsékletére,  $\lambda < 1$  esetén a tüzelőanyag van feleslegben, ezért az égése nem lesz teljes, ezért kisebb a hatásfok, továbbá a tökéletlen égés termékei megjelennek, úgymint a CO és a korom.

$\lambda = L / L_{st}$  ahol L az égéshez felhasznált levegő,  $L_{st}$  pedig az égéshez szükséges sztöchiometrikus levegő mennyiség.

Néhány tüzeléstechnikai mennyiség és fogalom definíciója:

Égéshő kJ/kg  $[33808 \cdot C\% + 144184 \cdot (H\% - 1/8 O\%) + 10460 \cdot S\%] / 100$   
Fűtőérték kJ/kg  $F = É - R$  (R a Regnault hő)

$R = [2510 (9 \cdot H\% + nedv.\%)] / 100$

(A C, H, O, S és nedv. %-ok a tüzelőanyagra vonatkoznak.)

Égési hőmérséklet az a maximális hőmérséklet, amely a tüzelőanyag elméleti levegőszükséglettel való elégetése során keletkezik, ha nincs hőcsere és veszteség. Légefelesleg tényező a ténylegesen használt és az elméletileg szükséges levegő hányada.

Gyulladási hőmérséklet az a legkisebb hőmérséklet, amire ha az éghető anyagot felmelegítik levegőn, akkor magától meggyullad.

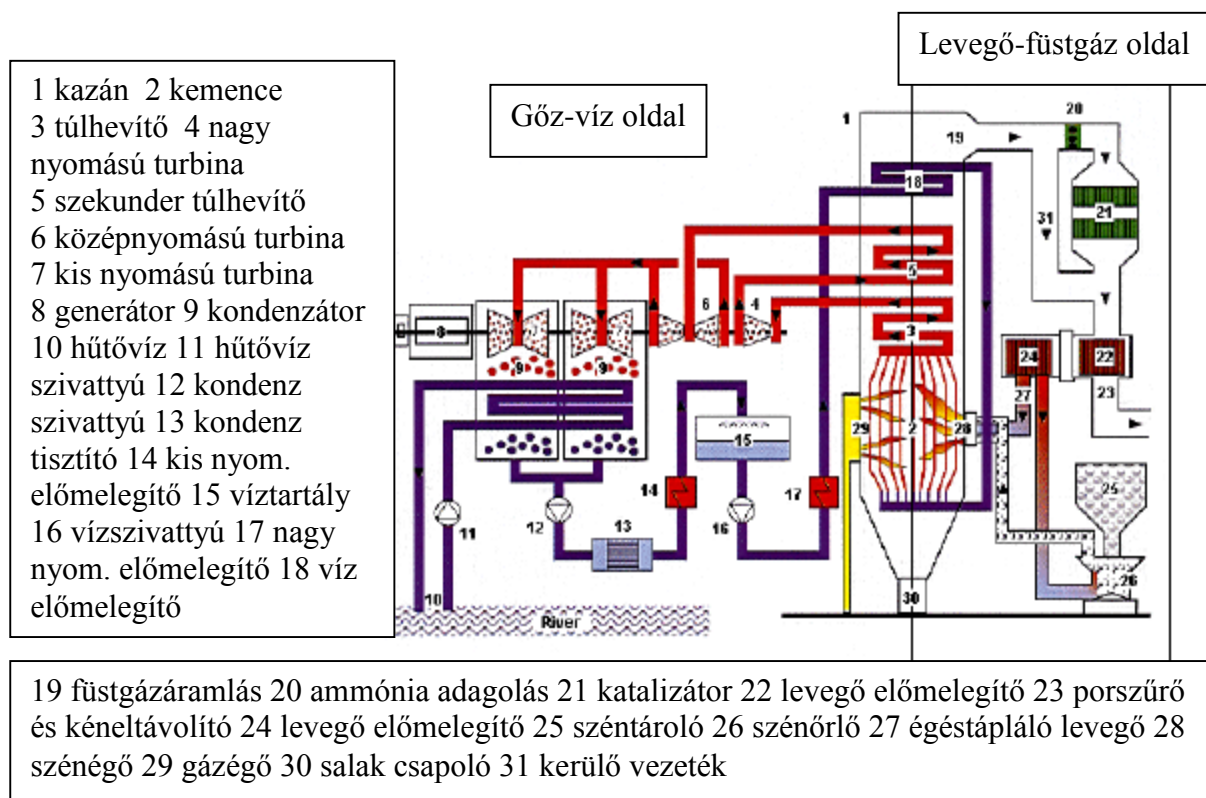
Túl gyors égés: robbanás, robbanó elegy jellemzői az alsó és felső robbanási határ, miszerint az éghető gáznemű anyagot levegővel az adott koncentrációban összekeverve szikra hatására már illetve még robban.

A diffúziós lángokban nagyobb hőmérséklet alakulhat ki, mint a kevert lángokban, viszont jobban szabályozhatók. A magasabb lánghőmérsékleten a nitrogénoxidok képződése is nagyobb mértékű. A tüzelőanyagok, mint például a kőszén és a kőolaj tartalmaznak kémiaiilag kötött szerves nitrogént, ami szintén hozzájárul a füstgázok NO<sub>x</sub> tartalmához. A tüzeléstechnika egyik, környezetvédelmi szempontból nagy kihívása a nitrogénoxidok képződésének csökkentése illetve megakadályozása. Alapvetően két módszerrel lehet ezt elérni, az egyik a tüzelési folyamat módosítása a NO<sub>x</sub> képződés csökkentésére, lényegében a lánghőmérséklet csökkentésével, a másik a füstgázok NO<sub>x</sub> mentesítése redukcióval. Ez utóbbi redukció lehet termikus (nitrogén tartalmú redukáló szerek [karbamid] adagolásával) és katalitikus (a redukáló szerek lehetnek a CO, H<sub>2</sub>, szénhidrogének és ammónia).

A tüzelőanyagok kéntartalma az égetés során elsősorban kéndioxiddá alakul, ami a nitrogénoxidokkal együtt az ún. savas esőket okozza. A tüzelőanyagok, elsősorban a kőolajszármazékok kéntartalmának csökkentése a leghatékonyabb megoldás, széntüzelésnél a füstgázokból CaO-dal lehet a kéndioxidot kivonni.

**30. táblázat. Az EU országok elektromos energia termelése 1997-ben. Forrás: Eurelectric 2001 [4]**

Tüzelőanyag		Termelt elektromos energia mennyisége GWh	Az összes %-ban
Szilárd tüzelőanyagok	Szén	471797	19,5
	Lignit	183140	7,6
	Kőolajszármazékok	185755	7,7
	Földgáz	332331	13,7
	Termék gázok	27793	1,1
	Egyebek	7707	0,3
Biomassza		27283	1,1
Nukleáris		859894	35,5
Víz		316116	13,0
Geotermális		3957	0,2
Szél		6909	0,3
Összes		2422682	



**140. ábra. Szén és gáztüzelésű hőerőmű fontosabb részeit**

A szilárd tüzelőanyagokat a tüzelőberendezések 90 %-ban porított formában alkalmazzák. Kétféle tüzelőeszközt használnak:

-szilárd fenékhamut adó kemencét, ami jóval a hamu olvadáspontja alatt dolgozik,

-salak csapoló kemencét, ami olyan magas hőmérsékleten üzemel, hogy a hamu olvadt állapotú, lefolyik a falak mentén és vízzel telt gyűjtőben fogják fel. Az ilyen tüzelőberendezéseket használják hulladékok együttes tüzelésére is.

A fluidizációs kemencéket használják a durván megőrölt szilárd tüzelőanyag égetésére, a nagyobb kemencékben ez az ún. cirkulációs fluidizált ágyban történik. Az ilyen berendezések részei még a por leválasztásra szolgáló ciklonok és a nagyobb szemcsék recirkulációját biztosító pneumatikus szállítók.

A rostélyos tüzelés a hagyományos változat, lényege, hogy a tüzelőanyag darabok átmérője nagyobb kell legyen, mint a rostély nyílásainak mérete.

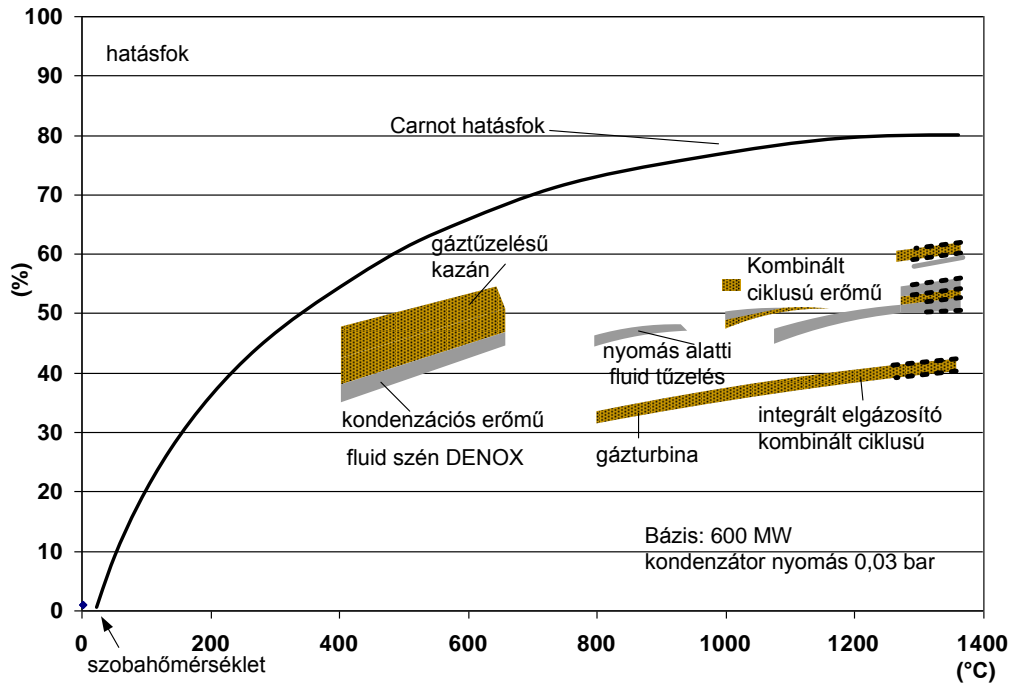
Az olaj és gáz tüzelése volt a modell a portüzelés számára. A gáz direkt elégetése levegővel megy, illetve a folyékony tüzelőanyagot beporlasztják finom cseppek formájában a kemencébe, ami aztán nagy mennyiségű illékony anyagot adva elég. Az ilyen folyamatban általában nem képződik hamu vagy csak csekély mennyiségű. Az égők általában a kemence alján helyezkednek el.

Az elgázosítókat többnyire biomassza feldolgozására használják, ezek atmoszférás nyomáson működnek, a kapott gázt főleg belsőégésű motorokban tüzelik el. Nagyobb erőművekben az elgázosítást nyomás alatt és nagy hőmérsékleten végzik, a gázt gázturbinákban égetik el, vagy kombinált ciklusú erőműben még gőzturbinákkal is kombinálják az energiatermelő egységet.

A gázturbinák ipari használatának előnyét felismerték a hőszolgáltatók is, ugyanis a füstgázok hőmérséklete 500°C felett van és így lehetőség nyílik egy további gőzfejlesztő beiktatására, amivel javítható az elektromos energia előállítás hatásfoka. Ez az elv alkalmazható a belsőégésű motorokra és a hőhasznosításra együttesen is.

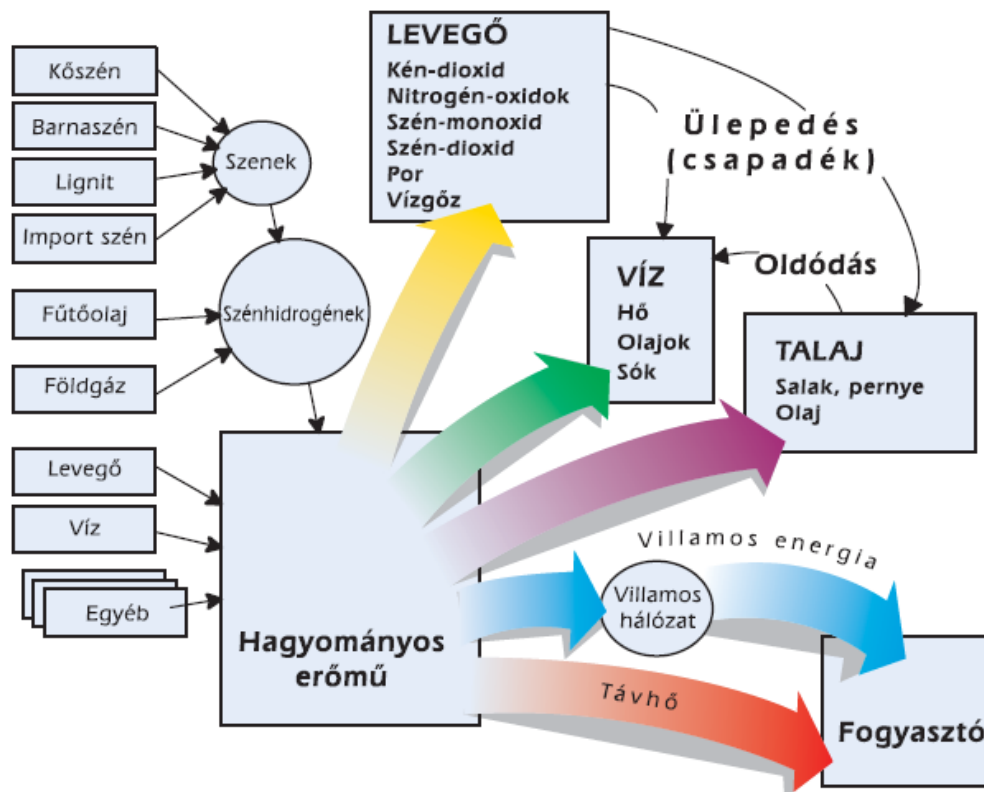
### 31. táblázat. Erőművek hatásfoka

Erőmű típusa	Elektromos hatásfok %		Tüzelőanyag hasznosulás %
	Új erőművek	Létező erőművek	Összes
Gáz turbinás	36-40	32-35	
Gázmotoros	38-45		
Gáztüzelésű kazán	40-42	38-40	
Kombinált ciklusú kiegészítő tüzeléssel együttes hőenergia előállítással	<40	<35	75-85
Biomassza fluidizációs	>28-30		75-90
Tőzeg fluidizációs	>28-30		
Az egység hőhasznosítási hatásfoka %			
Szén portüzelés	43-47	43-47	75-90
Nyomás alatti fluid	>42	>42	
Lignit portüzelés	42-45	42-45	
Nyomás alatti fluid	>42	>42	



141. ábra. A Carnot hatásfok összehasonlítása az egyes erőműtípusok hatásfokával a működési hőmérséklet függvényében.

## Az erőművek környezeti hatásai



142. ábra. Erőművek tüzelőanyagai és kibocsátásai



## Szálló por leválasztás

Az erőművek környezeti hatásai a levegőbe, vizekbe történő kibocsátásból és a hulladékok keletkezéséből adódnak. A levegőbe porszerű szilárd anyagok és gázok kerülhetnek, a következőkben ezen kibocsátások csökkentési lehetőségeit vesszük sorra.

A por eltávolítására elektrosztatikus porleválasztókat, szűrőket és mosókat használnak. Az elektrosztatikus leválasztó tulajdonképpen egy nagy doboz, amely fémlemezket tartalmaz, ezek között áramlik a füstgáz. A lemezek az elektródák, amelyekre nagy feszültséget kapcsolnak. A nagyfeszültségű elektromos tér hatására a gázmolekulák ionizálódnak, a porszemcsékkel ütközve azokon megkötődnek. Az ily módon töltéssel rendelkező porszemcsék az elektromos térben elmozdulnak az elektródok felé.

A szemcsék eltávolításának négy fázisa.

- a porszemcsék elektromos feltöltése,
- a feltöltött részek elmozdulása az elektromos térben,
- a por összegyűjtése az elektródokon,
- a por eltávolítása az elektród felületéről.

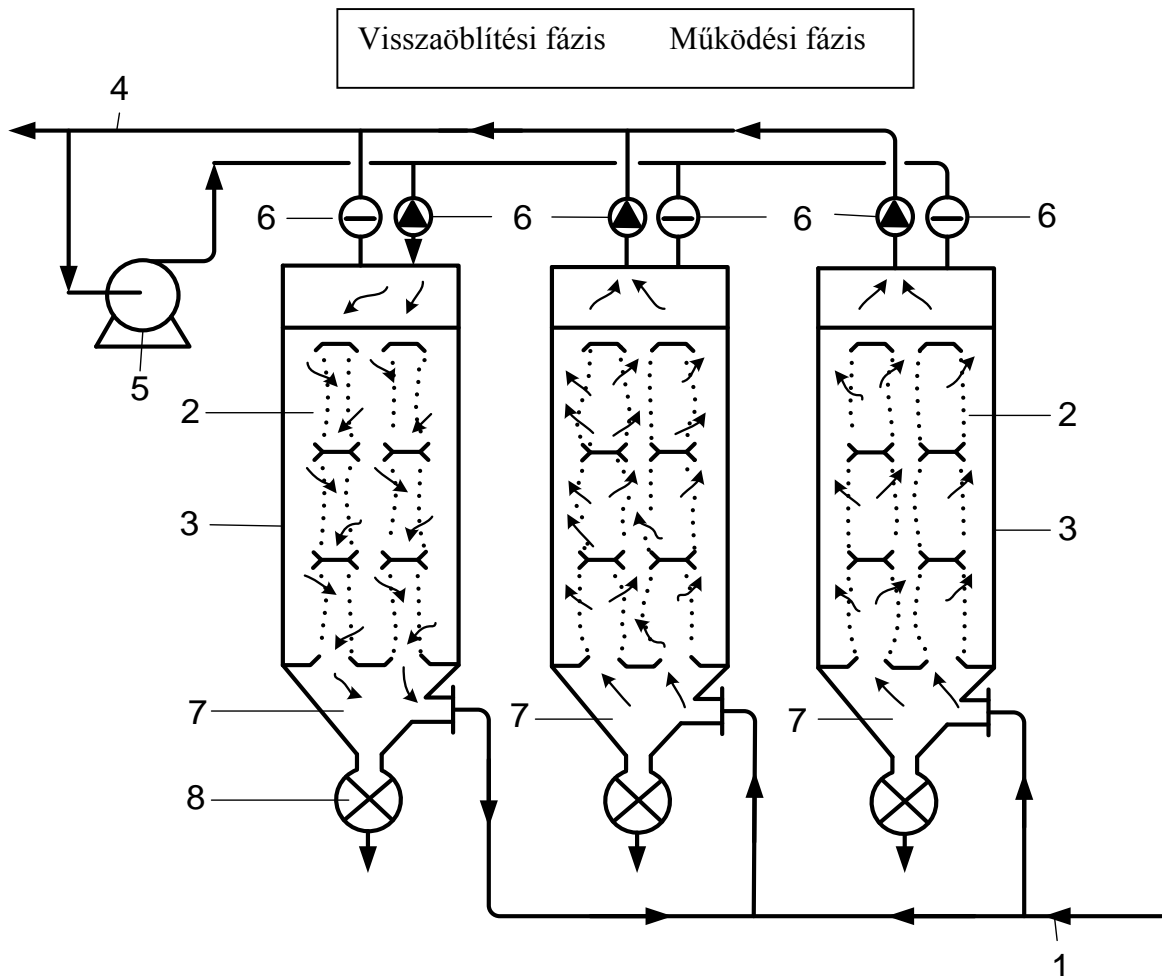
A leválasztott por az elektródokról nedves úton is eltávolítható, például vízzel.

A porleválasztás másik módszere a zsákos szűrés, gyakran együtt alkalmazzák a kéndioxid eltávolítással, ami mész vagy szóda beporlasztással történik. A tisztítandó füstgáz a szűrőben felfelé áramlik a szűrőszövet mentén, a tiszta gáz áthatol, a por a külső felületen lerakódik. Az egyes szűrők felváltva dolgoznak, hosszabb szűrési és rövidebb levált por eltávolítási időszakokkal.

A por szűrőfelületről való eltávolítására használt módszerek lehetnek a fordított légáramlás, mechanikus rázás vagy ütogetés, vibráció, túlnyomásos levegő pulzáltatás. A szűrőzsákok anyagát aszerint választják meg, hogy mekkora az igénybevétel, azaz a gázhőmérséklet, áramlási sebesség, por szemcseméret, savtartalom. A szűrők működését folyamatosan figyelemmel kell kísérni és hibás működés esetén beavatkozni, erre ma már optoelektronikus készülékek állnak rendelkezésre. A szűrők anyaga szintetikus szálakból szőtt textília, teflon és üvegszövet keveréke. Rendszerint 2-5 évente kell a szűrők anyagát kicserélni, ami a működési költség kb 10%-át teheti ki.

A hagyományos rostélyos tüzelés esetén elégséges lehet a mechanikus porleválasztás ciklonokkal, de ennek feltétele a nagyobb szemcséjű szálló hamu.

A harmadik poreltávolítási mód a mosás, venturi mosóban illetve mozgó ágyas mosóban. Ezekben a füstgázban szálló porszemcsék a nedvesség hatására állnak össze és csapódnak le a folyadékban. A folyadék lehűti a füstgázt, az így kivont hőt is célszerű hasznosítani. A gázmosókhoz alkalmas folyadék beporlasztóra és szennyvíztisztításra is szükség van. Általában kisebb hamu vagy pernye terhelésnél alkalmazhatók.



143. ábra. Zsákos füstgáz szűrő

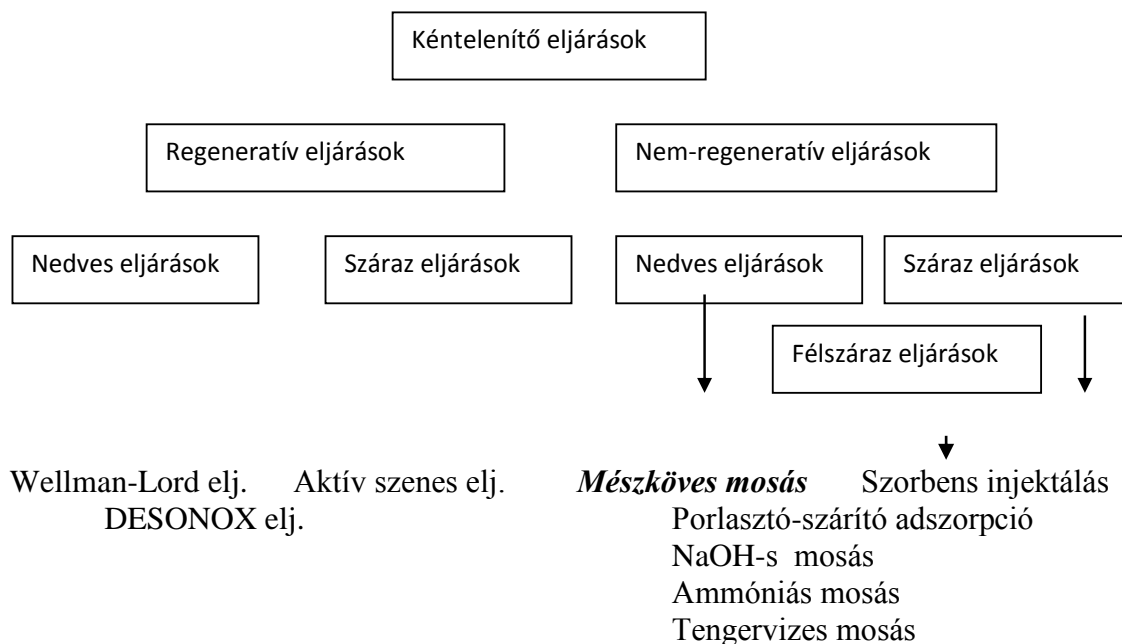
1 Nyers gáz bevezetés, 2 Szűrőzsákok 3 Szűrő háza 4 Tiszta gáz elvezetés 5 Légfúvó  
6 Szabályzó szelepek 7 Por gyűjtő 8 Forgó szelepek

A porleválasztási eljárások hatékonysága 96 és 99,9 % között változik a porszemcsék átmérőjétől függően, kivétel a ciklonos módszer, ahol ez csak 85-90 % az 5-10  $\mu\text{m}$ -nél nagyobb szemcsékre. A mosók áramlási ellenállása nagyobb, mint a többi berendezésé (30-200 x  $10^2$  Pa).

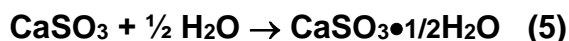
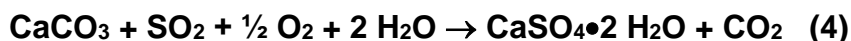
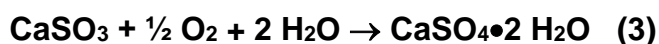
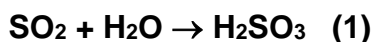
### Kénoxid emisszió csökkentés

A kéndioxid emisszió csökkentésének elsődleges lehetséges módja, hogy olyan tüzelőanyagot használunk, amelynek bázikus hamuja van és ez köti meg a kéndioxid legalább egy részét.

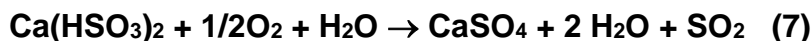
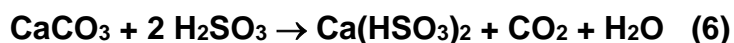
A kéndioxid kibocsátás túlnyomó részét azonban csak külön erre a célra alkalmazott eljárásokkal lehet a füstgázból eltávolítani:



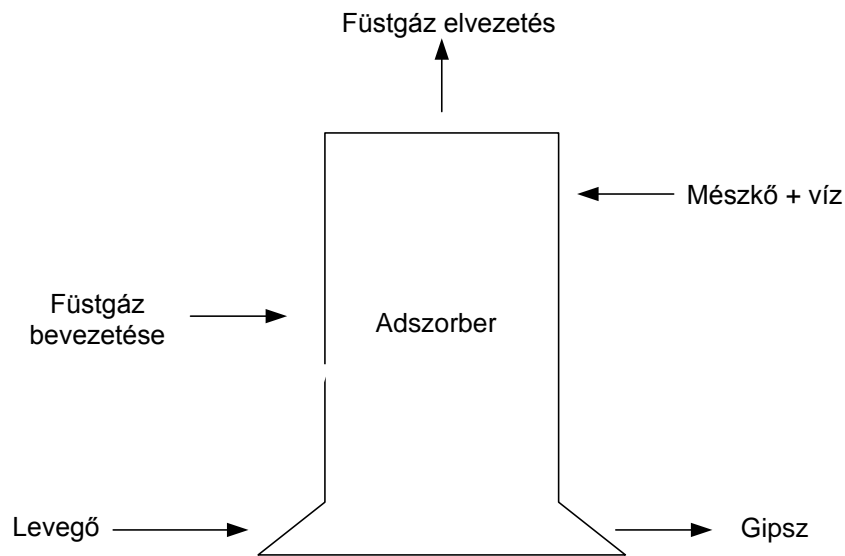
A legelterjedtebb technológia a meszes illetve mészköves mosás, amit az erőművek mintegy 80%-ában használnak. A nedves mészköves mosókat két kategóriába oszthatjuk, aszerint, hogy természetes oxidációt, vagy kényszerített oxidációt (pH 5-6) alkalmaznak.



Az (1) és (2) reakciók mindegyik kéttelenítőben végbemennek, a (3) a kalciumszulfit levegős oxidációja és a kristályos gipsz képződése. Alacsonyabb pH-n (4-5) a következő reakciók játszódnak le:



Ennek előnye, hogy a kalciumbiszulfid jobban oldódik vízben így a reakció jobban végbemegy és nincs kiválás.



*144. ábra. Mészköves mosás vázlatos rajza*

Az egy reaktoros un. in situ oxidációt használó eljárás terjedt el leginkább a világon, az adszorber négy alapváltozatát használják: porlasztó torony, jet buborékolós reaktor, töltött oszlop és kettős hurok reaktor. A nedves kéntelenítők agresszív hatásoknak vannak kitéve, korrózió, erózió és abrúzió történik. A füstgáz utat kell védeni, például gumi vagy csempe borítással a savas hatás ellen, különösen veszélyeztetett részek a bevezető nyílás, az adszorber és a kémény falak. A mésziszap mozgató rendszerekben fordul elő a koptató hatás, ilyenek a fúvókák, keverők, szivattyúk, csövek, szelepek.

A füstgáz eloszlásában a felszálló hatás, azaz a hőmérséklet mellett fontos a kémény magassága, ezzel együtt lehet, hogy szükséges a füstgáz visszamelegítése a kéntelenítés után. A technológia megbízhatóan működik számos helyen, alkalmazzák régebben épült erőművekben is a füstgázok kéntelenítésére.

A kéntelenítő eljárások hatásossága változó, a meszes mosásé 92-98 %, a tengervizes elnyelésé 85-98 %, a száraz szorbens injektálásé 85-92 %.

### **NO<sub>x</sub> emisszió csökkentés**

A nitrogén oxidok (NO<sub>x</sub>), amelyek a fosszilis tüzelőanyagok égetésénél keletkeznek a NO, NO<sub>2</sub> és az N<sub>2</sub>O. A teljes NO<sub>x</sub> kb. 90 %-a az NO. A nitrogén oxidok képződése lehet termikus és a tüzelőanyag nitrogéntartalmából keletkező.

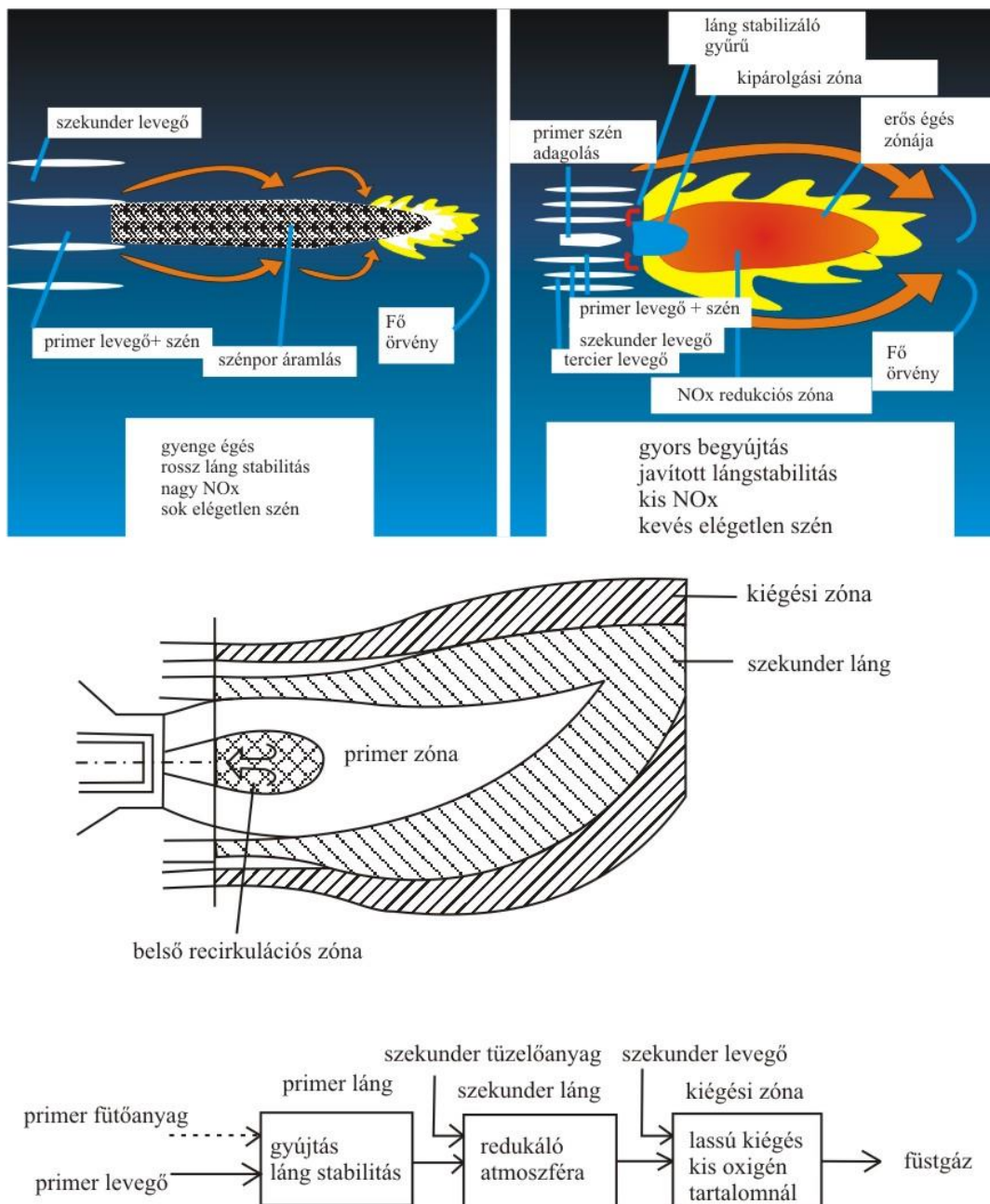
### **Primer denox technikák**

Az NO<sub>x</sub> keletkezését akadályozó illetve a tüzelőberendezésből kijutásukat megakadályozó megoldásokat nevezzük primer denox technikáknak. Ezeknek a denox mellett nem lehet kedvezőtlen hatásuk a többi szennyező anyag keletkezésére, mint a CO, vagy a tüzelőberendezés hatásfokára.

A primer denox technikák a következők lehetnek: kis légfeszleg, levegő megosztás, füstgáz recirkuláció, csökkentett levegő előmelegítés, tüzelőanyag megosztás. A legismertebbek a kis NO<sub>x</sub> égők. A légfeszleg csökkentés egyszerű módszer, viszont pontos füstgáz elemzést, valamint jól szabályozható tüzelőanyag adagolást és szabályozott levegő bevezetést igényel. A füstgáz recirkuláció csökkenti a

lánghőmérsékletet és ezzel a  $\text{NO}_x$  képződést. Hasonló hatású a csökkentett levegő előmelegítés is, ez azonban a hatásfok csökkenéséhez vezethet. A tüzelőanyag megosztása oly módon történik, hogy a tüzelő berendezést három zónára osztják. Az elsőben a tüzelőanyag 80-85 %-át égetik el léghiányosan, a másodikban újabb tüzelőanyagot enyhén redukáló körülmények között ( $\lambda = 0,7-0,9$ ), majd a harmadik utóégetőben levegő beadással ( $\lambda = 1,1$ ) teszik teljessé a folyamatot.

A legelterjedtebb technika a kis  $\text{NO}_x$  égők, amelyek működhetnek levegő és üzemanyag megosztással, füstgáz recirkulációval.



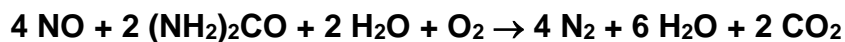
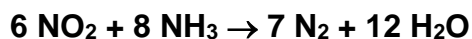
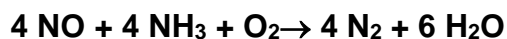
145. ábra. Csökkentett  $\text{NO}_x$  kibocsátású égők működése, felső ábrán levegő, alsó ábrán tüzelőanyag és levegő megosztással.

A csökkentett NO<sub>x</sub> kibocsátású égők új változatai a levegő és üzemanyag megosztást és a füstgáz recirkulációt együttesen alkalmazzák. A korábbi égők hátránya volt, hogy a láng átmérője 30-50 %-al nagyobb volt. Az új égőknél kombinálják az elkülönített lángot és a levegő megosztást, úgy, hogy a levegőt külön-külön fűjják be az elemi lángokba. A másodlagos légbefúvók nagyobb impulzussal működnek, ezzel mintegy szűkebbre zárják a lángot az égő tengelyéhez, azaz csökkentik az átmérőjét, hasonlóvá téve azt a hagyományos kompakt lángokéhoz. Az ilyen égők helyigénye nem nagyobb a hagyományos égőkénél, ezért beszerelhetők a meglévő berendezésekbe is.

### **Szekunder denox technikák**

A szekunder denox eljárások „csővégi” megoldások, a megképződött NO<sub>x</sub> csökkentésére szolgálnak, használhatók önállóan vagy a primer megoldásokkal együtt is. A füstgázok NO<sub>x</sub> tartalmának csökkentését lehet szelektív katalitikus redukcióval (SCR) és szelektív nem-katalitikus redukcióval (SNCR) megvalósítani. A redukáló szer mindkét esetben ammónia vagy karbamid lehet.

A szelektív katalitikus redukció 170 és 510 °C között játszódik le a katalizátorok felületén az alábbi reakcióegyenletek szerint:



A technológia fontos eleme az ammónia bejuttatása és minél tökéletesebb elkeveredése a füstgázban. A katalizátorok monolitok, méhsejt formájúak vagy egymásra rakott lapokból állnak. Anyaguk lehet TiO<sub>2</sub>, amihez V, Mo oxidot adnak, lehetnek zeolitok, vasoxid és végül aktív szén, ez utóbbi csak alacsony hőmérsékleten használható.

A DENOX katalizátorok élettartama 6-10 év is lehet, függően a tüzelőanyag minőségétől és a tüzelőberendezés működésétől. A katalitikus reaktor a füstgázok útjában több helyen is lehet, a kazán után közvetlenül, a porleválasztó után, vagy a kémény előtt közvetlenül, a kénmentesítő után.

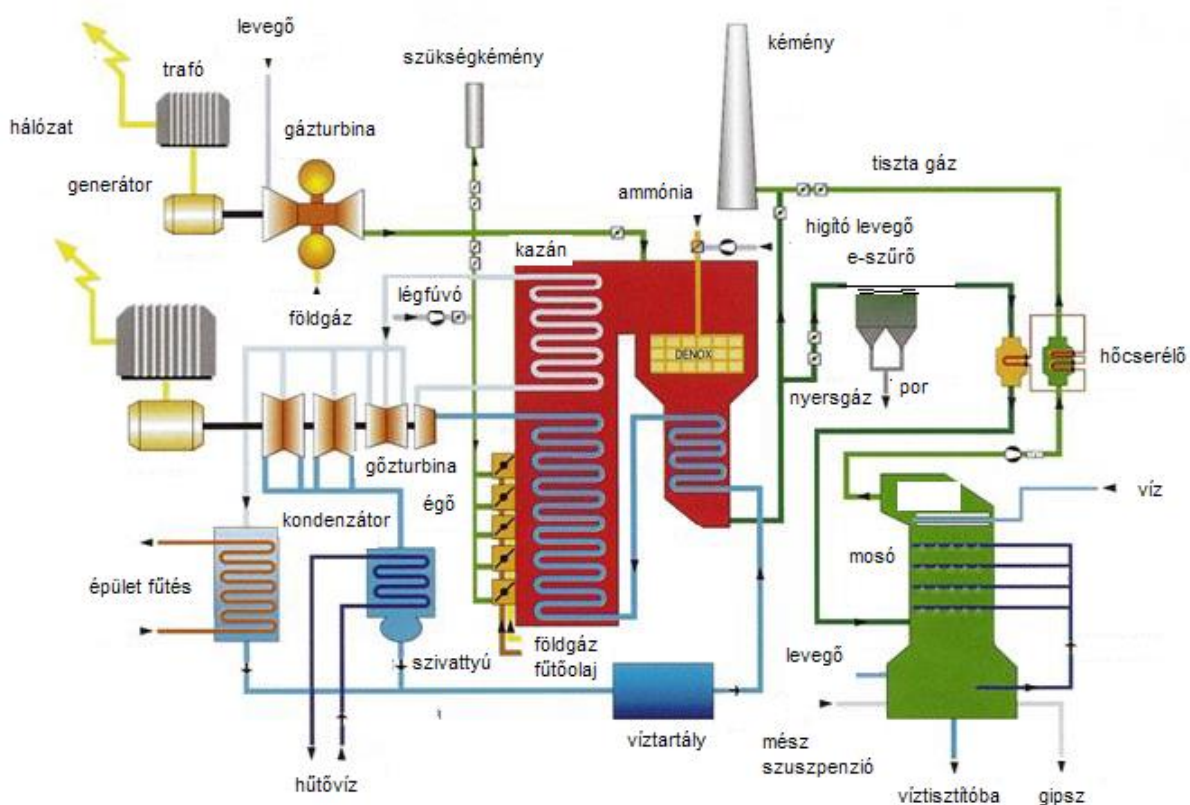
A nem-katalizált redukció lényegesen nagyobb hőmérsékletet igényel, 850-1100 °C-ot. Ez azt jelenti, hogy a redukáló szert az égőtér felső részébe kell bejuttatni, célszerűen úgy, hogy a füstgázzal egyenletesen elkeveredjen. Ez a technika kis NO<sub>x</sub> tartalmú füstgázra és stabil tüzelőanyag minőségnél használható.

A katalitikus redukció hatásfoka 80-95 %, míg a nem katalizált redukcióé 30-50 %. Fejlesztés és üzemi bevezetés stádiumában vannak olyan eljárások, amelyek a NO<sub>x</sub> és a SO<sub>2</sub> eltávolítást együtt oldják meg, ilyen az aktív szenes adszorpción alapuló technológia. Ezekkel a kibocsátás mérséklése mellett például a kén vagy a kénsav, mint hasznosítható melléktermékek jelennek meg.

A tüzelőberendezések kibocsátásainál meg kell még említeni a fémeket, mint például a higanyt. Ennek a kibocsátását lehet csökkenteni a szén előkezelésével, azaz a higany tartalmú ásvány hányad kivonásával.

A tökéletlen égésből keletkezhet a CO és szénhidrogén emisszió, ezeknek az elkerülése a berendezések megfelelő működtetésével lehetséges, azaz a szükséges levegő mennyiség, égéstér hőmérséklet és tartózkodási idő biztosításával.

A tüzelőberendezések működése elkerülhetetlenül együtt jár a közismerten „üvegház hatású” CO<sub>2</sub> kibocsátásával. Nyilvánvaló az is, hogy ebből a szempontból a földgáz tüzelés a legelőnyösebb, viszont a készletek végesek. Szénből hosszabb időre van tartalék, viszont több a fajlagos CO<sub>2</sub> kibocsátás. Ezért az utóbbi időben előtérbe került olyan technológiák fejlesztése, amelyek a CO<sub>2</sub> megkötését célozzák. Sikerük kétséges.



146. ábra. Kombinált gázturbinás és gőzturbinás fűtőerőmű

## Kőolajfinomítók

Az olajipar a 19. század második felében alakult ki, az első ipari finomítók az Egyesült Államokban (Pennsylvania) és Oroszországban (Baku) kezdtek el dolgozni. A 20. században a motorizáció gyorsította fel a kőolaj termelését és feldolgozását, ami a század végére az egyik meghatározó iparággá vált az egész világon. Az olajipar legnagyobb fejlődése a II. világháborút követő három évtizedben zajlott. 1950 és 1980 között a kőolaj termelése és feldolgozása megötszöröződött. Az 1973-74-es és 1979-80-as olajválságok jelentős áremelkedéseket hoztak, amik természetesen hatottak az olaj fogyasztásra is. Olyan technológiákat fejlesztettek ki, amelyekkel megnőtt a kitermelés és emiatt csökkent a szükséges finomítói desztillációs kapacitás. A finomítói struktúrák komplexitása nőtt, nagy maradék feldolgozó kapacitások létesültek, amik

azt eredményezték, hogy megnőtt az un. „fehérárú” mennyisége, azaz az üzemanyagoké, miközben a feldolgozott kőolaj mennyisége még csökkenhetett is.

A 21. század elején immáron a kőolaj és földgáz készletek véges mivolta az egyik fő dilemma, aminek feloldására az alternatív energiahordozók fokozott alkalmazása jelentheti az egyik megoldást.

A kőolajfeldolgozás termékei az üzemanyagok (benzin, kerozin, gázolaj), fűtőanyagok (PB gáz, fűtőolaj), petrokémiai alapanyagok (vegyipari benzin és gázolaj), kenőanyagok, oldószerek, bitumen, korom, viaszok, kén, aromás vegyületek (benzol, toluol, xilolok).

A finomítók elhelyezkedése változó, lehetnek nagy kikötők mellett, vagy az ellátandó régió közepén olajvezetékhez kapcsolódva. A modern finomítók nagymértékben automatizált üzemek, a közepes méretű finomítók kapacitása 10.000 tonna kőolaj feldolgozása naponta.

A kőolaj elsősorban szénhidrogéneket tartalmaz, telített (paraffin és naftén [gyűrűs] szénh.) és telítetlen, elsősorban aromás szénhidrogéneket. Emellett kén, nitrogén és oxigén tartalmú vegyületek is vannak benne, továbbá fémek (pl. V, Ni, Fe) szintén vegyületeik formájában. Összetételük alapján a kőolajokat három kategóriába sorolják: paraffin bázisú, naftén bázisú és vegyes bázisú olajok. Osztályozzák a kőolajokat a szerint, hogy a különböző forráspontú frakciókat milyen arányban tartalmazzák, eszerint könnyű, közepes és nehéz olajokat különböztetnek meg, a könnyű olajok több benzin frakciót szolgáltatnak, míg a nehéz olajokban sok a desztillációs maradék, nagyobb mértékben igénylik az átalakítási technológiákat a feldolgozás során. További osztályozási szempont a kőolajok kéntartalma, 1%> kén tartalom a kicsi, 1-1,5 % a közepes, >1,5 % a magas kéntartalom. A kőolaj árát a fenti tényezők befolyásolják, legdrágábbak a kis kéntartalmú, könnyű olajok.

A finomítóknál alkalmazott folyamatok a következők:

Atmoszférikus desztilláció	a kőolaj alkotóinak forráspont szerinti elválasztása
Vákuumdesztilláció	a nagyobb forráspontú komponensek kinyerése
Sótalanítás	az olaj sótartalmának kivonása
Benzin, gázolaj és kerozin hidrogénező	kénmentesítés
Katalitikus reformáló	a benzin oktánszám javítása, aromizálás
Gázkezelés, szétválasztás	PB gáz tisztítás, kéntelenítés
Katalitikus krakkolás	vákuumgázolajok átalakítása könnyebb párlatokká
Viszkozitástörés	vákuumgázolajok termikus krakkolása könnyebb párlatokká
Hidrokrakkolás	vákuumgázolajok és maradékok átalakítása könnyebb párlatokká
Kokszolás	vákuummaradékok termikus krakkolása gázolajjává és koksszá
Aszfaltmentesítés	vákuummaradékok oldószeres extrakciója az aszfalt kinyerésre
Alkilálás	alkilát benzin gyártás elsősorban C4 frakcióból
Polimerizáció	polimer benzin gyártás olefinekből
Izomerizáció	izomerizált benzin előállítás
Aromás üzem	aromások kinyerése és elválasztása
Kenőanyag gyártás	vákuumgázolajok hidrogénezése, extrakciója és viaszmentesítése kenőolajok előállítására
Bitumen fuvatás	vákuummaradék oxidációs fuvatása bitumen előállítására



Kénkinyerés	a hidrogénező kénmentesítésből jövő kénhidrogén oxidációja és kén kinyerése, Claus üzem
Hidrogén gyártás	szénhidrogének vízgőzös bontása hidrogén előállítására

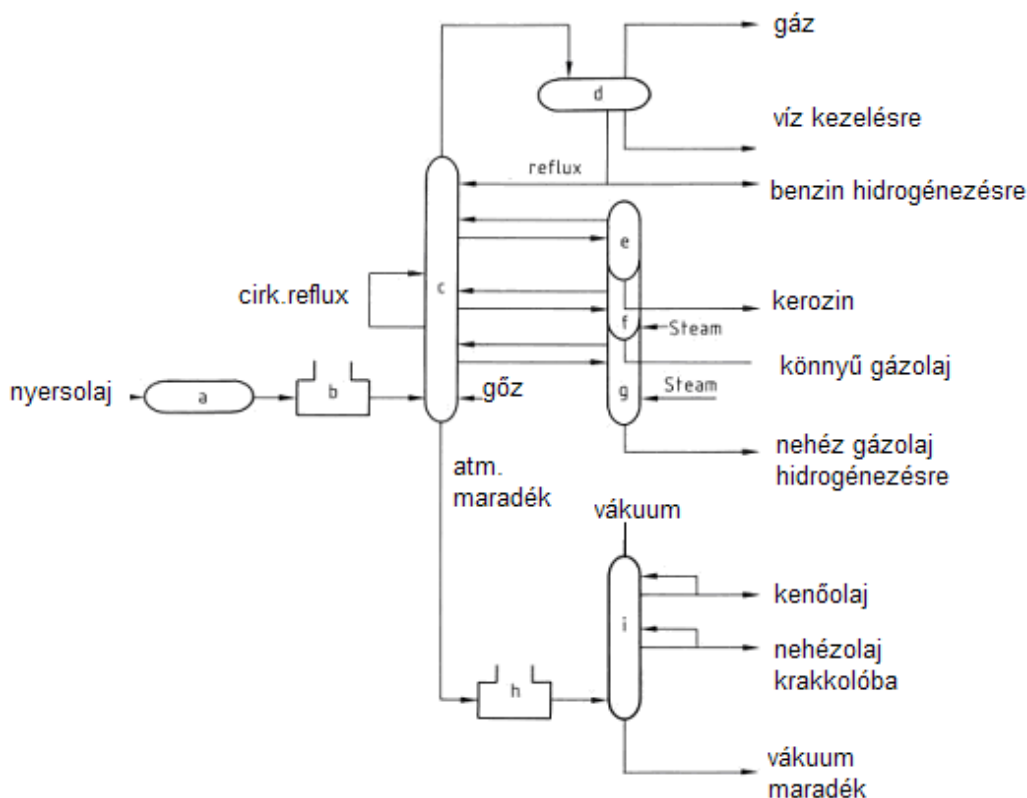
## Finomítói termékek

1. Finomítói gáz elsősorban metánt és etánt tartalmaz, a finomítói kemencékben égetik el.
2. LPG vagy magyarul PB gáz, cseppfolyós halmazállapotú, fűtő és üzemanyagként használják.
3. Motorbenzinek, forrásponthatárok 40-200°C, komponensei krakkbenzin, reformált benzin, alkilát benzin, izomerizátum, polimer benzin, pirolízis benzin, alkoholok, éterek, összefoglaló néven oxigenátok. Specifikációjuk: oktánszám, ami a kompressziótűrést fejezi ki, illékonyaság, forráspont határok, sűrűség, oxidációs stabilitás, ólomtartalom.
4. Kerozin, magyar nevén petróleum, forrásponthatárai 150-250°C, használják un. világító olajként, repülőgép üzemanyagként. Jellemzői: sűrűség, fagyáspont, viszkozitás, termikus stabilitás, vezetőképesség, korróziós sajátságok, víztartalom, aromás és kéntartalom.
5. Gázolaj, könnyű és nehéz frakciókból állhat, származhat a desztillációból vagy a krakkelésből, forrásponthatárai 200-350°C, jellemzője még a sűrűség, kéntartalom, cetánszám. Diesel üzemanyagként és fűtőolajként használják.
6. Oldószerek.
7. Paraffinok. (olaj és szilárd)
8. Kenőolajok és gépzsírok.
9. Bitumenek, aszfaltok, elsősorban útépitéshez használják.
10. Petrokoks, tüzeléshez, cementgyártáshoz, elektrodakészítéshez.

## Desztilláció

A kőolaj desztillációja folyamatos üzemű desztilláló kolonnákban történik, a műveletet rektifikálásnak nevezik. A forraláshoz szükséges hőt csökemencében viszik be. A rektifikáló oszlopokban tányérok vannak, amelyeken a gőz-folyadék intenzív érintkeztetéséhez szükséges buborékolók, szelepek vannak, ezek szükségesek ahhoz is, hogy az egyes tányérokban lévő folyadék elválasztását is biztosítsák. A 360°C feletti forráspontú frakciókat csak vákuumdesztillációval lehet kinyerni, ez azt jelenti, hogy így a forráshőmérséklet olyan marad, mint az atmoszférikus desztillációnál. Az un. vákuumgázolaj, ami a katalitikus krakkoló alapanyaga, 550°C atmoszférikus végforráspontú anyagnak felel meg. Az atmoszférikus desztilláló oszlop fejterméke a könnyű benzin, lejjebb kapják a nehéz benzint, a kerozint és a gázolajat, a fenéktermék megy a vákuumdesztillálóba, ahol a kenőolaj és nehéz olaj frakciókat kapják, amely utóbbiakat a krakkolóba továbbítják. A vákuumdesztilláció fenéktermékét a korszerű finomítóknál a maradékfeldolgozóba viszik, ami többféle technológiát takarhat.

A finomítók legfontosabb kémiai konverziós eljárása a katalitikus krakkoló, betűszóval FCC, ami a „fluid catalytic cracking” kifejezésből adódik. A katalitikus krakkolás gőz fázisban, nagy hőmérsékleten, zeolit katalizátorok jelenlétében megy az un. karbénium ionos mechanizmussal, ami olefinek, elágazó láncú szénhidrogének és aromások képződéséhez vezet, így jó oktánszámú anyagokat kapnak. A krakkolásban jelentős mennyiségű gáz is keletkezik, amelyet tüzelésre használnak, illetve a C4 frakcióból az alkilát üzemben izoparaffinokat állítanak elő, benzin keverőkomponensnek.



147. ábra. 9. ábra A kőolaj desztilláció folyamata

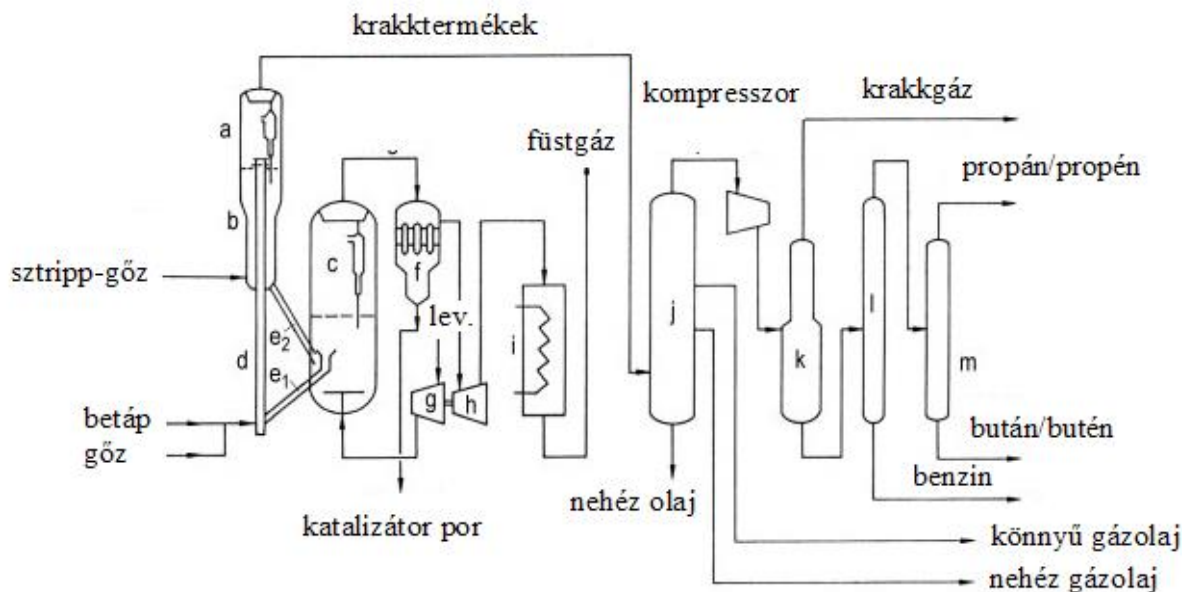
a) sótlanító; b) hevítő; c) fő rektifikáló oszlop; d) kondenzátor; e) kerozin kigőzölő; f) könnyű gázolaj kigőzölő; g) nehéz gázolaj kigőzölő; h) vákuum hevítő; i) vákuum desztilláló

A krakkolás során a katalizátor felületén jelentős mennyiségű kokslerakódás képződik, amit a regenerátorban égetnek le levegővel. Erre azért van szükség, mert a széndepozitumok csökkentik a katalizátor aktivitását, hiszen blokkolják az aktív felületét.

A nagy kéntartalmú kőolajok kitermelése és ennek nyomán a kénvegyületek eltávolításának igénye a különböző frakciókból, valamint a szigorúbb termék előírások, környezetvédelmi szempontok, a krakkolt anyagok mennyiségének növekedése egyaránt ösztönözte a hidrogénező kapacitások kiépítését. Ezek az üzemek a kőolaj feldolgozás legnagyobb kibocsátású üzemai. Legfontosabb szerepük az, hogy katalitikus hidrogénezéssel a szerves kénvegyületeket kénhidrogénné és szénhidrogénekké alakítsák, a kénhidrogént kimosva a gázokból a Claus üzemekben kénné alakítják. A kőolaj desztillátumok kéntartalmának csökkentése mellett a hidrogénezés csökkenti a nitrogén és fémtartalmat is és telíti az aromás vegyületek egy részét is. A hidrogénezéshez ún. szulfidált katalizátorokat használnak, amelyek Co-Mo illetve Ni-Mo és Ni-W bázisúak, felületükön az oxidokat fémszulfidokká alakítják, ezzel teszik őket érzéketlenné a katalizátorméreg kénvegyületekre.

A reformáló eljárások a benzin frakciók átalakítására szolgálnak, az ún. „straight-run”, azaz közvetlenül a kőolaj desztillációjából származó benzin párlatokat, amelyek 35-65 oktánszámúak, konvertálják motorbenzin komponensekké. A katalitikus reformáláshoz a betáplált anyagokat többek között kénmentesíteni kell. A reformáló katalizátorok alapja az  $Al_2O_3$  hordozós Pt, amihez a hordozó savasságát fokozandó  $Cl^-$  ionokat adó

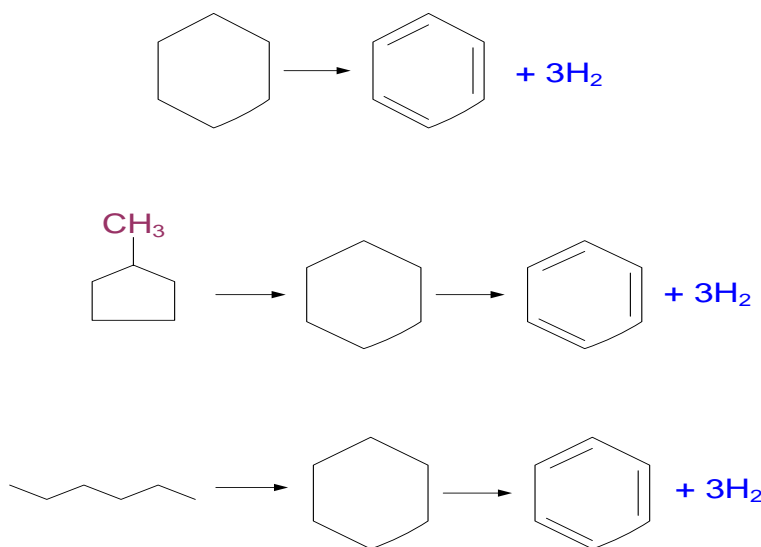
halogén vegyületeket adnak. A Pt kokszképzési sebességét pedig ötvöző fémekkel csökkentik, ilyen promótor anyag a Re (rénium) és az Sn (ón).



148. ábra. Krakküzem (FCC) folyamatábrája

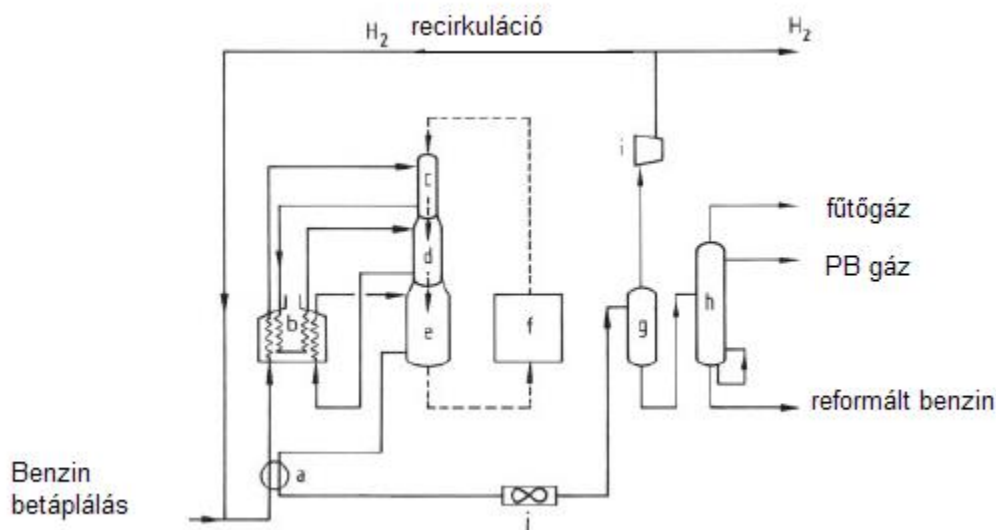
a) reaktor, b) sztrippelő; c) regenerátor; d) rizer; e1) regenerátor vezetéke; e2) sztrippelő vezetéke; f) ciklon; g) légfúvó; h) füstgáz turbina; i) kazán; j) frakcionáló; k) abszorber; l) debutanizáló; m) depropanizáló.

A legfontosabb reformálás közben lejátszódó reakciók a dehidrogénezés, dehidroizomerizáció és a dehidrociklizálás:



Emellett hidrokrakkolás is végbemegy, ami gáz komponensek képződéséhez vezet, ezeket feldolgozás után lehet hasznosítani fűtőgázként vagy a C4 frakciót az alkilát benzin gyártáshoz. Hasznos reakció az izomerizáció, amennyiben izoparaffinok képződnek a paraffinokból, mivel ez szintén az oktánszám növekedésével jár. A fő reakciók egyensúlya szempontjából a nagyobb hőmérséklet és a kisebb hidrogén

parciális nyomás a kedvező, viszont ezek a körülmények gyorsítják a kokszképződést a katalizátor felületén, ami az aktivitás csökkenésével jár. Ezért az iparban alkalmazott körülmények (480-510°C, 10-30 bar) kompromisszum eredményeként alakultak ki, figyelembe véve mind a reakciók egyensúlyi viszonyait, mind a katalizátor aktivitáscsökkenésének és regenerálásának szempontjait. A jelenleg használatos eljárásokban (szemiregeneratív, teljes regenerálással működő és folyamatos regenerálással működő) a katalizátorok felületéről levegővel leégetik a kokszt, a különbség ennek módjában és eszközeiben van. A korszerű megoldás a folytonos regenerálás, ennél a katalizátor a reaktor csöveiben lassan mozog lefelé, miközben a felületén a kokszlerakódás kialakul. A reaktor aljára érve egy szeleprendszeren át jut a kimerült katalizátor a regenerálóba, ahol kontrollált hőmérsékleten oxidálják levegővel, majd visszaviszik a reformáló reaktor tetejére. A katalizátor mozgásának megkönnyítésére a szemcséi gömb alakúak, így a porlódása is minimális. A UOP cég által kifejlesztett eljárásban a Pt-át Sn-nal ötvözik, ami megnöveli a regenerálás közötti használati időt, mert csökkenti a kokszképződés sebességét.



149. ábra. Folyamatos regenerálással működő katalitikus reformáló.

a) Hőcserélő, b) kemence, c), d), e) reformáló reaktorok, f) katalizátor regeneráló, g) szeparátor, h) stabilizáló oszlop, i) gáz recirkuláltató kompresszor, j) termék hűtő.

A hidrokrakkolás a nagyobb „fehérárú” kihozatalt célozza, méghozzá az FCC-hez képest jobb minőségű termékek formájában. A nyersanyagai a vákuumdesztillációból, a katalitikus krakkolásból és az aszfaltmentesítésből származó nagy forrpontú frakciók. A reaktorokban 400°C-os hőmérsékleten és 80-150 bar nyomáson fém szulfid katalizátorokkal hidrogéneznak, termékként benzin, kerozin és gázolaj termékeket kapnak. Általában két lépésben működnek, az elsőben Co-Mo alapú katalizátorral a kén, nitrogén és oxigén mentesítés történik, a másodikban Ni-W katalizátorral a hidrokrakkolás.

A maradék feldolgozó eljárások kiindulási anyagai a desztillációs maradékok, nehéz olajok, bitumen, olajhomok és olajpala. A termékek változatosak, függenek a kiindulási anyagtól és az alkalmazott eljárástól egyaránt. A cél lehet a desztillátumok mennyiségének maximalizálása, a maradékok minél teljesebb feldolgozása, újabban az un. szintetikus üzemanyagok előállítására az olajhomokból és az olajpalából.

A maradékok nagy széntartalmú, hidrogénben szegény anyagok. Amennyiben könnyebb párlatokat akarunk belőlük előállítani, akkor két lehetőség kínálkozik, az egyik a hidrogén bevitele („H-in”), a másik a szén kivétele („C-out”). A maradék feldolgozó kapacitások kb. 60%-a termikus eljárás, ezen belül döntően a késleltetett kokszolás, a többi a hidrogénezés.

A késleltetett kokszolásban az atmoszférikus desztilláció maradékát frakcionáló kolonnába visszük, ahol lehűti a krakkolt gőzöket. A frakcionáló fenékterméke kerül egy csökemencén keresztül kb. 490°C-on a kokszoló dobokba, ahol bomlik, petrokosztot és gőzalakú termékeket adva. A dobokban összegyűlt kosztot felváltva kiürítik. Kifejlesztették a kokszolás fluid változatát is, ahol a kokszképződés fluid reaktorban történik, még nagyobb hőmérsékleten (500-550°C), sőt a kosztot még tovább hevítik parciális oxidációval egy másik fluid reaktorban, hogy a maradék feldolgozását teljessé tegyék.

A maradék feldolgozó eljárásokhoz szokták még sorolni a hidrokrakk eljárások egy részét, az aszfalt mentesítést és a parciális oxidációt. Ez utóbbival CO + H<sub>2</sub> elegyet lehet előállítani, ami szolgálhat hidrogén forrásként a finomítók számára vagy szintézisgázként a metanol szintézishez. Ez utóbbi tekinthető környezetbarát üzemanyagnak is.

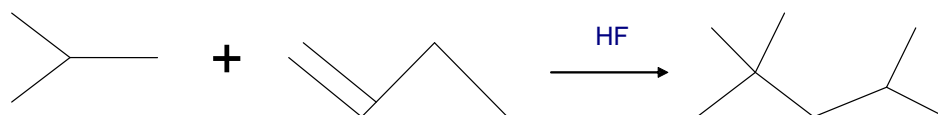
A „C-out” eljárások, a termikus és katalitikus krakkolás viszonylag kisebb beruházási és üzemeltetési költségekkel jellemezhetők, de kisebb desztillátum hozamot és gyengébb minőséget adnak, nem kívánatos melléktermékekkel együtt. A „H-in” eljárások nagyobb hozamot adnak, de sokkal drágábbak, mert jelentős mennyiségű katalizátort igényelnek, ráadásul katalizátor mérgekkel együtt kell hidrogénezni. Ezért is jellemző, hogy kombinálják a különböző eljárásokat, méghozzá többféleképpen, elsősorban a maradék feldolgozást és a vákuumgázolajok konverzióját. Hosszú távon növekszik a nehéz, nagy kén, nitrogén és fémtartalmú olajok felhasználása, ami a környezeti problémák miatt is igényli a hidrogénezést. A következő kombinációk alkalmazása terjedt el a nagy feldolgozási hányaddal működő finomítókban:

hidrogénezés + kokszolás hidrogénezés + katalitikus krakkolás

hidrogénezés + oldószeres aszfaltmentesítés és mint a leghatékonyabb változat:

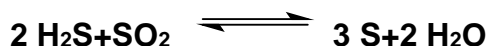
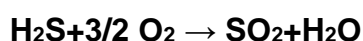
kokszolás, hidrogénezés, hidrokrakk + aszfaltmentesítés + parciális oxidáció.

A jó minőségű benzinek előállítására a már ismertetett eljárások mellett használják az alkilát benzin gyártást, a polimerizációt és az izomerizációt. Az alkilezés savkatalizált reakció (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HF), amelyben C<sub>4</sub> olefin és paraffin reagálnak, C<sub>8</sub> izoparaffint adva.



A polimerizációban C<sub>3</sub>/C<sub>4</sub> olefinekből foszforsavas katalízissal állítanak elő jó oktánszámú izoparaffinokat. Az izomerizációs technológiák nemesfém/savas hordozós katalizátorokkal C<sub>5</sub>/C<sub>6</sub> n-paraffinokból nyerik az izomerizátumot, amit szintén benzinek oktánszámának javítására lehet használni.

A finomítókban a jelentős hidrodesszulfurizálási kapacitások révén jelentős mennyiségű kénhidrogén keletkezik, amit a Claus üzemben alakítanak elemi kénre az alábbi reakciók szerint:



A reakció egyensúlyi viszonyai olyanok, hogy a kénkinyerés hatásfoka csak 94-95 %. A kéneltávolítás teljessé tételére abszorpciós lépést iktatnak be, amivel a kén 99,5 %-a kinyerhető. Ez az abszorpció aminos lúgos mosást jelent, amivel a kénhidrogén nyomai is eltávolíthatóak a véggázokból és visszavihetők a Claus üzembe.

## Finomítói struktúrák

A kőolaj feldolgozás fejlődését jól szemlélteti az, hogyan változott az idők folyamán a finomítók struktúrája, kiépítettsége és ezzel együtt a kőolajból nyerhető „fehérárúk” aránya. A legegyszerűbb a „hydroskimming” vagy „tüzelőolaj” finomító, ez desztilláló egységből, benzín és gázolaj hidrogénezőből, katalitikus reformálóból valamint gáz-kénfeldolgozóból áll. Az atmoszférikus desztilláló maradékát, 43%-nyi részt, nehéz fűtőolajként kell értékesíteni.

A katalitikus krakkoló-viszkozitástörő finomító csak kb. ¼ rész fűtőolajat produkál, a fehér árúk mennyisége 70% körüli. Ennek részei a „tüzelőolaj” finomítóhoz képest még a vákuumdesztilláló, az FCC és végül a viszkozitástörő krakkoló. A következő konfiguráció kiegészül még hidrokrakk technológiával és aszfaltmentesítővel. A fűtőolaj mennyisége a feldolgozott kőolaj 1/10-e alá csökken. A legkorszerűbb finomítói struktúra a hidrokrakk mellett még koksizálót is alkalmaz, az egyedüli elégetendő szilárd anyag a petrokoks (5%), amit például cementgyárakban lehet a klinkerkemencében elégetni. A kb. ¼ rész benzín mellett 60%-nyi középső párlat keletkezik, azaz például gázolaj, ami Európában jellemző. Az ilyen finomító működtetéséhez szükség van többlet hidrogénre, amit víz-gáz reakcióban állítanak elő.

## A kőolajfeldolgozás környezeti hatásai

32. táblázat. A szennyező források a finomítóban

Szennyező	Források
CO <sub>2</sub>	Kemencék, kazánok, gázturbinák, FCC regenerátorok, CO kazánok, fáklyák, égetők
CO	Kemencék, kazánok, gázturbinák, FCC regenerátorok, CO kazánok, fáklyák, égetők, kén visszanyerők
NO <sub>x</sub>	Kemencék, kazánok, gázturbinák, FCC regenerátorok, CO kazánok, fáklyák, égetők, koksizáló
Részecskék, benne fémek	Kemencék, kazánok, gázturbinák, FCC regenerátorok, CO kazánok, fáklyák, égetők
Kénoxidok	Kemencék, kazánok, gázturbinák, FCC regenerátorok, CO kazánok, fáklyák, égetők, kén visszanyerők
VOCs illékony szerves anyagok	Tároló és kezelő egységek, fáklyák, gázválasztók, olaj/víz szeparátorok, szivárgások, (szelepek, csatlakozások).

A finomítók kibocsátásának jellemzését adja a következő táblázat, amelyben az egyes finomítói részterületek illékony anyag (VOC) kibocsátását adjuk meg egy évi 10 millió tonna kapacitású üzemre.

**33. táblázat. Finomítói területek VOC emissziói.**

Folyamat	VOC emisszió tonna/év
Kőolajkikötő	260
Szennyvíz kezelő	400
Termék kikötő	815
Eljárások területe	1000
Tartálypark	1820
Összes	4295

**A „buborék” koncepció**

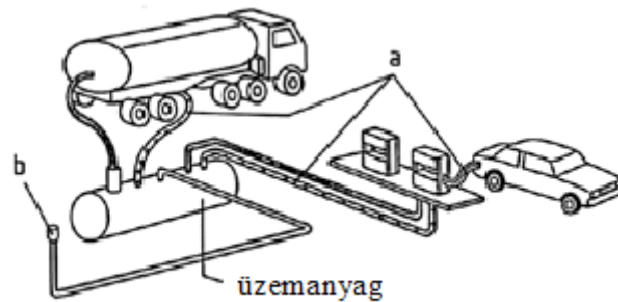


A „buborék” koncepciót általában a levegőbe kibocsátott SO<sub>2</sub>-ra alkalmazzák, de használható a NO<sub>x</sub>-ra, a porra, CO-ra és a fémekre (Ni, V). Ez egy szabályozó eszköz, amit számos EU országban használnak. Ahogy az ábrán is látható, a „buborék” megközelítés a levegőbe történő emissziót úgy kezeli, mintha az egész finomítót egyetlen kémény kötné a környezethez. A „buborék” koncepciót azért használják, mert műszaki, gazdasági és környezeti érvek is támogatják: a finomítók kivételesek az ipari üzemek között, mert saját maguk állítják elő a tüzelő anyagokat. A finomító bonyolult rendszer, sok emissziós helye létezik, változatos kiindulási anyag összetétellel működik, változtatja az alkalmazott eljárásokat, néha azok paramétereit is az optimális termékstruktúra előállítás miatt. Gazdasági érv az, hogy a finomítónak szüksége van arra a szabadságra, hogy megválassza hol avatkozik be az emisszió csökkentésére, a piaci igényeknek és lehetőségeknek megfelelően működtesse a technológiákat, mindezt a legjobb hatékonysággal. Környezeti érv az, hogy a hatóságoknak rendelkezni kell azzal a lehetőséggel, hogy megszabják az emissziós határértékeket, ugyanakkor az üzemeltető erre reagálva szabadon választhasson a rendelkezésére álló technikák között a gazdasági szempontok szerint. Továbbá ez a koncepció a különböző finomítók összehasonlítását is könnyebbé teszi.

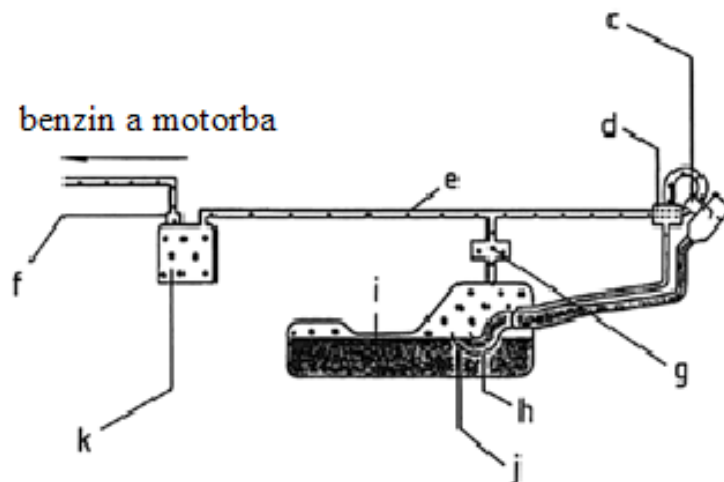
A szennyező anyagokat, mint a NO<sub>x</sub>, részecskék, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>, más kénvegyületek és illékony szerves vegyületek, jellemzően „csövégi” technikákkal ártalmatlanítják. Az egyik legnagyobb ilyen rendszer a finomítóban az aminos mosó, a kénvisszanyerő, aminek terméke a kén. A fáklyákat szintén elterjedten alkalmazzák a finomítóban környezeti és biztonsági okokból.

A 33. táblázat adatai szerint az illékony anyagok kibocsátása a tároló és szállító egységekben a legnagyobb, ezért itt van leginkább szükség az emisszió csökkentésre.



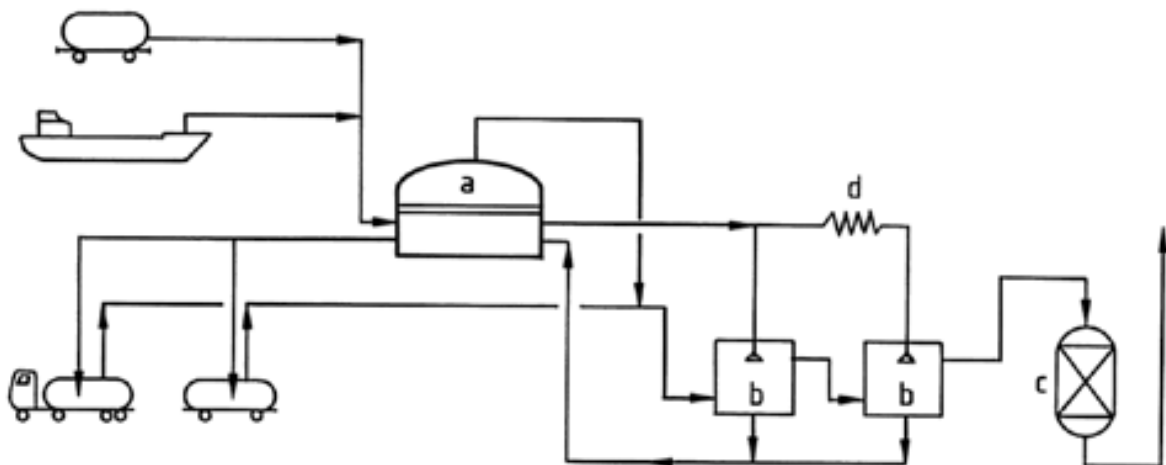


150. ábra. Üzemanyag töltőállomás a gőzök visszanyerésével a) benzin vezetékek, b) légző



151. ábra. Szénszűrős üzemanyag gőz visszanyerés a járműben,

c) szelep, d) gáz-folyadék elválasztó, e) üzemanyag vezeték, f) mágneses szelep és regenerálás szabályzó, g) standard légző és túltöltés védő, h) kivezetés, i) üzemanyag tartály, j) folyadékzár, k) aktívszenes szűrő, 4,5 liter kapacitással.



152. ábra. Tároló és szállító rendszer üzemanyag gőz visszanyeréssel.

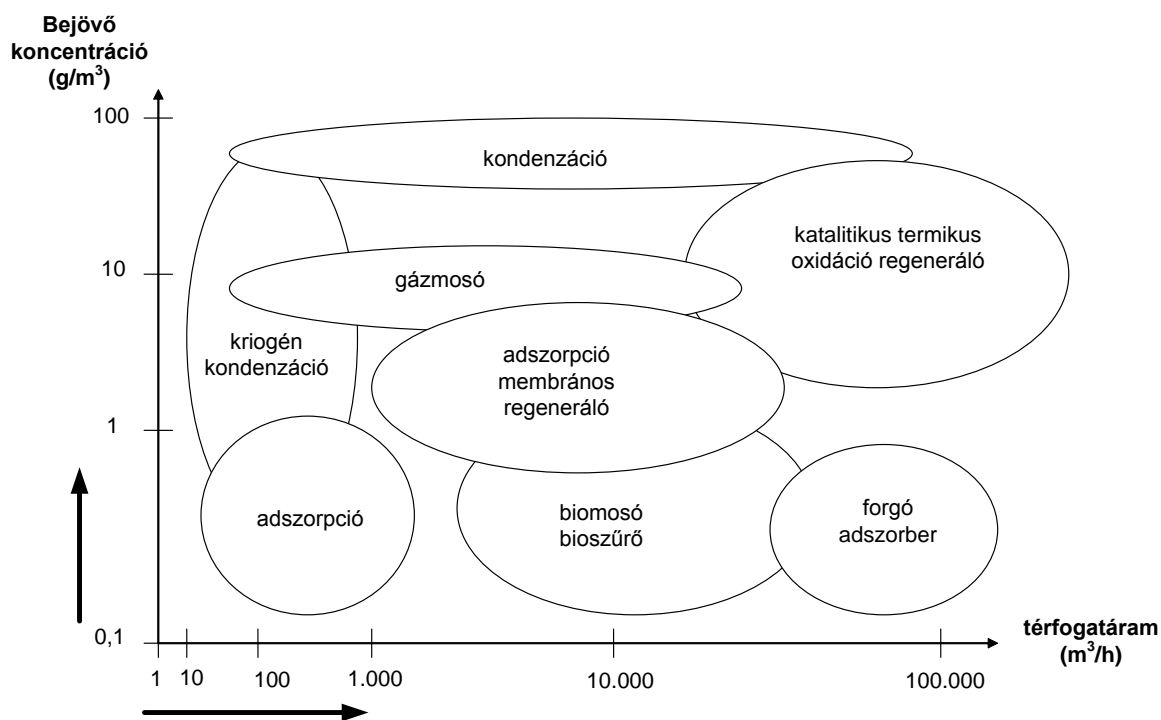
a) tároló tartály lebegő tetővel, b) kilépő gőzök, gázok mosása, c) finom tisztítás, adszorpcióval, d) alacsony hőmérsékletű hűtés (-40°C).



A 150. ábra, 151. ábra és 152. ábra láthatóak a megoldások vázlatos rajzai, nevezetesen a tankolásnál a gőzök visszavezetése a töltőpisztolyból is elszívással, a gépjárműben az üzemanyag tartály légzéséből adódó gőzkibocsátás csökkentése aktív szénes adszorpcióval, a tárolás és szállítás, töltés-ürítés közbeni veszteség minimalizálása abszorpcióval, adszorpcióval és kriogén pára lecsapással.

A finomítói illékony anyag kibocsátások becslésére többféle módszert (API, American Petroleum Institute) dolgoztak ki, ezeket mérésekkel ellenőrizték. Azt találták, hogy megfelelően hosszú, például egész éves periódust tekintve a becslések jó eredményeket adnak, a veszteségek, avagy az emisszió előre jelezhető. A leginkább légszennyező művelet az üzemanyag komponensek összekeverése, elsősorban a benziné, amelyben az összes anyag mintegy 0,05%-a lesz a párolgási veszteség.

A finomítói kibocsátások minimalizálásának lehetséges módja az angol „good housekeeping” kifejezéssel illetett módszer együttes, ennek kifejeződése az ISO minősítés megszerzése, ami manapság elengedhetetlen mind gazdasági, mind környezetvédelmi szempontból. A fenti módszerek között említendő a karbantartás szervezése és ennek megfelelő, ellenőrzött végzése. A berendezések és eszközök tisztítása oly módon kell, hogy történjen, amivel a légnemű és a vízbe kerülő szennyezések csökkenthetők illetve egyben ártalmatlaníthatók legyenek. A finomítói szivattyúk és kompresszorok feleljenek meg a legújabb technikáknak, ami például a tömítések, tömszelencék kivitelezését illeti. Ide sorolható még a korszerű folyamatirányítás, on-line méréssel és szabályzással, talaj szennyezés megelőzése, szivárgás felderítés és kijavítás, szénhidrogén kifolyások megelőzése és minimalizálása, hulladék keletkezés minimalizálása.



**153. ábra.** Az illékony anyagok eltávolítása csővégi technikáinak alkalmazási lehetőségei a finomítóknál, a koncentráció és a térfogatáram függvényében.

Az illékony szénhidrogén kibocsátások mellett, a finomítók számos tüzelő és égető berendezést működtetvén, a szokásos füstgáz komponenseket eresztik ki a levegőbe.

Emiatt ugyan azokat az emisszió csökkentési eljárásokat alkalmazzák, amelyeket a tüzelő berendezések fejezetben már ismertettünk, például kéndioxid és nitrogén-dioxid csökkentési technikákat.

## Szervetlen vegyipar

### Nitrogénipar

A szervetlen vegyipar két nagy ágazata a nitrogénipar és a kénsavgyártás kulcsfontosságú több szempontból is. A termékeik ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , szuperfoszfát, stb) adják a műtrágyagyártás alapanyagait és a robbanóanyag gyártás fontos reagenseit, a nitráló savakat. Nélkülük a nagy hozamú élelmiszer termelés és a hadviselés nem lehetséges. Nem véletlen tehát, hogy ezeknek az iparágaknak a fejlesztése, majd a telepítése fontos része volt a fejlett országok gazdasága kialakulásának.

### Ammónia szintézis

Az ammónia a második legnagyobb volumenű szintetikus vegyi anyag, a világ fogyasztás csaknem 90%-át nitrogénből és hidrogénből állítják elő az eredetileg Fritz Haber és Karl Bosch által kifejlesztett katalitikus eljárással, ami az Alwin Mittasch féle promoteált vas katalizátort alkalmazza. A mai ammónia üzemek gyakorlatilag ugyanolyan felépítésűek, mint az első üzem volt: a  $\text{H}_2\text{-N}_2$  elegy a vas katalizátoron  $400\text{-}500^\circ\text{C}$ -on 100 bar feletti nyomáson reagál, a reagálatlan gázelegyet recirkuláltatják, az ammóniát nagy nyomáson kondenzáltatják és elválasztják a szintézis gáztól. Annak idején már Bosch is tisztában volt vele, hogy az ammónia szintézis költségeit elsősorban és nagyrészt a szintézis gáz előállításának költségei határozzák meg. Ezzel magyarázható, hogy amíg az ammónia szintézis körülményei az évtizedek során keveset változtak, addig a szintézis gáz előállítási és tisztítási eljárásai nagyban különböznek a száz évvel ezelőttiektől.

Az ammóniát alkotó nitrogén és hidrogén a levegőből és a vízből állíthatók elő fosszilis energiahordozókkal végzett reakciókban, a fosszilis energiahordozók a földgáz, szénhidrogén frakciók és egyes országokban a kőszén.

Az ammónia szintézis a következő reakcióegyenlet szerint megy végbe:



1 kg ammóniában megkötött nitrogénhez  $2,4 \text{ m}^3$  hidrogént és  $0,8 \text{ m}^3$  nitrogént kell reagáltatni, miközben  $3,27 \text{ MJ}$  hő fejlődik. A reaktorok kialakítása és az optimális katalizátorok készítése széleskörű tudományos és mérnöki munkát igényelt, ez volt az első olyan nagyüzemi technológia, ahol meg kellett oldani a robbanásveszélyes gázelegy kompresszióját, recirkulációját, a katalizátorok és az acél alkatrészek hidrogén és szénmonoxid okozta korróziójának kiküszöbölését, az ammónia elválasztását a szintézisgáz elegytől, a reaktorokban fejlődő hő elvezetését, az inert gázok lefúvatásának módszerét. Az iménti felsorolás közel sem teljes, mert kidolgozták a reakció egyensúlyi viszonyainak meghatározási módszereit és a reakció

sebesség mérésének eljárását, mert minderre szükség volt a reaktorok méretezéséhez.

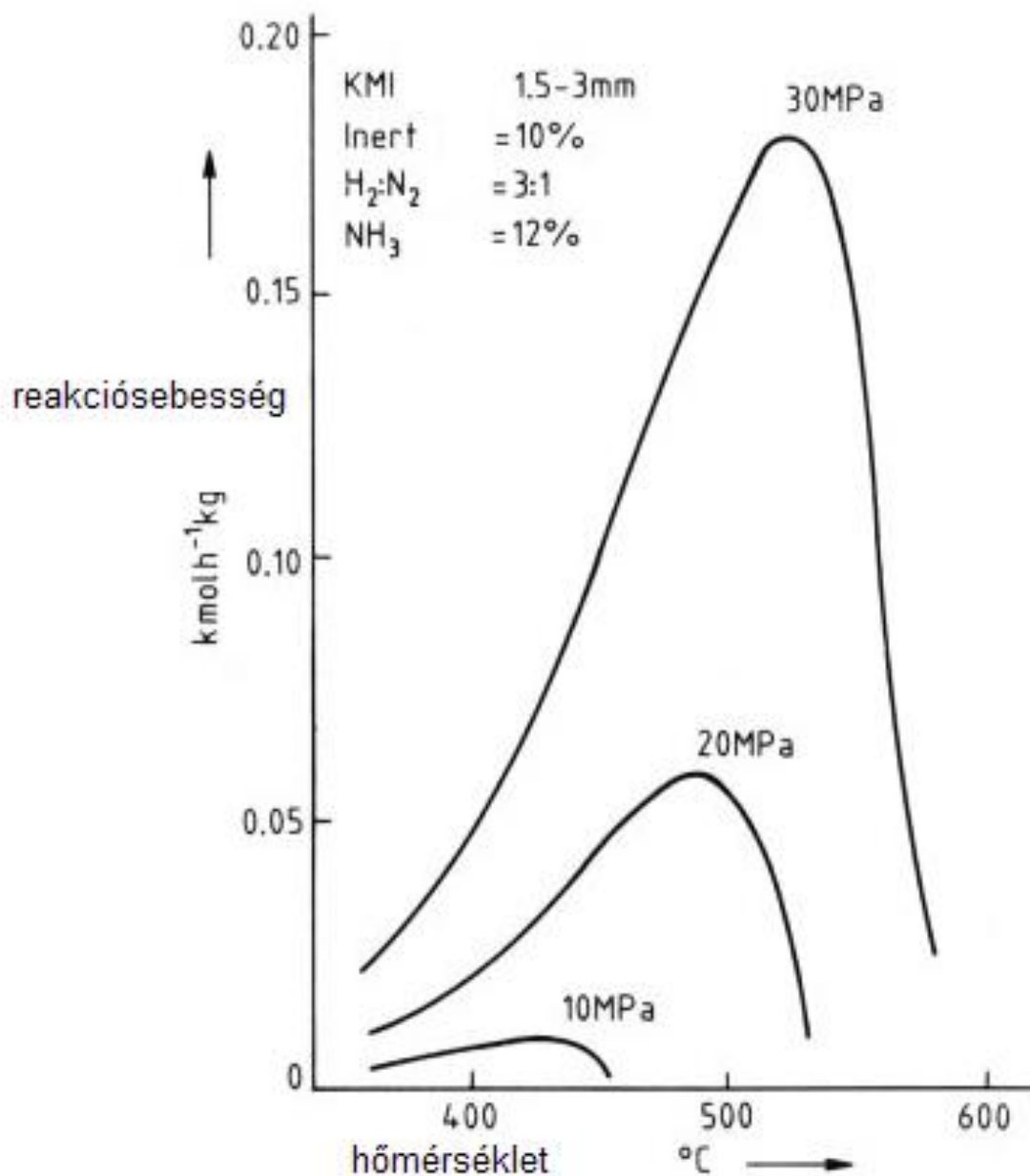
Az ammónia szintézis katalizátor az üzem „szíve”, ugyanis ez határozza meg közvetlenül az alkalmazott össznyomás és termelési igény mellett a hőmérséklet tartományt, a recirkulációs gázáramot, a hűtési igényeket. Közvetve meghatározza a reaktor méreteket, a hőcserélő kapacitást, a betáplált gáz tisztasági követelményeit, így a beruházási és működési költségeket a szintézis gáz előállításánál. Annak ellenére, hogy a katalizátor költségek elhanyagolhatóak az egész üzem költségeihez képest, mégis meghatározza a katalizátor teljesítőképessége az egész folyamat gazdaságosságát.

A katalizátorral szemben támasztott elvárások a következők:

- 1) A nagy aktivitás a lehető legkisebb hőmérsékleten, átlagos kereskedelmi katalizátor 25 térfogat % ammóniát ad 400 bar nyomáson és 480°C véghőmérsékleten.
- 2) A legnagyobb méregtűrő képesség oxigén és klórtartalmú vegyületekre, amik még a legjobban megtisztított szintézisgázban is előfordulnak.
- 3) Hosszú élettartam, ami hőállóságot és méregállóságot jelent, ez ugyanis meghatározza a katalizátorcsere idejét és az ezzel járó költségeket, termelés kiesést. Korszerű üzemekben előfordult már 14 éves használati idő is.
- 4) Mechanikai szilárdság, mert ez határozza meg a porlódás és tördelődés miatt a nyomásesés növekedést, ami üzemleálláshoz vezethet. Emiatt nem alkalmazták az urániumkarbid katalizátort, mert széttöredezett használat közben és az oxigéntartalmú vegyületek károsították.
- 5) A jelentős ammónia igény miatt megbízható alapanyag ellátásra van szükség, az első ipari katalizátor Os tartalmú volt, ezért a BASF felvásárolta az akkori világbiztosítást.

Az ammónia szintézis megvalósításától napjainkig a vas katalizátort alkalmazzák, amit nem-redukálódó fénoxidokkal promoveálnak. Az utóbbi időben Ru alapú, Rb-mal promoveált katalizátort is alkalmaznak ipari eljárásban.

A vas katalizátor a fő komponens vasoxid mellett  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -ot és promótor  $\text{K}_2\text{O}$ -ot tartalmaz, más fénoxidokkal együtt. A készítés során az oxidokat összekeverik, majd célszerűen indukciós kemencében megolvasztják (2000°C), az olvadékot megfelelő sebességgel lehűtik, a kapott szilárd anyagot megfelelő darabosságúra őrlik, végül szintézis gázzal redukálják. Ez a redukció történhet in situ a reaktorban, lassú, kontrollált hőmérséklet program szerint, vagy előállítanak manapság már ún. előredukált katalizátort, amelyet a reaktorban viszonylag rövid idő alatt lehet aktiválni. Az ilyen előredukált katalizátort passziválják, mielőtt levegő éri, mert redukált állapotban pirofóros. A katalizátort üzem közben óvni kell az oxigén tartalmú vegyületektől ( $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ), különösen magasabb hőmérsékleten (>500°C) gyors az okozott mérgeződés illetve öregedés, ami a katalizátor aktivitásának idő előtti romlását okozza. A szintézis gázból el kell távolítani a kénvegyületeket is, sőt ügyelni kell kis kén tartalmú kenőanyagok használatára a keringető kompresszorban.



16. ábra Az ammónia képződés sebessége a hőmérséklet és a nyomás függvényében.

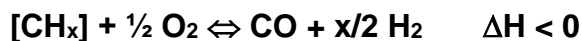
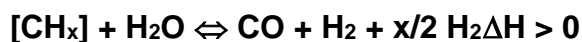
Az ipari ammónia előállítás részei:

A) szintézis gáz előállítás 1) nyersanyag előkészítés és gáz előállítás, 2) CO konverzió. 3) gáztisztítás

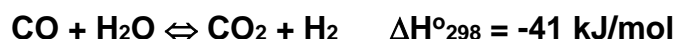
B) kompresszió

C) Szintézis és lefűjt gáz kezelés

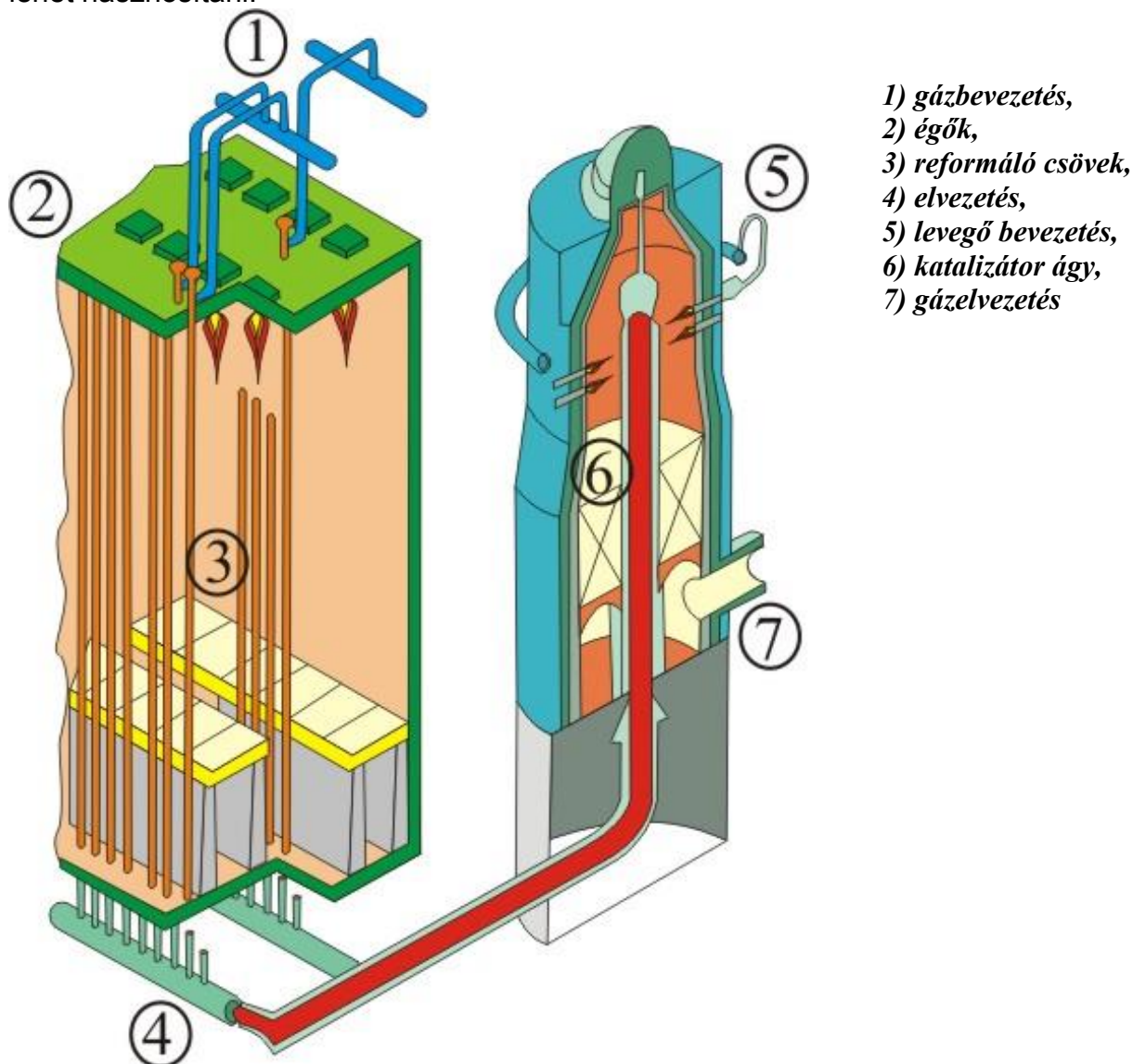
A szintézisgáz gyártás első lépése a fosszilis tüzelőanyagok reakciója vízgőzzel és oxigénnel, katalizátor jelenlétében:



Ezt az eljárást az angol irodalom „steam reforming” kifejezéssel illeti, magyarul vízgáz reakciónak nevezik. A CO konverzióját egy második lépésben végzik, szintén katalizátorral:



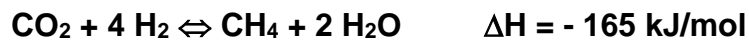
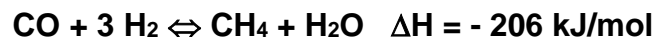
A reakcióegyenletekből látszik, hogy az első lépésnél szükség van az oxidációra is, mert a vízgáz reakció endoterm, ugyanakkor a CO konverzió exoterm. A könnyű szénhidrogéneket lehet a vízgáz reakcióval átalakítani, viszont a nehéz fűtőolajokat és a szenet, elsősorban kéntartalmuk miatt csak a nem-katalitikus parciális oxidációval lehet hasznosítani.



154. ábra. Uhde radiációs és szekunder vízgáz reformer

A reformálóban Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katalizátort használnak, ami elviseli a nagy hőmérsékletet (>1000°C). Különleges ötvözött acélból készítik a reaktor csöveit, amelyek a katalizátort tartalmazzák. A második lépés a szénmonoxid konverzió, amit két lépésben végeznek, az elsőben 320-350°C-on vas-krom katalizátorral, a másodikban

200-210°C-on Cu, Zn/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katalizátorral, a végső CO koncentráció 0,1-0,3%. A következő lépés a CO<sub>2</sub> eltávolítása mosással, mosófolyadékknak lúgos kémhatású anyagokat használnak, amelyek regenerálhatóak, azaz nagyobb hőmérsékleten leadják az elnyelt széndioxidot. Ilyenek egyes szerves nitrogén vegyületek, mint például az etanolaminok, amelyek kémiai folyamatban kötik meg a savanyú széndioxidot, működnek fizikai folyamaton alapuló eljárások is, mint például az N-metil-pirrolidonos, ezeknél kisebb az energia felhasználás a regenerálásnál, viszont a végső széndioxid koncentráció nagyobb. A CO és a CO<sub>2</sub> legnagyobb részének eltávolítása után még szükség van a maradék oxigén tartalmú gázok eltávolítására is egészen ppm szintekig, mert az ammónia szintézis katalizátorok érzékenyek rájuk, mint katalizátor mérgekre. A legelterjedtebb módszer a metanizálás, amelynek során a szintézis gázt Ni katalizátoron vezetik át, ahol a CO és a CO<sub>2</sub> metánná hidrogéneződnek az alábbi reakcióegyenletek szerint. Ez ugyan némi hidrogén veszteséggel jár, továbbá az ammónia szintézis körből lefuvatást igényel, hogy ne dúsuljon fel a metán a megengedettnél jobban.



A reakciót hordozós Ni katalizátoron 25-35 bar nyomáson és 250-350°C-on hajtják végre.

Az ammónia szintézis üzemek következő fontos egysége a kompresszió. Ezt a műveletet hosszú ideig dugattyús kompresszorokkal oldották meg, amiket elektromos motorokkal vagy gázmotorokkal hajtottak meg. Manapság kizárólag centrifugális kompresszorokat használnak, ezeknek számos előnye van, ezért nemcsak a szintézis körben, hanem a gázgyártásban és a hűtésnél is ilyeneket alkalmaznak. A meghajtásukra gőzturbinákat használnak, amelyek fontos tulajdonsága rugalmas terhelhetőségük.

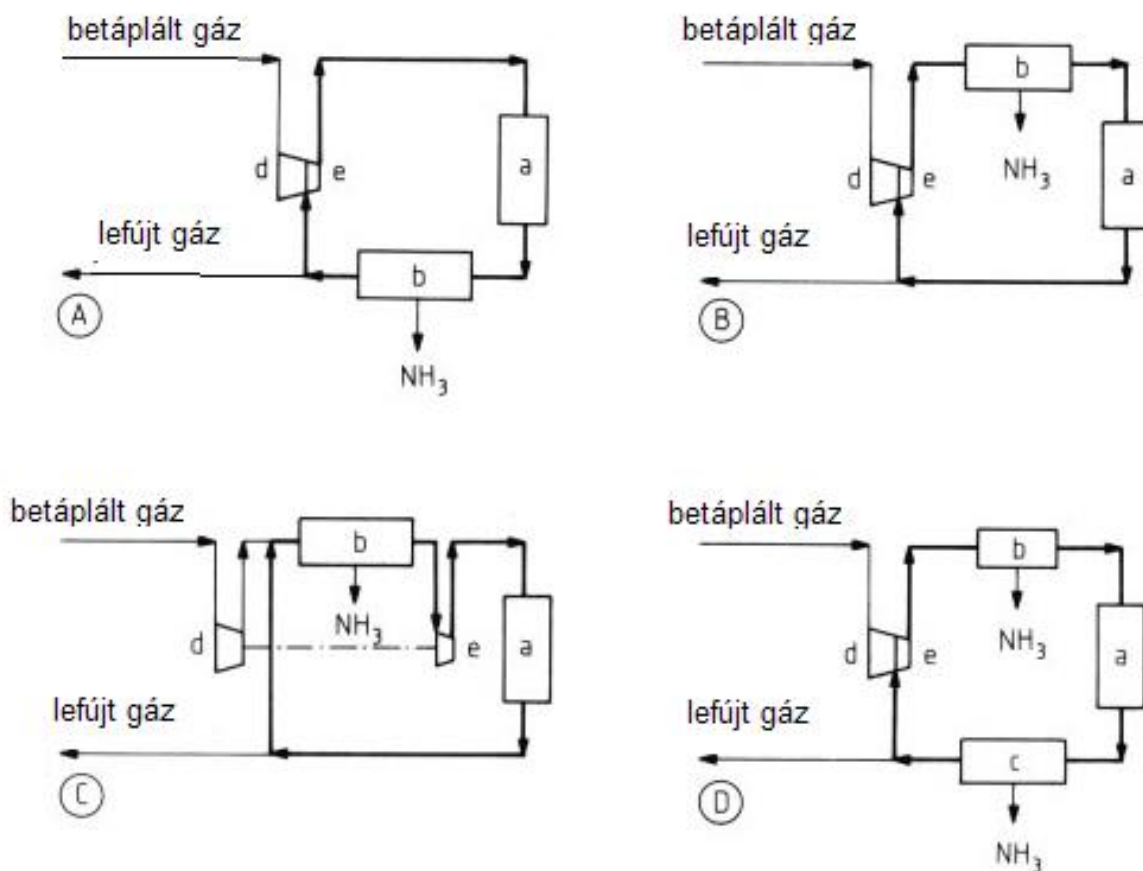
Az ammónia szintézis körök többféle konfigurációban működnek, ezek láthatóak a 155. ábra.

Az ammónia szintézis reaktorok tervezése különleges mérnöki és vegyészmérnöki feladat, a tervezési alapadatok, méretek, katalizátorágyak száma, mérete, hőmérséklet profilok, gáz összetételek, nyomásesések számításához alkalmas matematikai modellre van szükség. A reaktor viselkedését stacioner állapotban két differenciálegyenlet írja le. Az egyik a koncentráció-hely összefüggést adja meg, ez a kémiai reakció sebességi egyenlete, a másik a hőmérséklet hely függését írja le, formája függ a konverter típusától. Ez azt jelenti, hogy a hőmérséklet profil nemcsak a hőtermelő reakció sebességétől, hanem a hőelvonás módjától is függ. További egyenletek írják le a betáplálendő anyag és a reaktorból kijövő elegy hőcseréjét.

Az üzemi konverterek két csoportba oszthatók: a belső hűtésűek, amelyeknél a hűtőközeg (a betáplált hideg gáz) csövekben megy át a katalizátor ágyon, vagy a csövekben lévő katalizátort a csövek között áramolva hűti, ezeket csöves hűtésű reaktoroknak hívják. A másik alaptípusban a katalizátorágyat több részre osztják, ezekben a reakció adiabatikusan játszódik le, a képződött hőt a szekciók között betáplált hideg gázzal vagy gőzfejlesztésre használt külső hőcserélőkben veszik el. Ezeket hívják indirekt hűtésű reaktoroknak.

A gáz áramlása axiális, keresztáramú vagy radiális lehet, a különböző hűtési módszereket használhatják egy reaktoron belül is. A szigorú körülmények (nagy nyomás, nagy hőmérséklet, nagy hidrogén parciális nyomás) különleges szerkezeti

anyagok használatát követelik meg. Általában a reaktorok egy külső és egy belső köpenyből állnak, a kettő között hidegebb gáz áramlik, ami lehetővé teszi a külső nyomásálló rész felépítését kevésbé igényes, de nagy szilárdságú acélból.



155. ábra. Ammónia szintézis körök lehetséges konfigurációi

*A) szintézis kör tiszta és száraz beadott gázra, B) termék kinyerés recirkulációs kompresszió után, C) termék kinyerés recirkulációs kompresszió előtt, D) kétlépcsős termék kondenzáció*  
*a) ammónia reaktor hőcserélőkkel, b) ammónia kinyerés hűtéssel és kondenzációval, c) ammónia kinyerés kondenzációval környezeti hőmérsékleten, d) szintézis gáz kompresszor, e) recirkulációs kompresszor.*

Az ammónia üzemekben a szintézis körből a képződött terméket hűtéssel kondenzáltatják a szintéziskör nyomásán, a kondenzátumot elválasztják a gáztól, amit recirkulálnak. Ez a hűtő, kondenzációs rész többféleképpen is elhelyezhető a szintézis körben (155. ábra). Nagy nyomású szintézisnél (>450 bar) a vizes vagy léghűtés elegendő a szükséges kis ammónia koncentráció eléréséhez, a modern, középnyomású üzemekben hűtésre van szükség, ami legalább -25°C-on dolgozik. Ezt a hűtést ammóniával működő hűtőkörökkel oldják meg, ahol az ammónia atmoszférás nyomáson történő elpárolgatásával végzik a hőelvonást.

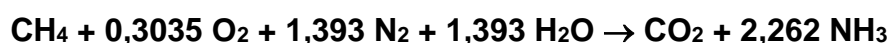
A szintézis körök működtetésének fontos eleme az inert gáz (metán, argon, hélium) tartalom szinten tartása, azaz a lefűvátás mértékének meghatározása illetve a lefűjt gáz hasznosítása. A mai üzemekben több megoldást is alkalmaznak a lefűjt gáz hasznos komponenseinek, elsősorban a hidrogén tartalmának a visszanyerésére. Az egyik módszer a kriogén elválasztás, ahol a lehűtött gázelegyből (<-188°C) a metánt,

argont, sőt még a héliumot is kondenzáltatják, ily módon a hidrogén 90-95%-a visszanyerhető. A másik technológia a membrános elválasztás, ahol a polimer membránon átdiffundáló hidrogént összegyűjtve a kompresszor megfelelő fokozatának szívó oldalához vezetik (hatásfok 90-95%). A UOP fejlesztette ki a váltakozó nyomású adszorpciót, zeolit és aktív szén adszorbenseket alkalmaznak ennél a módszernél, mintegy 80%-os hatásfokkal a hidrogénre nézve. Fejlesztési fázisban van a fémhidrides adszorpció módszer.

A továbbiakban összefoglaljuk, hogy az egyes szintézis paraméterek milyen hatásúak az ammónia termelésére:

- nyomás: a növelése növeli a konverziót és kedvező az ammónia egyensúlyi koncentrációjára,
- belépő hőmérséklet: két ellentétes hatása van, növeli a reakció sebességet, viszont rontja adiabatikus működésnél az egyensúlyt,
- térsebesség: növelésével csökken a kilépő ammónia koncentráció, de nő a teljes ammónia hozam,
- inert gáz szint: csökkenti a reakciósebességet,
- hidrogén/nitrogén arány: alacsonyabb hőmérsékleten a maximális reakciósebesség kisebb aránynál van, a maximum helye függ a térsebességtől is,
- recirkulációs arány: a nagyobb recirkuláció csökkenti az ammónia koncentrációt, emiatt távolabb vagyunk az egyensúlytól, nő a reakciósebesség, kevesebb katalizátor kell. Viszont csökken a hővisszanyerésnél a hőmérséklet, nagyobb hőcserélő felületre van szükség, nagyobb csőátmérők kellenek, berendezések nagyobbak lesznek,
- szeparátor hőmérséklet: mivel ez határozza meg az ammónia koncentrációt a konverter belépésnél, a kisebb ammónia koncentrációhoz alacsonyabb hőmérséklet kell, amivel nagyobb konverzió vagy kevesebb katalizátor jár együtt,
- katalizátor szemcse méret: kisebb átmérő nagyobb konverziót ad, mivel a diffúziós gátlás kisebb.

Az ammónia szintézisnél, hasonlóan más energaintenzív technológiákhoz, a legfontosabb költség tényező az, hogy mennyi energiahordozót használunk fel egységnyi termék előállításához.



$$\Delta H = -86 \text{ kJ/mol} \quad \Delta F = -101 \text{ kJ/mol} \quad 25^\circ\text{C}$$

A fenti reakcióegyenletből az adódik, hogy 583 m<sup>3</sup> metán kell 1 tonna ammóniához, ami átszámítva 20,9 GJ/t NH<sub>3</sub>-t jelent, az ammónia fűtőértéke 18,6 GJ/t NH<sub>3</sub>, ami az elvi minimum. A klasszikus Haber-Bosch féle szintézis esetében ez az érték 80-90 GJ/t NH<sub>3</sub> volt, a korszerű üzemeknél manapság lecsökkent 28GJ alá.

Az ammónia üzemek két alapvető szintézisgáz gyártó módszeren alapulnak, az egyik a vízgáz reakció a könnyű szénhidrogének, a másik a parciális oxidáció a nehéz fűtőolajok és a kőszén felhasználásával. Az előbbieket négyféle változatban használatosak.

1. fejlett hagyományos eljárások nagy teljesítményű reformerrel és sztöchiometrikus levegővel a szekunder reformerben,
2. eljárások csökkentett primer reformeri tüzeléssel és levegőfelesleggel,
3. eljárások hőcserélős reformerrel,
4. eljárások szekunder reformer nélkül, levegőszétválasztással.



A második csoport jellegzetessége, hogy kezelniük kell a használt energiahordozók nagy kén tartalmát és fémtartalmát, ezért a tisztítási műveletek ezekben mások, a felhasznált energia is jóval több. A nehéz olajoknál 35-38 GJ, a szénél 50-60 GJ/t NH<sub>3</sub> a megadott érték.

### **Ammónia szintézis környezeti hatásai**

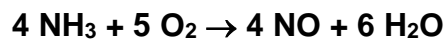
Az általános környezeti hatások, levegő, víz, talaj szennyezés, nyersanyag és energia fogyasztás szempontjából az ammónia szintézis viszonylag tiszta technológia, kis emisszióval, kis energia fogyasztással, mivel nagyhatékonyságú folyamatról van szó, nincsenek kereszthatások sem. A vízgáz reakción alapuló eljárásoknál a NO<sub>x</sub> emisszió a primer reformer füstgázaiból jön, de mennyiségében elhanyagolható más tevékenységekéhez képest. A vízbe történő kibocsátás a többlet gőz kondenzációjából adódhat a CO eltávolítás előtt, de ez kiküszöbölhető. Kis mennyiségű metanol és aminok visszaforgathatók a kazánvízzel. A gőzös sztrippeléssel kijuthatnak szennyezők a levegőbe, viszont a kondenzátumot fel lehet használni a belépő gáz telítésére. A parciális oxidációs technológiáknál a gőzkazánok füstgázaiban lévő kéndioxid a környezeti szempontból veszélyes anyag, ennek kivonása a tüzelő berendezéseknél ismertetett módon történik. Újabban aggodalmat okoznak az ammónia üzemek egyes berendezései, mint zajforrások, különösen lakóterületek közelében. Zajforrásként megjelölték a nagyobb gázmennyiségek lefúvatását, gőzkifújásokat, égők hangját, rezonanciás hangokat füstgáz vezetékekből, kompresszorok, fúvók, szivattyúk hangját. A zajcsökkentésre használható megoldások például a kis zajszintű lefúvató szelepek, hangtompítók, hangszigetelő burkolatok a szivattyúknak, vagy elhelyezésük épületeken belül.

Az EU országaiban meghatározták azokat az emissziós határértékeket, amelyeket az ammónia üzemektől megkövetelnek, ezek természetesen országonként eltérhetnek, de a gyakorlat az egységesítés irányába mutat.

### **Salétromsavgyártás**

A salétromsav előállítása az Ostwald által mintegy 100 éve kidolgozott módon történik, a következő reakciók szerint:

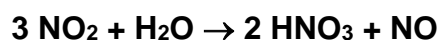
1) az ammónia katalitikus oxidációja levegővel NO-dá



2) az NO oxidációja NO<sub>2</sub>-dá vagy N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-dá



3) a nitrogénoxidok abszorpciója salétromsav képződésével

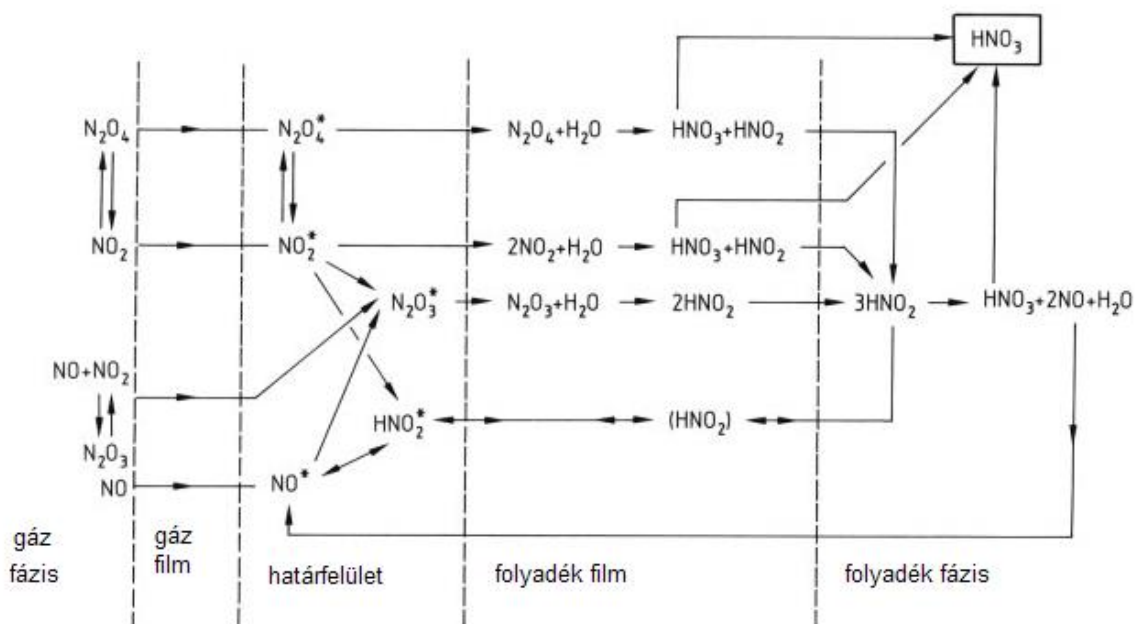


Az ammónia oxidáció Pt-Rh (5%) háló katalizátoron játszódik le, a szelektivitás 93-98% közötti, mellékreakció a N<sub>2</sub>O és a nitrogén képződése. A folyamat sebesség meghatározó részlépése az ammónia diffúziója a katalizátor felületéhez a lamináris határrétegen át. A sztöchiometrikus 14,4% ammónia koncentrációhoz képest kisebb

arányt alkalmaznak a robbanási határ miatt. Az alkalmazott hőmérséklet 850-950 °C között van a nyomástól és a térébességtől függően. A katalizátor használat közben veszít aktivitásából, ezt a hőmérséklet emelésével lehet kompenzálni. Az aktivitás csökkenés egyik oka a fémvesztés, elsősorban a Pt elillanása. Mivel nagyon drága nemesfémekről van szó, ezért visszanyerési módszereket dolgoztak ki. Az egyik módszernél mechanikus, üveg vagy kerámia szűrőket használnak, a másikonál fémhálót helyeznek a termék-gázok útjába, ami Pd-ból készül és úgy köti meg, hogy ötvözetet ad a ráakódó Pt-val. Ily módon a Pt nagyrészt visszanyerik, természetesen Pd veszteség árán, ennek az ára viszont fajlagosan csak mintegy ötöde, tizede a Pt-nak.

A NO tartalmú gázokat oxidálják majd abszorberben alakítják salétromsavvá, az elnyelési reakcióban újra képződő NO az abszorber tányérjai között a gázfázisban oxidálódik NO<sub>2</sub>-dá. (155. ábra). Az eljárások változatai abban különböznek, hogy milyen nyomáson végzik az ammónia oxidációt és az abszorpciót, valamint abban, hogy hígabb vagy tömény salétromsavat állítanak elő. Ez utóbbit kétféleképpen nyerik: az indirekt eljárásokban a töményítést extraktív desztillációval végzik, kénsav vagy magnéziumnitrát jelenlétében. A direkt eljárásban folyékony N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-ot állítanak elő és ezt reagáltatják oxigénnel és híg salétromsavval.

A salétromsav gyártást annak ellenére, hogy alapjai nem változtak az elmúlt 100 évben, sokan fejlesztették. A fejlesztések érintették a bemenő gázok és a cseppfolyós ammónia szűrését, mivel a szilárd szennyezések csökkentik a katalizátor hatékonyságát.



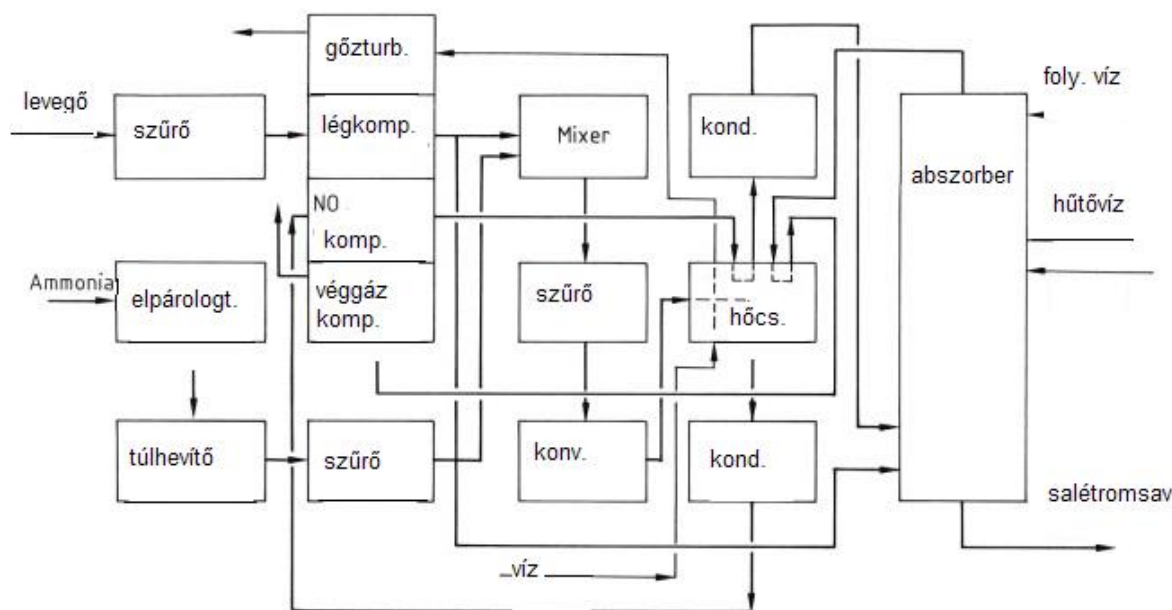
156. ábra. A salétromsav gyártás abszorpciós lépése során lejátszódó reakciók

Számos olyan irányú munka folyt, ami a legjobb szerkezeti anyag kialakítására vonatkozott, ennek eredményeként ma már olyan speciális ötvözött acélokat (Cr-Ni ötvözetek) használnak, amelyeknek hosszú az élettartama még az erősen korrózió közegben is. Ebben a technológiában is alapvető fontosságú az energetikai rendszer optimalizálása, ezt úgy érik el, hogy az exoterm folyamatokban keletkező hőt minél nagyobb hányadban használják anyagáramok előmelegítésére és gőz termelésére.

Javították az eljárást úgy is, hogy megnövelték az abszorpciós lépésben a nyomást, ezzel a reakciósebességet növelték és csökkentették a véggázok NO tartalmát.

### A salétromsav gyártás környezeti hatásai

Két évtizeddel ezelőtt még Magyarországon is megszokott látvány volt, hogy a salétromsav gyártó üzemek kéményéből sárga sőt vörösesbarna füst gomolygott. Ennek oka az volt, hogy a véggázokat tisztátalanul engedték ki a levegőbe, a nitrogén oxidok okozták az elszíneződést. Ez természetesen nemcsak kellemetlen látvány, hanem káros a környezetre minden élőlény szempontjából. Azóta a helyzet alapvetően megváltozott, a környezetszennyező üzemek egy részét leállították, a működő üzemeket gáztisztítókkal szerelték fel.



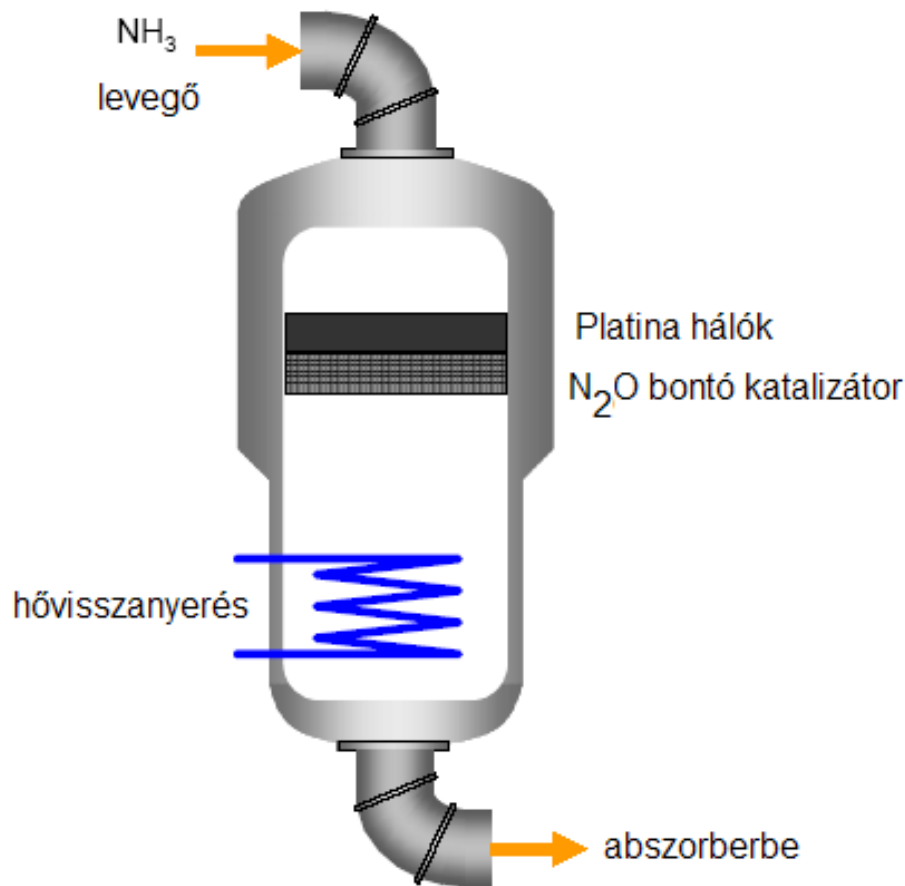
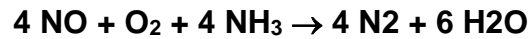
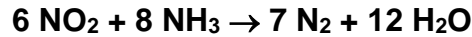
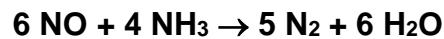
157. ábra. A salétromsavgyártás berendezéseinek folyamatábrája.

A következőkben sorra vesszük azokat a megoldásokat, amelyekkel a salétromsav gyártás környezeti hatásait mérsékelni lehet.

A véggázok kezelésére használt technikák a szelektív katalitikus redukció (SCR) és a nem-szelektív katalitikus redukció (NSCR). A NO<sub>x</sub> és az N<sub>2</sub>O emisszió csökkentésének módszerei lehetnek az oxidációs lépés optimalizálása, a levegő és az ammónia minél tökéletesebb összekeverése, a gázelegy egyenletes elosztása az oxidáló katalizátoron, a N<sub>2</sub>O katalitikus bontása az oxidációs reaktorban, közvetlenül az oxidáló katalizátor után, az abszorpciós lépés optimalizálása, a NO<sub>x</sub>/N<sub>2</sub>O kombinált katalitikus eltávolítása NH<sub>3</sub> adagolással a véggázba, közvetlenül az expanziós turbina előtt.

Fontos lehetőség az oxidációs reakció szelektivitásának javítására a katalizátor üzemidejének meghatározása, ugyanis a hosszabb üzemidő során romlik a szelektivitás, nő a képződött N<sub>2</sub>O mennyisége. Hasonlóképpen fontos az abszorpciós lépésben a nyomás, a hőmérséklet és az oszlop szerkezetének meghatározása, összehangolása, mert mindezek csökkentik a véggázok NO<sub>x</sub> tartalmát. Ilyen optimalizálás eredményeként alakultak ki a két nyomású technológiák, ezeknél a beruházási költség nagyobb, de a hatásfokuk jobb.

A salétromsav gyártó üzemek jelentős hányadánál használják a szelektív katalitikus redukciót a nitrogénoxidok bontására, hiszen a szükséges redukálószer, az ammónia rendelkezésre áll. A lejátszódó reakciók a következők:



*158. ábra. N<sub>2</sub>O bontás az oxidációs reaktorban másik katalizátorral*

A hőmérséklet 200-360°C a katalizátortól függően (nemesfémek, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), a képződött hőt itt is hasznosítják.

Egyes üzemekben a véggázok hőmérséklete olyan alacsony lehet, hogy az ammóniás redukciónál NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> képződése előfordulhat, ez lerakódhat az expanziós turbina lapátokon és a kéményben, ezzel biztonsági kockázatot okoz. Ennek elkerülésére az abszorpciós toronyba H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-ot adagolnak, aminek hatására nő az oxidációs hatásfok és lecsökken a véggázok NO<sub>x</sub> tartalma. Új megoldás most létesülő üzemekben, hogy a NO<sub>x</sub> redukcióját a véggázban NH<sub>3</sub>-val, míg a N<sub>2</sub>O-dét szénhidrogénekkal végzik megosztott reaktorban.

## Karbamid

Az ipari eljárásokban a karbamidot ammónia és széndioxid nagy nyomás alatti (>150 bar) és emelt hőmérsékletű (150-210°C) Basaroff reakciójában állítják elő:

Az első reakció gyors, exoterm, teljesen végbemegy, a második lassabb és endoterm, nem megy végbe teljesen.



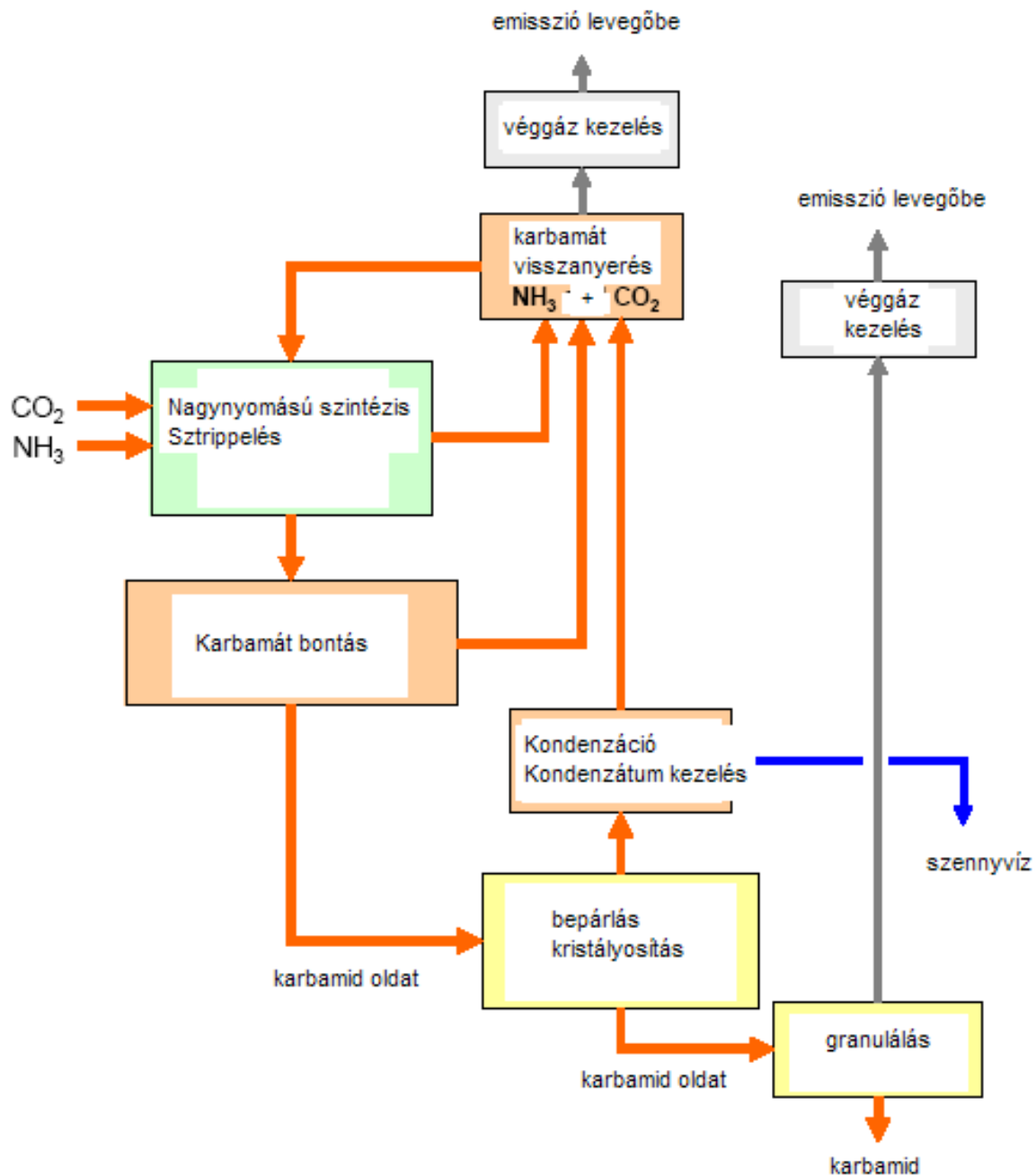
Mint általában, a karbamid üzemeknek is számtalan elvárásnak kell megfelelniük, ilyenek a termék minőség, nyersanyag és energia fogyasztás, környezeti hatások, biztonság, megbízhatóság, kis beruházási költség. A karbamid ipari előállítása már több mint fél évszázados, ezért kijelenthetjük, hogy az előbb említett, részben egymásnak ellentmondó kritériumokat jól meghatározták és összefoglalták adott eljárás(ok) megalkotásánál. A mérnöki megfontolások a karbamid technológiáknál néhány különleges megoldást eredményeztek:

- 1) a per pass konverzió a reaktorban termodinamikai okok miatt korlátozott, ez az  $\text{NH}_3\text{-CO}_2$  elegy azeotróp viselkedésével tetézve szükségessé teszi a különleges recirkulációs rendszert,
- 2) a közti termék, ammóniumkarbamát nagyon korrózív, ezért a szerkezeti anyagok megválasztása és a készülékek kialakítása alapvető fontosságú,
- 3) a két mellékreakciót, a karbamid hidrolízisét és a biuret képződését figyelembe kell venni.

Gazdaságos átalakulási fokot olyan eljárás tervezéssel lehet kialakítani, ami szerint a termék karbamidot el kell választani a többi komponenstől, az ammónia felesleget vissza kell forgatni, az ammónium karbamátot elbontani, az  $\text{NH}_3$ -t és a  $\text{CO}_2$ -t visszaforgatni (teljes recirkulációs folyamat). Ezt a karbamid oldat nyomás alatti sztrippelésével és expandáltatásával lehet elérni. A kialakult megoldásváltozatok a következők:

- konvencionális eljárások,
- $\text{CO}_2$  sztrippelő eljárások,
- $\text{NH}_3$  sztrippelő eljárások,
- izobár dupla recirkulációs eljárás,
- $\text{NH}_3$  és  $\text{CO}_2$  sztrippeléssel.

Végül a karbamid oldatot bepárolják, kristályosítják, vagy olvadékból szilárdítják és granulálják. Így használható műtrágyaként is.



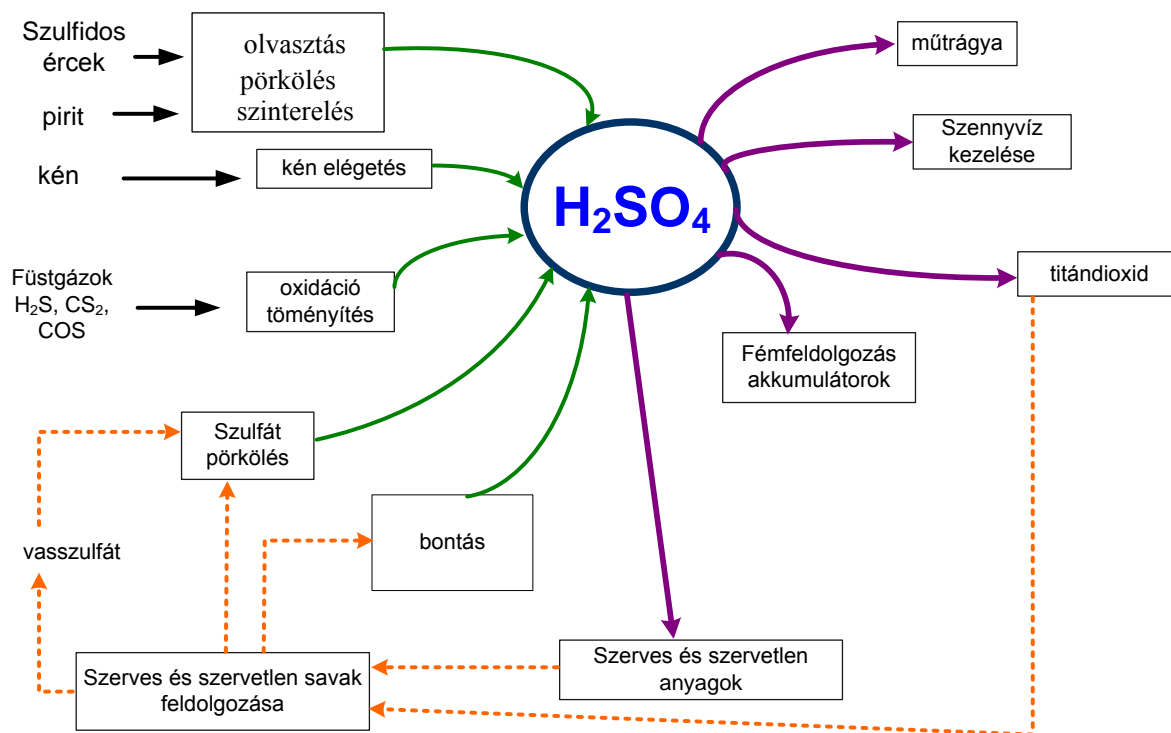
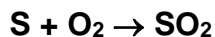
159. ábra. Karbamid előállítás folyamatábrája.

### A karbamid gyártás környezeti hatásai

A karbamid gyártás a termék és a kiindulási anyagok természete révén nem tekinthető jelentős környezeti hatású eljárásnak, energetikai szempontból sem tartozik ezek közé. Ezzel együtt a technológiát olyan szintre fejlesztették, hogy a kiindulási anyagokat szinte teljes mértékben visszaforgatják, a keletkezett hőenergiát hasznosítják, még a termék formálásánál keletkező port és bomlástermékeket is kimossák a véggázokból és visszanyerik. A technológiai vizet visszaforgatják vagy tisztítják, ami a benne lévő anyagok hidrolízisét és visszavezetését jelenti.

## Kénsavgyártás

A kénsav a legnagyobb mennyiségben előállított vegyianyag, a termelése kb 150 millió tonna évente a világon. Előállítása különböző kéntartalmú anyagokból történik, úgy hogy először kéndioxidot, majd abból kéntrioxidot csinálnak, majd azt vízzel reagáltatják.



160. ábra. A kénsavgyártás kiindulási anyagai és a kénsav felhasználása

34. táblázat. A kénsavgyártás nyersanyag megoszlása

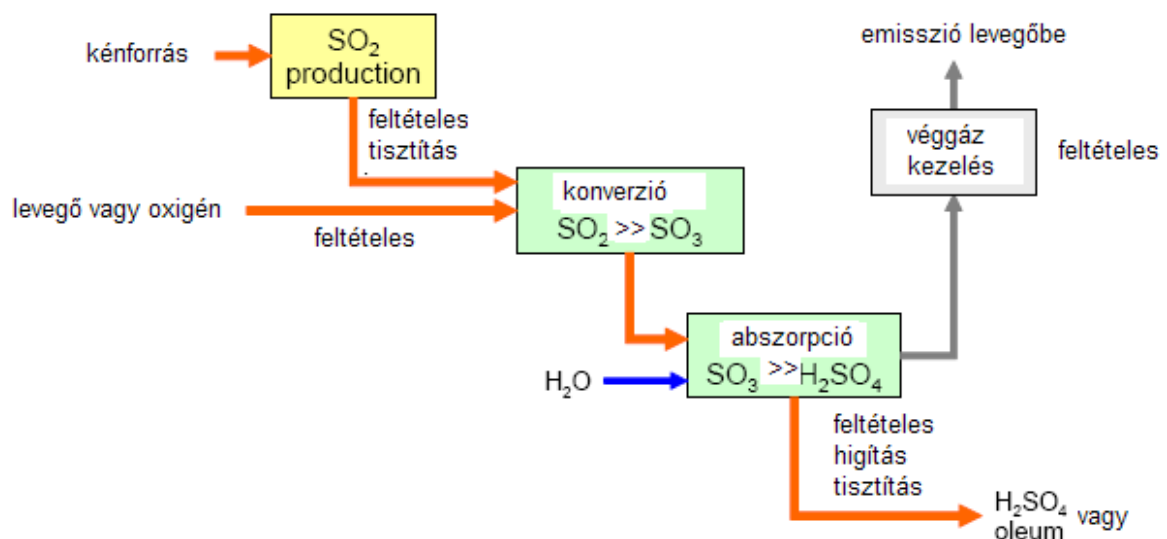
SO <sub>2</sub> forrás	%
kén	43,7
Nem-vas fémek	39,0
Kénsav regenerálás	7,5
Pirit	4,2
Visszanyerés és egyéb	5,6

A kénsavgyártás exoterm reakciókból áll. A kéntrioxid képződés egyensúlyi reakció, ezért a következő módszerek szolgálhatnak az átalakulás növelésére:

- hőmérséklet csökkentése hőeltávolítással
- nagyobb oxigén koncentráció
- kéntrioxid eltávolítás

- nyomás növelése
- a megfelelő katalizátor megválasztásával csökkenthető a reakció hőmérséklet
- nagyobb reakció idő.

Általában elmondhatjuk, hogy az adott megoldások a kéndioxid forrástól függenek, ez többnyire meghatározza a kéndioxid kiindulási koncentrációját is. A legnagyobb mennyiségben felhasznált elemi kén a kőolaj finomítókból, a Claus üzemekből származik. Elégetése úgy történik, hogy olvadt állapotban a kemencébe porlasztják, ahol levegőben elég, az égetés történhet egy vagy két lépésben, a hőmérséklet 900-1500°C. Az égetőhöz hőhasznosító kazán tartozik. A termék gázokat, amelyek mintegy 18% SO<sub>2</sub>-t tartalmaznak, a konverterbe vezetés előtt levegővel hígítják.



161. ábra. A kénsavgyártás folyamata.

Az eljárások legfontosabb berendezései a konverterek és az abszorberok, előbbieik modern változatai a centrális csöves reaktor és a közbenső hőcserélős reaktor. A kéntrioxid-víz reakciót úgy hajtják végre, hogy a gázt kénsavban nyeletik el, miközben vizet is adagolnak hozzá, oly módon, hogy a nagy mennyiségű fejlődő reakcióhőt elvezessék. A konverterben működik a katalizátor, ami manapság szinte kizárólag V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> szilikagél hordozón, CsNO<sub>3</sub> promotórral. A reakcióhőmérséklet 390-440°C, ha nem emelkedik 600°C fölé tartósan, akkor a katalizátor élettartama elérheti a 10 évet is.

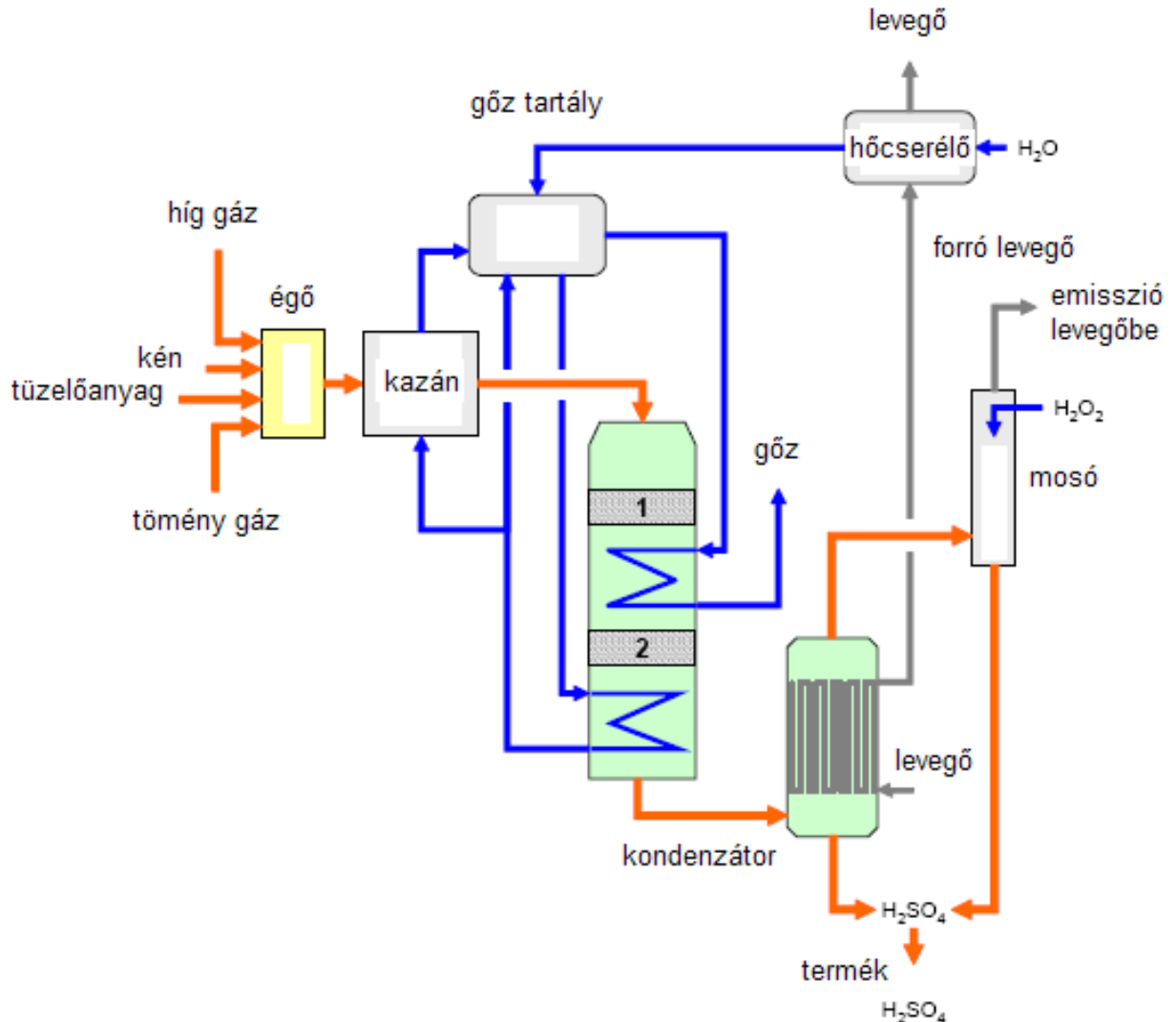
Az elemi kén mellett a további kéndioxid előállítási lehetőségek: kimerült kénsav bontása, pirit (FeS) pörkölése, TiO<sub>2</sub> előállítás, fémszulfátok bontása, ércszinterelése, pörkölése, H<sub>2</sub>S-ben gazdag véggázok, nagy kéntartalmú tüzelőanyagok elégetése, kéntartalmú szerves vegyületek elbontása. A felsorolt anyagok feldolgozása általában termikus eljárásokban történik, adott esetben tüzelőanyagok elégetésével kombinálva, például csökemencében koksszal.

## A kénsavgyártás környezeti hatásai

Ahogy a fejezet elején írtuk, a kénsavgyártás a legnagyobb egyedi vegyi anyag technológia, ezért környezeti hatásai már csak a volumenénél fogva is jelentősek,



különösen fontosak a kibocsátásai, mert savas gázokról és adott esetben mérgező fémekről van szó. A korszerű kénsav gyárak ezzel szemben minimális emisszióval dolgoznak, mert kialakultak azok a megoldások, amelyek lehetővé teszik a kénoxidok kibocsátásának nagyon alacsony szintjét.



162. ábra. Nedves kénsavgyártási technológia folyamatábrája.

A következőkben felsoroljuk azokat a technikákat, amelyek a környezeti hatások mérséklésére szolgálnak, azaz BAT (best available technique, elérhető legjobb technika) megoldásként számba jönnek:

- dupla kontakt/dupla abszorpció,
- egyszeres kontakt/dupla abszorpció,
- 5. katalizátorágy beiktatása,
- Cs-mal promóveált katalizátor használata,
- áttérés egyszeresről kétszeres abszorpcióra,
- nedves vagy kombinált nedves/száraz eljárás,
- a katalizátor rendszeres ellenőrzése, különösen az első katalizátor ágyon,
- tégla-íves konverterek cseréje saválló acél reaktorokra,

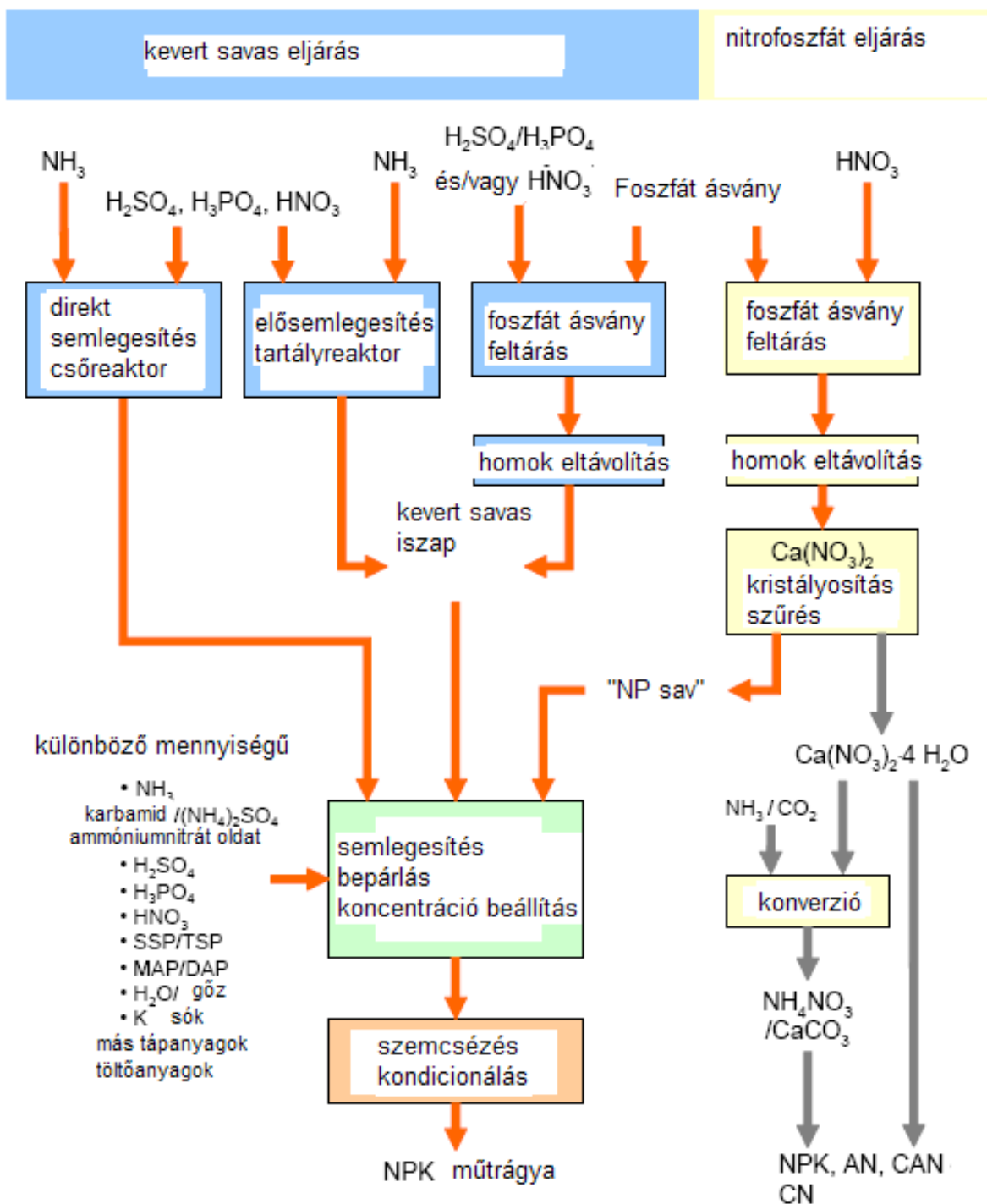
- nyers gáz tisztítás metallurgiai üzemek esetén,
- javított levegő szűrés, kétlépcsős szűrés kén égetésnél,
- kén javított szűrés, utószűrők használata,
- hőcserélők hatásfokának ellenőrzése,
- véggáz mosás, melléktermékek visszaforgatásával,
- kéndioxid szint folyamatos mérése,
- kis szennyezést tartalmazó kén használata,
- bemenő gáz és égést tápláló levegő megfelelő szárítása,
- nagyobb kondenzációs felület használata, nedves eljárásnál,
- sav megfelelő elosztatása és recirkulációs sebessége,
- nagy teljesítményű gyertyás szűrők használata abszorpció után,
- az abszorber sav koncentrációjának és hőmérsékletének ellenőrzése,
- visszanyerési és ártalmatlanítási technikák alkalmazása a nedves eljárásban.

Külön is érdemes szólni a nedves eljárásról (25. ábra), ami tulajdonképpen a SO<sub>2</sub> előállításánál létrejött nedves gázokat vezeti a konverterbe, ezáltal a kijövő gázokból közvetlenül kénsav keletkezik a kondenzátorban. Ezáltal lehetőség nyílik hígabb kéndioxidos gázból is töményebb kénsavat előállítani, másik lehetséges előny az elmenő kénsav permet csökkentése a lecsorgó filmes kondenzátorban.

## Mútrágyák

A műtrágyák a természetes szerves trágyákkal együtt a talajok tápanyag utánpótlását szolgálják az intenzív mezőgazdasági termelés folyamatában. Legismertebbek az NPK műtrágyák, amelyek mindhárom fő tápanyagkomponenst, a nitrogént, a foszfort és a káliumot is tartalmazzák vízoldható vegyületek formájában, a növények számára a talajból felvehető alakban. A következő fejezetben ezeknek a termékeknek a legfontosabb előállítási eljárásait ismertetjük és az eljárások környezeti hatásait vesszük sorra. Nem foglalkozunk a műtrágyázás környezeti hatásaival, az ennek hatására a természetben bekövetkező többnyire kedvezőtlen folyamatokkal.

A foszfát ásványok feltárása történhet salétromsavval vagy kevert savakkal (HNO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>), a keletkezett Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>-ot vagy gipszet elválasztják, a kapott nitrogén és foszfor tartalmú oldatot használják tovább a NPK gyártáshoz. A direkt vagy elősemlegesítésnél a savakat (salétromsav, kénsav, foszforsav) ammóniával semlegesítik, majd a kapott sóoldatokat bepárolva szilárdítják. A másik technológia szerint a savak semlegesítését forgó dobban, szilárd termék jelenlétében végzik ammóniával, hasznosítva a semlegesítés hőjét a víztartalom elpárologtatásához. A szemcsés anyag kialakítását többféle berendezésben (granuláló dobban, szóró toronyban, keverőgépben, granuláló bepárlóban, préseléssel) végezhetik. A szükséges hőmérséklet a termék összetételétől függ, 180-320°C közötti lehet, mindenestre a szilárd anyagok megolvadását el kell kerülni, mert összetapadhatnak a szemcsék.



163. ábra. NPK műtrágyák előállítása foszfát ásványokból

## A műtrágyagyártás környezeti hatásai

A műtrágya előállítási technológiák emissziói a  $\text{NO}_x$ , és az  $\text{NH}_3$ , a feltárási és semlegesítési lépésekből, valamint a por kibocsátás a szárítás és a granulálás folyamataiból erednek.

A  $\text{NO}_x$  a foszfát ásványok feltárása során keletkezik, abban az esetben, ha a salétromsav oxidálható komponenssel reagál, ilyenek a vas vegyületei és szerves

anyagok. Ezért célszerű olyan foszfátot használni, aminek minimális a vas és a szerves anyag tartalma. A forgó dobos szárítás és granulálás során a szárító levegőbe por kerül, amit ciklonokban választanak le, hogy ne jusson ki a külső térbe. A száraz, granulált terméket le kell hűteni, mielőtt tárolásra kerül. Erre a célra forgó dob és fluidizált hűtő mellett újabban lemezes hűtőket használnak. Ezekben a forró granulátum saválló acél lemezfelületek között csúszik lefelé, miközben a lemezeket belülről vízzel hűtik. A módszer előnyei a kisebb mértékű porzás és a szükséges kisebb mennyiségű energia. Alkalmazzák az energia takarékoság és a kisebb por emisszió miatt a levegő recirkulációját a szárítóban, ennél szükséges a ciklonos és szűrős porleválasztás. A szemcseméret optimalizálásával lehetséges csökkenteni a visszaforgatandó elporlott anyagot és a túlméretes szemcséket. A foszfát feltárásból, a homok elválasztásából és a kalciumnitrát szűréséből származó NO<sub>x</sub> tartalmú véggázokat mosóban ártalmatlanítják, ahol NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> oldattal érintkeztetik, amit visszaforgatnak az NPK gyártáshoz. A mosást ciklonos leválasztással is kombinálhatják, a mosófolyadékokat pedig recirkuláltatják. A folyamatból származó szennyvizet biológiai tisztításra kell vinni, adott esetben a foszfátok előzetes leválasztása után.

## A klór-alkáli elektrolízis

Cruickshank már 1800-ban előállította a klórt elektrolízissel, mégis ipari eljárásá akkor vált, amikor kidolgozták a szintetikus grafit anódot és rendelkezésre állt a szükséges elektromos áram. Az 1800-as évek végén párhuzamosan fejlődött ki a diafragmás és a higanykatódos eljárás, míg a membrános technológiát az 1970-es években valósították meg ipari léptékben.

Ugyanebben az időszakban a grafit anódokat kiszorították az aktivált titán anódok mind a diafragmás, mind a higanyos eljárásokban.

A 19. században a klórt csak fehérítésre használták, termelése az 1940-es évektől növekedett jelentősen a PVC és poliuretán igényekkel együtt. Az aromás klórvegyületek, a propilénoxid, a klórozott szénhidrogén oldószerek és szerves klórvegyületek előállítása szintén növelte a klór igényt. Jelenleg a Nyugat-Európai termelés 9 millió tonna körül van, a US 11,2 millió tonnás és Japán 4,2 millió tonnás termelése mellett, a világban 1994-ben 38 millió tonna klórt állítottak elő.

A klór előállítása az egyik legnagyobb elektromos energia fogyasztó eljárás. Az egyes országok vegyiparának fejlettségét szokták klórtermelésével is jellemezni.

A klór-alkáli termelésben három technológiát alkalmaznak, a higanyos, a diafragmás és a membrános eljárást, nyersanyagként kősót, NaCl-ot használnak. Más eljárások, ahol sósavat vagy olvadt alkáliloklidokat elektrolizálnak csak mintegy 3%-át adják a klór termelésnek. A membrános eljárást az utóbbi 30 évben tovább fejlesztették, mind gazdasági mind ökológiai szempontból jobb a másik kettőnél. Ennek ellenére Európában lassan terjed, mert a meglévő üzemek még nem túl régiek, cseréjük a következő időszakban várható.

A klórt legnagyobb mennyiségben a szerves klórvegyületek, elsősorban a vinilklorid előállítására használják, ami a PVC monomere. Mivel a klórt nehéz tárolni és szállítani gazdaságosan, ezért előállítását általában a felhasználás helyén végzik. Kb. 80%-át használják a szerves vegyiparban, a vinilklorid mellett klórmetánok, foszgén, triklóretilén előállítására. Számos finomkémiailag intermedierek, gyógyszerhatóanyag és növényvédőszer szintéziséhez is szükség van a klórra. Kb. 15%-át fogyasztja el a szerves vegyipar, hipoklorit, sósav, fémkloridok és bróm előállítására. Közvetlen felhasználása a víz kezelésben és a cellulóz és papír iparban van (~4%).

Európában a klórt többnyire helyben használják fel, a kapcsolódó technológiák elfogyasztják mind a klórt, mind a lúgot, általában egy telephelyen belül.

Az elektrolízist eredetileg a klór előállítására fejlesztették ki, de az együtt képződő lúg is felhasználásra talált, mint például a textilkészítés, mosószerek előállítása. A lúg termelés a molekulatömegek arányában 1,128 tonna NaOH/tonna Cl<sub>2</sub>. A lúg általában 50%-os oldat formájában képződik, egyszerűen tárolható és szállítható is. Fontosabb felhasználási területei a következők:

- szerves és szervetlen anyagok szintézise,
- metallurgiai eljárások, alumíniumipar,
- cellulóz és papíripar,
- textilipar,
- szappan és mosószergyártás,
- vízkezelés,
- fogyasztási cikkek.

A hidrogén szintén a klór gyártás mellékterméke, 28 kg keletkezik 1 tonna klór előállításánál. Felhasználása lehet tüzelőanyagként, nagyobb vegyiüzemekben hidrogénezési reakciókhoz, metanol, ammónia szintézishez, sósav, hidrogénperoxid előállításához.

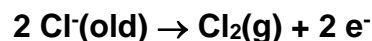
A klór és a lúg együtt keletkezése rögzített arányban állandó problémát jelenthet a klór-alkáli ipar számára, mivel a két anyag iránti igény nincs összhangban, hiszen eltérő technológiákhoz is használják őket. Ebből adódik, hogy az árak néha nagyon különbözőek az éppen aktuális igényeknek megfelelően. A klór nehéz szállíthatósága miatt alkalmazzák azt a megoldást, hogy a könnyen kezelhető diklóretánt, a PVC prekursorát szállítják nagyobb távolságokra.

## Elektrolízis technológiák

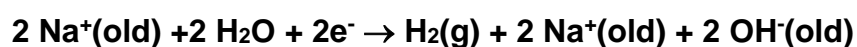
A klór előállítására szolgáló három eljárás (higanyos, diafragmás, membrános) elsősorban abban különbözik egymástól, hogy miképpen oldják meg az anódon keletkező klór és a katódon képződő lúg és hidrogén elválasztását.

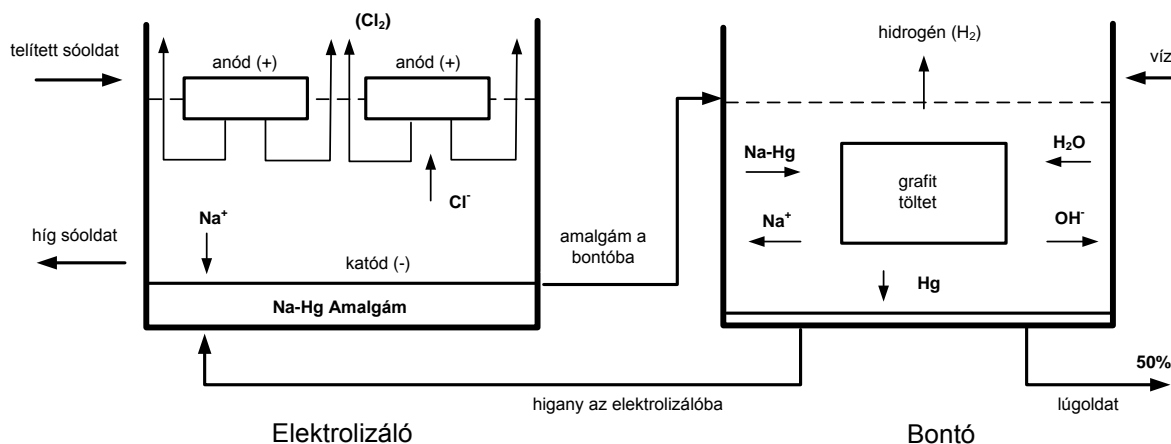
A NaCl oldat elektrolízisének alapelve a következő:

- az anódon a klorid ionok oxidálódnak és klórt adnak,



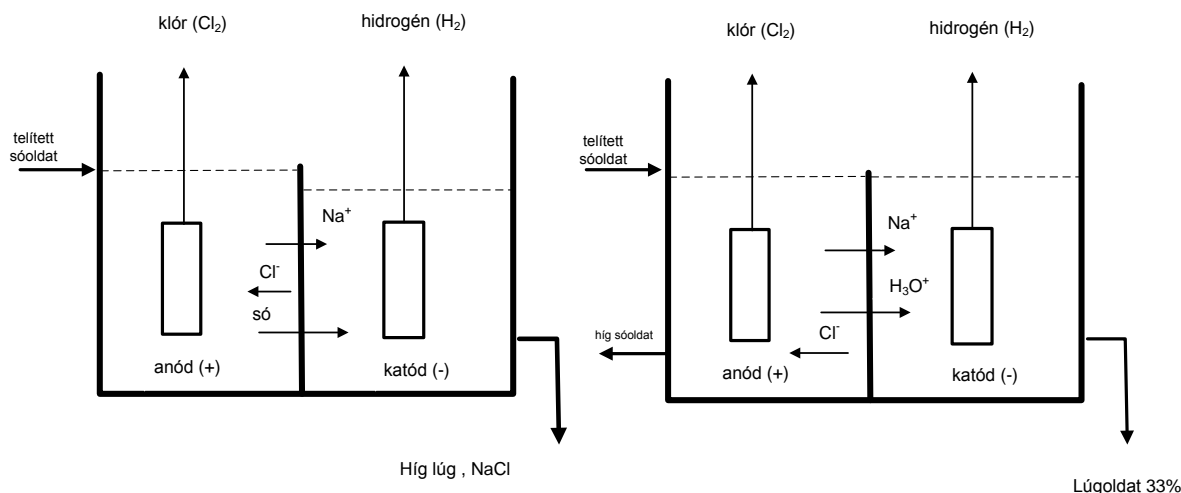
-a katódon a higanyos eljárásnál nátrium/higany amalgám képződik, amiből a bontóban vízzel hidrogén és NaOH keletkezik, a membrános és diafragmás cellákban vízbontás megy végbe hidrogén és OH<sup>-</sup> ionok képződése mellett.





164. ábra. Higanyos elektrolizáló és bontó cella elvi működése

A higanyos cella működése azon alapul, hogy a hidrogén túlfeszültsége nagy a higanyon, ezért a nátrium válik le. A sóban lévő szennyezések (pl. V) csökkenthetik ezt a túlfeszültséget, emiatt hidrogén válhat le a Hg katódon és bejuthat a klórgázba. Ez veszélyes, mert a hidrogén a klórral is, ugyanúgy mint az oxigénnel, már 4%-os mennyiségben robbanó elegyet alkot. A higanyos cellák 21-22%-os kimerült sóoldat koncentrációval működnek, ez azt jelenti, hogy egyszeri áthaladáskor a sóból 15-16% reagál el. Hígabb sóoldattal a vezetőképesség csökkenése miatt romlana az elektromos hatásfok. Az elektrolizáló cellában 70-80°C, a bontóban 90-130°C a hőmérséklet. A Hg anóddal, ami a cella alján vékony rétegben folyik, szembe kapcsolt katód manapság már szinte kizárólag Ti-ből készül, ami a felületén TiO<sub>2</sub> és RuO<sub>2</sub> bevonattal van ellátva, ezek az anódok hosszú élettartamúak és jobb hatásfokkal működnek (+10%).



165. ábra. Diafragmás (bal oldalon) és membrános (jobb oldalon) elektrolízis cella

A diafragmás eljárás elsősorban az USA-ban terjedt el, itt még ma is a termelés kb. 70%-át adja. A higanyos eljárással szemben ennél minden folyamat egy cellában játszódik le és az elmenő oldat só és lúgot is tartalmaz. A diafragma feladata hogy elválassza az anódon fejlődő klórt és a katódon fejlődő hidrogént és az itt keletkező

lúgot. Ha nem volna a diafragma, akkor a hidrogén és a klór összekeveredve meggyulladna, a lúg és a klór pedig hipokloritot illetve klorátot adna. A diafragma azbesztből készül (ma már vannak polimer diafragmák!), elválasztja a betáplált sóoldatot a lúgtartalmú katódtérben lévő oldattól. A tisztított sóoldat az anódtérbe lép be és átszivárog a diafragmán keresztül a katódtérbe, ennek hajtóereje az, hogy az anódtér folyadékszintje magasabb. A kb. 25% sótartalmú oldatból a só fele reagál el a 80-99°C hőmérsékleten. A 11% lúgot és 18% sót tartalmazó termékoldatot bepárolják 50% NaOH tartalomig, amikor is a só kristályosan kiválik nagyon tiszta formában. Ily módon sóoldat készítéshez visszaforgatható.

Az 1970-es években az ioncserélő membránok kifejlesztésével új elektrolízis technológia jelent meg, ami lehetővé tette mind a higany, mind az azbeszt kiváltását. Azóta is továbbfejlesztették, minden szempontból előnyösebb, az új üzemek csak ezzel e technológiával létesültek.

Ennél az eljárásnál az anódot és a katódot vízzáró, ion-vezető membrán választja el, a sóoldat az anódtérben áramlik, ahol a klorid ionok klórrá oxidálódnak. A nátrium ionok a membránon átjutva a katódtérbe kerülnek, ahol lúgoldat áramlik. Ide vezetik be az ionmentes vizet, amiből hidrogén és hidroxil ionok lesznek, ez utóbbiak a nátrium ionokkal 32-35%-os töménységű lúgot adnak. A kimerült sóoldatot szilárd NaCl hozzáadásával, a lúgoldatot bepárlással töményítik. A katód anyaga nikkelt vagy saválló acél, felületén katalitikus hatású bevonattal, mint például Ni-NiO. Az anód a már ismert Ti nemesfémoxid bevonattal. A membrán anyaga perfluorozott polimer, amin karboxil csoportok vannak a katódos oldali rétegben, míg az anódos oldalon szulfonsav csoportokat építenek a polimer rétegbe, a membránt teflon szákkal erősítik. Élettartamuk 2-5 év közötti.

Fontos lépés az elektrolízis üzemekben a bemenő sóoldat tisztítása, ugyanis az alkáliföldfém ionok, más fémszennyezések károsak az elektrolízisnél, ezért el kell távolítani őket a kiindulási anyagból. Ez karbonátos, szulfátos vagy lúgos lecsapással és szűréssel történik.

### 35. táblázat. A kősó elektrolízis technológiák összehasonlítása

	Higanyos	Diafragmás	Membrános
Lúg minőség	Nagy <30 mg/l NaCl 5-150µg/l Hg	1-1,5% NaCl tartalom, NaClO <sub>3</sub> 0,1%	Nagy <50 ppm NaCl
Lúg koncentráció	50%	12% töményíteni kell	33% töményíteni kell
Klór minőség	Kis mennyiségű <0,1% oxigént és hidrogént tartalmaz	1,5-2,5% oxigén tartalom	0,5-2% oxigén tartalom az elektrolit savasságától függően
Sóoldat jellemzők	Tisztítást igényel a só minőségétől függően	Tisztítást igényel a só minőségétől függően	Nagy tisztaságú sóoldatot igényel
Elektromos teljesítmény változtathatóság	Változtatható elektromos teljesítménnyel is elmege le 30%-os kapacitásig	Csak kis áramingadozást és sóoldat áramlási sebesség változást enged meg	Lehetséges kisebb terheléssel működtetni, de rontja a hatásfokot és a termék minőséget

## **A klór-alkáli elektrolízis környezeti hatásai**

Mind a kiindulási anyagok, mind a technológiából származó szennyező anyagok szempontjából alapvető, hogy milyen cellát használnak. A felhasznált elektromosságot nyersanyagnak tekinthetjük, nem felejtkezve el előállításának környezeti hatásairól, hiszen az egyik legnagyobb ipari fogyasztóról van szó. A környezeti hatások közül ki kell emelni a higanyos és diafragmás eljárások szennyezéseit, ami a talaj, a vizek tekintetében egyes helyeken nagyon komoly problémát jelent.

Különösen veszélyes a higany szennyeződés, ami a legnagyobb mértékű, érinti az összes környezeti szférát. Példaként lehet említeni azt, hogy a szerves Hg vegyületeket egyes anaerob baktériumok szerves vegyületekké alakítják és így bekerülhetnek a táplálék láncba.

A higany a hulladékokkal, a lefolyó vízzel eljuthat a talajba, a talajvízbe, onnan pedig az élő vizekbe. Ha elkészítik egy üzem higany mérlegét, az soha nem kiegyenlített, a fém felhalmozódik a berendezésekben, épületszerkezetekben, nagyon nehéz és költséges eltávolítani, hiszen sűrűségénél fogva gyorsan megy lefelé a talajban is.

A diafragmás technológiánál a fő veszély az azbeszt, aminek nem tehetjük ki az ott dolgozókat. Ezért folynak olyan fejlesztések, amelyek az azbeszt diafragma kiváltását célozzák más, ártalmatlan anyagokkal.

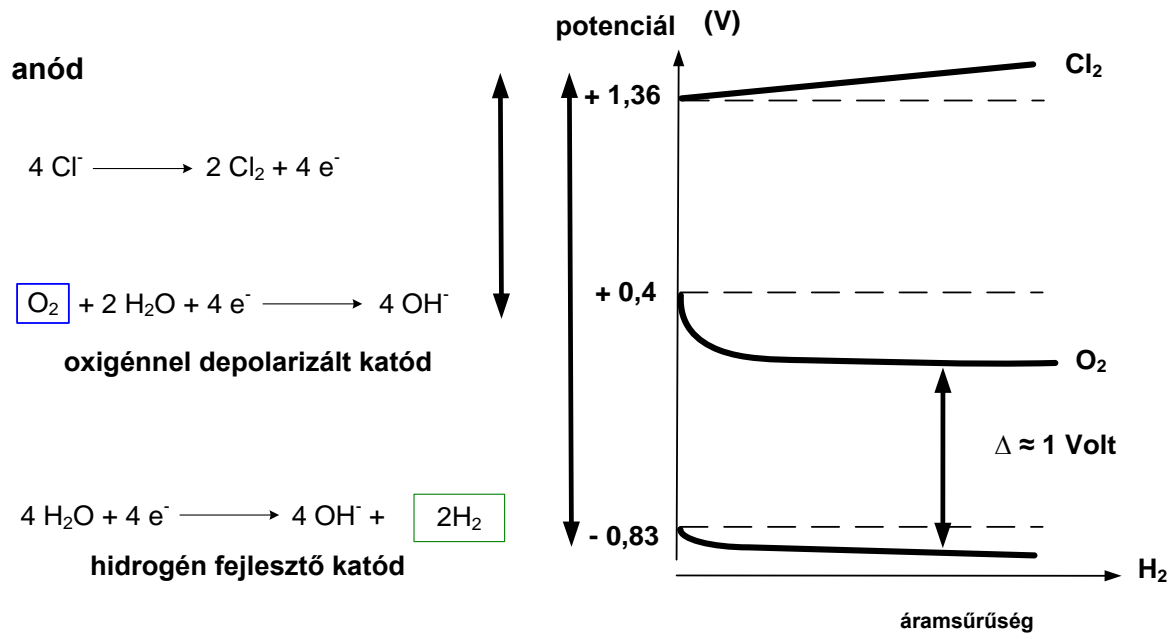
Az elektrolízis üzemekre a BAT (elérhető legjobb technika) a membrános eljárás. A működő üzemekben olyan klór elnyelő egységre van szükség, ami üzemzavar esetén képes mindazt a klórt megkötni, ami az üzem leállításáig termelődik. A membrános üzemekben el kell kerülni a klorátok és bromátok kijutását a szennyvizekkel. A higanyos technológiával dolgozó üzemekben a higany szennyezés minimalizálása az előírás, vonatkozik ez az üzemeltetésre és az üzemek felszámolására is. Hasonlóképpen a diafragmás technológiáknál az azbeszt környezetbe kerülését kell elkerülni, a folyékony és szilárd hulladékok megfelelő kezelésével, például termikus kezeléssel.

A fejlesztések közül a következőket említjük meg: oxigénnel depolarizált katód, a tüzelőanyag cella koncepció bevitele az elektrolízis cellába, amivel a katódos félcella oxigént redukál hidrogén fejlesztése helyett, amivel a cellafeszültség kb 1 voltal csökkenthető.

A membrános technológia továbbfejlesztését jelenti az a további védő réteggel készült membrán, amellyel 50%-os lúgoldat állítható elő.

A diafragmás technológiában történt fejlesztés az ún. „prekatód”. Ez a katódra felvitt réteg, ami elektro-katalitikus hatású, a túlfeszültséget csökkenti.





166. ábra. Oxigénnel depolarizált katód működése

## Építőanyag ipar

### Építőipari kötőanyagok

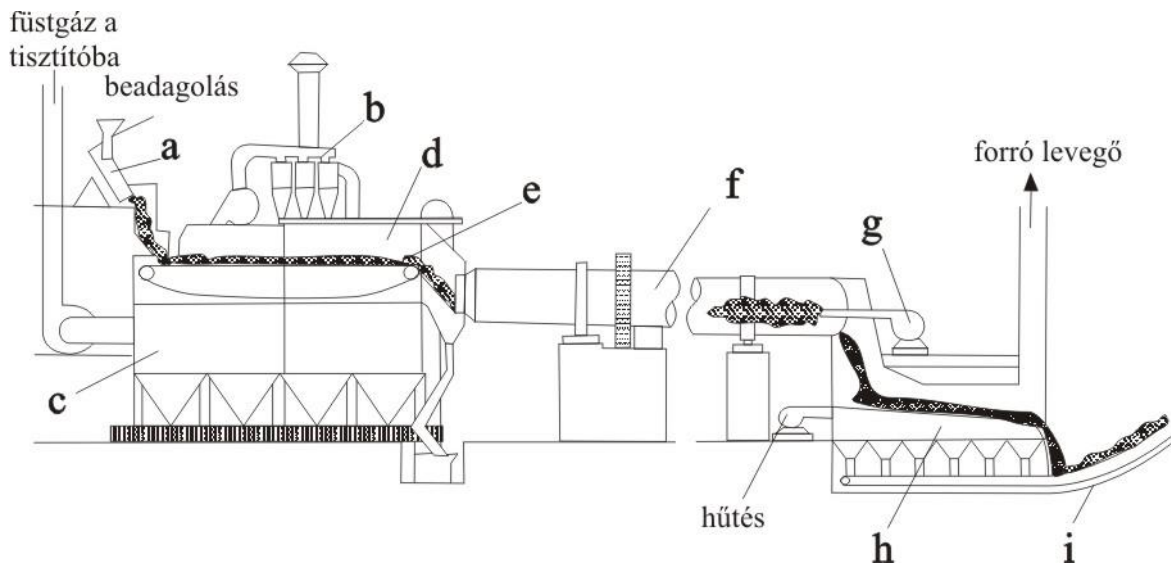
- A kötőanyagok kémiai és fizikai folyamatokban pépes vagy folyékony állapotból szilárd állapotúvá válnak és a beléjük kevert szilárd anyagokat összeragasztják.
- Természetes (agyag, bitumen) vagy mesterséges (mész, gipsz, cement) eredetűek.
- Osztályozásuk: hidraulikus (cement) és nem hidraulikus (mész, gipsz) kötőanyagok.
- Két fázisban alakul ki végleges hatásuk: kötési és szilárdulási szakasz.

### Cementgyártás

A cement a magas és mélyépítés nyersanyaga, előállításának a volumene rávilágít az építőipar konjunktúrális helyzetére és ezzel együtt az általános gazdasági helyzetre. Az EU cement termelése 1995-ben 172 millió tonna volt, ez a világ termelés 12%-a. A cement kavicssal és acéllal összekeverve és szerelve adja a vasbetont, ami az épített szerkezetek egyik legfontosabb alkotója.

A cement gyártás nyersanyagait kibányásszák, őrlik, homogenizálják, ezután jönnek a termikus lépések, a kalciumkarbonát bontása, majd a kalciumoxid kiégetése szilíciumoxiddal, alumíniumoxiddal és vasoxiddal nagy hőmérsékleten a klinker előállítására. Ezt követően a klinkert összekeverik és egyben őrlik gipsszel és más összetevőkkel együtt a cement előállítására. A kalciumkarbonát forrásai a mészkő, dolomit, kréta, márga, a szilíciumoxid, alumíniumoxid, vasoxid más ércekben és ásványokban fordulnak elő, ilyen a homok, pala, agyag vagy a vasérc. Az erőművek hamuja, a kohósalak és más folyamatok hulladékai, maradékai szintén felhasználhatók a nyersanyagok helyettesítésére. 1 tonna klinker előállításához

átlagosan 1,57 tonna nyersanyagot használnak fel Európában. Az eltávozó anyag nagy része a karbonát bomlásából származó CO<sub>2</sub>.



167. ábra. Klinkerkemence rostélyos előmelegítővel és hűtővel.

a) tablettázó; b) köztes porgyűjtő; c) szárító kamra; d) forró kamra; e) rács; f) forgó kemence; g) égő; h) rácsos hűtő; i) klinker szalag

A cement gyártás energiaintenzív technológia, a költségek 30-40%-a erre fordítódik. Többféle tüzelőanyagot használnak a hőtermeléshez, a leggyakrabban használtak a petrokoks (39%), szén (36%), hulladékok (10%), fűtőolaj (7%), lignit (6%), földgáz (2%).

1995-ben az EU-ban 252 cementgyár működött 437 klinker kemencével. A tipikus kemence méret 3000 tonna klinker/ nap kapacitású.

A klinker égetés forgókemencében történik, ami nedves vagy száraz hosszú kemence rendszer része, nedves és száraz rostélyos előmelegítő kemencéből, száraz szuszpenziós előmelegítőtől vagy előmelegítő/kalcináló kemencéből áll. A BAT a cement klinker előállítására a száraz kemence több lépcsős szuszpenziós előmelegítővel és előkalcinálással, hőigénye 3000 MJ/tonna klinker. A leggyakrabban használt ún. „Portland” cement összetételét a 36. táblázat tüntettük fel. A 37. táblázat láthatóak azok a fontosabb folyamatok, amelyek a klinker égetése közben lejátszódnak, ezek részben fizikai változások, például adszorbeált víz vesztese, részben kémiai átalakulások, mint például a karbonátok bomlása, spinellek képződése. A legnagyobb hőmérsékleteken, 1400°C felett egyes fázisok megolvadnak, feloldanak másokat, sőt szilárd-szilárd fázisú reakciók is lejátszódnak, mindezek során alakul ki a klinker végleges állapota. A klinkert a cement előállítására még egyéb anyagokkal, például gipsszel is összekeverik, hogy a végleges, kereskedelmi forgalomba hozható terméket megkapják.

A 168. ábra tüntettük fel azokat a folyamatokat, amelyek során a cement vízzel és kavicsal, acélszálakkal, rudakkal együtt megköt, a betont, illetve a vasbetont adva. A kötés és szilárdulás folyamatai, hasonlóan az égetéshez, lehetnek fizikai és kémiai változások, az előbbiekre példa a kristályosodás, az utóbbiakra a kristályvizes anyagféleségek kialakulása a dehidratált vegyületekből, vagy a CO<sub>2</sub> felvételével járó karbonátosodási reakciók.

### **A cementgyártás környezeti hatásai**

A klinker égetés a folyamat legfontosabb része környezeti hatás, energiafelhasználás és légszennyezés szempontjából egyaránt. Az emissziók a nitrogénoxidok, kéndioxid és a por. A porleválasztás már hosszú ideje folyik, a kéndioxid ártalmatlanítás az egyes üzemekben más és más lehet, a nitrogénoxidok ártalmatlanítása viszonylag újabb törekvés. Az elsődleges intézkedések a folyamatszabályozás, optimalizálás, gravimetrikus szilárd tüzelőanyag adagolás, optimalizált hűtő kapcsolódás és energia menedzsment rendszer, ezek az intézkedések javítják a klinker minőségét, csökkentik az energiafelhasználást és csökkentik az emissziót.

A nitrogénoxidok csökkentésére a megosztott tüzelés mellett a szelektív nem-katalitikus redukciót célszerű használni. A kéndioxid csökkentésre a tüzelőanyag kéntartalmának csökkentése a legjobb megoldás, míg a porleválasztásra az elektrosztatikus porleválasztók és a szűrők alkalmazhatók. A szilárd hulladék csökkentésére a szemcsés anyag folyamatba való visszaforgatása az ajánlatos.

A cementgyártás, ezen belül is a klinkerégetés kiváló lehetőséget kínál különböző eredetű veszélyes hulladékok ártalmatlanítására. A klinkerkemence azért alkalmas erre, mert olyan nagy hőmérséklet van benne, aminél a szerves anyagok oxidálódnak illetve elbomlanak, továbbá nagy mennyiségben mozog benne olyan anyagáram, ami tartalmaz bázikus anyagokat a savas oxidációs termékek semlegesítésére, nagy felületű szilárd anyagot, ami adszorpció révén megköti a nem kívánatos szennyező komponenseket a füstgázból. Nem elhanyagolható az a szempont sem, hogy a hulladékok égéshője csökkenti a cementgyártáshoz szükséges nagy mennyiségű tüzelőanyagot.

A következő felsorolás tartalmazza azokat a fontosabb hulladékanyagokat, amelyeket klinkerkemencében szoktak ártalmatlanítani: hidraulikus olajok, klórmentes szigetelő olajok, kenőolajok, fa hulladékok, szennyvíziszapok, gumi hulladék, papír, karton, petrolkocsz, papíriszap, műanyagok, kohászati hulladékok, útfenntartási hulladékok, ón visszaforgatási hulladékok, talajok, építési törmelékek szerves anyag tartalommal. Lehetőség van például vegyipari eredetű hulladék oldószerek elégetésére is, mivel a klinkerkemence legnagyobb hőmérsékletű zónájában az oldószerégetés veszélyes melléktermékei, a dioxinok úgyszintén elbomlanak. Természetesen az ártalmatlanítandó hulladék mennyisége az előállított cement tört része lehet csak, hogy sem a cement minőségét, sem a kibocsátott füstgáz tartalmát érdemben ne befolyásolja.

### 36. táblázat. Klinker összetétele

A Portland cement klinker összetétele

Összetevő	Képlet	Tartalom, tö %	
		Tartomány Átlag	
Trikalcium szilikát	$3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2 \text{ (C}_3\text{S)}$	46 – 79	61
Dikalcium szilikát	$2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2 \text{ (C}_2\text{S)}$	5 – 30	15
Kalcium aluminoferrit	$2 \text{ CaO} \cdot (\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3) [\text{C}_2(\text{A}, \text{F})]$	4 – 16	8
Trikalcium aluminát	$3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ (C}_3\text{A)}$	6 – 18	12
Szabad kalcium oxid	$\text{CaO (C)}$	0.1 – 4	
Szabad magnezium oxid	$\text{MgO (M)}$	0.7 – 1.5	1.5

### 37. táblázat. Klinker égetése közben lejátszódó folyamatok

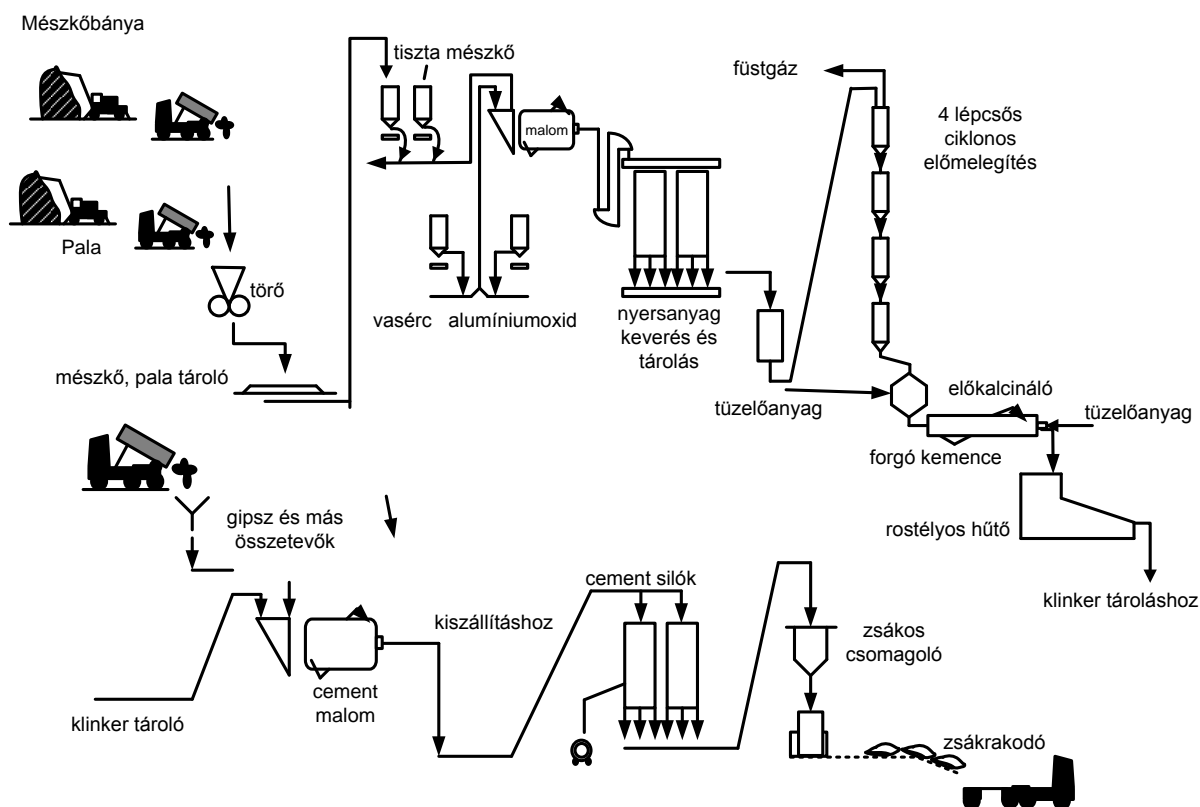
Hőmérséklet, Az égetés során lejátszódó reakciók  
°C

≤ 100	Szabad nedvesség eltávolítása
100 – 200	Adsorbeált nedvesség eltávolítása
200 – 400	fokozatos H <sub>2</sub> O veszteség halloysit, montmorillonit, pyrophyllit-ből finom csillám képződés indul Határozott expanzió
400 – 700	Szerves anyag oxidálódik, agyagásvány szerkezetek megbomlanak, pyrophyllit kezd kiterjedni
573	Kvarc inverziója
700 – 950	pyrophyllit maximális kiterjedése, spinel képződés az agyagokban
950 – 1000	Muscovit szerkezet lerombolódik, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ vagy mullit képződik
1000 – 1100	mullit, $3 \text{ Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{ SiO}_2$ , képződik az agyagból
1100 – 1200	földpát megolvad, agyag és cristobalit feloldódik, porozitás csökken, zsugorodás fokozódik
1300	Üveges fázis nő, termék kiterjed, abszorpció nő, szilárdság csökken

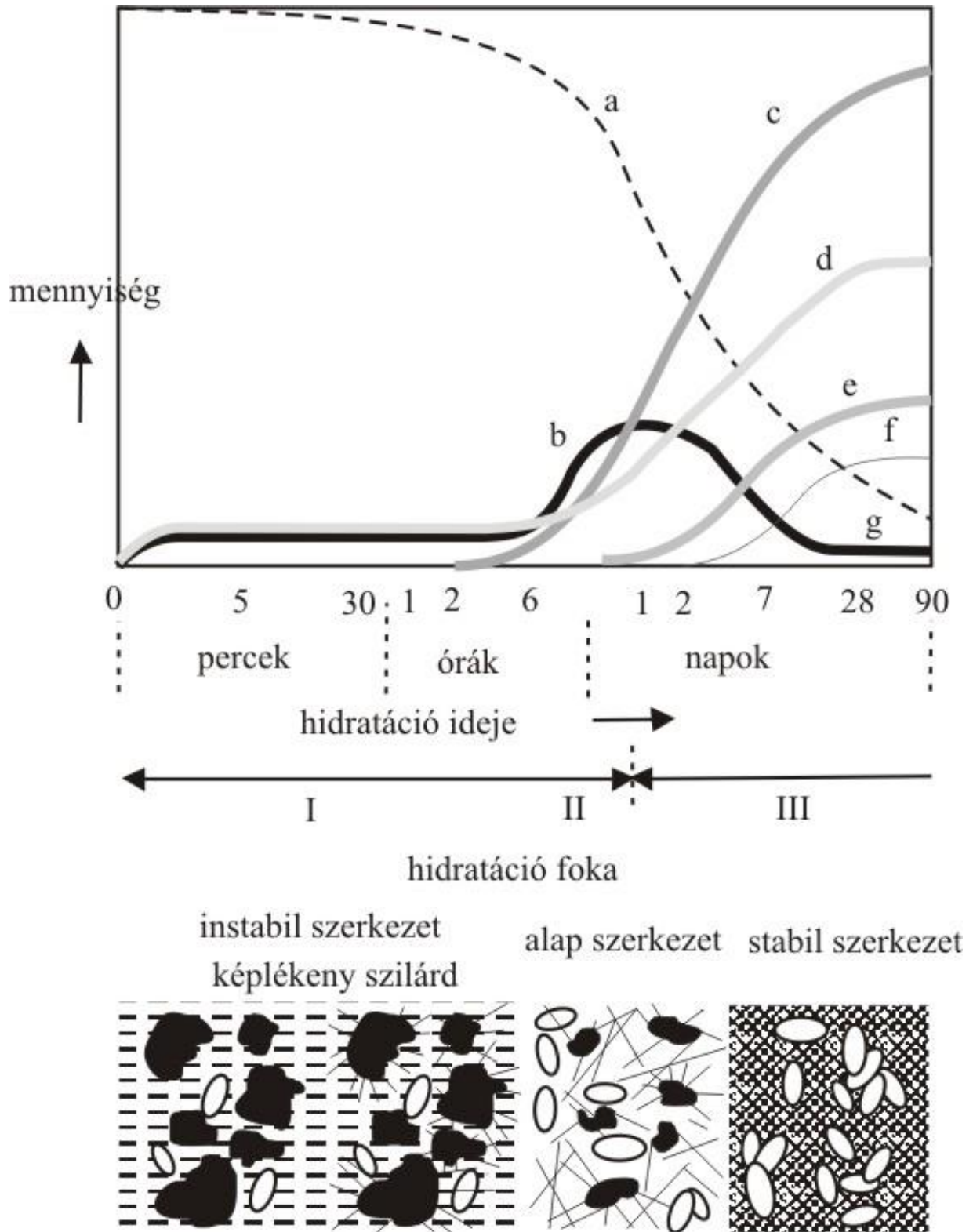
A cement gyártása rengeteg energiát igényel, ezért az évtizedek folyamán a fejlesztések elsősorban arra irányultak, hogy a folyamatot a hővisszanyerés és hasznosítás szempontjából optimalizálják. A 167. ábra és 168. ábra láthatóak olyan megoldások, amelyek a forró füstgázok hőjének és a forró klinker fájhőjének visszanyerésére szolgálnak, az előbbivel a betáplált nyersanyag keveréket melegítik fel, az utóbbival az égést tápláló levegőt melegítik elő.

Korszerű új technológiát fejlesztettek ki Japánban, ami energia megtakarítást eredményez a hagyományos eljárásokhoz képest és a cement minőségét is javítja. 1986-ban indítottak egy projektet, ami olyan fejlesztést jelentett, hogy a klinkerégetési

folyamatot fluid rendszerű kemencében valósítják meg. Először 20 tonna /nap kapacitású félüzemi berendezést hoztak létre, majd 200 tonna /nap léptékűt építettek fel. Ennek a kísérleti üzemnek a folyamatábráját tüntették fel a 170. ábra. A rendszer elemei: szuszpenziós előmelegítő, tölcséres granuláló kemence, fluid ágyas égető kemence, fluid kvecs hűtő, töltött ágyas hűtő. A szuszpenziós előmelegítő 4 lépcsős ciklonos berendezés, ami előmelegíti és kalcinálja a nyersanyagot. A granuláló kemencében 1,5-2,5 mm-es szemcséket állítanak elő 1300°C-on. Az égető, zsugorító kemencében 1400°C-on teszik teljessé a folyamatot. A fluid rendszerű kvencs hűtő a klinkert gyorsan lehűti 1400°C-ról 1000°C-ra, végül a töltött ágyas hűtőben 100°C-ra hűtik. A kapott klinker minősége azonos vagy jobb, mint a hagyományos eljárással előállítotté, a NO<sub>x</sub> emisszió 115-190 mg/m<sup>3</sup> nehéz fűtőolaj használatánál, 440-515 mg/m<sup>3</sup> porszén használatánál. A számítások szerint egy 3000 tonna/nap kapacitású üzemben a hőfelhasználás mintegy 10-12%-al csökkenthető a hagyományos szuszpenziós előmelegítő, rostélyos hűtős forgó kemencés üzeméhez képest, ami egyben a CO<sub>2</sub> emisszió ugyanilyen arányú csökkentési lehetőségét teremti meg. Az új fejlesztés lehetővé teszi az emisszió csökkentés mellett az építési költségek és az elfoglalt terület mintegy 30%-os csökkentését is.



168. ábra. Cementgyártás folyamata



169. ábra. Cement szilárdulási folyamata.

a) porozitás; b) kalcium szilikát hidrat, hosszú szálak; c) kalcium szilikát hidrat, rövid szálak; d) kalcium hidroxid; e) kalcium aluminát hidrat, vas(III)oxid tartalommal; f) onoszulfát; g) triszulfát





## Égetett mész előállítása

Az égetett meszet többféle célra használják, az acél gyártásban salakosító adaléknak, az építőiparban kötőanyagként, vízkezeléshez, talajjavításhoz, Ca-karbid előállításához, ipari kibocsátások savas komponenseinek semlegesítésére, mint például füstgázok SO<sub>2</sub> tartalmának megkötésére. Az EU-ban évente kb. 20 millió tonnát állítanak elő, ami a világtermelés 15%-a.

Az égetett mész előállítása kalcium és/vagy magnézium karbonátok hevítésével történik, amikor széndioxid távozik és a fénoxid marad vissza.



$$\Delta H = + 3010 \text{ kJ/kg } 900^\circ\text{C-on}$$

A fenti reakció egyensúlyi, a CO<sub>2</sub> parciális nyomása a karbonát felett 800-900°C között nő jelentősen, nem véletlen, hogy a mészégetést ilyen hőmérsékleten végzik.

A mészégető kemencéből kijövő meszet törlik, őrlik, szemcseméret szerint elválasztják, mielőtt a tároló silókba vinnék. A forgalomba hozatal történhet égetett mészként, vagy vízzel való keverés és reakció után oltott mészként, kémiai nevén méshidrátként.

A mész kifejezés magában foglalja mind az égetett, mind az oltott meszet, az előbbi CaO, az utóbbi Ca(OH)<sub>2</sub>, ami forgalomba kerülhet por alakban, csak a kémiailag kötött vizet tartalmazva, vagy vizes szuszpenzió formájában, ami nem szilárd anyag, hanem víztartalmától függően kocsonyás vagy folyós fehér pép.

A mészkő felhasználás 1,4-2,2 tonna közötti 1 tonna égetett mész előállításához, ez függ a mészkő tisztaságától, a kiégetés mértékétől, a hulladékok mennyiségétől. A mészégetés a cementgyártáshoz hasonlóan nagyon energiaintenzív tevékenység, a teljes költségek kb. 50%-a energia költség. Tüzelőanyagként használnak földgázt, szenet, kokszot, lignitet, petrokokszot, olajat.

1995-ben az EU-ban 240 mészégető működött 450 kemencével, ezek nagy része aknás kemence vagy párhuzamos áramlású regeneratív aknás kemence, kapacitás tekintetében méretük 50-500 tonna /nap.

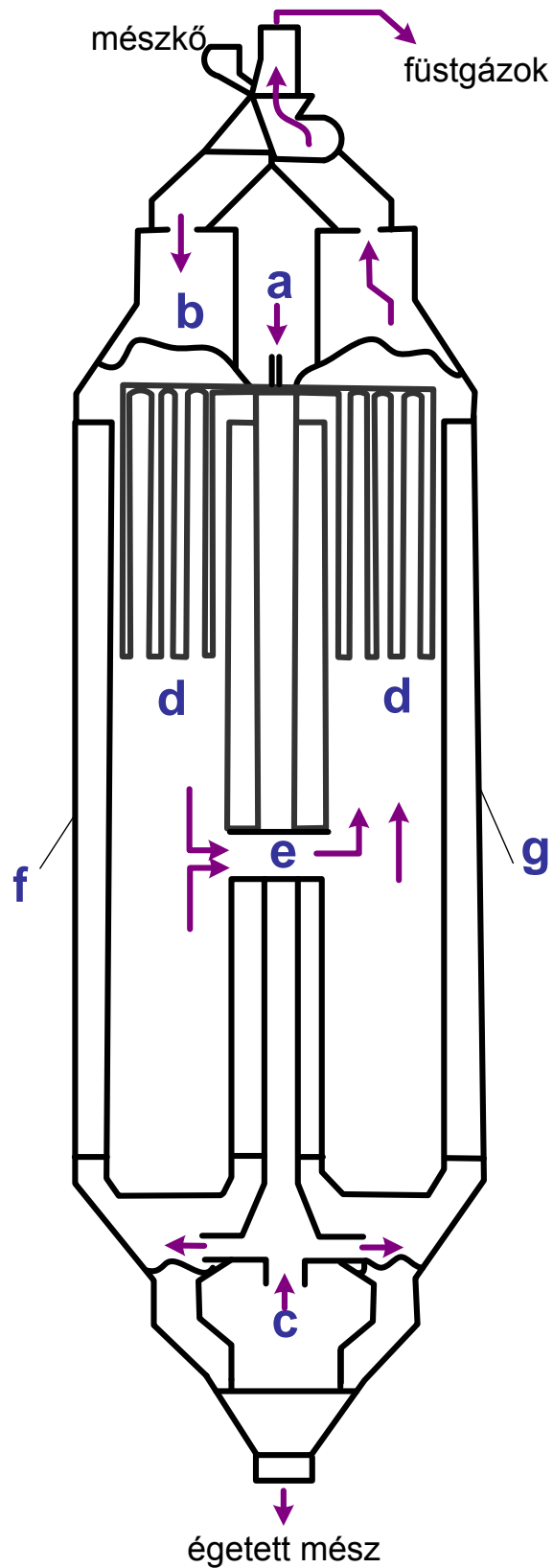
### A mészégetés környezeti hatásai

A mész előállítás környezeti hatásai a légszennyezés és az energia használat, fő forrás a mész égetése, a mész oltása és az őrlés másodlagos jelentőségű.

A főbb emissziók a por, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> és CO. A por eltávolítására szövet szűrőket, elektrosztatikus porleválasztókat és nedves mosókat használnak, hasonlóan az erőművi tüzelőberendezésekhez. Az elmenő füstgázok portartalmát 50 mg/m<sup>3</sup> értékre célszerű csökkenteni ezekkel a módszerekkel.

A NO<sub>x</sub> és a SO<sub>2</sub> emisszió csökkentésére nem találhatóak utalások a mészégető technológiákkal kapcsolatosan, ennek oka az lehet, hogy a bázikus CaO jó részben megköti a savas karakterű kén és nitrogén oxidokat





171. ábra. Párhuzamos áramlású regeneratív kemence.

a) tüzelőanyag; b) égést tápláló levegő; c) hűtőlevegő; d) lándzsák; e) keresztjárat; f) akna1; g) akna2

## Kerámiaipar

A „keramos” szó görög eredetű, égetett földet jelent. Jellemzően, de nem kizárólagosan a kerámia termék fénoxid, borid, karbid, nitrid, vagy ezek vegyülete. Lehet mázas vagy mázatlan, kristályos, részben kristályos vagy üveges szerkezetű, általában szervesetlen, nemfémes anyagokból készül, olvasztott anyagból, ami lehűtésre szilárdul, formálása és elkészítése egyszeri vagy egymás utáni hőkezeléssel történik.

38. táblázat. Kerámia termékek osztályozása

Pórusos	szövetű	gyártmányok	Tömör	szövetű	gyártmányok
Az anyag sárga v. vörös	Az anyag sárga v. vörös	Az anyag fehér	Az anyag nem fehér	Az anyag nem fehér	Az anyag fehér
Máz nélkül	Mázzal	Átlátszó vagy színes máz	Máz nélkül	Mázzal bevonva	
Tégla, cserép Tűzálló építőanyag	Kályha-csempe, majolika	Kőedény-fajansz	Klinker, keramit, saválló burkoló	Kőagyag csatornák	Porcelán

A kerámiák az emberiség legrégebben ismert használati tárgyai közé tartoznak, tudjuk, hogy már mintegy 10000 évvel ezelőtt is készítettek kerámia tárgyakat. A készítmény technológia természetesen sokat fejlődött, de az alapok ugyanazok. A kerámiák az utóbbi 50 évben bevonultak a „high-tech” iparágakba, mint amilyen az elektronika, számítógépek, optikai kommunikációs eszközök, megmunkáló szerszámok, fémbevonatok, nagy igénybevételnek kitett alkatrészek, űrtechnika, nagy hőmérsékletű reaktorok, motor részek, orvosi implantátumok, stb.

A kerámiák mind alapanyagaikat, mind elkészítésüket tekintve sokfélék, ennek a jegyzetnek a terjedelme nem teszi lehetővé a részletes kifejtést. Az alapvető csoportosítás Ullmann szerint.

39. táblázat. Kerámiák csoportosítása alapanyag és felhasználás szerint

Tradicionális kerámiák	Korszerű kerámiák
Agyagtárgyak	Elektromos szigetelők
Fazekas termékek	Mágneses ferritek
Fehér termékek	Optikai, lámpák
Agyag, földpát és kvarc alapú kőedény	Kémiai célú edények, eszközök
üvegkerámia	Hőálló alkatrészek
háztartási porcelán	Mechanikai, vágó, megmunkáló szerszámok
ipari porcelán	Biológiai, implantátumok
műszaki kerámiák	Nukleáris üzemanyag pasztillák

Leggyakoribb kerámia termékek:

Fali és padlócsempék  
Tégla és cserép  
Háztartási asztali és főzőedények  
Hőálló termékek  
Higiéniai termékek  
Technikai kerámiák  
Mázás kőagyag csövek  
Nagyméretű agyag termékek  
Szervetlen bevonatok.

A hagyományos kerámiagyártás alapanyagai a következők:

- **Agyag** aluminoszilikát, vízzel összegyúrva képlékeny, száradáskor és kiégetéskor alakját megtartja.
- **Kaolin**, aluminoszilikát ez is, **Montmorillonit**
- **SiO<sub>2</sub>** kvarchomok, homokkő
- **Földpát** kálium-aluminoszilikát, tömörre teszi a kerámiát
- **Mész, márga, magnezit, dolomit, kalcium és magnéziumkarbonátok**, a porozitást növelik.

A kerámiák felületére adott esetben mázat visznek fel, aminek gyakorlati és esztétikai szerepe is lehet. A mázak sima, egyenletes felületet adnak, ami lehet matt vagy fényes, szerkezetüket tekintve az üvegre emlékeztetnek, de olvadt állapotban nagyobb viszkozitásúak. Erősen tapadnak a kerámia alaphoz. A mázok prekursorait alkotórészeikből és vízből golyós malomban végzett őrléssel állítják elő, ekkor tejszerű homogén szuszpenziót kapnak, amit fel kell vinni a részlegesen kiégetett kerámia tárgyak felületére. A máz szuszpenziókat a kerámiákra bemerítéssel vagy szórással viszik fel. Kiégetésük 600-1500°C között történhet, függően a készülő tárgy funkciójától és elvárt tulajdonságaitól. A mázokkal a felületet ellenállóvá tehetjük korrózió-folyadékokkal szemben, kialakíthatók félvezető mázak is. A mázak alkotó anyagai: SiO<sub>2</sub>, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZnO, PbO, PbO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O, CaO, MgO, BaO, SrO, K<sub>2</sub>O, Rb<sub>2</sub>O, Cs<sub>2</sub>O, Li<sub>2</sub>O.

A kerámia tárgyak készítésének lépései:

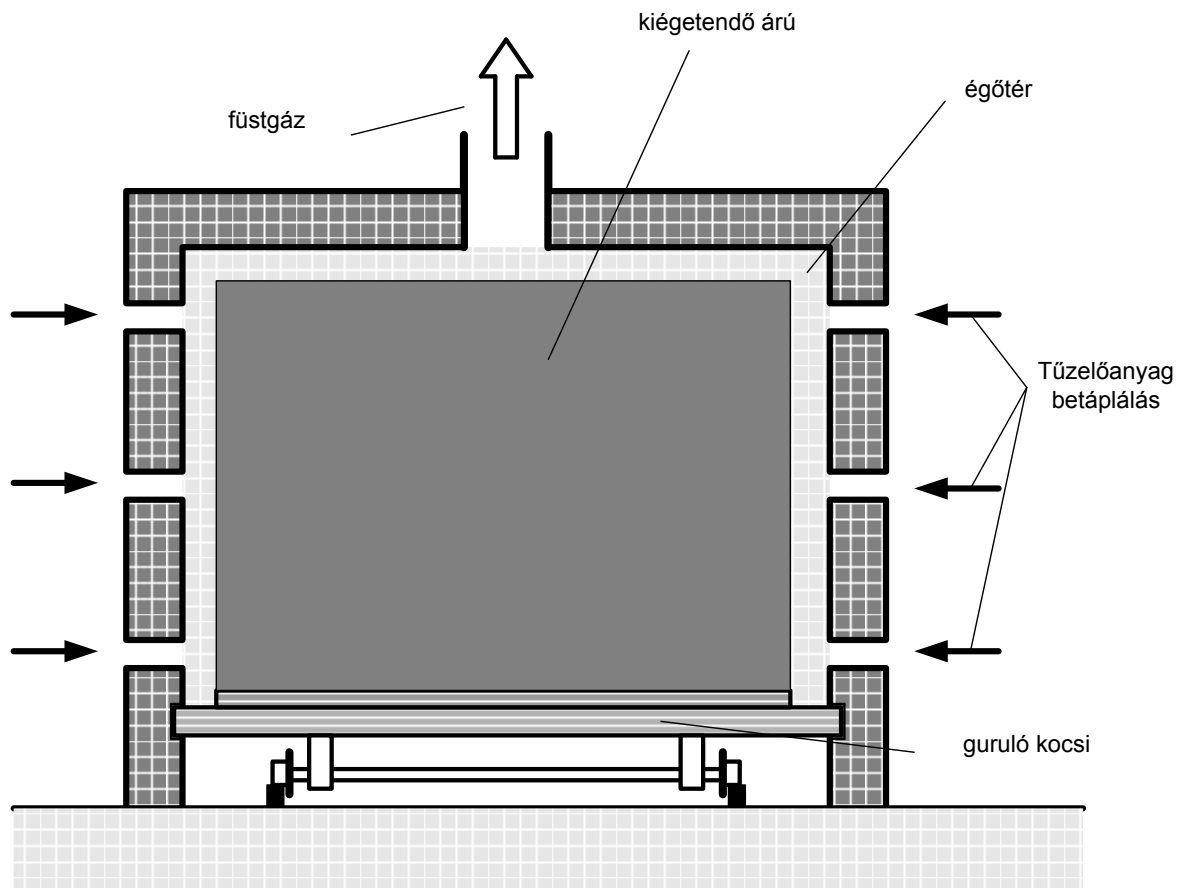
#### **Alapanyagok bányászata és előkészítése**

**Aprítás** őrlés szemcseméret csökkentése, homogenizálás  
**Formázás** nedves és száraz sajtolás, korongozás  
**Szárítás** természetes, mesterséges, hőigényes, közben zsugorodás  
**Égetés** kémiai és fizikai folyamatok, fontos paraméterek: felfűtés sebessége, égetés hőmérséklete, ideje, lehűtés módja,

Az égető kemencék lehetnek szakaszos és folytonos működésűek, gáz, olaj, fa tüzeléssel vagy elektromos fűtéssel.

Égetési hőmérsékletek	tégla	920-1000°C
	kőedény	1100-1250°C
	kőagyag, kerámit	1200-1350°C
	porcelán	1250-1450°C
	tűzálló anyagok	1300-1700°C

### Kemence mozgó kocsival

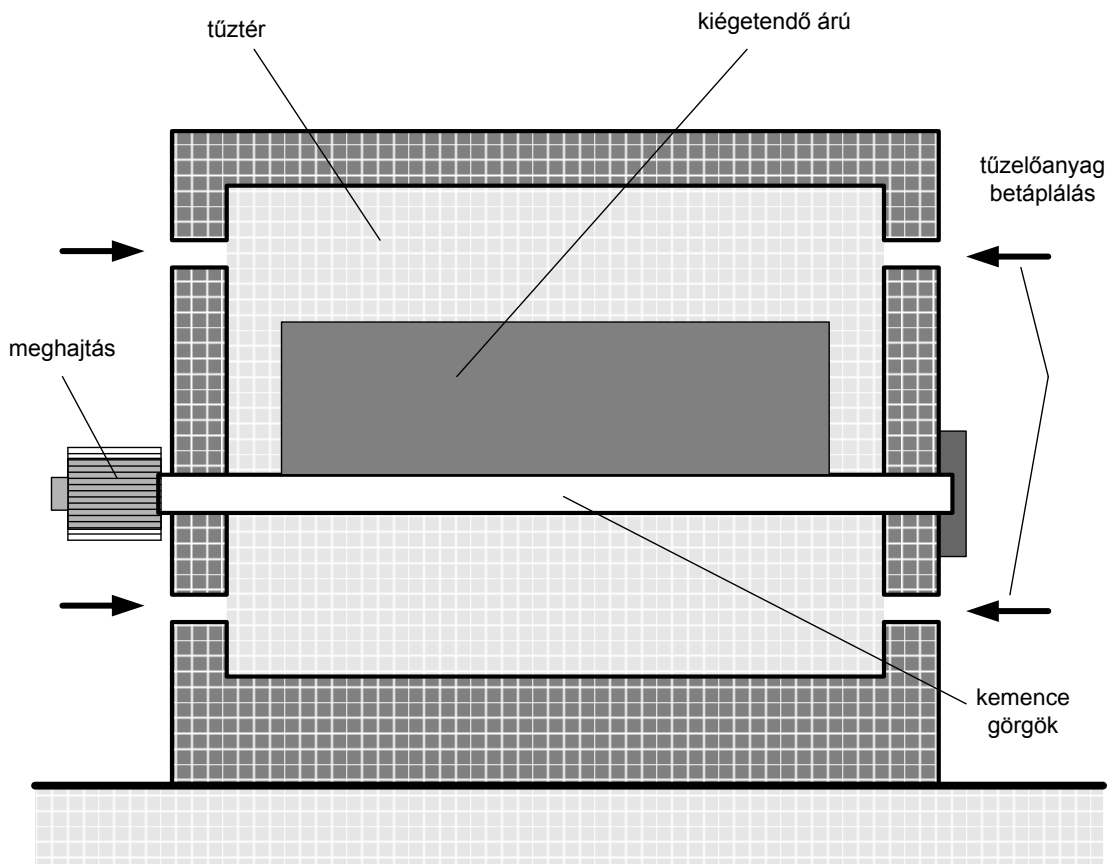


172. ábra. Égető kemence mozgatható kocsival

Az égető kemencék különböző típusúak, az égetendő áru az egyik csoport esetében egy helyben van, a körülötte lévő tér hőmérséklete változik a szükséglet szerint (szárítás, kalcinálás, égetés, lehűtés), ezek a szakaszosan fűtött kemencék. A másik csoport esetében az égetendő áru mozog a különböző hőmérsékletű kemence zónákon végig, ilyen az alagút kemence, ezek a folyamatosan fűtött kemencék.

A kemence légtérének összetétele lényeges hatással van a kerámiák tulajdonságára. Például a nagyobb oxigén tartalom elősegíti a szén kiégését a kerámiából, a sókat oxidokká alakíthatja. Kis oxigén tartalomnál a fémek kisebb oxidációs fokú formában vannak jelen a redukáló hatás miatt, ez szín és állag változásokat okozhat. A kéntartalmú tüzelőanyagok elégetésénél sok esetben óvni kell a kerámiákat, a mázokat a  $\text{SO}_2$  hatásától. Az elektromos fűtésű kemencékben nincs szennyeződési lehetőség, ezért is használják speciális kerámiák előállítására.

Gögetős égető kemence keresztmetszete



173. ábra. Görgős égető kemence

### A kerámia gyártás környezeti hatásai

A speciális eljárások miatt a kerámia gyártás emisszióval jár a levegőbe, vízbe és a talajba egyaránt. A környezeti hatásokhoz tartozhat még a kellemetlen szag és a zaj is. Megemlítendő ezen a helyen a nyersanyagok bányászatával a tájban okozott kár is. Az emisszió függ a felhasznált nyersanyagoktól és tüzelőanyagoktól és az alkalmazott előállítási eljárásoktól. A levegőbe történő emisszió lehet por, korom, gáznemű anyagok (CO<sub>2</sub>, CO, kén és nitrogén oxidok, fluór és klór vegyületek, nehézfémek). A por kibocsátás előfordul a nyersanyagok előkészítésénél, a mozzgatásnál, őrlésnél. A szennyvizekbe a gyártás során kerülnek be szennyező anyagok, ásványi eredetűek, szerves és szerves anyagok, nehézfémek. Hulladékként jelentkezhetnek a kerámia tárgyak formázása során képződő plasztikus anyagrészek, hibás darabok, összetört termékek, hamu, por, csomagolási hulladékok. A kerámia gyártás sok energiát használ, ezért a tüzelés során keletkező szennyező anyagok itt is megjelennek.

A környezeti hatások csökkentésére a következő megoldásokat alkalmazzák:

Az energia felhasználás csökkentésére a szárítók és kemencék javítása a megoldás, a hulladék hő hasznosítása, kapcsolódás erőművi energiatermeléshez, kis szennyező anyag tartalmú tüzelőanyagok használata. A por kibocsátás mérséklésére a por keletkezésével járó műveletek kiiktatása vagy zárt térben, elszívás mellett történő

végzése, a nagymennyiségű anyag tárolására szolgáló területek megfigyelése, takarás, szűrőrendszerek felszerelése.

A gáznemű kibocsátások csökkentésére használhatók mindazok a módszerek, amelyeket a tüzelő berendezéseknél ismertettünk. Hasonlóképpen ugyanez mondható el a szennyvizekre is. A szilárd hulladékok képződését a kerámia tárgyak formázásánál keletkező leeső hulladék visszaforgatásával, a selejt képződés csökkentésével lehet visszaszorítani.

A kerámia iparban folyó fejlesztések közül hármat említünk ezen a helyen.

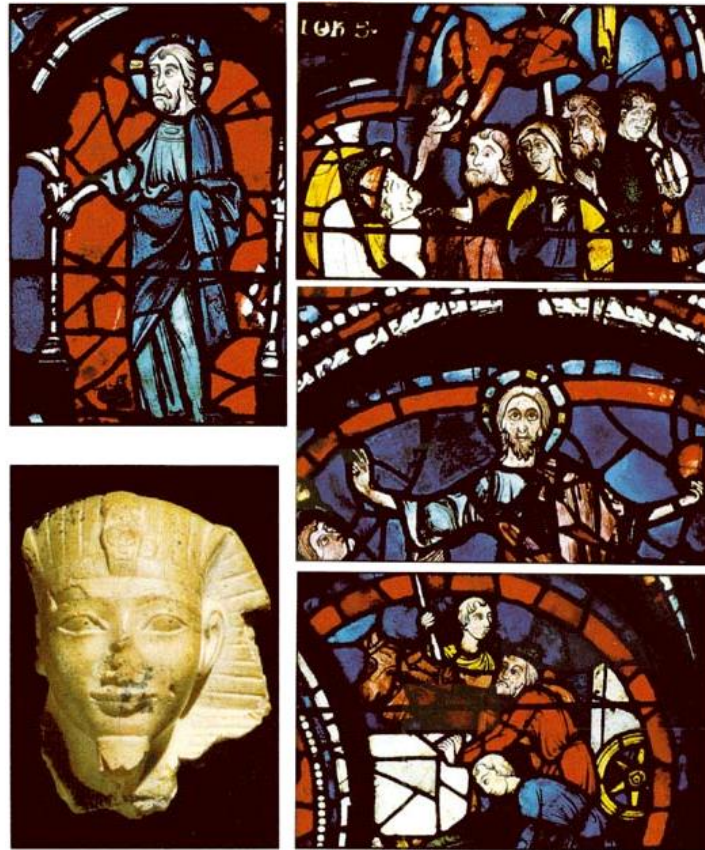
A kemence gázterében lévő vízpára erősen befolyásolja a fluorid és a kénoxid kibocsátást. A radiációs csöves fűtés alkalmazásával kiküszöbölhető a kemence gázterének víztartalma. Ennél a megoldásnál a tüzelőanyag elégetése nagy hőállóságú szilíciumkarbid csövekben történik, ezek sugárzó hőjével hevítik a kemence terében lévő kiégetendő anyagot. Ezt a technikát a kisebb volumenű gyártásoknál alkalmazhatják.

Kísérleti stádiumban van a mikrohullámú hőközlés alkalmazása a hagyományos fűtéssel kombinációban. Ezzel lehetségesnek látszik a hőhatásra a termékben keletkező feszültség csökkentése mellett a nagyobb teljesítőképesség és energiahasznosítási hatások.

Nagyméretű, hőálló kerámia tárgyak gyártásánál problematikus művelet a darab szárítása, ezért acél vagy szén fűtőszálakat helyeznek el bennük, amivel a szárítási folyamat gyorsítható és egyenletessé tehető, egyben javul a termék minősége is.

Végül a nyersanyagok bányászatával okozott környezeti hatásokról. A régebbi időkben a fazekas, vagy a vályogvetők megkeresték a falu határában az agyagot és ahonnan kitermelték, ott keletkezett a kacsausztató. Az iparszerű kerámiaigyártás sokkal nagyobb bányák megnyitását igényelte, amelyek idővel jelentős „sebeket” ütöttek a tájba. Ez érvényes az építőanyagipar (cement és mész) más ágazataira is. Manapság egyre többet foglalkoznak ezeknek a bányáknak a rekultivációjával, különösen akkor fontos ez, ha már befejezték a művelést. Társadalmi érdek, hogy ezeket a tájsebeket begyógyítsák és visszadják területüket az erdőknek, vagy a mezőgazdasági művelésnek.

## Üvegipar



174. ábra. Fáraó fej üvegbe öntve és a Charles katedrális üveglakai

Az olvadt anyagok egy része nem kristályosodik ki, ha a termodinamikai olvadáspontja alá hűtötték. Az ilyen olvadékok a túlhűtéssel megszilárdulnak térfogatuk vagy entrópiájuk megváltozása nélkül. Ezeket a szilárd anyagokat nevezzük üvegeknek, amelyek egyébként tulajdonságaikban izotrópok. A legtöbb szervesetlen üvegek képző rendszer a következő elemek kovalens vegyületeiből áll: Si, B, Ge, Sn, Pb, P, As, Sb, O, S, Se, Te.

Morey a következő definíciót adta az üvegre: „Az üveg szervesetlen anyag, állapota szerint, ami analóg a folyadékállapottal, a folyadékállapotból folyamatosan jön létre. A hűtés közben a viszkozitása olyan mértékben megnő, hogy gyakorlati szempontból merev lesz. Ezért mondhatjuk, hogy az üveg olyan anyag, aminek energiataralma a folyadék és kristályos állapot között van. Az üveg közelítő összetétele:  $R_2O \cdot R'O \cdot 6SiO_2$ , ahol R és R' lehet Ca, Mg, Al, B, Na, K, Fe, Pb, Mn. Az előállításához használt legfontosabb nyersanyagok a kvarchomok, szóda, mészkőliszt, ólomoxid, bórsav, dolomit, timföld. Részletesebb felsorolás a 40. táblázat látható.

A fluor tartalmú anyagok (pl.  $CaF_2$ ) bizonyos termékeket opálössé tesznek, ezt azzal érik el, hogy kristályok képződnek az üvegben. A fluórt használják az üvegszál gyártásnál is, mert optimálissá teszi a felületi feszültséget és a folyási tulajdonságokat, minimálisra csökkenti a tördelődést.

Az üvegyártás növekvő fontosságú nyersanyaga az üvegtörmelék, ami lehet üzemen belülről vagy kívülről származó is. Bár látszólag minden eljárásban visszaforgatható az üveghulladék, a nemesebb termékeknél ezt nem teszik a minőség megőrzése érdekében. A palackgyártásban néha az üveghulladék aránya eléri a 80%-ot is. Ez

előnyös, mert kevesebb energiát igényel, minden 1 tonna üveghulladék kb. 1,2 tonna nyersanyagot vált ki.

Üveggyártás folyamatai a következők: keverés, olvasztás, formálás, hűtés, megmunkálás, hőkezelés-feszültségmentesítés. Ezen belül a formálás részlépései: fúvás, húzás, öntés, hengerlés, sajtolás.

Az üveg termékek jó részénél szükség van a színezésre, erre különböző fémvegyületeket használnak, a *41. táblázat* ezeket tüntették fel.

Az üveggyári kemencéket nagy mennyiségű üveg olvasztására tervezik, működési idejük legalább 12 év, napi kapacitásuk 20-600 tonna közt van. Az üveget tartalmazó kemence hőálló téglákkal bélelt „doboz”, boltozatos vagy körívű menyezettel. A tűzálló téglákat acél szerkezet fogja közre. Többféle kemence konstrukciót használnak, ezek a tüzelés és a levegő előmelegítés módjában különböznek egymástól. A *175. ábra* lévő kemencében két kamra sor felváltva működik a levegő előmelegítésére, amíg az egyikben az égést tápláló levegőt melegítik elő, addig a másikon vezetik keresztül a forró füstgázokat.

A legnagyobb mennyiségben előállított üveg termék a palack. A *42. táblázat* tüntették fel a palacküveg jellemző összetételét.

A palack készítés folyamata két változatban működik, préssel és fúvással. Az automatikus palack készítő eljárások lépései:

- 1) megfelelő súlyú és hőmérsékletű üvegcsépp képzése,
- 2) az elsődleges alak kialakítása dugattyús préssel vagy komprimált levegővel,
- 3) az elsődleges alak átvitele a végső formába,
- 4) a palack fúvása levegővel a végső alakra,
- 5) a termék eltávolítása a formából.

Egy kemence általában több, például 4 párhuzamos fúvósorot táplál, pontosan adagolt üveg „cseppekkel”.

A másik nagy termékcsoport a síküvegek, összetételük megegyezik a palacküvegével. A legismertebb technológia szerint az olvasztókádból jövő üveglvadékat folyékony ónnal telt kádba vezetik, az ónra az üveg olvadék felúszik, szétterül és hűlni kezd. Az ón oxidációjának megakadályozására ez zárt berendezés, inert gázt vagy hidrogént vezetnek bele. Az ónnal telt kádból a megfelelő vastagságú üveg görgőorra jut, ahol tovább hűtik, majd megfelelő nagyságú táblákra vágják.

A korszerű, nagy szilárdságú üvegeket edzik és általában több rétegből ragasztják össze, ílymódon készülnek a gépkocsi szélvédő üvegek és a biztonsági üvegek is.

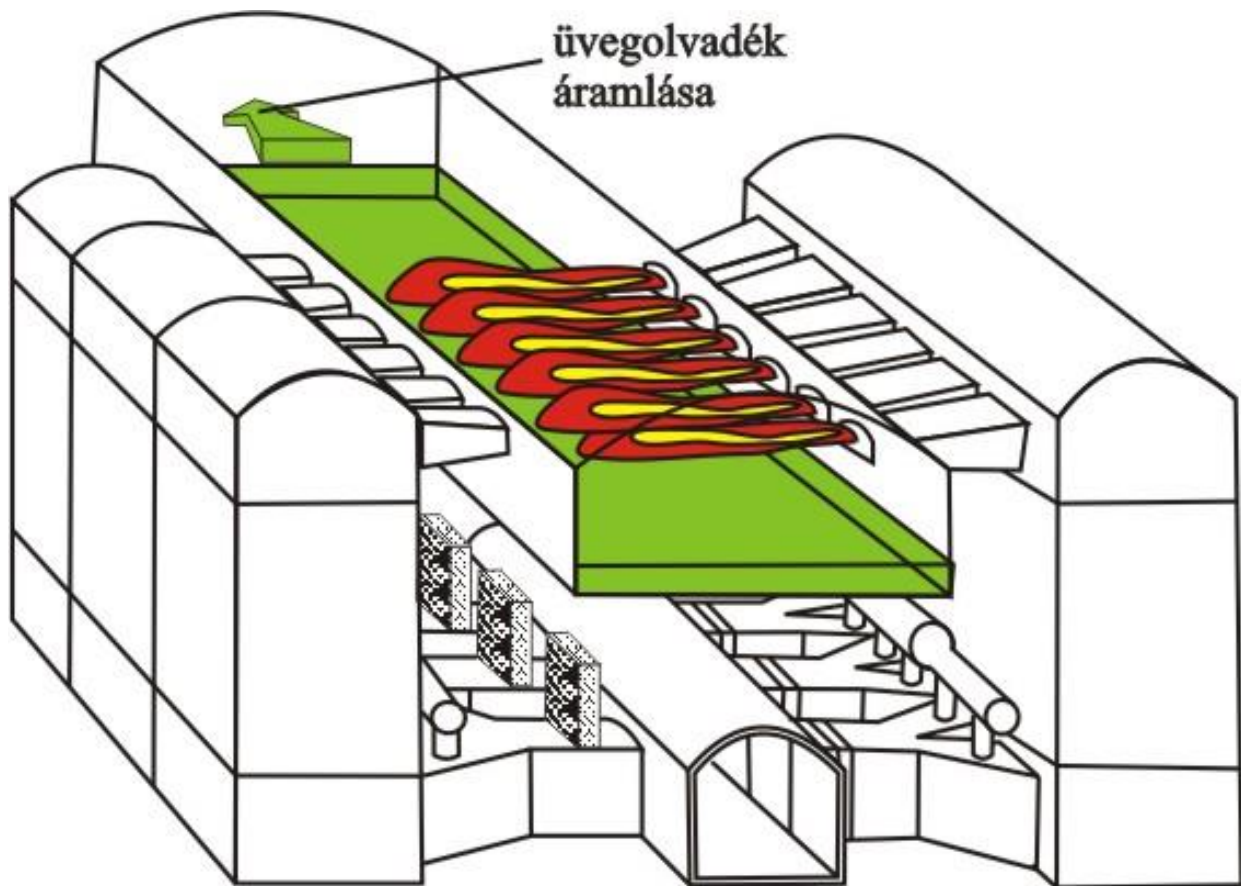


**40. táblázat. Az üvegyártás nyersanyagai**

Nyersanyag	Kémiai összetétel	Üvegtévképző oxid	Oxid, tö %
Homok	SiO <sub>2</sub> <sup>β</sup>	SiO <sub>2</sub>	99.8
Szóda	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	58.5
Trona	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> · NaHCO <sub>3</sub> · 2 H <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	41.9
Mészke	CaCO <sub>3</sub>	CaO	56.0
Dolomit	CaCO <sub>3</sub> · MgCO <sub>3</sub>	CaO	30.5
		MgO	21.5
Földpát	(K,Na) <sub>2</sub> O · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 6 SiO <sub>2</sub> <sup>β</sup>	SiO <sub>2</sub>	68.0
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.5
		(K,Na) <sub>2</sub> O	12.8
Nephelin	NaAlSiO <sub>4</sub> <sup>β</sup>	SiO <sub>2</sub>	60.6
Syenit		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23.3
		(K,Na) <sub>2</sub> O	14.8
Petalit	LiAlSi <sub>4</sub> O <sub>10</sub>	Li <sub>2</sub> O	4.9
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.7
		SiO <sub>2</sub>	78.4
Borax	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> · 5 H <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	21.8
pentahidrát		B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	48.8
Bórsav	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	56.3
Colemanit	Ca <sub>2</sub> B <sub>6</sub> O <sub>11</sub> · 5 H <sub>2</sub> O	CaO	27.2
		B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	51.0
Ulexit	NaCaB <sub>5</sub> O <sub>9</sub> · 8 H <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	9.5
		CaO	17.2
		B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	53.7
Ólomoxid	PbO	PbO	99.9
Vizmentes kálicszóda	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	68.0
Káliumnitrát	KNO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	46.2
Kalciumfluorid	CaF <sub>2</sub>	CaO	69.9
Cinkoxid	ZnO	ZnO	100.0
Bárium karbonat	BaCO <sub>3</sub>	BaO	76.9
Stroncium karbonat	SrCO <sub>3</sub>	SrO	70.1
Nátriumantimonát	NaSbO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	16
		Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	75.6
Kohósalak	x SiO <sub>2</sub> · y CaO · z Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + sulfide		

**41. táblázat. Az üvegek színezésére használt fémvegyületek**

Elem	Ion	Szín
Réz	Cu <sup>2+</sup>	világoskék
Króm	Cr <sup>3+</sup>	zöld
	Cr <sup>6+</sup>	sárga
Mangán	Mn <sup>3+</sup>	ibolya
Vas	Fe <sup>3+</sup>	sárgás-barna
	Fe <sup>2+</sup>	kékes-zöld
Kobalt	Co <sup>2+</sup>	intenzív kék, borátüvegben rózsaszín
	Co <sup>3+</sup>	zöld
Nikkel	Ni <sup>2+</sup>	szürkés-barna, sárga, zöld, kék, ibolya az üvegtől függően
Vanádium	V <sup>3+</sup>	zöld szilikát üvegben, barna borátüvegben
Titán	Ti <sup>3+</sup>	ibolya redukáló körülmények között olvastva
Neodímium	Nd <sup>3+</sup>	vöröses ibolya
Szelén	Se <sup>0</sup>	rózsaszín
Prazeodímium	Pr <sup>3+</sup>	világos zöld



175. ábra. Regeneratív, kereszttüzelésű üvegolvasztó kemence.

42. táblázat. Palacküveg jellemző összetétele

Komponens	%
Szilíciumdioxid $\text{SiO}_2$	72,6
Nátriumoxid $\text{Na}_2\text{O}$	13,6
Kalciumoxid $\text{CaO}$	8,6
Magnéziumoxid $\text{MgO}$	4,1
Alumíniumoxid $\text{Al}_2\text{O}_3$	0,7
Káliumoxid $\text{K}_2\text{O}$	0,3
Kéntrioxid $\text{SO}_3$	0,17
színezők, szennyezések	nyomok

Az üvegyipar harmadik nagy termékcsaládja az üvegyapot, a szálak szerkezetű anyagok. Ezek jellemző összetételét tüntettük fel a 43. táblázat. Előállításuk szintén üvegolvadékból történik, oly módon, hogy az olvadékokat kis nyílásokon át centrifugális erővel kinyomják a levegővel hűtött térbe, ahol megszilárdul. Ezután a szálanyagot összepréselik és paplan formájában használják, elsősorban hőszigetelésre. Üvegszálakból készítenek szövetet is, amit szintén szigetelésre használnak, például elektromos fűtőszalagokban, lombikmelegítőekben. Ezekkel vált lehetővé a korábban

használt azbeszt kiváltása, amiről kiderült, hogy rákkeltő anyag és használatát betiltották épületekben, üzemekben, ahol szigetelésekben alkalmazták.

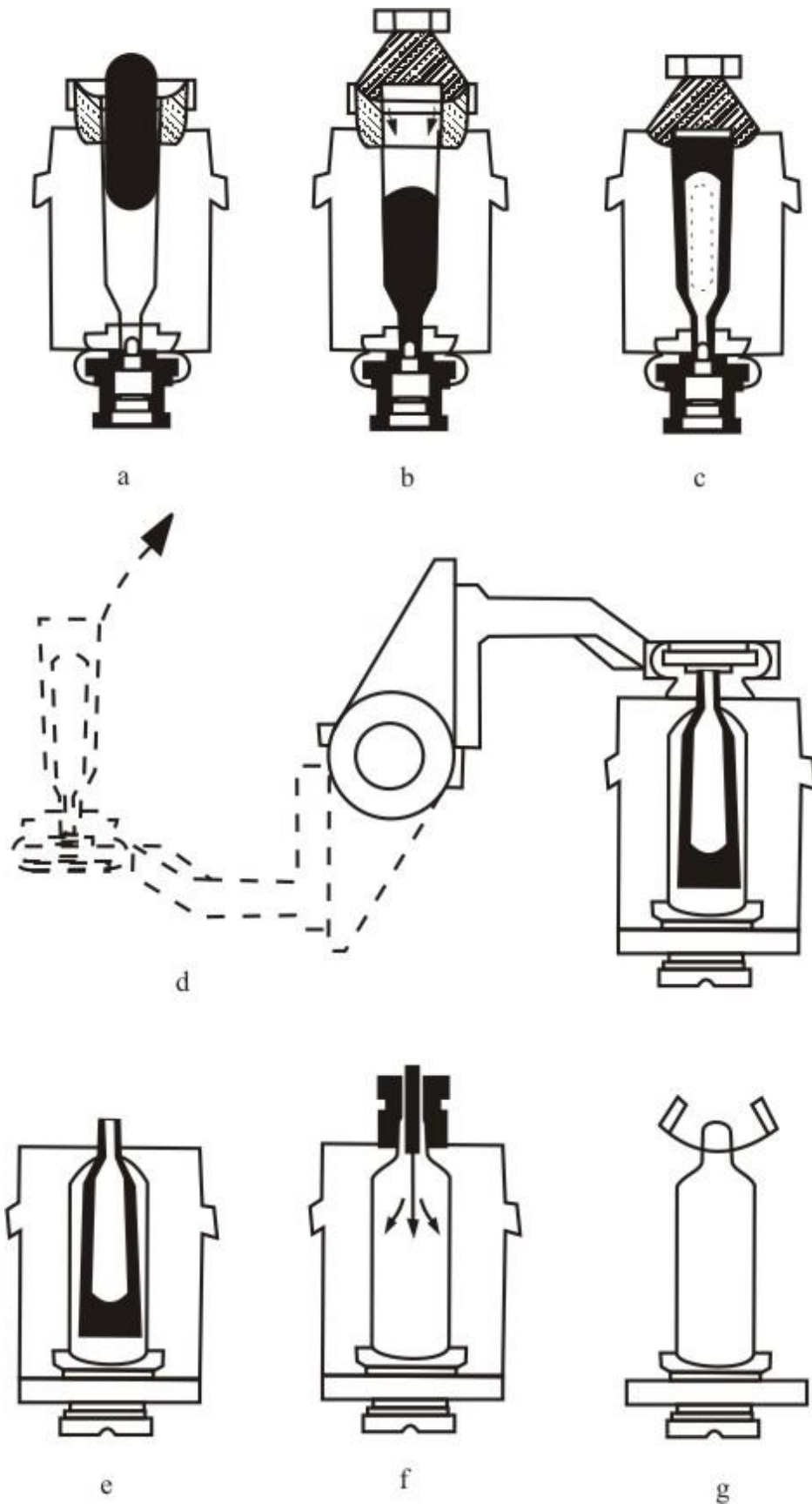
**43. táblázat. Üvegyapot jellemző összetétele**

Komponens	%
SiO <sub>2</sub>	53-60
Alkálifémoxidok	<2
Alkáliföldfémoxidok	20-24
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5-10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11-16
ZrO <sub>2</sub>	0
TiO <sub>2</sub>	0-3
F	0-2
Vasoxid	<1
Cinkoxid	0
szennyezések	<1

**Az üvegyártás környezeti hatásai**

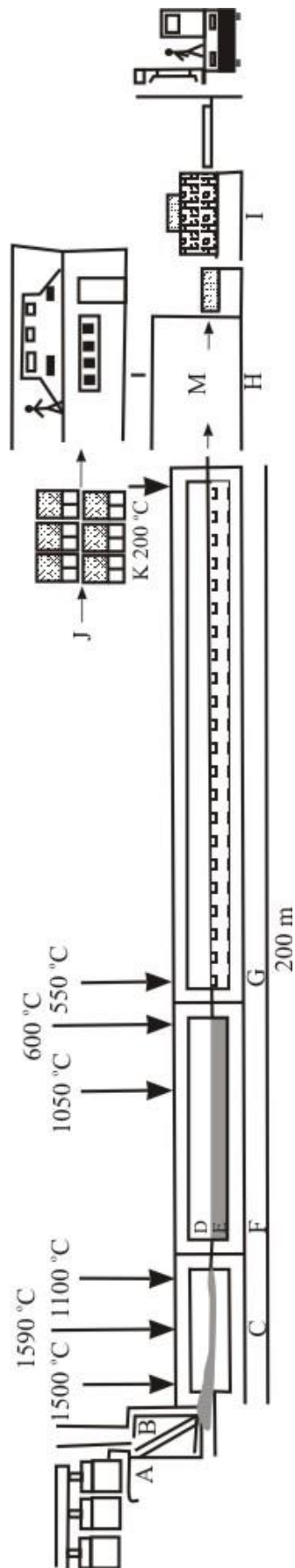
Az üvegyártás is azok közé az ágazatok közé tartozik, amelyek sok energiát használnak fel a termékeik előállítására, ezért kibocsátásaik elsősorban a tüzeléssel kapcsolatosak. Az üvegyárakban ugyanazokat az alapvető módszereket használják a füstgázok tisztítására, mint az erőművekben vagy más tüzelőberendezéseknél. Az üvegyártásnál lehetőség van a visszanyert por hasznosítására, mert többnyire bekeverhető a nyersanyagba. A statisztikai adatok azt mutatják, hogy egyre nő a visszaforgatott üveg mennyisége, ehhez arra van szükség, hogy megvalósuljon a szelektív gyűjtés. Ez szükséges azért, mert a vegyes kommunális hulladékból nem lehet az üveget kigyűjteni, másrészt a színes és a színtelen üvegek újbóli felhasználása is más-más termékekhez lehetséges.

Az újabb fejlesztések részben az energiafelhasználás csökkentésére irányulnak, ilyen az „oxy-fuel” tüzelés, ennél levegő helyett oxigént használnak, ami csökkenti a tüzelőanyag igényt. Születtek új megoldások a nyersanyag és az üvegtörmelék előmelegítésére. Megkísérlik a mérgező komponensek (Se, F) csökkentését, anélkül, hogy az energiaigények növekednének. Szintén energia megtakarító megoldás a szegmentált olvasztás, ahol a friss nyersanyagot és az üvegtörmeléket külön-külön olvasztják meg, az előbbit magasabb, az utóbbit mintegy 300°-al alacsonyabb hőmérsékleten. Jelenleg folyik a gyors olvasztásos megoldások fejlesztése, ahol a nyersanyagot beadják direkt a lángba, illetve elektromos ívvel olvasztják meg az anyagot.



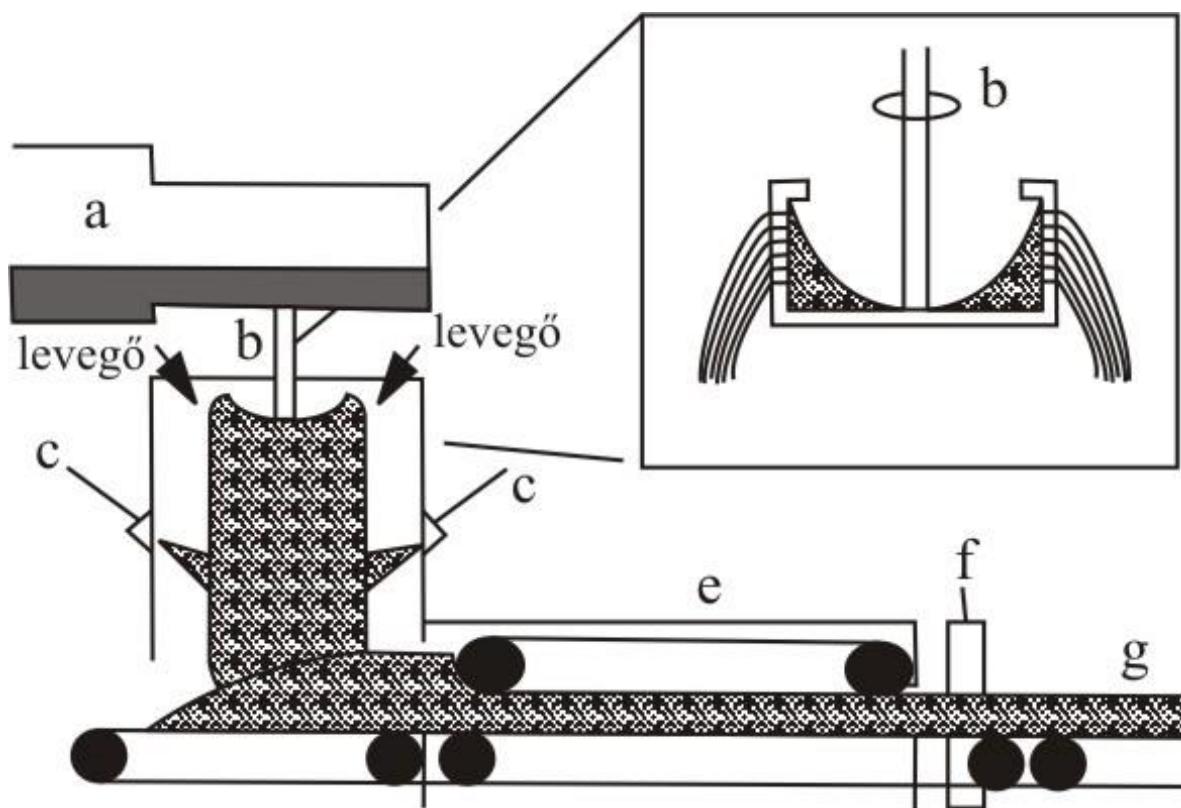
176. ábra. A palackfűvés folyamatának lépései.

a) Beadagolás, b) Lefújás, c) Ellenfújás,  
d) Átbillentés talpára, e) Újrahevítés, f) Végző fújás belső hűtéssel, g) Kivétel



177. ábra. Síküvegyártó berendezés vázlatja.

*A) nyersanyag keverék, B) üvegtörmelék, C) olvasztókemence, D) szabályozott gáztér, E) olvadt ón, F) lebegő fürdő, G) ürítő nyílás, H) irányító terem, I) automatikus rakodó, J) irányító, K) számítógép, L) ellenőrzés, M) vágást irányító komputer.*



178. ábra. Üveggyapot előállító berendezés vázlatja.

*a) Olvasztó tartály; b) Centrifuga fúvókákkal; c) Kötőanyag befújása; d) Üvegszövedék; e) Kötésképző kemence; f) Bárd; g) Termék*

## Papíripar

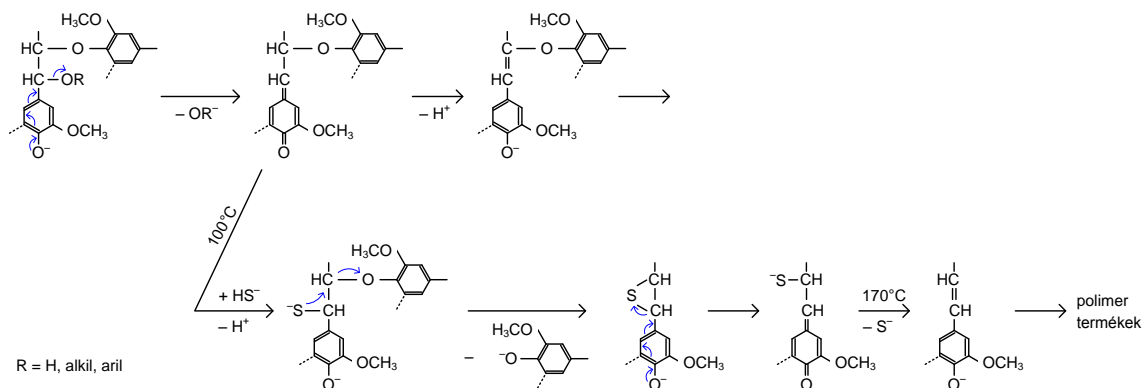
A papíripart a tágabb értelemben vett vegyipar ágazatai közé sorolják, bár üzemei többnyire teljesen függetlenek más vegyipari üzemektől elhelyezkedésük szempontjából. A papíripari technológiák ismertetése szintén meghaladja ennek a jegyzetnek a kereteit, ezért csak a legfontosabb eljárások főbb jellemzőit és a környezeti hatások csökkentésének módszereit ismertetjük röviden.

A fa és más lignocellulóz tartalmú növényi anyagok, mint a szalma, sokfél sejt típusból állnak, amikben a cellulóz, a hemicellulóz és a lignin, ami a szálak közötti és sejtfalban lévő kötőanyag, együtt fordulnak elő. A kémiai feltárás során a lignin és a hemicellulóz nagy része kioldódik, így a kötőerő megszűnik, a cellulóz szálak elválaszthatók, az így kapott nedves anyagot nevezzük papírpépnek. Mivel a lignint nem lehet teljesen eltávolítani a feltárás során, ezért a fehér papír előállítására fehérítést kell végezni.

A papír szálakból álló lap, ami a cellulóz mellett még számos egyéb vegyi anyagot tartalmaz, amelyek a minőségét befolyásolják. A papír előállításához a cellulóz szálak és a vegyi anyagok mellett még jelentős mennyiségű vízre és energiára van szükség, ez utóbbit gőz és elektromos energia formájában fogyasztja a papírgyártás. Ennek folytán a papírgyártás környezeti hatásai igen jelentősek, mivel a vizekbe és a

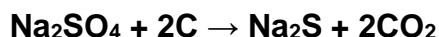
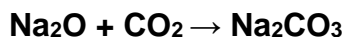
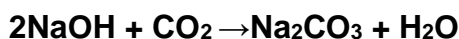
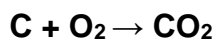
levegőbe egyaránt történik emisszió. Emellett hulladékok is keletkeznek, amelyek szintén komoly gondot okoznak. Ha mindezeket összevetjük és kiegészítjük azzal, hogy a papírhoz sok fa kivágására is szükség van, akkor elmondható, hogy a papírgyártás és fogyasztás az emberiség egyik legnagyobb környezetet érintő tevékenysége.

A papírpép előállítható nyers faaprítékból, de felhasználható a hulladékpapír is, ami jelentősen csökkentheti a környezeti hatásokat.



179. ábra. A lignin főbb reakciói pépesítés közben

A faapríték kezelésére az ún. kraft eljárást használják a legelterjedtebben, mert a legtöbb kiindulási anyaghoz jó, kiváló minőségű papírpépet szolgáltat. A feltárási folyadék NaOH-ot, és Na<sub>2</sub>S-ot tartalmaz, mint aktív reagenseket, de van benne Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> és Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> is mellékreakciókból. A kraft eljárás 165-175°C-on zajlik, 1-2 óra hosszan, függően az alapanyagtól és a hőmérséklettől. A feltárási eredménye a mosás és szűrés után kapott papírpép és az ún. fekete folyadék, ami tartalmazza a kioldott anyagokat. A feltáráshoz szükséges vegyszerek regenerálására és a szerves anyag hasznosítására és ártalmatlanítására ezt az oldatot betöményítik vákuumbepárlással, majd megfelelő kemencében elégetik. Ily módon energiát termelnek és visszanyerik a vegyi anyagokat. Az égetés során lejátszódó főbb reakciókat tüntettük fel a következőkben:



Az égető kemence alján összegyűlő salakot vagy hamut, ami szódát és szulfidot tartalmaz, vízben oldják, majd mésszel reagáltatva visszanyerik a lúgot. A kivált kalciumkarbonátot égetéssel szintén visszalakítják CaO-dá.



A kraft eljárásból kapott pépet visszamaradt lignin tartalma miatt fehéríteni kell, ez többnyire oxidációt jelent. Az eljárások felsorolva a következők: klórozás, lúgos extrakció, Na vagy Ca hipokloritos fehérítés, klórdioxidos fehérítés, oxigénes kezelés lúgos közegben, peroxidos kezelés, ózonos kezelés, ditionitos fehérítés.

## **Papírgyártás környezeti hatásai**

Mindezen folyamatok miatt a papírpép gyártás során nagy mennyiségű szennyvíz keletkezik, a KOI értéke 50 kg/tonna pép. A vízfogyasztás kb. 50 m<sup>3</sup>/tonna pép ilyen üzemekben. Az 50 kg oxigén igény mintegy fele származik a kraft eljárásból, másik fele pedig a fehérítésből.

A szennyvizet tisztító telepre kell vinni, ahol elsősorban biológiai eljárással lehet csökkenteni a szennyező anyagokat. A víz visszaforgatásával a kibocsátások töménysége általában nő, ezért a biológiai tisztítás is nehezebbé válik, ezért vizsgálták a kémiai oxidáció lehetőségét, amivel a KOI érték jelentősen csökkenthető.

A BAT, a legjobb elérhető technikák a kraft eljárásban:

a fa száraz kéregtelenítése, megnövelt ligninmentesítés, hatékony mosás, klórmentes fehérítés, lúgos víz recirkulációja, kifolyások csökkentése, kondenzátumok sztrippelése, fekete folyadék bepárlási kapacitás, hűtővizek recirkulációja, elegendő tárolókapacitás használt folyadékok tárolására, előzetes és biológiai szennyvízkezelés.

Kellemetlen szagú gázok összegyűjtése, SO<sub>2</sub> emisszió ellenőrzése, elégetésük kemencében, gázmosó használata. A szennyezett és kevésbé szennyezett vizek külön kezelése. A víz tisztítása ülepitéssel, szűréssel, folyamat-víz visszaforgatása, kiegyenlítő medence és primer kezelés bevezetése. Biológiai vízkezelés, a tisztított víz recirkulációja.



## Az energia fogalma, tulajdonságai

Dr. Barótfi István, SZIE

Az energia görög eredetű szó, és tevékenységet, munkát jelent. Az energia fogalmának hosszú ideig kellett várnia arra, hogy a misztifikálások, az isteni tulajdonságok lekopjanak róla, és a mai értelemben is helytálló általános megfogalmazás szülessék. Ez a megfogalmazás W. Thomsontól (Lord Kelvin) származik 1860-ból: „A meghatározott állapotú anyagi rendszer energiája azon hatások – mechanikai munkaegységben mért – összege, amelyek a rendszerből távoznak akkor, amikor az egy önkényesen választott null-állapotba megy át”.

A fizika tantárgy keretében az energia fogalmához általában azt jelenítik meg, hogy nem vész el csak átalakul. Ez sokunkban azt a félreértelmezést is kialakíthatja, hogy akkor a használatok nem kell különösebben törődni vele, hiszen nem fog elfogyani. Nos ez valójában így is van, csak nagyon nem mindegy, hogy milyen formában és hol van az energia. Nem mindegy, hogy a fűtéshez felhasznált tüzelőanyag melege a lakásban vagy a környezetben van, a benzint az autónk milyen mértékben használja a haladásra, a világítótest a villamosenergiából milyen mértékben ad fényt, stb. A környezetbe kerülő, a felhasználás során a rendszereinkből kikerülő energia a számunkra mégiscsak elvész, számunkra további hasznosításra alkalmatlanná válik. Ezért a mindennapok során az energia kérdését nem általában, hanem saját felhasználási rendszereink hasznosítása szempontjából értékeljük.

Mindenféle tevékenység energiát igényel. Az energia nem más, mint potenciális munka. Ezt fejezi ki az is, hogy az energia mérésére is a munka mértékegységét használják, vagyis a joule-t (J) vagy a teljesítmény és idő szorzataként a wattórát (Wh) illetve ezek többszöröseit. Energiagazdálkodással kapcsolatos vizsgálatoknál az olajjal való összehasonlítás is szokásos. Ilyenkor olajegyenérték (OE) mértékegységet is használnak.

Az energia fogalma különböző értelmezésének következménye, hogy a mindennapos gyakorlat az energia különböző megjelenési formáit másként határozza meg, és más-más mértékegységeket is használt. Így pl. a hőenergiánál a kalóriát, a fényenergiánál lumensecundumot, stb.

### Energia a természetben

Az energia legfontosabb tulajdonsága, hogy nem teremthető és nem semmisíthető meg, csupán megjelenési formái változtathatók. Elvileg nincs semmi akadálya annak, hogy az energiát egyik formájából a másik formájába alakítsák át, a gyakorlatban azonban az átalakítás sohasem megy végbe tökéletesen, így mindig veszteséggel kell számolni. Ez a veszteség legtöbbször a belső energia növelésében, azaz hő formájában jelenik meg.

Az ember a különböző tevékenységeihez energiát tehát csak úgy használhat fel, ha azt az energia valamilyen más formájából a célnak megfelelően átalakítja. A rendelkezésre álló készlet, amelyből meríthet: a környező világ energiatartalma. A legnagyobb forrás a Nap energiájának közvetlen felhasználása. A Nap sugárzási energiájának felhasználása azonban a költséges átalakítási, tárolási megoldások miatt mind ez ideig nem tudott általánosan elterjedni.

Az emberiség hosszú időn keresztül majdnem kizárólagosan és napjainkban is még a legnagyobb hányadban a napenergia közvetett felhasználásából fedezi energiaigényét. A napenergia közvetett felhasználása alatt azt kell érteni, hogy a nap

sugárzó energiáját elsőként a természet értékesíti és az ember ezeket a természeti jelenségeket, illetve kémiaiilag megkötött energiát alakítja át és hasznosítja.

Az energiafelhasználás szempontjából a különböző energia-formák közül a legnagyobb jelentősége (legszélesebb körben használt): a hőenergiának és a villamos energiának. A hőenergiát az előzőekben felsorolt források bármelyikéből át lehet alakítani, de a legáltalánosabb az anyagok kémiai energiájának felszabadítása révén elsődleges hő-, mechanikai- és villamos-energia átalakítása. Ez az iparban a technológiától függően a felhasználás helyén, vagy központilag hőerőművekben történhet.

A villamos energia a kedvező felhasználása és szállítási tulajdonságai miatt ma már a legelterjedtebb energiaforma. Előállítását más energiaformákból, általában ipari méretekben villamos erőművekben történik.

## Az energia megjelenési formái

Az energia fogalma a mindennapi ember számára talán nem minden jelenség mögött tűnik fel, annak ellenére, hogy a jelenségeket ismeri, következményeivel számol. A jelenségek maguk általában energiaátadási, átalakulási folyamatok, melyek során az energia egyik megjelenési formájából egy másikba alakul. Például a szél mozgásba hozza a víz felszínét, a Nap felmelegíti a sugárzott felületet, az esztergagép munka közben anyagot alakít, stb. jelenségek mind energiaátalakulási, hasznosítási folyamatok. Az átalakulások, hasznosítások során az energia különböző formában jelenik meg, melyek közül a legfontosabbokról néhány fontos gondolat.

A mindennapi felhasználás szempontjából az energia megjelenési formáit hat alapformára lehet felosztani:

- mechanikai energia,
- belső energia (köznapiban használatban hőenergia),
- fény energia,
- kémiai energia,
- villamos energia,
- nukleáris energia.

A mechanika energia a legismertebb energiaforma. A mechanikai energia nem más, mint a mozgó test energiája. Ez minden gép hajtóereje. A gőzgép vagy benzinmotor gyorsan mozgó dugattyúinak mechanikai energiája van. Munkát úgy végeznek, hogy forgatják a kerekeket. Gyakran igen egyszerű formában is találkozhatunk a mechanikai energiával, mint például amikor a kalapács erős ütéssel a szögre csapódik, mélyebbre kényszerítve ezzel a szöveget a fában, vagy valamely tárgy leesése, eldőlése, stb. mind mechanikai energia.

A fizikusok a mechanikai energiát két egymástól jól elkülöníthető formára osztják: a kinetikus és a potenciális energiára. Ha a tárgy valóban mozgásban van, akkor kinetikus energiáról van szó, ha a tárgyban mozgásra való képesség, azaz tárolt energia van, akkor potenciális energiáról van szó.

A potenciális energia forrása gyakran a nehézségi erő. Ez jelen van minden talajról felemelt testben. Amikor a felemelt tárgyat elengedik, a nehézségi erő lefelé húzza azt, és útközben munkát végez. A völgyzáró gát mögött tárolt víz így tulajdonképpen potenciális energiát halmoz fel. A gáton át vezető útja során a víz turbinákon áramlik keresztül és generátorokat forgat. Természetesen van nem nehézségi erőből származó potenciális energia is. Például az óra felhúzott rugója, az íj kifeszített húrja, a kihúzott gumiszalag ugyancsak potenciális energia.

A belső energiát nem teljesen pontos értelmezéssel hőnek is nevezik. Amikor a gőzgép dugattyúi forgatják a kerekeket, akkor ez a gőz azon belső energiájának hatására történik, amit az az égő szénrel megtöltött kazánban, hőhatás formájában kapott. Ugyanez a belső energia jön létre az autó motorjának hengereiben a benzin-levegő elegy felrobbanásakor is, és az így keletkezett forró gáz kitágulva mozgatja a dugattyúkat, illetve a gépkocsit.

A villamos energia az az energiafogalom mely a villamos áramokkal, mágneses jelenségekkel kapcsolatos. A villamos energia kedvező szállítási lehetőségei és átalakításának jó hatásfokú megoldásai révén az egyik leggyakoribb energiaformává vált.

Kémiai energia az üzemanyagokban, tápanyagokban kémiaiilag kötött energiaforma. Az üzemanyag elégetésekor ez az energia szabadul fel és érezzük hő formájában, illetve a táplálék elfogyasztása során ez az energia forma teszi lehetővé az ember számára a munkavégzést. A szén, a fa, az olaj vagy gáz kémiai energiája gépek hajtására képes, vagy lát el bennünket meleggel. Azokat az anyagokat, melyekben kémiai formában van jelen az energia, és így az anyag energiaforrásként energiát jelent energiahordozóknak nevezzük. Az energiahordozók közé tartozó anyagok egy részénél a kémiai energia átalakítása hőenergiává tüzeléssel történik. Ezeket az energiahordozókat tüzelőanyagoknak nevezik. Vannak olyan energiahordozók is melyeknél a kémiai energiát nem tüzeléssel hanem nukleáris reakciókkal alakítják át hővé. A tüzelőanyagok energiáját leegyszerűsítve fűtőértékkel szokták jellemezni.

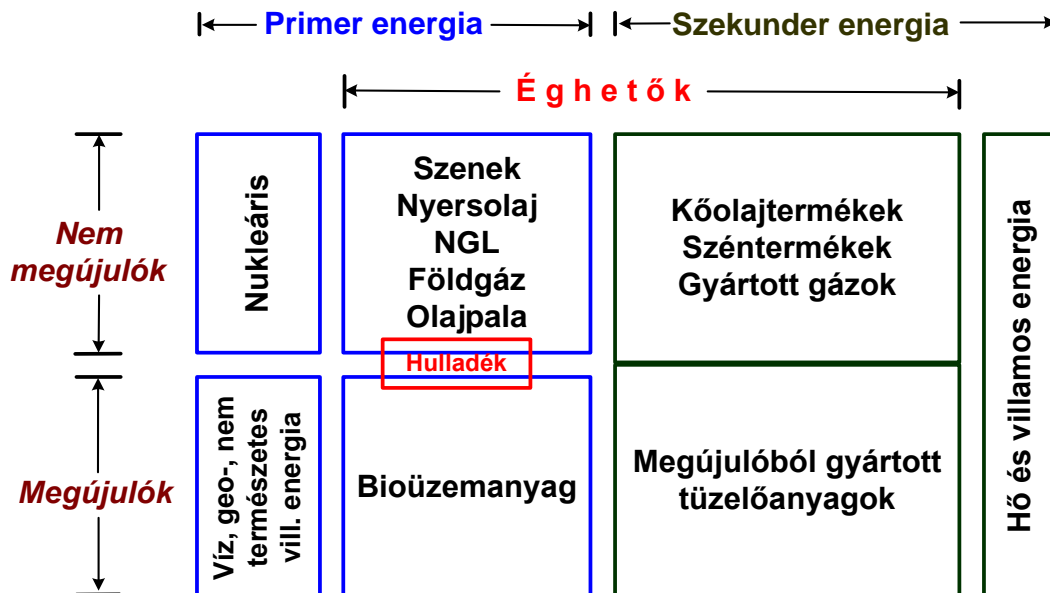
A fény energia az elektromágneses sugárzás egyik fajtája. Ma már az elektromágneses sugárzásnak, mint energiaformának nemcsak a látható, hanem a szabad szemmel nem látható formái is ismertek, és alkalmazásuk az iparban is elterjedt. Ide tartozik a napenergia, melynek jelentőségét az utóbbi években kezdik csak értékelni, bár ősidők óta ismerték. A Nap negyedóra alatt annyi energiát sugároz a földre, amennyit az emberiség évenként, az energia minden lehetséges formáját figyelembe véve felhasznál. A földünkön valamennyi zöld növény a fény energiájából nyeri életerejét, és végső soron minden állati, valamint emberi élet a növényi tápanyagokra van utalva. Az ember szempontjából a fényenergia tehát mind közvetlen energiaforrás, mind pedig közvetett úton saját életfeltétele egyaránt nélkülözhetetlen. A fényen kívül az ember más láthatatlan sugárzási energiaformákat is munkára fog, ilyenek pl. a rádióhullámok, a röntgensugarak, az infravörös és ultraibolya fény, valamint a radioaktív sugárzás.

A nukleáris energia a legújabban felismert energiaforma. A nukleáris energia az atomok magjából származik, s azzal az erővel kapcsolatos, amely az anyag legkisebb építőelemeit tartja össze. Felfedezése után nyomban pusztításra használták. Az atom és hidrogénbombák robbanása esetén a felszabaduló magenergiáknak akkora a hőhatása és mechanikai munkavégzése, hogy a robbanás kilométeres körzetében minden elég és porrá válik. Ez az energia azonban lassan, szabályozottan is felszabadulhat és békés célokra használható fel.

Az energia különböző formái közül a célnak megfelelő formát energia-átalakítással biztosítjuk. Az energiát az energiaellátás folyamatában mindig az energiahordozó közvetíti. A gyakorlatban primer és szekunder energiahordozókat szokás megkülönböztetni, noha megkülönböztetésük nem minden esetben határolható el élesen.

A természetben található energiaforrásokat tekintik primer (elsődleges) energiahordozóknak. A primer (elsődleges) energia a természetben előforduló az ember által még át nem alakított szilárd, folyékony és gáznemű nyersanyagokban rejlő energia.

## Az energiahordozók osztályozása



180. ábra. Az energiahordozók osztályozása

Az energiafogyasztók a primer energiahordozóknak csak kisebb részarányát használják fel eredeti állapotban. Nagyobb részük átalakítás után szekunder (másodlagos) energiaként kerül forgalmazásra és felhasználásra. Szekunder energia például a vízenergiából nyerhető villamos energia, az atomerőműben, szenes erőműben előállított villamos energia. De ugyanígy ide sorolható a napenergiából foto-villamos energia-átalakítóval nyerhető villamos energia is.

### Primer energiahordozók

A legkorábbi energia az igavonó állatok erejéből származott és még ma is hasznosított energiaforrás. Ma már leginkább csak a fejlődő országokban használják, ahol a kis farmokon ez a legelérhetőbb energiaforrás.

Az állati energiaforrások mellett a tűz feltalálásával napjainkig a növények tüzelése volt a meghatározó. Eltekintve a felszínre bukkanó szénrétegeknél talált széntől, a 17. századig a biomassza (elsősorban fa) volt az egyetlen hőenergia forrás a Napon kívül. Ebben az időben a világításban az állati és növényi olajok, valamint a fagyú gyertyák égetése játszott nagy szerepet. Az ipari forradalom elején a fát felváltotta a szén. A növekvő jólét szükséges technikai innováció kedvező alapfeltételeket biztosított az energiaigény növekedéséhez, ugyanekkor ez lehetővé is tette korszerűbb energiaforrások kitermelését. Ez vezetett a gépek növekvő használatához, amelyhez a szén sokkal jobb üzemanyag volt, mint a fa.

A szén a Földön a legbőségebben rendelkezésre álló tüzelőanyag, a gazdaságosan kitermelhető ismert ásványi tüzelőanyag készletnek a 85 %-át teszi ki. A földkéregben felhalmozódott széntelepek hosszú földtani korszakok alatt alakultak ki.

A szén a víz alá került elhalt növények nagy molekulái mikroorganizmusok hatására, hosszú idő alatt lejátszódó biokémiai folyamatok hatására kisebb molekulákra bomlanak le. A nedvesség és a kevés oxigén jelenlétében lejátszódó folyamat során a bomlástermékek egy része gáz alakban, vagy vizes oldatban távozik, a szilárd maradék a tőzeg. Frissen fejtve a nedvességtartalma igen nagy 85-90%. Ezért levegőn szárítják a nedvességtartalmat 20-25 %-ra csökkentik. Ekkor fűtőértéke: 15,5-17,5 MJ/kg. Rossz tüzelőanyag, csak helyben használják fel. A világon az összes tőzeg 3000 EJ, évente 80 Mt-t termelnek ki. A szénképződés további fázisa a széntelepek kialakulása. A széntelepek elsősorban olyan medencékben alakultak ki, ahova a kőzetből kevés egyéb hordalék került. Ezek a medencék az idők során lesüllyedtek, fölértek más rétegek rakódtak. Ezek a rétegek egymás fölött megismétlődtek. A Föld mélyében uralkodó nagyobb nyomás és magasabb hőmérséklet hatására a kisebb molekulású vegyületek polimerizálódtak és kondenzálódtak, így alakult ki a kőszén nagy molekulású, bonyolult vegyületekből álló kolloid szerkezete.

Feketeszén a karbon korban, 300-350 millió évvel ezelőtt mocsárerdőkből (zsurlók, páfrányerdők) keletkezett. Magyarországon a Mecsekben levő feketeszén kora: 150-200 millió évvel ezelőtt tengerparti mocsarokból keletkezett.

A feketeszének fűtőértékük: 17-33 MJ/kg között van. Típusai a következők:

Hosszú lángú szén: sok illó anyagot tartalmaz, rosszul kokszolható, lángkemencék ideális tüzelőanyaga.

Gázszen: kisebb lánggal ég, könnyen gyullad, gyengén kokszolható.

Kovácsszen: jól kokszolható.

Kokszszen (zsírshén): Lágy, szilárdsága kicsi, jól összesül, nagy szilárdságú kokszot lehet belőle csinálni.

Sovány kőszén: nem sülő-képes.

Antracit: legidősebb szénféleség, teljesen homogén, fénye üveges, nem kokszolható.

Barnaszén az eocén korban, 60-75 millió évvel ezelőtt sűrű láperdőkből (mint a mostani trópusi, szubtrópusi, mérsékeltévi növények) Magyarországon is a barnaszén ekkor keletkezett a Pannon tenger partján, de kisebb mennyiségben van krétakori barnaszén is (75-125 millió év).

Kemény barnaszén: ha 40 %-nál kevesebb bányanedvességet tartalmaz. (röviden: barnaszén)

Lágy barnaszén: ha 40 %-nál nagyobb bányanedvességet tartalmaz. (röviden: lignit)

A lignit a legfiatalabb szén, szerkezete még erősen fás. A lignitek nagy nedvesség és hamutartalma miatt fűtőértéke többnyire 3,5-10 MJ/kg között van. Előnyük, hogy nagy mennyiségben nem túl vastag takaróréteg alatt található. Külféjtéssel kitermelhetők. Rossz tüzeléstechnikai tulajdonságaik miatt csak nagy erőművekben lehet gazdaságosan eltüzélni.

A kőolajat, vagy más néven az ásványi olajat túlnyomórészt nyersanyagként importálják, és a finomítókban alakítják át. A szállításra a szállító országban vásárolt mennyiségnek mintegy 1-2 %-a fordítódik. A finomítóknál a nyersolajat fűtőolajra, üzemanyagra és vegyi alapanyagokra választják szét. A háztartásokra ezekből egyrészt a tüzelőolaj/fűtőolaj, másrészt az üzemanyag, harmadrészt elektromos áram (amelyet a fűtőolajjal fűtött erőművekben állítanak elő) vonatkozik.

**44. táblázat. A tüzelőanyagok osztályozása**

	Természetes tüzelőanyagok	Mesterséges tüzelőanyagok
Szilárd	Fa Lignit Tőzeg Barna-kőszén Fekete kőszén Antracit	Faszén Ahidrált lignit Brikett, félkoks Brikett, koks
Folyékony	Kőolaj	Kőolajtermékek Benzin Petróleum Gázolaj Tüzelőolaj Fűtőolaj Alkoholok Fekete-kőszénkátrány termékek Könnyűolaj-benzol Középolaj-naftalin Nehézolaj-kátrányolaj Antracénolaj Szurok Barna-kőszénkátrány termékek Szénbenzin Szolárolaj Paraffinolajok Paraffin
Gáznemű	Földgáz	Svélgáz Koks-kemencegáz Torokgáz Vízgáz Bontási gázok

A földgáz különböző szénhidrogének elegye. A földgázszükséglet jelentős hányadát külföldről szerezzük be, a hazai kitermelés világviszonylatban nem számottevő. A szállítás kb. a rendelkezésre álló földgáz készlet 1 %-át emészt fel. A gázellátók a földgázra vonatkozóan hosszú távú szállítási szerződéseket kötnek, amelyek általában 20 évnél hosszabb időre szólnak. Az 1980-as és 1990-es éveket összehasonlítva a földgáz felhasználás arányának folyamatos növekedése figyelhető meg. Ez az átrétegződés a szilárd tüzelőanyagok és az ásványi olajok rovására történik.

A primer energiákhoz tartoznak még a megújuló energiaforrások, melyek az energiaválság óta ismételten az energetikai lehetőségeink homlokterébe kerültek. Ezek között hazánkban a legnagyobb lehetőséget a biomassza jelenti, mely az erdő és mezőgazdasági termelés során, vagy annak melléktermékeként meghatározó szerepet játszhat a megújuló energiaforrások körében. Így mindenképp az erdészettől származó tűzifa, vagy különböző szántóföldi növények, illetve egyre inkább az energetikai célra ültetett növények, az energiaültetvények játszzhatják a fő szerepet. Ezeknek az anyagoknak száraz állapotban 15 MJ/kg a fűtőértéke és eltüzelésük általában némi előkészítés után megoldható. A biomassza tüzelés

általában kisfogyasztóknál hasábfá, pellet, brikett formában történik, erőművekben inkább apríték formában. Tüzelésre alkalmas lehet a kommunális hulladék (lakossági szemét) éghető része, melyek elhelyezése, ártalmatlanítása gyakran egyébként is gondot okoz. A megújuló energiaforrások között meg kell említeni még a szél-, a víz-energiát és a geotermikus energiát is, bár ezek mennyisége az összenergia-felhasználás mértékéhez viszonyítva nem számottevők.

## Az energia átalakítása

A mindennapi életben a rendelkezésünkre álló energiaforrásokat, vagy energiahordozókat közvetlenül általában nem használjuk, többnyire átalakítjuk őket. Az energiaátalakítás többnyire azért történik, mert vagy a felhasználás, vagy a szállítás szempontjából az átalakított, szekunder energia előnyösebb. Az ipar, a közlekedés, a kommunális fogyasztók mindjobban a "nemesebb", a felhasználás során kényelmesebb, jobban automatizálható berendezésben használható, kevesebb hulladékkal, kevesebb környezeti szennyezéssel járó és jobb hatásfokkal hasznosítható energiaformákat igényli. ("Igényesebb" energiahordozók pl.: az olajfinomítás termékei, földgáz, a gőz, a forró víz és mindenek előtt a villamos energia.). Az átalakítási folyamatok közül néhány jellemzőt röviden ismertetünk.

45. táblázat. Az energiaátalakítás lehetőségei

	Tüzelő- és üzemanyag	Hő	Mechanikai munka	Villamos energia
Tüzelőanyag (szén, kőolaj-, földgáz, nukleáris üzemanyag)	brikett, kocsz, széngáz, benzin, gázolaj, fűtőolaj PB gáz, dúsított üzemanyag, üzemanyag elem	exoterm reakciók, égés: kazánok, fűtőművek, fűtőerőművek, meghasadás: reaktor, fúzió	belsőégésű motorok: benzinmotorok, dízelmotorok, gázmotorok, gázturbinák	galvánelem, tüzelőanyag-cella, izotópos áramtermelés, hőerőművek, atomerőművek
Hőenergia	endoterm reakciók	hőcserélők, abszorpciós hűtőgépek és hőszivattyúk	hőerőgépek: gőzturbinák, gázturbinák	hőelem
Mechanikai energia	mechanokémiai jelenségek, részecskegyorsítás	hűtőgépek, hőszivattyúk	mechanikai hajtások, pneumatikus gépek, hidraulikus gépek, vízturbina	generátor, vízerőmű
Villamos energia		villamos fűtés, bojler, villanytűzhely, villamos hőszivattyú	villamos motorok, MHD-generátor	transzformátor, egyenirányító, frekvencia váltó, elektroncső

## **Tüzelőanyag nemesítés, üzemanyaggyártás**

A természetben előforduló fosszilis (szén, kőolaj, földgáz) és nukleáris (urán, tórium) tüzelőanyagokat többféle módon lehet felhasználhatóbb terméké nemesíteni. Szénből pl. brikettet, kokszot lehet gyártani, vagy szénelgázosítással gázt előállítani. A kőolaj feldolgozása során számos hasznos termékhez jutunk, nevezetesen üzemanyagként benzint és gázolajat, maradék terméként fűtőolajok különböző fajtáit kapjuk. A tüzelőanyagok előkészítésének, nemesítésének célja lehet a szárítás (pl. lignit esetén), vagy a környezetre káros anyagok kivonása (pl. kéntelenítés). A nukleáris tüzelőanyagokat a felhasználás előtt elő kell készíteni. A legtöbb reaktortípusban a természetes urán nem használható, azt U235 izotópokban dúsítani kell. A dúsításon kívül az atomreaktorokba helyezhető nukleáris tüzelőanyag elemek gyártása még igen sok előkészítő fázist igényel.

A megújuló energiaforrások között a biomassa átalakításának különböző lehetőségei is megjelennek a mindennapi felhasználásban is. Elvértve, de már hazánkban is kereskedelmi forgalomba kapható a fából, szalmából készített brikett és tűzi pellet. Az olajos növényekből készített ún. biodizel és a benzinhez kevert bioalkohol is létjogosultságot kapott a hazai energiahordozók között.

## **Hőtermelés**

A hőtermelés az energiaátalakítás gyakori lépése. Erőművekben villamosenergia termelés céljára, vagy hőenergia biztosítására, ill. helyi felhasználásban helyiségfűtésre, technológiai célokra, használati melegvíz-termelésre igen széles körben merül fel igényként ez az energiaforma. A hőt többnyire tüzelőanyagokból elégetéssel kályhákban, kazánokban állítják elő lakásokban, vagy különböző erőművekben. Gyakran a helyi hőenergiaigényt - elsősorban a kényelem miatt villamosenergiából biztosítják (háztartásokban pl. villamos fűtés, villanytűzhely, villanybojler, stb.).

## **Villamosenergia-termelés**

A villamosenergia a legkedveltebb, sokféle célra könnyen átalakíthatóan használható energiafajta. A villamosenergiát erőművekben termelik, amelyek a tüzelőanyagok (szén, kőolaj, földgáz) kémiai-kötésű energiáját hővé, a hőt mechanikai munkává, majd a mechanikai munkát villamos energiává alakítják. Az erőművek vagy csak villamos energiát, vagy villamos energiát és kapcsoltan hőt állítanak elő. Az erőművek a felhasznált tüzelőanyag alapján hagyományos hőerőművek vagy atomerőművek, munkaközegük alapján gőzerőművek, gázturbinás erőművek vagy kombinált gáz/gőzerőművek lehetnek.

A megújuló energiákat hasznosító erőművek közül a legfontosabbak a vízerőművek. A jövő energetikájában a jelenleginél jóval fontosabb szerep juthat a megújuló energiaforrásokra alapozott - a hagyományos hő-mechanikai energia átalakítást megkerülő, közvetlen villamosenergia-termelő eljárásoknak, pl. a tüzelőanyag-celláknak, a napenergia foto-villamos átalakítását megvalósító napelemeknek. A fúziós villamosenergia-termelés ugyancsak a jövőbeni villamos energia előállítás lehetséges ígérete.



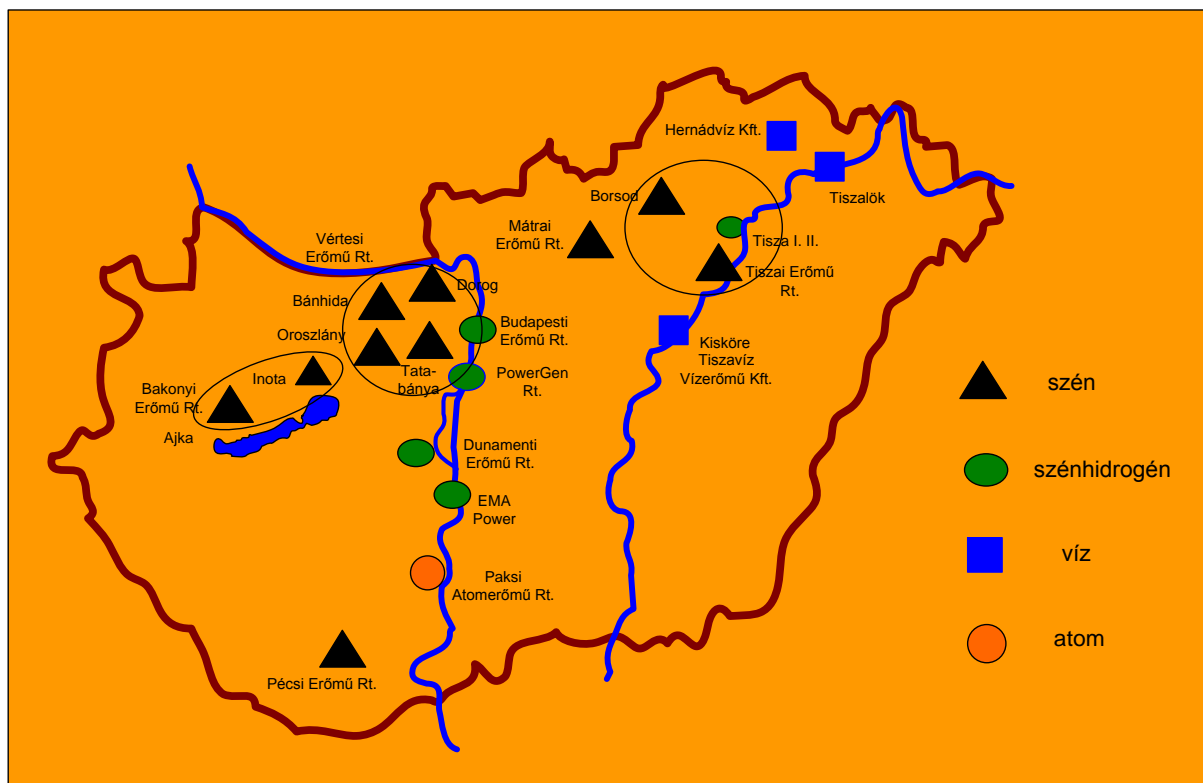
## Szekunder energiahordozók

A primer energiahordozókból, vagy energiaforrásokból átalakítással nyert energiahordozókat szekunder (másodlagos) energiaforrásoknak nevezzük. Szekunder energia például a vízenergiából nyerhető villamos energia, az atomerőműben, szenes erőműben előállított villamos energia. De ugyanígy ide sorolható a napenergiából foto-villamos energia-átalakítóval nyerhető villamos energia is.

A primer energiaforrások átalakításával a felhasználó számára alkalmas energiaformát végenergia-hordozóknak is nevezik.

## Villamosenergia

Magyarországon az elektromos áram a végenergia-fogyasztás 13 %-át teszi ki. Az elektromos energiát általában erőművekben alakítják át. Megkülönböztetünk ún. alapterhelésű erőműveket, amelyek közé tartoznak a vízerőművek, a nukleáris és a szénerőművek. Ezek az erőművek a nap 24 órájában üzemelnek, és alacsony termelési költségükkel kiemelkednek a többi üzem közül.



181. ábra. Magyarország erőművei

A menetrend-tartó erőművek azok az erőművek, amelyek az áram-előállítással követik a fogyasztás ingadozását. Ilyen erőműként üzemeltetik a szénerőművek egy részét és a földgázerőműveket. Az ún. csúcsterhelés kiegyenlítésére gázturbina-erőműveket, valamint tárolós és szivattyús-tárolós erőműveket használnak. Ezek a legrövidebb idő alatt üzembe helyezhetők és ezzel a gyors teljesítmény-kiegyenlítést biztosítják. A különböző primer energiahordozók átalakítása villamosenergiává csak tetemes

ráfördítással lehetséges. A rendelkezésre álló nagy gőzerőművek energetikai hatásfoka (azaz a villamosenergia előállítás és a felhasznált primer energia aránya) 38-40 % körül van. Modernebb szén- vagy atomerőművekben azonban ma már ennél jobb hatásfok is elérhető. Még a legmodernebb erőműveknél is átlagosan abból indulhatunk ki, hogy 100 % primer energia befektetés mellett 42-48 % elektromos energia nyerhető. Az így előállított áramot azután nagyfeszültségű vezetékeken, több kapcsolóállomáson és transzformátoron keresztül szállítják, amíg a fogyasztás helyén a 380/230 volt áll a fogyasztó rendelkezésére. A teljes vezetékhalózat ezáltal biztosítani tudja, hogy gyakorlatilag nincs fogyasztási korlátozás sem a fogyasztás időpontjára sem a mennyiségére vonatkozóan. Az ellátórendszer úgy működik, hogy a terhelésingadozások és a fogyasztási csúcsok levezethetők legyenek. Az időben lépcsőzetes áramtarifák bevezetésével a fogyasztási csúcsok elsimítására törekszenek, hogy ezáltal összességében alacsonyabb villamosenergia költségek és jobb energia-kihasználás elérésére legyen lehetőség.

## Távhő

Az ország teljes lakásállományának közel 16 %-a távfűtött és ez a ország összes energiafelhasználásában mintegy 5 %-ot jelent. A távhő kedvező árú energiahordozót jelent az ipari vonzáskörzetek és ezeknek megfelelően strukturált városrészek, valamint a nagyfogyasztók esetében. Különösen előnyös a kogenerációs erőművekben a kapcsolt villamosenergia termelés, melynek során 80%-nál magasabb összhatásfokot lehet elérni.

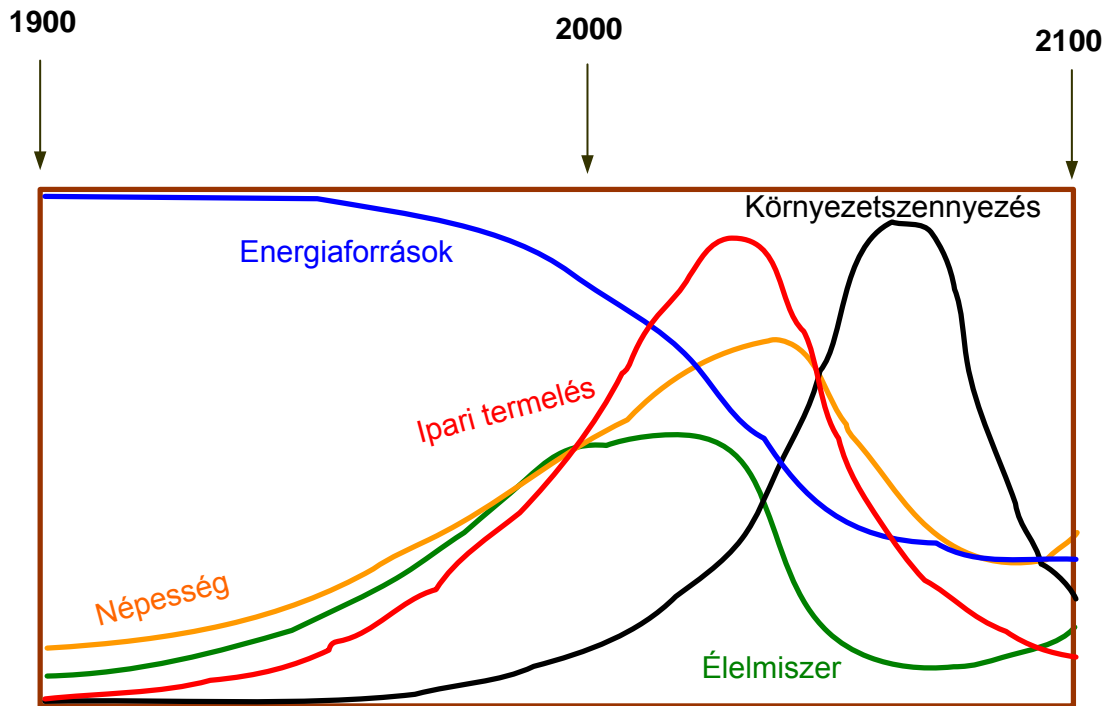
## Energia, az ember és fejlődés

Régebben az ember közvetlenül a természet kínálta energiaforrások felhasználásával tevékenykedett. A technikai eszközök lehetővé tették számára, hogy erejét, munkavégző képességét megnövelje, de ehhez már mesterségesen kitermelt és átalakított energiaforrások illetve energiaforrások igénybevételére volt szüksége. A technikai fejlődés elképesztő méreteivel ezért együtt járt az energiafelhasználás rendkívüli mértékű megnövekedése is.

Századunk második harmadában ez a technikai fejlődés lehetővé tette azt is, hogy előre vetítsük világunk alakulását és ennek kapcsán világossá vált a felismerés: a fejlődésnek korlátjai vannak, és fenntartható fejlődés csak erőforrásaink (nyersanyag és energiaforrások) következetes takarékoskodásával együtt képzelhető el. Ez a követelmény nemcsak abból táplálkozik, hogy a meglévő készletek a növekvő felhasználás miatti kimerülés megfogható közelségbe kerültek, hanem abból is, hogy a hagyományos energiahordozók felhasználása jelentős környezetkárosítást jelent. Nincs más megoldás, mint a hagyományos energiahordozókkal való következetes és szigorú takarékoskodás, és az energiaigények - egyre nagyobb mértékben - megújuló energiaforrásokból történő kielégítése.

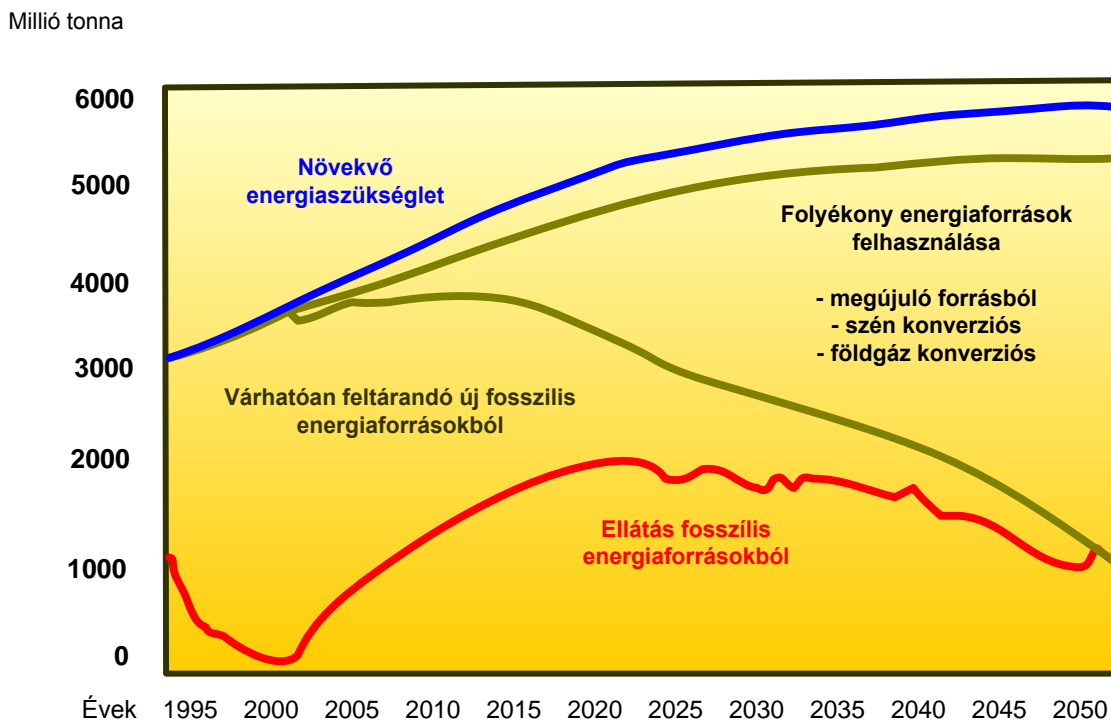
Az energiafelhasználás növekedésének oka az ember kényelmének és igényének változása. A változás alapvetően abban nyilvánul meg, hogy többet, jobbat és kényelmesebben szeretnénk elérni, függetlenül attól hogy az ember közvetlen energiafogyasztása lényegében megváltozott volna.

## A világ helyzete



182. ábra. A világ helyzetének alakulását bemutató modell

## Az energiaszükséglet fejlődése világszerte, és annak fedezése



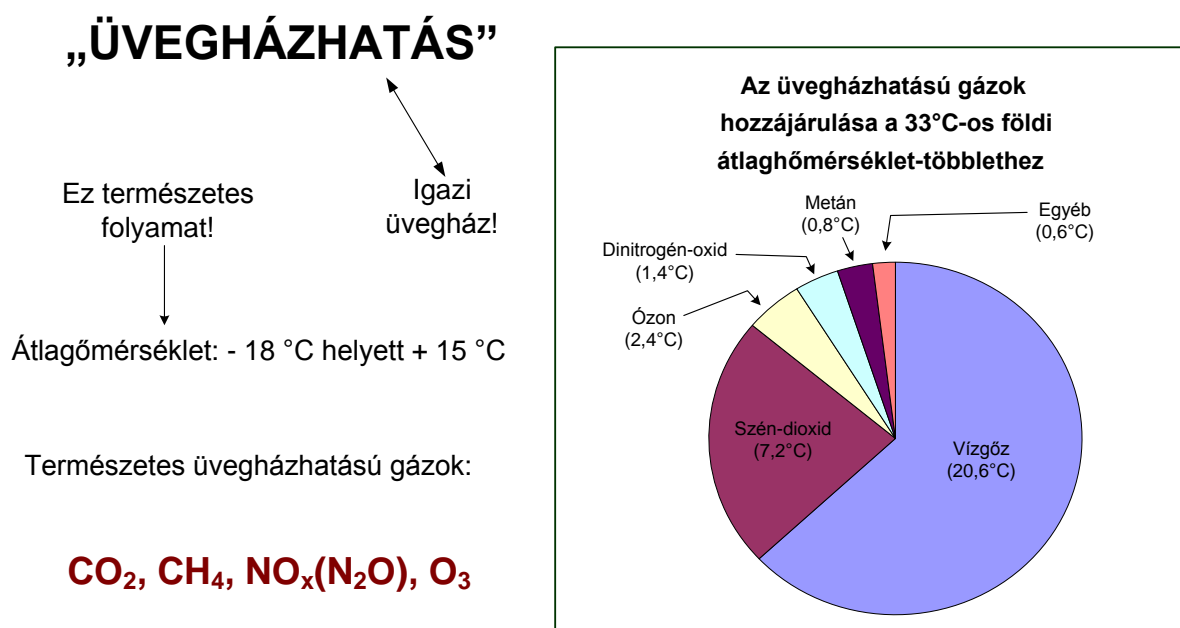
183. ábra. A világ energiafelhasználásának várt alakulása

A mai ember sem fogyaszt, illetve igényel a táplálkozás során nagyobb energiataartalmú élelmiszereket, de ezeknek az élelmiszereknek az előállítása viszont sokszorta több energiával történik. Az energia felhasználás növekedésében azzal is tisztában kell lenni, hogy az ember létfenntartásához felhasznált élelmiszer előállításának az energiaigénye nemcsak a mezőgazdaság, illetve élelmiszeripar fejlődésével függ össze, hanem megköveteli az ipar, az energetika a szállítás közreműködését, ezeknek a területeknek a fejlődését és ezeken a területeken is számottevő energiafelhasználás-növekedés következik be.

## Energia és környezet

Meglehető energiakészleteink korlátozott volta megköveteli, hogy energiaigényünket külső (földön kívüli) forrásból egészítsük ki. Erre - jelenlegi ismereteink szerint reális esélyt - a Naptól származó energia közvetlen, vagy átalakult formában (szél, víz, biomassza, stb.) megjelenő energiaforrásoknak a felhasználása kínál.

A Nap a földi élet nélkülözhetetlen eleme. A Nap állandó energiameennyiséget jelent a Föld számára. Ez az energiameennyiség 17000-szer nagyobb, mint az emberiség jelenlegi teljes energiafelhasználása. Ez az óriási energiameennyiség, mely a Naptól a Földre kerül, a Föld atmoszférájába jut, a vizekben és a biomasszában tárolódik és aztán végül is, mint hó a világűrbe kerül vissza. Ez biztosítja az életfeltételeket a táplálkozástól a megfelelő klímakörülményekig. A Föld légterében levő gázok lehetővé teszik a Nap rövidhullámú sugárzásának bejutását és megakadályozzák a hosszuhullámú meleg sugárzását a kozmoszba. A levegőben levő gázok közül néhány, mint pl. a széndioxid, a metán, a fluor-klór-szénhidrogének, és a vízgőz hasonló hatást fejtenek ki, mint az üveg az üvegházban, ezért is nevezzük üvegházhatásnak. Az üvegházhatás a föld légterében végbemenő természetes folyamat, mely a föld klimatikus változása szempontjából meghatározó.



184. ábra. Üvegházhatású gázok hozzájárulása a légköri hőmérséklethez

Amint az üvegházgázok mennyisége az atmoszférában emelkedik, úgy marad egyre több meleg az atmoszférában és ezáltal jön létre egy általános melegedés, különösen az alsóbb légrétegekben, ahol az időjárás kialakulása a legnagyobb szerepet játssza. Amikor az üvegházeffektusról beszélünk, akkor erről a járulékos hatásról van szó, melyet az emberi tevékenység idéz elő.

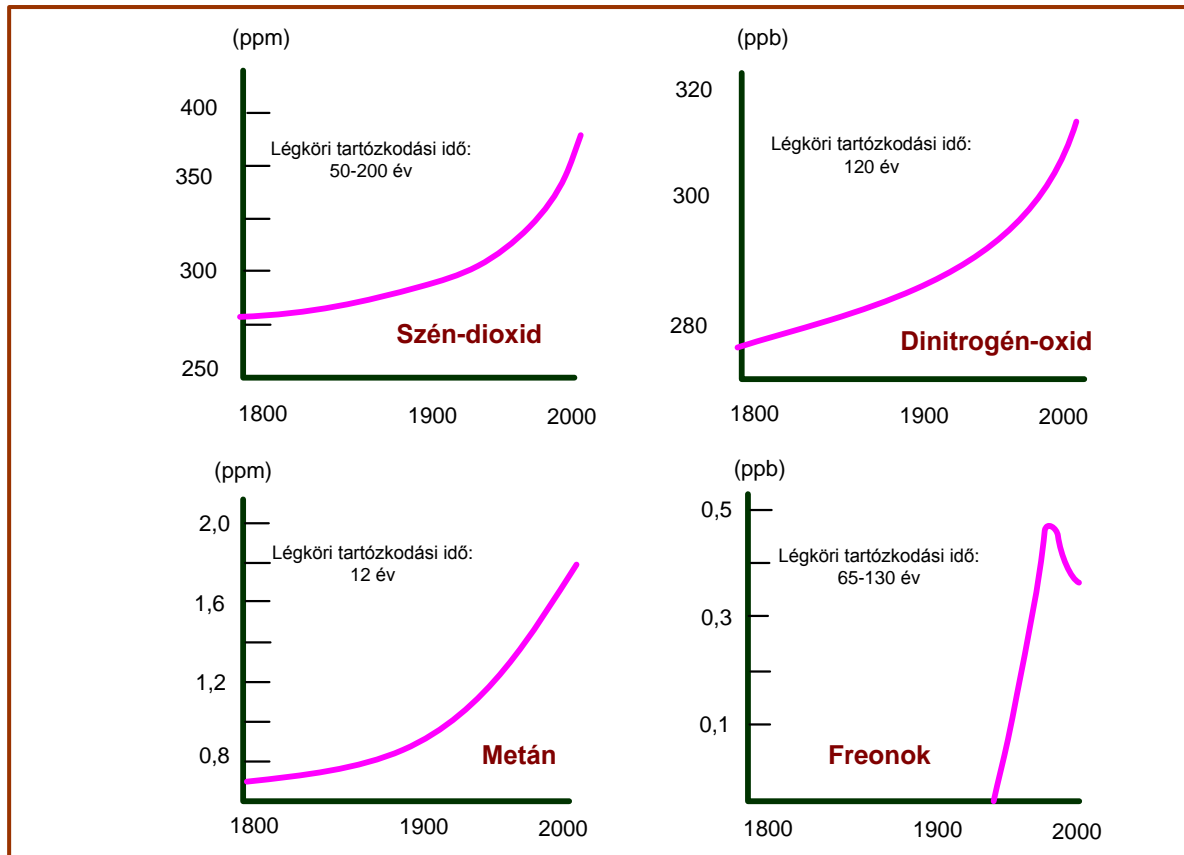
Az energiafelhasználás állandó növekedése következtében - az utóbbi évek mérései ezt igazolják - az üvegházgázok mennyisége vészjóslóan gyorsan növekedett. A jelenlegi fejlődési ütem szerint az üvegházgázok mennyisége 30-40 évenként megduplázódik. Ennek hatását tudósok százai vizsgálták és a politikusoknak is több megállapodást sikerült elfogadtatni ezzel a kérdéssel kapcsolatban. Néhány fontosabb megállapítás:

- Az üvegházgázok további növekedésével a klímaváltozásnak és a természeti katasztrófáknak a valószínűsége egyre nő a következő és az azután következő generációk számára. Minden év, mely hatékony ellenintézkedés nélkül múlik el, megfordíthatatlan következményekkel jár.
- A kormányfők 1988. évi Torontói konferenciáján, ahol erről a fenyegető fejlődésről tanácskoztak, elfogadtak egy ajánlást, miszerint a széndioxid-emissziót évente azonos mértékben 2005-ig 20 %-al kell csökkenteni. Az ajánlás Kiotóban vált megállapodássá az un. Kiotói Jegyzőkönyv, az éghajlatváltozásról szóló New York-i keretegyezmény jegyzőkönyvben, mely 2005. február 16-án lépett hatályba az Amerikai Egyesült Államok és Ausztrália támogatása nélkül. Ebben a fejlett országok vállalták, hogy (1990-et tekintve bázisévnek) 2012-ig 5,2%-kal csökkentik az üvegházhatású gázok kibocsátását. Ezen belül az egyes országok esetében eltérések vannak, így az Európai Unió eredeti tizenöt tagállama 8%-os, Magyarország 6%-os csökkentést vállalt.

Ennek az ajánlásnak a korlátozása rendkívül nehéz feladatot jelent. A legfontosabb üvegházgáz, amely a legnagyobb mértékben felelős a melegedésért, természetes végterméke a fosszilis szénhidrogének elégetésének. Az energiatermelés alapját világszerte ezek a szénhidrogének jelentik. A szén, olaj vagy gáz elégetésekor mindig széndioxid is keletkezik. A jólét javulásával mostanáig növekvő energiafelhasználás jelentkezett, és ez a

- széndioxid-emisszió növekedéséhez vezetett.
- Egyedüli kiút ebből a kritikus fejlődésből a szén, az olaj, a gáz felhasználás növekedésének mérséklése. A fosszilis szénhidrogének visszaszorítására Magyarországon is különböző lehetőségek vannak, a fokozott energiafelhasználás csökkentésén keresztül a megújuló energiaforrások legszélesebb körű alkalmazásáig.
- A széndioxid-emisszió csökkentése az energiapolitika átállását és az energiatermelés mélyreható változását követeli meg. Ez az átállás eddig még nem következett be. Több országban, köztük magát környezetvédelmi célokért elkötelezett országban is, nemhogy csökkent hanem növekedett a széndioxid-kibocsátás az elmúlt években. Ez a riasztó jelenség, nevezetesen az elfogadott és megértett szükségszerű tennivalók nem teljesítése minden politikai felelőst tettekre kell sarkalljon. Egyre nagyobb ellentét fejlődik a széndioxid-csökkentés ökológiai szükség-szerűsége és a gazdasági fejlődés és a globalizációval együtt járó világméretű kiéleződő gazdasági verseny következményei között.

### Fontosabb üvegházgázok koncentrációjának változása a légkörben (1800-2000)

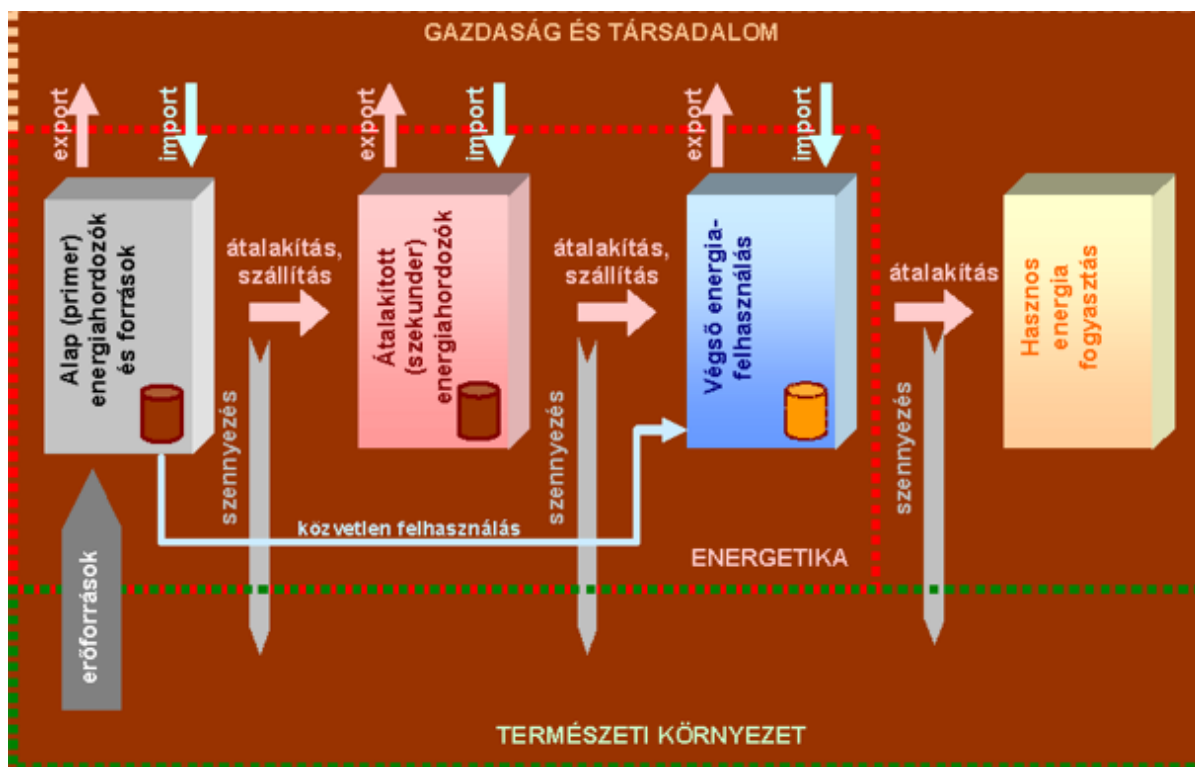


185. ábra. Az egyes üvegházgázok változása

- Energiatermelésünk ilyen mértékű fejlődése előrevetíti a jövőbeni katasztrófát. A mai felelős generáció közömbösségének a mi gyermekeink lesznek a szenvedő alanyai.
- Hatékony ellenstratégiát a mértéktelen szén, gáz és olaj felhasználás ellen az energiatakarékosság és a megújuló energiahordozók alkalmazása jelent. Mindkét kérdés csak az árakon keresztül valósulhat meg.
- Az üvegházgázok gyarapodása ma a környezeti problémánk között az egyik legjelentősebb és következményeiben alattomos, mindenekelőtt azért, mert a változásoknak a hatása az atmoszféra összetételében csak évtizedek múlva lesz érezhető és akkor az ellenintézkedés már hatástalan.
- A klímaváltozás lassú, évtizedekig tartó folyamat, és rövidtávon nem lehet megváltoztatni. Ebben rejlik különleges nehézsége is: az ember a mai fogyasztói társadalomban mélyreható beavatkozásokat okoz, és ezzel a következő generációt előre várható katasztrófába sodorja. Nemcsak Magyarország számára kihívás ez, hanem az ipari világ összes országát érinti. A folyamatot úgy tűnik nem tudjuk megváltoztatni, de mindent el kell követni a hatások előre várható következményeinek feltárására és az alkalmazkodásra.

Az üvegházhatás szempontjából az energiateljesítményünk meghatározó, hiszen fosszilis tüzelőanyagok elégetésekor széndioxid kerül a levegőbe. A fosszilis primer energiahordozók átalakításának és felhasználásának fajlagos széndioxid termelése.

Fajlagos széndioxid kibocsátás alatt a felhasznált energia széndioxid emisszióját értjük grammban, vagy kilogrammban a végenergia kilowattórájára vonatkozóan.



186. ábra. Az energetika természeti-gazdasági kapcsolata

A nem fosszilis energiahordozóknak is hatása van a környezetre. Itt első helyen kell említeni a nukleáris energiát. A nukleáris erőművekben a magenergia használata törvény szerint csak akkor lehetséges, ha az erőművek biztosítani tudják az erőmű üzemeltetése során keletkező radioaktív hulladékok elszállítását és kezelését. Ehhez hozzátartozik még hosszútávon az erőmű felszámolása a hosszú évekig tartó használat befejezése után. Az, hogy ez biztosítható-e vagy sem a környezetvédők részéről hevesen vitatott. Ezzel szemben az is tény, hogy jelenleg világszerte nem létezik olyan végtároló amiről egyértelműen kijelenthető, hogy az több száz évig használható, üzemeltethető és biztonságos lesz. Ezért a nukleáris energia hasznosításának és annak következményeinek a kérdésével még évtizedekig foglalkozniuk kell a következő generációknak.

Még az ún. megújuló energiaforrások sem jelentik az energia károsanyag-mentes felhasználást. A vízerőművek befolyásolják a vizek természetes mozgását. A közvetlenül lakott területek mellé telepített szél erőművek zajszennyezést okoznak. A hulladékégető-fűtőművekkel kapcsolatban az a probléma vetődik fel, hogy a háztartási és ipari hulladékok elégetése során keletkező nem kívánatos kémiai kötött anyagokkal részt vesznek a környezet szennyezésében. Összefoglalva tehát megállapítható, hogy az összes energiahordozó a használata során szennyezi a környezetet.

A különböző káros-anyag kibocsátás mellett, a primer energiahordozók - fizikailag törvényszerűen – fellépő hő leadásával is terhelik a környezetet. Bár ez a környezetterhelés a Napból származó energiához képest jelentéktelen, de hatása más környezetkárosítással összegződik, és a Föld energetikai egyensúlyának változását

idézheti elő, vagy ennek a folyamatnak a felgyorsulását eredményezheti. Az energiaátalakítás, felhasználás környezeti hatásait tekintve tehát nemcsak közvetlenül érzékelhető gázra kell gondolni, hanem arra is, hogy az átalakítás során általában sokféle, összetett környezetszennyezés történik.

A környezet szempontjából tehát valamennyi energiafelhasználás (ha különböző mértékben is) szennyezést jelent. Ezért arra kell törekednünk, hogy a lehető legkevesebb energiát használjunk fel és azt is a legcélszerűbben.

## **Az energiafelhasználás**

Az energiafelhasználást a használt energia, vagy energiahordozó mértékével mennyiségileg le tudjuk írni. Ez azonban nem fejezi ki azt, hogy az energiát mire használtuk és a felhasználás milyen célszerű volt. Az energiafelhasználás célszerű módjával, az energiaforrások átalakításának és ezek veszteségeinek mérlegelésével, csökkentésével az energiagazdálkodás foglalkozik, melynek célja a hatékony energiafelhasználás biztosítása (vagyis a használt energiával a legtöbb munkát lehessen végezni). Az energiagazdálkodás vállalati és nemzetgazdasági területen azt jelenti, hogy a termeléséhez mennyi és milyen energiát használnak fel, vagy adott energia-felhasználással a nemzetgazdaság mekkora termelést és termelési értéket valósít meg. Az energiával való gazdálkodást azonban nemcsak ilyen nagyléptékű folyamatoknál, hanem a mindennapi tevékenységeinknél is hasonlóan értékelni kell.

Az energia-felhasználás jellemzői

Az energiafelhasználást a használt energia, vagy energiahordozó mértékével mennyiségileg le tudjuk írni. Ez azonban nem fejezi ki azt, hogy az energiát mire használtuk és a felhasználás milyen célszerű volt. Az energiafelhasználás célszerű módjával az energiagazdálkodás foglalkozik, melynek célja a hatékony energiafelhasználás biztosítása (vagyis a használt energia minél nagyobb mértékben hasznosuljon). Az energiagazdálkodás vállalati és nemzetgazdasági területen azt jelenti, hogy a termeléséhez mennyi és milyen energiát használnak fel, vagy adott energia-felhasználással a nemzetgazdaság mekkora termelést és termelési értéket valósít meg. Az energiával való gazdálkodást azonban nemcsak ilyen nagyléptékű folyamatoknál, hanem a mindennapi tevékenységeinknél is hasonlóan értékelni kell.

## **Az energia-felhasználás jellemzői**

Az energiafelhasználás hatékonyságát különböző fajlagos mérőszámokkal, indikátorokkal lehet kifejezni. Egy energetikai indikátor azt mutatja, hogy egy adott termék, szolgáltatás, stb. előállításához, elvégzéséhez mennyi energia szükséges. A fajlagos adatoknál a vonatkoztatási alap a termék, vagy tevékenység köre és a tevékenység fajtájától függően sokféle lehet.

A nemzetgazdaságban a termelő tevékenység energiafelhasználását a tevékenység természetes értéke helyett inkább a termelési értékre szokták vonatkoztatni.

Ezeket a mutatókat több tevékenységre illetve egy nemzetgazdaság egészére is vonatkoztatják. Általánosságban a nemzetgazdaság energiaigényessége csökkenthető



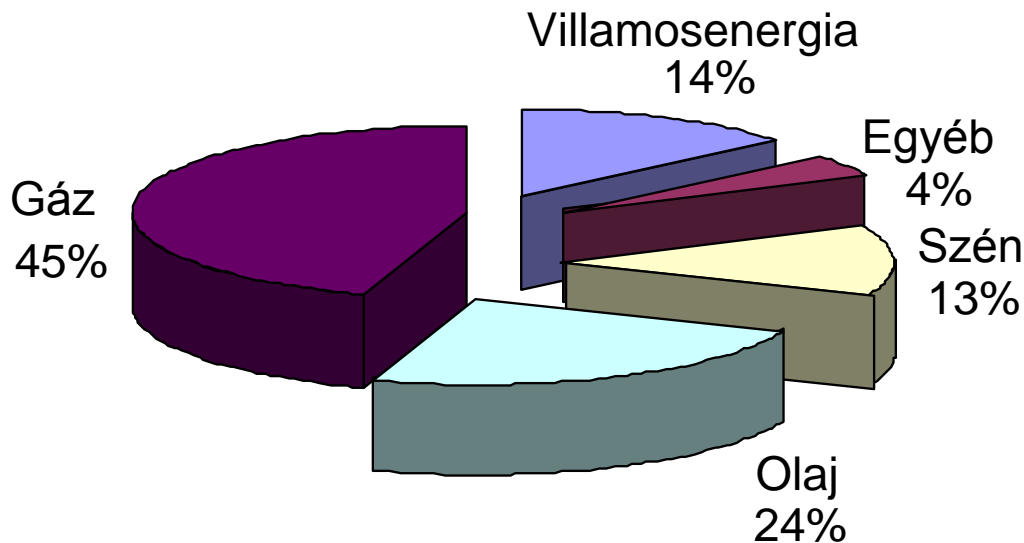
- az ipar ágazati szerkezetének olyan módosításával, amely az alapanyagipar súlyát csökkenti, a feldolgozóiparét pedig növeli
- az érintett termelés olyan technológiai korszerűsítésével, mely az energiafelhasználás csökkentésével és/vagy termelési érték növekedésével jár,
- olyan energetikai módszerekkel, melyek az energiaellátás hatásfokát növelik és ezáltal a környezetterhelés is csökken

A nemzetközi összehasonlításokhoz mind a GDP-t, mind a teljes energiafelhasználást a lakosság létszámára is szokták vonatkoztatni.

Egy országban az energiafelhasználás jellemzésére az egy főre jutó energiafelhasználást is használják, melyet általában alapenergiában adják meg, de esetenként más energiára (pl.: villamos-energiára) és értelmezik.

## Energiafelhasználás Magyarországon

Magyarországon a használt primer energia felhasználásának arányait a 8. ábra mutatja. Ez az ún. végenergia a különböző fogyasztói csoportokon belüli további átalakításhoz hasznos energia formájában továbbítják. Minden átalakítási és szállítási folyamat maga is energiát használ fel. Ez azt jelenti, hogy a primer energia végenergiává való átalakítása illetve ennek további átalakítása hasznos energiává veszteségekkel jár, amelynek költségét a mindenkori végfelhasználó fizeti meg.

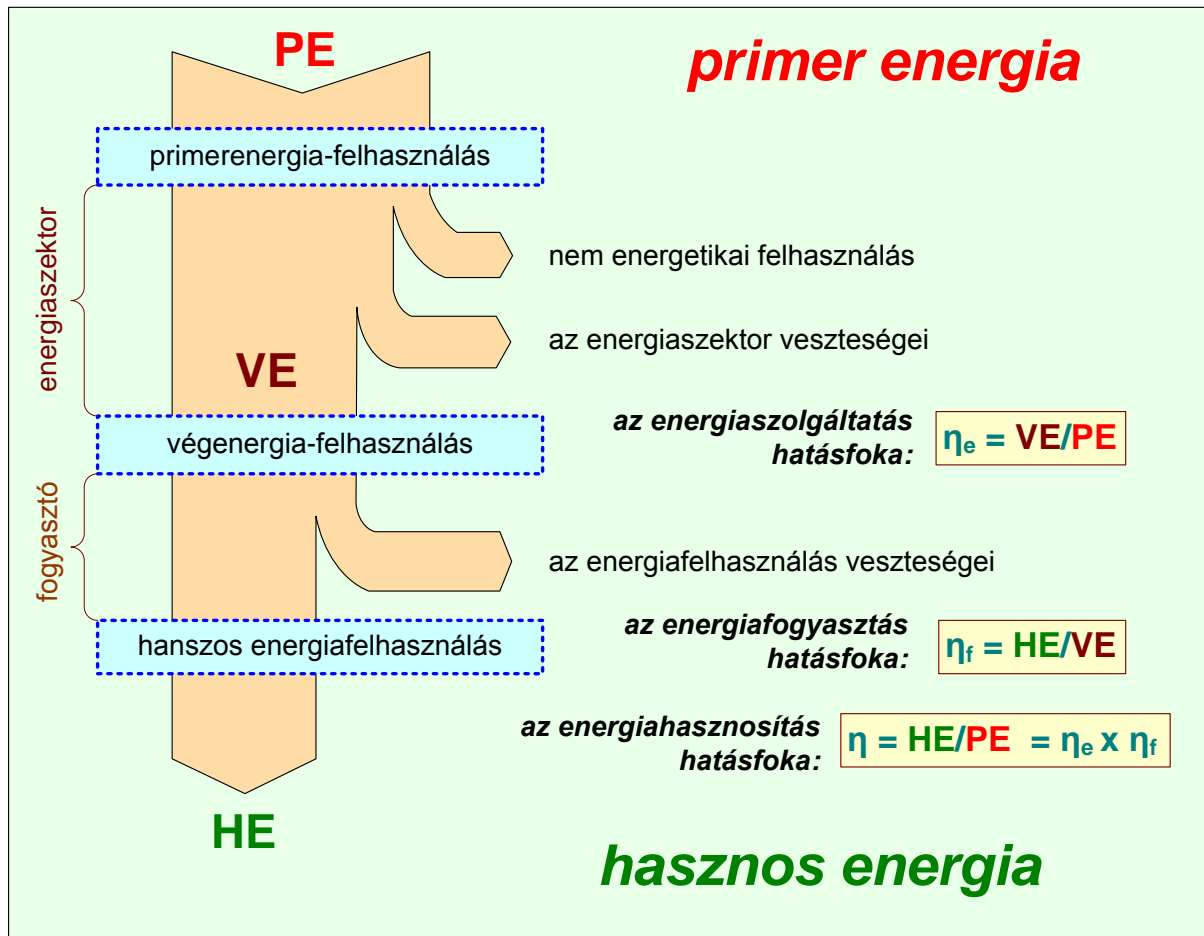


## Az éves összes energiafelhasználás 1088 PJ

*187. ábra. A primer energiafelhasználás szerkezete Magyarországon*

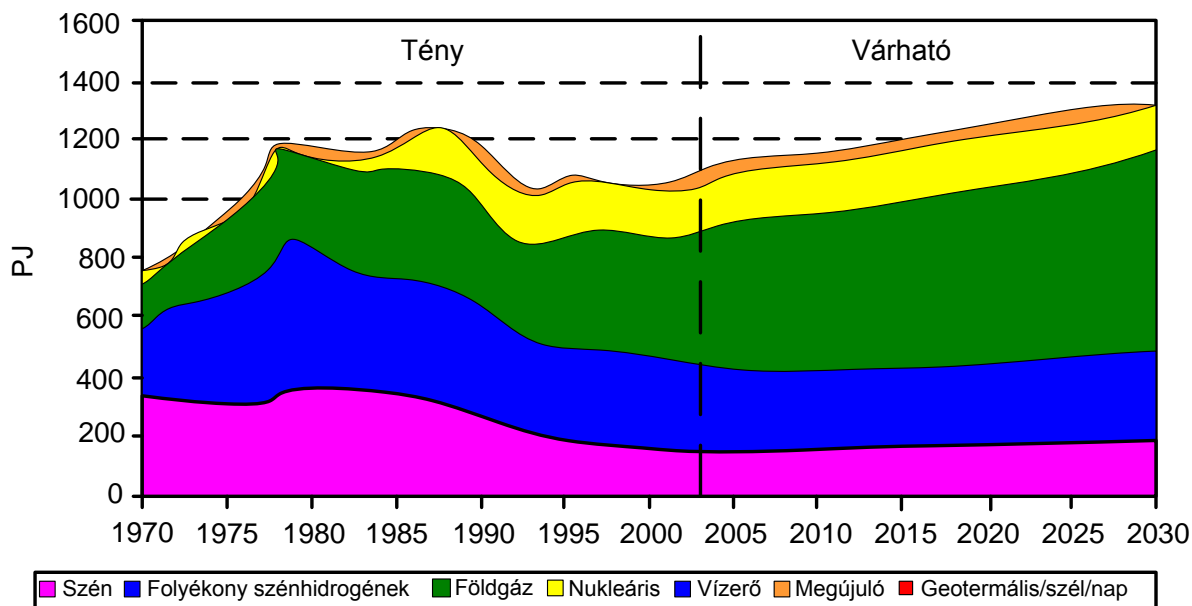
Az országos energiastatisztikák mértékegységként a PJ-t, vagy a TJ-t használják, de a jobb érzékelhetőség miatt régebben az olajjal való egyenértéket is használták. Az

olajegyenérték tOe 1 tonna olaj egység megfelel 41 MJ energiának. Az olaj 1 tonnájának elégetése során 41 MJ energia szabadul fel.



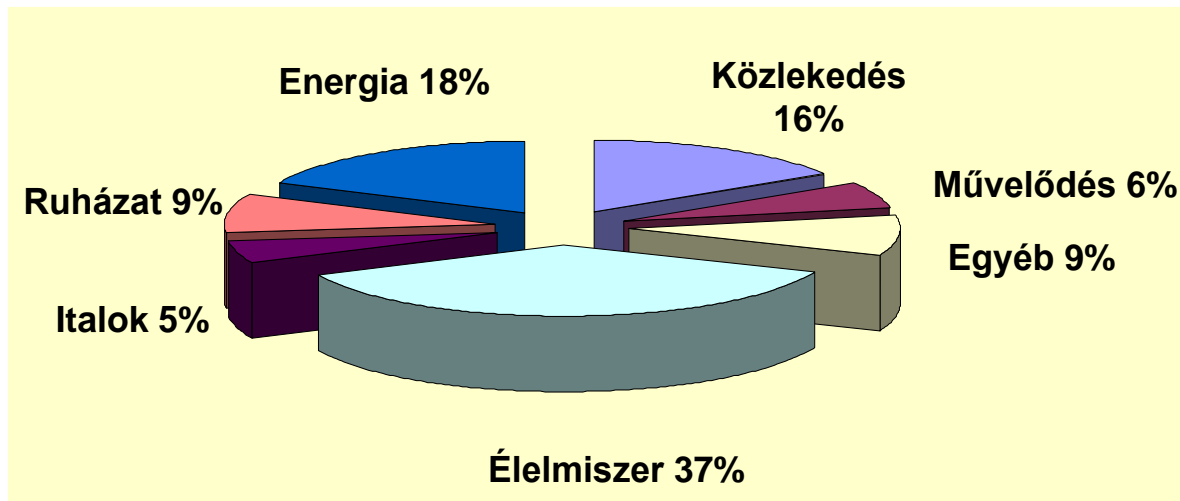
188. ábra. Az energiaátalakítás folyamata

A magyar gazdaságban végbemenő társadalmi és gazdasági változásokkal párhuzamosan mind az összes, mind pedig a villamos energia felhasználás az utóbbi negyedszázadban erősen csökkent. Az 1994-től kezdődően a gazdasági növekedést csak a villamos energia növekedése követte, az összes energia felhasználás 1999-ig tovább csökkent. Míg a GDP szintje 1999-ben elérte az 1989-es szintet, az összes energia felhasználás több mint 20 %-al a 89-es szint alatt marad. A tendenciát a 189. ábra jól mutatja. Az ipari termelés 1993. óta növekszik, 1999-ben az ipari termelés volumene 28 %-al haladta meg az 1989-es szintet. Az összes energiafelhasználás az iparban 1989 óta folyamatosan csökken, 1999-ben a 80-as szint majdnem fele, az 1989-es szintnek is mintegy 60 %-a körül alakult. A villamos energia felhasználás a 80-as években még enyhén nőtt, majd 1987-től csökkent és a termelés fellendülése után is inkább stagnált.



189. ábra. Magyarország energiafelhasználásának szerkezete

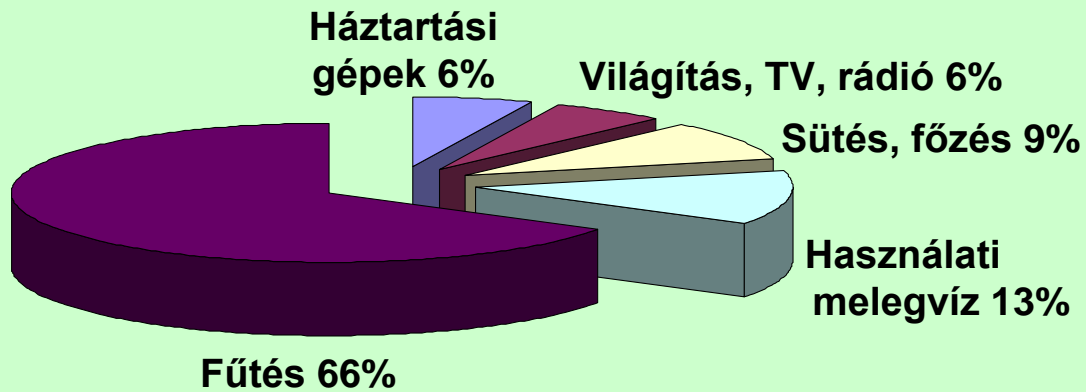
2004-ben az ország energiafelhasználása 1088 PJ volt, és ez 0,5 %-al kisebb, mint 1999-ben. Az energiaforrásokból a földgáz 45 %-kal, a primer - vízerőművekben, illetve atomerőművekben termelt, valamint importált - villamos energia 14 %-kal, a folyékony szénhidrogének 24 %-kal, a szénfeleségek 13 %-kal részesedtek. A villamosenergia- és a földgázipar biztosítja a belföldi energiafelhasználásnak mintegy 3/4 részét.



190. ábra. Az energiaköltség egy magyar háztartás költségeiben

A magyar energiafelhasználás kb 1/3-a a háztartásokban fogy el, azaz ott fogyasztjuk el. Az energiára a háztartási költségvetés közel 20 %-át fordítjuk, és ennek az energiafelhasználásnak legnagyobb része a fűtésre megy el.

## Az energiafelhasználás arányai a háztartásokban (közlekedés nélkül)



191. ábra. Az energiafelhasználás arányai az átlagos magyar háztartásban (közlekedés nélkül)

### Az energetikai hatékonyság mutatói

Az energiagazdálkodás fő feladata az energia hatékony felhasználása. Az energiafelhasználás hatékonyságát különböző fajlagos mérőszámokkal lehet kifejezni. A fajlagos adatoknál a vonatkoztatási alap a tevékenység köre és a tevékenység fajtájától függően sokféle lehet.

A nemzetgazdaságban a termelő tevékenység egyetlen eleménél a fajlagos (alap) energiafelhasználás

$$1. \text{ képlet} \quad q_{Fi} = \frac{Q_{Fi}}{G_i} = \frac{Q_{Fi} / \eta_F}{G_i}$$

ahol:

$G_i$  az  $i$ -edik tevékenység természetes mértéke (kg, m<sup>3</sup>, db, stb.)

$Q_{fi}$  ehhez a tevékenységhez tartozó végenergia-felhasználása (pl.: hő, villamosenergia)

$$Q_i = \frac{Q_{Fi}}{\eta_F} \text{ ezen tevékenység tüzelőhő felhasználása}$$

$\eta_F$  a végenergia előállításának hatásfoka.

A nemzetgazdaság összes (alap) energiafelhasználása

$$2. \text{ képlet} \quad Q = \sum_i G_i q_i$$

Az energiafelhasználást a tevékenység természetes értéke helyett inkább a termelési értékre  $N$  (Ft) szokták vonatkoztatni. Ezzel az érintett tevékenység energiaigényessége

$$3. \text{ képlet } e_i = \frac{Q_i}{N_i} = \frac{Q_{Fi} / \eta_F}{N_i} = \frac{e_{Fi}}{\eta_F}, \quad [MJ/Ft]$$

illetve az energetikai hatékonyság

$$4. \text{ képlet } h_i = \frac{N_i}{Q_i} = \frac{1}{e_i}, \quad \left[ \frac{Ft}{MJ} \right]$$

Ezeket a mutatókat több tevékenységre illetve egy nemzetgazdaság egészére is vonatkoztatják.

A belföldi termék összértéke

$$5. \text{ képlet } N = \sum_i N_i$$

Ezt általánosan a közgazdaságtanban GDP (Gross Domestic Product) néven ismerik és használják. A nemzetgazdaság energiaigényessége

$$6. \text{ képlet } e = \frac{Q}{N} = \frac{\sum_i Q_i}{N} = \frac{\sum_i N_i e_i}{N} = \frac{\sum_i N_i \frac{e_{Fi}}{\eta_F}}{N} = \sum_i S_{Ni} e_i = \sum_i S_{Ni} \frac{E_{Fi}}{\eta_F}$$

illetve az energetikai hatékonyság

$$7. \text{ képlet } h = \frac{N}{Q} = \frac{\sum_i N_i}{Q} = \frac{\sum_i N_i}{\sum_i Q_i} = \frac{\sum_i N_i}{\sum_i Q_i h_i} = \sum_i S_{Qi} h_i$$

ahol:

$$S_{Ni} = \frac{N_i}{N} \quad \text{az } i\text{-edik tevékenység relatív termelési értéke (súlyfaktor)}$$

$$S_{Qi} = \frac{Q_i}{Q} \quad \text{az } i\text{-edik tevékenység relatív energiafelhasználása (súlyfaktor)}$$

A nemzetgazdaság energiaigényességét kifejező mutató felírható az alapanyagiparra (AI) és a kevésbé energiaigényes feldolgozóiparra a súlyfaktorok segítségével

$$8. \text{ képlet } e = S_{AI} \frac{e_{AI}}{\eta_F} + S_{FI} \frac{e_{FI}}{\eta_F}$$

Az összefüggés alapján megállapítható, hogy a nemzetgazdaság energiaigényessége csökkenthető

- az ipar ágazati szerkezetének olyan módosításával, amely az alapanyagipar súlyát ( $S_{AI}$ ) csökkenti, a feldolgozóiparét ( $S_{FI}$ ) pedig növeli

- az érintett termelés olyan technológiai korszerűsítésével, mely  $e_{FI}$  csökkentését az energiafelhasználás csökkentésével és/vagy  $N_i$  termelési érték növekedésével éri el,
- olyan energetikai módszerekkel, melyek az energiaellátás hatásfokát növelik és ezáltal a környezetterhelés is csökken.

A nemzetközi összehasonlításokhoz mind a GDP-t, mind a teljes energiafelhasználást a lakosság létszámára (L) is szokták vonatkoztatni.  
Az egy főre jutó GDP

9. képlet  $n = \frac{N}{L}$ , Ft/fő, (USD/fő)

és az egy főre jutó energiafelhasználás

10. képlet  $q = \frac{Q}{L}$  [MJ/fő]

Az egy főre jutó energiafelhasználást általában alapenergiában adják meg, de esetenként más energiára (pl.: villamosenergiára) és értelmezik.

11. képlet  $q_E = \frac{E}{L}$

## Energetikai rugalmasság

Az egy főre eső GDP és energiafelhasználás között kapcsolat van: nagyobb fajlagos termelés nagyobb fajlagos energiafelhasználással jár. Különböző országok erre vonatkozó adatait

12. képlet  $\ln q = a + b \ln n$

összefüggéssel lehet közelíteni és értékelni.

Hasonló összefüggéssel közelíthető az összes energiafelhasználás és a GDP közötti kapcsolat is

13. képlet  $\ln Q = c + d \ln N$ ,

amelyből

14. képlet  $\frac{dQ}{dN} = d \frac{Q}{N}$

Az utóbbi összefüggésből értelmezhető az energetika rugalmassági tényezője elemi és véges változásokra

$$15. \text{ képlet } d = \frac{\frac{dQ}{dN}}{\frac{Q}{N}} = \frac{\frac{\Delta Q}{\Delta N}}{\frac{Q}{N}} = \frac{v_Q}{v_N}$$

illetőleg

$$16. \text{ képlet } d = \frac{\Delta QN}{\Delta NQ} = \frac{\Delta e}{e} = \frac{h}{\Delta h}$$

ahol a GDP növekedési üteme

$$17. \text{ képlet } v_N = \frac{\Delta Q}{Q}$$

és az energiafelhasználás növekedési üteme

$$18. \text{ képlet } v_Q = \frac{\Delta Q}{Q}$$

Mindkét növekedési ütem különböző időtartamokra (pl.: differenciálisan, évre) értelmezhető. A gazdaságfejlesztés egyik fő célja, hogy  $d$  értéke alacsony legyen: a GDP növelését minél kisebb energianövekedéssel valósítsa meg. Ennek eszközei szintén az energiaellátás hatásfokának növelése, az egyes termelési technológiák energiaigényességének csökkentése.

## Gazdasági hatékonyság

A gazdaság ágazatai közötti kapcsolatokat naturális mértékekben nehéz megadni. A kapcsolatokat pénzürtékben célszerű egységesíteni. Ezt az ágazati kapcsolat mérlegével (ÁKM) lehet kifejezni.

Az ÁKM adatrendszerében az energiaellátás folyamatait is pénzürtékben kell kifejezni. Az energiaátalakítás energetikai hatékonyságát az

$$19. \text{ képlet } \eta = \frac{Q_{ki}}{Q_{be}} = \frac{Q_{be} - V}{Q_{be}} = 1 - \frac{V}{Q_{be}}$$

hatásfok fejezi ki. Az energiaátalakítás értéktermelése viszont a

$$20. \text{ képlet } H = \frac{GDP}{N_{ki}} = \frac{GDP}{N_{be} + GDP} = \frac{N_{ki} - N_{be}}{N_{ki}}$$

gazdasági hatékonysággal jellemezhető, ahol  $N_{be}$  az energiaátalakításba bevitt érték, GDP a hozzáadott érték és  $N_{ki} = N_{be} + GDP$  a bruttó termelés értéke

## Egyedi és vezetékes energiaellátás

A fogyasztók egyedileg vagy kiterjedt vezetékhalozaton keresztül láthatók el energiával. Bizonyos primer és szekunder energiahordozók esetén csak az egyedi energiaellátás jöhet számításba. Ebbe a csoportba tartoznak a szenek, a széntermékek és az olajtermékek. Szállításuk és forgalmazásuk eszközei változatosak.

Az energiaellátás fejlesztésének egyik velejárója a vezetékes energiaellátás terjedése. A vezetékes energiaellátás főleg három energiahordozó esetén alakult ki. A villamos energiát kezdetektől villamos hálózat juttatta el a termelőtől a fogyasztóig. A kezdeti helyi kis hálózatok területi, majd országos és végül nemzetközi együttműködő villamos hálózatok kialakulására vezettek.

A földgáz szerepe az utóbbi évtizedekben jelentősen növekedett az energiaellátásban. Forgalmazása szintén kizárólag földgázvezetéseken keresztül történik, amelyek az országok egyre több települését behálózzák.

Városok hőellátásában indokolt lehet a távhőszolgáltatás is, különösen akkor, ha kellően nagy a hősűrűség és a távhőt a fűtőerőművek hatékony kapcsolt energiatermeléssel állítják elő. A távhőt forróvíz- vagy gőzhálózatú távhőrendszerek szolgáltatják.

## Energiafogyasztók

Az energiaellátás célja és végállomása az energiafogyasztók igényének kielégítése. Az energiafogyasztók összetétele a gazdaság/társadalom egészét tükrözi, általában termelői (ipari és mezőgazdasági), intézményi és lakossági energiafogyasztókról beszélhetünk.

Az energiafogyasztást mérhetjük a felhasznált tüzelőanyag bázisán, ezt gyakran bruttó energiafogyasztásnak nevezzük. Az energiafogyasztóknál a végenergia-felhasználást, az un. nettó energiafogyasztást állapíthatjuk meg. A bruttó és nettó felhasználás közötti különbséget energiaátalakítási és szállítási veszteségek okozzák. A végenergia-felhasználásban bizonyos mértékű alternativitás lehetséges. A szóba jövő alternatív megoldások közül gazdasági és piaci szempontok alapján lehet és kell választani. Piaci szempontok elsősorban a hőellátásban és a tervezés fázisában érvényesülhetnek. Tervezéskor lehet választani egyedi és vezetékes hőellátás között, a vezetékes ellátás földgázvezeték illetve távhőellátást kiépítését jelentheti. Tervezéskor az egyes fogyasztók érdekei csak korlátok között érvényesülhetnek, az optimális energiaellátás módjának választásában inkább a fogyasztói körzetek közérdeke a meghatározó (pl.: a földgázvezeték megvalósítása lakossági hozzájárulással). Az energiaellátás bizonyos területein természetes monopóliumok is megjelennek (áramszolgáltatók).

Az ipari fogyasztók a felhasznált energiahordozókat esetenként nem csak energetikai célokra használják, hanem ezek képezik technológiájuk nyersanyagát is (vegyipar).

A fogyasztók energiafelhasználásának összesítése határozza meg a nemzeti energiaellátás struktúráját. Az energiastruktúra hosszú távú alakulását a piaci viszonyok és az állami beavatkozás (árszabályozás, prioritások) mellett az energetika általános fejlődési tendenciái befolyásolják.



## Energiarendszerek

Az energiaellátás országos feladataira - a nemzetgazdaság fontos ágazataként - az energiaipar alakult ki. Az energiaipar részeként különböző energiarendszerek működnek.

Az energiaipar három fő részre tagolható: energiaforrások, -átalakítók és -szolgáltatók. Az alapenergia-források ( $Q_A$ ) a primer energiahordozók hazai termelését ( $Q_{Ah}$ ) és importját ( $Q_{Ai}$ ) együtt jelenti. Része az adott ország hazai szén-, olaj-, földgáz- és uránbányászat. A hazai primer energiaforrásokat általában a szén, kőolaj és földgáz importja egészíti ki.

Az energiaforrásból a primer energiahordozók egy része közvetlenül a fogyasztókhoz jut ( $Q_p$ ). Másik része a központi energiaátalakítóba kerül ( $Q_{pB}$ ), amelyek ebből megfelelő szekunder energiahordozókat állítanak elő ( $Q_{sB}$ ). A központi energiaátalakítók körébe tartoznak a villamosenergia-termelő erőművek, a hőt előállító fűtőművek és fűtőerőművek, az energiahordozókat feldolgozó és nemesítő művek: olajfinomítók, brikettgyártó, koks- és gáztermelő, szénelgázosító művek. A szekunder energiahordozók előállításához kapcsolódik a szekunder energiahordozók importja ( $Q_{si}$ ), elsősorban a villamosenergia-import és néhány olajtermék importja.

A primer ( $Q_p$ ) és szekunder ( $Q_s$ ) energiahordozókat a végenergia-felhasználók felé az energiaszolgáltatók forgalmazzák ( $Q_c$ ). Az energiaforgalmazók sorában igen jelentősek a földgáz, a villamos energia és a távhő szolgáltatói és rendszerei.

Az alapenergia-forrásra bemeneti oldalon hazai termelés ( $Q_{ah}$ ) és import ( $Q_{ai}$ ), kimeneti oldalon az átalakításra kerülő ( $Q_{pB}$ ) és a primer energiahordozóként felhasználásra kerülő ( $Q_p$ ) energiák mérlege írható fel.

**21. képlet** 
$$Q_{Ah} + Q_{Ai} = Q_A = Q_{pB} + Q_p$$

Az energiaátalakítás kimeneti oldalán rendelkezésre álló szekunder energia

**22. képlet** 
$$Q_{sB} = Q_{pB} - V_B$$

ahol  $V_B$  az energiaátalakítás vesztesége, mely környezetterhelésként jelentkezik.  
A szekunder energiahordozók mérlege

**23. képlet** 
$$Q_s = Q_{sB} + Q_{si}$$

ahol  $Q_{si}$  a szekunder energiahordozók importja.

A végenergia felhasználás az energiaszállítás  $V_c$  veszteségeinek figyelembevételével

**24. képlet** 
$$Q_s + Q_p - V_c = Q_c = Q_F + Q_{NE} + V_F$$

ahol  $Q_F$  a fogyasztói oldalon a hasznos energiafelhasználás,  $Q_{NE}$  a nem energetikai célú felhasználás,  $V_F$  veszteség a végenergia felhasználóknál. A teljes energiafelhasználás

**25. képlet** 
$$Q_{\dot{o}} = Q_A + Q_{si} = Q_c + V_B + V_c = Q_F + Q_{NE} + V$$

ahol  $V = V_B + V_c + V_F$  az energiaellátásban fellépő összes veszteség.

Az energiamérlegben az eltérő értékű energiák (pl. tüzelőanyag, villamos energia) helyes és egyértelmű összehasonlítása nagy körültekintést igényel (pl. a villamos energia egysége mekkora tüzelőhő tartalommal egyenértékű).

## Földgázellátó - hálózat

Az Európai Unió és hazánk energiaellátásában egyre növekvő és már igen jelentős szerepet tölt be a földgáz. A földgázellátó-rendszer kiinduló eleme a földgázforrás. A földgázforrások és a felhasználók közötti kapcsolatot a nagy és középnomású földgázvezetékek képezik. Magyarország a Győr-Baumgarten (Hungaria-Ausztria) gázvezetékekkel kapcsolódik a nyugati, míg Beregdarócnál a Testvériség gázvezetékekkel a keleti (oroszországi) gázvezeték rendszerekhez. A magyarországi gázimport 85-90 %-ban orosz, 10-15 %-ban nyugati gázellátó rendszerekből származik.

A földgáz távvezetékrendszer 13 hazai és 2 import belépési ponttal rendelkezik, a gázátadó állomások száma 365. A földgázszállító rendszer kapacitása 16,5 Mrd m<sup>3</sup>/év, napi szállítóképessége 84 Mm<sup>3</sup>. A szállító vezetékrendszer üzemeltetése, biztonsági felügyelete az Országos Telemechanikai Rendszer II. (OTR II.) segítségével történik. A szolgáltató társaságok (9 db) üzemeltetésében lévő elosztóvezeték-rendszer együttes hossza 58400 km volt 1996. év végén. Ebből a nagynyomású (64 bar) országos szállító vezetékrendszer hossza megközelítőleg 4850 km. A földgázellátás és felhasználás összehangolásának biztosítására (téli-nyári csúcsigények jelentős eltérése miatt) földalatti földgáz tárolókat üzemeltetnek.

A nagynyomású szállító vezetékhez átadó állomásokon keresztül kapcsolódnak az ipari, kommunális és lakossági fogyasztók.

Ez az elosztóvezeték hálózat biztosítja a hálózatra kapcsolt 1731 település fogyasztóinak földgázellátását. Az elosztó vezeték több mint 80%-a korszerű polietilén alapanyagú. Az elosztó hálózat veszteségeit - metán szivárgás - ezáltal sikerült csökkenteni, ami környezetvédelmi okokból is fontos, hiszen a metán üvegházhatású gáz.

A földgáz nyomása a gázelosztó hálózatban:

- nagynyomás: 64 bar
- nagy közénomás: 4 - 25 bar
- középnomás: 0,1 - 4 bar
- kisnyomás: max. 100 mbar

Az elosztóvezetékekben kis nyomást ( $p < 0,1$  bar) tartanak, mert ilyen módon csökkenthető a lakott területen nehezen megvalósítható védősáv, illetve növelhető a környezetbiztonság. A gázfogyasztók teljesítménye és csatlakozási nyomása igen széles határok között változik. A lakossági és általában a kisteljesítményű készülékek a kisnyomású hálózatokra, míg az ipari fogyasztók középnomású hálózatokra kapcsolhatók. A gázturbinás energiatermelő egységeket nagynyomású gázvezetésekre kell kapcsolni.

A földgázhálózat kiépítésének köszönhetően a földgázhasználat Magyarországon az utóbbi évtizedekben jelentősen megnőtt.

## Folyékony energiahordozók

Magyarországon kőolajtermelés Budafa, Lovászi, Nagylengyel és Algyő mezőiből történik. A hazai kőolajkutak 1996-ig  $83 \cdot 10^6$  tonna kőolajat termeltek. A kőolajimport a magyar energiaellátás fontos része. A kőolaj túlnyomó részét Oroszországból

vásároljuk. Ez a kőolaj Ukrajnán keresztül a Barátság II. vezetéken érkezik Magyarországra. A vezeték évi szállítóképessége  $10 \cdot 10^6$  tonna.

A Szlovákián át haladó Barátság I. vezetékhez is kiépítettünk egy évi  $5 \cdot 10^6$  tonna évi szállítóképességű leágazást, amely tartalékként a szállítás biztonságát növeli. Az egyoldalú olajimport megszüntetése érdekében épült az Adria csővezeték  $10 \cdot 10^6$  tonna évi szállítóképességgel.

Az olajfinomítókat és a kőolajtermék készletező-tároló helyeket termékvezetékek kötik össze. A nagynyomású olaj- és termékvezetékek, az átadó és fogadó, valamint a nyomásfokozó állomások környezeti-környezetbiztonsági szempontból különleges műszaki felügyelete igényelnek. Az elmúlt évek távvezetési meghibásodásai (Fényeslitke) csak erősítették a környezetvédelem és katasztrófa-elhárítás fontosságát.

Századunk második felében a véletlen többször is vezetett olyan katasztrófákhoz, amelyek tragikus következményekkel jártak a környezetre és az ott lakókra egyaránt. Nem véletlen tehát, hogy a problémákkal egyre komolyabban foglalkoznak a tudósok és a politikusok egyaránt.

## Villamosenergia-rendszer

A villamosenergia-rendszer (VER) fő részét az erőművek képezik. Ezek közös hálózatra táplálják a megtermelt villamos energiát, ezért együttműködő erőműrendszerről lehet beszélni.

A VER másik fő része az alaphálózat. Az alaphálózat különböző nagyfeszültségű (nálunk: 220, 440 és 750 kV) vezetékekből áll, amelyek jól behálózzák az ország területét. Egy-egy ország alaphálózata általában együttműködik más országok alaphálózatával is (villamosenergia-rendszerek egyesülése: VERE).

A villamosenergia-rendszer harmadik részét az elosztóhálózatok és a fogyasztók képezik. A villamos fogyasztókat különböző feszültségű hálózatokról láthatjuk el. A kisteljesítményű, lakossági fogyasztókat az alacsony feszültségű hálózatokra kapcsoljuk, a teljesítménynöveléssel általában nő a nagyobb feszültségű hálózatra kapcsolás igénye és célszerűsége. Egyes nagyfogyasztókat az erőművek közvetlenül látnak el generátorkapcsukról. A villamosenergia mind a termelő, mind pedig a kommunális területen a legjelentősebb energia-forrás.

## Távhőrendszer

A távhő rendszer települések, sűrű energiafogyasztói szerkezet hőenergiaigényének kielégítésére előnyös energiaellátó rendszer. Hazánkban általában lakótelepek lakásainak fűtésére, használati melegvíz-ellátására alakítottak ki távhő rendszereket. A távhőt forróvízes vagy gőzközegű távhőrendszereken keresztül szolgáltatják.

A távhőrendszer kiindulása a hőtermelés, ami lehet közvetlen (kazántelep) vagy kapcsolt (fűtőerőmű), esetleg valamilyen hulladék- vagy olcsó hő hasznosítása. A forróvízes távhőrendszer fő eleme az a vezetékpár, amelynek előremenő ágában  $T_e$  hőmérsékletű, visszatérő ágában pedig  $T_v$  hőmérsékletű vizet keringtetünk.

A hőfogyasztók fogyasztói hőközpontokon keresztül kapcsolódnak a távhőrendszerhez. A kapcsolódás lehet hőcserélőn keresztül indirekt (az ábra ezt az általános alkalmazott megoldást mutatja), vagy közvetlen. A változó fogyasztói hőigényeket vagy a  $T_e$  és  $T_v$  hőmérsékletek, vagy a keringtetett tömegáram, esetleg mindkettő megfelelő változtatásával követhetjük alapvetően központi, kisebb mértékben helyi beavatkozásokkal.

## Energetikai folyamatok veszteségei

Az energetikai folyamatok mindig veszteséggel járnak. A veszteségek különösen az energiaátalakítás során lehetnek igen jelentősek. Az energetikai veszteségeket jellegüknél fogva két alaptípusra oszthatjuk: mennyiségi és minőségi (irreverzibilitásból eredő) veszteségekre. Egyes összetett veszteségekben mindkét típus vonásai megtalálhatók.

### Mennyiségi veszteségek, mennyiségi hatásfok

Az energetikai veszteségek egyik csoportját az jellemzi, hogy a bevitt energia ( $Q$ ) egy része a környezetbe távozva elvész ( $V$ ), de a megmaradó hasznos energia ( $E$ ) minőségi jellemzői nem változnak vagy változásukkal nem számolunk. Az energiamérleg

$$26. \text{ képlet} \quad Q = E + V$$

és a környezeti veszteséget kifejező hatásfok

$$27. \text{ képlet} \quad \eta_v = \frac{E}{Q} = 1 - \frac{V}{Q}$$

Az előállított energiából az energiaátalakító maga is fogyaszt. A hasznosan kiadott energia ekkor

$$28. \text{ ábra} \quad E = E_t + E_g,$$

ahol  $E_t$  a termelt energia,  $E_g$  az önfogyasztás. Az önfogyasztást jellemző hatásfok

$$29. \text{ ábra} \quad \eta_\varepsilon = \frac{E}{E_t} = \frac{E}{E + E_\varepsilon} = \frac{1}{1 + \varepsilon}$$

ahol  $\varepsilon = E_g/E$  az önfogyasztás tényezője.

A környezeti veszteséget és az önfogyasztást együtt kifejező mennyiségi hatásfok

$$30. \text{ ábra} \quad \eta_m = \frac{E}{Q} = \frac{E_t}{Q} \frac{E}{E_t} = \eta_v \eta_\varepsilon = \eta_v \frac{1}{1 + \varepsilon}$$

ha az önfogyasztást a beviteli oldalon elhanyagoljuk illetve az értelmezésben figyelmen kívül hagyjuk.

Ez a hatásfok nem tesz különbséget a bevitt energiák (pl. tüzelőanyag és villamos energia) minősége illetve értéke között. Korrekt értékelést csak akkor kaphatunk, ha a bevitt energiákat valamilyen energiában (pl. tüzelőhőben) közös nevezőre hozzuk. Ha az  $i$ -edik energiát tüzelőhőből  $\eta_i$  hatásfokkal tudjuk előállítani, akkor Például kazán esetén  $Q$  hasznos hő termeléséhez  $Q_i$  tüzelőhőt és  $E$  villamos energiát használunk el, akkor a kazán tüzelőhőre vonatkoztatott hatásfoka

$$31. \text{ képlet} \quad \eta_{mü} = \frac{Q}{Q_i + \frac{E}{\eta_E}}$$

ahol  $\eta_E$  a felhasznált villamos energia előállításának hatásfoka.

### **Az irreverzibilitás okozta veszteségek**

A hő értékeségét a mechanikai munkává történő átalakítás szemszögéből a termodinamikai átlaghőmérsékletek fejezi ki. Ezekkel a veszteségmentes energiaátalakítás Carnot-hatásfoka

$$32. \text{ képlet } \eta_c = 1 - \frac{\overline{T}_2}{\overline{T}_1}$$

ahol

$\overline{T}_1$  a hőközlés

$\overline{T}_2$  a hőelvonás termodinamikai átlaghőmérséklete

A hő-mechanikai munka átalakítás hővel kapcsolatos folyamataiban olyan veszteségek is fellépnek, amelyeknél a hő mennyisége ugyan változatlan marad, de állapotjellemzői úgy változnak meg, hogy a hő értéke a munkavégzés szempontjából csökken. Az ilyen irreverzibilis folyamatokat  $Q = \text{áll}$  hő esetén az entrópia növekedése illetve a termodinamikai átlaghőmérséklet csökkenése jelzi. A gyakorlatban a hőcsere, a fojtás és a keveredés tekinthető irreverzibilis folyamatnak.

## A biomassza mint energiahordozó, és annak energetikai hasznosítása.

Dr. Marosvölgyi Béla, Nyugat-Magyarországi Egyetem

Biomasszának nevezzük azon szerves-anyagok összességét, melyek fotoszintézissel vagy organizmusok szintetizáló-, illetve átalakító tevékenysége révén jönnek létre, illetve ezen anyagok hasznosítása közben melléktermékként keletkeznek. Megújuló, vagy bővítetten is megújítható anyagok lévén a megújuló energiahordozók legnagyobb bázisát képezik Európában.

A biomasszák három nagy csoportját különböztetjük meg:

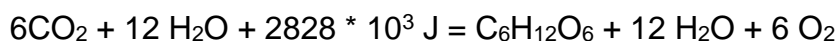
- **Primer biomasszák:** a fotoszintézissel létrejövő anyagok (növények, növényi részek, a növények hasznosítása közben visszamaradó homogén melléktermékek (fa, teljes növény, szalma, stb.)
- **Szekunder biomasszák:** a primer biomasszák élő szervezetekben vagy azok közreműködésével létrejövő szerves anyagok (állati zsírok, fehérjék, stb.)
- **Tercier biomasszák:** a primer vagy/és szekunder biomasszák hasznosítása közben keletkező melléktermékek, vagy a biomasszák keverékei (állati trágyák, szerves hulladékok, feldolgozási kevert biomasszák, stb.), esetleg más biotechnológiák hulladékai (szennyvíziszap, cefre, stb.)

A biomasszák részben vízből, részben szerves vegyületekből, részben ásványi anyagokból állnak. A szerves vegyületek elemi alkotói között jelentős arányt képvisel a C, a H<sub>2</sub>, ezért energiatartalmuk jelentős. A CH vegyületeket tartalmazó anyagok energiatartalma oxidációs (égés), fermentációs (rothasztó), erjesztéses, termikus (pirolitikus), illetve egyéb folyamatok közben szabadítható fel.

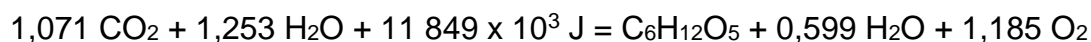
**A primer biomasszák** a lignocellulózok, melyekből a növények épülnek fel.

A Földre érkező napsugárzás a légkör határán  $I_0 = 1353 \text{ W/m}^2$

A beérkező napsugárzás energiája biokémiai folyamatok során (fotoszintézissel) kötődik meg a növényekben (elsőleges biomassza)



1 kg tömegű primer szerves-anyag előállítására esetén



A folyamatok eredményeként nem csak biomassza jön létre, hanem O<sub>2</sub> is felszabadul. Ez azt jelenti, hogy a biomassza, mint energiahordozó létrejöttékor többlet oxigén szabadul fel, ami akkor, amikor a biomassza energetikai hasznosítása (égetés) történik, táplálja az égést.

Az energiatermelésre számításba vehető növények száma szinte korlátlan, hiszen lignocellulózokként mindegyik alkalmas a környezetbarát energiatermelésre a napenergia megkötése révén, és a zárt CO<sub>2</sub>- körforgalom előnyeinek megjelenése mellett.

A növényi (primer) biomasszák eredetük szerint lehetnek mező- vagy erdőgazdálkodási melléktermékek (szalma, kukoricaszár, csutka, tűzifa, stb.), vagy ugyanezen ágazatokban ültetvényeken termesztett teljesnövény. Ez utóbbiakat nevezzük energetikai ültetvényeknek.

A hagyományos mezőgazdasági melléktermékek energetikai hasznosításának igen nagy múltja van. Viszonylag nagy mennyiséget használnak fel hőtermelésben. A melléktermékek mindig a legolcsóbb energiahordozók, mert a velük kapcsolatos logisztikai költségeket általában a főtermék árába építik be,

A növényi biomasszák intenzív hasznosítása gyakran (napjainkban egyre inkább) azt eredményezi, hogy nem áll rendelkezésre elegendő alapanyag, vagy a koncentrációja igen nagy logisztikai többletköltségekkel járna.

Ilyen esetben fontos szerephez jutnak az energetikai ültetvények.

Az energetikai ültetvények növényekkel létesülő olyan célkultúrák, melyek biomassza-termékük energiahordozó előállításában vagy energiatermelésben hasznosul.

Ha az ültetvények létesítésének célja biológiai hajtóanyagok előállítása, akkor az alkoholgyártásban felhasználható hagyományos mezőgazdasági növények (kukorica, búza, repce, stb.) is energianövénynek minősül.

Hagyományos értelemben azokat az ültetvényeket tekintjük energetikai ültetvényeknek, melyekről a teljes lignocellulóz-termék energetikai hasznosításra (közvetlen elégetésre vagy gázosításra) kerül.

Az energetikai ültetvények létesülhetnek

Lágyszárú növényekkel, melyek lehetnek

Egynyáriak (energiakender, triticale, stb) és

Évelők (energiafű, energianád, stb.)

Fás-szárúakkal

Faültetvények formájában

Cserjékkel (energiafűz, amorfa, stb.)

Nemesített klónokkal (nemesnyárok, faalakú füzek, stb.)

Energiaerdőként

Speciális hálózattal és üzemeltetési technológiával,  
hagyományos, de gyorsan növekvő fafajokkal (akác, bálványfa, stb.)



*192. ábra. Energianád ültetvény, és nemesnyár energetikai faültetvény.*

A lágyszárúakkal létesített energetikai ültetvények mezőgazdasági területen (szántó) létesülnek, és mezőgazdasági technikával takarítják be azokat (kombájn, járvaszecskázó). A levágott anyagot a betakarítási technológiától függően szecska vagy bála formájában gyűjtik és tárolják a felhasználásig. Az energianövények hozama viszonylag nagy. Az energiafű első kaszálásakor 8-11 t az energianád végvágásakor 20-25 t biomassa nyerhető. Az energetikai faültetvényről 2 éves korban 30-60 t dendromasszát (fa biomassa) is nyerhetünk. (a hozam 15-30 t/ha\*év).

A biomasszák között a fa a hagyományos energiahordozó. A hagyományos energiafa a tűzifa. Az erdőgazdálkodás közben kitermelt faanyagok azon részéből állítják elő, amely a hagyományos faiparban nem hasznosítható. Magyarországon az erdők lombos fafajúak, ezért a kitermelt fa több mint 50%-a csak tűzifának alkalmas. A lakosság mintegy 2 millió m<sup>3</sup> tűzifát használ fel energiahordozóként, emellett jelentős mennyiség jut (hazai kereslet híján) exportra is.

A primer energiahordozók (lignocellulózok) legfontosabb energetikai hasznosítási formája a közvetlen elégetés. Az égethetőség és az égéssel járó környezeti hatások szempontjából legfontosabb anyagjellemzők a következők:

- a kémiai összetétel,
- a vegyi összetétel
- a nedvességtartalom
- az égéshő és a fűtőérték,
- a hamutartalom
- a fajlagos energiatartalom

A kémiai összetételt a fában jelenlevő elemek minősége és mennyisége jellemzik.

**46. táblázat. A fa szárazanyagának kémiai (elemi) összetétele.**

Elem	Mérték (m / m)	Érték
Carbon (C)	g/kg	450
Hidrogén (H)	g/kg	60
Oxigén (O)	g/kg	440
Nitrogén (N)	mg/kg	900
Kén (S)	mg/kg	120
Klór (Cl)	mg/kg	< 0,01
Kadmium (Cd)	mg/kg	0,11
Cink (Zn)	mg/kg	14,57
Réz (Cu)	mg/kg	1,3
Fluór (F)	mg/kg	< 0,01
Ólom (Pb)	mg/kg	0,98
Króm (Cr)	mg/kg	0,94

(Nussbauer 1994)

A vegyi összetétel a fára jellemző vegyületek minőségét és arányait mutatja meg. Energetikai szempontból fontos a fa alapállapotára jellemző vegyi összetétel. A legfontosabb vegyületek a következők.



**47. táblázat. A fontosabb fajok vegyi összetétele ( % )**

Fafaj	Pentozán	Cellulóz	Lignin	Egyéb
Lucfenyő	11,30	57,84	28,29	2,57
Erdeifenyő	11,02	54,25	26,35	8,38
Bükk	24,86	53,46	22,46	0,78
Nyír	27,07	45,30	19,56	8,07
Nyár	23,75	47,16	18,24	10,85
Cser	22	45	22	10

**48. táblázat. A fa tüzeléstechnikai szempontból fontos alkotói. (Fafaj: bükk)**

Megnevezés	Mértékegység	Érték
Illóanyagok	m/m %	81,3
Szilárd éghető	m/m %	18,1
Hamu	m/m %	0,6

(Nussbauer, 1994.)

**Nedvességtartalom.**

A fa legnagyobb mértékben változó jellemzője a nedvességtartalom. Ennek mértéke függ a fajtától, a farész korától, a vegetációs időszakától, a kitermelést követő tárolási időtartamtól, stb. A gyakorlatban a következő elnevezéseket és értékeket használják:

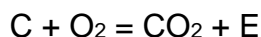
Nedvességtartalom (u %)

élőnedves	40-47 %
természetes száradt	25-30%
légszáraz	15-20 %
szárított	9-12 %
abszolút száraz (ASZ)	0%

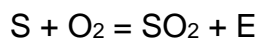
Az fát, mint energiahordozót (hasonlóan a hagyományos fosszilis energiahordozókhoz) a fűtőértéke jellemzi.

A biomasszából leggyakrabban oxidáció révén nyerjük vissza a megkötött energiát. A legfontosabb oxidációs folyamatok a következők:

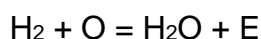
**Égethető anyagok az energiahordozókban C, H, S**



$$12 \text{ kg C} + 32 \text{ kg O}_2 / 44 \text{ kg CO}_2 + 407 \text{ MJ}$$



$$32 \text{ kg S} + 32 \text{ kg O}_2 = 64 \text{ kg SO}_2 + 297 \text{ MJ}$$



$$2 \text{ kg H}_2 + 16 \text{ kg O}_2 = 18 \text{ kg H}_2O + 287 \text{ MJ}$$

Fűtőérték:

$$Hu = 34,8 C + 93,9 H + 10,5 S + 6,3 N - 10,8 O - 2,5 w$$

Az anyagok %-os értéke kerül a képletbe. w = víztartalom.

A fa természetes állapotára jellemző fűtőértékek átlagos értékei a következők:

absz. száraz állapotban	18.8 -19.0 MJ/kg
élőnedves állapotban	9.5-10.5 MJ/kg
szabványos tűzifaként	13,5 -14,5 MJ/kg

**49. táblázat. A fa és más lignocellulózok fűtőértéke légszáraz állapotban.**

Megnevezés	A légszáraz melléktermék fűtőértéke GJ/t
Szalma	13,0-14,2
Kukoricaszár	10,5-12,5
Napraforgószár	8,0-10,0
Erdei apríték	12,0-14,5
Faipari hulladék	13,0-16,0
Szőlőnyesedék	10,5-12,5
Gyümölcsfanyesedék	10,0-11,0
Erdei apríték	12,0-14,5
Faipari hulladék	13,0-16,0

Hamutartalom.

A hamutartalom a biomassa elégetését követően visszamaradó ásványi eredetű anyagok összessége.

Megkülönböztetünk

- anyagvizsgálatokkal meghatározott hamutartalmat (szabványos körülmények között végzett izzítással határozzuk meg), és
- a tüzelőberendezésben keletkező salakanyag mennyiségéből kiindulva meghatározott hamutartalmat.

Az elsődleges biomassa (lignocellulóz) hamutartalmát

- az növényi rész ásványianyag-tartalma
- a betakarítási vagy feldolgozási technológiák okozta szennyeződés

határozzák meg, míg a másodlagos biomasszák hamutartalma mindenek előtt

- az alapanyag-jellemzőktől
- az előkészítési- illetve feldolgozási technológiáktól
- az adalékolástól

A hamut a fa ásványi anyagaiból keletkezett oxidok, és a farészekben levő szennyeződések alkotják. A hamutartalmat

$$H (\%) = 100 \cdot H/A$$

képlettel számíthatjuk, ahol (A) az elégett tüzelőanyag, (H) a visszamaradt hamu tömege.

A hamutartalom jelentős mértéken függ attól, hogy a tüzelőanyag a fa mely részéből származik, és a fakitermelésnél milyen technológiát alkalmaztak. Jellemző hamutartalom-értékek:

Tiszta fa	0,2 – 0,5 %
Tiszta fakéreg	3,5 – 5 %
Vonszolva közelített fa kérge	6,0 – 14 %
Keménylombos fa gallyanyaga	2,5 – 3,5 %
Ültetvény dendromssza	1,9 - 3,2%
Nemesnyár levél	9,8 – 11,5 %

A hamu vizsgálata környezetvédelmi szempontból nagyon fontossá vált, mert az EU biológiai energiahordozókra készülő szabványa sok, a jelenlegi szabványosítással nem érintett elem vizsgálatát írja elő.

Különösen fontosak a vizsgálatok azért, mert a biomasszák direkt tüzeléses energetikai hasznosításánál újabban

- A káros füstgázelemek képződésének lehetőségeit (SO<sub>x</sub>, HCl, PCDD, NO<sub>x</sub>)
- A korróziót okozó emissziót (Al, Si, K, Na, Ca, Mg, Fe, P)
- Az aerosol emissziót (Ti, As, Ba, Cd, Co, Cu, Cr, Hg, Mo, Mn, Ni, Pb, V, Zn) is vizsgálni kell.

### **A biomassa előkészítése eltüzeléshez:**

A lignocellulózokat eredeti állapotukban nagyon nehéz lenne az energia-termelő berendezésekben felhasználni (elégetni), ezért a hasznosítás előtt a berendezések által támasztott igényeknek megfelelően elő kell készíteni.

Az előkészítés történhet

- darabolással (fa darabolása kályhákhoz, kandallóhoz, kiskazánokhoz)
- aprítással (aprítógéppel 10-50 mm főméretű darabokra forgácsolás) az alapanyag homogenizálása, a tüztérbe táplálás megkönnyítése és az égetés jobb szabályozhatósága céljából)
- őrléssel (finomforgács vagy fapor előállítása) a speciális égetés (porbefúvás) vagy a későbbi tömörítés előkészítése céljából.
- tömörítéssel, a logisztikai problémák csökkentése, a speciális égetés feltételeinek megteremtése vagy a speciális (nemesített) tüzelőanyagok előállítása céljából.

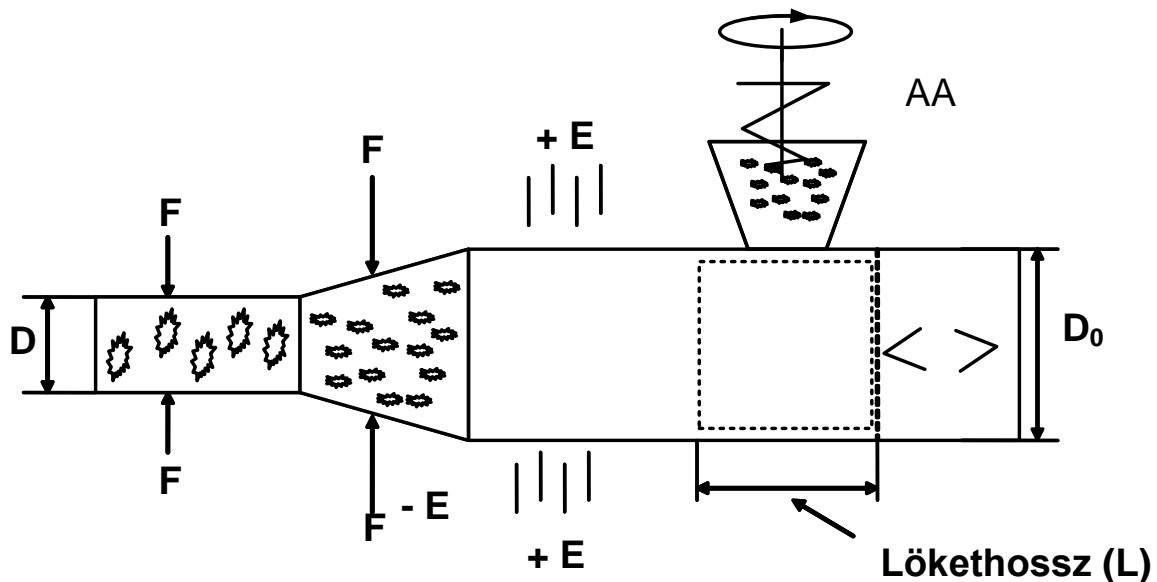
A biomasszák előkészítésének speciális gépei (darabológépek, hasítógépek, aprítógépek, kalapácsos darálók, stb. kifejlesztése az erdőgazdasági-faipari és a mezőgazdasági gépek között történt meg. Ezek bemutatására a faenergetika speciális gépei között van lehetőség. Itt az energetikai tömörítvények gépeinek és technológiáinak rövid ismertetésére van lehetőség.

Az energetikai tömörítvények az egyébként kis sűrűségű alapanyagokból készülnek. A tömörítvény lehet: bála, köteg, brikett és pellet.

A bálák a szálás biomasszák (energiafű, energianád) anyagának tömörítése során jönnek létre. Hasáb- vagy hengerbálákat készítenek a hagyományos mezőgazdasági gépekkel. A bálák sűrűsége 400-500 kg/m<sup>3</sup>, és méreteik miatt könnyen rakodhatóak, határozott alaki tulajdonságaik révén pedig könnyen, kis helyigénnyel tárolhatók.

A kötegek gallyakból, venyigéből, nyesedékből, stb. speciális kötegelő-géppel készülnek. Viszonylag nagy átmérőjű hengereket állítanak elő, melyeket a kötegek képzés közben alkalmazott zsinegekkel tartanak egyben. A kötegek könnyen tárolhatók, szállíthatók, és a felhasználási helyen szükség esetén aprítják azokat.

A brikett a lignocellulózok finom aprítékából illetve poraiból készül. Az alapanyag részecskéinek mérete 1-2 mm. Az anyag nedvességtartalma 7-9 %. A nedvességtartalom a brikettálhatóságot nagymértékben befolyásolja, ezért ha a nedvességtartalom változó, külön szárító berendezéseket kell alkalmazni. Az előállított brikett alakja, mérete, sűrűsége az alkalmazott gép működési elvétől (dugattyús, nyomócsigas, őrlőcsigas) is függ. Jó minőségű a brikett, ha nedvességtartalma 7-9%, sűrűsége 1,1-1,2 g/cm<sup>3</sup>, a fűtőérték 17-19 MJ/kg.



$$TV = (D_0 * L) / (D * I)$$

193. ábra. Brikettálás dugattyús géppel.

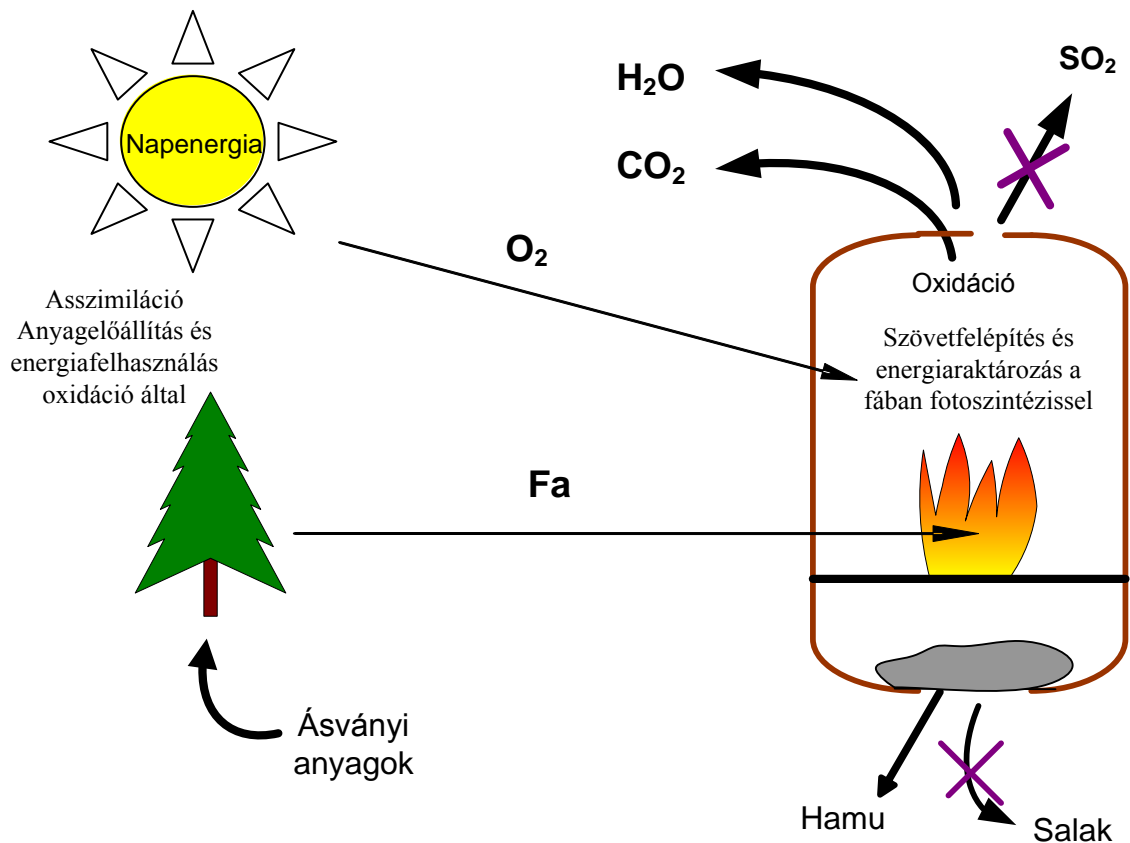
A pellet a lignocellulózok finom aprítékából illetve poraiból készül. A pellettálókban az aktív elemek (görgők) elé adagolt anyagot sík- vagy dobmatrica sok-sok furatán keresztül préselik, miközben az anyagból 5-15 mm átmérőjű kis hengerek képződnek. A pellet-egységek sűrűsége, fűtőértéke, stb. hasonló a brikettekére. Az ömlesztett pellet halmaz-sűrűsége 700-800 kg/m<sup>3</sup>.



194. ábra. Fabrikett és agripellet.

## Energiatermelés primer biomasszából, égetéssel.

A lignocellulózok égetéssel történő hasznosítása esetében CO<sub>2</sub>- neutrális energia-termelés valósul meg. Ennek lényege az, hogy az égés közben az a CO<sub>2</sub> szabadul fel, melyet a légkörből a napenergia felhasználásával a növény a közelmúltban kötött meg. Hasonló folyamat játszódna le a szerves-anyaggal akkor is, ha a növény elhalását követően természetes folyamatok közben bomlana, de ez esetben nem nyernénk meg a megkötött napenergiát.



195. ábra. CO<sub>2</sub>-neutrális energiatermelés biomasszából.

A lignocellulóz biomasszák égetése igen sokféle tüzelőberendezésben valósulhat meg. Ezek lehetnek:

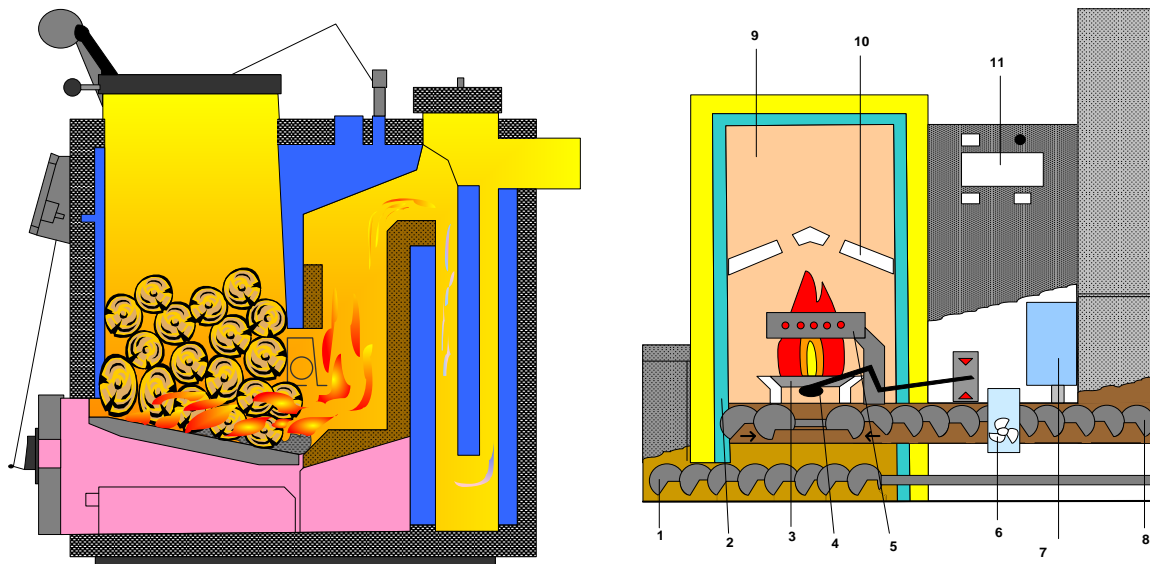
- kisteljesítményű lakossági célú készülékeket, melyek lehetnek
  - kályhák, kandallók
  - hőlégfűvők
  - központifűtés-kiskazánok
- közepes teljesítményű hőtermelők üzemi célra
- kommunális hőszolgáltatók
  - távhőszolgáltatáshoz
  - távhőszolgáltatáshoz és használati melegvíz (HMV) szolgáltatáshoz
  - kogenerációhoz
- biomassza-bázisú erőművek

A kályhák és a kandallók a legelterjedtebbek, melyeknek ma már igen korszerű, viszonylag jó hatásfokkal üzemelő változatai is vannak. Tüzelőanyaguk lehet hasábfá, biobrikett. A korszerű kályhák égéslevegő-ellátása szabályozható, ezért hatásfokuk viszonylag magas. Újabban a kályhába/kandallókba hőcserélőt is szerelnek, így központi fűtés kiskazánjaként is működhetnek.

A hőlégfűvők kettősfalú lemez kazetták, melyekben az égés szabályozottan folyik. A tűzteret körbezáró lemezek közé ventilátorral levegőt fújnak, és az mint hőhordozó a keletkező hőt elszállítja. A kilépő levegővel fűtik a teret.

A kiskazánok egyedi központi fűtés hőtermelő egysége. 10-100 kW közötti névleges teljesítményűek. Aprítékkal, pellettel, a speciális gázosító kazánok darabos fával működtethetők. A hőhordozó többnyire melegvíz, ami a radiátorokban adja le energiáját.

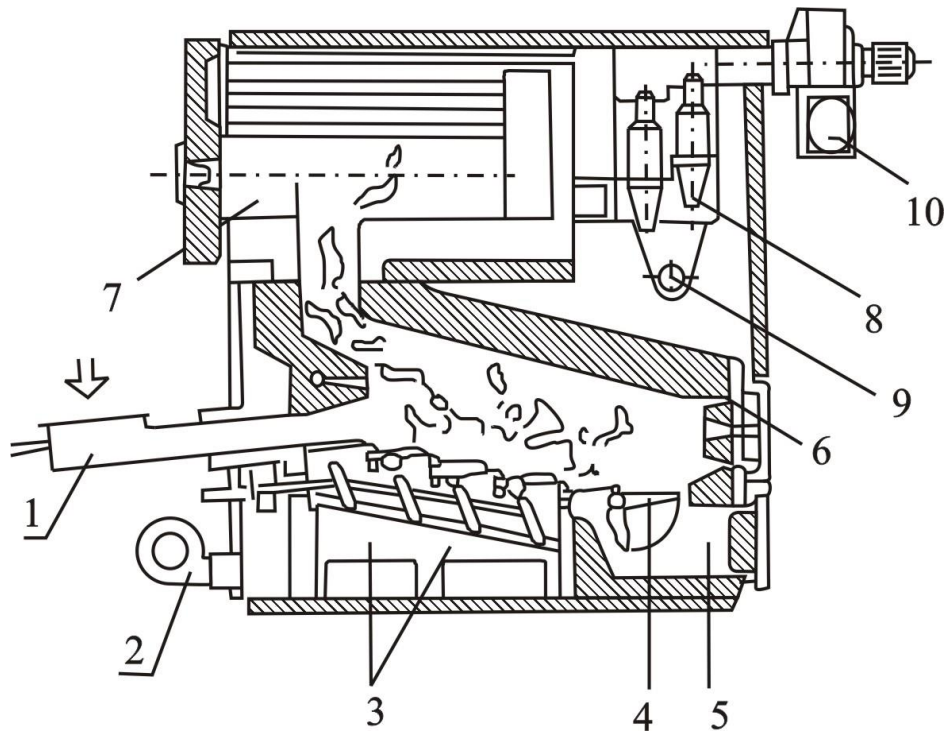
A legelterjedtebb a kétaknás fatüzelésű kiskazán, melynek egyszerűbb, és teljesen automatizált változatai is vannak. Mindegyiknél jól elkülöníthető a tüzelőanyagtér, az előégető tér (kigázosítás) és az utóégető tér (az éghető gázok elégetésére). Egyszerűbb esetben primer és szekunder levegő-bevezetés történik, a teljesen automatizált berendezéseknél lambdaszondával vezérelt tercierlevegő-bevezetés is van, így az égés gyakorlatilag tökéletes. A berendezések hatásfoka meghaladja a 90%-ot, emissziói minden szempontból megfelelőek.



**196. ábra. Kétaknás kiskazán és pellettüzelő kiskazán.**

**Pellettüzelő kiskazán elvi elrendezése: 1. hamuzócsiga, 2. vízköpeny 3. égetőserleg 4. tüzelőanyag szintszabályozó. fűvőka-gyűrű ventilátor (primerlevegő) oltóvíztartály betápláló csiga utóégető tér lángterelő vezérlő PC.**

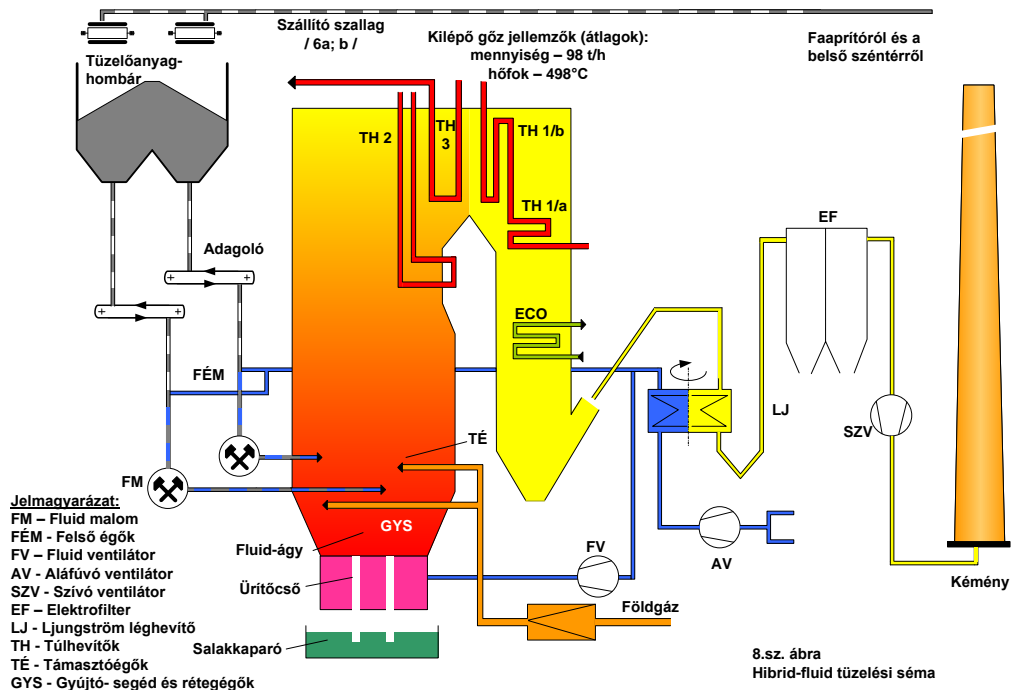
Az üzemi hőtermelők szabályozott tűzterű, többfordítós hőcserélőkkel szerelt kazánok, melyekben a jobb szabályozhatóság érdekében mindenképp aprítékot égetnek. Rostélyája legtöbbször ferde-mozgó. A hőcserélő füstcsöves, legalább két fordítókamrával. A hőhordozó lehet melegvíz, forróvíz, gőz vagy termo-olaj. A teljesítményük 150 kW és 5 MW között szokásos.



197. ábra. Nagykazán.

1. tüzelőanyag-betoló, 2. primerlevegő ventilátora, 3. mozgóröstély-tér, 4. salakürítő lap, 5. salakkamra, 6. terelőlap és szekunderlevegő-fúvókák, 7. hőcserélő.

A nagy füstgázmennyiségek szükségessé teszi a füstgázventillátorok alkalmazását. A hőközpontokban elhelyezett nagyteljesítményű hőtermelőket a távhőszolgáltatás is használja. Ebben az esetben a tüzelőberendezéshez a tüzelőanyag tárolását, illetve folyamatos és biztonságos tüztérbe juttatását biztosító elemek is beépítésre kerülnek.



198. ábra. Hibrid-fluid tüzelési séma.

## A biogáztermelési és hasznosítási alaptermotechnológiák.

A biogáz-technológia egyrészt a biohulladékok által okozott környezetterhelést csökkenti, másrészt jelentős mennyiségű megújuló energiaforrás kihasználását eredményezi. Mindkét szempont rendkívül fontos, hiszen

- a biológiai eredetű hulladékok mennyisége a jövőben jelentősen nő
- az energiagazdálkodás területén pedig jelentősen nő a megújuló energiahordozók szerepe.

A településeken keletkező kommunális hulladék 30-40%-a biológiailag bontható szerves anyag. Ennek döntő többségét ma még közvetlen talaj, talajvíz és levegőszennyezést okozó szeméttelpeken helyezük el.

A hulladék „hegyekben” lejátszódó szervesanyag lebontási folyamatok révén igen jelentős a keletkező depóniagáz (metán CH<sub>4</sub>, széndioxid CO<sub>2</sub>), melyek a legerőteljesebb üvegház-hatást okozó gázok.

A kommunális szennyvizek jelentik a biohulladékok következő nagyságrendjét. A biológiai szennyvíztisztítás során keletkező úgynevezett fölösiszap igen magas szervesanyag tartalmú. A szennyvíztelepek iszapkezelése ma még jelentős arányban megoldatlan.

Az élelmiszeripar, ezen belül elsősorban a vágóhidak termelik a biohulladékok igen jelentős volumenét, melyek gyakorlatilag veszélyes hulladéknak minősülnek. Ártalmatlanításuk így jelentős költséget igényel. Különös figyelemmel kell lenni a vágóhídi hulladékok és az állati hullák ártalmatlanítása során az állategészségügyi problémák megelőzésére.

A biohulladékoknak, keletkezési helyüktől és körülményeiktől függetlenül közös tulajdonságuk, hogy biotechnológiai eljárásokkal – a költséges ártalmatlanítás helyett – energiatermelésre és a mezőgazdaságban tápanyag utánpótlásra hasznosíthatók.

### 50. táblázat. Energiatermelés biohulladékokból.

Állatfajta	Biogáztermelés (m <sup>3</sup> /év)	Fűtőolaj-egyenérték (kg/év)
1 tehén	482	241
1 hízómarha	307	154
1 ló	730	365
1 koca+szaporulat	201	101
1 hízó	56	28
1 juh	58	29
1000 csirke	1450	730

A biológiai hulladékok levegőtől elzárt, úgynevezett anaerob körülmények között, megfelelő hőmérsékleten baktériumok segítségével fermentálódnak. A fermentáció során nagy mennyiségű biogáz (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>) keletkezik, melynek energiataralma, mintegy 2/3-a (23 MJ/m<sup>3</sup>) a földgáznak.



A biogáz gázmotorban elégetve villamos és hőenergia termelésre hasznosítható. A fermentáció során a patogén baktériumok és gyommagvak elpusztulnak, így a mezőgazdaság számára kiváló, tápanyagban gazdag biotrágya jön létre.

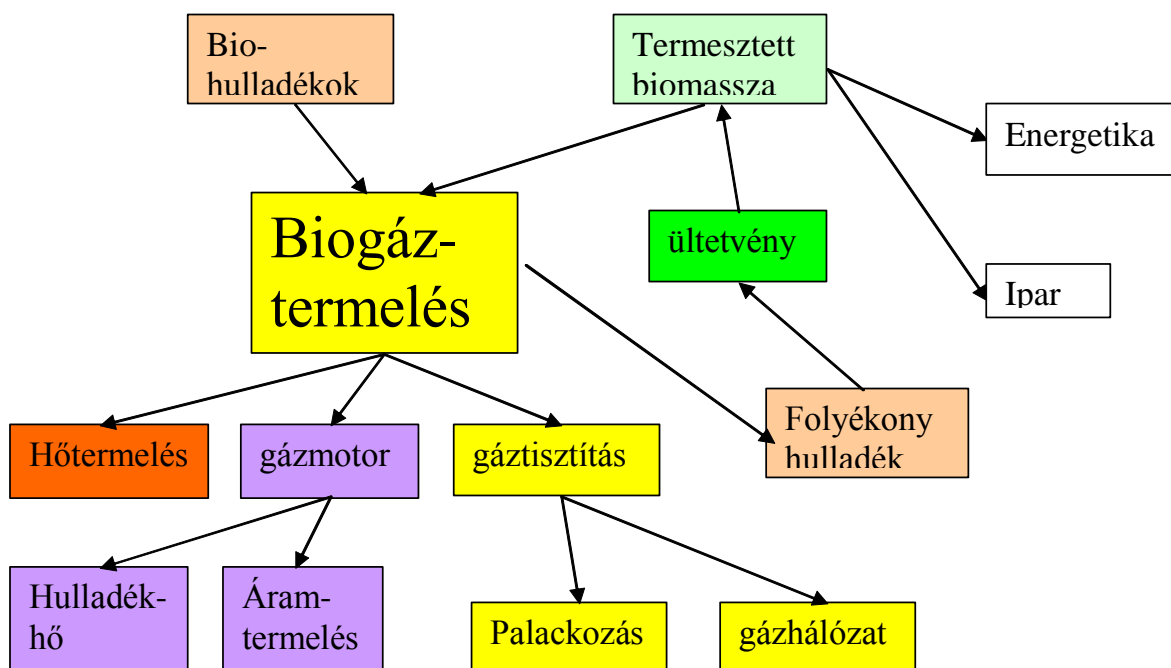
Mindenek előtt megoldható az ágazat saját környezetvédelmi problémája. Ugyanakkor egyéb árbevételre tehet szert, mert csak a mezőgazdasági ágazat képes a nemzetgazdaság más ágazataiban keletkező biohulladékok fogadására is, mert ezé az ágazaté a termőföld, ahol a keletkező biotrágya hasznosítható.

### A biogáz előállításának legelterjedtebb módszerei:

Külföldön (elsősorban Kínában és Indiában) legnagyobb számban kis, családi méretű biogáz-termelő aknák létesültek. Az infrastruktúrával nem rendelkező régiókban az ábrán bemutatott kis berendezésből több, mint 10 millió darab üzemel.

Biogáz-telepet biológiai hulladékokkal, moslékkal, szerves trágyával, mezőgazdasági melléktermékekkel, illetve ezek kombinálásával lehet üzemeltetni. A szabadalmazott zárt csőfermentálóban az anaerob baktériumok a biológiai hulladékokat lebontják és nagy metán gáz-tartalmú, 19-20 MJ/m<sup>3</sup> fűtőértékű biogázt állítanak elő. A fermentálás után a nitrogén tartalmú folyadékot, mint jó minőségű trágyát a szántóföldekre, szerves trágyaként lehet kijuttatni.

## Biogáz-termelés és hasznosítás



199. ábra. Biogáz-termelés és hasznosítás.

A keletkezett gázt megfelelő komprimálás után közvetlenül gázmotorokban, kazánokban is fel lehet használni, illetve gázhálózaton vagy palackozás útján más felhasználóhoz is el lehet juttatni.

A gázmotorok által termelt elektromos energiát – amennyiben helyi felhasználó nincs – az elektromos hálózatba lehet táplálni. A gázmotorok hűtésekor kinyerhető hőenergiát (hulladék hő) távfűtésben, üvegházak fűtésénél, stb. illetve használati melegvíz előállítására lehet felhasználni.

A keletkező biogáz tisztítására külön gondot fordítanak. Külön berendezést (SO<sub>2</sub>-mosót) alkalmaznak abban az esetben, ha H<sub>2</sub>S keletkezésével is számolni kell. H<sub>2</sub>S-mosó alkalmazásával elérhető, hogy a biogáz felhasználása közben keletkező égésgázok nem, vagy csak határérték alatt tartalmazzanak SO<sub>2</sub>-t

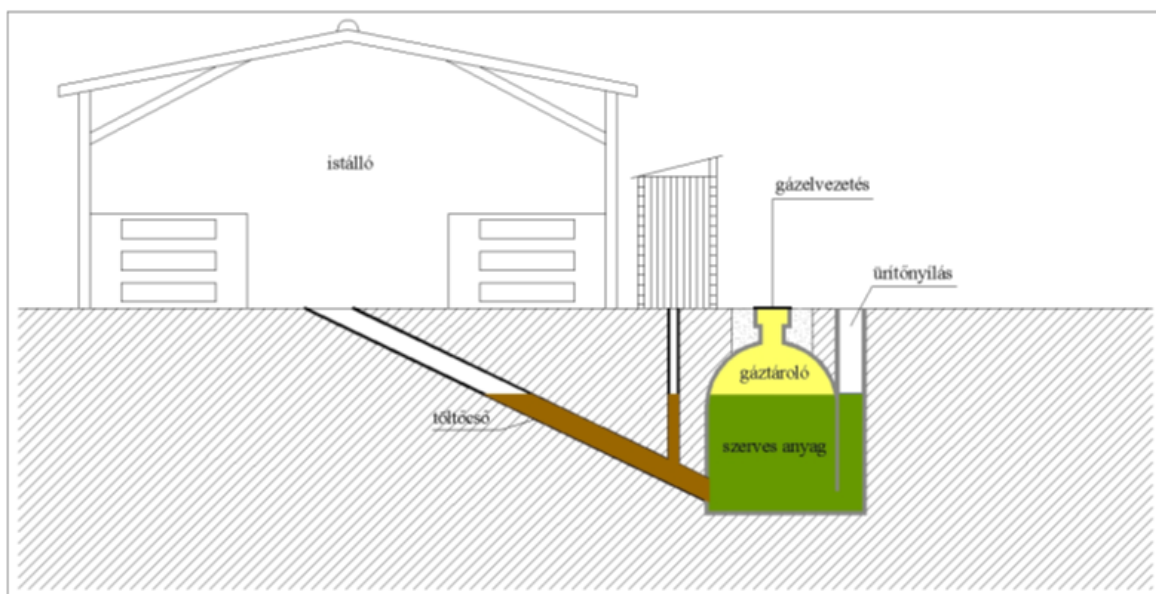
A technológiába egyre gyakrabban beépítik a gáztartályt. Ennek oka az, hogy a gáztermelés és a gázelvétel csak a legkritikább esetben valósítható meg azonos és állandó gázárammal. A gázképzés és a gázfelhasználás közötti különbségeket gáztárolókkal egyenlítik ki. Az utóbbi időben nagyon terjednek a rugalmas lemezből készített ún.: fóliatartályok.

A biogáz energetikai hasznosítására két alaptechnológia terjedt el.

- Hőtermelés közvetlen elégetéssel. Ebben az esetben a gáz elégetése égőfejekben történik. A felszabaduló hővel hőhordozót melegítenek, és a hőenergiát fűtéshez, HMV előállításához használják fel
- A gáz felhasználása hajtóanyagként belsőégésű motorban döntően villamosenergia előállítására.

Korábban a legelterjedtebb megoldás a hőtermelés volt. A hőigény azonban nagymértékben függ az évszakoktól, ezért egy egyenletesebb gázfelhasználás céljából az utóbbi időben hő- és villamos energia kapcsolt termelésében nagyobb lehetőségeket látnak.

A biogázt lokális felhasználáshoz viszonylag egyszerű berendezésekkel is elő lehet állítani. Ilyen esetben a fő cél a biomassza mint hulladék ártalmatlanítása, és ha erre lehetőség van, a keletkező gáz hasznosítása (főként égőfejjel hőtermelésre)



200. ábra. Biogáztermelő akna.

A nagyobb szennyvíztisztító telepeken évtizedek óta alkalmazzák az ún. folyékony biogáztermelő technológiát. A biológiai tisztítás során keletkező fölösiszapot 4-6% szárazanyag-tartalomra besűrítve iszaprothasztóba vezetik. A keletkező biogázt a szennyvíztisztító telep saját energiaellátására hasznosítják. A kirohadt iszapot víztelenítés után komposztálják, a csurgalékvizet tisztításra visszavezetik a szennyvíztisztítási technológiára.

Az elmúlt két évtizedben – Európa szerte – igen dinamikusan terjed az állattartó telepeken keletkező trágya hasznosítására az ún. nedves eljárás, amit az ábra szemléltet.

Az eljárás lényege, hogy speciális, aprítókéses szivattyúkkal és keverőkkel 12% szárazanyag-tartalmú trágya homogenizálása, szállítása és keverése is megoldható. A magasabb szárazanyag tartalmú trágya hasznosítása kisebb fermentor térfogatot igényel. A keletkező biotrágyát 180 napos tározás után a termőföldön tápanyag-utánpótlásra hasznosítják. A technológia elsősorban a híg sertétrágya és az ezzel együtt kezelt magasabb szárazanyag-tartalmú biomassza hasznosítására alkalmas.

A villamosenergia-termeléshez három jól elkülöníthető megoldást alkalmaznak. Ezek a következők:

- generátorhajtás belsőégésű motorral
- generátorhajtás gázturbinával
- generátorhajtás gőzmotorral.

A belsőégésű motorra alapuló technológia esetében a rendszer fő elemei:

- a fogadó és keverőtartály
- a fermentor
- a gáztartály
- a kirohadt biotrágya tárolója
- a gázmotoros energiaközpont
- a biztonsági okok miatt a gázmotorral párhuzamosan kapcsolt égőfej

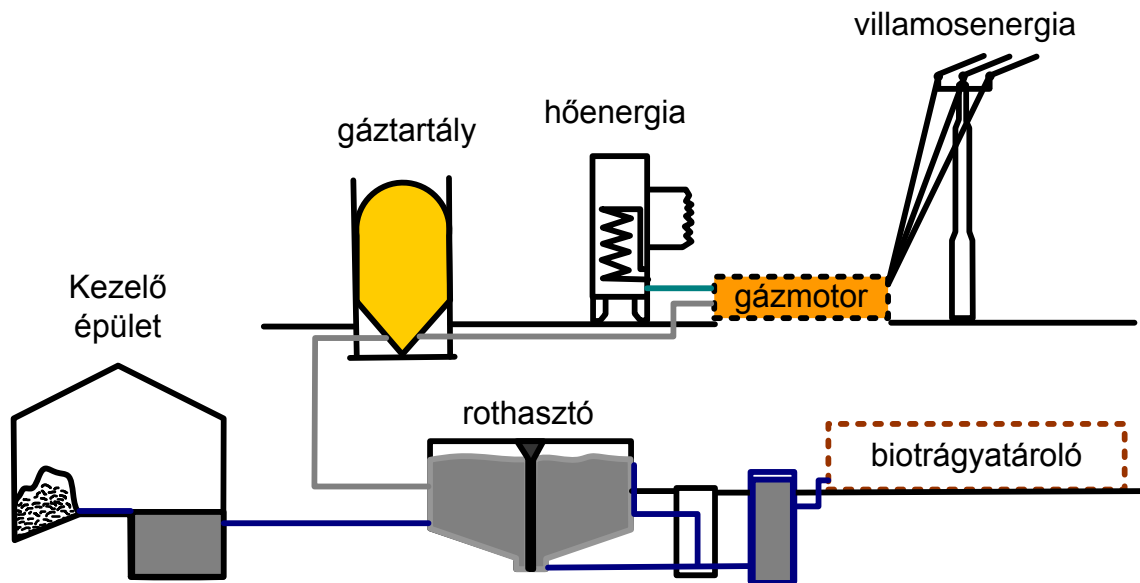
Egy 100 m<sup>3</sup>/nap tehéntrágyára (9-10% szárazanyag-tartalom) anyagbevitelre alapozott biogáztelepen 2500 m<sup>3</sup> űrtartalmú ENTEC-BIMA fermenter, 500 m<sup>3</sup>-es gáztartály, 1050 kW névleges teljesítményű fáklya (150 m<sup>3</sup>/h) és gázmotoros generátor (240 kW elektromos, 365 kW termikus teljesítménnyel) található.

A gázkihozatal 27-30 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> trágya, a keletkező gáz kb. 60% CH<sub>4</sub>-t tartalmaz, aH<sub>2</sub>S tartalom <1000 ppm.

A gáztartályból vételezett gáz energiatartalma a gázmotoros generátor üzemeltetésekor áramtermelésre (kb 30%) és hőtermelésre használandó el.

Az áram egy része értékesítésre kerül. Egy kisebb része (kb 20%) a biogáz-üzem működtetéséhez szükséges.

A keletkező hő az üzem létesítményeinek fűtéséhez, a fermentor fűtéséhez és forró víz előállítására (távfűtés) kerül felhasználásra.



201. ábra. Nedves (sz.a. < 12%) biogáz-technológia.

Újabban világszerte erős a törekvés az un. száraz 25-50% szárazanyag-tartalmú biomassza fermentálása is.

A bemutatott eljárások alapanyaganyag-specifikusak. Világszerte számos változatuk létezik, melyek lényege közös, nevezetesen az, hogy a biomasszában rejlő energiát és tápanyagot minél hatékonyabban hasznosítsák.

Európában és a világ fejlett országaiban rendkívül dinamikus fejlődik a megújuló energiaforrásokból – ezen belül a biomasszából – származó villamosenergia felhasználása. Ennek megfelelően főként a villamosenergia-termelést szolgáló biogáz-technológiákat fejlesztik.

### Új külföldi fejlesztési eredmények és alkalmazástechnikai megoldások.

A külföldi biogáz-technológiák, és az azok megvalósításához szükséges technikák fejlesztésének elemzése közben sok olyan szempontot határozhatunk meg, melyek hazai figyelembe vételét indokoltnak tartjuk.

Ezek közül a fontosabbak a következők:

- a biogáztermelés alapanyagául lehetőleg keverékeket használnak. A keverékek optimális receptjét laboratóriumi fermentálási kísérletekkel határozzák meg.
- a biogáztelepet modulrendszerben építik meg. Ez azt jelenti, hogy részegységként fejlesztett rendszerelemeket a szerint válogatnak és kapcsolnak össze, hogy milyen alapanyagból milyen célra és milyen hozattal mellett kívánják biogázt előállítani.
- Nagy figyelmet fordítanak a fermentor kialakítására. Ez a rendszerelem álló illetve döntött kivitelben készül.

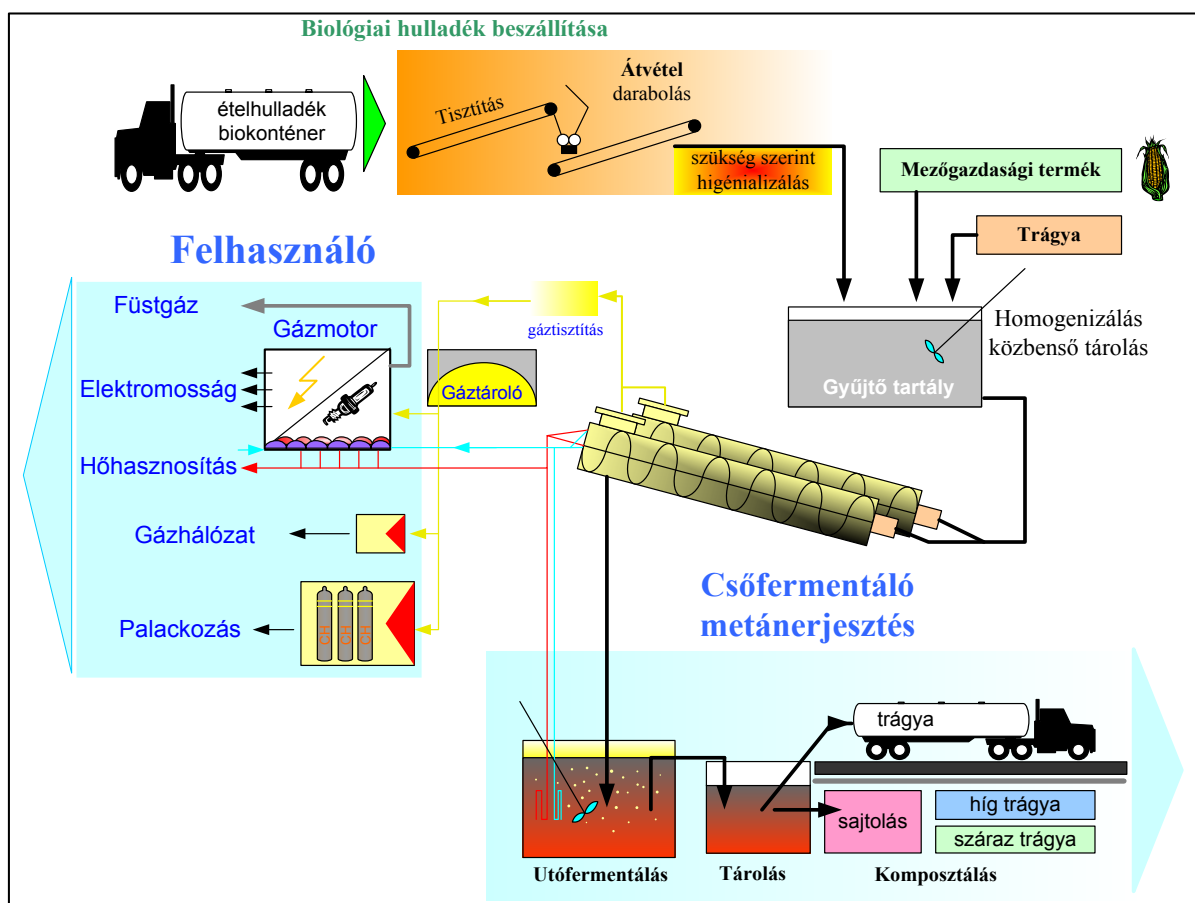
Biogáz-telepet biológiai hulladékokkal, moslékkal, szerves trágyával, mezőgazdasági melléktermékekkel, illetve ezek kombinálásával lehet üzemeltetni. A szabadalmazott zárt csőfermentálóban az anaerob baktériumok a biológiai hulladékokat lebontják és nagy metán gáz-tartalmú, 19-20 MJ/m<sup>3</sup> fűtőértékű biogázt állítanak elő. A fermentálás után a nitrogén tartalmú folyadékot mint jó minőségű trágyát a szántóföldekre, szerves trágyaként lehet kijuttatni.

A keletkezett gázt megfelelő komprimálás után közvetlenül gázmotorokban, kazánokban fel lehet használni, illetve gázhálózaton vagy palackozás útján más felhasználóhoz is el lehet juttatni.

A gázmotorok által termelt elektromos energiát – amennyiben helyi felhasználó nincs – az elektromos hálózatba lehet táplálni. A gázmotorok hűtésekor kinyerhető hőenergiát (hulladékhő) távfűtésben, üvegházak fűtésénél, stb. illetve használati melegvíz előállítására lehet felhasználni.

A technológiába egyre gyakrabban beépítik a gáztartályt. Ennek oka az, hogy a gáztermelés és a gázelvétel csak a legritkább esetben valósítható meg azonos és állandó gázárammal. A gázképzés és a gázfelhasználás közötti különbségeket gáztárolókkal egyenlítik ki. Az utóbbi időben nagyon terjednek a rugalmas lemezből készített ún.: fóliatartályok.

## Biogáz berendezés elvi kapcsolási vázlatja



202. ábra. Csőfermentoros biogáztelep komplex hasznosítással.

A biogáztelepek a jövőben igen nagy szerephez juthatnak. A szennyvíz-telepek iszapjának ártalmatlanításán túl gyors elterjedésük várható a biotechnológiai üzemekhez (bioalkohol-üzem, biodízel-üzem) kapcsolódó létesítményként, hiszen a bio-hajtóanyag-üzemek melléktermékeit is ártalmatlanítani kell.

Fontos szerephez juthatnak a kis biogáz-berendezések az élelmiszer-maradványok (éttermi maradékok, konyhai hulladékok, stb.) mint veszélyes hulladékok

ártalmatlanításában. Ilyen célra kisteljesítményű berendezéseket fejlesztettek ki (20-500 kWe). Ilyen teljesítmény-határok között előnyös a gázturbina használata.



**203. ábra. Kisteljesítményű gázturbinák (24 kW) párhuzamos üzemmódban.**

A turbinákkal áramtermelést végezhetnek, mellyel az objektumban hűtők, klímaberendezések, vizes boilerok működtethetők, de az áram hálózatra is adható. A hulladékhőt HMV előállításához lehet felhasználni. A gázturbinák párhuzamos elrendezése lehetővé teszi, az áram iránti igény hiányában a keletkező gáz részben vagy teljes egészében gázégők felhasználásával HMV előállításához vagy fűtéshez kerüljön felhasználásra.

## Szélenergia

Dr. Patkó István, Budapesti Műszaki Főiskola

A szél mozgási energiájának mechanikai munkává alakítását az emberiség évezredek óta végzi. Vitorlával átalakított szélenergíát hajók mozgatására használták és használják napjainkban is. Ezt azért lehet biztonságosan megtenni, mert a tengerek, óceánok és nagy vízfelületű tavak felszínén egyenletes „kifúj” széljárás van. A szárazföld felszínén már kevésbé egyenletes és mindenképpen gyengébb a szél. Ezt a „legyengült” szelet szélkerék révén lehet munkavégzésre kényszeríteni. A szél mozgási energiáját a szélkerék forgómozgássá, illetve a szélkerék tengelyén levehető forgómozgássá és nyomatókká alakítja. Ezzel a nyomatókkal lehet mechanikai munkát végezni, pl. szélmalomok esetén a malmot hajtani vagy kútszivattyúkat működtetni, vizet felszínre hozni, illetve mezőgazdasági öntöző rendszereket üzemeltetni. Napjainkban pedig a villamos generátor forgórészének tengelyét forgatva elektromos áramtermelésre lehet a szélenergíát használni.

Ma már bizonyított tény, hogy gazdaságosan működő – 5-10 év alatt megtérülő – szélkerekeket csak olyan helyre érdemes telepíteni, ahol egyenletes a szél és az éves átlagos szélebbesség  $6 \text{ m/s}$  fölött van. Így tengerparti részekre, nagy kiterjedésű fennsíkokra, síkvidékekre gazdaságos szélkerekeket telepíteni.

Magyarország Európa szélcsendes területei közé számít. Az Országos Meteorológiai Szolgálat mérései alapján az átlagos szélebbesség értékei a  $2.5 - 3.5 \text{ m/s}$  tartományba esnek, lásd 51. táblázat. Ezeket a sebességértékeket 10 m-rel a talajfelszín felett mérték.

51. táblázat. Átlagos szélebbességek az OMSZ mérései alapján.

A szél sebességének átlagos havi értékei ( $\text{m/s}$ )													
Hely \ Hónap	Jan.	Febr.	Márc.	Ápr.	Máj.	Jún.	Júl.	Aug.	Szept.	Okt.	Nov.	Dec.	Éves középérték
Budapest, Csillagvizsgáló	3,4	3,6	3,9	3,7	3,1	3,0	2,9	3,1	3,0	3,3	3,2	3,6	3,3
Budapest, Obszervatórium	3,3	3,7	4,1	4,2	3,7	3,6	3,5	3,6	3,2	3,3	3,0	3,6	3,6
Debrecen, Repülőtér	3,3	3,2	3,5	3,5	3,2	2,8	2,7	2,5	2,5	2,6	2,5	3,0	2,9
Kecskemét	3,0	3,2	3,7	3,6	3,0	2,7	2,6	2,6	2,5	2,7	2,6	3,2	3,0
Kékestető	3,2	3,2	3,1	3,4	2,6	2,2	2,4	2,6	2,8	3,6	3,3	3,6	3,0
Keszthely	2,6	2,8	3,5	3,5	2,8	3,0	2,4	2,5	2,1	2,4	3,0	3,0	2,8

A szélebbesség adataiból is kitűnik, hogy nem várható a szélkerekek – szélörvények – rohamos elterjedése Magyarországon. Természetesen kivételt képez, ha a magyar kormány politikai döntése alapján gyorsul fel a szélörvények elterjedése.

2005. december 31-én Magyarországon 10 településen, 16 db szélérőmű üzemelt, 17,475 MW együttes beépített teljesítménnyel. Az erőművek által termelt villamos energia nem érte el Magyarország villamos energia igényének 0,3 %-t. Európában (EU-25) – 2004. december 31.-én – összesen 34.205 db szélérőmű működött. A legtöbb erőmű – 16.629 db – Németországban található, míg Szlovákiában nem volt szélérőmű. A szélérőművek magyarországi elterjedésének nem csak földrajzi akadálya van, hanem létezik egy ún. villamos energia rendszer szabályozhatóságából adódó korlát is.

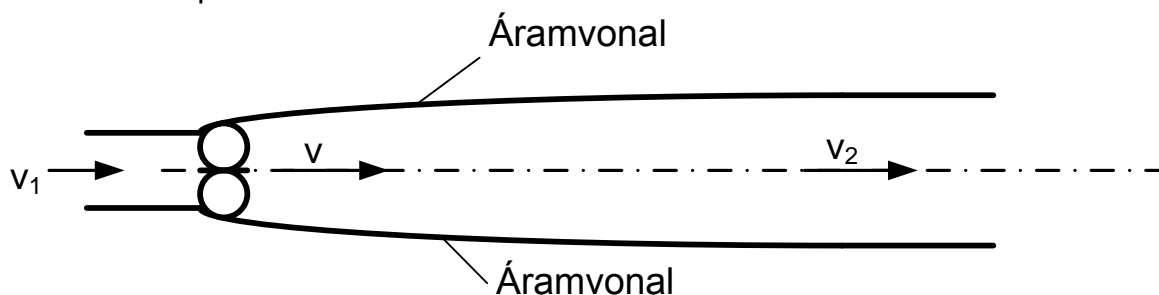
Képzeljük el, - a példa kedvéért – hogy a beépített szélérőművek teljesítménye eléri a 300 MW-ot. Mivel a szélérőművek teljesítménye a széljárástól függ, kisebb szélességek esetén esetleg csak 10-20 MW teljesítménnyel, míg nagyobb szélességek esetén 250-280 MW teljesítménnyel üzemelnének. Mivel a villamos energia nem tárolható, a termelésnek és a fogyasztásnak minden pillanapban meg kell egyeznie. Ezért készenlétben kell tartani olyan hagyományos erőműveket, amelyekkel a gyors változásokat is lehet követni. Német tapasztalatok szerint a szélérőművek beépített teljesítményének több mint 90 %-ig kell készenlétben tartani hagyományos erőművek kapacitását. A rendszer szabályozhatósága nagyobb tartalék tartásával (ezek lehetnek nem csak termelők, hanem fogyasztók is) tehát javítható, ami pénzbe kerül. Ezt a többlet költséget a fogyasztónak kell megfizetni.

A továbbiakban csak a szélenergiából nyerhető villamos energia előállítását vizsgáljuk. Azon berendezések együttesét, amelyek erre képesek szélérőműveknek nevezzük.

## Szélenergia átalakításának fizikai korlátja

Könnyen belátható, hogy a „ $v$ ” sebességű szél teljes mozgási energiája nem alakítható át mechanikai munkává, mert ha ez megtörténne, akkor a szélesség a szélkerék után  $v=0$  lenne, ami fizikai képtelenség.

A szélkerék megfordított munkafolyamatú légcsavar. A légcsavar a levegő felgyorsítása árán vontató erőt hoz létre. A szélkerék a levegő lelassítása útján teljesítményt ad le. A szélkerék síkjában (204. ábra) kialakuló átlagos szélesség messze a szélkerék előtt és messze a szélkerék mögött uralkodó sebességek számtani középértéke.



204. ábra. Szélkerék áramlási viszonya

Az ábrán és a levezetésben használt jelölések:

$v_1$ [m/s]	—	szélkerék előtti szélesség
$v_2$ [m/s]	—	szélkerék utáni szélesség
$v$ [m/s]	—	szélkeréken áthaladó szélesség
$F$ [m <sup>2</sup> ]	—	szélkerék által súrolt kör területe
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	—	levegő sűrűsége
$N$ [W]	—	szélkerék tengelyéről levehető teljesítmény



$$v_1 > v_2 \quad \text{és} \quad v = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

Az ideális szélkerék felületén áthaladó  $\rho F \frac{v_1 + v_2}{2}$  levegőtömeg mozgási energiacsökkenését veszteség nélkül hasznosítja.

$$N = \frac{1}{2} \rho F \frac{v_1 + v_2}{2} (v_1^2 - v_2^2)$$

Ez a teljesítmény adott  $v_1$  mellett annál a  $v_2$  sebességnél lesz a legnagyobb, melynél:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial v_2} &= \frac{F\rho}{4} [(v_1^2 - v_2^2) - v_1 + v_2] 2v_2 = \\ &= \frac{F\rho}{4} (-3v_2^2 + v_1^2 - 2v_1v_2) = 0 \end{aligned}$$

Vagyis:

$$\left(3 \frac{v_2}{v_1}\right)^2 + 2 \frac{v_2}{v_1} - 1 = 0$$

Amelyből:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{-2 + \sqrt{4 + 4 \cdot 3}}{2 \cdot 3} = \frac{1}{3}$$

Ekkor:

$$\frac{\partial^2 N}{\partial^2 v_2^2} = \frac{F\rho}{4} (-6v_2 - 2v_1) = \frac{F\rho}{4} (-12v_2) < 0$$

tehát  $N$ -nek valóban maximuma van.

Adott keresztmetszetű ideális szélmotor tehát akkor ad legnagyobb teljesítményt, ha a szél sebességét  $1/3$ -ra fékezi le. Ekkor a szélkeréken való áthaladás sebessége a szél sebességének  $2/3$ -a. A maximális teljesítményt pedig az

$$N_{\max} = F \frac{\rho}{2} \frac{v_1 + \frac{v_1}{3}}{2} \left( v_1^2 - \frac{v_1^2}{9} \right) = \frac{16}{27} \frac{\rho}{2} F v_1^3 = 0.593 \frac{\rho}{2} F v_1^3$$

összefüggéssel lehet meghatározni. A valóságos szélérőmű a különféle veszteségek miatt ennek a teljesítménynek mintegy 30-60 %-t szolgáltatja.

## Szélerőmű szerkezeti felépítése

Szélerőmű távlati képe látható a 205. ábra



**205. ábra. Szélerőmű**

A szélerőmű három fő szerkezeti elemből áll:

- alapzat
- tartótorony
- gondola

### Alapzat

Általában 10-15 m átmérőjű 1,5-2,5 m mély, csonka kúp alakú vasbeton szerkezet. Feladata, hogy a létesítmény stabilitását biztosítsa, és karimás kötéssel csatlakozik hozzá a kb. 100t súlyú tartótorony.

### Tartótorony

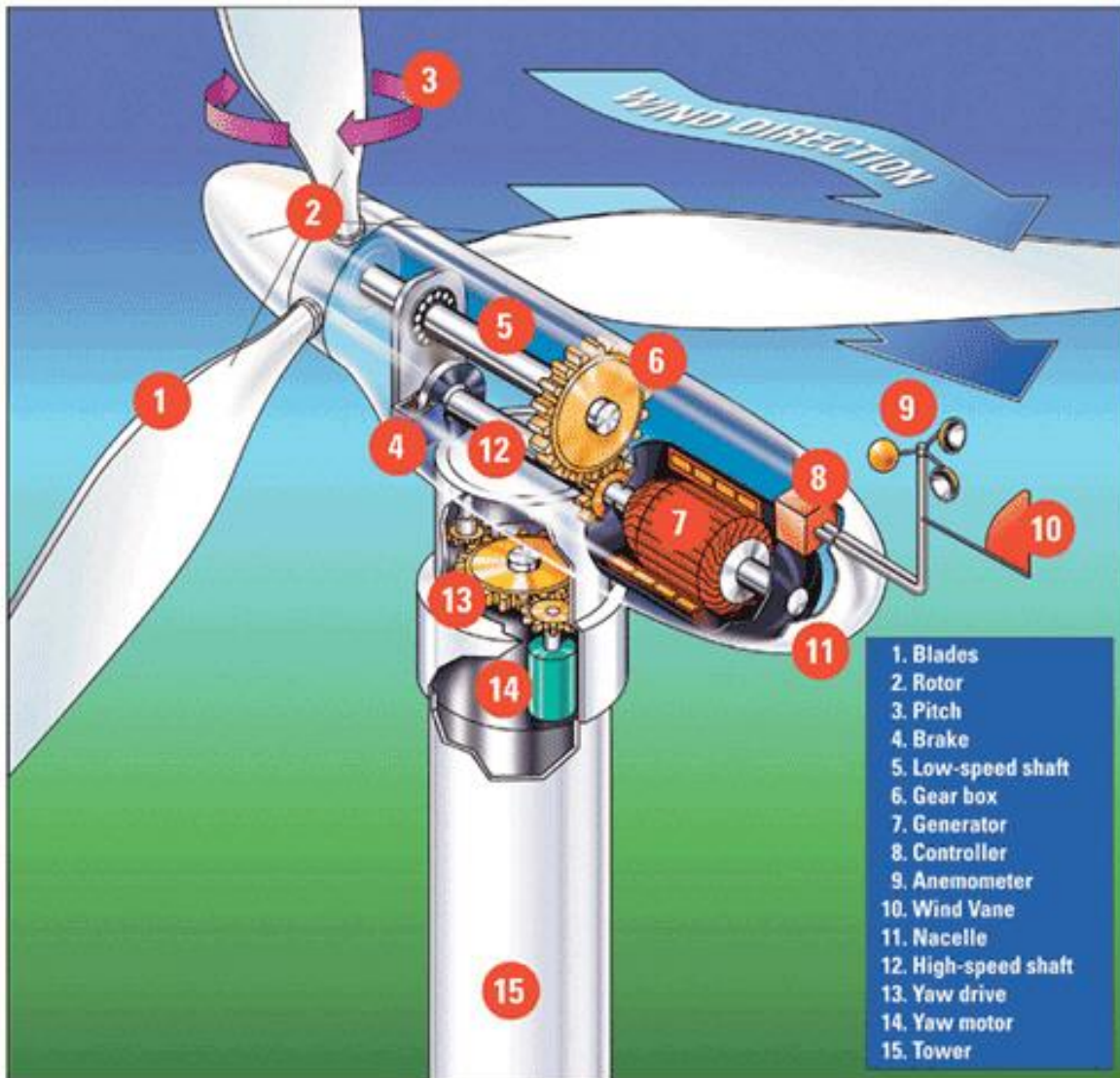
50-70 m magas 15-20 mm falvastagságú kúpos cső. Alsó átmérője 2-3 m, a felső átmérője 1-1,5 m.

Feladata, hogy tartsa a gondolát.

A tartótoronyban – földszinten – helyezik el a megtermelt áram átalakító és irányító berendezéseit.

### Gondola

Általában 4-5 m átmérőjű, 8-12 m hosszú elem. A gondola axonometrikus képe látható a 206. ábra



206. ábra. Szélerőmű gondolájának axonometrikus rajza

A 206. ábra feltüntetett elemek:

- **Szélesség mérő (9. Anemometer):** méri a szél tényleges, mindenkori sebességét és a mért adatokat a vezérlőegységhez továbbítja.
- **Lapátok (1. Blades):** két, három lapáttal rendelkeznek a turbinák. A lapátok saját tengelyük körül elfordíthatók. Így szabályozni lehet a szélkerék fordulatszámát. Anyaguk általában üvegszál erősítésű műanyag. Éleibe villámhárító huzalokat építenek. Külső felületük védőréteggel van bevonva.
- **Fék (4. Brake):** tárcsafék, lehet mechanikus, elektromos, hidraulikus elven működő. Feladata, hogy vészhelyzetben megállítsa a szélkereket.
- **Vezérlő (8. Controller):** 2-3 m/s-os szélességnél elindítja a kereket, míg 20-30 m/s szélességnél leállítja. Így biztosítja az erőmű biztonságos üzemét.
- **Sebességváltó (6. Gear box):** a szélkerék tengelye és a generátor tengelye közötti kapcsolatot biztosítja és a 30-60 1/perc szélkerék fordulatszámot átalakítja 1200-1500 1/perc-re, ami szükséges a generátor működéséhez.

Költséges és nagy súlyú elem, ezért gyakran elhagyják. Így a szélkerék közvetlenül hajtja meg a generátort.

- **Generátor (7. Generator):** több pólusú generátor, váltóáram előállítására.
- **Generátor tengely (12. High-speed shaft):** generátor forgórészének tengelye (1200-1500 1/perc).
- **Gondola (11. Nacelle):** általában akkorák, hogy bennük kényelmesen el lehet végezni a javításokat és karbantartásokat.
- **Lapát állásszöge (3. Pitch):** a lapát keresztmetszetét olyanra alakították, mint egy repülőgép szárnyszerkezete. Így mikor a szél körüláramolja a lapátot, akkor a lapáton egy felhajtóerő keletkezik, ami a szélkereket forgásra kényszeríti.
- **Széliránymérő (10. Wind vane):** meghatározza a tényleges szélirányt és ennek függvényében vezérli a gondola elfordításának (szélre állításának) hajtását, hogy állítsa szélre a szélkereket.
- **Gondola elfordító (13. Yaw drive):** a széliránymérő vezérlésének megfelelően gondoskodik arról, hogy a szélkerék mindig szélirányban álljon.

## A szélerőmű működése

A szélerőművek alapvetően két üzemmódban üzemeltethetők:

- sziget üzemmód
- hálózatra táplálási üzemmód

### Sziget üzemmód

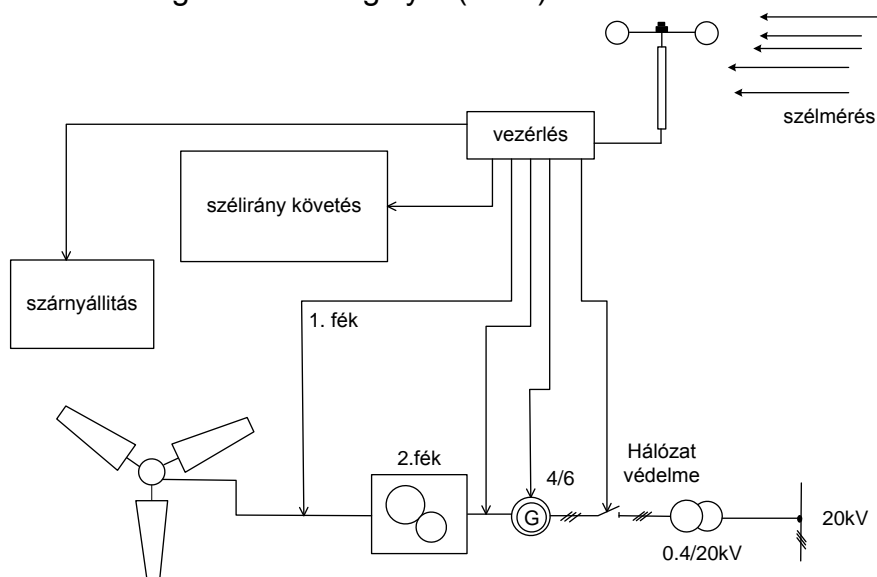
Sziget üzemmódról akkor beszélünk, ha a termelt villamos energia nem kerül betáplálásra az országos hálózatba. A termelt villamos energiát az országos hálózattól függetlenül – általában – az előállítás helyen használják fel, pl. a villamos elosztó hálózattól távol lévő farmok, tanyák, üzemek villamos energia igényének kielégítésére.

### Hálózatra táplálási üzemmód

A megtermelt villamos energia betáplálásra kerül az országos vagy helyi villamos energia elosztó hálózatba. A betáplált energia értékét az elosztó hálózatot üzemeltető (az áramszolgáltató) megfizeti a szélerőmű tulajdonosának.

A hálózatra táplálási üzemmód elvi kapcsolása látható a 207. ábra.

Ezen az ábrán egy olyan szélerőmű elvi kapcsolása látható, ahol két fék van (1.fék és 2.fék), külön fékezik a generátor tengelyét (2.fék)



207. ábra. Hálózatra táplálási üzemmód elvi kapcsolási vázlata.

A működés során a szél energiája megforgatja a lapátkereket, amelynek fordulatszámát és a lapátok állásszögét egy számítógépes program vezérli úgy, hogy a megfelelő értéket a pillanatnyi, mért szélesebségtől függően állítja be.

A generátor változó feszültségű, változó frekvenciájú, váltakozó áramot termel. Ezt az áramot kábelek viszik le a torony aljába, ahol az inverter első lépésben egyen irányítja, majd második lépésben átalakítja 0,4 kV/50Hz-es árammá.

Az áram, kilépve a toronyból, kábeleken át kerül be a különálló transzformátor házba, ahol a transzformátor 20 kV feszültségszintre transzformálja fel. Ugyancsak a transzformátor házban kapott helyet az elszámolási mérés, mely alapján fizet az áramszolgáltató a szélerőmű tulajdonosának.

A transzformátort elhagyó közép feszültségű áram föld-, vagy légkábelen át jut be az áramszolgáltató 20 kV-os hálózatába.

A szélerőmű akkor kezdi meg az áramtermelését ha:

- szélesebség eléri a minimális, ún. indítási értéket a 2-3  $m/s$ -t
- ha a befogadó hálózat (20 kV-os) üzemel, feszültség alatt van.

A szélkerék mindig automatikusan a szélirányra merőlegesen áll be. A rendszert vezérlő program a kerék fordulatszámát minden pillanatban – a lapát állásszögének változtatásával – úgy szabályozza, hogy az energiaátalakítás hatásfoka maximális legyen. Ha a szélesebség eléri a rendszer számára maximális 20-30  $m/s$  értéket, akkor a túlzott erőhatások elkerülése érdekében a fék illetve a fékek leállítják a rendszert.

Magyarország első szélerőművének fontosabb műszaki adatait az 52. táblázat tartalmazza.

**52. táblázat. A Kulcson telepített erőmű műszaki adatai.**

1.	Típus:	ENERCON E-40 Nyomatékváltó nélküli változtatható Fordulatszámú és lapátszögű.
2.	Névleges teljesítmény:	600 kW
3.	Tengelymagasság:	65 m
4.	Lapátkerék átmérője:	44 m
5.	Lapátok száma:	3 db
6.	Fordulatszám:	18-341/p
7.	Indítási szélesebség:	2,5 m/s (9 km/h)
8.	Biztonsági leállítás:	25 m/s (90 m/s)
9.	Kilépő feszültség:	440 V
10.	Hálózati betáplálás:	20000 V
11.	Tervezett energiatermelés:	1200MWh/h/év
12.	Első évben megtermelt energia:	1230MWh

## Geotermikus energia

### Alapfogalmak

A „geotermikus” szó görög eredetű és jelentése „földi” vagy földből származó. Így a geotermikus energia a föld természetes hőjét jelenti, ami a Föld belsejében keletkezik és a felszín felé áramlik. Ez a termikus energia hővezetés révén felmelegíti a felszín alatti kőzeteket és a kőzetekben tárolt, ún. pórusvizeket. Ezen pórusvizeket nevezik hévizeknek vagy termálvizeknek. Könnyen belátható, hogy a Föld felszín egy adott pontján minél vékonyabb a földkéreg és minél több a pórusokban tárolt víz mennyisége, annál gazdagabb a terület geotermikus energiában. A Föld középpontjában körülbelül 7000 °C hőmérséklet uralkodik. Ez az óriási hőmérséklet két módon jött létre. Megközelítőleg 4600 millió éve, bolygónk anyagának kondenzálódásának idején a belső részek rendkívül gyorsan felmelegedtek, mivel a sűrűsödő anyagok kinetikus energiája hőenergiává alakult. Másrészt a Föld belsejében hosszú bomlási idejű izotópok találhatóak, mint például a tórium 232, az uránium 238 és a kálium 40. Ezek bomlása során hő szabadul fel, mely megközelítőleg  $5 \times 10^{20}$  J/év. A radioaktív bomlás mértéke exponenciálisan csökken, ezért feltételezhetően a Föld kialakulása után közvetlenül a radioaktív bomlásból származó hő ötszöröse lehetett a maénak. Földünk felszínére a Föld belseje felől érkező hőmennyiség átlagosan  $10^{20}$  J/év. A hő azért áramlik a Földmag felől a litoszféra irányába, mert közöttük jelentős hőmérséklet-különbség van.

Mielőtt tovább vizsgálnánk a geotermikus energia felhasználását az alábbi három fogalom bevezetése szükséges:

- geotermikus  $gg$  gradiens (gg): az egységnyi mélységnövekedéshez tartozó hőmérséklet növekedés.  
mértékegysége:  $\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{m}}$
- közethővezető  $\lambda$  képessége ( $\lambda$ ): megmutatja, hogy 1 m<sup>2</sup> felületű, 1 m vastag kőzeten 1°C hőmérsékletkülönbség hatására, 1s alatt mekkora hőmennyiség áramlik át.  
Mértékegysége:  $\frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}}$
- hőáram,  $\Phi$  hőfluxus ( $\Phi$ ): a hőáramra merőleges 1m<sup>2</sup> felületen 1s alatt átáramló hőmennyiség  
Mértékegysége: W

Így egy adott mélységben lévő hőáram ( $\Phi$ ) egyenlő ugyan abban a mélységben mért geotermikus gradiens ( $gg$ ) és kőzet hővezető képességének ( $\lambda$ ) szorzatával azaz:

$$\Phi = \lambda * gg \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

### Magyarország geotermikus adottságai

A Kárpát-medence, de különösen Magyarország területe alatt a földkéreg az átlagosnál vékonyabb, ezért hazánk geotermikus adottságai igen kedvezőek. A Föld belsejéből kifelé irányuló hőáram átlagos értéke 90-100 W/m<sup>2</sup>, ami mintegy kétszerese a kontinentális átlagnak. Az egységnyi mélységnövekedéshez tartozó hőmérsékletemelkedést jelentő geotermikus gradiens átlagértéke a Földön általában 0,020-0,033 °C/m, nálunk pedig általában 0.042-0,066 °C/m. A fenti termikus adottságok miatt nálunk 1000 m mélységben a réteghőmérséklet eléri, sőt meg is

haladja a 60 °C-t. A hőmérsékleti izotermák 2000 m mélységben már 100 °C feletti mezőket fednek fel.

A geotermikus energia hordozóját a Kárpát-medencében döntően a termálvíz képviseli, amely a nagy vastagságú, több helyen 6 km-t is meghaladó üledékes kőzetösszletek porózus – permeábilis tartományait tölti fel.

Magyarország felszínét többnyire fiatal üledékes- és vulkáni kőzetek fedik. A több ezer méter mélységben húzódó medencealjzat szerkezetéről geofizikai módszerekkel és fúrásokkal nyerünk információkat.

A hévíztárazó kőzetrendszerek (az aquiferek) különböző földtani korúak és különböző kőzettani és kőzetfizikai típusúak. Ebből következik, hogy e hévíztárazó kőzetrendszerek pórusaiban lévő víz kémiai összetétele, hőmérséklete és nyomása rendkívül különböző. A Zágráb-Kaposvár-Sátoraljaújhely vonalában húzódó fő szerkezeti vonal az országot két eltérő földtani fejlődésű részre osztja, melyek több szerkezeti elemből épülnek fel.

Az egyik nagy egység az egész alföldi medencére kiterjedő, rétegzett típusú, többszintes, soktelepes felső pannon homokkő és homokosorozat. A felső pannon rétegek alsó és középső részében 20-30%, a felső részében a 30%-ot is meghaladó porozitásértékű homokkővek találhatóak. Ez nagyon fontos, hiszen a geotermikus folyadék tárolása csak nagy porozitású kőzetekben lehetséges. A hévíztárazó rendszerből nyert víz kifolyási hőmérséklete 100°C-ig terjed, a Nagyalföld déli-délkeleti részén előfordul a 96-98°C-os kifolyóvíz-hőmérséklet 1600-2000 l/min hozam mellett. A hévizek összes sótartalma legfeljebb 2-4 g/l.

Fontos lelőhelynek számít ezen a területen Szentés, Kiskunmajsa, Hódmezővásárhely, Debrecen.

A másik nagy egységet az ország többi része alkotja, triász repedezett, hasadékos, részben karsztosodott és függőleges áramlási pályákkal jellemzett mészkő és dolomit képviseli. A tároló helyenként 4000-5000 méter vastag, repedés és kőzetrés-hálózata területenként, geometriailag nem jellemezhető. Porozitása másodlagosan alakult ki és területenként változó. A hévízben kevés az oldott gáztartalom, a vizek túlnyomórészt kis, átlagosan 0,8-1 g/l sótartalmúak. A kifolyó víz hőmérséklete helyenként megközelíti a 100 °C értéket, a földalatti tározóból rendszerint nagy mennyiség termelhető ki.

Magyarországon a triász karbonátos területek délnyugat-északkelet irányúak. Ide tartoznak a leghíresebb fürdővárosok, mint például Hévíz, Komárom, Budapest, Mezőkövesd és Miskolc.

## **Geotermikus energia hasznosítása**

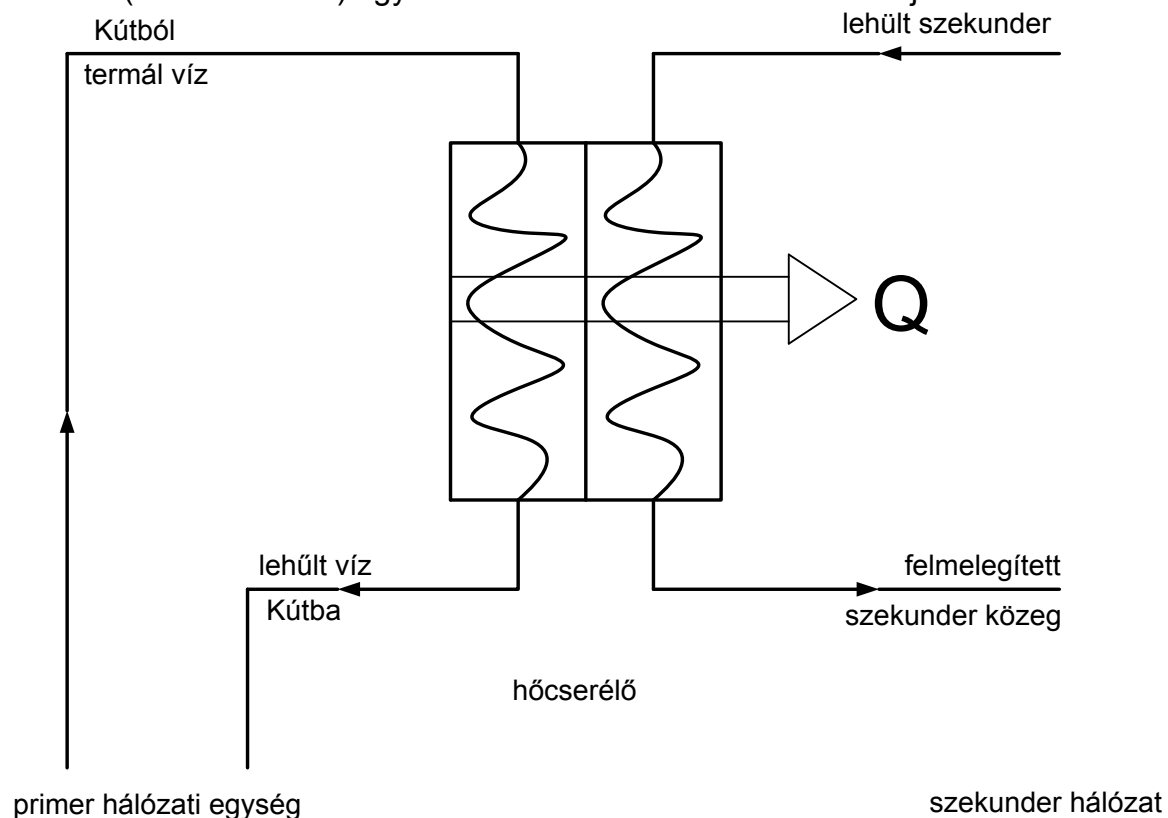
A geotermikus energia felhasználását az alábbiak szerint csoportosíthatjuk:

- Követlen felhasználás
- Elektromos áram termelésére történő felhasználás
- Hőszivattyúval történő felhasználás.

## **Geotermikus energia közvetlen felhasználása**

Közvetlen felhasználásnál a felszín alatti tárolókból felhozott hévizek hőtartalmát közvetlenül hasznosítjuk. A termálvizek egy része emberi beavatkozás nélkül tör a felszínre, hőforrások és gejzírek formájában. Évezredekkel korábban az emberek már használták a feltörő hőforrások melegét mindennapi életükhöz, főzésre, tisztálkodásra és bizonyos betegségek gyógyítására. Természetesen a feltörő víz egy kis részét tudták csak felhasználni. A felhasználás gazdaságosságáról ebben az időben még nem beszélhetünk. A feltörő hévíz teljes mennyisége a föld felszínén elfolyt. A 19.

században a technika fejlődése lehetővé tette a felszín alatt rejlő hévíz lelőhelyek felkutatását és feltárását. A feltárás lényege, hogy az 500-2000 m mélyen lévő hévíz tározóba kutat fúrnak, ennek átmérője 100-500 mm. A kút beomlása ellen egy acél vagy műanyag béléscsővet sajtolnak a kútba a teljes hosszon. A termálvíz a földalatti tározóban lévő túlnyomás hatására – saját energiájának felhasználásával – kerül a felszínre. A kút felszíni végére – kútfejre – egy elzáró szerelvényt helyeznek, amivel a kút vízhozamát szabályozni illetve elzárni lehet. Az így felszínre kerülő termálvíz hőtartalmát hasznosítjuk közvetlenül. A lehűlt termálvizet – kezdetben – a felszínen elengedték, felszíni vizekbe vezették. A termálvíz sótartalma miatt a környezet károsodott. A 20. században már elő tudtak állítani olyan nagynyomású szivattyúkat, amelyekkel a lehűlt termálvizet – egy másik kúton keresztül – a földalatti tározóba tudják visszajuttatni. A termálvizet közvetlenül is fel lehet használni fűtésre. Ebben az esetben, a termálvízben lévő sók – a hőmérséklet csökkenése miatt a hő leadók belső felületére kicsapódnak és az átáramlási szabad keresztmetszetet csökkentik, valamint a hőátadási tényező értékét lerontják. Ezért a termálvíz hő tartalmát egy hőcserélőn keresztül (lásd 208. ábra) egy ún. szekunder hálózaton hasznosítják.



**208. ábra. Termálvíz közvetett felhasználása**

A szekunder közeg – általában – sótlanított víz, ami a hőcserélőn átszármasztott – a termálvízből kivett –  $Q$  hőmennyiséget elszállítja a hő leadókhoz. A leggyakoribb hasznosítási mód a lakossági kommunális, mezőgazdasági létesítmények fűtése, amelyeket a komplex hő hasznosítás megfelelő hőmérsékleti szintjein célszerű igénybe venni. Ez azt jelenti, hogy az egyik hő hasznosítóból kilépő fűtővízzel egy másik – kisebb hőmérsékletet igénylő – hő hasznosítót tudunk ellátni.

A lakó- és középületek fűtési és használati – melegvíz igényét a 80-90 °C-os hévizet szolgáltató kutakkal távhőszolgáltatás szerűen ki lehet elégíteni.

Tekintve, hogy a földgáztüzelés egyre drágább hazánkban is, néhány helyen máris áttértek a geotermikus alaphőellátásra, és ilyen esetben csak az úgynevezett



csúcskazán működik földgázzal, amely évente alig néhány száz órát üzemel a téli hideg időszakokban.

Az új épületeknél célszerű az úgynevezett közepes- és kishőmérsékletű fűtési rendszereket (padlófűtések, légfűtések) kialakítani, mivel ezeknél a 60°C feletti hőmérséklet-tartományba tartozó hévizek is jól felhasználhatók. A teljes használati melegvíz-igény kizárólag a termálenergiára támaszkodva elégíthető ki.

A legtöbb hévizet ma a mezőgazdaság használja fel hazánkban. Elsősorban a növénytermesztő telepek fűtése gazdaságos. A növényházak fajlagos hőigénye meglehetősen nagy, eléri a 200-250 W/m<sup>2</sup> értéket is, szellőztetés esetén pedig még ennél is több. Az üvegházak légtér-fűtésére a 60-90°C-os hévíz teljes mértékben megfelel, a talajfűtésre elegendő a 25-45°C-os hévíz is. A fóliaházak esetében pedig – amelyek télen nem, hanem csak kora tavasszal és késő ősszel üzemelnek – megfelel az egészen alacsony hőmérsékletű (10-30°C-os) hévíz is. A növényházak fajlagosan nagy hőigényűek, ezért belső fóliatakarással szokták legalább az éjszakai hőveszteséget csökkenteni. Növényház esetén a hévíz alkalmas a légtér fűtésére, vegetációs fűtésre és talajfűtésre is. Az elfolyó és még meleg víz energiáját célszerű hőszivattyúval magasabb hőmérsékletszintre emelni és a rendszerben felhasználni. Tipikus megoldás, hogy a növényházi hévizes fűtési rendszert kiegészítik hőszivattyúval és egy csúcskazánal, így ugyanis gazdaságosan és biztonságosan lehet a hőigényeket kielégíteni. A kettős burkolatú fóliasátrak 20°C-os, elfolyó hévízzel fűthetők, a hektáronként szükséges víz mennyisége 1500 liter percenként.

A jelenlegi gyakorlat azt mutatja, hogy az állattartó telepek szaporító épületei és a fiatal állatok tartására szolgáló épületek fűtési igényének kielégítésére 50°C-nál magasabb hőmérsékletű hévízre van szükség.

A szarvasmarha-ellető ólak 15-18 °C-ot igényelnek. A legalkalmasabb rendszer ezeknél az építményeknél a padlófűtés, illetve a sima csöves konvekciós fűtés.

A mezőgazdaság területén igen jelentős energiafogyasztók a szárítók. Mivel használatuk a fűtési idényen kívüli időszakban válik szükségessé, így elősegítik az éves hő- és vízfelhasználás egyenletessé tételét. A hévízzel azok az alacsony hőmérsékletű szárítók üzemeltethetők, amelyekkel a vetőmagok, szalmaszalmák, gyógynövények és zöldségek felesleg víztartalmát lehet eltávolítani. Az alacsony hőmérsékletű szárítás során, ahol 60°C-nál magasabb hőmérsékletű hévízre van szükség, a magvak megőrzik csírázó képességüket.

A már említett alkalmazási területeken kívül a hévíz felhasználható az élelmiszeriparban is a különböző szárítási műveletekhez.

A hévízhasznosítás jelentős hányadát képezi a balneológiai hasznosítás. A Magyarországon jelenleg működő 850 db 30°C-nál melegebb kifolyó vizű kútból 245-nek (29,4%), valamint 7 termális karsztforrás-csoportnak a vizét hasznosítjuk fürdőkben és kórházakban csaknem kizárólag üdülési-idegenforgalmi és balneológiai célokra. 85 db (10%) hévízkút többcélú, amelyet a nyári szezonban fürdők vízellátására is használnak. A mintegy 340.000 m<sup>3</sup>/nap évi átlagos hévíztermelésből kb. 140.000 m<sup>3</sup>/nap -ra (41%-ra) becsülhető a balneológiai felhasználás. A hazai fürdőknél lévő felszínalatti vízkészlet ennél lényegesen nagyobb, mert a legtöbb termálfürdő hideg-langyos vizű kutakkal, esetleg (mint pl. a Lukács-fürdő) forrásokkal is rendelkezik.

## **Elektromos áram termelése**

A legtöbb erőmű vízgőzt használ elektromos energia termeléséhez. A vízgőzt általában szén, olaj vagy gáztüzelésű kazánal állítják elő. A kazán által termelt hő gőzturbinára vezetik, ami megforgatja a turbina forgórészét. A turbina tengelyéhez van

kapcsolva a generátor forgórésze. A generátor állórészéről lehet levenni az előállított váltóáramot.

A geotermikus erőműveknél a turbinára vezetendő gőzt nem kazánokban állítják elő, hanem a termálvíz kigőzölögtetésével hozzák létre és vezetik a turbinára. Természetesen elektromos áram előállításához olyan termálvizek használhatók, amelyek kifolyási hőmérséklete nagyobb mint 180°C. Magyarországon ilyen termálvíz nem, vagy csak igen kis mennyiségben található, ezért geotermikus erőművek nincsenek Magyarországon.

Geotermikus erőműveknek három típusa különböztethető meg:

- száraz gőzzel működő erőművek
- kigőzölögtetett gőzzel működő erőművek
- kettős ciklusú erőművek

### Száraz gőzzel működő erőmű

Léteznek olyan termálvíz lelőhelyek, ahol a termálvíz hőmérséklete és nyomása akkora, hogy a termálvíz gőz formájában van és ezt kutak segítségével a felszínre hozzák és közvetlenül a gőzturbinára vezetik. Ilyen erőművek üzemelnek Észak-Californiában (USA) és a Yellowstone Nemzeti Parkban (USA).

### Kigőzölögtetett gőzzel működő erőmű

Ezek az erőművek a legelterjedtebbek. A 180°C-os termálvizet a felszínre hozva egy kigőzölögtetőbe (nagy tartály) vezetik, ahol a víz nyomását csökkentve a víz átalakul gőzzé. Ez a gőz víz cseppeket tartalmaz, amiket leválasztanak a gőzből. Az így szárazra tett gőzt vezetik a gőzturbinára.

### Kettős ciklusú erőmű

A 105-180 °C-os termálvizet használják energia termelésre. A kitermelt termálvízzel – hőcserélőn keresztül – felhevítenek egy olyan un. munkafolyadékot, amelynek forráspontja kisebb, mint a víz forráspontja (< 100°C). a hevítés során a munkafolyadék gőzzé alakul és ezt a gőzt vezetik a turbinára.

Az 53. táblázat lévő adatok alapján összehasonlítható a termálvíz közvetlen hasznosítása az elektromos energia termeléssel.

53. táblázat. Geotermikus erőművek kapacitása

Ország	Elektromos áram termelésére (Mwe)	Közvetlen felhasználásra (MWt)
USA	2800	160
Mexikó	680	8
El Salvador	95	0
Nicaragua	35	0
Japán	228	970
Kína	11	610
Taiwan	3	10
Fülöp-szigetek	894	0
Indonézia	140	0
Új-Zéland	280	200
A volt Szovjetúnió tagországai	11	340
Izland	39	480
Franciaország	4	270

Ország	Elektromos áram termelésére (Mwe)	Közvetlen felhasználásra (MWt)
Olaszország	545	210
<b>Magyarország</b>	<b>0</b>	<b>375</b>
Törökország	21	70
Kenya	45	0
Összesen	5831	3703

## Földhő hasznosítása hőszivattyúval

A hő magasabb hőmérsékletű helyről az alacsonyabb hőmérsékletű helyre áramlik, de hőszivattyúval ez megváltoztatható. A hőszivattyú működési elvének megértéséhez nézzük a következő viccet:

Úr: Jean, hideg van a szobában, alig van 18°C.

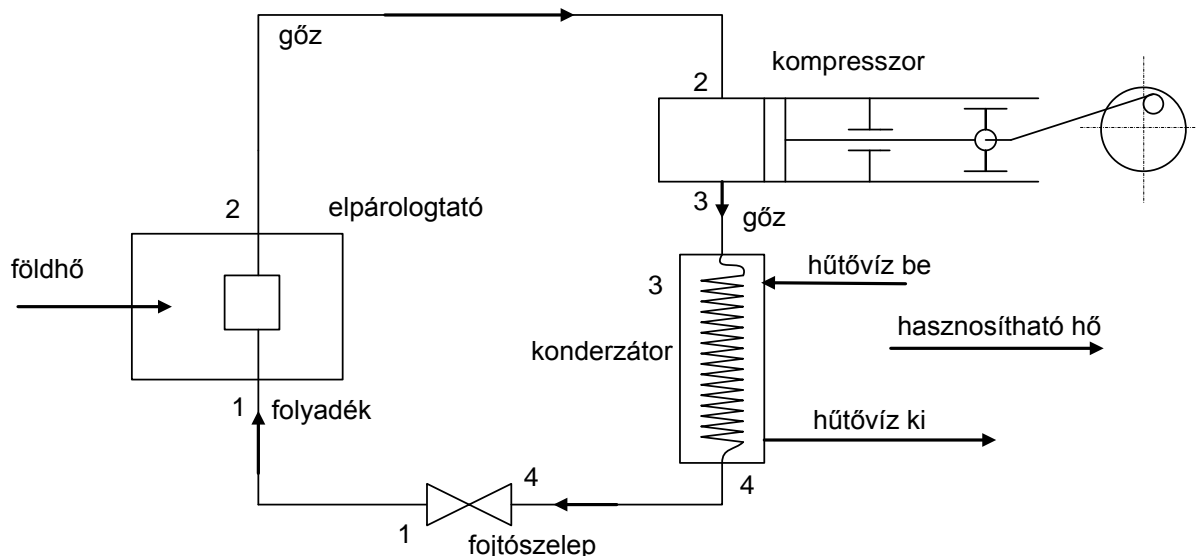
Jean: Igen Uram, kint is hideg van, ott 3°C-van.

Úr: Jean, nyissa ki az ablakot és engedje be a kinti 3°C-t, így bent 21°C lesz.

Bármennyire furcsa is, de Jean teljesítheti az Úr kívánságát, ha egy hőszivattyút alkalmaz.

A hőszivattyú nem tesz mást, mint, hogy a kisebb hőmérsékletű helyről a magasabb hőmérsékletű helyre „szivattyúzza” a hőt. A hőszivattyú nem más mint egy hűtőgép. A hűtés során is az alacsony hőfokú hűtendő térből szivattyúzzuk fel a hőt a szobahőfokára. A felszivattyúzásához mechanikai munkát kell a rendszerbe befektetni, ezt egy kompresszor biztosítja.

A 209. ábra egy hőszivattyú elvi kapcsolása látható. Az ábrán a hőszivattyú fontosabb elemeit és a hűtőközeg áramlási irányát jelöltük.

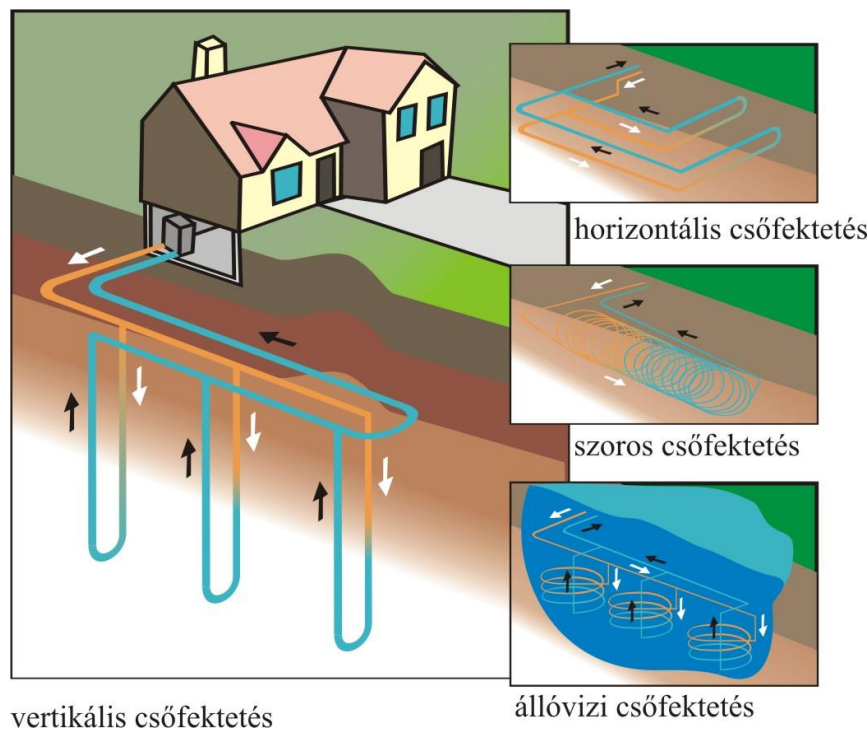


209. ábra. Hőszivattyú elvi kapcsolása

A rendszerben ún. munkaközeget áramoltatnak. Műszaki és gazdaságossági szempontok alapján olyan közeget kell alkalmazni, amelynek forráspontja a föld hőmérséklete ( $t_{\text{föld}}$ ) alatt van. Ily módon, hogyha a munkaközeg  $t_{\text{föld}}$  hőmérsékletű ( $t_{\text{föld}} < t_{\text{föld}}$ ) és folyadék formájában érkezik az elpárolgatóba, ott  $t_{\text{föld}}$  hőmérsékletű környezetből hőt vesz fel. Ennek hatására elpárolog és  $t_{\text{föld}}$  hőmérsékletű gőz formájában távozik. Innen ered az elpárolgató elnevezés.

Az elpárologtatóból kilépő kisnyomású és kis hőmérsékletű, gőz halmazállapotú munkaközeg ezután a kompresszorba áramlik. Itt ideális esetben adiabatikus kompresszió révén megnő a nyomása és a hőmérséklete, tehát az elpárologtatóban elvont hőt itt emeljük fel magasabb hőfokszintre, mégpedig a rendelkezésre álló természetes hűtőközeg hőmérséklete fölé. A kompresszorból ugyanis a gőz a kondenzátorba jut és ezen keresztül adja le a hőszivattyú az elpárologtatóban elvont hő mennyiségét a környezetének, tehát a levegőnek vagy hűtővíznek. Ez utóbbi lehet pl. radiátorok fűtővize. A kompresszorban ezek hőfokánál magasabb hőmérsékletet kell előállítani, annak érdekében, hogy a kondenzátorból a természetes hőáramlás útján távozzon el a hő. A munkaközeg fajtáját, ill. a kompresszorban létrehozott nyomást úgy választják meg, hogy a kondenzátorban uralkodó hőmérséklet megfeleljen az ehhez a nyomáshoz tartozó forrponthi hőmérsékletnek. Így a hő elvonás hatására a hűtőközeg lecsapódik, ismét folyadék halmazállapotúvá válik. Nyomása és hőmérséklete azonban túlságosan nagy ahhoz, hogy visszavezessük az elpárologtatóba. Ezért előbb munkát végeztetünk vele, mégpedig úgy, hogy egy szelepen vezetjük keresztül. Itt fojtást szenved, ezáltal nyomása is, hőmérséklete is, a kívánt értékre esik le. Ezután már valóban visszavezethetjük az elpárologtatóba, vagyis zárhatjuk a körfolyamatot. Az elpárologtatót el kell helyezni abba a közegbe, ahonnan el kívánjuk vonni a hőt. Ha föld hőt kívánunk hasznosítani, akkor az elpárologtatót kétféle képen alakíthatjuk ki:

- Vízszintesen elhelyezett esőkígyóként, amiben áramoltatják a munkaközegét. Ebben az esetben több száz méter hosszú, 10-20 mm átmérőjű műanyag vagy acélcsöveket fektetnek le 1-2 méter mélyen (lásd 3.sz.ábra). Hátránya, hogy nagy felületen (pl. a fűtött alapterület 2-3 szorosán) kell megbolygatni a talajt. A rendszerrel négyzetméterenként 20-30 W hő teljesítmény nyerhető.
- Talajszondás rendszer esetén kb. 80-120 m mély cső kutat fúrnak. Ebben helyezik el az U alakúra hajtott 10-30 mm átmérőjű csövet, amiben áramlik a munkaközeg (lásd 210. ábra)



210. ábra. Csőfektetési módok

Kondenzátor egy olyan hőcserélő, amely képes átadni a munkaközeg által szállított hőt, a hő hasznosító közegnek. Sok esetben ez is egy csőkiágó.

Az elpárolgató alakjának, fajtájának változtatásával felszíni vizekből (lásd. 210. ábra) a környező levegőből is lehet hőt elvonni, és hasznosítani.

Ha a rendszerben a munkaközeg áramlási irányát megváltoztatjuk, akkor az elpárolgató és a kondenzátor szerepe felcserélődik. Így a hőszivattyút hűtésre lehet használni. Tehát a jól méretezett hőszivattyúval télen fűteni, nyáron hűteni lehet.

## Vízenergia

A víz energiáját – hasonlóan a szél energiájához – az emberiség már évezredek óta használja. A régi kultúrák, Kínában, Egyiptomban, Mezopotámiában, vízkerekeket használtak mezőgazdasági területek öntözésére. Római időkben jelentek meg a vízimalmok. Melyeket szárazföldre – vízfolyások partjára – telepítettek és gabona őrlésére használták. De olvashatunk hajókra épített úszómalmokról is.

A vízenergiának a megújuló energiaforrások között kitüntetett szerepe van, mert a biomassa hasznosítás kivételével jelenleg az egyetlen, amely számottevő szerepet játszik a világ energiaigényének kielégítésében (2,3 %). Az elektromos energiatermelés hőskorában, a XX. század első felében sokáig úgy tűnt, a vízenergia lehet az elektromos áramtermelés legfőbb forrása, és a ma fejlett országokban sorra épültek a vízerőművek. A vízenergia részaránya azonban néhány évtizede mégis folyamatosan csökken. Előállítási költsége ugyanis nagyban függ attól, hogy milyen adottságú helyre telepítik az erőműveket. Először természetesen a legjobb helyekre kerültek. Miután azonban ezeket már felhasználták, a rosszabb adottságú területek egyre kevésbé voltak versenyképesek az olcsó kőolajjal és földgázzal szemben.

A fejlett országokban a vízenergia termelés az elmúlt 30 évben nem nőtt jelentősen és várhatóan már nem is fog. Más a helyzet a fejlődő országokban, ahol még nem használták ki az összes kedvező földrajzi helyzetű területet (például jelenleg is építik a világ majdan legnagyobb energiatermelő erőművét Kínában a Jangce folyón, mely 2009-re készül el és 18,2 GW teljesítményű lesz). Ha számításba vesszük az összes olyan helyet a Földön, ahol egyáltalán érdemes vízerőművet építeni (ezt energiagazdálkodási szakemberek megtették), akkor kiderül, hogy ezek összesen mintegy 3 TW teljesítménnyel tudnának üzemelni.

Az emberiség jelenleg mintegy 14 TW energiát használ, tehát, ha ma minden szóba jöhető helyen lenne vízerőmű, akkor is alig több mint, 20 %-át tudná fedezni a mai szükségleteknek, amely arány a jövőben tovább romlik. Ma még a 3 TW -nak csak mintegy 12 %-át használják ki, tehát elvileg mód van a vízenergia felhasználásának bővítésére, de a további építkezéseket akadályozza az a tény is, hogy a vízerőmű építése jelentős környezeti károkat okoz. A gátak, víztározók, csatornák, zsilipek építése a környezet nagymértékű átalakításával jár. Embereket kell lakóhelyükről elköltöztetni, területeket elárasztani, ami az ökoszisztéma megváltozását eredményezi. Fajok tűnhetnek el a területről, vagy pusztulhatnak ki. Az árvízveszély megszüntetése, az öntöző és ivóvízellátás a vízerőművek jótékony hatásai közé tartozik, igaz, ez nem a környezetnek, hanem csak az embernek segít. Mindezek miatt Kanada kivételével egyetlen fejlett ország sem tervezi nagyobb vízerőmű üzembe helyezését. A szakemberek is több fantáziát látnak a kisebb, helyi igényeket kielégítő vízerőművekben, melyek jobban képesek beilleszkedni a környezetbe, ezek azonban soha nem fognak jelentős mennyiségű energiát termelni.

## A vízenergia hasznosítása Magyarországon

Hazánkban a vízenergia-felhasználás a múlt század végéig az egyik alapvető energiatermelési mód volt, különösen a malomiparban. Egy 1885. évi statisztika szerint Magyarország akkori területén 22647 vízkerék és 99 turbina üzemelt, 56 MW teljesítménnyel. A századfordulón néhány vízimalmot törpe vízerőműre alakítottak át, amelyek csak elektromos energiát termeltek. Ilyenek voltak a Gyöngyösön, a Pilinkán, a Kis-Rábán, később pedig a Répcén, a Lajtán és a Sédén lévő vízkerekek. A ma üzemelő 100 kW-nál kisebb teljesítményű vízierőművek mintegy 58 %-a a második világháború előtt épült. Az 1958-as nagy áramszünetek következményeként minden lehetséges energiaforrást fel kellett kutatni. Ekkor kerültek ismét előtérbe hazánk kis vízfolyásainak vízhasznosítási kérdései. Párhuzamosan folyt az országos hálózatra dolgozó, illetve egy-egy település önálló villamosenergia-ellátását biztosító törpe vízierőművek létesítése. Ezeket általában a még jó állapotban lévő vízimalmok átépítésével alakították ki. A munkák 1960-ig tartottak, utána újabb vízerőmű alig létesült, a gazdaságtalannak ítélteteket pedig leállították.

Magyarország műszakilag hasznosítható vízerő-potenciálja kb. 1000 MW, amely természetesen jóval több a valóban villamosenergia-termelésre hasznosított vagy hasznosítható vízerő-potenciálnál. A százalékos megoszlás durván az alábbi:

- Duna 72 %,
- Tisza 10 %,
- Dráva 9 %,
- Rába, Hernád 5 %,
- egyéb 4 %.

A teljes hasznosítás esetén kinyerhető energia 25-27 PJ, azaz 7000-7500 millió kWh évente. Ezzel szemben a valóság az, hogy

- a Dunán nincs – és várhatóan a közeljövőben nem is lesz – villamos energia termelésre szolgáló létesítmény,
- a Tiszán a – hazai viszonyok között nagynak számító – Tiszalöki Vízerőmű és, mint legújabb létesítmény, a Kiskörei Vízerőmű található, 11,5 MW és 28 MW beépített teljesítménnyel,
- a Dráván jelenleg nincs erőmű,
- a Rábán és a Hernádon, illetve mellékfolyóikon üzemel a hazai kis- és törpe vízerőművek döntő többsége,
- egyéb vizeinken működő energiatermelő berendezés nincs üzemben.

Az erőműveket a beépített teljesítményük alapján három kategóriába soroljuk:

- I. kategória: 500 kW feletti beépített teljesítményű erőművek
- II. kategória: 100-500 kW közötti erőművek, ezek a kis-erőművek.
- III. Kategória: 100 kW alatti erőművek, ezek a törpe erőművek.

Magyarországon – jelenleg – 24 vízerőmű működik 49,175 MW össz. beépített teljesítménnyel. Ezek között I. kategóriába 4 erőmű tartozik. Ezek között van Kisköre (28 MW), Tiszalök (11,4 MW). 13 db törpe-erőmű és 7 db kis-erőmű található.

## Vízenergia hasznosításának elmélete

A felszíni vizek:

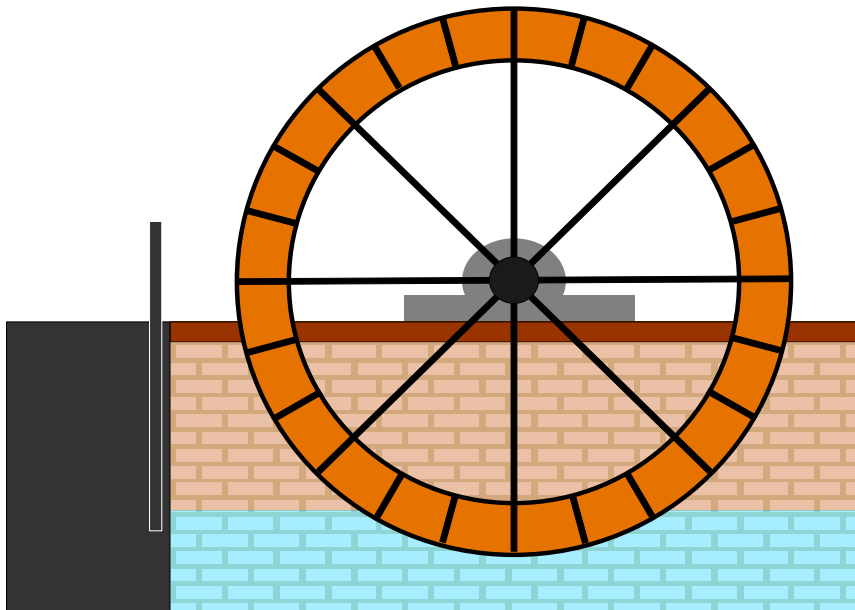
- mozgási
- helyzeti (potenciális)

energiáját lehet felhasználni.

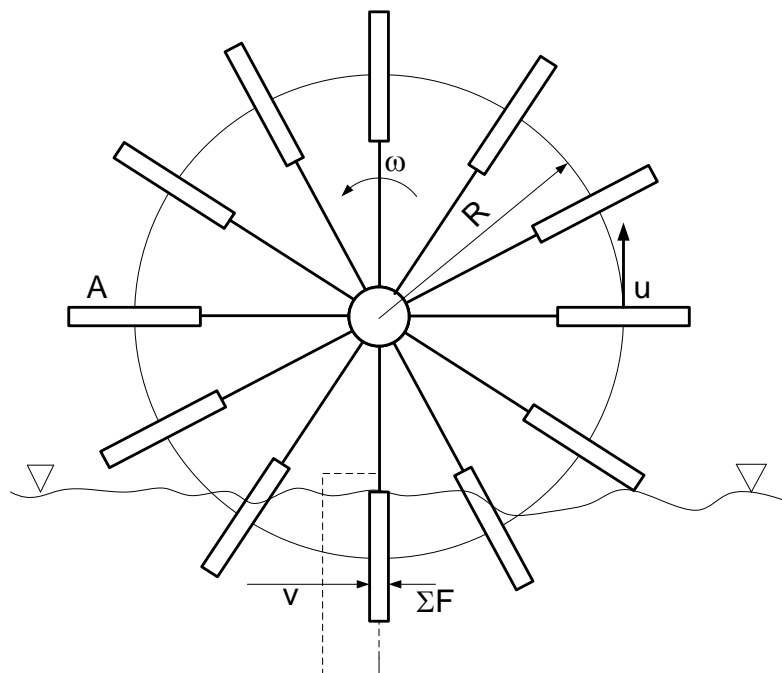
Mindkét esetben ún. vízkerék segítségével tudjuk a víz energiáját felhasználni. A víz energiája révén megforgatja a vízkereket, így a kerék tengelyén levehető forgómozgás és nyomaték hasznosítható mechanikai munkává illetve felhasználható elektromos áram előállítására, ha a forgómozgással egy generátor forgó részét forgatjuk. A mozgási energia felhasználásánál külön kell tárgyalni a folyóvizek és a tengerek vízének mozgási energiájának felhasználását.

## Vízfolyások mozgási energiájának hasznosítása

A folyók mozgási energiájának hasznosításához az ún. alulcsapott vízkerekeket kell használni. A vízkerék és elrendezése a 211. ábra látható



211. ábra. Alulcsapott vízkerek elvi elrendezése



212. ábra. Alulcsapott vízkerek elmélete

A járókerék egyszerű síklapokból áll. A lapátok kerületi sebessége  $u$ , az  $F$  felületű lapát  $v$  sebességű folyóba merül. Az időegységenként a lapátra érkező víztömeg

$$q_m = \rho * F * v \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

Az impulzustétel szerint a vízbe merített lapát közepére ható erő

$$P = \rho * F * v(v - u) \quad [N]$$

Feltételeztük, hogy a folyó  $v$  sebességű áramlására merőlegesen állandóan található egy  $u$  sebességgel haladó lapát. Ez csak akkor lenne így, ha a keréken végtelen sok lapát lenne. Természetesen ez nem így van. Eltekintünk továbbá attól, hogy a lapátok egymás körül kialakult áramlását zavarják. Ideális körülmények mellett a vízkerék hasznos teljesítménye:

$$N = P * u = q_m(v - u) * u \quad [W]$$

Vizsgáljuk meg, hogy mely kerületi sebességnél kapjuk a legnagyobb járókerék teljesítményt

$$\frac{dN}{du} = q_m v - 2q_m u = 0 \quad \text{ebből} \quad u = \frac{v}{2} \quad \text{érték adódik.}$$

Tehát a vízkeréken levehető maximális teljesítmény

$$N_{\max} = q_m \frac{v^2}{4} \quad [W]$$

A járókerék lapátjának felületével ( $F$ ) azonos keresztmetszetű folyadéksugár mozgási energiájából számolható teljesítmény:

$$N_{\text{folyó}} = q_m \frac{v^2}{2} \quad [W]$$

Tehát az alulcsapott vízkerék a folyó mozgási energiájának csak – ideális esetben is – 50 %-át képes hasznosítani.

Figyelembe véve az idealizált és a valóságos viszonyok közötti különbséget, valamint a vízkerék elemeinek súrlódási és egyéb veszteségeit a vízkerék hatásfoka a 10 %-t sem éri el.

## Óceánok, tengerek hullámozásának kinetikai energiáját hasznosító erőművek

A hullámozásból nyerhető energia ketté bontható. Egyrészt közvetlenül a felszíni hullámok mozgásából származó energiára, másrészt a hullámozás következtében a



felszín alatt létrejövő nyomásingadozásból származó energiára. A hullámzásból származó teljesítmény nagyságát 2 TW-ra becsülik. A hullámmozgásból elektromos energiát előállító generátor lehet a vízfelületen, de lehet a parton is.

#### Hullámok tetejére telepített erőmű

A hullámok tetején lebeg egy uszály, ahol el van helyezve a turbina és a generátor. A turbinához egy hosszú vízzel teli tömlő csatlakozik, amely a vízfelszínnél úszik. Az uszály himbálódzása következtében a tömlő megnyúlik és elernyed, ami a tömlő belsejében lévő víz nyomását megváltoztatja. Ez a nyomásváltozás hajtja keresztül a turbinán a vizet, és termel elektromos áramot.

Egy másik megoldás, ha a turbinát és a generátort a tengerből kiálló sziklára építik, egy víztározóval. A tengerben egy U alakú felül nyitott hosszú keskeny csatornát építenek ki betonból, úgy, hogy a csatorna feneke a sziklán lévő tározóba lejtjen. A csatorna oldalfala olyan magas, hogy a hullámok éppen becsapjanak a csatornába. A csatorna elvezeti a tengervizet a sziklán lévő tározóba, ahonnan a víz a turbinára áramlik és elektromos áramot termel.

### **Felszíni vizek helyzeti energiájának hasznosítása**

A vizek potenciális energiáját azon a helyen lehet hasznosítani, ahol a vízfolyásban rövid távolságon nagy vízszint különbségek vannak, vagy előállíthatók. Három ilyen esetet lehet megkülönböztetni:

- duzzasztóműves eset
- szivattyús – tározós eset
- nagy esésű hegyi vízfolyások esete.

#### **Duzzasztóműves erőművek**

A vízfolyás medrére merőlegesen duzzasztógátat építenek. Így a gát előtti területen egy nagy kiterjedésű víztározó jön létre, miközben a tározóban a vízszintje megnő. Ezt a tározót nevezik bögének. A duzzasztógátba építik be a vízturbinákat. A vízturbinák mellett ugyancsak a gátba építenek különféle vízátvezető csatornákat, zsilipeket (pl. hajó zsilip, halak átjutását biztosító csatorna, stb.). A gátban lévő összes nyílás vízátbocsátását úgy tervezik, hogy a gát alatti folyószakasz vízhozama és vízszintje – a gát megépítését követően – ne változzon.

A gátba épített turbinákat olyan mélyre helyezik el, hogy azok a gát utáni folyószakasz vízszintje alá kerüljenek. Így a tározó és a folyó vízszintje közötti szintdifferenciából adódó esés ( $H$ ) használható fel energiatermelésre. A turbinán időegység alatt átvezetett vízmennyiség a turbina víznyelése ( $Q$ ). Ezekkel a mennyiségekkel a beépített erőmű teljesítménye:

$$N = Q * H * q * \rho \quad [W]$$

ahol

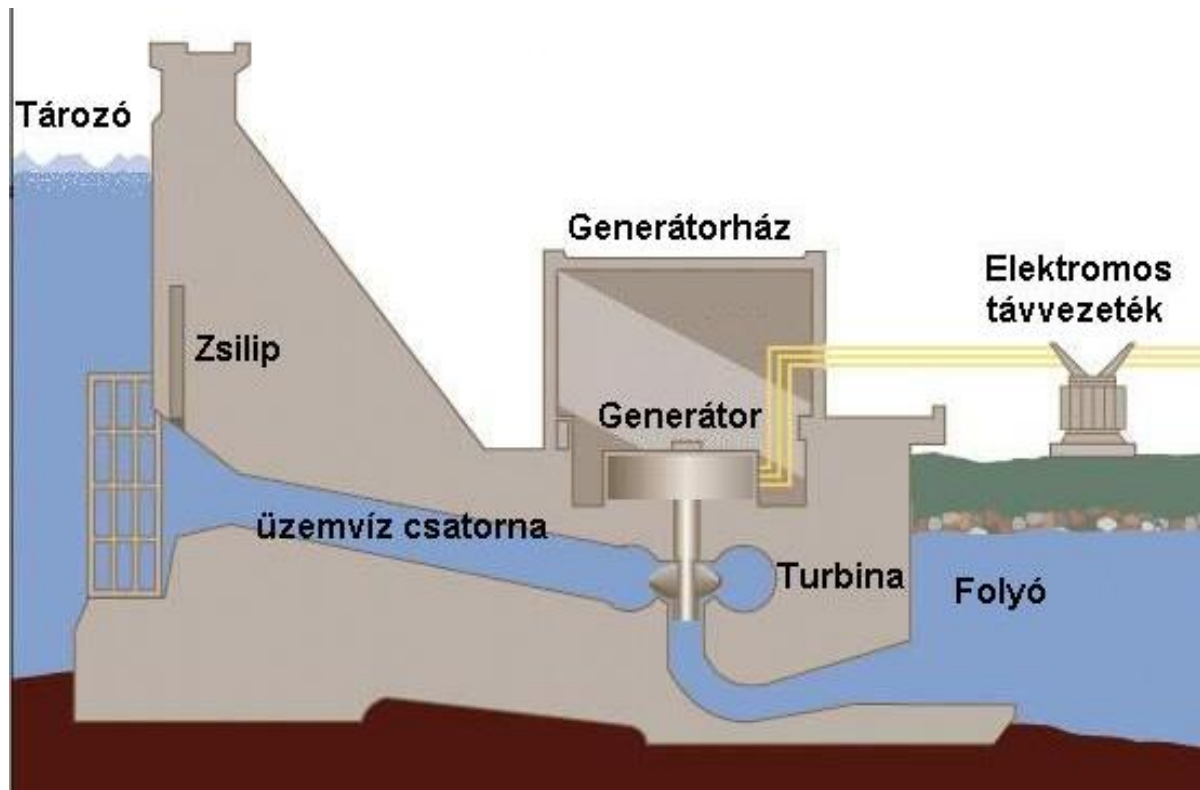
$$Q \left[ \frac{m^3}{s} \right] \quad = \text{turbina víznyelés}$$

$$H [m] \quad = \text{geodetikus esés}$$

$$\rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \quad = \text{víz sűrűsége}$$

$$g \left[ \frac{m}{s^2} \right] = \text{gravitációs gyorsulás}$$

Egy ilyen elrendezésű erőmű elvi elrendezése látható a 213. ábra.



213. ábra. Duzzasztóműves erőmű elvi vázlat

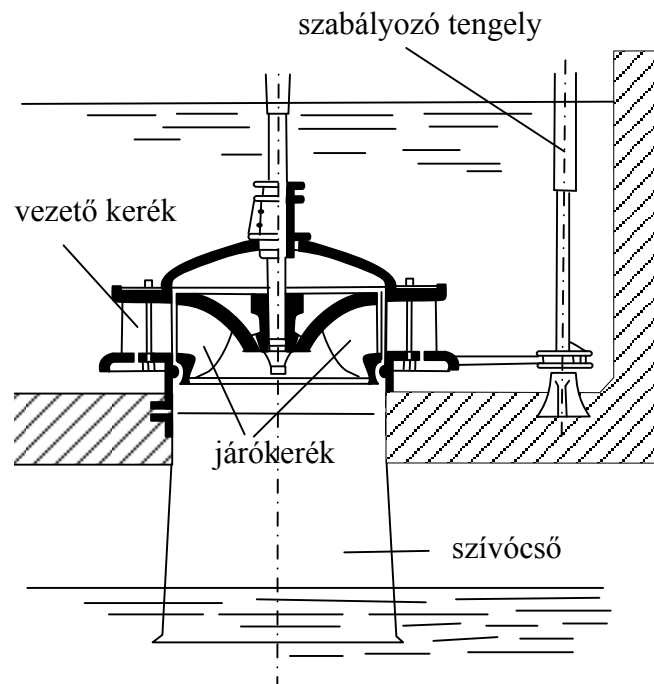
Az erőműben kétféle turbinát alkalmazhatnak, ezek:

- Francis – turbina
- Kaplan – turbina

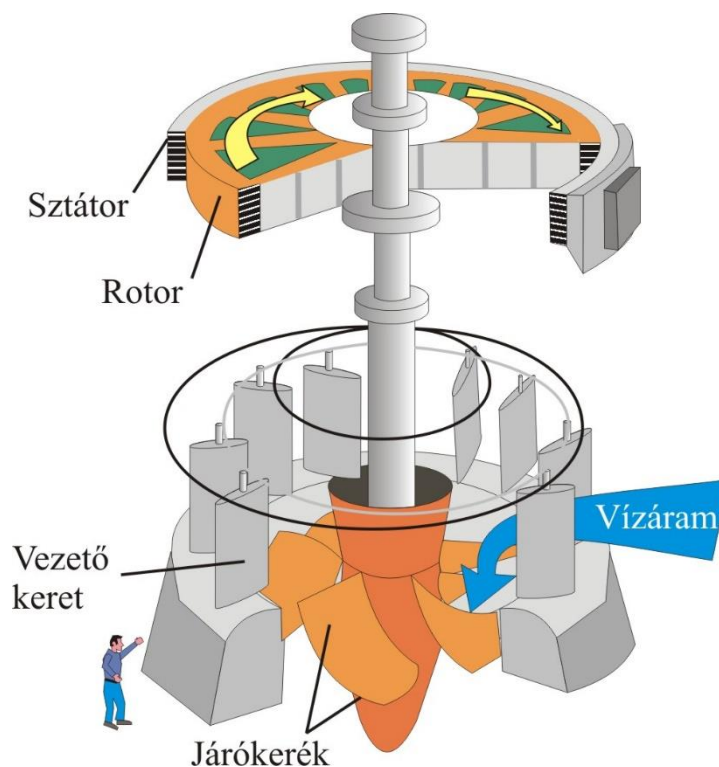
#### Francis – turbina

Úgy néz ki mint egy centrifugális vízszivattyú. Működését tekintve, szivattyú üzemmódban a turbina tengelyét forgatjuk, ekkor a gép vizet szállít alacsonyabb helyről magasabb helyre. Ha a magasabban lévő vizet átengedjük a gépen, akkor a víz megforgatja a járókereket és a kerék tengelyéről levehető munkával energiát lehet termelni. Ez az ún. turbina üzemmód.

A Francis-turbina első példánya kb. 100 éve készült. Vízszintes és függőleges tengelyelrendezéssel egyaránt beépítik. A turbina fordulatszámának szabályozását a járókerék beömlési keresztmetszetének változtatásával végzik. Ezt a változtatást, a járókereket körülvevő vezetőkerék lapátjainak állításával lehet elvégezni. (lásd. 214. ábra). Ha a turbinát nem lehet úgy elhelyezni, hogy az a gát mögötti folyószakasz vízszintje alá kerüljön, akkor a turbina kiömlő keresztmetszetére egy szívócsövet helyeznek el.



214. ábra. Francis-turbina



215. ábra. Kaplan-turbina

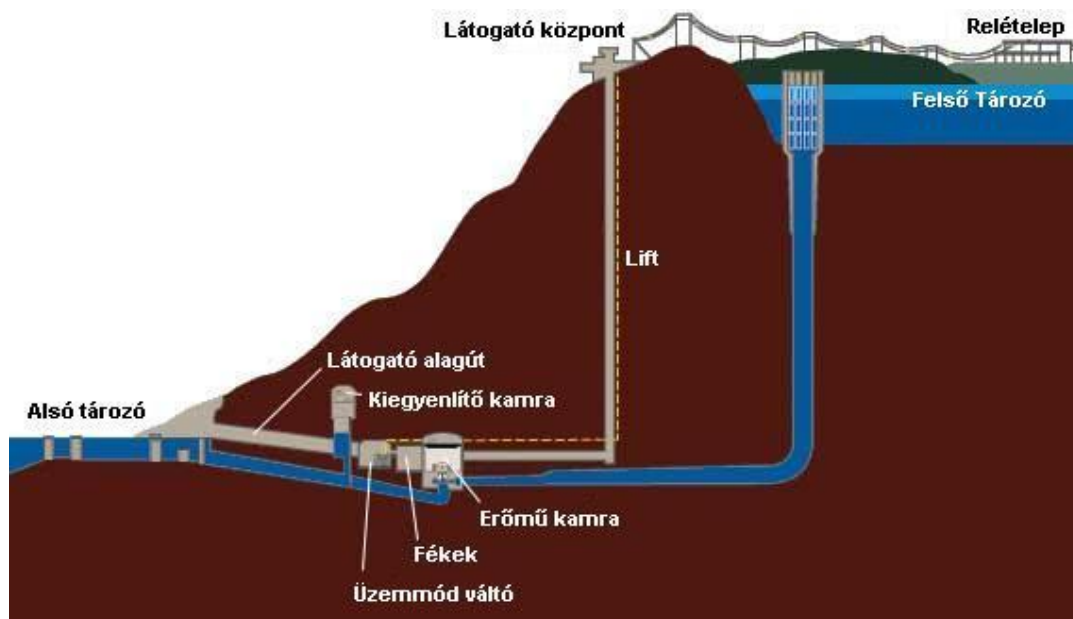
Kaplan-turbina

Ez a turbina a propeller turbinák egyik különleges fajtája. A propellergéptől abban különbözik, hogy a járókerekének lapátjai állíthatók, és a járókerék a vezetőkerék

szabályozásához úgy kapcsolódik, hogy a gép hatásfoka mindig a legmagasabb legyen. A 215. ábra a turbina és a tengelyére ékelt generátor látható. A generátor állórésze a sztátor, a forgórésze a rotor.

### Szivattyús – tározós erőmű

Az erőmű alapfunkciója nem az elektromos energia termelése, hanem az elektromos hálózaton jelentkező egyenetlen elvételből adódó problémák csökkentése, kiküszöbölése. Az erőmű elvi vázlatát a 216. ábra mutatja.



216. ábra. Szivattyús-tározós erőmű

Az erőműbe Francis-turbinát építenek, így az üzemmód váltóval a turbina tud turbina üzemmódban és tud szivattyú üzemmódban is dolgozni. Ha az elektromos hálózaton nincs, vagy csak kevés az elvétel, akkor a turbina tengelyén lévő generátor álló részét az elektromos hálózatról táplálva a generátor motorként fog üzemelni és forgatja a járókereket. Ekkor a turbina szivattyú üzemmódban dolgozik és az alsó tározóból a felső tározóba szállítja a vizet. Ellenkező esetben, ha az elektromos hálózaton nagy az elvétel, akkor a felső tározóból – a zsilip kinyitásával – a turbinára engedik a vizet. A gép turbina üzemmódban üzemel és áramot termel, amit a hálózatba táplál. Sok esetben az alsó tározó szerepét egy nagy vízhozamú folyó tölti be. A felső tározót a folyó partján lévő hegyre telepítik. Az erőmű teljes élettartamát vizsgálva belátható, hogy plusz elektromos energiát nem termel, csak az elektromos energia fogyasztás ingadozásának nem kívánatos hatásait csökkenti.

### Nagyeesű vízfolyásokra telepített erőművek

A duzzasztóműves turbináknál a turbinát mindig a gátba – víz szint alá – telepítették. Ebben az esetben a turbinákat a vízfolyás mellé telepítik, és a vizet vezetősatornával vezetik a turbinára. Ilyenkor a hasznosítható esés a felső vízfolyás vízszintje és általában a turbina tengelye közötti szintdifferencia.

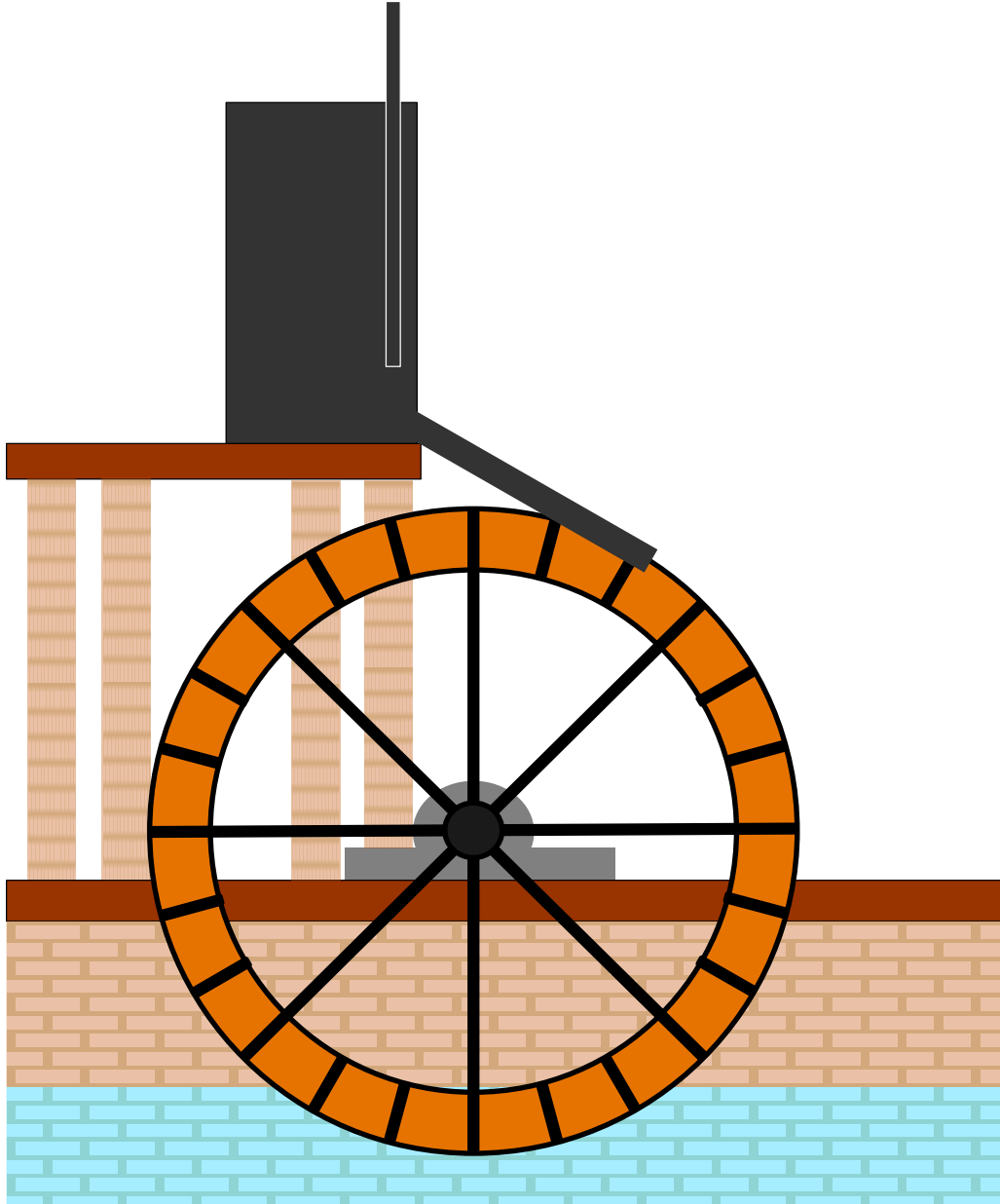
Ebbe a csoportba sorolhatók:

- Felülcsapott vízkerék
- Bánki-turbina

- Pelton-turbina

#### Felülcsapott vízkerék

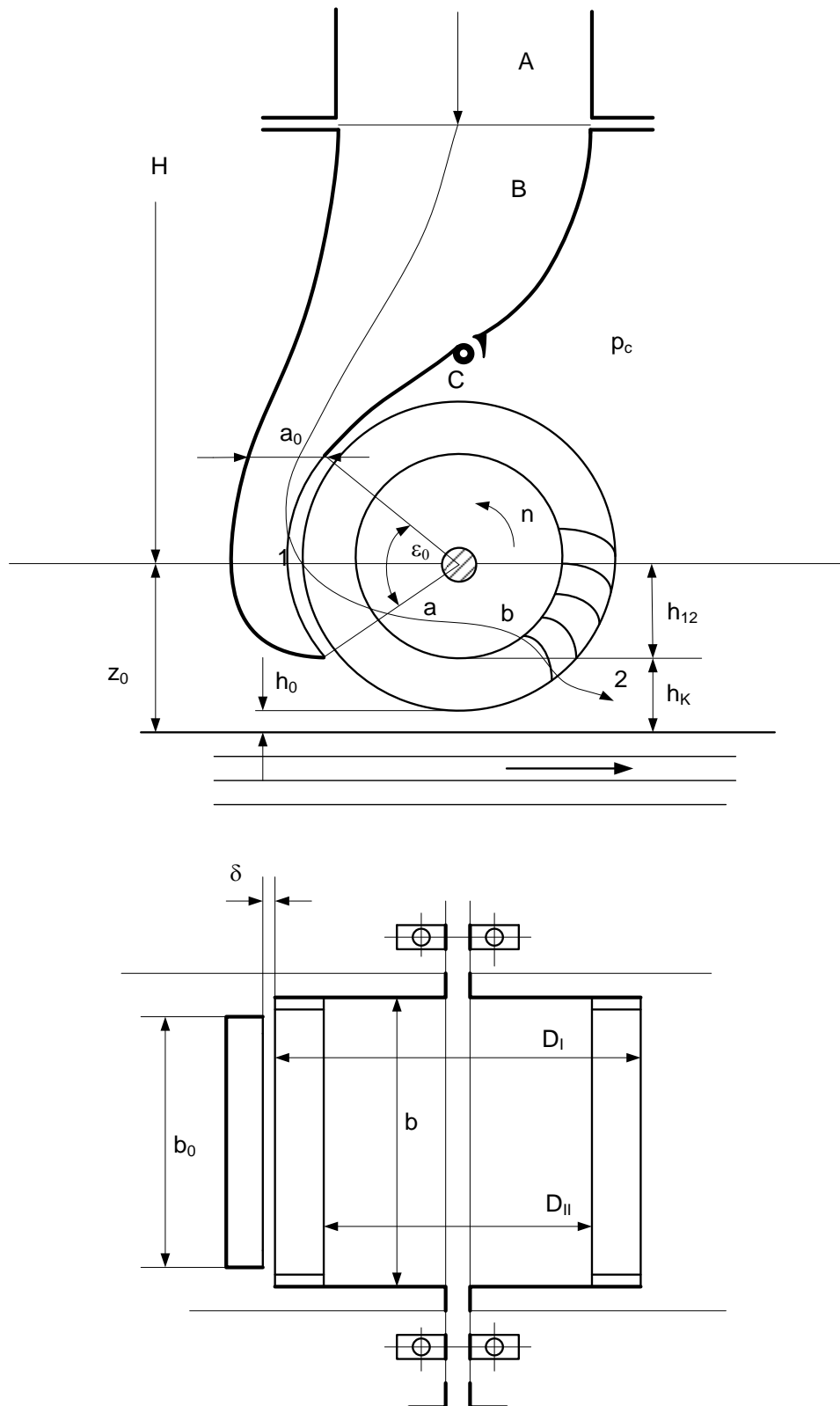
A vízkerék szerkezete megegyezik a 211. ábra és 212. ábra felültetett alulcsapott vízkerék szerkezetével. Működését tekintve a vizet a kerék tengelye fölött vezetik a kerékre (lásd: 217. ábra)



**217. ábra. Felülcsapott vízkerék**

#### Bánki-turbina

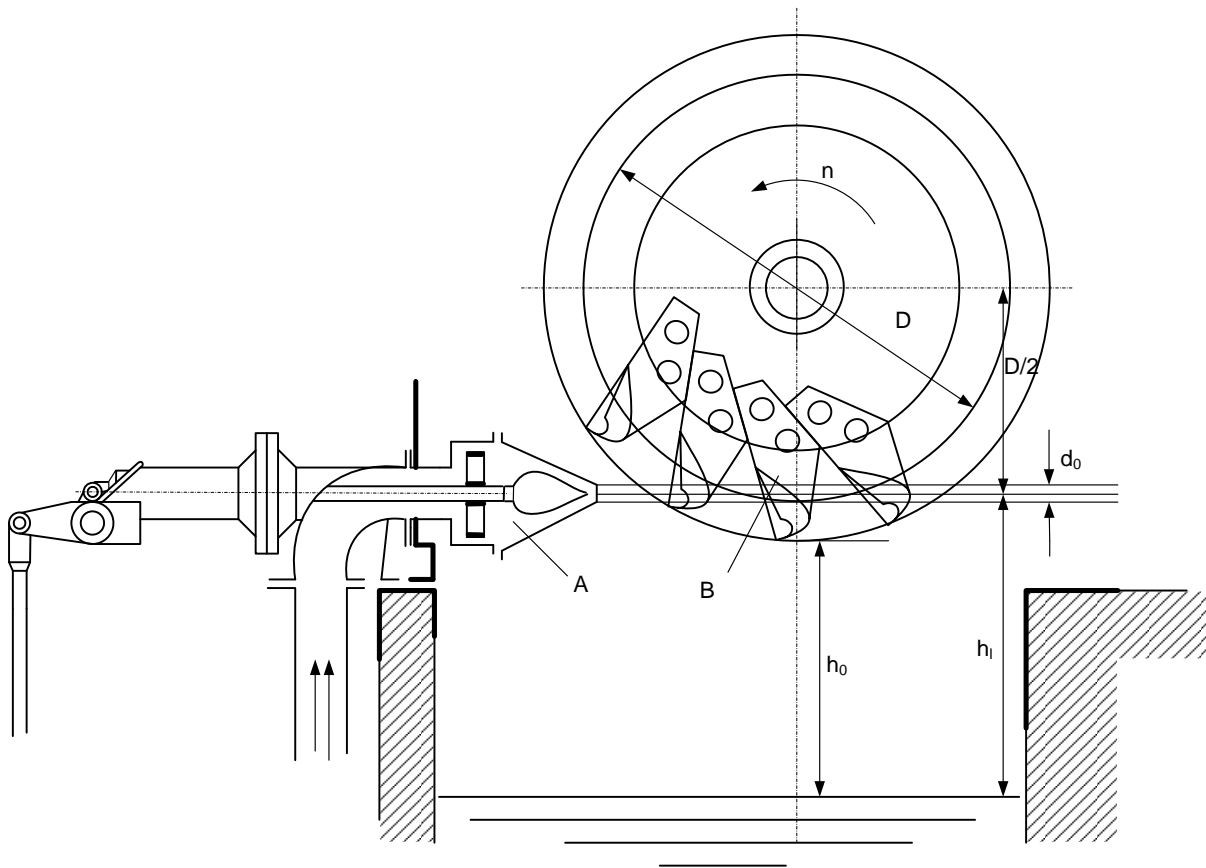
A turbina feltalálója Bánki Donát (1859-1922) gépészmérnök, akadémikus. Az általa kifejlesztett kettős átömlésű turbinát 1917-ben szabadalmaztatta. A turbina elvi felépítését a 218. ábra mutatja. A felső (turbina feletti vízfolyásból, víztározóból) a vizet körkereszt metszetű nyomócső vezet a turbinához, melynek a turbina felőli vége „A” már négyszög keresztmetszetű. Ehhez a végéhez csatlakozik a „B” jelű vezetőcsatorna, amely a vizet közvetlenül vezet a járókerékre. A járókerék kétszeres átömlésű. A víz először 1 jelű helyen ömlik át a lapátcsatornákon és bejut a kerék belsejébe, majd még egyszer átömölve a 2 jelű helyen hagyja el a turbinát.



218. ábra. Bánki-turbina

Pelton-turbina

Nagy geodetikus eséseknél használják. A tározóból érkező víz az „A” jelű sugárcsövet szabadsugár alakjában elhagyva éri a „B” jelű járókerék lapátjaira (lásd 219. ábra).



**219. ábra. Pelton-turbina**

A Bánki-turbinához hasonlóan a járókerék itt is szabadon függ  $h_0$  magassággal az alsó tározó vízszintje felett. Amiből következik, hogy a járókerékből kilépő víz esése már nem hasznosítható. Vagyis az ábrákon jelölt  $h_k$  jelű szintkülönbség elveszettnek tekinthető. A vízmennyiség növelése érdekében a vizet nem egy, hanem több szabadsugárral vezethetik a járókerékre.

## Gáz-folyadék, gőz-folyadék eljárások

Dr. Tungler Antal, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

### A gáz-folyadék és gőz-folyadék eljárásokról és környezetvédelmi szerepükről általában

A gáz-folyadék és gőz-folyadék eljárások az anyagátadási eljárások/műveletek közé tartoznak. Fontos eljárások, melyekkel általában többkomponensű elegyeket szeparálunk komponensek szerint. A szeparáció eredményességét az elegy komponenseinek viselkedését leíró fizikai-kémiai összefüggések, más néven gáz-folyadék ill. gőz-folyadék egyensúlyok és a műveleti paraméterek együttesen szabják meg. Az egyensúlyi összefüggések néha olyanok, hogy bizonyos elválasztások nem lehetségesek, pl. azeotropia. Az eljárásokkal mindig valamilyen elválasztást valósítunk meg, melynek során a kiindulási elegyet egy másik nem, vagy csak alig elegyedő fázissal hozzuk érintkezésbe, hogy a kívánt komponens(ek) a másik fázisba kerüljenek. Ezek a gáz-folyadék és a gőz-folyadék fázispárok. A fázispárok közt többnyire egyensúly áll be, ezért szokás ezeket az elválasztási eljárásokat egyensúlyiaknak is nevezni. A gáz-folyadék fázispár leginkább abszorpció ill. az ellentétes művelet tehát deszorpció esetében fordul elő. A gőz-folyadék fázispár leginkább a desztillációra jellemző.

Az *abszorpció* esetében bizonyos komponens(ek)e)t, *abszorptívumot* ill. *szolutumot*, nyerünk ki egy gázelegyből megfelelő folyadékfázisú oldószer, *abszorbens*, segítségével. Tehát a komponensátadás a gázfázisból a folyadékfázisba történik. Az abszorpció ellentétes művelete, *deszorpció* esetén pedig a komponensátadás fordított, az illékony komponens a folyadékfázisból a gázfázisba megy, miközben az abszorbenst, újrafelhasználáshoz, regeneráljuk.

A *desztilláció* esetén folyadékelegy elválasztása történik úgy, hogy annak részleges elpárologtatásával egy részét gőzzé alakítjuk. A folyadékelegy illékonyabb komponense(i) a gőzfázisba kerülnek, és ott feldúsulnak, míg a kevésbé illékonyak a folyadékfázisban maradnak.

*Környezetvédelemben* az abszorpciót általában gáztisztításra (füstgázok, gázemissziók stb.), káros gázok elnyelésére használjuk. A desztillációt sokféle környezetvédelmi feladatra alkalmazhatjuk, pl. oldószerek regenerálására, káros, illékony komponensek (Volatile Organic Compounds, VOC) folyadékelegyből történő eltávolítására, szennyvizek fiziko-kémiai kezelésére, melynek során az illékony komponensek eltávolításával a kémiai oxigénigényt (KOI, chemical oxygen demand, COD) is csökkentjük, valamint a kihajtott komponens(ek)e)t lehetőség szerint újrahasznosítjuk. Desztillációval sikeresen eltávolíthatunk számos halogéntartalmú szerves szennyezést is (adsorbable organically bound halogens, AOX).

### Gáz-folyadék, gőz-folyadék egyensúlyok Gáz-folyadék egyensúlyok

A gáz-folyadék eljárások tárgyalása előtt meg kell vizsgálni a gáz-folyadék egyensúlyokat és azok leírását.

A két fázis közti egyensúly kialakulását a hőmérséklet, a nyomás és az összetétel befolyásolja. Az egyensúly kialakulását a Gibbs-féle fáziszabály korlátozza, miszerint



**1. képlet**  $S_z = C - F + 2$

ahol  $S_z$  a rendszer szabadsági fokainak száma,  
 $C$  a komponensek száma,  
 $F$  a fázisok száma.

Ha egy szennyező komponenst pl. kéndioxidot kívánunk levegőből eltávolítani egy abszorbenssel pl. vízzel, akkor a szabadsági fok három. A nyomás és hőmérséklet megválasztása esetén egy szabadsági fok marad. Így ha pl., adott a kéndioxid összetétele a folyadékfázisban ( $x_a$ ) akkor a fázisszabály szerint a gázfázisú összetétel (móltört:  $y_a$ , vagy parciális nyomás  $p_a$ ) meghatározott.

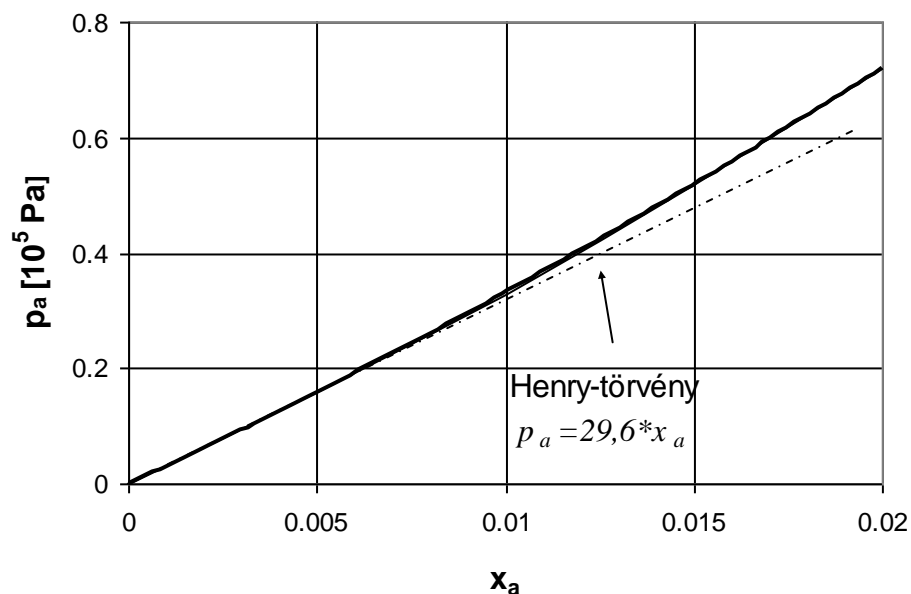
Ezt az  $x_a \sim p_a$  összefüggést a „Henry-törvény” írja le, melynek általános alakja:

**2. képlet**  $p_a = H * x_a$

ahol  $H$  az ú.n. Henry-állandó [ $N/m^2$ ].  
Ha a 2. képlet mindkét oldalát elosztjuk az össznyomással ( $P$ ):

**3. képlet**  $y_a = H' * x_a$

ahol  $H' = H/P$ , az ú.n. módosított Henry-állandó, dimenziómentes.



**220. ábra. Kéndioxid-levegő-víz rendszer egyensúlyi görbéje 20°C-on**

A 220. ábra a kéndioxid-levegő-víz rendszer egyensúlyi görbéjét mutatja. Mivel a Henry-törvény csak rosszul oldódó gázokra, tehát kis folyadék-koncentrációk tartományában érvényes, látható az ábrán is a nagyobb koncentrációk tartományában tapasztalható eltérés. Ezért a Henry-törvény alkalmazhatóságát mindig ellenőrizni kell.

Gázok oldhatósága folyadékokban nő a nyomás növelésével és csökken a hőmérséklet növelésével. Ezeket az effektusokat abszorpció ill. deszorpció megvalósításánál figyelembe kell venni.

## Gőz-folyadék egyensúlyok

A gőz-folyadék egyensúlyok a gőz-folyadék eljárások tárgyalásának kiinduló pontja, hiszen pontosan megszabják, hogy az eljárásokkal milyen elválasztást hajthatunk végre, ill. fordítva, tehát egy adott gőz-folyadék egyensúllyal bíró elegy, melyik eljárással és hogyan választható el. A gőz-folyadék elegyekre is érvényes a Gibbs-féle fázistörvény (**1. képlet**). Eszerint, ha egy kétkomponensű elegy, pl. benzol-toluol esetén amikor is gőz- és folyadék fázisunk is van, a szabadsági fok  $Sz = C - F + 2 = 2 - 2 + 2 = 2$  lesz. Ha pl. adott a nyomás, akkor már csak egyetlen adat rögzíthető, pl. hőmérséklet, a folyadék- vagy a gőzösszetétel.

Ideális elegyekre érvényes a *Raoult törvény*:

**4. képlet**  $p_i = p_i^0 * x_i,$

ahol  $p_i$  az  $i$ -dik komponens parciális nyomása a gőztérben,  
 $p_i^0$  a tiszta  $i$ -dik komponens parciális nyomása,  
 $x_i$  az  $i$ -dik komponens móltörtje a folyadékfázisban.

Az  $a$  komponens parciális nyomása a gőztérben számítható a gőzfázisban mért móltörtékből és viszont a *Dalton-törvény* alapján:

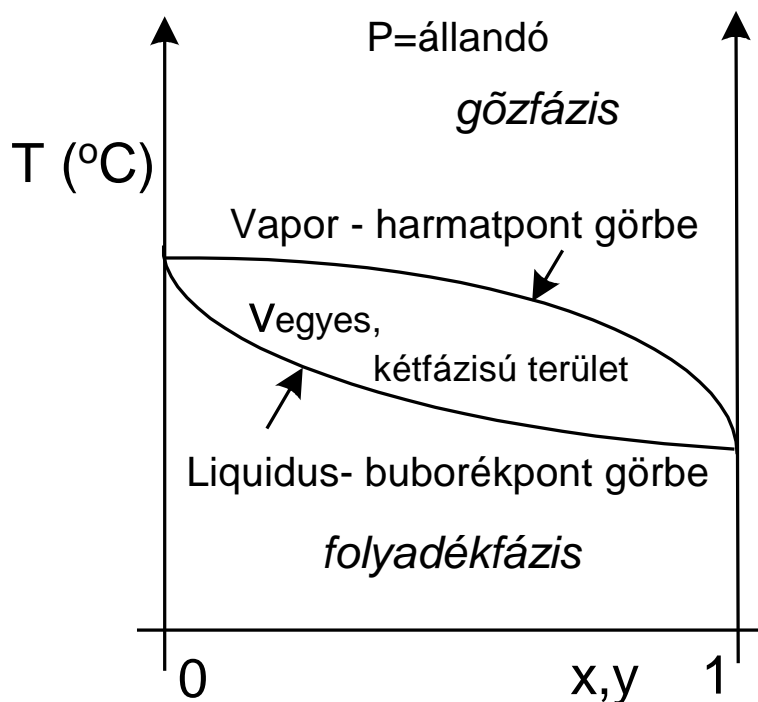
**5. képlet**  $p_i = P * y_i,$

ahol  $p_i$  az  $i$ -dik komponens parciális nyomása a gőztérben,  
 $P$  az össznyomás,  
 $y_i$  az  $i$ -dik komponens móltörtje a gőzfázisban.

A két törvényt egyesítve kapjuk a *Raoult-Dalton-törvényt*:

**6. képlet**  $y_i = \frac{p_i^0 * x_i}{P}.$

A gőz-folyadék egyensúlyokat ábrázolni is lehet. Ezt többnyire kétkomponensű – biner – elegyekre teszik meg. A folyadék- és gőzösszetételeket ábrázolják a hőmérséklet a függvényében. A 221. ábra mutat egy kvalitatív összefüggést. Általános konvenció, hogy biner rendszerek esetében mindig az illékonyabb komponens összetételét tüntetik fel. Másik fontos konvenció, hogy desztilláció esetén többnyire móltörtökkel dolgoznak. Ennek okát később, az állandó moláris párolgás és túlfolyás eseténél fogjuk elmagyarázni.



221. ábra. T-x-y (hőfok, móltörték) diagram (kvalitatív)

A T-x-y diagram vagy forráspontdiagram a hőmérsékletet és az összetételeket mutatja két esetre:

- az ún. *liquidus* görbe mutatja a forrásban lévő telített folyadékot, vagyis amikor a kérdéses folyadékeleg éppen forni kezd, azaz az ún. *buborékpontján* van,
- az ún. *vapor* görbe pedig a telített gőzt mutatja, vagyis amikor a gőz éppen kondenzálódni kezd, vagyis az ún. *harmatpontján* van.

A buborékpont és harmatpont hőmérsékleteit számítani is tudjuk. A buborékponti hőmérsékleten lévő folyadékeleg gőzmóltörtjeinek összege éppen egy (**7. képlet**).

$$\text{7. képlet} \quad \sum_i y_i = 1 \quad i = 1, 2, \dots, I.$$

ahol  $I$  a komponensek száma

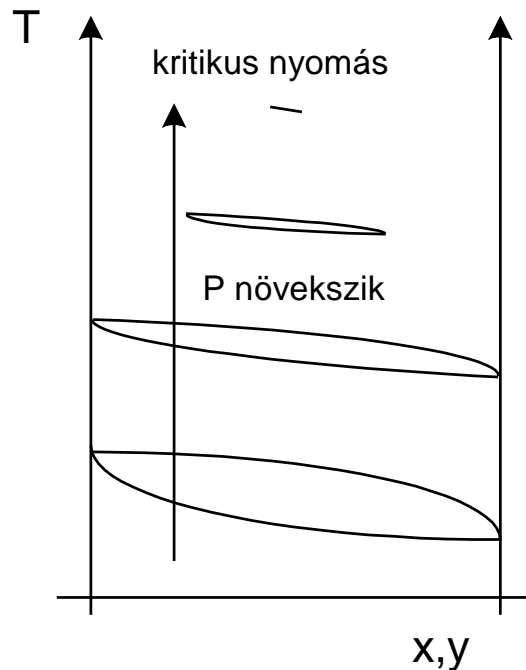
A harmatponti hőmérsékleten lévő folyadékeleg folyadékmóltörtjeinek összege éppen egy (**8. képlet**).

$$\text{8. képlet} \quad \sum_i x_i = 1 \quad i = 1, 2, \dots, I.$$

ahol  $I$  a komponensek száma

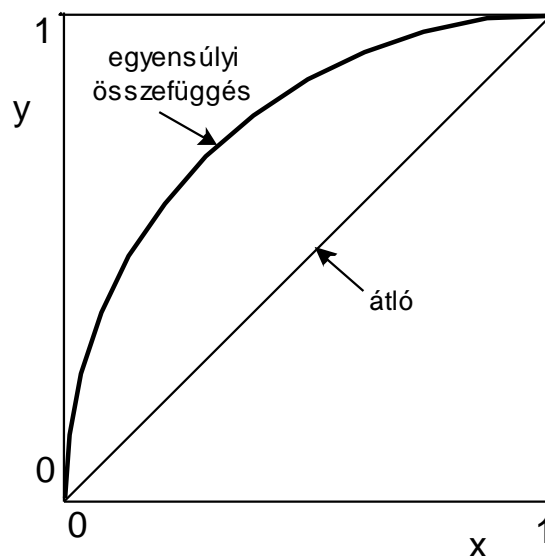
A nyomás növekedésével a T-x-y diagramon a forráshőmérsékletek egyre magasabbak lesznek, a kétfázisú terület egyre zsugorodik, és a kritikus nyomáson és hőmérsékleten eltűnik (222. ábra). Ez azt is jelenti, hogy a nyomás növekedtével romlik

az elegy desztillációval történő elválaszthatósága, mivel a gőz- és folyadék-összetételek közelednek egymáshoz.



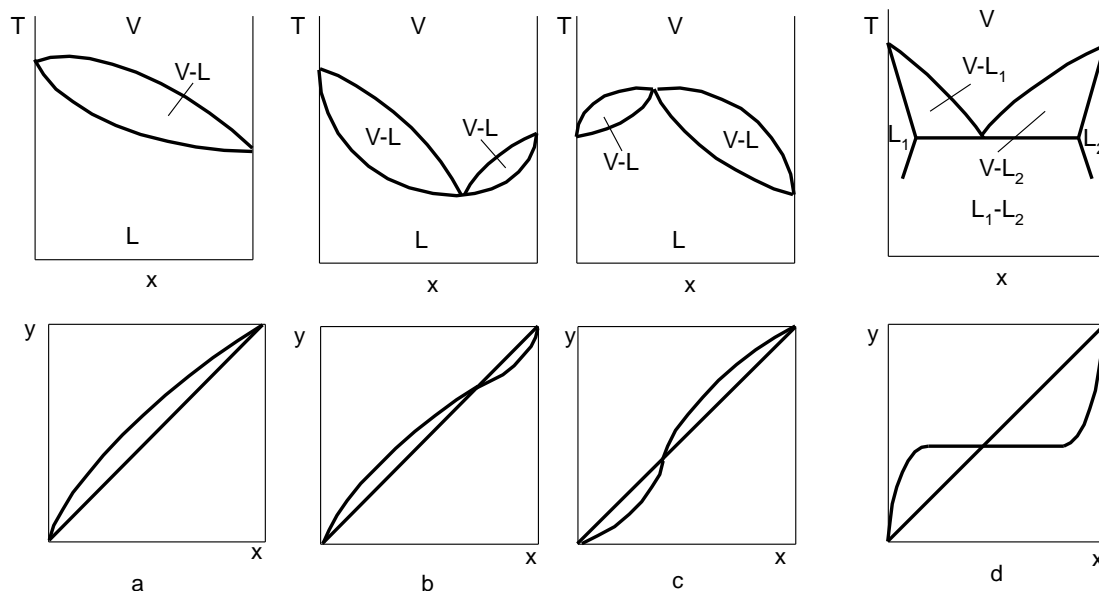
222. ábra.  $T$ - $x$ - $y$  (hőfok, móltörtek) diagram (kvalitatív) egyre növekvő nyomások esetén

Mérnöki számításoknál szokás csak a gőz- és folyadék-összetételeket ábrázolni. A 223. ábra mutat be egy ilyen  $x$ - $y$  diagramot biner rendszerre. A diagramban, a szokásnak megfelelően, szintén az illékonyabb komponens móltörtjei szerepelnek. A diagram azt mutatja, hogy milyen összetételű gőz- és folyadékfázisok vannak egyensúlyban. Az átló segít egyrészt abban, hogy lássuk, hogy az illékonyabb komponens dúsabb a gőzfázisban mint a folyadékfázisban, másrészt a később bemutatandó mérnöki számításoknál.



223. ábra.  $x$ - $y$  egyensúlyi diagram (kvalitatív)

A természetben nem csak ideális viselkedésű folyadékelegyek fordulnak elő, hanem számos nem-ideális viselkedésű, vagyis nem ideális gőz-folyadék egyensúlyt mutató elegy is előfordul. A nem-idealitás különböző formájú lehet. A 224. ábra mutat be néhány ilyen nem-idealitást.



224. ábra. Gőz-folyadék egyensúlyok alapesetei

(Elegyek: *a-ideális, reguláris (zeotrop), b-minimális forráspontú homogén azeotrop, c-maximális forráspontú homogén azeotrop, d- minimális forráspontú heterogén azeotrop*)

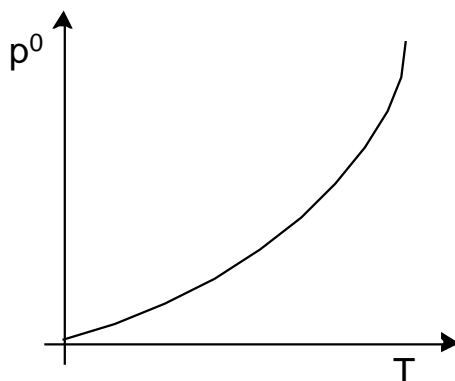
Megjegyezzük, hogy az ideális, a reguláris vagy normális és a poláros elegyek T-x-y ill- x-y diagramja formailag hasonlóképpen néz ki, ha nem képeznek azeotropot. Gőz-folyadék egyensúlyaik számítása viszont más elvek szerint történik, amit később részletezünk.

Az ábrán látható nem-idealitások magyarázatául megemlítjük, hogy a természetben előfordulnak olyan folyadékelegyek, melyek egy bizonyos összetételénél a folyadékból forralás hatására felszálló gőzelegy összetétele megegyezik a folyadékéval ( $x=y$ ). Ezek az ún. *azeotrop* elegyek, és a kérdéses összetétel az *azeotrop összetétel*. Vannak minimális és maximális forráspontú azeotrop elegyek, valamint homogén és heterogén azeotropok. Az x-y diagramban ilyenkor az egyensúlyi görbe metszi az átlót jelezvén, hogy a gőz- és folyadékfázis összetételei megegyeznek.

Egymással nem elegyedő ill. korlátozottan elegyedő folyadékok elegyei is előfordulnak, pl. víz - etilacetát. Ezeket az elegyeket heterogén fázisú elegyeknek hívjuk. Ezek az elegyek minimális forráspontú hetero-azotropot képeznek.

## Gőz-folyadék egyensúlyok számítása

A gőz-folyadék egyensúlyok számítására a desztilláció vizsgálatoknál szükség van. Fontos ismeret a tiszta anyag gőznyomása, tenziója, mely a hőmérséklettel exponenciálisan nő (225. ábra).

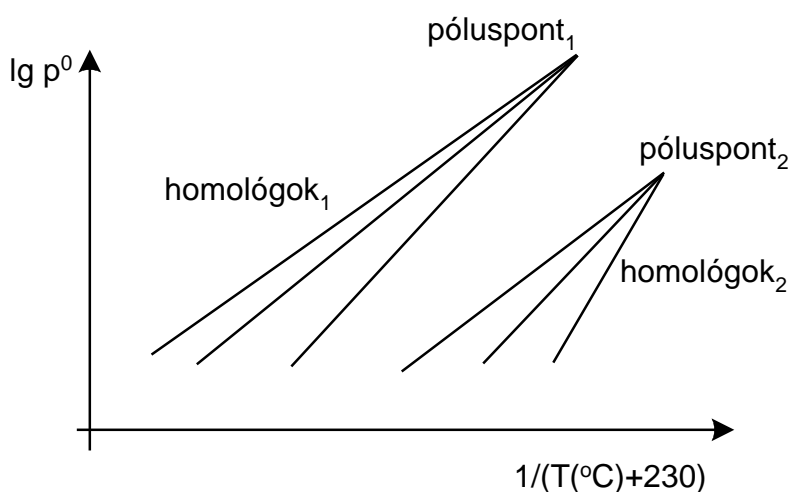


225. ábra. Tenzió görbe (kvalitatív)

A gőz folyadék egyensúlyok számításánál fontos az egyes komponensek tenzióinak számítása. Erre a feladatra a legáltalánosabban elterjedt módszer *Antoine*-tól származik, és *Antoine-egyenlet* néven ismert a köztudatban (**9. képlet**).

**9. képlet** 
$$\lg p^0 = A - \frac{B}{C+T}$$

Az Antoine-egyenlet konstansait ( $A$ ,  $B$ ,  $C$ ) különböző nyomás és hőmérséklet dimenziókra állapították meg. A leggyakoribb a tízes alapú logaritmus, *torr* mint a nyomás ( $p^0$ ) dimenziója, és °C mint a hőmérséklet ( $T$ ) dimenziója kombináció. Ezért *Antoine-konstansok* irodalmazásakor először mindig meg kell győződni a dimenziókról. Ugyancsak figyelni kell arra, hogy az Antoine-konstansok mindig csak egy bizonyos intervallumban érvényesek. Ezek is adottak a konstansokkal együtt. Cox mutatta ki, hogy alifás szénhidrogének homológ sorai esetén, ha azok gőznyomásainak logaritmusát  $1/(T(^{\circ}\text{C})+230)$  hőmérsékletskálán ábrázoljuk, akkor olyan egyeneseket kapunk, melyek egy pontban az ún. *póluspontban* metszik egymást. Más anyagcsoportok homológ soraira is hasonló képet kapunk (226. ábra).



226. ábra. Cox-diagram (kvalitatív)

## Egyensúlyi arány, relatív illékonyosság

Az egyes komponensek elgőzölögtetési hajlamát mutatja az *egyensúlyi arány* ( $K_i$ ), mely az  $i$ -dik komponens gőzfázisú móltörtjének ( $y_i$ ) és folyadékfázisú móltörtjének ( $x_i$ ) hányadosa (**10.képlet**).

$$10.képlet \quad K_i = \frac{\gamma_i}{x_i} \quad i = 1, 2, \dots, I$$

Az egyensúlyi arány, amint a neve is mutatja, az egyensúlyban lévő gőz- és folyadékfázisok összetételeit hasonlítja össze. Minél nagyobb ez az arány, a kérdéses komponens annál inkább illékony vagyis az elgőzölögtetésre hajlamos.

Mivel desztilláció esetén komponenseket választunk el azok különböző illékonyasága alapján, ezért logikus, hogy összehasonlítjuk az egyes komponensek elgőzölögtetési hajlamát vagyis illékonyaságát. Ez az ún. relatív illékonyosság (**11. képlet**).

$$11.képlet \quad \alpha_{ij} = \frac{K_i}{K_j} = \frac{\frac{\gamma_i}{x_i}}{\frac{\gamma_j}{x_j}}$$

ahol  $\alpha_{ij}$  az  $i$ -dik komponensnek a  $j$ -dik komponensre viszonyított relatív illékonyasága,  
 $y, x$  megfelelő móltörtek.

Elfogadott konvenció, hogy mindig az illékonyabb komponenst hasonlítjuk a kevésbé illékonyhoz, ezért teljesül, hogy  $\alpha > 1$ . A Raoult-Dalton törvény (**6. képlet**) alapján belátható, hogy a relatív illékonyosság kifejezhető a tiszta komponensek adott hőmérsékletre vonatkozó kérdéses gőznyomásával is, mely forma (**12. képlet**) még szemléletesebben mutatja, hogy az illékonyaságokat hasonlítjuk össze:

$$12.képlet \quad \alpha_{ij} = \frac{p_i^0}{p_j^0} \quad .$$

A relatív illékonyosság ismeretében az egyensúlyi gőz- és folyadék-összetételek számíthatók. Pl. egy biner rendszer esetén, ahol konvenciószerűen az  $x$  és  $y$  az illékonyabb komponens móltörtjeit jelentik a relatív illékonyosság ismeretében felírhatjuk, hogy

$$13.képlet \quad \frac{y}{1-y} = \alpha * \frac{x}{1-x}$$

és

$$14.képlet \quad y = \frac{\alpha * x}{1 + (\alpha - 1) * x} \quad .$$

A kétkomponensű elegyek gőz-folyadék egyensúlyi összefüggései ábrázolhatók az  $x$ - $y$  diagramban (225. ábra). A kis relatív illékonyasággal jellemezhető biner elegyek

egyensúlyi görbéje közel van az átlóhoz (az átló megfelel az  $\alpha=1$  elvi határesetnek). Minél közelebb van az egyensúlyi görbe az átlóhoz, annál nehezebb elválasztás, és fordítva.

### Nem-idealitás és számítása

A Raoult-Dalton-törvény **6. képletben** bemutatott formája szigorúan véve csak ideális elegyekre vonatkozik. Ez a megfogalmazás fordítva is igaz, vagyis az ideális elegyek követik a Raoult-Dalton-törvényt. Általában a hasonló méretű molekulákból álló szénhidrogén elegyek követik leginkább az ideális viselkedést, pl. a benzol-toluol elegy.

Az ideálistól való eltérés az elegyben lévő molekulák nagysága és alakja közti jelentős különbségnek ill. a molekulák közti különböző jellegű, kémiai és fizikai jellegű erőknek tulajdonítható. Nagyobb nyomás esetén a gőzfázis viselkedésének az ideális gáztörvénytől való eltérését is figyelembe kell venni. Ilyenkor pl. a nyomás helyett az ún. fugacitással, a termodinamikai nyomással számolunk.

#### *Reguláris vagy normális elegyek*

Az ideális viselkedéstől való eltérés legenyhébb formája az ún. *reguláris vagy normális elegyeknél* figyelhető meg. A kölcsönhatás jellege főleg fizikai, a molekulák nem poláros jellegűek. Ilyen elegyek, pl. az eltérő méretű molekulákból álló szénhidrogén elegyek. Ilyenkor az ún. állapotegyenletekkel dolgozunk, pl. Soave-Redlich-Kwong (SRK) vagy Peng-Robinson (PR). Az egyenletekkel az ilyen elegyek gőz-folyadék viselkedése jól leírható. A molekulák közti eltérés azonban nem lehet túl nagy, pl.  $nC_4 - nC_{12}$  elegye jól leírható.

#### *Poláros avagy erősen nem-ideális elegyek*

Ilyen elegyeknél a molekulák közti kölcsönhatási erő kémiai jellegű vonzásból ill. taszításból származik. A kölcsönhatás jelentős, az állapotegyenletek nem alkalmazhatók. A gőz-folyadék egyensúlyok szélesebben alkalmazható leírására az általánosított Raoult-Dalton-törvényt alkalmazzuk. Eszerint

$$15.képlet \quad y_i * f_i^P = x_i * \gamma_i * f_i^0 \quad i = 1, 2, \dots, I$$

ahol  $f_i^P$  az  $i$ -dik komponens fugacitása az elegy  $P$  össznyomásán és  $T$  hőmérsékletén,

$\gamma_i$  az  $i$ -dik komponens aktivitási együtthatója, mely a folyadékelegy ideálistól való eltérését veszi figyelembe,

$f_i^0$  az ún. standard fugacitás, melyet az  $i$ -dik komponens fugacitásaként definiálunk.

A gőzfugacitási együtthatót definiálva  $\left( \varphi_i = \frac{f_i^P}{P} \right)$  átírhatjuk a Raoult-Dalton-törvényt:

$$16.képlet \quad y_i * \varphi_i * P = x_i * \gamma_i * f_i^0 \quad i = 1, \dots, I$$



Ha a nyomás nem túl nagy és a gőzfázis nem tartalmaz asszociálódó komponenseket, akkor  $\varphi_i = 1$ , és a  $f_i^0$  standard fugacitás helyett a kérdéses komponens gőznyomása, tenziója írható:

$$17.képlet \quad y_i * P = x_i * \gamma_i * p_i^0 \quad i = 1.....I$$

A relatív illékonyság definíciója nem-ideális elegyekre, nem túl nagy nyomások esetére, amikor is a fugacitás helyett a nyomás alkalmazható:

$$18.képlet \quad \alpha_{ij} = \frac{p_i^0 * \gamma_i}{p_j^0 * \gamma_j}$$

A gőzfázisú fugacitást (gőzfugacitási együttható) számítható az állapotegyenletek segítségével, pl. SRK.

A folyadékaktivitási együttható számítására számos módszer létezik, pl. Wilson-, UNIQUAC-, NRTL, Van Laar egyenletek. Külön meg kell említeni a UNIFAC egyenletet ill. módszert, mely egy ún. csoportjárulék módszer. A molekulák alkotó részeiből építi fel tulajdonságukat, és állapítja meg folyadékaktivitási együtthatójukat.

Az említett módszerek biner párokra állapítják meg a folyadékaktivitási együtthatókat, de azok alapján a többkomponensű elegyek viselkedése is számítható.

#### *Azeotrop elegyek, gőz-folyadék-folyadék egyensúlyok*

A nem-idealitás tárgyalása során már megemlítettük az azeotropiát (224. ábra). Ilyenkor a gőz- és folyadék összetétele azonos, ami azt jelenti, hogy a relatív illékonyság ebben a pontban eggyel egyenlő. Ebben a pontban az illékonyságok különbözőségén alapuló egyszerű elpárologtatás nem eredményez elválasztást, de speciális desztillációs technikákkal eredményt lehet elérni.

Az azeotrop elegyek gőz-folyadék egyensúlyait is a fentiekben leírt módon számítjuk.

Heterogén fázisú elegyeknél számoljuk még az ún. folyadék-folyadék egyensúlyokat is. Desztilláció megvalósításánál ilyenkor együtt számoljuk a gőz-folyadék és a folyadék-folyadék egyensúlyokat, és ezért ezt gőz-folyadék-folyadék egyensúlyoknak ill. egyensúlyi számításoknak nevezzük. A folyadékaktivitási együttható számítására alkalmas módszerek némelyike (pl. UNIQUAC, NRTL) alkalmas a folyadék-folyadék egyensúlyok számítására is.

## Abszorpció és készülékei

Abszorpció esetében bizonyos komponens(ek)e)t, nyerünk ki egy gázelegyből megfelelő folyadékfázisú abszorbens segítségével. Tehát a komponensátadás a gázfázisból a folyadékfázisba történik. Ez a folyamat az ú.n. *egyirányú diffúzió* egyik formája, mert csak egyetlen irányban történik egy vagy több komponens transzportja. Ha pl. levegő-ammónia-víz rendszert vizsgáljuk, akkor ú.n. *szelektív egyirányú diffúzióról* van szó. A transzportálódó komponens az ammónia, a levegő vízben történő oldódása, hasonlóan a víz levegőbe történő kerüléséhez, az ammóniához képest elhanyagolható.

Az abszorpciónak két típusát különböztetjük meg:

- 1 *Fizikai abszorpció*, amikor a gázkomponens csak egyszerűen oldódik az abszorbensben. Ilyenkor a komponens oldódását az egyensúlyi viszonyok, tehát a gáz parciális nyomása és folyadékban lévő koncentrációja szabják meg (**2. képlet**). Ilyen esetek pl. széndioxid oldódása vízben, szerves oldószergőzők elnyeletése vízben.
- 2 *Kemoszorpció (kemiszorpció)*, amikor a gáz abszorpcióját a folyadékfázisban kémiai reakció követi, és az abszorpció nem tekinthető egyensúlyi folyamatnak. Ilyen pl. széndioxid elnyeletése nátrium hidroxid oldatban, füstgázok meszes vízzel történő mosása. Kemoszorpció esetén elvileg teljes elnyeletést lehet megvalósítani. A keletkező reakciótermék felhasználásáról ill. elhelyezéséről gondoskodni kell.

*A továbbiakban csak az egyensúlyra vezető abszorpcióval foglalkozunk, ahol a jelenségeket a gáz-folyadék egyensúlyok írják le. A kemoszorpció tárgyalása a reaktorok témaköre.*

Az abszorpciót hőjelenségek is kísérik. Az abszorpciós hő három fő rész összege:

- kondenzációs hő,
- oldáshő,
- hígítási hő.

A hígítási hő az első kettőhöz képest elhanyagolható.

A gyakorlatban előfordul izotermnek tekinthető abszorpció is, ahol a hőjelenségek elhanyagolhatók, pl. szénhidrogének abszorpciója olajban. Rosszul oldódó gáz abszorpciója esetén, pl. széndioxid vízben, még jelentős abszorpciós hő esetén sem várható számottevő hőmérsékletváltozás.

Forró gázok abszorpciója esetén, ha az abszorbens hőmérséklete alacsonyabb a gáz(ok) kondenzációs hőmérsékleténél, akkor a gázok „belekondenzálnak” az abszorbensbe, és jelentősen felmelegítik annak hőmérsékletét.

Az abszorpció hőjelenségeit figyelembe kell venni, mert a hőmérséklet emelkedésével a gázok oldékonysága, abszorpciója romlik.

## Anyagátbocsátás az abszorpció során, az abszorpció mechanizmusa

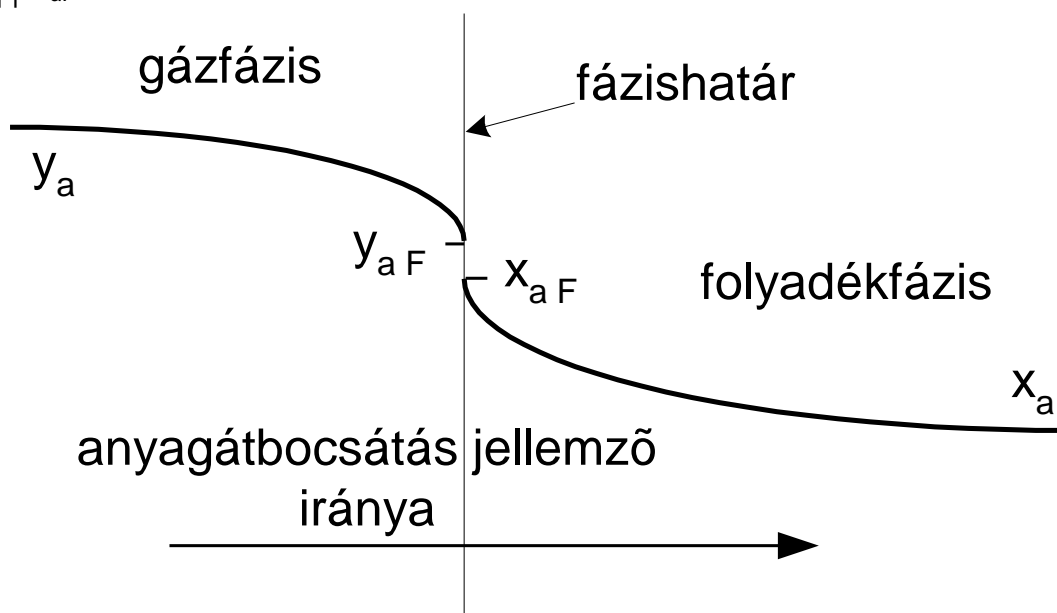
Az abszorpció során a gázt és a folyadékot érintkeztetjük, és az anyagátbocsátás hatékonyságának növelésére igyekszünk minél nagyobb anyagátadási felületet létrehozni, pl. töltött oszlop, tányéros oszlop stb. alkalmazásával. Ilyenkor, hasonlóan más anyagátbocsátási folyamatoknál, egy fázishatár-felület alakul ki a gáz- és folyadékfázis közt, melynek nagyságát többnyire nem ismerjük. Abszorpciónál az

anyagátbocsátás, jellemző módon a gázfázisból a folyadékfázisba irányul. Természetesen, mivel egyensúlyi folyamatról van szó ezért fordított irányú anyagátbocsátás is elképzelhető.

A gáz főtömegében a koncentráció,  $y_a$ , nagyobb, mint a fázishatár-felületen,  $y_{aF}$ , ezért a gázfázisban az abszorbeálendő komponens a fázishatár felé tart, azon átlép, és a folyadékfázisban folytatja útját. A fázishatáron történő áthaladást az anyagátbocsátás egyéb ellenállásaihoz képest elhanyagolhatjuk.

A folyadékfázisban a határfelületi koncentráció,  $x_{aF}$ , nagyobb, mint a fázis főtömegére jellemző érték,  $x_a$ . A fázishatár környezetében kialakuló koncentrációprofil a 227. ábra mutatja móltörttekkel. Természetesen a gázfázis koncentrációja parciális nyomásokkal is kifejezhető ( $p_a = y_a * P$ ).

A fázishatáron egyensúly alakul ki a gáz- és folyadékfázis közt. Az egyensúly jelölése  $y_{aF} ||| x_{aF}$ .



227. ábra. Anyagátbocsátás abszorpciónál, „a” komponensre nézve

Az anyagátbocsátást leírhatjuk az anyagátbocsátási tényezők ismeretében:

19. képlet  $\dot{n}_a = K_G * (y_a - y_a^*) * A$

20. képlet  $\dot{n}_a = K_L * (x_a^* - x_a) * A$

ahol  $\dot{n}_a$  az „a” komponens moláris árama (mol/s),  
 $A$  az anyagátbocsátás felülete (m<sup>2</sup>),  
 $K_G$ , gázoldali anyagátbocsátási tényező (mol/s m<sup>2</sup>),  
 $K_L$ , folyadékoldali anyagátbocsátási tényező (mol/s m<sup>2</sup>),  
 $y_a^*$  az  $x_a$  koncentrációval egyensúlyban lévő összetétel, tehát  $y_a^* ||| x_a$ ,  
 $x_a^*$  az  $y_a$  koncentrációval egyensúlyban lévő összetétel,

tehát  $y_a ||| x_a^*$ .

## Az abszorbens kiválasztása

Fontos mérnöki feladat. Számos szempontnak meg kell felelnie, így pl.

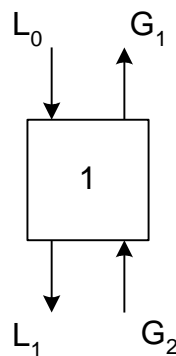
- jól és szelektíven kell oldania az abszorbeálandó komponens(ek)e)t, vagyis a szolutumot ill. abszorptívumot, azaz elérhető legyen vele a kívánt gázkinyerés ill. tisztítás,
- kis tenziója legyen, hogy kevés legyen az oldószerveszteség,
- kis viszkozitású legyen, mert akkor gyors az abszorpció és kicsi az abszorber nyomásesése,
- egyszerű legyen a regenerálása,
- használata gazdaságos legyen,
- környezetre ne legyen veszélyes.

Kemoszorpciót akkor célszerű alkalmazni, ha a fizikai abszorpció nem célravezető, azaz nem találunk megfelelő abszorbenst, mellyel a kívánt gázkinyerés ill. a tisztítás reális keretek közt a gyakorlatban megoldható lenne.

## Egyfokozatú abszorpció

Különlegesen jól oldódó gázok esetében célravezető. A gázt és folyadékot intenzíven érintkeztetjük, majd fizikailag szétválasztjuk. Az érintkezés alatt megtörténik a komponensek diffúziója ill. megoszlása a fázisok közt. Ideális esetben beáll a fázisok közt a gáz-folyadék egyensúly, és a fokozatot elhagyó anyagáramok (gáz és folyadék) egymással egyensúlyban vannak. Ilyenkor ez az egy fokozat egy egyensúlyi egység, melyet abszorpció esetében elméleti tányérnak is nevezünk. Az egyensúlyi fokozat ezen tárgyalása általános, a később tárgyalandó desztillációra is vonatkozik. Desztilláció esetén a gőz-folyadék egyensúly beállta a megkívánt feltétel.

Az egyfokozatú egységre felírható a teljes anyagmérleg vagyis a belépő és kilépő anyagmennyiségek mérlege (228. ábra):



228. ábra. Egyfokozatú ellenáramú abszorpciós egység

21. képlet  $L_0 + G_2 = L_1 + G_1.$

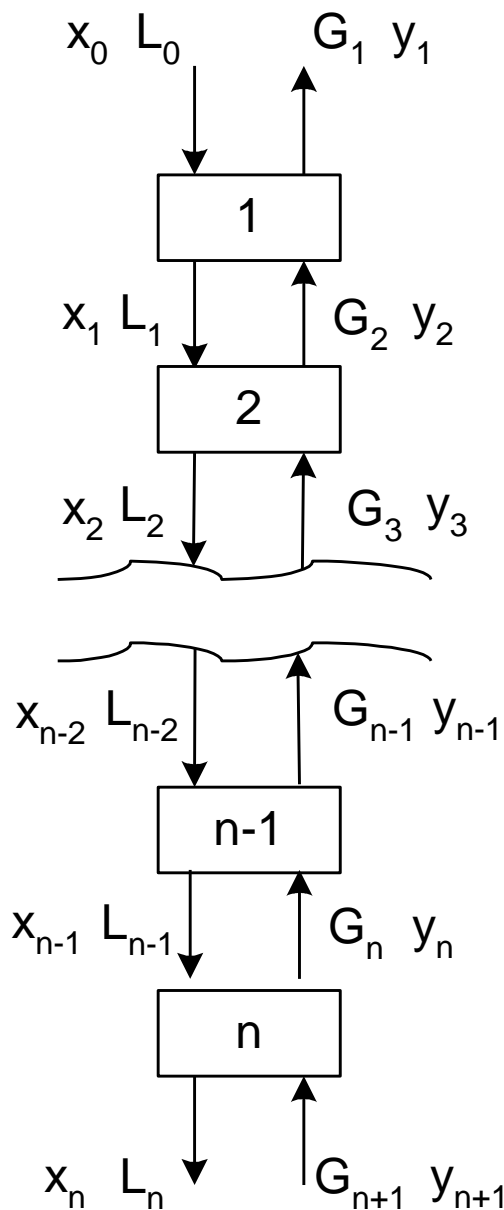
Illetve a komponensmérleg, bármely „i” komponensre:

22. képlet  $L_0 * x_{i0} + G_2 * y_{i2} = L_1 * x_{i1} + G_1 * y_{i1} \quad i = 1, \dots, I$

ahol  $L, G$  a folyadék és gázáramok, (mól vagy tömeg/idő),  
 $x_i$   $i$  komponens mól vagy tömegtörtje a folyadékfázisban,  
 $y_i$   $i$  komponens mól vagy tömegtörtje a gázfázisban,  
 $I$  a komponensek száma.

## Többfokozatú abszorpció

Az abszorpció hatékonyságát növelhetjük, ha azt több egyensúlyi fokozatban hajtjuk végre. Ez tulajdonképpen nem más mint több egyfokozatú abszorpció egymás után, ahol az anyagáramok ellenáramban haladnak. Minden egyes fokozatban beáll az egyensúly, tehát a fokozatot elhagyó gáz- és folyadékáramok egymással egyensúlyban vannak. Az így létrehozható szétválasztás mértéke nagyobb, mint egyetlen fokozat esetén. Az egyfokozatú esethez hasonló módon az anyag és komponensmérleg felírható a többfokozatú ellenáramú egységre (229. ábra):



229. ábra. Többfokozatú ( $n$  db.) ellenáramú abszorpciós egység

$$23. \text{ képlet} \quad L_0 + G_{n+1} = L_n + G_1.$$

Illetve a komponensmérleg, bármely komponensre:

$$24. \text{ képlet} \quad L_0 * x_{i0} + G_{n+1} * y_{in+1} = L_n * x_{in} + G_1 * y_{i1} \quad i = 1, 2, \dots, I$$

Az anyagmérlegből levezethető a **25. képlet**,

$$25. \text{ képlet} \quad y_{in+1} = \frac{L_n}{G_{n+1}} x_{in} + \frac{G_1 * y_{i1} - L_0 * x_{i0}}{G_{n+1}}$$

melyet *munkavonalnak* nevezünk. A munkavonal megadja a többfokozatú egységben az egységek közt, egymás mellett elhaladó anyagáramok közti összefüggéseket, pl. a 229. ábra az  $L_{n-1}$  és a  $G_n$  közt. A munkavonal meredeksége pedig a folyadék gáz arányt adja meg ( $L/G$ ), mely jellemző az abszorber üzemeltetésére.

## Nagymennyiségű gáz abszorpciója

Amennyiben az abszorpció során jelentős mennyiségű az abszorbeált gáz mennyisége, vagyis nem hanyagolható el az inert gázhoz képest, akkor nem igaz az, hogy az abszorberben a gáz ( $G$ ) és folyadékáram ( $L$ ) mindvégig állandóak ill. állandónak tekinthetők. Ilyenkor nem használjuk a móltörtet, hanem mindent az inert gázra vonatkoztatunk. A koncentrációkra bevezetjük  $X$  és  $Y$  változókat:

$$26. \text{ képlet} \quad X_i = \frac{x_i}{1 - x_i} \left[ \frac{\text{kmol abszorptívum / szolutum}}{\text{kmol abszorbens}} \right]$$

$$27. \text{ képlet} \quad Y_i = \frac{y_i}{1 - y_i} \left[ \frac{\text{kmol abszorptívum / szolutum}}{\text{kmol hordozó / inert gáz}} \right]$$

ahol az abszorbeálendő komponens mennyiségét a hordozó gáz mennyiségére vonatkoztatjuk. (A vonatkoztatást természetesen más, de mindkét mennyiségre nézve azonos dimenzióban pl. kg vagy  $\text{m}^3$ -ben is el lehet végezni.)

Az egyensúlyi összefüggést is ennek megfelelően át kell alakítani. Így pl. a Henry-törvény alakja (**3. képlet**) a **28. képlet**-re módosul:

$$28. \text{ képlet} \quad \frac{Y_i}{1 + Y_i} = H' * \frac{X_i}{1 + X_i}.$$

Az anyagmérlegek felírásánál is  $X_i$  és  $Y_i$  koncentrációkat használjuk, de ez megköveteli a gáz és folyadékáramok átírását is szolutummentes bázisra. Pl. a **24. képlet** által leírt anyagmérleg alakja a **29. képlet**-re módosul,

$$29. \text{ képlet} \quad L' * X_{i0} + G' * Y_{in+1} = L' * X_{in} + G' * Y_{i1} \quad i = 1, \dots, I$$

ahol  $G'$  az inert gáz (szolutummentes gáz) árama ( $\text{kmol/s}$ ,  $\text{kg/s}$ ,  $\text{m}^3/\text{s}$ ),

$L'$  az abszorbens szolutummentes árama (kmol/s, kg/s, m<sup>3</sup>/s).

A gáz- és folyadékáramok indexelése elhagyható, mert értékük az abszorberben végig állandó. Illetve a munkavonal:

$$30. \text{ képlet} \quad Y_{in+1} = \frac{L'}{G'} X_{in} + \frac{G' * Y_{i1} - L' * X_{i0}}{G'}$$

Ezzel az átalakítással megoldható, hogy a gáz és folyadékáramok végig állandóak az abszorber hossza, egyensúlyi egységei, mentén és az Y-X diagramban ábrázolva egyenes lesz, melynek meredeksége a szolutummentes folyadék gáz arányt adja meg. Az egyensúlyi összefüggés alakja bármilyen formát felvehet.

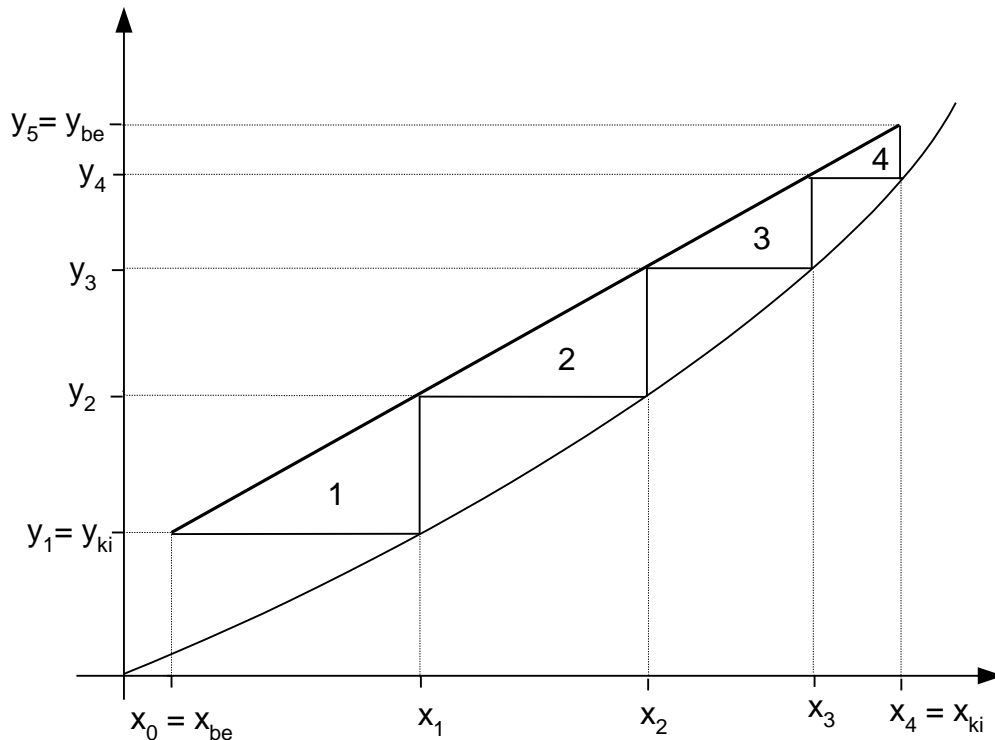
### Az egyensúlyi egységek száma

Egy abszorpciós berendezésnél meghatározhatjuk, hogy a berendezés elválasztóképessége hány egyensúlyi fokozatnak felel meg. Mivel az egyensúlyi egységet elhagyó gáz- és folyadékáramok egyensúlyban vannak, ezért ezt a fokozatszámot elméleti fokozatnak ill. tányéros berendezések esetén elméleti tányérszámnak is hívják. Ezek a kifejezések szinonimák.

A számítás feltételezi, hogy az abszorpció során csak a szolutum fordul elő mindkét fázisban; az abszorbens és a hordozó gáz egymással nem elegyednek.

A számítást legegyszerűbben y-x vagy Y-X diagramban végezhetjük el az abszorpció jellegétől függően (230. ábra). A számítás lényege, hogy grafikusan, azaz az egyensúlyi vonal segítségével kiszámítjuk az egyes egyensúlyi egységeket elhagyó áramokat, a munkavonal segítségével pedig az egyes egységek közti áramok összetételét. Ez a számítás tulajdonképpen egy „lépcsőszerkesztésnek” felel meg, melyet a berendezés egyik végén kezdünk el. Ha az abszorber tetején kezdjük (tányéros berendezéseknél a tányérszámozást is többnyire az oszlopfejben kezdjük), akkor a fokozatot elhagyó gáz  $y_1$  a fokozatba belépő abszorbens  $x_0$ , melyeket egymás mellett haladó áramoknak tekinthetünk, tehát ezek az áramok a munkavonalon fekszenek, és annak egyik végpontját adják meg. Az első fokozatot elhagyó folyadékáram  $x_1$ , melyet az egyensúlyi görbéről olvashatunk le, tehát „átlépünk” az egyensúlyi görbére és leolvassuk  $x_1$  –et. Ezzel a folyadékárammal szembehaladó gázáram összetétele  $y_2$ , melyet ismét a munkavonalról olvasunk le. Így újra a munkavonalra kerültünk és megállapítottuk az első elméleti v. egyensúlyi fokozatot.

A szerkesztést az abszorber aljáig végezzük, és megállapíthatjuk az abszorber elválasztóképességének megfelelő fokozatszámot, mely tulajdonképpen azt is megadja, hogy az abszorberben hányszor áll be a gáz-folyadék vagyis az y-x egyensúly.



230. ábra. Egyensúlyi fokozatok meghatározása

Az abszorber elméleti fokozatszámát meghatározhatjuk analitikusan is az ú.n. *Kremser-egyenlet* segítségével is, melyet a fenti szerkesztés alapján vezetünk le. Az 1. tényér komponensmérlege:

31. képlet  $G^*(y_2 - y_1) = L^*(x_1 - x_0).$

Az egyensúlyi összefüggés:

32. képlet  $y_1 = m * x_1.$

Az abszorpciós faktor:

33. képlet  $A = \frac{L}{m * G},$

melynek értékére, ha változik az abszorberben, megengedett, hogy az abszorber két végén vett értékek mértani átlagával számoljunk. Ezekből kapjuk:

34. képlet  $y_1 = \frac{y_2 + A * m * x_0}{1 + A} = \frac{(A - 1)y_2 + A * (A - 1) * m * x_0}{A^2 - 1}$

35. képlet  $y_2 = \frac{y_3 + A * y_1}{1 + A}$

ill. a 34. képlet behelyettesítésével, átrendezés után:



$$36. \text{ képlet} \quad y_2 = \frac{(A^2 - 1) * y_3 + A^2 * (A - 1) * m * x_0}{A^3 - 1}.$$

Az összefüggés rekurzív. Az  $n$ -dik tényérra felírható:

$$37. \text{ képlet} \quad y_n = \frac{(A^n - 1) * y_{n+1} + A^n * (A - 1) * m * x_0}{A^{n+1} - 1}.$$

Az abszorber teljes anyagmérlegének segítségével kiküszöbölhetjük az belső áramokat, és csak a be- és kilépő áramok maradnak:

$$38. \text{ képlet} \quad G * (y_{n+1} - y_1) = L * (x_n - x_0)$$

azaz

$$39. \text{ képlet} \quad A * (y_n - m * x_0) = y_{n+1} - y_1$$

A **37. képlet** és **38. képlet** felhasználásával kapjuk a Kremser-egyenletet:

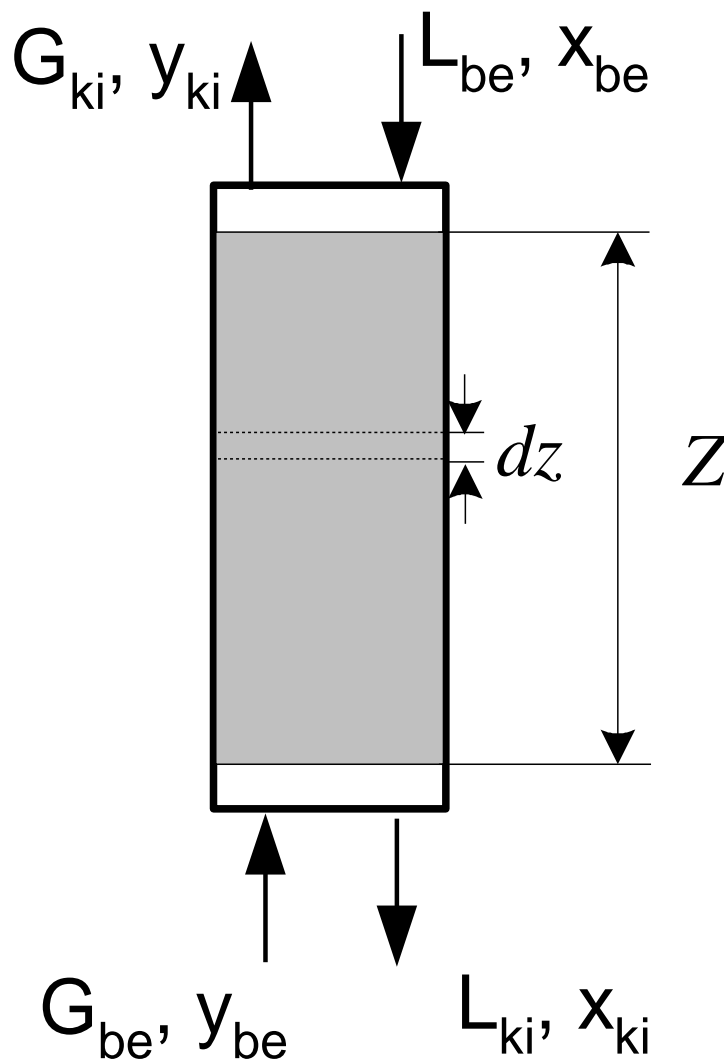
$$40. \text{ képlet} \quad \frac{y_{n+1} - y_1}{y_{n+1} - m * x_0} = \frac{A^{n+1} - A}{A^{n+1} - 1}$$

melyet megoldhatunk a fokozatszámra

$$41. \text{ képlet} \quad n = \frac{\lg \left[ \frac{y_{n+1} - m * x_0}{y_1 - m * x_0} * \left( 1 - \frac{1}{A} \right) + \frac{1}{A} \right]}{\lg A}.$$

## Töltött oszlopok jellemzése: átviteli egységek, HTU, NTU, HETP

Az abszorpciónál, mint az anyagátbocsátási műveleteknél általában, nincs módunk meghatározni azt a felületet, mely a komponensátadásra rendelkezésre áll. Ezért azt az abszorber egységnyi térfogatára vonatkoztatott átbecsátási tényezővel mérjük. Ezt a leírást a folytonos érintkeztetésű abszorbereknél, pl. töltött oszlop, használjuk (231. ábra).



231. ábra. Töltött abszorber vázlatos rajza

A töltött abszorber differenciálisan kicsiny töltetmagasságának ( $dz$ ) megfelelő érintkeztetési felület ( $dA$ ):

42. képlet  $dA = \omega * S * dz$

ahol  $\omega$  az egységnyi térfogatra vonatkoztatott érintkeztetési felület ( $m^2$  felület/ $m^3$  töltet)  
 $S$  a töltött oszlop keresztmetszete ( $m^2$ ),

Megjegyezzük, hogy az egységnyi térfogatra vonatkoztatott érintkeztetési felület ( $\omega$ ) nem azonos a száraz töltet fajlagos felületével.  $\omega$  nem csupán a töltet fajlagos felületétől, hanem a folyadék és gáz uralkodó sebességeitől, tehát az áramlási viszonyoktól is függ. Szokás azonban a száraz töltet fajlagos felületével számolni, de

ilyenkor bevezetnek egy  $\varphi$  nedvesítési tényezőt, mellyel a száraz töltet fajlagos felületét megszorozva  $\omega$ -t kapjuk.

Mivel  $\omega$  (ill.  $\varphi$ ) rendszerint nem ismert, ezért mindig egyesítjük az anyagátbocsátási együtthatókkal és így kapjuk a térfogati anyagátbocsátási együtthatókat:

$$43. \text{ képlet} \quad K_G^* \omega \quad \text{ill.} \quad K_L^* \omega \quad (\text{kmol/s m}^3).$$

Az anyagátbocsátást a térfogati együtthatókkal írjuk le:

$$44. \text{ képlet} \quad d\dot{n}_a = K_G^* (y_a - y_a^*) dA = K_G^* \omega^* S^* (y_a - y_a^*) dz,$$

$$45. \text{ képlet} \quad d\dot{n}_a = K_L^* (x_a^* - x_a) dA = K_L^* \omega^* S^* (x_a^* - x_a) dz.$$

Az anyagátbocsátást leírhatjuk a komponensáramok változásaként is:

$$46. \text{ képlet} \quad d\dot{n}_a = d(G^* y_a) = d(L^* x_a).$$

Mivel híg oldatoknál feltételezhetjük, hogy  $G$  és  $L$  is egyaránt állandó, ezért írhatjuk, hogy

$$47. \text{ képlet} \quad K_G^* \omega^* S^* (y_a - y_a^*) dz = G^* dy_a,$$

$$48. \text{ képlet} \quad K_L^* \omega^* S^* (x_a^* - x_a) dz = L^* dx_a.$$

Átrendezve és a komponensindexet ( $a$ ) elhagyva kapjuk:

$$49. \text{ képlet} \quad \int_0^Z dz = Z = \frac{G}{K_G^* \omega^* S^*} \int_{y_{ki}}^{y_{be}} \frac{dy}{y - y^*},$$

$$50. \text{ képlet} \quad \int_0^Z dz = Z = \frac{L}{K_L^* \omega^* S^*} \int_{x_{be}}^{x_{ki}} \frac{dx}{x^* - x}.$$

A levezetés eredményeként a töltött oszlopok anyagátbocsátását két tényező szorzataként írhatjuk fel. A **49. képlet** első tagja a  $(HTU)_G$  (*height of transfer unit*), vagyis az *átviteli egység magasság*, a második tag az  $(NTU)_G$  (*number of transfer units*) pedig az *átviteli egységek száma*. A **50. képlet** u. ezeket az értékeket adja meg, de a folyadékfázisra,  $(HTU)_L$  és  $(NTU)_L$ .

Ezek alapján egy adott elválasztáshoz szükséges töltött oszlop magassága ill. egy adott oszlopon végrehajtható elválasztás mind folyadék, mind gázoldalról számítható. A gázfázisra:

$$51. \text{ képlet} \quad Z = (HTU)_G^* (NTU)_G,$$

illetve a folyadékfázisra:

**52. képlet**  $Z = (HTU)_L * (NTU)_L.$

A két fázisra végzett számítások értelemszerűen u. azt az eredményt kell, hogy adják. A  $HTU$  értéke mutatja egy töltet hatékonyságát. Minél kisebb ennek értéke annál hatékonyabb a töltet. Az  $NTU$  integrál megadja, hogy a kérdéses fázisban elérni kívánt változás hányszorosa e véges változás során kialakuló hajtóerő ( $y - y^*$  ill.  $x^* - x$ ) átlagának.

A gyakorlatban egyre inkább alkalmazzák, töltött oszlopokra is, a fentebb leírt egyensúlyi egységek vagy más néven elméleti tányérok számítását, és az elméleti tányérszámmal jellemzik az adott abszorber anyagátadási hatékonyságát. Töltött oszlopok esetében az egy elméleti tányérnak megfelelő töltetmagasságot (Height of Equivalent Theoretical Plate, HETP) adják meg. Többnyire ezt használják a tölteléseket gyártó cégek is.

Tányéros abszorberek esetében használatos az  $n$ . tányérhatásfok, mely azt mutatja, hogy a kérdéses tányéron történő anyagátbocsátás mennyire közelíti meg az elméleti tányéron történő anyagátbocsátást, vagyis mennyire felel meg az egyensúlyi egységnek. Irodalmi adatok szerint abszorberek esetében ez a tányérhatásfok alacsony, kb. 30-40% körül van. (Az abszorberokről és a tányérhatásfokról még később írunk.)

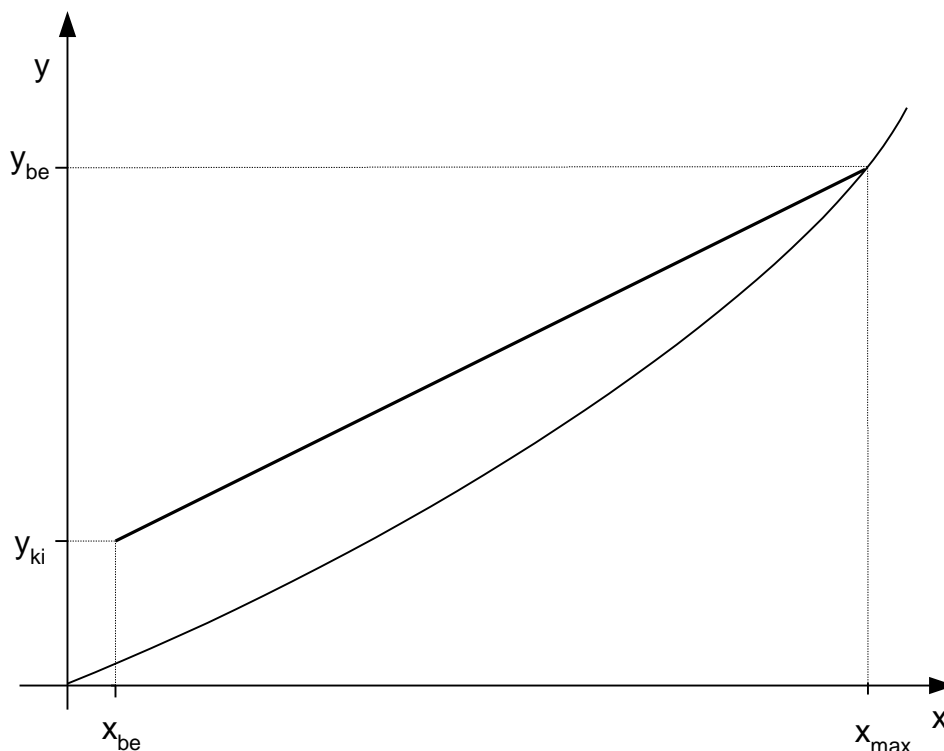
## Az abszorpció folyadékárama, minimális folyadékáram

Az abszorpció megvalósításánál elsődleges az abszorberre ill. az abszorpcióra jellemző egyensúlyi összefüggés valamint a munkavonal megállapítása, megszerkesztése. Az abszorbens helyes kiválasztásával az egyensúlyi összefüggést gyakorlatilag megszabtuk. Az abszorpció működtetésének másik paramétere az abszorbens mennyisége, melyet a munkavonal meredekségéből olvashatunk le, hiszen a munkavonal meredeksége a folyadék/gáz arányt ( $L/G$ ) adja meg (**25. és 31. képletek**). A munkavonal meredekségét a legegyszerűbben grafikusán határozhatjuk meg (**232. ábra**). Az ábrázolást és a szerkesztést bármelyik koncentráció ( $x$ - $y$  vagy  $X$ - $Y$ ) használatával megtehetjük, de természetesen ügyelni kell arra, hogy a kapott eredményt a választott dimenzióknak megfelelően értelmezzük.

A folyadékáram meghatározásához ismernünk kell a kiindulási tervezési paramétereket, így

- a tisztítandó/abszorbeálandó gáz kiindulási koncentrációját ( $y_{be}$  ami megfelel az  $y_{n+1}$ -nek a 229. ábra szerint),
- az elérni kívánt koncentrációt/tisztaságot ( $y_{ki}$  ami megfelel az  $y_1$ -nek a 229. ábra szerint),
- a rendelkezésre álló abszorbens kiindulási koncentrációját ( $x_{be}$  ami megfelel az  $x_0$ -nak a 229. ábra szerint),

A tervezési koncentrációkat ábrázoljuk az  $x$ - $y$  ill.  $X$ - $Y$  koordinátarendszerben.



**232. ábra. Abszorber minimális folyadékáramának meghatározása**

Az ábrázolt pontok közül  $x_{be}$  és  $y_{ki}$  metszéspontja megadja a munkavonal egy pontját. A munkavonal másik pontja az  $y_{bei}$  és az egyensúlyi görbe metszéspontja. Ez így előálló munkavonal, mivel éppen érinti az egyensúlyi görbét, egy hipotetikus üzemelesnek felel meg. Ez az a minimális folyadék-gáz arány, ill. a gázáram ismeretében számítható minimális folyadékáram, melynél az abszorpció ill. az abszorber már éppen nem üzemel. Ugyanis csak azok az üzemelesállapotok reálisak, melyeknél az egyensúlyi görbe és a munkavonal nemcsak hogy nem metszik, de nem is érintik egymást. Ennek az üzemelesállapotnak a hipotetikus voltát az is mutatja, hogy a 230. ábra bemutatott egyensúlyi fokozat meghatározás esetén, ebben az esetben, végtelen tányérszámot kapnánk.

Tehát, ez a folyadék-gáz arány az abszorpcióra nézve egy nem megvalósítható fiktív határeset, és a valóságban egy ennél mindenképpen nagyobb abszorbens árammal kell dolgoznunk. Ez a fiktív határeset megadja az abszorbert elhagyó abszorbens maximális szolutum koncentrációját, mely szintén fiktív. A valós üzemelesállapotoknál ennél hígabb koncentrációkat kapunk.

(Megjegyezzük, hogy a végtelen nagy folyadékáramhoz éppen függőleges munkavonal tartozna. Ez a másik fiktív határeset az abszorpciónak.)

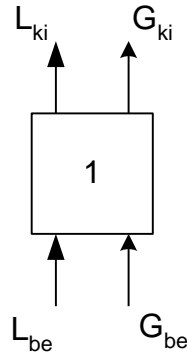
A 232. ábra szerint a munkavonal meredekségéből analitikusan is kifejezhetjük a minimális folyadékáramot:

**53. képlet** 
$$L_{\min} = G * \frac{y_{be} - y_{ki}}{x_{\max} - x_{be}}.$$

Gyakorlati példák szerint az abszorbereknél alkalmazott abszorbens áram a minimális értéknél alig nagyobb, annak kb. 1.2-1.6 szerese.

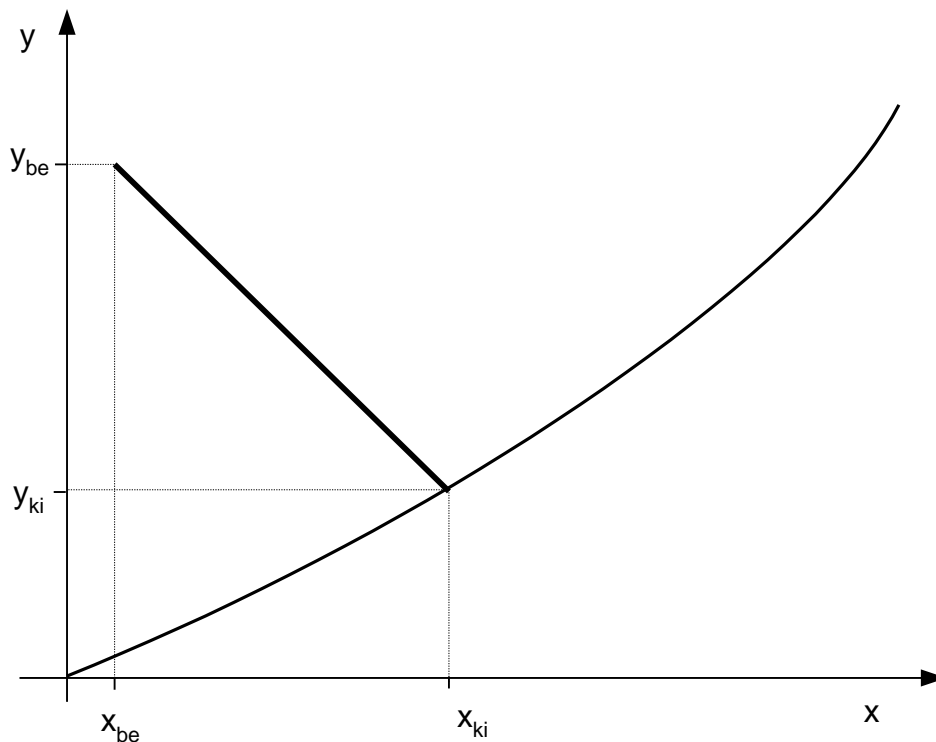
## Egyenáramú abszorpció

Ha a gáz és az abszorbens egymással azonos irányban áramlik, akkor egyenáramú abszorpcióról beszélünk (233. ábra).



233. ábra. Egyfokozatú egyenáramú abszorpciós egység

Ilyenkor a munkavonal meredeksége negatív lesz (234. ábra).



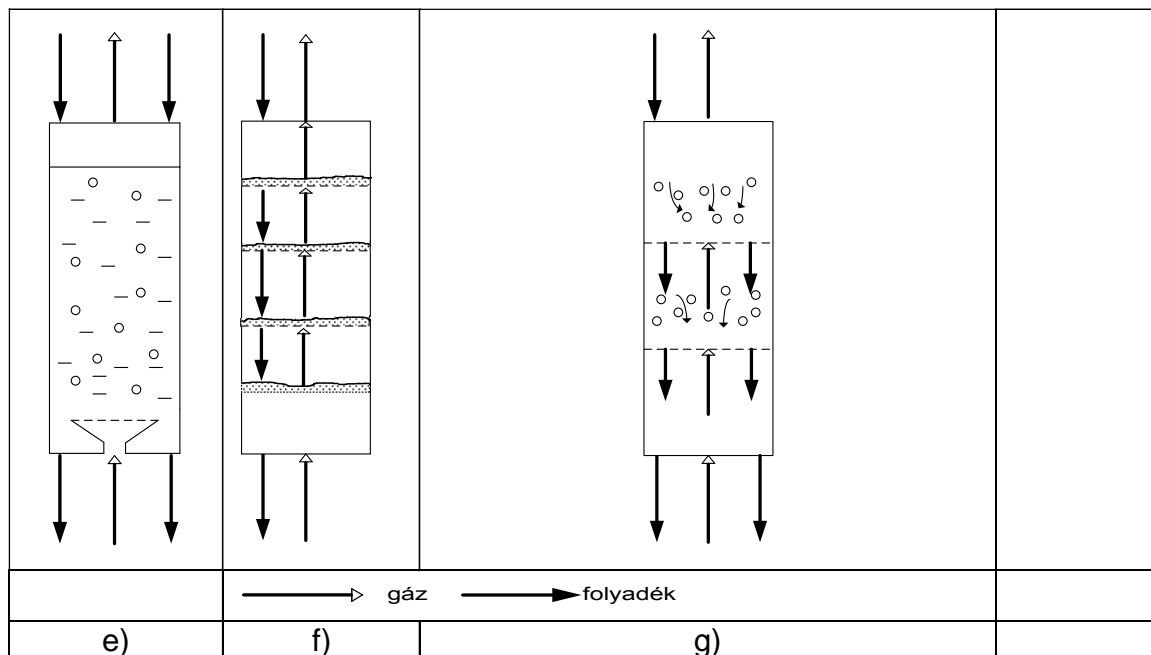
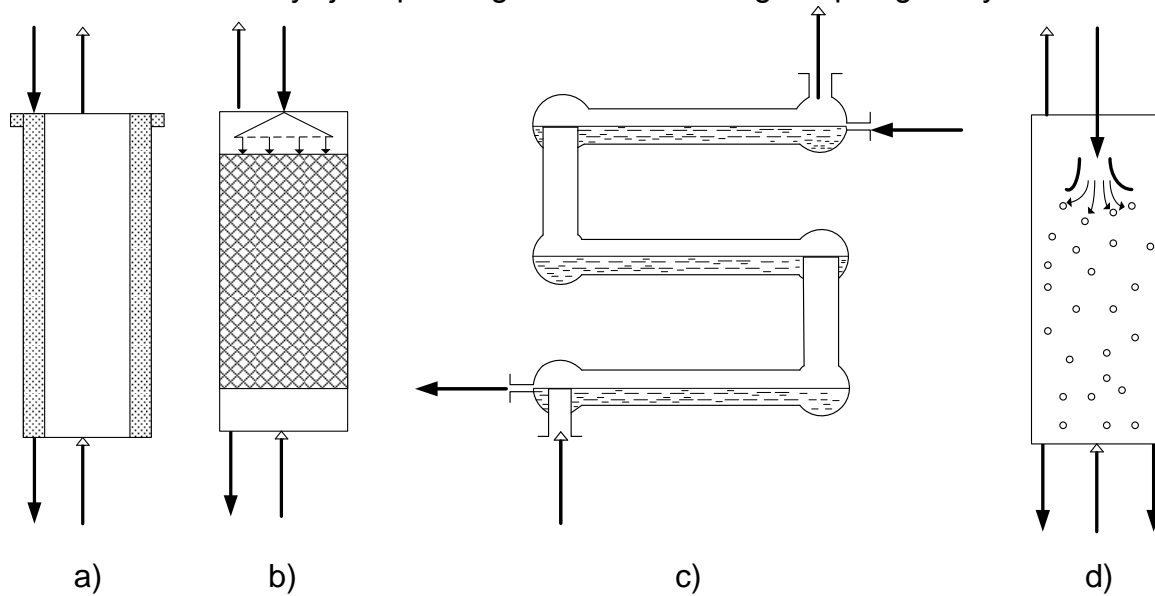
234. ábra. Egyenáramú abszorber munkavonala

Az egyenáramú abszorber előnye, hogy bármilyen folyadék-gáz aránynál működik, a kilépő gáz- és folyadékelegy egymással egyensúlyban vagy annak közelében van, a berendezés hatékonyságától függően. Hátránya, hogy kisebb mértékű tisztítás érhető el vele mint az ellenáramú megoldás esetén, és az abszorbens is hígabb lesz a szolútumban.

Ezért főleg rendkívül jól oldódó gáz, pl. HCl vizes abszorpciója, esetén használhatják, különösen akkor, ha erős felmelegedéssel jár az abszorpció. Készülékként ilyenkor esőfilmes vagy kúszófilmes abszorbert alkalmaznak, mely egyben hőcserélő is. Számos egyéb megoldás is lehetséges, melyeket a berendezéseknél mutatunk be.

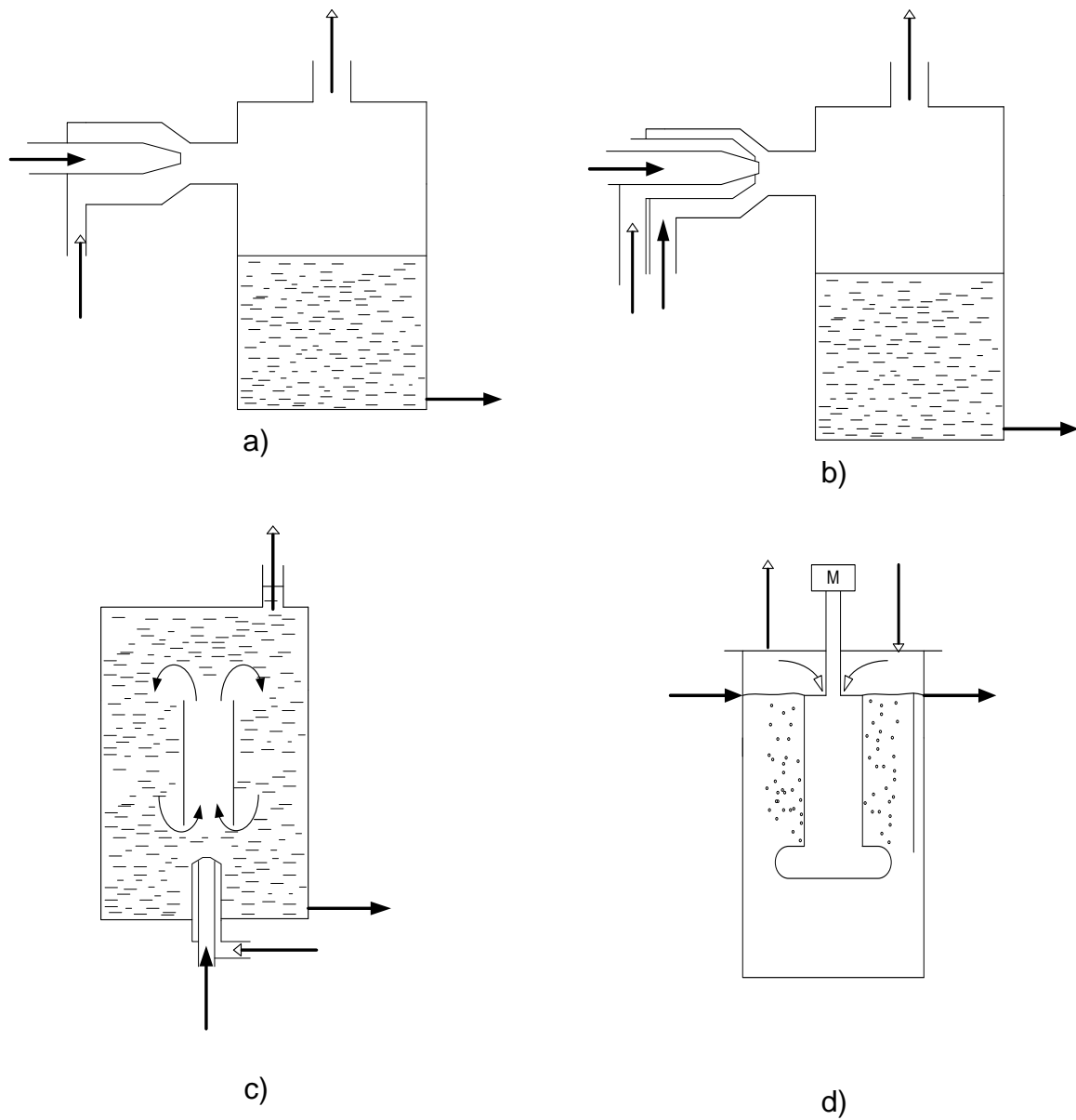
## Abszorpció készülékei, abszorberek

A gyakorlatban a legváltozatosabb abszorberek fordulnak elő. Változatosságukat sokrétű alkalmazásuk indokolja, különböző jellegű feladatokra mindig más és más abszorber a legmegfelelőbb. A 235. ábra mutat be néhány ellenáramban üzemelő abszorbert. Az üres nyíl jelképezi a gázáramot a vastagított pedig a folyadékáramot.



235. ábra. Ellenáramban üzemelő abszorberek

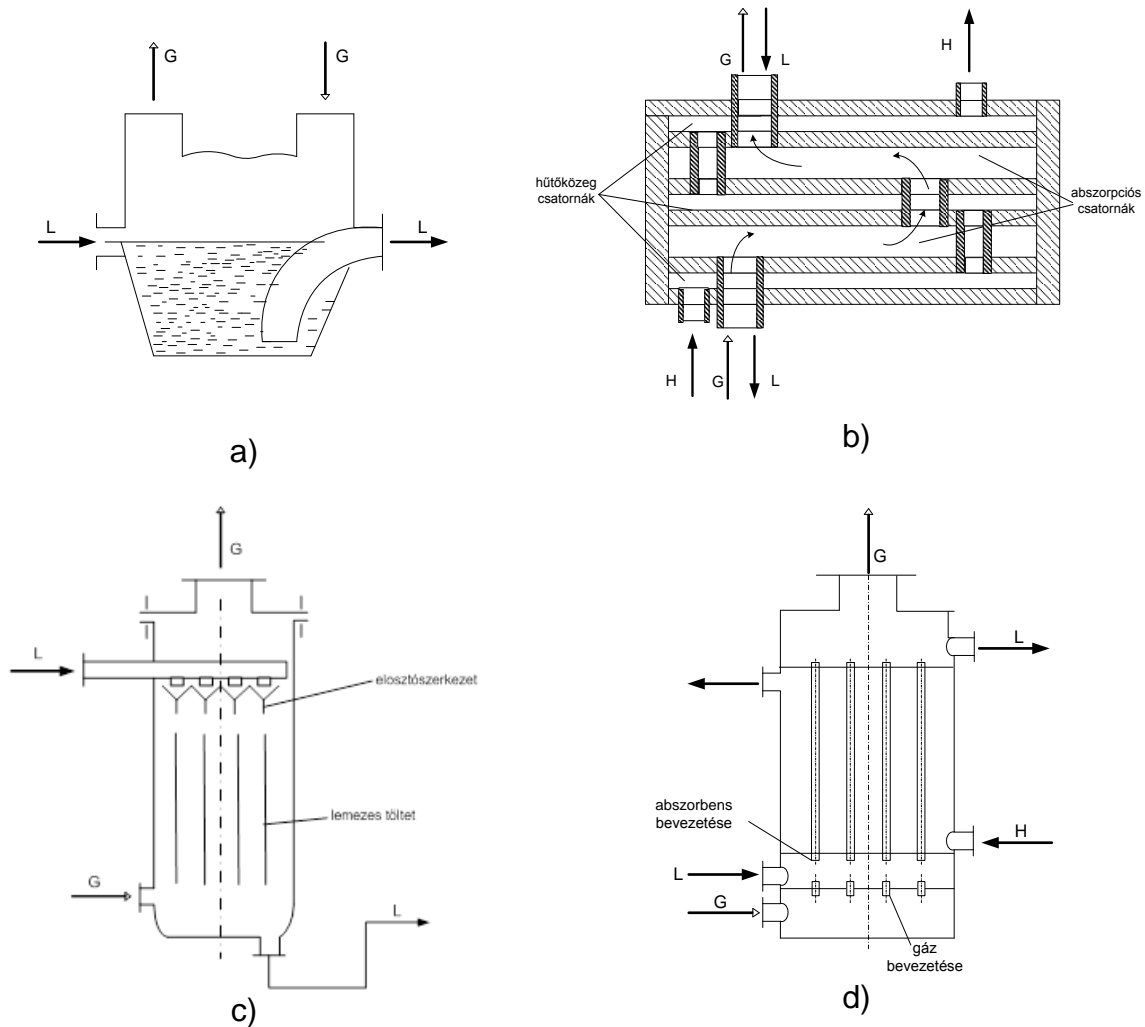
*a - üres csőoszlop (folyadékfilmes), b - töltött oszlop, c - felületi abszorber, d - permetező oszlop, e - buborékoltató oszlop, f - tányéros oszlop, g - tányéros oszlop, tányérok között szabadon mozgó golyókkal*



**236. ábra. Egyenáramban üzemelő abszorberek**

*a – Venturi mosó, b – sugárfúvókás mosó, c – vezetőcsöves sugárfúvókás mosó, d – gázbuborékoltató abszorber*





237. ábra. Speciális abszorberek

*a - felületi, b – lemezes, hőcserélővel, c – esőfilmes, d – kúszófilmes, hőcserélővel; L=folyadék, G=gáz, H=hűtőközeg*

A 236. ábra és 237. ábra további abszorbereket mutat be. Ezek a megoldások speciálisak, többnyire egyenáramúnak tekinthetők. A 237. ábra olyan, hőcserélővel kombinált megoldásokat is láthatunk, melyeknél a keletkező abszorpciós hő elvonása is megoldott. A 237. ábra a filmabszorberek egy-egy típusát mutatják be.

## Deszorpció, az abszorbens regenerálása

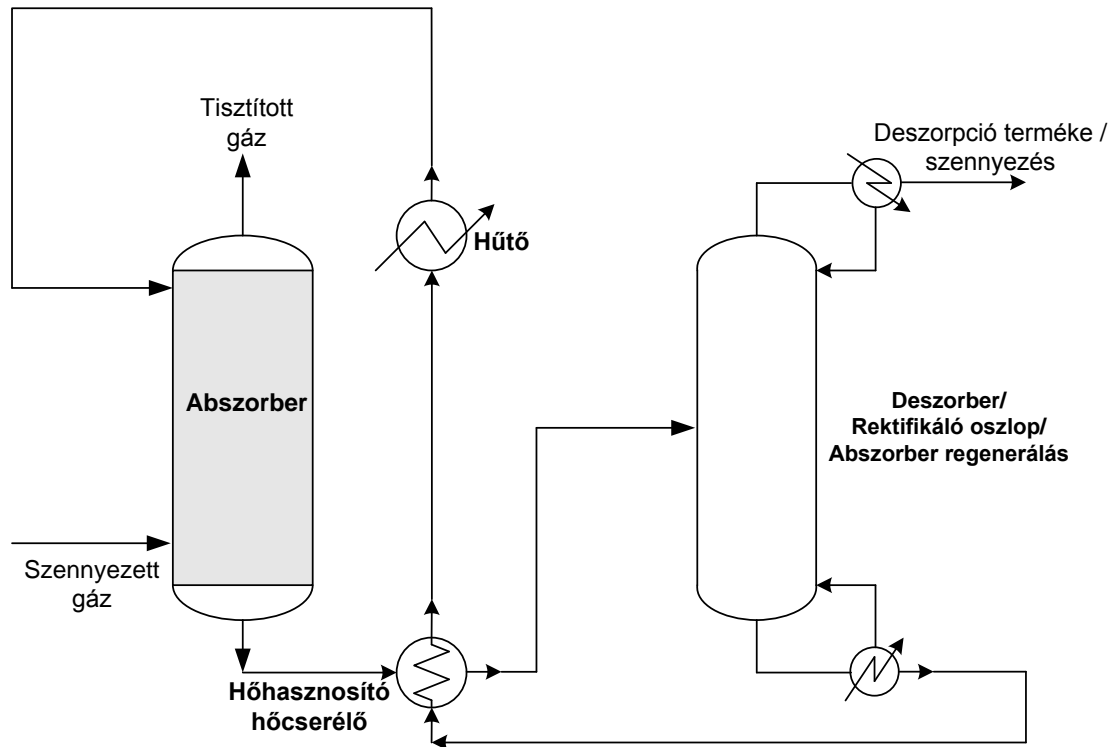
Az abszorpciót az ipari alkalmazásokkor többnyire deszorpció követi, amikor is kinyerjük az abszorbeált gázt és regeneráljuk az abszorbent. A deszorpció során olyan körülményeket alkalmazunk, melyek az abszorpcióval ellentétesek, tehát magas hőmérsékletet és/vagy alacsony nyomást. Így a deszorpció megvalósítható:

- inert gázzal vagy vízgőzzel végzett kihajtással,
- az abszorbens melegítésével és rektifikálással,
- nyomáscsökkentéssel.

Az *inert gázzal* (többnyire levegő vagy nitrogén) történő kihajtás során az abszorbeált gáz, (szolutum/abszorbens) az inert gázba kerül, és abból kinyerni már nehéz. Vízgőz alkalmazása esetén a szolutum a vízgőzzel távozik, mellyel együtt

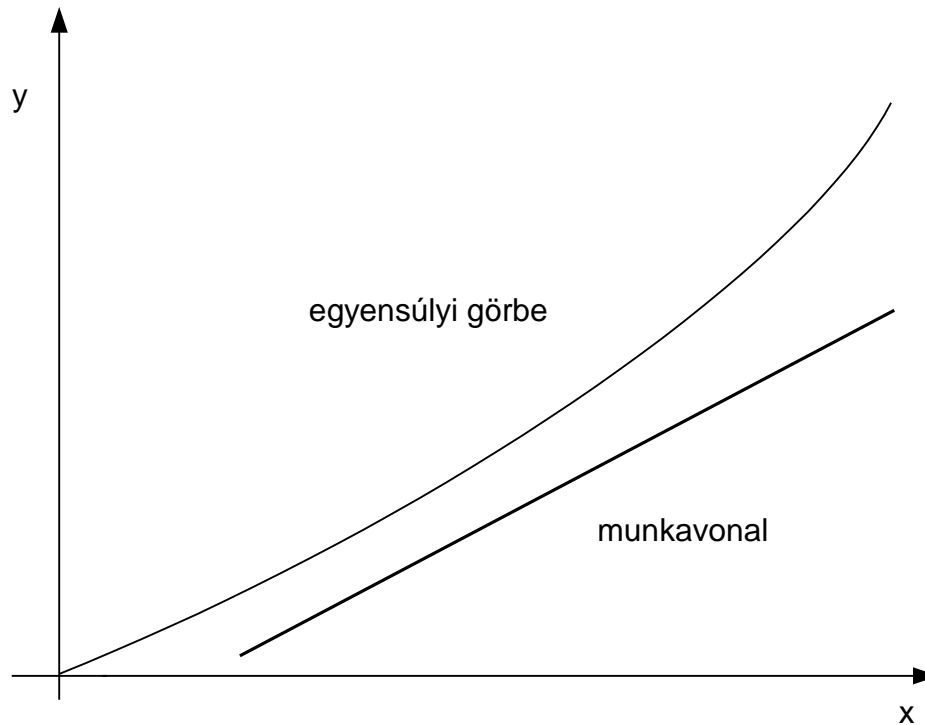
kondenzáltatható. Ez utóbbi akkor célravezető, ha szolutum és a víz egymással nem elegyednek, és így könnyen szétválaszthatók. Ez a műveletet a *sztrippelés* egyik fajtája. Sztrippelésről bővebben a desztillációnál.

Az abszorbens *melegítése* során a szolutummal az abszorbens is távozik, ezért sok esetben ezt a fajta deszorpciót rektifikálással oldják meg. Ilyenkor elválasztják az abszorbenst és a szolutumot, és a megtisztított abszorbenst visszavezetik az abszorberbe (238. ábra).



238. ábra. Abszorber-deszorber rendszer, melegítéssel, rektifikálással

Amennyiben a deszorpciót vagyis az abszorbens regenerálását termikusan oldjuk meg, tehát a desztilláció egy formáját végezzük, akkor ennek során az abszorbeált komponens a folyadékfázisból a gáz-gőz fázisba megy át. Ez az irány fordított az abszorpció komponensátbocsátásához képest. Ez a munkavonal elhelyezkedésében is tükröződik, mely ilyen esetben, ahogy az desztillációnál szokásos, az egyensúlyi görbe alatt helyezkedik el.



239. ábra. Deszorpció y-x diagramja

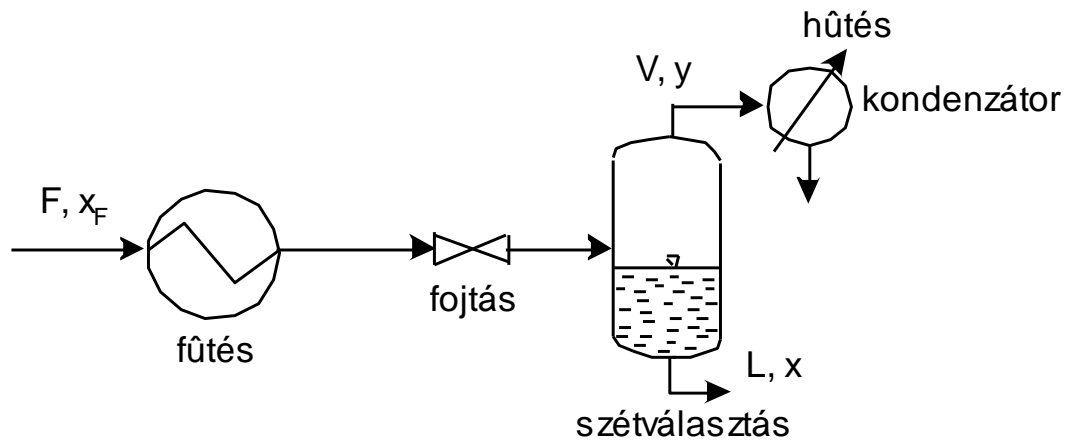
A nyomáscsökkentés csak nagynyomású abszorpció után célravezető. Vákuumot is alkalmazhatnak, esetleg hőközléssel kombinálva.

## Desztilláció és készülékei

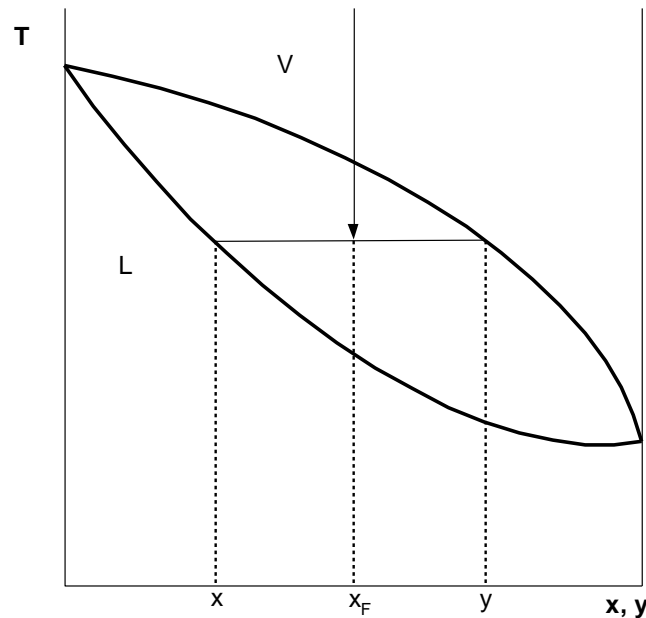
A desztilláció megvalósításának legegyszerűbb megoldásai azok, amikor a desztillációt csak egy lépésben valósítjuk meg. Ezek egyszerű megoldások, de tudatában kell lenni korlátaiknak, melyeket a gőz-folyadék egyensúlyok és a műveleti paraméterek szabnak meg.

### Folyamatos egyensúlyi desztilláció

Ennél az eljárásnál a két vagy több komponenst tartalmazó folyadékkegyet nyomás alatt felmelegítjük, majd egy erre a célra szolgáló berendezésben elpárologtatjuk (240. ábra). Az elpárologtatás során az illékony komponens(ek) a gőzfázisban feldúsulnak, tehát szétválasztás történik. A gőzfázist általában kondenzátorban kondenzáltatjuk. Az eljárás folyamatos, az összetételeket az egyensúlyi összefüggések valamint az eljárás körülményei (hőmérséklet, nyomás, anyagáramok) megszabják. Ha ezeket állandó értéken tartjuk, az összetételek is állandók maradnak



240. ábra. Folyamatos egyensúlyi desztilláció



241. ábra. Folyamatos egyensúlyi desztilláció bemutatása T-x-y diagramon

Az eljárás mérlegegyenleteit felírhatjuk. Az anyagmérleg:

54. képlet  $F = V + L,$

ahol  $F$  betáplálás (mól/idő),  
 $V$  desztillátum (mól/idő),  
 $L$  maradék (mól/idő).

A komponensmérleg felírható bármely  $i$  komponensre:

55. képlet  $F * x_{Fi} = V * y_i + L * x_i \quad i = 1, 2, \dots, I$

ahol  $x_{Fi}$  a betáplálás összetétele (móltört),

$y_i$  a desztillátum összetétele (móltört),

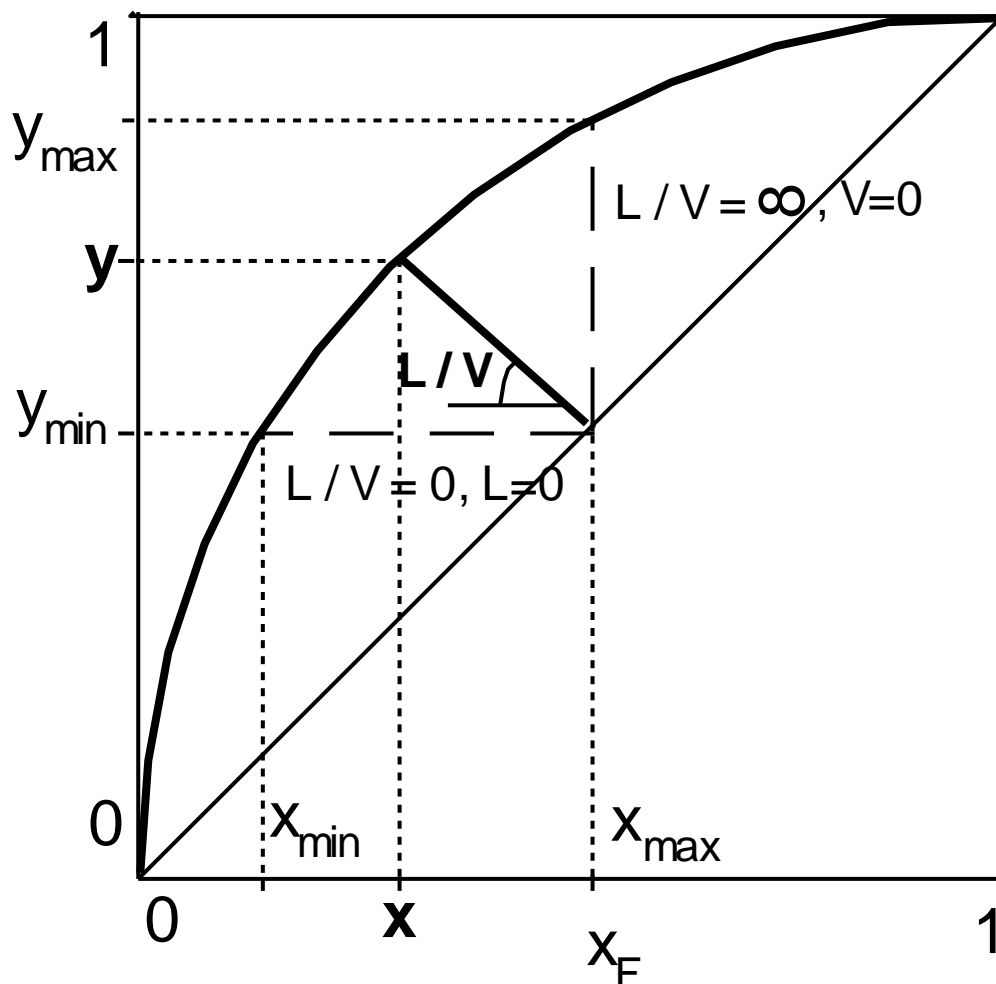
$x_i$  a maradék összetétele (móltört).

A desztillátum összetétele számítható:

**56. képlet** 
$$y_i = -\frac{L}{V} * x_i + \frac{F}{V} * x_{Fi} \quad i = 1, 2, \dots, I.$$

Biner rendszerre az x-y diagramban beláthatjuk az egyszerű folyamatos desztilláció megvalósíthatóságát ill. korlátait (242. ábra). Az  $L / V$  arány megadja a munkavonalat, vagyis azt a vonalat, amely leírja a desztilláció működését.

A két elméletileg vizsgálható szélső határeset egyike, amikor  $V=0$ , amikor is gyakorlatilag nem veszünk el desztillátumot. Ebben az esetben a gőzárám/desztillátum összetétele az elméletileg elérhető maximum, míg a folyadék/maradék összetétele a lehetséges legmagasabb érték. A másik határeset, amikor  $L=0$ , amikor gyakorlatilag teljes elpárologtatást hajtunk végre. A desztillátum összetétele a minimális érték, míg a maradéké az elméletileg elérhető legkisebb.



242. ábra. Biner folyamatos egyensúlyi desztilláció megvalósíthatósága

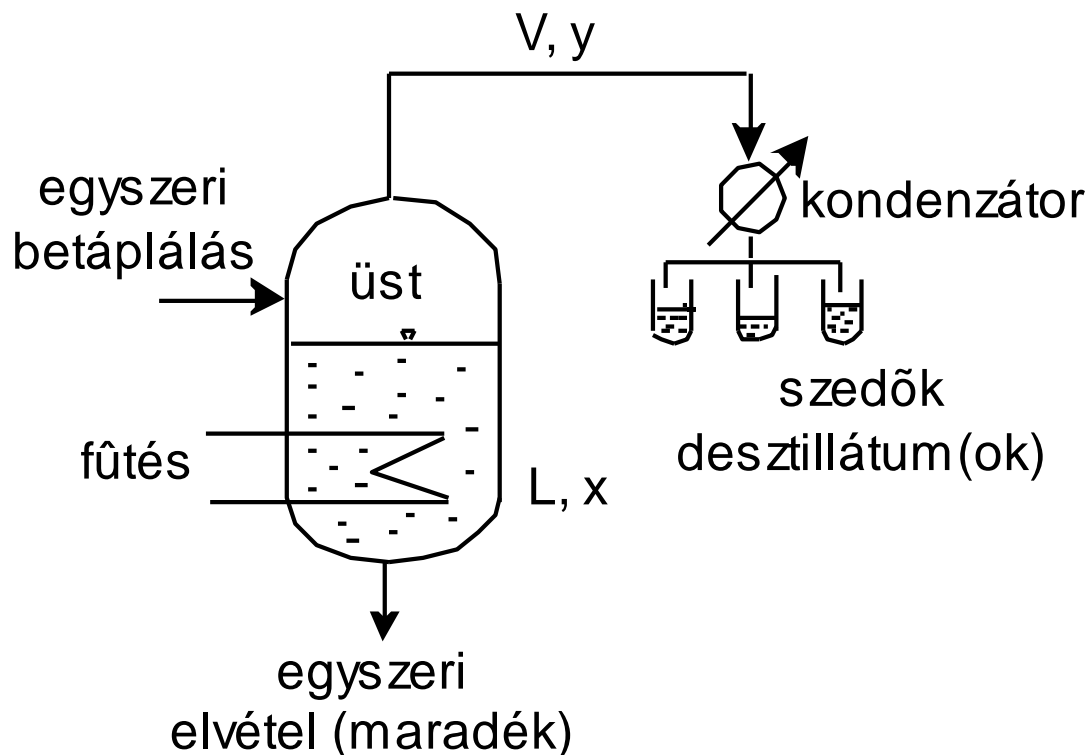
Valós  $L / V$  arányok az elméleti határértékek között vannak, és értékük az összetételekből számítható, biner rendszerre:

57. képlet 
$$\frac{L}{V} = \frac{y - x_F}{x_F - x}$$

A 241. ábra végzett vizsgálatok bemutatják a folyamatos egyensúlyi desztilláció elméleti korlátait. Ha ettől eltérő, kisebb vagy nagyobb összetételű termékeket kívánunk előállítani, akkor a desztillációt ismételni kell, vagy rektifikációt alkalmazunk.

## Szakaszos egyensúlyi desztilláció

Ebben az esetben egy üstbe betöltjük a desztillálandó anyagot, fűtjük, a párákat kondenzáltatjuk és szedőedényekben gyűjtjük (243. ábra). Több szedőedény lehetővé teszi azok megfelelő cseréjét, és így különböző összetételű desztillátumokat nyerhetünk.



243. ábra. Szakaszos desztilláció

Az összetétel az üstben és a desztillátumban egyensúlyban van, de csak egy differenciálisan kicsiny időtartamig, mivel az összetételek az időben folyamatosan változnak. Ezért szokás ezt a fajta desztillációt *differenciális* desztillációnak is hívni. A komponensmérleg, ennek megfelelően, ebben az esetben egy differenciál egyenlet:

58. képlet 
$$L * x = (L - dL) * (x - dx) + y * dL$$

ahol  $L * x$  az üstben lévő kiindulási anyagmennyiség,  
 $(L - dL) * (x - dx)$  az üstben maradt anyagmennyiség,  
 $y * dL$  az üstből a gőzbe távozó anyagmennyiség.

Az **58. képlet** differenciálegyenletet átrendezve és a differenciálok másodrendű szorzatát ( $dL * dx$ ) elhanyagolva:

$$59. \text{ képlet} \quad \frac{dL}{L} = \frac{dx}{y - x}.$$

Az **58. képlet** differenciálegyenletet megoldva kapjuk:

$$60. \text{ képlet} \quad \int_{L_{\text{végő}}^{L_{\text{kezdeti}}}} \frac{dL}{L} = \ln \frac{L_{\text{kezdeti}}}{L_{\text{végő}}} = \int_{x_{\text{végő}}^{x_{\text{kezdeti}}}} \frac{dx}{y - x}.$$

Az integrált biner elegyekre grafikusán is megoldhatjuk, többkomponensű elegyek esetében figyelembe kell venni a relatív illékonyságokat. Állandó relatív illékonyságokat feltételezve, levezethetünk a fentiekhez hasonló analitikus megoldást.

## Vízgőz-desztilláció

Ha egy anyag a vízzel nem ill. korlátoltan elegyedik, akkor eredményesen alkalmazható a vízgőz-desztilláció. A Gibbs-féle fázisszabály szerint, mivel két komponens és három fázis van, ezért

$$61. \text{ képlet} \quad F = 2 + 2 - 3 = 1,$$

csak egyetlen szabadsági foka van a rendszernek. Ha az össznyomás adott, a rendszer határozott, és az össznyomás a rendszer tiszta komponensei gőznyomásainak összege lesz vagyis a rendszer nem követi a Raoult-törvényt:

$$62. \text{ képlet} \quad P = p_a^0 + p_{\text{víz}}^0.$$

ahol  $P$  az össznyomás,  
 $p_a^0$  a tiszta  $a$  anyag gőznyomása,  
 $p_{\text{víz}}^0$  a víz gőznyomása.

Az elegy gőznyomása ily módon az aktuális komponensek forráshőmérsékleteinél alacsonyabb hőmérsékleten éri el a saját forráshőmérsékletét, ami azt eredményezi, hogy alacsony hőmérsékleten, kíméletesen végezhetünk desztillációt. Ez különösen hőérzékeny anyagok esetében fontos.

A vízgőz-desztilláció párájának összetétele:

$$63. \text{ képlet} \quad y_a = \frac{p_a^0}{P} \quad \text{ill.} \quad y_{\text{víz}} = \frac{p_{\text{víz}}^0}{P}.$$

A párákat kondenzáltatjuk, és fázis szeparációnak vetjük alá.

## **Rektifikálás és készülékei**

### **A rektifikálás elve**

Az egyszerű desztillációk könnyen kivitelezhetők, de megvannak az elválasztási korlátaik. Ezt a folyamatos egyensúlyi desztillációnál részleteztük, ld.: 240. ábra. Ezek az elválasztási korlátok gyakran nem teszik lehetővé, hogy a kívánt tisztaságú termékeket előállítsuk. Ilyenkor egy lehetséges megoldás, hogy a desztillációt addig ismételjük a desztillátummal ill. maradékkal, amíg a kívánt terméktisztaságot el nem érjük. (A vízgőz-desztillációt nincs értelme ismételni, hisz ott az illékonyági viszonyok és a fázisszeparáció törvényei, vagyis a folyadék-folyadék egyensúlyok, megszabják az elérhető maximális tisztaságot. Ezért ez mindig egy egylépéses eljárás.)

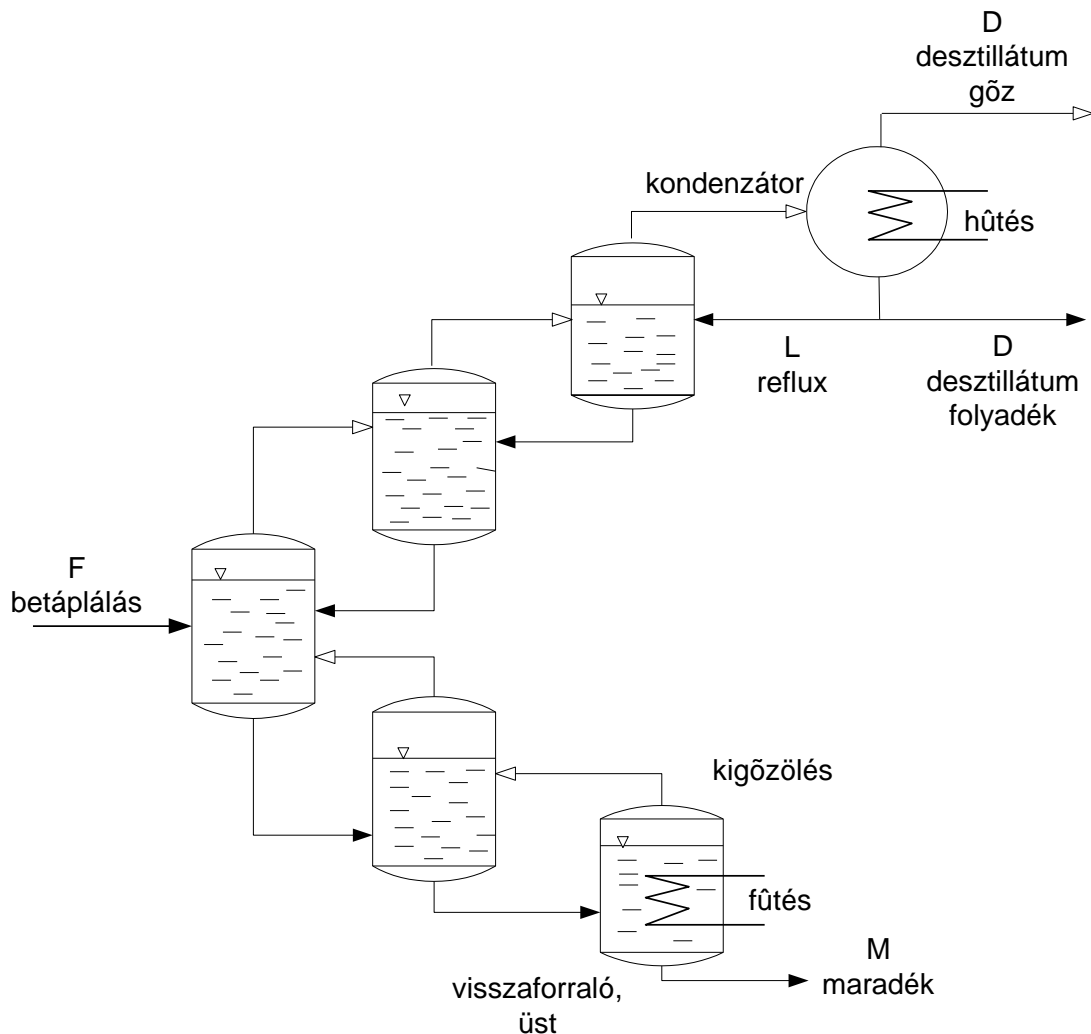
A folyamatos egyensúlyi desztilláció ismételt végrehajtása energetikailag rendkívül kedvezőtlen, hisz az elegyet el kell párologtatni, majd a gőzöket kondenzáltatni kell. Energetikailag kedvezőbb, ha a gőzöket nem kondenzáltatjuk, hanem felhasználjuk a következő egyensúlyi fokozat fűtésére. Ott a gőz részlegesen kondenzálódik, mely által tovább dúsul az illékonyabb komponens(ek)ben. A gőz kondenzálódásával növekvő folyadékmennyiséget pedig a gőzzel ellentétes irányú fokozatba vezetjük. Így a gőzárám az egyes egyensúlyi egységekben az illékonyabb komponens(ek)ben, míg a folyadék a kevésbé illékonyabbakban dúsul. Vagyis az ismételt egyensúlyi desztillációkkal lényegesen növeljük az elválasztás mértékét, melyet most már az egyensúlyi fokozatok száma is megszab.

Ezt a fajta ismételt, többfokozatú desztillációt rektifikálásnak hívják, melynek elvét a 244. ábra mutatja be.

A hőközlés az utolsó fokozatban történik, melyet visszaforralónak vagy más néven üstnek is hívnak. A gőzárám felfelé halad, míg a folyadék vele ellenáramban, lefelé. A gőzök kondenzáltatása a legfelső fokozat után történik az ún. kondenzátorban. A kondenzáció lehet teljes, totál kondenzátor, vagy részleges, parciális, amikor is deflegmációról ill. deflegmátorról máséven parciális kondenzátorról beszélünk. Parciális kondenzáció esetén a parciális kondenzátor is egy egyensúlyi fokozat, de a gőzként távozó desztillátum kondenzáltatásáról gondoskodni kell. Ez alól kivétel lehet, ha nem-kondenzálódó gáz(ok), pl. kőolaj-feldolgozásakor metán van a rendszerben.

A rektifikálást szokás frakcionált desztillációnak vagy frakcionálásnak is hívni. Ugyanakkor a desztilláció pedig leginkább gyűjtőfogalomként szerepel, és sokszor a rektifikálást is desztillációnak nevezik.

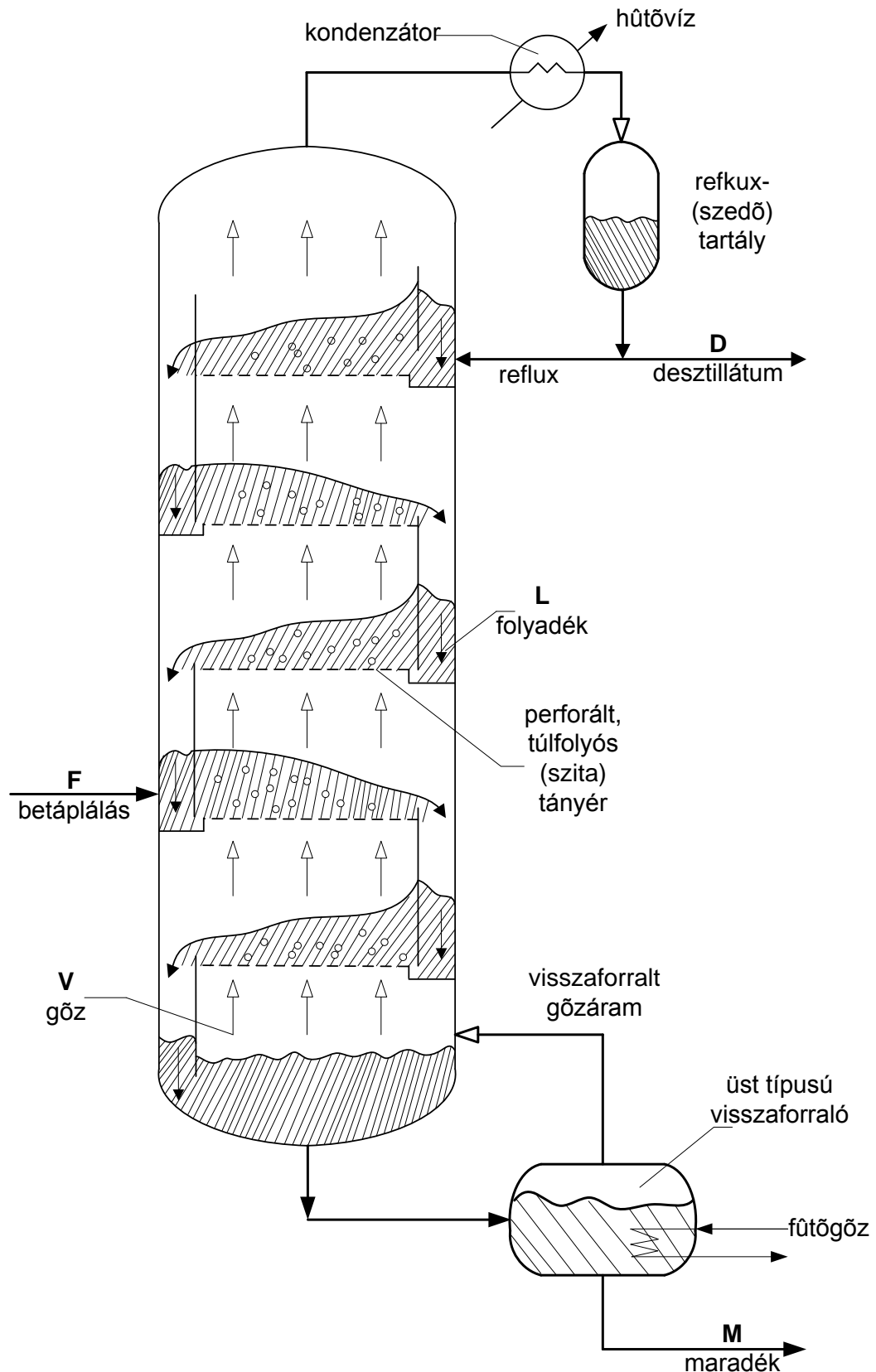




244. ábra. A rektifikálás elve

## A rektifikálás megvalósítása

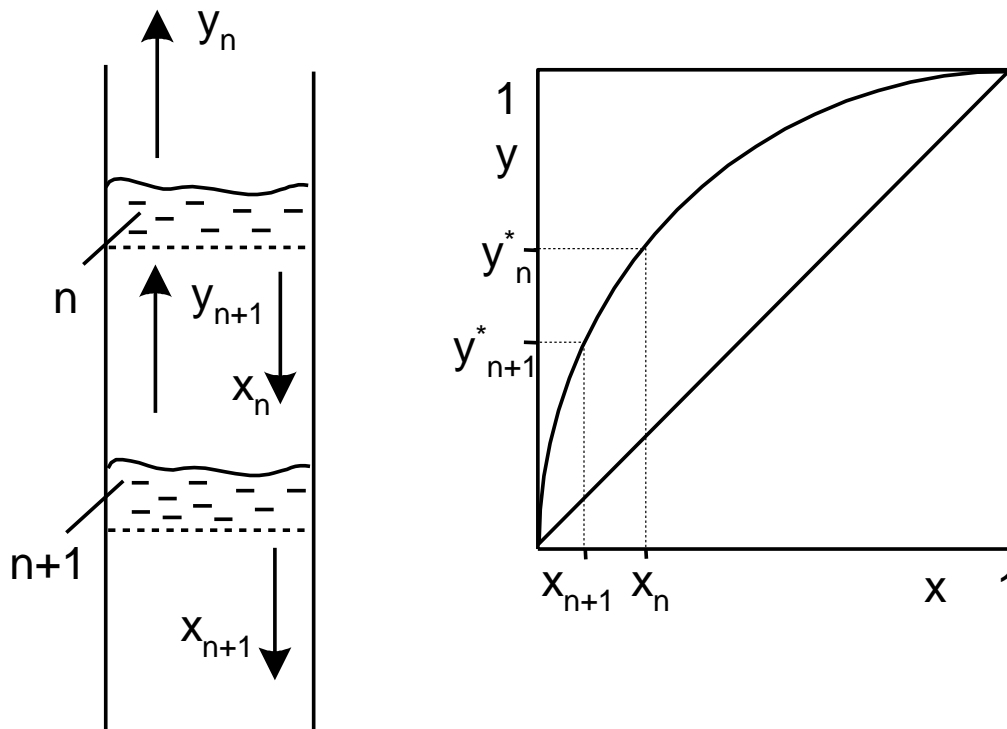
A 244. ábra bemutatja a rektifikálás elvét. A gyakorlatban nem ezt a módot választják, hanem a rektifikálást egyetlen berendezésben, egy hengeres álló készülékben valósítják meg. A berendezésben alulról fölfelé száll a gőz, felülről lefelé csurog a folyadék, és az intenzív érintkeztetésükhöz szükséges felületet úgy biztosítják, hogy a berendezésbe ún. tányérokat vagy valamilyen töltelék/töltetet építenek be. A berendezést a 244. ábra bemutatott elveknek megfelelően alul, a visszaforralóban fűtik, a tetején a kondenzátorban hűtik. A kondenzátor lehet teljes vagy totál kondenzátor vagy parciális (deflegmátor). A berendezést (245. ábra) rektifikáló vagy desztilláló oszlopnak illetve kolonnának hívják.



245. ábra. Tányéros kolonna sematikus rajza

Egy tányéros kolonnában a tányérok u. azt a funkciót töltik be mint a 244. ábra látható elvi vázlaton az egyensúlyi egységek. Vagyis a tányérről felszálló gőz és folyadék

egymással egyensúlyban vannak. Ez a gyakorlatban nincs mindig így, ezért azt a tényért, amelyről a felszálló gőz és a lecsurgó folyadék ténylegesen egyensúlyban vannak ( $y_n \parallel x_n$ ) *elméleti tényérnek* nevezik (246. ábra).



246. ábra. Az elméleti tényér fogalma

A gyakorlati/valódi tényérok elválasztóképességét pedig a *tényérhatásfokkal* jellemzik, mely azt mutatja, hogy a gyakorlati tényér viselkedése mennyire közelíti meg az elméletiét, vagyis a tényéron mennyire áll be az elméleti egyensúly. Ezt a Murphree-féle tényérhatásfokkal vagy „gőz” hatásfokkal ( $\eta$ ) jellemzik. A kifejezésben azt hasonlítjuk össze, hogy a gőz n. valós tényéron létrejövő dúsulása, hogyan viszonyul azzal a dúsulással ami egy elméleti tényéron jönne létre.

64. képlet 
$$\eta = \frac{y_n - y_{n+1}}{y_n^* - y_{n+1}},$$

ahol  $y_n, y_{n+1}$  az n. ill. n+1-dik tényérről felszálló gőz összetétele,  
 $y_n^*$  az n. elméleti tényérről felszálló,  $x_n$ -el egyensúlyban lévő,  
 gőz összetétele ( $y_n^* \parallel x_n$ ).

A valódi desztilláló oszlop elválasztóképességét az ún. *oszlophatásfokkal* jellemzik, vagyis, hogy a kérdéses oszlop viselkedése, hogy viszonyul a hasonló számú, de kizárólag elméleti tényérokat tartalmazó oszlop viselkedéséhez.

A desztilláció tanulmányozásánál általában elméleti tényérral ill. elméleti tényérszámmal dolgoznak. A tervezés ill. számítás után azt korrigálják a tényérhatásfokkal vagy az oszlophatásfokkal. A hatásfok meghatározása történhet elméleti úton, különböző összefüggések alapján vagy tapasztalati úton. A hatásfok függ a tényér konstrukciójától, és az elválasztandó elegy anyagi tulajdonságaitól is.

Amennyiben töltött oszloppal végezzük a desztillációt, úgy használhatjuk az abszorpciónál bemutatott átviteli egység (HTU, NTU) módszert. Mivel a desztilláció elméleti vizsgálatánál többnyire az elméleti tényér fogalmát használjuk, ezért a töltött oszlopok elválasztóképességének leírását is igyekeznek ilyen szempontból definiálni. Ezért egyre inkább a HETP, vagyis az egy elméleti tényér elválasztóképességének megfelelő töltetmagasság, használata a jellemző. Tehát a töltetes kolonnát is számolhatjuk hasonló elvek szerint mint a tényéros kolonnát.

A desztilláló oszlopot alul az ún. visszaforralóban fűtik, és így állítják elő az elválasztáshoz szükséges gőzarámot. Ha ún. üst típusú visszaforralót alkalmaznak, akkor az elpárologtatás részleges, a visszaforralóból veszik el a maradékot vagy más néven fenékterméket, és az üst maga is megfelel egy elméleti tényérnek. Ha ún. termoszifon típusú visszaforralót alkalmaznak, akkor a visszaforralás teljes, a maradékot az oszlop aljából, fenekéből veszik el, a visszaforraló nem jelent újabb elválasztást azaz egy újabb elméleti tényért.

A kolonna tetején távozó gőzöket a kondenzátorban részben vagy egészben kondenzáltatják. Az így keletkezett folyadékot megosztják: egy része lesz az ún. desztillátum vagy fejtermék, a másik részét pedig visszavezetik az oszlopba. Ez a visszavezetett mennyiség az ún. reflux, mellyel az elválasztáshoz szükséges folyadékarámot biztosítjuk a kolonnában. A reflux mennyisége nem lehet tetszőleges, nagyságát a gőz-folyadék egyensúlyi és műveleti paraméterek befolyásolják.

## A rektifikálás számítása

A rektifikálás számítása elengedhetetlen új kolonnák tervezésekor (szintézis) ill. meglévő berendezések vizsgálata (analízis) során. Ma már egyre precízebb és sokoldalúbb professzionális programcsomagok állnak rendelkezésünkre. A programcsomagokban lévő algoritmusok egyre igényesebbek, és egyre pontosabban tudják a különböző desztillációs feladatokat számolni. A finomodó algoritmusok mellett fontos, hogy a gőz-folyadék ill. gőz-folyadék-folyadék egyensúlyok számítása is egyre megbízhatóbb.

A rektifikációs számítások alapjait azonban a legegyszerűbb eset vizsgálatával érthetjük meg, nevezetesen az ideális biner elegy elválasztásának tanulmányozásával. Az ezen az eseten bemutatott elvek ismerete segítséget nyújt a bonyolultabb rektifikálási/desztillációs feladatok/problémák megértéséhez és megoldásához.

## Biner zeotrop elegyek rektifikálása

Ide sorolhatjuk mindazokat az elegyeket, melyek nem képeznek azeotropokat, tehát gőz-folyadék egyensúlyuk T-x-y ill. x-y diagramban ábrázolva a 224. ábra bemutatott alakú.

Tekintsük meg a biner elegy elválasztását végző rektifikáló oszlopot (247. ábra). Általában az oszlopba középen táplálunk be. A betáplálás feletti más néven felső oszloprész az ún. *dúsító vagy rektifikáló zóna/szekció*, míg a betáplálás alatti vagy alsó

oszloprész az ún. *szegényítő, kigőzölő vagy sztrippelő zóna/szekció*. A rektifikálás elveinek megértéséhez egyaránt kell ismerni az oszlop/kolonna külső és belső anyagáramait.

A kolonna teljes anyag- és komponensmérlege:

**65. képlet**  $F = M + D,$

**66. képlet**  $F * x_F = M * x_M + D * x_D,$

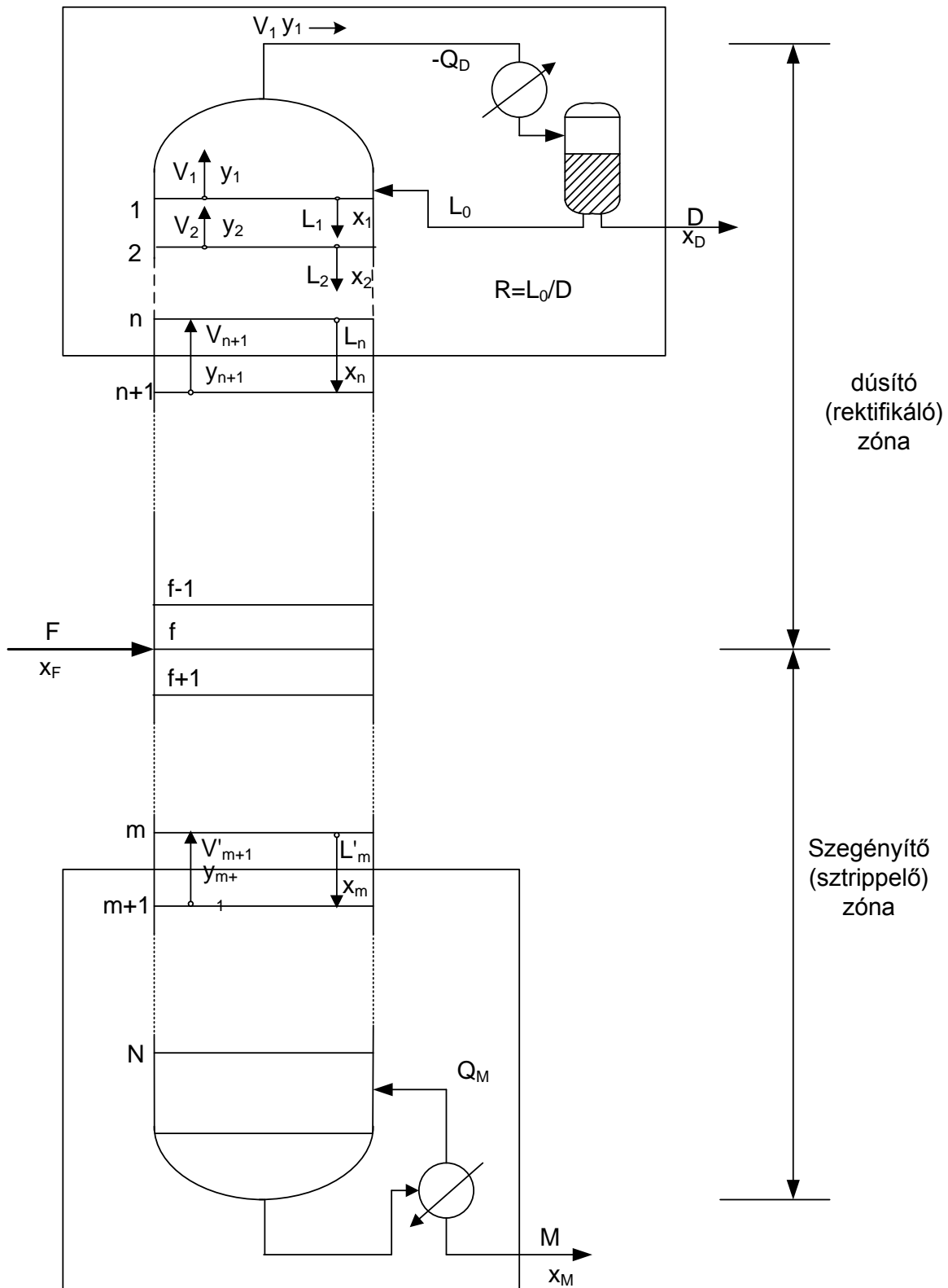
ahol  $F$  betáplálás (mól/idő),  
 $M$  maradék (mól/idő),  
 $D$  desztillátum (mól/idő),  
 $x_F$  az illékonyabb komponens móltörtje a betáplálásban,  
 $x_M$  az illékonyabb komponens móltörtje a maradékban,  
 $x_D$  az illékonyabb komponens móltörtje a desztillátumban.

Az anyag- és komponensmérleg felírható a kolonna bármely részére, így pl. a felső  $n$  tányérra, beleértve az oszlopféjet is:

**67. képlet**  $V_{n+1} = L_n + D,$

**68. képlet**  $V_{n+1} * y_{n+1} = L_n * x_n + D * x_D,$

ahol  $V_{n+1}$  az  $n+1$ -dik tányérról felszálló gőz mennyisége (mól/idő),  
 $L_n$  az  $n$ -dik tányérról lecsurgó folyadék mennyisége (mól/idő),  
 $y_{n+1}$  az  $n+1$ -dik tányérról felszálló gőzáramban az illékonyabb komponens móltörtje,  
 $x_n$  az  $n$ -dik tányérról lecsurgó folyadékáramban az illékonyabb komponens móltörtje



247. ábra. Rektifikáló oszlop külső és belső áramai műveleti számításhoz

A desztilláló oszlop belső anyagáramait tanulmányozva jelentős egyszerűsítést tehetünk, ha alkalmazzuk az ún. *állandó moláris párolgás és túlfolyás tételét*, mely kimondja, hogy a kolonna belső áramai mólból kifejezve állandóak. (Természetesen gondolnunk kell arra, ha betáplálás ill. elvétel történik az oszlopba ill. oszlopból.)

A tétel alapja az, hogy

- az egyes komponensek párolgáshői mólra vonatkoztatva közel állandóak,
- a hőmérsékletváltozásból eredő szenzibilis hőmennyiség-változások a párolgáshőhöz képest elhanyagolhatók,
- az elegyedési hőeffektus elhanyagolható,
- a hőveszteség elhanyagolható.

A tétel értelmében a belső áramok értéke a felső oszloprészre egységesen  $V$  és  $L$ :

$$69. \text{ képlet} \quad V_{n+1} = V_n = V_{n-1} = \dots = V,$$

$$70. \text{ képlet} \quad L_n = L_{n-1} = L_{n-2} = \dots = L.$$

Az alsó, betáplálás alatti oszloprész belső áramai pedig egységesen  $V'$  és  $L'$ :

$$71. \text{ képlet} \quad V'_{m+1} = V'_m = V'_{m-1} = \dots = V',$$

$$72. \text{ képlet} \quad L'_m = L'_{m-1} = L'_{m-2} = \dots = L'.$$

Ez a magyarázata, hogy desztillációs számításokat hagyományosan mól/idő és móltört dimenziókban számolják.

### Munkavonalak

Az abszorberhez hasonlóan a rektifikáló oszlopra is felírhatjuk a munkavonalakat, melyek alapja a komponensmérleg. Így a **68. képlet** alapján írhatjuk:

$$73. \text{ képlet} \quad y_{n+1} = \frac{L}{V} x_n + \frac{D}{V} * x_D.$$

Mivel a kolonna fején távozó gőzáram ( $V$ ):

$$74. \text{ képlet} \quad V = L + D,$$

valamint, ha bevezetjük a rektifikáló oszlop működésére kiemelten fontos jellemzőt az

ún. refluxarányt  $\left( R = \frac{L}{D} \right)$  akkor a **63. képlet** átírható a

$$75. \text{ képlet} \quad y_{n+1} = \frac{L}{L+D} x_n + \frac{D}{L+D} * x_D,$$

$$76. \text{ képlet} \quad y_{n+1} = \frac{R}{R+1} x_n + \frac{D}{R+1} * x_D,$$

formákba, mely egyenletek, főleg a **76. képlet**-ben levezetett alak, a felső, dúsító oszloprész *munkavonalának* egyenlete.

A kolonna alsó oszloprészére is levezethetjük a munkavonalat. Ehhez ismét a komponensmérlegből indulunk ki, mely az alsó oszloprészre, az  $m$ -dik tányértól lefelé:

77. képlet 
$$L'_m * x_m = M * x_M + V'_{m+1} * y_{m+1},$$

melyből levezethető az alsó oszloprész munkavonalának egyenlete:

78. képlet 
$$y_{m+1} = \frac{L'}{V'} x_m + \frac{M}{V'} * x_M.$$

A munkavonalak, ahogy azt az abszorpciónál már láttuk, az egymás mellett elhaladó áramok összetételeire állapítanak meg összefüggést. A munkavonalak az y-x diagramban ábrázolva egyenest adnak.

### A betáplálás hőállapota, q-vonal

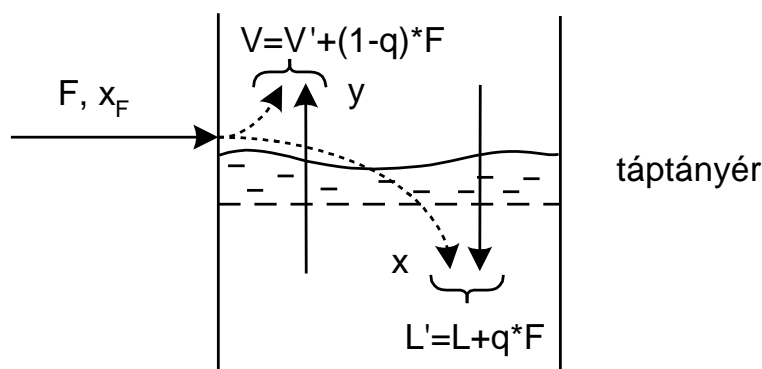
A rektifikáló kolonnába, az esetek túlnyomó többségében az oszlop hossza mentén táplálunk be. A betáplálás megváltoztatja az oszlop belső áramait. A változtatás mértéke attól függ, hogy az betáplálás milyen hőállapotú, vagyis a kolonnába belépve, hogyan változtatja meg a belső gőz- és folyadékáramokat. A betáplálás hőállapotát q-val jellemezzük. Ennek definíciója:

79. képlet 
$$q = \frac{H_F - h_F}{\lambda_F},$$

ahol  $H_F$  a betáplálási koncentrációjú telített gőz moláris entalpiája (J/mól),  
 $h_F$  a tényleges betáplálás moláris entalpiája (J/mól),  
 $\lambda_F$  betáplálási koncentrációjú elegy moláris párolgáshője (J/mól).

A q értéke tehát azt jelenti, hogy 1 mól betáplálás telített gőzzé történő alakításához a betáplálás moláris párolgáshőjének hányszorosát ill. hányadrészét kell a betáplálással közölni. Másszavakkal: a q (dimenziómentes szám) azt adja meg, hogy a betáplálás hányad része kerül a folyadékfázisba.

A betáplálási hely áramai ezek alapján számíthatók (248. ábra).



248. ábra. A betáplálási hely áramainak számítása

A betáplálás hőállapotának (q) lehetséges értékeit mutatja az 54. táblázat.



**54. táblázat. A betáplálás hőállapotának ( $q$ ) jellemző értékei**

A betáplálás	$q$
hideg, buborékpont alatti hőmérsékletű folyadék	$q > 1$
telített, buborékponton lévő folyadék	$q = 1$
gőz és folyadék elegye (buborék és harmatpont hőmérséklete között)	$0 < q < 1$
telített gőz (harmatponti hőmérsékleten lévő gőz)	$q = 0$
túlhevített gőz (harmatpont hőmérséklete felett lévő gőz)	$q < 0$

A betáplálás mennyisége és hőállapota egyaránt befolyásolja a kolonna alsó és felső oszloprészeinek belső áramait. A betáplálási helyen a kolonna felső és alsó oszloprészeinek munkavonala metszik egymást, melynek helye a betáplálás hőállapotától azaz a  $q$  értékétől is függ. Ezért, írjuk fel a kolonna betáplálási tényéjára mindkét munkavonal egyenletét. A **68. és 77. képletek** jelentik a munkavonalak alapegyenletét, vagyis a komponensmérlegeket:

**68. képlet**  $V_{n+1} * y_{n+1} = L_n * x_n + D * x_D,$

**77. képlet**  $L'_m * x_m = M * x_M + V'_{m+1} * y_{m+1}.$

Ha munkavonalakat egyetlen tényérra, a betáplálási tényérra vizsgáljuk, akkor azok algebrai egyenletekként lesznek kezelhetők, és az indexelést is elhagyhatjuk (ld. még 248. ábra is). Így a betáplálási tényérra nézve írhatjuk:

**80. képlet**  $V * y = L * x + D * x_D,$

**81. képlet**  $V' * y = L' * x - M * x_M,$

ahol  $y$  az alsó oszloprészből a felső oszloprészbe felszálló gőz móltörtje (beleértve a betáplálást is),  
 $x$  az alsó oszloprészbe belépő folyadékáram összetétele (beleértve a betáplálást is).

A két munkavonalat egymásból kivonva kapjuk:

**82. képlet**  $(V' - V) * y = (L' - L) * x - M * x_M - D * x_D.$

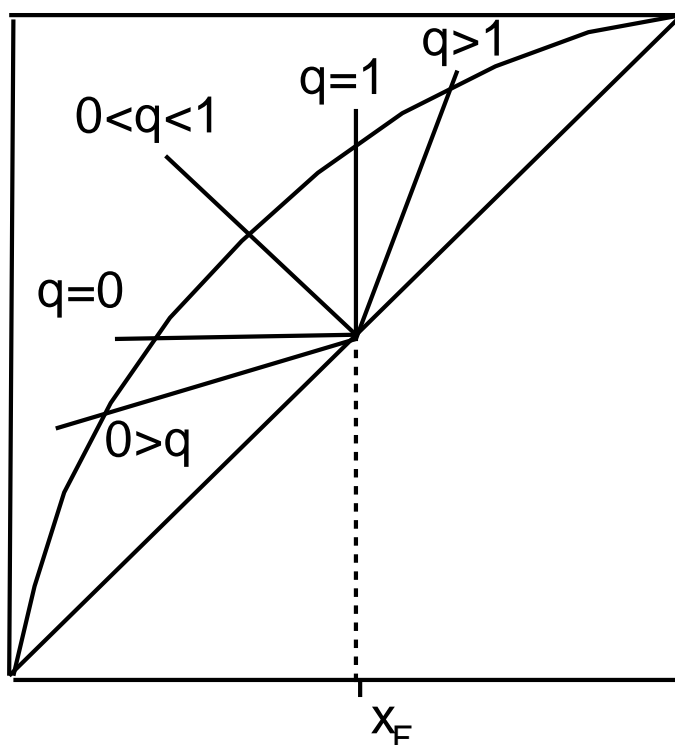
A 248. ábra alapján **82. képlet** anyagáramait kifejezhetjük a betáplálás hőállapotát jellemző  $q$  felhasználásával:

**83. képlet**  $F * (q - 1) * y = q * F * x - F * x_F.$

Ebből megkapható az ún.  $q$ -vonal egyenlete:

**84. képlet**  $y = \frac{q}{q-1} * x - \frac{x_F}{q-1}.$

A  $q$ -vonal berajzolható az  $y$ - $x$  diagramba.



249. ábra. A  $q$ -vonal lehetséges helyzetei az  $y$ - $x$  diagramban

### Elméleti tányérszám, hármas metszéspont, lépcsőszerkesztés

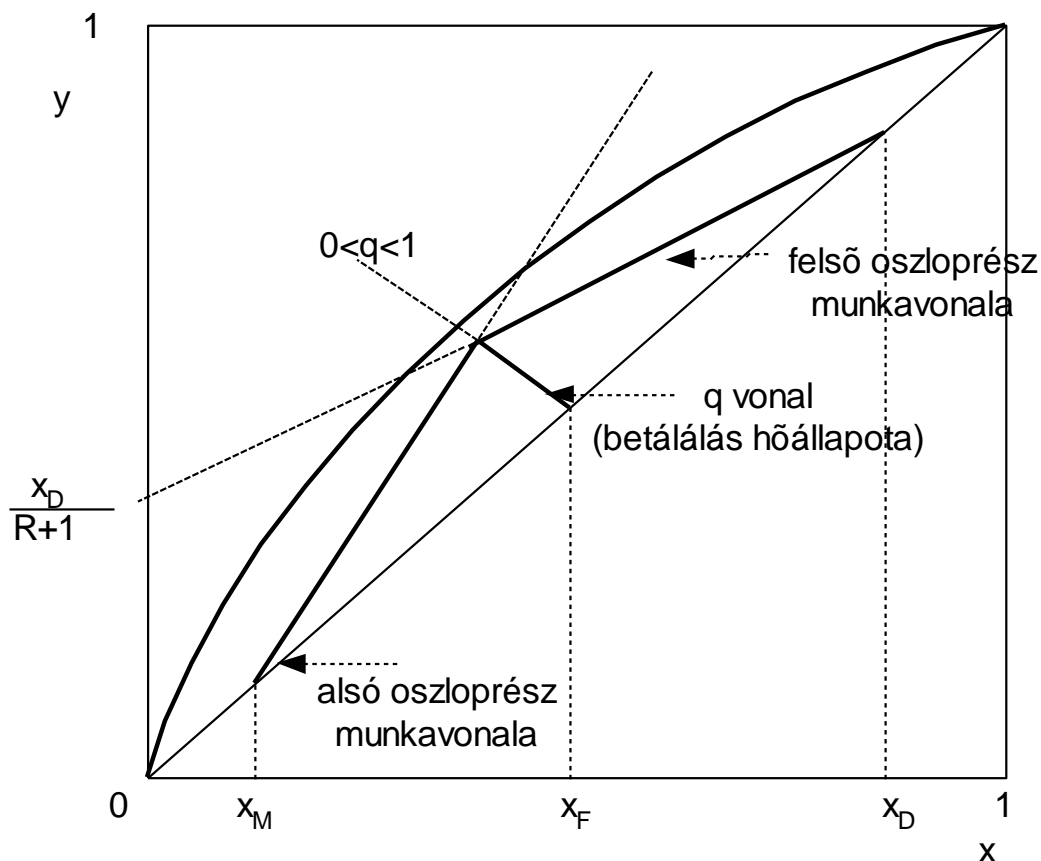
A munkavonalakat az  $y$ - $x$  diagramban ábrázolhatjuk, és az abszorbernél leírt elvek szerint és módon meghatározhatjuk az egyensúlyi egységek, vagyis az elméleti fokozatok/tányérok számát. Az abszorbernél leírt tányérszám-meghatározáshoz képest a desztillációnál azonban több eltérés is van.

- Mivel itt az anyagátadás jellemző iránya a folyadékfázisból a gőzfázisba irányul, ezért a munkavonal az egyensúlyi összefüggés alatt halad. (A deszorbernél is így volt, hiszen az is desztilláció.)
- Az alsó és a felső oszloprész munkavonala valamint a  $q$ -vonal egy pontban, egy ún. *hármas metszéspontban* metszik egymást (249. ábra).

A hármas metszéspont létét könnyen beláthatjuk, hisz a betáplálás és annak hőállapota egyaránt befolyásolja a felső és az alsó oszloprész működését, a két oszloprész pedig egymás működését. Ugyanis amíg az oszlop tetején a visszavezetett reflux mennyisége az oszlop belső folyadékáramát, addig a visszaforrólóban előállított gőz, pedig az oszlop belső gőzáramát befolyásolja.

A munkavonalak megállapításához először megfogalmazzuk a desztillációs feladatot, tehát adott betáplálási összetétel mellett ( $x_F$ ), definiáljuk a kívánt terméktisztaságokat ( $x_D$ ,  $x_M$ ), melyek ismeretében a fej- és fenéktermék áramok a komponensmérleg alapján számíthatók lesznek. Megállapítjuk a refluxarányt, melynek módjáról a későbbiekben még szó lesz. Ezután megrajzolhatjuk a rektifikáló oszlop, adott elválasztási problémát leíró munkavonalait és a betáplálásra jellemző  $q$ -vonalat. A három vonal megrajzolásának egy lehetséges módozata, hogy először behúzzuk a  $q$ -

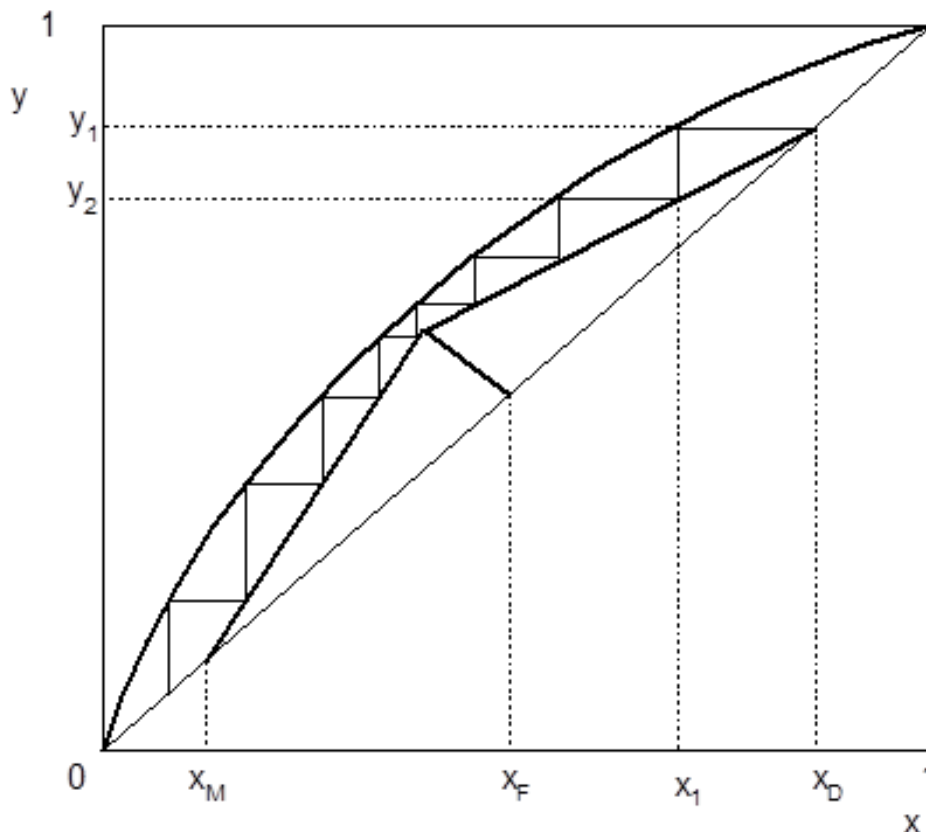
vonalat, melynek meredeksége  $q/(q-1)$ , majd megállapítjuk a felső oszloprész munkavonalát. A felső oszloprész munkavonala az  $x_D$  és az átló metszéspontjából indul, meredeksége  $R/(R+1)$ , tengelymetszete  $x_D/(R+1)$ . Ennek a két vonalnak a metszéspontja már megadja a hármass metszéspontot. Az alsó oszloprész munkavonala az  $x_M$  és az átló metszéspontjából indul, és a már meghatározott hármass metszéspontba tart. Meredeksége  $L/V$ .



**250. ábra.** Zeotrop elegyet elválasztó, egy betáplálású, két termékes kolonna munkavonalai és q-vonala

A munkavonalak megszerkesztése után, mely automatikusan megadja a hármass metszéspont is, elvégezhetjük a lépcsőszerkesztést, melyet McCabe és Thiele dolgoztak ki (251. ábra).

A lépcsőszerkesztés elve u. az mint az abszorbernél volt, azaz az egyensúlyi görbe megadja az elméleti tányért elhagyó, egymással egyensúlyban lévő áramok összetételét (247. ábra). Tehát, célszerűen az oszlop tetején kezdve, megállapíthatjuk, hogy  $x_D=y_1$ , ha totál kondenzátort alkalmazunk. Az 1. tányérról lecsurgó folyadék összetételét ( $x_1$ ) az egyensúlyi görbéről olvassuk le. Az  $x_1$  összetételű folyadékarámmal szembeáramló gőz ( $y_2$ ) összetételét a komponensmérleg vagyis a munkavonal adja meg. Ezzel az első elméleti tányért/egységet meghatároztuk. Ezt a szerkesztést az  $x_M$  összetétel eléréséig ill. ha a szerkesztés éppen úgy jön ki, akkor az azon való túllépésig folytatjuk. A tényleges tányérszámot a hatásfokkal való korrekcióval kapjuk.



251. ábra. McCabe-Thiele féle elméleti tányérszám-meghatározási módszer (lépcsőszerkesztés)

### A betáplálás optimális helye

A 251. ábra bemutatott „lépcsőszerkesztés” megadja a betáplálás optimális helyét is. A rektifikáló oszlop elméleti tányérszámainak meghatározásakor az a tányér, amelyik a felső és az alsó munkavonal metszéspontjában, azaz a hármas metszéspontban van, az lesz a betáplálás optimális helye. Ha nem erre a tányérra táplálunk be, akkor romlik a rektifikáló oszlop elválasztási hatékonysága, tehát a kívánt elválasztás nem vagy csak nagyobb költség árán, azaz nagyobb energiafogyasztással lesz teljesíthető ill. több tányérra lesz szükség. A gyakorlatban megépülő kolonnáknál, mivel az elválasztási feladat változhat, ezért több betáplálási helyet alakítanak ki, és mindig az optimális helyet választják.

### Minimális tányérszám, minimális refluxarány

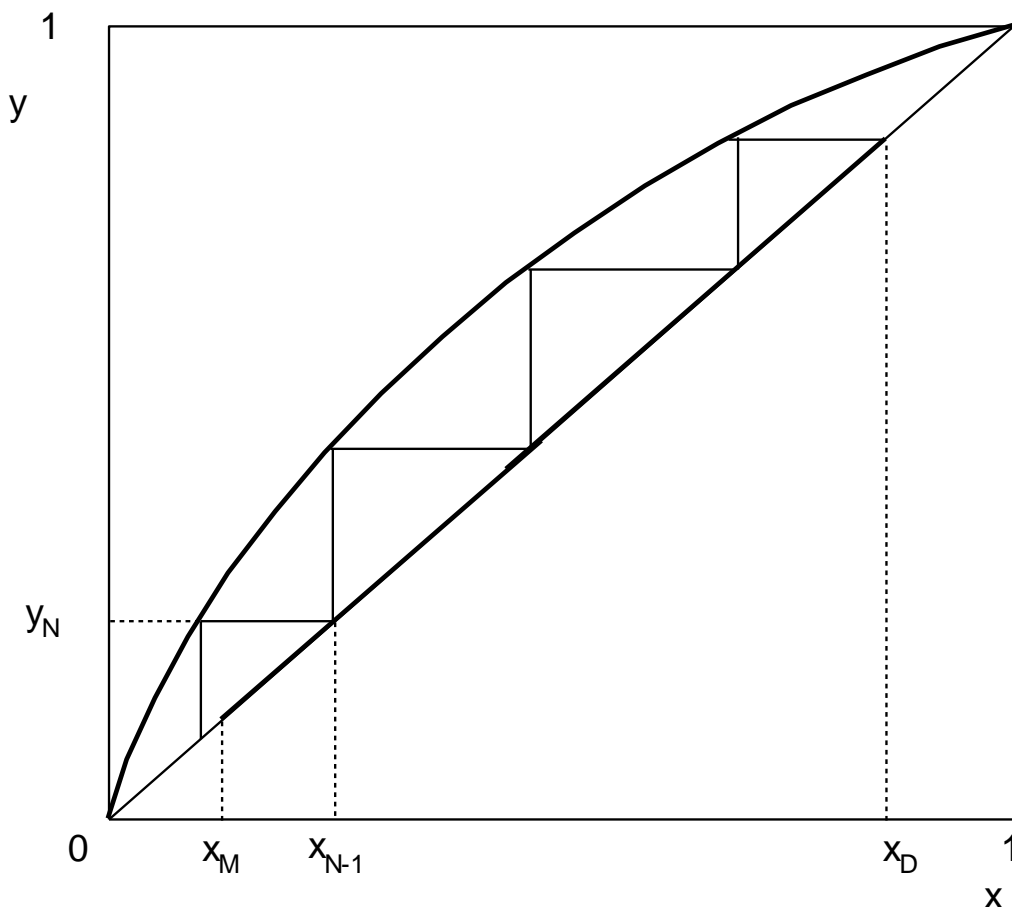
A rektifikáló kolonna helyes működtetéséhez szükséges ismerni annak megvalósíthatósági paramétereit, vagyis, hány tányér kell a kérdéses elválasztáshoz, és mekkora legyen az elválasztáshoz szükséges reflux.

#### Minimális tányérszám

A McCabe-Thiele féle elméleti tányérszám meghatározás segítségével is beláthatjuk, hogy a refluxarány és az elméleti tányérszám értékei összefüggenek. Ha növeljük a refluxarányt csökken az adott elválasztáshoz szükséges tányérszám, és fordítva. A

rektifikálás megvalósíthatóságának ismeretéhez szükséges ismerni a minimális értékeket, tehát a minimális tányérszámot és a minimális refluxarányt.

Ha növeljük a refluxarányt, a tányérszám szükséglet csökken. A minimális tányérszám értékét úgy kapjuk meg, ha a reflux értéke az elméletileg legnagyobb érték. Mivel  $R=L/D$ , a legnagyobb refluxarányt akkor kapjuk, ha nem veszünk el desztillátumot, ami megfelel a *teljes reflux* (végtelen refluxarány) üzemállapotnak. Ilyenkor a kolonnát fűtjük és a lekondenzált gőzarányt teljes egészében visszavezetjük az oszlopba. Természetesen nincs betáplálás és fenéktermék sem, a munkavonalak az átlóba simulnak.



252. ábra. Minimális tányérszám grafikus meghatározása

Erre az üzemállapotra elvégezve a McCabe-Thiele féle lépcsőszerkesztést, akkor az így kapott tányérszám az ún. *minimális tányérszám*. Ez egy határérték, melynél a gyakorlatban, egy működő kolonna esetében, melynek van betáplálása valamint fej- és fenékterméke, csak nagyobb tányérszámok fordulhatnak elő.

A minimális tányérszámot ki is számíthatjuk. A legfelső 1. tányérra, a relatív illékonyág definíciója (**11. képlet**) alapján, a kérdéses biner elválasztásra igaz, hogy:

$$85. \text{ képlet} \quad \frac{y_1}{1-y_1} = \alpha_1 * \frac{x_1}{1-x_1}.$$

Ez igaz a következő tényérra, tehát a 2-dikra is:

$$86. \text{ képlet} \quad \frac{y_2}{1-y_2} = \alpha_2 * \frac{x_2}{1-x_2}.$$

Teljes reflux esetén  $y_i=x_{i-1}$ , valamint  $y_1=x_D$  tehát felírható egy rekurzív formula:

$$87. \text{ képlet} \quad \frac{x_D}{1-x_D} = \alpha_1 * \alpha_2 * \dots * \alpha_N * \frac{x_N}{1-x_N}.$$

Ha a relatív illékonyságok nem állandóak a kolonna hossza mentén, akkor egy átlagértékkel (számtani vagy mértani) számolunk:

$$88. \text{ képlet} \quad \alpha_1 * \alpha_2 * \dots * \alpha_N = \bar{\alpha}^N.$$

A relatív illékonyság kitevője  $N$  a minimális tányérszámot adj meg ( $N_{min}$ ):  
amiből  $N_{min}$  kifejezhető:

$$89. \text{ képlet} \quad N_{min} = \frac{\lg \left[ \frac{y_1 * (1-x_N)}{(1-y_1) * x_N} \right]}{\lg \bar{\alpha}},$$

amit átírhatunk a kolonna fej és fenéktermék összetételeire

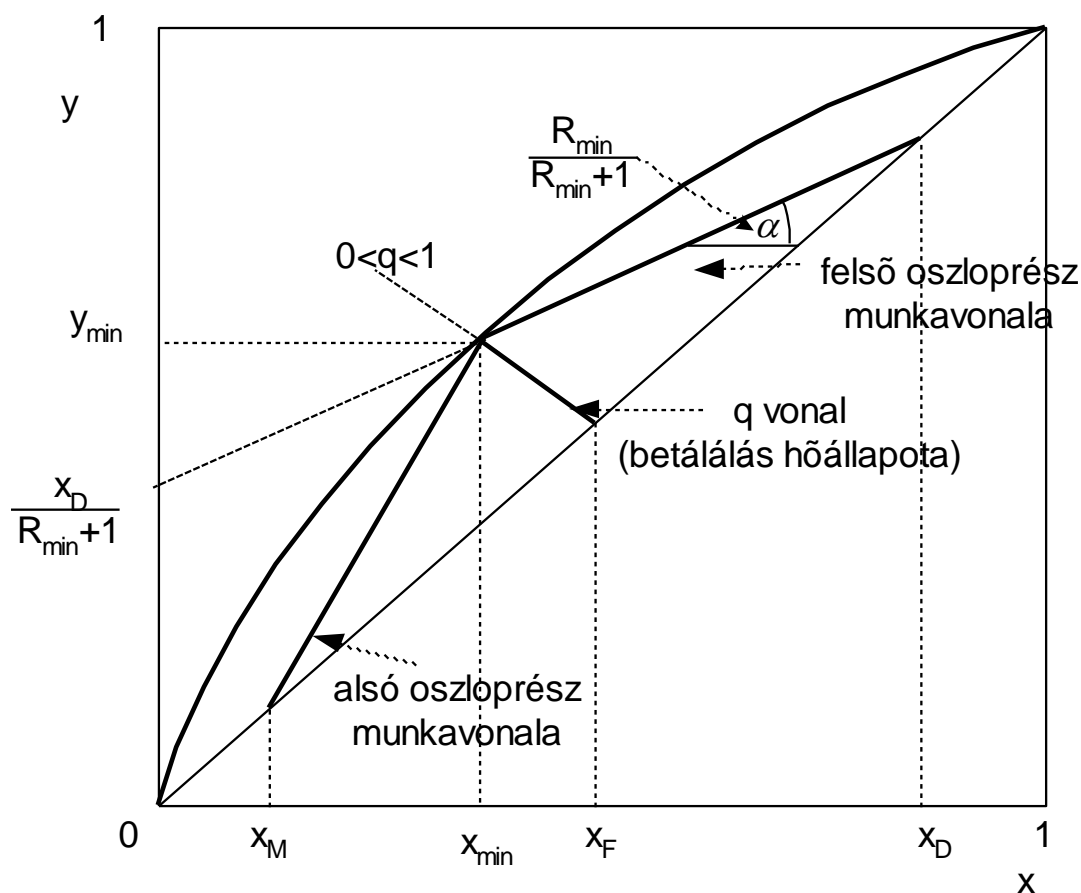
$$90. \text{ képlet} \quad N_{min} = \frac{\lg \left[ \frac{x_D * (1-x_M)}{(1-x_D) * x_M} \right]}{\lg \bar{\alpha}}.$$

A **90. képlet** az ún. *Fenske-egyenlet*. Használatánál gondolni kell arra, hogy üst típusú visszaforrálók esetén az üst is egy elméleti tányér, melynek értékével ilyenkor a minimális tányérszám értékét korrigálni kell.

### Minimális refluxarány

A meghatározás elve hasonló az abszorbernél tárgyaltakhoz.

A rektifikálás megvalósíthatóságának egy másik igen fontos kritériuma a minimális refluxarány. A kolonnába ugyanis a fejben lekondenzált gőz egy részét, ahogy azt már tárgyaltuk, visszavezetjük. Ez a reflux, melyre a többfokozatú gőz-folyadék elválasztást megvalósító rektifikációhoz feltétlen szükség van. A minimális reflux mennyisége, ill. az ahhoz tartozó minimális refluxarány, az a határeset, ahol a rektifikálás még éppen nem működik. A minimálisnál nagyobb értékeket kell alkalmazni a rektifikálás megvalósításához.

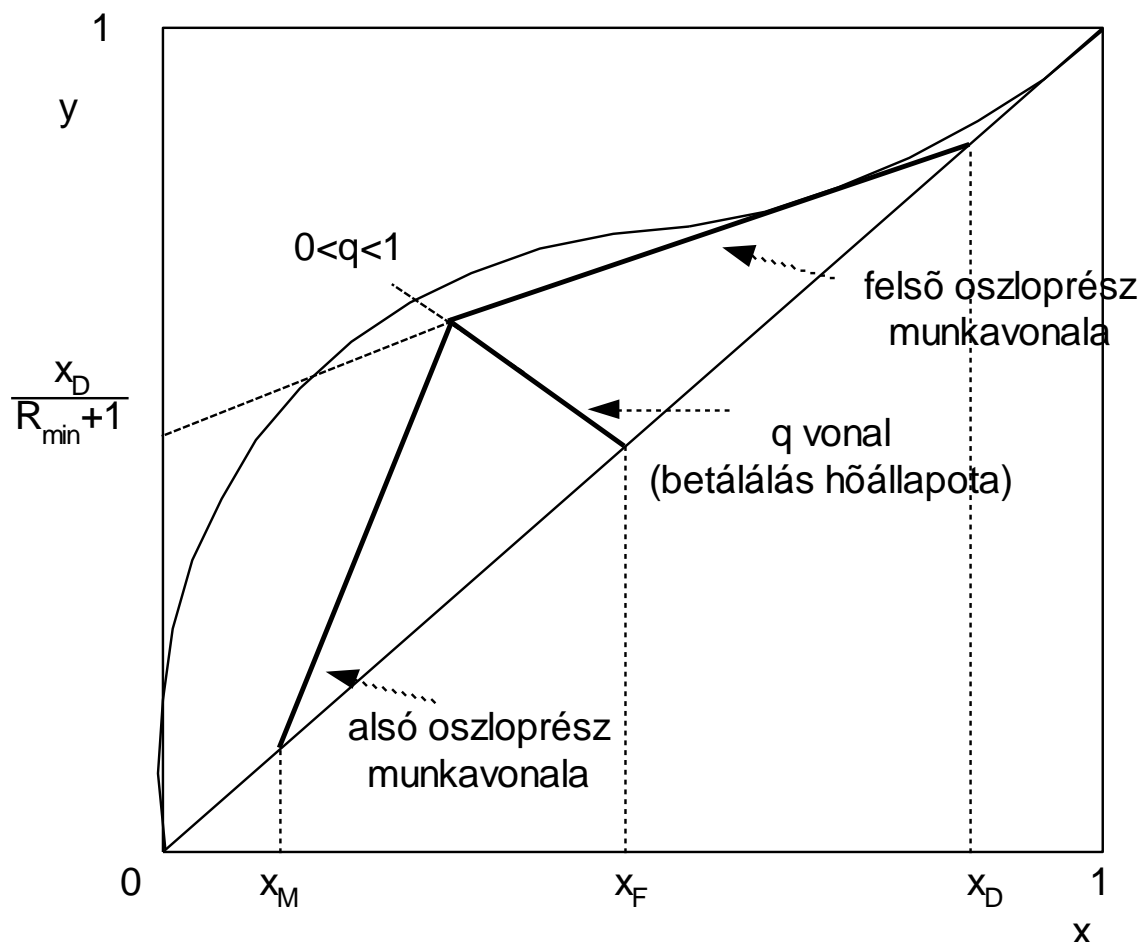


253. ábra. Minimális refluxarány grafikus meghatározása

A minimális refluxarány fogalmát az  $y$ - $x$  diagramban a 253. ábra érthetjük meg. A refluxarány változtatásával változik a felső és az alsó oszlop rész munkavonalának iránytangense. Ha a refluxarány csökken, a felső oszlop rész munkavonalának meredeksége ( $R/(R+1)$ ) egyre csökken, a biner zeotrop elegyek rektifikálására jellemző hármas metszéspont egyre közelebb kerül az egyensúlyi görbéhez. Ezáltal az elválasztáshoz szükséges tányérszám is egyre nő.

Ha a hármas metszéspont éppen az egyensúlyi görbére kerül, akkor a refluxarány a minimális értékét veszi fel. Ilyenkor a rektifikálás már az éppen nem megvalósítható határeset lesz. Ezt az is mutatja, hogy a lépcsőszerkesztéssel végtelen számú tányért kapunk, és nem tudunk a felső oszlop rész munkavonaláról átlépni az alsóra.

Az ehhez az állapothoz tartozó felső munkavonal meredeksége ill. tengelymetszete megadja a minimális refluxarány értékét.



254. ábra. Minimális refluxarány grafikus meghatározása, speciális eset

A 254. ábra egy különleges, rendhagyó alakú gőz-folyadék egyensúlyú elegyet mutat. Ha a fenti meghatározást követnénk, akkor a felső munkavonal metszené az egyensúlyi görbét, és kilépne a munkavonal és az egyensúlyi görbe által körülhatárolt területről, ami értelmetlen lenne. Ilyenkor a minimális refluxarányhoz tartozó munkavonal az érintő lesz.

A fenti gondolatmenet alapján azt is megállapíthatjuk, hogy csak akkor valósítható meg a rektifikálás, ha a hármas metszéspont az egyensúlyi görbe és az átló közt helyezkedik el (tehát nem is érinti azokat), és a munkavonalak sem lépnek ki ebből a területből.

A minimális refluxarányt meghatározhatjuk analitikusan is a fentiek alapján. Ehhez ismernünk kell a metszéspont értékeit ( $y_{min}$ ,  $x_{min}$ ). Mivel a felső munkavonal iránytangense:

91. képlet 
$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{R_{min}}{R_{min} + 1} = \frac{x_D - y_{min}}{x_D - x_{min}}$$

amiből

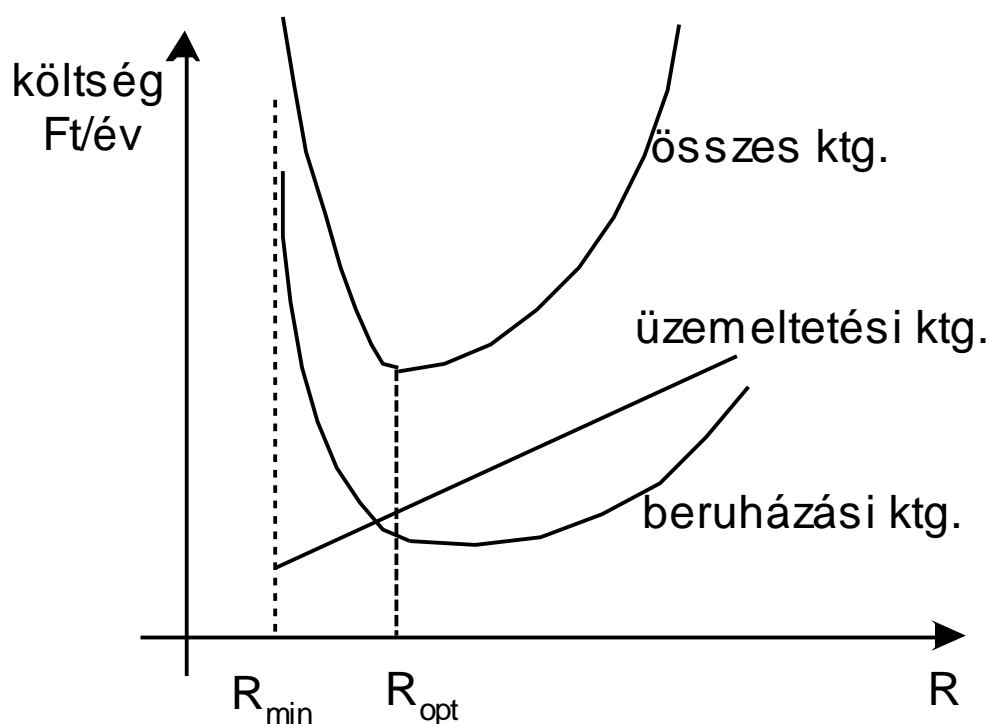


**92. képlet** 
$$R_{min} = \frac{x_D - y_{min}}{y_{min} - x_{min}}$$

**Tényleges elméleti tényérszám és reflux számítása, optimális refluxarány**

A fentiekben láttuk, hogy hogyan lehet biner zeotrop elegyekre egyszerűen meghatározni a rektifikálás megvalósíthatóságainak határértékeit: a minimális tényérszámot és a minimális refluxarányt. A valós rektifikáló oszlopban több tényért ill., annak megfelelő töltetet kell beépítenünk ill. a minimálisnál nagyobb refluxarányal fog az oszlop üzemelni.

Valós rektifikálási problémánál a tényleges refluxarányt gazdaságossági optimalizálással állapítjuk meg. A refluxarány változásának függvényében megbecsüljük a várható üzemeltetési és beruházási költségeket. Kis refluxarány esetében nagy, soktányéros kolonna építése szükséges. Nagy refluxaránynál nagy lesz az üzemeltetési költség, kisebb tényérszámú kolonna is megfelelő. Túlságosan nagy refluxarány esetén a kolonna tényérszámszükséglete már nem csökken lényegesen, viszont nő átmérője és nagy hőcserélők (visszaforraló, kondenzátor) lesznek szükségesek, ami a beruházási költségek újabb emelkedését idézi elő (255. ábra).



**255. ábra. Optimális refluxarány meghatározása**

Az optimalizálás eredménye általában közel van a minimális reflux értékéhez. A tapasztalatok szerint

**93. képlet** 
$$R_{opt} = 1,1 \div 2,0 * R_{min}$$

Az optimális refluxarányhoz tartozó kolonna és hőcserélőméretek már meghatározhatók.

Anélkül, hogy részletekbe becsátkoznánk megemlíjtjük, hogy a desztilláló oszlopok itt részletezett számítása elvégezhető, többek közt, az ún. „short-cut”, egyszerűsített számítási algoritmussal ill. precíz algoritmusokkal. Ezekkel az algoritmusokkal számítógépen dolgozunk, és ezek az algoritmusok ma már a professzionális programcsomagok részei.

## **Többkomponensű és azeotrop elegyek rektifikálása**

Megemlíjtjük, hogy a rektifikálás eredményesen alkalmazható többkomponensű és erősen nemideális ill. azeotrop elegyek elválasztására is. A biner zeotrop elegyek elválasztására bemutatott elvek érvényesek a többkomponensű elegyek elválasztása során is. Az ilyen elválasztások is eredményesen számíthatók az említett precíz algoritmusokkal, melyek általában tényérről tényérra számolják az anyag és komponensmérlegeket, valamint a hőmérséleget és az egyensúlyi összefüggéseket. A rektifikálás megvalósítása ill. megoldásai rendkívül sokfélék és az elválasztandó elegy tulajdonságaitól függenek. Számos rektifikációs megoldás létezik, pl. kőolaj lepárlására speciális desztilláló oszlopokat építenek, csökemence fűtéssel, oldalsztripperekkel, cirkulációs refluxokkal. Azeotropia (**5. ábra**) esetén más jellegű, különleges desztillációs technikákat alkalmazunk pl. azeotrop rektifikálást, kétnyomásos rektifikálást, extraktív desztillációt, extraktív heteroazeotrop desztillációt. Számos rektifikációs megoldás részletes leírását találhatjuk *Fonyó-Fábry, Vegyipari művelettani alapismeretek* című könyvében.

## **A rektifikálás készülékei**

A rektifikálást oszlopokban más néven kolonnákban valósítjuk meg. Ezek az ún. rektifikáló vagy desztilláló kolonnák. Az itt ismertetésre kerülő készülékekben nem csak rektifikálást hanem abszorpciót is megvalósíthatunk.

A rektifikáló oszlopok felépítése számos hasonlóságot tartalmaz (245. ábra). A kolonnák kiszolgáló berendezései hőcserélő berendezések, melyek közül ki kell emelni a visszaforralót, más néven üstöt, valamint a párák kondenzáltatását végző kondenzátort, mely lehet parciális (deflegmátor) vagy teljes. Ezek a berendezések speciális desztillációs megoldásoknál különleges megoldásúak is lehetnek, esetleg némelyikük teljesen hiányzik. Ezeket az eseteket és a kolonnához tartozó hőcserélőket itt nem tárgyaljuk.

A továbbiakban csak a kolonnákra ill. azok belső szerkezeteire koncentrálnak. (Amennyiben a kolonnában abszorpciót valósítunk meg, akkor nincs az oszlopnak kondenzátora és nincs visszaforralója sem. Csak a kolonna üzemel, mint abszorber, illetve deszorber jelenléte esetén a 238. ábra mutatja a lehetséges megoldást.

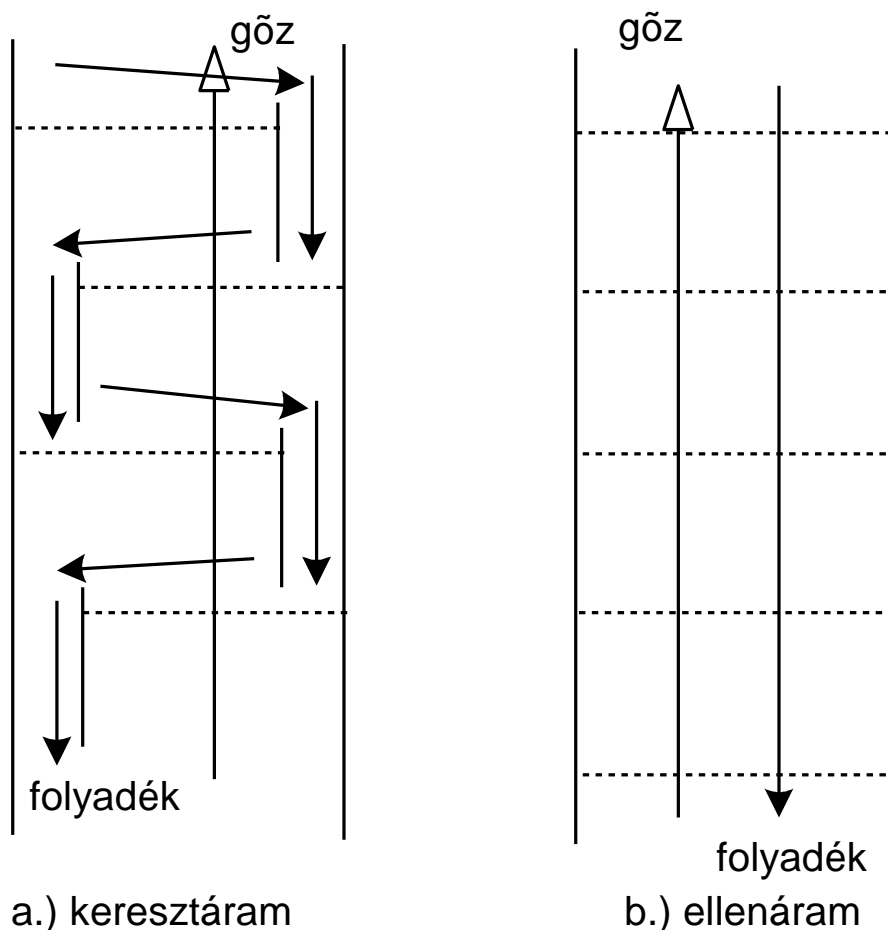
A kolonnákban lévő belső szerkezet szerepe, hogy a gőz(gáz) és folyadék áramok érintkeztetéséhez felületet biztosítson, melyen az anyagátadás létrejön. Minél nagyobb ez a felület ill. intenzívebb a két fázis érintkeztetése annál jobb lesz az anyagátadás, melyet többek között az átviteli egységekkel vagy az elméleti tényérszámmal jellemezhetünk.

A kolonnák (rektifikáló vagy abszorpciós) belső szerkezeteit többféleképp csoportosíthatjuk. Az egyik lehetőség szerint:

1. tányéros (túlfolyós vagy túlfolyó nélküli),
2. töltetes (rendezetlen vagy rendezett).

Másik lehetőség a belső áramok áramlása szerint (256. ábra):

- 1 túlfolyós tányéros, melyben a folyadék az anyagátadás során, mely a tányérokon zajlik le, keresztirányban áramlik,
- 2 túlfolyó nélküli és töltött oszlopok, melyben a két áram egymással párhuzamosan, ellenáramban áramlik.



256. ábra. Gőz(gáz)-folyadék érintkeztetési megoldások

A gyakorlatban általában aszerint különböztetik meg az oszlopokat, hogy belső szerkezete tányérokot vagy valamilyen töltetet tartalmaz. A két kolonnabelső típust ritkán keverik egy kolonnában, de néha pl. felújítások során előfordulhat.

A rektifikálás során többnyire mindig alkalmaznak valamilyen kolonnabelsőt, melyek tányérok vagy tölteteket lehetnek. A 235. ábra bemutat olyan oszlopokat is (üres csőoszlop, permetező oszlop, buborékoltató oszlop), melyekben nincsen kolonnabelső. Ezek leginkább csak abszorbereknél fordulnak elő.

A rektifikáló és abszorpciós kolonnák tányérjainak ill. tölteteinek működése akkor jó, ha az anyagátadásra jellemző habzás ill. habréteg kialakul. Ezért a kolonnatölteteket szokás üvegfalú kolonnákban tesztelni, hogy azt a habzást jól megfigyelhessék és kimérhessék. Természetesen, a hab magassága nem szabad, hogy túl nagy legyen, mert akkor felléphet az ún. áthabzás, vagyis a hab felkerül a felsőbb tányérokra, mely rontja az elválasztás hatékonyságát.

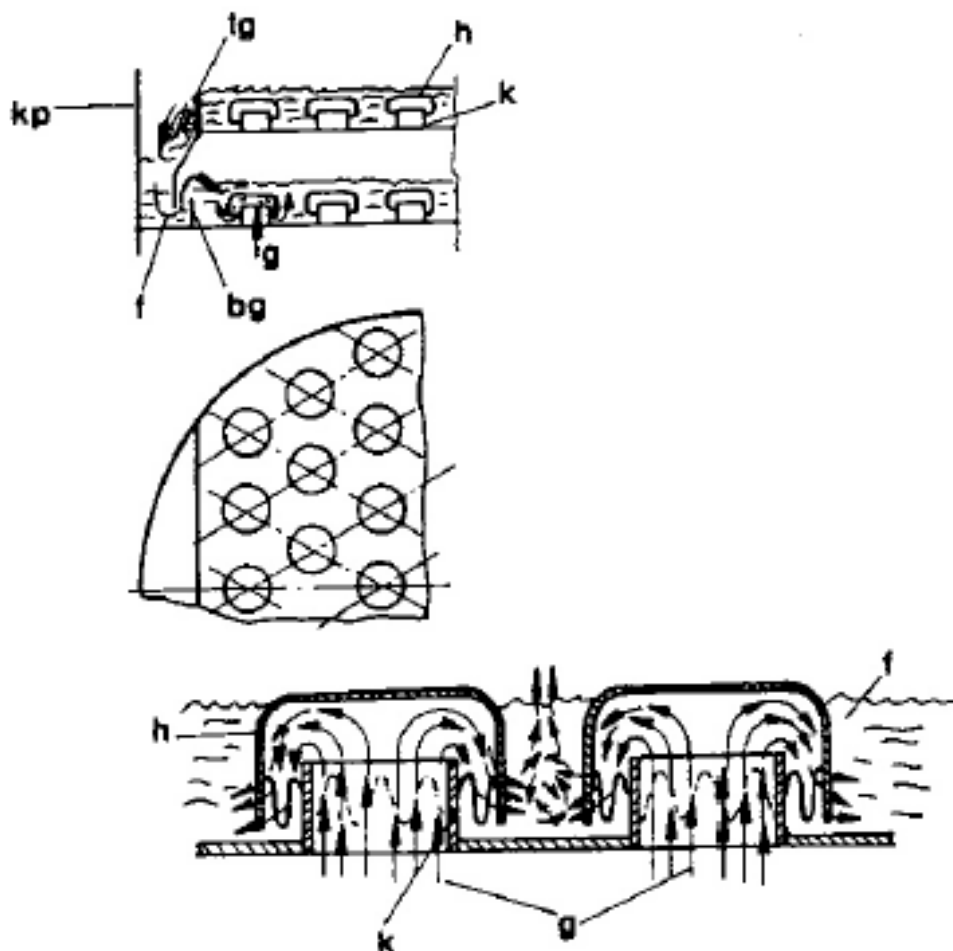
A kolonnák tányérjainak működését a tányérhatásfokkal is jellemezzük (**64. képlet**). Ez azt mutatja, hogy a valódi tányér mennyire közelíti meg az elméleti tányér elválasztóképességét. Töltött oszlopoknál az átviteli egységek magassága vagy az újabban alkalmazott egy elméleti tányérhoz tartozó töltetmagasság ami jellemzi a töltet hatékonyságát vagyis elválasztóképességét.

A következőkben, a *teljesség igénye nélkül* bemutatunk néhány tányér és töltettípust.

## Tányéros oszlopok

Két fő típusuk van: túlfolyós vagy túlfolyó nélküli.

A túlfolyós tányérok közül az egyik legrégebbi tányérszerkezet az ún. *harangsapkás vagy buboréksapkás* tányér (257. ábra). A gőz az ún. kéményeken keresztülhaladva a sapkák vagy harangok résein lép ki, ahol találkozik a folyadékkal és azon átbuborékol. A tányér széles munkatartományban dolgozik megbízhatóan, üzembiztos, működése és így tervezhetősége jól ismert. Hatásfoka jó, szerkezete komplikáltabb mint számos más tányértípusé.

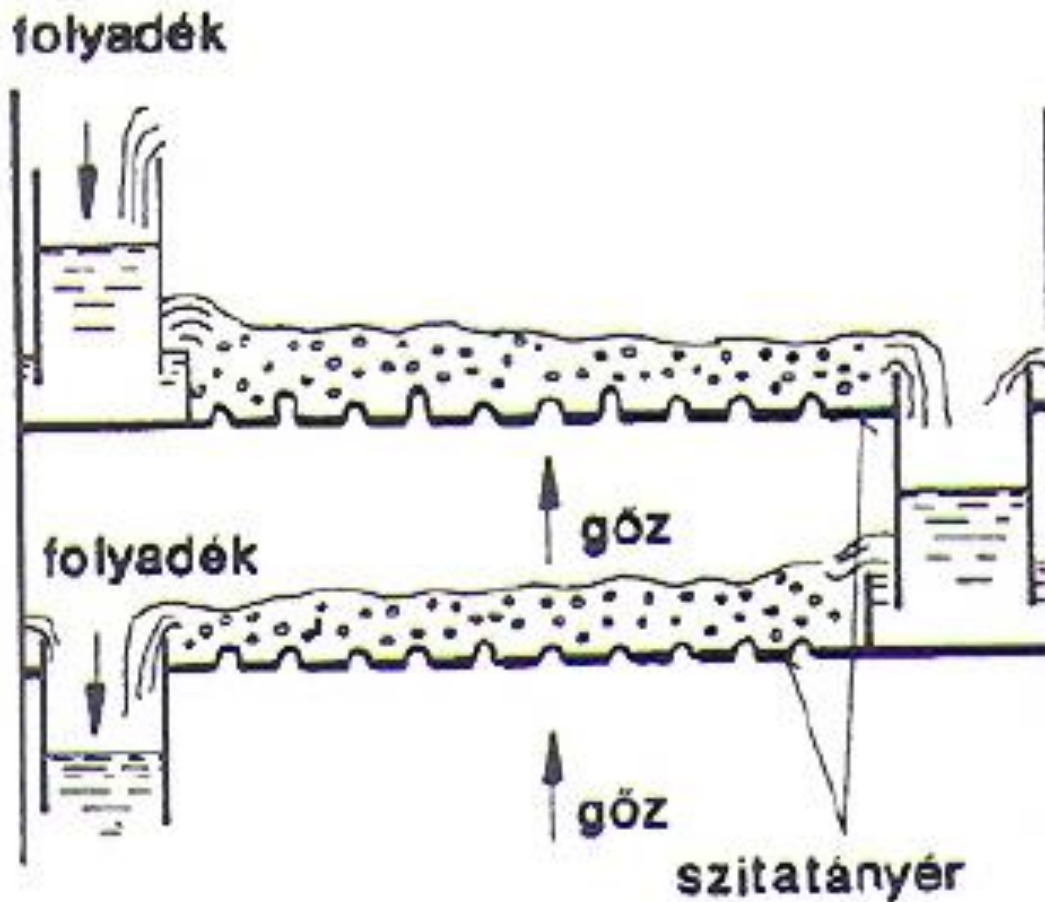


257. ábra. Harangsapkás tányér

(*h-harang, bg-beömlő gát, k-kémény, kp-kolonnaköpeny, g-gőz, tg-túlfolyógát, f-folyadék*)

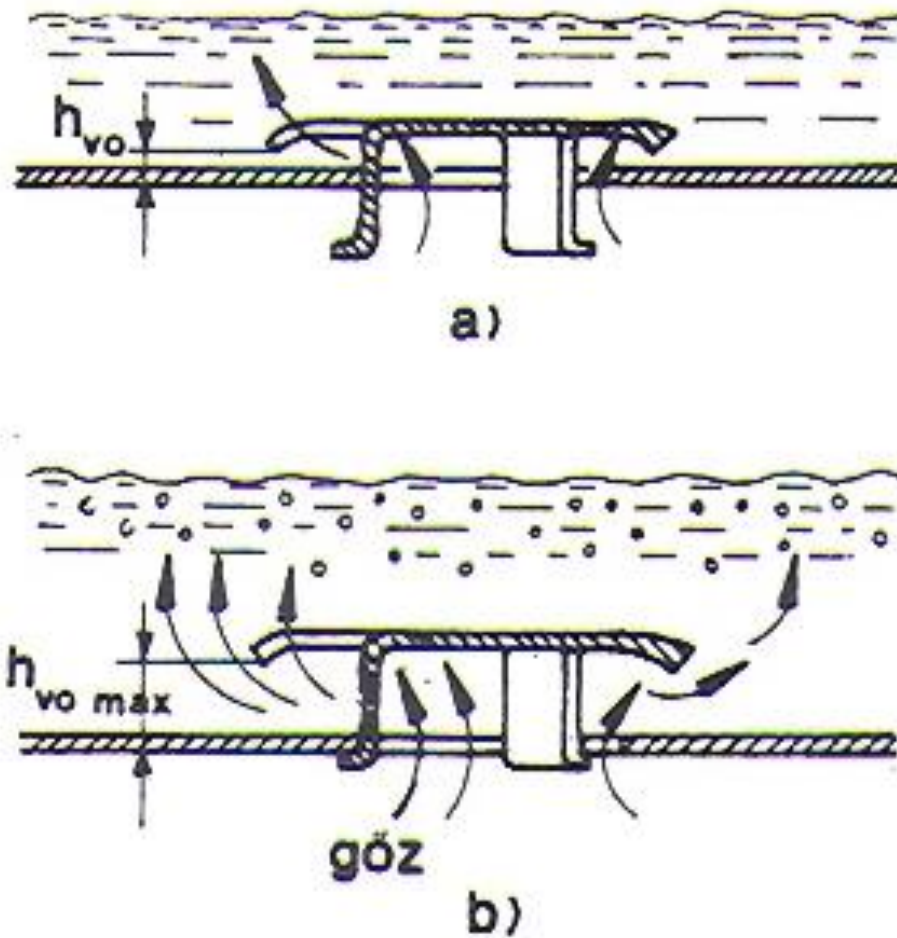
Másik régebbi tányértípus az ún. szitatányér (258. ábra). Előnye egyszerűsége és azzal együtt járó olcsósága. Rugalmas működésű, jó hatásfokú, üzembiztos. A folyadék tányéron való tartásához szükséges egy minimális gőz(gáz) sebesség,

amikor is a lyukakon átáramló dinamikus nyomása tartja fenn a tányéron a folyadékréteget, mely így csak a túlfolyókon tud az alsóbb tányérokra folyni. A szitatányért napjainkban is fejlesztik, számos korszerű megoldása ismert.



258. ábra. Túlfolyós szitatányér

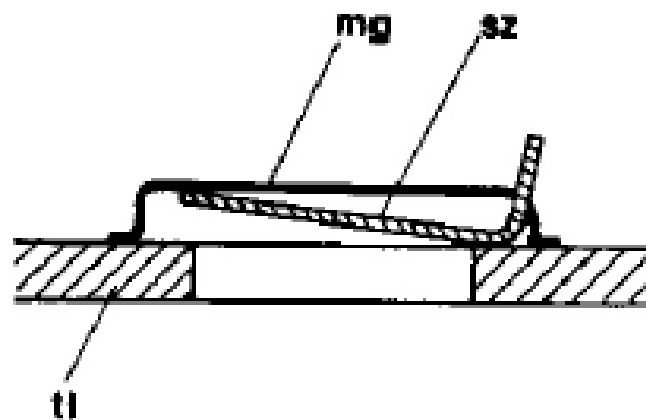
A túlfolyós tányérok működési tartományait lehet bővíteni. Ezért kezdték el gyártani az 1950-es években a *szelepes tányérokat*, melyeknek ma már számos típusa van forgalomban. Ha a gőz folyadékba történő buborékolását szelepeken keresztül oldjuk meg, akkor ezek a szelepek képesek a mindenkor változó terheléshez alkalmazkodva helyzetüket változtatni (259. ábra). Nagyobb gőzáram esetén a szelepek felfelé mozdulnak el, „nyitnak” és ezáltal növelik a tányér ún. *szabad keresztmetszetét*, melyen keresztül a gőz tud áramolni.



259. ábra. Szelepes tányér egy eleme

*a-alaphelyzet, b-működés közbeni teljesen nyitott helyzet*

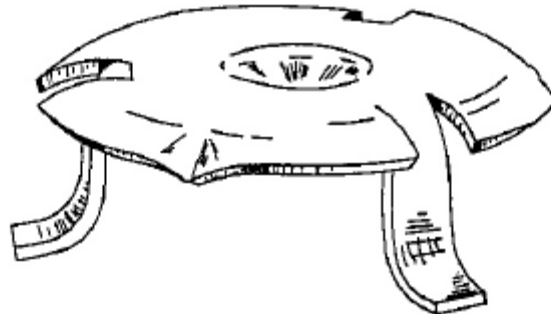
A 260. ábra és 261. ábra közismert tányérszelepeket mutatnak be (Nutter szelep, Glitsch szelep)



260. ábra. Nutter tányérszelep

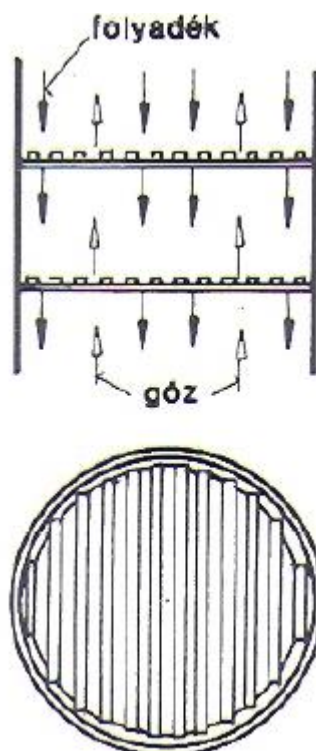
*sz-szelep, tl-tányérlemez, mg-mozgásgátló elem*

A túlfolyó nélküli tányérok közül a legegyszerűbb az ún. rács vagy rostélytányér (261. ábra).



261. ábra. Glitsch-szelep

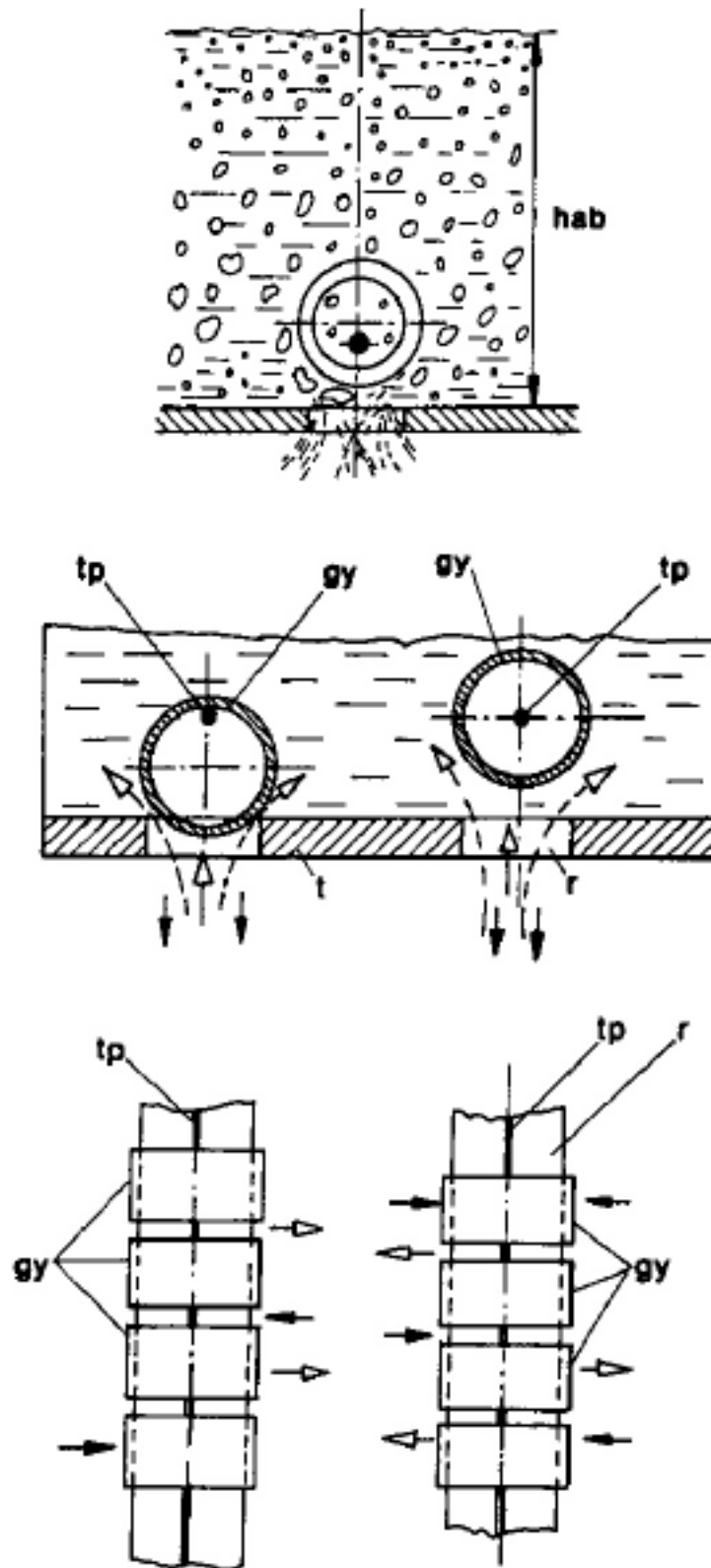
A túlfolyó nélküli tányérok közül a legegyszerűbb és a legelterjedtebb típus az ún. rács- vagy rostélytányér (262. ábra). Készítésekor egy fémlemezbe rácsszerű nyílásokat marnak. Lehet csőből is készíteni, és ilyenkor a csőben hőközlő közeget is áramoltathatunk, pl. abszorpciós hő elvonása is lehetséges ilyen módon. A tányéron lévő nyílások nagysága, azaz a szabadkeresztmetszet, megszabja működési tartományukat.



262. ábra. Rács- vagy rostélytányér

A szítatányér konstrukció is megtalálható túlfolyó nélküli kivitelben. Ilyenkor a szíták lyukméretét úgy kell megállapítani, hogy a szabadkeresztmen át mind a gőz(gáz) mind

a folyadék át tudjon haladni, és az anyagátadásra jellemző habzás a tányérokon kialakuljon.

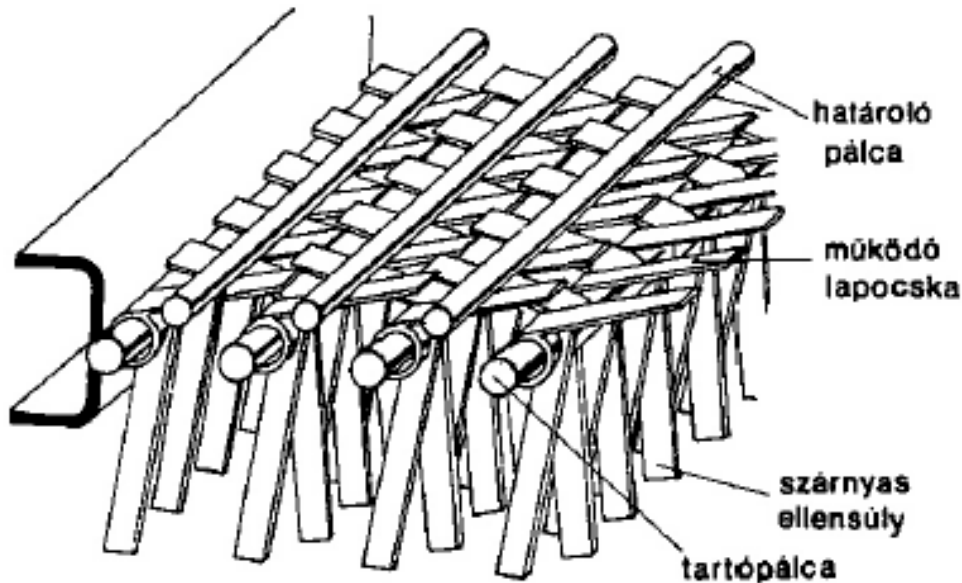


263. ábra. Gyűrűszelepes (Fábry-féle) rácstányér



A rácstányér viszonylag szűk munkatartományát jelentősen növelhetjük az ún. gyűrűszelepes vagy más néven Fábry-féle rácstányérral. Ez a magyar szabadalom a 263. ábra látható. A lényege, hogy a rácstányér rései fölé helyezett pálcákra gyűrűket szerelnek, melyek szabad mozgásukkal a tányér szabadkeresztmetszete változik, és ezáltal rugalmasabban, tágabb munkatartományban, működik a tányér.

Fontos környezetvédelmi feladatra, szilárd anyaggal szennyezett gázok mosására, használhatjuk az ún. KEBIZUTA tányért.



264. ábra. KEBIZUTA-tányér

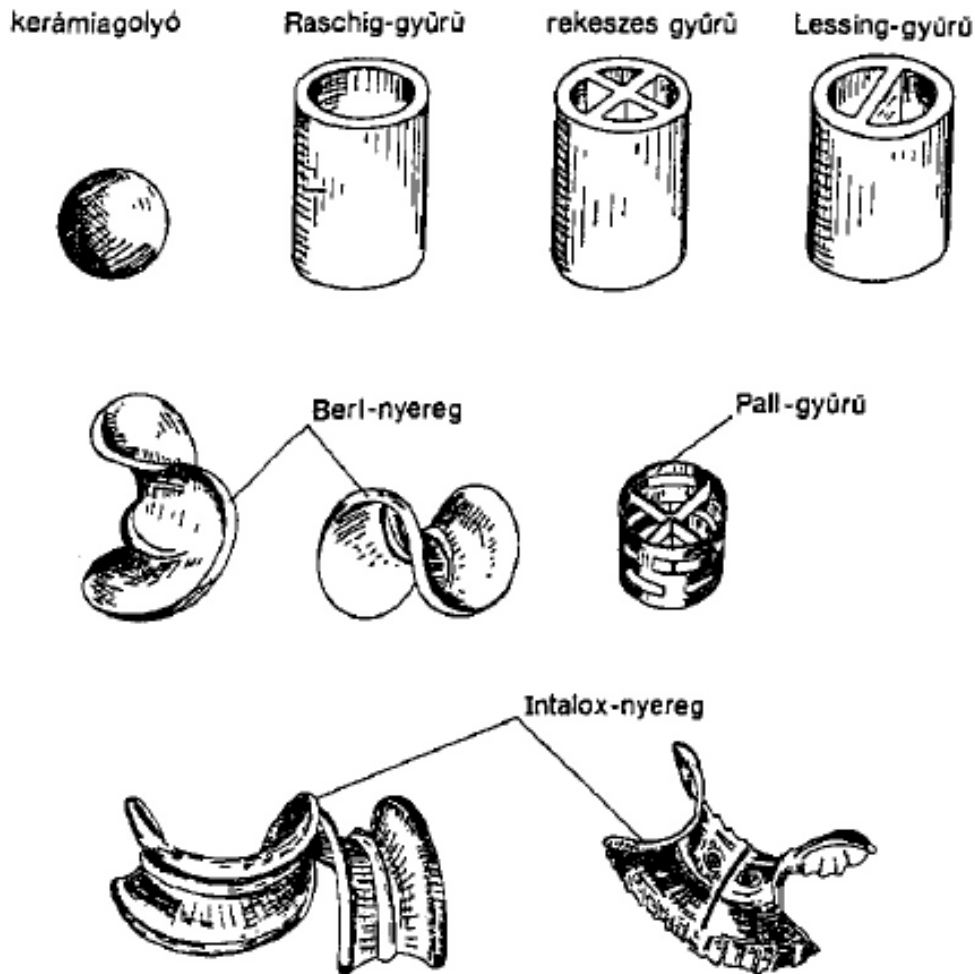
A **KE**resztáramú **BI**llenőelemes **ZU**hany tányér magyar szabadalom. Elsősorban poros gázok-gőzök mosására, folyadékkal történő érintkeztetésére szolgál.

## Töltött oszlopok

A töltött oszlopokat két fő csoportba osztjuk, melyek: *ömlesztett vagy rendezetlen töltetes* és *rendezett töltetes oszlopok*. A gyakorlatban, ha abszorpciós kolonnák használatára kerül sor (pl. gázmosó), akkor azok leginkább rendezetlen, kerámatöltetes oszlopok.

A rendezetlen töltetek legrégebb megoldása a koksszal töltött oszlop, ahol a kokszt biztosította az anyagátadáshoz szükséges felületet. Ezután használtak többnyire kerámiából készült golyókat ill. gyűrűket. A kerámia mint szerkezeti anyag elsősorban a korrozív gázok-gőzökkel való munka miatt volt szükséges. A 265. ábra mutat be néhány töltelék típust. A típusok kialakulását és lehetőség szerinti szabványosítását az indokolta, hogy az abszorberek ill. rektifikáló oszlopok elválasztóképessége előre számolható, tervezhető legyen.

A töltelékek ömlesztett halmazt képeznek a kolonnában, és szabványosításuk után a HTU és NTU számításokhoz szükséges paraméterei ismertek, esetleges tervezéshez felhasználhatók.

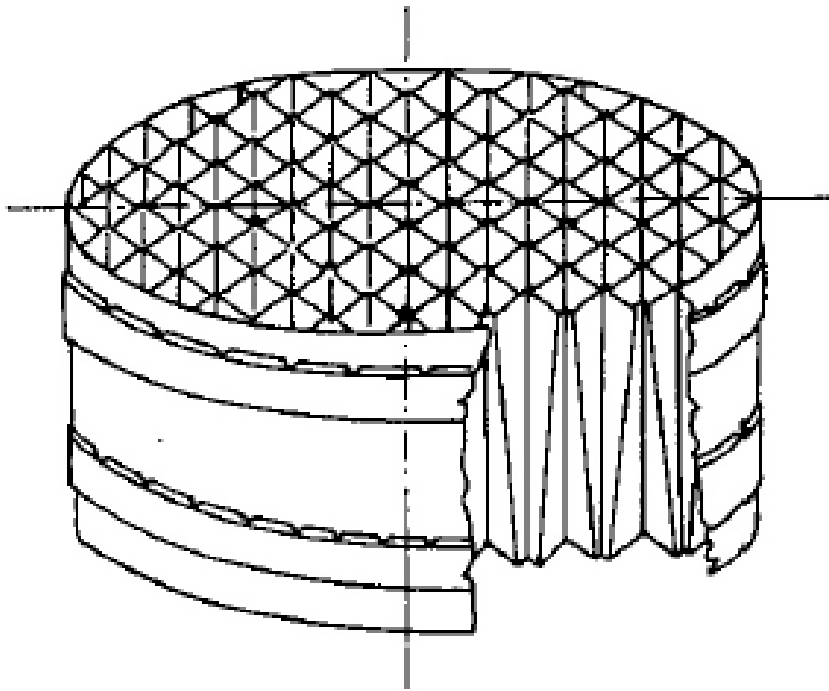


265. ábra. Töltet típusok

Fontos változást jelentett a töltött oszlopok működésében és ezáltal használatában a rendezett töltetek megjelenése. Ezek az új töltet típusok fém, kerámia és műanyag töltelékek. Többnyire vékony, szitaszerű lemez speciális hajtogatásával készülnek. Készülhetnek vékony lemezből is.


Jellemző tulajdonságuk a

- rendkívül kicsiny nyomásesés, mely a kolonnák működtetésénél több szempontból is kívánatos (pl. kisebb forráshőmérséklet-emelkedés az oszlop aljában, kisebb gázkompressziós munka abszorberek esetében),
- kicsiny „hold up” vagyis folyadékviszatarlás,
- nagyon jó elválasztó képesség,
- kiemelkedően magas rugalmas működés
- nagy kapacitás.



**266. ábra. VM-rendezett töltet**  
(*ifj. Fábry-Manczinger-féle*)

A világon számos gyártó foglalkozik rendezett töltetek gyártásával. A 266. ábra egy ilyen töltéttípust mutat be. A rendezett töltetek, fenti tulajdonságaik miatt, ma már egyre inkább alkalmazásra kerülnek. Gyakran egy meglévő tányéros kolonna tányérjainak rendezett töltetre történő cserélésével (revamping) az oszlop kapacitása többszörösére növelhető.

Az alfejezet  ábrái *Fonyó-Fábry, Vegyipari műveletti alapismeretek* című könyvéből kerültek, Fábry György engedélyével, felhasználásra.

### **Rektifikáló oszlopok tervezése**

A rektifikáló oszlopok tervezése rendkívül összetett mérnöki feladat.. A tányérok és töltetek viselkedését jól le tudjuk írni, műveleti és/vagy empirikus modellekkel. A kolonna várható terhelései, belső gőz(gáz) ill. folyadékáramai és a várható elválasztási igények alapján, a kiválasztott kolonnabelső működése ismeretében, számítani tudjuk az oszlop és a kolonnabelső (tányér vagy töltet) paramétereit. A kolonnabelső kiválasztására, tehát, hogy tányér vagy töltet ill. melyik tányér és melyik töltet, nehéz általános érvényű szabályokat megfogalmazni. Mindig a kérdéses elválasztási feladathoz keressük a megfelelő kolonnabelsőt, ami lehet töltet vagy tányér.

A kolonnatervezés komoly mérnöki ismereteket igényel. Ezt a munkát ma már számítógépes programcsomagok és az egyes töltet ill. tányérgyártó cégek katalógusai is segítik. A témával és mérnöki hátterével számos szakirodalom foglalkozik pl. *Fonyó-Fábry, Vegyipari műveletti alapismeretek*.

## Szárítás

Vincze Lászlóné dr., Eötvös József Főiskola, Baja

A **szárítás** során valamely nedves (vagy oldószert tartalmazó) szilárd anyag nedvesség (oldószertartalmát) csökkentjük, vagy eltávolítjuk. Mechanikailag részben megoldható sajtolással, centrifugálással, szűréssel. Jelen fejezetben az elpárologtatásos, kigőzölögtetési eljárásokat tárgyaljuk. Anyag- és energiátanszport folyamatról van szó, amelynek sebessége, határfoka a megfelelő eljárással növelhető. [Fonyó Zs.;-Fábry Gy.:Vegyipari művelettani alapismeretek](#)

## Szilárd – gáz rendszerek Szilárd anyag szárítása

A száraz anyag és a nedvesség kapcsolata befolyásolja a transzport folyamatokat. Két alapvető folyamatról van szó, Az egyik a hő áramlása a folyadék elpárologtatásához, a másik tömegáram (anyag) amikor a gőzállapotú nedvesség elpárolg a szilárd anyag felületéről.

A nedvesség kötöttségi állapota szerint csoportosítva:

Kötetlen nedvesség (Mechanikailag kötött víz)

Felületi nedvesség, amely úgy viselkedik, mint a szabad folyadékfelszín.  
Kapilláris nedvesség, eltávolítása a kapilláris méretének függvénye, a szárításnál a diffúziós mechanizmus a döntő.

Kötött nedvesség:

Kémiaailag kötött víz, a kötés igen erős, részben a kristályszerkezet része, vagy kémiai reakció eredményeként rögzült (más vegyület a nedves, mint az eredeti.

Fizikai-kémiaailag kötött víz, vagy adszorpciós, vagy ozmózisos kötéssel kötött változat.

A művelet célja:

- térfogatcsökkentés,
- tartósítás
- oldószervisszanyerés (pl. újrahasznosítás céljából)
- környezetvédelem

Módja:

- természetes eljárás
- mesterséges eljárással.

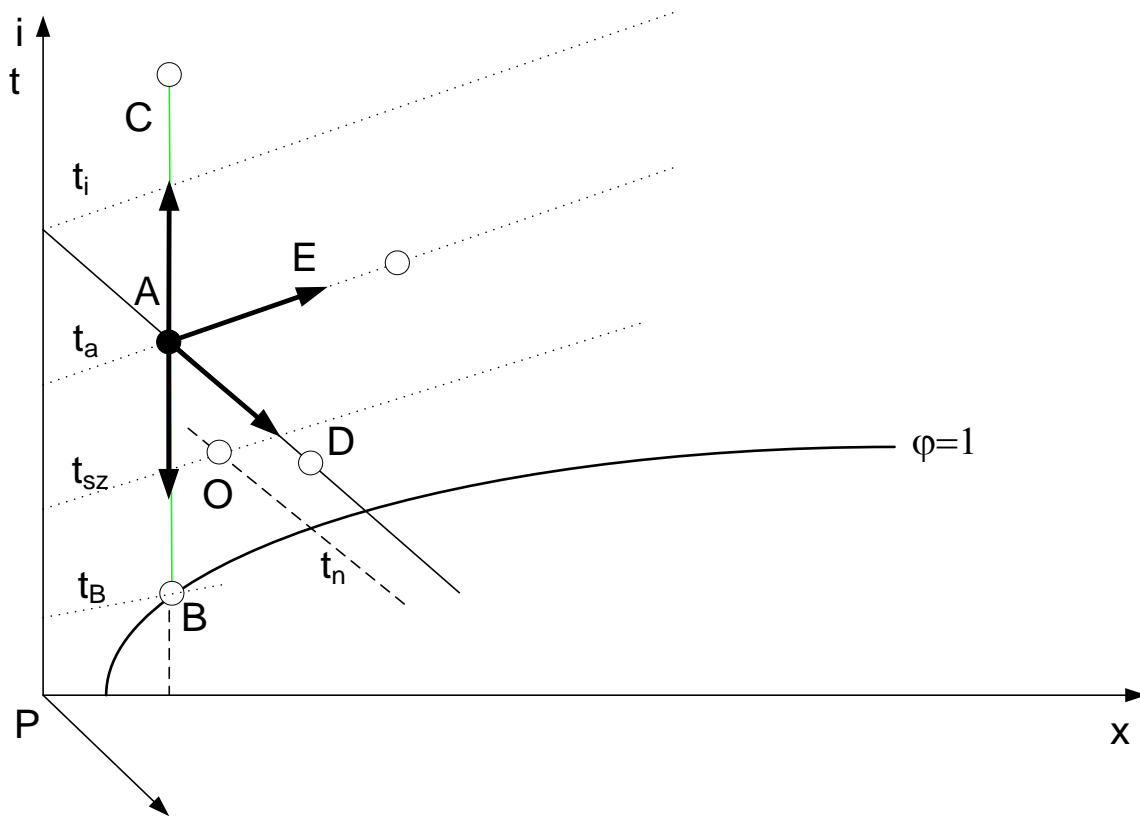
## A szárító közeg jellemzői

A nedvességet a szárított anyag körül áramló levegő szállítja el, vagy ami párologás és/vagy diffúzió révén a nyugalomban levő levegőbe kerül, ezért alapvetően ismernünk kell a levegő állapotjelzőit és annak változását a szárítás során. A 267. ábra szemlélteti az egyes variációkat.

A 267. ábra a Mollier féle i-x diagramot, a nedves levegő hőtartalom–nedvességtartalom diagramját mutatja. Lényege, hogy ferdeszögű koordináta rendszerben készült, ahol a függőleges tengely a hőtartalom és a hőmérséklet

paramétereket jelöli. A vízszintes  $x$  tengely az abszolút nedvességtartalmat ábrázolja kg nedvesség/kg száraz levegő dimenzióban, egyúttal az  $x$  tengely a  $t=0$  C° hőmérsékletű izotermának felel meg.

A  $\varphi=1$  relatív nedvességtartalom alatti terület a ködtartomány, amellyel ezen fejezetben nem foglalkozunk.



267. ábra: A levegő Mollier féle  $i$ - $x$  diagramja

Jelölések:

- $x$  – a levegő nedvességtartalma (kg nedvesség/kg száraz levegő)
- $i$  – a levegő-víz rendszer entalpiája (kJ/kg)
- $\varphi$  – a levegő relatív páratartalma
- $t$  – hőmérséklet (C°)

Az adiabatikusan elpárologtatott víz párolgáshője nem változtatja ideális esetben a nedves levegő entalpiáját, de a felvett víz mennyiségétől függően a hőmérséklete csökken és a nedvességtartalma (abszolút, relatív) növekszik. (A-D vonal)

Az „A” állapotú levegő hőmérsékletének változtatása a nedvességbevitel illetve elvonás nélkül az entalpia és a hőmérséklet változását jelenti. (A-C irány, A-B irány) Az abszolút nedvesség tartalom nem változik ezért a változás irány párhuzamos a függőleges tengellyel. Természetesen a relatív páratartalom változik.

Az A-E változás azonos hőmérsékleten történő nedvességtartalom növekedést és entalpia növekedését jelzi, ahol a szükséges párolgáshőt külső forrásból biztosítjuk.

A környezeti levegő entalpiájának nedvességtartalmának meghatározása a száraz levegő (az adott állapotú, relatív páratartalmú,  $t_{sz}$ ) és a nedves (a telített) levegő ( $t_n$ ) hőmérséklete alapján történhet, 267. ábra („0” pont, pszichrométer elv)

Anyagmérleg a szárító levegő nedvességtartalmának növekedésére:

$$1. \text{ képlet} \quad \dot{L}_A \cdot x_A + \dot{V} = \dot{L}_A \cdot x_{kev}$$

$$2. \text{ képlet} \quad \dot{V} = \dot{L}_A \cdot (x_{kev} - x_A)$$

$$3. \text{ képlet} \quad \dot{L}_A \cdot i_A + \dot{V} \cdot t \cdot c_v = \dot{L}_A \cdot i_{kev}$$

$$4. \text{ képlet} \quad \frac{i_{kev} - i_A}{x_{kev} - x_A} = \frac{\Delta i}{\Delta x} = c_v \cdot t_b$$

Jelölések:  $\dot{L}_A$  - a száraz levegő tömegárama (kg/h),  
 $\dot{V}$  - a nedvesség tömegárama (kg/h),  
 $x$  - nedvességtartalom kg nedvesség/kg szárazlevegő  
 $c_v$  - a víz fajhője  
 $t$  - hőmérséklet C°  
 $i$  - entalpia kJ/kg

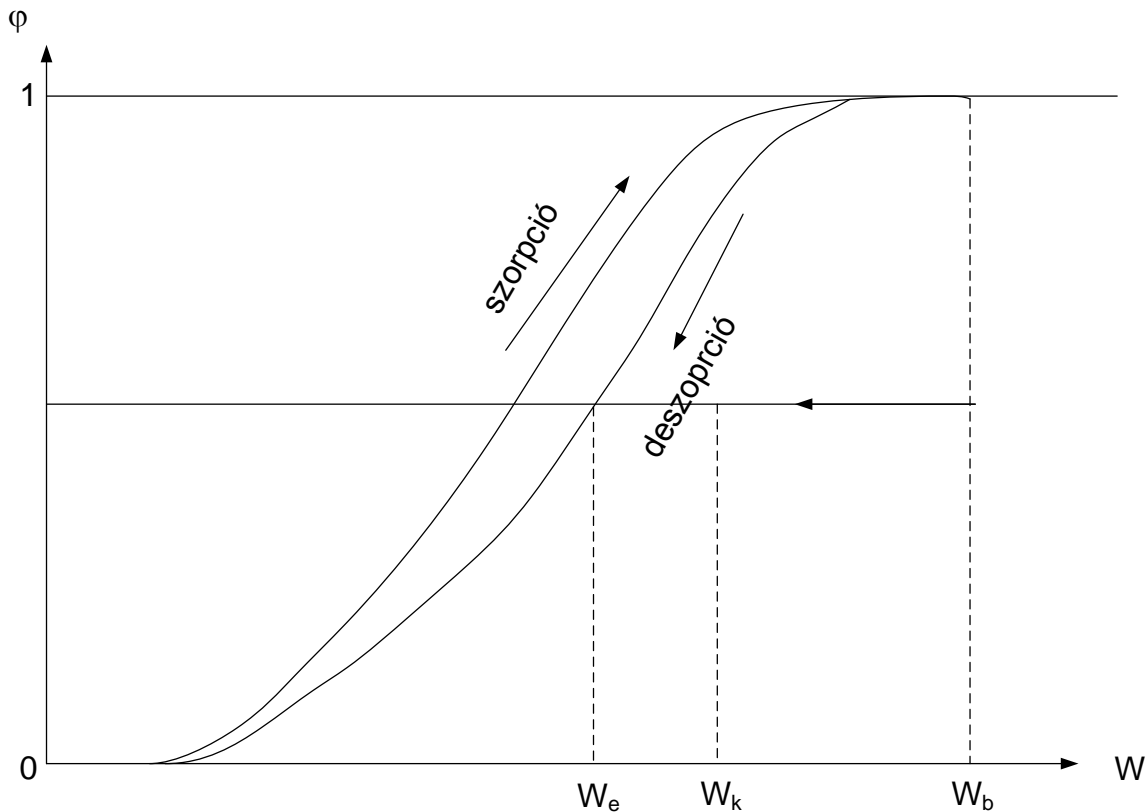
### 5. képlet Feladat.

A nedves hőmérő és a száraz hőmérő hőmérséklet adatai alapján határozza meg Mollier diagramon a levegő entalpiáját kJ/kg-ben, valamint abszolút nedvességtartalmát kg nedvesség/kg száraz levegő dimenzióban!

## A száradási folyamat

### Szorpciós és deszorpciós izotermák, hiszterézis

A szárítandó anyag és a vele érintkező levegő közötti nedvességvándorlás irányát a nedvesség viszonya határozza meg, az egyensúlyi állapot kialakulása több tényező együtthatasának eredménye. Többek között a levegő relatív páratartalma, az anyag tulajdonságai (vízleadó képessége) és a rendelkezésre álló idő a döntő tényező.



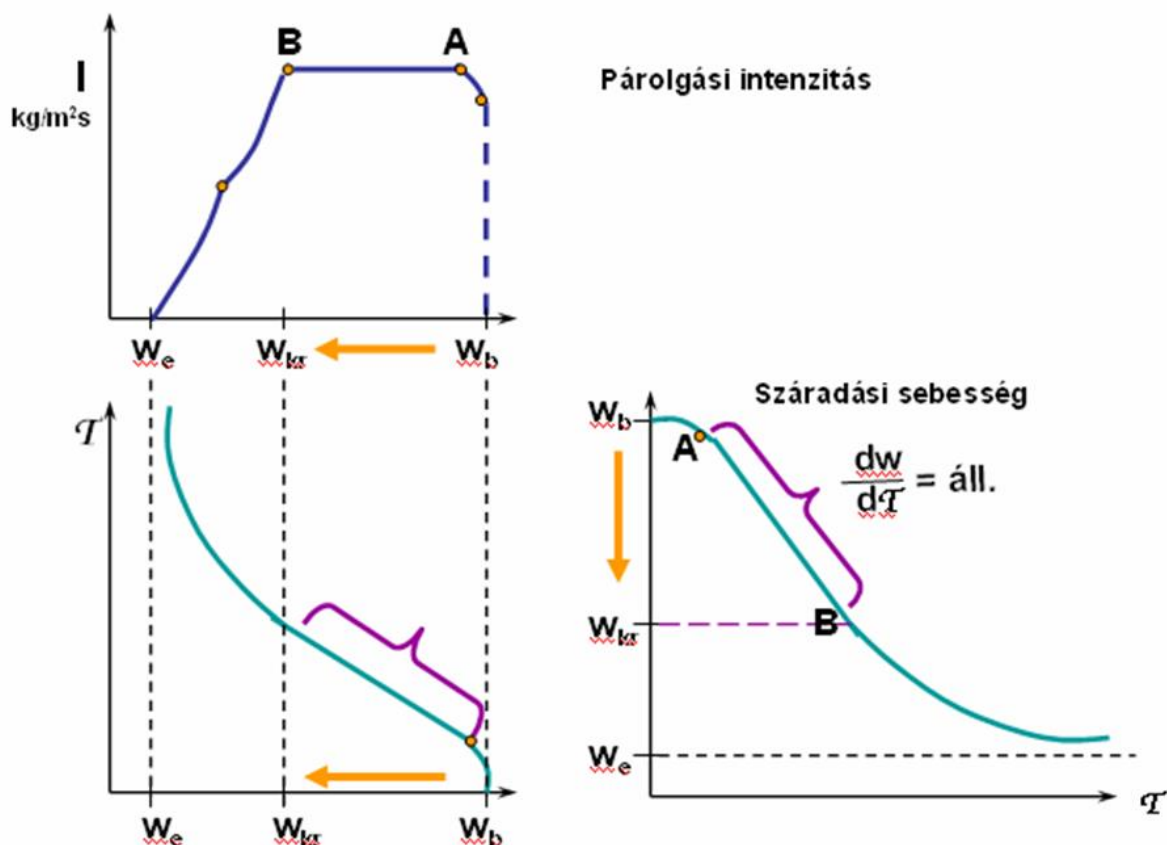
**268. ábra:** A szorpció és deszorpció histerézis

A 268. ábra látható a szorpció histerézis. Egy  $w_b$  kezdeti nedvességtartalmú szilárd anyagot  $\varphi_x$  relatív páratartalmú levegővel szárítunk. A  $w_b - w_k$  nedvességtartalom csökkenés a kötetlen nedvesség (felületi) eltávolítása miatt alakul ki. A  $w_k - w_e$  nedvességtartalom csökkenés az egyensúlyi nedvességtartalom eléréséig tart. Minél kisebb a szárító levegő relatív nedvességtartalma annál nagyobb mértékű nedvességeltávolítás valósul meg, a szárítandó anyag pedig kisebb maradék nedvességtartalmú lesz.

Látható, hogy a szárítási műveletnél az alkalmazott levegő relatív páratartalma meghatározó az egyensúlyi nedvességtartalom szempontjából.

### Száradási sebesség

Az előző fejezetben tárgyaltuk, hogy minden anyagot csak az egyensúlyi nedvességtartalomig száríthatunk. Amíg az anyag felületén szabad víz található, az egyenesen párolog. Ha a felületen található víz elpárolgott, az az anyag belsejéből, üregeiből, pórusaiból diffúzióval vándorol a felületre. A felszíni párolgás és a diffúzió sebessége eltérő, ez utóbbi kisebb, ezért lassul le az anyagtranszport sebessége.



269. ábra: Párolgási intenzitás, száradási sebesség

A 269. ábra a párolgási intenzitást és a száradási sebességet mutatja. A kezdeti A-B szakasz a kiegyenlítődségi szakasz rövid, a B-C szakasz az egyenletes intenzitású szakasz, amikor a párolgási sebesség állandó ( $\frac{dw}{d\tau} = \text{áll.}$ ). Amikor a szárítandó anyag nedvességtartalma eléri a  $w_{kr}$  kritikus nedvességtartalom értéket, a párolgás gyorsabb, mint a diffúzió, ezért csökken a sebesség, csökken a párolgási intenzitás.

A 269. ábra a C-D intervallumban még vannak a felületen nedves foltok, csak a D-E között nincs, ekkor csak a diffúzió sebességétől függ a száradási sebesség. Az E pontban a szárítandó anyag nedvességtartalma eléri a szárító levegő vízgőztartalmának megfelelő  $w_e$  egyensúlyi értéket.

A folyadékáramlás belső mechanizmusa az anyag szerkezet függő:

- Homogén szilárd anyagban végbemenő diffúzió
- Kapilláris áramlás szemcsés és pórusos anyagokban
- A zsugorodás és nyomáskülönbség által létrehozott áramlás
- Elpárolgás-kondenzálódás miatt bekövetkező vándorlás.

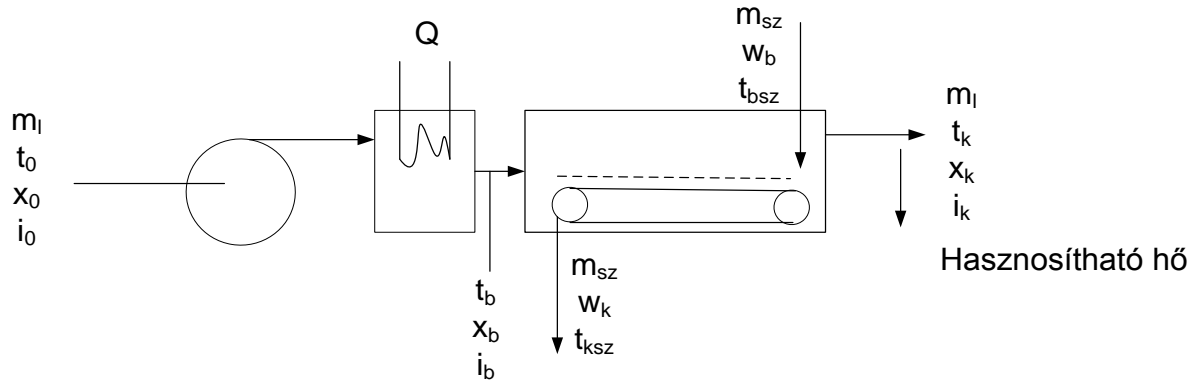
Adott időpontban egyfajta, de a száradási folyamat különböző szakaszaiban eltérő mechanizmus válhat uralkodóvá.



## A konvekciós szárítás

A szárítási művelet során az anyagtranszport folyamat a szilárd anyag és az áramló levegő között játszódik le. (270. ábra)

Ideális esetben az egyensúly elérhető, a valóságban közelíthető.



270. ábra: A konvektív szárítás elvi sémája

### Az anyagtranszport anyagmérlege:

A szárítandó anyag által leadott nedvesség:

$$5. \text{ képlet} \quad \dot{m}_n = \dot{m}_{sz} \cdot (w_b - w_k)$$

A levegő által felvett nedvesség:

$$6. \text{ képlet} \quad \dot{m}_n = \dot{m}_l \cdot (x_k - x_b)$$

A teljes anyagáram levegőre:

$$7. \text{ képlet} \quad \dot{m}_{levössz} = \dot{m}_l \cdot (1 + x)$$

A teljes anyagáram a szárítandó anyagra:

$$8. \text{ képlet} \quad \dot{m}_{szilárd} = \dot{m}_{sz} \cdot (1 + w)$$

A nedvesíthető anyag hőtartalma

$$9. \text{ képlet} \quad i_n = c_{szár} \cdot t + w \cdot c_{víz} \cdot t + \Delta i_{nedv}$$

### A hőmérleg

$$10. \text{ képlet} \quad \dot{m}_l \cdot i_b + \dot{Q}_{hő} + \dot{m}_{sz} \cdot i_{nb} = \dot{m}_l \cdot i_k + \dot{m}_{sz} \cdot i_{nk} + \dot{Q}_{veszt}$$

Ha közelítésképpen elhanyagoljuk a hővesztéseget, és a szárítandó anyag miatti veszteséget, akkor:

$$11. \text{ képlet} \quad \dot{Q}_{h\delta} = \dot{m}_l \cdot (i_k - i_b) = \dot{m} \cdot \frac{\Delta i}{\Delta x}$$

A fajlagos hőigény (1 kg nedvesség eltávolításához szükséges hőenergia):

$$12. \text{ képlet} \quad \frac{\dot{Q}_{h\delta}}{\dot{m}_n} = \frac{\Delta i}{\Delta x}$$

Jelölések:

$\dot{m}$  tömegáram (kg/óra)

w – a szárítandó anyag nedvességtartalma (kg nedvesség/kg szárazanyag)

x – a szárító levegő nedvességtartalma (kg nedvesség/kg száraz levegő)

i – entalpia (kJ/kg)

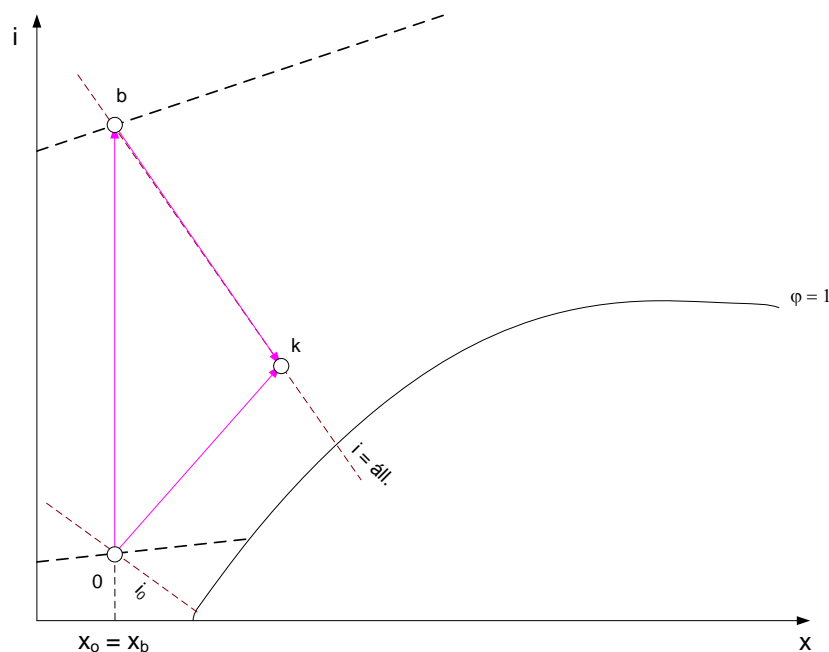
$\dot{Q}_{h\delta}$  - hőáram (kJ/h)

### Egyfokozatú szárítás ábrázolása i-x diagramon

A szárítás során a környezeti levegőt (friss levegő) elő kell készíteni. A (271. ábra) a  $t_o$  hőmérsékletű levegőt  $t_b$  hőmérsékletűre melegítjük. Ezalatt ideális esetben az abszolút nedvességtartalma ( $x_o$ ) nem változik, csak a hőmérséklete  $t_o$ -ról  $t_b$ -re és entalpiája  $i_o$ -ról  $i_b$ -re.

Az elvonandó víz mennyisége:

$$13. \text{ képlet} \quad \Delta x = x_k - x_o = x_k - x_b$$



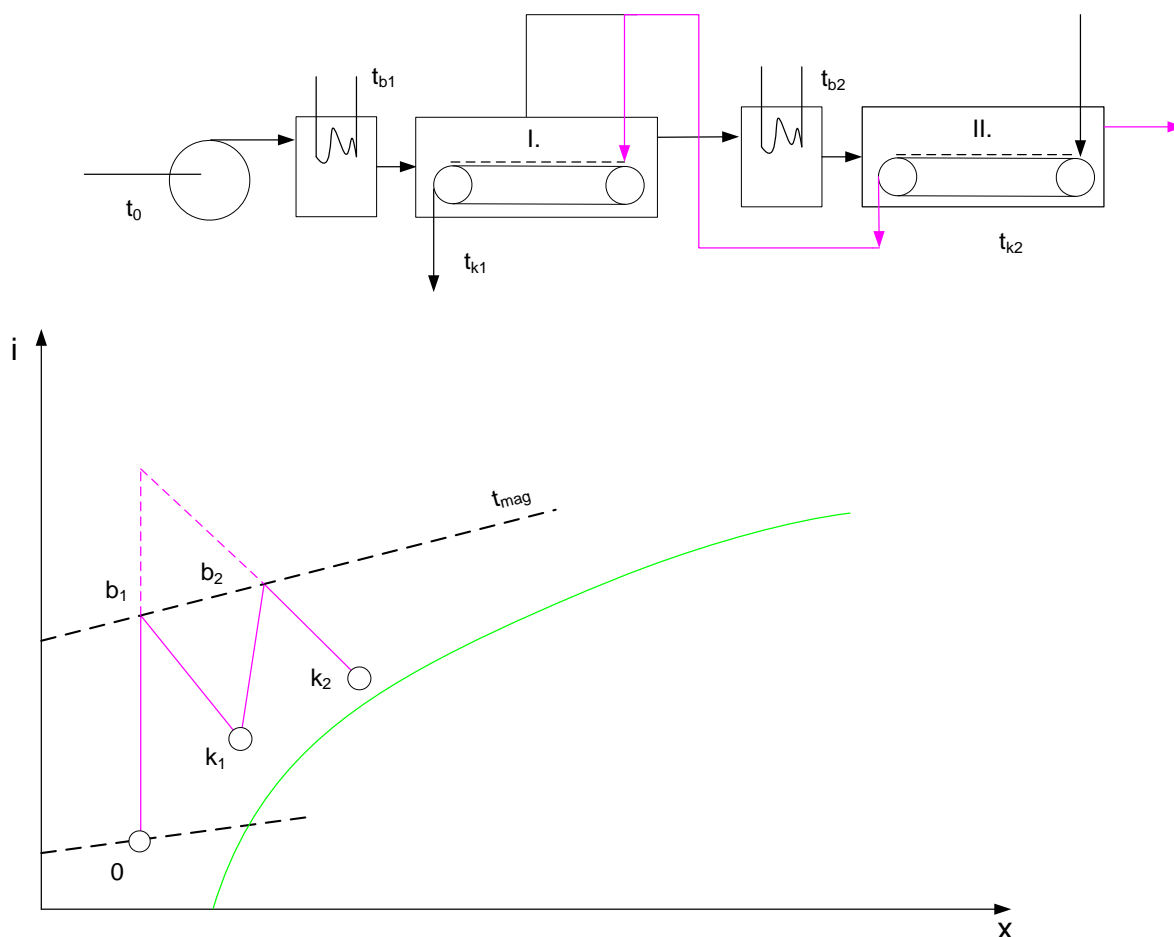
271. ábra: Egyfokozatú szárítás ábrázolása i-x diagramon

Minél nagyobb a  $t_b$ , azaz a szárításnál alkalmazott levegő hőmérséklete, annál kevesebb szükséges, de a szárítandó anyag hőérzékenysége korlátozó tényező. Ezekben az esetekben szóba jöhet a többfokozatú szárítás.

## Többfokozatú szárítás

A szárításnál alkalmazott levegő egy, vagy többszöri közbenső melegítésével elérhető, hogy hőre érzékeny anyag ne károsodjon a szárítási folyamat során, esetleg a nagy hőmérsékleten képződő felszíni kéreg ne akadályozza a nedvesség eltávolítását. A 272. ábra a szaggatott vonal jelzi, ha egyfokozatban történt volna a szárítás.

Az egyes fokozatokban közölt hő a szárító levegő elő-, ill. visszamelegítésére összeadódva adja a teljes hőigényt. A 272. ábra a  $t_0$  hőmérsékletű környezeti levegőt az egyes fokozatok előtt azonos  $t_{b1}=t_{b2}$  hőmérsékletre melegítjük.



272. ábra: Kétfokozatú szárítás ábrázolása  $i$ - $x$  diagramon

## Szárítás füstgáz-levegő keverékével

Ebben az esetben a rendelkezésre álló nagy hőmérsékletű füstgáz (más technológiából) szolgáltatja a környezeti levegő előmelegítésére szolgáló hőenergiát. (273. ábra) A keverés arányának határt szab részben az anyag hőérzékenysége, valamint a füstgáz minősége (szennyezőanyagai).

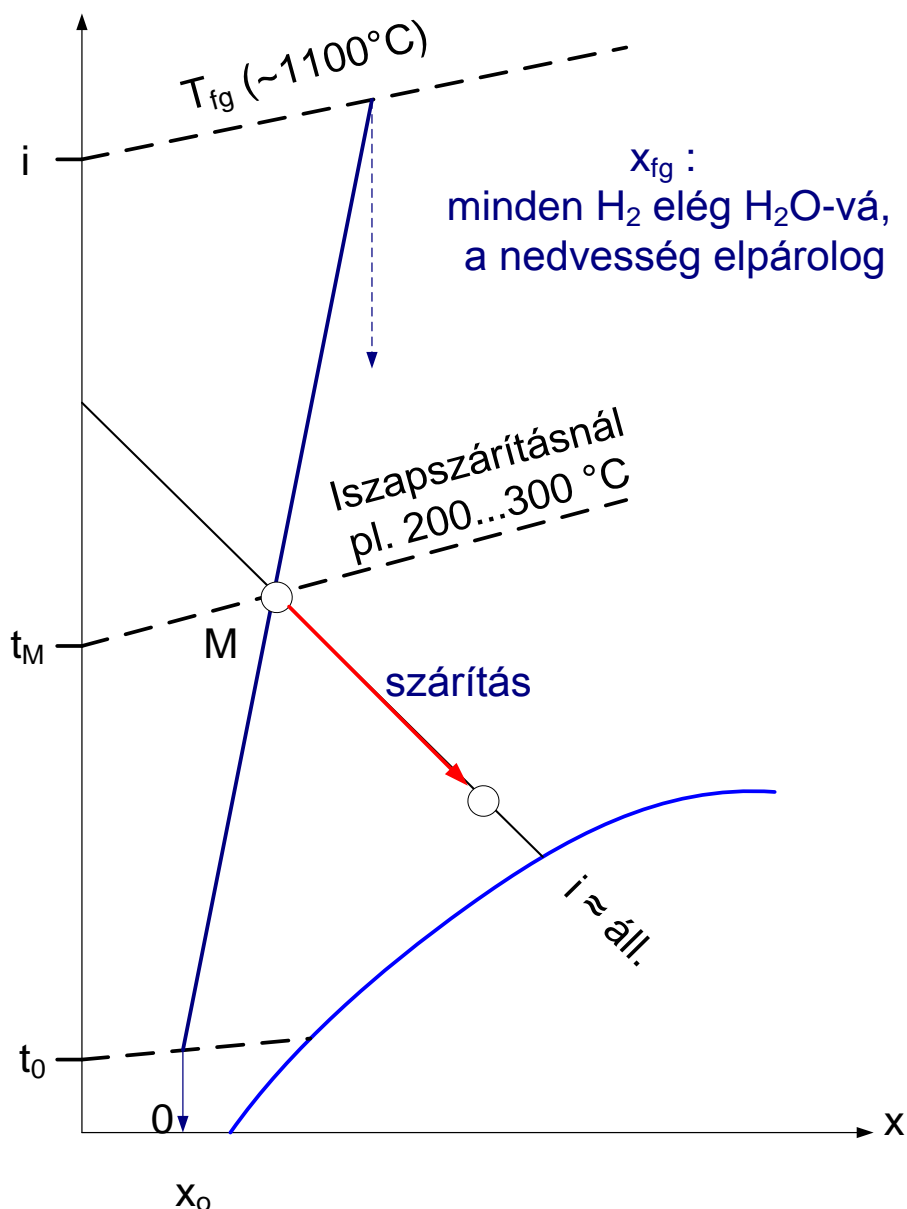
Anyagmérleg a füstgáz levegő keverésénél:

14. képlet  $\dot{M}_o \cdot x_o + \dot{m}_{fg} \cdot x_{fg} = \dot{M} \cdot x_M$

15. képlet  $\dot{M} = \dot{m}_o + \dot{m}_{fg}$

Átrendezve:

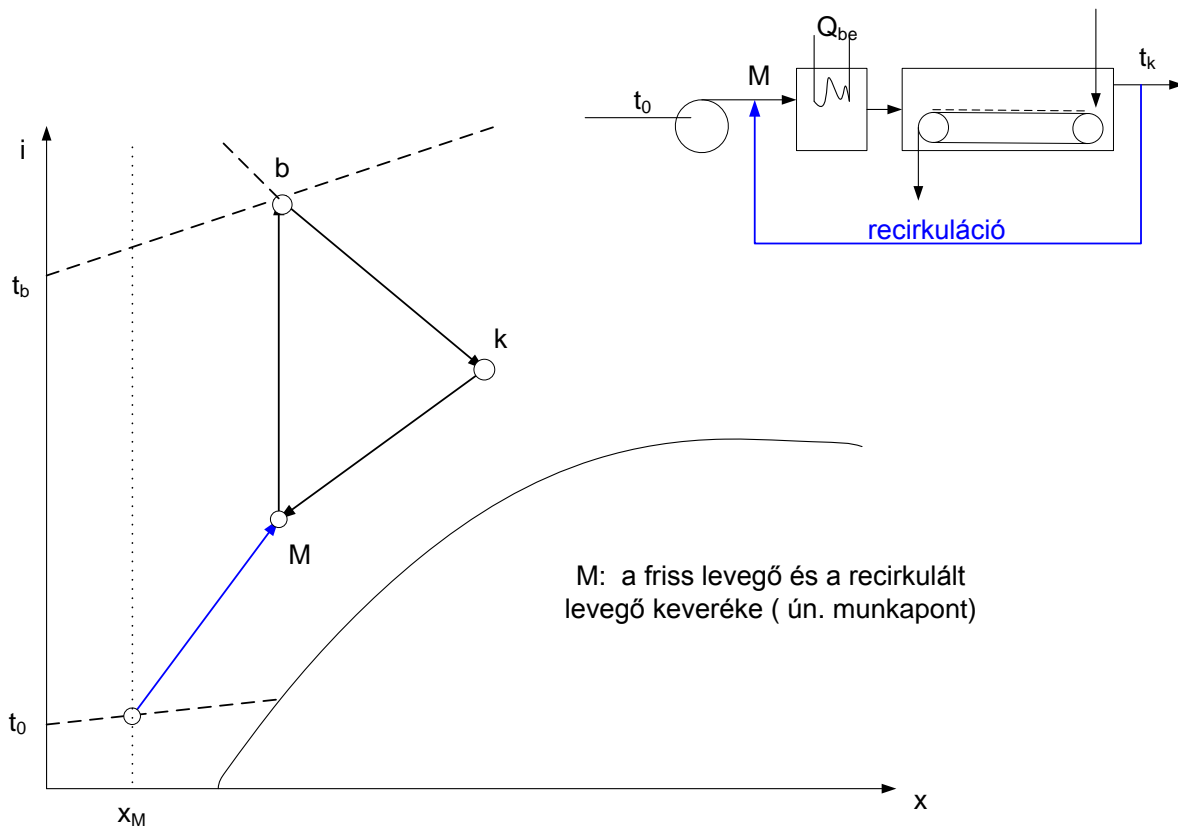
16. képlet  $\frac{\dot{m}_{fg}}{\dot{m}_o} = \frac{x_M - x_o}{x_{fg} - x_M}$



273. ábra: Szárítás füstgázzal, *i-x* diagramon

**Szárítás részleges recirkulációval**

A szárítóból kilépő levegő entalpiája részleges recirkulációval hasznosítható. A 274. ábralátható módon. A hőenergia részleges visszanyerése azzal jár, hogy a szárításhoz előkészített „M” állapotú levegő abszolút nedvességtartalma nagyobb, mint a környezeti levegő  $x_0$  értéke.



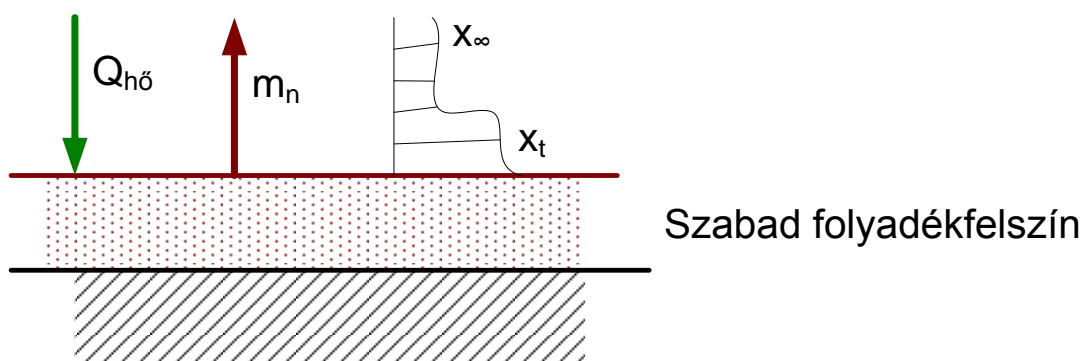
274. ábra: Szárítás részleges recirkulációval

Az elvonandó víz mennyisége ( $x_k - x_M$ ).

17. képlet

$$\Delta x = x_k - x_M = x_k - x_b$$

### A konvektív szárítás kinetikája



275. ábra: A konvektív szárítás kinetikája

Anyagmérleg:

18. képlet  $\dot{m}_n = \beta_x \cdot A \cdot (x_t - x_\infty)$

19. képlet  $\dot{m}_n = \beta_{\Delta p} \cdot A \cdot (p_t - p_\infty)$

Jelölés:

A – felület

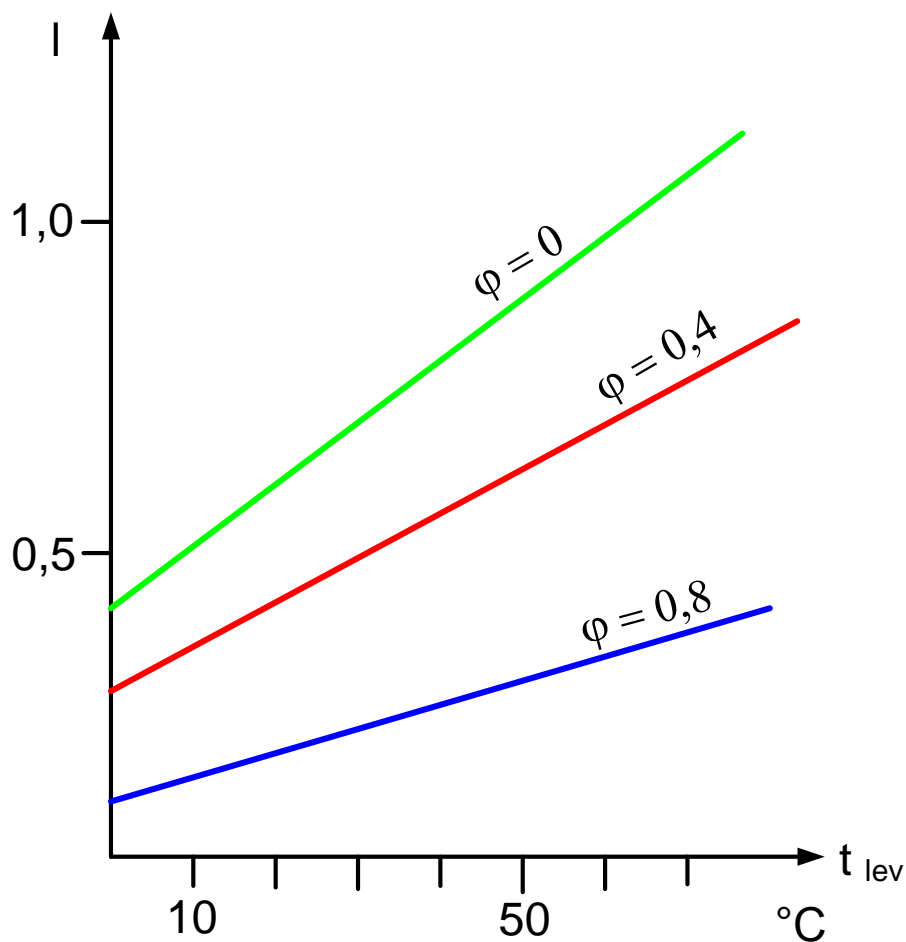
$\beta$ - párolgási tényező

A párolgási intenzitás:

20. képlet  $I = \beta_{\Delta p} \cdot (p_t - p_\infty)$

A szükséges felület számítása:

21. képlet  $A = \frac{\dot{m}_n}{I}$



276. ábra: A párolgási intenzitás, hőmérséklet a relatív páratartalom függvényében

## Szárító berendezések

A konvektív szárítók csoportosítása több szempont szerint történhet, például a berendezés üzeme szerint megkülönböztetünk szakaszos, folyamatos üzemű szárítókat. Az anyag helyzete szerint nyugvóágyas berendezések, ill. mozgó rétegű, fluidizációs szárítók. Az anyag és a szárító közeg egymáshoz viszonyított mozgása szerint egyen-, ellen és keresztáramú szárítókat. A szárítóban alkalmazott nyomás alapján lehetnek atmoszférikus vagy vákuumszárítók.

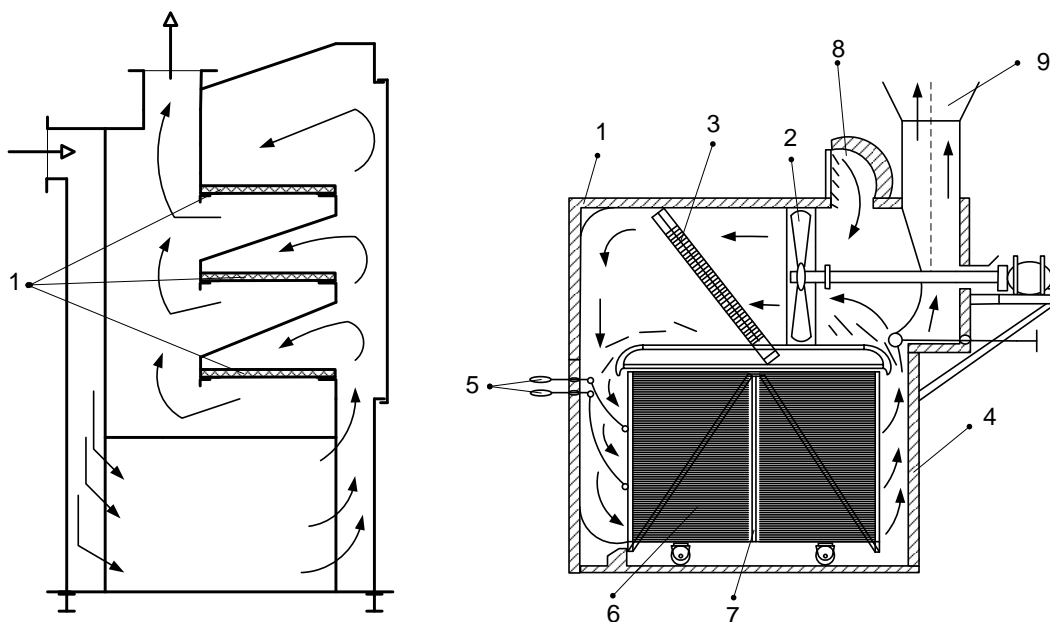
A szakaszos üzemű szárítóknál sok esetben egyenlőtlenül szárad az anyag, mivel nem egyenletesen éri a szárítólevegő, összetapadt, nedves részek maradhatnak, amit többszöri szárítási művelet megszakításával, forgatással csökkentenek.

Valójában ezek ún. nyugvóágyas szárítók. Az aprított szilárd anyag állandó helyzetben van, egymáshoz képest nem mozdul el. A szárító közeg (levegő) áramlik, az érintkezés a szilárd gáz határfelületen van. Üreges anyagoknál az üregek közti áramlás, vagy helytelen réteg elhelyezésnél ún. csatornákon keresztüli áramlás rontja az anyagátadási viszonyokat.

A nyugvó ágyas rendszerek használata elterjedt, tág szemcseméretű halmazok szárítására alkalmas (0,6-75 mm).

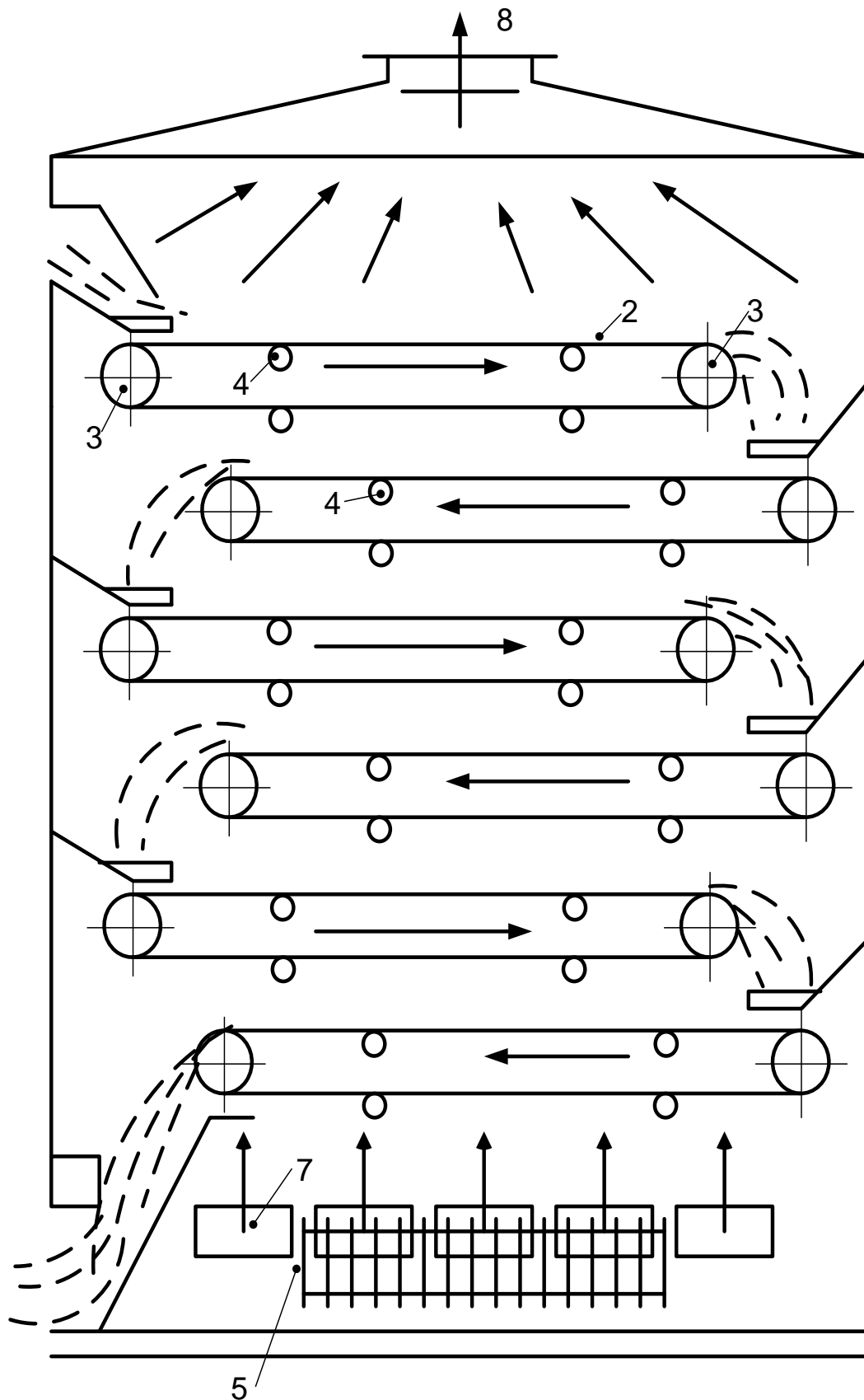
Szakaszosak, például az átáramlásos, közvetlen fűtésű tálcás szárítók. (277. ábra)

Konvektív szárító típusok



277. ábra: konvektív szárító típusok

A szalagos szárítók folyamatos üzeműnek tekinthetők, a szárítandó anyag. Több szállítószalag helyezkedik el egymás fölött, az anyag föntről hullik lefelé, így minden szalagsor váltásnál részben keveredik az elmozdulás miatt. A levegő áramlását többnyire ventilátorral biztosítják. Élelmiszeriparban elterjedt típus. (278. ábra)

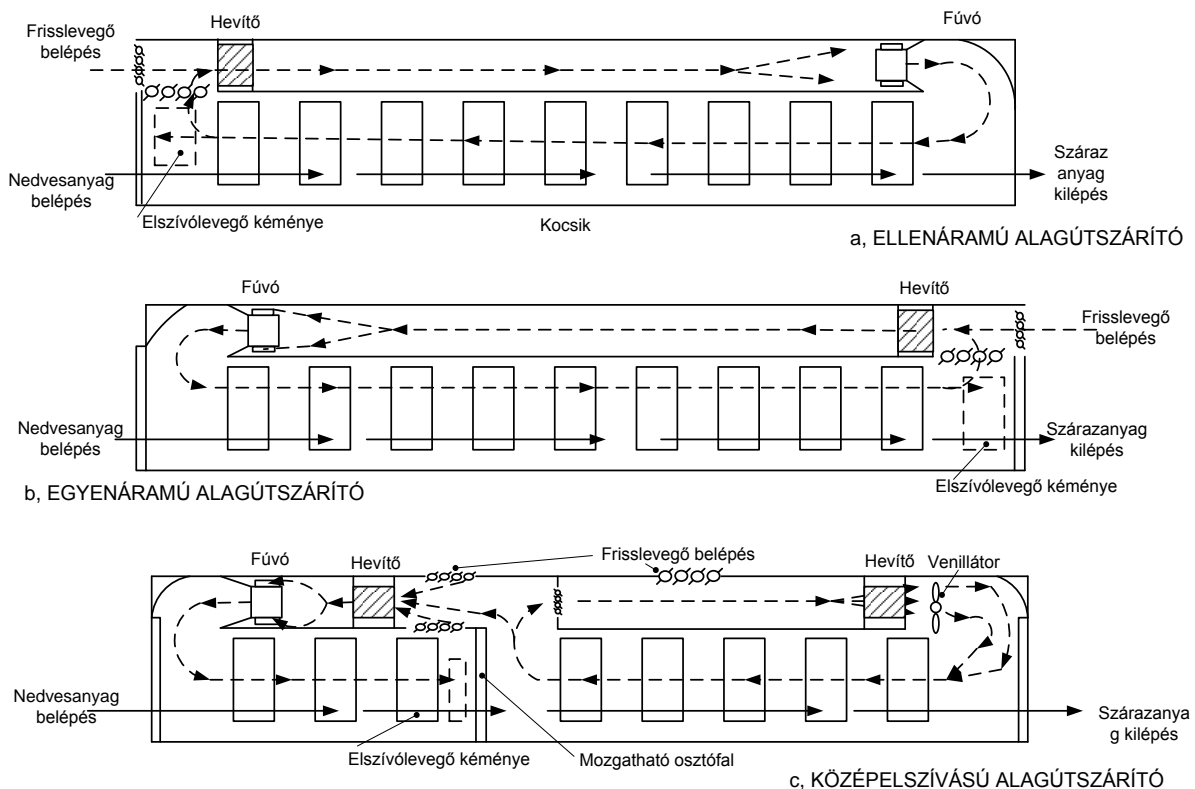


278. ábra: Szalagos szárító



### Folyamatos alagútszárító

Az alagútszárító félfolyamatosnak tekinthető, mivel egy-egy kocsi kihúzásával halad előre a láncolat. A szárítólevegő és az anyag haladási iránya szerint a 3 különböző variációt a (279. ábra) mutatja. Alkalmazás pl. a téglaiparban.



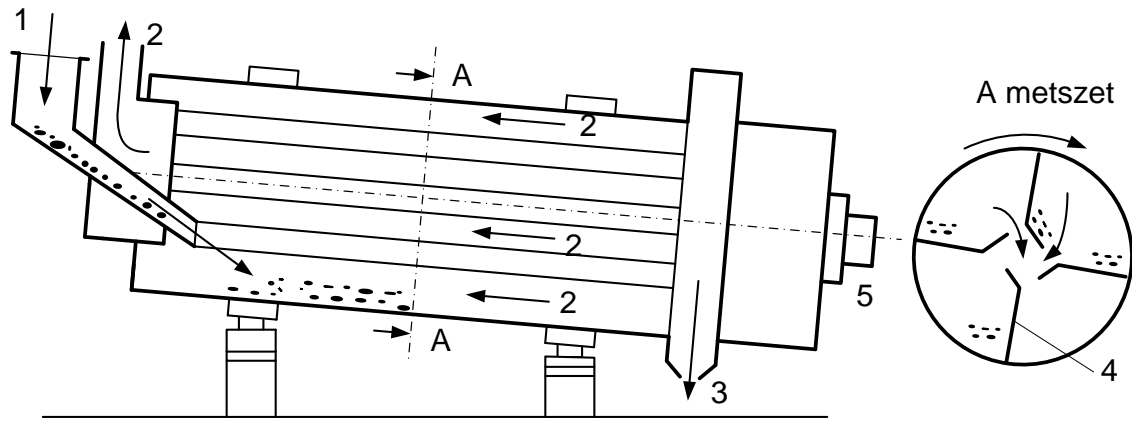
279. ábra Az anyag haladása szerinti variációk

### Mozgóréteges rendszerek

A szilárd anyag és gáz érintkeztetéssel járó műveletekben az érintkezés határfoka javul, mivel a szilárd anyag mozgatásával az üregek kialakulása elkerülhető, továbbá az anyag keveredése is megvalósul, ami egyenletesebbé teszi az anyagtranszportot.

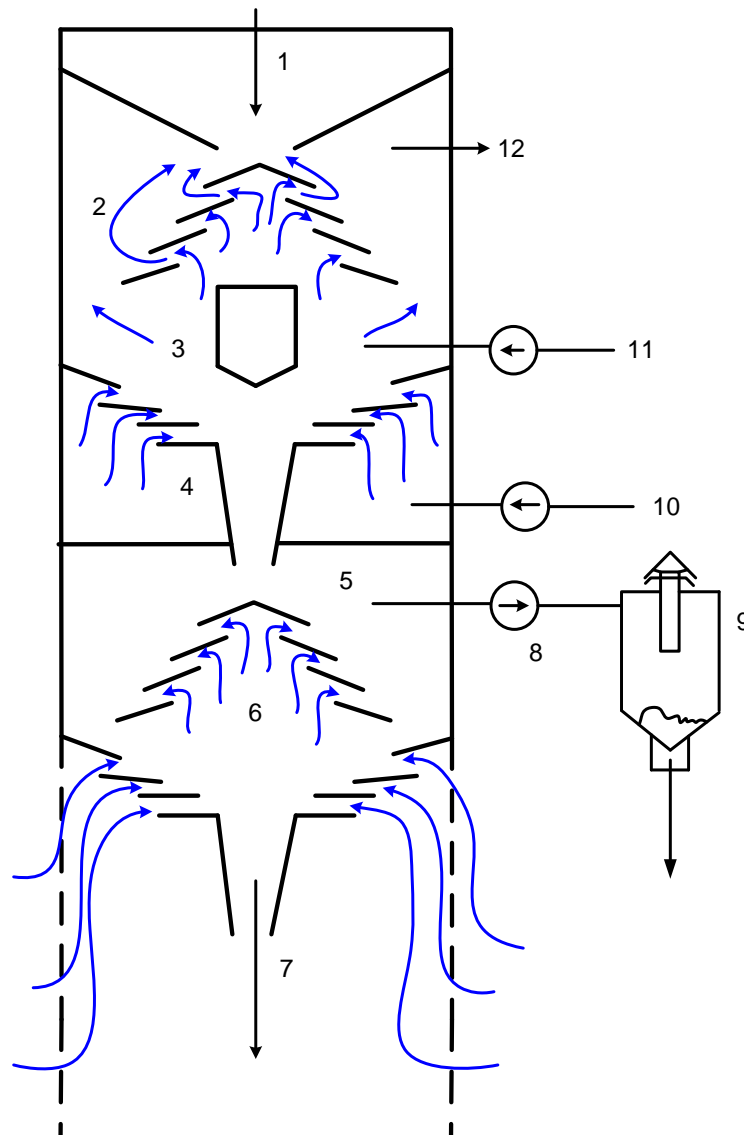
A berendezésfajták lehetnek, forgódobok, kevert dobok, gravitációs készülékek, fluidizációs szárítók.

A forgódobok esetén a forgó henger kis lejtésű, hossza az átmérő 4-10 szerese, átmérője 0,3-3 m közt változhat (280. ábra)



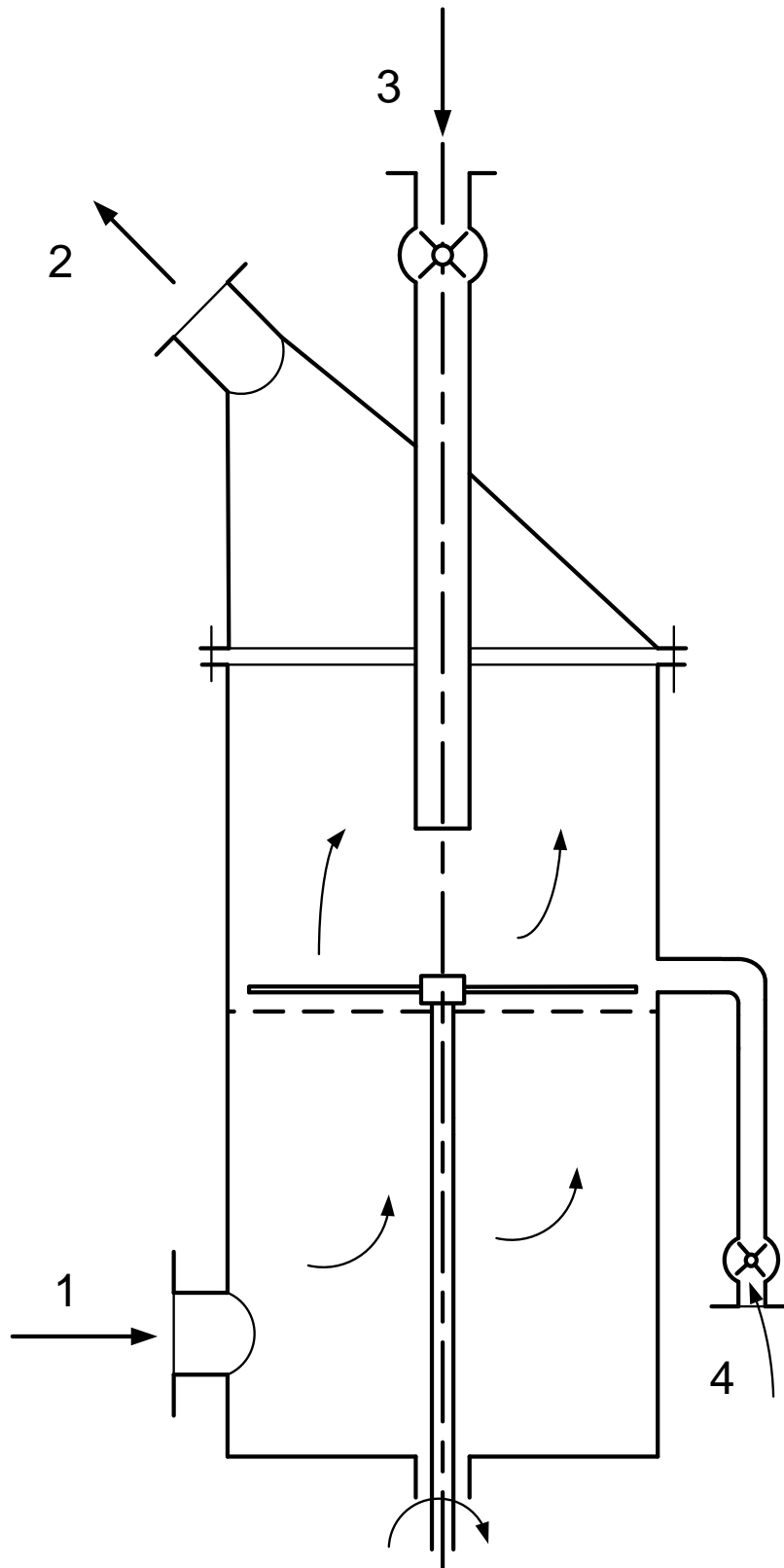
280. ábra: Dobszárító

A következő 281. ábra gravitációs mozgóréteges szárítót ábrázol. Szemcsés halmazok szárítására alkalmas. Alkalmazás például a terményszárítóknál.



281. ábra: Gravitációs szárító

A fluidizációs szárítók esetében a halmaz eleminek összetapadása nem lép fel. A szárító levegő árama a minimális fluidizációs sebességet meghaladja, de nem éri el a pneumatikus szállítás sebességét. Többféle típusa ismert. (282. ábra)



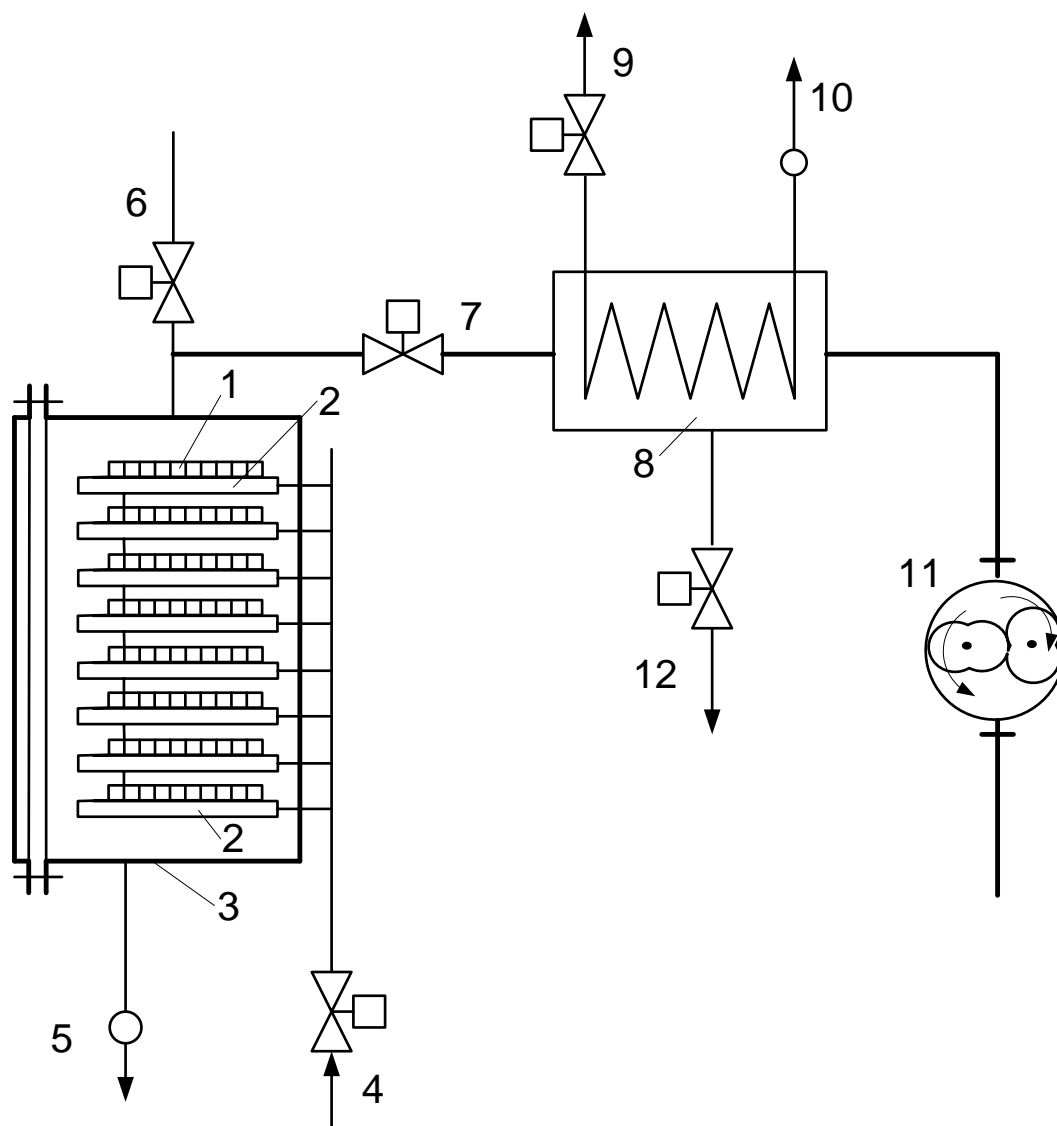
**282. ábra: Fluidizációs szárító**

**1-szárító levegő, 2- nedves levegő, 3-szárítandó anyag, 4-szárított anyag**

## Kontakt szárítás

Eltérően a konvektív szárítástól a víz elpárologtatásához szükséges hőt az anyaggal közvetlenül érintkező felülettől kapja. A fűtőfelület jó hővezető képességű anyag, amelyet lehet gőzzel, meleg vízzel, forró olajjal, elektromos energiával is fűteni. A hő és nedvességtranszport iránya megegyezik, a szárítandó anyag vezetési tulajdonságai, rétegvastagsága meghatározóak. Vékony réteg alkalmazása előnyös. A keletkezett vízgőz a levegőbe kerülve növeli annak nedvességtartalmát, eltávolítása vagy atmoszférikusan áramlással, vagy vákuumban elszívással történhet. (283)

Gyakori a hengerszáritók alkalmazása, ahol a fűtött henger felületére viszik fel a nedves anyagot, eltávolításuk szárítás után képes leválasztással történhet.

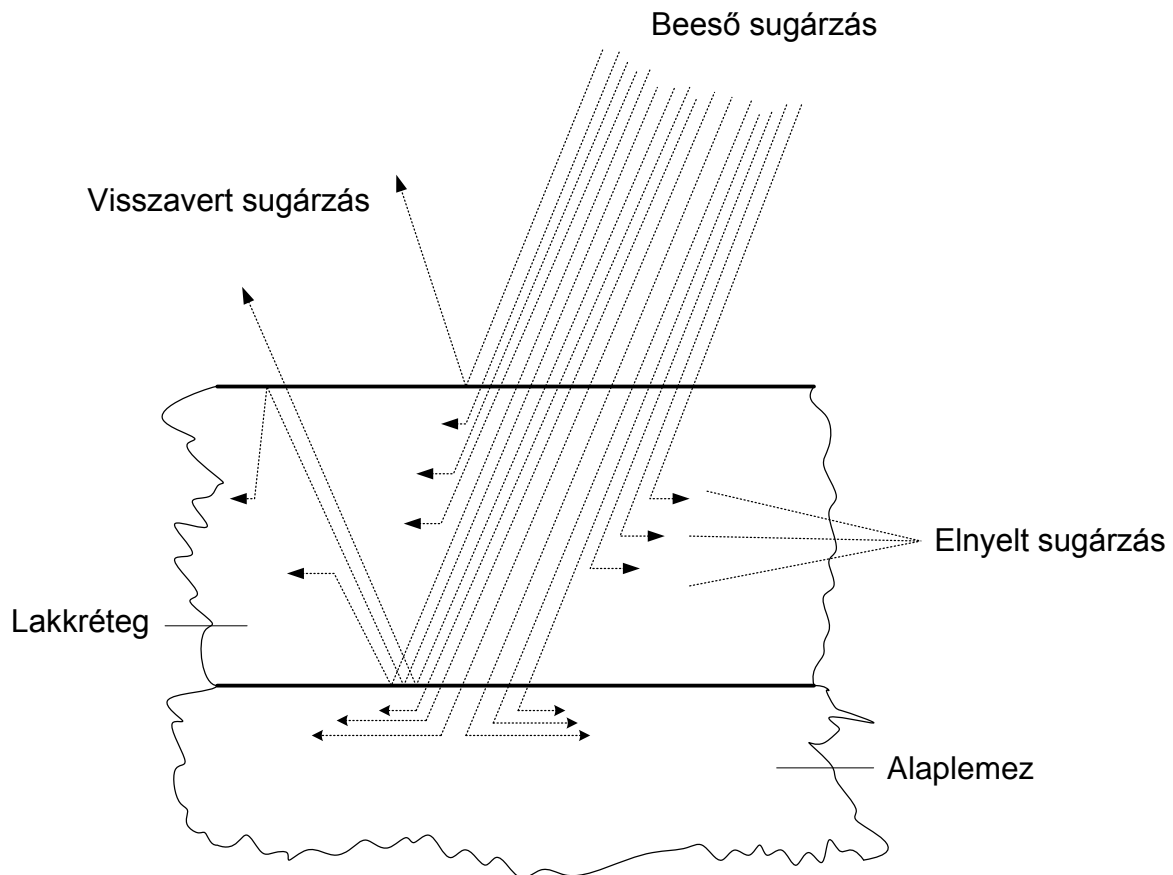


283. ábra: Kontakt vákuumszáritó felépítési elve

1-anyag, 2-fűtött felületek, 3-ház, 4-fűtőközeg belépés, 5-fűtőközeg kilépés, 6-légköri csatlakozó, 7-szívóvezeték, 8-kondenzátor, 9-hűtőközeg belépés, 10-hűtőközeg kilépés, 11-vákuumszivattyú, 12-folyadék

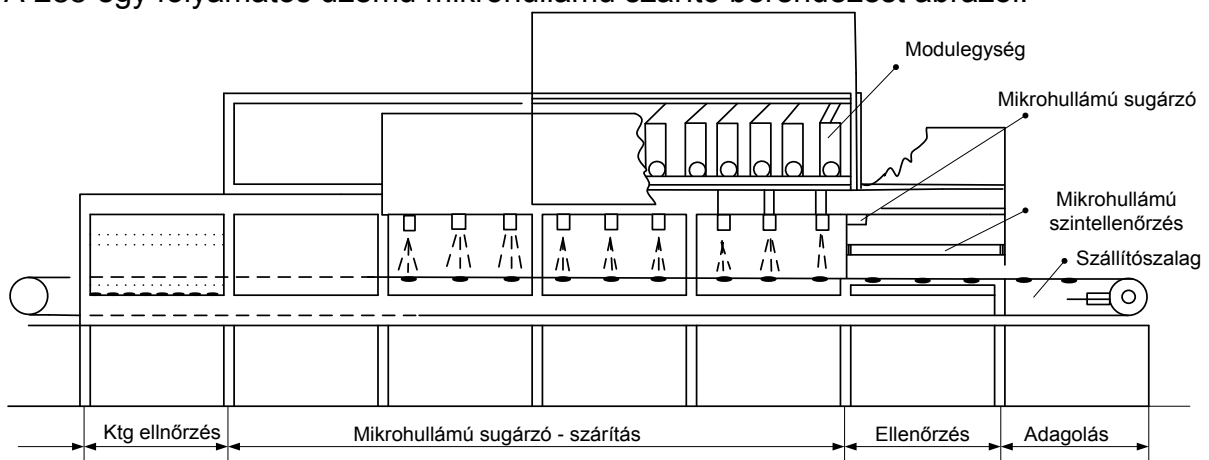
## Szárítás hőszugárzással

A hőközlés egyik módja a sugárzás, mely esetben infravörös, vagy a mikrohullámú tartományba eső hullámhosszúságú sugárzás fotonjait a szárítandó anyag atomjai hőfejlődés közben elnyelik, ennek eredményeképpen a nedvesség vándorlás elindul a felület felé. A száradási folyamat az intenzitás és a sugárzási idő függvénye. (284)



284. ábra: A sugárzással szárítás elve

A 285 egy folyamatos üzemű mikrohullámú szárító berendezést ábrázol.



285. ábra: Folyamatos üzemű mikrohullámú szárító

## Adszorpció műveletek

Az adszorpció során gáz vagy folyadékelegyből egy vagy több komponens eltávolítása a cél.

Megvalósítása nagy fajlagos felületű szilárd anyagok, adszorbensek alkalmazásával történik. Jelentősége van a gáztisztítás során az illékony komponensek eltávolításában, újrahasznosításában deszorpcióval (környezetvédelmi vonatkozások). A megkötés fizikai, fizikai-kémiai és kémiai kölcsönhatások révén jön létre. Gyakorlati előnye a fizikai adszorpciónak, hogy viszonylag egyszerűen regenerálható az adszorbens és újrahasználható, sőt a visszanyert, deszorbeált anyag is. A kemisorpció nem reverzibilis folyamat, így sem az adszorbeált anyag sem az adszorbens nem nyerhető vissza eredeti formájában.

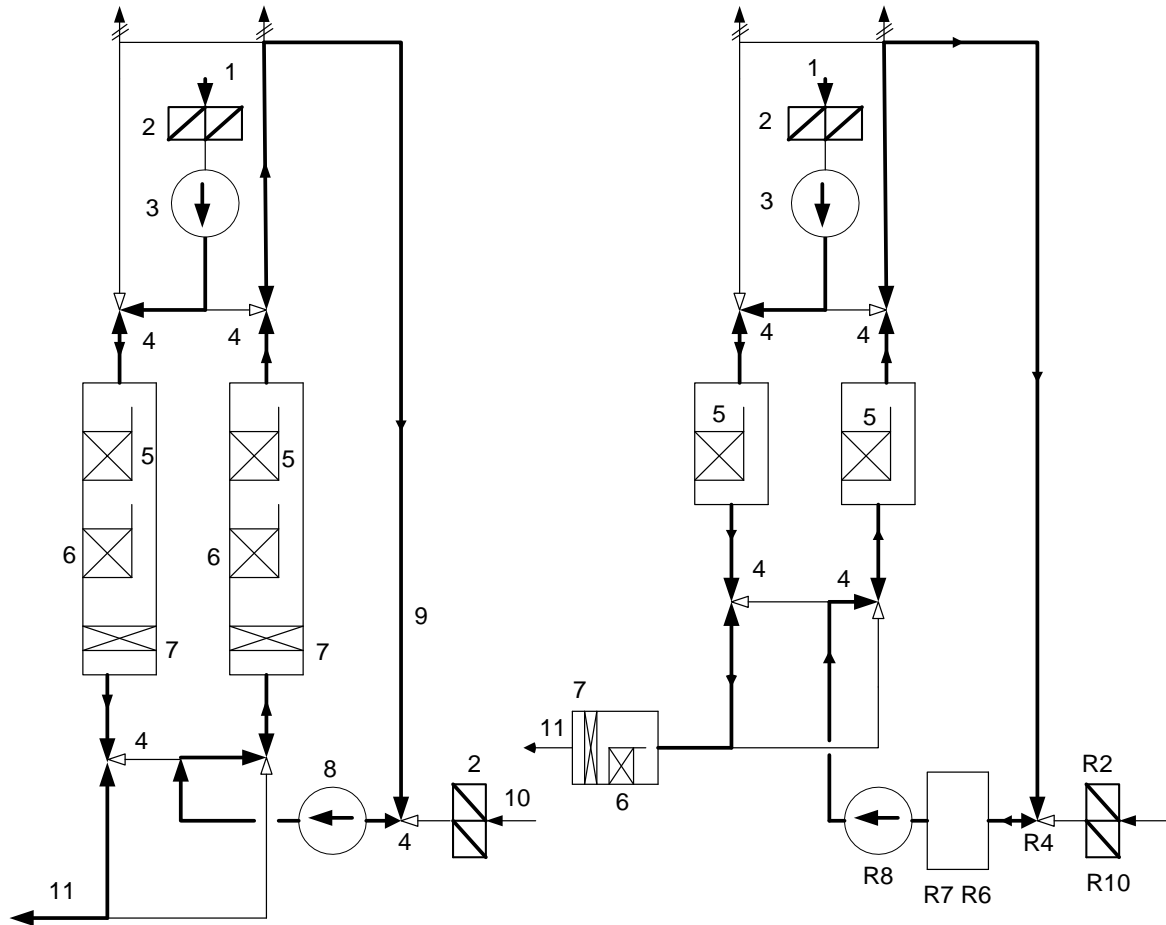
[Halász: A környezetvédelmi technológia alapjai](#)

Az adszorpció alkalmazása kis koncentrációk esetén célszerű, például a levegő szárítása, füstgázok tisztítása, illékony oldószer visszanyerése ipari gázokból.

Az adszorpció egyensúlyi folyamat, az anyagtranszport az állapotváltozók, idő, a fluidumok érintkezési módjainak, az anyagi jellemzők függvénye. Például szakaszos, félfolyamatos, folyamatos eljárásokra csoportosíthatjuk. (286)

Adszorbensek: aktív szén, szilikagél, alumíniumoxidok, zeolitok. Az aktív szenet különböző anyagok elszénésítésével és aktiválásával állítják elő. Fajlagos felületük 600-1500 m<sup>2</sup>/g ; elsősorban szerves anyagok megkötésére használják. A szilárd-gáz rendszeren kívül szilárd-folyadék rendszerekben is használatos (pl. színtelenítésre, szaganyagok megkötésére) adszorpció tulajdonsága miatt.

A természetes eredetű zeolitok pórusmérete tág határok közt változik, míg a mesterséges zeolitok homogén pórusmérettel rendelkeznek, ami szelektivitásukat rendkívül megnöveli.

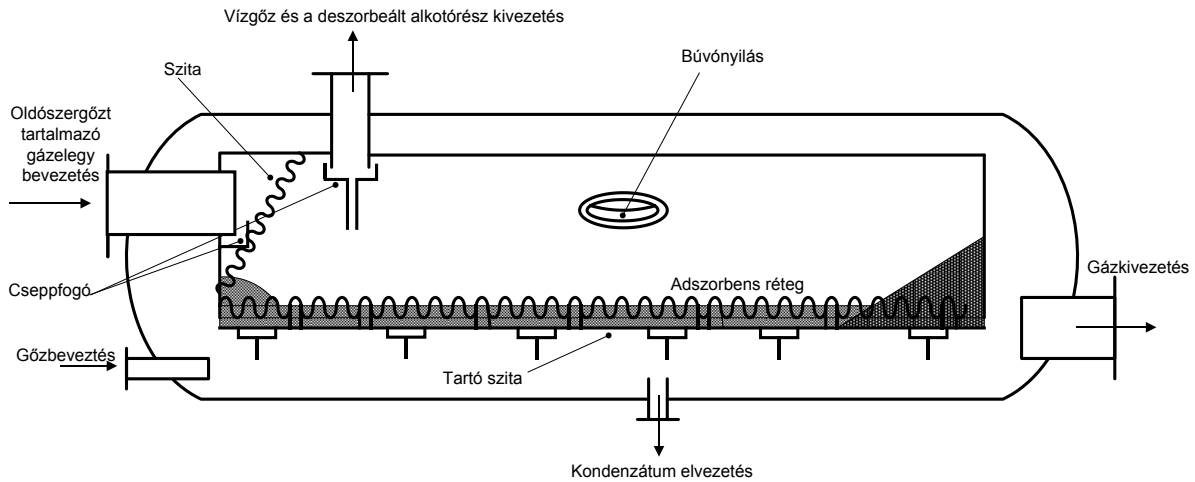


**286. ábra** Adszorpciós elven működő klímazárító bal oldal: adszorpciós üzem, a jobb oldali reaktíváló üzemmódban

**Jelölések:** 1-nedves levegő, 2-szűrő, 3-ventilátor, 4-háromjártatú tolózárak, 5-adszorbens, 6-hűtő, 7-utófűtő, 8-regeneráló ventilátor, 9-reaktíváló levegővezeték, 10- külső levegő regeneráláshoz, 11-szárítóközeg, R-regenerálás

Imre K.: Szárítási Kézikönyv

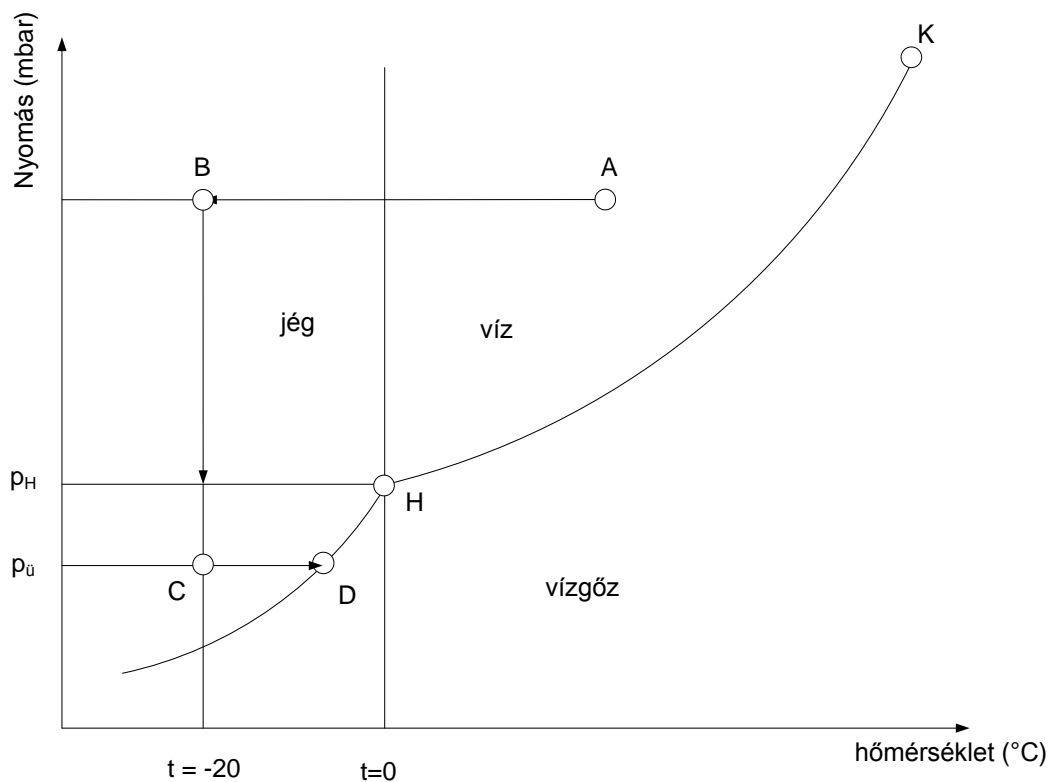
Tágabb értelemben a nedvesség tartalomn kívül illékony oldószerek eltávolítását is a szárításhoz sorolhatjuk. (287.ábra)



287. ábra: Oldószereltávolítás adszorpcióval.

## Fagyasztva szárítás

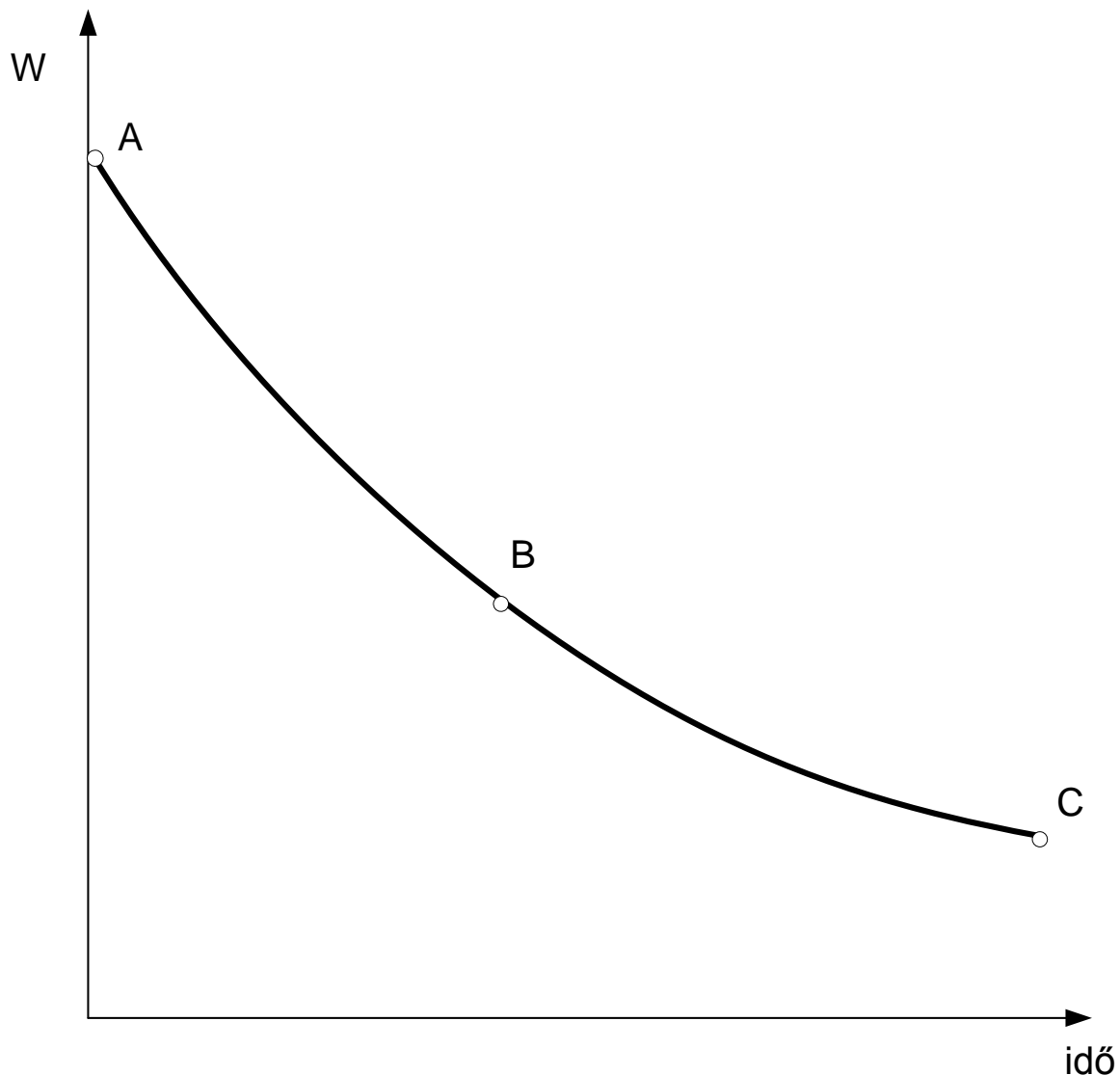
A fagyasztva szárítás, liofilezés elve, hogy a csökkentett nyomáson alacsonyabb hőmérsékleten indul meg a párolgás. A víz hármaspontjának állapothatározóit ismerve, attól alacsonyabb nyomás alkalmazásával elérhető, hogy a fázisátalakulás során a szilárból közvetlen légnemű halmazállapotba kerüljön a nedvesség (szublimáció), tehát alacsony hőmérsékleten kíméletesen csökkenthető az anyag nedvességtartalma.



288. ábra: A fagyasztva szárítás elve



A száradás sebessége az A-B szakaszon állandó, a B-C szakaszon csökkenő tendenciájú. (289. ábra)



289. ábra: Száradási sebesség fagyasztva szárításnál

A száradási sebesség:

$$22. \text{ képlet} \quad \frac{dw}{dT} = \frac{Q}{\lambda_{sz}} = \frac{k \cdot A \cdot \Delta T}{\lambda_{sz}}$$

A 22. képlet egyenletből látható, hogy a hőátadás sebessége egyenesen arányos a hőátadó felülettel, a hőforrás és a jég hőmérséklete közti különbséggel, a hőközlés módjától függő hőátadási tényezővel, fordítottan arányos a szublimációs hővel.

[PERRY J. H.: Vegyészmérnökök kézikönyve II.](#)

Előnye, hogy a bomlékony vegyületek nem szenvednek kémiai változást, kis veszteség az illékony komponensek csoportjánál (kivéve a víz), összetapadás, kéregképződés minimális, az anyag steril marad, kedvezőtlen kémiai reakciók nem játszódnak le.

Hátránya, hogy költséges. A gyakorlatban  $-10\text{ C}^\circ$  -tól  $40\text{ C}^\circ$  –hőmérséklet intervallumot és 15-30 Pa nyomást alkalmaznak.

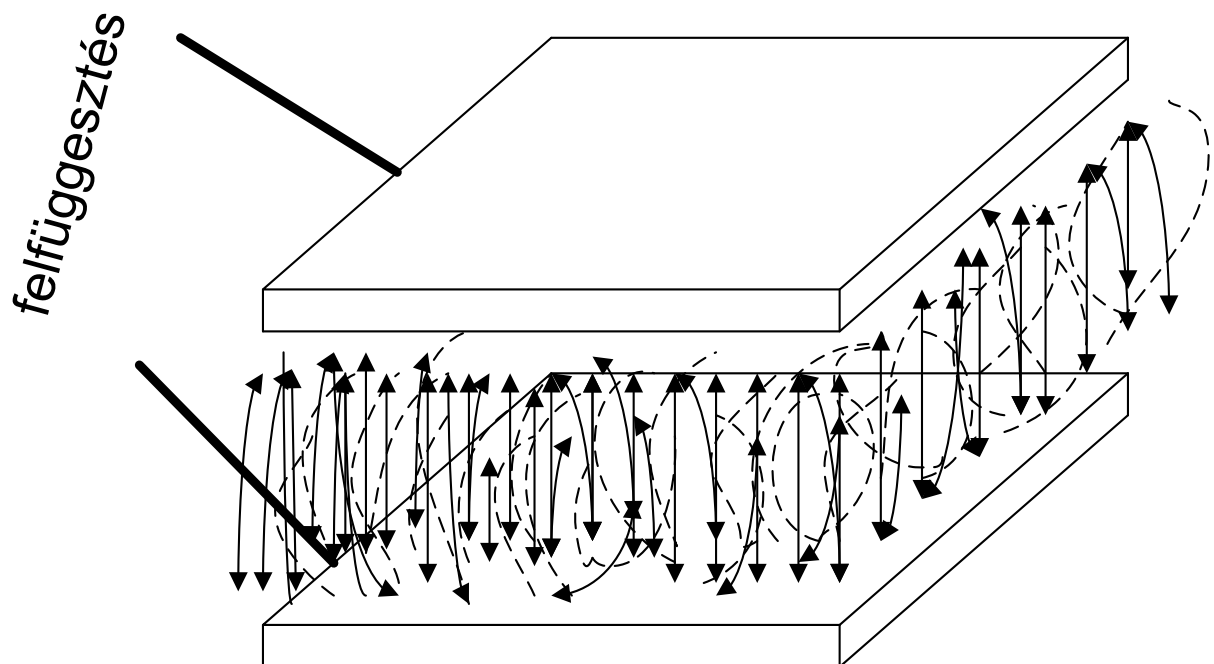
Alkalmazási példák.

- Élelmiszerek szárítása, gyümölcslevek, főzelékek, halak, hús, tej, teakivonat....
- Gyógyászatban vérplazma, vészérum, baktérium és víruskultúrák, hormonok, vitaminok, gyógyszerek, preparátumok szárítása....

## Nagyfrekvenciás szárítás

A szárítandó anyagot síkkondenzátorok lemezei közé helyezik el, ahol a nagyfrekvenciás felmelegedés részben kapilláris hatást idéz elő, részben a belső anyagrész hőmérsékletét növeli ami szintén a vízleadás irányába hat. A nagyobb dielektromos állandójú anyagok gyorsabban, a kisebbek lassabban hevülnek. (290. ábra)

A szárítandó anyagokban a legnagyobb dielektromos állandója a víznek van, ezért könnyen felmelegszik és elpárolog, a nedvességleadással párhuzamosan változik a felvett teljesítmény, ami a nedvességtartalom változás nyomán követésében segít.

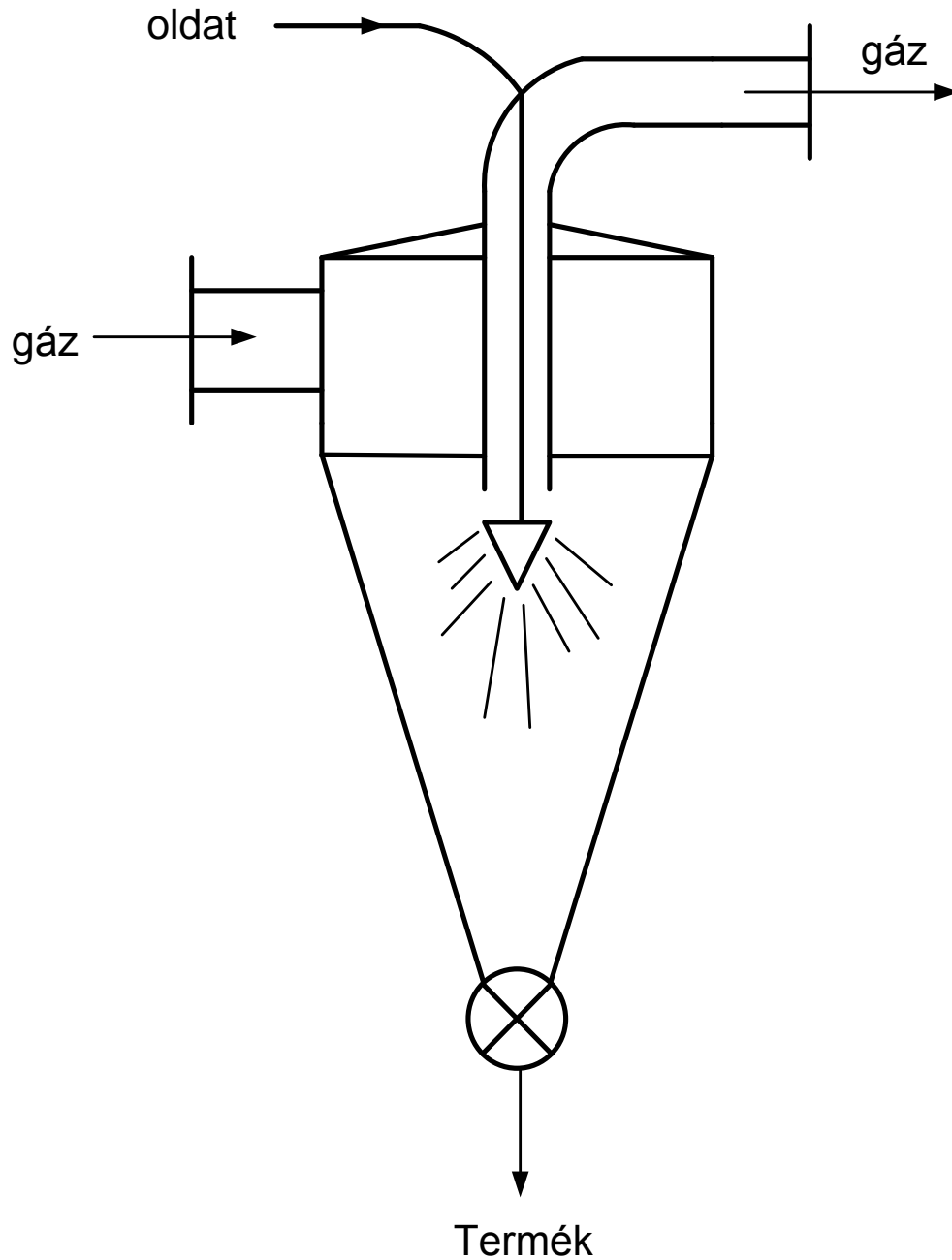


290. ábra: Nagyfrekvenciás szárítás

## Folyadék-gáz rendszerek

A folyadék-gáz anyagátadási rendszerek több csoportja ismeretes az anyagok elválasztása céljából, például desztillálás, abszorbeálás..., a szárítási művelet témakörébe a nedvességleadás, nedvesítés, porlasztva szárítás sorolandó. A

porlasztva szárítás valójában a bepárlás speciális esete, amikor a nem illékony szilárd anyag oldatából eltávolítjuk a nedvességet. 291. ábra)



**291. ábra: Porlasztva szárító**

## A környezetvédelmi technológiák gépészeti elemei, technológiai folyamatok monitorozása

Dr. Balázs Tibor, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

### Szennyvíztisztítási technológia

A szennyvíztisztítás tanulmányozását célszerű a települési szennyvíztisztítással kezdeni, több okból. Az ipari szennyvizek tisztításánál is ugyanazok a berendezések használatosak, mint a települési tisztításánál. A tisztítás alapsémája is így érthető meg jobban. Sok esetben célszerű az ipari szennyvizet előkezelés után keverni települési szennyvízzel és végleges tisztítását így elvégezni.

Az ipari szennyvizek közvetlenül, tisztítatlanul általában nem vezethetők élővizekbe, valamint nem keverhetők a települési szennyvízzel, mert annak tisztítását megzavarják, illetve lehetetlenné teszik. Az ipari szennyvizek a tevékenységtől függő, jellegzetes összetételt mutatnak. Kezelésüket, tisztításukat a keletkezés helyén kell megoldani. A tipikus ipari szennyvizek tisztítására tipizált szennyvízkezelő rendszerek alakultak ki.

A települések szennyvizét csatornahálózatok gyűjtik és vezetik el. Megkülönböztetünk egyesített és osztott szennyvízhálózatot. Osztott szennyvízhálózatról beszélünk, ha a csapadékvíz és az egyéb települési szennyvizeket külön-külön csatornarendszerben gyűjtik. Egyesített a szennyvízhálózat, ha a különválasztás nem történik meg, a kommunális és a csapadékvíz együtt vezetik el.

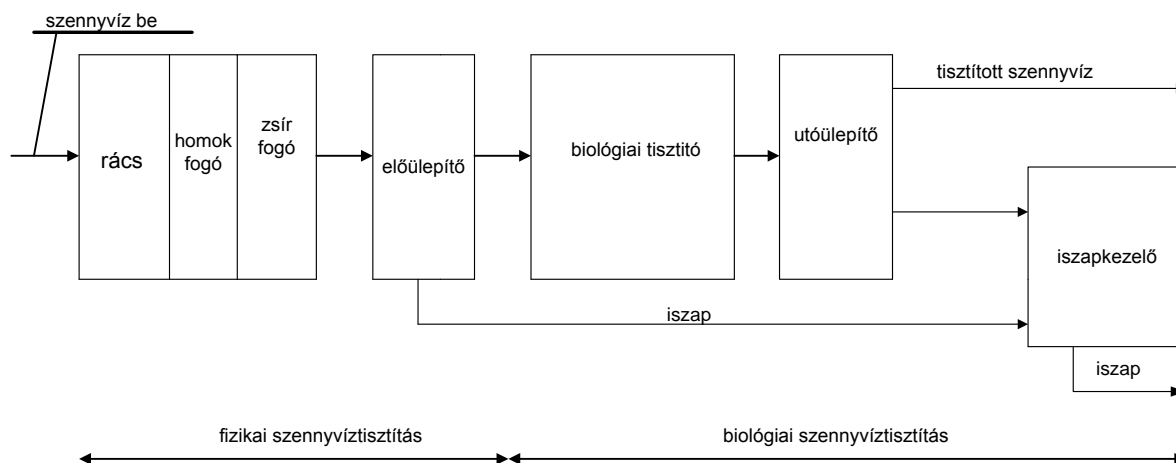
Az osztott hálózatok alkalmazását, a csapadékvíz külön elvezetését indokolja, hogy mennyisége igen nagy ingadozásokat mutat, ami a tisztítómű erős túlméretezését kívánja meg. Ha a gyűjtőterület erősen szennyezett felületű, a csapadékvíz is erősen szennyezett, tisztításra szorul: indokolt az egyesített szennyvízhálózat alkalmazása.

A települési szennyvizek tisztítására jellegzetes megoldások alakultak ki.

A szennyvíztisztítás két fő feladatra bomlik, úgymint:

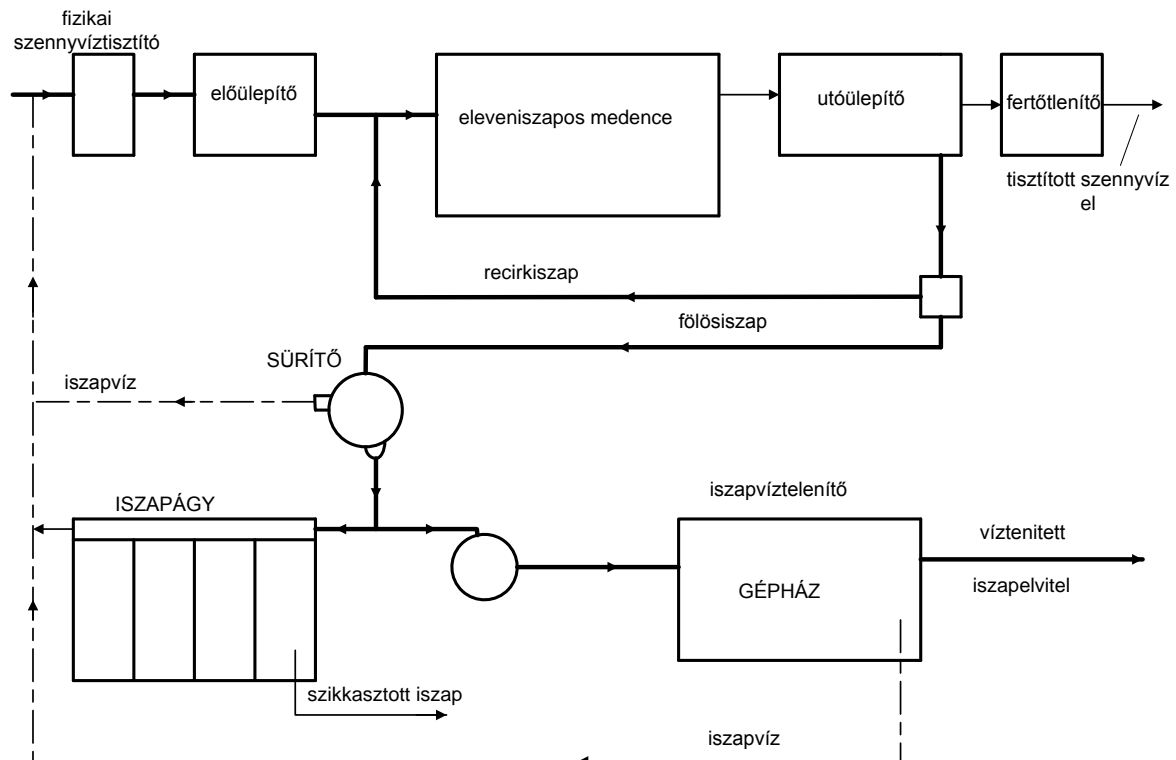
- a nem oldott, darabos szennyezők mechanikus eltávolítása,
- oldott + finom lebegő szilárd + mikroorganizmusok + szerves anyagok lebontása, eltávolítása.

A települési szennyvizek tisztításának alapsémáját a 292 mutatja be.



292. ábra. Települési szennyvíztisztítás alapsémája.

A 293. ábra. Szennyvíztisztító rendszer elvi vázlatát, egy kis terhelésű - szaknyelven teljes oxidációs - szennyvíztisztító rendszert mutat be. Átlagos települési szennyvíznél a tisztítás hatékonysága e rendszerben a szerves anyagra 85-95%, ammóniára 92-98%, nitrogénre 60-65%, összes foszforra 20-25%.



293. ábra. Szennyvíztisztító rendszer elvi vázlatát.

Kis és közepes terhelésű telepeknél e rendszer igen jól alkalmazható,  $Q_d \leq 18000 \text{ m}^3/\text{d}$ -ig. Nem igényel kvalifikált személyzetet, könnyen és biztonságosan üzemeltethető, de energiaigénye nagy. Kevés, egyszerű műtárgyból áll, könnyen elhelyezhető. A következő pontban a szennyvíztisztítási technológiáknál alkalmazott fontosabb gépészeti berendezéseket.

## Szennyvíztisztítási technológia gépészeti berendezései

### Fizikai szennyvíztisztítás berendezései

A szennyvízkezelés legelső lépéseit képezik a fizikai tisztítás berendezései:

- kő - kavicsfogó,
- rács,
- homokfogó,
- zsírfogó,
- ülepítők.

## Kő- és kavicsfogó

Települési szennyvízkezelő rendszereknél a kő és kavicsfogó az esővíz által görgetett köveket tartja vissza. A rács előtt elhelyezkedő és minimum 1 m mély, 1-2 m széles ládaszerű bővület. Biztosítja az 5-20 cm méretű görgetégek visszatartását.

## Rácsok

A tisztítóba beömlő szennyvízből az elragadott, úszó, nagyméretű szilárd anyagokat szűri ki. Védi a további berendezéseket e szilárd anyagok üzemzavart okozó hatásától. A *durva rács*: az 40 mm feletti méretű úszó-lebegő szemet (faág, deszka, állati tetem stb.) visszatartását végzi. A 40-100 mm pálcanyílású rácsot a vízfolyás irányában 2:1 hajlásszögben, nyílt csatornába beépítve alkalmazzák. A szivattyúk és egyéb mechanikus berendezések védelmét szolgálja.

A *finom rács*: a 40 mm-nél kisebb szemetet szűri ki. 6-40 mm pálcasztású rácsokat használnak e célra. Az utána következő tisztító egységek tehermentesítését biztosítja. Kivitelük szerint megkülönböztetünk:

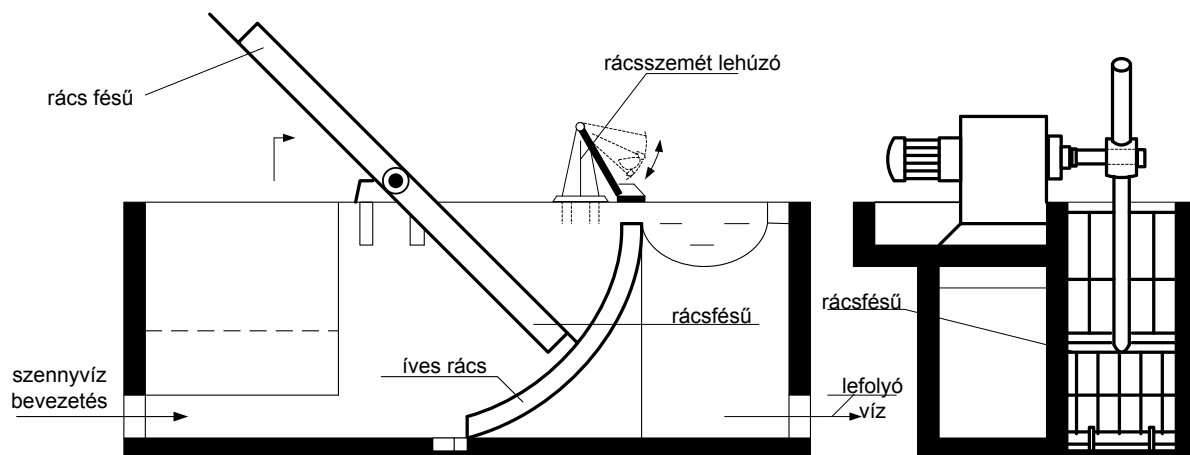
Kézi rácsot, amit kis terhelésű tisztítóknál használnak. Itt az egyszerű síkrácsról a szemetet kézzel távolítják el.

Íves rácsot, amit kis- és közepes terhelésnél használnak :  $Q_d \leq 2-500 \text{ m}^3/\text{d}$

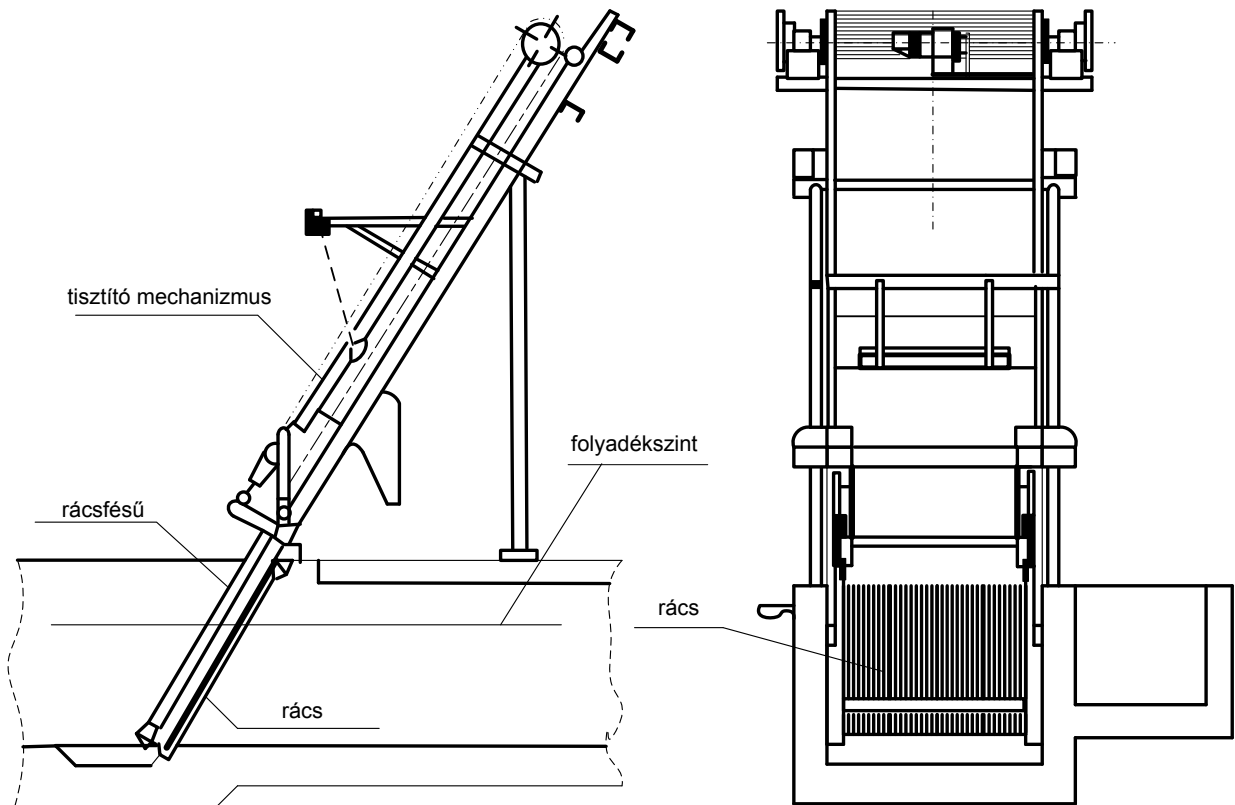
A 294 látható forgó rácsfésű a szemetet gépi úton szedi le a rácsról.

Mechanikus tisztítású síkrácsokat (esetenként kosaras rácsot) alkalmaznak nagy -  $5000 \text{ m}^3/\text{d}$  -t meghaladó terhelésű tisztítóművek esetén. E berendezéseknél a rácsról a szemetet gépi berendezések távolítják el. Egy mechanikus tisztítású síkrácsot mutatja be a 295. A kosaras rácsot és annak működését a 296 láthatjuk. Ennél a nyers szennyvíz a kosár palástján bentről kifelé áramlik át. A rácsszemetet az 1 rácscsésű a nyílak irányában haladva felemeli és a 4 csigás szállító vályúba ejti. A 3 fésű az 1 rácscsésű tisztítását biztosítja.

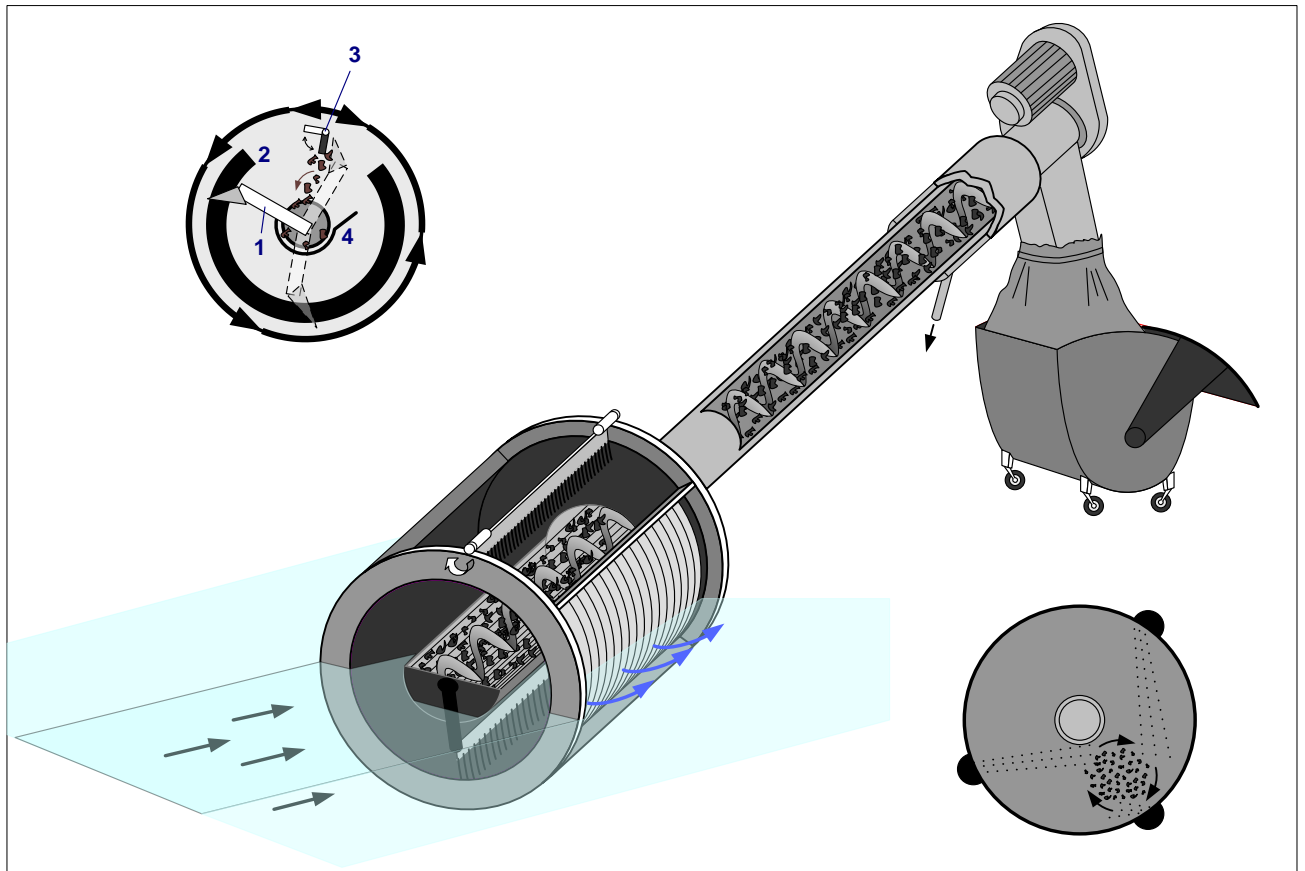
A rácsok felületének nagyságát úgy választják meg, hogy a megengedhetőnél nagyobb nyomásesést (visszaduzzasztást) a csatornában ne okozzon.



294. ábra. Íves rács.



295. ábra. Mechanikus tisztítású síkrács.

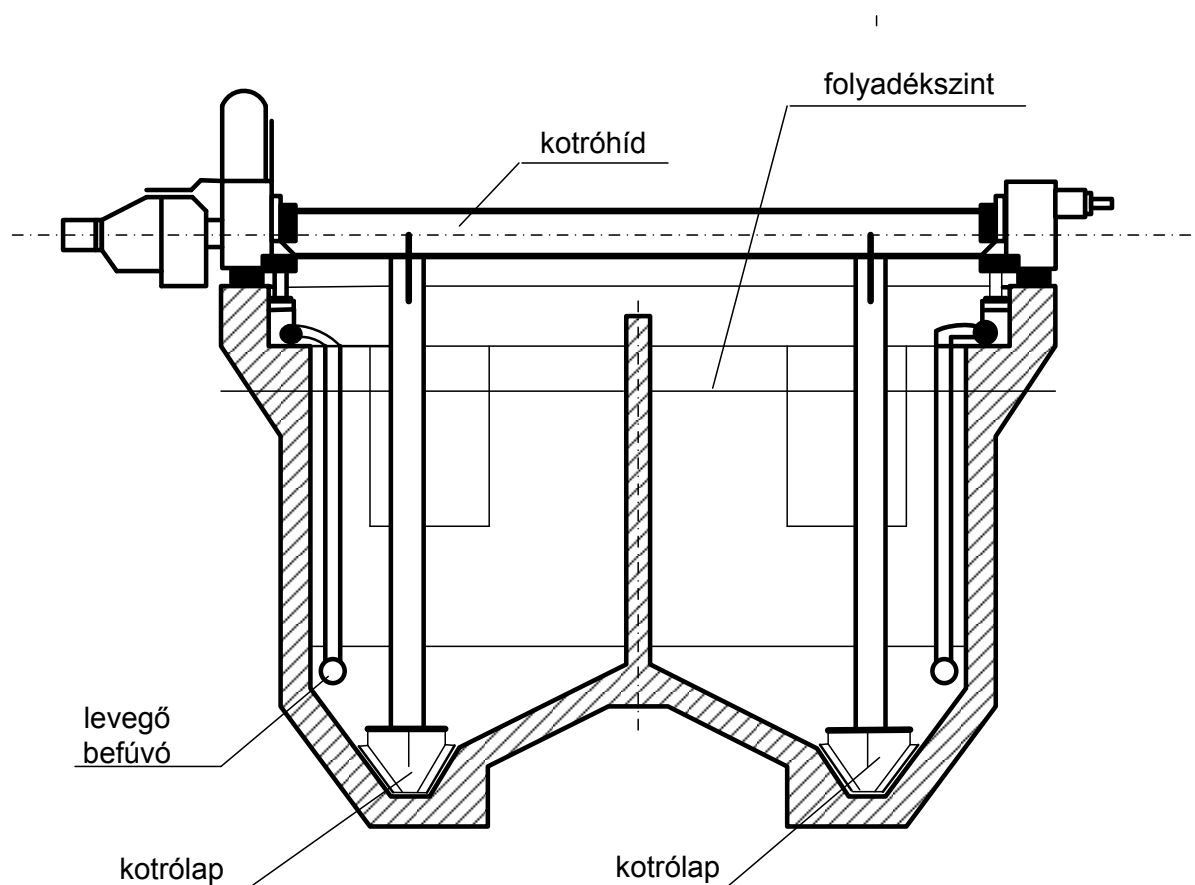


296. ábra. Kosaras rács.

## Homokfogók

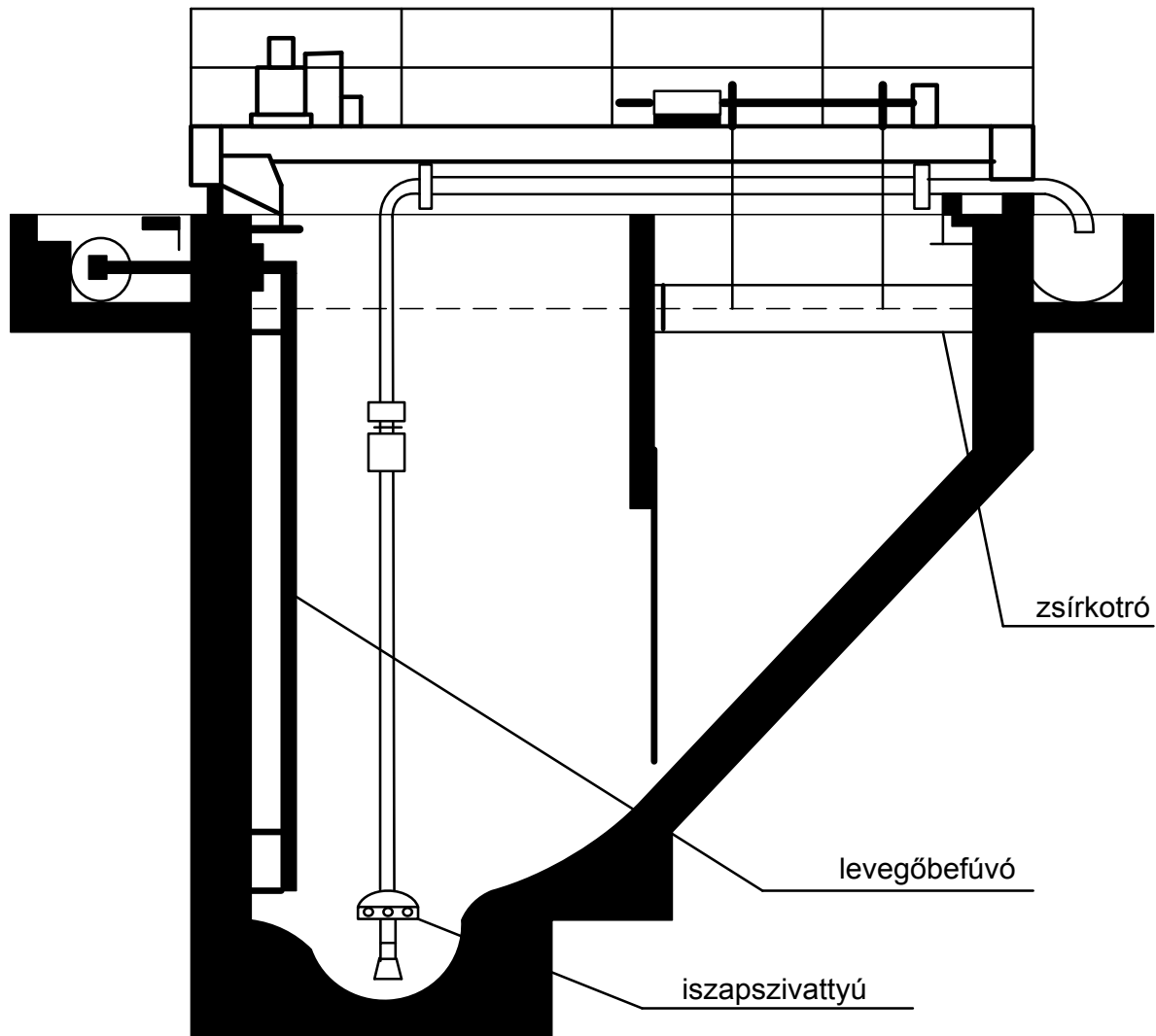
A rácson átjutott 0,2 mm-nél nagyobb szemcseméretű, víznél nehezebb szemét kiülepítését végzik. Sokféle megoldást használnak. Általánosan jellemző rájuk, hogy a homok kiülepítése közben gyakran alkalmaznak légbefúvást, a szemcsékhez tapadó szervesanyag leválasztására, a homok-üledék elősegítésére. A felszínre emelkedő szennyeződést külön gyűjtik, nagy zsír-, olaj- és szervesanyag tartalma miatt. A vízszintes átfolyású berendezéseknél a sebességet  $v=0,3$  m/s körüli értéken tartják, a tartózkodási idő pedig 2 - 5 min. (A szennyvízgyűjtő csatornában  $v=0,6$  m/s a szokásos sebesség.) Egy vízszintes átfolyású, iker elrendezésű homokfogó keresztmetszetét mutat be a 297, egy levegő átfúvásos, uszadékgyűjtőjét pedig a 298.

A homokfogó zsompjából kikerülő zagyból a homokot újabban hidrociklonnal választják le.



297. ábra. Vízszintes átfolyású, iker elrendezésű homokfogó keresztmetszete.





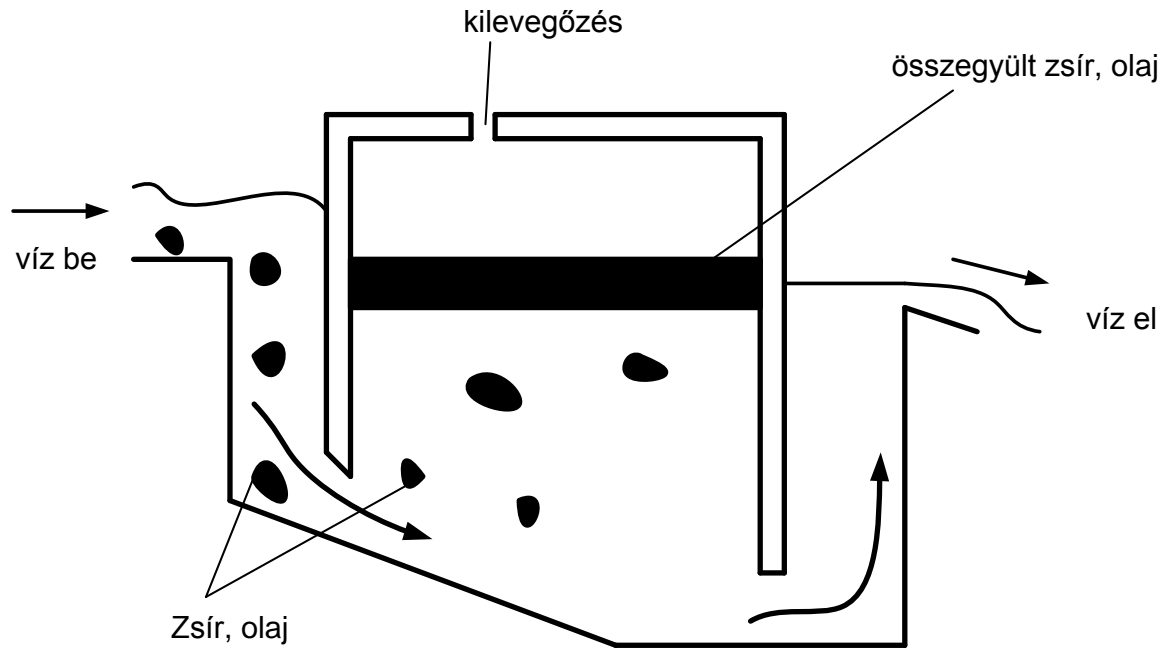
298. ábra. Légbefúvásos, uszadékgyűjtős homokfogó keresztmetszete.

## Zsírfogók

Feladatuk a szennyvízben jelentkező zsír- és olajtartalom kiválasztása. A zsír- és olaj leválasztását elsődlegesen a képződés helyén kell elvégezni, mégis mindig előfordul bizonyos mennyiségű olajos frakció a települési szennyvizekben, s az zavarja a további tisztítási lépések működését.

Ha a homokfogó felúszó frakciójával együtt nem távolíthatók el megfelelő hatékonysággal a zsírok, a homokfogó után a 299 látható kialakítású tisztítóállomást építenek be a technológiai sorba.

Az eredményes leválasztáshoz a homokfogóhoz hasonlóan megfelelően kis átfolyási sebességet kell a készülékben biztosítani.



299. ábra. Zsírfogó elvi kialakítása

## Ülepítők

Feladatuk a 0,2 mm-nél kisebb és a víznél nehezebb szemcsék, valamint az úszó- és lebegő anyagok kiválasztása. Alkalmazási területük:

- önálló mechanikai tisztító berendezésként,
- elő- és utóülepítőként biológiai és kémiai tisztítórendszereknél használatosak.

Az előülepítő iszapja nagyobb sűrűségű, az utóülepítőből elfolyó víz tisztább - ebben különböznek. - Általában egyszintes berendezések. -/Előülepítőként, illetve egyesített ülepítő-rothasztó műtárgyként használnak kétszintes megoldást is./

Jellegzetességük, hogy nagy víztérfogatból kis mennyiségű lebegőanyagot távolítanak el, ezért üzemeltetésük és tervezésük nagy gondosságot igényel. Kialakításukat és üzemvitelüket a zagyjellemzőkhöz illeszteni kell.

Leggyakoribb típusai:

- hosszanti átfolyású, négyszög alaprajzú ülepítő medencék, gépi kotróberendezéssel,
- sugárirányú átfolyású, kör alaprajzú ülepítők, gépi kotróval (Dorr ülepítők),
- függőleges átfolyású tölcseres ülepítők.

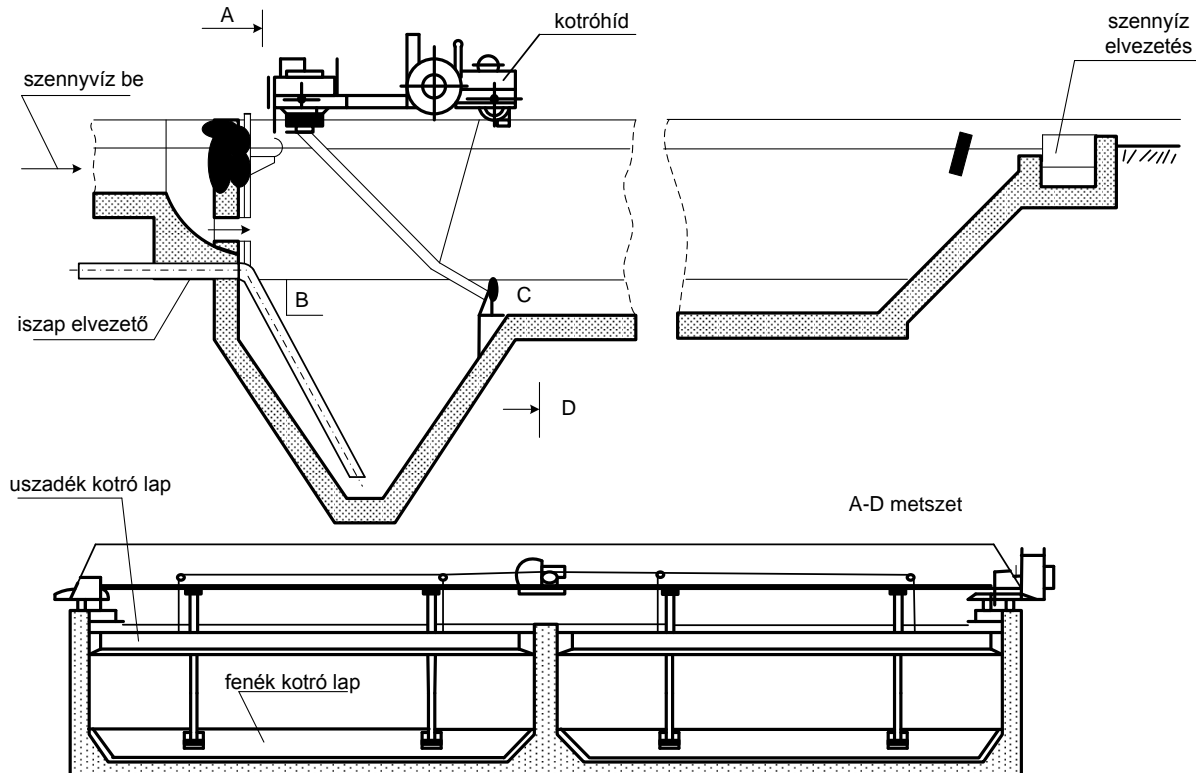
Hosszanti átfolyású ülepítők: 150-2000 m<sup>3</sup>/d terhelési tartományban használatosak.

Jellegzetes kialakításuk a 300 látható. Az alkalmazott átlagos medence mélység: h=1,5-2,5 m, szélesség: b=4-8 m. (Ezt a méretet a kotrószerkezet korlátozza.)

A medence mélység - hosszúság arányát 1:20 - 1:30-ra választják, a fenék a zsomp felé 1-2 %-al lejt. A medence fenéke lapos kiképzésű - szemben a homokfogóknál használt vályús kiképzéssel.

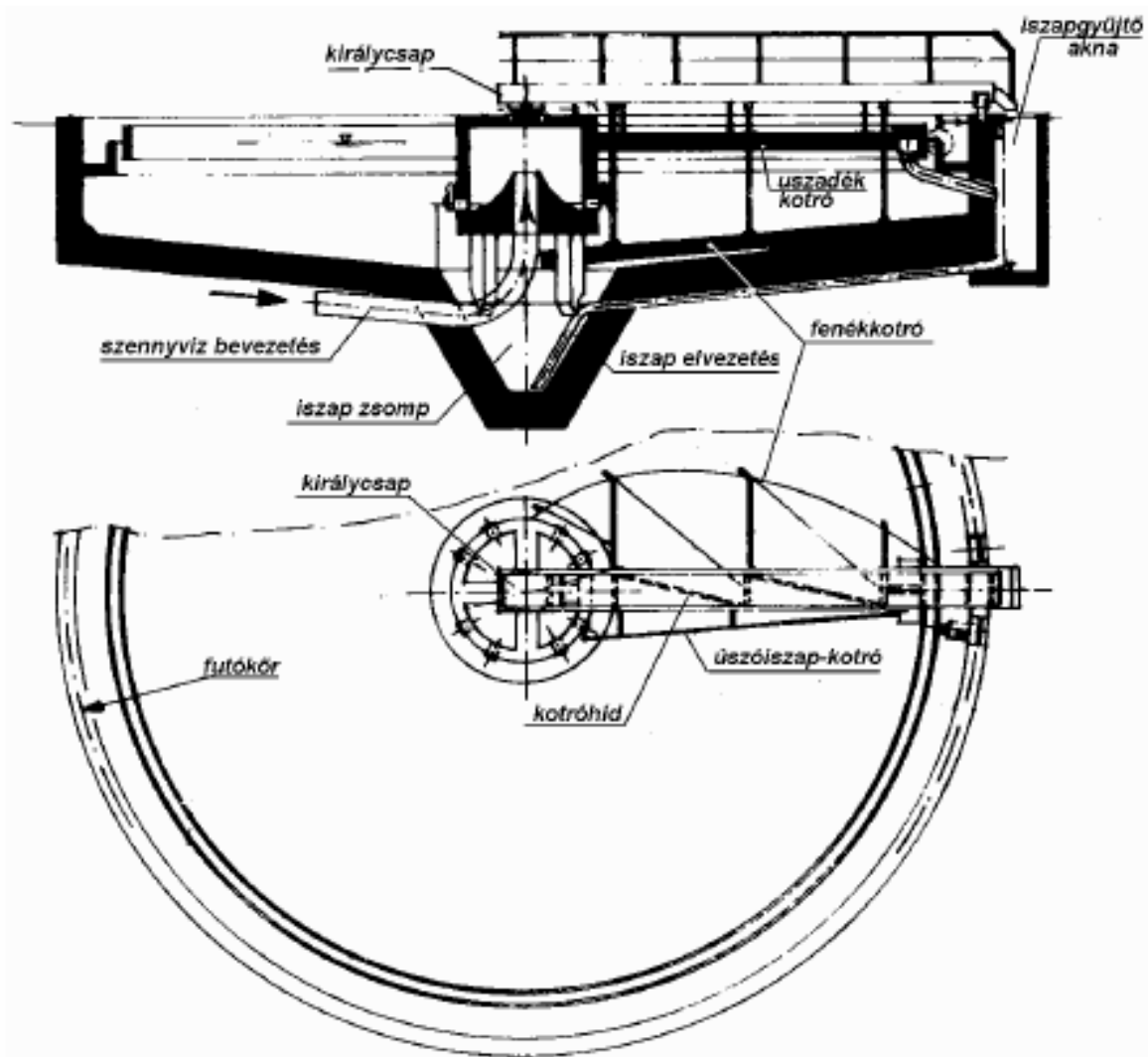
A kotrószerkezetek haladási sebessége 1-3 cm/s. A zsompba kotort iszapot centrifugál-, vagy mamutszivattyúval szállítják el. Biológiai tisztítók utóülepítőinél a recirkulációs iszap mozgatására szívesen használnak csigaemelőt (csigaszivattyút),

ami az eleveniszap pelyheit centrifugálszivattyúnál kevésbé aprítják. - A felúszó - flotálódó - anyagokat a felszínen haladó kotrószerkezet tereli a gyűjtővályúba. Sugárirányú átfolyású ülepítőket 300-400 m<sup>3</sup>/d terhelés felett használnak. Egy Dorr rendszerű sugár irányú átfolyású szennyvízülepítő kialakítását a 301 mutatja be. D=18-40 m közötti medenceátmérők használatosak. 40 m feletti méreteknél a szél zavaró hatása jelentkezik, ezért nem használnak nagyobbat. (40m-nél nagyobb átmérő esetén, erős szélnél, csak a szél irányában volna derített folyadék-kiömlés, ezzel megszűnne az egyenletes sugár irányú áramlás.) A közepes folyadék-mélység: h=1,5-2,5 m, s a szokásos h/D arány: h/D=1:20-1:25. A fenéklejtés 2-3%.



300. ábra. Hosszanti átfolyású, ikerelrendezésű ülepítő kialakítása.

A tisztítandó szennyvizet alulról, a készülék közepén vezetik be, és eloszolva sugárirányban áramlik a készülék pereme felé. Itt fogazott bukóélen átjutva gyűjtőcsatornába, majd gyűjtővezetékbe ömlik. Mialatt a folyadékrészek a középtől a peremig eljutnak, a nehéz szemcsék (az iszap) a fenék felé, a könnyű: az uszadék pedig a felszín felé mozdul el. A nehéz részecskék végül a fenék-közelben gyűlnek össze. Az iszapot ferde, vagy íves lapátokkal ellátott forgó-kotró szerkezet továbbítja az iszapzsompba. A kotrószerkezet kerületi sebessége maximum 6 cm/s, utőülepítőknél maximum 3 cm/s. A felszínen képződő uszadékot tolólap a kerületen levő uszadékcsapdába sodorja.

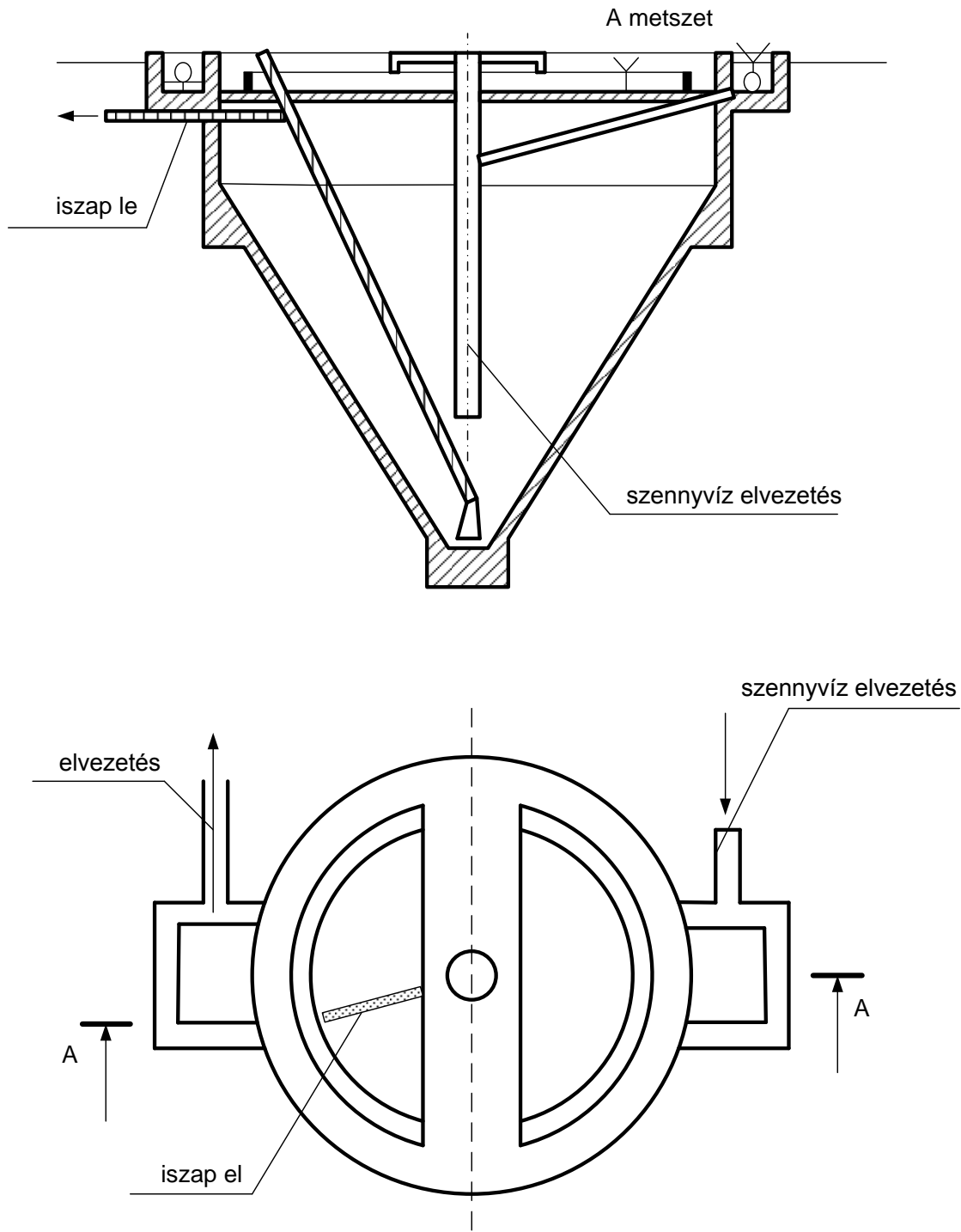


301. ábra. Sugár irányú átfolyású - Dorr rendszerű - ülepítő.

**Függőleges átfolyású tölcséres ülepítők:** kis és közepes ( $Q \sim 2500 \text{ m}^3/\text{d}$ ) tisztítótelepek utóülepítőjeként, vagy kémiai tisztítók ülepítőjeként használatos. Általában kör keresztmetszetű. Négyzög keresztmetszettel csak különleges esetben építik.

Kialakítását a 302 mutatja be.

Alkalmazott méretek:  $D \leq 8\text{m}$ ,  $V \leq 100 \text{ m}^3$ . Maximum 4 darabot használnak belőle egy telepen.



302. ábra. Függőleges átfolyású tölcéses ülepítő.

## Biológiai szennyvíztisztítás berendezései

E műveletek feladata a lebegő szerves részecskék, oldott és kolloidális szerves szennyezők lebontása biokémiai úton.

A mikroorganizmusok két módon hatnak:

- enzimeikkel lebontanak:
  - építőelemeire bontják a szerves molekulákat, illetve
- felfalják a szennyező anyagokat:

- szervezetükbe beépítik vagy
- felveszik és energiaforrásként lebontják.

A mikroorganizmusok lehetnek

- aerob szervezetek: oxigént felhasználók, és
- anaerob szervezetek: oxigént nem igénylők.

Az aerob bakteriális folyamatok biztosítják a szerves anyagok lebontását. Ilyen mikroorganizmusok: a szaprofiták, gombák, élesztők és baktériumok. Ezek a mikroorganizmusok a nagymolekulájú szerves anyagokat enzimeikkel tördelik, majd sejtanyagukba beépítik.

Oxigént használnak még:

- a nitrifikáló baktériumok az  $\text{NH}_3 \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$  oxidációs folyamatokhoz,
- a kénfaló baktériumok: a kén oxidálásából nyernek energiát
- a vasbaktériumok: az  $\text{Fe}^{\text{II}}$ -oxid  $\rightarrow$   $\text{Fe}^{\text{III}}$ -oxid folyamatokhoz,
- a metánoxidálók: a  $\text{CH}_4 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$  folyamathoz.

Anaerob bakteriális folyamatok közül fontos a denitrifikáció: az  $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{N}_2$  folyamat. Véghezviteléhez megfelelő szénforrás (hidrolizált szervesanyag, vagy a szennyvíz szervesanyaga), valamint az  $\text{NO}_3^-$  jelenléte - azaz előrehaladott nitrifikáció - szükséges.

A biológiai szennyvíztisztítók két leginkább használt formája:

- a csepegtető testes - fix filmes - szennyvíztisztító,
- az eleveniszapos - lebegő, diszperz ágyas - szennyvíztisztító.

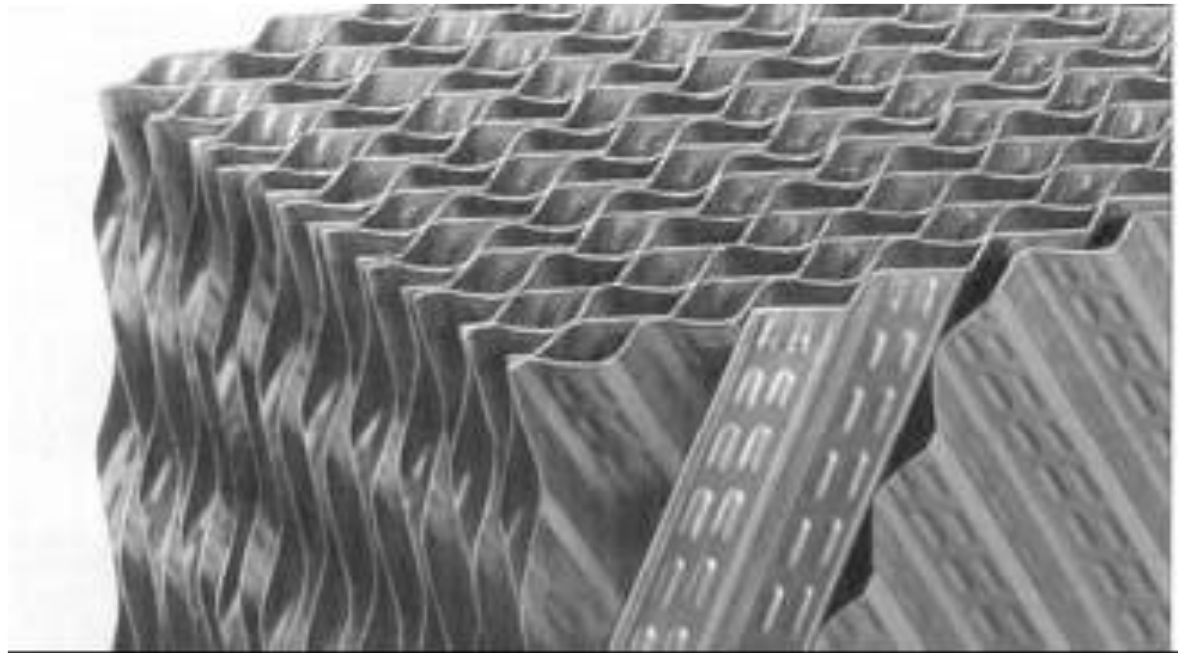
### **Csepegtetőtestes szennyvíztisztítók**

E rendszereknél a tisztítást tölteléktestek felületén kialakuló biológiai hártya (film) végzi. A hárt्यान belüli anyagtranszport biztosítja az oxigén + tápanyag szállítását a film mikroorganizmusaihoz és távolítja el a biofilm anyagcsere termékeit.

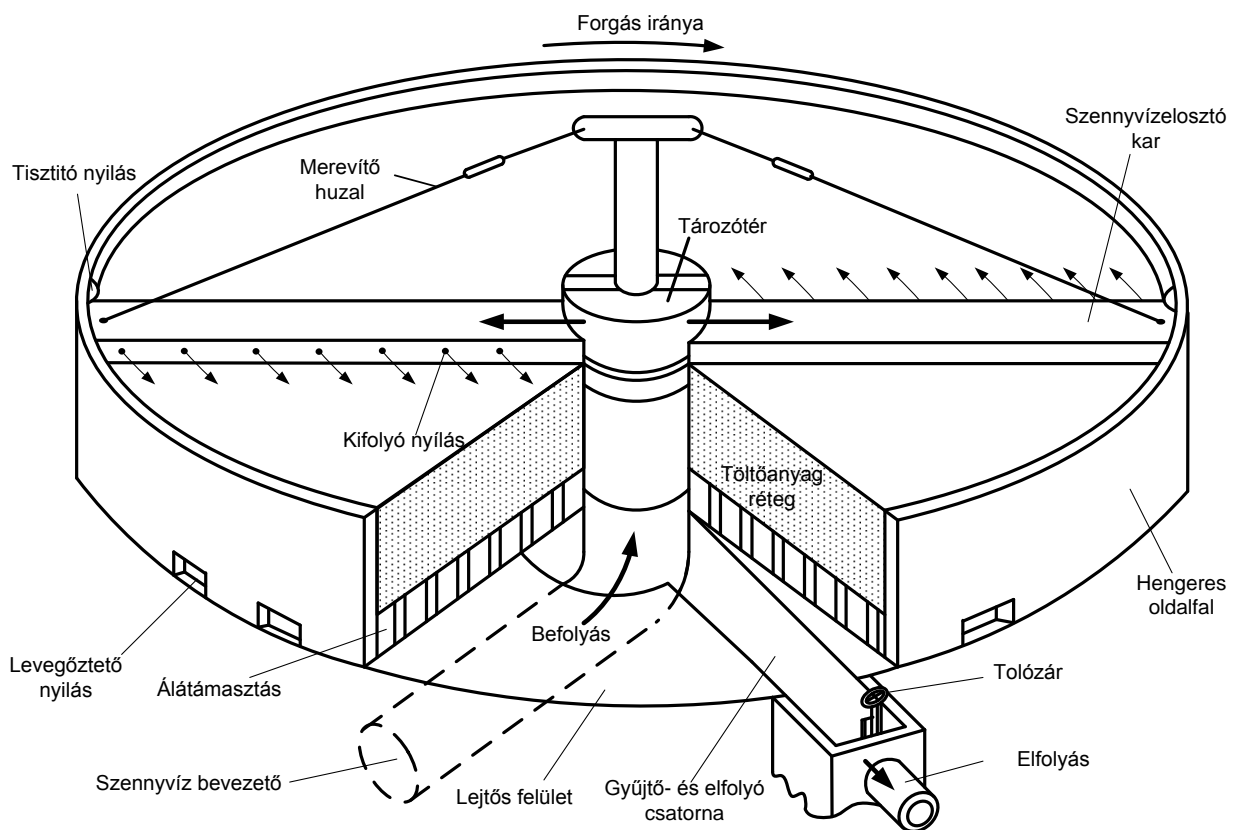
A biofilm aerob és kis hányadban anaerob organizmusokból épül fel. A berendezés alulról átszellőzni képes tartály, /építmény,/ ami nagy felületet biztosítani képes, időtálló töltelékkel van kitöltve. Az alkalmazott töltet-anyagok: bazalt-tufa, salak, habkő, téglák, speciális műanyag-töltet. A szennyvizet felülről juttatják a töltetre: forgó elosztó vályúkból csorgatják, vagy permetező szerkezetből permetezik. Egy kialakítási formája a 303. és 304 látható. A szennyvíz bevezetése itt a műtárgy középső részén keresztül történik.

A töltet terhelése szempontjából megkülönböztetünk:

- kis terhelésű,
- közepes terhelésű,
- nagy terhelésű csepegtető testes, "szuper-terhelésű" csepegtetőtestes tisztítórendszereket.



303. ábra. Csepegtető test műanyag töltete.



304. ábra. Csepegtetőtestes szennyvíztisztító kialakítása.

**55. táblázat. A csepegtetőtestes tisztítók főbb paramétereit.**

<b>Csepegtetőtest:</b>	<b>Kis terhelésű</b>	<b>Közepes terhelésű</b>	<b>Nagy terhelésű</b>	<b>Szuper terhelésű</b>
Magassága: H	2,5 - 3 m	2 - 4,5 m	8 - 24 m	8 - 24 m
Szervesanyag terhelése g/m <sup>3</sup> d	L <sub>b</sub> ≤ 175	L <sub>b</sub> ≤ 875	L <sub>b</sub> ≤ 3000	L <sub>b</sub> = 1,6-6 kg/m <sup>3</sup> d
Lebontás hatásfoka %	η = 85 - 92	η ≥ 75	η ≥ 70	η = 50 - 80
(BOI <sub>5</sub> ) <sub>el</sub> g/m <sup>3</sup>	≤ 25	≤ 30	≤ 45	
Felületi terhelés m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> h	0,08-0,16	0,4 - 0,8	0,7 - 1,5	1,5 - 5

A kis terhelésű csepegtetőtestes berendezésnél recirkulációt nem alkalmaznak. A töltelékre megengedett napi BOI<sub>5</sub>-terhelés: L<sub>bmax</sub>=175 g/m<sup>3</sup>d a hidraulikai terhelhetőség 0,08-0,16 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h.

Közepes terhelésű csepegtetőtestes berendezésnél az alkalmazott napi BOI<sub>5</sub> terhelés: L<sub>b</sub>=450- 750 g/m<sup>3</sup>d , de maximum L<sub>b</sub>=875 g/m<sup>3</sup>d.

Közepes terhelésűt akkor alkalmaznak, ha a szennyvíz mennyisége legalább:

Q<sub>d</sub>=200 m<sup>3</sup>/d, illetve a hidraulikai terhelés: 0,4-0,8 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h.

Nagyterhelésű csepegtető testes tisztító után utóülepítőt kell alkalmazni; kis és közepes terhelésűnél ez csak akkor szükséges, ha az elfolyó szennyvíz KOI-értéke meghaladja a 75 g/m<sup>3</sup> értéket.

A kisterhelésű csepegtetőtest egyszerű, nagyon megbízható rendszer. Változó minőségű szennyvizet is képes gyakorlatilag állandó minőségűvé tisztítani. A betáplálása lehet állandó, vagy szakaszos. Az adagolások közti szünet az 1-2 órát azonban nem érheti el, mert hosszabb üzemszünet esetén előáll a biológiai hártya károsodása. Zömében csak a felső 0,6-1,2 m rétegében van nagymennyiségű hártya. Alatta az autotróf nitrifikáló baktériumok az uralkodók, ami nagymértékben nitrifikált elfolyó szennyvizet képes eredményezni.

Nagy terhelésű csepegtetőtestes berendezést alkalmaznak biológiai rész-tisztításhoz, vagy nagy mennyiségű: Q<sub>d</sub> ≥ 200 m<sup>3</sup>/d szennyvíz teljes tisztításához.

A töltet átlagos térfogati terhelése: L<sub>b</sub> = 750-1100 g/m<sup>3</sup>d de maximum 3000 g/m<sup>3</sup>d.

Hidraulikai terhelhetőség: 0,7 - 1.5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h (recirkulációval együtt). A nagyterhelésű csepegtetőtesteknél recirkuláció alkalmazása szükséges, mert az az állandó hidraulikai terhelést mindég biztosítja, jó oxigénbevitt eredményez, végső soron a tisztítás hatékonyságát javítja és a lemosódó aktív, élő szervezeteket visszajuttatja a töltelékre. A nagy szervesanyag-terhelés azonban nem kedvez a nitrifikáló baktériumok elszaporodásának. Így a nagyterhelésű csepegtetőtestek nitrifikációt ritkán (csak kisterhelésű üzemeltetésű időszakokban) eredményeznek. A nagy terhelés a biológiai hártya erősebb lemosódását is eredményezi, amit az utóülepítő méretezésénél, illetve üzemeltetésénél figyelembe kell venni.

Műanyag töltetekkel 50-80%-os résztisztítást végezve igen nagy terhelések engedhetők meg: L<sub>b</sub> = 1,6-6 kg/m<sup>3</sup>d térfogati, illetve 1,5-5,0 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h hidraulikai felületi terhelésben kifejezve ("Szuperterhelésű csepegtetőtest").



## Eleveniszapos szennyvíztisztítás

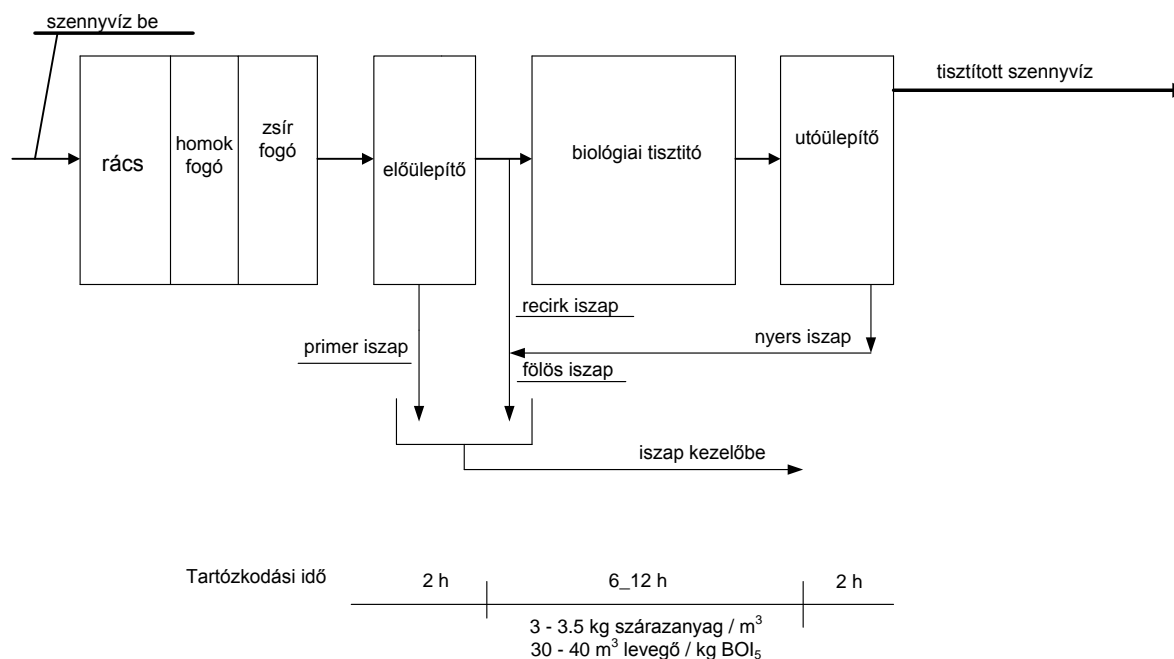
Az eleveniszapos szennyvíztisztítás a legelterjedtebb biológiai szennyvíztisztító eljárás. Készüléke lebegőágyas, folyamatosan táplált bioreaktor. A biomassza lényegileg a reaktorban marad: iszap ugyan állandóan lép ki a medencéből, de annak nagy része visszatáplálásra kerül a kellő iszapkoncentráció biztosítására.

A reaktor alaptípusa hosszanti átfolyású, téglalap alaprajzú medence, levegőztetővel és keverővel ellátva. Közepes és nagy szennyvíz áramoknál használatos. A mikroorganizmusok folyamatos oxigén-ellátást igényelnek, és keveréssel lebegésben kell tartani az élő iszapot, a tápanyag és végtermék egyenletes koncentrációjának egyidejű biztosítása mellett.

Az eleveniszapos technológiákban a reaktort követő utóülepítő a rendszer szerves részét képezi, nemcsak a szilárdanyagok leválasztását biztosítja, mint a csepegtetőtestes technológiáknál, hanem a biológiai tisztítási folyamat is folytatódik benne. Ezért minimum 2 óra tartózkodási időt kell ott biztosítani.

A tisztítást e biológiai tisztítóban az eleveniszap végzi, ami nagy felületű, 50-200 mikronos átmérőjű részecskékből áll. A részecskében - az üzemeltetési viszonyoktól függően - néhány, vagy igen sokféle mikroorganizmus él együtt.

Az eleveniszapos technológia és fő paramétereinek összefoglalását adja a 305. ábra.



**305. ábra. Eleveniszapos technológia elvi kapcsolása és jellemzői.**

Az eleveniszapos tisztító medencében annál nagyobb az anyagátadás, a szennyezőanyag lebontás, mennél nagyobb az eleveniszap koncentrációja. Az átlagos koncentráció 3-3,5 kg szárazanyag/m<sup>3</sup>. Az optimális iszapkoncentráció fenntartásához az utóülepítőből kikerülő iszap nagyobbik hányadát visszatáplálják, recirkuláltatják. Az iszapnövekmény a fölös iszap. Az elő- és utóülepítőben az átlagos tartózkodási idő 2 óra körüli. A biológiai tisztításnál optimális körülmények között a szerves anyagok 6-12 óra alatt bomlanak le és kg BOI<sub>5</sub>-önként 30-40 m<sup>3</sup> levegőt igényelnek. Maximális terhelést alkalmazva - a lehető legnagyobb iszapkoncentrációval, legnagyobb iszap-növekményre törekedve elérhető 1,5 kg

iszap-száranyag termelés lebontott kg BOI<sub>5</sub>-önként. - Üzemeltetési szempontból megkülönböztetünk nagyterhelésű és kisterhelésű ("hagyományos") folyamatokat.

A nagyterhelésű folyamatoknál - mint láttuk - a biotermék növekedése: az eltávolítandó szervesanyagok beépítése dominál. Bomlásterméként víz, széndioxid, és az iszapelhalásból ammónia képződik.

Jellemzi a folyamatot, hogy a szuszpendált szilárd anyagok koncentrációja és térfogati terhelése nagy. A tisztítás összhatásfoka gyenge, de viszonylag nagy szervesanyag lebontást eredményez.

A kisterhelésű folyamatoknál a fölösiszap-hányad sokkal kisebb: a tápanyag/mikroorganizmus arány a nagyterhelésűnek kb 50 %-a. Az iszaptelek mikroorganizmus összetétele sokkal gazdagabb, a nitrifikáló baktériumok is megjelennek.

A nehezen lebontható szennyezőket is tartalmazó szennyvizek kezelésénél jó megoldás lehet a többlépcsős tisztítás, a rövid és a hosszúidejű lebontási fázisok szétválasztása. Ilyenkor az első lépés rendszerint nagy terhelésű, gyorsan, nagy szervesanyag-csökkenést eredményez. A második lépés kisterhelésű, nagy tartózkodási idejű. - (A tisztítási lépcsők sok összekapcsolás-variánsa közül a legmegfelelőbbet, a szennyvíz-összetétel ismeretében kell kiválasztani).

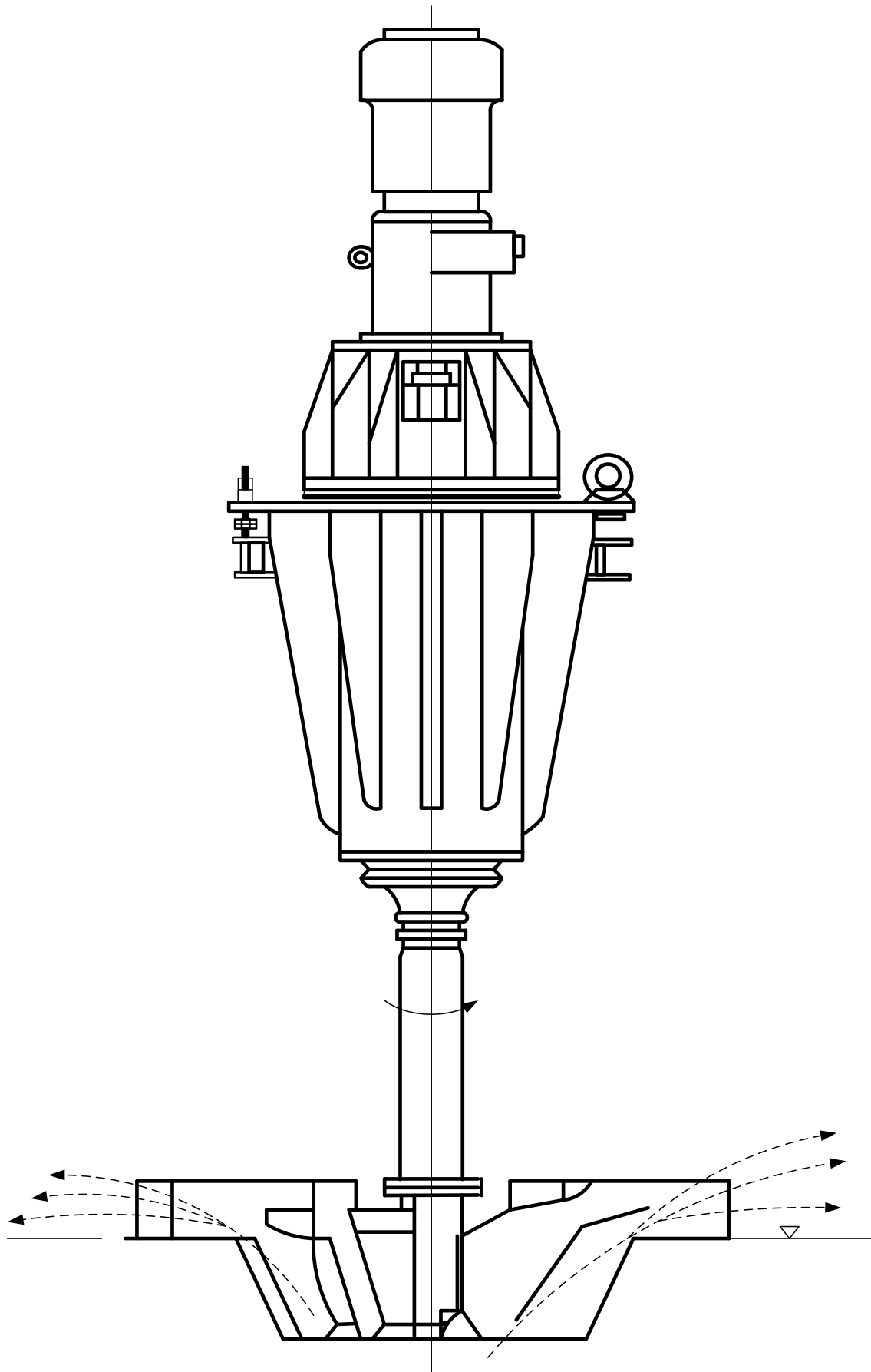
A többlépcsős tisztítás előnyei:

- ugyanolyan tisztítási hatásokhoz kisebb reaktor-térfogat elegendő,
- az első nagy terhelésű fokozat fölösiszapja sok nehezen bontható és bonthatatlan szerves anyagot és egyéb szennyezőt adszorbeál és kivon a szennyvízáramból,
- a második fokozat kevesebb O<sub>2</sub>-t igényel, így energia-megtakarítás érhető el,
- jobb végtisztítás érhető el, illetve kisebb össz-reaktortérfogat szükséges.

Hátránya, hogy több berendezés, műtárgy szükséges, és a két fokozat iszapja esetenként jelentősen eltérő tulajdonságú, ezért két iszapkezelő vonal kiépítése is szükséges lehet.

Amint említettük, az eleveniszapos reaktorban a bioterméknek O<sub>2</sub> -re van szüksége és az iszap leülepedésének megelőzését is meg kell akadályozni keveréssel. Az oxigénbevitelt felületi-, vagy mély levegőztetőkkel oldják meg.

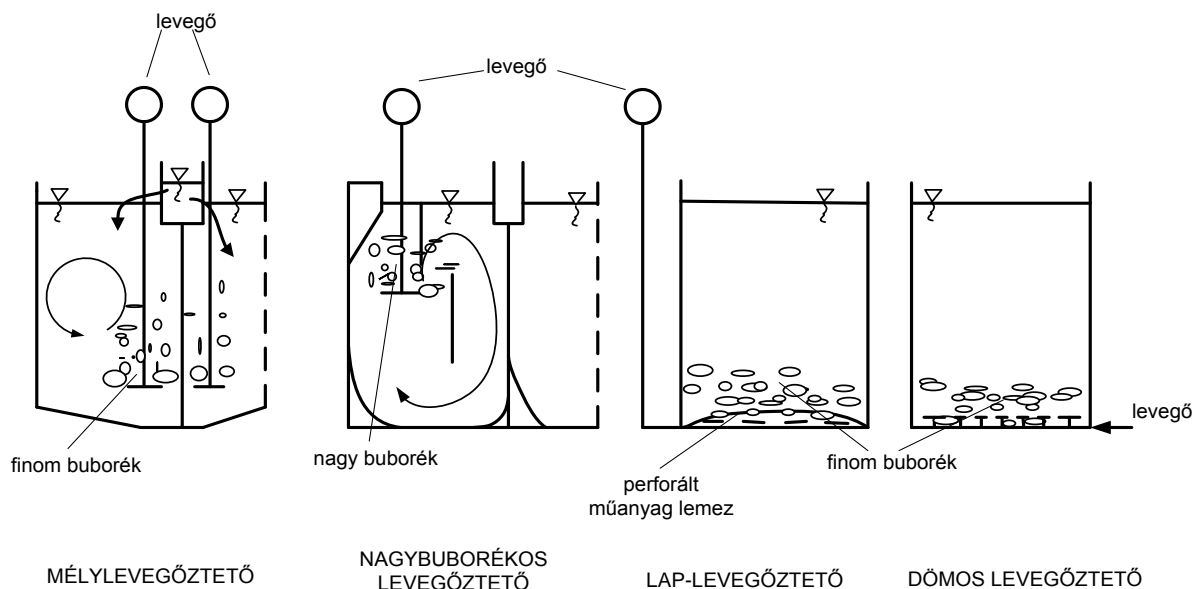
**A felületi levegőztetők** gyakran használt típusa a keverő-levegőztető, amit a 306. ábra mutat be.



306. ábra. Keverő - levegőztető.

Ez egy folyadék feletti hídra, vagy uszótestre épített, függőleges tengelyű speciális turbókeverő. A vízfelszínen  $v_k \sim 5$  m/s kerületi sebességgel dolgozó keverő intenzíven átkeveri a folyadékot és ugyanakkor felcsapja a felszín fölé a folyadék egy részét, miáltal a vízcseppek érintkeznek a levegővel és lehullva oxigént visznek a folyadékba. Egy-egy medencébe általában több keverő levegőztetőt is beépítenek, és 2-4 m-es vízmélységnél használják. A levegőztetés eredményességét az egy kWh felhasználással bevitt  $O_2$  tömegével jellemzik. (E típusnál 1,3-1,8 kg  $O_2$ /kWh a jellemző). Továbbfejlesztett változatánál a keverő alá a vízbe csövön préslevegőt (vagy oxigéngázt) vezetnek, amit a keverő apróra tördel és bekever a szennyvízbe.

**Mélylevegőztetőknél** a gázbekeverés jóval a felszín alatt történik. A kompresszoros rendszerek lemezes, dómos, csöves gázbevezetői műanyagból, kerámiából, szivacsos anyaggal borított csőből, furatos gumilemezből, stb. készülnek, és a medencék fenekén helyezkednek el. Befűvási teljesítményük korszerű szabályzással az igényekhez igazítható és így igen gazdaságos üzemeltetés valósítható meg. A használatos vízmélység: 4-6 m. Finom buborékos (0,5 - 1 mm-es furat) és nagybuborékos rendszereket (2-5 mm-es furat) különböztetnek meg. A helyesen elrendezett buborékoltatók a tisztítandó vizet megfelelően keverik is, amint azt a 307. ábra szemlélteti.



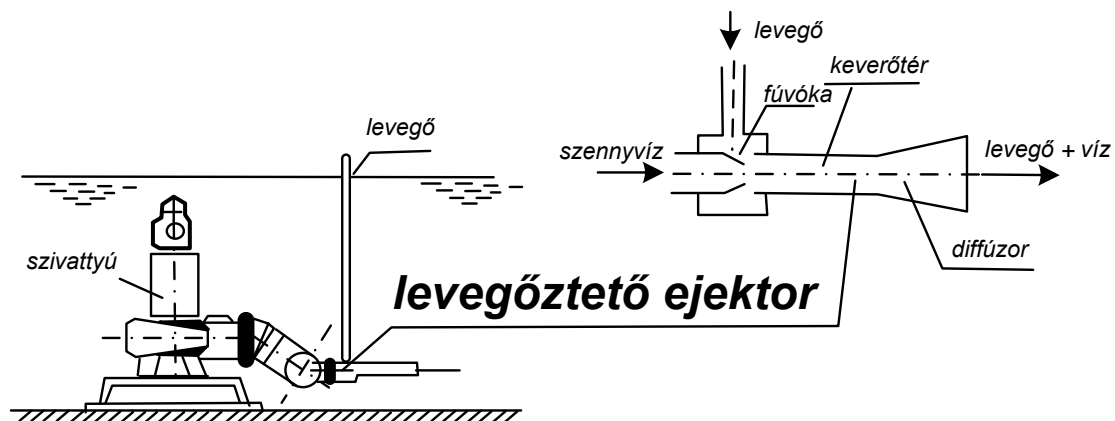
307. ábra. Buborékoltató rendszerek kialakítása.

A finom buborékos rendszerek nagy anyagátadó felületet biztosítanak, de a levegőt gondosan meg kell szűrni a befűvők eltömődésének megelőzésére. (Hatásosságuk a 3,5-4 kg  $O_2$ /kWh értéket is elérheti).

A nagy buborékos rendszernél a gáz nagyméretű nyílásokon jut a folyadékba, ezért a gázt nem kell szűrni. Hatásfokuk viszont kisebb.

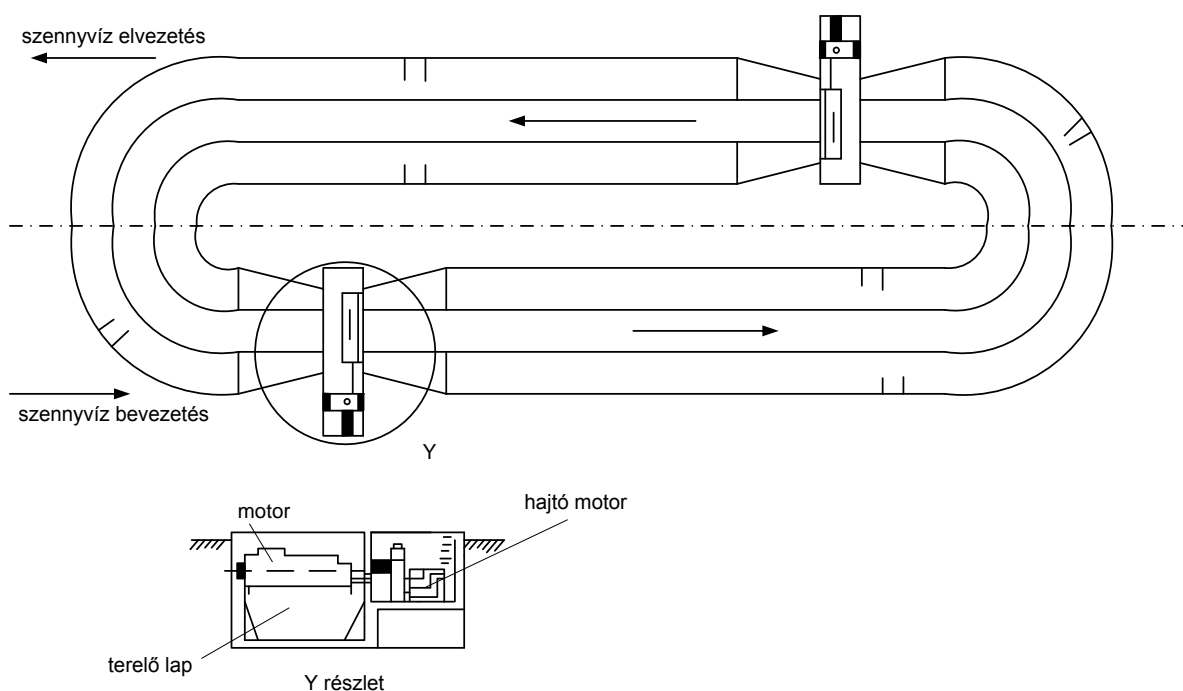
Az **ejektoros levegőztetőknél** - amint azt a 308. ábra bemutatja - a gázt folyadéksugár szívja be és apró buborékokra bontva kerül be a vízáramba. Az így előálló gázbuborékokkal telített erős folyadéksugár a medence intenzív keverését is biztosítani képes. Sok esetben kompresszor nyomja a levegőt az ejektorba, ami a hatékonyságot, az  $O_2$  beoldódás mértékét tovább növeli. (H=5-6 m vízmélységnél, légbeszívásnál 1,6-2,2 kg  $O_2$ /kWh, kompresszoros befűvásnál 2,4-2,8 kg  $O_2$ /kWh hatásosság érhető el.)

Folyadéksugaras levegőztetőknél a szennyvízfolyadék-sugár cseppekre bomlva érintkezik a vízfelszínhez és levegőt ragad magával, kever be a medencebeli folyadékba. /Hatékonysága 2,1-2,9 kg O<sub>2</sub>/kWh használt vízmélység: 0,6-7 m.  
Meg kell jegyeznünk, hogy a szennyvíztisztítás energiaköltségének mintegy 50-65%-a a levegőztetőknél jelentkezik, ezért fontos a jó hatásfok, a jó szabályzás biztosítása.



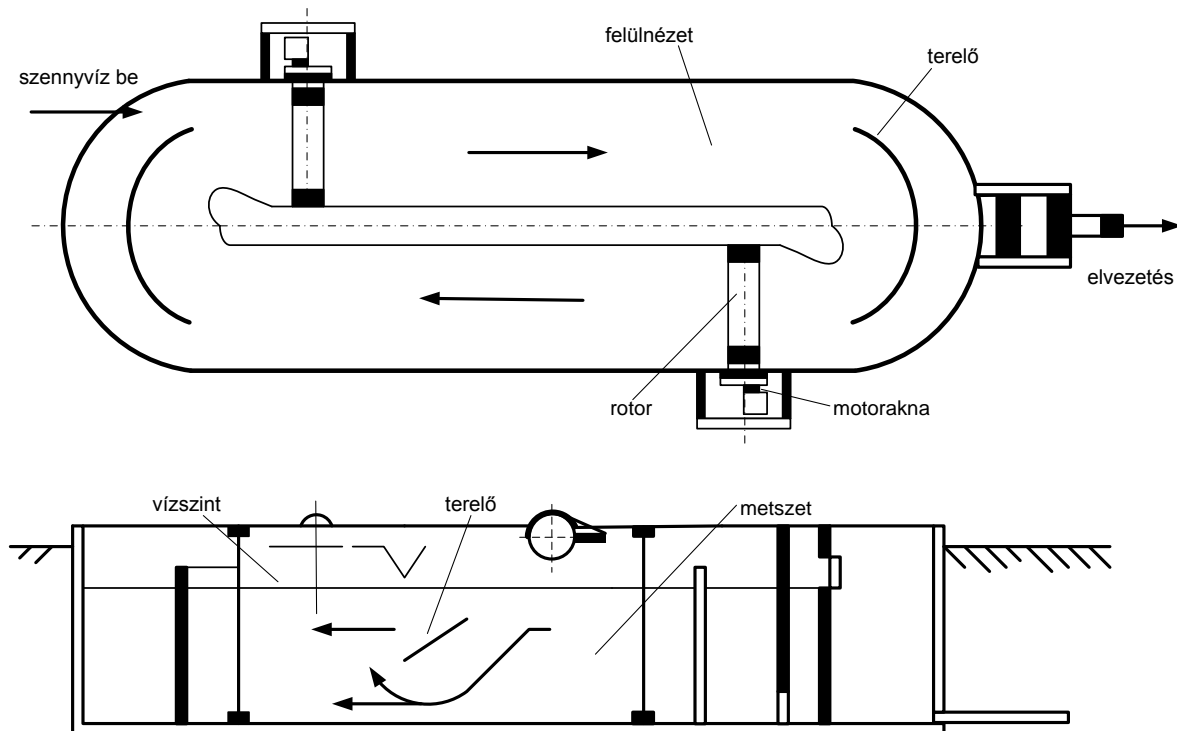
308. ábra. Levegőztető ejektor.

Kis és közepes szennyvíztisztító telepeken az egyszeri átömlésű téglalap alaprajzú medence helyett gyakran használják az **oxidációs árkot**. Ez egy lóversenypálya alakú, trapéz keresztmetszetű árok, aminél a fenékszélesség 1-2,5 m, rézsűszöge 1:1-1:1,5 közötti, a vízmélység 0,9 - 1,25 m. Az árkot műanyag fóliával, előre gyártott betonelemekkel burkolják az erózió ellen, vagy monolit betonból készítik. Az iszap lebegésben tartását, levegőztetést az egyenes szakaszok elejére beépített vízszintes tengelyű rotorok biztosítják. (309. ábra).



309. ábra. Oxidációs árok.

Nagyobb vízmennyiségeknél nagyobb tisztítótelepekre e rendszert vasbetonból építik meg nagyobb méretekkel és esetenként kettőnél több rotortal is ellátják, a bevitel biztosítására. Ilyen **csatornamedencés levegőztető**t mutat be a 310. ábra.



310. ábra. Csatornamedencés levegőztető

Az eddig tárgyalt vízszintes elrendezésű levegőztetők mellett léteznek függőleges elrendezésű levegőztetők is, bár kevésbé terjedtek el.

Szakaszos oxidációs reaktorok is használatosak kis közösségeknél, illetve üdülőövezetekben, ahol igen változó a terhelés. Ezek általában mélylevegőztetőkkel ellátott medencék. Régen kézi üzemeltetéssel, ma mikroprocesszoros vezérléssel dolgoznak. A reaktor szakaszos üzemvitelének fázisai:

- töltés az előülepítő gyűjtőmedencéjéből:  $t \sim 0,5$  óra; ez alatt minimális
- levegőbevitel történik,
- levegőztetés:  $t = 12$  óra (minimum 8 óra),
- üleptetés  $t \sim 1$  óra,
- tisztított szennyvíz eltávolítása  $t \sim 0,5$  óra,
- iszap részbeni eltávolítása  $t = 1/4$  óra.

## Fertőtlenítés berendezései

A fertőtlenítés célja, hogy a szennyvízkezelőből kilépő anyagáramok kórokozó mikroorganizmusait elpusztítsa, fertőzőképességüket megszüntesse. A fertőtlenítés a mikroorganizmusok enzimrendszerének irreverzibilis befolyásolása révén valósul meg, ami az élő szervezet elpusztítását eredményezi.

Az enzimrendszerek az oxidáló anyagokra igen érzékenyek, ezért a fertőtlenítést kézenfekvő oxidatív anyagokkal végezni.

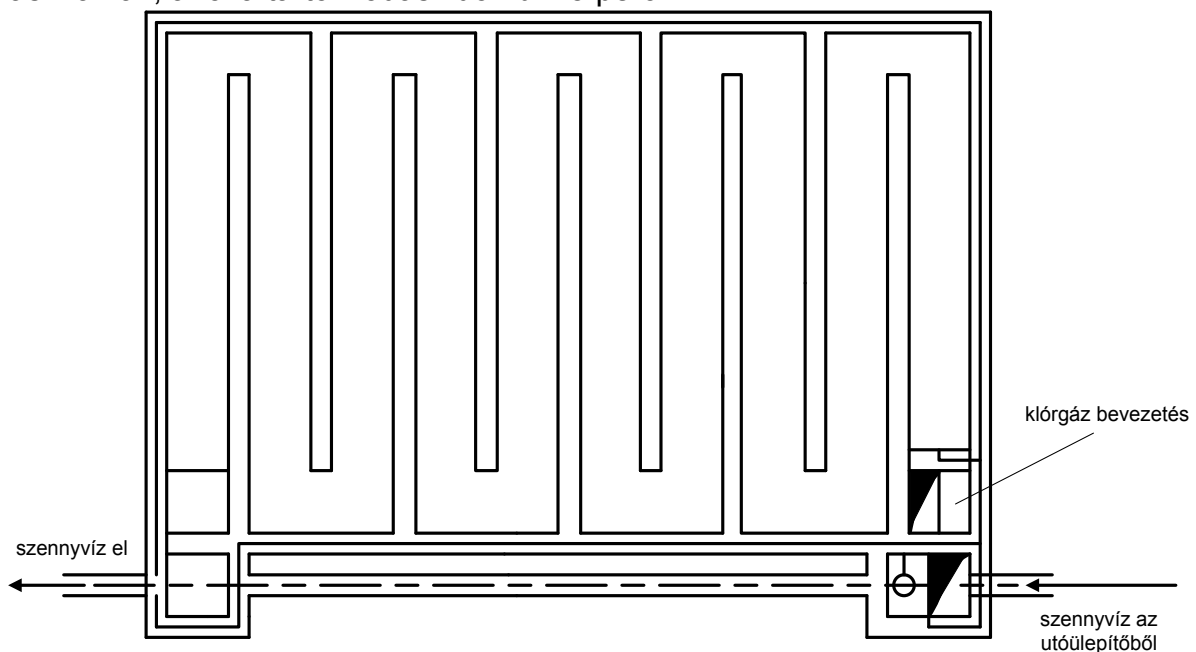
Napjainkban az ózonozás, valamint ultraibolya fénnel végzett fertőtlenítés is egyre inkább terjed, a szükséges ózont, a fertőtlenítő UV fényt kisülési csövekkel állítják elő. A legolcsóbb a klórozás, de közegészségügyi oldalról az ózonozást, és az UV kezelést ajánlják inkább.

A sejtekre klórozásnál toxikus hatást a HOCl hipoklóros sav fejt ki, ami a vízbe vezetett klórgázból képződik:



A bevitt klórt a szennyvízben jelenlevő ammónia klóraminok formájában leköti, ami nagyságrendekkel gyengébb fertőtlenítőszer mint a HOCl. Ezért a klóradagolást az ammóniatartalom figyelembevételével kell végezni úgy, hogy aktív szabad klór legyen a vízben.

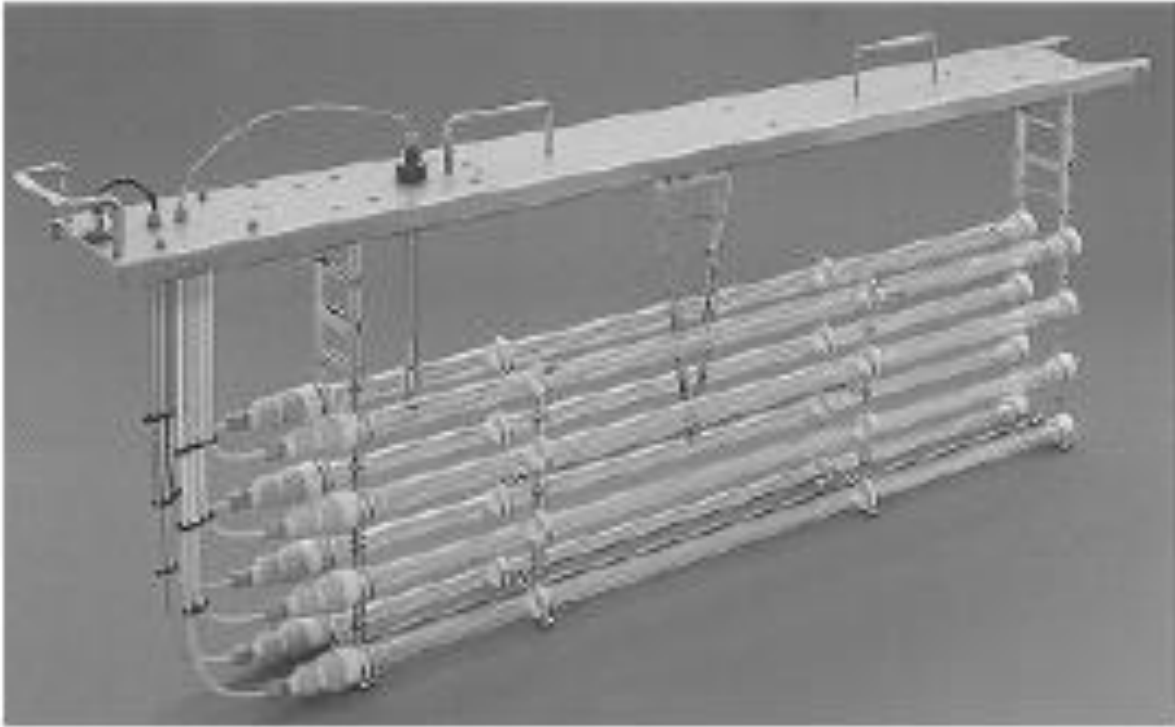
A **klórozásra** olyan, a 311. ábra látható kialakítású dugattyús áramlású reaktort használnak, ahol a tartózkodási idő kb. 15 perc.



311. ábra. Klórozó - fertőtlenítő.

A klór igen veszélyes anyag. Korróziót okoz, a környezetet károsan befolyásolja, és karcinogén vegyületeket is hoz létre. Ezért a fejlesztések klórdioxidos oxidálók és ultraibolya sugaras fertőtlenítők irányában haladnak.

Az ózont régebben villamos kisüléssel, újabban 224 nm-es ultraibolya fény segítségével állítják elő. Egy szennyvíz kezelésére alkalmas **UV besugárzó** készüléket a 312. ábra mutat be.



*312. ábra. Sugár-intenzitás mérővel és tisztító szerkezettel ellátott, csatorna szakaszba meríthető UV sugárzó egység.*

## **Szennyvíziszapok kezelésének berendezései**

Az ismertetett eleveniszapos települési szennyvíztisztítóknál két helyen választunk le szennyvíziszapot:

- az előülepítőkből a nyers iszapot,
- az utóülepítőkből a fölös iszapot.

A kettő összetétele nagymértékben eltér /-het/ egymástól. Ezért nagy telepeken indokolt külön feldolgozni őket. Mégis gyakran egyesítik, összekeverik a két szennyvíziszapot és mint kevert iszapot kezelik, illetve dolgozzák fel, mert úgy egyszerűbb az iszapfeldolgozó rendszer, másrészt a kevert iszap könnyebben ülepíthető.

Az iszapok kezelésének módját megszabja a további felhasználás, vagy elhelyezés, valamint szükségessé teszi a kezelést

- az iszapok nagy víztartalma,
- azok fertőző volta (féregpeték, patogén baktériumok vannak benne),
- ipari eredet esetén: mérgező anyagokat tartalmaz.

Az iszapkezelés legfontosabb lépései:

- iszapsűrítés,
- iszap kondicionálás és stabilizálás,
- fertőtlenítés,
- víztelenítés,
- végső elhelyezés, értékesítés.

A víztartalom jellegében - ~70% pórusvíz, (sűrítéssel csökkenthető)

- ~22% adhézios, kapillárisokban kötött víz, (kondicionálással csökkenthető)



- ~ 8% sejtekben kémiaailag kötött, és adszorpciós víz, (szárítással, termikus úton csökkenthető).

## Iszapsűrítés berendezései

Az iszapsűrítést gravitációs erőterben „gravitációs sűrítőben”, vagy oldott levegős iszapflotálóban vagy: centrifugális erőterben „dob”-centrifugában, tányéros centrifugában, „dekanter” centrifugában végezhetjük.

A **gravitációs sűrítőben** "keveréssel", az iszapot óvatosan átgyúrva, bolygatva segítik az ülepedést. E célból az ülepitő iszapkotróján ritkán /150-200 mm/ elrendezett pálcákkal "keverjük," /inkább csak bolygatjuk/ az iszapot: a pálcák a zagyban képződött gázok felszínre jutását s ezáltal az ülepedést segítik elő; megakadályozzák „iszap-hidak” képződését, az iszap összeállását. Egy ilyen kör alakú készülék kialakítását mutatja be a 313. ábra.

Az ábrán látható berendezés nagyon hasonlít a kör alakú /Dorr/ ülepitőkre, és az ott látott körkörös túlfolyó iszapvíz-elvezetéssel, uszadékot visszatartó merülő fallal építik. E sűrítők az ülepitőktől különböznek az alábbiakban:

- fenék lejtésük nagyobb /1:6 – 1:4/,
- a sűrítő műtárgy átmérője kisebb, mélysége viszonylag nagyobb,
- az iszap tartózkodási ideje jóval nagyobb: napos nagyságrendű,
- az iszapzsompba is benyúlik az iszapkotró, az eltömődések megelőzésére.

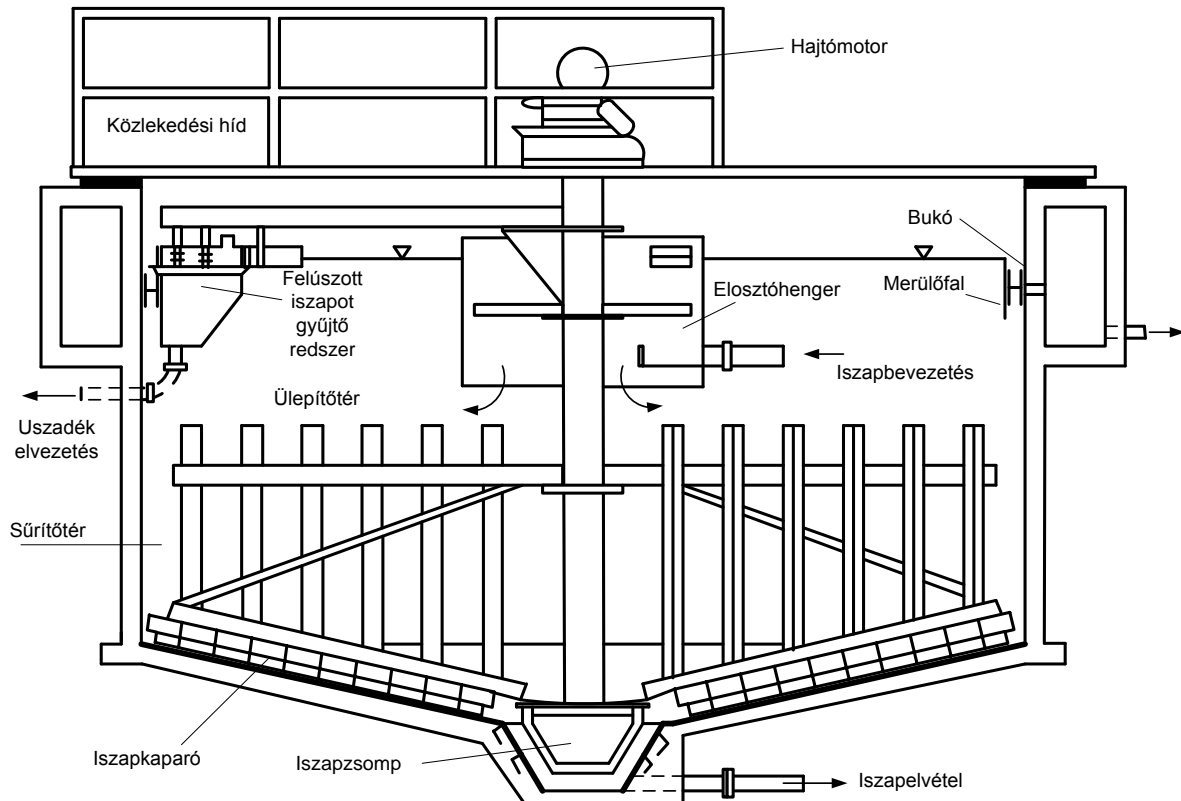
A gravitációs sűrítő alkalmazható előülepitő-iszap és kevert-iszap sűrítésére. 4-6% szárazanyag tartalom érhető el vele. Utőülepitő-iszapnál ritkán alkalmazzák, mert csak 2-3% szárazanyag tartalom érhető el vele. A oldott levegős flotációs iszapsűrítőknél finoman elosztatott, és az iszaprészekhez kapcsolódó légbuborékok segítségével felúsztatják és így uszadék formájában sűrítik a vízhez igen közel álló sűrűségű, vagy igen kis szemcseméretű iszapot.

A finom és egyenletesen elosztatott buboréktömeg létrehozásának két módját alkalmazzák:

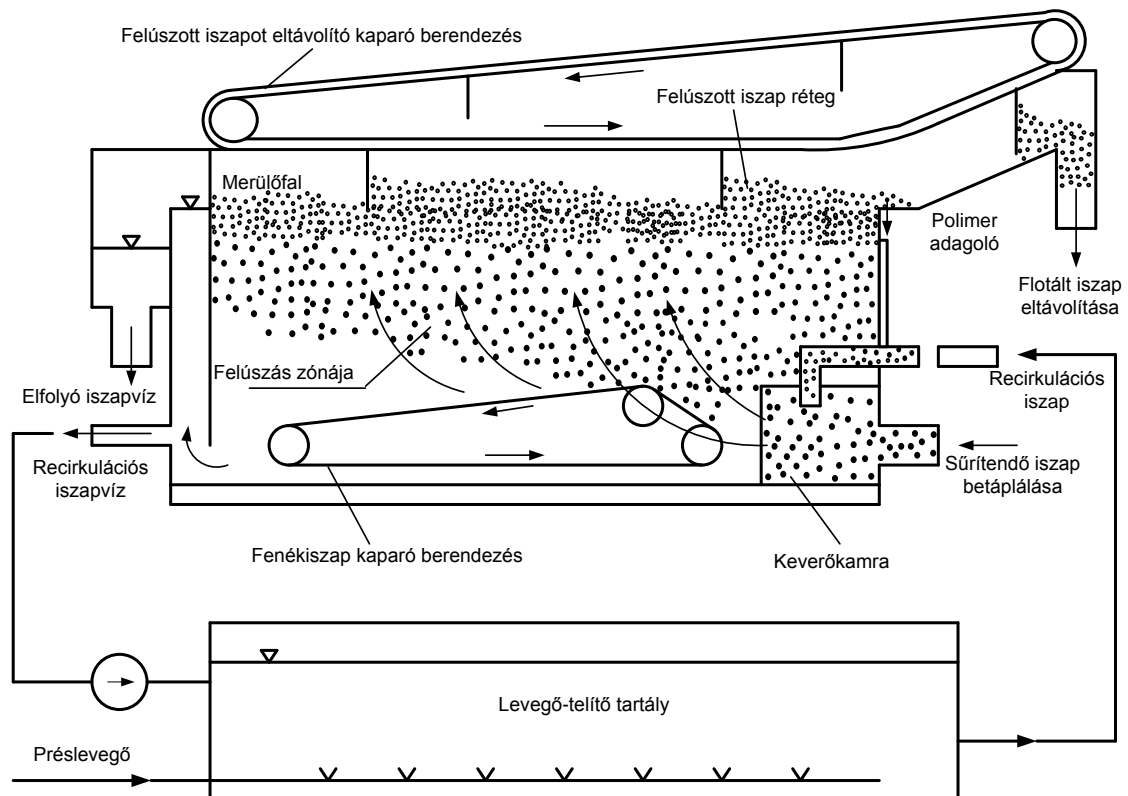
- levegő befúvás nagyobb nyomáson, s folyadék expandáltatása atmoszférára,
- levegő befúvás atmoszférán, s expandálás vákuumtérben.

Mindkét esetben a folyadékban oldott gáz felszabadulása játszódik le a kisebb nyomású térben, ami biztosítja a jelenlevő zsírcseppekhez, olajcseppekhez, szálamos részecskékhez, eleveniszap-pelyhekhez kapcsolódó finom buborékok útján az anyagok felúszását a folyadék felszínére. A buborékok kapcsolódását, a pehelyképződést az iszaphoz kevert vegyszerrel is javítják.

A 314. ábra egy (túlnyomásos légtelítővel működő) **flotációs sűrítőt** mutat be.

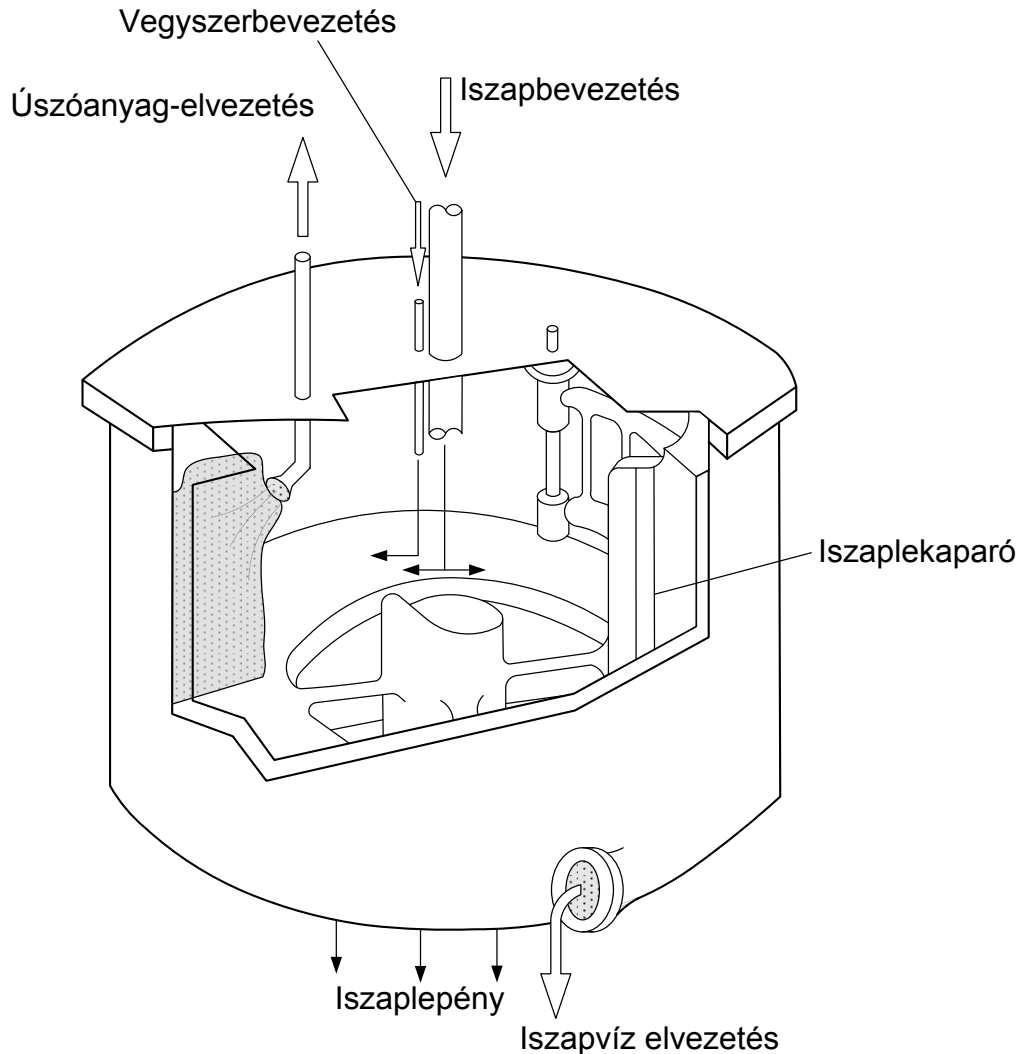


313. ábra. Gravitációs iszapsűrítő.



314. ábra. Flotációs iszapsűrítő.

A **dob-centrifuga** függőleges tengelyű, tömör dobfalú, három lábra függesztett ülepítő centrifuga. Metszetét/kialakítását a 315. ábra mutatja be.



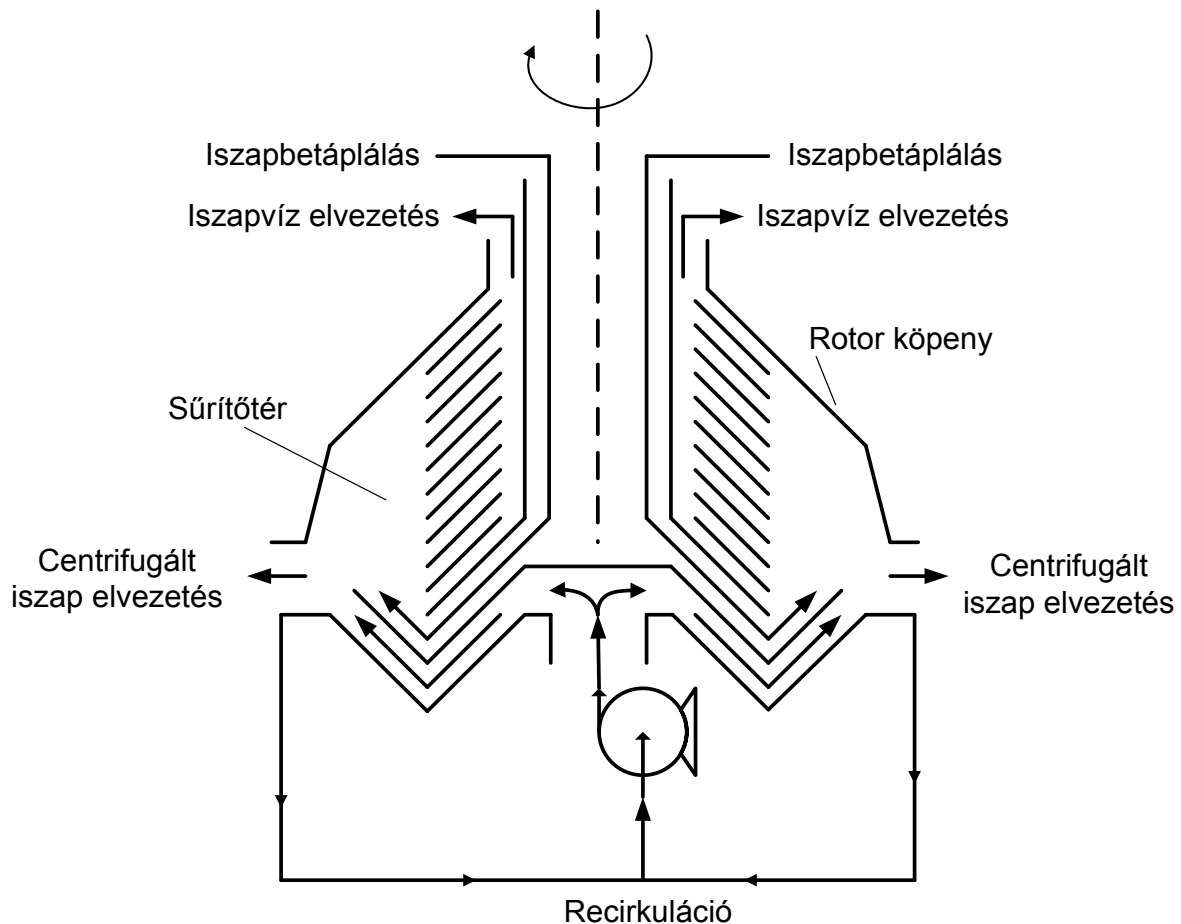
315. ábra. Dob centrifuga.

A dob  $\varnothing 1000$  mm körüli méretű, fordulatszáma 1000-1500 1/min. Kapacitása  $12\text{m}^3/\text{h}$  körüli, szakaszos működésű. A kis szennyvíztisztító telepek gépe. Mind iszapsűrítésre, mind iszap víztelenítésre alkalmas. Homokra nem érzékeny.

A sűrítendő iszapot a centrifuga forgó dobjába vezetik tangenciálisan, forgásirányban. Az iszap gyűrű alakban kitölti a dobot. A folyadéknál nehezebb iszaprészek a dob falánál gyűlnek össze, az iszapvíz pedig túlömlik, s a centrifuga álló házából alul kiömlik. A dobban, a fal mellett összegyűlő iszapréteg egyre vastagszik, a folyadékgyűrű vékonyodik; végül egyre több iszaprészeszké távozik a túlömlő iszapvízzel. Ekkor a betáplálást leállítják, csökkentik a fordulatszámot, és a sűrített iszapot hámozócsővel /iszapkaparóval/ eltávolítják. Ez után a forgórészt újra felpörgetik, indítják a betáplálást.

A szétválasztás jó hatásfokú vegyszer alkalmazása nélkül is. Az elérhető szilárdanyag tartalom 5-9%. Utőülepitő-iszagnál is használható e típus. Vegyszer adagolásával a teljesítménye megkétszerezhető.

A **tálcás /tányéros/ centrifuga** dobjának vonalas metszetét 316. ábra mutatja be. Függőleges tengelyű, nagy fordulatszámú /~5000 1/min, / csak iszapsűrítésre alkalmas centrifuga. Az iszap tengelyirányban ömlik a forgórészbe. A szilárd szemcsék a forgórész nagy átmérőjű részében gyűlnek össze, és fúvókákon lépnek ki a dobból.

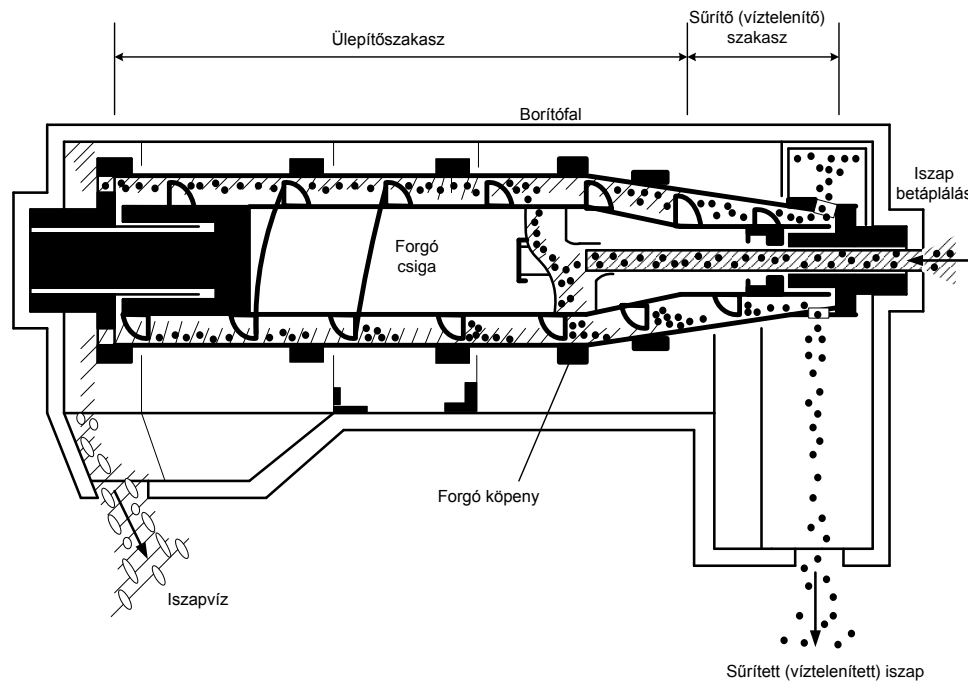


316. ábra. Tálcás centrifuga.

A forgórészt /ferde vonalakkal ábrázolt/ tányérok /betétkúpok/ töltik ki. Ezek ~10 mm távol vannak egymástól, s a betáplált folyadék köztük áramlik felfelé és középfelé, a folyadék kiömlése irányába. A tányérok simítják az áramlást, és csökkentik az ülepedési úthosszt. Az iszapszemcsék a centrifugális erőterben sugárirányban kifelé mozognak. Elérve egy betétkúpot annak belső felületén csúszva jutnak a nagyatmérőlű iszaptérbe. Innen fúvókákon /min. 12 db/ ömlik ki a sűrítmény a centrifugaház gyűjtőterébe. A sűrítmény egy részét recirkuláltatják, ami tartózkodási idő növelést és ez által jobb sűrítést eredményez. Ugyanis, ha egyszeri átfutásra méreteznék a fúvókákat, kis számú, és kis átmérőlű fúvóka adódna, amik könnyen eltömődnének és közöttük a dobban áramlási holtterek volnának, ahol lerakódások képződnének.

A tálcás centrifugák a nagy telepek gépei. Utőülepitő iszap sűrítésére alkalmazzák elsősorban, az elérhető szilárdanyag tartalom 4-6%. Alkalmazásánál ügyelni kell, hogy csak jól homokmentesített iszap /a homok koptatná a fúvókákat,/ és szálas anyag mentes iszap engedhető rá az eltömődések elkerülése végett.

**Dekanter /csigás ülepitő/ centrifuga** vonalas metszetét 317. ábra mutatja be.



317. ábra. Dekanter /csigás ülepítő/ centrifuga.

E centrifuga dobja vízszintes tengelyű, hengeres-kúpos kiképzésű. A dobon belül, attól 1-1,5%-al eltérő fordulatszámmal szállítócsigával ellátott betét forog. A csiga a dobfalra kiüledett iszapot szállítja a kúpos részhez, kikotorja a folyadékgyűrűből, s végül a dob legkisebb átmérőjű részén levő nyílásokon távozik a sűrített iszap a forgórészből. A sűrítendő iszapot a forgórészbe nyúló álló csövön vezetik be. A folyadék a dobon gyűrű alakban helyezkedik el, és a hengeres rész véglapján levő /állítható helyzetű/ nyílásokon ömlik ki.

E centrifuga típus a nagy telepek gépe, mind iszap sűrítésre, mind iszap víztelenítésre alkalmas. Utóülepítő iszap sűrítésére használják, 6-9% szárazanyag tartalom érhető el vele. Csak jól homokmentesített iszapnál használható. Az iszaprészeket roncsolja, így az iszapvízzel többlet szerves anyag jut alkalmazásakor vissza a tisztító sor elejére.

## Iszapkondicionálás

Feladata a sűrített iszap vízteleníthetőségének javítása, a szerves anyag stabilizálása, a patogén bacilusok mennyiségének csökkentése. Alkalmazhatunk fizikai-, kémiai- és biológiai kondicionálást.

### Fizikai kondicionálás

- Pasztörözés: felmelegítés 60-80 °C-ra, majd hűntartás 15-30 min-ig;
- Termikus kondicionálás: hevítés 180-220 °C-ra, ~30 min-ig hűntartás.

Teljes sejtpusztulást eredményez. Hátránya, hogy a sejtnedvek szerves anyag növekedést okoznak az iszapvízben. Továbbá költséges, bűzös. Viszont igen jól vízmentesíthető iszapot eredményez.

- Fagyasztásos kondicionálásnál a jégkristályok a sejtfalat szétroncsolják, a vízmentesítést akadályozó kolloidok elbomlanak. A mesterséges hűtés nem gazdaságos; a természetes téli fagyást hasznosítják.

### **Kémiai kondicionálás**

A kondicionáló vegyszerek /flokulálószer/ hatására javul a vízteleníthetőség, csökken a rothadóképesség, csökken a patogének mennyisége.

Végezhető - szerves koagulánsokkal (más néven polielektrolitokkal: Praestol, Zetag, Hercofloc, stb. Igen kevés kell belőlük!)

- szervetlen koagulánsokkal (  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{FeSO}_4$ ,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{CaO}$  -al).

Az alkalmazandót a további felhasználás megszabhatja. - Kísérleti alapon kell meghatározni mind a megfelelő vegyszert, mind az adagolandó mennyiséget. A túladagolás, különösen a polielektrolitoknál, rontja a hatékonyságot.

### **Biokémiai kondicionálás**

Lehet aerob és anaerob.

Aerob kondicionálás: az iszap ( osztott vagy kevert iszap) "teljes oxidációja", azaz tovább levegőztetése.

Alkalmazható, ha: -  $10^\circ\text{C}$  feletti hőfok biztosított egész évben,

- kis-, és közepes terhelésű szennyvíztelepen ( 2000 - 7500  $\text{m}^3/\text{d}$ )

Tokszikus ipari szennyvizeknél is alkalmazható lehet.

Kezelési idő: 8 - 12 nap.

Enzimes változata gyors: csupán 8 - 12 óra kezelési időt igényel; alkalmazása nagyobb: 2000 - 20.000  $\text{m}^3/\text{d}$  szennyvizet feldolgozó telepeken is gazdaságos.

Anaerob biológiai kondicionálás: alkalmazása közepes és nagy telepeknél gazdaságos.

Levegőtől elzárt rothasztást, biológiai lebontást végeznek, aminek során főleg  $\text{CH}_4$  és  $\text{CO}_2$  gáz (biogáz) és rothasztott iszap képződik. A művelet során az anaerob mikroorganizmusok a feldolgozott anyagokból enzimeikkel hasítják le a számukra szükséges oxigént.

A bontás főbb lépései:

- hidrolízis,
- savas erjedés, /ecet-, tej-, propion-...savak, alkoholok képződnek/
- metán fermentáció /ecetsav +  $\text{H}_2$  +  $\text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4$  +  $\text{CO}_2$

Jellemzői:

- a szerves anyag 40 - 60% -a lebomlik,
- kolloidok lebomlanak, s ezzel a sűrítettség lényegesen javul,
- metángáz képződik, ami gazdaságosan felhasználható és javítja a művelet energetikai hatékonyságát. (De: tűz-és robbanásveszélyt is okoz! )

Formái:

- hideg rothasztás:  $20^\circ\text{C}$  alatti hőmérsékleten játszódik le,
- fűtött rothasztás:  $32 < t < 58^\circ\text{C}$  hőmérséklet tartományban.

Hideg rothasztás:

- nyitott földmedencékben; 120 - 180 nap alatt játszódik le.
- (4000  $\text{m}^3/\text{d}$ -ig használatos.)
- kétszintes üleptők rothasztó tereiben; 75 - 90 nap kezelési idő szükséges. 2000-3000  $\text{m}^3/\text{d}$  terhelésű tisztítóknál használják.

Hasznosítható biogázt nem szolgáltat a hideg rothasztás, és igen idő és térfogat igényes.

A meleg rothasztást két hőmérséklet tartományban végzik:

- mezofil rothasztás: 32 - 38°C hőfoktartományban játszódik le, átlagosan 20-30 nap szükséges,
- termofil rothasztást 50 - 58°C tartományban végzik, 15-20 nap szükséges.

A termofil rothasztás előnyei a mezofillal szemben: gyorsabb, így kisebb reaktor-tér szükséges. Patogének előlése, a kezelt iszap vízteleníthetősége jobb. Hátrányai: hőmérsékletingadozásra érzékenyebb. A folyamat kevésbé stabil. Nagyobb az energia igénye. Továbbá: az iszapvíz több oldott szerves anyagot tartalmaz és gyengébb a szilárd-folyadék szétválasztás az utórothasztóban.

Alkalmazott reaktorok: 500 – 10.000 m<sup>3</sup>-est használnak, szükség esetén többet párhuzamosan alkalmazva. A fűtését a biogázzal végzik, így csak indításhoz kell külső energiáról gondoskodni a meleg rothasztásnál.

Hőenergia szükséges:

- a betáplált iszap felmelegítésére,
- a recirkulált /az utórothasztóból visszatáplált/ iszap felmelegítésére,
- a berendezések hőveszteségeinek pótlására.

A rothasztókat keverni kell:

- a tápanyag egyenletes eloszlása végett,
- a baktériumok és a tápanyag jó érintkeztetése végett,
- egyenletes hőmérséklet biztosítása végett,
- áramlási holtterek elkerülésére,
- uszadék-képződés csökkentése végett.

Keverés módja:

- mechanikus keverővel,
- recirkuláltató szivattyúval,
- a képződött gáz visszavezetésével.

Nem szükséges állandóan keverni. Általában naponta 3-6-szor 1-6 órát kevernek.

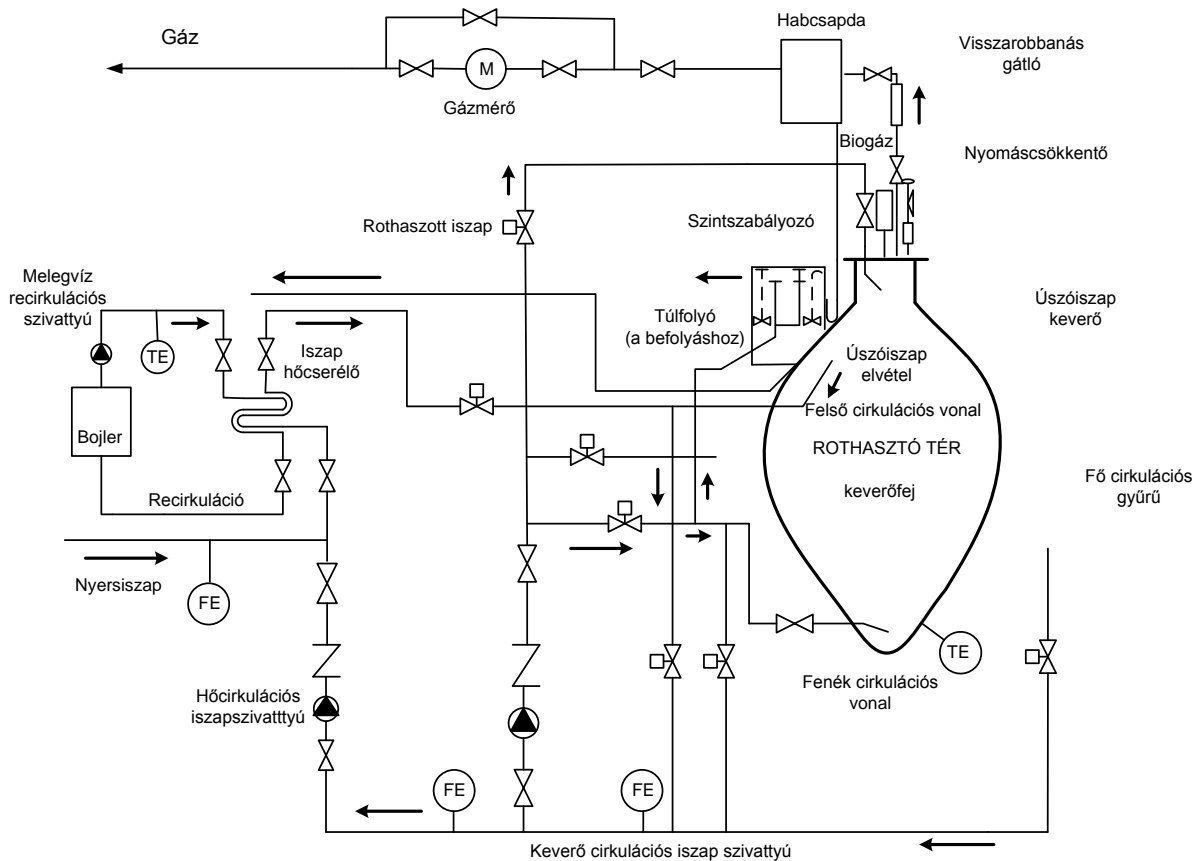
A képződött biogázzal kapcsolatban

- tárolótartály kell,
- gazdaságos felhasználásról kell gondoskodni (kazán, gázmotor, városi gázhálózatba táplálás, stb.)
- a fölös gáz megsemmisítésére gázfáklya kell,
- környezeti veszélyt el kell kerülni /villámhárító, rb szerelés./

A biogáz mennyisége: 0,75 - 1,0 m<sup>3</sup>/kg lebontott szerves anyag, vagy 0,02 - 0,03 m<sup>3</sup>/fő/nap - lakos-egyenértékre számítva.

A biogáz összetétele: CH<sub>4</sub>: 65 - 70%, CO<sub>2</sub>: 30 - 35%, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> 2 - 3%, H<sub>2</sub>S: tized %-ban képződik, de igen korrózív, fűtőértéke kb. 22,5 MJ/m<sup>3</sup>, kisebb, mint a városi gázé.

A 318. ábra jellegzetes reaktor kiképzést, ill. kapcsolást mutatunk be. A hőveszteség csökkentése miatt a gömb alak volna az ideális. A lerakódó homok jobb eltávolíthatósága miatt ezért a reaktort alul körte formában elkeskenyítik. Technikailag a hengeres-kúpos alak a jobban megvalósítható. E reaktor alakoknál a propeller keverőt használják mechanikus keverőként. Hosszabb idő elteltével lerakódás képződik rajta, amit fordított irányban járattva a keverőt (1/3-ad ideig kb..) a lerakódás eltávolítható.



318. ábra. Biológiai (Anaerob) rothasztó reaktor.

Hőcserélőként a kettős-csőves típus használatos, amit előnyös a gázmotor hűtővizével fűteni. Magasabb hőfokú fűtőközeg ráégetést okozhat. A reaktorok közül az utolsót utóreaktornak, más néven fázis-szétválasztónak nevezik, s ezt nem keverik. Itt még játszódhat le a rothadási folyamat, de fő feladata egyrészt a kirothadt iszap sűrítése ülepítéssel, másrészt a kirothadt iszap tárolása. Az innen visszavezetett iszappal a reaktorok rothasztó mikroorganizmus tartalma növelhető, s ezzel a művelet gyorsítható. Jó szolgálatot tesz a tárolt iszap olyan esetben is, amikor valamelyik reaktorban az erjedés nem kívánt irányban tolódik el (pl. túlzott savasodás).

### Szennyvíziszapok víztelenítése.

Az iszap víztelenítés célja, hogy az iszap veszítse el „folyadékszerű” tulajdonságait, szállítható, „lapátolható” legyen. Centrifugákat és többféle szűrőt lehet víztelenítésre használni. A megfelelő típus kiválasztásához félüzemi kísérletet célszerű végezni.

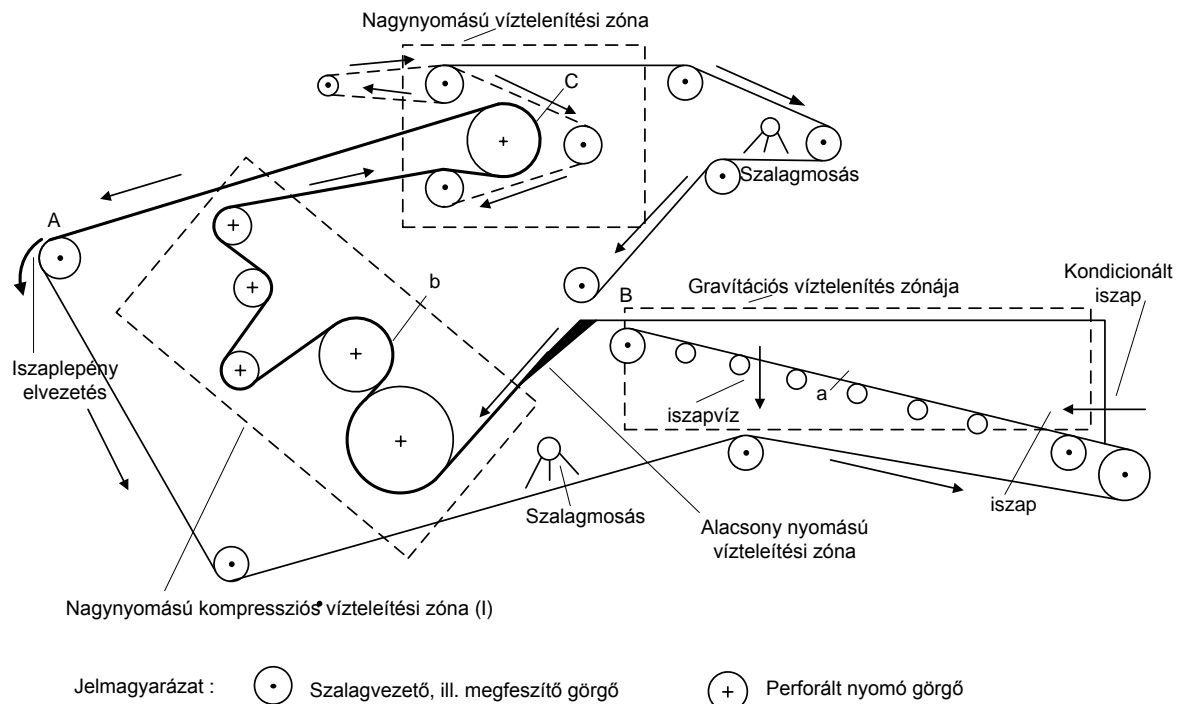
Centrifugák közül a dob-/ülepítő inga-/ centrifuga alsó leresztős változata alkalmas az iszap víztelenítésre. A kis telepek gépe.

A dekanter /csigás ülepítő/ centrifuga használata nagyon elterjedt. A nagy telepek gépe. Zárt, kis helyen elfér, nagy teljesítményű. Használatához vegyszer alkalmazása szükséges. Iszap víztelenítésnél általában nagyobb dob fordulatszámokat /és esetenként kissé eltérő dobkialakítást/ használnak, mint sűrítéshez.

Szűrők közül a vákuum dobszűrőt használták az 1970-es évekig elterjedten. Más szűrőtípusok azonban nagyot fejlődtek, és kb. 1970 óta kiszorították a vákuum dobszűrőket. Szalagos szűrőprések folyamatos működésűek, használatuk mind kis,



mind nagy telepeken igen elterjedt. Működésük, kialakításuk megértését biztosító vonalas rajzot láthatunk a 319. ábra.



319. ábra. Szalagszűrő prés.

A szalagszűrő préseken a következő jellegzetes lépésekben történik a víztelenítés:

1. Az iszap kémiai kondicionálása. „Super-flokkuláció” létrehozása az iszap szalagra vezetése előtti polielektrolit adagolással.
2. Gravitációs víztelenítés a szalag kezdeti szakaszán. A kondicionáló szer hatására szalag vízszintes, vagy emelkedő szakaszán az iszapvíz ~50%-a szalagszűrőn át távozik. Ehhez 1-2 min. tartózkodási idő szükséges.
3. Kisnyomású víztelenítés: az iszapot hordozó primer szalagra egyre szűkülő rést képezve egy második szűrőszalag fut rá. A szűkülő részben, s azt követően perforált hengerekre futva egyre növekvő nyomó hatás éri az iszapot. Fontos, hogy a nyomás fokozatosan nőjön, mert különben oldal irányban kifut a szalagok közül az iszap.

A nagynyomású víztelenítést többféle hatással hozzák létre. Egymást követő hengereken zegzugosan vezetve az iszap-szendvicset, ezzel sorozatos hajlításnak, /ezzel átgyúrásnak, / és a szalagok egyidejű feszítésével növekvő nyomásnak teszik ki az iszapleplenyt. /I-es zóna./ - Más esetben egymással szemben elhelyezkedő összeszorított hengerek préselnek. - Harmadik, igen hatékony megoldás az ábra szerinti II. zóna, amikor a nagy nyomást /egy utolsó, nagy átmérőjű hengeren/ egy harmadik szűrőszalag rászorításával hozzák létre. /Kb. 1 bar-ig fokozzák a nyomást a szendvicseben./

Fontos a fokozódó nyomás optimális alkalmazása. Túl gyors nyomás-növekedés hatására az iszap a hengerek közül kikúszik és a szalag pórusaiba is beprélódhat. A szalagsebesség 0,6 – 3 m/min közötti, rendszerint üzem közben is állítható. A szűrőszalag anyagát kísérletek alapján választják ki, mert igen sokféle műszál, pórusméret, szövési mód van a választékban. A szalag szélessége 0,5-3m, /de 2 m fölöttit ritkán használnak/. Az iszappal érintkező szalagokat intenzív mosással kell

ellátni. A szalagszűrő prés alkalmazásának előnyei: viszonylag kis energiaköltséggel megfelelően nagy szilárd anyag tartalmat állít elő. Folyamatos működésű, így jól illeszkedik a szennyvíztisztítás folyamatos technológiájába. – Hátrányai: az iszap minőségének változására igen érzékeny. Továbbá: a szűrőszalagok nagy igénybevételnek vannak kitéve, így a többi szűrőkészülékhez képest gyakrabban kell a szűrőszalagokat cserélni.

## Szennyvíztisztítási technológia monitorozása

A szennyvízkezelő technológia célja a beérkező szennyvíz minőségét előírt minőségűvé alakítani. Ezt a célt a technológia előírt üzemeltetésével érik el. A berendezések rendeltetésszerű használata számos mérési (pl., közegáram, szint, hőmérséklet, nyomás), szabályozási (pl. pH szabályozás) és vezérlési feladatot (pl. szivattyúk, keverők indítása/leállítása) ró a technológia üzemeltetőire. Ezeknek a feladatoknak az ellátására jól kidolgozott módszerek és berendezések szolgálnak. A szennyező komponensek koncentrációjának on-line mérése azonban csak néhány paraméter esetében (pl. pH, vezetőképesség, oldott oxigén) lehetséges (ezek száma azonban folyamatosan bővül). Ma még jelentős mértékben mintavételezés és laboratóriumi mérés technika szolgáltatja az eredményt, néha jelentős időeltolással (pl. 5 nap). A mintavételi hely kiválasztása, a mérés gyakorisága, a mintavétel ideje, mennyisége és a minták előkezelése és szállítása nagy körültekintést kíván. A bejövő és kibocsátott szennyvíz minőségének ellenőrzésére automatikus mintavevőket kell elhelyezni. A technológiából kibocsátott tisztított szennyvízben a szennyezőanyagok monitorozására számos jól bevált mérési módszer és mérőberendezés áll rendelkezésre. A szennyvíz monitorozás célja a kibocsátási határértékek ellenőrzése, naplózása. A 56. táblázat egy szennyvíztisztító telepről elfolyó tisztított szennyvíz minőséget mutatja.

**56. táblázat. Elfolyó tisztított szennyvíz minőség.**

	Határérték (mg/l) Napi átlag minták alapján	Maximális érték (mg/l) Napi átlag minták alapján
Összes lebegőanyag	35	80
BOI <sub>5</sub>	25	50
KOI	125	230
összes N	30	50
NH <sub>4</sub> -N	5	15
NO <sub>3</sub>	75	150
összes P	2	4

## Reaktorok

Dr. Halász János, Szegedi Tudomány Egyetem

### Reagáltatási műveletek, kémiai reaktorok

A környezetszennyező anyagok ártalmatlanításának egyik lehetséges (és nagyon fontos) művelete a kémiai reakció, amikor a káros komponenst a környezetre nézve ártalmatlan anyaggá alakítjuk át. A kémiai reakciók adott körülmények között történő megvalósításakor ki kell választanunk az optimális **reaktortípust**, a reakcióba vitt anyagok vagy anyagáramok ismeretében meg kell határozni a **reaktor méreteit**, és biztosítani kell azokat az **üzemi paramétereiket**, melyek betartása esetén a reaktor megbízhatóan és tartósan működik.

A környezetvédelemben általában a nagyipari kémiai technológiáktól eltérő feltételek között kell a kémiai reakciókat megvalósítani, így az alkalmazott reaktormegoldások is eltérőek. A környezetbe kilépő káros komponensek ugyanis a legtöbb esetben kis koncentrációban vannak jelen, a reaktorba kerülő anyag sokkomponensű, változó összetételű és hőmérsékletű lehet (elég itt a gépkocsik kipufogógázaira gondolni), ugyanakkor a szokásos vegyipari technológiákban koncentrált, tiszta, állandó állapotú anyagáramokkal számolhatunk. Érdemes azonban megjegyezni, hogy a vegyiparban maga a reaktor is környezetszennyező forrás lehet, ha nem sikerül (és általában nem sikerül!) a reakciókat a reaktánsok teljes konverziójával, szelektíven megvalósítani, akkor az át nem alakult kiindulási anyagok és a mellékreakciók termékei hulladékként jelentkeznek. A reaktorok megfelelő működtetése ezért a vegyipar környezetvédelmének egyik alapvető kérdése.

Az ipari termelésre, illetve a környezetszennyező anyagok kémiai átalakítására szolgáló reaktorok tervezéséhez és működtetéséhez a lejátszatni kívánt reakciók *sztoichiometriai*, *termodinamikai* és *reakciókinetikai* jellemzőit kell ismernünk. Ezek segítségével ugyanis végső soron képesek vagyunk megmondani, hogy az adott üzemi körülmények között milyen termékek és milyen mennyiségben távoznak a reaktorból.

A gyakorlatban a kis mennyiségben rendelkezésre álló, vagy átalakítandó anyagokat *szakaszos* üzemben reagáltatjuk. A szakaszos üzem általában nagy rugalmasságot jelent, ami fontos akkor, ha különböző reakciók megvalósítást kell biztosítanunk.

A *folyamatos* eljárás előnyei: állandósult állapot, idő és munkabér megtakarítás, szabályozhatóság és automatizálhatóság csak akkor használhatók ki a környezetvédelmi technológiák reaktorai esetén, ha állandó anyagáramok (pl. adott összetételű és mennyiségű) feldolgozást kell megoldanunk.

Természetesen a folytonos működésű reaktorokban is ugyanazok a kémiai folyamatok játszódnak le, mint a szakaszos készülékekben, az áramlás olyan jelenségeket idézhet elő, amelyek ez utóbbi esetben nem jelentkeznek (pl. lamináris áramlásnál a sebesség a csőtengelytől mért távolság függvénye, stb.). Továbbmenően, a folyamatos reaktorokban gyakorlatilag megvalósíthatatlan, hogy a berendezés minden pontján azonos legyen a hőmérséklet és a nyomás, ami a reakciók lefolyását jelentősen befolyásolhatja.

A szakaszos és folyamatos üzemmód közötti választás nagymértékben függ attól, hogy milyen a beruházási és a működtetési költségek aránya. Itt kell utalnunk arra, hogy ami egy nagyvállalat számára a legjobb, az nem feltétlenül optimális egy kisüzemi technológia esetén is.

A nagy ipari államokban kiadott, és gyakran magyar nyelven is hozzáférhető, reaktortervezéssel foglalkozó kézikönyveket nézegetve, a témában nem eléggé

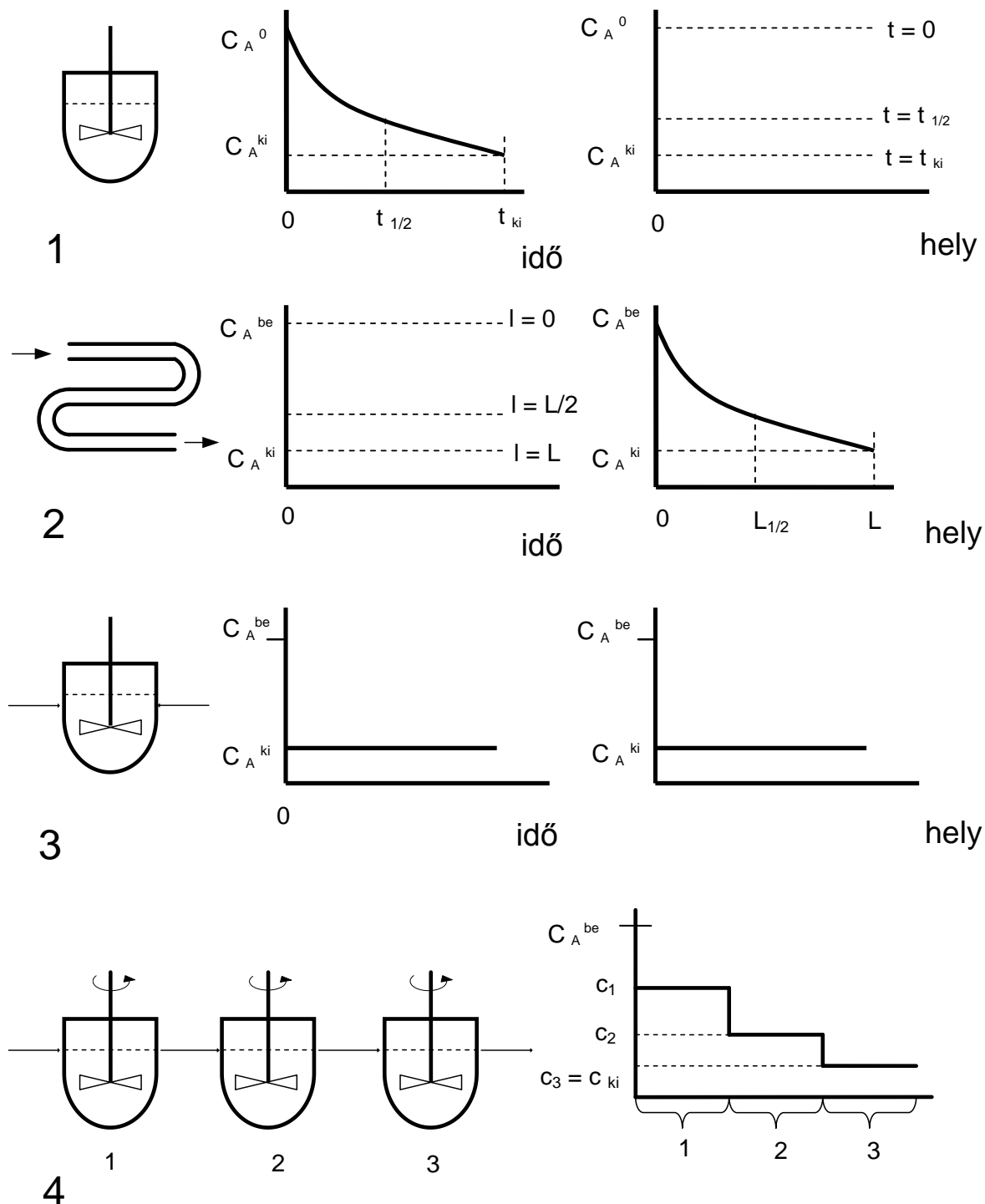
járatos olvasó hajlandó arra a következtetésre jutni, hogy a reaktortervezés a technológia olyannyira mindennapos és közönséges feladata, hogy néhány ilyen munka elolvasása után erre bárki vállalkozhat. A helyzet azonban egyáltalán nem ez, ugyanis az igazán komoly reaktorok fejlesztésével és megvalósításával a világon is csak néhány cég foglalkozik; elsősorban azok, melyek több évtizedes hagyományokkal, s ennek megfelelően igen nagy gyártási tapasztalatokkal rendelkeznek.

Hazánk kész termelőüzemek, licencek, szabadalmak vásárlásával igyekszik a környezeti ipar korszerűsítésére, és kisebb jelentőségű eljárásokat nem tekintve, saját tervező tevékenységet nem folytat. Ennek elsődleges oka az, hogy egy korszerű technológia kifejlesztése mérhetetlenül sokba kerül, másrészt nagy vegyipari gépgyártási kapacitást tételez fel.

## A kémiai reaktorok általános jellemzése

A 320. ábra. Ideális működésű reaktorokban kialakuló koncentrációprofil az ideális működésű reaktorokban kialakuló koncentrációviszonyokat szemlélteti. A *szakaszos üstreaktor* (angol kifejezéssel: *batch reactor*) és a *folyamatos csőreaktor* (*continuous tubular reactor*) működési elvét már a korábbiakban ismertettük. Kiegészítésképpen érdemes megemlíteni, hogy általában csőreaktornak nevezünk minden olyan folyamatosan működő reaktort, amelyben az egyik (vagy mindegyik) reaktáns állandó jelleggel halad egy adott - a cső tengelyével megegyező - térirányban és amelyben az áramlás irányában különböző pontokon elhelyezkedő fluidumelemek nem keverednek össze („*visszakeveredés mentes*” működési mód). A reaktor viselkedésének leírására első közelítésben tehát feltételezzük, hogy a fluidum „dugattyúszerű” áramlással halad (angolul „*piston flow*”, de használják a „*plug flow*”, azaz dugószerű áramlás kifejezést is). Homogén fázisú gáz- vagy folyadékreakciók lejátszatásakor a csőreaktor üres, csak a reagáló elegy halad rajta keresztül. Szilárd fázisú reakciók végrehajtására pl. *forgó csőkemencéket* is alkalmazhatunk.

Csőreaktorokat használunk sok nagyipari gáz- és folyadékreakció lejátszatására, de igen gyakori a heterogén katalitikus folyamatokban történő alkalmazás. Ilyenkor a reaktort megfelelően formázott szilárd katalizátorral töltjük meg; a töltet általában nem mozog, ez az *állóágyas reaktor*, de ismerünk a gravitáció hatására mozgó töltetet is, továbbmenőleg van olyan megoldás is, amikor a fluidumáram a reaktoron belül szállítja a katalizátort („*szállópor reaktor*”).



320. ábra. Ideális működésű reaktorokban kialakuló koncentrációprofil  
1: szakaszos üstreaktor; 2: csőreaktor; 3: tankreaktor; 4: reaktorkaszád

A folyamatos reaktorok másik képviselője a *kevert, folytonos tankreaktor* (angol kifejezéssel: *continuous stirred tank reactor, CSTR*) olyan tartály, amelybe folyamatosan lépnek be a reagáló anyagok, s ugyanilyen áramban, folyamatosan távozik a végtermék. illetve több sorba kapcsolt reaktornál, a reaktorkaszádnál (*cascade reactor*) a reakcióelegy az elsőből átlép a másodikba, harmadikba, stb., ahol esetleg más reakciókörülmények (hőmérséklet, nyomás) uralkodnak. A tankreaktorok alapvető jellemzője, hogy bennük a koncentráció időben és térben is állandó (eltekintve a „*felfutási*” periódustól), ennek következtében a reakciósebesség (és így a

hőtermelés sebessége) is állandó. Tehát ezek a berendezések jól szabályozhatóak; biztosítható az izoterm működés feltétele, ami sok szerves kémiai reakciónál (pl. halogénezés, szulfonálás, nitrálás vagy éppen a polimerizáció) alapvető jelentőségű. A reaktorkaszád esetén az egyik tartályból a másikba átlépve a reakcióelegy koncentrációja nem folyamatosan, hanem ugrásszerűen változik.

Az egyes anyagrészek tartózkodási ideje a tankreaktorban vagy a reaktorkaszádban természetesen nem azonos. A betáplált áramban lesznek olyan elemi térfogatok, amelyek a belépést követően azonnal kilépnek az első egységből, majd a másodikból, ...stb. is. A többiek azonban rövidebb-hosszabb időt töltenek el az egyes egységekben, azaz a *tartózkodási idő* statisztikai értelemben eloszlásfüggvénnyel írható le; az eloszlás bizonyos egyszerűbb esetekben számítható.

Megjegyzendő, hogy egyes eljárások szigorúan véve nem szakaszosak, vagy folytonosak, hanem „*félfolyamatos*” műveletnek tekinthetők. A penicillint például nagy fermentorokban gyártják, amit a termelés kezdetén mikroorganizmussal oltanak be. Megfelelő idő elteltével a fermentort kiürítik, és a fermentléből kinyerik a penicillint. Az eljárás így szakaszosnak tűnik; üzem közben azonban a fermentorba folyamatosan levegőt és tápoldatot (pl. cukrot) adagolnak, és folyamatosan eltávolítják a gáznemű melléktermékeket is.

**Termikus működés** alapján kétféle idealizált reaktortípust különböztetünk meg: az *izoterm*, illetve az *adiabatikus működésű* berendezéseket. Az **izoterm reaktort** az jellemzi, hogy az exoterm reakcióhő elvezetésére vagy az endoterm reakció hőszükségletének fedezésére hűtő- vagy fűtőfelületeket, elemeket építenek be. Az időben változó szakaszos reaktorban, illetve a csőreaktorban a tengely hossza mentén azonban, hiszen induláskor (a belépési ponton) nagy a reaktánskoncentráció, így nagy a reakciósebesség, és a hőtermelés sebessége is. Az idő vagy az áramlás előrehaladásával a reakciósebességgel együtt a hőtermelés sebessége is csökken, így csökkenteni kell az el- vagy az odavezetett hőt, ami nem egyszerű feladat, azaz az izoterm feltételek nehezen valósíthatók meg.

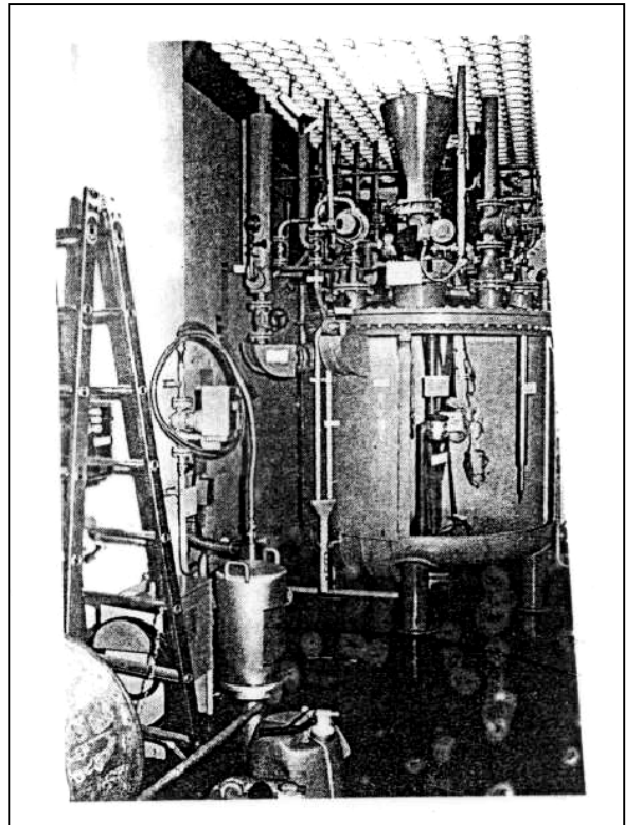
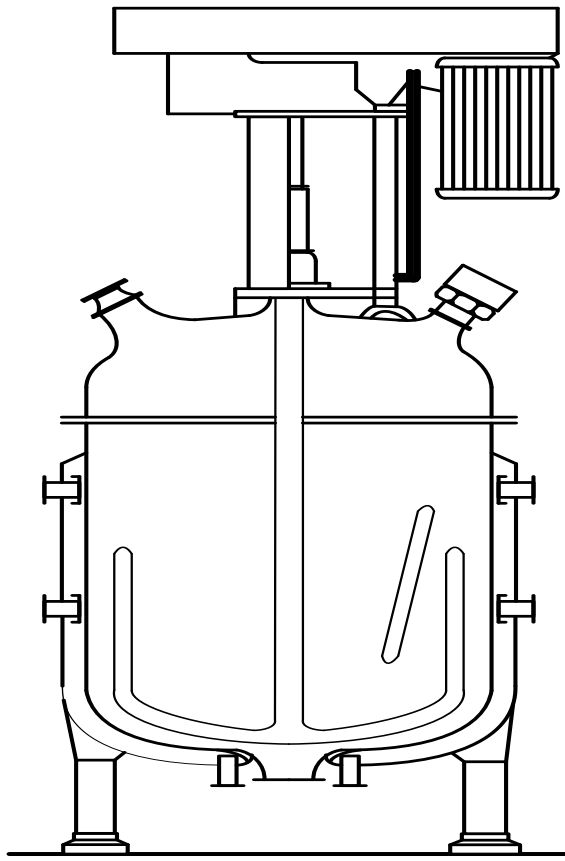
**Adiabatikus működés** esetén a reaktorba a reakció hőmérsékletére előmelegített anyagáramok lépnek be, de a továbbiakban hőátadás nincs, így a fejlődő exoterm reakcióhő hatására a reakcióelegy felmelegszik, míg endoterm reakció esetében lehűl. A valóságban a reaktorok rendszerint „*politrop*” üzemben működnek, ami azt jelenti, hogy a gyakorlatban sem az izoterm, sem az adiabatikus működés feltételeit nem sikerül teljes mértékben teljesíteni.

## A reaktorok anyag és energiamérlegei

A kémiai reaktorok leírásának és tervezésének alapvető kérdése, hogy milyen összefüggések alkalmasak a reaktorból távozó termékelegy mennyiségének és összetételének meghatározására, ha a betáplálás adatai és a reakciókörülmények ismertek. Mind a szakaszos, mind a folyamatos reaktorok *anyagmérlegének* felírásához az egyes komponensek *differenciális anyagmérleg egyenleteit* és az ismertnek feltételezett *reakciósebességi egyenleteket*, mint forrástagokat kell felhasználnunk.

A szakaszos működésű üstreaktor mérlegegyenletei

A szakaszos üzemű folyadék reakciók lejátszatosására legelterjedtebben hűtő- illetve fűtőelemekkel felszerelt keverős üstöt alkalmazhatjuk. A nagyobb nyomásra méretezett, zárt változatát az **autoklávot** a 321. ábra mutatjuk be.



321. ábra. Autokláv hosszmetsete és megjelenése

A szakaszos reaktorba a  $t_0 = 0$  időpontban tápláljuk be, a reakcióelegyét és ezzel indítjuk is a reakciót, majd annak lejátszódása után, azaz a  $t_R$  reakcióidő elteltével a termékelegyét eltávolítjuk. Ennek a reaktortípusnak fontos jellemzője, hogy zárt: a folyamat közben nincs betáplálás és elvétel, így a reagáló rendszer tömege és térfogata sem változik, azaz  $V_r = \text{állandó}$ .

Az ideális szakaszos reaktorra jellemző, hogy *tökéletesen kevert*, tehát a reakcióelegyben az intenzív paraméterek eloszlása egyenletes, azaz a koncentráció és a hőmérséklet egy adott időpontban az elegy minden pontján azonos. Homogén reaktánsanyag esetén fázisok közötti anyag- vagy hőátadás sem lép fel, így a mérlegegyenletek  $R$  számú független reakció lejátszódása esetén is egyszerűen felírhatók.

a) Komponensmérleg:

$$V_r \cdot \sum_{r=1}^R \nu_{r,j} \cdot w_r = V_r \cdot \frac{dc_j}{dt} \quad (10.1)$$

ahol  $c_j$  a  $j$ -edik komponens koncentrációja,  $\nu_{r,j}$  az adott komponens sztöchiometriai együtthatója az  $r$ -edik reakcióban, melynek sebessége  $w_r$ . Mivel a reaktor  $V_r$  térfogata állandó, következik:

$$\frac{dc_j}{dt} = \sum_{r=1}^R \nu_{r,j} \cdot \frac{dX_r}{dt} = \sum_{r=1}^R \nu_{r,j} \cdot w_r(X_1, \dots, X_R, c_1, \dots, c_K, T, p) \quad (10.2)$$

ahol  $X_r$  az  $r$ -edik reakcióra vonatkozó intenzív reakciókoordináta, és  $w_r$  a reakciósebességet leíró kinetikai egyenlet,  $T$  a reakcióelegy hőmérséklete, míg  $p$  a nyomása..

b) Entalpiamérleg:

$$\frac{\partial(\rho \cdot \bar{C}_p \cdot T)}{\partial t} = - \sum_{r=1}^R w_r \cdot \Delta H_{R,r}^o + \frac{q}{V_r} \quad (10.3)$$

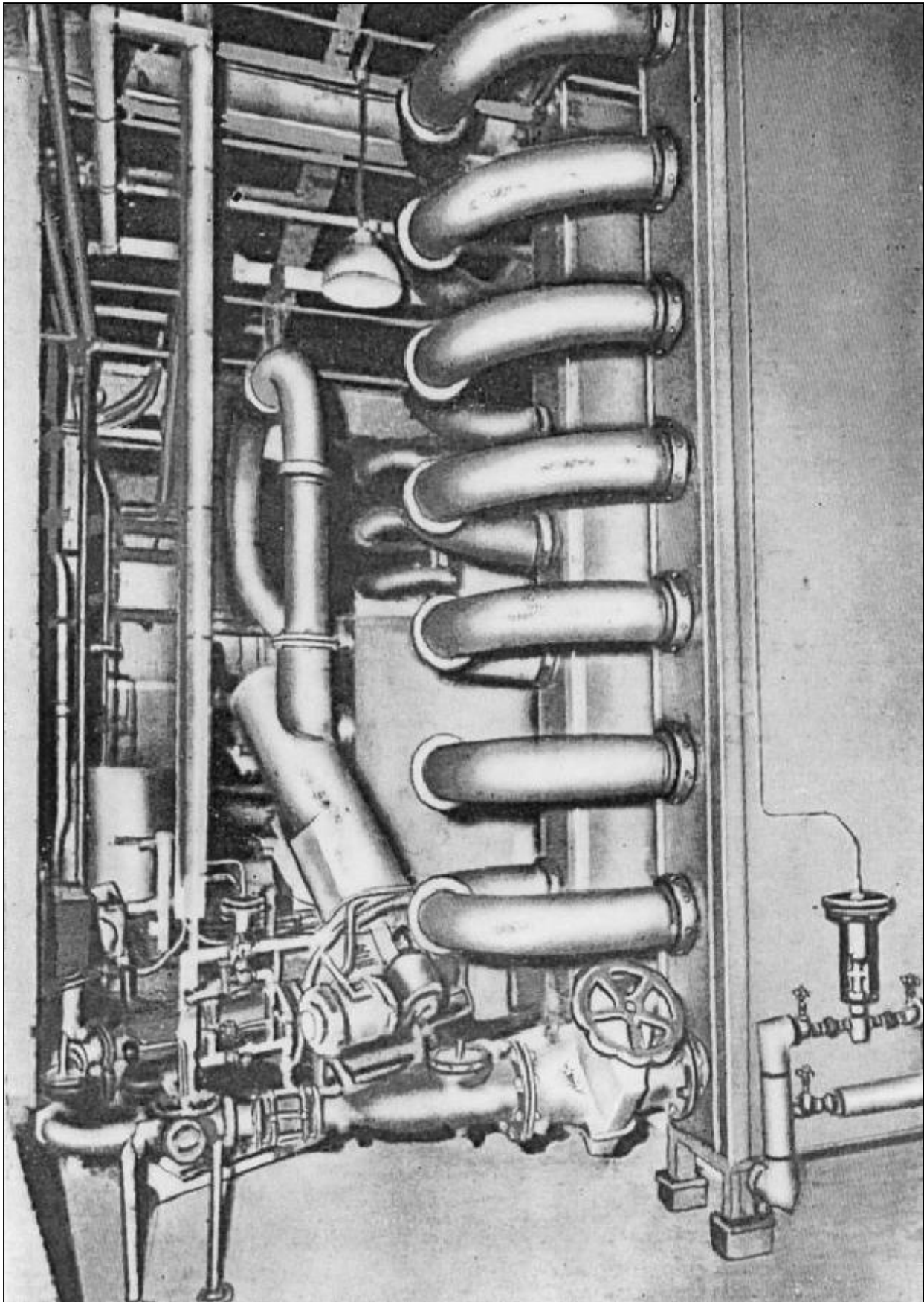
ahol  $\rho$  a reakcióelegy sűrűsége,  $\bar{C}_p$  az átlagos hőkapacitása,  $\Delta H_{R,r}^o$  az  $r$ -edik reakció standard reakcióentalpiája, míg  $q$  a reaktor fűtésére vagy hűtésre jellemző hőáram:

$$q = k \cdot A \cdot (T_k - T) \quad (10.4)$$

Itt  $k$  a hőátadási együttható,  $A$  a hőátadási felület, míg  $T_k$  a fűtő- vagy hűtőközeg átlagos hőmérséklete.

Ha ismerjük a  $w_r$  reakciósebességeket leíró kinetikai egyenleteket és a kezdeti feltételeket (koncentráció, hőmérséklet, nyomás), akkor a (10.2) és (10.3) egyenletek szimultán integrálásával tetszőleges  $t$  időpontra számíthatjuk az elegy összetételét és hőmérsékletét.





322. ábra. Folyamatos csőreaktor a gyakorlatban

## A folyamatos csőreaktorok anyag- és energiamérlege

A *csőreaktoron* (melynek egy lehetséges megoldását lásd a 3. ábrán) az anyagáram úgy halad keresztül, hogy közben nem keveredik. Ideális esetben minden térfogatelemnek a reakcióideje megegyezik az átlagos tartózkodási idővel. Ha az adott rendszerben megvalósítható a stacionárius, visszakeveredés-mentes *dugattyúáramlás*, akkor *ideális csőreaktorról* beszélhetünk (ez a feltétel a valóságban teljesen soha sem biztosítható). Ilyen körülmények között a lineáris sebesség (a  $z$  hosszkoordináta irányában) állandó, azaz:

$$u_{ax} = u(r) = \bar{u} = konst.$$

és a vezetési tényezők ( $D, \lambda$ ) értéke minden irányban 0. Ezeknek a feltételeknek a figyelembevételével a *csőreaktor differenciális komponensmérlege* a következőképpen írható fel:

$$- \operatorname{div}(\underline{u} \cdot c_j - D_j \cdot \operatorname{grad} c_j) + G_j = V_r \cdot \frac{dc_j}{dt} \quad (10.5)$$

Stacionárius esetben a koncentráció egy adott helyen időben állandó, az áramlás csak tengelyirányú, komponensforrásként pedig csak a kémiai reakció vehető figyelembe:

$$G_j = \sum_{r=1}^R \nu_{r,j} \cdot w_r \quad (10.6)$$

Ennek következtében a (105) egyenlet a következőképpen írható fel:

$$- A \cdot \bar{u} \cdot dz \cdot \frac{dc_j}{dz} + A \cdot dz \cdot \sum_{r=1}^R \nu_{r,j} \cdot w_r = 0 \quad (10.7)$$

1 reakció lejátszódása esetén (10.7) egyszerűsödik:

$$- \bar{u} \cdot \frac{dc_j}{dz} + \nu_j \cdot w_r = 0 \quad (10.8)$$

A megfelelő kezdet és peremfeltételek:  $z=0 \rightarrow c_j = c_j^o$  ill.  $z=L \rightarrow c_j = c_j^L$  megadásával (10.8) integrálható, miáltal meghatározhatók a  $c_j(z)$  koncentrációprofilok a hossz mentén:

$$\int_{c_j^o}^{c_j^L} \frac{dc_j}{\nu_j \cdot w_r(X, c_j, T)} = \int_0^L \frac{dz}{\bar{u}} = \frac{1}{\bar{u}} \cdot \int_0^L dz = \frac{L}{\bar{u}} = \bar{t} \quad (10.9)$$

Ha a rendszerben  $R$  számú független reakció játszódik le, (10.9) a következők szerint módosul:

$$\int_{c_j^o}^{c_j^t} \frac{dc_j}{\sum_{r=1}^R v_{r,j} \cdot w_r(X_r, c_j, T)} = \int_0^L \frac{dz}{\bar{u}} = \frac{L}{\bar{u}} = \bar{t} \quad (10.10)$$

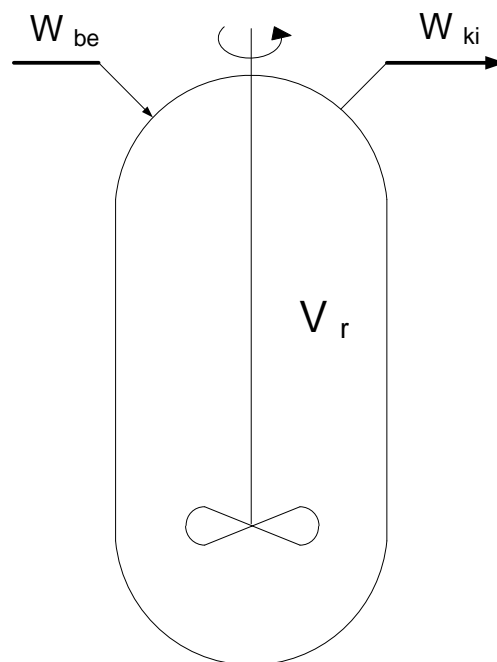
Mivel a tartózkodási idő:  $\bar{t} = \frac{V_r}{w} = \frac{L \cdot A}{\bar{u} \cdot A} = \frac{L}{\bar{u}}$ , bizonyítható, hogy a tartózkodási időre, mint független változóra átírva ugyanazokat az egyenleteket kapjuk, mint a szakaszos üstreaktor esetén.

A csőreaktorok entalpiamérlege is felírható:

$$\rho_m \cdot \bar{u} \cdot \bar{C}_p \cdot \frac{dT}{dz} = \sum_{r=1}^R (-\Delta H_r^0) \cdot w_r + k \cdot A \cdot (T_k - T) \quad (10.11)$$

## A folyamatos tankreaktor anyag- és energiamérlege

A reaktor legyen  $V_R$  térfogatú tartály, melybe a kiindulási elegyet  $w_{be}$  térfogatáramlási sebességgel tápláljuk be és ugyanolyan  $w_{ki}$  sebességgel vesszük el a terméket.



323. ábra. Folyamatos tankreaktor működési elve

Az anyagmérleg egyenlet felírásához tételezzük föl, hogy a reaktort a  $t = 0$  időpontban pillanatszerűen feltöltjük a betáplálásnak megfelelő összetételű eleggyel, majd megkezdjük a folyamatos betáplálást, valamint a termékelvezetést. Így a  $j$ -edik komponens (differenciális) anyagmérlege:

$$w_{be} \cdot c_j^o - w_{ki} \cdot c_j + V_r \cdot \sum_{r=1}^R v_{j,r} \cdot w_r = V_r \cdot \frac{dc_j}{dt} \quad (10.12)$$

ahol  $c_j$  a  $j$ -edik komponens koncentrációja a reaktorban és a kilépő elegyben, míg  $c_j^o$  ugyanezen komponens belépési koncentrációja.

Ha felhasználjuk, hogy  $\bar{t} = \frac{V}{w}$  és  $c_j = c_j^o + \sum_{r=1}^R v_{j,r} \cdot X_r$ , akkor (10.12)-ből némi egyszerűsítés után a következő kifejezést kapjuk:

$$\sum_{r=1}^R v_{j,r} \cdot \left( X_r - \bar{t} \cdot w_r + \bar{t} \cdot \frac{dX_r}{dt} \right) = 0 \quad (10.13)$$

Tekintettel arra, hogy a  $v_{j,r}$  mennyiségek a független reakciók sztöchiometriai együtthatói, tehát értékük 0-tól eltérő. Ennek következtében a (10.13) egyenlet csak akkor lehet nulla, ha a zárójelben szereplő kifejezés nullával egyenlő. tehát:

$$-X_r + \bar{t} \cdot w_r (X_1 \dots X_r, c_1 \dots c_K, T) = \bar{t} \cdot \frac{dX_r}{dt} \quad (10.14)$$

Ha a reaktor stacionárius üzemmódban működik, azaz  $\frac{dX_r}{dt} = 0$ , akkor a (10.14) differenciál-egyenletrendszer a következő algebrai egyenletrendszerre redukálódik:

$$-X_r + \bar{t} \cdot w_r (X_1 \dots X_r, c_1 \dots c_K, T) = 0 \quad (10.15)$$

vagy koncentrációkkal kifejezve:

$$c_j^o - c_j + \bar{t} \cdot \sum_{r=1}^R v_{j,r} \cdot w_r = 0 \quad (10.16)$$

Így a  $w_r$ -re megadható reakciósebességi egyenletek (és a betáplálási adatok) ismeretében a (10.15) vagy a (10.16) összefüggések alapján meghatározható az egyes komponensek koncentrációja a kilépő áramban, tehát számítható a konverzió, a termékek mennyisége és hozama, valamint szelektivitása is. Nagy könnyebbség, hogy a többi reaktortípustól eltérően - itt csak egyszerű algebrai egyenleteket kell megoldanunk, differenciálegyenletek helyett.

Az **entalpiamérleg** felírásához figyelembe kell vennünk a reaktorba belépő, illetve az abból kilépő hőáramokat:  $w \cdot \sum_j c_j^o \cdot H_j(T_{be})$ , illetve  $w \cdot \sum_j c_j \cdot H_j(T_{ki})$ , továbbá a  $q$  külső hőcserét.

$$w \cdot \sum_j c_j^o \cdot H_j(T_{be}) - w \cdot \sum_j c_j \cdot H_j(T_{ki}) + q = \frac{d}{dt} \cdot V_r \cdot \sum_j c_j \cdot H_j(T) \quad (10.17)$$

rendezve:

$$\sum_j c_j^o \cdot H_j(T_{be}) - \sum_j c_j \cdot H_j(T_{ki}) + \frac{q}{w} = \bar{t} \cdot \frac{d}{dt} \cdot \sum_j c_j \cdot H_j(T) \quad (10.18)$$

A (10.18) egyenlet oldalán végezzük el a szorzatok deriválását az összegzésen belül:

$$\bar{t} \cdot \frac{d}{dt} \cdot \sum_{j=1}^K c_j \cdot H_j = \bar{t} \cdot \sum_{j=1}^K \frac{dc_j}{dt} \cdot H_j + \bar{t} \cdot \sum_{j=1}^K c_j \cdot \left[ \sum_{k=1}^K \frac{\partial H_j}{\partial c_k} \cdot \frac{dc_k}{dt} + \frac{\partial H_j}{\partial T} \cdot \frac{dT}{dt} \right] \quad (10.19)$$

Mivel  $\sum_j c_j \cdot \frac{\partial H_j}{\partial c_k} = 0$ , ezek a tényezők az összegzés sorrendjének felcserélésével kiesnek. Tudjuk továbbá, hogy  $\frac{\partial H_j}{\partial T} = C_{p,j}$  és  $\sum_j \frac{\partial H_j}{\partial T} = \bar{C}_p$ . Ha mindezeket figyelembe vesszük, az anyagmérleg felhasználásával megkaphatjuk az entalpiamérleget:

$$\sum_{j=1}^K c_j^o \cdot [H_j(T_{be}) - H_j(T)] + \frac{q}{w} = \bar{t} \cdot \sum_{r=1}^R \Delta H_r^0 \cdot w_r + \bar{t} \cdot \bar{C}_p \cdot \frac{dT}{dt} \quad (10.20)$$

A (10.16) és (10.20) egyenletek szimultán megoldásával, ismerve a belépő áram koncentráció és hőmérséklet paramétereit, illetve a hőcsere jellemző adatait, számítani tudjuk a reaktorból kilépési értékeit. A feladat viszont általában az, hogy határozzuk meg az adott konverzió eléréséhez szükséges átlagos tartózkodási időt, ami a reaktor térfogatának és az áramlási sebességnek a hányadosa. Ha egy adott méretű berendezés áll rendelkezésünkre, akkor az áramlási sebességet, míg adott termelés esetén a szükséges reaktortérfogatot - mint tervezési paramétert - kell meghatároznunk.

## A folyamatos reaktorkaszád anyagmérlege

Az  $S$  számú tankreaktor sorbakapcsolásával előálló *reaktorkaszádra* érvényes komponensmérleg-egyenleteket egyszerűen felírhatjuk, hiszen az  $(s)$  sorszámú reaktor betáplálása az  $(s - 1)$  sorszámú reaktor kilépő árama, azaz a kaszád elemeire a (10.15) összefüggés érvényes, ha a benne szereplő mennyiségeket a reaktor sorszámára utaló index-szel látjuk el:

$$c_{j,s-1} - c_{j,s} + \bar{t}_s \cdot \sum_{r=1}^R v_{j,r} \cdot w_{r,s} (c_{1,s} \dots c_{K,s}, X_{1,s} \dots X_{r,s}, T_s) = \bar{t}_s \cdot \frac{dc_{j,s}}{dt} \quad (10.21)$$

A (10.21) egyenletek egy algebrai egyenletrendszer képviselnek, ami a vonatkozó reakciósebességi egyenletek felhasználásával az  $X_{r,s}$  reakciókoordinátákra, illetve a  $c_{j,s}$  koncentrációkra megoldható. A megoldás *rekurzív* módon végezhető el, mivel az  $s$ -edik reaktorra kapott eredményt kell felhasználnunk a következő,  $(s + 1)$  sorszámú reaktor anyagmérlegének számítására.

Az eddig elmondottakból nem derül ki, hogy milyen előnyei vannak a reaktorkaszádnak egyetlen tankreaktorral szemben. A kémiai reakciók lejátszatásakor - főleg napjainkban, a „zöld kémia” elveit tekintve - lehetőleg nagy konverzió elérésére törekszünk, hiszen így csökken a potenciális hulladékot jelentő el

nem reagált kiindulási anyag. Nagy konverzió esetén azonban a reaktánsok koncentrációja kicsi, ami a reakciósebesség jelentős csökkenését eredményezi. Így az adott cél eléréséhez nagy tartózkodási idő szükséges, ami adott termelést tekintve csak a reaktor méreteinek növelésével érhető el. A térfogatnövelés mértéke kisebb lesz, ha több tankreatort kapcsolunk sorba, amelyekben a koncentráció lépcsőzetesen változik, hiszen az első elemekben nagy reaktánskoncentráció mellett gyors reakció játszódik le, amihez kisebb tartózkodási idő is elegendő. El kell azonban mondanunk, hogy az egységnyi termeléshez szükséges reaktortérfogat még így is nagyobb lesz, mint amekkora a szakaszos reaktor alkalmazásakor szükséges (az ürítési és újratöltési időtől eltekintve), vagy amekkorát egy dugattyúáramlású csőreaktor megkövetel.

A kevert, folyamatos tankreaktorok nagyobb térfogata következtében felmerülő többlet beruházási költség ritkán jelentős. Ezeket a reaktorokat leggyakrabban atmoszférikus nyomáson lejátszódó folyadékfázisú reakciókhoz használják. Az ilyen folyamatok esetén a térfogati kapacitás biztosítása a teljes költségeknek csak elenyésző hányadát jelenti. Ha többemű reaktorkaszkádot alkalmazunk, akkor csökkenthetjük a reaktor össztérfogatát, de a költségek erőteljesen növekednek, mert a kaszkád árát alapvetően nem a tartályok falának acélszükséglete, hanem a csőcsonkok, keverők, mérő- és szabályozóelemek számának megsokszorozódása határozza meg, azaz növeli jelentős mértékben. Nem közömbös viszont, hogy a reaktorkaszkad alkalmazásánál - a folyamatos működésen felül - további előnyök is jelentkezhetnek: a reakció kinetikájának, a mellékreakciók fellépésének függvényében ugyanis kaszkádelemenként külön-külön válsztható meg az optimális tartózkodási idő, hőmérséklet, nyomás, esetenként a reaktánsbetáplálási pont, stb. Annak meghatározása pedig, hogy hány tankreaktor sorbakapcsolása jelenti az optimális megoldást, a tervezői művészet részét képezi, ennek részletei messze túlnyúlnak jelen jegyzet tematikáján.

## A gyakorlatban használt reaktorok fő típusai

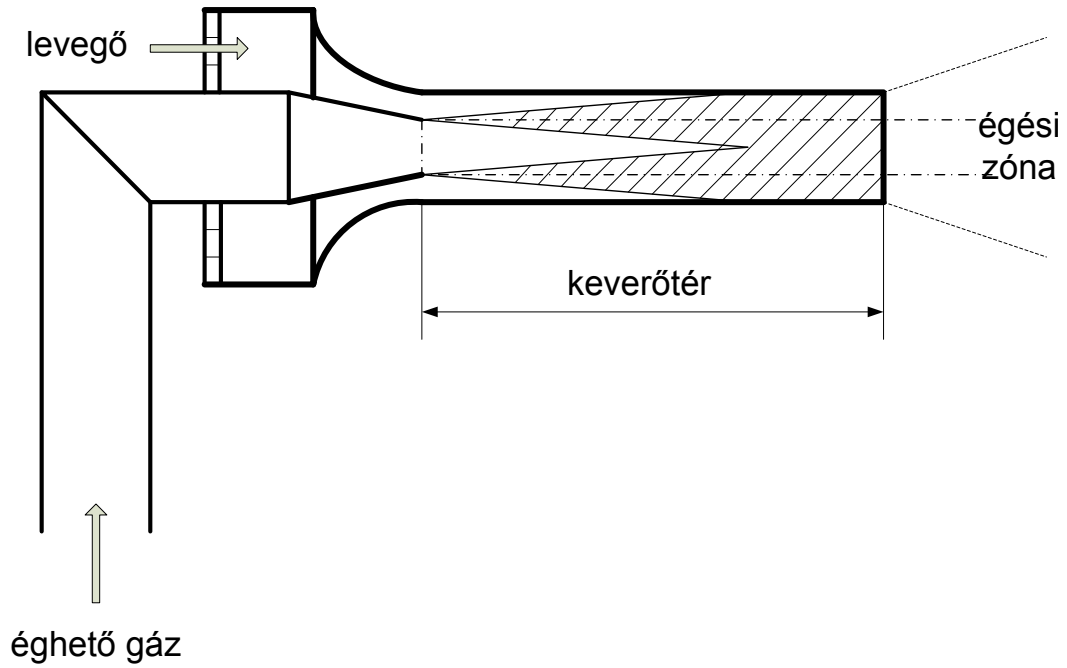
A reaktorok elvi működésén túl, a kémiai technológiában fontos annak ismerete is, hogy az egyes reakciók megvalósítására milyen konkrét berendezések használhatók, ezért a következőkben ezekből mutatunk be néhányat.

Az exoterm gázreakciók (égések) nagy részét energiatermelésre használják, például földgáz égetése a 324. ábralátható gázégőben, ami kényegében egy sugárkeverő, s a belépő gáz nyomásának figyelembevételével szabályozható a szűkítőnyílás átmérője, ezáltal viszont beállítható az optimális földgáz(üzemanyag):levegő arány, ami lehetővé teszi az energetikai szempontból jelentős maximális láng hőmérséklet elérését.

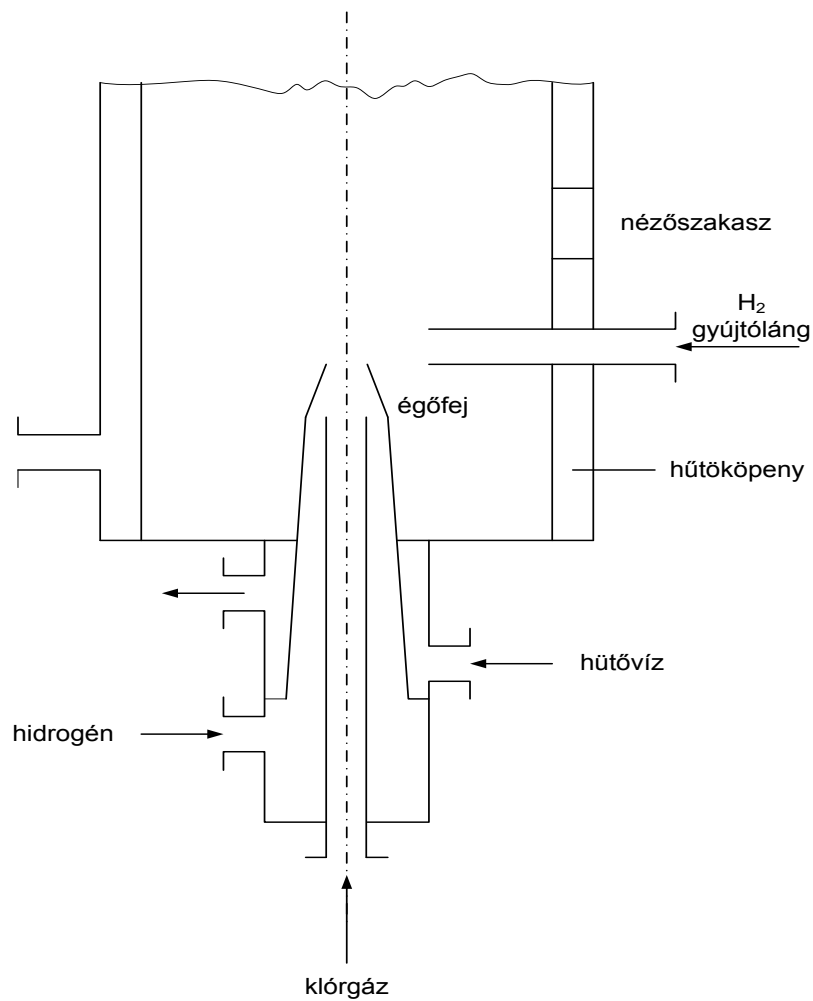
Hasonló elven működik a 325. ábra látható reaktor is, amelyet a sósavgáz szintézisére, vagy a metán parciális oxidációjára használnak. Ezek kialakításánál nagyon fontos szabály, hogy a gázok áramlási sebessége nagyobb legyen, mint az égés sebessége, hogy visszaégésből eredő robbanás ne következhesen be.

Az endoterm gázreakciók (szénhidrogének átalakítása, krakkolás) elősegítéséhez szükséges hő közlése általában csökemencében történik (326. ábra), és a reakció lejátszódása után vízgőz adagolással (kvencselés) hűtik le a terméket a további reakciók (pl. szénkiválás) megakadályozására.

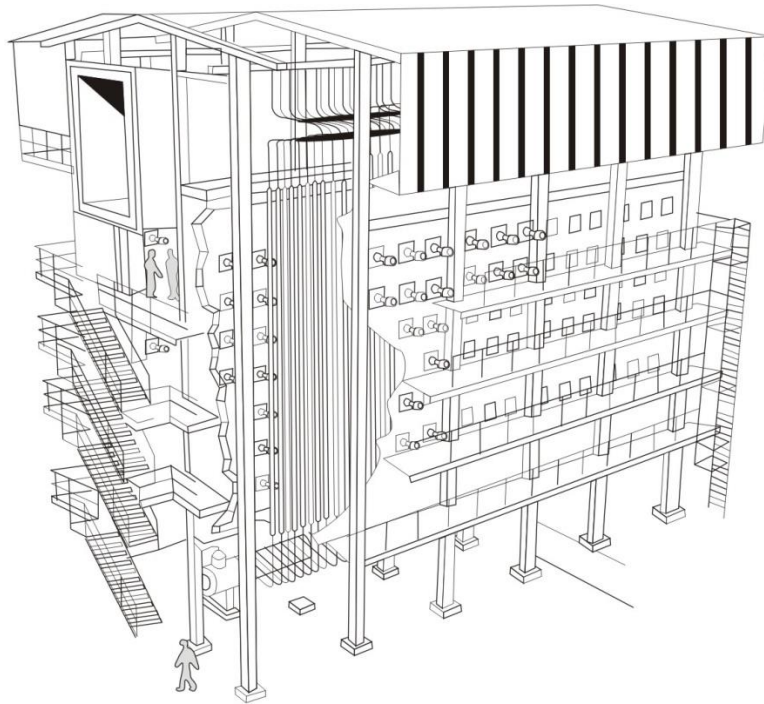
A bontáshoz szükséges hő külső fűtéssel (327. ábra) vagy elektromos ív felhasználásával is előállítható (327. ábra), így nyerhetünk földgázból (vagy bármilyen más szénhidrogénből) acetilént; a hőátadási feltételek jelentősen növelhetők hidrogén jelenlétében (327. ábra).



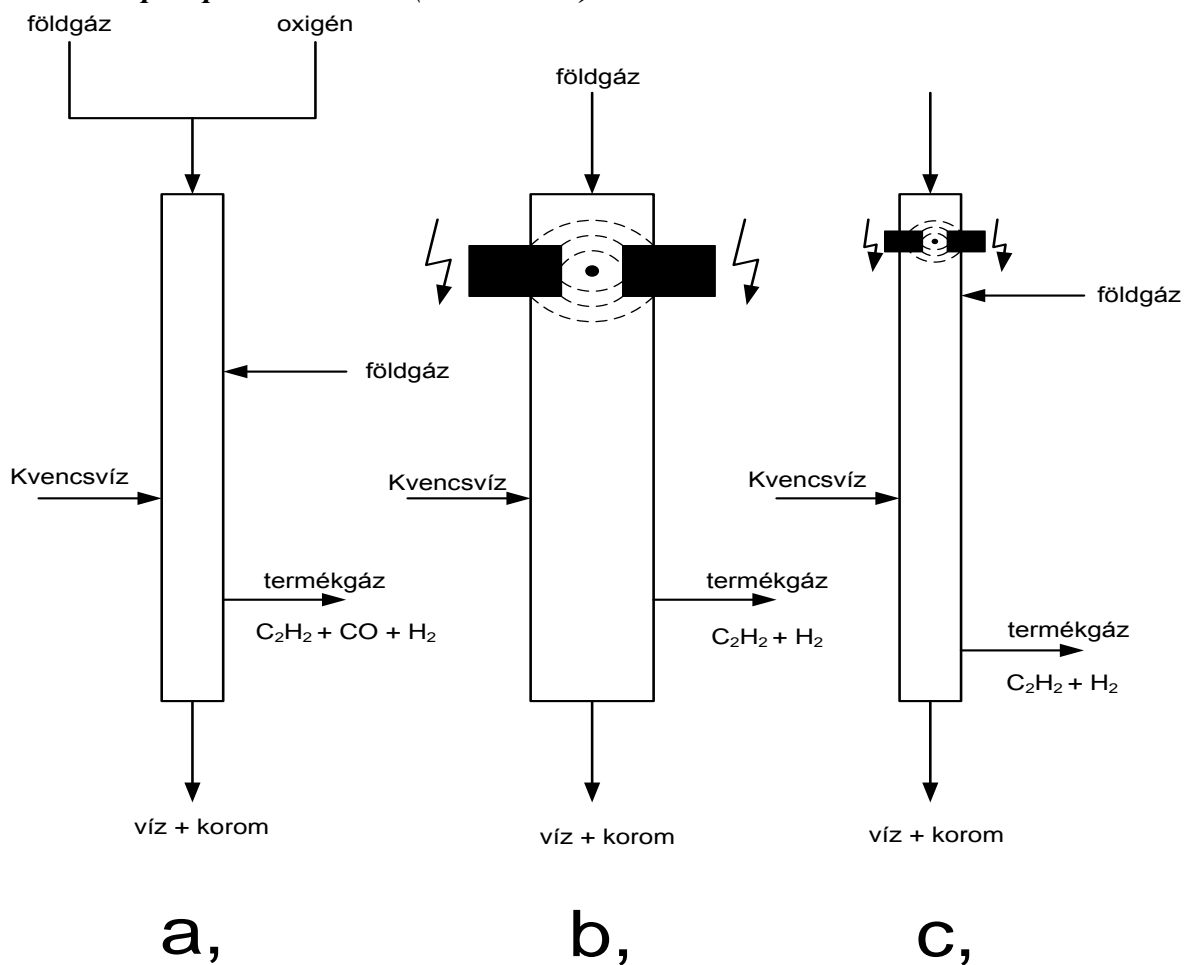
324. ábra. Gázégő kialakítása



325. ábra. HCl gáz előállításra szolgáló reaktor



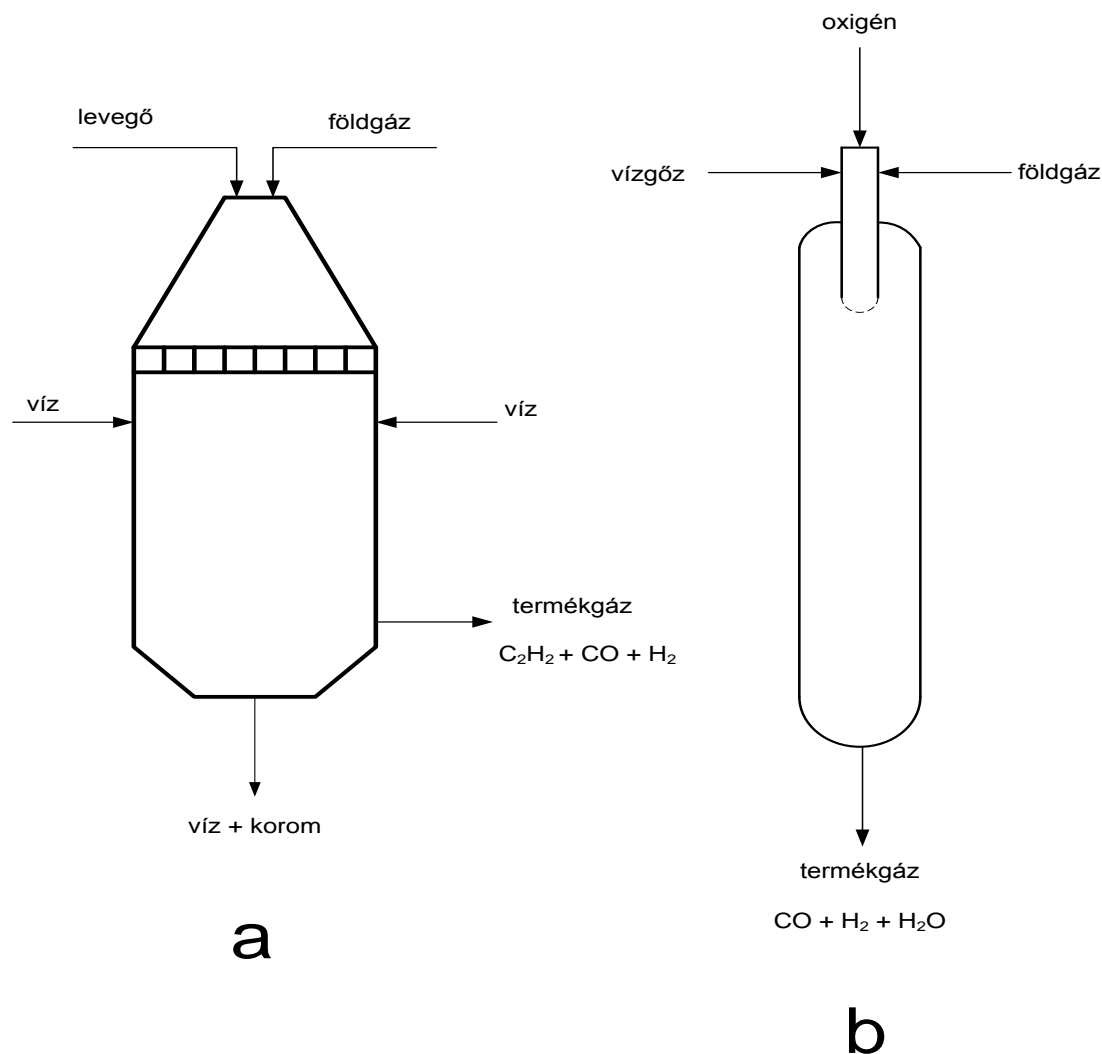
326. ábra. Ipari pirolízisreaktor (csőkemence)



327. ábra. Homogén, endoterm gázreakciók ipari megvalósítása  
a) magas hőmérsékletű pirolízis, b) elektromos ív, c) hidrogén elektromos ív



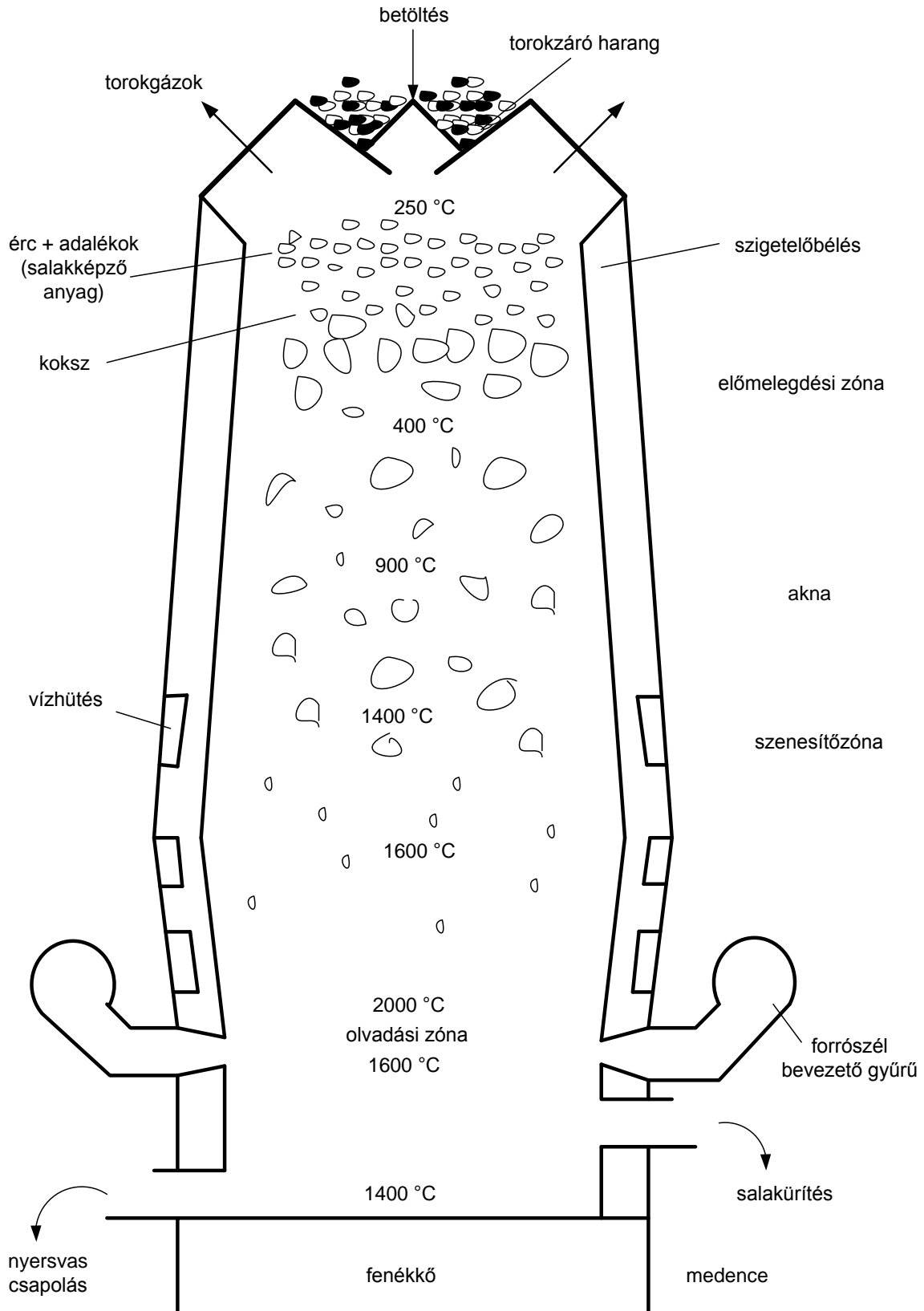
Az **autoterm** reaktorokban exoterm és endoterm folyamatok játszódnak le egyidőben, és az exoterm reakcióhő fedezi az endoterm folyamat hőszükségletét. Ilyen például az (napjainkra már csökkent jelentőségű) acetilén előállítása földgázból, amely során a földgáz egyidejű oxidációja biztosítja a bomláshoz szükséges hőmennyiséget (328. ábra). Hasonló technológiával, de alacsonyabb hőmérsékleten vízgőz adagolással szintézisgáz állítható elő. A metán, az oxigén és a vízgőz arányának szabályozásával stacionárius láng- és reaktorhőmérséklet állítható be.



328. ábra. Homogén gázreakciók autoterm megvalósítása  
a) acetiléngyártás SACHSEE- eljárással, b) szintézisgáz előállítás

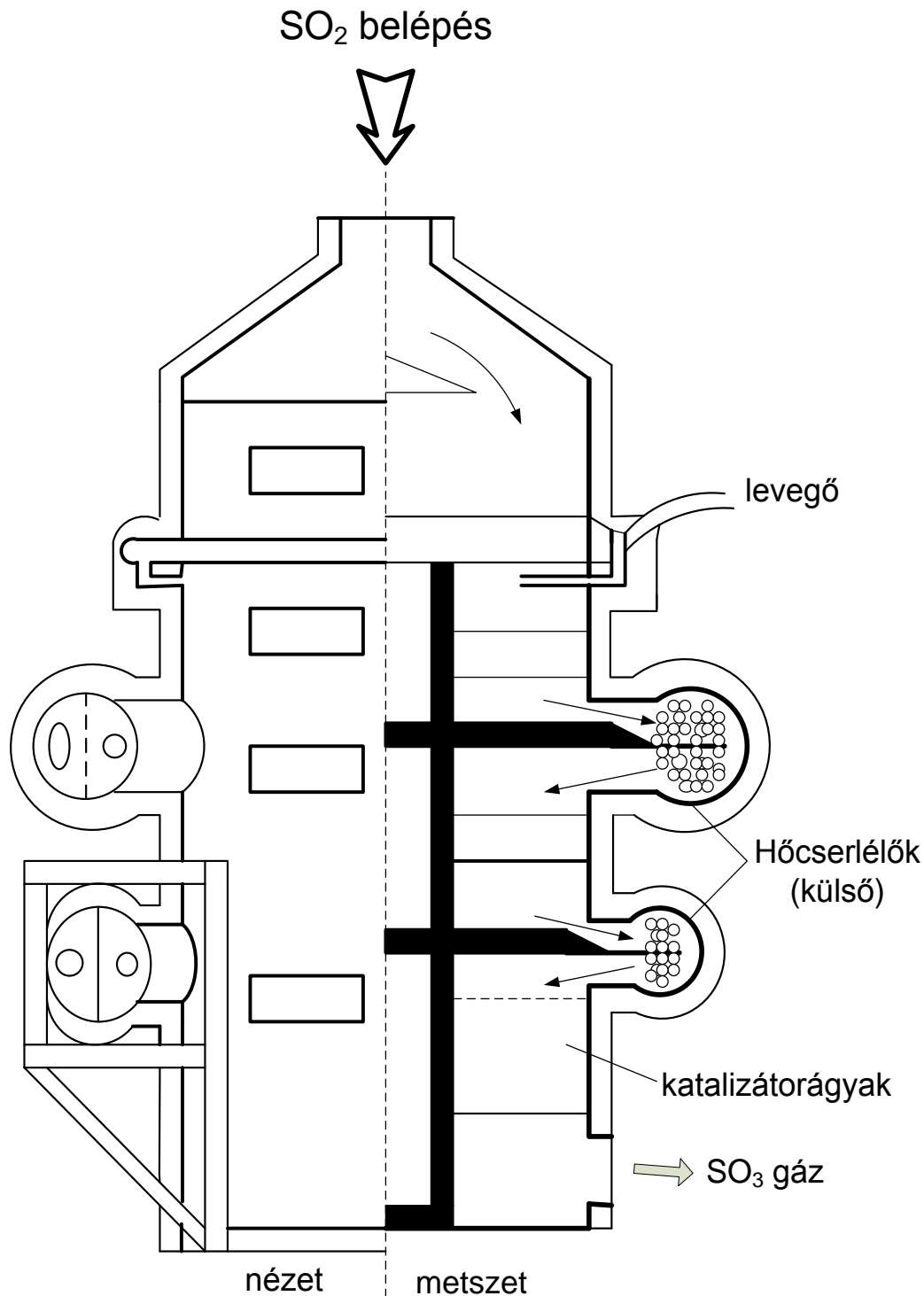
A gáz-szilárd reakciók keretében tárgyaljuk egyrészt azokat a reakciókat és megvalósítási lehetőségeiket, amelyekben az egyik reaktáns gáz, a másik szilárd fázisú, másrészt pedig azokat a gázreakciókat, amelyek valamilyen szilárd katalizátor felületén, azzal „kontaktusban” játszódnak le (kontakt, vagy heterogén katalízis). A gáz-szilárd fázisú reakciók végrehajtásának berendezései közül legfontosabbak az ún. kohó típusú reaktorok (329. ábra), amelyek több méter átmérőjű és több tíz méter magasságú készülékek. A kohóba fölülről adagolják be a szilárd reaktánsokat (szakaszosan vagy folyamatosan), alul pedig a gázbevezetés történik (ami többnyire

oxigén vagy levegő). Ilyen berendezéseket használnak többek között a vasérc feldolgozására, a mészégetésre, vagy a szénelgázosításra (generátorokban).

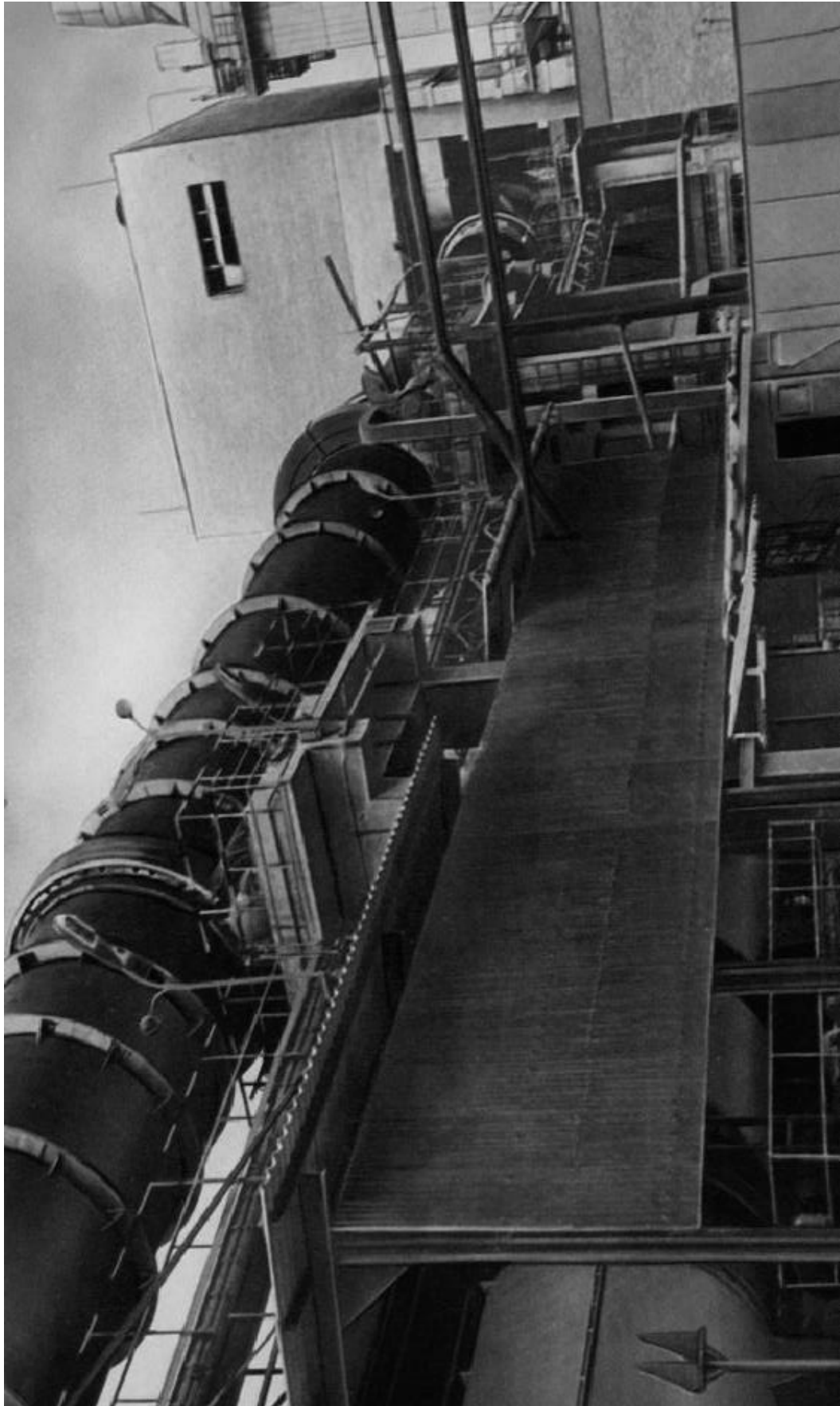


329. ábra. Nagykohó típusú reaktor

A gáz-szilárd reakciók lejátszására elterjedten használják a 330. ábra látható etázs-kemencét (pl. pirit, vagy más szulfidos ércek pörkölése), vagy a 331. ábra bemutatott forgó csőkemencét: cementgyártás, timföld előállítása, hulladékégetés. Az etázsreaktor heterogén katalitikus reakciók megvalósítására is alkalmazható. Ilyen lehet az  $\text{SO}_2$  oxidációja vanádium-pentoxid katalizátoron. A katalizátort több tálcán (etázs) helyezik el, és a szintek közötti hőcserélőkkel, vagy az egyes szintekre a hideg, kiindulási gázelegy külön-külön történő bevezetésével tudják biztosítani a reaktor optimális hőmérsékletét.

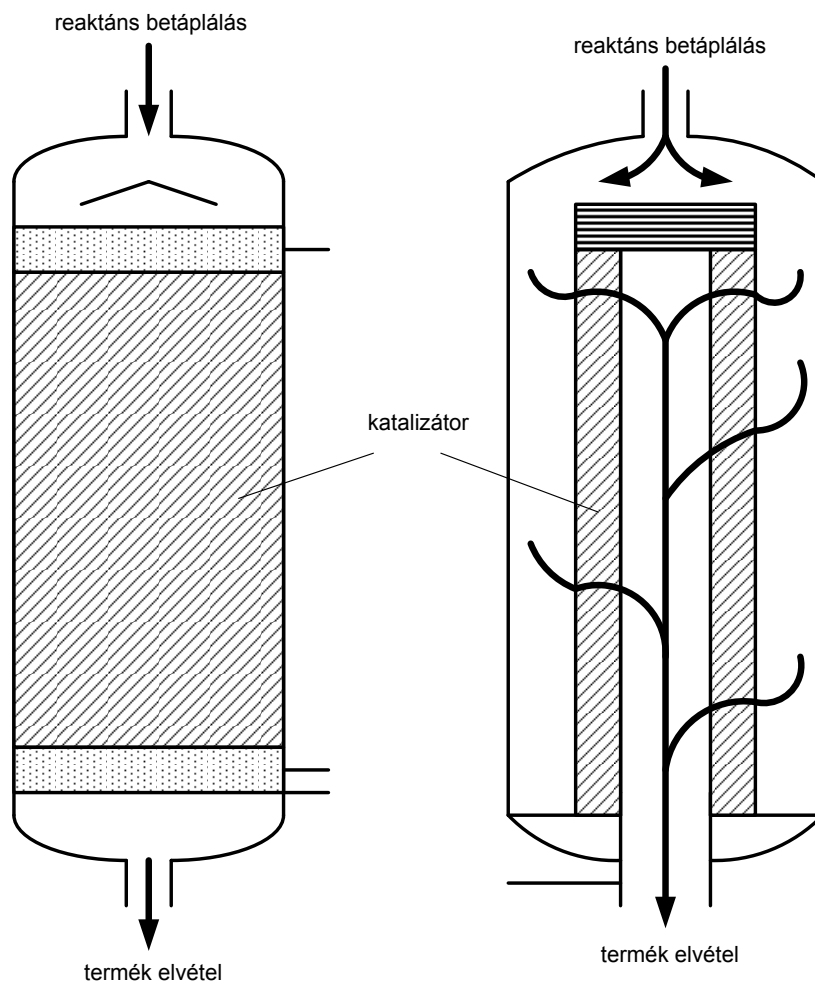


330. ábra. Etázsreaktor külső hűtéssel



*331. ábra. Timföldgyári forgó csőkemence*

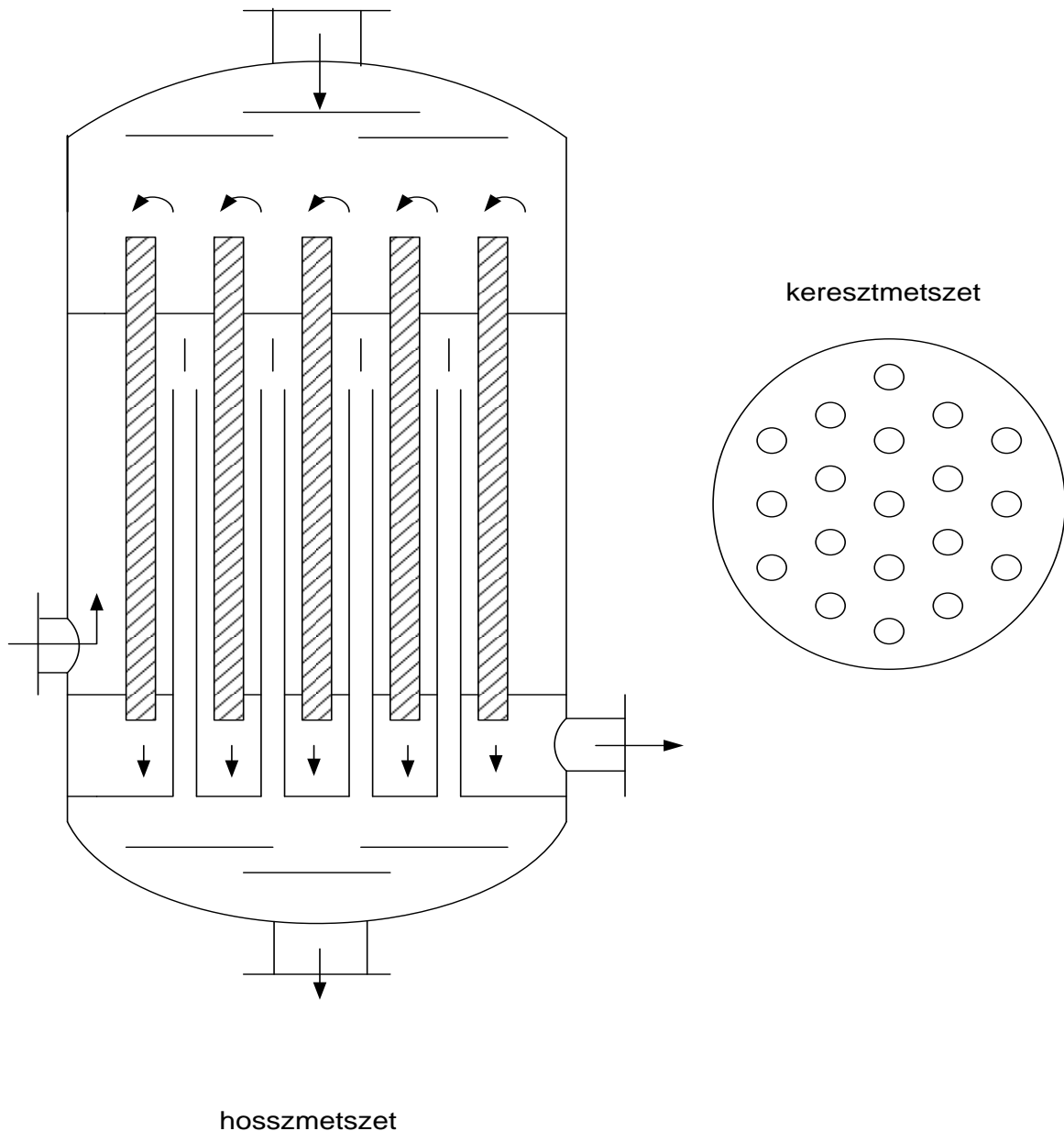
A környezetvédelmi technológiában, csakúgy, mint a vegyipari termelésben a heterogén katalitikus gázreakciók jelentik a meghatározó hányadot. Ide tartoznak a katalitikus hidrogénezési eljárások (kőolajszármazékok kénmentesítése, Fischer-Tropsch-szintézis) oxidációs reakciók (a kén-dioxid konverziója kén-trioxiddá, az ammónia átalakítása NO-vá, a szénhidrogének szelektív oxidációja), az ammónia- és a metanol-szintézis, a katalitikus krakkolás, reformálás, izomerizáció, stb.



**332. ábra. Állógyas reaktor heterogén katalitikus reakciók megvalósítására a) axiális áramlás, b) radiális áramlás**

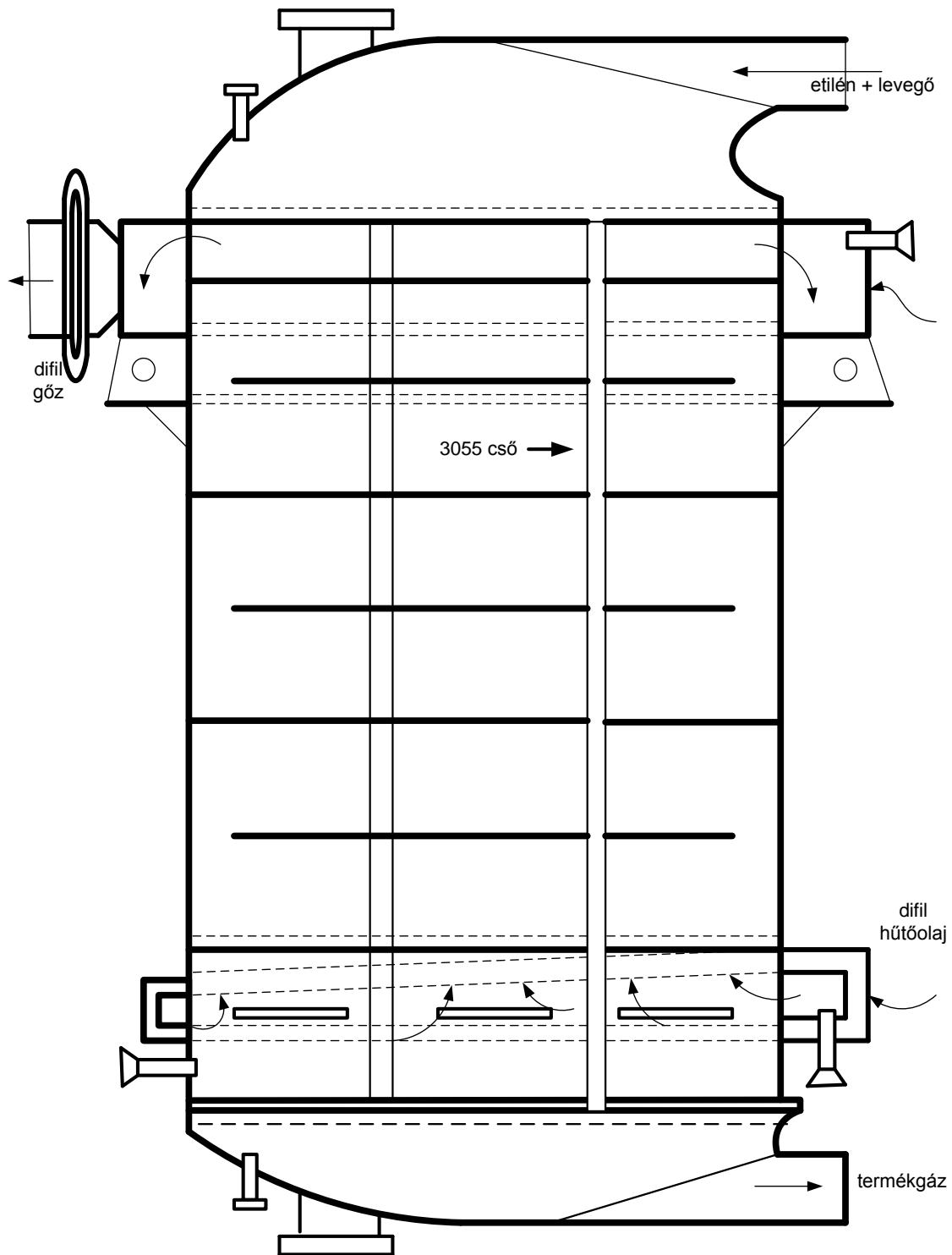
A heterogén katalitikus reakciók (amelyek szintén exoterm, vagy endoterm hőszínezetűek lehetnek) reaktorai közül elsőként a 332. ábra látható állógyas reaktort mutatjuk be, amely olyan esetekben használható, ha a reakció hőeffektusa nem jelentős; ilyenek lehetnek a szénhidrogénipari izomerizációs, reformálási vagy kéntelenítési eljárások. A régebbi megoldásoknál kizárólagosan a 332. ábra látható axiális áramlást alkalmazták, újabban - elsősorban a folyamatos reformálásban - jelentős szerephez jutott a radiális megoldás (332. ábra) is.

A jelentős mértékű hőtermeléssel (exoterm) vagy hőelvonással (endoterm) kísért heterogén katalitikus reakciók esetére a 333. ábra látható csököteges, állógyas reaktort említjük, ahol a csövekben helyezik el katalizátort, s a csövek közötti térben fűtő- vagy hűtőközeg áramoltatható a szükséges hőmérséklet biztosítására.



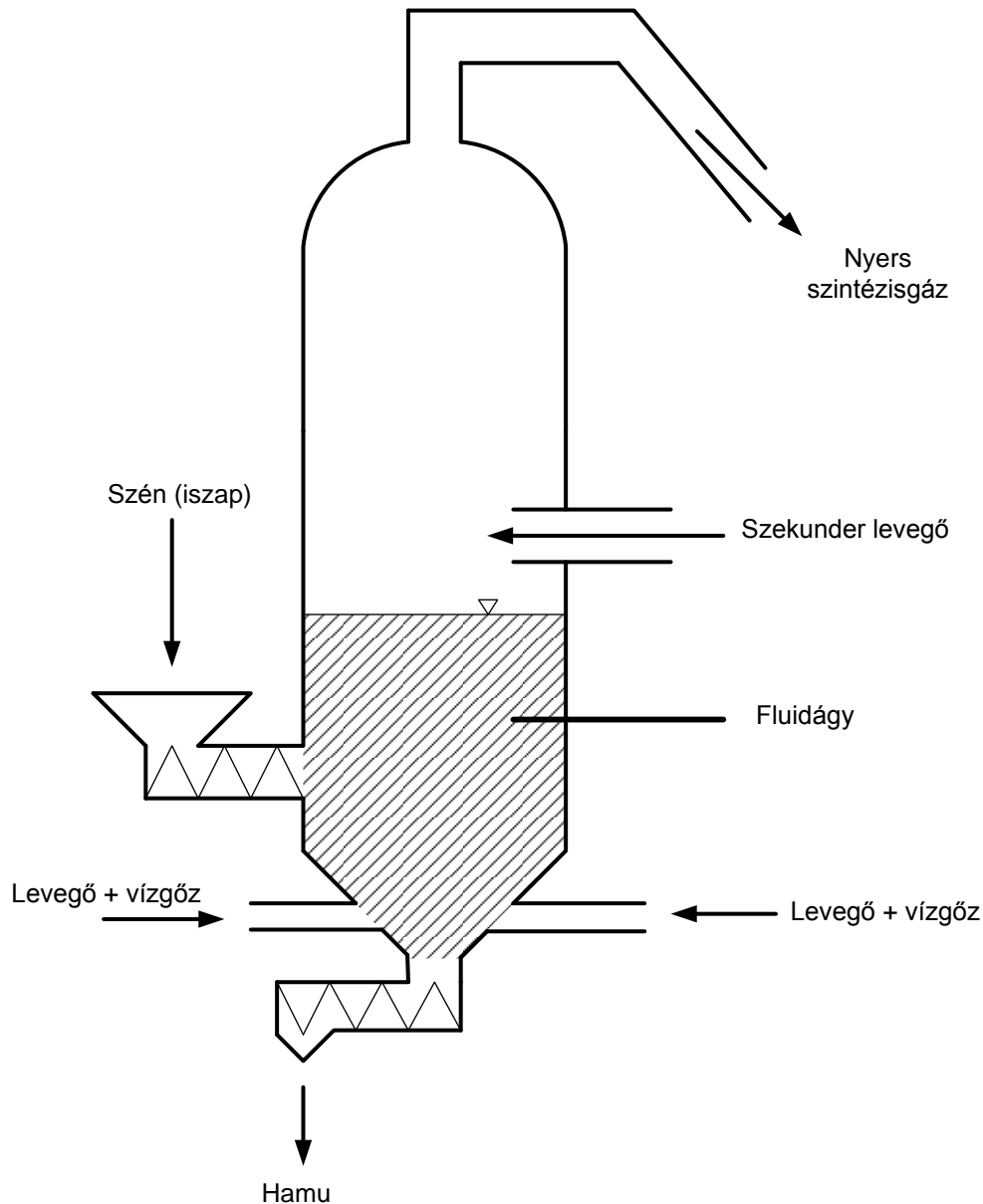
**333. ábra. Csőköteges reaktor heterogén katalitikus reakciók megvalósítására**

Szelektív oxidációs reakciók a legtöbb esetben csak igen szűk hőmérséklettartományban valósíthatók meg, ilyenkor alapvető jelentőségű az exoterm reakcióhő elvezetése adott hőmérsékleten. Ezen folyamatok közé tartozik az etilén etilénoxiddá történő átalakítása, ezüst katalizátoron, 260 °C hőmérsékleten. A reakciót a 334. ábra látható csőköteges reaktorban valósítják meg, ami 3055 párhuzamos csőben tartalmazza a színezüst katalizátor szemcséket. A reaktortartályt 260 °C forráspontú difenil-difeniloxid eleggyel töltik meg, ami állandó forrásban van, így tartható a szükséges hőmérséklet.



334. ábra. Az etilénoxid előállítására alkalmazott reaktor

A szilárd/gáz heterogén reakciók megvalósítására alkalmazott **fluidizációs** berendezések, illetve eljárások közé tartoznak a különböző kalcinálási, égetési technológiák, így a fluidizációs mészegetés, vagy a szulfidos ércek (elsősorban pirit) pörkölése, de a legfontosabbak közé tartoznak a *Winkler*-féle szénelgázosítás generátorai (335. ábra), továbbá a szénerőművekben, illetőleg a hulladékégetésben alkalmazott *fluidágyas kemencék* (336. ábra).



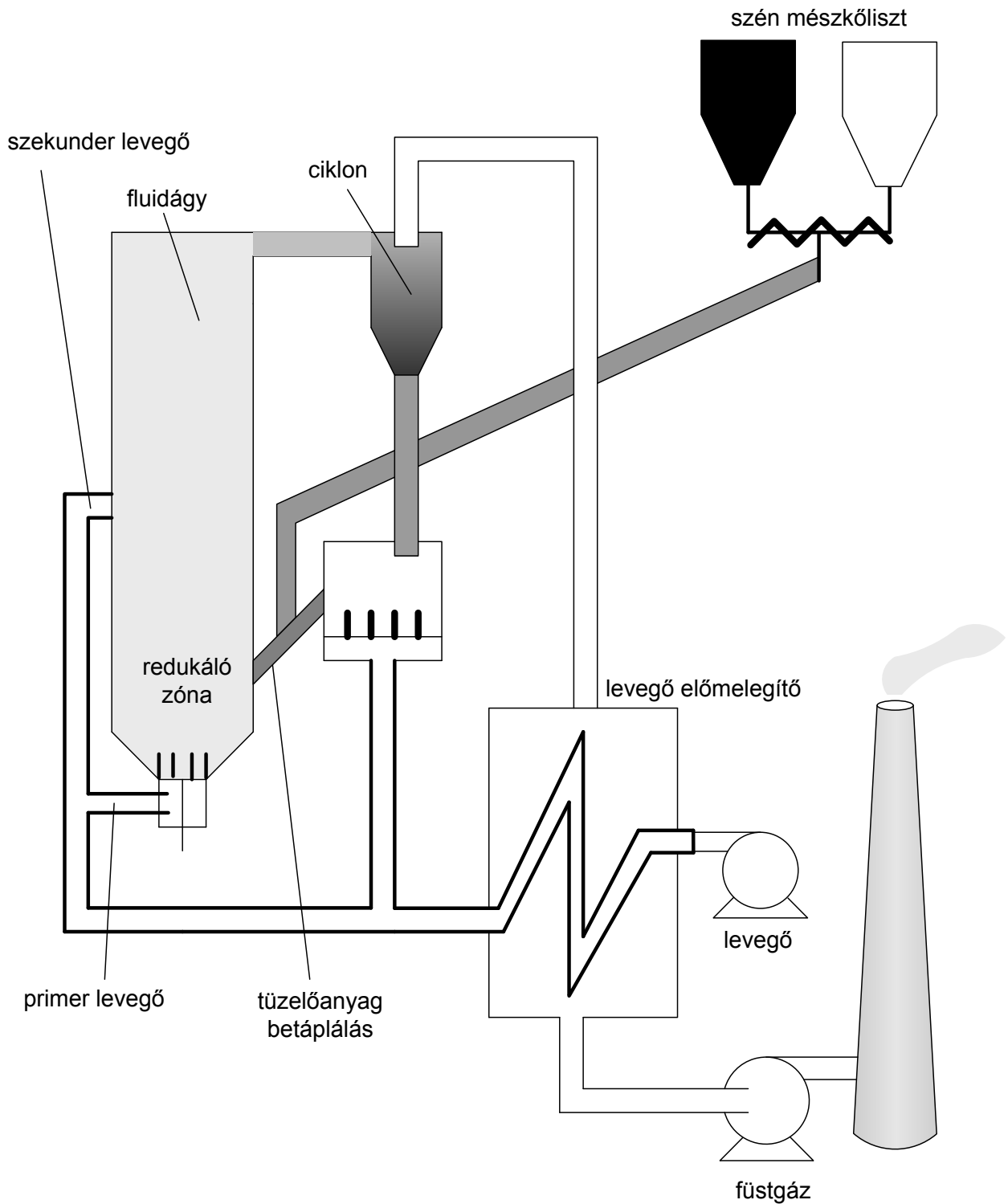
**335. ábra. Winkler-féle szénelgázosító generátor, kevert gáz gyártására**

A 335. ábra látható berendezésben az előmelegített levegő-vízgőz elegyet a szénporból képződő fluidágyon úgy fúvatják be, hogy erős turbulens áramlás alakulhasson ki. Az autoterm reakció néhány másodperc alatt 950-1000 °C hőmérsékleten megy végbe. A reaktorból a hamut a füstgáz pneumatikus szállítással távolítja el, ezért a kilépést követően hatékony elválasztásról és gáztisztításról kell gondoskodni. A levegő/vízgőz elegy előmelegítése hőcserélő segítségével a kiáramló füstgáz hőtartalmának hasznosításával oldható meg.

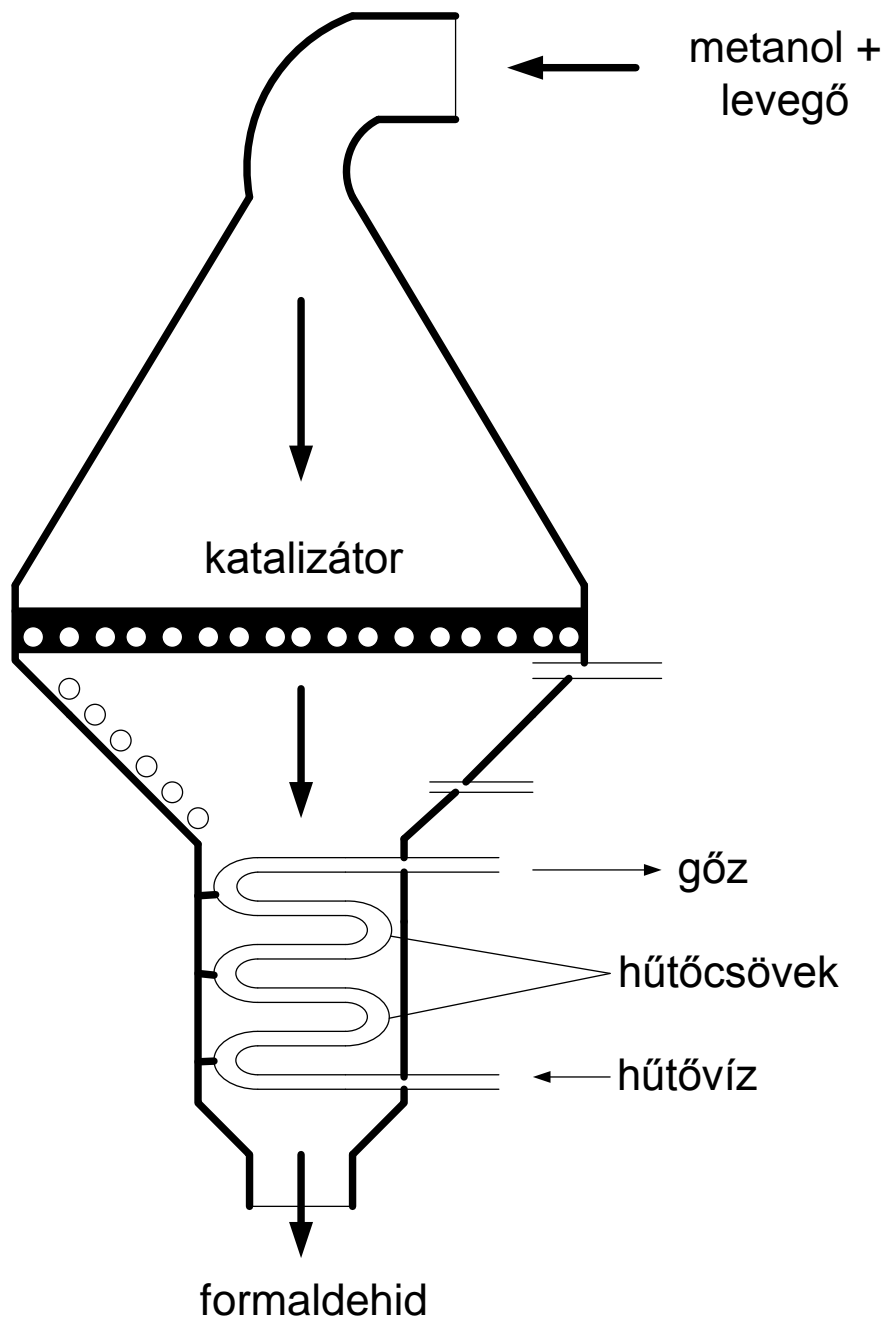
Nagy kéntartalmú tüzelőanyagok (szénpor, nehéz fűtőolaj) környezetkímélő hasznosítására alkalmazható a 336. ábra látható *fluidágyas kazán*, melyben a fluidizált állapotból adódó egyenletes hőmérséklet-eloszlás eredményeként az égési hőmérséklet jelentősen alacsonyabb, mint a hagyományos kazánokban. Ebből adódóan az NO<sub>x</sub> képződés kismértékű és a beadagolt aprószemcsés mészkő képes az SO<sub>2</sub> gyakorlatilag teljes megkötésére.



A kontakt katalitikus reakciók is lejátszhatók autoterm üzemmódban, erre példa a 337. ábra látható reaktor, ami a formaldehid gyártására szolgál metanol oxidatív dehidrogénezésével.



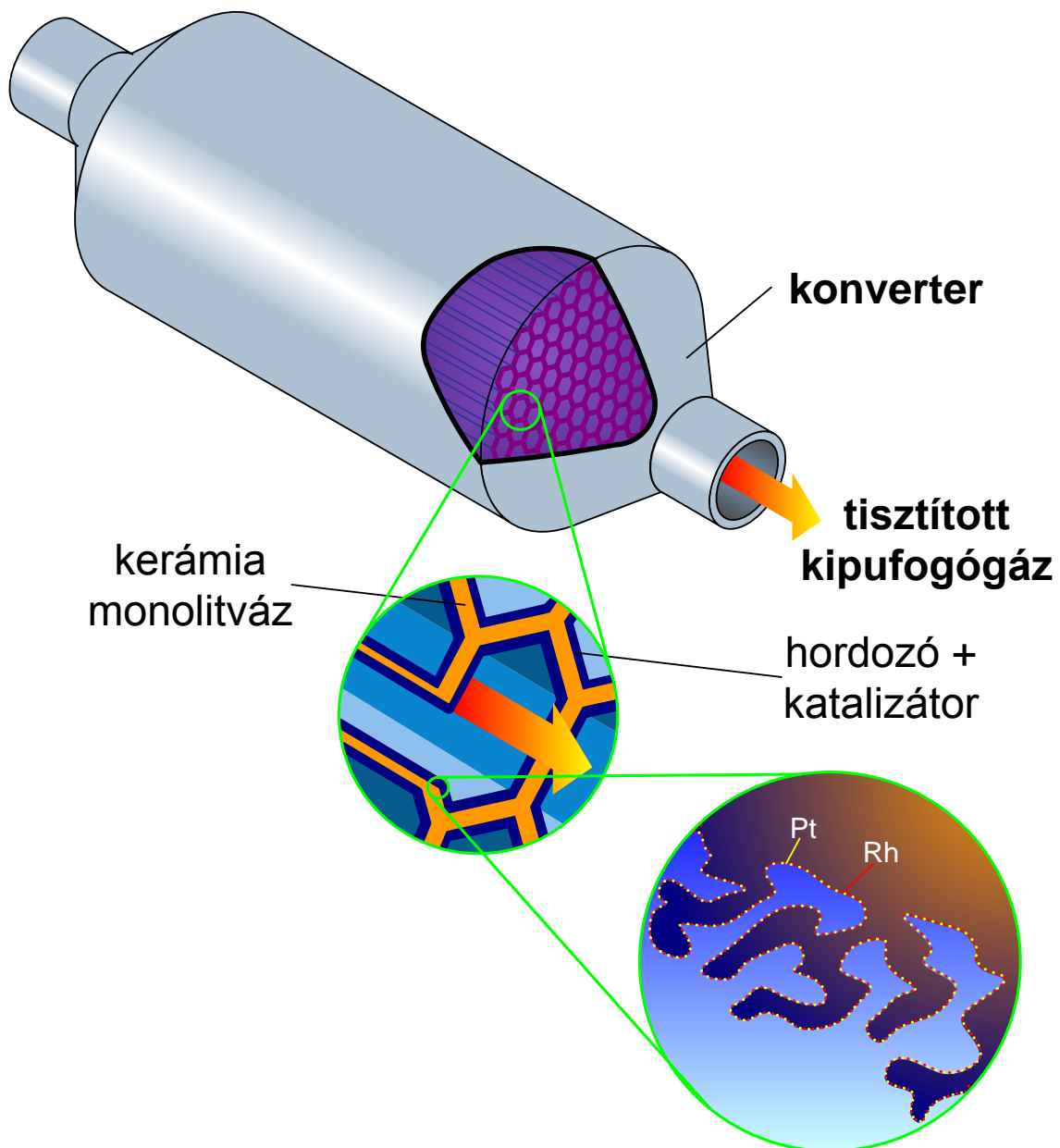
336. ábra. Fluidizációs kazán működési vázlat



**337. ábra. A metanol oxidatív dehidrogénezésére szolgáló reaktor (formaldehid előállítás)**

A 337. ábra látható reaktorban elhelyezett ezüst katalizátoron a metanol dehidrogénezése és az így keletkező hidrogén oxidációja is végbemegy, s ez utóbbi biztosítja a dehidrogénezéshez szükséges reakcióhőt. A metanol/levegő elegy arányának beállításával biztosítani lehet, hogy ugyanannyi hő keletkezzék az exoterm reakcióban, mint amennyi az endoterm dehidrogénezés hőigénye.

A csőreaktorok - mint említettük - jól beváltak a heterogén katalitikus folyamatokban, ennek egyik speciális lehetőségét jelenti az, amikor valamilyen szilárd vázszerkezetre (monolit) viszik fel a katalizátort. A gépkocsik kipufogógázainak kezelésére ilyen, monolitváza felvitt  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CeO}_2$  hordozón diszpergált Pt,Rh-katalizátort tartalmazó „háromutas konverter”-t használnak, magának a konverternek a kialakítását mutatjuk be a 338. ábra.

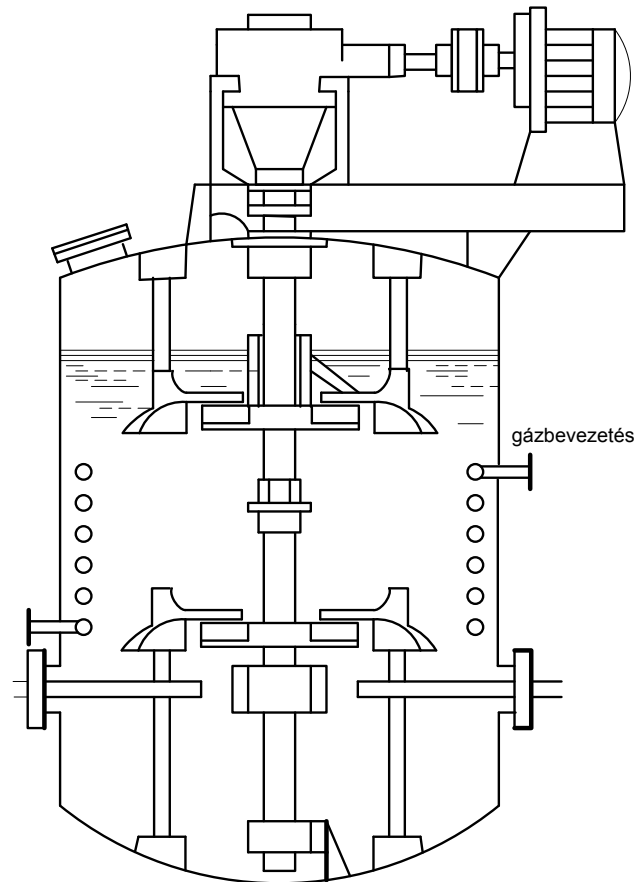


**338. ábra. A háromutas gépkocsikonverter kialakítása**

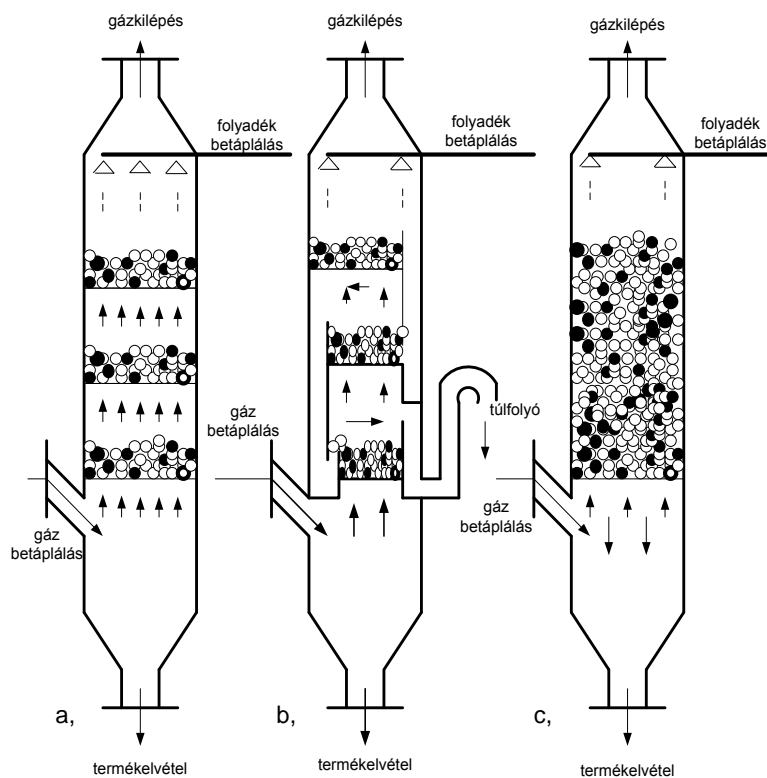
A gyakorlatban legtöbbször alkalmazott **folyadékreakciók** kivitelezésére az alapreaktorok használatosak,

A **folyadék-gáz reakciók** első lépése a gáz abszorpciója a folyadékban; gyors reakciók esetén sebességmeghatározó lehet ez a lépés, amit viszont a két fázis határfelületének növelésével lehet gyorsabbá tenni (lásd az abszorpciónál írtakat). Ezek a reakciók az abszorberekhez hasonló reaktorokban (tányéros, töltetes oszlop, filmreaktorok, permetező, porlasztó reaktorok, stb.) lehet lejátszatni. Ezek közül mutat be néhány jellegzetes megoldást a 339. ábra-341. ábra.

A 339. ábra látható **turbógázabszorbemél** a gázbevezetés a forgó tengelynél, középen történik, s a turbinakeverő lapátjai finom buborékokra osztják szét az intenzíven kevert folyadékban. A berendezés aerob fermentorként is használható

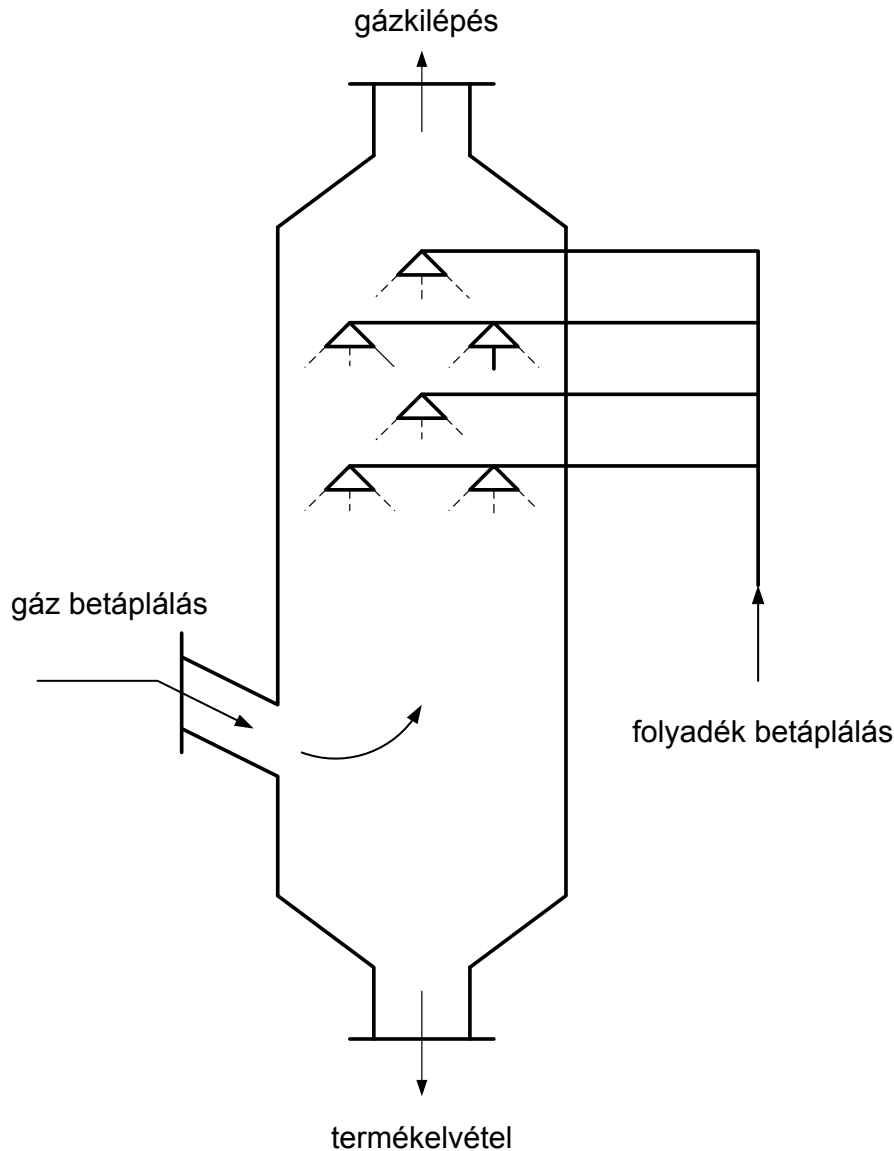


339. ábra. Turbógáz abszorber (fermentor)



340. ábra. Buborék- és habkolonna megoldások  
a) ellenáramú buborékkolonna, b) keresztáramú habkolonna,  
c) elárasztásos habkolonna

A habreaktorba alulról történik a reaktánsok bevezetése, s a gáz (legtöbbször oxigén vagy levegő) habzásban tartja a folyadékot, a termékek pedig főlülről (a folyadék túlfolyásával) távoznak a rendszerből. Ilyen reaktorokat használnak a *Wacker*-eljárásban (acetaldehid előállítására etilén oxidációjával), a paraffinok folyadékfázisú oxidációjában, de a fermentációs technológiákban is.



**341. ábra. Porlasztásos gáz/folyadék reaktor**

A 341. ábra látható porlasztásos berendezésben a gáz bevezetése alul történik és ebbe porlasztják be a folyadékot, az ábrának megfelelően általában több ponton, különböző magasságban. A porlasztásos berendezések előnyei az egyszerű konstrukció, a kis hidrodinamikai ellenállás, hátrányuk a porlasztás jelentős energiaigénye, a viszonylag kis gázáramlási sebesség (a cseppkihordás miatt).

A **szilárd-folyadék reakciók** esetén is általában az autoklávok használatosak, különféle keverő megoldásokkal, hiszen eme reakciónál a zagy tulajdonságaitól függően könnyebb-nehezebb feladat a keverés. Ezen reakciók körébe is fontos környezettechnológiai folyamatok tartoznak.

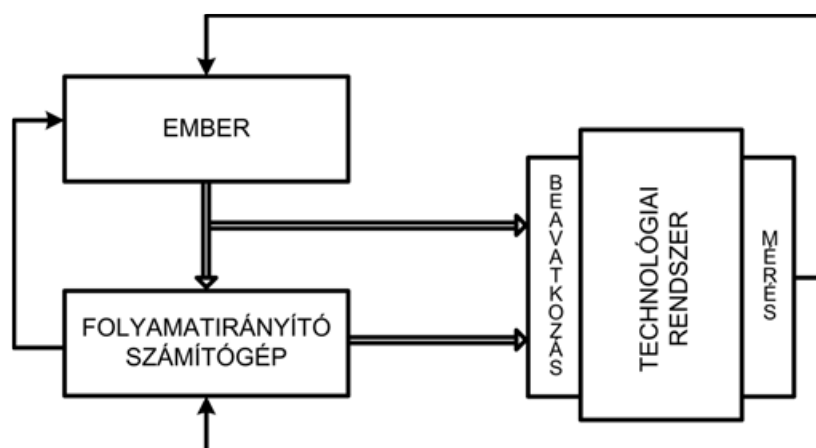
## Technológiai rendszerek modellezése

Dr. Szeifert Ferenc, Pannon Egyetem

Ebben a fejezetben a technológia modellezés szempontjait figyelembe véve, áttekintjük a mérnöki feladatok típusait, a feladat megoldások során leggyakrabban használt rendszermodelleket, majd részletesebben foglalkozunk az ún. *a priori* (fehér doboz) és az *a posteriori* (fekete doboz) modellezési technikákkal. Végül egy esettanulmány keretében azok alkalmazását is illusztráljuk. Igyekszünk a rendszer szemlélet nyújtotta lehetőségek kihasználására.

### A mérnöki feladat osztályok

Az elmúlt időszakban az ipari technológiák fejlődését több szálon is alapvetően a számítógépek, a számítástechnika és információtechnológia elterjedése határozta meg. Mindezen eszközök, technikák a technológia részévé váltak. Az ember, a számítógép és a szűkebb értelemben vett technológiai objektum vázlatos kapcsolatát a 342. ábra szemlélteti. Az utóbbi az anyag és energiaáramlást biztosító csővezetékekkel összekötött különböző gépeket, berendezéseket, készülékeket foglalja magába. A rendszer működését közvetlenül az ún. beavatkozó szerveken (csapok, tolózárak, szelepek, motorok indítása, leállítása, stb.) keresztül befolyásolhatjuk, miközben a teljes rendszer működéséről a különböző mérőműszerek (tömegáram, hőmérséklet, szint, nyomás, stb. mérése) jelei tájékoztatnak bennünket. A működtetés egyre nagyobb hányadát igyekszünk automatikusan elvégezni, ami azt jelenti, hogy a beavatkozásra vonatkozó információkat, a technológiai rendszer állapotát jellemző mérési jelek és a folyamatirányító számítógépben realizált irányítási algoritmusok alapján, a számítógép állítja elő. A magas fokú automatizáltság mellett is mindig szükség van az emberi felügyeletre és a technológiába való közvetlen beavatkozásra is. Mind a szűkebb értelemben vett kémiai technológiai objektum (KTO), mind a felügyeletét, irányítását végző számítógép hálózat ill. az embereket magába foglaló szervezet önmagában is összetett, bonyolult.



342. ábra. A technológia, a számítógép és az ember kapcsolata

A bonyolultsággal szembeni hatékony technika a rendszerszemlélet és ezen belül, műszaki rendszerek kapcsán, a hierarchikus szemlélet. Először vizsgálatunk tárgyát pontosan definiálva megkülönböztetjük a környezettől, majd a rendszert

kölcsönhatásban álló elemek összességéként tekintjük. Ha a rendszer eleme bonyolult azt is rendszerként értelmezzük, és így tovább. Ezáltal egy hierarchikus struktúrát kapunk, amely megismerése kapcsán a dekompozíció-koordináció elvét alkalmazva (ld. később is), a különböző szintű részek egymás utáni szisztematikus vizsgálatával jutunk el a teljes rendszer megismeréséhez.

A megismerés az egyik legfontosabb mérnöki tevékenység, amely az összes többi tevékenység alapjául szolgál. Egy technológiai objektum megismerése során az objektum állapotát meghatározó tulajdonságait (tömeg, térfogat, koncentráció, nyomás, tömegáram, stb.) kell feltárni, majd ezen tulajdonságok között fennálló törvényszerűségeket (egyensúly, megmaradás, mérleg, stb.) kell tisztáznunk. Ismereteinket verbálisan (szavakban, mondatokban), grafikusán (ábrákkal, diagramokkal) vagy formálisan (matematikai változók és összefüggések formájában) rögzíthetjük. A mérnöki gyakorlatban elsősorban a grafikusán ill. formálisan interpretált információk a fontosak, a számítógépben realizált különböző funkciójú algoritmusok a technológia matematikai modelljein alapulnak. A modell a technológia mása, a technológia tulajdonságait matematikai változókká, a törvényszerűségeket pedig a változók közötti összefüggésekké képezzük le. Így a matematikai modell a változók v halmaza és a függvények f halmaza kettősének tekinthető (ld. 57. táblázat):

### 11.1. egyenlet:

$$M = \langle v, f \rangle$$

### 57. táblázat. Mérnöki feladat osztályok

	MEGISMERÉS (modellen keresztül)	IRÁNYÍTÁS (üzemeltetés)	TERVEZÉS (fejlesztés)
<b>A feladat megfogalmazása</b>	<p>adott a KTO (amit vizsgálunk),</p> <p><b>meghatározandó:</b></p> <p>mely (vegyészmérnöki) MENNYISÉGEK és TÖRVÉNYSZERŰSÉGEK alkalmasak -az elvégzendő FELADAT szempontjából- az objektum hű VISSZATŰKRÖZÉSÉRE?</p>	<p>adott: a MŰKÖDŐKÉPES KTO (M matematikai modell)</p> <p>gazdasági célt kitűző CÉLFÜGGVÉNY (G)</p> <p><b>feladat:</b> az OPTIMÁLIS működés biztosítása</p> <p><b>Modell analízise:</b> SZABADSÁGI FOK (<math>n \geq 1</math>) ↓ IRÁNYÍTÁSI VÁLTOZÓK (U)</p>	<p>adott egy FUNKCIÓ</p> <p><b>meghatározandó</b> a megfelelő KTO</p> <p><b>probléma:</b> ugyanazon funkció ellátására számtalan KTO alkalmas, minden KTO sokféleképpen működhet,  a funkció ellátására alkalmas objektumok OPTIMÁLIS ÁLLAPOTAIT kell összehasonlítani (irányított KTO), s a gazdasági szempontból a legjobbkat kell választani!</p>
<b>Absztrakció</b>	<p>(vegyészmérnöki) MENNYISÉGEK → matematikai VÁLTOZÓK (V)</p> <p>TÖRVÉNYSZERŰSÉGEK → matematikai ÖSSZEFÜGGÉSEK (F)</p> <p><b>MATEMATIKAI MODELL:</b> <math>M = \langle V, F \rangle</math></p>	<p><b>extr G</b> <b>U</b> <b>Feltételek: M</b></p> <p>FELTÉTELES SZÉLSŐÉRTÉK PROBLÉMA (matematika, számítástechnika)</p>	<p><b>KOMBINATORIKUS ROBBANÁS!</b> (intuíció, próbálgatás, evolúció, tapasztalat)</p> <p><b>KOMPLEXITÁS ELLENSZERE:</b>  RENDSZERELMÉLET és INFORMÁCIÓTECHNOLÓGIA</p>

Az irányítási-üzemeltetési feladatokban adott az M matematikai modellel jellemezhető KTO, számtalan működési lehetőséggel. A megoldás annak a (legtöbbször egy) működési lehetőségnek a kiválasztása, amely érdekeinknek leginkább megfelel. Formailag ez egy **nagyméretű feltételes szélsőérték feladat**. Ennek elemei: az érdekeinket pontosan kifejező célfüggvény (vektor skalár függvény), aminek a szélsőértékét keressük; a technológiai szabadsági fok terhére kiválasztható

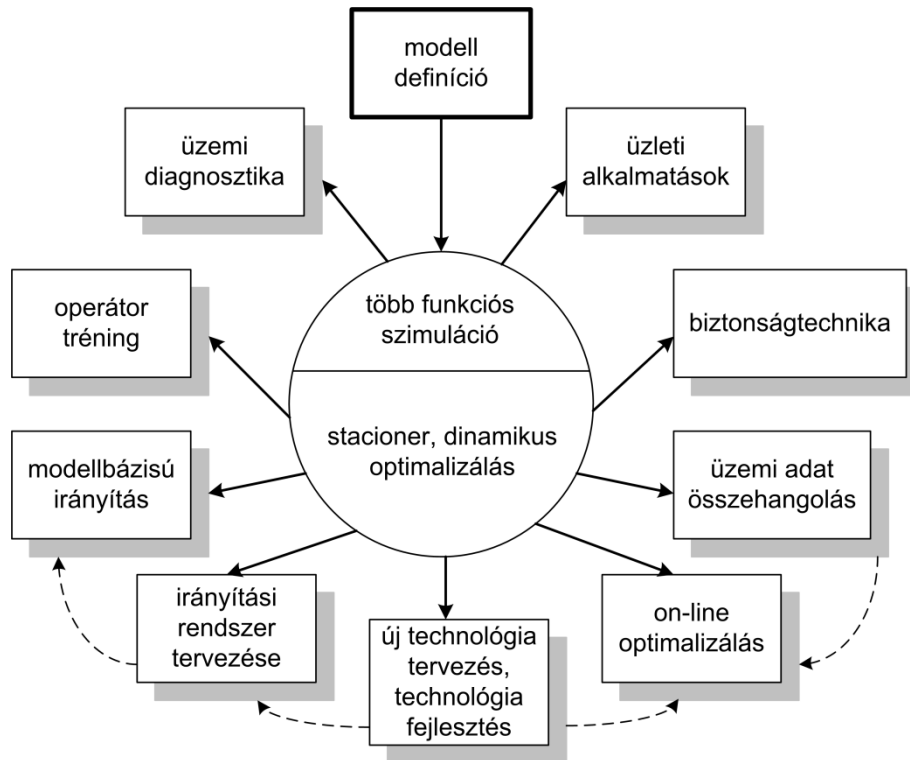
szabályozási változók, amelyek értékét egy megengedett tartományon belül szabadon variálhatunk; és végül a technológiai rendszer (dinamikus) viselkedését elfogadható pontossággal leíró (egyszerű vagy bonyolult) matematikai modell. A *tervezési feladatokban* adott egy funkció (a funkció ellátására kell létrehozni az objektumot), amelyet nagyon sok KTO elláthat. Feladatunk a lehetséges, adott funkciót érdekeink szerint legjobban ellátó irányított KTO kiválasztása. Logikailag ez is egy nagyméretű feltételes szélsőérték feladatként fogalmazható meg, azzal a kiegészítéssel, hogy ennél a feladat típusnál a megoldási lehetőségek száma rendkívül nagy is lehet (kombinatorikus robbanás). Látható, hogy a feladattípusok bonyolultsága a megismerés (modellezés) → irányítás → tervezés irányába nő, mivel az utóbbi kettő magába foglalja az előtte állókat (ld. 57. táblázat).

A folyamatosan működő technológiák a CIPS (**C**omputer **I**ntegrated **P**rocess **S**ystems), a szakaszos technológiák pedig a CIMS (**C**omputer **I**ntegrated **M**anufacturing **S**ystems) irányában fejlődnek. Ezen rendszerek integráltan kezelik az anyag, az energia és az információs áramokat és magukba foglalják a következő területekre vonatkozó döntéshozatalt: energia megtakarítás, termelékenységnövelés, gyártási veszteség csökkentése, környezetvédelem, minőségbiztosítás.

## Az alkalmazott rendszermodellek csoportosítása

A különböző vegyipari technológiák automatizáltsága különböző szintű, a trend a teljesen automatizált rendszerek felé irányul, amelyek minimális operátori beavatkozással, optimális feltételek mellett működnek. Az ilyen technológiák a részletes vegyészmérnöki, ún. *a priori modelleken* (fundamental process model, first principle model) alapulnak, amelyek felhasználhatók a technológiatervezésben, a technológia irányítási rendszerének a tervezésében, a műszerezés megtervezésében, a folyamatmodellezésben, a folyamatoptimalizálásban, a technológia működtetésének megalapozásában. A technológiában végbemenő folyamatokat is visszatükröző (részletes vegyészmérnöki) modell fokozatosan átveszi az irányításban gyakran használt egyszerű ún. *a posteriori modellek* (pl. bemenet-kimenet) funkcióját. A modell(ek) végig kíséri(k) a technológiát a teljes életciklusán (model life cycle). A modell megléte és ismerete tudatossá és konzisztensé teszi a technológusnak a működő rendszerre vonatkozó tapasztalatait. A 343. ábra illusztráljuk a technológia modell rendszerének alkalmazását a különböző területeken. A szűkebb értelemben vett irányításon túlmenően nő a szerepük a magasabb irányítási szintek megalapozásában, a biztonságtechnikában, az operátori tréning rendszerek (OTS, Operator Training System) kialakításában, de megjelentek az üzleti alkalmazásokban is. Itt a szűk keresztmetszetet, elsősorban a technológusi tudás formalizálása jelenti, megfelelő matematikai modell formájában. Az igényes mérnöki feladatmegoldásokban ezért ma már szinte nélkülözhetetlen a különböző típusú rendszermodellek használata. A feladatmegoldáshoz legalkalmasabb modell típus kiválasztása nem egyszerű, több szempont együttes mérlegelésének eredménye lehet. A mérnöki gyakorlatban elterjedten használt rendszermodellek egy lehetséges, különböző szempontok szerinti, csoportosítása látható az 58. táblázat.





343. ábra. A KTR modelljének többfunkciós alkalmazása

58. táblázat. Rendszermodellek csoportosítása

Csoportosítási szempont	Rendszermodellek típusok				
	A priori (fehér doboz, elméleti modell)	A posteriori (fekete doboz, kísérleti modell)	Kísérlettervezés	Adatmodellek	Jelmodellek (jelanalízis)
1. Modelllezési filozófia (megközelítés)	A priori (fehér doboz, elméleti modell)	A posteriori (fekete doboz, kísérleti modell)	Kísérlettervezés	Adatmodellek	Jelmodellek (jelanalízis)
2. A változók összefüggések típusa	Determinisztikus	Sztochasztikus	Fuzzy	Minőségi	
3. Rendszertechnika	Bemenet-kimenet modell (BKM)	Állapottér-modell (ÁTM)	Konvolúciós-modell	Neurális-hálózat (NH)	Genetikus modell
4. Térbeli homogenitás	Koncentrált paraméterű modell	Elosztott paraméterű modell			
5. Időbeli homogenitás	(homogén)	Inhomogén (diszkrét idejű események)			
		Absztrakt automaták	Petri- hálók	Vezérlő tábla	Létra diagram
6. Időbeli összefüggés	(Időben) folytonos	(Időben) diszkrét			
7. Időbeli viselkedés	Statikus	Dinamikus	Instacioner	Kvázistacioner	Stacioner
8. Vizsgálati tartomány	Időtartomány	Transzformált tartomány (ÁTVITELI FÜGGVÉNY)	Differenciál, illetve differencia - operátorok	Laplace, illetve Z-transzformált	Fourier transzformált
9. Matematikai sajátosság	Lineáris	Nem lineáris			

A modellek legfontosabb csoportja az *a priori modellek* (elméleti modell, fehér doboz modell, stb) osztálya, amelyeket azzal jellemezhetünk, hogy azok részben vagy egészben visszatükrözik a modellezett objektum struktúráját, minden változójának

fizikai értelmet tulajdoníthatunk, összefüggései pedig fizikai, kémiai törvényszerűségeken alapulnak, továbbá térben és időben információátvitelre is alkalmasak. Létező vagy elképzelhető objektumok modellezésére egyaránt alkalmasak. A megismerési folyamatban alapvető jelentőséggel bírnak, a tervezésnél kizárólagosan a priori jellegű modellek használhatók. A rendszermodellek másik nagy csoportját az *a posteriori modellek* (empirikus modell, fekete doboz modell, stb.) osztálya képezi. Ezek jellemzője, hogy részben sem tükrözik vissza a modellezett objektum struktúráját, csak az ún. bemeneti és kimeneti változóknak van fizikai tartalma, összefüggései formálisak, amelyek összekapcsolják a bemeneti és kimeneti változókat, mérési adatok felhasználásával biztosítható az elvárt adekvátság. Sem térbeli sem időbeli információátvitelre nem használható. Csak működő objektum modellezésére alkalmas, ezért elsősorban az irányításban használható.

A kétféle modellezési megközelítés alkalmazástechnikáját egy kissé részletesebben is tárgyaljuk.

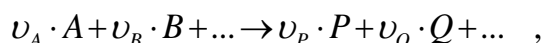
## Az a priori modellezés technika

Ebben a részben az a priori modellezés technikát tekintjük át, amelyben nagy szerepe van a modellezendő objektum struktúrájának, ezért a fejezetet a technológiai rendszer struktúrájának bemutatásával kezdjük. A hatvanas évek végére, a termodinamika eredményeire alapozva a technológia rendszer szemléletű modellezése is kifejldött. Napjainkban a hierarchikus technológia modellezés tűnik hatékonyak.

## A technológia struktúrája

A technológiai objektumra általában az jellemző, hogy működtetése kapcsolatos valamilyen kémiai komponens átalakításával. A kémiai átalakítást a reakcióegyenlet (sztöchiometriai egyenlet) reprezentálja:

*11.2. egyenlet:*



ahol  $\{A, B, \dots\}$  a kiindulási vagy reagáló komponensek,  $\{P, Q, \dots\}$  pedig a keletkező komponensek halmaza. A kémiai átalakulást az indokolja, hogy valamilyen  $N = \{A, B, \dots\}$  komponenseket tartalmazó nyersanyag(ok) felhasználásával a  $T \subseteq \{P, Q, \dots\}$  számunkra értékesebb termék(ek)hez akarunk hozzájutni.

A kémiai reakció, mint folyamat a *molekulák* közötti kölcsönhatások eredménye. A 11.2. sztöchiometriai egyenletben az  $S \in \{A, B, \dots\} \cup \{P, Q, \dots\}$  szimbólumok az azonos *kémiai szerkezetű* molekulák osztályát jelölik. A molekulák közötti kölcsönhatás a termodinamikai fázisban jön létre, s ezért a fázis tulajdonságai befolyásolják azt. Mint minden folyamat egy adott irányban (egyensúly) és időben (kinetika) folyik. Az irányt a fizikai-kémiai törvényszerűségek (termodinamika) jelölik ki, míg az időt az ember által létrehozott *berendezések* (konkrétan itt a reaktorok) biztosítják. A berendezésekben a "termodinamikai fázis" tulajdonsággal bíró molekula halmazok, az ún. *fáziselemek* között újszerű kölcsönhatások alakulnak ki (pl. az áramlás során). Ez befolyásolja a fáziselemek tulajdonságait, s ezen keresztül az egész folyamatot is. A fáziselemek jellegüket tekintve igen sokfélék lehetnek.

Heterokatalitikus reakciónál például a szilárd fázis elemeit még a reaktoron kívül - a katalizátor készítés során - kialakítják. A fluid fázisok fáziselemei ugyanakkor nagyon gyakran, a berendezésben az áramlás során jönnek létre, s közöttük bonyolult kölcsönhatások alakulnak ki (pl. diszperzió-koaleszcencia, keveredés a geometriai térben). A fáziselemek egyes esetekben elkülöníthetők, s individuálisan is megragadhatók (pl. mérés által), más esetekben viszont a fizikai elkülönítés nem lehetséges (pl. homogén fázisú reaktorban).

A fáziselemek közötti kölcsönhatás (általában az áramlás), a berendezések *berendezéselemeken* keresztüli céltudatos kialakításával, érdekeinknek megfelelően befolyásolható. A berendezéselemekben levő hasonló fáziselemek összessége a *fázis*. A fázis rendelkezik a "termodinamikai fázis" tulajdonsággal, de mint elemeinek - a fáziselemeknek - az összessége, annál több is (pl. diszpergált fázis).

A kémiai reagáltatás, mint művelet (eljárás) mellett egyéb olyan műveletek (eljárások) is léteznek, amelyeknek funkciója lehet, a nyersanyag átalakítása a célból, hogy a kémiai reagáltatás hatékonyabb legyen. Lehet ez a kémiai reagáltatás körülményeinek befolyásolása, de lehet a reaktorból távozó anyag további átalakítása is, s így értékesebbé tétele. Ezen további műveletek: a fázisok egyesítése (pl. keverés), a fázisok szétválasztása (pl. szűrés, centrifugálás), fázisok közötti komponens- ill. entalpiacsere (pl. adszorpció, adszorpció, kristályosítás, rektifikálás, hőcsere).

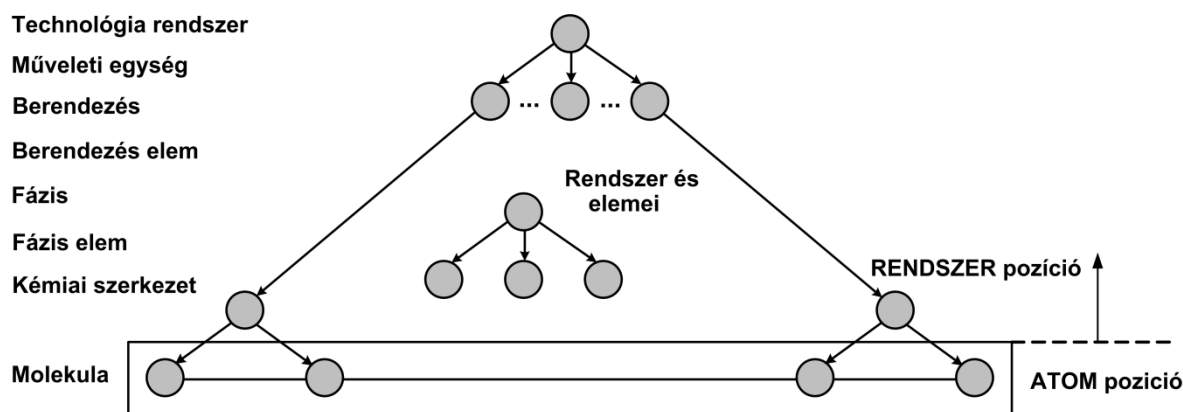
Az így értelmezett vegyipari műveletekre jellemző, hogy funkciójukat nem tudják - érdekeink szerint - tökéletesen ellátni. Ennek, a fizikai-kémiai törvényszerűségekbe ütköző akadályai vannak. Amint azt már említettük, minden folyamat az egyensúly irányába tart, s mint mozgás időben megy végbe. A rendelkezésre álló időt (tartózkodási idő) a berendezés véges geometriai méretei determinálják. Ezt a gátat úgy tudjuk áthidalni, hogy az adott művelethez "segéd" műveleteket is csatolunk. Ezáltal elemekből egy rendszert hoztunk létre, amely az adott funkciót magasabb szinten képes ellátni, mint egyik eleme. Erre a rendszerre jellemzőek az alábbiak. Az adott művelet a rendszer centrális eleme. A kapcsolt "segéd" műveletek a rendszer további elemei. A rendszer funkciója, a centrális elem funkciójával azonos. A rendszer mesterséges (ember által alkotott), a nem centrális elemek kiválasztása és az elemek közötti kapcsolatok kialakítása többnyire műszaki (és csak közvetetten gazdasági) célfüggvény alapján lehetséges. Az elemek közötti kapcsolatok típusai az alábbiak: *soros*, *párhuzamos*, *visszacsatolásos*. Párhuzamos kapcsolásnál az elemek között nincs (közvetlen) kapcsolat, de az egyes elemek ugyanazt a funkciót látják el. Soros kapcsolásnál a sorban előbb álló hat az utána következőre, míg visszacsatolásnál az egymásra hatás kölcsönös. Az ilyen rendszerek a *műveleti egység* tulajdonsággal bírnak. A műveleti egység tulajdonságú kémiai technológiai objektum, mint elemek maguk is rendszerre szervezhetők. A magasabb hierarchiájú rendszerre szervezés okai az alábbiak:

1. Egy kémiai technológiában több 11.1. egyenlettel megfogalmazható átalakítás is előfordulhat;
2. A műveleti egységben, mint rendszerben a kémiai reagáltatáson túl, a többi művelet is lehet centrális elem;
3. Az összekapcsolás a gazdaságosságot növeli.

Az így előállított rendszerre jellemző az, hogy több centrális eleme is lehet, s funkciója általában nem azonos egy elemének funkciójával. Ez is mesterséges, s az elemek

közötti kapcsolat kialakítása már többnyire közvetlenül gazdasági célfüggvény alapján lehetséges. A kölcsönhatást jellemző tömeg és energia áramok halmaza főáram és mellékáramok osztályára bontható. A főáramok által kijelölt kapcsolatokra a műveleti egységnél leírtak érvényesek. A mellékáramok kialakítása viszont egyértelműen gazdasági kérdés. Az ilyen rendszereket *technológiai rendszer* tulajdonságúnak tekintjük.

A {*molekula, kémiai szerkezet, fáziselem, fázis, berendezéselem, berendezés, műveleti egység, technológiai rendszer*} egy olyan {T1, T2, ...} rendezett tulajdonsághalmaz, amely kifejezi a kémiai technológiai objektumok hierarchikus felépülését (344. ábra). A hierarchia szintekbe való besorolásnál különféle szempontok érvényesülhetnek. Ugyanazon objektummal kapcsolatban többféle hierarchikus rendszer is definiálható - a dekompozíció művelete ugyanis többértelmű. A 344. ábra a nyilak a tartalmazási relációkat reprezentálják. Az alacsonyabb hierarchia szinten levő objektumok a magasabb szintű objektumok dekompozíciójából adódnak. Az objektumok halmazán a tartalmazási reláció egy *fa rendezést* ad. A legalacsonyabb hierarchia szintjén az *atom pozíciójű* (tovább már nem dekomponált) objektumok helyezkednek el. Az atom pozíciójű objektumok kivételével a többi objektum *rendszer pozícióban* van. Egy rendszer pozíciójű objektum modellje elemeinek modelljéből és a kapcsolatok modelljéből szintetizálható. A fentiek alapján érthető, hogy a KTO (hierarchikus) szerkezetét bemutatandó 344. ábra finomítható. Sőt a vegyészmérnöki tudomány "történetiségéből" adódóan a nomenklatura is sokszínű. Mindegyik "nomenklatura együttes" magán viseli az adott kutatóhely konkrét feladatainak jegyeit, ami a konstruktív, gyors feladatmegoldást korlátozza (mindez az irányítástechnikára még inkább jellemző).



344. ábra. A KTO, mint hierarchikus rendszer

## A technológia, mint műveleti egységek hálózata

A technológiai rendszerek vegyészmérnöki leírását *Damköhler* a múlt század harmincas éveiben alapozta meg. *Benedek* és *László* a vegyészmérnöki tudomány alapjait összefoglaló klasszikus, de ma is korszerű szemléletű tankönyve 1964-ben jelent meg. Ebben a technológiai rendszert műveleti egységek hálózataként definiálják, a középpontban a műveleti egység matematikai modellezése áll. „A műveleti egység a munka tárgyának és valamely speciális és egyedi munkaeszköznek ember által irányított kölcsönhatása, amelynek eredményeképpen a munka tárgya kisebb-nagyobb mértékben átalakul, a munka eszköze kisebb-nagyobb mérvű

elhasználódástól eltekintve azonban változatlan marad, az ember pedig valamilyen használati értéket termel, és ezekből munkaerejét megújítja.” A műveleti egység egy vagy több fázisú termodinamikai rendszer, amely leírását a transzportelmélet alapozta meg. A vegyészmérnöki tudomány mennyiségei a hosszúság, a tömeg, az idő és a hőmérséklet bázis mennyiségek hatványszorzatával generálhatók. Valamely mennyiség dimenzióján az alapmennyiségeknek azt a hatványszorzatát értjük, amelyben a kitevők pozitív vagy negatív egész számok vagy zérusok. Az additív jellegű mennyiségek az extenzív mennyiségek, a többi mennyiség intenzív. Az intenzív mennyiségek lehetnek térfogati sűrűségek (pl. fázis sűrűség, koncentráció) ill. potenciál jellegű mennyiségek (pl. kémiai potenciál, nyomás, hőmérséklet). Az extenzív mennyiségek időbeli megváltozása az áram, aminek a térfogatra, felületre vonatkoztatott megfelelője az áramsűrűség.

A termodinamika szerint egy homogén fázis leírására  $n=K+2$  adat szükséges, ahol  $K$  a komponensek száma. A leíró mennyiségek közül legalább egynek extenzívnek kell lennie. Térben inhomogén rendszer esetében az extenzívek térbeli sűrűségét vagy a potenciálokat kell ismerni minden időben, a tér minden pontjában (pl. a komponens tömeg térbeli sűrűsége, a koncentráció függvény  $c(t,x,y,z)$  vagy a potenciál jellegű hőmérséklet függvény  $T(t,x,y,z)$ ).

A fázis modelljét az extenzív mennyiségekre vonatkoztatott mérlegek felírásával alapozzuk meg. A rendszer extenzív mennyiségeit az alábbi folyamatok befolyásolják:

1. Konvektív áramlás. A berendezéseken átáramló fázisok okozta makroszkópikus áramlás. Formai sajátossága, hogy a fázis egy eleme a térkoordinátáját folytonos függvény szerint változtatja. A változás a fázis átlagos áramlási sebességével jellemezhető.
2. Konduktív áramlás. Az ilyen típusú transzportnak az az oka, hogy a fázis molekulákból épül fel, és az átlagos fázisáramlási sebesség a különböző kémiai komponensek különböző átlagsebességeiből adódik. Így az átlaghoz képest az egyes komponensek különböző sebességekkel áramlanak a berendezésben (mikroszkópikus áramlás: Fick, Fourier, Navier-Stokes törvények). A térkoordináták ezen transzport típusnál is folytonos függvény szerint változnak.
3. Forrás. Minden, ami nem a térkoordináták menti áramlásként írható le forrásnak tekinthető (pl. kémiai reakciók, „anyagvesztések”).
4. Átadás. Több fázis esetében a forrás egyik típusa.
5. Lokális megváltozás. Az extenzív mennyiségeket az 1-4. jelenség, mint okok igyekeznek megváltoztatni és ha nem kompenzálják egymás hatását, okozatként az extenzív mennyiség (vagy annak sűrűsége) időben megváltozik.

Inhomogén térben a mérleget a tér egy pontjára vonatkoztatjuk, emiatt a műveleti egységeket leíró mérleg egyenletek formálisan egy parciális differenciálegyenlet rendszert eredményeznek. A szükséges peremfeltételeket a rendszer és környezete kölcsönhatása alapján határozzuk meg. A kezdeti feltételek a rendszer kezdeti állapota alapján rögzíthetők. A *Benedek* és *László* által kibővített *Damköhler* egyenleteket a 345. ábra szemlélteti. Ezek a műveleti egységet leíró fundamentális egyenletek. A fázis tömegre felírt mérleg a folytonossági tételt adja. A  $K-1$  db komponens tömeg, az energia és a vektoriális impulzus mérlegek bal oldala a lokális megváltozást (okozat), jobb oldala pedig rendre a konvektív, a vezetési, a forrás ill. az átadás tagokat (okok) tartalmazza. Az alap egyenletek alkalmazása során két nehézség jelentkezik:

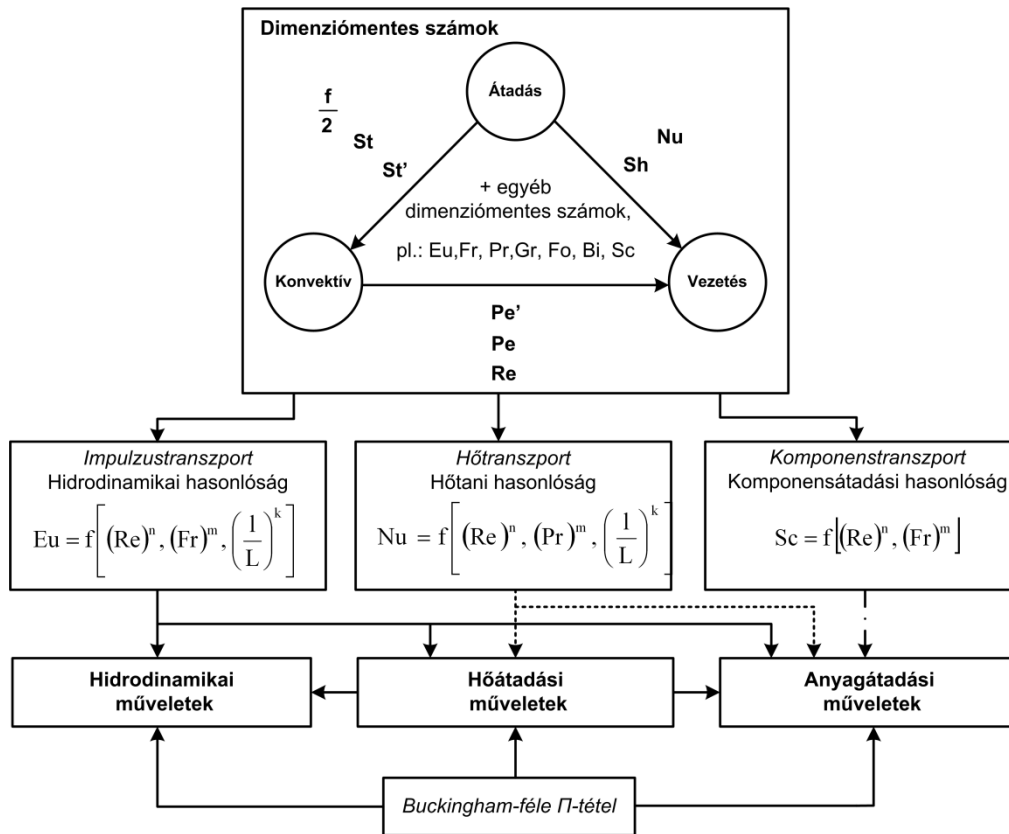
1. Hogyan adhatók meg az egyenletekben szereplő paraméterek, az ún. termodinamikai tulajdonságok (reakció kinetikai konstansok, átadási tényezők, stb) értékei?
2. Hogyan oldjuk meg a parciális differenciálegyenlet rendszert?

	Lokális megváltozás	Konvektív tag	Vezetékes tag	Forrástag	Átadási tag
<b>MÉRLEGEK</b>					
<b>fázistömeg:</b>	$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\text{div}(\rho \cdot \underline{v})$				
<b>komponens:</b>	$\frac{\partial c_i}{\partial t} = -\text{div}(c_i \cdot \underline{v}) + \text{div}(D_i \cdot \text{grad } c_i) + v_i \cdot r_v \pm \beta_i \cdot \omega \cdot \Delta c_i$				
<b>hő:</b>	$\frac{\partial(\rho \cdot c_p \cdot T)}{\partial t} = -\text{div}(\rho \cdot c_p \cdot T \cdot \underline{v}) + \text{div}(\lambda \cdot \text{grad } T) + (-\Delta H_R) \cdot r_v + \alpha \cdot \omega_Q \cdot \Delta T$				
<b>impulzus:</b>	$\frac{\partial(\rho \cdot \underline{v})}{\partial t} = -\rho \cdot (\underline{v} \cdot \nabla) \cdot \underline{v} + \text{grad}(\eta \cdot \text{div } \underline{v}) - \text{grad } p + p \cdot \underline{a}$				

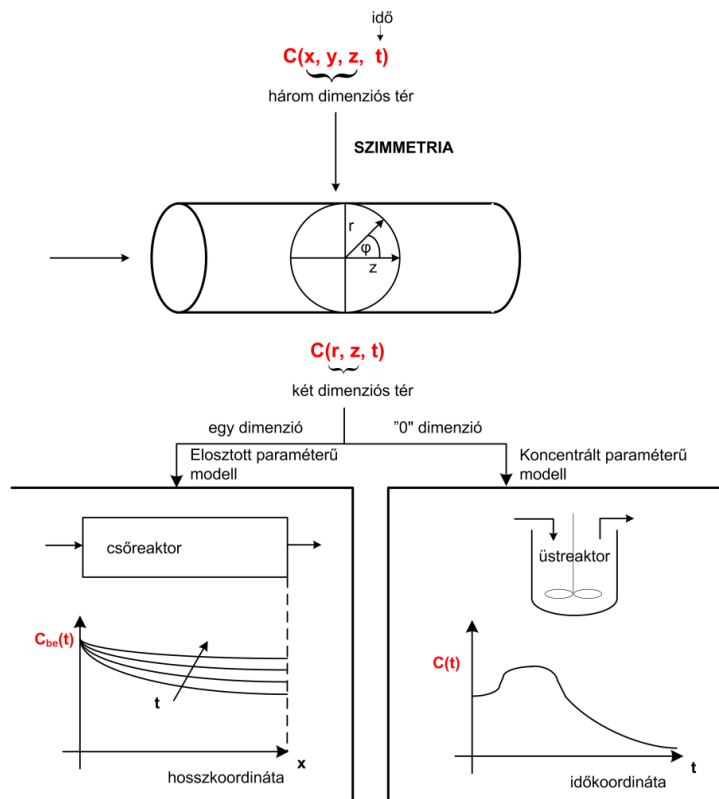
345. ábra. A műveleti egységek fundamentális egyenletei

A modellekben felhasznált paraméterek értékeinek pontossága kulcskérdés a technológia modellezésében. Külön szakterület a termodinamikai tulajdonságok számítása, amelyben az alapvető termodinamikai törvényszerűségek mellett az ún. dimenzióanalízis is szerepet kap, megalapozva a tulajdonságok felhasználásával definiált dimenziómentes mennyiségek közötti analógiákat, hasonlóságokat és összefüggéseket (346. ábra).

A modellek numerikus megoldásához egyre több jól használható mérnöki szoftver (különböző rendeltetésű szimulátor) áll rendelkezésünkre. Sok esetben pedig a háromdimenziós térben és időben való leírás is egyszerűsíthetünk a modellezendő konkrét objektum sajátosságait figyelembe véve (ld. 347. ábra). Cső alakú berendezésben például, a szimmetria viszonyokat kihasználva, kétdimenziós henger koordináta rendszert használhatunk. Ha a cső hossz/átmérő arány kellően nagy, akkor a sugár menti változások figyelmen kívül hagyásával, a tér egy dimenzióssá válik. Végül az üstszerű, jól kevert berendezésekben a geometriai teret homogénnek tekintve, időbeli közönséges differenciálegyenlet rendszerhez jutunk. A technológia állandósult állapotának számításához a modellből az időkoordinátát is eliminálhatjuk (stacioner, kvázi stacioner modellek), ami végső soron algebrai egyenletrendszerhez vezet.



346. ábra. A dimenziómentes számok rendszere



347. ábra. A térbeli leírás egyszerűsítése

## A technológiai rendszer hierarchikus modellezése

A technológiai rendszernek műveleti egységek hálózataként való leírása az esetek nagy részében hatékonyan bizonyult. Az alkalmazása során viszont nehézségek is adódtak:

1. Nagyszámú elemből álló rendszerek kezelésére nem alkalmas. Ezért a kibővített Damköhler-egyenletek mellett, azoktól függetlenül, a modellezésben megjelentek az ún. populáció mérleg egyenletek (pl. kristályosítás, nagy komponens számú polimerizáció).
2. A műveleti egységek egyre összetettebbek, így egységként való kezelésük körülményes.

Ezen problémák kezelésére a hetvenes évek elején kezdődtek el azok a próbálkozások, amelyekben a technológiai rendszert differenciáltabb struktúrák szerint képzeltek el. Ezek vezettek el a technológiai rendszerek hierarchikus modellezéséhez. Itt az Árva által bevezetett elemszám sűrűsége alapuló hierarchikus megközelítést mutatjuk be.

A hierarchikus modellezésnél a technológia 343. ábra látható struktúrája az irányadó. A modellalkotás során az alábbi alapelveket követjük:

1. A KTO sorozatosan felbontható úgy részekre, hogy egy (rész) objektum sajátosságai autonóm módon feltárhatók azon objektumoktól függetlenül, amely objektumoknak az adott objektum része, ill. amely objektumok az adott objektumnak részei.
2. A sorozatos felbontásnál a céloksági viszonyok mindig megszabják azt a legalacsonyabb szintet, amelynél a felbontás művelete befejezhető, s ezen a legalacsonyabb szinten elhelyezkedő objektumokat ismertként kell tételeznünk.
3. A sorozatos felbontás (dekompozíció) eredményeképpen kapott objektumokat ok-okozati (alulról felfelé ható) ill. céloksági (felülről lefelé ható) kapcsolatok szervezik egésszé. Az ok-okozati viszonyok feltárásánál közvetetten céloksági szempontok is érvényesülnek (a modellezés relativizmusa).
4. Bármely (rész)objektum a közvetlen felbontásából adódó (alacsonyabb hierarchiájú) részobjektumok és ezen részobjektumok közötti kölcsönhatások analízisének keresztül ismerhető meg.
5. A dekompozíció során eredendően diszkrét rendszerekhez jutunk, bizonyos feltételek teljesülése mellett azonban a diszkrét részekből összetett objektumot folytonos rendszerként kezeljük.
6. A hierarchikusan egymáshoz rendelt két rendszer kapcsolata egy hierarchia paradoxonon nyugszik, amely azt fejezi ki, hogy a felsőbb (hierarchiájú) szint elvileg nem függetleníthető az (alsóbb) hierarchiájú szinttől, ugyanakkor - a hierarchia szintek autonómiáját tételezve - a felsőbb szint (önmagában) zárt modelljével számolunk.
7. Egy-egy (rész)objektum megismerésénél érvényesül az addíció elve, amely azt fejezi ki, hogy a korábbi ismeretekhez új ismeretek hozzátehetőek ill. elvehetőek.

A fentiek „szellemében a technológiai rendszer modell alkotásában az alábbi lépéseket célszerű megkülönböztetni:

1. Dekomponálás.
2. Kódolás.
3. Atom pozíciójú objektum modelljének kiválasztása.
4. Rendszer pozíciójú objektum modelljének megalkotása.
5. A technológiai objektum modellrendszerének kialakítása.



A vizsgált kémiai technológiai objektumot összetettsége miatt valamilyen tulajdonság ( $T_1$ ) alapján egyszerűbb részekre dekomponáljuk. A dekomponálás sohasem egyértelmű feladat, de bizonyos szabályokat be kell tartanunk:

1. A részek fedjék le az egészet.
2. A részeknek ne legyen közös eleme.
3. A részek komplexitása összemérhető legyen.

Az így kapott részek még mindig összetettek lehetnek, ezért a dekomponálást más tulajdonságok ( $T_2, T_3, \dots$ ) szerint tovább folytatjuk addig a pontig, amelynél a dekompozíció eredményeként kapott objektumok kellően egyszerűek vagy a modelljük ismert. Így jutunk el a 343. ábra látható hierarchikus struktúrához. Egy összetett technológiai rendszer esetében a részobjektumok száma nagy, ezért egy olyan konzisztens kódrendszert kell alkalmazni, amellyel az objektumok egy-egy értelműen megjelölhetők. Az objektumok elnevezése mellett a részek közötti kapcsolatok kódolását is el kell végeznünk. Az objektumok neveit tartalmazó  $K$  kódhalmazon értelmezhető egy  $\rho$  tartamazási reláció az alábbi értelemben:

$(k_1, k_2) \in \rho$ , ha a  $k_2$  nevű objektum a  $k_1$  objektum közvetlen vagy közvetett dekompozíciójából adódott ( $k_1, k_2 \in K$ ).

A  $\langle K, \rho \rangle$  egy farendezés, amelynek maximális eleme a vizsgált rendszer. A legalacsonyabb szintű elemek atom (nem kémiai!) pozícióban, az összes többi objektum pedig rendszer pozícióban van. A rendszer pozíciójú objektum közvetlen dekomponálásával a rendszer eleme pozícióban lévő objektumokat kapjuk. Ebben a struktúrában az atom pozíciójú objektumok a legegyszerűbbek, modelljeiket külső információforrás alapján rögzítjük. A rendszer pozíciójú objektum modelljét elemei modelljeiből és az elemek közötti kölcsönhatást leíró modellből származtatjuk.

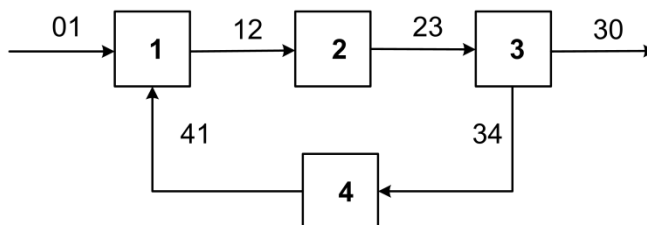
A rendszer pozíciójú objektum modellalkotása szempontjából a rendszereket két nagy csoportra oszthatjuk. Az egyik csoport a diszkrét rendszerek osztályát képezi. A diszkrét rendszerekben az elemek megtartják önállóságukat, így a rendszer modellt az elem modellekből „additív” módon képezzük, kiegészítve azokat az elemek közötti kapcsolatok leírásával. A 348. ábra például az 1, 2, 3, 4 nevű műveleti egységekből felépülő technológiai rendszer sémája látható. Az elemeket a 01 (környezetből belépő), 12, 23, 30 (környezetbe kilépő), 34, 41 kódú áramok kapcsolják össze. Az áramok jelentik a műveleti egységek közötti kapcsolatokat, amelyek leírhatók például az ún. kapcsolati mátrixszal, amely a kódhalmaz és a kapcsolati kódhalmaz Descartes szorzatán értelmezhető. A mátrix sorait az elemek, oszlopait a kapcsolatok definiálják. A megfelelő mezőbe 0, +1, -1 kerül annak függvényében, hogy az adott kapcsolat elkerüli, belépő vagy kilépő az adott elemből. A kapcsolatok leírására más megoldásokat is használnak (pl. szomszédossági mátrix, amely az elemek kódhalmazának önmagával képzett Descartes szorzatán értelmezhető).

A rendszer pozíciójú objektumok másik nagy csoportja a folytonos rendszerek osztálya. A folytonos rendszerek modellalkotása jelenti a modellezés egyik legösszetettebb lépését. A dekompozíció során eredendően mindig diszkrét rendszert kapunk. Nagyszámú elem esetében viszont a diszkrét rendszerre vonatkozó fenti leírás nem hatékony, gyakran lehetetlen (pl. egy folyadék csepp,  $10^{23}$  db nagyságrendű molekulából álló rendszernek tekinthető). Ilyen esetekben az eredendően diszkrét rendszert - a természettudományokban is alkalmazott fogáshoz hasonlóan - folytonos

rendszerként írjuk le. A folytonos rendszerként való leírásnál az alábbi feltételeknek kell teljesülnie:

1. Kellően nagyszámú elem és kapcsolat.
2. Az elemek modelljei izomorfak és a kapcsolatok is homogének a kapcsolatok terében.

A technológia, mint műveleti egységek hálózata:



Az elemek közötti kapcsolatok definiálása (mátrix, gráf, stb.):

	01	12	23	34	41	30
1	1	-1	0	0	1	0
2	0	1	-1	0	0	0
3	0	0	1	-1	0	-1
4	0	0	0	1	-1	0

### 348. ábra. Diszkrét rendszerek leírása

A rendszer egy tetszőleges elemét az ún. belső tulajdonságaival ( $y$ ) jellemezhetjük. A belső tulajdonságok, mint koordináták definiálják az elem állapotainak folytonos  $T_y$  -terét (ld. 349. ábra). A tér egy  $\pi_y \in T_y$  pontján méretüktől függetlenül, azonos állapotú (tulajdonságaik alapján megkülönböztethetetlen) elemek helyezkednek el. Például, ha a rendszer elem egy folyadék csepp, az jellemezhető a térfogatával ( $V$ ), a benne szereplő komponens koncentrációjával ( $c$ ), esetleg hőmérsékletével ( $T$ ), stb. Ekkor a belső tulajdonságok halmaza  $y = \{V, c, T\}$ . Az elemek közötti kölcsönhatásokat az ún. külső tulajdonságaival ( $x$ ) jellemezhetjük. A külső tulajdonságok, mint koordináták definiálják a kölcsönhatások folytonos  $T_x$  -terét. Két elem akkor és csak akkor van kölcsönhatásban, ha az adott időben, a  $T_x$  -tér azonos  $\pi_x \in T_x$  pontján helyezkednek el. Például, ha a folyadék cseppek egy reaktoron keresztül áramlanak a külső tulajdonságok a háromdimenziós geometria teret definiálják. Ugyanakkor, ha a geometriai teret csupán a hosszkoordinátával definiáljuk egy csőreaktorban, akkor a hosszkoordináta adott pontján lévő cseppek, a modellben akkor is kölcsönhatásban állnak egymással, ha fizikailag nem is érintkeznek (a csőreaktor egy keresztmetszetében helyezkednek el).

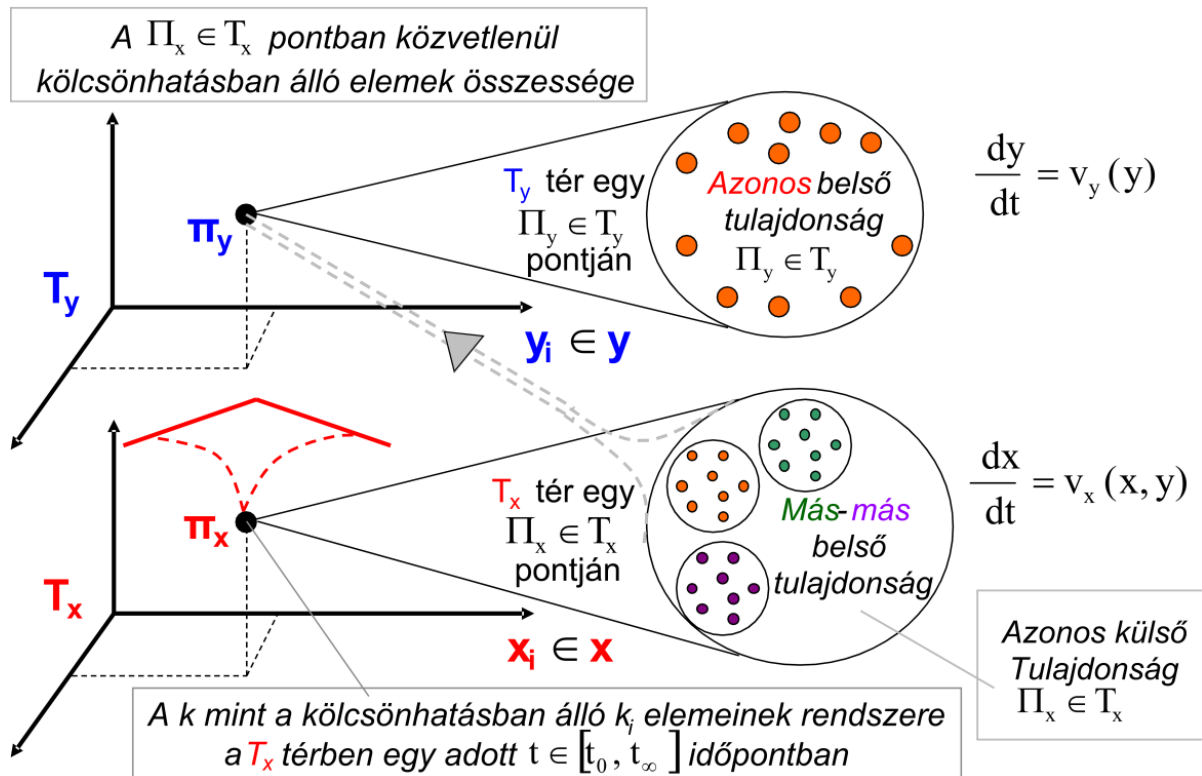
A rendszer pozíciójú objektum modelljének megalkotásához legyen adott az elemek modellje és a kapcsolatokat leíró modell:

**11.3. egyenlet:**

$$\frac{dy}{dt} = v_y(y) \quad (\text{elem modell})$$

**11.4. egyenlet:**

$$\frac{dx}{dt} = v_x(x, y) \quad (\text{kapcsolati modell})$$



349. ábra. A  $T_x$  és a  $T_y$  terek kapcsolata

Egyesítsük a belső és külső tulajdonságokat,  $z = x \cup y$  és hozzuk létre az ún. folytonos  $T_z$  fázis teret. A fázis tér egy  $\pi_z \in T_z$  pontjában az azonos belső és külső tulajdonsággal bíró elemek helyezkednek el (fizikai méretüktől függetlenül „elférnek” a tér egy zérus térfogatú pontján). A rendszer leírására a fázis térben értelmezzük az elemszám sűrűséget:

11.5. egyenlet:

$$\psi_z(t, z) = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta z},$$

ahol  $\Delta z$  a  $T_z$ -tér egy körbehatárolt részének térfogata, ill.  $\Delta N$  a körbehatárolt térrészben lévő elemek száma.

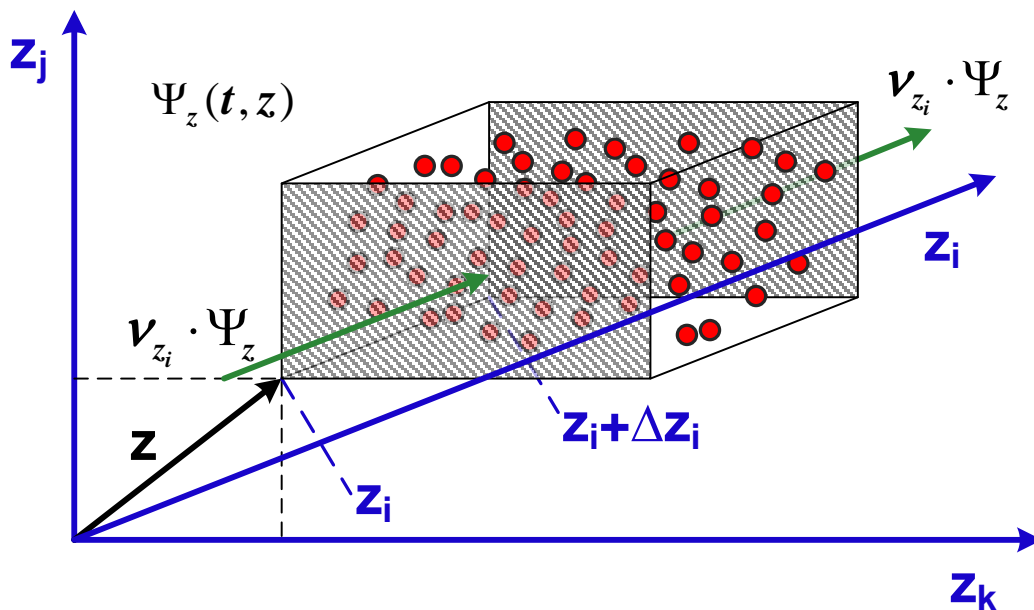
Az elemszám extenzív mennyiség, azért az elemszámra mérleget lehet felírni ugyanúgy, ahogyan mérleget készíthetünk a fázis tömegre, a komponens tömegre, az energiára és az impulzusra. A fázistérben az elemszám megváltozására ható konkrét jelenségek két nagy csoportra oszthatók:

1. A  $z_i \in z$  koordináta menti áramlás, hasonlóan a geometriai koordináta menti konvektív áramláshoz. Az áramlás mértékét a (11.3-11.4.) modellekben szereplő  $v_z$  függvények adják meg. Például folyadék cseppek rendszerében, a cseppben lejátszódó kémiai reakció a koncentrációváltoztatás által egy  $c$  koordináta menti „konvektív” áramot indukál.
2. Forrás. Minden egyéb olyan jelenség, amely nem tartozik az előző osztályba, de hat az elemszámra. A forrás (ill. a negatív forrás a nyelő) mértékét a  $q_z^s(z)$  elemszám forrassűrűség függvénnyel írjuk le. Például a folyadék cseppek összetapadása vagy diszpergálódása.

3. Lokális megváltozás: Az elemek számát az 1-2. jelenségek, mint okok igyekeznek megváltoztatni és ha nem kompenzálják egymás hatását, okozatként az elemek száma (ill annak fázistérbeli sűrűsége) időben megváltozik.

A fázistérben a rendszer elemek eloszlása általában inhomogén, ezért jelöljük ki a  $\underline{z}$  vektorral a tér egy pontját és az arra illeszkedő  $\Delta z = \Delta z_1 \cdot \Delta z_2 \cdot \dots \cdot \Delta z_i \cdot \dots \cdot \Delta z_n$  térfogatú,  $n$  (fázis tér koordinátáinak a száma) dimenziós téglatestet. Erre írjuk fel a mérleget az alábbiak figyelembe vételével (ld. 350. ábra):

1. A téglatestben bent lévő rendszer elemek száma:  $\Psi_z \cdot \Delta z$   
db,
2. A  $z_i = z_i$  felületen beáramló elemek száma:  $(\nu_z \cdot \Psi_z) / (\Delta z / \Delta z_i)$   
db/idő,  $i = 1, 2, \dots, n$ .
3. A  $z_i = z_i + \Delta z_i$  felületen kiáramló elemek száma:  $(\nu_z \cdot \Psi_z) / (\Delta z / \Delta z_i)$   
db/idő,  $i = 1, 2, \dots, n$ .
4. A téglatestben keletkező/eltűnő elemek száma:  $q_z^S \cdot \Delta z$   
db/idő.



350. ábra. Mérleg a fázistérben

Az 1. és 4. egy  $n$ -szeres térfogati integrál, a 2. és 3. pedig  $(n-1)$ -szeres felületi integrál, amelyeket az integrál középérték tételt alkalmazva az 1-4. szorzatokkal számolunk ki. Az egyes függvényeket a térfogat ill. felületek belső pontján kell venni. Amennyiben az 2-4. okok nem kompenzálják egymás hatását, akkor a bent lévő elemek száma időben megváltozik:

11.6. egyenlet:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\Psi_z \cdot \Delta z) = \dots + [\nu_z \cdot \Psi_z](\dots, z_i, \dots) \cdot \frac{\Delta z}{\Delta z_i} - [\nu_z \cdot \Psi_z](\dots, z_i + \Delta z_i, \dots) \cdot \frac{\Delta z}{\Delta z_i} + \dots + q_z^S \cdot \Delta z$$

A (11.6) egyenletet  $\Delta z$ -vel elosztva és a  $\Delta z \rightarrow 0$  határátmenetet elvégezve az elemszámra vonatkozó differenciális mérlegegyenlet az alábbi alakban írható fel:

**11.7. egyenlet:**

$$\frac{\partial \Psi_z}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(v_z \Psi_z) = q_z^s \quad ,$$

ahol 
$$\frac{\partial}{\partial z}(v_z \Psi_z) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial z_i}(v_{z_i} \Psi_z) \quad .$$

A 11.7. mérlegegyenlet az  $n$  db koordináta irányában a „konvektív (makroszkópikus) áramlásokat” és a forrást, mint okokat tartalmazza, amelyek ha nem kompenzálják egymás hatását, akkor okozatként az elemek száma időben megváltozik (lokális megváltozás). A definiált rendszerben a  $\Psi_z(t, z)$  teljes fázistérbeli ismerete jelenti a „teljes tudást”, amiből a rendszer egyéb tulajdonságai származtathatók. Ha például  $V \cdot c(V, c \in z)$  egy folyadékcseppben jelenti az adott komponens tömegét, akkor a  $V \cdot c \cdot \Psi_z(t, z)$  függvény a komponens tömeg fázistérbeli eloszlását adja. Az integrált mennyiségek is értelmezhetők, például az  $\mathfrak{S}_y(V \cdot c \cdot \Psi_z)$  mennyiség a komponens tömeg  $T_x$ -térbeli eloszlását adja. (Az  $\mathfrak{S}_y(f)$  integráloperátor az  $f$  függvény integrálját jelenti az  $y$  elemei szerint, azok teljes értelmezési tartománya felett.) Ha a  $T_x$  a geometriai tér és a folyadékcseppek a teret teljesen kitöltik az  $\mathfrak{S}_y(V \cdot c \cdot \Psi_z) / \mathfrak{S}_y(V \cdot \Psi_z)$  mennyiség egyben a folyadék fázis koncentrációját adja. A 11.7. parciális differenciálegyenlet a megfelelő kezdeti és peremfeltételek mellett elvileg megoldható. Két nehézség adódik:

- Az egyenletben szereplő függvények és paraméterek korrekt megadása (tartalmi nehézség).
- A több változó szerinti parciális differenciálegyenlet megoldása (formai nehézség).

A nehézségek kezelését az is indokolja, hogy a mérnöki feladat megoldás kisebb információ tartalmú modellek alkalmazásával is kielégíthető. Ezért a 11.7. mérleget nem közvetlenül, hanem a kisebb információ tartalmú modellek generálására használjuk fel. Ennek illusztrálására tekintsük a 351. ábra. A 11.7. leírást tekintsük a rendszer mikro szintű modelljének. Különböző mértékű integrálással ún. rendszer szintű tulajdonságokat definiálhatunk és ezen rendszer tulajdonságokra vonatkozó összefüggések adják a rendszer szintű modellt (makro szint).



**351. ábra. Különböző hierarchia szintű modellek kapcsolata**

Definiáljuk például az alábbi rendszer tulajdonságokat:

**11.8. egyenlet:**

$$\Phi_i = \mathfrak{I}_h[\varphi_i(y) \cdot \Psi_z] \quad /i=1,2,\dots,n \ ,$$

ahol  $\varphi_i(y)$  az elem egy extenzív mennyisége,  $h$  az integrálással eliminált változók halmaza. A  $\Phi_i$  rendszer tulajdonságra vonatkozó összefüggést a 11.7-11.8. összefüggésekből származtathatjuk:

**11.9. egyenlet:**

$$\frac{\partial \Phi_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial u} (\langle v_u \rangle \cdot \Phi_i) + \frac{\partial}{\partial u} \left( -a_u^i \cdot \frac{\partial \Phi_i}{\partial u} \right) = q_u^{\Phi_i} \quad /i=1,2,\dots,n \ ,$$

ahol  $u = z \setminus h$ , a rendszer  $T_u$ -terét definiáló koordináták,  $\langle v_u \rangle$  a  $v_u$  függvények  $T_u$ -térbeli átlag értékei,  $a_u^i$  a harmadik tag közelítésénél bevezetett új anyagi tulajdonság,  $q_u^{\Phi_i}$  a  $\Phi_i$  forrás sűrűsége a  $T_u$ -térben.

A 11.9. mérlegegyenlet tagjaival kapcsolatban az alábbiakat kell hangsúlyoznunk:

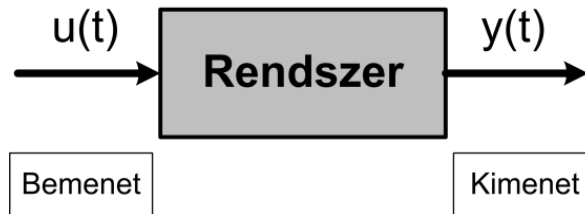
1. Konvekció a  $T_u$ -térben. A mikro szint  $u$  koordináták menti konvektív áramából adódik,  $\langle v_u \rangle$  átlagokkal számolva.
2. Kondukción a  $T_u$ -térben. A mikro szint  $u$  koordináták menti konvektív áramából adódik,  $\langle v_u \rangle$  átlagoktól való eltérések miatt (ld. Fick, Fourier, Navies-Stokes törvények a komponens tömeg, hő és impulzus transzportnál).
3. Forrás a  $T_u$ -térben. A mikro szint  $h$  koordináták menti konvektív áramából és az elemszám forrás sűrűségéből adódik.
4. Lokális megváltozás a  $T_u$ -térben. Amennyiben az (1-3.) jelenségek nem kompenzálják egymás hatását, akkor a  $\Phi_i$  extenzív mennyiség értéke időben megváltozik.

A rendszer változók megfelelő megválasztásával a 11.9. egyenlettel megfogalmazott rendszer modell zárttá tehető, ami azt jelenti, hogy a 11.7-11.8. összefüggésektől függetlenül megoldható. A 11.9. rendszer modell a változók megfelelő kiválasztásával lefedik az előző fejezet fundamentális egyenleteit, de generálhatók a különböző problémák populációs mérlegei is.

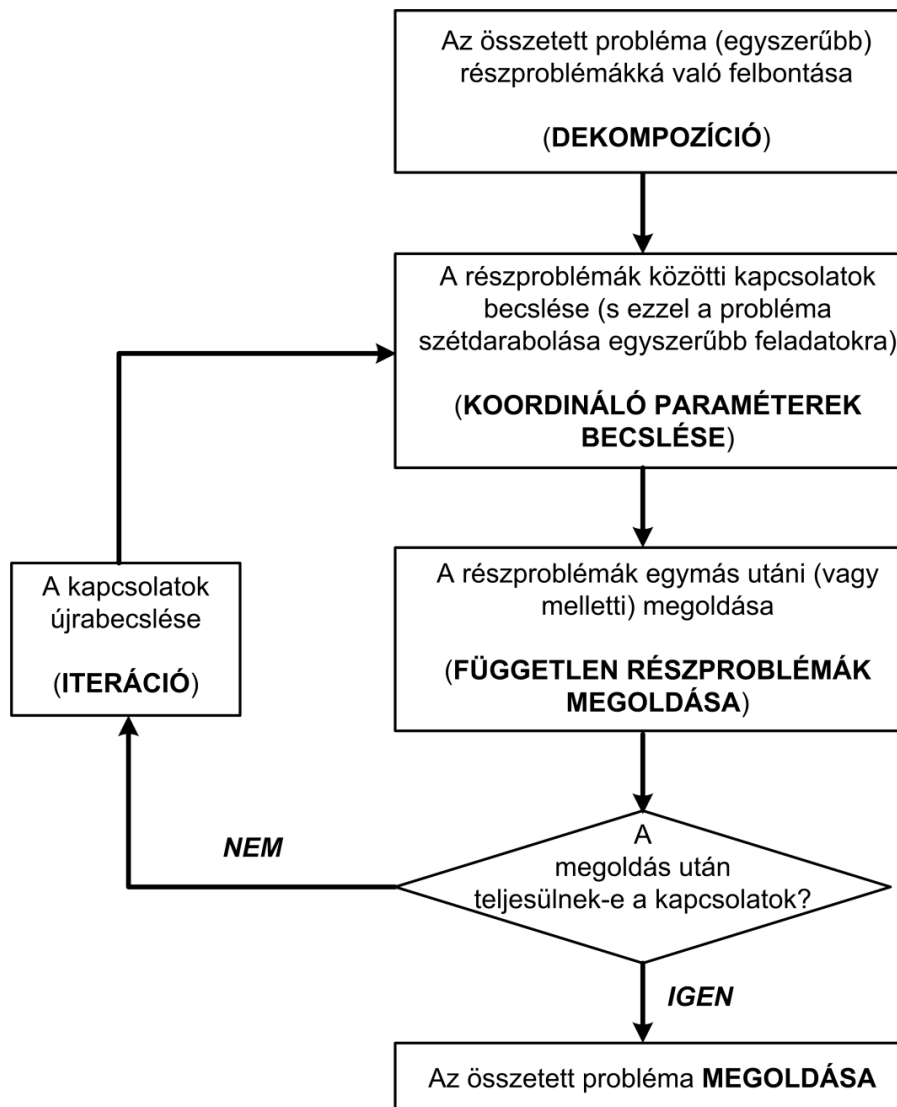
## A poszteriori modellezés technika

Az előző fejezetben összefoglaltuk az a posteriori modellek legfontosabb tulajdonságait. Egy ilyen modellről nem várjuk el, hogy visszatükörözze a modellezett objektum minden lényeges tulajdonságát, ugyanakkor elvárjuk azt, hogy a rendszerként definiált fizikai értelemmel is bíró  $y(t)$  kimenet és  $u(t)$  bemenet párokat megfelelő pontossággal leírják (ld. még 352. ábra). A rendszer szemlélet alkalmazása során a bemenetet a környezet határozza meg és mindig azt vizsgáljuk, hogy ennek függvényében a rendszer milyen kimenetet ad. Ezért a rendszer modell egy olyan függvény kapcsolat, amely a rendszer bemenetét a rendszer kimenetére képezi le. A

technológiai rendszerrel kapcsolatos mérnöki feladatok komplexek, ezért a megoldásukat segítő „egyszerű” rendszerek definiálása nem triviális. A feladatmegoldásban a dekompozíció-koordináció elvét alkalmazzuk (ld. 353. ábra), amely eredményeként az összetett feladatot könnyebben megoldható feladatok összehangolt megoldására vezetjük vissza.



352. ábra. A vizsgált rendszer



353. ábra. A dekompozíció-koordináció elve

## Rendszermodellek

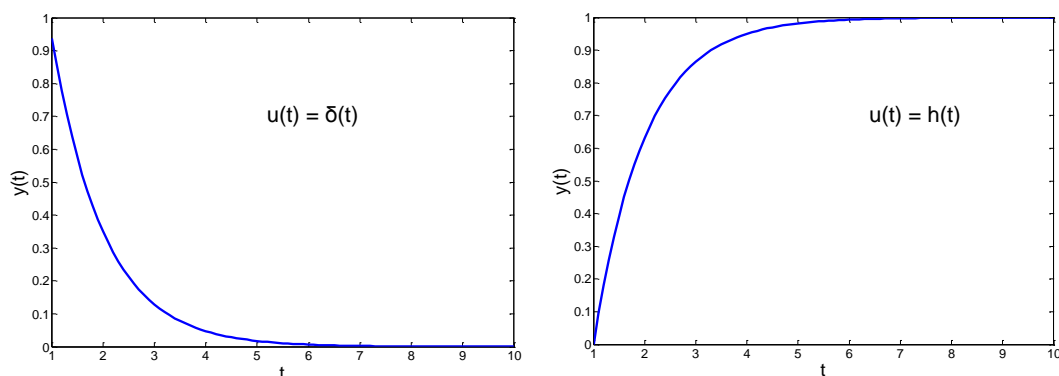
A 352. ábra bemutatott rendszerek leírásánál általában az 58. táblázat felsorolt rendszer modelleket alkalmazzuk. Ezek közül a leggyakrabban használtakat illusztrációként az alábbiakban mutatjuk be. Az egyik legegyszerűbb rendszer modell a bemenet kimenet modell, amely a rendszer kimenő jele különböző rendű differenciálhányadosainak lineáris kombinációját, a bemenő jele különböző rendű differenciálhányadosainak lineáris kombinációjával teszi egyenlővé:

**11.10. egyenlet:**

$$\sum_{i=0}^n a_{n-i} \frac{d^i y}{dt^i} = \sum_{i=0}^m b_{m-i} \frac{d^i u}{dt^i} ,$$

ahol a 0-ad rendű derivált a függvényértéket jelenti;  $m, n$  egész számok (paraméterek) a rendszer (bemeneti, kimeneti) rendűségét definiálják;  $a_i$  /  $i=1,2,\dots,n$ , ill.  $b_i$  /  $i=1,2,\dots,m$  a rendszer modell fizikai értelemmel nem bíró paraméterei.

A 11.10. egyenlet által definiált rendszer viselkedése a benne szereplő paraméterek konkrét értékeitől függ. Gyakran jellemezzük a rendszert az ún. súlyfüggvényével ill. az átmeneti függvényével, amelyek a Dirac-delta egység impulzus ( $\delta(t)$ ) ill. Heaviside egység ugrás ( $h(t)$ ) függvényekre adott válasz függvények (elsőrendű rendszernél ld. 354. ábra).



**354. ábra. Elsőrendű rendszer súly- és átmeneti függvénye**

Láttuk, hogy az irányított technológia a szűkebb értelemben vett technológiai rendszerből és a folyamatirányító (leginkább digitális) számítógépből áll. A számítógépben a 11.10. egyenlet közvetlenül nem jeleníthető meg, ezért azt egy jól megválasztott  $T_0$  mintavételezési idővel diszkrétizáljuk. Ennek eredménye a diszkrét idejű bemenet kimenet modell:

**11.11. egyenlet:**

$$\sum_{i=0}^n a_i y_{k-i} = \sum_{i=0}^m b_i u_{k-i} ,$$

ahol  $u_k$ ,  $y_k$  a diszkrét bemenő, ill. kimenő jel;  $m, n$  egész számok (paraméterek) a rendszer (bemeneti, kimeneti) rendűségét definiálják;  $a_i$  /  $i=1,2,\dots,n$ , ill.  $b_i$  /  $i=1,2,\dots,m$  a rendszer modell fizikai értelemmel nem bíró paraméterei.



A bemenet-kimenet modellek mellett gyakran használjuk az állapottér modelleket is, amelyek felépítését a 355. ábra szemlélteti. Ennél a fizikai értelemmel bíró bemenetek és kimenetek mellett definiáljuk az állapot fogalmát is (nem szükségszerű, hogy fizikai értelme legyen). A kimenetet a bemenetből és állapotokból számoljuk (kimeneti függvény,  $\underline{G}(x,u)$ ), az állapotok megváltozását ugyancsak a bemenetből és az aktuális állapotokból kapjuk (állapot átmeneti függvény,  $\underline{F}(x,u)$ ). Lineáris esetben mind az állapot átmeneti függvény, mind a kimeneti függvény az aktuális állapot és a bemenet lineáris kombinációja:

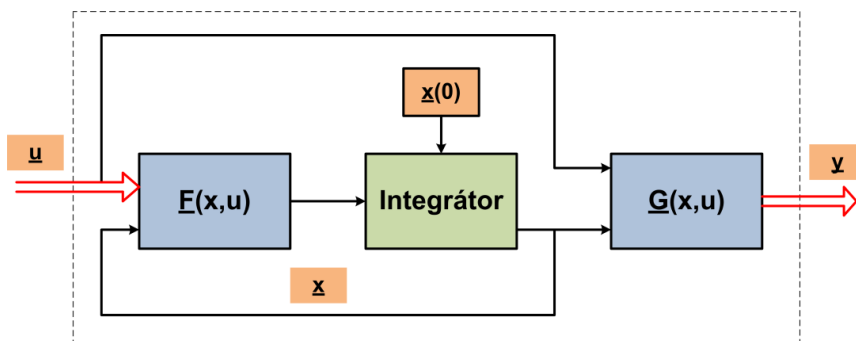
**11.12. egyenlet:**

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu \quad , \quad (\text{állapot átmeneti függvény})$$

**11.13. egyenlet:**

$$y = Cx + Du \quad , \quad (\text{kimeneti függvény})$$

ahol  $A$  rendszer mátrix,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  további paraméter mátrixok, a rendszer rendűségét az  $x$  vektor mérete adja meg.



355. ábra. Az állapottér modellek szerkezete

A megfelelő diszkrét idejű modell, a diszkrét állapottér modell az alábbi formát ölti:

**11.14. egyenlet:**

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k \quad , \quad (\text{állapot átmeneti függvény})$$

**11.15. egyenlet:**

$$y_k = Cx_k + Du_k \quad , \quad (\text{kimeneti függvény})$$

ahol  $u_k$ ,  $x_k$ ,  $y_k$  a diszkrét bemeneti, állapot ill. kimeneti változó.

Az időben folytonos differenciál egyenletek ill. rendszerek Laplace-transzformációval, az időben diszkrét differencia egyenletek ill. rendszerek pedig Z-transzformációval algebrai egyenletekké ill. egyenlet-rendszerre alakíthatók. Értelmezhetjük a rendszer átviteli függvényét, amely a kimenet transzformáltja, osztva a bemenet transzformáltjával, zérus kezdeti feltételek mellett. Ennek megfelelően transzformált tartományban a rendszer kimenete, a bemenet és az átviteli függvény szorzatával állítható elő. Ez rendkívül egyszerű leírást tesz lehetővé és nagy előnye, hogy a

rendszer vizsgálatot a transzformált tartományban is elvégezhetjük, nincs szükség a körülményes inverz transzformációk elvégzésére.

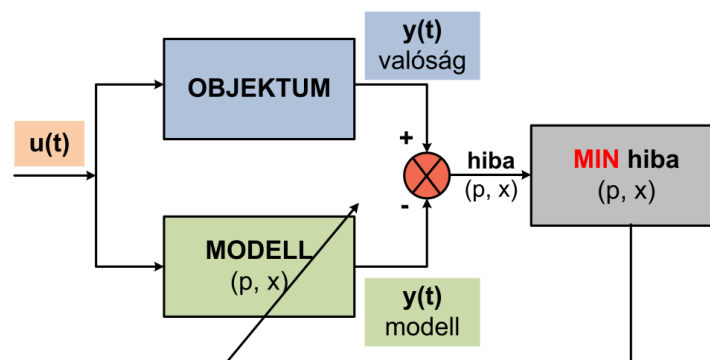
A fenti lineáris rendszermodellek kölcsönösen átalakíthatók egymásba, matematikai egyszerűségük folytán a rendszeranalízis szívesen alkalmazott eszközei.

## Paraméter identifikáció

A fenti rendszermodellek számos olyan paramétert tartalmaznak, amelyeknek nincs fizikai tartalma, csupán azt a célt szolgálják, hogy a tételezett matematikai összefüggések kellő pontossággal visszatükrözzék a bemenetek és kimenetek dinamikus kapcsolatát. Ez csak úgy lehetséges, hogy a modell felhasználása előtt, a fizikai rendszeren gyűjtött adatok alapján ezeknek a paramétereknek olyan értékeit határozzuk meg, amelyek biztosítják a modell adekvátságát. Ezt a műveletet identifikációnak (mesterséges neurális hálózati modelleknél tanításnak) nevezzük, amelynek a legfontosabb lépései az alábbiak:

1. A változók megválasztása (rendszer definíció, a leírás mélysége, kísérlettervezés, stb.).
2. A modell struktúra kiválasztása (struktúra identifikáció).
3. A paraméterek becslése (paraméter identifikáció, grafikus és numerikus módszerek).
4. A modell adekvátságának ellenőrzése.

Az identifikáció műveletét a 356. ábra szemlélteti. A modellt párhuzamosan „kapcsoljuk” a valós objektummal, vagyis mindkettőnek ugyanaz a bemenete. Azt vizsgáljuk, hogy különböző bemenőjel hatására, hogyan változik a két kimenet, amelyek különbségéből képezhető a modell hiba. Egy olyan feltételes szélsőérték problémát kell megfogalmazni, amelyben a modell paramétereit variálva, a modell hiba minimumát keressük. Ennek megoldása az identifikált paraméter értékek. Az identifikációra egyszerű grafikus technikákat is alkalmazhatunk. Például a rendszer átmeneti függvényét ismerve a legfontosabb modell paraméterek (erősítési tényező, időállandó, holtidő) szinte közvetlenül leolvashatók. Mindent kielégítő pontos eredményeket viszont csak a jól kidolgozott numerikus módszerek (pl. a legkisebb négyzetek módszere) adnak.



356. ábra. Az identifikáció művelete

Az a posteriori modellek a rendszerek irányításában használhatók fel hatékonyan.

## Irányított reaktor vizsgálata (esettanulmány)

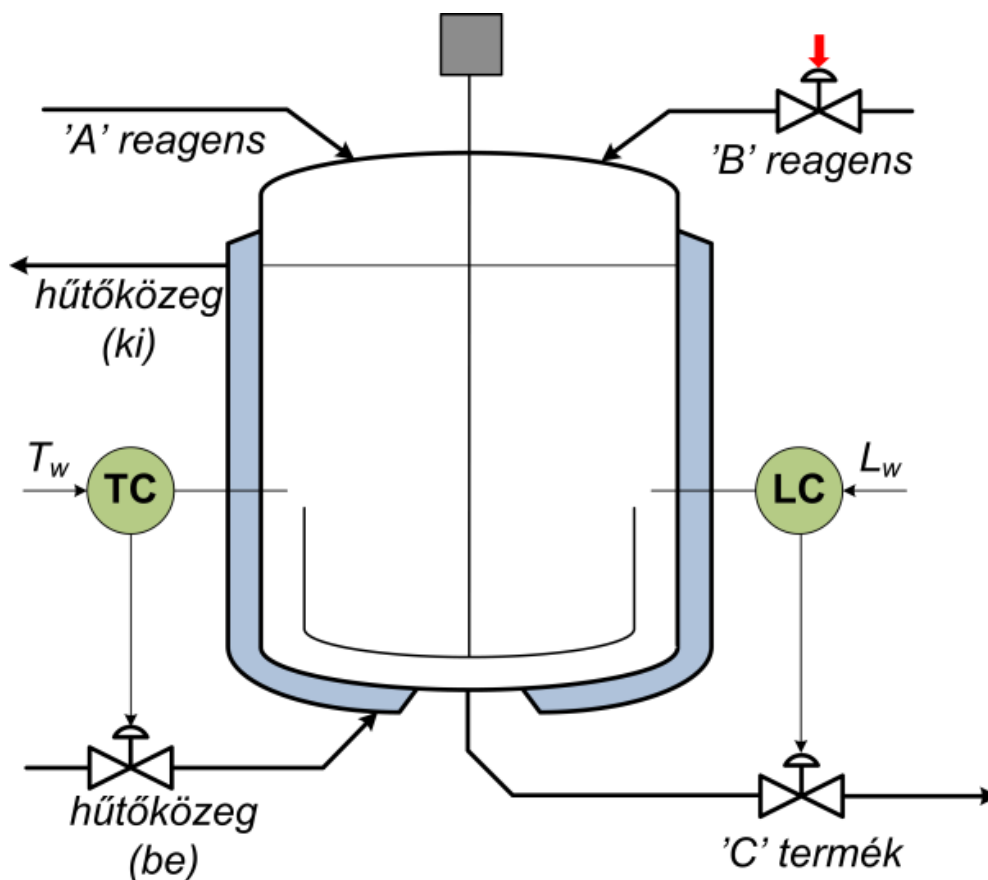
Az a priori és az a posteriori modellezés technikák illusztrálása céljából egy reaktor vizsgálat részleteit mutatjuk be. A reaktor egy technológiai rendszer része, műszerezési diagramja a 357. ábra látható. A reaktor maga egy keverővel ellátott fűthető-hűthető autokláv, amelybe két csővezetéken keresztül (az egyiket szabályozott módon) vezethetjük be a reagenseket. A szintszabályozást a termék elvételével, a reaktor hőmérsékletét pedig a hűtő (fűtő) közeg tömegáramával szabályozzuk. A rendszer kapcsán a hőmérsékletszabályozást és az irányított reaktor dinamikai viselkedését vizsgáljuk meg.

A hőmérsékletszabályozás sémája a 358. ábra látható, amely egy összetett rendszer. Részei az irányítandó objektum és a szabályozó. Az irányítandó objektum, a hőközlő közeg mennyiségét meghatározó szabályozó szelep pozíciója (bemenet,  $u$ ) és a reaktor hőmérséklet (kimenet,  $y$ ) kapcsolatát leíró rendszerként definiálhatók. Leírhatjuk ezt például egy elsőrendű holtidős bemenet-kimenet modellként:

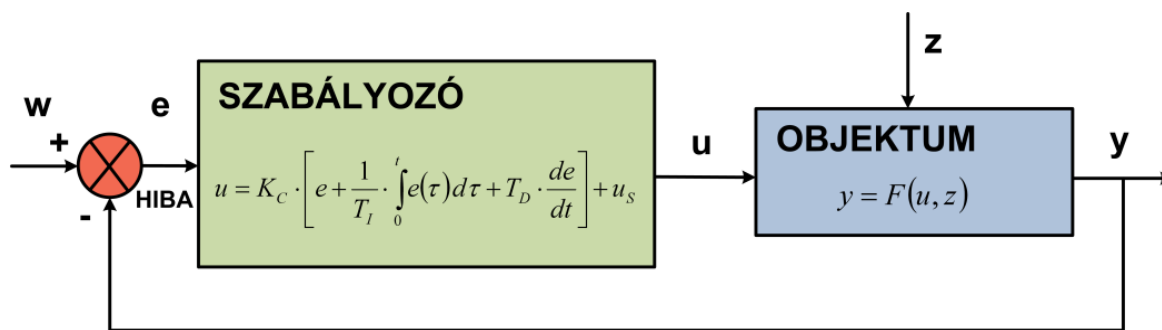
**11.16. egyenlet:**

$$\tau \frac{dy}{dt} + y = Ku(t - t_h) \quad ,$$

ahol  $K$ ,  $\tau$ ,  $t_h$  identifikálható paraméterek (erősítési tényező, időállandó, holtidő).



357. ábra. A vizsgált reaktor műszerezési diagramja



358. ábra. A hőmérsékletszabályozás sémája

A reaktoron végzett céltudatos kísérletekből a modell paramétereit meghatározhatók, és a modell alapján megtervezhető az irányított rendszer másik eleme a szabályozó, amely a folyamatirányító számítógépben egy algoritmus formájában realizálható. A szabályozó tervezés áll egy szabályozó típus kiválasztásából (pl. PID-szabályozó) és a szabályozó paramétereinek meghatározásából ( $K_C$ ,  $T_I$ ,  $T_D$ ). Ez utóbbiak a modell paraméterek függvényeként adhatók meg.

A reaktor tervezéséhez ill. az irányított rendszer dinamikájának vizsgálatához az a priori modellek használata szükséges. Az első lépés a megfelelő modell struktúra kialakítása, amely tartalmazza a rendszer elemeit, az elemek elemeit, valamint az elemek közötti domináns kölcsönhatásokat is (ld. 359. ábra). Egyszerű esetet vizsgáljunk, egy folyadék fázisban egy elsőrendű kémiai reakció játszódjék le, és a terekben tökéletes keveredést tételezzünk fel. Ekkor a reaktor belsőre egy komponens tömeg és egy hőmérleg, a köpenyterre pedig egy hőmérleg felírása szükséges:

11.17. egyenlet:

$$\frac{d(V \cdot c)}{dt} = B \cdot (c_{be} - c) - V \cdot k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) \cdot c$$

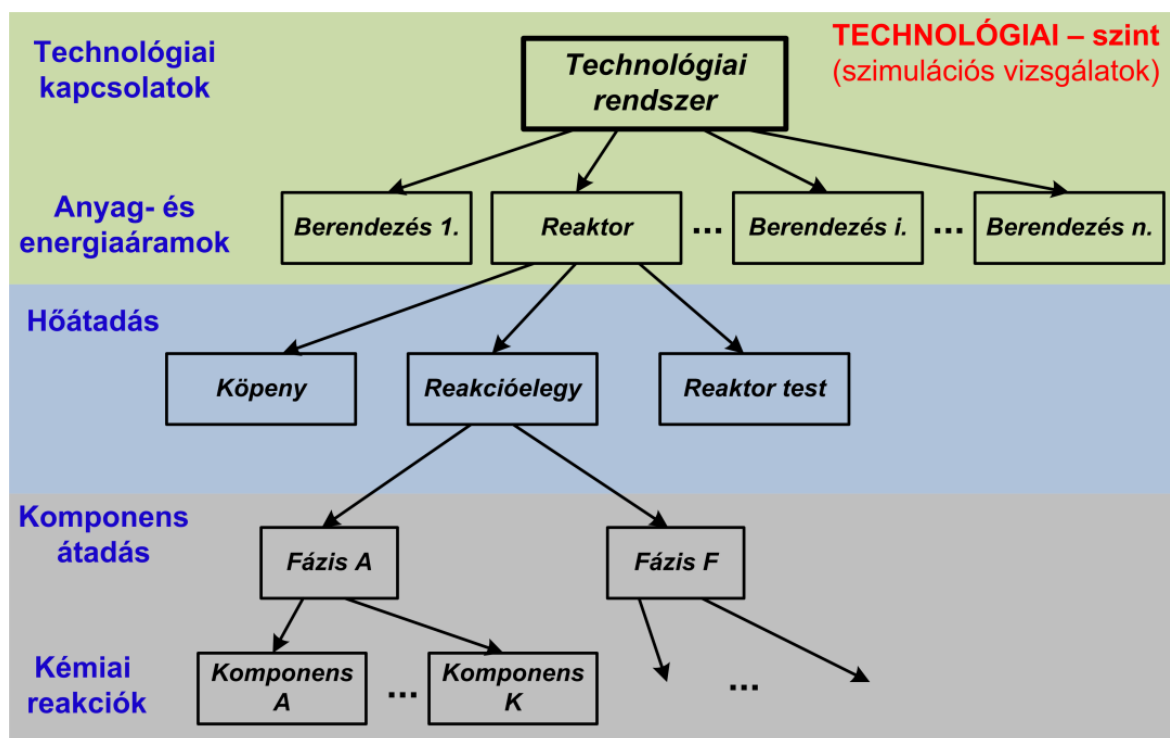
11.18. egyenlet:

$$V \cdot \rho \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} = B \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{be} - T) + V \cdot k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) \cdot c \cdot (-\Delta H_R) - \alpha \cdot F \cdot (T - T_H)$$

11.19. egyenlet:

$$(V \cdot \rho \cdot c_p)_H \cdot \frac{dT_H}{dt} = (B \cdot \rho \cdot c_p)_H \cdot (T_{H,be} - T_H) + \alpha \cdot F \cdot (T - T_H) \quad ,$$

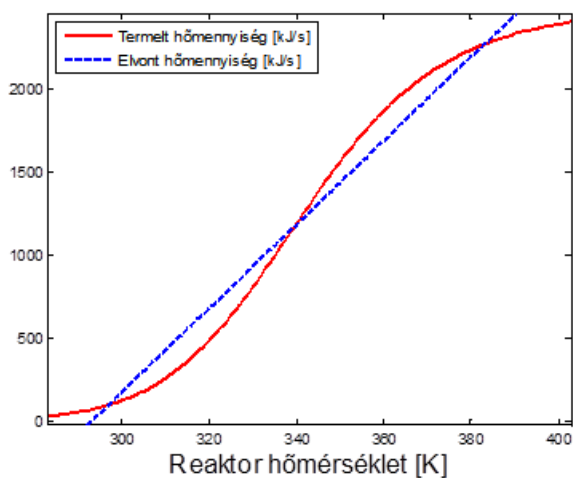
ahol  $V$ ,  $c$ ,  $T$ ,  $T_H$ , sorban a következők térfogat, koncentráció, reaktor ill. köpeny hőmérséklet (állapotváltozók);  $B$  a térfogatáram;  $\rho$ ,  $c_p$ ,  $k_0$ ,  $\Delta H_R$ ,  $E_A$ ,  $R$  termodinamikai és reakció paraméterek;  $\alpha$ ,  $F$  a hőátzármaztatási tényező, felület; az alsóindexekben  $be$  a belépést,  $H$  pedig a húzóközeget jelöli.



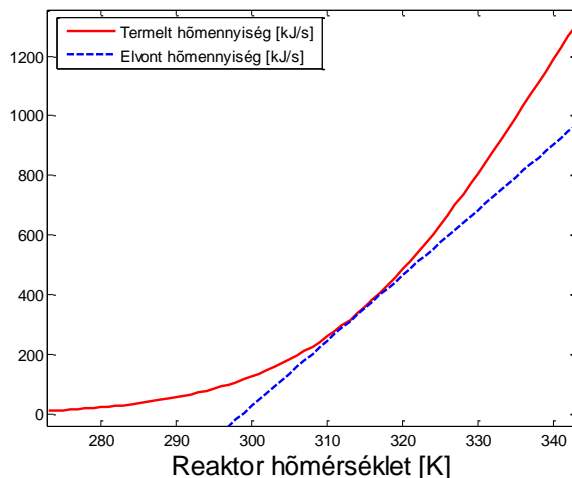
359. ábra. A reaktor struktúrája

A 11.17-11.19. egyenletekkel megfogalmazott modell a hőmérséklet szabályozás nélküli reaktor dinamikus viselkedését írja le. A reaktor tervezés szempontjából fontos a stacioner állapot vizsgálata is. A stacioner modellt, a deriváltak zérusra állításával kapjuk, amely formailag egy háromváltozós nemlineáris egyenletrendszer. A numerikus megoldását szemlélteti a 360. ábra. Ennél a reaktor hőmérlegének lineáris és nemlineáris komponenseit (amelyek hőáramok) külön-külön ábrázoljuk a hőmérséklet függvényében. A megoldást a hőáramok metszéspontjai adják. Általában három megoldást is kapunk, amelyek közül a középső instabil. Az instabilitás igazolása végett tételezzük fel, hogy a reaktort olyan zavarás érte, amely következtében a hőmérséklet nagyobb lett. Magasabb hőmérsékleten ugyanakkor a hőtermelés nagyobb a hőelvétnél, ezért a hőmérséklet nem hűl vissza a stacioner pontba. A másik irányba változtatva a hőmérsékletet viszont nem melegszik vissza, ami az adott munkapont instabilitását jelenti. A fenti gondolatmenettel igazolhatjuk a másik két munkapont stabilitását. A lehetséges stabil munkapontok közül bármelyikben huzamosan üzemelhet a reaktor. Az indítási feltételek határozzák meg, hogy melyik lesz a tényleges munkapont. A 360. ábra egy olyan reaktor karakterisztika látható, amelynek egy stacioner megoldása létezik, és megállapítható, hogy az instabil. Ez azt jelenti, hogy bármelyik kezdőállapotból kiindulva a reaktor nem kerül stacioner állapotba. Jól látható ez a 361. ábra, amelyen az időben összetartozó koncentráció-hőmérséklet értékeket az ún. fázistérbeli trajektóriák mutatják (a  $K_C = 0$  jelenti azt, hogy a szabályozó nincs bekapcsolva). A hőmérséklet nő a reagens fogy. Kapcsoljuk be ezek után a szabályozót és állítsuk be a paramétereit (legyen arányos ún. P-szabályozó:  $K_C = 10$ ,  $1/T_I = T_D = 0$ ). A dinamikus karakterisztika jellegében megváltozik (ld. 361. ábra) és a kezdeti értékektől függetlenül a reaktor hőmérséklet a szabályozó alapjeléhez közelít ( $T_w = 30\text{ °C}$ ). A koncentráció és a hőmérséklet időbeli lefutását a 362. ábra mutatja. Az egyszerű szabályozó tehát stabilizálja a reaktort, azaz az irányítandó objektum instabil, az irányított objektum pedig stabil. Mindez fordítva is

előfordulhat, az irányítandó objektum stabil, az irányított objektum pedig instabil. Ilyenkor a szabályozó újrahangolásával kell az irányított objektumot stabilizálni.

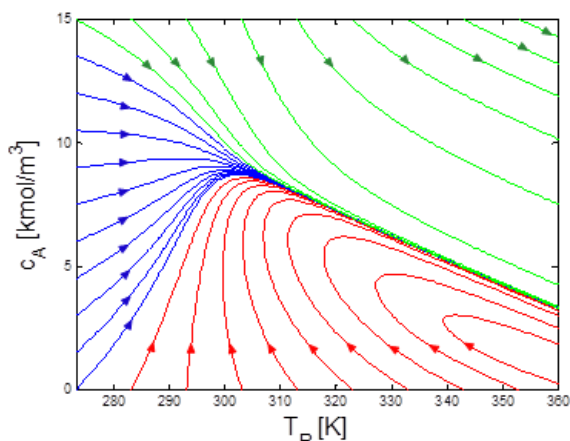


a) Két stabil stacioner munkapont

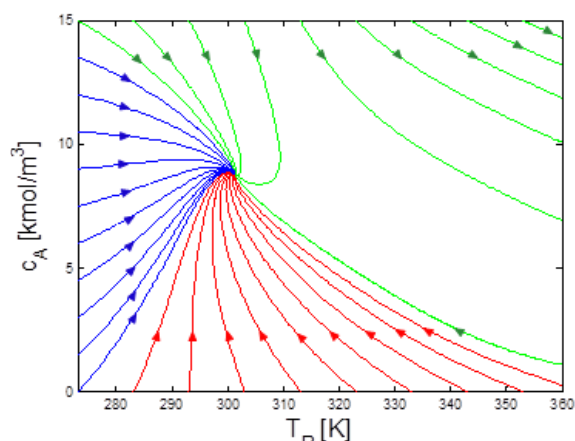


b) Nincs stabil stacioner munkapont

360. ábra. A stacioner modell megoldásának illusztrációja

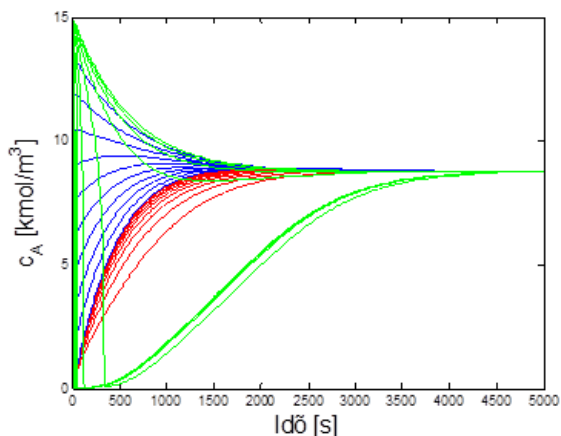


a) Nincs szabályozó

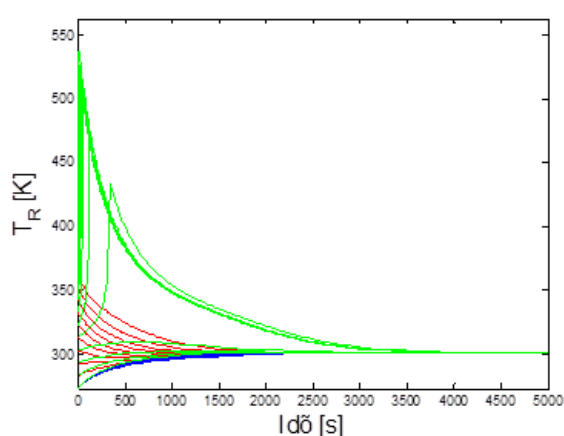


b) A szabályozó stabilizál

361. ábra. Instabilitás a fázistérben



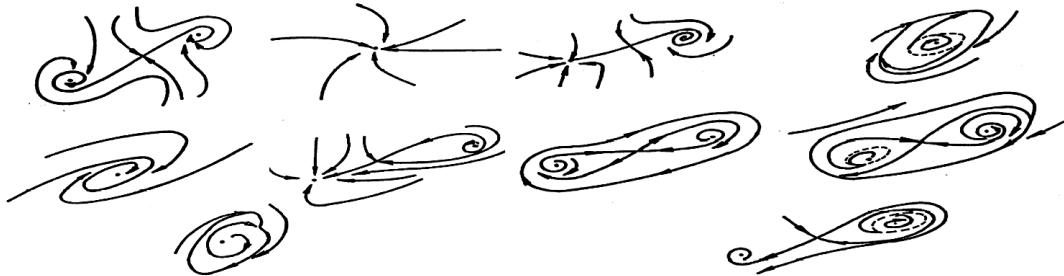
a) A reagens koncentrációjának változása



b) A reaktor hőmérsékletének változása

362. ábra. A reaktor dinamikus viselkedése arányos szabályozó esetén

A fentiek érzékeltetik, hogy a viszonylag egyszerű objektum is képes összetett dinamikai viselkedésre. Már tökéletesen kevert üstreaktorban lejátszódó elsőrendű kémiai reakció is képes, különböző paraméterek mellett, igen különböző dinamikai viselkedésre. Jól illusztrálja ezt a 363. ábra, amely a stacioner munkapont körüli dinamikus viselkedést mutatja a fázis síkban.



**363. ábra.** Lehetséges fázis portrék elsőrendű reakciónál

## Irodalomjegyzék

- BENEDEK P., LÁSZLÓ A.: A vegyészmérnöki tudomány alapjai; 1964; Budapest; Műszaki Könyvkiadó; .
- FONYÓ ZS., FÁBRY GY.: Vegyipari művelettani alapismeretek; 2004; Budapest; Nemzeti Tankönyvkiadó; .
- ÁRVA P., SZEIFERT F.: Kémiai technológiai rendszerek matematikai modellezése; 1981; Magyar Kémikusok Lapja; ; 648:656.
- RAMIREZ W. F.: Computational Methods for Process Simulation; 1989; Butterworths Series in Chemical Engineering; ; .
- VAJDA S.: Vegyipari folyamatok dinamikája és irányítása; 1984; Budapest; Tudományos szervezési és Informatikai Intézet; .
- FONYÓ Zs.-FÁBRY Gy.: 1998 Vegyipari művelettani alapismeretek Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest
- FÁBRY Gy.:1995;Élelmiszeripari eljárások és berendezések; Mezőgazda; Budapest
- PERRY J. H.; Vegyészmérnökök kézikönyve II. , Műszaki Könyvkiadó; Budapest; 1969;1099-2384 old.
- IMRE L.;1974;Szárítási Kézikönyv; Műszaki Könyvkiadó; Budapest;1121 oldal
- HALÁSZ J.-HANNUS I.-KIRICSI I.;1998;A környezetvédelmi technológia alapjai;JATE Phare Program HU-94.05;Szeged;153
- Barótfi István: Környezettechnika kézikönyv. Budapest, 1991.
- Dr. Benedek Pál: Víz tisztítás – szennyvíztisztítás zsebkönyv. Műszaki, Budapest, 1989.
- Dr. Öllös Géza: Szennyvíztisztító telepek üzemeltetése I-II. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1995.
- Dr. Tömösy László:Víz tisztaságvédelem-szennyvíztisztítás. Oktatási segédlet. (BME Gépészeti Eljárástechnika Tanszék, 2004)
- Fűzi O.: Áramlástechnikai gépek, Tankönyvkiadó, Budapest, 1974
- Barátfi I.: Energia felhasználói kézikönyv, Környezet-technika Szolgáltató Kft Budapest, 1996
- Magyar Energia Hivatal: Megújuló energiaforrások a villamos energia-termelésben, Budapest, 2006
- <http://www.nrel.gov/learning/NREL> National Renewable Energy Laboratory 2006
- BARÓTFI I.(szerk.): Energiafelhasználói Kézikönyv. Budapest: KÖTECH Kiadó, 1994. p. 1009.
- BARÓTFI I (szerk.): Környezettechnika. Budapest: Mezőgazda Kiadó, 2000. p. 968.
- BÜKI G.: Energetika. Műegyetemi Kiadó Budapest, 1999.
- TÓTH P.-BULLA M.: Energiagazdálkodás és környezet (Akkreditált felsőfokú szakképzés, PHARE IPSE 243401) Győr, 1998.
- VAJDA GY.: Kockázat és biztonság Akadémiai Kiadó, Budapest, 1998.
- EUROPEAN UNION; Integrated Pollution Prevention and Control, Reference Document on Best Available Techniques for Large Combustion Plants; 2006.
- SENKAN S.; CASTALDI M.; Combustion, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry; 2005, Wiley-VCH.
- VAJTA L., SZEBÉNYI I., CZENCZ M.; Kémiai technológia; 1985; Budapest.



- Eurelectric; "EURELECTRIC proposal for a Best Available Techniques Reference Document for Large Combustion Plants"; 2001.
- EUROPEAN COMMISSION; Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC), Reference Document on Best Available Techniques for Mineral Oil and Gas Refineries; 2001.
- IRION W. W.; NEUWIRTH O. S.; Oil Refining; Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry; 2003; Wiley-VCH.
- EUROPEAN COMMISSION; Integrated Pollution Prevention and Control Draft Reference Document on Best Available Techniques for the Manufacture of Large Volume Inorganic Chemicals, - Ammonia, Acids and Fertilisers, Final Draft; October 2006.
- EFMA; "Production of Ammonia", Best Available Techniques for Pollution Prevention and Control in the European Fertilizer Industry; (2000).
- GERMAN UBA; "Large Volume Gaseous and Liquid Inorganic Chemicals"; 2000.
- UK EA; "IPC Guidance note on Inorganic Chemicals"; 1999; S2 4.04.
- 11 UHDE; "Ammonia" 2004.
- APPL, M; Ammonia; Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry; 2005; Wiley-VCH.
- THIEMANN M., SCHEIBLER E., WIEGAND K. W.; Nitric Acid, Nitrous Acid, and Nitrogen Oxides; Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry; 2005; Wiley-VCH.
- MEESSEN J. H., PETERSEN H.; Urea; Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry; 2005; Wiley-VCH.
- GERMAN UBA; "German Notes on BAT for the production of Large Volume Solid Inorganic Chemicals: Urea"; 2001.
- AUSTRIAN UBA; "Stand der Technik in der Schwefelsäureerzeugung im Hinblick auf die IPPC-Richtlinie"; 2001; M-137.
- EFMA; "Production of Sulphuric Acid"; 2000.
- KRISTIANSEN H., JENSEN K.; "The Topsøe Wet gas Sulphuric Acid (WSA) Process for Treatment of lean Sulphurous Gases"; Sulphur; 2004.
- EFMA; Best Available Techniques for Pollution Prevention and Control in the European Fertilizer Industry; "Production of ammonium nitrate and calcium ammonium nitrate"; 2000.
- SCHMITTINGER P., FLORKIEWICZ T., CURLIN L. C., LÜKE B., SCANNELL R., NAVIN T., ZELFEL E., BARTSCH R.; Chlorine; Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry; 2006; Wiley-VCH.
- EUROPEAN COMMISSION; Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) Reference Document on Best Available Techniques in the Chlor-Alkali Manufacturing industry; 2001.
- SPRUNG S., KROPP J., Cement and Concrete; Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry; 2005; Wiley-VCH.
- EUROPEAN COMMISSION; Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) Reference Document on Best Available Techniques in the Cement and Lime Manufacturing Industries; 2001.
- PHELPS G. W., WACHTMAN, JR. J. B.; Ceramics, General Survey; Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry; 2005; Wiley-VCH.
- EUROPEAN COMMISSION; Integrated Pollution Prevention and Control Draft Reference Document on Best Available Techniques for the Ceramic Manufacturing Industry; Final Draft September; 2006.
- EUROPEAN COMMISSION; Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) Reference Document on Best Available Techniques in the Glass Manufacturing Industry; 2001.
- DE JONG B. H. W. S., BEERKENS R. G. C., van NIJNATTEN P. A.; Glass; Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry; 2005; Wiley-VCH.

- PATT R., KORDSACHIA O., SÜTTINGER R., OHTANI Y., HOESCH J. F., EHRLER P., EICHINGER R., HOLIK H., HAMM U., ROHMANN M. E., MUMMENHOFF P., PETERMANN E., MILLER R. F., FRANK D., WILKEN R., BAUMGARTEN H. L., RENTROP G-H.; Paper and Pulp; Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry; 2005; Wiley-VCH.
- EUROPEAN COMMISSION; Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) Reference Document on Best Available Techniques in the Pulp and Paper Industry; 2001.
- VAJTA L., SZEBÉNYI I., CZENCZ M.; Általános kémiai technológia; 1989; Budapest; Tankönyvkiadó; 382.
- GERECS Á.; Bevezetés a kémiai technológiába; 1995; Budapest; Nemzeti Tankönyvkiadó; 605.
- STOCCHI E.; Industrial Chemistry; 1990; New York; Ellis Horwood; 712.
- TWISS B., GOODRIDGE M., Managing Technology for Competitive Advantage; 1989; London; Pittman.
- PATAKI B.; Technológiamenedzsment; 2005; Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem; Oktatási segédlet; 91.
- BENEDEK P., LÁSZLÓ A. A vegyészmérnöki tudomány alapjai; 1964; Budapest; Műszaki Könyvkiadó; 440.
- MANG B., ISTVÁN ZS., MURVAI J., CSIZMADIA L., TÓTH A.; A tiszta technológiák és környezeti biztonsági rendszerek fejlesztése és bevezetése I. (MTA Stratégiai Kutatások); Tanulmány; 1997; Budapest; BKE Környezetgazdaságtani és technológiai tanszék; 51.
- GRÁFF J., TOLDY F., SZ.TÓTH GY., VERES G.; A hazai kohászat légszennyezése (MTA Stratégiai Kutatások);1999; Budapest; BKE Környezetgazdaságtani és technológiai tanszék; 41.
- EUROPEAN UNION; Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) – Best Available Techniques References Document on the Production of Iron and Steel;2001
- ULLMANN'S Encyclopaedia of Industrial Chemistry, 5 edition. IRON; 1991; VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim Vol. 461-590.
- ULLMANN'S Encyclopaedia of Industrial Chemistry, 5 edition. STEEL; 1994; VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim Vol. 63-307.
- SCHMÖLE P., LÜNGEN H.B.; Hot metal production in the blast furnace from an ecological point of view; 2004; Presentation at the 2<sup>nd</sup> International Meeting on Ironmaking. Brazil.
- TARDY P., KÁROLY GY.; Az oxigénes acélgártás és az elektroacélgártás lehetséges arányainak alakulása a betéllátás függvényébe. 2003; Vaskohászat 136 évf. 3.szám. 121-127.
- SZIKLAVÁRI J.; Vaskohászat és környezetgazdálkodás; 2002; Magyar Tudomány; 2002/7. szám; 903-917.
- RENTZ O. Report on Best Available Techniques in the Electric Steelmaking Industry; 1997; D-Karlsruhe; French-German Institute for Environmental Research.
- BENEDEK P., LÁSZLÓ A.: A vegyészmérnöki tudomány alapjai; 1964; Budapest; Műszaki Könyvkiadó;.
- FONYÓ Zs., FÁBRY Gy.: Vegyipari művelettani alapismeretek; 1998; Budapest; Nemzeti Tankönyvkiadó;.
- LAJOS T.: Az áramlástan alapjai; 2004; Budapest; Műegyetemi Kiadó;.
- ÁKOSHEGYI Gy., NÉMETH I.: Fürdők kézikönyve, Tervezés – építés - üzemeltetés; 2006; Budapest; A Magyar Fürdőszövetség kiadásában,.

- KASZATKIN A. G.: Alapműveletek, gépek és készülékek a vegyiparban; 1976; Budapest; Műszaki Könyvkiadó;
- CIBOROWSKI J.: A vegyipari műveletek alapjai; 1969; Budapest; Műszaki Könyvkiadó;
- European Chemical Industry Council; [www.cefic.be](http://www.cefic.be)
- WEISSERMEL K., ARPE H-J.: Industrial Organic Chemistry, Fourth, Revised Edition; 2003; Weinheim; Wiley-VCH; 491;
- DEÁK GY.: Szerves vegyipari alapfolyamatok kézikönyve; 1978; Budapest; Műszaki Könyvkiadó; 1052;
- GERECS Á.; Bevezetés a kémiai technológiába; 1995; Budapest; Nemzeti Tankönyvkiadó; 605;
- HANNUS I., HALÁSZ I., FEJES P.: Kémiai technológia (egyetemi jegyzet); 1990; Szeged; JATE Kiadó; 338;
- GROGGINS P. H.: A szintetikus szerves vegyipar alapeljárásai; 1958; Budapest; Műszaki Könyvkiadó; 800;
- LOSONCZI B.: Szerves kémiai technológia; 1988; Budapest; Tankönyvkiadó; 137;
- HEISZMAN J.: Szerves kémiai technológia; 1991; Budapest; Tankönyvkiadó; 205;
- PONGRÁCZ A-NÉ, TÓTH ZS., VILABOY J. T.: MDI-termékek gyártásának és minőségének fejlesztése a BorsodChem Rt.-nél; 1999; Magyar Kémikusok Lapja; 54. évf., 9. sz.; 425-429;
- ELSCHENBROICH Ch., SALZER A.: Organometallics, 1992; Weinheim; VCH Verlagsgesellschaft mbH; 495;
- FAIGL F., KOLLÁR L., KOTSCHY A., SZEPE L.: Szerves fémvegyületek kémiája; 2001; Budapest; Nemzeti Tankönyvkiadó; 448;
- TŐRÖS SZ., HEIL B.: Nagyszелеktivitású szerveskémiai szintézisek; Oktatási segédlet; 1987; Veszprémi Vegyipari Egyetem; 62;
- BAHRMANN H., BACH H.: Oxo Synthesis in ULLMANN'S Encyclopaedia of Industrial Chemistry; 2000; Wiley-VCH Verlag GmbH;
- FALBE J.: New syntheses with carbon monoxide; 1980; New York; Springer-Verlag; 465;
- HORVÁTH I. T. (ed): Encyclopedia of Catalysis Vol. 1-6; 2003; New Jersey; Wiley-Interscience; 814; 814; 808; 789; 777; 770;
- LENGYEL Z.: Bevezetés a biotechnológiába; Oktatási segédlet; 1994; Veszprémi Egyetem, 111;
- MARKÓ L.: Miért „balkezesek” a fehérjéket felépítő aminosavak?; 1999; Természet világa; 130. évf., 1. sz.; 2-6;
- TANG W., ZHANG X.: New chiral phosphorus ligands for enantioselective hydrogenation; 2003; Chem. Rev.; 103; 3029-3069;
- ALMÁDI C., NÁDASY M.: Növényvédőszer-kémia, kari jegyzet; 1987; Keszthely; Agrártudományi Egyetem; 204;
- DIÓSPATONYI I.: A húsfeldolgozás technológiája;  
<http://www.chemonet.hu/hun/food/technol/husipar/husipar.html>
- BARÓTFI I.: Környezettechnika, 2000; Budapest; Mezőgazda Kiadó; 981;
- DIÓSPATONYI I.: A zöldség- és gyümölcsfeldolgozás technológiái;  
<http://www.chemonet.hu/hun/food/technol/zoldseg/zoldseg.html>
- BIACS P., CSUTORA M., HORNYÁK M., HORVÁTH A., ILLÉS Z., LÁBODY J., PRÉM K., RÉDEY Á., SZABÓ I., SZEKÉR K., TAMASKA L., TÓTH G., ZIMLER T.: Hulladékgazdálkodás; 2003; Budapest; Tertia Kiadó; 320;
- MOHOS F.: Édesipari technológia; 1990; Budapest; Kertészeti és Élelmiszeripari Egyetem; 281;

- BALOGH CS., SZEKERES SZ.: A sajtgyártás és melléktermékeinek kezelése; hallgatói tanulmány; 2002; Veszprémi Egyetem; 26;
- CSOHÁNY M., DOMAK ZS.: Csokoládégyártás; hallgatói tanulmány; 2002; Veszprémi Egyetem; 24;
- KÁRPÁTI Á.: A tejfeldolgozás szennyvízei és tisztításuk; doktori (PhD) értekezés; 1997; Veszprémi Egyetem; 122;
- BENEDEK P., LÁSZLÓ A.: A vegyész-mérnöki tudomány alapjai; 1964; Budapest; Műszaki Könyvkiadó;
- GYARMATI I.: Nemegyensúlyi termodinamika; 1976; Budapest; Műszaki Könyvkiadó;
- FONYÓ Zs., FÁBRY Gy.: Vegyipari művelettani alapismeretek; 1998; Budapest; Nemzeti Tankönyvkiadó;
- LISZI J.: Fizikai kémia; 1993; Veszprém; Veszprémi Egyetemi Kiadó;
- MARTON Gy., DENCS B.: Vegyipari Műveletek; 1978; Veszprém; Veszprémi Egyetemi Kiadó;
- HALÁSZ J., HANNUS I.: A vegyipari és környezettechnikai műveletek alapjai; 2005; Szeged; JATE Press;
- Dr. Gruber József – Dr. Blakó Miklós: Folyadékok mechanikája, Tankönyvkiadó, Budapest, 1971
- Barótfi István: Környezettechnika, Mezőgazda Kiadó, Budapest, 2000
- <http://www.nrel.gov/learning/NREL> National Renewable Energy Laboratory 2006
- OMSZ: Szélsébségi adatok
- Magyar Energia Hivatal: The operation of the Hungarian electricity system, konferencia előadás, 2005. június 26-27.
- EWEA: Wind power installed in Europe by and of 2004.
- Magyar Energia Hivatal: Megújuló energiák, összeállítás, Budapest, 2006.
- dr. Rakonczai J.: Globális Környezeti Problémák Debrecen, 2003
- Zöld Híd Energetikai és Környezetvédelmi Tanácsadó egyesülés konferenciája: A geotermikus energia hasznosításának lehetőségei Magyarországon Harkány, 2002
- Dr. Patkó István: Műszaki Ábrázolás és Gépszerkezetek II. KMF főiskolai jegyzet Budapest, 1994
- Megújuló energiaforrások hazai hasznosítási irányelvei a területi tervezéshez KTM, Budapest, 1996
- Monoki Á. – Barna T.: Környezetbarát energiák Debrecen, 2001

## Ábrajegyzék

1. ábra. Propeller keverő.....	19
2. ábra Egykomponensű rendszer p-v-T diagramja.....	24
3. ábra Egykomponensű rendszer p-T diagramja.....	25
4. ábra Egykomponensű rendszer p-v diagramja.....	25
5. ábra. A széndioxid sűrűsége, viszkozitása és öndiffúziós állandója a nyomás függvényében 35 °C-on.....	26
6. ábra Ideális elegy p-x diagramja.....	28
7. ábra Reális elegy p-x diagramja.....	29
8. ábra Reális elegy p-x-T fázisdiagramja.....	30
9. ábra Reális elegy p-x diagramja.....	31
10. ábra Reális elegy T-x diagramja.....	32
11. ábra Reális elegy p-T diagramja.....	33
12. ábra Konvektív áram.....	34
13. ábra Nyírófeszültség.....	37
14. ábra Kétfilmelmélet.....	40
15. ábra Koncentrációviszonyok a kétfilmelmélet szerint.....	41
16. ábra Kétfilmelmélet hő- és impulzusátadásra.....	41
17. ábra Differenciális mérleg egyfázisú rendszerben.....	44
18. ábra Hajtóerő és koncentrációprofil egyenáramú műveleti egységekben.....	48
19. ábra Hajtóerő és koncentrációprofil ellenáramú műveleti egységekben.....	49
20. ábra Ellenáramú műveleti egység integrális mérlege.....	50
21. ábra Többfokozatú ellenáramú műveleti egység.....	51
22. ábra Tartózkodási idő sűrűségfüggvény.....	53
23. ábra Tartózkodási idő eloszlásfüggvény.....	54
24. ábra Belső koreloszlás sűrűségfüggvény.....	55
25. ábra Impulzusfüggvény.....	56
26. ábra Egységugrás függvény.....	57
27. ábra Dugószerű áramlás sebességprofilja.....	59
28. ábra Dugószerű áramlású cső tartózkodási idő sűrűség- és eloszlásfüggvénye.....	60
29. ábra Lamináris áramlás sebességprofilja.....	61
30. ábra Lamináris áramlású cső tartózkodási idő sűrűség- és eloszlásfüggvénye.....	62
31. ábra Turbulens áramlás sebességprofilja.....	63
32. ábra Turbulens áramlású cső tartózkodási idő sűrűségfüggvénye.....	63
33. ábra Visszakeveredéssel áramlású cső tartózkodási idő sűrűség- és eloszlásfüggvénye a $Pe'$ szám függvényében.....	65
34. ábra Töltetes cső sebességprofilja.....	66
35. ábra Tartózkodási idő sűrűségfüggvény töltetes csőben.....	67
36. ábra Cső recirkulációs árammal.....	67
37. ábra Recirkulációs reális cső tartózkodási idő sűrűségfüggvénye.....	68
38. ábra Tökéletesen kevert üst.....	68
39. ábra Tökéletesen kevert üst tartózkodási idő sűrűség- és eloszlásfüggvénye.....	69
40. ábra Tökéletesen kevert üstkaszád.....	70
41. ábra Tökéletesen kevert üst tartózkodási idő sűrűség- és eloszlásfüggvénye.....	71
42. ábra Vegyipari berendezések csoportosítása tartózkodási idő eloszlás szerint.....	72
43. ábra. Nyírófeszültség és sebességeloszlás kialakulása két párhuzamos lap között.....	77
44. ábra. A newtoni és a nemnewtoni folyadékok folyásgörbéi, és sebesség profiljai csőben.....	78
45. ábra. A newtoni fluidum lamináris áramlása kör keresztmetszetű csőben.....	80
46. ábra. Sűrűségi tényező a $Re$ -szám függvényében Colebrook szerint.....	86

47. ábra. A keverő elvi rajza .....	92
48. ábra. Az Ülepítésnél fellépő erők és körüláramlott gömb áramvonalai .....	94
49. ábra. Ülepedés instacionáris tartományban .....	97
50. ábra. Töltött oszlop jellemzői .....	99
51. ábra. Töltött oszlopon a nyomásesés és a porozitás a sebesség függvényében .....	103
52. ábra. A szűrés elvi rajza .....	106
53. ábra. A centrifugában kialakuló folyadékfelszint .....	109
54. ábra. A szerveskémiai technológia tárgya .....	111
55. ábra. A szelektív szintézisek egyes típusai .....	112
56. ábra. Az EU vegyipari termelésének megoszlása 2005-ben országok szerint .....	115
57. ábra. Az EU vegyiparának felosztása iparágak szerint .....	116
58. ábra. A kőolaj és földgáz, mint szerves vegyipari nyersanyag .....	117
59. ábra. A szén, mint szerves vegyipari nyersanyag .....	118
60. ábra. A biomassza, mint szerves vegyipari nyersanyag .....	118
61. ábra. A szerves vegyipar egyes alapanyagainak termelése .....	119
62. ábra. A szerves vegyipari alapfolyamatok .....	119
63. ábra. Kevert nitrálás – háromszög diagram .....	120
64. ábra. Benzol szakaszos nitrálása .....	121
65. ábra. Benzol szulfonálása .....	122
66. ábra. HF katalizátoros alkilező üzem folyamatábrája .....	124
67. ábra. MDI technológia sémája a BorsodChem Rt.-nél [9] .....	125
68. ábra. Poliuretán habok szerkezete .....	126
69. ábra. A klorál előállítása .....	126
70. ábra. A monoklórecetsav előállítása .....	127
71. ábra. Izopropilalkohol előállítása propén hidratálásával .....	128
72. ábra. A fenol előállítási módszerei .....	130
73. ábra. A n-dibutil-ftalát szintézis technológiája .....	132
74. ábra. A homogénkatalitikus ciklusok elemi lépései .....	134
75. ábra. Egy általános katalitikus ciklus .....	135
76. ábra. Wacker szintézis reakciómechanizmus .....	136
77. ábra. Heck-Breslow reakciómechanizmus .....	138
78. ábra. Általános technológiai séma a hidroformilezésre .....	140
79. ábra. Vegyipari termékek szintézis gázból .....	140
80. ábra. Ecetsav szintézis Monsanto eljárással .....	142
81. ábra. Gyógyszerhatóanyagok, finomkémiai intermedierek szintézise (sztöchiometrikus reakció fémorganikus reagensekkel) .....	146
82. ábra. Szakaszos üzemű bioreaktor a járulékos szerelvényeivel .....	147
83. ábra. Biotecnológiai termékek ára .....	148
84. ábra. Optikai izomerek eltérő hatása .....	150
85. ábra. Gyógyszerhatóanyagok .....	150
86. ábra. Királis foszfánok .....	152
87. ábra. Nobel-díjasok a XXI. században a fémorganikus kémia területéről .....	152
88. ábra. Heterogénizált, DIOP-tartalmú katalizátor előállítása .....	153
89. ábra. H-Cube™: nagynyomású, folyamatos üzemmódú mikro hidrogénező készülék .....	154
90. ábra. Tenzidek hidrofíll-lipofil egyensúlya .....	155
91. ábra. A növényvédőszer hatóanyag kutatás fázisai .....	157
92. ábra. A cukorgyártás technológiai folyamata .....	160
93. ábra. A Theobroma cacao, a csokoládé alapanyaga .....	161
94. ábra. Folytonos üzemű csokoládémassza gyártó .....	161
95. ábra. „CAVEMIL” rendszerű csokoládékészítmény gyártósor vázlata .....	162

96. ábra. A hagyományos kolbász gyártási műveletei .....	163
97. ábra. A tejipar főbb termékei .....	167
98. ábra. Az ementáli sajt gyártásának technológiája .....	168
99. ábra A technológiai életciklus törvénye .....	172
100. ábra Folyamatábra példák .....	175
101. ábra Technológiai mérleg I. ....	176
102. ábra Technológiai mérleg II. ....	177
103. ábra Sankey-diagram .....	178
104. ábra Kitermelés (Yield).....	181
105. ábra Konverzió .....	182
106. ábra Környezettechnológiai variánsok beruházási és üzemeltetési költségeinek viszonya .....	188
107. ábra A Földkéreg szerkezete .....	189
108. ábra Ércdúsítási módszerek I.....	195
109. ábra. Elvi folyamatábra: ásványi nyeresanyag metallurgiai előkészítése ipari feldolgozásra .....	196
110. ábra Pelletező eljárások .....	196
111. ábra. Vas-szén ötvözetek állapotábrája és a széntartalomtól függő acélfajták .....	200
112. ábra Koksizálás .....	204
113. ábra Koksizálókemence .....	206
114. ábra A koksizoló kamrák elvi működését szemléltető séma: .....	207
115. ábra Koksizálás lépései .....	208
116. ábra Koksizoltás .....	209
117. ábra Koksizoló üzem vízáramai .....	211
118. ábra. A koksizológymű elvi távlati képe és szennyezési forrásai .....	213
119. ábra. Koksizoló üzem emissziós forrásai .....	213
120. ábra Levegőelőmelegítő .....	214
<b>121. ábra. A kohósalakok, az üveg- és a kerámiaanyagok elhelyezkedése a <math>SiO_2 - CaO - Al_2O_3</math> rendszerben:</b> .....	216
122. ábra. Kohósalakok hasznosítása az EU országaiban .....	217
123. ábra. Nyersvas és acélgyártási eljárások elve .....	217
124. ábra Kohósalakok felhasználása .....	218
125. ábra. Az integrált vas-, és acélgyártás fő technológiai folyamatai, inputok és emissziók .....	219
126. ábra Nagykohó és kiszolgáló egységeinek panoráma elrendezése .....	220
127. ábra. Vasolvasztó nagykohó .....	221
128. ábra Nagyolvasztó felépítése .....	223
129. ábra Egyensúlyi reakciók a nagyolvasztóban .....	224
130. ábra Torokgázok összetétele .....	225
131. ábra. Oxigén befúvásos acél-konverter .....	229
132. ábra. OBM konverter keresztmetszete .....	229
133. ábra Másodlagos metallurgiai kezelés folyamatai .....	231
134. ábra. Oxigén-konverteres acélgyártás .....	232
135. ábra. Az EAF eljárás áttekintő folyamatai .....	233
136. ábra Acélkohó .....	234
137. ábra A technológiai folyamat egyes szakaszaiban képződő emissziók .....	235
138. ábra. A kibocsátásra kerülő kiemelt szennyezők relatív emissziójának értékei .....	236
139. ábra. A teljes primer energia termelés Mtoe-ben (kőolajegyenérték, 1 Mtoe = 16,3 GJ) .....	238
140. ábra. Szén és gáztüzelésű hőerőmű fontosabb részegységei .....	242

141. ábra. A Carnot hatásfok összehasonlítása az egyes erőműtípusok hatásfokával a működési hőmérséklet függvényében. ....	244
142. ábra. Erőművek tüzelőanyagai és kibocsátásai .....	244
143. ábra. Zsákos füstgáz szűrő .....	246
144. ábra. Mészköves mosás vázlatos rajza .....	248
145. ábra. Csökkentett NO <sub>x</sub> kibocsátású égők működése, felső ábrán levegő, alsó ábrán tüzelőanyag és levegő megosztással. ....	249
146. ábra. Kombinált gázturbinás és gőzturbinás fűtőerőmű .....	251
147. ábra. 9. ábra A kőolaj desztilláció folyamatábrája .....	254
148. ábra. Krakküzem (FCC) folyamatábrája .....	255
149. ábra. Folyamatos regenerálással működő katalitikus reformáló. ....	256
150. ábra. Üzemanyag töltőállomás a gőzök visszanyerésével a) benzin vezeték, b) légző .....	260
151. ábra. Szénszűrős üzemanyag gőz visszanyerés a járműben, .....	260
152. ábra. Tároló és szállító rendszer üzemanyag gőz visszanyeréssel. ....	260
153. ábra. Az illékony anyagok eltávolítása csővégi technikáinak alkalmazási lehetőségei a finomítóknál, a koncentráció és a térfogatáram függvényében. ....	261
154. ábra. Uhde radiációs és szekunder vízgáz reformer .....	265
155. ábra. Ammónia szintézis körök lehetséges konfigurációi .....	267
156. ábra. A salétromsav gyártás abszorpciós lépése során lejátszódó reakciók .....	270
157. ábra. A salétromsavgyártás berendezéseinek folyamatábrája .....	271
158. ábra. N <sub>2</sub> O bontás az oxidációs reaktorban másik katalizátorral .....	272
159. ábra. Karbamid előállítás folyamatábrája. ....	274
160. ábra. A kénsavgyártás kiindulási anyagai és a kénsav felhasználása .....	275
161. ábra. A kénsavgyártás folyamata. ....	276
162. ábra. Nedves kénsavgyártási technológia folyamatábrája. ....	277
163. ábra. NPK műtrágyák előállítása foszfát ásványokból .....	279
164. ábra. Higanys elektrolizáló és bontó cella elvi működése .....	282
165. ábra. Diafragmás (bal oldalon) és membrános (jobb oldalon) elektrolízis cella .....	282
166. ábra. Oxigénnel depolarizált katód működése .....	285
167. ábra. Klinkerkemence rostélyos előmelegítővel és hűtővel. ....	286
168. ábra. Cementgyártás folyamata .....	289
169. ábra. Cement szilárdulási folyamata. ....	290
170. ábra. Fluidizációs rendszerű cementgyártás folyamatábrája. ....	291
171. ábra. Párhuzamos áramlású regeneratív kemence. ....	293
172. ábra. Égető kemence mozgatható kocsival .....	296
173. ábra. Görgős égető kemence .....	297
174. ábra. Fáraó fej üvegbe öntve és a Charles katedrális üvegablakai .....	299
175. ábra. Regeneratív, kereszttüzelésű üvegolvasztó kemence. ....	302
176. ábra. A palackfűtés folyamatának lépései. ....	304
177. ábra. Síküveggyártó berendezés vázlata. ....	305
178. ábra. Üveggyapot előállító berendezés vázlata. ....	306
179. ábra. A lignin főbb reakciói pépesítés közben. ....	307
180. ábra. Az energiahordozók osztályozása .....	312
181. ábra. Magyarország erőművei .....	317
182. ábra. A világ helyzetének alakulását bemutató modell .....	319
183. ábra. A világ energiafelhasználásának várt alakulása .....	319
184. ábra. Üvegházhatású gázok hozzájárulása a légköri hőmérséklethez .....	320
185. ábra. Az egyes üvegházgázok változása .....	322
186. ábra. Az energetika természeti-gazdasági kapcsolata .....	323



187. ábra. A primer energiafelhasználás szerkezete Magyarországon .....	325
188. ábra. Az energiaátalakítás folyamata .....	326
189. ábra. Magyarország energiafelhasználásának szerkezete .....	327
190. ábra. Az energiaköltség egy magyar háztartás költségeiben .....	327
191. ábra. Az energiafelhasználás arányai az átlagos magyar háztartásban (közlekedés nélkül) .....	328
192. ábra. Energianád ültetvény, és nemesnyár energetikai faültetvény .....	339
193. ábra. Brikettálás dugattyús géppel .....	344
<b>194. ábra. Fabrikett és agripellet.</b> .....	344
195. ábra. CO <sub>2</sub> -neutrális energiatermelés biomasszából .....	345
196. ábra. Kétaknás kiskazán és pellettüzelő kiskazán .....	346
197. ábra. Nagykazán .....	347
198. ábra. Hibrid-fluid tüzelési séma .....	347
199. ábra. Biogáz-termelés és hasznosítás .....	349
200. ábra. Biogáztermelő akna .....	350
201. ábra. Nedves (sz.a. < 12%) biogáz-technológia .....	352
202. ábra. Csőfermentoros biogáztelep komplex hasznosítással .....	353
203. ábra. Kisteljesítményű gázturbinák (24 kW) párhuzamos üzemmódban .....	354
204. ábra. Szélkerék áramlási viszonya .....	356
205. ábra. Szélerőmű .....	358
206. ábra. Szélerőmű gondolájának axonometrikus rajza .....	359
207. ábra. Hálózatra táplálási üzemmód elvi kapcsolási vázlata .....	360
208. ábra. Termásvíz közvetett felhasználása .....	364
209. ábra. Hőszivattyú elvi kapcsolása .....	367
210. ábra. Csőfektetési módok .....	368
211. ábra. Alulcsapott vízkerék elvi elrendezése .....	371
212. ábra. Alulcsapott vízkerék elmélete .....	371
213. ábra. Duzzasztóműves erőmű elvi vázlata .....	374
214. ábra. Francis-turbina .....	375
215. ábra. Kaplan-turbina .....	375
216. ábra. Szivattyús-tározós erőmű .....	376
217. ábra. Felülcsapott vízkerék .....	377
218. ábra. Bánki-turbina .....	378
219. ábra. Pelton-turbina .....	379
220. ábra. Kéndioxid-levegő-víz rendszer egyensúlyi görbéje 20°C-on .....	381
221. ábra. T-x-y (hőfok, móltörtek) diagram (kvalitatív) .....	383
222. ábra. T-x-y (hőfok, móltörtek) diagram (kvalitatív) egyre növekvő nyomások esetén ...	384
223. ábra. x-y egyensúlyi diagram (kvalitatív) .....	384
224. ábra. Gőz-folyadék egyensúlyok alapesetei .....	385
225. ábra. Tenzio görbe (kvalitatív) .....	386
226. ábra. Cox-diagram (kvalitatív) .....	386
227. ábra. Anyagátbocsátás abszorpciónál, „a” komponensre nézve .....	391
228. ábra. Egyfokozatú ellenáramú abszorpciós egység .....	392
229. ábra. Többfokozatú (n db.) ellenáramú abszorpciós egység .....	393
230. ábra. Egyensúlyi fokozatok meghatározása .....	396
231. ábra. Töltött abszorber vázlatos rajza .....	398
232. ábra. Abszorber minimális folyadékáramának meghatározása .....	401
233. ábra. Egyfokozatú egyenáramú abszorpciós egység .....	402
234. ábra. Egyenáramú abszorber munkavonala .....	402
235. ábra. Ellenáramban üzemelő abszorber .....	403

236. ábra. Egyenáramban üzemelő abszorberek .....	404
237. ábra. Speciális abszorberek .....	405
238. ábra. Abszorber-deszorber rendszer, melegítéssel, rektifikálással .....	406
239. ábra. Deszorpció $y-x$ diagramja .....	407
240. ábra. Folyamatos egyensúlyi desztilláció .....	408
241. ábra. Folyamatos egyensúlyi desztilláció bemutatása $T-x-y$ diagramon .....	408
242. ábra. Biner folyamatos egyensúlyi desztilláció megvalósíthatósága .....	409
243. ábra. Szakaszos desztilláció .....	410
244. ábra. A rektifikálás elve .....	413
245. ábra. Tányéros kolonna sematikus rajza .....	414
246. ábra. Az elméleti tányér fogalma .....	415
247. ábra. Rektifikáló oszlop külső és belső áramai műveleti számításhoz .....	418
248. ábra. A betáplálási hely áramainak számítása .....	420
249. ábra. A $q$ -vonal lehetséges helyzetei az $y-x$ diagramban .....	422
250. ábra. Zeotrop elegyet elválasztó, egy betáplálású, két termékes kolonna munkavonalai és $q$ -vonala .....	423
251. ábra. McCabe-Thiele féle elméleti tányérszám-meghatározási módszer (lépcsőszerkesztés) .....	424
252. ábra. Minimális tányérszám grafikus meghatározása .....	425
253. ábra. Minimális refluxarány grafikus meghatározása .....	427
254. ábra. Minimális refluxarány grafikus meghatározása, speciális eset .....	428
255. ábra. Optimális refluxarány meghatározása .....	429
256. ábra. Gőz(gáz)-folyadék érintkeztetési megoldások .....	431
257. ábra. Harangsapkás tányér .....	432
258. ábra. Túlfolyós szitatányér .....	433
259. ábra. Szelepes tányér egy eleme .....	434
260. ábra. Nutter tányérszelep .....	434
261. ábra. Glitsch-szelep .....	435
262. ábra. Rács- vagy rostélytányér .....	435
263. ábra. Gyűrűszelepes (Fábry-féle) rácstányér .....	436
264. ábra. KEBIZUTA-tányér .....	437
265. ábra. Töltettípusok .....	438
266. ábra. VM-rendezett töltet .....	439
267. ábra: A levegő Mollier féle $i-x$ diagramja .....	441
268. ábra: A szorpciós és deszorpciós hiszterézis .....	443
269. ábra: Párolgási intenzitás, száradási sebesség .....	444
270. ábra: A konvektív szárítás elvi sémája .....	445
271. ábra: Egyfokozatú szárítás ábrázolása $i-x$ diagramon .....	446
272. ábra: Kétfokozatú szárítás ábrázolása $i-x$ diagramon .....	447
273. ábra: Szárítás füstgázzal, $i-x$ diagramon .....	448
274. ábra: Szárítás részleges recirkulációval .....	449
275. ábra: A konvektív szárítás kinetikája .....	449
276. ábra: A párolgási intenzitás, hőmérséklet a relatív páratartalom függvényében .....	450
277. ábra: konvektív szárító típusok .....	451
278. ábra: Szalagos szárító .....	452
279. ábra: Az anyag haladása szerinti variációk .....	453
280. ábra: Dobszárító .....	454
281. ábra: Gravitációs szárító .....	454
282. ábra: Fluidizációs szárító .....	455
283. ábra: Kontakt vákuumszárító felépítési elve .....	456

284. ábra: A sugárzással szárítás elve .....	457
285. ábra: Folyamatos üzemű mikrohullámú szárító .....	457
286. ábra Adszorpciós elven működő klímászárító bal oldal: adszorpciós üzem, a jobb oldali reaktíváló üzemmódban .....	459
287. ábra: Oldószereltávolítás adszorpcióval .....	460
288. ábra: A fagyasztva szárítás elve .....	460
289. ábra: Száradási sebesség fagyasztva szárításnál .....	461
290. ábra: Nagyfrekvenciás szárítás .....	462
291. ábra: Porlasztva szárító .....	463
292. ábra. Települési szennyvíztisztítás alapsémája. ....	464
293. ábra. Szennyvíztisztító rendszer elvi vázlata .....	465
294. ábra. Íves rács. ....	466
295. ábra. Mechanikus tisztítású síkrács. ....	467
296. ábra. Kosaras rács. ....	467
297. ábra. Vízszintes átfolyású, iker elrendezésű homokfogó keresztmetszete .....	468
298. ábra. Légbefúvásos, uszadékgyűjtős homokfogó keresztmetszete. ....	469
299. ábra. Zsírfogó elvi kialakítása .....	470
300. ábra. Hosszanti átfolyású, ikerelrendezésű ülepitő kialakítása. ....	471
301. ábra. Sugár irányú átfolyású - Dorr rendszerű - ülepitő. ....	472
302. ábra. Függőleges átfolyású tölcserés ülepitő. ....	473
303. ábra. Csepegtető test műanyag töltete. ....	475
304. ábra. Csepegtetőtestes szennyvíztisztító kialakítása. ....	475
305. ábra. Eleveniszapos technológia elvi kapcsolása és jellemzői. ....	477
306. ábra. Keverő - levegőztető .....	479
307. ábra. Buborékoltató rendszerek kialakítása .....	480
308. ábra. Levegőztető ejektor. ....	481
309. ábra. Oxidációs árok .....	481
310. ábra. Csatornamedencés levegőztető .....	482
311. ábra. Klórozó - fertőtlenítő .....	483
312. ábra. Sugár-intenzitás mérővel és tisztító szerkezettel ellátott, csatorna szakaszba meríthető UV sugárzó egység. ....	484
313. ábra. Gravitációs iszapsűrítő. ....	486
314. ábra. Flotációs iszapsűrítő. ....	486
315. ábra. Dob centrifuga. ....	487
316. ábra. Tálcsás centrifuga. ....	488
317. ábra. Dekanter /csigás ülepitő/ centrifuga. ....	489
318. ábra. Biológiai (Anaerob) rothasztó reaktor .....	492
319. ábra. Szalagszűrő prés. ....	493
320. ábra. Ideális működésű reaktorokban kialakuló koncentrációprofil .....	497
321. ábra. Autokláv hosszmetzete és megjelenése .....	499
322. ábra. Folyamatos csőreaktor a gyakorlatban .....	501
323. ábra. Folyamatos tankreaktor működési elve .....	503
324. ábra. Gázégő kialakítása .....	507
325. ábra. HCl gáz előállításra szolgáló reaktor .....	507
326. ábra. Ipari pirolízisreaktor (csökemence) .....	508
327. ábra. Homogén, endoterm gázreakciók ipari megvalósítása .....	508
328. ábra. Homogén gázreakciók autoterm megvalósítása .....	509
329. ábra. Nagykohó típusú reaktor .....	510
330. ábra. Etázsreaktor külső hűtéssel .....	511
331. ábra. Timföldgyári forgó csökemence .....	512

332. ábra. Állóagyas reaktor heterogén katalitikus reakciók megvalósítására a) axiális áramlás, b) radiális áramlás .....	513
333. ábra. Csököteges reaktor heterogén katalitikus reakciók megvalósítására .....	514
334. ábra. Az etilénoxid előállítására alkalmazott reaktor .....	515
335. ábra. Winkler-féle szénelgázosító generátor, kevert gáz gyártására .....	516
336. ábra. Fluidizációs kazán működési vázlatja .....	517
337. ábra. A metanol oxidatív dehidrogénezésére szolgáló reaktor.....	518
338. ábra. A háromutas gépkocsikonverter kialakítása.....	519
339. ábra. Turbógáz abszorber (fermentor).....	520
340. ábra. Buborék- és habkolonna megoldások.....	520
341. ábra. Porlasztásos gáz/folyadék reaktor .....	521
342. ábra. <i>A technológia, a számítógép és az ember kapcsolata</i> .....	522
343. ábra. <i>A KTR modelljének többfunkciós alkalmazása</i> .....	525
344. ábra. <i>A KTO, mint hierarchikus rendszer</i> .....	528
345. ábra. <i>A műveleti egységek fundamentális egyenletei</i> .....	530
346. ábra. <i>A dimenziómentes számok rendszere</i> .....	531
347. ábra. <i>A térbeli leírás egyszerűsítése</i> .....	531
348. ábra. <i>Diszkrét rendszerek leírása</i> .....	534
349. ábra. <i>A Tx és a Ty terek kapcsolata</i> .....	535
350. ábra. <i>Mérleg a fázistérben</i> .....	536
351. ábra. <i>Különböző hierarchia szintű modellek kapcsolata</i> .....	537
352. ábra. <i>A vizsgált rendszer</i> .....	539
353. ábra. <i>A dekompozíció-koordináció elve</i> .....	539
354. ábra. <i>Elsőrendű rendszer súly- és átmeneti függvénye</i> .....	540
355. ábra. <i>Az állapottér modellek szerkezete</i> .....	541
356. ábra. <i>Az identifikáció művelete</i> .....	542
357. ábra. <i>A vizsgált reaktor műszerezési diagramja</i> .....	543
358. ábra. <i>A hőmérséklet szabályozás sémája</i> .....	544
359. ábra. <i>A reaktor struktúrája</i> .....	545
360. ábra. <i>A stacioner modell megoldásának illusztrációja</i> .....	546
361. ábra. <i>Instabilitás a fázistérben</i> .....	546
362. ábra. <i>A reaktor dinamikus viselkedése arányos szabályozó esetén</i> .....	546
363. ábra. <i>Lehetséges fázis portrék elsőrendű reakciónál</i> .....	547

## Táblázatjegyzék

1. táblázat. A mérnöki tudományok alapmennyiségei (generáló elemek).....	17
2. táblázat. A különböző fluidumokra jellemző diffúziós állandó, sűrűség és viszkozitás értékek.....	26
3. táblázat. Többfázisú rendszerek szabadsági foka.....	26
4. táblázat. Többkomponensű többfázisú rendszerek szabadsági foka.....	27
5. táblázat. Konvektív, vezetési és átadási áram összefoglaló táblázata.....	42
6. táblázat. Fluidumok ajánlott áramlási sebességei.....	89
7. táblázat. Raschig gyűrűk jellemző adatai.....	99
8. táblázat. A vegyipar növekedése az EU-ban szektoronként 1995-2005 között.....	114
9. táblázat. A fenol előállítás módszerek összehasonlítása.....	131
10. táblázat. Segéd táblázatok a 18-elektron szabályhoz.....	134
11. táblázat. Wacker szintézissel előállított szerves nagyipari alapanyagok.....	137
12. táblázat. Az alapvető propilén-hidroformilező eljárások összehasonlítása.....	139
13. táblázat. Nagyipari homogén katalitikus szintézisek.....	143
14. táblázat. Az enzimek csoportosítása.....	148
15. táblázat. Enzimek rögzítése.....	149
16. táblázat. A világ aminosav termelése.....	149
17. táblázat. A szintetikus felületaktív anyagok csoportosítása.....	155
18. táblázat. A növényvédőszer csoportosítása hatás szerint.....	157
19. táblázat. A növényvédőszer csoportosítása hatóanyag szerint.....	158
20. táblázat. A növényvédőszer összetétele.....	158
21. táblázat. Tartósítási eljárások a húsiparban.....	163
22. táblázat. A zöldség- és gyümölcs tartósítóipar technológiai műveletei.....	164
23. táblázat. Egy HACCP rendszer kidolgozásának főbb lépései.....	169
24. táblázat. Légszennyező anyagok eredete.....	188
25. táblázat. Fémek a természetben.....	190
26. Táblázat Ötvözetek.....	192
27. táblázat. Kőszén összetétele.....	205
28. táblázat. Energia konverziós faktorok.....	240
29. táblázat. A különböző energiahordozók részeseződése a világ energiatermelésében.....	240
30. táblázat. Az EU országok elektromos energia termelése 1997-ben. Forrás: Eurelectric 2001 [4].....	242
31. táblázat. Erőművek hatásfoka.....	243
32. táblázat. A szennyező források a finomítóban.....	258
33. táblázat. Finomítói területek VOC emissziói.....	259
34. táblázat. A kénsavgyártás nyersanyag megoszlása.....	275
35. táblázat. A kősó elektrolízis technológiák összehasonlítása.....	283
36. táblázat. Klinker összetétele.....	288
37. táblázat. Klinker égetése közben lejátszódó folyamatok.....	288
38. táblázat. Kerámia termékek osztályozása.....	294
39. táblázat. Kerámiák csoportosítása alapanyag és felhasználás szerint.....	294
40. táblázat. Az üvegyártás nyersanyagai.....	301
41. táblázat. Az üvegek színezésére használt fémvegyületek.....	301
42. táblázat. Palacküveg jellemző összetétele.....	302
43. táblázat. Üvegyapot jellemző összetétele.....	303
44. táblázat. A tüzelőanyagok osztályozása.....	314
45. táblázat. Az energiaátalakítás lehetőségei.....	315
46. táblázat. A fa szárazanyagának kémiai (elemi) összetétele.....	340

47. táblázat. A fontosabb fafajok vegyi összetétele (%) .....	341
<b>48. táblázat. A fa tüzeléstechnikai szempontból fontos alkotói. (Fafaj: bükk) .....</b>	<b>341</b>
49. táblázat. A fa és más lignocellulózok fűtőértéke légszáraz állapotban. ....	342
50. táblázat. Energiatermelés biohulladékokból. ....	348
51. táblázat. Átlagos szélességek az OMSZ mérései alapján. ....	355
52. táblázat. A Kulcson telepített erőmű műszaki adatai. ....	361
53. táblázat. Geotermikus erőművek kapacitása .....	366
54. táblázat. A betáplálás hőállapotának (q) jellemző értékei .....	421
55. táblázat. A csepegtetőtestes tisztítók főbb paraméterei. ....	476
<b>56. táblázat. Elfolyó tisztított szennyvíz minőség. ....</b>	<b>494</b>
57. táblázat. Mérnöki feladat osztályok .....	523
58. táblázat. Rendszermodellek csoportosítása.....	525