

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



11. kötet

# Levegőtisztaság-védelem

Szerkesztő: Radnainé Dr. Gyöngyös Zsuzsanna

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

**11. kötet**

**Levegőtisztaság-védelem**

Szerkesztő: Radnainé Dr. Gyöngyös Zsuzsanna

Szerzők:

Fülöp Tamás

Hanus István

Molnár Károly

Örvös Mária

Patkó István

Pitrik József

ISBN: 978-615-5044-36-6

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>1. BEVEZETÉS.....</b>	<b>8</b>
<b>2. A légkör összetétele és szerkezete.....</b>	<b>10</b>
2.1. A levegő összetétele .....	10
2.2. A légkör szerkezete .....	12
2.3. A Föld légkörének kialakulása .....	14
2.3.1. Az őslégkör alkotói. Létrejöttük, változásai.....	15
2.3.2. Az üvegházhatás.....	20
2.3.3. Szennyező anyagok mennyisége a légkörben .....	27
2.4. A levegő fizikai állapotátározói és szerepük a levegőszennyezésben.....	29
2.5. Kémiai reakciók az atmoszférában.....	32
2.5.1. A troposzférában lejátszódó kémiai reakciók .....	33
2.5.2. Kémiai reakciók a sztratoszférában.....	40
2.5.3. A mezoszféra és a termoszféra kémiai reakciói .....	42
<b>3. A levegőszennyezés forrásai és fajtái .....</b>	<b>44</b>
3.1. A légszennyezők eredete.....	44
3.1.1. Természetes eredetű légszennyezők .....	44
3.1.2. Antropogén eredetű légszennyezők .....	45
3.2. A légszennyező források fő típusai.....	48
3.3. A légszennyezés folyamata és mérése .....	49
<b>4. A leggyakoribb szennyező anyagok és jellemzőik .....</b>	<b>52</b>
<b>5. A légszennyező anyagok káros hatása .....</b>	<b>56</b>
5.1. Egészséget károsító hatás.....	56
5.2. A légszennyezettség hatása a növény és állatvilágra .....	59
5.3. A környezet savasodása .....	61
5.4. A levegőszennyezettség hatása a művi környezetre .....	61
<b>6. A légszennyező anyagok kibocsátásának szabályozása .....</b>	<b>63</b>

<b>6.1.</b>	<b>Kibocsátási határértékek.....</b>	<b>63</b>
6.1.1.	Technológiai kibocsátási határértékek.....	63
6.1.2.	Össztömegű kibocsátási határértékek .....	65
<b>6.2.</b>	<b>Az emisszió meghatározása .....</b>	<b>65</b>
6.2.1.	Az emisszió meghatározása műszaki számításokkal .....	66
6.2.2.	Az emisszió méréssel történő meghatározása .....	67
<b>6.3.</b>	<b>Az immisszió mérése .....</b>	<b>72</b>
6.3.1.	Mintavétel .....	74
6.3.2.	Analitikai eljárások .....	76
6.3.3.	Passzív monitorok .....	77
6.3.4.	Biológiai vizsgálatok .....	78
6.3.5.	Folyamatos, „real-time” üzemű analizátorok (air monitorok) .....	78
<b>6.4.</b>	<b>Terjedési modellek alkalmazása a levegőminőség meghatározására.....</b>	<b>83</b>
6.4.1.	Légszennyeződési folyamatok modellezése.....	83
<b>7.</b>	<b><i>Belső égésű motorok levegőszennyező hatása és csökkentésének lehetősége.....</i></b>	<b>87</b>
<b>7.1.</b>	<b>A városi közlekedés és környezeti hatásainak modellezése .....</b>	<b>92</b>
7.1.1.	Légszennyezési emisszió modellezése .....	93
<b>8.</b>	<b><i>A szag és csökkentése .....</i></b>	<b>111</b>
<b>8.1.</b>	<b>Szaganyagok .....</b>	<b>111</b>
<b>8.2.</b>	<b>A keletkező szaganyagok hatásai.....</b>	<b>112</b>
<b>8.3.</b>	<b>A szagkibocsátás meghatározása .....</b>	<b>113</b>
8.3.1.	A szag mérése érzékszervi vizsgálattal .....	114
8.3.2.	A szagkoncentráció mérése dinamikus olfaktométerrel.....	115
8.3.3.	A szagkibocsátás meghatározása .....	118
<b>8.4.</b>	<b>A szagkibocsátás csökkentésének lehetőségei.....</b>	<b>119</b>
8.4.1.	A szagkibocsátás csökkentésének aktív módszerei.....	119
8.4.2.	A szagkibocsátás csökkentésének passzív módszerei .....	120
<b>9.</b>	<b><i>Hulladéklerakók okozta légszennyezés.....</i></b>	<b>121</b>
<b>9.1.</b>	<b>A hulladékok fajtái, a hulladéklerakók .....</b>	<b>121</b>
<b>9.2.</b>	<b>A hulladéklerakók környezetszennyező hatásai .....</b>	<b>122</b>
<b>9.3.</b>	<b>A hulladéklerakó-gáz.....</b>	<b>123</b>
9.3.1.	A hulladéklerakó-gáz képződése .....	124

9.3.2.	A hulladéklerakó-gáz képződését befolyásoló tényezők.....	125
9.3.3.	A hulladéklerakó-gáz összetétele .....	125
9.3.4.	A képződött gázok eltávolítása a lerakókból .....	127
<b>10.</b>	<b>A levegőszennyezés elleni védekezés lehetőségei .....</b>	<b>131</b>
<b>10.1.</b>	<b>Szilárd anyagok leválasztása .....</b>	<b>132</b>
10.1.1.	Porleválasztók .....	133
10.1.2.	Gáz halmazállapotú szennyezőanyagok leválasztása .....	159
<b>10.2.</b>	<b>Adszorpció.....</b>	<b>173</b>
10.2.1.	Az adszorpció elméleti alapjai .....	173
10.2.2.	Adszorpció elven működő füstgáztisztítási eljárások .....	178
<b>10.3.</b>	<b>Abszorpció.....</b>	<b>181</b>
10.3.1.	Abszorber kialakítások .....	181
10.3.2.	Abszorpció elven működő füstgáztisztítás.....	186
<b>10.4.</b>	<b>Kondenzáció .....</b>	<b>189</b>
10.4.1.	Termikus véggáz-tisztítás .....	194
<b>10.5.</b>	<b>Biológiai véggáz-tisztítás .....</b>	<b>199</b>
<b>10.6.</b>	<b>Kénmentesítési technológiák.....</b>	<b>205</b>
10.6.1.	Kén-dioxid eltávolítás füstgázokból.....	209
<b>10.7.</b>	<b>Nitrogén-oxidok eltávolítása: DENOX-eljárások .....</b>	<b>218</b>
10.7.1.	A nitrogén-oxidok forrásai .....	219
10.7.2.	A nitrogén-oxidok károsító hatásai .....	222
10.7.3.	Az NO <sub>x</sub> emisszió csökkentését szolgáló eljárások.....	223
<b>10.8.</b>	<b>Illékony szerves vegyületek (VOC) légszennyezése .....</b>	<b>231</b>
10.8.1.	Klórtartalmú vegyületek és környezeti hatásaik .....	232
<b>Ábrajegyzék.....</b>	<b>.....</b>	<b>242</b>
<b>Táblázatjegyzék.....</b>	<b>.....</b>	<b>246</b>

## 1. BEVEZETÉS

Szűkebb és tágabb környezetünk védelme a különféle károsító hatásoktól jelenkori műszaki életünk, társadalmi és szociális tevékenységünk egyre fontosabbá váló feladata. Amerre csak nézünk, pusztuló erdőkkel – növényzettel, kihalt állatfajokkal, az ember számtalan, korábban nem ismert megbetegedésével, az épített, műszaki környezet felgyorsuló károsodásával kell szembesülnünk. Riasztó prognózisok érkeznek a legkülönbélebb tudományterületekkel foglalkozó tudósok részéről – ezek közül is legfenyegetőbb és a legközelebbi időkben bekövetkezni jósolt környezeti katasztrófa a globális klímaváltozás, amelynek – sajnálatos módon – ma már egyre több, visszafordíthatatlan hatását észleljük. Valamennyiünknek be kell ismernünk, veszélyben a Föld bolygó, és amennyiben műszaki haladásunk vívmányait ezentúl is csak a környezet rombolására, nem pedig a károkozás csökkentésére – megállítására fordítjuk, unokáink számára nem maradnak lakható, élhető földi körülmények. Ne feledjük a régi közmondást: „Ha az ember kivágta az utolsó fát, kifogta az utolsó halat, elszennyezte az utolsó folyót, rá kell majd döbennie, hogy a pénzt nem lehet megenni...”.

A környezetkárosítás egyik legjelentősebb forrása maga az emberi tevékenység. Ennek mértéke a technikai eszközök használatával megsokszorozódott, ilyenformán az ipar, illetve az iparszerű tevékenység a környezetszennyezés fő okozójává lépett elő. Környezetünk védelmének leghatékonyabb módja, ha a tevékenység végzésekor a technika minden lehetőségét felhasználva megakadályozzuk a környezet károsításait. Az ennek érdekében alkalmazott technika, az úgynevezett környezettechnika tehát az ipar, a mezőgazdaság, a kereskedelem, a szolgáltatás, stb. területén a tevékenységgel szervesen összefüggő kérdés.

A környezet védelmét a szennyezés keletkezésének helyén, tehát általában a termelési folyamat során kell elkezdeni. Ugyanakkor a termelésben dolgozó szakemberek szakmai ismerete – ma még – elsősorban természetesen a termelési folyamattal összefüggő, még akkor is, ha végzettségük szerint alkalmasak lehetnének ilyen feladatok elvégzésére is.

Könyvünkben a környezetet érő legkülönbélebb szennyező hatások közül a levegő tisztaságának védelmével foglalkozunk.

A levegő környezetünk egyik alapvető eleme, amelynek a szükséges mennyiségben és minőségben való jelenlétéről feltétlenül gondoskodnunk kell, mert biológiai szempontból anyagcserénk egyik legfontosabb összetevője, amelynek hiányában életünk legfeljebb másodpercekig tartható fenn;



- termelési szempontból az ipar és a mezőgazdaság egyik legfontosabb nyersanyaga és üzemanyaga (energiatermelés);
- a közlekedés területén a repülés közege, továbbá nyers- és üzemanyag.

Minden ország levegővagyona arányos az ország területével, és annak szennyezettsége általában olyan, ahogyan azt az adott ország szennyezi vagy védi. Azért csak általában, mert főként az ipari szennyezések a levegő áramlásával rendszerint túljutnak a szennyező ország határán – a levegő és vele együtt a környezet elemei számára nincsenek országhatárok. Svédországban például egyre több olyan káros szennyeződést észlelnek, amelyet bizonyíthatóan angliai gyárak bocsátanak ki. Hazánkban is több alkalommal megfigyelték a csapadék radioaktivitásának növekedését az Óceániában végzett magaslégtörési nukleáris robbantások után. Kis területű országokban az is előfordulhat, hogy a levegő szennyezettsége jobban függ a szomszédos országok kibocsátásától és széljárásától, mint a saját eredetű szennyezéstől. A nemzetközi áthatások aránya azonban Magyarországon egyelőre még jelentéktelen azokhoz a helyi szennyeződésekhez képest, amelyek az ipari gócpontok és a nagyvárosok közelében észlelhetők.

Környezetismerettel, környezetvédelemmel, a légkör szennyezésének megelőzésével foglalkozó szakemberek, valamint főként ezen interdiszciplináris tudományterület felsőfokú intézményekben tanuló hallgatói számára készült jegyzetünkben felhasználtuk – gyakran szó szerinti idézetben is – a témakörben már korábban megjelent, a levegőtisztaság-védelem jeles szakértői által írott anyagokat, könyvrészleteket. Az idézett irodalmakat a jegyzet végén soroljuk fel, és ezúton is köszönetet mondunk mindazoknak, akinek ismeretanyagait jegyzetünkbe beépítettük.

## 2. A LÉGKÖR ÖSSZETÉTELE ÉS SZERKEZETE

### 2.1. A levegő összetétele

A Föld légkörét számos gáz keveréke alkotja. Ezeket a gázokat különböző szempontok szerint osztályozhatjuk.

*Az egyik felosztás az összetétel szerinti:*

alapgázok – a gázfázis egyes komponenseit alapgázoknak nevezzük, ezek aránya a száraz levegőben

#### *1. táblázat. Alapgázok a légkörben*

gáz	térfogat %
nitrogén (N <sub>2</sub> )	78,10
oxigén (O <sub>2</sub> )	20,93
argon (Ar)	0,93
széndioxid (CO <sub>2</sub> )	0,03
hidrogén (H <sub>2</sub> ) és nemesgázok	0,01

Az alapgázokon belül külön említést érdemel a szén-dioxid, amely a levegőben mint állandó összetevő 0,03 %-ban van jelen. Ez az arány a tenger, a légkör és a bioszféra között kialakult egyensúly következtében állandó. Fontos ez azért, mert a szén-dioxid a Föld sugárzási mérlegének kialakításában játszik szerepet. A rövidhullámú napsugárzást elnyelés nélkül átengedi, de a felmelegedett földfelszín hosszuhullámú hősugárzását jelentős mértékben elnyeli: ezt nevezzük üvegházhatásnak. A szén-dioxid mennyiségének csökkenése a légkörben tehát lehüléshez, növekedése pedig felmelegedéshez vezet. Ennek a korábban állandónak tekintett komponensnek a koncentrációja a megfigyelések szerint századunk eleje óta növekszik a fosszilis tüzelőanyagok nagymértékű égetése, valamint a szénhidrogén származékokkal hajtott járművek egyre növekvő forgalma következtében.

**vendéganyagok** – az alapgázokon kívül a természetes levegőben előforduló ún. vendéganyagok jelenlétének oka az, hogy a bioszféra elemei között állandó dinamikus anyagcsere van. Ezek az anyagok: vízgőz, különféle szilárd részecskék (por, korom, stb.), cseppfolyós és gáznemű részecskék, mikroszkópikus élő szervezetek

A legfontosabb vendéganyag a vízgőz, amely több százalék térfogatrészt kitölthet (az Egyenlítőnél 3-4 %, a mérsékelt égövben 1 % körüli). A száraz levegő és a vízgőz elegye a nedves levegő. Ha a vízgőzt szilárd vagy gáznemű levegő-alkatrészek (por, korom, higroszkópos gázmolekula, pl.  $\text{SO}_2$ ) az ún. kondenzációs magvakon kicsapódik, felhő vagy köd keletkezik. A víz légköri körfolyamata alapvető szerepet játszik a légkör öntisztításában is, mert az eső így a szennyező anyagokat mintegy kimossa a légkörből (egyidejűleg azonban a talaj és az élővizeink szennyeződnek!). A levegőből távozó sokféle szennyező anyag a talajra vagy a vízre közbömbös, sőt előnyös is lehet (például humuszt hord a szél egy homokos területre).

A vízgőz mellett a légkör az emberi tevékenységtől függetlenül is számos gáz halmazállapotú vegyületet (pl.  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_x$ ) tartalmaz kis mennyiségben biológiai, légköri (villámlás) vagy vulkanikus folyamatok eredményeként. Így bár azok nagyobb koncentrációban az egészségre ártalmasak, bizonyos mennyiségükhöz az ember nyilván alkalmazkodott, ezért a levegőtisztítás célját és eredményességét mindig ennek figyelembe vételével kell megítélni, és nem kell ezen anyagok teljes eltávolítására törekedni.

Az ózon ( $\text{O}_3$ ) a magasabb légrétegekben keletkezik és, a légkör energiaháztartásában van szerepe.

A nitrogén-vegyületek közül a dinitrogén-oxid ( $\text{N}_2\text{O}$ ) található a légkörben a legnagyobb mennyiségben, majd az ammónia ( $\text{NH}_3$ ) és a nitrogén-dioxid ( $\text{NO}_2$ ) következik. A kén-vegyületek közül a kén-dioxid ( $\text{SO}_2$ ) és a kén-hidrogén ( $\text{H}_2\text{S}$ ) a legjelentősebb. A teljes kénkibocsátás évente  $100 \cdot 10^6$  tonnára tehető, ennek mintegy fele emberi tevékenység eredménye.

A cseppfolyós és szilárd aeroszol részecskék ( $10^{-3} - 10 \mu\text{m}$ ) egy része a föld, illetve az óceánok felszínéről diszpergálással kerül a levegőbe, emellett vulkáni kitörésekkel is számolni kell. Nagy hányad magában a levegőben képződik különféle reakciók következtében, pl. az ammónium-szulfát és a kénsav. A háttér-levegő  $1 \text{ cm}^3$ -ében általában 250 – 500 db aeroszol részecske van. A levegőben mindig megtalálható az aeroplankton, vagyis a levegőben lebegő élőlények sokasága.

A talaj természetes eredetű radioaktív izotópjai közül a  $^{222}\text{Rn}$  nemesgáz, így a talajból a levegőbe jut, ahol további bomlással szilárd termékek keletkeznek, amelyek a levegő aeroszoljaihoz kötődnek. Ezzel magyarázható, hogy a levegő aeroszoljai többé-kevésbé radioaktívak. A levegő természetes radioaktivitása néhány  $\text{Bq/m}^3$  nagyságrendű. Az óceánok felett a tengervíz nagyon csekély rádium-tartalma következtében a levegő radon-koncentrációja egy – két nagyságrenddel kisebb, mint a szárazföldek felett.

Az említett anyagok okozzák a légkör ún. globális háttér-szennyezettségét, a lakott területek levegő-szennyezettsége mégis túlnyomórészt mesterséges forrásokból ered. Bár a levegő-szennyezés elsődleges okai a szennyező anyagokat kibocsátó források, a légszennyezés kialakulását mindazok a tényezők befolyásolják, amelyek a levegőbe került anyagok koncentrációjának csökkenését kedvezően vagy kedvezőtlenül befolyásolják.

*A másik felosztás a légkörben való tartózkodási idő szerint:*

igen változékony gázok, amelyek tartózkodási ideje néhány nap vagy hét  
változó gázok néhány éves, esetleg tízéves tartózkodási idővel  
állandó gázok jóval hosszabb tartózkodási idővel.

A tartózkodási idő fontos sajátossága az a törvényszerűség, miszerint minél kisebb valamelyik összetevő tartózkodási ideje, annál kisebb koncentrációjának tér- és időbeli változékonysága. A Föld légkörében a különféle gázok, cseppfolyós és szilárd részecskék aeroszolt alkotnak, amelyek az atmoszférába a többi földi szférából kerülnek, illetve meghatározott tartózkodási idő után ide jutnak vissza.

## 2.2. A légkör szerkezete

Mielőtt a légkör szerkezetét elemeznénk, fontos megemlítenünk, milyen szférákból épül fel a Föld bolygó a felszínén illetve azt övezően.

A Föld felszínén található élettelen illetve élő formációkat az alábbi szféra-csoportokra osztjuk:

- litoszféra – a Földet alkotó ásványok és kőzetek összessége
- hidroszféra – a Föld felszínén található álló és folyóvizek összessége
- krioszféra – a Föld sarkvidékeit borító jégtakaró összessége (a magas hegyvidékek hó és jégkészlete nem tartozik bele)
- bioszféra – a Földön előforduló élőlények összessége
- atmoszféra – a Földet körülvevő több ezer kilométer vastagságú légrétegek összessége.

Földünket a levegőréteg több ezer kilométer vastagságban burkolja. A légkör alapvető sajátossága, hogy az állandóan érvényesülő keverő mozgások következtében – bár sűrűsége felfelé haladva csökken – a gázkeverék relatív összetétele kb. 80 km magasságig nem változik. Ezt a réteget homoszférának nevezzük.

Az atmoszférát – az előbb elmondottakat is figyelembe véve – két nagy, tulajdonságaiban egymástól lényegesen különböző részre: homoszférára és heteroszférára osztjuk. Ezen két nagy atmoszféra-egység további szerkezeti elemekre tagolódik.

### ***Homoszféra***

*Troposzféra* – a Föld felszínéhez legközelebb eső levegő-szféra, amelyet erős vertikális irányú légmozgások jellemeznek, amik a felszínről érkező szennyező anyagok intenzív turbulens keveredését, valamint konvekcióját idézik elő. A hőmérséklet ebben a légrétegben a felszíntől függőleges irányban távolodva folyamatosan csökken, 100 méterenként átlagosan 0,65°C-al. A troposzféra vastagsága a pólusokon mintegy 8 km, az Egyenlítő fölött 18 km, míg a mérsékelt égövben átlagosan 10 – 11 km. A troposzféra hőenergiáját a földfelszíntől kapja.

*Sztratoszféra* – a sztratoszférában járó szelek sebessége először csökken, majd újabb szélerősség-maximum következik. Ebben a rétegben a hőmérséklet a magassággal emelkedik. Magassága kb. 50 km, ahol a hőmérséklet 0°C körül mozog. Hőenergiáját a napfény ultraibolya sugárzásától kapja. Legfontosabb jellemzője, hogy ezen légréteg foglalja magába a földi élet szempontjából létfontosságú ózonréteget, amely a káros ultraibolya sugárzást nagymértékben elnyeli.

*Mezoszféra* – a homoszféra-rétegek közül a leghidegebb, mivel a földfelszínről visszaverődő hősugárzás már csak alig érvényesíti felmelegítő hatását. Elnevezése is tükrözi, hogy átmenetet képez a két nagy réteg-csoport között. A mezoszféra magasságában már viszonylag csekély a levegő sűrűsége, ezért jelentősebb szelek nem alakulnak ki, ennek ellenére konvektív légmozgások fordulnak elő.

### ***Heteroszféra vagy termoszféra***

a légkör legkülső, távolabbi részein már a világűrrel kapcsolódó szerkezeti eleme. A levegő sűrűsége – a térfogategységben található molekulák száma – tovább csökken, közeledik a világűr légüres tere felé. Ebben a szférában a hőmérséklet – számunkra meglepő módon, hiszen azt várnánk, hogy közel a világűr jeges hidegéhez – ismét emelkedni kezd. Ez a melegedés azonban már nem függ össze a földfelszínről történő hővisszaverődéssel, közvetlenül a Naptól származik, a még előforduló és a magasabb hőmérséklet következtében intenzív mozgást végző levegőmolekulák által elnyelt rövid- és mikrohullámú napsugárzás hatására jön létre. A Föld felszínén kialakuló és a légáramlások következtében mind vertikálisan, mind horizontálisan

mozgó szennyezések a heteroszféra magasságába már nem jutnak fel, ezért a hagyományos értelemben vett környezeti levegőtisztaságvédelemnek már nem tanulmányozott eleme. Sajnálatos módon azonban ez az atmoszféra-egység sem mentes a földi hatású szennyező anyagoktól, gondoljunk csak a felbocsátott különféle időjárási vizsgáló eszközökből, szatellit-maradványokból, stb. származó hulladékokra, amelyek többnyire ebben a rétegben gyűlnek össze. Ezek a hulladékok azonban jelenlegi tudásunk szerint nincsenek hatással a földi életre.

### 2.3. A Föld légkörének kialakulása

A Föld anyagát adó ősbolygó kezdetben három fázisú diszperz rendszer volt. A nagyobb sűrűségű és nagyságú aeroszol részecskék középen helyezkedtek el. Az aeroszol hígult, majd tiszta gázhalmazállapotú anyagba ment át. Az ősbolygó gázfázisát elsősorban  $H_2$ , He,  $CH_4$ ,  $H_2O$ ,  $NH_3$  és  $H_2S$  alkotta ( kozmikus gázok).

A Föld típusú bolygónál – amelyek felépítése megszilárdult magból (kőzetből) és azt övező, különféle gázokból összetevődő atmoszférából állnak – a gravitációs mező és a hőmérséklet olyan volt, hogy a kozmikus gázok jelentős részét a bolygók hamar elvesztették. Ezt a folyamatot *disszipációnak* (szétszóródásnak) nevezzük.

A kozmikus gázok disszipációja után a szilárd övekből számos gáznemű anyag szabadult fel. Ezeket másodlagos légköri komponenseknek nevezzük. A másodlagos alkotórészek deszorpció, valamint vulkanikus és termikus folyamatok, esetleg különböző kémiai reakciók termékei voltak

Kezdetben a légkör elsősorban metánból, vízgőzből és ammóniából állt.

Ezekből az alapgázokból az atmoszférában uralkodó és folyamatosan változó légkörfizikai, fizikai-kémiai valamint kezdetleges meteorológiai viszonyok között elsősorban kémiai reakciók játszódtak le, amelyek eredményeként első lépésben ugyancsak alapgázoknak tekinthető szén-dioxid, nitrogén, oxigén, víz és kén-dioxid képződött. Mai tudásunk és elfogadott tudományos teóriáink szerint már lehetőség volt egyre bonyolultabb vegyületek, majd aminosavak, az élő anyagot alkotó szerves vegyületek építőköveinek kialakulására is.

Az említett atmoszférikus folyamatokkal egyidőben – természetesen igen hosszú idő, évmilliók alatt – a bolygó felületén is jelentős változások következtek be. A felszín fokozatosan lehűlt, a szilárd kéreg egyre vastagabbá vált, a hegyképző mozgások hatására a geomorfológia – legalábbis relatíve – állandósult. A felszíni képződmények természetesen sohasem tekinthetők abszolút értelemben állandónak, az alapvető változások, a földrészek mozgása a mai napig tart (lemeztektonika), és ennek hosszú távú következményei számunkra egyelőre beláthatatlanok.

A Föld egészére kiterjedő geotektonikai aktivitás legközvetlenebbül észlelhető hatásai jelenleg az utóbbi években-évtizedekben mindinkább felerősödő vulkanikus és földrengéses tevékenység, amely a jelenkorban is folyamatosan alakítja a bolygó felszínét, annak bioszféráját, hidroszféráját – egész környezetünket.

A földfelszín hozzávetőlegesen állandó morfológiájának kialakulásával egyidejűleg megkezdődött és kisebb-nagyobb megszakításokkal folyamatosan ment végbe a bolygón a kondenzált vízfelhalmozódás. A légkörből meginduló csapadékhullás következtében források, patakok, folyók, majd végül tengerek és világóceánok jöttek létre – édes és sós vizek egyaránt. A Föld közel kétharmadát alkotó felszíni vizek lettek aztán a földi élet forrásai – az evolúciós elmélet szerint a kezdetleges élőlények a mai napig a tengerekből származnak, és a tengerekben-óceánokban a biológiai sokszínűség legalább olyan mértéket ér el, mint a szárazföldön. Mindemellert a víz a levegővel együtt a földi életformák lételemét jelenti, víz nélkül bolygónkon a ma ismert formájában élet nem létezhetne.

### **2.3.1. Az őslégkör alkotói. Létrejöttük, változásaik**

Mint korábban arról már szó esett, az ősbolygó gázfázisát elsősorban  $H_2$ , He,  $CH_4$ ,  $H_2O$ ,  $NH_3$  és  $H_2S$  alkotta (kozmosz gázok). Ezen gázkomponensek többsége azonban ma már inkább csak szennyező anyagként jelenik meg az atmoszférában ( $CH_4$ ,  $NH_3$  és  $H_2S$ ), a fő alkotók a nitrogén, az oxigén, valamint a szén-dioxid.

#### 2.3.1.1. A légköri nitrogén és a bioszféra kapcsolata

Az atmoszféra földfelszínhez közeli rétegeinek jelentős hányadát a nitrogén teszi ki. A nitrogén színtelen, szagtalan, kémiai és biológiailag gyakorlatilag teljesen közömbös gáz, amely azonban igen fontos szerepet tölt be a szerves, valamint a biológiailag aktív anyagok körforgásában.

Az atmoszférában való megjelenése – eredete – a mai napig vitatott a légkörfizikusok-kémikusok körében, mivel mint láttuk, az őslégkörben nem volt nyoma, és a világűrben jelenlegi ismereteink szerint nincsenek olyan elemek – vegyületek, amelyek a nitrogén képződését magyaráznák, elősegítenék. Legvalószínűbbnek a földi eredet feltételezése látszik – természetesen a Földön történt megjelenése is az ismeretlenség homályába vész. Ma már természetesen bőséggel találkozunk környezetünkben olyan anyagokkal – elsősorban

mikroorganizmusokkal – amelyek a légkörünkben megtalálható igen tekintélyes mennyiség létrehozásában közreműködnek.

A nitrogén körforgása az élő szerves anyag, valamint az élettelen környezet között a sokrétű szerepet betöltő, baktérium jellegű mikroorganizmusok révén megy végbe, és állandóan, megszakítás nélkül működik. Ez a körforgás a következő: a nitrifikáló baktériumok segítségével, amelyek főként a termőtalajban élnek, a levegő nitrogénje a növények gyökérzetén keresztül, azok által felvehető kémiai formában beépül a különféle növények szerves anyagába. Az állatok illetve az ember által elfogyasztott növényi táplálékkal a magasabb rendű élőlények testfelépítő vegyületeinek részévé válik – természetesen kémiaiilag és biológiailag már átalakult formában. Az élő szerves anyagok – növények, állatok, emberek – életfolyamatainak végeztével elhalnak, túlnyomórészt a talajba kerülnek vissza. A bonyolult kémiai összetételű és felépítésű tartalmú szerves anyagok korhadás, bomlás, leépülés útján mind kisebb molekulákká alakulnak át. Ezen anyagok nitrogén tartalmának kiválasztását a talajban élő denitrifikáló baktériumok segítik elő: a folyamat végeredménye ismételten gáznemű nitrogén lesz.

#### 2.3.1.2. A légköri oxigénszint emelkedése a geológiai korok folyamán

Mikor a légköri oxigén megjelenését, felszaporodását tárgyaljuk, ismét visszautalunk ama korábbi kijelentésünkre, miszerint az atmoszféra ősgázai között az oxigén mint önálló gáz nem volt jelen. A világűr mai jellegéhez hasonlatosan a Földön kezdetben redukáló légkör uralkodott, ennek megfelelően az első élőnek tekinthető szervesanyag-szerveződések anaerob működésűek voltak, és a mélységi vizekben jöttek létre. Ezek az élőlények primitív algák és baktériumok voltak, amelyek a geológiai korok során évmilliók alatt a törzsfajlás során mind fejlettebb szervezetekké alakultak. Természetesen ezek a mikroorganizmusok a fejlődéssel nem tűntek el a földi életből, többségük eredeti formájában, más részük átalakultan, de továbbra is mikroorganizmusként ma is él, részt vesz a földi életben.

Az algákban és más kezdetleges növényi szervezetekben a fejlődés során létrejött a klorofill, amely mint tudjuk, a növényekben végbemenő fotoszintézisben kulcsszerepet tölt be. A fotoszintézis az a fotokémiai folyamat, amelyben a levegő szén-dioxid tartalma a napfény hatására elbomlik, gáz alakú oxigén képződik, a CO<sub>2</sub> karbon-tartalma pedig a növényi szerves anyag építőkövévé válik.



Természetesen oxigén a Földön lejátszódó egyéb változások, mint például a kőzetek, vagy akár szerves anyagok bomlásakor is kerülhet a légkörbe, annak döntő része azonban a növények közreműködésével, a fotoszintézis útján képződik.

A különböző folyamatok hatására, amelyek oxigént termelnek vagy fogyasztanak, az atmoszférában mára egy állandónak tekinthető oxigén-szint alakult ki – a levegő kb. 20 %-át alkotja. Ez az egyensúly azonban feltételezi, hogy a fotoszintézisben közreműködő növényzet mennyisége is közel állandó, a természet „nem számol” az egyre fokozódó erdőirtásokkal, a terjedő elsivatagosodással, stb. Ne higgyük, hogy az erdők, az élő környezet védelméért folytatott harc csak a „vad zöldek” különködése, ha a levegő szennyezése, a növényzet fogyatkozása a jelenleg tapasztalható ütemben tart tovább, sőt esetleg fokozódik is, hovatovább nem lesz elegendő oxigén, belélegezhető levegő.

### 2.3.1.3. A légköri szén-dioxid változásai

A szén-dioxid a kozmikus gázok disszipációja után a szilárd övekből felszabadult másodlagos légköri komponensek közé tartozik. A földtörténeti korszakok kezdetén az alakulóban lévő Föld felszínén, valamint az ósatmoszférában lejátszódó különféle fizikai és kémiai folyamatok eredményeképpen szintje a mainál lényegesen magasabb volt. A fejlődés során koncentrációja fokozatosan csökkent a szűkebb és tágabb környezetben lejátszódó kémiai reakciók, majd meghatározó módon a bioszféra kialakulása révén, a fotoszintézis következtében. Jelenleg egy kvázi-egyensúlyi állapot áll fenn: a szerves anyagok bomlási folyamatai során és a fotoszintézisben elhasználódó szén-dioxid mennyisége közel azonosnak tekinthető. Ez az egyensúly azonban rendkívül sérülékeny, minthogy CO<sub>2</sub> nem csak az élőlények anyagcsere folyamatai és az élő anyag elhalála után bekövetkező bomlás után kerül a légtérbe, hanem különféle természeti jelenségek, de főként az emberi tevékenység következtében is. Gondoljunk csak a gyakori vulkáni tevékenységre, ahol a megolvadt kőzetanyagon kívül sokféle gáz, köztük jelentős mennyiségű szén-dioxid is kerül a levegőbe, amelynek hatásáról a későbbiekben még ejtünk szót. Sokkal veszélyesebbnek azonban az ipari forradalmakat követő rohamos technikai-technológiai fejlődés, amely a fosszilis tüzelőanyagok fokozódó mértékű elégetését is eredményezi igen tekintélyes mértékű szén-dioxid kibocsátással járva. Ezt az igen nagy gázmennyiséget a fogyóban lévő zöld növényzet már nem képes teljes egészében lebontani, tekintélyes hányada átalakulás nélkül az atmoszférában marad a földi bioszférát egyre súlyosabban veszélyeztető hatásokat, legfőképpen az üvegházhatást kiváltva. Erről a jelenségről az elkövetkezendőkben részletesen is szó lesz, mivel lényegének megértése, a

kifejlődésének megállítására – esetleg még – lehetséges tennivalók ismerete mindannyiunk, de elsősorban a környezetvédelemben tevékenykedők számára döntő fontosságú.

#### 2.3.1.4. Nyomgázok az atmoszférában

Az előző fejezet-részekben felsorolt és részletezett fő atmoszféra-alkotókon kívül további természetes komponensek is előfordulnak légkörünkben. Ezek a gázok a hidrogén, a hélium (a naptevékenységgel kapcsolatos elemek), a metán (ősalkotó), szén-monoxid (CO<sub>2</sub>-ből redukcióval jön létre), valamint az ózon.

Az ózonnak, mint a sztratoszféra legfontosabb rétegét alkotó gáznak a földi élet szempontjából kiemelkedő jelentőséget kell tulajdonítanunk. Az ózon (O<sub>3</sub>), az oxigén háromatomos módosulata főként a légköri oxigénből az ott lejátszódó elektromos kisülések és egyéb légkörfizikai jelenségek hatására jön létre. A földtörténeti korszakok során az atmoszférában felhalmozódva egy közel állandó vastagságú homogén réteget hozott létre, amelynek elsődleges szerepe a földi élet védelmében áll. Az ózonréteg a Napból a Földre irányuló különféle elektromágneses sugárzások közül az életet veszélyeztető egyik ultraibolya (UV-B) sugárzás túlnyomó részét kiszűri. Gondoljunk csak vissza korábbi tanulmányainkra: az ultraibolya fény sterilizáló, baktériumölő sajátosságú, hosszabb időn át tartó, nagyobb dózisu sugárzás a magasabb rendű élő szervezeteket is veszélyezteti. Elsősorban a sejtekben és a kromoszómákban hoz létre elváltozásokat, mutációkat, ami jelenleg még be nem látható módon károsíthatja a földi élőlényeket. Számos olyan, mai technikai életünkben, civilizációnkban naponta használatos anyag van, amelyből az ózonréteget befolyásoló, tömegét, vastagságát csökkentő légszennyező anyag kerül a levegőbe. Ilyenek például a különféle freon-származékok (többszörösen halogénezett szénhidrogének), amelyek különösen károsak, és bár használatuk kedvező tulajdonságaik, kémiai és fizikai jellemzőik miatt igen elterjedt és kedvelt volt, ma már szerte a világon tiltólistán szerepelnek, vagyis mind ipari, mind laboratóriumi használatuk tilos.

A napjainkban gyakran emlegetett ózonlyuk-képződést természetesen nem úgy kell elképzelni, hogy a kialakult gágrétegben ténylegesen lyukak, azaz jól körülhatárolt anyag-hiányok jönnek létre. Azokon a helyeken, amelyekre azt mondjuk: itt lyukak keletkeztek az ózonrétegben, a védőréteg vékonyodásáról van szó, a kisebb gáztömeg nyilvánvalóan kevesebb káros sugárzás-mennyiség elnyelésére képes. Ilyen elvékonyodások egyelőre szerencsére főként a Föld pólusai felett alakultak ki, de kiterjedésük növekszik, és ma már sajnos az egész földfelszínen érzékelhető több-kevesebb hatása. A további károsítás megállítása életünk

védelmében halaszthatatlan feladat, és feltétlenül indokolja azokat a szigorú intézkedéseket, amelyeket a szakemberek javaslatai alapján nemzetek és kormányaik hoztak (a freonok mellett például a klórozott szénhidrogének használatának megtiltása is).

#### 2.3.1.5. Az atmoszférát alkotó alapgázok keletkezésének forrásai

Amint arról már szó esett, a légkör alkotóelemeinek és esetleges szennyező anyagainak forrása a legkülönbélebb lehet. Ezek közül csak néhány lényegesebbet sorolunk fel megjelölve a belőlük keletkező szilárd, cseppfolyós, légnemű vagy akár élő alkotókat vagy szennyezőket.

Emberi tevékenységek – ez az a forrás, amelyből a legtöbb, elsősorban légszennyezést okozó fizikai vagy kémiai jellegű anyag kerül az atmoszférába (porok, különféle gázok, gőzök, stb.) Legkárosabbnak az üvegházhatásban főszerepet játszó szén-dioxid kibocsátás tekinthető.

Óceánok felszíne – a légkörbe jutó vízgőz túlnyomó részének forrása. Párolgással cseppfolyós és légnemű vízmolekulák, továbbá a tengerekben és óceánokban élő mikroszkópikus élőlények levegőbe kerülésének folyamata.

*Talajfelszín* – elsősorban különféle – talaj, kőzet és ásványalkotó – szilárd anyagok pora, továbbá ugyancsak mikroszkópikus élőlények levegőbe kerülésének forrása.

*Naptevékenység* – a Napot alkotó hidrogén, valamint a Napban lejátszódó magfúzió révén keletkező hélium atmoszférába kerülésének forrása a napkitörések során. Jelentős befolyásoló tényezőként tartjuk számon továbbá a Napból kiinduló és a földi életre hatással bíró széles skálájú elektromágneses sugárzásokat is, hiszen ezek közvetlenül és közvetve egyaránt közreműködnek a légkör fizikai és kémiai állapotának alakításában.

*Vulkáni tevékenység* – a Földön különösen az utóbbi években – évtizedekben fokozódó gyakorisággal előforduló vulkáni tevékenység (lényegében a kisebb-nagyobb, legkülönbélebb por és gáznemű légszennyezők kibocsátásával járó kitörések) az atmoszférába jutó természetes eredetű szennyezések legnagyobb forrása. Az emittált légszennyezők közül legveszélyesebbek a nagy tömegű por, valamint a szén-dioxid és a metán (üvegházhatású gázok).

*Szénhidrogének oxidációja* – ezen a forráson elsősorban a korábban már részletezett, az ózonréteget károsító szénhidrogének közvetlen hatását, valamint a robbanómotoros gépjárművek üzemanyagának elégeésekor képződő szén-dioxid és szén-monoxid légkörbe jutását értjük. Elöljáróban – mivel a gépjárművek okozta légszennyezésről a későbbiekben még szó lesz – itt jegyezzük meg, hogy nagyságrendjét tekintve ma a legnagyobb légszennyező forrás Földünkön a közlekedés.

### 2.3.2. Az üvegházhatás

Az utóbbi években – évtizedekben folyamatosan szaporodnak a váratlan és furcsa időjárási – klimatikus jelenségek, amelyeket a szakemberek – meteorológusok, légkörkutatók – a globális felmelegedés rovására írnak. A globális – vagyis a Föld egészére kiterjedő – felmelegedés az üvegházhatásnak nevezett légköri folyamat eredménye, amely az atmoszférában felhalmozódó és ott szennyezőanyag réteget létrehozó ún. üvegház-gázok közreműködésével jön létre.

Mielőtt a jelenség részletezésébe fognánk, nézzük meg, melyek is az előbb említett üvegház-gázok és hogyan kerülnek az atmoszférába.

A legfontosabb üvegházhatású gázok közé a széndioxidot ( $\text{CO}_2$ ), a metánt ( $\text{CH}_4$ ), a vízgőzt ( $\text{H}_2\text{O}$ ), a dinitrogén-oxidot ( $\text{N}_2\text{O}$ ), az ózont ( $\text{O}_3$ ), valamint a freonokat soroljuk. Az említettek közül a legjelentősebb befolyással az első három „légszennyező anyag” bír, mivel ezek a leggyakoribbak, és mondhatjuk, hogy mind természetes úton, mind pedig az ember közreműködésével a legnagyobb mennyiségben kerülnek az atmoszférába. A fő bűnösnek a szén-dioxidot szoktuk kikiáltani, mivel tartózkodási ideje a légkörben igen hosszú – elérheti a 200 év időtartamot is. Ezzel szemben a vízgőznek, amelynek a hővisszatartásban játszott szerepe legalább olyan nagyságrendű, mint a  $\text{CO}_2$ -é, jelentéktelenebb szerepet tulajdonítunk, mivel az atmoszférából hamar eltávozik, sajátos tulajdonságai, elsősorban igen magas felületi feszültsége révén néhány nap alatt növekvő nagyságú cseppekké áll össze, felhőket képez, és csapadék formájában kihullik a légkörből. Ugyancsak jelentős szerepet játszik az üvegházhatás kialakulásában a metán, de ugyancsak rövidebb tartózkodási ideje miatt a veszélyhelyzet létrejöttében közreműködése alárendeltebb. A legfontosabb üvegházhatású gázok jellemzőit az alábbi, **2. táblázat** foglaltuk össze, amelyet dr. Gács Iván a Budapesti Gazdaságtudományi és Műszaki Egyetem egyetemi docense, a téma kiváló ismerője volt szíves a jegyzet megírásához rendelkezésünkre bocsátani a fejezetben bemutatandó többi ábrával együtt. A táblázatban láthatóak a kibocsátott mennyiségek nagyságrendjei, a légkörben való tartózkodási idő, a hővisszatartó hatáshoz való hozzájárulás relatív nagysága, a hatáshoz történő hozzájárulás százalékos megoszlása, valamint a kibocsátás hozzávetőleges bontása természetes, valamint az ember által okozott, antropogén eredetre. Láthatjuk, hogy legveszélyesebbek a különféle freon-származékok lennének – amelyeket már az ózonlyukak kialakulásáért is alapvető felelőssé tettünk – de az atmoszférába jutó, ma már elenyésző mennyiségük miatt rendszerint nem foglalkozunk velük. Ugyanez a megállapítás vonatkozik a dinitrogén-oxidra is.

*Az üvegházhatás* – vagyis a Naptól érkező hőenergia földfelszínen történő visszatartása – az alábbiak szerint jön létre.

A Napból kiinduló számtalan elektromágneses jellegű sugárzás közül az infravörös sugárzás az, amely a hőenergiát a Földre szállítja. Ez a sugárzás rövidhullámú IR-sugárzás, amelyet a kialakult szennyezőanyag-gázcsoport akadálytalanul átenged. A Földre érkeve ez a sugárzás felmelegíti a felszínt, valamint a felszínen található különböző szférákat, miközben egy részük változatlan formában onnan visszaverődik, és ki is jut az atmoszférából. A felmelegedett Földről és objektumairól a felvett hőenergia egy részének leadására hosszuhullámú, ugyancsak infravörös sugárzás jellegű ún. földszugárzás indul meg a légkör magasabb rétegei, végsősoron a világűr felé. Ez a sugárzás azonban már gyakorlatilag nem tud áthatolni a szennyezőanyag-rétegen, arról a földfelszín irányába visszaverődik tovább melegítve azt. A folyamat ismétlődve egymást erősíti, az atmoszféra legalsó rétegeiben visszatartja a meleget – egész pontosan a növénytermesztésből jól ismert üvegházak hatását hozva létre.

## 2. táblázat. Legfontosabb üvegházhatású gázok jellemzői

	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	O <sub>3</sub>	CFC-11	CFC-12
<b>Légköri koncentráció</b>						
iparosodás előtt, ppm	275-280	0.7-0.8	0.29	0.015	0	0
1990 körül, ppm	350-360	1.65-1.75	0.3-0.32	0.02	200-280*	320-480*
növekedési ütem, %/év	0.4-0.5	0.09-0.1	0.2-0.3	0.5	4-5	4-6
Légköri élettartam, év	15-200	kb. 10	kb. 150	0.1 (?)	50-80	100-150
Relatív hatás	1	32	150	2 000	14 000	17 000
Hozzájárulás, %	44-52	6-18	3-6	6-10	5-8	10-18
<b>Kibocsátás, Mt/év</b>						
természetes	111-169**	77-317	1-3		0	0
antropogén	5-8**	110-450	5-9		0.31-0.4	0.44-0.56
ebből energetikai	4.5-5.5**	30-110	3-6		0	0

\* ppb=10<sup>-6</sup> ppm

\*\* Gt/év

**Relatív hatás:** egy atom hányszor akkora hatást fejt ki, mint egy CO<sub>2</sub> atom.

**Hozzájárulás:** szerep a 2000-ig bekövetkező üvegházhatáshoz. E gázok összes részesedése kb. 96%

A felsorolt gázok közreműködésével létrejött üvegházhatás nem tekintendő egyértelműen káros jelenségnek, mivel teljes hiányában a Földön nem létezhetnének az életfeltételek, fagyos hideg, átlag mínusz 18°C hőmérséklet uralkodna. A természetes üvegházhatás révén kb. 33°C-al magasabb, plussz 15°C a földi átlaghőmérséklet – természetesen a földrajzi övek szerint különböző megoszlásban.

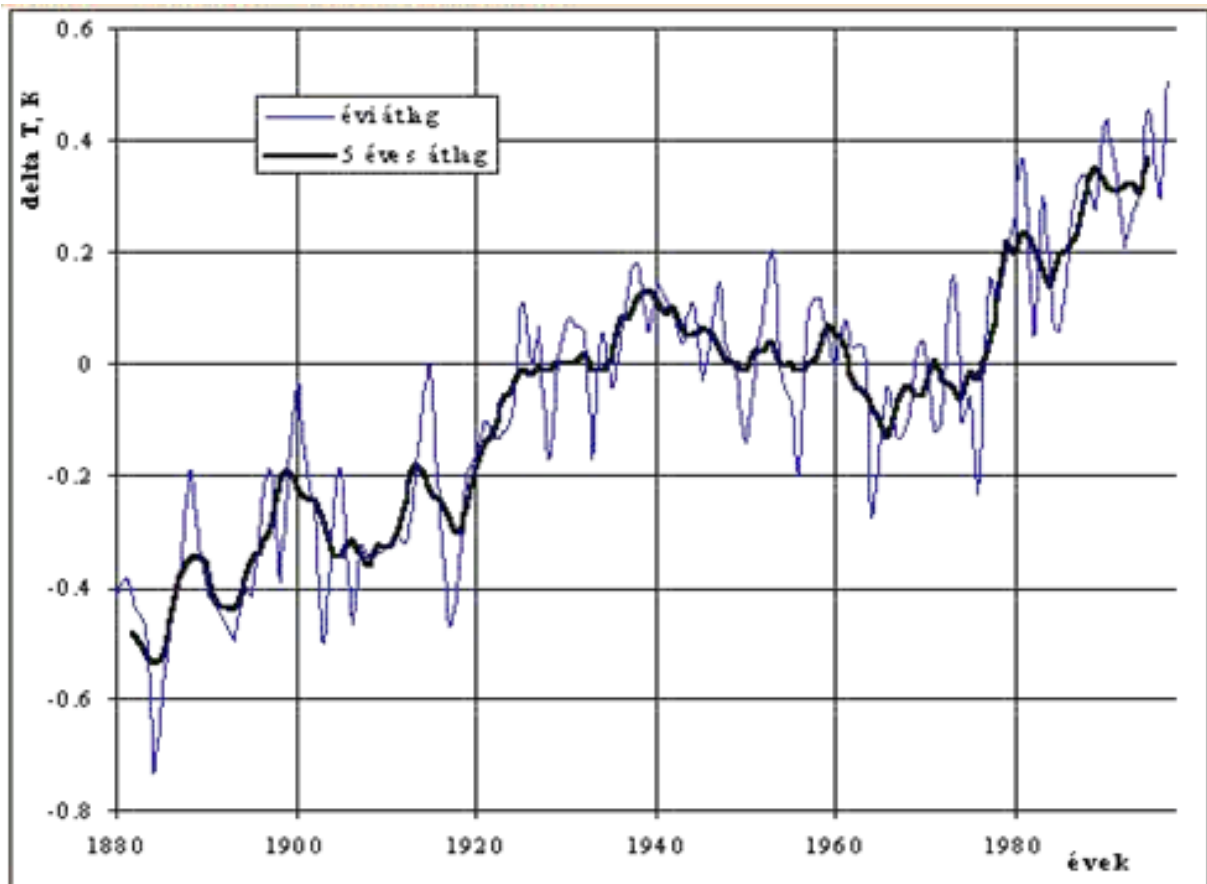
Vizsgáljuk meg a továbbiakban, hogy a most említett, a földi élet feltételeit biztosító kedvező hatásán kívül mi mindent tulajdoníthatunk a légkör szennyezése révén kialakuló üvegházhatásnak.

A bevezetőben már megemlített váratlan és furcsa globális klíma-rendellenességek nyomán egyre nagyobb fontosságot kapott a klimatológia tudománya, amely többek között azt vizsgálja, hogy az éghajlati változások természetesek-e, vagy az ember közreműködése idézi elő azokat. Mindenekelőtt jegyezzük meg: a földi klíma állandóan változik, ez természetes jelenség, az ember beavatkozása nélkül is így lenne – csak kérdés, milyen mértékben? Sajnos, jelenlegi tudásunk szerint, amint erről a későbbiekben részletesen szó lesz, ez a kérdés egyelőre eldönthetetlen.

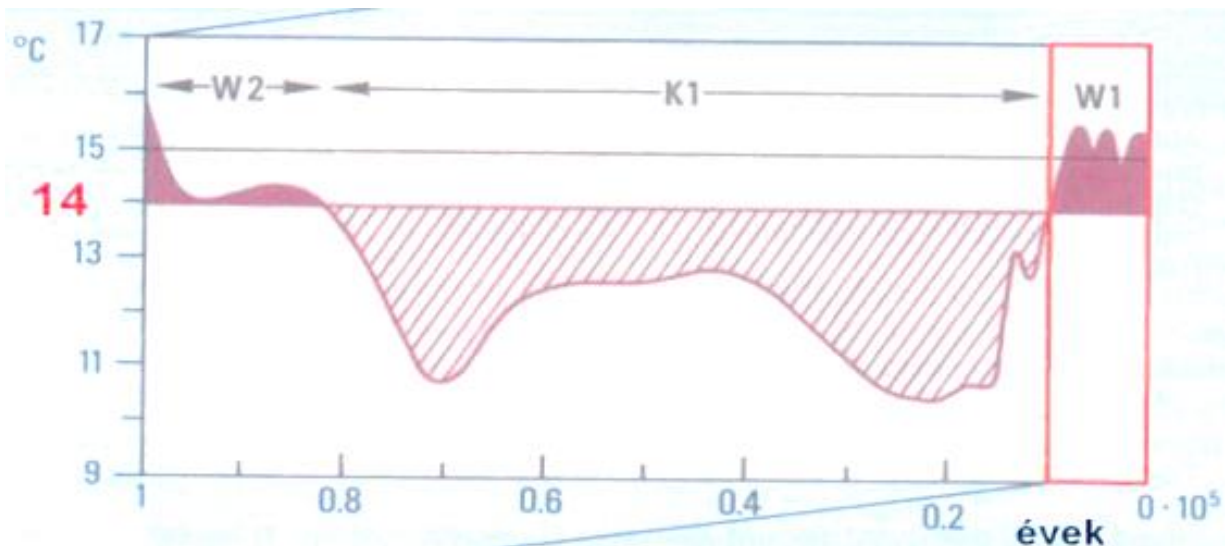
Amikor üvegházhatásról beszélünk, az időjárásról van szó, ami időszakonként ingadozik (felmelegedés – lehűlés), és semmiképpen nem tévesztendő össze a klímával, ami az időjárások összességét jelenti az adott klimatikus övezetekben (pl. trópusi, mérsékelt, sarki, stb.). Ezen időjárás-ingadozások alapján nem lehet eldönteni, tényleges klímaváltozásról van-e szó, ehhez hosszú távú hőmérsékleti megfigyelésekre lenne szükség. Ha az egyik helyen az adott időben rossz az időjárás, még nem ad okot általános következtetések levonására. Ma már a nemzetközi meteorológiai mérőhálózat kialakítása révén minden nap mérik a hőmérsékletet a világ minden pontján. Ez a mérőhálózat azonban sajnos csak kb. 100 éve létezik – megbízható adatok csak ebből az évszázadból állnak rendelkezésünkre. Ez időszakban viszont az átlaghőmérséklet kb. 0,5 °C-al emelkedett. Az erről készített diagramot az **1. ábra** mutatjuk be.

Mint láthatjuk, még ebben a viszonylag rövid időszakban is jelentős ingadozások figyelhetők meg – egy kifejezett lehűlési periódus volt az 1960/70-es években.

A globális felmelegedéssel foglalkozó szakemberek közül többen úgy vélik, nem egyértelműen az emberi tevékenység tehető felelőssé a változásokért, sőt kétségbe vonják még a globális felmelegedés tényét is. Szerintük ilyen nagyságrendű klímaváltozások a múltban, az ipari forradalmak előtt többször is előfordultak, a maitól lényegesen eltérő időjárási és klímaviszonyok uralkodtak. Leggyakrabban arra hivatkoznak, hogy valaha Grönland – mint a neve is mutatja – „zöld sziget” volt, lakott, ma pedig az örök hó és jég birodalma. Globálisan, a Föld egészét tekintve azonban ez sem bizonyíték, hasonló, a maitól alapvetően különböző helyek és időszakok mindig is voltak. Meteorológusok és klimatológusok egy csoportja szerint a jelenlegi lassú hőmérséklet-emelkedés természetes ingadozás, a legutolsó, az un. Würmi jégkorszakot követő felmelegedés (**2. ábra**).



1. ábra. A Föld átlaghőmérséklete az utolsó 100 évben



2. ábra: A Föld átlaghőmérséklete az utolsó 100.000 évben

A távoli múlt időjárási és klímaváltozásait a vastag sarki jégtakarókban található gáz-zárványok, valamint a fák évgyűrűinek vizsgálatával próbálják rekonstruálni. A fák évgyűrűi a Föld természetes archivumai – szélesebb évgyűrűk melegebb, csapadékosabb tavaszra-nyárra

utalnak. További vizsgálatokra alkalmasak még a Föld  $\frac{3}{4}$  részét alkotó óceánokban kifejlődő korallok – a mészváz igen sok információt zár magába a tengerek változó viszonyairól.

Szén-dioxid mérésre azok az ideális helyek, amelyek távol vannak a várostól, amely termeli, és távol vannak a nagy kiterjedésű növényzettől, amely fogyasztja, elnyeli azt. Ilyen, a célra minden szempontból megfelelő mérési pontot találtak a Hawaii szigeteken lévő Mauna Loa vulkán területén, és az ott már kb. ötven éve folyó ma is folynak. A naponta többször elvégzett mérések során elsősorban egy tavaszi – őszi ciklikusság volt tapasztalható a légkör szén-dioxid koncentrációjában. Azt viszont egyértelműen megállapították, hogy a CO<sub>2</sub> mennyisége a légkörben minden évben lassan növekszik – a tudósok szerint ez bizonyíték arra nézve, hogy a többségét az ember termeli. A keletkező szén-dioxid – mint már láthattuk – az atmoszférában nagyon tartós, és szétterjed az egész Földön. Így a ma kibocsátott CO<sub>2</sub> a jövő időjárását is meghatározza – biztosra vehetjük, hogy a szabályozási próbálkozásokkal már elkéstünk, a helyzet, a felmelegedés csak romlani fog. Ez a szituáció tipikus példája annak a figyelmeztetésnek, hogy a környezetszennyezéssel az unokáink jövőjét tesszük tönkre!

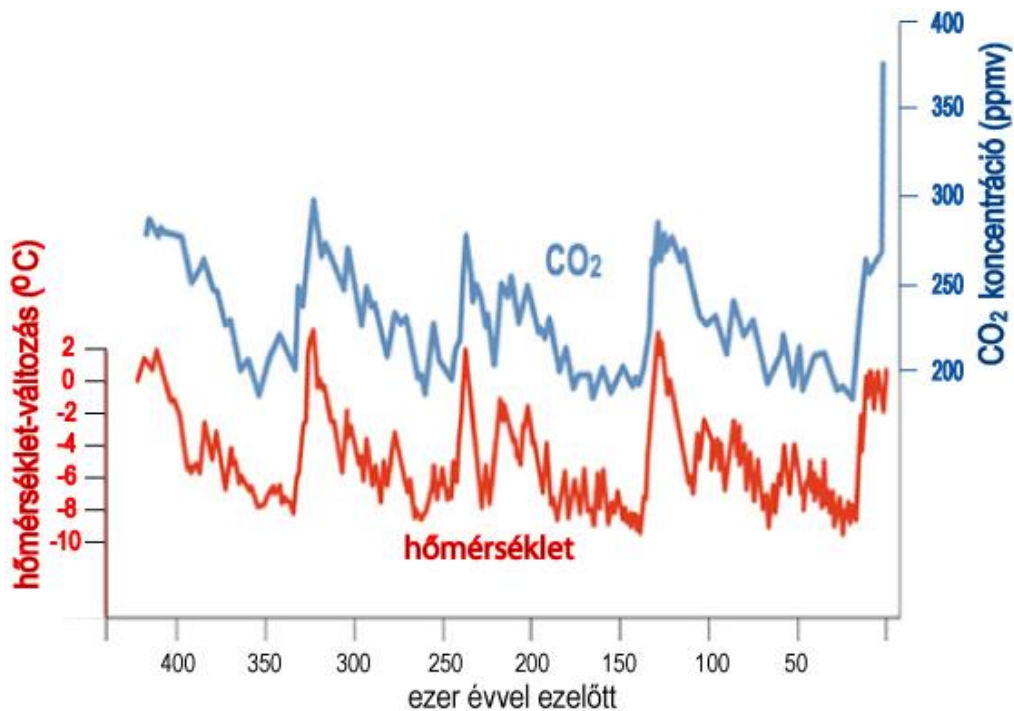
A kibocsátás első ránézésre hihetetlen mértékben növekszik. Nézzük meg a 3. táblázat, amely az elmúlt 60 év ember általi CO<sub>2</sub>-szennyezését mutatja be.

### 3. táblázat. Karbon kibocsátás

Időszak	Karbon-kibocsátás CO <sub>2</sub> formájában
1945	1 milliárd tonna
1960	2,5 milliárd tonna
ma	7 milliárd tonna

Az elvégzett mérések azt is bebizonyították, hogy a légköri szén-dioxid mennyiség és a hőmérséklet emelkedése között szignifikáns kapcsolat mutatható ki, amint az a 3. *ábra* egyértelműen megállapítható. Az ábrán azonban az is jól látszik, hogy bár az utóbbi néhány ezer évben erősen megemelkedett a CO<sub>2</sub> mennyisége és ezzel együtt a relatív hőmérséklet, az elmúlt évezredekben ilyen változások máskor is voltak, olyankor, amikor az ember még meg sem jelent a Földön. Ne feledjük el továbbá, hogy az utolsó jégkorszak kb. 10 ezer évvel ezelőtt fejeződött be!





### 3. ábra: CO<sub>2</sub> és a hőmérséklet kapcsolata

(Forrás: <http://tamop412a.ttk.pte.hu/files/kornyezettan9/www/book.html>)

Megemlítjük, hogy vannak olyan vélemények is (elsősorban a szennyező anyagot kibocsátó ipar képviselői között), amelyek szerint a CO<sub>2</sub>-t nem kell szennyezőnek tekinteni, hanem növénytápszernek – a fotoszintézis során a növények szöveteik felépítéséhez felhasználják, zöldebb lesz a világ. Modellkísérletekkel bebizonyították, hogy (jelentősen) megemelt szén-dioxid atmoszférában két év alatt 25 %-os növekedést értek el egy erdő fáit vizsgálva. A hatás tehát pillanatnyilag kétségtelen, a tudósok szerint azonban ez a növekedés csak addig fog tartani, amíg a fák pusztulása be nem következik: ekkor a szerves anyag bomlása során felszabaduló szén-dioxid visszakerül a légkörbe. Nyilvánvalóan nekik van igazuk.

A globális felmelegedés a földfelszín és az azt övező atmoszféra fokozatos hőmérséklet-emelkedését jelenti. Hatása természetesen elsősorban közvetlen, ami a sarki jégtakarók egyre gyorsuló olvadását okozza, ami először centiméterekkel, később az előrejelzések szerint akár méterekkel is megemelheti a világtengerek szintjét. Gondoljuk csak el, mit jelent ez a vízszintnövekedés a mélyen fekvő, kiemelkedő partvidék nélküli országok, szigetek számára! Városok, országrészek, országok, szigetek tűnhetnek el a víz alatt – ennek megakadályozására kevés remény látszik.

A globális felmelegedés közvetett hatását a klímaváltozások jelentik. Az éghajlat változása sok folyamat bonyolult visszacsatolásából áll. Az óceánok vizének felmelegedése erősebb párolgást hoz létre, ezáltal több vízgőz kerül a levegőbe, ami erősíti az üvegházhatást – pozitív

visszacsatolás. Ugyanakkor ezáltal több alacsony felhő is keletkezik, amelyek csökkentik a felmelegedést – negatív visszacsatolás. A szén-dioxid hatása tehát csak összetetten értelmezhető, és megítélésében a Nemzetközi Légkörkutató Központ (Boulder, Colorado, USA) kutatói szerint is nagyon sok a bizonytalanság.

Az óceánok az éghajlat jelentős befolyásoló, egyúttal bizonytalansági tényezői. A víz az Egyenlítőn felmelegszik – pl. a Golf-áramlat, amely a Mexikói-öbölből indul, az Atlanti óceánon átkelve Európa nyugati partjait melegíti, majd a sarkkör közelében már annyira lehül, hogy a hideg sós víz lesüllyed, és a tenger mélyén tér vissza az Egyenlítőhöz. Ez a körforgás a CO<sub>2</sub> „eltemetését” is jelenti.

Felmerül a kérdés: tehetünk-e valamit a „világvége” elkerülésére, és ha igen, mit tegyünk? A problémát felismerve évekkal ezelőtt megindultak a kezdeményezések a kibocsátás szabályozására, csökkentésére. A kezdeményezésben az Egyesült Államok járt az élen, amely a világ energiatermelésének egynegyedét használja fel egymaga. Világszerte igen sok szén (60 %) és olajerőmű működik, amelyek a kibocsátás fő bűnösei. Léteznek azonban más erőművek is, pl az atomerőművek, amelyek a széntüzelésűekkel együtt a legolcsóbb energiát szolgáltatják. Ismeretes azonban az emberek ellenállása az atomerőművekkel szemben – meg kellene értetni a tiltakozókkal a különbséget egy erőmű és a pusztító sugárfegyver között. Bármennyire is tiltakozunk a különféle „szennyező” energia-termelők ellen, be kell látnunk, hogy ma még semmiféle érdemi, gazdaságosan működő, és főként elegendő energiát előállító alternatívával nem rendelkezünk. És még csak kutatások sem folynak sehol a világon a hagyományos energiaforrások felváltására. Az un. megújuló energiaforrások, mint a napenergia, a szélenergia, a biomassza. stb. csak távlati, és igen korlátozott lehetőségeket biztosítanak. Napenergiával (igen drágán) csak ott és akkor termelhető elektromos áram, ahol és amikor az erőmű berendezéseit megfelelő energiasűrűségű napsugárzás éri. Ez pedig a világ nagy részén nem megvalósítható ipari méretekben. Hasonló a helyzet a széllel – igen sok szélcsendes hely van világszerte, és a szélenergiának is olyan kicsi az energia-sűrűsége, hogy egész országokat kellene szélenergiával teletűzdelni – de akkor hol marad hely az emberek, a mezőgazdaság számára? Az alternatív energiaforrások közül viszonylag leggazdaságosabban a vízerőművek működnek – de az egész világ egyre növekvő energiaellátását nyilvánvalóan nem képesek biztosítani. A biomasszát pedig jobb elfelejteni, hiszen a kis fűtőértékű növényi alapanyagból amúgy is kevés van, pusztul az az ember közreműködése nélkül is – azonkívül ugyancsak CO<sub>2</sub>-termelő.

Ne tévesszük szem elől, hogy a lehangosabb kritikusok maguk is „bűnösök” a globális felmelegedést előidéző változások kialakulásában, hiszen ahányszor felkapcsolunk egy lámpát,

háztartási gépet, főzünk, fűtünk, melegvizet használunk – annyszor járulunk hozzá mindannyian a légkör szennyezéséhez az elektromos áram vagy más fosszilis tüzelőanyag alkalmazásával. Számítások szerint egy ember évente átlag 800 kg korbont, azaz  $4 \cdot 800 = 3200$  kg szén-dioxidot juttat a levegőbe az általa felhasznált elektromos energiával. Ehhez járul még természetesen a közlekedés: a CO<sub>2</sub>-kibocsátás egyharmada a járművekből ered! Elképzelések persze vannak itt is alternatív motorokról, motorhajtó anyagokról, amilyen például a hidrogén. Elvben a megoldás nem rossz (bár oxigénben elégetve szeret felrobbanni), a kipufogó melléktermék vízgőz, ami kevésbé káros az üvegházhatás szempontjából. De miből lesz a hidrogén? Vagy vízből elektromos árammal történő elbontással, vagy szénhidrogénekből szintén szennyező melléktermékek kibocsátása révén. Gondoljunk bele: akkor javítottunk valamin is?

Az 1997-es Kyoto-i Környezetvédelmi Világkongresszuson igen erőteljes törekvések fogalmazódtak meg a kibocsátás csökkentésére irányuló nemzetközi megállapodás kidolgozása érdekében. Hosszas viták és nagy nehézségek kompromisszumok árán létre is jött egy szabályozó dekrétum, de sajnos azóta bebizonyosodott, hogy azokat az ígervényeket szinte sehol a világon nem tartják be. Az Egyesült Államok kongresszusa az elsők között volt, amely nem ratifikálta a megállapodást. Kyoto tehát megbukott, és közel az idő, amikor súlyos változások fognak bekövetkezni. Tengerszint-emelkedések, aszályok, áradások, pusztító szélviharok, járványok, éhínségek. Ma még mindig a fosszilis tüzelőanyagok korát éljük. Ha lesz jövőnk ezen a Földön, valami már energiaforrást kell találnunk, mert olyan változások elé nézünk, amelyek beláthatatlanok. A jövő generáció sorsa van a kezünkben.

### ***2.3.3. Szennyező anyagok mennyisége a légkörben***

A légszennyező anyagok koncentrációja a levegőben attól függ, hogy mennyi légszennyező anyag kerül a levegőbe mekkora levegőtérfogatba és mennyi légszennyező anyag hagyja el a légkört.

A légszennyező anyagok a levegőbe a forrásokból közvetlenül emisszióval kerülnek (elsődleges légszennyezők), vagy pedig a levegőben az elsődleges légszennyező anyagokból, esetleg ezek és a levegő természetes alkotóelemeinek kölcsönhatására kémiai reakciókkal keletkeznek (másodlagos légszennyezők).

Ha a légkörbe jutó idegen anyagok változatlan formában a levegőben maradnának, akkor annak összetétele viszonylag rövid idő alatt úgy megváltozna, hogy az emberi élet számára

alkalmatlanná válna. Szerencsére a levegőnek – az élő vízhez és a talajhoz hasonlóan – természetes öntisztulása van.

A tisztulási folyamatokat három csoportba sorolhatjuk:

- a szennyező anyag a légkörből eltávozik
- a szennyező anyag más (esetleg közömbös) anyaggá átalakul
- a szennyező anyag koncentrációja csökken, tehát felhígul.

Az első csoportba tartozó lehetőségek egyike az ülepedés (szedimentáció), amellyel a szilárd vagy folyékony szennyeződés durva frakciója távozik az atmoszférából. A radioaktivitás-vizsgálatoknál a kihullás (fall out) fogalmat használjuk.

Az impakció vagy precipitáció felületekhez ütközés vagy tapadás útján választja ki a szennyeződést. Termoprecipitáció esetén a részecskék a hozzájuk képest hidegebb felületre, elektroprecipitáció esetén pedig ellenkező elektromos töltésű felületekre csapódnak ki. Ezek a folyamatok nagyrészt a föld- és tengerfelülettel érintkező légrétegekben játszódnak le, de légköri részecskék vagy vízcseppek felületén is létrejöhetnek.

Az ad- és abszorpció gáznemű szennyezőknél elsőrendű jelentőségűek. Elsősorban a tengerek nagy felülete jön számításba, de a talaj és az élővilág gázmegkötő képessége is tekintélyes.

Jelentős folyamatok a kondenzálódás és a kimosódás is. Felhőképződéskor a szennyező anyagok kondenzációs magvakként szolgálhatnak, és a csapadékkal ők maguk is kikerülhetnek a légkörből. Emellett a csapadék kihullása során tekintélyes légrétegeket mos át.

Az említett tisztulási folyamatokat nem lehet egymástól élesen elhatárolni: például egy esőcsepp aeroszol részecskének ütközés után azt feloldhatja, a jelenség egyúttal kimosódás és ülepedés.

A második csoportba azok a folyamatok tartoznak, amelyek során a szennyeződés közömbös vagy kevésbé szennyező anyagokká alakul át.

A harmadik csoportba tartozó hígulási lehetőségek közül a diffúziót, továbbá a szelek és turbulens légmozgások hatását említjük. A hígulás csak a szűkebb környezet szempontjából kedvező, nagyobb területre, illetve az atmoszférára nézve közömbös, mert így a légkörben lévő szennyező anyag abszolút mennyiségei nem változnak, csak koncentrációjuk csökken.

## 2.4. A levegő fizikai állapothatározói és szerepük a levegőszennyezésben

Az üvegházhatást részletező fejezet-részben már szó esett az időjárás és a klíma fogalmak megkülönböztetéséről.

Az időjárás – a levegő pillanatnyi fizikai állapotainak sorozata.

A klíma – az időjárások összessége a földfelszín valamely helyén

Az időjárással a meteorológia, az éghajlattal pedig a klimatológia foglalkozik.

Az időjárást és az éghajlatot a levegő fizikai állapothatározói jellemzik. Ezek:

- a léghőmérséklet
- a légnyomás
- a levegő nedvességtartalma
- a felhőzet mennyisége
- a látástávolság
- a szélsébség és a szélirány.

A felsorolt fizikai állapothatározók nagyságát az időjárást és a klímát illetően mindig a földfelszínen és annak 100 – 200 m vastagságú légkörében kell vizsgálni, befolyásoló szerepük ott érvényesül. A magasabb légrétegek tulajdonságai, mindenkori állapotuk legfeljebb csak közvetve vannak hatással a felszínközeli lejátszódó folyamatokra.

A levegő hőmérséklete mint időjárást befolyásoló tényező valamennyiünk számára nyilvánvaló, és nagyságát a Naptól induló infravörös sugárzás Földre érkező intenzitása és energiasűrűsége alakítja. A felmelegedést illető fontos szempont a sugárzás intenzitásán kívül a Föld Naptól való távolsága és a sugarak beesési szöge (tél – nyár!), valamint a felhőzet éppen aktuális kiterjedése, amely vastagságától és magassági elhelyezkedésétől függően több vagy kevesebb „meleget” enged át.

A légnyomás a hőmérséklettel szorosan összefüggő állapothatározó (gondoljunk vissza az általános gáztörvényről tanultakra!). Az időjárásra gyakorolt hatása rendszerint közvetett, elsősorban a szelek és az időjárási frontok kialakulásában van jelentősebb szerepe.

A levegő (elsősorban relatív) nedvességtartalma nem csak a felhő- és csapadékképződés, hanem a légszennyező anyagokkal való kölcsönhatása miatt is jelentős. Két fő rész-fogalmat különböztetünk meg:

- ◆ **abszolút nedvességtartalom** – az 1 m<sup>3</sup> levegőben lévő vízpára grammokban kifejezett mennyisége

- ◆ **relatív nedvességtartalom** – a tényleges páratartalmat az adott hőmérsékleten a telítési vízgőztartalom százalékában adja meg (ezért csak a hőmérséklet egyidejű megadása esetén van értelme).

A felhőzet a levegő nedvességtartalmából alakul ki, és belőlük a felhő légkörben való elhelyezkedésének megfelelő hőmérsékleten elért telítési pontját elérve különféle csapadékok hullanak a földfelszínre. A felhőzet kiterjedésétől és vastagságától függően leárnýékolja a talajfelszínt, akadályozva felmelegedését, egyszersmind zárórétégeként viselkedik, így hatása az időjárás alakulása szempontjából általában kedvezőtlen. A levegő nedvességtartalmából valamint a felhőkből létrejövő csapadékok a hőmérséklettől függően melegben harmat és eső, hidegben dér, dara, hó vagy jég.

Az időjárás változásait a különböző légáramlatok idézik elő, a klímát már több tényező határozza meg: a földrajzi szélesség, a tengerektől való távolság, a kialakult szélirány, a páratartalom ingadozásai, a tengerszint feletti magasság, a domborzati viszonyok, stb.

A napsugárzás hatására a talajközeli rétegek felmelegednek, sűrűségük csökken, ezért felemelkednek. Ennek következtében a hűvösebb területek (pl. a nehezebben felmelegedő vízfelszín) felől a felmelegedett területre is légáramlás (szél) indul meg, ezeknek pótlására viszont a magasabb légrétegekből lefelé áramlik a levegő. ---ez a folytonos mozgás keveri a troposzférát. Enélkül a keverő hatás nélkül tűrhetetlen volna a nagyvárosok légterének szennyezettsége.

A légszennyező anyagok koncentrációjának csökkenését különösen a 8 – 10 m/s- nál nagyobb sebességű szelek segítik elő, mivel ezek turbulenciája már jelentős. –a turbulenciát fokozzák a szélirány-változások (pl. erdő), szellőkések és a függőleges szélmozgás. a gázok diffúziósebessége légköri méretekben nem elegendő a levegőbe került szennyező anyagok kellően gyors hígításához. A turbulens légköri mozgások hígulást elősegítő hatása százszor – ezszer nagyobb a diffúzió hatásánál.

A különféle szelek az időjárás alakításán kívül a légszennyezettség nagyságának, eloszlásának és terjedésének alapvető befolyásoló tényezői. Ebből a szempontból

- a nagy sebességű (>10 m/s), turbulens szelek → kedvező hatásúak
- a kisebb sebességű, lamináris szelek → kedvezőtlen hatásúak
- a szélcsend és az inverzió → kedvezőtlen hatásúak.

A légkör szennyezettségi állapota, valamint az ennek hatására kialakuló folyamatok szempontjából rendkívül fontos az inverzió jelenségének megértése. Az inverz állapot – jelentésénél fogva könnyen belátható – fordított állapotot jelent. Szokásos – normál – időjárási helyzetben a Nap által felmelegített földfelszín fölött meleg légrétegek helyezkednek el, fölötte pedig fokozatosan csökkenő hőmérsékletűek. A légszennyező anyagok ezekbe a meleg rétegekbe emittálódnak, és minthogy a meleg levegő sűrűsége kisebb a fölötte elhelyezkedő hidegebb légrétegekénél, megindul a szennyezett meleg levegő felfelé áramlása, vagyis keveredés, a szennyezés hígulása alakul ki. Ez a helyzet környezetvédelmi szempontból kedvezőnek ítéltető. Inverz – fordított – állapotban a földfelszínen található meleg levegő alá hideg légréteg áramlik (tör) be, és nehezebb sűrűsége miatt a felszínen megüledik. Ennél fogva természetesen a szennyező anyagok is ebbe a légrétegbe jutnak, és mivel nincs felfelé irányuló légmozgás, keveredés, ezzel együtt a szennyezés felhígulása sem jön létre. A jelenség környezetvédelmi szempontból tehát egyértelműen káros, és a szennyező anyagok földközelségben tartásán kívül rendkívül kellemetlen időjárási jelenségek, ún. füstködök vagy szmogok kialakulását idézi elő.

Normál körülmények között a szilárd légszennyező anyagok nagyobb szemcseméret-tartományba eső részecskéi ülepednek, a kisebb részecskék pedig ütközések révén fokozatosan nagyobb szemcsékké egyesülnek, és így ugyancsak az ülepedő por mérettartományába jutnak. A hidrofíll porok agglomerációját a levegő nedvességtartalma megakadályozza. Így ezek a porok – vékony vízfóval borítottan – hosszú ideig lebegve maradnak és szennyezik a levegőt. Különböző gáz alakú légszennyező anyagok jelenlétében a hidrofíll porok is hidrofíllé változhatnak, és a légnedvesség hatása ezekre is érvényesül.

A levegő nedvességtartalma tehát stabilizálja a porszennyeződést, utóbbi pedig elősegíti a ködképződést. A kölcsönhatás további következményeképpen a látástávolság csökken, ez ugyanakkor a közlekedési forgalom lassulásával fokozza a gépjárművek szennyezőanyag kibocsátását, a légszennyeződés erősödését. A légszennyező anyagoknak ilyen együttes hatása és a kedvezőtlen légköri, meteorológiai körülmények találkozása vezet a füstköd (szmog) kialakulásához, amely a levegőszennyeződési jelenségek legszélsőségesebb formája.

A füstködöknek vagy szmogoknak két alapvető típusát különböztetjük meg: a Londoni típusú szmogot, valamint a Los Angeles-i típusú szmogot. Elnevezésüket leggyakoribb előfordulási helyeikről kapták.

Londoni szmog: a füstköd egyik formája, amely a szén- és olajtüzelés következményeképpen főleg a téli időszakban, magas relatív nedvességtartalomnál szokott jelentkezni. A

légszennyezést itt elsősorban kén-dioxid, szén-monoxid és korom okozza. A füstköd a hajnali órákban – amikor a leghidegebb van – alakul ki, amikor rendszerint inverziós állapot lép fel.

Los Angeles-i szmog: a füstköd másik formája, amely főleg a nagy gépjárműforgalom következménye lehet erős napfénybesugárzás és a levegő magas abszolút nedvességtartalma mellett. A légszennyeződést nitrogén-oxidok és szénhidrogének okozzák. Ezekből a napfény katalizáló hatására új vegyületek keletkeznek, többek között ózon, peroxi-acil származékok és más bonyolult szerves vegyületek, amelyek mérgezőek, fojtó hatásúak. Ez a fajta füstköd nyáron, a déli órákban lép fel a leggyakrabban.

Az előzőekben részletezett szmog-féleségek az utóbbi években sajnálatos módon egyre gyakrabban fordulnak elő, különösen a Los Angeles-i típusú, mivel a felmelegedés és a gépjárműforgalom okozta szennyezőanyag-kibocsátás egyre fokozódik, az elvékonyodó ózonréteg miatt pedig a napfény ultraibolya sugárzása erősödik. Forró nyári napokon létrejötté egyre valószínűbb, ezért hazánkban ma már az önkormányzatok számára jogszabályban előírt kötelezettség un. szmog-riadó tervek készítése, amelynek végrehajtását a súlyosan károsító légszennyezettségi állapotban el kell rendelni, a lakosság és az arra illetékes hivatali szervek együttműködésével meg kell kísérelni az esetleges környezeti (és természetesen egészségügyi) katasztrófák bekövetkezését.

## **2.5. Kémiai reakciók az atmoszférában**

***(Fülöp Tamás)***

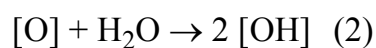
A légkörben lejátszódó kémiai reakciók közül a levegőtisztaság-védelemmel foglalkozó szakember számára a troposzférában és a sztratoszférában végbemenő folyamatok érdekesek. Az atmoszférába kerülő és az ott keletkező káros anyagok a troposzférában fejtik ki hatásukat az élő és élettelen környezetre, míg a sztratoszférában végbemenő reakciók a földi bioszférát az ultraibolya sugárzástól megvédő ózonréteggel állnak kapcsolatban. Az atmoszférában lejátszódó kémiai reakciók nagy része fotokémiai reakció, a Nap sugárzó energiája a légkörben található molekulákat gerjeszti, ionizálja, szabad gyökökre disszociálja, biztosítva ezzel a reakciók lejátszódásához szükséges aktiválási energiát. A gyök valamely kémiai kötés felszakadásával keletkező párosítatlan elektront tartalmazó atom vagy atomcsoport. Az abszorbeált energia hatására a következő reakciók játszódnak le:



- gerjesztés:  $A \xrightarrow{h\nu} A^*$
- disszociáció:  $A^* \rightarrow D_1 + D_2 + \dots + D_n$
- közvetlen reakció:  $A^* + B \rightarrow P_1 + P_2 + \dots + P_n$
- dezaktiváció:  $A^* + M \rightarrow A + M + \text{energia}$ .

### 2.5.1. A troposzférában lejátszódó kémiai reakciók

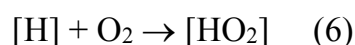
A troposzférában végbemenő reakciókban a hidroxil gyök ([OH]) játszik fontos szerepet. Keletkezése azzal magyarázható, hogy a troposzférában az ózon koncentrációja mintegy 40 ppb, amely ózon fotokémiai bomlásával keletkező oxigén gyök a troposzféra vízgőz tartalmával reakcióba lépve hidroxil gyököt eredményez:



A troposzférába kerülő redukált állapotú szennyezőanyagok oxidációja legnagyobb részt a hidroxil gyökkel való reakcióban játszódik le.

#### 2.5.1.1. A kénvegyületek reakciói

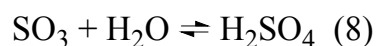
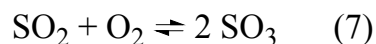
Azok a vegyületek amelyek redukált állapotú kenet tartalmaznak, hidroxil gyökkel és a levegő oxigénjével reakcióba lépve, több lépésen át, gyökös mechanizmussal kén-dioxidá alakulnak. A karbonil-szulfid esetében pl. a következő reakciók játszódnak le:



Amint látható, e reakciósorozatnak nemcsak a légköri kén-dioxid képződése szempontjából van jelentősége, hanem ezen reakciók eredményeként egy újabb légköri oxidáló ágens a hidroperoxil gyök [HO<sub>2</sub>] is keletkezik.

Hasonló mechanizmussal megy végbe a szerves kénvegyületek oxidációja is, amely reakciókban még aldehidek is keletkeznek, hozzájárulva az oxidáló fotokémiai füstköd kialakulásához.

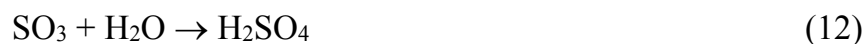
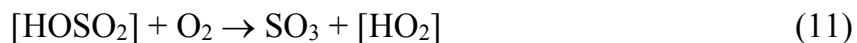
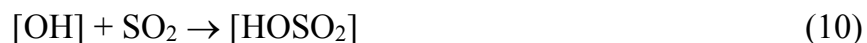
Az e reakciókban létrejövő, valamint az atmoszférába természetes és mesterséges forrásokból bekerülő kén-dioxid számos gáz és folyadék fázisú reakcióban vesz részt. Oxidációja több úton mehet végbe. Közvetlen oxidációja a következő reakciókkal írható le:



E reakciók sebessége nem számottevő, a kén-dioxid átalakulásában kis szerepet játszanak. Sokkal valószínűbb, hogy a kén-dioxid fotokémiai reakciók révén valamely oxidáló ágens (OH, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>) jelenlétében alakul át kén-trioxiddá. A nitrogén-dioxiddal lejátszódó reakció egyenlete:

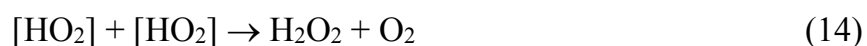
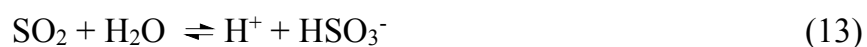


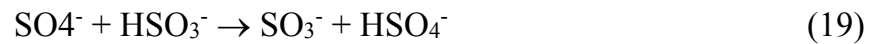
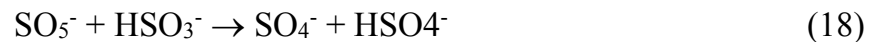
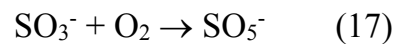
Ha a kén-dioxid oxidációja hidroxil gyök hatására történik, akkor a következő reakciók játszódhatnak le:



Ezen túlmenően a levegőben lebegő szilárd részecskék felületén adszorbeálódó kén-dioxid e részecskék katalitikus hatására is kén-trioxiddá alakulhat, amelynek vízgőzzel való reakciója, majd ezt követő kondenzációja ugyancsak kénsav keletkezését eredményezi.

A kén-dioxid oxidációja végbemehet folyadékfázisban is, amennyiben az oldódik a légkörben lévő vízcseppekben. Ez esetben a kén-dioxid átalakításában a vízben jól oldódó hidroperoxil gyökökből képződő hidrogén-peroxid is részt vesz. Folyadékfázisú oxidáció esetén a következő reakciók játszódhatnak le:





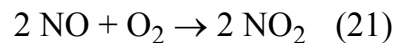
Ammóniának a vízcseppekben való oldódásával különböző sók vizes oldatai jönnek létre (pl. ammónium-biszulfit ( $\text{NH}_4\text{HSO}_4$ ), ammónium-szulfát ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ), amelyekből a víz elpárolgása után szilárd részecskék maradnak vissza. Képződésük alapján az ún. nukleációs részecskeméret tartományba tartoznak. E szilárd részecskék a  $0,1 \mu\text{m}$ -nél kisebb jellemző mérettel rendelkeznek, s erősen ki vannak téve a gázmolekulák hőmozgásából, a Brown-mozgásból adódó ún. diffúziós erőhatásnak. E mozgásból származó sebességük meghaladja a a gravitációs erőhatásból származó ülepedési sebességüket, így ezen részecskék a légkörből nem ülepednek ki. Atmoszférában való jelenlétük erősen befolyásolja a látótávolságot, valamint sugárzás visszaverő és szóró hatásuk miatt jelentősen befolyásolják a légkör energiamérlegét is. Ezen részecskék agglomerációjával keletkeznek az akkumulációs tartomány részecskéi, amelyek jellemző mérete  $0,1 - 2 \mu\text{m}$  közé esik.

#### 2.5.1.2. Nitrogénvegyületek reakciói

A troposzférában lejátszódó kémiai reakciókban a nitrogénvegyületek közül a nitrogén-oxidoknak van a legnagyobb szerepe. A nitrogénmolekula elektromágneses sugárzást abszorbeálva nitrogén gyökökre hasad, amely oxigénnel reagálva nitrogén-monoxiddá alakul. Ez a reakció csak a felső sztratoszférában tud lejátszódni, ahol az ózonréteg felett még megfelelő energiájú sugárzás áll rendelkezésre a nitrogénmolekula disszociálásához. Nagyobb a valószínűsége, hogy a nitrogén-monoxid elektromos kisülés (villámlás) és termikus hatás következtében jön létre. Képződik még nitrogén-monoxid a dinitrogén-oxid fotokémiai bomlása révén is, amely reakció a sztratoszférában játszódik le:



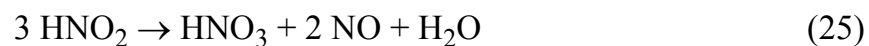
Az NO emisszió antropogén forrásai pedig a közlekedés, a hőerőművek, valamint egyes ipari tevékenységek (pl. salétromsav-gyártás). A nitrogén-monoxid a továbbiakban nitrogén-dioxiddá oxidálódik. Az oxidáció többféle mechanizmus szerint végbemehet. A közvetlen oxidáció egyenlete:



A teljes NO konverzióknak csak mintegy 25 %-át teszi ki az ily módon történő átalakulás. Gyorsabban játszódik le a reakció erélyesebb oxidálószerekkel (pl. ózonnal, hidroxil gyökkel):



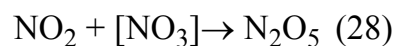
A nitrogén-dioxid vízgőzzel reagálva salétromsavat és salétromossavat képez. A salétromossav további átalakulás révén, főleg lebegő szilárd szemcsék katalitikus hatására salétromsavvá és nitrogén-monoxiddá alakul:



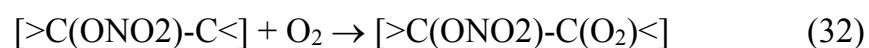
A nitrogén-monoxid atmoszférabeli koncentrációját csökkentő legjelentősebb folyamatok a közvetlen vagy fotokémiai oxidáció nitrogén-dioxiddá. A nitrogén-dioxid hidroxil gyökkel salétromsavvá alakul:



E reakció főleg napközben játszódik le. Napsugárzás hiányában is megtörténik azonban a salétromsav képződése a következő reakcióegyenletek szerint:



A reakciókban  $[\text{NO}_3]$  nitrát gyököt jelent, amely a napsugárzás hatására NO-ra,  $\text{NO}_2$ -ra bomlik. Napsugárzás hiányában a nitrátgyök szénhidrogénekkal ( $[\text{RH}]$ ) vesz gyökképzési és addíciós reakciókban vesz részt:



A salétromsav gőzkondenzáció révén folyadékállapotú aeroszolt képez, ammóniával reagálva ammónium-nitrát keletkezik ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ), ami a szilárd légtörési aeroszolnak az ammónium-szulfát után a második leggyakoribb komponense.

### 2.5.1.3. A szénvegyületek reakciói

A szén-monoxid hidroxil gyökkel való reakciója:



A reakcióban keletkező hidrogén gyök gyorsan reagál oxigénnel, a reakcióban hidroperoxil gyök  $[\text{HO}_2]$  keletkezik, amely ugyancsak erőlyes oxidáló ágens.

A metán szintén reagál a hidroxil gyökkel:



A metán jelenlegi koncentrációja az atmoszférában 1,67 ppm, a 100 évvel ezelőttihez képest koncentrációja megkétszereződött. E koncentráció növekedéshez a metán emisszió növekedése mellett, hozzájárul a szén-monoxid atmoszférabeli koncentrációjának növekedése is, ugyanis a (33) reakció sebessége jelentősen meghaladja a (34) reakcióét, ami azt jelenti, hogy a metán átalakításában egyik legnagyobb szerepet játszó hidroxilgyök koncentrációját a szén-monoxiddal való reakció jelentősen csökkenti.

Az (34) reakcióban keletkező metil gyök, illetve egyéb szénhidrogének hasonló reakcióban keletkező gyökei ( $[\text{R}]$ ), oxigénnel reagálva eredményezik a szerves peroxil gyökök képződését  $[\text{RO}_2]$ , amelyek a troposzféra kémiai reakcióiban ugyancsak fontos szerepet játszanak. Oxidálják pl. a NO-t a következő reakció szerint:



Metilgyök esetében a következő reakció játszódhat le:



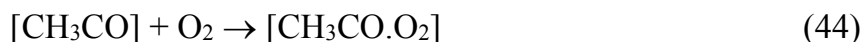
A keletkező metoxil-gyök  $[\text{CH}_3\text{O}]$  további reakciókban vesz részt, amelynek eredményeképpen hidroperoxil gyök, formaldehid ( $\text{HCHO}$ ), és szén-monoxid keletkezik.



Magasabb szénatomszámú szénhidrogének esetében a (35) reakcióban keletkező alkoxil-gyök [RO] kötésfelhasadással elbomolhat:



További oxidációs reakciók acil gyök ( $\text{R}''\text{CO}$ ) és peroxi-acil gyök keletkezését ( $\text{R}''\text{CO}\cdot\text{O}_2$ ) eredményezik. Abban az esetben, ha  $\text{R}''$  metilcsoport, e folyamatok eredményeképpen peroxi-acetil gyök ( $\text{CH}_3\text{CO}\cdot\text{O}_2$ ) keletkezik az alábbi reakciók szerint:



A peroxi-acetil gyök troposzférában való megjelenésének a fotokémiai (Los Angeles típusú) füstköd kialakulása szempontjából van jelentősége.

### **A fotokémiai füstköd kialakulása**

A korábban ismertetett egymással nagymértékben összefüggő kémiai reakciók eredményezik a fotokémiai (Los Angeles típusú) füstköd kialakulását. A füstköd (szmog) légszennyező anyagoknak a vonatkozó légszennyezettségi (immissziós) határértéket huzamos időn át meghaladó felhalmozódása a troposzféra felszínközeli rétegében. Kialakulásában döntő szerepet játszik a légszennyező anyagok nagymértékű kibocsátása, kedvezőtlen meteorológiai körülmények (inverzió, szélcsend), valamint a domborzati tényezők. A füstködöknek két alaptípusát különböztetjük meg az oxidáló típusú füstködöt, amelyről jelen fejezetben szólunk, valamint a redukáló típusú füstködöt, amelyet London-típusú füstködnek is neveznek. A kétféle füstköd legfontosabb jellemzőit a **4. táblázat** tartalmazza.

**4. táblázat. A füstködök jellemzői**

<b>Jellemző</b>	<b>London-típusú</b>	<b>Los Angeles-típusú</b>
Jelentkezési időpont	reggel és este	délben
Hőmérséklet	0-5 °C	24 – 32 °C
Relatív páratartalom	80 % felett, köd	70 % alatt
Kémiai jelleg	redukáló	oxidáló
Hatás	légzőszervi	kötőhártya-irritáció
Fő komponensek	SO <sub>2</sub> , CO, korom	O <sub>3</sub> , NO <sub>x</sub> , RH
Leggyakoribb előfordulás	nov.-jan.	jún.-szept.

A London-típusú füstköd kialakulását elsősorban a széntüzelés légszennyező anyag emissziója okozza, s a kibocsátott légszennyező anyagok közvetlenül fejtik ki egészségkárosító hatásukat. A Los Angeles-típusú füstköd kialakulása a közlekedésből származó légszennyező anyag kibocsátás következménye, a gépjárművek elégtelen szénhidrogén, valamint nitrogén-oxid kibocsátása iniciálja azokat a reakciókat, amelyek az oxidáló szmog kialakulását eredményezik. Mindenekelőtt számolni kell fotokémiai füstköd esetén az ózon felszínközeli koncentrációjának növekedésével. Az ózon jelenlétét a troposzférában a sztratoszférából való diffúzió, illetve a molekuláris oxigén oxigéngyökkel való reakciója okozza:

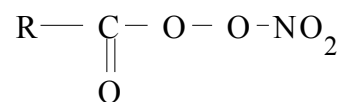


A troposzférában az oxigéngyök jelenléte leginkább annak köszönhető, hogy a gépjárművek által kibocsátott nitrogén-monoxid nitrogén-dioxiddá oxidálódik a (21) – (23) egyenletek alapján. A nitrogén-dioxid fotolízise (napsugárzás hatására történő bomlása) NO és oxigéngyök keletkezését eredményezi.



Az oxigéngyök részt vesz az ózonképződési folyamatban, a nitrogén-monoxid pedig ismételt oxidálódik. Ezen oxidációs reakciókban egyéb komponensek is részt vesznek, mint pl. a peroxilgyökök, így ezen anyagok jelenléte is befolyásolja a felszínközeli ózonképződést. A peroxilgyökök jelenléte pedig a gépjárművek elégtelen szénhidrogén emissziójának, valamint az azt követő oxidációs reakcióknak a következménye.

A szénhidrogének azonban nemcsak az ózonképződés befolyásolásával vesznek részt a fotokémiai füstköd kialakításában, hanem oly módon is, hogy oxidációs reakcióik termékei a peroxi-acil-nitrát típusú vegyületek, amelyek ugyancsak az egészségre káros hatású komponensei a Los Angeles-típusú szmognak. A peroxi acil nitrátok általános képlete:



Abban az esetben, ha R metilcsoport, peroxi acetil nitrát elnevezésű vegyületről beszélünk. A peroxi-acetil-nitrát keletkezése a (44) reakcióban keletkező peroxi-acetil gyök nitrogén-dioxiddal képzett reakciójának a terméke. A peroxi-acil-nitrátok közül a fotokémiai füstköd kialakulásában leginkább ez a vegyület vesz részt.

A peroxi-acil-nitrátok 2 ppm és e feletti koncentrációban a szemet irritálják, s kimutatták, hogy fotoszintézist inhibeáló hatásuk van.

### 2.5.2. *Kémiai reakciók a sztratoszférában*

A sztratoszférában lejátszódó kémiai reakciók általában a Földet a Napsugárzás ultraibolya (UV) tartományának káros hullámhossz intervallumától megvédő ózonréteggel vannak kapcsolatban. Az ózonréteg az atmoszférában 10 és 50 km magasságok között található, vertikális koncentráció-eloszlása azonban nem egyenletes, koncentrációjának maximuma 35 km-es magasságban van. Az ózon keletkezése és bomlása – antropogén hatás nélkül – egymással egyensúlyban lévő folyamatok, s az ún. Chapman reakciók alapján játszódnak le:

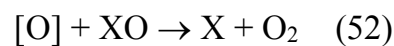


A sztratoszférában az oxigénmolekula bomlása a napsugárzás 230 nm alatti hullámhossztartományának abszorpciója miatt következik be. Míg a légkör legalsó részében ez

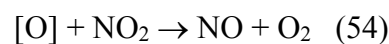


a hullámhossztartomány már nem áll rendelkezésre, így ott az oxigéngyök az előzőekben ismertettek alapján a nitrogén-dioxid fotokémiai bomlásával keletkezik, addig a sztratoszférában az oxigéngyök forrása az oxigénmolekula fotolízise. Az oxigéngyök ezután oxigénmolekulával reakcióba lép valamely a felszabaduló energiát abszorbeáló molekula jelenlétében, aminek eredményeként ózon képződik. Ezek a reakciók a sztratoszférikus ózonréteg forrásai. Ugyanakkor a keletkezési folyamatokkal egyensúlyban zajlik az ózon bomlása is, a (49) és (50) egyenletek alapján. A (49) egyenlet szerinti reakciót a Napsugárzás 310 nm alatti hullámhossztartományának abszorpciója okozza.

Antropogén eredetű légszennyező anyagok kibocsátásának hatására a sztratoszférikus ózonréteg bomlási folyamata felgyorsul. Ezen légszennyező anyagok jelenlétében lejátszódó folyamatok az alábbi általános reakcióséma szerint foglalhatók össze:



A reakciókban résztvevő "X" gyök és molekula is lehet (elsősorban NO molekula, valamint [OH] és [Cl] gyökök). NO esetén az alábbi reakciók játszódnak le:

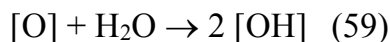


A reakciók lejátszódásához szükséges NO forrásai elsősorban a sztratoszférában közlekedő repülőgépek. Az NO néhány napos légköri tartózkodási ideje nem elegendő, arra hogy a Föld felszínéről a légkörbe kerülő NO eljusson a sztratoszférába. Ha a reakciópartner az [OH], illetve a [Cl] gyök, akkor a lejátszódó reakciók a következők:



Látható, hogy minden reakciópár esetén elbomlik egy ózonmolekula, majd a második reakcióeredményeképpen visszaalakul az ózonmolekula bomlását előidéző reakciópartner,

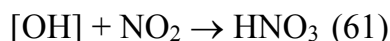
amely újabb reakcióciklusokban részt véve további ózonmolekulákat képes elbontani. Az [OH] forrása a sztratoszférában az oxigéngyök vízgőzzel való reakciója:



A [Cl] gyök viszont a Föld felszínéről a légkörbe kerülő halogénezett szénhidrogén-származékok fotokémiai bomlásának eredménye. Jelenleg ezen szénhidrogén-származékok felhasználását már nemzetközi egyezmények tiltják, viszont mivel e típusú vegyületek atmoszférikus tartózkodási ideje több, mint száz év, ezért az utóbbi évtizedekben kibocsátott vegyületek jelenleg is kifejtik a sztratoszférikus ózonrétegre káros hatásukat. A klórgyök képződésének reakciója (diklór-difluor-metán, CFC-12 esetén):



Az ózon bomlását okozó anyagok egyéb reakciókban is részt vesznek, ilyenkor képződnek az ún. rezervoár (tároló) vegyületek. Rezervoár reakciókra néhány példa:



A rezervoár vegyületekből, azonban az ózon bomlását okozó anyagok fel is szabadulhatnak.



### 2.5.3. A mezoszféra és a termoszféra kémiai reakciói

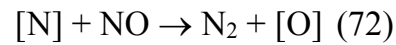
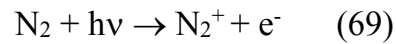
Mivel a mezoszféra és a termoszféra légkör legfelső rétegei, az atmoszférában itt áll rendelkezésre a legnagyobb energia a kémiai reakciók lejátszódásához. A nagy energiájú neutrális folyamatok mellett szerepet kapnak itt a ionreakciók is. E szférákban a neutrális részecskék közül a legnagyobb koncentrációval az oxigéngyök rendelkezik. A sugárzás hullámhossza még megfelelően kicsi (és energiája megfelelően nagy) ahhoz, hogy lejátszódjon a vízgőz fotolízise:



A HO<sub>x</sub> molekulák és gyökök között még az alábbi reakciók lehetségesek:



Ionreakciók közül az alábbiak lejátszódása lehetséges:



### 3. A LEVEGŐSZENNYEZÉS FORRÁSAI ÉS FAJTÁI

Levegőszennyezőnek kell minősíteni származásuktól és állapotuktól függetlenül azokat az anyagokat, amelyek olyan mértékben jutnak a levegőbe, hogy azzal az embert és környezetét kedvezőtlenül befolyásolják vagy anyagi kárt okoznak. Bár a természetes szennyező források összkibocsátásukat tekintve a mesterséges szennyező forrásokat jelenleg még többszörösen meghaladják, a bioszféra szempontjából káros szennyezőanyag-koncentrációk kialakulásához nem vezetnek.

A mesterséges szennyező források egyik fő jellegzetessége, hogy általában területileg koncentráltan – nagy városokban vagy ipartelepeken – helyezkednek el, ezért a szennyező anyagokat erősen korlátolt kiterjedésű légtérbe bocsátják, és azoknak a környezet szempontjából ártalmatlan hígulására csak jóval a városok határain kívül kerül sor.

Légszennyező minden berendezés, épület, jármű vagy szabadban elhelyezkedő anyag (meddőhányó, széntároló, szemétkerakó hely), amely légszennyezést okoz.

#### 3.1. A légszennyezők eredete

A levegőszennyező anyagokat eredetük szempontjából két nagy csoportra, természetes és antropogén – az ember által előidézett – eredetűre osztjuk.

##### 3.1.1. Természetes eredetű légszennyezők

A légkörbe jutó szennyező anyagok tekintélyes része természetes eredetű. A Föld felületének nagyobb részét kitevő hidroszféra jelentős mennyiségű aeroszolt termel. A hullámveréssel levegőbe jutó vízcseppek beszáradásával főleg nátrium (Na), kálium (K), klorid (Cl) szulfát ( $\text{SO}_4$ ) ionokból álló vegyületek maradnak az atmoszférában. A tengeri élővilág hatalmas mennyiségű gáz halmazállapotú anyagcsere-terméket is a levegőbe juttat.

A litoszféra felületéről főleg szilárd fázisú szennyező anyagok származnak. A széllel felkavart homok ( $\text{SiO}_2$ ) gyakran nagy koncentrációban van jelen. A talajok pora szerves alkatrészeket tartalmaz, főleg azonban ásványok porából, karbonátokból, szulfátokból és oxidokból áll (például  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , stb.). Vulkáni tevékenység során porok, gőzök és gázok ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{CO}$ ) jutnak a levegőbe. Sztyeppék, bozótok, erdők tüzeinek égéstermékei a szén-dioxidon kívül kormot és karcinogén szénhidrogéneket hordoznak. A növények és állatok bomlástermékei ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , aminok, merkaptánok, atb.) gyakran bűzösek.

A gázkitörésekből és szerves bomlástermékként levegőbe kerülő kis szénatom-számú szénhidrogének közül legnagyobb és meglehetősen állandó a metán koncentrációja (1,2 ppm).

### 3.1.2. *Antropogén eredetű légszennyezők*

Az egyes országok emisszióinak fajtája és mennyisége számos tényezőtől függ. Ilyenek: az energiatermeléshez és kommunális fűtéshez használt tüzelőanyagok fajtája, az ipari termelés volumene és korszerűsége, a légszennyező anyagok leválasztásának foka, a gépjárművek száma és műszaki színvonala, a lakosság száma és az éghajlat. A fő szennyező forrásokat jól szemlélteti az **5. táblázat**, amely az Egyesült Államokban 1975-ben az emberi tevékenység során kibocsátott szennyező anyagok adatait tartalmazza.

#### **5. táblázat. Az USA-ban 1975-ben kibocsátott főbb légszennyező anyagok becsült mennyisége, Mt/év**

Szennyező anyagok Mt-ban		Tüzelőanyagok égetése	Hulladékok égetése	Ipari folyamatok	Összesen
Szilárd részecskék	1,2	6,0	0,9	7,9	16,0
szén-monoxid	69,6	1,1	4,4	8,5	83,6
kén-dioxid	0,8	23,7	0,1	5,1	29,7
nitrogén-oxidok	9,6	11,2	0,3	0,6	21,7
szénhidrogének	10,6	1,3	1,2	3,1	27,5
<b>Összesen</b>	<b>91,8</b>	<b>43,3</b>	<b>6,9</b>	<b>25,2</b>	<b>178,5</b>

Az iparhoz számítva az oldószer-elpárolgást is, az ipar részesedése 20,4 %. Az emittált szennyezés 90 %-a gáznemű és csak 10 %-a por, az emisszió mintegy fele a közlekedésből, ¼ - ¼ része pedig az iparból és a fosszilis tüzelőanyagok elégetéséből ered. Megállapíthatjuk azt is, hogy a levegő szennyezését elsősorban égési folyamatok (oxidáció) okozzák, bárhol is mennek végbe: háztartásokban, hőerőművekben vagy a gépjárművek robbanómotorjaiban. A fosszilis tüzelőanyagok (kőszén, kőolaj, földgáz) ugyanis a szénen kívül egyéb elemeket is tartalmaznak, azok mennyisége kihat a füst-gázok összetételére. Az égéskor keletkező füstgáz a szén oxidjain kívül vízgőzből, a kén és a nitrogén oxidjaiból áll, de néha metánt és egyéb gáznemű szénhidrogéneket is tartalmaz, sőt szilárd részecskéket is magával ragad, mint amilyenek a pernye, korom, koks és kátrány.

A levegő ember általi szennyezését elsősorban az égési folyamatok (oxidáció) okozzák, bárhol mennyek is végbe: háztartásokban, hőerőművekben, a gépjárművek robbanómotorjaiban, vagy magában az emberi szervezetben.

Fosszilis tüzelőanyagok égetése – a kibocsátott légszennyezők főleg a szén, a kén, a nitrogén oxidjai, vízgőz, szilárd részecskék (pernye, por, korom, stb.), szénhidrogének

Az égéstermékek hatása a környezetre nagyon különböző. A szén tökéletlen égésekor keletkező szén-monoxid (CO) nagyon erős mérgező, a tökéletes égés terméke, a szén-dioxid (CO<sub>2</sub>) viszont hasznos a növényzet számára, ugyanakkor a kén-dioxid (SO<sub>2</sub>) egyike a legkárosabb levegőszennyező anyagoknak.

Szembetűnően kiemelkedik a széntüzelésű erőművek szennyező hatása. Gáznemű szennyező anyagokból az olajtüzelésű erőmű 35, a földgáztüzelésű csak 6 %-át bocsátja ki a széntüzelésű erőmű emissziójának. Ez utóbbiakban a szilárd részecskék a gáznemű szennyező anyagokkal nagyságrendileg azonos mennyiségben keletkeznek. Az olaj és földgáztüzelésű erőművek szilárd részecske kibocsátása a széntüzelésű erőművek emissziójához képest elhanyagolható. Külön figyelmet érdemelnek a nitrogén-oxidok, amelyeket az olaj és földgáztüzelésű erőművek is jelentős mértékben emittálnak.

Városok kén-dioxid és szilárd részecske emissziójának mértéke elsősorban a kommunális fűrés és az ipari hőenergia-termelés tüzelőanyagaitól és berendezéseitől függ.

*Gépjárművek meghajtása* – szén-monoxid, kén-dioxid, nitrogén-oxidok, szénhidrogének (telített, telítetlen), korom, benz-a-pirén és egy sor oxigéntartalmú szerves vegyület

A gépkocsik okozta légszennyezés is a nagyvárosok egyik központi problémája, ennek érdekében figyelembe kell venni az Otto- és dízelmotorok kipufogógázainak eltérő összetételét. A kétféle motorban a különböző működési elv miatt eltérő égési folyamatok játszódnak le, az üzemanyag is már. Míg a dízelmotorok állandóan légfesleggel dolgoznak, az Otto-motorok az üzemi tartomány nagy részében léghiánnyal működnek, ezért az égéstermékek összetétele eltérő.

Az egészségre ártalmatlan komponensek mellett a két motortípus kipufogógázai – eltérő mértékben – szén-monoxidot, nitrogén-oxidokat, szénhidrogéneket (telített, telítetlen), kormot, benzpirént, kén-dioxidot és egy sor oxigéntartalmú szerves vegyületet tartalmaznak. Az egyes komponensek mennyiségét a motor üzemállapota (üresjárat, hidegindítás, stb.) nagymértékben befolyásolja. Közvetlen egészségártalom szempontjából legveszélyesebb a szén-monoxid, amely már 0,01 % v/v koncentráció felett mérgezési tüneteket okozhat azáltal, hogy a vér hemoglobinjából az oxigént kiszorítja.

A szennyező hatás értékelésére a szikragyújtású motoroknál elsősorban a szén-monoxidot, szénhidrogéneket és nitrogén-oxidokat, míg a kompressziós gyújtású motoroknál a koromtartalmat, illetve laboratóriumi szinten újabban a nitrogén-oxidokat, szén-monoxidot és szénhidrogéneket mérik. Ezen a területen az emisszió csökkentésére az első lépés a gondos karbantartás.

*Ipari tevékenység* – különféle szerves és szervetlen eredetű porok, gázok, gőzök, ásványi anyagok

Az ipar rendkívül változatos szennyező anyagaival és koncentrált forrásaival tűnik ki. Általában zárt technológiák alkalmazására kell törekedni, a légszennyezési problémák megoldása gyakran hasznos anyagok visszanyerésével jár együtt. Fontos a telephely célszerű kijelölése és a védősávok alkalmazása. Az alábbiakban néhány jellemző példát említünk.

A szénbányák osztályozói szén- és meddőpor kibocsátásával szennyezik a környezetet. A legnagyobb porszennyezés okozói a cementgyárak, amelyek a nyers-anyagok és égetőkemencék porát, valamint a cementport egyaránt kibocsátják. Lég-szennyező a kohászat is: a nagyolvasztók torokgáza szén-monoxidot, metánt és port tartalmaz, a poremisszió 20-200 kg/t nyersvas lehet. Az acélgyártó berendezésekből kilépő gáz legjelentősebb komponense a vas-oxid, ami az ún. barnafüstöt képezi.

Hidrogén-fluoridból a legnagyobb mennyiség a foszfátműtrágya gyártásánál, a fluorapatit feltárásakor kerül a véggázzal a levegőbe. Jelentős a timföld elektrolízisének, az üvegmáratásnál és a zománcgyártásnál szabadba kerülő HF és más fluor-vegyületek mérgező hatása is. Klór a nátrium-kloridot elektrolizáló üzemekre és a szerves vegyiparra jellemző. Sósav nem csak a szintézisüzemből jut a környezetbe, hanem ércek klórozó pörkölésének és klórtartalmú hulladékok (pl. PVC) égetésének véggázaival is. Kénsav- és cellulózgyárak véggázaival kén-dioxid, nitrogénműtrágya és salétromsav gyárakból nitrogén-oxidok kerülnek a levegőbe.

A már említett iparágak mellett számottevő az építő-, építőanyag- és könnyűipar levegőszennyező hatása is.

*Mezőgazdaság* – porszennyezés, műtrágyák, növényvédő szerek, állattartás

A mezőgazdasági tevékenység korábban csak olyan anyagokat juttatott a levegő-be, amelyek természetes körülmények között keletkeznek. Meg kell azonban említenünk, hogy olyan országokban, mint hazánk, a szántóföldekről származó porszennyezés is jelentős lehet. Ennek okai: az ország területének 70 %-a áll mezőgazdasági művelés alatt, az ország fele fel van szántva, ennek nagy része hónapokig fedetlen, ugyanakkor a csapadék és az erdőterület kevés.

Manapság az említett porszennyezés mellett a mezőgazdaság fokozódó kemizálásával nem csak a műtrágyák pora, hanem biológiailag aktív anyagok egész sora kerül a levegőbe, különösen amióta repülőgépről szórják, permetezik azokat. A peszticidek (klórozott szénhidrogének, szerves foszfátészterek, ditio-karbamátok, stb.) alkalmazása miatt ma már a mezőgazdaság a természet biológiai egyensúlyát nagyon veszélyezteti.

A metán-szennyezés mezőgazdasági eredetű is lehet. Tekintélyes mennyiségű metánt juttatnak a levegőbe a rizstermő földek, továbbá – bármilyen hihetetlennek tűnik is – de a szarvasmarhák emésztési anyagtermékei között is jelentős mértékben megtaláljuk a metán, vagyis a szarvasmarhák metánt lélegeznek ki.

### **3.2. A légszennyező források fő típusai**

Régebben egy ország vagy terület levegőjének szennyezettsége rendszerint iparának fejlettségével volt arányos, később a fejlettséget a közlekedés okozta szennyeződés részesedési aránya jellemezte. Napjainkban a korszerűsödő gépjárműállomány (főleg a gazdagabb országokban, de hazánkban is) a gépjárművek számának növekedése mellett nem növeli tovább a szennyezettséget.

Primer szennyező források azok, amelyek a szennyező anyagokat termelik és a légkörbe juttatják. Szekunder forrásoknak azokat nevezzük, ahonnan a levegőből egyszer már távozott, eltávolított, illetve a termelésből már kivont szennyező anyagok ismét a légkörbe kerülhetnek. Ilyenek a pernyehányók, meddőhányók vagy például a cementgyárak utakra, talajra, épületekre ülepedett pora, amelyet a szél felkavar. Ilyenek a szeméttelpek, továbbá a szennyvizek, amelyekből az elnyelt gázok, oldószerek gőzei kidiffundálnak.

A levegőbe szennyező anyagokat kibocsátó forrásokat elhelyezkedésük, jellegzetességeik, a kibocsátás jellege alapján csoportokba sorolták, amely egyrészt tájékoztat a légtérbe kerülés módjáról és egyúttal arra is rámutat, miként lehetséges az adott források szennyező hatását csökkenteni, esetleg megszüntetni.

#### *Pontszerű források*

A pontforrások (un. koncentrált paraméterű források) azok, amelyeknél a légszennyező anyagok koncentrációja és a hordozó gázok térfogatárama, ezáltal a környezetbe lépő káros anyagok mennyisége egyértelműen meghatározható. Nem feltétel, hogy a gázáramlást gépi berendezés (szivattyú, ventilátor) biztosítsa. A pontforrásokhoz tartozik a kémény, a kürtő, a szellőző.



A pontforrás elnevezés arra utal, hogy a szennyező anyagok a terjedés-hígulási számítások szempontjából „egy pontban” lépnek ki a környezeti szabad levegőbe. Az ún. magas pontforrásoknál (erőművek, ipartelepek magas kéményei) a légkör természetes hígítóképessége az év nagy részében optimális mértékben tud érvényesülni.

#### *Felületi források*

A felületi (un. szórt paraméterű vagy diffúz) forrásoknál a szennyező anyagokat kibocsátó felület nagysága ugyan meghatározható, de a hordozó gáz térfogata és sebessége nem, így a környezetbe kerülő anyagok mennyiségére csak közvetett mérések és számítások útján lehet következtetni. Itt a meteorológiai viszonyok, például a szélesebbesség nem csak a már kilépett szennyező anyagok hígulását, hanem a diffúz forrásból történő anyagkibocsátást is jelentősen befolyásolják. Tipikus példája a felületi vagy diffúz forrásoknak a hulladéklerakók felszíne.

A diffúz források lényeges alcsoportját képezik az un. vonalas légszennyező források. Ide tartoznak a közutak, vasútvonalak, víziutak és légifolyosók. Ezeket a forrásokat az jellemzi, hogy szennyező hatásukat a rajtuk áthaladó járművek száma és egyedi kibocsátása határozza meg. Szennyező hatásuk mértéke közvetve ezen adatok mérésével és számítás útján határozható meg.

### **3.3. A légszennyezés folyamata és mérése**

A légszennyezés folyamata három jól elkülöníthető szakaszból áll, ezek az emisszió, transzmisszió és immisszió.

#### ***Emisszió***

A különböző típusú forrásokból időegység alatt a környezeti levegőbe bocsátott szennyező anyag mennyiségét emissziónak nevezzük, értékét általában kg/óra egységben adjuk meg. A kibocsátás koncentrációja (emissziókoncentráció,  $\text{g/Nm}^3$ ) a lég-szennyező anyagoknak a hordozó gáz normál térfogatára vonatkoztatott mennyisége.

A második szakaszban, a transzmisszió során a levegőbe került szennyező anyagok hígulnak, ülepednek, fizikai és kémiai változásokon mennek át. A transzmissziót leíró összefüggéseket a légkörfizikai jelenségek mérése és értékelése útján számítják.

#### ***Immisszió***

A harmadik szakasz – amely környezetünkkel, tevékenységünkkel közvetlen kapcsolatban van – az immisszió, a környezeti levegőminőség. A kibocsátott szennyező anyagoknak a talajközeli levegőben kialakult koncentrációját nevezzük immissziónak.

## Immisszió ellenőrző hálózatok

Két fő típus:

- levegő monitorok – automatikus működésű mérőállomások
- rendszeres szakaszos mintavétel – 30 perces illetve 24 órás
- lehetnek telepítettek – automatikus vagy kézi
- időszakosan üzemelők – kézi méréssel vagy mérőkocsival

A mérőpontok kijelölésének szempontjai a vizsgálat céljától függenek, azonban mindig reprezentatív helyen kell kijelölni.

Telepíthetők minden különösebb rendszer nélkül, de ez számos hibaforrást rejt magában, és hatékonysága rossz. Adott szennyező forrás hatását célszerűen koncentrikus körökben, égtájanként telepített állomásokkal mérhetjük fel.

Háttérszennyeződés – a Meteorológiai Világszervezet által szigorúan meghatározott körülmények közt kell mérni olyan helyeken, ahol semmilyen szennyezőforrás nincs.

Települések alapterhelése – az Egészségügyi Világszervezet javaslatán alapuló elrendezésben, helyi szennyező forrásoktól mentes, jól átszellőző helyekre telepített mérőállomásokon kell mérni.

A levegőt szennyező anyagokat legegyszerűbb halmazállapotuk szerint csoportosítani, így vannak

- szilárd,
- cseppfolyós és
- gáz halmazállapotú
- szennyező anyagok.

A gáz halmazállapotú szennyezők koncentrációját  $\text{mg}/\text{m}^3$ ,  $\text{mg}/\text{Nm}^3$  vagy ppm egységekben adjuk meg. A ppm térfogatarányban kifejezett koncentráció, jelentése

$$1 \text{ ppm} = \frac{\text{cm}^3 (\text{légszennyezőanyag})}{\text{m}^3 (\text{levegő})}$$

A ppm egységben történő megadás előnye, hogy a gáz hőmérsékletének és nyomásának változásától gyakorlatilag független.

A tömeg szerinti koncentráció átszámítására szolgáló összefüggés

$$\text{ppm} = \frac{V}{M} k,$$

ahol  $V$  a gáz moláris térfogata,  $\text{cm}^3/\text{mmol}$ ;

$M$  a légszennyező anyag  $V$  a légszennyező moláris tömege,  $\text{mg}/\text{mmol}$ ;

$k$  a tömeg szerinti koncentráció,  $\text{mg}/\text{m}^3$ .

A por-és ködszennyeződés mértékét a tömeg vagy részecskeszám szerinti koncentrációval fejezhetjük ki:

tömeg szerinti koncentráció vagy porterhelés, pl.  $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ;

részecskeszám szerinti koncentráció, pl.  $\text{db}/\text{cm}^3$ .

Ülepedő porok jellemzésére szokásos a porszórás megadása, amely a környezet területegységére időegység alatt leülepedő por mennyisége  $\text{g}/(\text{m}^2 * \text{hónap})$  vagy  $\text{t}/(\text{km}^2 * \text{év})$  egységben kifejezve.

A gáznemű közegben elosztott (diszpergált) részecskék ülepedés szempontjából a következőképpen csoportosíthatók:

az  $1000 - 10 \mu\text{m}$  szemcseméretűek gyorsan ülepednek (pl. ülepedő porok);

a  $10 - 0,1 \mu\text{m}$  szemcseméretű részecskék igen lassan ülepednek, stabil aeroszolt képeznek (pl. lebegő porok);

a  $0,1 - 0,001 \mu\text{m}$  szemcseméretűek már nem ülepednek, hígulásuk a gázokéhoz hasonló.

Az aeroszoloknak két fő csoportja van: diszperziós és kondenzációs aeroszolok. A diszperziós aeroszolok szilárd vagy folyékony anyagok aprítása, illetve porlasztása vagy levegőáram révén lebegő állapotba vitelével keletkeznek. A kondenzációs aeroszolok gőzök kondenzációja vagy gázok kémiai reakciója révén képződnek, ezek rendszerint  $1 \mu\text{m}$ -nél kisebb átmérőjűek. A diszperziós aeroszolok többnyire nagyobb szemcseméretűek és szabálytalan alakúak.

A szilárd részecskéket tartalmazó aeroszolókat **pornak** nevezzük, míg a szilárd és folyékony diszperz fázist együttesen tartalmazó aeroszolok a **füstök**, a csak folyékony részecskéket tartalmazó aeroszolok a **ködök**.

## **4. A LEGGYAKORIBB SZENNYEZŐ ANYAGOK ÉS JELLEMZŐIK**

### ***Szén-dioxid***

A szén-dioxid az egyik leggyakrabban és legnagyobb tömegben a légkörbe kerülő szennyező anyag. Színtelen, szagtalan, az élő szervezetekre közömbös, nem mérgező gáz. A levegőnél nehezebb. Vízzel nem túl hevesen, de benne elnyelődve szénsavat alkot, amely a légkörből kimosódva és a talajra, élővizekbe hullva azok elsavasodását idézi elő. Légszennyezés szempontjából veszélyességét gyakorlatilag az üvegházhatás kialakulásában játszott szerepe jelenti, az élő szervezeteket nem veszélyezteti (csak akkor okoz fulladásos halált, ha mennyisége olyan nagy, hogy a levegőből a légzéshez szükséges oxigén-térfogatot kiszorítja). A növények felhasználják életfolyamataikban (fotoszintézis), a művi környezetet a savas esők révén károsítja. A légkör természetes alkotóeleme, de szennyezőként mind természetes, mind antropogén forrásokból igen jelentős tömegben (évente több milliárd tonna!) jut az atmoszférába. Főként fosszilis tüzelőanyagok és szerves vegyületek égésekor, bomlásakor képződik.

### ***Kén-dioxid***

Színtelen, jellegzetesen szúrós szagú, köhögésre ingerlő gáz. Vízen nagyon jól oldódik, azzal kénsavvá egyesül. A levegőnél nehezebb. Oxigénnel csak katalizátorok jelenlétében vegyül. Erélyes oxidálószer, a szerves festékek egy részét elszínteleníti. Napfény vagy katalizátor hatására a klórral szulfuril-kloriddá egyesül. Élő szervezetekre rendkívül mérgező hatású. Tisztán belélegezve fulladásos halált, néhány század százaléknyi mennyisége légzési nehézséggel járó mérgezési tüneteket okoz. Különösen érzékeny rá a növényzet (savas esők!). A légkörbe főleg nagy kéntartalmú szenek elégetése, kénsavgyártás, papírgyártás, kőolajipari technológiák során kerül. Kisebb mennyiségben olajtüzelésből, dízel-motorok kipufogógázaiból is származik.

### ***Oxidált nitrogénvegyületek***

A nitrogén-monoxid színtelen, vízben kevésbé oldódó gáz. Nehezebb a levegőnél. Igen reakcióképes: a levegő oxigénjével nitrogén-dioxiddá alakul, amely folyamat a napsugárzás UV-spektruma hatására különösen felgyorsul. Klórral nitrozil-kloridot alkot. A nitrogén-monoxidot a vér hemoglobinja megköti. Oxidálószer és víz jelenlétében salétromsavvá oxidálódik (savas eső!). Elemeiből igen magas hőmérsékleten, például villámláskor képződik.

A nitrogén-dioxid vörösbarna színű gáz, a levegőnél nehezebb. Ugyancsak reakcióképes, vízben azonban rosszul oldódik, A nitrogén-dioxid alacsonyabb hőmérsékleten nitrogén-tetroxiddá alakul: már szobahőmérsékleten is jelentős a nitrogén-tetroxid aránya. Erélyes oxidálószer. A nitrogén-trioxid – 10 °C körül forr. A képződő gáz nitrogén-dioxidra és nitrogén-monoxidra disszociál. Nitrózus gázok a műtrágyagyártás, műanyaggyártás, valamint nagy nyomáson végbemenő égési folyamatok (dízel-motorok) során keletkeznek és jutnak a légkörbe. Erősen mérgező hatásúak.

### ***Fluor***

Az elemi fluor sárgászöld, szúrós szagú, a levegőnél nehezebb gáz. Valamennyi elem közül a legreakcióképebb. Hidrogénnel hevesen egyesül, a vizet is bontja. A hidrogén-fluorid szobahőmérsékleten forr. A  $\text{H}_4\text{F}_4$  molekulák a hőmérséklet emelkedésével fokozatosan  $\text{H}_2\text{F}_2$ , majd HF molekulákra disszociálnak. Vízrel minden arányban elegyedik. Az üveget oldja. A fluor és a hidrogén-fluorid az élő szervezetekre igen veszélyes, nagyon agresszív mérge. A légkörbe az alumínium-kohászatban használatos folyópát bomlása révén, üveggyárak és zománcművek tevékenysége során kerül. Műtrágyagyártás, téglá- és cserépegetés egyes esetekben ugyancsak fluort emittál. A fluoridok közül levegőszennyezőként főleg a vízben oldódó alkáli-fluoridok jöhetnek számításba.

### ***Szén-monoxid***

Szintelen, szagtalan, vízben kevésbé oldódó, szobahőmérsékleten nehezen oxidálható gáz. A levegőnél kissé nehezebb. Huzamos belégzés esetén rendkívül mérgező emberre, állatra egyaránt. A vérben igen stabilis szén-oxi-hemoglobin alakjában halmozódik fel kiszorítva az oxigént a vér hemoglobinjából fulladásos halált okozva ezáltal. Rendszerint tökéletlen égések során keletkezik. Erőművek, kohók, gépjárművek nagy mennyiségben juttatják a levegőbe.

### ***Szilárd halmazállapotú szennyezők (por, részecskék)***

A légköri szilárd szennyeződések durva frakcióját ülepedő pornak, más néven szedimentumnak szokták nevezni. Vízben oldódó és oldhatatlan, valamint szerves és szervesetlen frakciókra szokták osztani. A hosszabb ideig lebegve maradó kisebb részecskék neve szálló por (ennek a frakciónak a nemzetközi elnevezése: TSP – Total Suspended Particulates). A légzőszervekbe

való lejutás eltérő mechanizmusa miatt megkülönböztetjük a 10 µm-nél kisebb részecskéket (PM 10 = Particulate Matter 10 µm) és a PM 2,5 frakciót.

A szilárd halmazállapotú légszennyezők élő szervezetekre gyakorolt hatását elsősorban az határozza meg, milyen tulajdonsággal bírnak azok az anyagok, vegyületek, amelyekből létrejöttek. A mérgező tulajdonságú kémiai anyagok pora mérgező, a közömböseké nem. Az egyébként nem mérgező hatású porok veszélye azonban abban állhat, hogy igen apró (pl. PM 2,5) szemcseméretű frakcióját hosszabb ideig belélegezve ezek a porok a tüdőhólyagocskában visszamaradnak, és idővel igen súlyos portüdő megbetegedést okoznak (szilikózis, antrakózis). A növényzet szempontjából nem a mérgező hatás dominál, hanem a por a levelek felületére rakódva elzárhatja azok légzőnyílásait, ílymódon váltva ki azok pusztulását. A épített környezetre csak az egyébként agresszív anyagokból keletkezett, vagy a vízzel azzá váló porok jelentenek környezeti veszélyforrást.

Egyes, leggyakoribb szennyező anyagok mérgező és halálos koncentrációit a **6. táblázat** foglaltuk össze.

**6. táblázat. Leggyakoribb szennyező anyagok mérgező és halálos koncentrációit**

Anyag	Küszöbérték [mg/m <sup>3</sup> ]	Küszöbérték [mg/m <sup>3</sup> ]
Acetaldehid		20 mg/h; 1-2 h alatt
Aceton	1-100 ml konc. gáz	
Benzin		120 mg/liter, 5-10 min alatt
Benzol		65 mg/liter, 5-10 min alatt
Bróm		3,5 mg/liter
Hidrogén-cianid		40-80 mg/liter, azonnal
Hidrogén-szulfid		0,5-2,0 mg/liter, azonnal
Kén-dioxid		8 mg/liter, 5-10 min alatt
Klór		2,5 mg/liter, azonnal
Nitrózus gázok	0,2 – 0,5 mg/liter	1 mg/liter, 1 h alatt
Salétromsav	0,3 – 0,4 mg/liter	0,5-1 mg/liter, 1 h alatt
Szén-monoxid	0,01 %-os, 1-2 óra alatt	1 %-os azonnal
Triklór-etilén	30 mg/liter	

A légkörben lebegő élő szervezetek (baktériumok, vírusok, algák, spórák, pollen) neve aeroplankton. A természetes, szabad légkörben ezek közül az allergén pollenek okozzák a legtöbb gondot. Közismert képviselőjük a parlagfű.

A szilárd szennyeződések fő alkotói az égésből eredő pernye és korom, a talajfelszínről, cementiparból, kohászatból és számos más iparból származó por, amelyek összetétele igen változatos. Megkülönböztetünk toxikus és közömbös porokat. A por-határérték a közömbös porra vonatkozik, toxikus porokra szigorúbb előírások érvényesek. Toxikusnak minősülnek a biológiailag aktív mezőgazdasági szerek porai, mint a peszticidek, fungicidek, herbicidek. Toxikus por az ólom is, valamint a különféle rákkeltő vegyületek, elsősorban a 3,4 – benzpirén.

## 5. A LÉGSZENNYEZŐ ANYAGOK KÁROS HATÁSA

A káros hatást a légszennyező anyagok bizonyos mennyisége (dózisa) váltja ki. A szervezetbe jutó anyag mennyisége az expozíciótól függ: vagyis hogy az egyén milyen szennyezetségi (c a szennyező anyag koncentrációja) levegőben mennyi ideig (t az expozíciós idő) tartózkodott, tehát a hatás elvileg a  $c \cdot t$  szorzat értékétől függ.

Meg kell jegyezni, hogy azonos expozíciós időt adó, de más szennyezőktől adó-dó értékek nem tekinthetők mindig azonosnak. Nagyobb koncentráció olyan akut hatásokat válthat ki, amelyek kisebb szennyezetségnél hosszabb idő után sem jelentkeznek. A rövid ideig ható nagyobb koncentráció szelektál: az érzékenyebb vagy beteg lakosságot megtámadja, sőt elpusztítja. Ismétlődő szmogoknál pl. az első okoz mortalitás-növekedést, mert a következőknél már nincs érzékeny populáció. A krónikus levegőszennyezés viszont az ember egész életén, sőt generációkon át és a népesség minden tagjára folyamatosan fejti ki hatását. Ez a huzamos hatás megváltoztathatja az élettani folyamatokat, krónikus betegségeket hozhat létre, sőt genetikai károsodásokat is okozhat. Közismert, hogy a fejlődés-történet során nem a drasztikus hatások, föld-rengések, árvizek, más akut természeti katasztrófák idézték elő a maradandó, sorsdöntő változásokat az élővilágban, hanem pl. a néhány °C-os hőmérséklet-változás a Föld klímájában vagy a légköri oxigén, szén-dioxid mennyiségének viszonylag csekély, de tartós módosulásai. A humánbiológiai szempontok mellett figyelembe kell venni a haszonállatok és a növényzet, a természet és az anyagi eszközök védelmét is. A rendkívül sok légszennyező anyag közül hazánkban jelenleg mintegy 330 anyag megengedett maximális koncentrációját írja elő rendelet. A következőkben a gyakrabban előforduló légszennyezők káros hatásaival foglalkozunk.

### 5.1. Egészséget károsító hatás

A levegő tisztaságának nagy jelentősége van az ember egészségének megóvása szempontjából. A szervezet a levegőszennyeződés elhárítására energiát fordít, amely felesleges megterhelést jelent, csökken a szervezet ellenálló képessége. A szennyezett levegő gyengíti a szervezetet, betegségeket idézhet elő, a meglévőket súlyosbíthatja, késleltetheti a gyógyulásukat.

A városi légszennyeződés növeli a krónikus bronchitis (légcsőhurut) okozta mortalitást. Ha a városi levegőszennyeződést megszüntethetnénk, a tüdőrák okozta megbetegedést egytizedére, a krónikus bronchitis okozta halálozást mintegy felére tudnánk csökkenteni. A légúti daganatos megbetegedések száma a szennyezett levegőjű területeken magasabb az átlagosnál.



Az égéstermékek között ugyanis jelentős mennyiségben vannak jelen a különféle policiklusos-aromás szénhidrogének, amelyek rákkeltő hatásúak. A legjellemzőbb rákkeltő anyag a 3,4 - benzpirén.

A szennyező anyagok hatása a tüdőn keresztül öt területen jelentkezik:

1. a légutaknál, amelyek köhögési reflex megindulásával válaszolnak,
2. a bronchusoknál (tüdőhólyagocskák) véredényeinél, amelyek csökkenteni igyekeznek a bronchusok nyálkahártyáján át történő károsanyag abszorpciót,
3. a tüdő véredényeinél, amelyek az alveoláris (a tüdőt vérrel ellátó) kapillárisokból való abszorpció csökkentésével válaszolnak,
4. a szívnél és a nagy véredényeknél, amelyek a toxikus anyagok transzportjában vesznek részt,
5. a szervekbe, szövetekbe, sejtekbe eljutva, ahol mérgező hatásukat az anyag cseréhez kapcsolódva kifejtik.

A levegőszennyeződés élettani hatásai külső és belső tényezőktől függenek. Külső tényezők: az adott szennyező anyag koncentrációja, az anyag toxicitása, más szennyező anyagok károsodást erősítő vagy gyengítő hatása, az expozíció időtartama és periódusai, valamint környezeti tényezők, úgymint a páratartalom, hőmérséklet, stb. Belső tényezők: az exponált szervezet általános állapota és érzékenysége az illető anyaggal vagy anyagokkal szemben.

Ennek eredőjeképpen a következő hatások jöhetnek létre az egyén esetében: halál, akut megbetegedés, krónikus betegség, fontos élettani folyamatok megváltozásai (pl. tüdőventilláció, oxigéntranszport), káros hatások (pl. szemirritáció) és kellemetlen hatások (pl. bűz). Lehetségesek generatív, genetikai és populáció-genetikai hatások is, de ezek humán vonatkozásban nincsenek bizonyítva. Lényeges megkülönböztetnünk a rövid időn belül (short-term) hatásokat és a huzamos expozíció során, illetve hosszabb idő után bekövetkező (long-term) hatásokat. A short-term hatásokra vonatkozóan viszonylag sok adattal rendelkezünk. A long-term hatások jórészt felderítetlenek, és valószínűleg sokoldalúbbak, mint amennyit jelenlegi ismereteink alapján bizonyítani tudunk.

Jellegzetes és régóta ismert károsító hatást gyakorol az emberi szervezetre a szén-monoxid. A koncentrációtól és az időtartamtól függően a vér oxihemoglobinjából az oxigént karboxi-hemoglobin képződése közben kiszorítja, ezáltal csökkenti a testszövetekhez szállított oxigén mennyiségét. Végső fokon fulladást okoz. Veszélyességét fokozza, hogy szintelen, szagtalan. 6 órai,  $0,23 \text{ mg/dm}^3$  CO-dal történő enyhe mérgezés esetén a vér karboxi-hemoglobin tartalma

16 – 20 %, 45 %-nál munkaképtelenség, 60 – 80 % esetén néhány órán belül halál következik be. Nagyvárosok közlekedési csomópontjaiban a szén-monoxid a károsító szintet általában eléri, ami az öntudat tompulásában, a reakcióképesség csökkenésben nyilvánul meg.

A kén-dioxid nagyobb koncentrációkban a szem és a felső légutak nyálkahártyáját izgatja, kisebb koncentrációkban az alsó légutak csillószőreit és nyálkahártyáját károsítja, így a védekező képesség csökkenésével gyulladós betegségek kialakulását teszi lehetővé. Zavarja a fehérje anyagcserét, izgatja az idegvégződéseket. Akut mérgezés esetén a halálos kimenetel ritka.

Mivel a nitrogén-monoxid a levegőben gyorsan nitrogén-dioxiddá alakul, káros élettani hatását így fejt ki: vízzel a tüdőben sav keletkezik, és a tüdő szövetének el-roncsolásán kívül a vérerek erős tágulását is előidézi. A szem és a légutak nyálkahártyáját is erősen izgatja. A hatás súlyossága a nitrogén-dioxid arányától függ, ezért az  $\text{NO}_x$ -en belül annak értékét külön mérik, illetve a rendeletek előírják.

A gépkocsik kipufogógázaiból és a petrokkémiai iparból származó szénhidrogének között olyanok is vannak, amelyeknek állatkísérletek és statisztikai felmérések alapján karcinogén (rákkeltő) hatást tulajdonítanak. Legjelentősebb képviselőjük a 3,4-benzpirén.

A klór erélyes oxidáló, roncsoló hatású. A hidrogén-fluorid izgatja a légutakat, az égéshez hasonló sebeket okoz. Az ammónia  $0,5 \text{ mg/dm}^3$ -nél nagyobb koncentrációban könnyezést, szemfájdalmat és gyulladást kelt,  $0,7 \text{ mg/dm}^3$  felett súlyos légzési és keringési zavarok lépnek fel, szívgyengeséget és halált okozhat.

A lebegő szilárd részecskék (korom, por, pernye) az egészségre szintén káros hatást gyakorolhatnak. A szervezetbe való behatolás szempontjából a  $0,25 - 10 \text{ }\mu\text{m}$  közötti szemcseméretű részecskék a legveszélyesebbek, mert a  $10 \text{ }\mu\text{m}$ -nél nagyobb részecskéket belélegezve, azok csak a felső légutakig jutnak, a  $0,25 \text{ }\mu\text{m}$ -nél kisebbeket pedig a tüdő nem tartja vissza, így az elhasznált levegővel újra a szabadba kerülnek. A nem kimondottan mérgező tulajdonságú porok káros hatása esetleg csak évek elteltével mutatható ki (pl. szilikózis és portüdő). Ha gáznemű és szilárd szennyezők egyidejűleg vannak jelen, az egészségkárosító hatás méreteke nagyobb.

## 5.2. A légszennyezettség hatása a növény és állatvilágra

A levegő elszennyeződésének története évtizedeinkben új szakaszába lépett. A szennyezett levegő most már nem csak ipari és lakóterületeket, hanem mezőgazdasági és természeti területeket is érint, az emberre gyakorolt hatás mellett egyre inkább jelentkeznek a növényekre és az állatokra gyakorolt káros hatások. A növények sokszor jóval érzékenyebbek a szennyeződéssel szemben, mint az állatok vagy az ember. A növényeket, köztük a zuzmókat ezért indikátorként is felhasználják.

Szilárd halmazállapotú szennyeződések főleg azzal fejtenek ki káros hatást a növényekre, hogy a levélre ülepedve csökkentik a növény hasznos felületét és ezzel az asszimilációt. A kolloidális porok, pl. a cementpor eltömítik a növény légcseré nyílásait. Toxikus porok az anyagcsere folyamatokba kapcsolódva fejtik ki káros hatásukat. A szennyező gázok a levél légcseré nyílásain át bejutnak a szövetek közötti térbe. A sejtek felületén megkötődhetnek, reagálhatnak a vízzel vagy beléphetnek az anyagcserébe. A kén-dioxid például a vízzel kénessavvá, kénsavvá alakul, és így roncsoló hatást fejt ki. Másrészt közvetlenül a klorofillal is reakcióba léphet, és bénítja a fotoszintézist. Nagyobb mérvű károsodás szemmel látható elváltozással jár. A levél szövege helyenként összezsugorodik, ráncosodik, elfonnyad. A klorofill és a színyanyagok pusztulása következtében színváltozás észlelhető: sárga, barna, vörös foltok jelennek meg a levélen. Hasonló figyelhető meg a virágszirmokon is. Igen jellegzetes a marginális nekrozis, a levelek, szirmok széleinek elhalása. Hasonló jelenségek természetesen más okok miatt is előfordulhatnak: szárazság, rovarkár, bakteriális fertőzés következtében. Mégis, az egyes károsodás-típusok jellemzőek bizonyos szennyező anyagokra.

Természetesen nem marad hatástalan a növényekre a füstköd, a szmog sem. A szmogok két típusa, az oxidáló és a redukáló jellegzetes nyomokat hagy a növényen. Nem közömbös, hogy milyen életszakaszában éri a növényt a károsító hatás. Fiatal, osztódó szövetek, bár érzékenyebbek, de jól regenerálódnak, ha a hatás nem hosszantartó. Az idős szövetekben bekövetkezett károsodás maradandó. A különböző növény-fajok sem egyformán érzékenyek a szennyeződéssel szemben. Kén-dioxidra nézve pl. a lóhere, árpa, gyapot, búza és alma sorrendben a legérzékenyebbek. Más fajok viszont rezisztensek lehetnek. Ilyenek kén-dioxid esetében a burgonya, hagyma, zab.

Főleg a termesztett növények tulajdonságait vizsgálják ebben a viszonylatban, tekintettel a gazdasági kihatásokra. A természetes növényzetről még igen kevés adattal rendelkezünk. Tudjuk azonban, hogy pl. a zuzmók, amelyeket a legigénytelenebb növényeknek tartanak, igen érzékenyen reagálnak. Szennyezett levegőjű városok környékén zuzmómentes övezetek

húzódnak. Hosszan tartó vagy rendszeresen ismétlődő behatás eredményeképpen a növényzet visszamarad a fejlődésében, kevesebb és kisebb levele nő. Kisebb lesz a termete, kevesebb a virága, termése. A különböző porok a felhasználandó termés vagy levél felületére tapadnak, csökkentik értéküket. Vegyi gyárak bűzös termékei adszorbeálódva élvezhetetlenné tehetik a termést. A kárt szenvedett növények életképessége és szaporodó képessége csökken. Krónikus behatás esetén a természetes populációban megcsappan az egyed- és fajsám. A rezisztens, többnyire értéktelen fajok elszaporodnak, megváltozik a populáció és a cönózis összetétele.

A növényzet ugyanakkor visszahat a levegőszennyeződés alakulására: szűri, tisztítja a levegőt. Ismeretes és bizonyított a védőerdősávok, erdők kedvező hatása a levegőszennyeződés terjedésének meggátlásában.

Az állatvilágban a levegőszennyező anyagok elsősorban a légutakon át jutnak a szervezetbe, és fejtik ki hatásukat. Súlyosbító körülmény, hogy amíg az állatok az ivó-víz és a táplálék minőségét bizonyos mértékig megválogathatják, a levegő megválogatására nincs lehetőségük, mert azt csak igen rövid ideig tudják nélkülözni. A szennyezett levegőnek a természetben élő állatvilágra gyakorolt hatásáról keveset tudunk. Ismeretes, hogy a szennyezett levegőjú városból számos madárfaj elvándorol. A mezőgazdaság kemizálása során egyre nagyobb mennyiségben használt rovarirtó szerek, szerves foszfát-észterek, klórozott szénhidrogének szintén jelentkezhetnek levegő-szennyező anyagként. Túlzott mértékű vagy szabálytalan, szakszerűtlen használatuk ugyanolyan méretű katasztrófákat okozott levegőn keresztül is, mint a közismert hal-pusztulások egyes tavak, folyók elszennyeződése során. A kártékony rovarok helyett gyakran esnek áldozatul nagy tömegekben erdők-mezők ízeltlábúi, amelynek következménye a biológiai egyensúly felborulása lehet. Előfordult madarak és kisebb emlősök tömeges pusztulása is. Az ember ízeltlábú háziállatainak, a méheknek sorait is megtizedelik a mezőgazdaságban használt vegyszerek.

A különféle levegőszennyező anyagok komoly károkat okozhatnak a mezőgazdaságban. Hazánkban is előfordult, hogy szőlőtermesztő vidékek bora vált élvezhetetlen-né vegyipari bűzös kibocsátások következtében vagy gyümölcsösök mentek tönkre cement- és kén-dioxid szennyezés miatt. Az ilyen drámai hatások mellett jelentős, bár kevésbé feltűnő az a folyamatosan jelentkező kártétel, amely termés-csökkenésben jelentkezik. Irodalmi adatok szerint 50 %-os termés-csökkenést is megfigyeltek.

Gondolnunk kell azonban olyan károokra is, amelyek pénzben aligha fejezhető ki. Egyre szűkebbek azok a területek, amelyek országaink, földrészünk eredeti szépségeit, természeti tájait, állat- és növényvilágát őrzik. Ezeket a területeket rendeletekkel és kerítésekkel meg lehet védeni a romboló hatások egy részétől, de nem lehet megóvni a levegőszennyezéstől.

### **5.3. A környezet savasodása**

Az utóbbi évtizedekben vált ismertté az a jelenség, amelyet a környezet fokozódó elsavasodásának, népszerűen savas esőnek nevezünk. A jelenség az északi féltekén kontinentális méreteket öltött. Egyes égéstermékek ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ) a légköri nedvességgel savakat alkotnak, és csapadék vagy száraz kihullás formájában a földfelszínre jutnak. A száraz és a nedves ülepedés mennyisége hasonló nagyságrendű. Tavak, termőtalajok, a talajvíz vonatkozásában jól mérhető egyes területeken a környezet savasodásának mértéke. A talajok különböző fajtái különböző mértékben közömbösítik a savas kihullást. A pH-változás általában nem közvetlenül károsítja a növényzetet, hanem a talajban oldott anyagok (fémek) oldhatóságának növelésével, amelyek így a növénybe jutva felszívódhatnak és mérgezést okozhatnak. Másrészt a talaj mikroorganizmusainak pusztulása a következmény. Ennek egyik hatása egyes fafajok pusztulása erdeinkben.

### **5.4. A levegőszennyezettség hatása a művi környezetre**

Nem marad hatástalan a levegőszennyeződés az anyagi javakra sem. A műszaki károk elsősorban a fémek fokozott korróziójából, építőanyagok mállásából erednek. A savképző szennyeződések ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ , nitrátok, nitritek, szerves anyagok) a légkör víztartalmával kapcsolódva savas kémhatású oldatokat alkotnak, és ezek a fémek felületén elektrokémiai folyamatokat indítanak meg. A folyadék-cseppekben lokális elemek alakulnak ki, amelyekben az anód-folyamat a fém oldódása, rozsdásodása lesz. Az acél korróziója a szennyezett városi, ipari levegőben ötször gyorsabb, mint tiszta helyeken. Vas esetében ez a szám negyvenszeres is lehet. Savas bevonatok az építő-anyag kalcium-karbonátjával reakcióba lépnek, oldják azt. Legfeltűnőbbek a kőszobronkon megjelenő károk. Sok évszázadot jól átvészelt művészeti alkotások napjainkban néhány év alatt a felismerhetetlenség határáig tönkremennek szennyezett levegőjú területeken.

Műszaki károk keletkeznek: gépekben, berendezésekben, gépjárművekben, szer-számokban, ipari építményekben, ipari és lakóépületekben, középületekben és azok felszereléseiben, un. vonalas létesítményekben, mint utak és tartozékaik, hidak, távvezetékek.

Egyéb műszaki károk még a vezetékek átégése, a világítási többlet-fogyasztás, fokozott tisztítási szükséglet, a műanyagok és a gumi fokozott romlása, a technológiai akadályok (pl. ha tiszta levegő a technológiához csak szűréssel nyerhető). A felsoroltakat nevezzük közvetett

károknak. A közvetett károk: az iparnak a levegőbe jutó veszteségei (pl. cementpor), amelyek egyúttal a szennyeződés okozói is, de visszanyerésük esetén felhasználhatóak lennének. A veszteség elérheti a felhasznált nyersanyag 0,5-6 %-át, és az ebből eredő kár esetenként nagyobb is lehet, mint a közvetlen kártétel. A levegőszennyeződéssel kapcsolatos ellenőrzés, mérés, kutatás költségei is ide sorolhatók.

## 6. A LÉGSZENNYEZŐ ANYAGOK KIBOCSÁTÁSÁNAK SZABÁLYOZÁSA

A környezet védelmének szabályairól szóló 1995. évi LIII. törvény (a környezetvédelmi törvény) alapelveként az alábbiakat mondja ki:

„A környezethasználatot úgy kell megszervezni, hogy a legkisebb mértékű környezetterhelést és igénybevételt idézze elő, megelőzze a környezetszennyezést, kizárja a környezetkárosítást.”

A megelőzés érdekében a környezethasználat során a leghatékonyabb megoldást kell alkalmazni – elérhető (rendelkezésre álló) legjobb technikák (BAT).

**BAT** – a korszerű technikai színvonalnak megfelelő legjobb rendelkezésre álló technika, amelyet a kibocsátások megelőzése és – amennyiben a megelőzés nem valósítható meg – csökkentése, valamint a környezet egészére gyakorolt hatás mérséklése érdekében alkalmaznak, és amely a kibocsátási határértékek megállapításának alapjául szolgál.

### 6.1. Kibocsátási határértékek

A kibocsátási határértékeket a mindenkor érvényben lévő, a levegőtisztaság-védelemmel foglalkozó jogszabályok tartalmazzák. Jegyzetünk összeállításakor a 14/2001 (II. 14.) KöM-EüM-FVM-KHVM számú, a helyhez kötött pontforrások kibocsátási határértékei tárgyú együttes miniszteri rendelet foglalja magába a jelenleg érvényes határérték-féleségeket, valamint a kibocsátható káros anyagok mennyiségeit a legkülönbözőbb termékekre vonatkozóan. A hivatkozott rendelet nem foglalkozik az illékony szerves anyagok kibocsátási határértékeivel, azt a 10/2001. (VI. 2.) KöM-EüM-FVM-KHVM rendelet szabályozza.

#### 6.1.1. Technológiai kibocsátási határértékek

A technológiai kibocsátási határértékeket minden esetben a BAT figyelembe vételével kell megállapítani, ezért értékük a technikai, gazdasági és társadalmi fejlődéssel időben változik.

Két fő csoportra oszthatók:

- általános technológiai kibocsátási határértékek,
- eljárás-specifikus technológiai kibocsátási határértékek.

Értékük függ:

- a légszennyező anyag tömegáramától,
- a légszennyező anyag minőségétől, veszélyességétől,
- a legjobb rendelkezésre álló technika szintjétől.

Különböző mértékegységekben adhatók meg:

- koncentráció:  $\text{mg/m}^3$  füstgáz, ppm, térfogatszázalék
- termékspecifikus érték:  $\text{g/GJ}$ ,  $\text{g/kWh}$ ,  $\text{kg/t}$  termék,  $\text{g/m}^2$  termék

A felhasznált nyersanyag mennyiségére vonatkoztatott érték: w%

### ***Általános technológiai kibocsátási határértékek***

Az általános technológiai kibocsátási határértékeket szennyező anyag csoportokra állapítják meg a szennyező anyag fizikai, kémiai tulajdonságai és a környezetre gyakorolt hatása alapján.

Külön határérték rendszer vonatkozik az alábbi anyagszámokra:

- szilárd szerves anyagok,
- gáz és gőznemű szerves anyagok,
- szerves anyagok,
- rákkeltő anyagok.

Az általános technológiai kibocsátási határértékek érvényesek minden olyan esetben, amikor az egyes technológiákra vonatkozó eljárás specifikus technológiai kibocsátási határértékek, vagy az adott pontforrásra egyedi kibocsátási határértékek nincsenek meghatározva.

### ***Eljárás specifikus technológiai kibocsátási határértékek***

Eljárás specifikus technológiai határértékeket állapítanak meg egy sor olyan technológiára, amelyek fejlettségi szintje bizonyos szennyező anyagok tekintetében szigorúbb, vagy enyhébb követelmények betartását teszi lehetővé. Az eljárás specifikus technológiai határértékek – a részletesen szabályozott technológiák kivételével – csak az adott eljárás meghatározott anyagaina vonatkoznak, a technológiákból kikerülő egyéb szennyező anyagokra az általános technológiai határértékeket kell alkalmazni.

Részletesen szabályozott technológiák pl.:

- tüzelési eljárások,



- hulladékok égetése,
- motorbenzinek tárolása és szállítása,
- gépjárművek égéstermékeinek kibocsátása,
- illékony szerves vegyületek felhasználása.

### **6.1.2. Össztömegű kibocsátási határértékek**

Az össztömegű kibocsátási határértékek mindig egy meghatározott területre vagy termelési ágra, szennyezőforrás-csoportra megállapított, kibocsátható szennyezőanyag összmennyiségek.

Megállapításának célja, hogy egy adott területen – esetleg egy egész ország területén – egy meghatározott forrás-csoport kibocsátásának fokozatos tervszerű mérséklését lehessen elérni. Kiemelt alkalmazási területe a határokon áterjedő légszennyezések mérséklésére szolgáló nemzetközi egyezmények tervszerű teljesítésének biztosítása.

## **6.2. Az emisszió meghatározása**

Az emisszió – más néven kibocsátás – meghatározása történhet méréssel illetve műszaki számítással.

A számítással történő meghatározás alapul veszi az anyagmérleget, a fajlagos és tapasztalati adatokat. Ez abban az esetben használható, ha nincs meg az a műszaki lehetőség, amellyel az emisszió meghatározás megoldható lenne.

Gyakoribb és ma már egyre teljesebb körű az emisszió méréssel történő meghatározása.

Alapvető emisszió-mérések:

- Gázok (gőzök) emissziójának mérése
- Szilárd anyagok emissziójának mérése

### 6.2.1. Az emisszió meghatározása műszaki számításokkal

#### 6.2.1.1. Az emisszió meghatározása anyagmérleg alapján

Anyagmérleg segítségével nagyságrendileg helyes, tájékoztató adatokat nyerhetünk a szennyező technológiák kibocsátott anyagairól, azok mennyiségéről. Egy-egy gyártási folyamat anyagmérlegét a különböző folyamatok egyenlegének vizsgálatával, a kölcsönhatások és átalakulások feltárásával komplex módon kell kezelni.

Anyagmérleg alapján jó közelítéssel határozhatók meg például azon festési eljárások, amelyeknél az adott festékek, lakkok felhordását követően kémiai reakciók nem játszódnak le. Hagyományos festékek alkalmazása esetén a festékek, lakkok oldószer-tartalma, valamint a hígítók – amelyek általában szintén szerves anyagok – vagy felhordás, vagy száradás során távoznak a környezetbe.

Az emisszió az alábbi összefüggés segítségével határozható meg:

$$E_0 = \frac{M \frac{x}{100} + m}{t} \quad [kg/h]$$

ahol:  $E_0$  – az oldószer emisszió,  
 $M$  – az éves festék-felhasználás [kg/év],  
 $x$  – a festék oldószer-tartalma [w %],  
 $m$  – az éves hígító-felhasználás [kg/év],  
 $t$  – az éves üzemórák száma [h/év].

A számításokat természetesen minden egyes festékfajtára külön-külön kell kiszámítani.

Jó eredményt adnak az illékony savakkal (sósav, salétromsav) történő pácolási és maratási műveleteknél, vagy szerves illékony folyadékokkal történő zsírtalanításoknál végezhető számítások is.

#### 6.2.1.2. Emissziószámítás fajlagos és tapasztalati adatok alapján

Az emisszió meghatározásának – helyesebben előre becslésének – ezt a módszerét elsősorban akkor lehet alkalmazni, ha az alkalmazni (beépíteni) kívánt eszközről, berendezésről, technológiáról már rendelkezünk tapasztalati vagy mérésekkel igazolt adatokkal, illetve azok a gyártótól, esetleg más felhasználóktól hozzáférhetőek. Főként tüzelő és hőtermelő berendezéseknél, valamint gépjárműveknél gyakori a módszer alkalmazása.

## **6.2.2. Az emisszió méréssel történő meghatározása**

### 6.2.2.1. A poremisszió mérése

A szilárd halmazállapotú tüzelőanyagok elégetésekor szálló pernye keletkezik, amely a tüzelőanyag éghetetlen, valamint el nem égett összetevőiből áll. A poremisszió jelentős részét az el nem égett apró szemcsézetű szálló kokszt és a korom teszi ki.

A szálló pernye fajlagos mennyisége és szemcsefinomsága a rostélyszerkezet fajtájától, az alkalmazott huzat mértékétől, a tüztér terhelésétől, a hőhordozó fajtájától, valamint a tüzelési rendszertől függ.

A szilárd halmazállapotú emisszió kétféle módon mérhető: folyamatosan vagy szakaszosan. Folyamatosan működő regisztráló műszerek rendszerint közvetett (villamos, optikai, izotópos) úton mutatják ki a gáz porkoncentrációját.

Szakaszos mérés esetén a leszívott rész-gázáram portartalmát szűrőpapír, membránszűrő vagy ciklon választja le. A mintavételi helyre vonatkozó követelményeket a gázmérésnél írjuk le. A gyakorlatban használt gravimetriás mintavevők működésének lényege az, hogy a zárt csatornában áramló főgázból gázmintát szívnak le, és ebből választják le a gáz portartalmát. A leválasztott anyagot tömeg és összetétel szerint analizálják.

#### ***Ciklonos leválasztók***

A ciklontesttel szerelt szondaszár porterhelés során zárt csatornában van elhelyezve, és az izokinetikus sebességgel leszívott rész-gázáram portartalmát a csatornában tartózkodó gáz hőmérsékletén választja le. A gáz effektív fajlagos porkoncentrációját a ciklonszondában felfogott pormennyiség és az átszívott gázmennyiség hányadosa adja meg.

#### ***Impaktoros leválasztók***

A mérőfejbe belépő gáz portartalma aerodinamikai lépcsőkön keresztül a por szemcseméretétől függően frakciószerűen leválik. Így a különböző fokozatoknál kilépő és megmaradó (összegyűlő) pormennyiség kiértékelhető. Ismertek a 2 – 12 fokozatú impaktoros mintavevők, amelyek 0,4 – 12 µm tartományban választanak le. Szokás nagy porterhelésnél előimpaktort beépíteni.

#### ***Membránszűrős leválasztók***

A vett gázmintából belső vagy külsőtéri leválasztással a szilárd szennyezőt a célnak megfelelő membránszűrőn választjuk le.

#### 6.2.2.2. A gázemisszió mérése

##### ***A) Folyamatos mérési módszerrel***

Folyamatos mérés esetén a gázminta elvétele és az egyes komponensek koncentrációjának meghatározása egyidejűleg és folyamatosan történik. Időben állandó emisszió esetén a mérések időtartama rövidebb. Időben változó emisszió esetén a súlyozott átlag segítségével kell az átlagos emissziót meghatározni.

Mintavevő szondaként minden olyan cső alkalmazható, amelynek anyaga hő- és korrózióálló, adszorpciót, kemisorpciót a mérendő komponensekkel nem hoz létre. A gázvezetékek anyagára vonatkozó követelmények a hőállóság kivételével az előzőekkel azonosak.

A mintavevő szondát úgy kell elhelyezni a mérősíkban, hogy a szükséges paraméterek mérését egyidejűleg lehetővé tegye és egyúttal a mérés végrehajtását ne zavarja.

A mérési folyamatban folyamatosan mérhető az oxigén, a kén-dioxid, szén-monoxid, nitrogén-oxidok, a sósav, a klór, az ammónia és a szerves anyagok össz-koncentrációja. A többi gáznemű légszennyező anyag mérése kvázi-folyamatos vagy szakaszos.

A folyamatos mérési módszerekre kidolgozott szabványok nem mérőműszereket, hanem mérési elveket szabványosítanak.

##### ***B) Szakaszos mérési módszerekkel***

A gáznemű légszennyező anyagok két nagy csoportra oszthatók:

szervetlen légszennyező anyagok

szerves légszennyező anyagok

A szervetlen légszennyezők vizsgálatánál az anyagok adszorpcióval választhatók le, míg a szerves légszennyezőket adszorpció segítségével lehet megkötni.

A mintavevő eszközökkel szembeni követelményeket a gázminta illetve a hordozógáz állapotjelzői és a mérendő komponens kémiai tulajdonságai határozzák meg.

Adszorpció esetén a vizsgált komponens megkötése mindig valamilyen gázmosóba helyezett oldatban történik, míg szerves anyagok gőzei esetén megfelelő módon előkészített (többnyire aktivált) aktív szénen, mint adszorberen történik meg az elnyelődés. Ismeretes még a vizsgált komponensek kifagyasztása is.

A gázmintának a mérőláncon keresztül történő átszívási sebességét, valamint a gázminta térfogat-áramát a vizsgálandó komponens kémiai tulajdonságai, valamint várható koncentrációja határozza meg.

A mintavétel időtartama általában 10 – 30 perc közötti érték, de igen alacsony légtéri koncentrációk esetén 8 – 24 óra is lehet.

A mintavételek számát a technológia illetve az emisszió jellege, időbeni változása határozza meg annak érdekében, hogy a vizsgálatokkal kapott átlagérték lehetőség szerint helyesen reprezentálja az adott technológia vagy berendezés kibocsátását a mérések ideje alatti üzemvitelre vonatkozóan.

Nagyon kis koncentrációjú, de kellemetlen hatású bűzös anyagok mérésére hazánkban a szubjektív érzékelésen alapuló ún. olfaktometriás mérési módszer terjedt el. Ennél a módszernél a bűzös levegőt gázzal (O<sub>2</sub>) kell hígítani a szagküszöbig. Az érzékelést minimálisan 8 olyan személy végzi, akik nem érzéketlenek a szagokra. Az olfaktometriánál szagegységekben adják meg a kellemetlen szagok intenzitását.

A gázemisszió-mérések lefolytatásának menete:

- a technológia vagy létesítmény megismerése, adatgyűjtés, helyszíni szemle,
- a mérőhely kijelölése, mérőállás kialakítása,
- a mérési terv elkészítése,
- a mérőhely ellenőrzése,
- a méréshez szükséges eszközök és egyéb feltételek előkészítése illetve biztosítása,
- a mérőeszközök kihelyezése a mérőhelyre, mérőkörök összeállítása,
- mérés,
- a mérési eredmények kiértékelése.

Mindenfajta emissziómérésnél alapvető feladat a mérés ideje alatt az üzemvitel illetve a termelés figyelemmel kísérése, valamint az üzemviteli adatok pontos és alapos rögzítése és mellérendelése a mérési eredményekhez.

### ***1. A mérés előkészítése***

A gáz-mintavételi hely kiválasztása

A gázmintát a technológiai berendezés olyan helyéről kell venni, ahol a vizsgálandó gáz koncentráció a technológiai folyamat adott részének működését valóban jellemzi, és az üzemmenet változását gyorsan követi.

A gáz-mintavételi szerelvény kezelési szempontból jól hozzáférhető legyen.

Fontos irányelv a gázelemző felállítási helyére, hogy a mérőberendezést a mutatóbeli holtidő csökkentése miatt a gáz-mintavételi helyhez a lehető legközelebb kell felállítani.

Az elemzőt átlagos, és lehetőleg állandó szobahőmérsékletű, rázkódás-mentes helyiségben, vagy a szabadban lévő, a hőmérsékleti feltételeknek megfelelő szabadtéri épületben (esetleg szekrényben) kell elhelyezni.

A felállítási hely hőmérséklete a gázelemző megengedett környezeti hőmérsékletének értéktartományán belül kell legyen.

Az analízátort a sugárzó hőtől is óvni kell.

A jó mérési eredmény érdekében a gázt elő kell készíteni (porszűrés, nedvesség leválasztás).

#### *Porszűrés*

A gázelemző műszereknél igen fontos, hogy a mérendő gáz porszennyeződéstől mentes legyen. Ennek érdekében több lépcsős szűrést célszerű alkalmazni.

Szűrés a mintavételi csatornában, amelynek durva szűrőanyaga keramikus henger.

Szűrés a gázelemző bementén, hogy a gázvezeték falán lerakódott por és az áramló finom por nem károsítsa az elemzőt. Ez lehet papír vagy membrán szűrő. Fontos, hogy a beépített szűrők áramlási ellenállása kicsi legyen.

#### *Nedvesség leválasztás*

A mérendő gázt több szempontból célszerű a nedvességtől megtisztítani illetve a nedvességet leválasztani. A nedvesség a porral összecementeződik, meggátolva a gázáramlást. Egyes gázelemzők működését zavarja, a mérést pontatlanná teszi (pl. infravörös elven működő elemzők).

Nedvesség leválasztásra a mérési rendszerben többféle módszer használatos, ezt mindig a mérendő komponens kémiai tulajdonságai alapján lehet eldönteni. Gázok vizsgálata esetén leggyakoribb a kifagyasztásos módszer (gázhűtő). A gázhűtők általában villamos üzemelésűek, + 2 °C –ra szabályozhatók. Ezen a hőmérsékleten a gáz gyakorlatilag száraznak tekinthető.

A kiváló nedvesség kondenzátum-edényben felfogható, és abból szükség szerint további analitikai vizsgálatok végezhetők.

#### *Zavaró komponensek kiszűrése*

A technológia ismeretében adott mérendő komponenshez hozzárendelhető a megfelelő gázelemző. a mérési elvet zavaró komponenst szűréssel, semlegesítéssel tudjuk eltávolítani.

#### *A mintagáz szállítása*

A gáz szállítására többnyire membrán szivattyút célszerű használni akár a mintavevő szonda után elhelyezve (nyomott üzem), akár a gázelemző után elhelyezve (szívott üzemű rendszer). A leszívott gázmennyiség ismerete fontos a gázelemzők beállításához. A mintavevő rendszer részét képezi a mennyiségmérő illetve –jelző egység. ez lehet gázóra vagy rotaméter.

## **2. Kiegészítő mérések és eszközök**

A gázemisszió mérésnél a gázalkotók mérésén kívül az össz-kibocsátás megismeréséhez különböző kiegészítő méréseket szükséges elvégezni

#### *A) Hőmérsékletmérés*

A méréshez 0 – 1200 0C tartományban mérő készüléket célszerű alkalmazni, amely különböző benyúlási hosszú érzékelővel rendelkezik.

Megengedett hiba: ~ 1 %.

#### *B) Gázmennyiség-mérés*

A szennyező anyagok emissziója csak a mérés ideje alatt átáramlott gáztérfogat ismeretében lehetséges.

A mennyiség-méréshez használható:

- lebegőtestes áramlásmérő (rotaméter),
- nyomáskülönbség-mérés alapján működő mérő-perem, mérő-torok vagy Venturi-cső,
- térfogat-összegző műszerek (pl. gázóra).

#### *C) Térfogatáram mérése*

A mérést szabvány szerint Prandtl-csőves dinamikus nyomás-méréssel kell elvégezni a teljes mérési keresztmetszetben kijelölt pontokon. A meghatározáshoz alapvető feltétel a hordozógáz hőmérsékletének ismerete.

#### *D) Gázelőkészítő egység*

A gázelőkészítő egység a mérendő gáz tisztítását végzi főleg a por és vízgőz tartalmától. A gázelemzés nélkülözhetetlen része.

#### *E) Regisztráló és adatgyűjtő egység*

A mért értékek rögzítése történhet vonalírón, pontírón és adatgyűjtő készülékkel. Lassú változású folyamatokhoz gazdaságosabb a pontíró regisztráló. A gyors változásokon átmenő folyamatokat vonalíróval, ezen belül is a nagyobb pontosságot, megbízhatóságot biztosító kompenzográfal célszerű jegyezni. A számítástechnika terjedésével a mérési folyamatok célszerű adatfeldolgozásával egyre több mérési folyamathoz használható egy vagy többcsatornás adatgyűjtő.

### **6.3. Az immisszió mérése**

Az immisszió a levegőtisztaság-védelmi intézkedések eredménye: határértékek betartása minden levegőtisztaság-védelmi intézkedés végső célja.

Az immisszió kialakulására számos tényező hat, amelyek állandóan változnak. Ezért egy terület levegőszennyeződéséről nem kaphatunk néhány méréssel megfelelő képet. Általában több éven át végzett rendszeres ellenőrzést tartunk mértékadónak. A Központi Légekörfizikai Intézet számításai szerint minimálisan 26 adat szükséges ahhoz, hogy az évi átlagértéket elfogadható közelítéssel megadhassuk. Ezeket a méréseket az év során egyenletesen elosztva kell végezni, egy-egy teljes napon át (24 órás átlag). Természetesen ilyen kis számú adatból részeredményeket kiragadni (például havi átlagot számítani, időjárás összefüggésekre következtetni) nem szabad.

A több szempontból kielégítő mérési eredményhez 24 órás időtartamú, naponkénti, kézi, vagy automatikus váltással történő átlagmintavétellel juthatunk. A gyakorlatban egy éven át legalább hetenként egyszer végeznek méréseket. Ügyelni kell arra, hogy adott mérőpontról a minták a nap különböző óráiból származzanak. A szennyeződés időbeni megoszlásának követésére legalkalmasabbak a folyamatosan működő regisztráló műszerek.



Az immisszió ellenőrző hálózatok két fő típusát különböztetjük meg. Az egyik az ún. air monitorok (regisztráló készülékek) alkalmazásán alapul. A mérőállomás folyamatosan működik, adataikat telefonvonalon vagy URH-n egy központba továbbítják, ahol a terület levegőszennyeződési állapota a mérésekkel egyidejűleg ellenőrizhető. Ez a rendszer azonnali beavatkozást tesz lehetővé veszélyhelyzet esetén: például elrendelhetik a füstköd intézkedési terv (szmog-riadó) alkalmazását. Ez egyrészt az erősen szennyező üzemek (például erőművek) teljesítményének csökkentését vagy időszakos leállítását teszik lehetővé, másrészt a közlekedés korlátozását (például belvárosokban) rendelhetik el. A füstköd intézkedési terv három fokozatú:

- készültség, amelyről csak az érintett szervezetek és üzemek értesülnek
- az 1. fokozat az üzemeltetés és a közlekedés kisebb korlátozásával jár, míg
- a 2. fokozat az erősen szennyezett légállapot huzamos fennmaradása esetén szigorúbb intézkedéseket tartalmaz.

A másik típus a rendszeres szakaszos (24 órás vagy 30 perces) mintavételt alkalmazza. A mérőhelyek lehetnek telepítettek, ezen belül automatikusak, vagy kézi vezérlésűek, és lehetnek olyanok, amelyeket időszakonként műszerrel, mérőkocsival felkeresnek. Az ilyen hálózat létesítése kevésbé költséges, így több mérőhely jelölhető ki. A szolgáltatott információk (különösen a 24 órás mérések esetében) a legfontosabb igényeket kielégítik. Az adatok értékelése és a beavatkozás általában egy hónap, vagy egy év után válik lehetővé.

A mérőpontok kijelölésének szempontjai a vizsgálat céljától függenek, azt azonban mindig reprezentatív helyen kell kitűzni. A forgalmas útkereszteződésekben a talajszinttől másfél méter magasságban vett minták reprezentatívak abban az esetben, ha az ott dolgozó emberek terhelését kívánjuk felderíteni. Ugyanezek a mérések viszont egyáltalán nem reprezentatívak az illető városrész egészére vonatkozóan.

A háttérszennyeződés mérésére a nagy városoktól 100 km távolságban, forgalmas földi és légi útvonaltól nem érintett helyen kerülhet sor, ahol a környéken semminémű szennyező forrás nincs. Az ilyen mérőállomás követelményeit a Meteorológiai Világszervezet szigorúan meghatározza.

Valamely település alapterhelését mérő állomással szemben a következők a követelmények: helyi szennyező források közvetlen hatásától mentes, kéményektől és forgalomtól viszonylag távoli (néhány száz méterre felvett), jól átszellőző helyen, például a városi parkban legyen elhelyezve. Az ilyen állomás adatai a város egy nagyobb, kb. négyzetkilométeres területére jellemzők.

A mérőpontok kijelölhetők minden különösebb rendszer nélkül, de ez számos hibaforrást rejt magában, és hatékonysága rosszabb, mint a szisztematikus állomáshálózaté. Adott szennyező forrás hatását célszerűen koncentrikus körökben, égtájanként telepített állomásokkal mérhetjük fel. A mérőhelyek ideális esetben a szélrózsa és a körök metszéspontjaira kerülnek. Egy település, vagy terület felmérésére sokhelyütt alkalmazzák a négyzetháló-rendszert, amelyben a mérőpontok a négyzetháló metszéspontjaira kerülnek. Az egyes négyzetek oldalhossza a terület nagyságától és a laksűrűségtől függ: 2 km-től 10 km-ig változik. Az ilyen rendszerek kizárják a szubjektív telepítési szempontokat, egyenletes állomás-eloszlást adnak, és lehetővé teszik a pontos helymeghatározást, számítógépes térinformatika alkalmazását. Hátránya, hogy sok mérőeszközt igényel, és a gyakorlatban ritkán lehet a mérőállomást pontosan a kijelölt helyre telepíteni.

A szabad levegő szennyeződésének vizsgálata során általában két munkafázist különböztetünk meg: a mintavételt és az analízist. Ez a két fázis az air monitorok esetében nem különül el, a nyílt csatornás rendszereknél pedig nincs mintavétel.

### **6.3.1. Mintavétel**

A mintavétel egyszerű esetben a levegőnek műanyag ballonba, üvegedénybe juttatása. Ülepedő porfrakció esetében nyitott edénybe, tapadó felületre hulló anyagot fogunk fel. Ezek az egyszerű módszerek csak ritkán alkalmazhatóak, mert a levegőben a szennyező anyagok igen kis koncentrációban vannak jelen, ezért a mintavételt dúsítással kapcsoljuk össze. Elnyelető edényben folyadékon keresztül nagy mennyiségű levegőt szívunk át. A folyadék többnyire speciális reagens, amely a mérendő szennyező anyagot megköti. A szilárd halmazállapotú szennyező anyagokat különféle szűrőkön foghatjuk fel a levegő átszívása útján. A szűrő befogadására fém vagy műanyag befogófejet, patront használunk. A mintavevők alapvető egységei: az elnyelető edény vagy szűrő, a levegőmennyiség mérő vagy áramlásmérő, és a szivattyú.

A mérés pontossága végett törekedni kell a nagy mennyiségű levegő átszívására. Ennek határt szab a mintavétel időtartama. A kapott szennyezőanyag koncentráció a mintavételi időszak átlagértékét adja. Minél hosszabb tehát a mintavétel, annál inkább elmosódnak a szélső értékek. Időegység alatt a mintavevő rendszeren átáramoltatott levegő mennyisége korlátozott, mert az elnyelődési hatások az átáramoltatási sebesség növelésével gyorsan romlik, szűrőfelület esetén pedig annak ellenállása szab határt.

A 30 perces mintavételnél az átáramoltatás térfogatsebessége 0,2 – 2,0 l/min közt lehet az alkalmazott eszközök függvényében. Gázkromatográfiás vizsgálatokhoz szilárd adszorbenssel (aktív szén granulátum, preparált szilika-gél) töltött csöveken vesznek mintát, amelynél az átszívási levegőáram a méret és a töltet szerint változó. A 24 órás „napi átlagminta” teljes átáramoltatott levegő mennyisége 1 – 2 m<sup>3</sup>. Hazai levegőminőségi határértékeink jelenleg 30 perces és 24 órás (valamint éves) időintervallumokra szólnak. Az EU szabályozás ettől esetenként eltér. A mintavétel időtartamát ezekhez célszerű igazítani.

A gázok megkötődése az elnyelés során általában nem tökéletes. Kedvező esetben elérhető a 90 – 98 %-os adszorpció. Ha az adszorpció hatásfoka ismert, az értékeléshez szorzófaktor alkalmazható.

A szennyező anyag koncentrációjának kiszámításához szükséges az átáramoltatott levegő térfogatának ismerete. Száraz és vizes gázórákat vagy rotamétereket alkalmaznak, amely utóbbiaknál mérni kell a mintavétel időtartamát. Használatos továbbá a tömegáram mérésére a mérőperem, valamint elektronikus megoldások. A hőmérséklet-emelkedés pozitív, a csökkenés negatív hibát okoz: 1°C hőmérséklet változás 0,37 %-os hibát eredményez rotaméter esetében. Az előírt áramlási sebesség beállítása túszeleppel, kritikus keresztmetszet alkalmazásával, vagy elektronikus áramlás-érzékelővel lehetséges.

A mintázandó levegő átszívására elektromos szivattyúkat használnak. A gáz-mintavevőkhöz kis teljesítményű, az analízisre is alkalmas mennyiségű por-mintavételhez nagy teljesítményű szivattyúk kellenek. Mindkét esetben fontos a tartós, sőt folyamatos üzemeltetésre való alkalmasság.

Napjainkban már a legritkább esetben használnak házilag összeállított mintavevő eszközöket. Ezeket kiszorították a komplett mintavevő berendezések, amelyek nagyobb pontosságot biztosítanak, valamint számos típusuk automatikus üzemben is működtethető.

A mintavétellel egyidejűleg mérni illetve észlelni szükséges néhány, a levegőszennyezettség szempontjából fontos meteorológiai paramétert. Ezek: a szél iránya és erőssége, a hőmérséklet és a relatív páratartalom, a borultság és a csapadék. A szél erősségét kézi vagy rögzített anemométerrel, a hőmérsékletet és a páratartalmat respirációs pszichrométerrel mérjük. A meteorológiai szolgálattól kaphatjuk meg az aktuális makro-szinoptikus adatokat, mint a hőmérsékleti gradiens (inverzió magassága), a ciklonos-anticiklonos állapot.

### 6.3.2. *Analitikai eljárások*

Az analízis, tekintettel az igen kis mennyiségekre, érzékeny módszereket követel. A kézi vagy automatikus eszközökkel végzett, hagyományosnak tekinthető mintavételt követően leggyakrabban a fotometriás, konduktometriás, súly szerinti, gázkromatográfiás (GC) ionkromatográfiás, nagynyomású folyadékkromatográfiás (HPLC) vagy atomabszorpciós spektrométeres (AAS) analíziseket alkalmazzák. A leggyakoribb szennyező anyagok részletes kémiai analitikai eljárásait nemzetközi és magyar szabványok tartalmazzák.

Nagy jelentőségű a mérési módszerek egységesítése, mert az eredmények csak így hasonlíthatók össze egymással. Ilyen egységesítési törekvés van az Egészségügyi Világszervezet, a Meteorológiai Világszervezet, a Nemzetközi Szabványosítási Szervezet kereteiben. Napjainkban a legfontosabb egységes szabályozást az Európai Unió irányelvei tartalmazzák. Intézményeink jó eredménnyel vesznek részt a nemzetközi hitelesítési eljárásokban.

Kén-dioxid esetében a West-Gaecke módszert, nitrogén-dioxid esetében a Salzman eljárást használják hitelesítő módszerként. A fluoridokat célszerűen ionszelektív elektród alkalmazásával mérhetjük.

A porvizsgálatok közül elterjedten alkalmazzák az ülepedő porterhelésnek és összetételének mérését. 30 napos expozícióval, szabványos gyűjtőedénnyel nyert mintából, súly szerinti analízissel mérik a vízben oldódó és a vízben oldhatatlan frakciót. A finomabb, nem ülepedő porfrakció analízisére a nagyteljesítményű pormintavevőkkel nyert minta alkalmas. A szűrőfelületen 100 – 200 m<sup>3</sup> levegőből kinyert por alkalmas fémek, policiklusos aromás szénhidrogének (karcinogén anyagok), biológiailag aktív porok vizsgálatára.

A szennyező anyagok koncentrációját mg/m<sup>3</sup>-ben és µg/m<sup>3</sup>-ben szokták megadni. Az angolszász országokban elterjedt a ppm (pars pro millien – egy rész a millióban) használata. A mg/m<sup>3</sup> – ppm, illetve a ppm - mg/m<sup>3</sup> átszámítás az alábbi képlettel történik:

$$A \left[ \text{mg} / \text{m}^3 \right] = \frac{M}{24} \left[ \text{ppm} \right]; \quad \text{illetve} \quad A \left[ \text{ppm} \right] = \frac{24}{M} \left[ \text{mg} / \text{m}^3 \right]$$

ahol: M - az anyag molekulatömege

A 24-es szám szobahőmérsékleten érvényes, míg 0°C-on 22,4-el kell számolni.

A levegőszennyezettség analitikai módszerei között – a pontosság igényének növekedésével – egyre nagyobb helyet kapnak az un. nagyműszeres eljárások.

Az *atomabszorpciós spektrofotometria* (AAS) alkalmazása a fémszennyeződések kimutatásában nélkülözhetetlen. Specifikus, szelektív módszer, amely mintegy 70 elem meghatározására alkalmas. A levegőhigiénés gyakorlatban leginkább az ólom-, kadmium-, nikkell-, réz-, króm-, cink-, vanádium-, arzén- és tallium-koncentrációkat szokták mérni. A mérés a szűrőn felfogott (általában több száz m<sup>3</sup> levegő átszívásával nyert minta leoldásával kapott oldatból történik, savas feltárással. Nagyobb érzékenységgű elektrotermikus atomizálással történik a meghatározás.

A *gázkromatográfiát* (GC) különféle szerves anyagok, szénhidrogének, oldószerek, esetenként növényvédőszer-maradékok, vegyipari eredetű levegőszennyező anyagok kimutatására alkalmazzák. A levegőhigiénés gyakorlatban a gázkromatográfiás analízist elsősorban a nagyobb molekulájú vegyületek, például az el nem égett üzemanyag-maradékok, aromás szénhidrogének (PAH, benz-a-pirén), polilórozott bifenilek (PCB-k), nitrózaminok, peszticidek, dioxin kimutatására alkalmazzák. A legtöbb esetben a gázformájú levegőszennyeződések aktív szénen vagy más adszorberen dúsítják, majd oldószeres vagy termikus deszorpció után analizálják. A meghatározás érzékenysége az alkalmazott kromatográfiás és mintavételi körülményektől függően nanogrammos, sőt pikogrammos szinten lehetséges.

A poliaromás szénhidrogének kimutatása egészségi szempontból fontos, köztük számos rákkeltő anyag található. Célszerűen *nagynyomású folyadék-kromatográffal* (HPLC – high pressure liquid chromatograph) vizsgálhatjuk. a mintát nagyteljesítményű pormintavevővel szűrőre vesszük, A mérési módszert szabvány tartalmazza.

### **6.3.3. Passzív monitorok**

Az immisszió-ellenőrzési eljárások között az utóbbi időben egyre inkább teret nyer az un. passzív monitorok alkalmazása. Ezek egyszerű, viszonylag olcsó eszközök, amelyek rendszerint egy tartóból (kapszulából, patronból, csőből) és egy abszorbensből (reagenssel átitatott szűrőből, aktív szénből, stb.) állnak. Több napos expozíciójuk egyszerű kihelyezéssel történik, felületükön a szennyező anyag – koncentrációjának függvényében – megkötődik.

Laboratóriumi analízisük anyagonként eltérő. Segítségükkel nagy területek vizsgálhatók, alkalmazásuk elsősorban tájékozódó felméréseknél, előzetes vizsgálatoknál indokolt. A jelenleg használatos passzív monitorok adatait a **7. táblázat** foglaltuk össze.

**7. táblázat. Passzív monitorok**

Mért komponens	Abszorbeáló anyag	Analitikai eljárás
Nitrogén-dioxid	Trietanol-amin	Salzman-módszer
Kén-dioxid	Trietanol-amin	West-Gaecke módszer
Nátrium-karbonát		Ion-kromatográfia
Ózon	Dipiridil-etilén	MBTH-módszer
Formaldehid	Nátrium-biszulfit	Kromotrópsavas eljárás
	Trietanol-amin	Pararosanilin módszer
Benzol, toluol, xilol	Aktív szén	Gázkromatográfia
Szén-monoxid	Zu-Y zeolit	Gázkromatográfia

**6.3.4. Biológiai vizsgálatok**

A szabad légkörben ártalma (humán patogén) mikroorganizmusok csak kis számban fordulnak elő. Zárt helyeken azonban (iskola, kórház, munkahely, metroállomás, stb.) esetenként szükséges bakteriológiai mintát venni. Ennek eszköze az ún. réses mintavevő, amely táptalaj felületére ütközteti a mikroorganizmusokat. A táptalajról azokat kitenyésztik és faj szerint azonosítják.

A napi gyakorlat szempontjából fontos szerepe van az allergén pollenek vizsgálatának. Hazánkban működik egy országos pollen-ellenőrző hálózat az ÁNTSz intézetek kezelésében. A szélirány szerint differenciáló gyűjtőkészülékben felfogott pollen-szemcséket naponta begyűjtik, és mikroszkóppal határozzák meg azok számát és fajtáját. Az eredményeket a médiában közlik.

**6.3.5. Folyamatos, „real-time” üzemű analizátorok (air monitorok)**

Az 1980-as években kezdtek elterjedni a fejlett országokban az ún. real time air monitorok, amelyek folyamatos méréseik adatait egyidejűleg továbbítják egy adatgyűjtő központba. A rendszerint többféle szennyező anyag mérésére szolgáló, komplex monitor állomásokat

konténerbe vagy mérőkocsiba építik be. Egy komplett mérőállomás beszerzési és üzemeltetési költsége természetesen nagy. Hazánkban harmincnál több ilyen mérőállomás működik. Az alábbiakban a leggyakrabban mért szennyező anyagok analizátorait és főbb tartozékaikat ismertetjük.

#### *Kén-dioxid monitorok*

A analízis elve a pulzáló fluoreszcencia. A zavaró komponensek kiszűrése után 314 nm-es hullámhosszúságú UV fényel sugározzák be a levegőmintát. Ez a hullámhossz az SO<sub>2</sub> molekulák abszorpciójára jellemző. A molekulák által kibocsátott fluoreszcens UV sugárzás jut az optikai rendszerbe. Az elektronsokszorozó jele digitális jellé konvertálva jut a mikroprocesszoros feldolgozóba.

Az air monitorok jellemzésére példaként a TEI Model 43C adatait közöljük.

#### **8. táblázat. TEI Model 43C jellemző adatai**

Mérési tartomány:	0 – 1000 ppb, illetve 0 – 100 ppm 21,0 ppb, 10 s átlagolási idő mellett
Legkisebb detektálható érték:	1,0 ppb, 60 s átlagolási idő mellett 0,5 ppb, 300 s átlagolási idő mellett
24 órás zéró drift:	kevesebb, mint 1 ppb
Válasz idő:	80 s
Pontosság:	1 % vagy 1 ppb
Linearitás:	±1 % a teljes skálára
Mintavételi áramlás:	0,5 l/min

Hasonló célú analizátorok: pl. E SA, AF 21 M, Horiba APSA-360

#### *Nitrogén-oxid, nitrogén-dioxid és nitrózus gázok*

Ezek a monitorok egyidejűleg mérik a nitrogén-oxid (NO), a nitrogén-dioxid (NO<sub>2</sub>) és az összes nitrózus gáz (NO<sub>x</sub>) koncentrációját. Az analízis elve a kemilumineszcencia. Az NO molekulák O<sub>3</sub> molekulákkal reakcióba lépve oxidálódnak. A gerjesztett NO\* molekula az alapállapotba való visszatéréskor a 600-1200 nm tartományban lumineszcens sugárzást bocsát ki. A csökkentett nyomású reakciókamra optikai szűrője csak a 610 nm feletti sugárzást engedi át, kiszűrve a zavaró interferenciákat. A sugárzást az elektronsokszorozó méri, ahonnan a mikroprocesszoros feldolgozó egységbe jut a jel. Az ózont ózongenerátorral állítják elő. Az

NO<sub>2</sub> méréséhez a molekulát NO-vá kell alakítani, ami egy 320°C hőmérsékletű molibdén kályhában történik. A két mérés különbsége adja az NO<sub>2</sub> koncentrációját. Egy 3 zónával ellátott chopper forog az elektronsokszorozó előtt, amely így felváltva az NO, NO<sub>x</sub> és sötétáram értékeket méri. Ilyen készülékek pl. az ESA, AC 31 M, Horiba APNA-360 és a TEI Model 42C.

#### *Szén-monoxid monitorok*

A mérés elve a nem diszperzív, infravörös hullámhosszú, korrelációs spektrofotometria. A szén-monoxid abszorpciós spektruma 4,67 μm hullámhossznál maximumot mutat, amely az optikai szűrő spektrumába esik. Az optikai szűrőt egy korrelációs keréknek nevezett gáz-szűrővel kombinálják, amely kiszűri a más gázok által okozott interferenciát. Az infravörös sugárnyaláb, mielőtt a detektorhoz ér, átmegy a korrelációs keréken, az optikai padon, és egy keskeny sávú optikai szűrőn. A sugár így időben tagolva három jelet ad: nulla jel, mérési jel és referencia jel, amely egy CO-val töltött cellán megy át. A sugár abszorpciójának változását – a zajcsökkentés miatt – Peltier elemmel hűtött fényelem érzékeli. Az érzékelést mikroprocesszor végzi. Ilyen készülékek pl. a TEI Model 48C, az ESA CO 11 M és a Horiba APMA-360.

#### *Ózon monitorok*

Az ózon mérés elve az ultraibolya fénnel történő fotometria. Az ózon 253,7 nm hullámhosszra vonatkozó abszorpciós együtthatója ismert. A Lambert-Beer törvény alapján a koncentráció kiszámítható. A kétcellás rendszerben az egyik cellán ózonmentes, szűrt levegő, míg a másik cellán a mérendő minta áramlik át. Az ózon-generátoros kivitelben a referenciát a generált ózon szolgáltatja. Erre a célra szolgál az ESA. 0341 M, a TEI Model 49C, Horiba APOA-360.

#### *Részecskék (por) mérésére szolgáló monitorok*

A finomabb porfrakciók, a szálló por mérésére illetve méret szerinti differenciálására kaszkád rendszereket alkalmaznak, erre folyamatos üzemű monitorokat fejlesztettek ki. Az összes lebegő részecske (total suspended particulate, TSP) mérésére, a 10 μm-nél kisebb frakció (particulate matter 10 μm, PM 10) mérésére, újabban pedig a 2,5 μm-nél kisebb átmérőjű részecskék (PM 2,5 vagy PPM 1,0) mérésére szolgáló eszközöket is alkalmaznak.

A legelterjedtebb mérési elv a fokozatosan előre mozgó szűrőpapír-szalagon vett porminta β-sugár abszorpcióján alapul. A sugárzás elnyelődése arányos a porréteg vastagságával illetve a por-koncentrációval. Fő elemei a β-sugárforrás, a papírszalagot mozgató mechanika, a sugárzás-érzékelő, a mikroprocesszoros vezérlés és a jelátalakító-jeladó rendszer. Ilyen a FAG-



Eberline, az Andersen béta-sugaras monitor, az APM-monitor, valamint az ESA. MPSI 100 készülékek. Ugyanerre a célra, de más elven működő készülék a TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance) rendszer, amely a szűrőfelületre rakódó por frekvencia-módosító hatását felhasználva mint mikromérleg működik.

#### *Szerves anyagok mérésére szolgáló monitorok*

A légkörben előforduló szerves anyagok mérésére szolgáló monitorok első generációja az un. „nem-metán szénhidrogén”-eket méri. A légkörben természetes forrásokból származó, viszonylag nagy koncentrációban jelen lévő metánt katalitikus kivonással kiküszöbölve méri a többi illékony szénhidrogén-komponens összegét. Mérési elve a láng-ionizációs gázkromatográfia. Nem-metán szénhidrogének mérésére szolgáló készülékek a TEI Model 55C és a DANI TNMH 451.

Az újabb készülékek általában a közlekedési forrásokra és vegyi üzemekre jellemző benzol, toluol és xilol (BTX) koncentrációját regisztrálják. Erre szolgáló speciális gázkromatográf a Chrompack monitor, amelynek legalacsonyabb érzékelési koncentrációja benzolra  $0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Formaldehid monitorozására alkalmas a TEI Model 54C.

#### *DOAS (Differenciál Optikai Abszorpciós Spektroszkópia)*

A nyílt, hosszú fényutas spektroszkópia viszonylag új mérési rendszerét jó ideig nem szabványosították. A jelenlegi típusokat már az Európai Unió is elfogadja. A rendszer lényege, hogy egy ívlámpa széles spektrumú sugárnysalábot bocsát ki, amely áthatol a vizsgálandó  $10 - 5000 \text{ m}$ -es mintaszakaszon. Az ultraibolya és látható fényt passzív visszaverő juttatja vissza a vevő optikához. Itt egy száloptikán keresztül jut a fény az elemzést végző spektrométerbe. A szennyező gázok jellemző spektrumot nyelnek el az emittált fényből, amelynek hullámhosszát az analízátor nagy érzékenységgel és pontossággal határozza meg. Az elemzés végső fázisát a kapcsolt számítógép végzi. Előnye a rendszernek, hogy egyetlen készülékkel sokféle szennyező anyag mérhető, beleértve a szerves komponenseket is, amelyek folyamatos üzemben más módon nem, vagy csak igen költségesen regisztrálhatók. Alkalmazhatók egy utca, egy városrész, vagy például repülőtér szennyezettségének ellenőrzésére on line üzemmódban. Ilyen készülékek a DOAS 2000 és az OPSIS gyártmányok. A DOAS 2000 készülék néhány jellemző adata az alábbi.

Mérhető anyagok: az ózon, nitrogén-oxidok, kén-dioxid, BTX, formaldehid, fotokémiai szennyezések, más szerves anyagok és aldehidek. Legkisebb detektálási koncentráció:  $0,5 \text{ ppb}$ ,  $250 \text{ m}$  mérési szakaszon, 5 perces átlagidővel.

### *Monitorok tartozékai*

A monitorok hosszú időn (heteken) át üzemelhetnek kezelői beavatkozás nélkül. Ennek feltétele az automatikus kalibráló rendszer telepítése. A beállított mérési program biztosítja a napi egyszeri vagy többszöri kalibrálást. A kalibráló gázt hígítás után ismert koncentrációra beállítva juttatja az analizátorba. Főbb részei ennek megfelelően a gázpalack vagy generátor, a gázhígító egység, a temperált permeációs cső, a program-vezérlő és ellenőrző rendszer. Ilyen készülékek: a TEI Model 146 Multigas Calibration System, a Moderl 165 ózon generátor, az ESA VE 3M hordozható három csatornás kalibrátor, ML Audit Calibrator.

### *Adatkezelő rendszer*

A gázmérő monitorok általában néhány másodperces gyakorisággal szolgáltatnak mérési részadatokat. Ezek kezelése, gyűjtése, tárolása, telefonvonalon vagy URH-n való továbbítása, a kívánt időtartamra (időtartamokra) történő átlagok képzése az adatkezelő rendszer feladata. Egy adatkezelő egység általában a monitor állomás valamennyi mérőegységét kiszolgálja. Ilyenek: az ESA SAM 32, a Breitfuss Anacomp, az ML Envirologger.

A monitor-hálózat központi adatkezelő rendszere a program függvényében végzi a kívánt feldolgozásokat és értékeléseket (félóránként, óránként, 24 óránként) jegyzőkönyvet nyomtat, diagramokat készít. Interaktív kapcsolatot tart a monitor-állomásokkal, amelynek keretében hibajelzést kap, kalibrálást indíthat meg, adatokat kérdezhet le on line rendszerben. Hazánkban használatos levegőminőség kezelő program-csomagok például a SCANAIR (ESA), a HERS (ML) és az ANACOMP (TEI). Gondot okoz, ha egy mérőhálózaton belül különböző adatkezelő programok üzemelnek, amelyek nem kompatibilisek. Ennek kiküszöbölésére készült a Breitfus Intercomp, amely a TEI, Anacomp, API, Horiba, ML, ESA, FAG-Eberline, TEOM és MetOne rendszerek együttes kezelését teszi lehetővé.

### *Meteorológiai mérőeszközök*

A komplett mérőállomás vagy mérőkocsi tartozékai a meteorológiai mérőeszközök. Mérik a hőmérsékletet, a relatív páratartalmat, a szél erejét és irányát, a légnyomást és a napsugárzás intenzitását. Ezek az adatok is az adatkezelő és feldolgozó egységbe kerülnek. A programok összefüggésbe hozzák a meteorológiai állapotot a szennyezettséggel.

## **6.4. Terjedési modellek alkalmazása a levegőminőség meghatározására**

Bármelyik típusú levegőszennyezettség mérést használjuk is, a beruházás és üzemeltetés költségei jelentősek, a munkaerő ráfordítás nagy. Emellett a legkorszerűbb mérőrendszerrel sem lehet egy település teljes terjedelmének szennyezettségét megismerni, időbeli alakulását, a csúcserőértékeket az egész területre nézve megmérni.

A mérések kiegészítésére ezért esetenként – például hatásvizsgálatokhoz – pótolhatatlan a terjedési modellek alkalmazása. Az első terjedési modelleket emisszió-pontforrásokra dolgozták ki. Ma már használatban vannak az immisszió adatokat felhasználó, városi közlekedési és települési terjedési modellek is. Ezek az immisszió-mérő állomások adataira támaszkodva, az emissziók, a terepalakulatok és a meteorológiai tényezők figyelembe vételével jelentős területek expozícióját jó közelítéssel adják meg. Előnyük továbbá, hogy változó állapotokra, prognózisok készítésére is alkalmasak.

### **6.4.1. Légszennyeződési folyamatok modellezése**

#### **6.4.1.1. A kibocsátás és a légköri koncentráció összefüggése**

A levegőminőség szabályozása azon a kézenfekvő feltevésen alapul, hogy nagyobb emisszióhoz magasabb légköri koncentráció tartozik. Konkrét feladatok megoldásához számszerűsítésre van szükség, ezért numerikus modelleket alkalmazunk. Segítségükkel választ kaphatunk pl. a következő kérdésekre:

Adott kibocsátási forrás(ok) esetén milyen lesz a szennyező anyagok térbeli eloszlása.

Ha a kibocsátás (és a meteorológiai helyzet) a jövőben meghatározott módon változik, milyen légszennyeződés várható.

Hogyan változik a levegőkörnyezet minősége az emissziót meghatározó gazdasági tevékenység változása esetén.

Mekkora minimális emisszió-csökkenés szükséges ahhoz, hogy a légszennyeződés szintje adott területen a megengedett érték alatt maradjon.

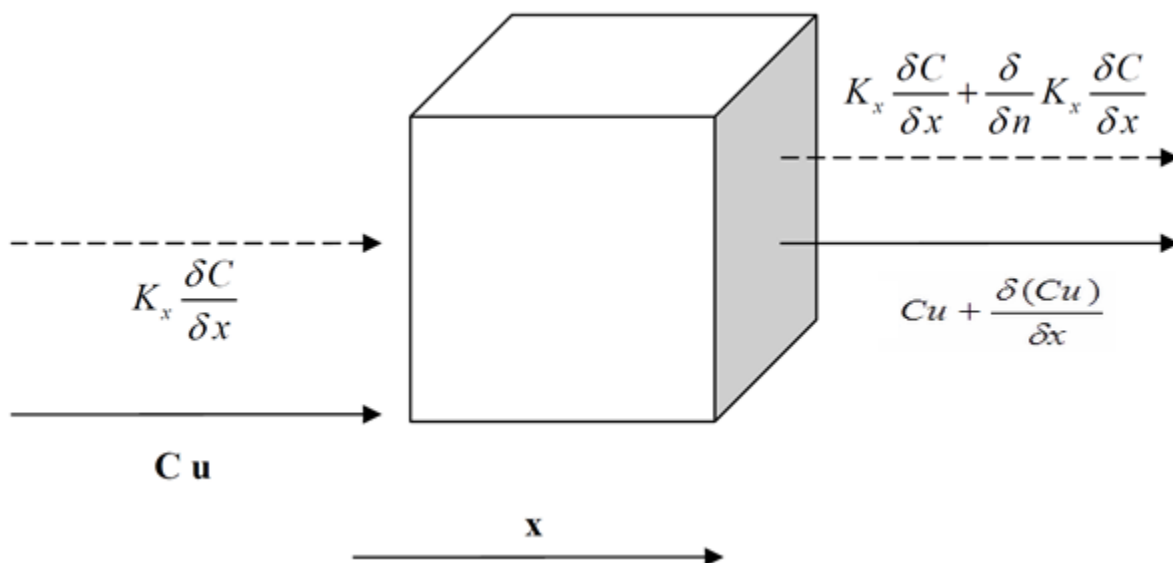
Hogyan módosítják a kibocsátás körülményei (pl. a kémények magassága) a légszennyeződés eloszlását.

Ma már – a számítógépek alkalmazásának tömeges elterjedésével – egyre több, kiváló minőségű programozott terjedési modell vásárolható és használható fel céljainknak

megfelelően. Ezeknek a modell-programoknak csak az általunk megismerni kívánt immissziós állapotoknak megfelelő, számunkra ismert peremfeltételeket kell megadnunk, és a modell előállítja a várható szennyeződési viszonyokat. Természetesen ezekkel a számítógépes modellekkel a munka összehasonlíthatatlanul gyorsabb, mint régebben, amikor kézi eszközökkel kellett – valamennyi feltételnek megfelelően újra és újra – iterációs módszerrel a számításokat elvégezni. Mindazonáltal a szükséges alapismeretek megismertetése céljából bemutatjuk a három legelterjedtebben alkalmazott – és nyilvánvalóan a számítógépes modellekben is felhasznált – modell-típust.

#### 6.4.1.2. EULER-féle közelítés: kontinuitási egyenlet

Az Euler –féle közelítéssel az események lefolyását a Földhöz rögzített (álló) koordináta-rendszerben vizsgáljuk. A kontinuitási egyenlet a légszennyező anyagok transzportjának legáltalánosabb formája.



A tömeg be- és kiáramlása egységnyi térfogatú levegőelembe  
ahol  $C$  a koncentráció a szél felőli oldalon  
 $u$  a szélesség

A légköri elembe a szennyező anyag koncentrációja változik

- a rendezett légmozgás miatt (TRx),
- a légköri mozgások turbulenciája miatt (TRx),

- növekszik az emisszió miatt (S),
- csökken a kiülepedés miatt (D),
- a szennyező anyag kémiai reakciók okozta keletkezése vagy fogyása által

Összességében a szennyező anyag koncentrációjának időbeli változása a légtérben:

$$-\frac{\delta C}{\delta t} = T_R + T_{IR} + S - D \pm FR$$

#### 6.4.1.3. LAGRANGE-típusú modellek: regionális és szárazföldi léptékű folyamatok

A Lagrange-típusú modelleknél a koordináta-rendszer (a doboz) a légáramlással együtt halad. Az egységnyi alapú és H keveredési réteg-magasságú dobozok rögzített emissziós mező fölött mozognak, így minden időlépték alatt meghatározott mennyiségű anyag kerül beléjük.

A légtér-egység koncentráció-változása:

$$\frac{d C_1}{d t} = \frac{Q}{H} - k_1 C_1 - k_2 C_1 - k_3 C_1$$

ahol  $C_1$  a koncentráció,

$Q$  az emisszió,

$k_1, k_2, k_3$  a kémiai átalakulás, a száraz és a nedves ülepedés együtthatója.

Tekintve, hogy a modellel több száz kilométer kiterjedésű folyamatokat is leírhatunk, a légmozgást nem a talajszéllel, hanem általában a 850 hPa nyomású izobár-felület (~ 1500 m) áramlási mezejével jellemezzük, amelynek térképei 6 órás időintervallumra a meteorológiai gyakorlatban rendelkezésre állnak.

#### 6.4.1.4. GAUSS-modell: kis léptékű légszennyeződési folyamatok

Magas pontforrások esetén a helyi légszennyeződés modellezésére a gyakorlatban általában a Gauss-féle egyenletet alkalmazzák. A véletlenszerű turbulens mozgások közel semleges légrétegződés mellett a szélirányra merőlegesen vízszintes és függőleges síkban normális

eloszlást alakítanak ki. Ennek azonban az a feltétele, hogy a tekintett anyagok (gázok, részecskék) ülepedése elhanyagolható legyen.

Térben és időben állandó szélességet és turbulenciát, valamint egyenletes felszín feltételezve a talaj közelében az  $x$  tengely mentén ( $y = z = 0$ ) a forrástól  $x$  távolságra a légszennyező anyag koncentrációja:

$$C(x,0,0) = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_x u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{h_e}{\sigma_z}\right)^2\right]$$

ahol  $\sigma_y$  és  $\sigma_z$  a koncentráció szórása az  $y$  és az  $z$  irányokban. Értéküket a levegő függőleges stabilitása szabja meg.

$Q$  az emisszió,  $h_e$  a tényleges kéménymagasság, ahol a kéményből kiinduló füstfáklya középvonala vízszintessé válik.

$$h_e = h_s + \Delta h$$

## **7. BELSŐ ÉGÉSŰ MOTOROK LEVEGŐSZENNYEZŐ HATÁSA ÉS CSÖKKENTÉSÉNEK LEHETŐSÉGE**

A világban alkalmazott belső égésű motorok darabszáma meghaladja az egymilliárdot. A legnagyobb felhasználási területet a közlekedési eszközök jelentik. A belső égésű motorral hajtott gépkocsik (személygépkocsik, autóbuszok és a tehergépkocsik) száma a Földön jelenleg túlhaladja a 700 milliós darabszámot, és az évenkénti növekménye megközelíti a 40 milliót.

A belső égésű motorok olyan energiaátalakító berendezések, amelyek a hajtóanyag elégetésével nyert hőenergiát mechanikai munkává alakítják át, miközben a légtérbe kipufogógázt bocsátanak ki.

A belsőégésű motor jelentős mennyiségű levegőt használ fel működése során. Az Otto-motoroknál 1 kg benzinhoz megközelítőleg 15 kg ( $12 \text{ m}^3$ ) levegő, a dízelmotornál pedig 1 kg gázolajhoz 18 – 26 kg (14 – 20

A kipufogógáz összetétele több tényezőtől függ: a motor típusától (Otto-motor, dízelmotor, kettő- vagy négyütemű motor), a motor szerkezeti kialakításától, az égéstértől, a motor beállításától, a levegőszűréstől, a hajtóanyag összetételétől, a kenőolaj-fogyasztástól, az alkalmazott kipufogógáz-tisztító berendezéstől, stb.

A belső égésű motor jelentős mennyiségű levegőt használ fel működése során. Az Otto-motoroknál 1 kg benzinhoz megközelítőleg 15 kg ( $12 \text{ m}^3$ ) levegő, a dízelmotoroknál pedig 1 kg gázolajhoz 18 – 26 kg ( $14 - 20 \text{ m}^3$ ) levegő szükséges.

A motorokban lejátszódó égés sajátosságai miatt a hajtóanyagból származó égéstermékek összetétele más, mintha ugyanazt az energiahordozót egyéb körülmények között égetnénk el. A kipufogógázban mintegy négyszáz féle összetevő mutatható ki, amelyek közül a legtöbb csak nyomokban lelhető fel. Az alkotók közül csak a nitrogén, az oxigén és a vízgőz környezetbarát, az összes többi szennyezőanyag: mérgező vagy az emberi szervezetbe bizonyos mennyiségben bekerülve rákkeltő sajátosságú.

A kipufogógáz összetétele több tényezőtől függ: a motor típusától (Otto-motor, dízelmotor, kettő- vagy négyüzemű), a motor szerkezeti kialakításától, az égéstértől, a motor beállításától, az üzemi állapotától, a levegőszűréstől, a hajtóanyag összetételétől, a kenőolaj fogyasztásától és összetételétől, az alkalmazott kipufogógáz tisztító berendezéstől, stb.

Az Otto- és a dízelmotorok kipufogógázaiban ugyanazok a főbb károsanyag összetevők mutathatók ki. Ameddig ólmozott benzint is használtak, az Otto-motorok kipufogógázában mérgező ólom-származékok is megtalálhatók voltak. A dízelolaj esetében a gázolaj kéntartalma miatt mérgező kénoxidok is vannak a kipufogógázban.

A dízelmotor kipufogógázának jellegzetes komponense a jelentős mennyiségben előforduló korom, amelyhez kötődnek az el nem égett policiklusos szénhidrogének (pl. a 3,4-benzpirén), ezért ezek nehezebben keverednek a levegővel, később alakulnak át, és így növekszik ezek rákkeltő hatása. Természetesen más szilárd részecskékhez pl. a levegőből bejutottakhoz is kötődhetnek ezek a rákkeltők, ezért a motorok levegőszűrésének jóságától közvetlenül is függ a környezetre veszélyes alkotók hatása.

**9. táblázat. Otto- és dízelmotorok károsanyag kibocsátása**

Komponens	Otto-motornál	Dízelmotornál	Hatás
<b>Nem mérgezők</b>			
Nitrogén (N <sub>2</sub> )	74 – 77 % v/v	76 – 78 % v/v	nem szennyező
Oxigén (O <sub>2</sub> )	0, - 3 % v/v	2 – 14 % v/v	nem szennyező
Vízgőz (H <sub>2</sub> O)	3 - 6% v/v	0,5 – 6 % v/v	nem szennyező
Szén-dioxid (CO <sub>2</sub> )	5 – 12 % v/v	1 – 6 % v/v	szennyező
<b>Mérgezők</b>			
Szén-monoxid (CO)	0,5 – 10 % v/v	100 – 2000 ppm	nem rákkeltő
Nitrogén-oxidok (NO <sub>x</sub> )	500 – 3000 ppm	200 – 5000 ppm	rákkeltő
Szénhidrogének (C <sub>m</sub> H <sub>n</sub> )	100 – 10000 ppm	10 – 500 ppm	rákkeltő
Aldehidek (R-CHO)	0 – 200 ppm	0 – 50 ppm	rákkeltő
Korom	0 – 2 mg/m <sup>3</sup>	10 – 11000 mg/m <sup>3</sup>	rákkeltő
Benzpirén	10 – 20 µg/m <sup>3</sup>	0 – 10 µg/m <sup>3</sup>	erős rákkeltő

A belső égésű motorokból a légtérbe kikerülő kipufogógázok sajátos tulajdonságú környezet-szennyezést is okozhatnak:

- ősszel – télen: inverziós szmog
- nyáron: Los Angeles típusú szmog

A gépjárművek légszennyezettségére vonatkozó, jól reprodukálható vizsgálati eljárást nem volt könnyű kidolgozni, mert a belső égésű motor minden üzemeltetési állapotában más-más összetételű kipufogógázt produkál.

A kipufogógáz-emisszió összetételének meghatározására és korlátozására a kutatások az Egyesült Államokban kezdődtek. Az 1970-es évektől kezdődően a gépjárművek



szennyezőanyag kibocsátását – a mennyiségükre utaló vizsgálati eljárások alapján – szinte a világ valamennyi országában előírások korlátozzák.

A belsőégésű motorral ellátott gépjárművek légszennyező hatásának mérsékléséhez nem elegendő új típusok kifejlesztése, vizsgálata és azok elfogadása illetve a sorozatgyártás termékeinek minőségellenőrzése. A használatban lévő gépjárművek légszennyező hatását is rendeletileg határértékekhez kell kötni abból a célból, hogy a kellő szintű műszaki állapot mindig megkövetelhető legyen.

A gépjárművek időszakos műszaki felülvizsgálata keretében Magyarországon 1977-től kezdtek környezetvédelmi vizsgálatokat végezni (un. „zöld kártya” évenkénti beszerzésének megkövetelése). A környezetvédelmi felülvizsgálat rendszere a Közlekedési Főfelügyelet irányítása mellett fokozatosan kiépült

Magyarországon jelenleg a 18/2001. (V. 23.) számú, a gépkocsik környezetvédelmi felülvizsgálatáról és ellenőrzéséről alkotott KÖVIM-BM-KöM együttes rendelet érvényes. a jogszabály benzine üzemanyag-meghajtás esetén három alapvető motor-típust, továbbá dízel üzemű motor-típust különböztet meg, és ezek működésére vonatkozóan ír elő különféle környezetvédelmi vizsgálatokat, illetve kibocsátási határértékeket.

A három említett benzinmotor-típus:

- ◆ hagyományos Otto-motor
- ◆ szabályozatlan keverékképzésű, katalizátoros motor
- ◆ szabályozott keverékképzésű, katalizátoros motor

A különböző motortípusokra vonatkozóan eltérő felülvizsgálati időtartamot ír elő a jogszabály – természetesen a motorok eltérő környezetszennyező emissziói miatt. A környezetvédelmi felülvizsgálatok során ma már nem csak a károsanyag-kibocsátás mértékét határozzák meg az arra feljogosított műhelyekben a célra jogszabályban elfogadott mérőműszerekkel, hanem a légszennyezésen kívül a gépjárműnek egyéb környezetvédelmi szempontoknak is meg kell felelnie (a kötelező műszaki alkalmasságon túlmenően). A vizsgálatok eredményéről „Környezetvédelmi igazoló lap”-ot állítanak ki, amely a forgalomban való részvétel elengedhetetlen feltétele. A felülvizsgálatok során tapasztalt „megfelelőségek” alapján a gépjármű rendszámára egy hatszög alakú plakettet ragasztanak fel, amelynek színe piros, sárga vagy zöld lehet. Ennek a plakettnek a színe a közlekedésfelügyelet illetve a rendőrség tájékoztatására is szolgál elsősorban szmog-riadók elrendelése esetén, amikor is a szmog-helyzet súlyosságától függően először a piros színű plakettel ellátott – legtöbb szennyező

anyagot kibocsátó, rendszerint korszerűtlen motorral felszerelt vagy rossz műszaki állapotú – gépjárművek közlekedését tiltják meg, majd a helyzet súlyosbodása után a sárga jelzéssel ellátottakat. A zöld színű plakettel bíró gépjárművek általában a legkorszerűbb elektronikai vezérlő-berendezésekkel, szabályozott keverékképzésű, katalizátoros motorral üzemelnek, következésképp a lehetséges legkevesebb károsanyagot bocsátják ki.

A belsőégésű motor kipufogógáz károsanyag emissziójának mérséklése összetett feladat. A motor szennyező hatásának csökkentése érdekében fejleszteni kell a konstrukciós adottságokat, az egyes rész megoldásokat, az égéstér alakját, az égés lefolyásának szabályozását, a keverékképzést, a motor hűtésének és kenésének vezérlését, az alkalmazott üzemanyagokat, a katalizátort, stb.

A légviszonytól vagy légfeleslegtől ( $\lambda$  - tényező, amely meghatározza, hogy benzinben dús vagy szegény a motor hengereiben elégetendő keverék) nagymértékben függ a kipufogógáz károsanyag összetétele. Az Otto-motor a legnagyobb teljesítményt  $\lambda = 0,8$  körüli légfeleslegnél (viszonylag dús keverék) szolgáltat, ezzel szemben a károsanyag összetétele legkedvezőbbnek a  $\lambda = 1$  körüli értéknél, az elméletileg szükséges levegőmennyiségnél adódik.

A levegőszennyezés csökkentése érdekében az utóbbi harminc év egyik legeredményesebb fejlesztése Otto-motor esetében a szabályozott keverékképzés (elektronikusan vezérelt benzin-befecskendezés vagy elektronikus karburátor) és a hármas hatású („háromutas”) katalizátor együttes alkalmazása volt.

Ennek a megoldásnak a lényege az, hogy a kipufogógázban lévő CO, szénhidrogének, NO<sub>x</sub>-ek a platina és ródium katalizátorral nagy hatásfokkal tisztíthatók 1-es légviszony mellett. Az ideális benzin-levegő keverési arányt pontosan az elektronikusan vezérelt keverékképző berendezés állítja elő, amelyhez a vezérlő jelet az ún. lambda-szonda ( $\lambda$  - szonda) szolgáltatja. A szonda feszültsége 800 mV-os változást mutat, ha a kipufogógázban szabad oxigén van, és az elektronika ennek a jelnek a hatására módosítja a levegőhöz adagolt benzin mennyiségét. A pontosan szabályozott keverékképzéssel hajtóanyag megtakarítás is elérhető. A katalizátor működésének fenntartásához ólommentes benzinnel kell a motort működtetni, hogy az aktív nemesfém rétegre ne rakódjanak rá az ólom és vegyületei. Többek között ez a tény indokolta, hogy ma már gyakorlatilag világszerte tilos az ólmozott benzinek használata.

A dízelmotorok károsanyag kibocsátásának csökkentése elsősorban a nitrogén-oxidokra, a koromra és a szilárd részecskékre irányul. Az előbefecskendezési szög helyes megválasztása, annak betartása jelentős mértékben befolyásolja a kipufogógáz összetételét és a motor gazdaságos üzemét. A befecskendezési kezdet késleltetése az NO<sub>x</sub> csökkentésének lehetőségét

kínálja fel, de ezzel együtt növekszik az el nem égett szénhidrogének mennyisége, a füstölési hajlam és a motor fajlagos hajtóanyag fogyasztása. A gyártók ezért az előbefecskendezési szög kijelölésekor igen körültekintően járnak el.

Az  $\text{NO}_x$  csökkentése érdekében a dízelmotor-technika eredményesen alkalmazza az elektronikusan szabályozott kipufogógáz visszavezetést, amely részterheléseknél igen hatásos. A szénhidrogének mérséklése katalizátor alkalmazásának lehetőségével dízelmotornál is megoldható, de a magas kéntartalmú gázolaj esetén katalizátorral nagymértékben megnő a szulfát részecskék aránya.

A dízelmotoroknál bevezetésre kerülő elektronikus szabályozású befecskendező rendszerek és az igen magas (1400 – 1800 bar) befecskendezési nyomás használata jelenthet újabb előrelépést a levegőszennyezés mérséklésének tekintetében.

A belső égésű motorok levegőszennyezése (különösen szén-dioxid vonatkozásában) és annak mérséklése összefügg az energia felhasználás problémájával. A belső égésű vagy robbanómotorral hajtott gépjárművek a primer energiaforrás (például a földben lévő kőolaj) energia-tartalmának 9 – 10 %-át hasznosítják mechanikai munkaként! A korszerű motorokkal elérhető teljes hatásfok ugyanakkor 27 – 32 %-os, jobb, mint a villamos motoré (ha a villamos energia hőerőműbeni előállításának hatásfokát is figyelembe vesszük). A mérnököknek szembe kell nézniük ezzel a tragikusan alacsony hatásfokkal, mindent el kell követniük az energiafogyasztás mérséklésének érdekében.

A belső égésű motorokkal kapcsolatos energia megtakarítás három fajtát lehet megkülönböztetni (primer, szekunder és terciér energia megtakarítást) annak alapján, ahogy a mérnöktársadalom három különböző rétegét érintik.

A primer energia megtakarítás alatt az energiaátalakító gépeink rész hatásfokának a javítását értjük. A jelenlegi helyzetben és valószínűleg még jó néhány évig gépjárműveink belső égésű motorokkal üzemelnek, ezért főleg ezen motorok fejlesztése szükséges.

A primer energia megtakarítását szolgálják többek között a belső égésű motor égésterének fejlesztése, az elektronikusan szabályozott keverékképzés és égési folyamat alkalmazása illetve tökéletesítése, a kompresszió viszony növelése, a magasabb égési véghőmérséklet megengedése, a motor belső mechanikai veszteségeinek mérséklése.

A szekunder energia megtakarítás a gépjárműfejlesztő mérnökök tevékenységi köre. Ide tartozik többek között a gépjármű légellenállásának csökkentése, a hajtáslánc harmonizálása és belső veszteségének mérséklése, a gumibroncsok fejlesztése, a fékezés megvalósítása energia rekuperációval, a vezető és utastér klímatiszítása hulladék hővel.

A tercier energia megtakarítás pedig a járművet üzemeltető és a közlekedést (a munkavégzést) tervező mérnökök tevékenységén múlik. Az energia takarékosági szempontok alapján megválasztott útvonalak kiépítése és használata, a szállítás és a munkavégzések optimalizálása, a kombinált szállítás (közúti-vasúti vagy közúti-vízi) bevezetése, a városi forgalom tervezése, a zöld haladási hullám kialakítása, az energia takarékoságon alapuló közlekedésrendészeti előírások bevezetése, stb. jelethetnek eredményes energiatakarékosságot.

A tömegközlekedés preferálása az egyéni közlekedéssel szemben az egyik legjelentősebb energia megtakarítási lehetőséget jelenti annak ellenére, hogy a személygépkocsi gyártók a 3 liter/100 km fogyasztású, négy személyes kisautók előállításán fáradoznak.

### **7.1. A városi közlekedés és környezeti hatásainak modellezése**

*(Pitrik József)*

A bemutatott modellek elsősorban az egyedi, helyhez kötött pontforrások által létrehozott légszennyezés vizsgálatára alkalmasak. Az erőművek és az ipari kibocsátók emissziója általában termelési anyagmérleg segítségével az idő függvényében megállapítható, így a megismert modellek szerinti koncentráció értékek a hely függvényében számolhatók.

Ez a módszer nem alkalmazható közvetlenül a közlekedési eredetű légszennyezési-légszennyeződési folyamat elemzésére, mert a közlekedési tér rendkívül eltérő, a kibocsátás a forgalom és a járműösszetétel függvénye.

Egy település közlekedése és a környezeti hatásrendszere különböző szinteken vizsgálható és értékelhető. Mások a városlakók, a gépjárművezetők, a közlekedés üzemeltetőinek, fejlesztőinek, kutatóinak elvárása.

A közlekedés objektív feltárása érdekében készített modellek lehetőséget nyújthatnak a folyamatok „szükséges finomságú” leírására, statikus és dinamikus vizsgálatára.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> A városi közlekedéssel kapcsolatos modellezés főbb lehetőségeit konkrét szegedi vizsgálatok bemutatásával szemléltetjük. Szeged jó *modellvárosnak* tekinthető, mert geomorfológiai és természeti környezete egységes, történeti város, szerkezete áttekinthető, valamennyi közlekedési eszközrendszer reprezentálva van, a hivatásforgalom és a szabadidő forgalom jelentős. A modellek jól adaptálhatók, az eredmények tájékoztató céllal más településeken is hasznosíthatók.

### 7.1.1. Légszennyezési emisszió modellezése

#### 7.1.1.1. Hagyományos forgalmi adatbázis felhasználása

A hagyományos forgalmi adatfelvétel az utak meghatározott keresztmetszeteiben történik, melyekben a főbb járműfajták előfordulását folyamatosan jegyzőkönyvezik, majd az óránkénti előfordulásokat összegzik. Ezek szolgálnak alapul az átlagos napi forgalom és a mértékadó óraforgalom kiszámítására. A járműfajták szerinti számlálási adatokat az összehasonlítások érdekében ún. egységjárműre számítják át.<sup>2</sup> Ezek az adatsorok minden jelentősebb közútra rendelkezésre állnak.

#### A) Kapcsolódó közúti forgalom légszennyezésének modellje

A közúti eredetű légszennyezési modell alapjául a vizsgált település határán áthaladó fontosabb utak forgalomszámlálási adatsorai szolgálnak. Hagyományos forgalomszámlálás alapján felvett adatsort mutat be a **10. táblázat**, melyet a **4. ábra** szemléltet. Modell-jármű egy 1,5 l-es lökettérfogatú dízel jármű, melynek a városi forgalomban a fordulat-száma 1000/perc-re becsülhető. Hagyományos motor esetén a hengertérbe bejutó térfogatáram 750 l/perc. Ugyanennyinek felvéve a kipufogógáz térfogatát, percenként ( $V_1=V_2$ )  $0,75 \text{ m}^3$  füstgáz jut a levegőbe.

#### 10. táblázat. Napi forgalomterhelési adatsor, Szeged (egységjármű/nap)

Dorozsmai út	5-ös út Bp. (E75)	5-ös út Határ(E75)	Csongrádi út		47-es út	43-as út (E68)	Bajai út
1999 <sup>3</sup>	15800	12335	8786	3780	14710	13877	10019
2001 <sup>4</sup>	27333	18230	9071	6613	15736	19756	12277
2002 <sup>5</sup>	28181	23201	10035	17429	14744	23134	12966

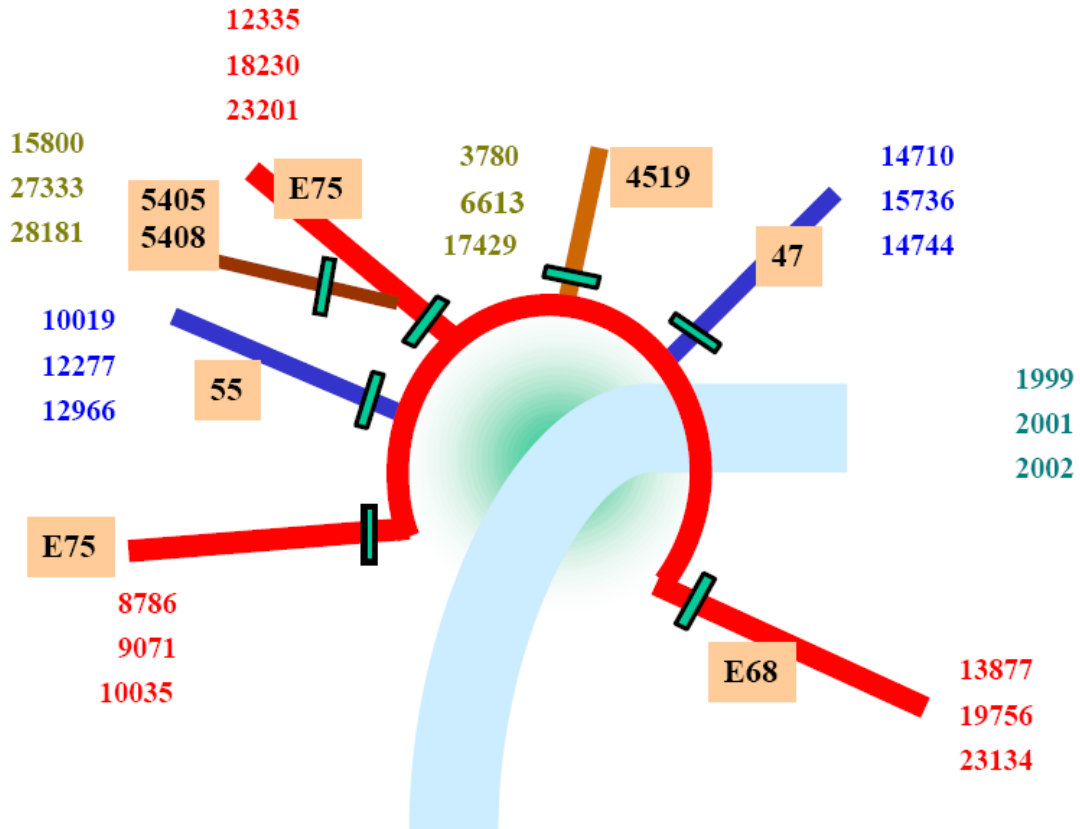
[Megjegyzés: A járműegyenérték (egységjármű) a jármű forgalomban betöltött szerepére utal. A forgalomszámlálás az utak különböző városhatár közeli szelvényeiben készült. Ezek közül az átlag körüli értéket tartalmazza a táblázat.]

<sup>2</sup> A fogalmak definíciói megtalálhatók a közlekedési szakirodalomban: (FÜLÖP G. 1994; KRIZSÁN GY.–KOREN CS. 1994).

<sup>3</sup> Pro Urbe Kft.: Szeged város közúthálózatának adatai. 1999.

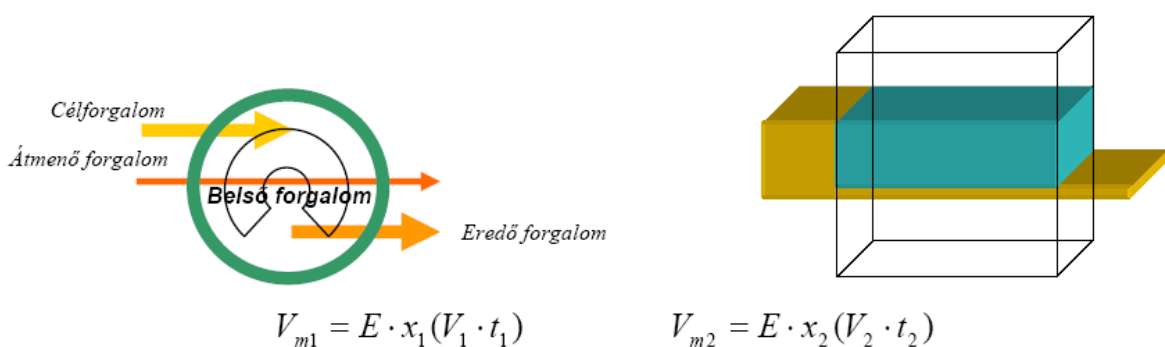
<sup>4</sup> Kézirat: Közútkezelő Kht. 2001.

<sup>5</sup> Csongrád megyei Közútkezelő Kht.: Forgalomszámlálási adatok, 2000, 2001, 2002. – CD



4. ábra Szeged főbb kapcsolódó útjainak forgalma [Szerkesztette: Pitrik J.]

Szegeden egy 1994-ben végzett felmérés elemezte az átmenő, a cél és az eredő forgalom arányát. Ez alapján feltehető, hogy a beérkező forgalom (E) 85%-a ( $x_1=0,85$ ) a cél és 15%-a ( $x_2=0,15$ ) átmenő. Ezt szemlélteti az 5. ábra „box” modellje.



5. ábra A közúti forgalom eloszlása és „box” modellje [Forrás: PITRIK J. 2003a; PITRIK J. 2001]

Ugyanezt az arány fel-tételezhető a kimenő forgalom elemzésekor is. Napi átlagban feltehető, hogy az eredő és a cél forgalom menetideje ( $t_1=$ )20 perc, az átmenő forgalom menetideje

( $t_2=$ )30 perc. Ezekkel az adatokkal számított füstgáz kibocsátásokat ( $V_{m1}$  – cél és eredő forgalomra eső;  $V_{m2}$  – átmenő forgalomra eső) a **11. táblázat** tartalmazza (PITRIK J. 2001). A „doboz” modell adatsorai helyi vizsgálatoknak megfelelően módosíthatók. A modell a település szerkezetére és a közlekedési sajátosságokra nem érzékeny.

**11. táblázat. A modellszámítás eredményei: Füstgázkibocsátás kapcsolódó közúti forgalom esetén, Szeged [Szerkesztette: Pitrik J.]**

	1999		2001		2002	
	Ejármű/nap	Füstgáz/nap	Ejármű/nap	Füstgáz/nap	Ejármű/nap	Füstgáz/nap
Cél és eredő forgalom	67411	1011165 m <sup>3</sup>	92664	1389960 m <sup>3</sup>	110236	1653540 m <sup>3</sup>
Átmenő forgalom	11896	267660 m <sup>3</sup>	16352	367920 m <sup>3</sup>	19454	437715 m <sup>3</sup>
Összesen	79307	1278825 m <sup>3</sup>	109016	1757880 m <sup>3</sup>	129690	2091255 m <sup>3</sup>

**B) Belső városi forgalom és légszennyezési modellje**

Lényegesen bonyolultabb feladat a városon belüli forgalom légszennyező hatásának becslése. Legpontosabban akkor járhatnánk el, ha egy adott forgalomban résztvevő járműszámot becsülni tudnánk. A ma használatban lévő forgalomterhelési ábrákat az egyes kordonpontokon áthaladó járműszám alapján készítik, így ezek elsősorban a közlekedéstervezéshez és a településtervezéshez nyújtanak információt. Megállapíthatók a szűk keresztmetszetek, a változtatások hatásai tervezhetők.

1999-ben Szeged belterületén 93 kordonponton történt hagyományos forgalomszámálás. A forgalom nagysága szerint 5 kategóriát felvéve, a mértékadó órai forgalom eloszlását a **12. táblázat** mutatja (PITRIK J. 2003a).

**12. táblázat. Szegedi gépjármű forgalom eloszlása**

	0–500 db/óra	501–1000 db/óra	1001–1500 db/óra	1501–2000 db/óra	2001–2500 db/óra
Előfordulások száma	53	26	8	4	2
Összes városi forgalom, órai	13250	19500	10000	7000	4500
Összes városi forgalom, napi	106000	156000	80000	56000	36000

Középértékeket figyelembe véve az összes városi forgalom 434000 jármű/nap. Levonva a városi határfelületen áthaladó járműszámot, a tényleges belső forgalom: 354693 jármű/nap. Napi 20 perces üzemidőt figyelembe véve – az előzőekben használt metodikát alkalmazva – a becsült kibocsátás: 5320395 m<sup>3</sup> füstgáz.

Természetesen az A és B módszer első közelítésnek, globális módszernek tekinthető. Ha részletes és folyamatosan karbantartott adatbázisok állnak rendelkezésünkre, a települési forgalom által kibocsátott füstgáz elég nagy pontossággal számolható a modell segítségével.

#### 7.1.1.2. Járműspecifikus forgalmi adatbázis alkalmazása

A hagyományos adatokon alapuló modellezés csak tájékoztató és általános képet mutat a település légszennyezettségi állapotáról. Az igazi környezeti probléma a csomópontokban, vagy meghatározott útszakaszokon lép fel. A város geokörnyezeti adottságai, beépítettsége, meteorológiai jellemzői, a forgalom időfüggő alakulása, a gépjárműállomány összetétele és mű-szaki állapota, a terhelések, a vezetési technikák és a forgalmi szituáció, mind olyan tényezők, amelyek befolyásolják a fontosabb szennyezőanyagok (CO, CxHy, NOx, ...) emisszióját, transzmissziós folyamatait és az immisszió értékeket.<sup>6</sup>

A járműspecifikus adatbázis felvételére kialakított módszer lényege, hogy minden áthaladó jármű típusazonosításra kerül. Egy forgalomszámlálási adatsort mutat a **6. ábra**. Az adatsorok összehasonlításából két fontos következtetés vonható le: egyrészt „ugyanaz” a járműköteg mozog a város (meghatározott) útjain; másrészt a járműállomány összetétele és az egyes típusok előfordulási gyakorisága követhető.

#### ***C) Belső városi forgalom modellezése csomóponti adatsor alapján***

A módszer csomóponti forgalmi adatokon alapszik. Mértékadó csomópontokat választva modellezhető a kibocsátás. A szegedi csomópontokban 1990-ben, 1992-ben és 2000-ben végzett részletes járműspecifikus forgalomszámlálás adatsoraiból számolt, 1 órára eső járműszámot a **13. táblázat** mutatja. Ezek alapján kerültek megállapításra az egyszerűsített modell csomóponti kategóriái.

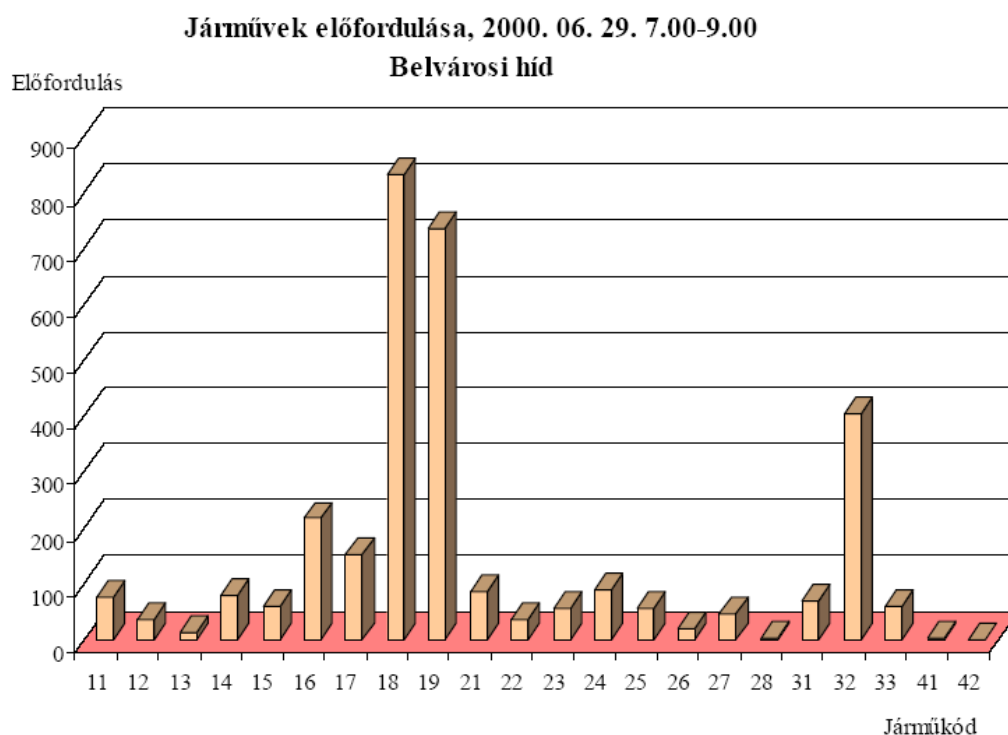
Egyszerűsített modell feltétele, hogy 20 csomópontban 8 órán keresztül tartózkodik az összes üzemelő jármű. Két kategóriát figyelembe véve (I. – 1200 jármű, 10 csomópont; II. – 500 jármű, 10 csomópont), az előző kibocsátási módszert alkalmazva, az összes városi járműszám (8 órán át): 17000. Ezen járművek 1 órai üzemben  $765000 \text{ m}^3$ , 8 órai üzemben  $6120000 \text{ m}^3$  füstgázt bocsátanak ki. Figyelembe véve a már kiszámított eredő és célforgalmi kibocsátást, az összes belforgalmi keletkezésű kipufogógáz:  $4841175 \text{ m}^3$  (PITRIK J. 2001).

---

<sup>6</sup> Ezt a módszert 1990-től alkalmazzuk Szegeden. A vizsgálatok többsége a Belvárosi híd szegedi hídfőjében készült. Ezzel az eljárással bizonyítottuk, hogy 1990 és 2000 között a légszennyezettség állapota ~60%-ot javult



Az A és C módszer eredményei csak kissé térnek el, így a költséges kordonponti forgalom-számlálás helyett néhány jellegzetes csomópont adatsora is kielégítő eredményt ad. Szegeden az 1999 és 2002-es vizsgálati eredmények közötti évi ~19%-os növekedést általános érvényűnek tekintve, mintegy 8 millió m<sup>3</sup> napi belforgalmi és 10 millió m<sup>3</sup> napi összes városi kipufogógáz keletkezésével kell ma számolnunk. Ha a kipufogógáz ~1,5%-át tekintjük CO-nak<sup>7</sup>, a Szeged területén naponta a légkörbe kerülő CO mennyisége 150000 m<sup>3</sup>, azaz 187500 kg, míg az ebből eredő szén mennyiségét 93750 kg-ra becsülhetjük (CO: 1,25.10<sup>-3</sup> g/cm<sup>3</sup>; ebből: C: ~0,5 kg/m<sup>3</sup>).

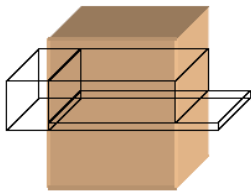


11 - Zsiguli	18 - Régi gyártású nyugati autó (5 évnél idősebb)	26 - Gáz üzemű autóbusz
12 - Skoda	19 - Új gyártású nyugati és közép európai autó	27 - Trolibusz, villamos
13 - Dacia	21 - Kisteherautó (nyugati)	28 - Motorkerékpár
14 - Trabant	22 - Kisteherautó (keleti)	31 - Kismotorkerékpár
15 - Wartburg	23 - Kisbusz (Dízel üzemű)	32 - Kerékpár
16 - Egyéb keleti (rég)i autó	24 - Kisbusz (Benzin üzemű)	41 - Teherautó
17 - Új gyártású keleti autó	25 - Dízel üzemű autóbusz	42 - Kamion

### 6. ábra Járműspecifikus forgalmi adatbázis

7 6/1990. (IV. 12.) KöHÉM rendelet 5. számú melléklete

**13. táblázat. Forgalm számlálási adatok, „box” modell Szeged [Szerkesztette: Pitrik J.]**



Forgalmi adatok	1990. 11. 13.	1992. 11. 10.	2000. 06. 29.
Belvárosi hid szegedi hidfő	1675/óra ≈ 30/perc		1547/óra ≈ 26/perc
Boldogasszony sgt. – Vitéz u.		751/óra ≈ 12/perc	554/óra ≈ 9/perc
Csillag tér			835/óra ≈ 14/perc

**D) Városfüggő emissziós modell képzése**

A speciális forgalm számlálási technika egy alapos, a vizsgált városra jellemző modell-képzésre ad lehetőséget.

A vizsgált járműtípusokra, gyári norma adatok, valamint a hazai megengedett kibocsátási értékek figyelembevételével CO emissziós normasor alkotható. A norma a kiválasztott járműtípusokra alapjáraton ( $e'$ ) és normálüzemi ( $e''$ ) – a névleges fordulatszám 60%-ra – számított kibocsátásokat vesz figyelembe (PITRIK J. 1992; 1998; 2000). Az adatsort a **14. táblázat** mutatja.

A gépjárműtípusonként megállapított emissziónormák alapján képzett alapadatsorok jellemzik az adott csomópont (a városrész) CO szennyezési folyamatát.

Az alapadatsor „érzékeny” a járműtípusok előfordulási gyakoriságára és a típusra jellemző emissziókra:

$$E_i' = e_i' \cdot \frac{z_i}{3600} \qquad E_i'' = e_i'' \cdot \frac{z_i}{3600}$$

ahol:

- i – járműtípus;
  - a modell járműtípus kibocsátása alapjáraton, mg/s;
  - a modell járműtípus kibocsátása normálüzemben, mg/s;
- z – járműtípus előfordulási száma, db/óra.

Az alapadatsor egyértelműen szemlélteti, hogy a vizsgált időszakban melyik típus milyen mértékben felelős a szennyezésekért. Bevezetve az alábbi jelöléseket:

- $z'$  – percenkénti forgalom (járműszám);
- $t_v$  – átlagos várakozási idő;
- $t_a$  – áthaladási idő.

**14. táblázat. CO emissziós normasor [Források: MSZ 19950; MSZ 21854-1990; MSZ-07-4448-1991; MSZ 21878-85; 6/1990 (IV.12) KÖHÉM; AM Személygépkocsi műhelyadatok. Szakirodalmi kiadó – Aargauer Tagblatt AG, Aarau, 1992.]**

<i>Járműkódok – Járműfajták</i>	<i>e'</i> <i>mg/s</i>	<i>e''</i> <i>mg/s</i>
	<i>Alapjáraton</i>	<i>Névleges fordulaton 60%-ban</i>
11 – Zsiguli	426,59	2112,66
12 – Skoda	240,64	859,44
13 – Dácia	406,28	1787,64
14 – Trabant	140,63	551,29
15 – Wartburg	195,32	781,31
16 – Egyéb keleti (régí) autó	492,22	2320,49
17 – Új gyártású keleti autó	250,00	300,00
18 – Régi gyártású nyugati autó (5 évnél idősebb)	250,00	300,00
19 – Új gyártású nyugati és középeurópai autó	128,33	150,01
21 – Kisteherautó (nyugati)	390,00	450,00
22 – Kisteherautó (keleti)	750,06	4219,08
23 – Kisbusz (Dízel üzemű)	750,06	2343,93
24 – Kisbusz (Benzin üzemű)	750,06	2343,93
25 – Dízel üzemű autóbusz	4022,00	4022,00
26 – Gáz üzemű autóbusz	2000,00	2000,00
27 – Trolibusz, villamos	–	–
28 – Motorkerékpár	166,00	166,00
31 – Kismotorkerékpár	80,00	80,00
32 – Kerékpár	–	–
41 – Teherautó	3351,74	3351,74
43– Egyéb gépjármű	869,95	869,95

A percenkénti CO emisszió:

$$Q_m = z' \cdot (t_v \cdot \bar{E}' + t_a \cdot \bar{E}'')$$

ahol ' és '' a modellforgalomra összesített emissziók egy járműre eső átlaga. Az átlag jármű olyan járművet testesít meg, amely a vizsgált csomópontra jellemző szennye-zőanyag kibocsátást adja. A számítás folyamata ugyanazon csomópontban különböző időpontokban:

1990. 11. 13. – Szeged, régi hídfő

$$\bar{E}' = s_1 \cdot \sum E' = 0,0714 \cdot 209,76 = 14,98 \quad \text{mg/s, jármű}$$

$$\bar{E}'' = s_1 \cdot \sum E'' = 0,0714 \cdot 689,76 = 49,24 \quad \text{mg/s, jármű}$$

$$Q_m = 27,9 \cdot (45 \cdot 14,98 + 15 \cdot 49,24) = 39414,33 \quad \text{mg/perc}$$

$$= 2,34648 \quad \text{kg/óra}$$

ahol:  $s_1$  – az összegzett csoportok számának reciproka: 1/14;

$t_v$  – 45 sec;

$t_a$  – 15 sec;

$z'$  – 27,9 jármű/perc.

2000. 06. 29. – Szeged, régi hídfő

$$\bar{E}' = s_2 \cdot \sum E' = 0,0555 \cdot 136,42 = 7,57 \quad \text{mg/s, jármű}$$

$$\bar{E}'' = s_2 \cdot \sum E'' = 0,0555 \cdot 287,27 = 15,94 \quad \text{mg/s, jármű}$$

$$Q_m = 25,7 \cdot (45 \cdot 7,57 + 15 \cdot 15,94) = 14899,57 \quad \text{mg/perc}$$

$$= 0,8939 \quad \text{kg/óra}$$

ahol:  $s_2$  – az összegzett csoportok számának reciproka: 1/18;

$t_v$  – 45 sec;

$t_a$  – 15 sec;

$z'$  – 25,7 jármű/perc.

A modell vizsgálati eredményei alapján fontos megállapításokat tehetők. 10 év alatt a járműforgalom volumene lényegesen nem változott. A forgalom összetétele azonban kedvezően változott, azaz a környezetbarátabb járműcsaládok kerültek előtérbe. A szegedi hídfőnél elvégzett mérések egyértelműen igazolják, hogy a lokális terhelés jelentősen csökkent, a normaszintek túllépése minimális mértékű. A videokazetták megtekintése után az is nyilvánvaló, hogy a mostani immissziós csúcsokat egy-egy „tragikus” állapotú gépjármű okozta.

A modellvizsgálat több pontján is követhető, hogy a 2000-i CO kibocsátás az 1990-i állapotnak kb. 35–40%-a. A bizonytalanság a csomópont forgalmi feltételeinek

megváltozásából, a különböző légállapotokból és az emissziós alapadatok pontatlanságából eredhet. A modell további finomításával lehetőség nyílik arra, hogy az emissziómodell mind nagyobb pontossággal közelítse a tényleges kibocsátási értékeket, így korrektebb adatbázisokat használhassunk a városi közlekedési problémák megoldásához.

A modellszámítás eredményeit a **15. táblázat** foglalja össze.

Az emissziós modellek megalkotásakor – a célnak megfelelően – különböző tér- és/vagy időbeli folyamatokat vehetünk figyelembe.

Az A) modell a települést egy képzeletbeli doboznak fogja fel, és csak a doboz határán áthaladó jár-művek adatsorait dolgozza fel. Ezek az adatok több évre vonatkozóan a települések és az utak többségére adottak, ezért az eloszlás rövid vizsgálata vagy elemzése alapján elkészíthető. Modelljármű fogalmát megalkotva az összes kipufogógáz mennyiség egyszerűen becsülhető. Az időbeli változások kimutathatók.

A B) modell abból indul ki, hogy nagyvárosokban a belső utak forgalmára is vannak adatsorok. Ezek segítségével a belső városi forgalom füstgázmennyisége becsülhető. Ha nincs adatsor, akkor a jellegzetes útszakaszok tipizálhatók és az órai forgalom rövid megfigyelések után is felvehető.

A C) modell pontos csomóponti adatokon alapszik és az egész város(doboz) forgalmát kategorizálja, és ez alapján számolja a kipufogógáz mennyiségét. Gyors, az időbeli változások jól érzékelhetők. Eredménye a CO, a CO<sub>2</sub>, az NO<sub>x</sub> becslésére is használható.

A D) modell tapasztalatokon nyugvó kutatási eredményeket mutat be. Bizonyítja, hogy a városban haladó járműcsoportok légszennyezőanyag kibocsátása a tranziens üzemmód következtében a csomópontok zsúfoltságától, áteresztő képességétől, a forgalom szervezésétől döntő mértékben függ. Egy adott gép-járműcsoport műszaki paraméterei egy-egy útvonal megtétele során nem változnak jelentősen. A modell segítségével nagy pontossággal számolhatók a lokális terekben kikerülő légszennyező anyagok.

A modellek köre bővíthető, de a professzionális számítógépes modellek is ezeken a számítási metódusokon alapulnak, az alap-adatsorok felvétele nem nélkülözhető, a számítások logikája azonban nehezen követhető, a felhasználás rendkívül költséges.

**15. táblázat. Emissziós modell alapadatok (forgalom, forgalmi rangsor, CO kibocsátás, szennyezési rangsor), Szeged, régi híd (Belvárosi) szegedi hídfő, 1990, 2000 [Szerkesztette: Pitrik J.]**

Jármű- kódok	1990					2000				
	db/óra (6 órai átlag)	FORGALMI RANGSOR	E' mg/s	E'' mg/s	SZENNYE- ZÉSI RANGSOR	db/óra	FORGALMI RANGSOR	E' mg/s	E'' mg/s	SZENNYE- ZÉSI RANGSOR
11	442,0	1.	52,38	259,39	1.	39	9.	4,62	22,89	7.
12	71,3	9.	4,77	17,02	9.	19	16.	1,27	4,54	14.
13	178,5	3.	20,14	88,64	3.	7	18.	0,79	3,48	16.
14	161,5	4.	6,31	24,73	7.	40	8.	1,56	6,13	13.
15	83,0	8.	4,50	18,01	8.	30	11.	1,63	6,51	12.
16	127,3	5.	17,41	82,06	5.	109	4.	14,90	70,26	1.
17	28,0	13.	1,94	2,33	12.	77	5.	5,35	6,42	10.
18	263,3	2.	18,28	21,94	6.	417	1.	28,96	34,75	2.
19						369	2.	13,15	15,38	5.
21						43	7.	4,66	5,38	11.
22	87,1	7.	18,15	102,08	2.	20	15.	4,17	23,44	6.
23			0,00	0,00		28	12.	5,83	18,23	8.
24	17,1	14.	3,56	11,13	11.	46	6.	9,58	29,95	4.
25	46,3	10.	51,73	51,73	4.	27	13.	30,17	30,17	3.
26						11	17.	6,11	6,11	9.
27	32	12.				23	14.			
28	35,8	11.	1,65	1,65	13.	2	20.	0,09	0,09	18.
31						35	10.	0,78	0,78	17.
32	88,3	6.				202	3.			
41	8,3	15.	7,73	7,73	10.	3	19.	2,79	2,79	15.
43	5	16.	1,21	1,21	14.					
Σ	1675		209,76	689,65		1547		136,42	287,27	

### 7.1.1.3. Légszennyezési transzmisszió modellezése

A városi közlekedés jellegzetessége, hogy eltérő konstrukciójú és állapotú járműtípusok, eltérő gépjárművezetői üzemelési folyamat során, álló vagy mozgó üzemben egyedi járműként vagy járműcsoportot alkotva szennyezőanyag-felhőt bocsátanak ki. A modellezéssel kiszámított szennyezőanyag emissziók álló vagy mozgó forrásokból jutnak a levegőkörnyezetbe. A kipufogógáz alkotói többnyire eltérnek a levegő általános összetételétől, ezért szennyező-anyagnak minősülnek.

A közlekedés által generált légszennyezőanyag források kiterjedésük szerint csoportosíthatók:

- ◆ – pontforrás, ha pontszerű a kibocsátás: egy jármű, egynek tekinthető járműcsoport, vagy egy közlekedési csomópont esetén;
- ◆ – vonalforrás, ha a járműcsoport egy úton zárttá válik, a kibocsátás folyamatos;
- ◆ – területi forrás, ha a város egy részén, vagy egész területén telítetté válik a forgalom és a kibocsátás folyamatos.

A kibocsátott szennyezőanyag ún. transzmissziós folyamat révén tovaterjed, miközben rész-folyamatok fejtik ki hatásukat (turbulens diffúzió, szél általi elszállítódás, kémiai és radioaktív átalakulás, száraz és nedves kihullás, visszatükröződés). A közlekedési eredetű légszennyezés terjedési folyamata – és részfolyamatai – megfelelő matematikai apparátus segítségével ma már jól leírhatók. A leíró modellek többnyire differenciálegyenlet-rendszerek, melyeknek különböző megoldásai is ismertek. A légszennyezőanyag immisszió értéke a számítások eredménye, mely a fentiekén túl a hely és az idő függvénye is (BEDE G.–GÁCS I. 1980; PITRIK J. 1986).

A modellezés lehetővé teszi, hogy a gépjárműforgalomban keletkező légszennyezőanyagok útját nyomon kövessük és egy tetszőlegesen választott receptor pontban a szennyező-anyag koncentrációjának értékét megállapítsuk. Ismerve az emberre megengedhető immisszió normákat, minősíthetjük a légszennyezetségi állapotát az adott pontban.<sup>8</sup>

Néhány egyszerű modell vázlatos bemutatása szemlélteti, a szegedi forgalom által generált légszennyezetségi állapottér kialakulását, és a légszennyezetségi minősítést. A vizsgálatok csak a szénmonoxid terjedésére térnek ki.

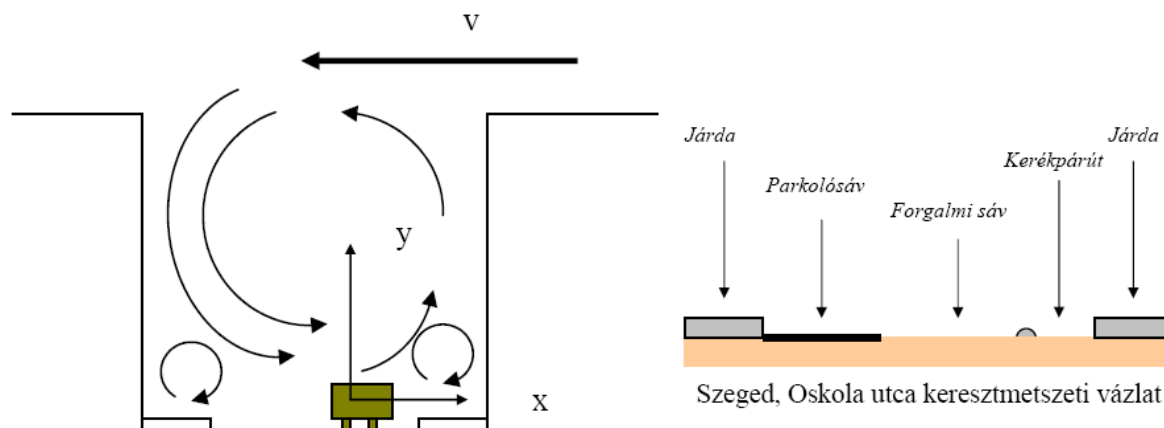
### **A) Empirikus összefüggés alkalmazása zárt beépítés esetén**

Egy zárt utcaszakasz esetén, ha a forgalom irányára merőleges szél fúj – sajátos örvényrendszer alakul ki. A főörvény a magasabb emeletek felé sodorja a légszennyezést, míg a másodlagos örvények a járdaszint közeli szennyezést növelik. Egy empirikus modell segítségével egyszerűen modellezhető a forgalom, a szélesség és a távolságok függvényében a légszennyezőanyag (pl. CO) koncentrációja. Az áramlási viszonyokat és a jelöléseket **7. ábra**, míg az empirikus modell alapján készített Maple program eredményét a **8. ábra** szemlélteti (BEDE G.–GÁCS I. 1980).

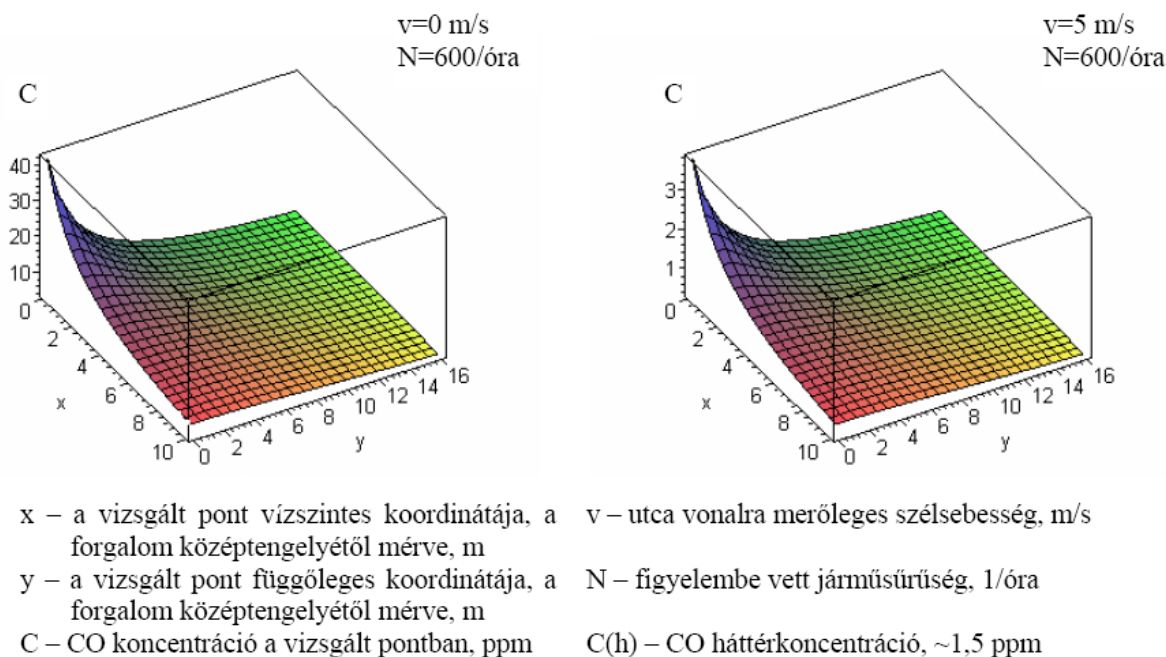
Szeged legforgalmasabb területein a város beépítettségére jellemző az utcaszerű, zárt beépítés. A vizsgált útszakasz: Oskola utca Belvárosi híd előtti szakasza. Itt egyirányú a forgalom, az egyik oldalon parkolási lehetőség, a másik oldalon kerékpárút van. Csúcs-forgalom esetén tipikus vonalas szennyezőforrás alakulhat ki. Az úttest mindkét oldalát kétemeletes épületek határolják.

---

<sup>8</sup> CO levegőminőségi határértékek az MSZ 21854/1990 alapján: Védett I. övezetben:  $I_{30\text{perc}} = 10000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  
 $I_{\text{napi}} = 5000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; Kiemelten védett I. övezetben:  $I_{30\text{perc}} = 5000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $I_{\text{napi}} = 2000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;



**7. ábra A terjedés empirikus modellje (utcakanyon vázlatja)[Szerkesztette: Pitrik J.; Forrás: BEDE G.–GÁCS I. 1980]**



$$\Delta(C_{szélalatti}) = 0,07 \frac{N}{(v+0,5) \cdot (\sqrt{x^2 + y^2} + 2)}$$

**8. ábra A terjedés empirikus modellje (empirikus összefüggés, jelölések, Maple kép) [Szerkesztette: Pitrik J.; Forrás: BEDE G.–GÁCS I. 1980]**

A függvény elemzéséből látható, hogy az  $u=0 \text{ m/s}$  „szélcsend” esetén a járműtengely középpontjában ~40 ppm CO koncentráció is előfordulhat. A gyalogjárda középvonalaiban ( $x=3,75 \text{ m}$ ) a 0 szinten ~20 ppm, 1,5 m-en 5–6 ppm is lehet. A második emelet szintjén, az ablak párkányvonalaiban ~4 ppm koncentráció valószínűsíthető. A megengedett immiszió szint



4,28 ppm. Lényegesen kedvezőbb a helyzet  $u=5$  m/s szélesség esetén. A széloldali immisszió számítását itt nem részletezzük, az örvények miatt az értéke a norma alatt marad.

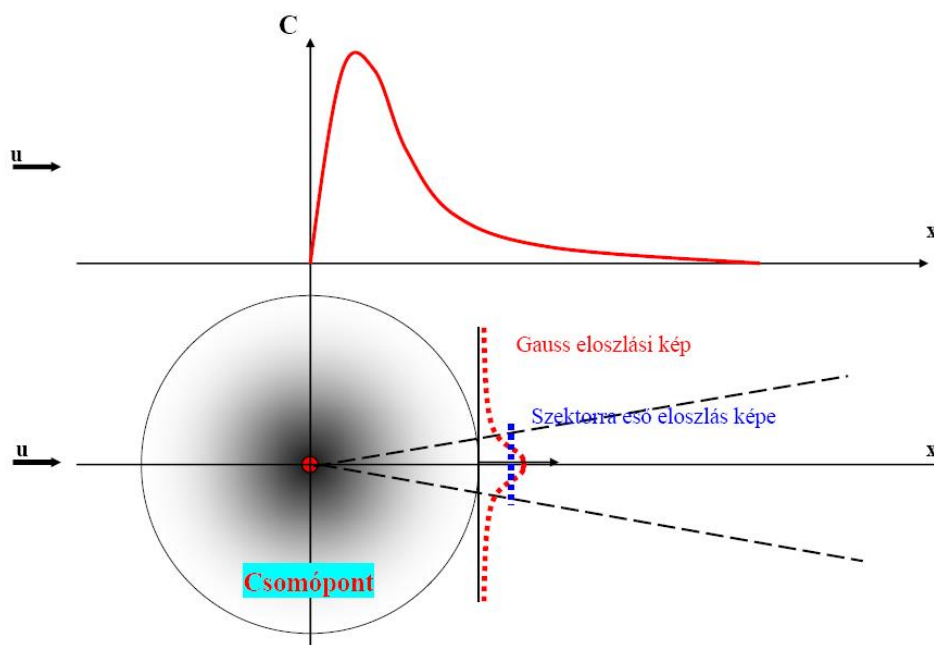
A figyelembe vett N érték átlagnak tekinthető.

Az empirikus modellel jól becsülhető a CO szennyezés mértéke különböző kereszt-metszeti pontokban. Ezek az eredmények jól egyeznek a mért adatokkal is.

## B) Szektorra átlagolt (átalakított) modell alkalmazása csomópontra

Gyakori elvárás, hogy egy-egy kiemelt csomópont légállapotát jól ismerjük különböző térségekben (játszótér, nyitott étterem közelében) és az épületek különböző szintjein. A modellképzés során a jellegzetes városi adatokat (beépítettség, növényzet, utca méret, átlagos szélesség, stabilitási indikátorok) figyelembe véve a szabványosított területi koncentráció modell (Gauss-Sutton-Pasquill) alkalmazható.

A Szeged Belvárosi híd szegedi csomópontjára készített modellhez az MSZ 21459/1-81 szabvány egyenlete szolgált alapként. Az egyenletek megjelenítése Maple 7. matematikai programcsomag felhasználásával készült. A modell környezetét a **9. ábra** szemlélteti. A modell futtatásainak eredményeit az 10. ábra mutatja. A különböző meteorológiai állapotok a programban tetszőlegesen beállíthatók (tr-modell-B1.mws).



**9. ábra** A szektorra átlagolt koncentráció számítás környezete és értelmezése csomópontba integrált kibocsátás figyelembevételével [Szerkesztette: Pitrik J.]

A modell változatainak jellegzetes adatai a **10. ábra** és a program mellékletek jelöléseinek figyelembevételével:

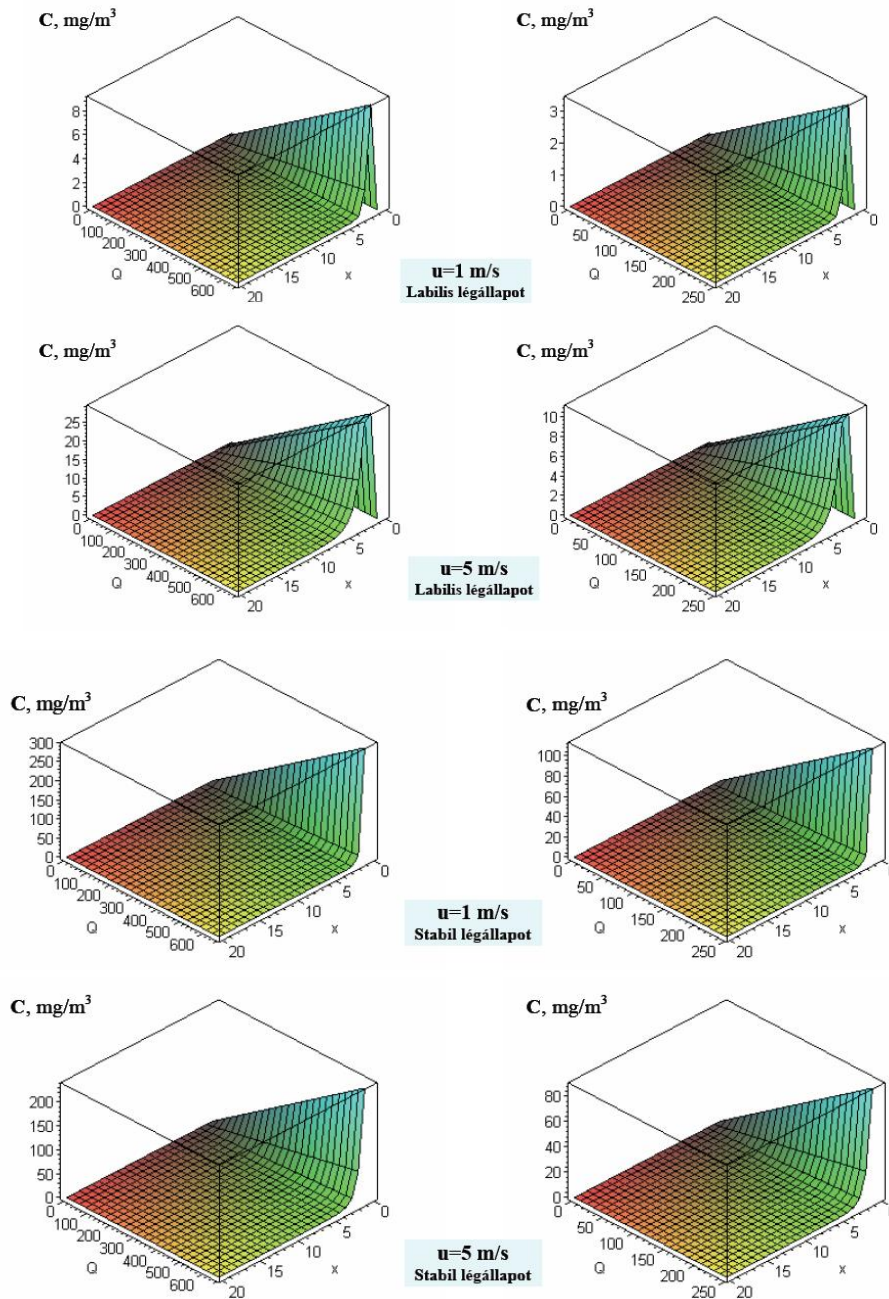
Szeged, 1990. 11. 13. Régi híd	B1/1 modell	B1/2 modell
Átlagos CO kibocsátás:	Q=657 mg/s	Q=657 mg/s
Effektív kibocsátási magasság:	H=0,5 m	H=0,5 m
Szélesség:	u=1 m/s (szélcsend)	u=5 m/s
Érdességi paraméter:	Z=2 (város)	Z=2 (város)
Stabilitási jellemzők:	Labilis (A, B, C)	Labilis (A, B, C)
Szélprofil kitevő:	p=0,079	p=0,079
Korrekciós tényező:	k=0,6	k=0,6

Szeged, 1990. 11. 13. Régi híd	B1/3 modell	B1/4 modell
Átlagos CO kibocsátás:	Q=657 mg/s	Q=657 mg/s
Effektív kibocsátási magasság:	H=0,5 m	H=0,5 m
Szélesség:	u=1 m/s (szélcsend)	u=5 m/s
Érdességi paraméter:	Z=2 (város)	Z=2 (város)
Stabilitási jellemzők:	Stabil (F– inverzió)	Stabil (F– inverzió)
Szélprofil kitevő:	p=0,440	p=0,440
Korrekciós tényező:	k=1	k=1

Szeged, 2000. 06. 29. Régi híd	B2/1 modell	B2/2 modell
Átlagos CO kibocsátás:	Q=248 mg/s	Q=248 mg/s
Effektív kibocsátási magasság:	H=0,5 m	H=0,5 m
Szélesség:	u=1 m/s (szélcsend)	u=5 m/s
Érdességi paraméter:	Z=2 (város)	Z=2 (város)
Stabilitási jellemzők:	Labilis (A, B, C)	Labilis (A, B, C)
Szélprofil kitevő:	p=0,079	p=0,079
Korrekciós tényező:	k=0,6	k=0,6

Szeged, 2000. 06. 29. Régi híd	B2/3 modell	B2/4 modell
Átlagos CO kibocsátás:	Q=248 mg/s	Q=248 mg/s
Effektív kibocsátási magasság:	H=0,5 m	H=0,5 m
Szélesebesség:	u=1 m/s (szélcsend)	u=5 m/s
Érdességi paraméter:	Z=2 (város)	Z=2 (város)
Stabilitási jellemzők:	Stabil (F– inverzió)	Stabil (F– inverzió)
Szélprofil kitevő:	p=0,440	p=0,440
Korrektációs tényező:	k=1	k=1

A B. modell ugyanazon csomópont CO légszennyezési állapotát írja le különböző időpontokban, a tényleges forgalom alapján – emisszió modellel – számított Q kibocsátások esetén. Az éppen uralkodó széliránynak megfelelően értelmezve x irányát, x távolság függvényében számolhatók és ábrázolhatók a koncentrációértékek. A modell a vizsgált szektorban egy átlagos koncentráció értéket számol, amely a Gauss függvény alatti terület átlagának tekinthető. A legnagyobb a koncentráció a csomópont képzeletbeli középpontja közvetlen környezetében, a távolság növekedésével csökken. Különböző Q értékekre létrejövő függvényalakzat Q=állandó szintvonalak segítségével is tanulmányozható. A modell jól mutatja a légköri stabilitástól való érzékenységet. Labilis állapot esetén a füstgáz felfelé haladásának nincs akadálya, így a vizsgált térrészből való kikerülés gyors, inverzió esetén a koncentráció kritikussá válhat.



**10. ábra** A CO szennyezés eloszlása  $x$  és  $Q$  függvényében, szabványos transzmissziós modell számítás eredménye (Szeged, Bertalan híd szegedi hídfő –1990, 2000) [Szerkesztette: Pitrik J.; Jelölés:  $Q$ –kibocsátás, mg/s;  $x$ –forrástól való távolság, m;  $C$ –koncentráció,  $\text{mg}/\text{m}^3$ ]

A 10. ábra kép-párjait megfigyelve az alábbiak tapasztalhatók:

- ◆ – 10 év alatt a forgalmi környezet átalakulás és a járműpark kicserélése következtében a gépjárműforgalom CO kibocsátása 657 mg/s-ról 248 mg/s-ra csökkent;
- ◆ – Kedvező, labilis légállapot és szélcsend esetben a legkedvezőtlenebb állapot ~ 3–4 m távolságra, azaz a járda területén képződik. Az 1999-es adatokkal a

koncentráció értéke  $8 \text{ mg/m}^3$ , míg a 2000-es adatokkal  $3 \text{ mg/m}^3$ . A levegőminőségi határérték figyelembe vehető értéke (védett I. övre)  $10$  illetve  $5 \text{ mg/m}^3$ , ha 30 perces illetve napi normát tekintjük. Kiemelten védett övet feltételezve  $5$  illetve  $2 \text{ mg/m}^3$  értékkel kell összevetni a modelleredményt. Látható, hogy a lényegileg ebben a „kedvező” esetben is az immisszió értékek a megengedhetőség határán vannak.

- ◆ – Labilis légállapot és nagyobb szélsébség esetén azt várnánk, hogy az értékek a kedvező tartományba tolódnak, mégsem ez történt. Mindkét esetben rendkívül kedvezőtlen légállapot alakul ki:  $25/10 \text{ mg/m}^3$  értékben. Ez azzal magyarázható, hogy az effektív kibocsátási magasság alacsony, a beépítettség által befolyásolt szél visszatorlódásokat okoz. Ezt a modellt az érdességi paraméter figyelembevétele is befolyásolja.
- ◆ – Stabil légállapot esetén rendkívül kedvezőtlen immisszió szintek alakulnak ki. Szélcsendre a  $300/100 \text{ mg/m}^3$ , erősebb szél esetén:  $200/80 \text{ mg/m}^3$  érték számolható. Ezek az értékek a megengedhető normáknak (a legkedvezőbb határértéket figyelembe véve is)  $\sim 8$ – $30$ -szorososa. Ebben a légállapotban a szél kedvező hatása már egyértelműen érzékelhető.
- ◆ – Látható, hogy átlagos beépítettség esetén is döntő befolyást gyakorolnak a szennyezetségi állapotra a meteorológiai viszonyok. Különösen a légállapot és a szélsébség hatása fontos. Ezen jellemzők kapcsolata a városklímával, a beépítettséggel és a felszíni tagoltsággal ismert. A szélsébségtől való függés azt mutatja, hogy a zárt beépítést csökkenteni kell, hogy a lokális turbulencia növekedjék.

A közlekedési modellek képzésének két olyan változatát mutatta be a fenti elemzés, amely egy napra készen karbantartott emissziós alapadatrendszer és egy rövid vizsgálati idejű ( $\sim 10$  perc) forgalomszámlálás alapján ad számítási módszert a településre jellemző járműösszetétel alapján az órai emissziók kiszámítására. Az emisszióadatokat alapján a mellékelt Maple programok segítségével szemléltethetők és számíthatók a szennyezetségi értékek különböző be-meneti feltételek esetén.

A bemutatott modellek jó összefüggésben vannak a vizsgált időszakban mért CO immisszió értékekkel. Az időjárási viszonyok gyors megváltozása és a forgalom ingadozása következtében  $\sim 40\%$ -ban olyan szennyezetségi értékek mérhetők, melyek a norma fölé estek.

A modellrendszer természetesen alkalmas más szennyezőanyagok számítására is, de ezek emisszióadataiban – jármű adathiányok miatt – nagyobb a bizonytalanság.

A modell további finomításával lehetőség nyílik arra, hogy az emisszió modell mind nagyobb pontossággal közelítse a tényleges kibocsátási értékeket, így korrektebb adatbázisokat használhassunk a városi közlekedési problémák megoldásához.

## **8. A SZAG ÉS CSÖKKENTÉSE**

A levegőtisztaság-védelem egyik speciális területe a légkörnek a különböző szaganyagokkal, bűzös gázokkal történő szennyezése és az ez elleni védekezés. Az egyes légszennyező források szagkibocsátásával kapcsolatban szinte mindenkinek van valamilyen saját élménye. A lakott területhez túl közel vagy az uralkodó szélirány figyelembe vételének mellőzésével elhelyezett szagforrások (például vegyi, élelmiszeripari üzemek, állattartó telepek, stb.) ezen sajátosságait a közelében lakók különösen jól ismerik.

Ezt a problémát fokozhatja például az is, hogy a hazai mezőgazdaságban végbemenő szerkezetátalakulás eredményeképpen megjelenhetnek a lakott terület közelében is olyan kis- és közepes gazdaságok, amelyek állattartással is foglalkoznak.

A következő fejezetben az egyes légszennyező források által kibocsátott szaganyagokról, ezek egészségügyi hatásairól, a szagkibocsátás méréséről, valamint a szagkibocsátás csökkentési lehetőségeiről lesz szó.

### **8.1. Szaganyagok**

Egyes légszennyező forrásokból távozó gázok és gőzök jelentős része igen intenzív szaggal rendelkezik. A bűzös gázok között megtalálhatók például aldehidek, merkaptánok, ketonok, aminok, kis molekulájú zsírsavak, észterek, szerves savak, egyszerű és aromás kéntartalmú vegyületek. Ezek a szaganyagok a kibocsátást tekintve általában kis mennyiségűek, de már igen kis koncentrációban is jelentős szaghatást okoznak a szagforrások környezetében. A műszeres koncentráció-méréssel párhuzamosan végzett érzékszervi vizsgálatok eredményeképpen meghatározták az egyes szaganyagok szaglási küszöbértékét (szaglási határ), amely azt a szaganyag koncentrációt jelenti, amelyet egy „átlagos orral rendelkező” ember már érzékelni tud. Az elvégzett vizsgálatok során az is világossá vált, hogy a keletkezett szag mértékét, bűzös gázok keveréke esetén nem lehet az egyes alkotók koncentrációjával jellemezni. A szaghatást kiváltó összetevők meghatározása során ugyanis kb. 400 féle, szaghatást okozó vegyületet különítettek el. Ezeknek, mint szaganyagoknak a bonyolult keveréke eredményezi általában a szagforrásokból kikerülő szagot, de nem ismert, hogy a keverékek összetevői hogyan hatnak egymásra.

A **16. táblázat** néhány szaganyag, ezek szagának jellege és az általuk okozott szag szagküszöbértéke látható.

**16. táblázat. Néhány szaganyag, ezek szagának jellege és az általuk okozott szag szagküszöbértéke**

Vegyület	Szagküszöb érték [ppm]	Szag jellege
Allil merkaptán	0,005	Fokhagymaszerű
Ammónia	20	Szúrós
Krotíl-merkaptán	0,002	Görényszag
Kén-hidrogén	0,1	Záptojás
Metil-szulfid	0,002	Rothadt zöldség
Piridin	5	Irritáló
Szkatol	3	Bélsár
Tiofenol	0,005	Hányingert keltő

A szaganyagok meghatározása, a szag és az azt okozó anyag összepárosítása rendkívül nehéz feladat. A bűzös anyagok azonosítására, mennyiségi meghatározására leggyakrabban használt módszer a gázkromatográfiás elemzés. Ennek során szétválasztott anyagok érzékelésére és azonosítására lángionizációs detektort használnak. A kvalitatív kiértékelést a tömegspektrométeres vizsgálatokkal lehet még biztosabban megalapozni.

## 8.2. A keletkező szaganyagok hatásai

A légszennyező források szagkibocsátása gyakran okoz problémákat a szomszédság és a forrás tulajdonosa, a termelő között, mivel a kibocsátott szaganyagok a környezetben felhígulnak ugyan, mégis akár több ezer méterre is érezhetők. Ezt igazolják a konkrét méréseken alapuló légköri terjedési szimulációk is. Arra vonatkozóan, hogy mi is a szag, amely a szomszédsági problémákat kiváltja, álljon itt egy idézet: „A szag nem egy anyag tulajdonsága vagy jellemzője, hanem az anyag által az emberekből kiváltott reakció”.

Ahhoz, hogy egy anyag szaghatást okozzon (az érzékszervvel a jelenlétét észleljük) az szükséges, hogy koncentrációja a szagküszöbérték szintjét elérje, víz- és zsíroltható legyen, és valamely „szaghordozó” kémiai csoporthoz tartozzon. A korábban már említetteknek megfelelően a kibocsátó forrásokból származó szag esetén általában nagy számú bűzös anyag



keverékéről van szó. Nem csak a szag intenzitása, hanem elsősorban a szag minősége is a keverék alkotóitól függ. A szagérzet és a kialakuló reakciók emóciókkal és emlékekkel párosulnak, és ezekkel magyarázhatók.

Az immisszió oldaláról szemlélve a dolgot éppen azok a szagok bizonyulnak megterhelőnek és zaklatónak, amelyek kedvezőtlen időpontban fejtik ki hatásukat: például akkor, amikor egy család a vasárnapi ebéd után a kertben üldögél. Az éppen munkát végző ember viszont nem reagál olyan erősen a kellemetlen szagokra. Az egyéni jellemzők, mint a kor, a nem, a szaglóképesség és az idegi állapot jelentősen befolyásolják a szag hatására kiváltott reakciót: amíg az egyik személy még semmit sem érez, addig a másik már úgy érzi, hogy „megmérgezték”. Ez utóbbi esetben alakulhatnak ki olyan stressztünetek, amelyek azt tükrözik, hogy az érintett személy szerint az adott szagterhelés számára már elviselhetetlen, illetve hatását nem tudja feldolgozni.

Az állattartásból, illetve egyéb forrásból származó szaganyagok által a forrás környezetében élő lakosokra gyakorolt hatások és a kiváltott reakciók feltárása, vizsgálata az 1970-es évek elején kezdődött meg. Az elvégzett vizsgálatok, megfigyelések, tapasztalatok alapján általánosan megállapítható, hogy a szaghatással bíró anyagok általában nem okoznak közvetlen megbetegedést vagy egészségkárosodást, hanem a kiváltott reakciók útján az ember közérzetére hatnak károsan.

### **8.3. A szagkibocsátás meghatározása**

A korábban említetteknek megfelelően a szaganyagok jellemzői, az immisszió előforduló koncentrációi jelentősen nehezítik az anyagok azonosítását. Ezeken túl a szag „nagyságának”, koncentrációjának mikroanalitikai mérése a következő további nehézségekbe ütközik:

- ◆ a mikroanalitikai vizsgálatok hosszú időt vesznek igénybe, az eredményekre a szaggal kapcsolatos vitás esetekben viszont gyorsan szükség lenne
- ◆ a mikroanalitikai vizsgálatok anyag- és műszerigényessége igen költségessé teszi a vizsgálatokat, ezt csak fokozza, hogy ezeket csak laboratóriumi körülmények között lehet végrehajtani
- ◆ egyes komponensek koncentrációja gyakran a mérési határ alatt van
- ◆ az egyes komponensek koncentrációiból nem lehet a ténylegesen kialakuló szag jellegére és nagyságára következtetni (nem ismertek például a gázok szinergikus hatásai).

Ezen mérési nehézségek következtében a szag „nagyságának”, a szennyezett levegő szagkoncentrációjának meghatározására az érzékszervi vizsgálat bizonyult a legalkalmasabbnak. A mérések során a „mérőműszer” maga az emberi orr. A vizsgálat során nem az egyes komponensek koncentrációjának mérése történik, hanem a szagkeverék szaghatásának értékelése.

### **8.3.1. A szag mérése érzékszervi vizsgálatlaltal**

Valamely szag nagyságának érzékszervi vizsgálatlaltal történő „mérésekor” komoly nehézség, hogy a kiértékelő „műszer” az érzékelő személy orra (az orrban lévő „szagfelfogó készüléktől” a szagérzetet felfogó agyrészletig), amely ugyan lehetővé teszi a szubjektív érzékelést, de nehezen alkalmazható objektív értékelő berendezésként. Az is nehezíti az ilyen módon történő mérést, hogy az értékelő személynek a szagérzete folyamatos szagterhelés hatására csökken, azaz az érzékelő személy orra elfárad, hozzászokik a vizsgált szaghoz. Ezeket a szempontokat az objektív mérési eredményt adó mérési módszer kifejlesztésekor figyelembe kellett venni.

Az alkalmazott legegyszerűbb módszer a közvetlen szagészlelés volt. A vizsgálatot végző személyek kivonultak az adott helyszínre és ott eldöntötték, hogy az esetleges panaszoknak megfelelően éreznek-e valamilyen, a szagforrásnak (például az állattartó épületnek, vegyi üzemnek) tulajdonítható szagot. A módszer előnye volt, hogy a szag észlelésének körülményei megközelítették azokat a feltételeket, amelyek mellett a szagok elleni panaszok kialakultak.

Az ilyen módon elvégzett szagmérésekkel azonban több probléma is volt. Nehéz volt kiválogatni az „átlagos orral” rendelkező embereket. Kérdés volt a mérések reprodukálhatósága is, 2 – 3 mérési sorozat után a vizsgáló személyek orra fokozatosan hozzászokott a vizsgált szaghoz, a szaghatást egyre kisebb mértékűnek jelölték meg. A vizsgált környezet egyes jellemzőinek pszichológiai hatásai (például vizuális hatás, zaj) hátrányosan befolyásolták a mérés végrehajthatóságát.

A bűzmérés ma is elfogadott és alkalmazott módszerének kialakításakor az orvostudomány sietett a kutatók segítségére. A szaglász (olfactio) érzékenységének vizsgálatára, orvosi célokra dolgozták ki az olfaktometria módszerét, és a mérés végrehajtására alkalmas berendezést. Ezt az eljárást vették át a szaghatász méréseivel foglalkozó szakemberek az objektív szagmérés elvégzéséhez.

### 8.3.2. A szagkoncentráció mérése dinamikus olfaktométerrel

A szagmérésre jelenleg alkalmazott berendezés gyakorlatilag nem más, mint egy precíziós gázkeverő készülék, amelynek az érzékelője továbbra is az emberi orr. A vizsgálandó bűzös levegőt semleges referenciagázzal (ez lehet tiszta, szagmentes levegő vagy oxigéngáz) hígítják egyre csökkenő mértékben mindaddig, amíg a mérő személy a detektálásra kiépített orrmaszokban megérzi a szag megjelenését. A csökkenő mértékben történő hígítás kiküszöböli az orr elfáradásának lehetőségét. A készülékkel meg lehet határozni a különböző szagok szagküszöbértékét, a szagkoncentráció nagyságát.

A mérési eljárásnak két típusa ismeretes.

A statikus olfaktometriában a vizsgálandó gázmintát a mérés előtt, adott mértékben hígítják, és ezt a mintát vizsgálják a mérő személyekkel.

A dinamikus olfaktometriában valamely állandó mennyiségben áramló referenciagázhoz növekvő mértékben keverik az ugyancsak áramló bűzös gázt mindaddig, amíg a mérő személy (az „orr”) megérzi a szag megjelenését. A készülék tulajdonképpen gázsugár-szivattyúként működik, az áramló referenciagáz szivattyúzza a mérési helyről a bűzös levegőt. Amikor az „orr” jelzése alapján a szag az orrmaszokban megjelenik, megállapítják az áramlási paramétereket, és ezekből meghatározzák a szagintenzitásra jellemző hígítási számot, amelyet Zwaardemaker tiszteletére  $Z'$  -vel jelölnek:

$$Z' = \frac{V_m + V_h}{V_m}$$

ahol:  $V_m$  - a mintagáz, a bűzös levegő térfogatárama [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],

$V_h$  - a hígítógáz (referenciagáz) térfogatárama [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],

$Z'$  - a hígítási szám [1]

Ha a  $Z'$  értéket egységnyi térfogatban lévő szaganyagra vonatkoztatjuk, megkapjuk a szagkoncentrációt, amelynek mértékegysége szagegység/ $\text{m}^3$  [SZE/ $\text{m}^3$ ], jelen  $Z$ :

$$Z = Z' * c_0 \text{ [SZE/ m}^3\text{]},$$

ahol:  $Z$  - a szagkoncentráció [SZE/ $\text{m}^3$ ],

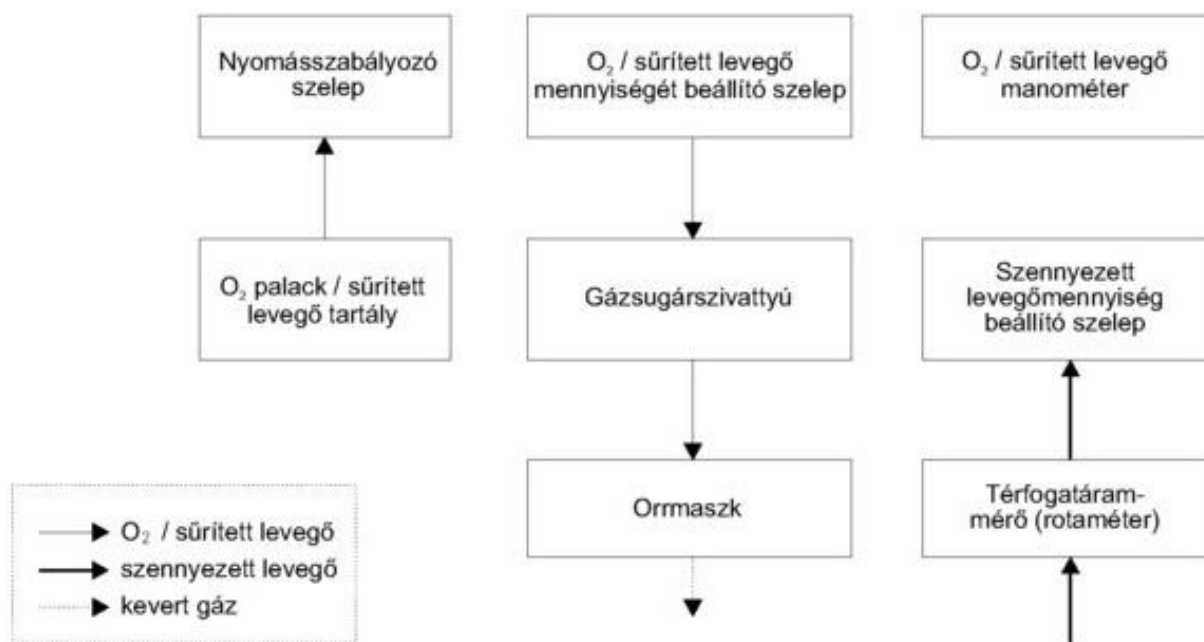
$Z'$  - a hígítási szám [1],

$c_0$  - a szagküszöbnél mért szagkoncentráció [1 SZE/ $\text{m}^3$ ].

Az 1 SZE/ $\text{m}^3$  az a szaganyag mennyiség, amely 1  $\text{m}^3$  neutrális levegőben még éppen/vagy már szagérzetet vált ki a vizsgálandó végző személyek 50 %-ánál. A kapott mérőszám oly módon

fejezi ki a bűzös levegő szaghatásának mértékét, hogy megadja azt a hígítási arányt, amely mellett a szennyezett levegő szagát még/már éppen meg lehet érezni. Az adott minta szagkoncentrációját a mérő személyek által megjelölt szagkoncentrációk átlagaként a mérésvezető határozza meg.

A dinamikus olfaktométer működési blokkdiagramját a **11. ábra** mutatjuk be.



**11. ábra** Dinamikus olfaktométer működési blokkdiagramja

A **17. táblázat** néhány bűzös technológia szennyezett levegőjének szagkoncentrációját mutatja

**17. táblázat. Néhány bűzös technológia szennyezett levegőjének szagkoncentrációja**

Technológia	Szagkoncentráció [SZE/m <sup>3</sup> ]
Állati takarmányfehérje előállítása	200 – 600
Bélfeldolgozás	150 – 400
Alkalmazott szarvasmarhatartás	10 – 70
Sertéstartás rácspadozaton	40 – 100
Mélyalmos baromfitartás	10 – 90

A jelenleg alkalmazott legkorszerűbb olfaktométer a H. Mannebeck által kifejlesztett T07 típusú olfaktométer. A berendezéssel végzett mérések során egyszerre 4 személy végezheti a felkínált szagminta értékelését, a hígítás minden egyes minta felkínálása után a felére csökken. Amikor valamely, a vizsgálatban résztvevő személy az orrmaszokban megérzi a szag

megjelenését, ezt egy gomb megnyomásával jelzi. A mérést az olfaktométerrel egybeépített számítógép irányítja, amely a beállított mintákra adott válaszok alapján állítja be az újabb hígítást, illetve állítja le a mérést és értékeli a mérés eredményét, amelyet egy nyomtató segítségével jegyzőkönyv formájában dokumentál. A T07-es olfaktométer  $1 - 10^6$  SZE/m<sup>3</sup> méréstartományban használható.

Fontos kérdés a mérésben résztvevő személyek számának meghatározása. A magyar szabvány a hígítási szám meghatározásához 8 mérőszemély részvételét írja elő, a vizsgálatkor állandó szagkibocsátású vizsgált szagforrás esetén 3 mérési sort kell elvégezni a mérő személyekkel, változó szagkibocsátás esetén, pillanatnyi viszonylagosan állandónak tekinthető kibocsátás mellett egy mérési sort.

További fontos kérdés a mérést végző személyek kiválasztása. A kiválasztásra vonatkozó magyar szabvány a mérés során átlagos szaglóképességű személyek közreműködését írja elő.

A mérésre alapvetően a következő személyek alkalmasak:

- ◆ 18 – 50 év közötti életkorúak
- ◆ nem szenvednek meghűléses megbetegedésben
- ◆ a mérés időpontja előtti 30 percben nem étkeztek, dohányoztak; a vizsgálat napján nem fogyasztottak erősen fűszeres ételt
- ◆ nem használtak a mérést megelőzően erős illatú kozmetikumot.

A mérés elvégzése előtti szaglóképesség vizsgálat során 10 ismert szaganyag közül 5 db szaglásra felkínált mintát kell a vizsgált személynek azonosítani. Az azonosítás helyességét pontozással kell minősíteni, és ennek alapján lehet meghatározni a személy mérésre való alkalmasságát.

Az utóbbi időben több vizsgálat és fejlesztés is történt a szubjektívnek mondott mérési módszer helyettesítésére. Ezen fejlesztési munka során olyan „mesterséges orr” kialakítására törekedtek, amely az emberi orr működési elvén alapulva (10 alapszag érzékelésére alkalmas receptorok, ezek együttes ingerei alakítják ki a szagérzetet; ilyen módon az ember kb. 1000 szag között tud különbséget tenni) határozza meg a szag nagyságát. A mérőműszerbe beépített 39 különféle gázérezkelő mikroanalizátort saját szelektív membrán mögött helyezik el, és csupán a szagkeverék egyes alkotóinak mérését végzi. A mérési eredmény az egyes analizátorok által kialakított jelek összesítésével alakul ki. A berendezés 30\*30 mm-es mikroprocesszor, amelybe a gázérezkelőket is beépítették, és amely a mérés értékelését is elvégzi.

### 8.3.3. A szagkibocsátás meghatározása

A szagkibocsátás meghatározásához a szennyezett levegő szagkoncentrációjának megállapításán kívül szükséges a szennyezett levegő térfogatáramának meghatározása is.

A szennyezett levegő térfogatáramát a hordozógáz áramlási sebességének mérése után számítással kell meghatározni. Az áramlási sebesség megmérhető Prandtl-csővel vagy anemométerrel. A térfogatáram ezután a következő képlettel számítható ki:

$$V_m = v * A \text{ [m}^3\text{/s]},$$

ahol:  $V_m$  - a szennyezett levegő térfogatárama [ $\text{m}^3\text{/s}$ ],

$v$  - a szennyezett levegő áramlási sebessége [ $\text{m/s}$ ],

$A$  - az áramlási keresztmetszet [ $\text{m}^2$ ].

A szennyezett levegő térfogatáramának ismeretében a szagkibocsátás:

$$E = Z * V_{sz} \text{ [SZE/s]}$$

ahol:  $E$  - a szagkibocsátás [ $\text{SZE/s}$ ],

$Z$  - a szagkoncentráció [ $\text{SZE/m}^3$ ],

$V_{sz}$  - a szagszennyezett levegő térfogatárama [ $\text{m}^3\text{/s}$ ].

Az egyik legjellemzőbb szagforrás, az állattartás esetén ahhoz, hogy az egyes állatfajok, a különböző korcsoportok és a tartástechnológiai megoldások szagkibocsátása összehasonlítható legyen, szükséges egy, a tartott állatok testtömege alapján meghatározható fajlagos szagkibocsátási mennyiség bevezetése. A témával kapcsolatos német, angol, dán szakirodalom egységesen a számosállatot, mint testtömeg átszámítási alapegységet használja fel a fajlagos szagkibocsátás meghatározásához. Egy számosállat (SZÁ) 500 kg-nyi élő testtömeget jelent. Ennek alapján a fajlagos szagkibocsátás:

$$E' = \frac{V_{sz} * Z}{n} \text{ [SZE/s * SZÁ]}$$

ahol:  $E'$  - a fajlagos szagkibocsátás [ $\text{SZE/s * SZÁ}$ ],

$Z$  - a szagkoncentráció [ $\text{SZE}/\text{m}^3$ ],

$V_{sz}$  - a szagszennyezett levegő istállóból kilépő összes térfogatárama [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],

$n$  - az istállóban tartott állatok összes testtömege [ $\text{SZÁ}$ ].

#### **8.4. A szagkibocsátás csökkentésének lehetőségei**

A szag kibocsátásának csökkentésére két alapvető módszer alkalmazható: az aktív illetve a passzív (end of pipe) eljárások. Az aktív megoldások esetén már a technológiai tevékenység során csökkentjük vagy megakadályozzuk a szaganyagok keletkezésének lehetőségét. Ez a szagforrások (bűzös technológiai tevékenységek) jellemzőinek megváltoztatásával érhető el. A passzív eljárások lnyege az, hogy a kibocsátó forrásból kilépő szennyezett levegőt utólagos kezeléssel tisztítjuk meg a szennyező anyagoktól.

##### **8.4.1. A szagkibocsátás csökkentésének aktív módszerei**

A korábban említettnek megfelelően a szagkibocsátás elleni aktív védelemről beszélünk, ha a technológiai folyamatban a szagszennyező anyag keletkezési lehetőségeit csökkentjük, megakadályozzuk (például zárt technológiai folyamattal, megfelelő alapanyag megválasztással, technológiai változtatással). Az aktív védekezés lehetőségei igen széles körűek, a szinte költség nélküli gondos üzemeltetéstől a teljes rekonstrukciót követő technológia-váltásig. Amennyiben az adott termelési tevékenységnél, technológiánál felmerül a szagkibocsátás elleni aktív védelem kérdése, az adott feltételek mellett kell megpróbálkozni a szakirodalomban részletesen tárgyalt, már kipróbált megoldások adaptálásával. A következőkben a teljesség igénye nélkül érzékeltetni kívánjuk az egyik legjellemzőbb szagforrás, az állattartás területén a szagkibocsátás csökkentésére vonatkozó aktív megoldási lehetőségeket.

A szag kialakulását, a keletkezett szaghatás nagyságát állattartás esetén a következő tényezők befolyásolják:

- ◆ a tartott állat fajtája, faja
- ◆ a tartási mód: almozatlan, kötött, kötetlen
- ◆ a takarmányozás módja
- ◆ a takarmány minősége

- ◆ az alom (trágya) minősége, nedvességtartalma, a beszórt alom minősége, padozat kialakítása (lejtés, vizelet és csurgalékvíz elvezetése), itató berendezések üzemeltetése, etető berendezések üzemeltetése
- ◆ a trágyaeltávolítás gyakorisága.

A tartástechnológiai jellemzők szagkibocsátásra gyakorolt hatásainak vizsgálata során megállapították, hogy például az etető és az itató berendezések helyes üzemeltetésével, megfelelő fűtési és szellőztetési rendszer kialakításával a szaganyagok keletkezési intenzitása, és így az állattartó épület szagkibocsátása jelentősen csökkenthető.

#### **8.4.2. A szagkibocsátás csökkentésének passzív módszerei**

A különböző bűzös technológiák által okozott szaghatás csökkentésével kapcsolatosan felmerült passzív megoldási lehetőségek a következők:

- ◆ adszorpció különböző anyagokon (például aktív szénen)
- ◆ mosóeljárás különböző lúgos vagy savas oldatokkal, esetleg vízzel
- ◆ ózonizálás
- ◆ fedés, közömbösítés
- ◆ szagemisszió szétszórása a légkilépő-nyílás magasságának emelésével
- ◆ biológiai végtisztítási lehetőségek (biomosók, bioszűrők).

A szagkibocsátás csökkentésére irányuló passzív megoldások a legtöbb esetben igen költségesek vagy egyéb, például másodlagos szennyezési problémákat vetnek fel (mosófolyadék regenerálása, kezelése, szűrők elhelyezése, regenerálása, stb.). Az üzemi tapasztalatok alátámasztják, hogy alkalmazhatósága esetén a szaghatás csökkentésére a jelenleg legalkalmasabb passzív megoldás a biológiai gáztisztítás.



## 9. HULLADÉKLERAKÓK OKOZTA LÉGSZENNYEZÉS

A levegő tisztaságának egyre nehezebben tolerálható – és a globális felmelegedés korábban részletezett bekövetkezési valószínűsége miatt világméretű katasztrófával fenyegető – szennyezése mellett a környezetvédelem ma talán második helyre sorolható igen súlyos problémája és megoldásra váró feladata az egyre fokozódó mértékű „hulladéktermelés”, a szeméthegek növekedése, a szanaszét dobált legkülönbözőbb hulladékok élővilágra gyakorolt egészségkárosító és toxikus hatásai. A környezetvédők – és minden előrelátóan gondolkodó polgár – mind hangosabb figyelmeztetése ellenére a legtöbbször igen rövid távú felhasználás után hulladékká váló anyagok hovatovább beborítják az országot, a belőlük képződő káros anyagok szennyezik földünket, használhatatlanná teszik vizeinket, megkeserítik életünket.

A hulladékgazdálkodás önmagában természetesen nem a levegőtisztaság-védelem feladata, a hulladékok elhelyezése, a hulladéklerakók üzemeltetése során azonban számos szennyező anyag kerül a levegőbe, amelyekkel sajnos foglalkoznunk kell. Ebben a fejezetben röviden ismertetjük a hulladéklerakók kialakítását, a művelésükkel létrejövő légszennyezést, valamint a lehetséges védekezési módokat.

### 9.1. A hulladékok fajtái, a hulladéklerakók

Szokásos értelemben vett hulladék kizárólag emberi tevékenység révén keletkezik. A természetes anyagok pusztulásakor vagy további természetes anyagok képződnek, vagy a szerves (élő) anyag lebomlásakor olyan elemek és vegyületek jönnek létre, amelyek a környezet természetes alkotóelemei, azokat a természet károsítás nélkül „újrahasznosítja”.

Az antropogén szennyező anyagokat, a hulladékokat két nagy csoportra osztjuk: veszélyes és nem veszélyes hulladékokra. A veszélyes hulladékok – elnevezésük is utal rá – fokozott kockázatot jelentenek az élő és az élettelen környezetre, különös gondossággal és csak a veszélyes hulladékokra vonatkozó jogszabályok előírásai szerint kell eljárni gyűjtésükkor, kezelésükkor, ártalmatlanításukkor. Jelen munkában ezekkel az anyagokkal, elhelyezésükkel, hatásaikkal nem foglalkozunk.

A nem veszélyes hulladékok további két csoportra oszthatók:

- ◆ kommunális (többnyire szerves anyagokból álló) hulladékokra és
- ◆ inert hulladékokra (többnyire építési törmelékek).

A nem veszélyes hulladékok begyűjtését, lerakókban történő elhelyezését ma már szigorú előírások szabályozzák, amelyek közül csak kettőt említünk meg: a 2000. évi XLIII. törvény a hulladékgazdálkodásról, valamint a 22/2001. (X. 10.) számú KöM rendelet a hulladéklerakók üzemeltetéséről és utógondozásáról. Ez utóbbi jogszabály a kommunális hulladéklerakók kialakításán kívül a környezetvédelem szempontjából igen lényeges művelési körülményeket, valamint a lerakás befejezésekor a rekultivációt és a továbbra is szükséges megfigyelési módokat írja elő.

A hulladéklerakók létesítésekor az alábbi szempontokra kell különös figyelmet fordítani:

- ◆ Helykiválasztás – lakott területektől lehetőleg távol, földtani közeget, felszíni és felszín alatti vizeket nem veszélyeztető, megfelelő nagyságú terület
- ◆ Hatásvizsgálat – a kommunális (és veszélyes) hulladéklerakók létesítése mindig hatásvizsgálat köteles tevékenység
- ◆ Alsó műszaki védelem – kialakításának rendje szigorúan szabályozott, a földtani közegek és a felszín alatti vizek védelmére elsősorban
- ◆ Felső műszaki védelem – a művelés befejezését követő rekultiváció módja és rétegrendje
- ◆ Üzemeltetési terv – a mindennapos művelés-üzemeltetés rendje
- ◆ Monitoring – a hatásvizsgálat elbírálása után hatóságilag előírt megfigyelő rendszer a felszín alatti vizek, valamint a levegő minőségének ellenőrzésére
- ◆ Utógondozás – a művelés beszüntetését, a rekultivációt követő rendszeres ellenőrzés (30 évig tartó utógondozás költség-fedezetét már a tervezés-engedélyeztetés során igazolni kell!)

## **9.2. A hulladéklerakók környezetszennyező hatásai**

A hulladéklerakók gyakorlatilag a környezet valamennyi elemét terhelik, és különböző mértékben szennyezik. Vonatkozik ez a már említett levegőn kívül nyilvánvalóan a lerakó alatti földtani közegekre és a felszín alatti vizekre, de a közelben található felszíni vizek sincsenek biztonságban.

A levegőszennyezést alapvetően két szennyező komponens hozza létre: a szilárdak (ezek különféle szerves és szervetlen, inert vagy esetleg mérgező porok) és légneműek (ezek gyakorlatilag a hulladék szerves anyagának bomlásakor a felszínre, majd onnan a levegőbe jutó

gázkomponensek). Megemlítendő még az ún. repszennyezés, amely a hulladéklerakó felszínéről szél által felkapott és továbbított, rendszerint igen könnyű hulladékokból áll. A repszennyezés az élő környezetre általában nem jelent veszélyt, esztétikai hatása azonban igen kedvezőtlen.

A porterhelés hulladéklerakókon általában a hulladékok szállító járműről történő leborításakor, valamint a szabályosan művelt depóniákon az ún. napi takarás (rendszerint agyagos talaj) kiszáradása után a járművek mozgása során kerül a légtérbe.

Különösen nagy mennyiségű – szerencsére túlnyomórészt inert – por képződik építési törmelékek leborításakor, amelyek rendszerint finom szemnagyságúak, ezért a létrejött aerodiszperz rendszer csak igen lassan ülepedik, a légszennyezés viszonylag hosszú ideig megmarad. Védekezni ellene gyakorlatilag nem lehet, hiszen nem lehet locsolórendszert telepíteni minden törmelékkel kiérkező jármű mellé – és bevallhatjuk őszintén, az efféle locsolás ritkán eredményes.

A napi takarás felverődő pora ugyancsak finom, stabil aerodiszperzió létrehozására képes, de a művelésre vonatkozó előírások szerint csurgalékvízzel vagy egyéb vízzel – oldattal történő locsolás a kiporzást jelentős mértékben csökkentheti.

Jegyezzük meg: hulladéklerakókon a porterhelés gyakorlatilag meg nem szüntethető, legfeljebb bizonyos mértékig csökkenthető környezetszennyezés, és ugyanezt mondhatjuk a repszennyezésre is. Lakott területtől viszonylag távol telepített, erdővel övezett lerakók esetében ez a szennyezés azonban ritkán terjed a lerakón túlra, inkább csak az ott dolgozók szempontjából káros.

Alapvetően különbözik ettől a hulladéklerakókban keletkező gázok okozta légszennyező hatás. Ezek a gázok túlnyomórészt könnyebbek a levegőnél, és a nehezebbeket is a légmozgás igen könnyen felemeli a magasabb légrétegekbe, így károsító hatásukat mind a felszínen, mind az atmoszférában kifejtik. Képződő jelentős nagyságrendjük és az általuk kiváltott károk miatt létrejöttükkel, a depóniákon történő mozgásukkal valamint az eltávolítási lehetőségekkel hosszabban foglalkozunk.

### **9.3. A hulladéklerakó-gáz**

Munkánkban a hulladéklerakókban képződő biogázt az egyéb hasonló jellegű és összetételű gázoktól való megkülönböztetésül, továbbá a vonatkozó jogszabály szóhasználata miatt is következetesen hulladéklerakó-gáznak fogjuk nevezni.

### 9.3.1. A hulladéklerakó-gáz képződése

A hulladéklerakó-gáz képződés körülményeit az anaerob bomlás jellemzi, a folyamat számára kedvező közepes (30 - 37°C) hőmérséklet-tartományban. Hasonló anaerob bomlás a komposztálóknak termofil mikroorganizmusokkal is végbemegy, mégpedig gyorsabban, mint a mezofil tenyésztéssel.

Az anaerob bomlás endoterm folyamat.

A kommunális hulladékok szerves anyaga főleg növényi anyag, kémiaiilag cellulóz, különböző hemicellulózok, cellulóz-származékok, egyszerű és összetett cukrok, amelyeket összefoglalóan szénhidrátoknak nevezünk. A növényi eredetű anyagokban kisebb, az állati eredetűekben nagyobb arányban vannak jelen a fehérjék és a peptidek, továbbá zsírok és olajok.

Az említett vegyületek teljes anaerob erjedési folyamatának biokémiája és mikrobiológiája még nem teljesen tisztázott. Az egyszerűsített bomlási ciklus a következőképp szemléltethető.

18. táblázat. Egyszerűsített bomlási ciklus

1. fokozat		2. fokozat
hidrolízis	savképződés	metánképződés
hosszúlánú zsírsavak		
glicerín		metán
↓		széndioxid
		víz
aminosavak		
mono- és diszacharidok		

A hulladéklerakó-gáz képződése alapvetően két szakaszra osztható:

Az első egy fermentációs biokémiai folyamat (savas erjedés), amely nagy molekulájú szerves anyagok lebontását, feltárását jelenti. A lebontást savképző baktériumok és gombák (tejsav, propionsav és vajsavbaktériumok) végzik.

A második szakaszban további baktérium-csoportok az egyszerűbb molekulákat építik le. Így ezek a baktériumok a szerves anyagokat oldható zsírsavakra, alkoholokra, szén-dioxidra, hidrogénre, hidrogén-szulfidra, stb. bontják. A folyamatban alapvetően metánképző baktériumok vesznek részt.

### **9.3.2. A hulladéklerakó-gáz képződését befolyásoló tényezők**

#### **Tápanyag**

A mikroszervezetek számára felvehető, megbontható szerves anyag, amely az életfunkciókhoz szükséges energiamennyiséget biztosítani tudja – lényegében a bontandó hulladék.

#### **Kémhatás**

A fermentatív és metanogén szervezetek a semleges, pH = 7 körüli értéken fejtik ki hatásukat a legkedvezőbben. A gyakorlat azt mutatja, hogy a degradációs folyamatok során felhalmozódó közti-termékek (szabad savak) hatására a pH-érték savas irányba tolódik el (pH = 4 – 5), ennek hatására a fermentatív szervezetek működése teljesen lelassul.

#### **Nedvesség (víz)**

Víz szükséges a mikroszervezetek anyagcseréjéhez, és ez a biokémiai folyamatok közege is. Ezért a tápanyag nedvességtartalma igen fontos tényező. A mikroorganizmusok tevékenységéhez szükséges nedvesség meglehetősen tág határok között mozog. Hulladéklerakók szeméttésében az anaerob bomlási folyamat kedvező mértékű kialakulásához általában 40 – 60 % nedvességtartalomra van szükség.

#### **Hőmérséklet**

A hőmérséklet egy adott mikroorganizmus élettevékenységéhez szükséges abiotikus környezeti tényező. A hulladéklerakó-gáz képződése szempontjából a legfontosabb rendezőfaktor. Ismeretesen mezofil (30 - 35°C) és termofil (50 - 65°C) optimális hőmérsékleti tartományokban hatásukat kifejtő baktériumok. Ez utóbbi esetében a folyamat gyorsabb, és 10 – 20 %-al termelékenyebben zajlik le ugyanolyan szerves anyag lebomlása esetén.

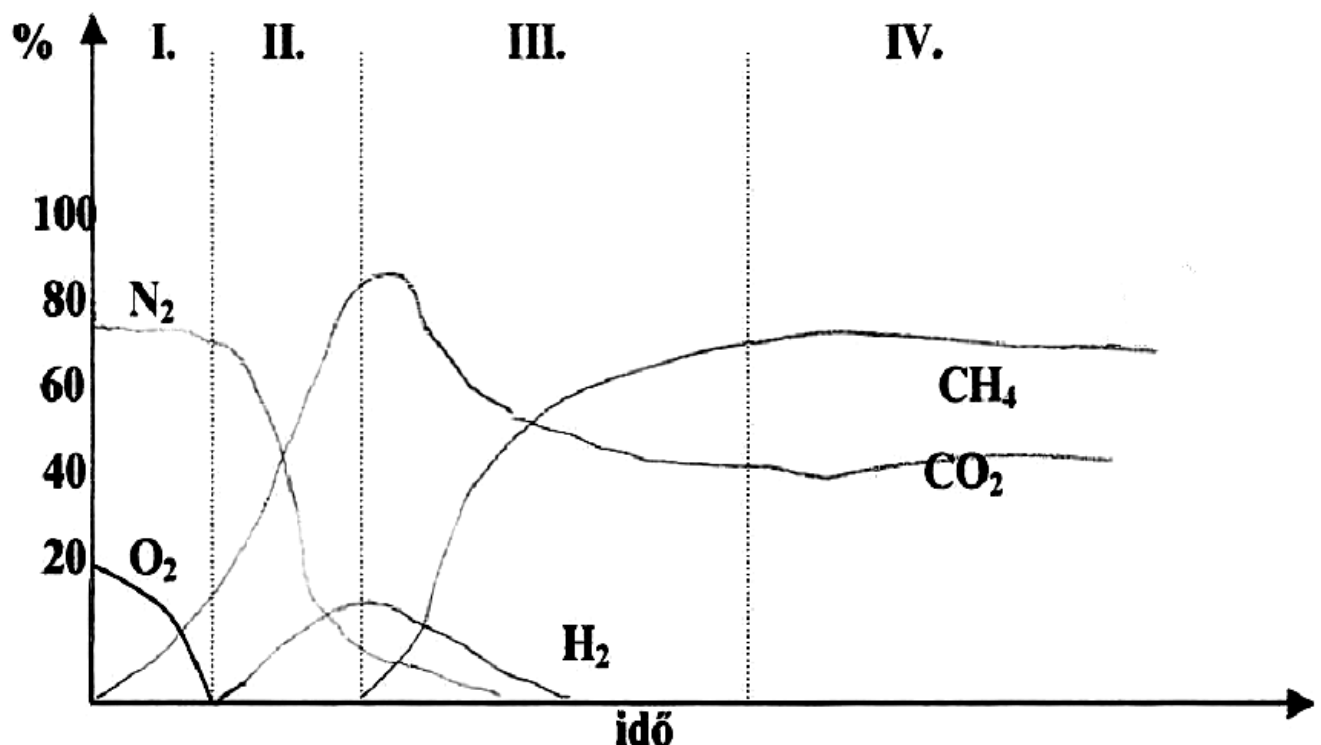
### **9.3.3. A hulladéklerakó-gáz összetétele**

A hulladéklerakókban képződő fermentációs lebomlás eredményeképpen képződő gázkeverék átlagos összetétele a következő.

**19. táblázat. Hulladéklerakókban képződő fermentációs lebomlás eredményeképpen képződő gázkeverék átlagos összetétele**

Gázfélésegek a hulladéklerakó-gázban		max.	min.	Átlag	
	Metán	CH <sub>4</sub>	70	55	66
	Szén-dioxid	CO <sub>2</sub>	44	27	31
<b>Mellékgázok</b>	Hidrogén	H <sub>2</sub>	4	-	Mellék- gázok összesen 3 %
	Oxigén	O <sub>2</sub>	1	-	
	Nitrogén	N <sub>2</sub>	1	0,1	
	Szén-monoxid	CO	4	-	
	Kém-hidrogén	H <sub>2</sub> S	2	-	

A szerves anyag hulladéklerakókban végbemenő fermentatív lebomlásának négy jellegzetes szakasza különíthető el, amelyekben a képződő gázok összetételében lényeges változások következnek be. Százalékos megoszlásban hozzávetőlegesen a következő trendek különíthetők el.



**12. ábra Szerves anyag hulladéklerakókban végbemenő fermentatív lebomlásának négy jellegzetes szakasza**

#### **9.3.4. A képződött gázok eltávolítása a lerakókból**

Az összetevők minőségét megfigyelve megállapíthatjuk, hogy a gázkeveréket elsősorban széndioxid és metán, vagyis a két legfontosabb üveghatás-gáz alkotja. A hulladéklerakók rendszerint tekintélyes nagyságú (5 – 20 ha) felülete diffúz felületi forrásként funkcionál, a szokásos emisszió elleni védekezési módszerekkel a levegő gázszennyezése nem akadályozható meg. Eltávolításukra mégis feltétlenül szükség van, mivel tudjuk, hogy a metán levegővel elegyedve 5 – 15 % koncentráció-tartományban robbanóképes keveréket alkot, amely a lerakó felületén szikraképződés hatására igen brizáns, jelentős kártételt okozó robbanásokat válthat ki. Ezeknek a megelőzése biztonságtechnikai szempontból igen lényeges feladat, hiszen a szeméttesten átmigráló – egyébként gyúlékonyságáról is jól ismert – gáz kedvezőtlen meteorológiai viszonyok fennállása esetén a lerakó felszínén, de a létesítmény épületeiben, építményeiben is összegyűlhet, és kialakulhat a robbanásveszély. Tüzek gyújtása a lerakó felszínén vagy a bomlás hatására esetlegesen létrejövő öngyulladás a szeméttest belsejében ugyancsak rendkívül kockázatos, mivel a felső robbanási határkoncentrációt meghaladó metántartalom esetén a lerakóban felhalmozódott éghető gáz folyamatos égést indukál, amely közönséges – megszokott – oltási módszerekkel nem számolható fel, hiszen az égési folyamat állandó utánpótlást kap metánból. Amennyiben pedig a már képződött gázkeverék metántartalma eléri a robbanási határt, az égés pillanatszerűen robbanásba megy át, amely szétvetheti a szeméttest egészét – amint arra már több havaria bekövetkezése figyelmeztet –, valamint egyéb súlyos, emberéleteket is veszélyeztető következményekkel járhat.

A robbanásveszélyen túlmenően a hulladéklerakó-gáz komponensei között toxikus elegyrészek is megtalálható, gondolunk itt elsősorban a szén-monoxidra és a kén-hidrogénre. Ezen két gázkomponens abszolút mennyisége a keveréken belül nem nagy, mérgező hatásuk viszont jelentős. Mindkét gáz a levegőnél nehezebb, vagyis völgyszerű képződményekben vagy nagyobb mélységű felhagyott bányákban történő hulladéklerakáskor a feltöltés kezdetén, amikor azonban a szerves anyag bomlása már folyamatban van, de a szükséges átszellőzés még nem kellően biztosított, a lerakó alján megülő levegőben emberélet kioltására is alkalmas térfogat halmozódhat fel.

A fejezet elején már hivatkozott hulladékgazdálkodási törvény az üzemeltetők számára kötelező jelleggel előírja, hogy a keletkező hulladéklerakó gáz folyamatos eltávolításáról, majd a feltöltés befejeztével a rekultiváció után összegyűjtéséről, és lehetőség szerint hasznosításáról gondoskodni kell. Üzemeltetés közben a talpra – az alsó műszaki védelemre – telepített és a

feltöltés arányában folyamatosan megemelt kiszellőztető kutakkal végzik a gázok eltávolítását. Egy ilyen kútrendszert a **13. ábra** mutatunk be.



### **13. ábra. Hulladéklerakó-gáz kiszellőztető kútrendszer**

Rekultiváció után a kutakat vezeték-hálózattal össze kell kötni, hogy segítségével a depóniában még folyamatosan képződő gáz leszívathassuk, majd összegyűjtés után – ha lehetséges – hasznosítsuk, vagy pedig elégezzük. Sajnálatos módon a nagy fűtőértékű gázkeverék hasznosítása ma még Magyarországon nem megoldott elsősorban a szükséges kiegészítő tevékenységek – gáztisztítás, a nem állandó összetétel és mennyiség miatti pufferozás, korlátozott működési időtartam, stb. – következtében. Külföldön ezen alternatív energiaforrás elpazarlását általában nem engedik meg maguknak, és például egy-egy nagyobb hulladékbegyűjtő körzetben a lerakókból elszívott, valamint a közös létesítményként elhelyezett szennyvíztisztítókból, a szennyvíziszapok rothasztásából kikerülő gáz-fűtőanyag hasznosítására gázmotorokkal vagy gázturbinákkal működtetett erőműveket telepítenek, és villamos áramot termelnek. Sajnálatos módon ez a fajta hasznosítás sem környezetbarát megoldás, mert a gáz elégetésekor szén-dioxid termelődik, ami ugyancsak környezetszennyező, viszont legalább az egyébként szokásosan még alkalmazott lefaklyázással vagy égető-berendezésben való megsemmisítéssel szemben, ami szintén káros a környezetre, valami haszon is származik a tevékenységből.



A következő képeken bemutatjuk az összegyűjtő vezeték-hálózatot és egy működő égető-berendezést. A befejező két kép azt hivatott szemléltetni, hogy a hulladéklerakó-gáz közelség ártalmatlan, környezetbarát anyag: jól látható agresszív, maró hatása, amely mint a rekultivált felületre telepített növényzetet, mind pedig a kút- és vezetékrendszert, valamint a betont is tönkreteszi.



**14. ábra. Gázgyűjtő vezeték rekultivált hulladéklerakón**



**15. ábra. Hulladéklerakó-gáz égető-berendezés**





***16. ábra. Savas gázmigráció által kipuštított növényzet***



***17. ábra. Az agresszív hulladéklerakó-gáz hatásai***

## 10. A LEVEGŐSZENNYEZÉS ELLENI VÉDEKEZÉS LEHETŐSÉGEI

A környezetszennyezés kellő anyagi ráfordítással elvileg teljesen megszüntethető volna, viszont az országnak indokolatlanul nagy anyagi terheket jelentene. Az emissziók szabályozásának mértéke általában a környezet minőségére vonatkozó társadalmi igények, illetve az ország gazdasági lehetőségeinek kompromisszuma. Tekintettel a levegőtisztaság-védelem jelentős anyagi terheire, az emissziós normák az egyes időszakokban nem lehetnek függetlenek az osztársadalom érdekeitől.

Természetesen egészen más a helyzet a hanyagságból származó nagymértékű környezetszennyezés esetében.

A nagymértékű légszennyezettség csökkentésére több alternatív lehetőség ismert, ilyenek például az energiahordozók struktúrájának megváltoztatása, a tüzelőanyagok vagy a füstgázok kéntelenítése, porleválasztás, zárt technológiák alkalmazása, gáztisztítás, az üzemek áttelepítése, a gépkocsik emisszió-szabályozása.

Rendkívül fontos, hogy a tisztításra olcsó és hatékony megoldást találjunk, mivel a tisztítás mértékét nem gazdaságossági megfontolások, hanem környezetvédelmi előírások határozzák meg, ugyanakkor a tisztítási hatásfok növelésével az eljárás költsége nem lineárisan, hanem exponenciálisan nő.

A tisztítási módszer kiválasztásakor nem elegendő csak azt vizsgálni, hogy a káros komponensek megfelelő mértékben eltávolíthatóak-e, hanem arról is dönten kell, hogy az elválasztott komponensekkel a továbbiakban mi történjék.

A tisztítási eljárás szerint a következő esetek lehetségesek:

- a szennyező anyagokat ártalmatlan anyagokká alakítjuk – ez végleges megoldás (például szénhidrogének termikus vagy katalitikus égetéssel szén-dioxiddá vagy vízzé alakítása)
- a szennyező anyagokat hasznosítható alakban nyerjük vissza (például fluor és hidrogén-fluorid visszanyerése kriolit formájában és visszavezetése a technológiai folyamatba)
- a tisztítás során a szennyező komponensek csak dúsulnak, és a keletkező szennyvíz, szilárd hulladék, iszap, elhasznált adszorbens vagy mosófolyadék további elhelyezéséről gondoskodni kell (például dolomitos füstgáz kéntelenítésnél a  $\text{CaSO}_4$  vagy  $\text{MgSO}_4$  elhelyezése).

A tisztítás módja szerint *száraz és nedves üzemű* berendezéseket különböztetünk meg.

A *száraz tisztítóberendezések* a levegőben lévő szennyező anyagokat azok különböző fizikai tulajdonságai és fizikai módszerek alapján választják le. Ha a szennyező anyag értékes, a száraz leválasztás után minden további művelet nélkül újra hasznosítható. A száraz eljárás feltétele, hogy a levegőből gőzök ne kondenzálódjanak.

A *nedves eljárások* előnye, hogy gázok és porok együttesen is eltávolíthatóak, és a kezelendő gáz magas hőmérséklete sem korlátozó tényező. Hátrányuk a nagyobb energiaigény, korrózióveszély és a keletkező mosófolyadék további kezelésének szükségessége.

Az alkalmazandó berendezések kiválasztásához a tisztítandó levegő mennyisége mellett a benne lévő szennyező anyagok fajtáit és koncentrációit, továbbá a kívánt tisztasági fokot kell ismerni. Adott esetben többlépcsős tisztító eljárásra lehet szükség (például durva porleválasztás utáni nedves gáztisztítás).

A szennyező anyagok levegőből történő leválasztási eljárásait összefoglalóan a **20. táblázat** mutatjuk be.

**20. táblázat. Szennyező anyagok leválasztási eljárásai levegőből  
Szilárd szennyezők**

Száraz leválasztás	Nedves leválasztás
tömegerőn alapuló leválasztás	leválasztó mozgó alkatrész nélkül
szűrőhatáson alapuló leválasztás	leválasztó mozgó alkatrésszel
elektrosztatikus leválasztás	nedves elektrosztatikus leválasztás
Gáz halmazállapotú szennyezők	
Szennyező anyag leválasztása	Szennyező anyag átalakítása
abszorpció	termikus égetés
adszorpció	katalitikus égetés
kondenzáció	katalitikus redukció
	véggázok biológiai tisztítása

**10.1. Szilárd anyagok leválasztása**

A levegőt szennyező szilárd részecskéket általában pornak nevezzük. A porok méretük, alakjuk, kémiai összetételük és fizikai tulajdonságaik alapján igen sokfélék lehetnek.

A por fogalmának meghatározására sokféle definíció létezik.

Összefoglalóan: a por olyan tetszőleges alakú és összetételű szilárd halmazállapotú részecskékből és gázból álló heterogén diszperz rendszer, amelyben a részecskék mérete széles határok között változik.

A porok eredetük szerint természetes forrásokból (talaj és kőzetek mállása, erdőtüzek, vulkánkitörések, stb.) származhatnak, illetve emberi tevékenység eredményeképpen kerülhetnek a légterbe. A mesterséges, antropogén forrásból származó porok döntően nyers- és félkész anyagok kezeléséből erednek (törés, aprítás, kopás, csiszolás, stb.)

A szilárd részecskék alakja a legkülönbözőbb lehet. Az osztályozás során általában három alakfajta különböztetünk meg:

- ◆ **izometrikus részecskék:** a részecske mérete mindhárom egymásra merőleges térbeli irányban közel azonos (ekvivalens gömbátmérővel jellemezzük),
- ◆ **lapos, lamináris részecskék:** két méret lényegesen nagyobb a harmadiknál (lemezek, pikkelyek, lamellák, stb.),
- ◆ **szálas, fibrilláris részecskék:** ezek egy irányban erősen megnyúltak (szálak, pálcikák, tűk, stb.).

### ***10.1.1. Porleválasztók***

***(Patkú István)***

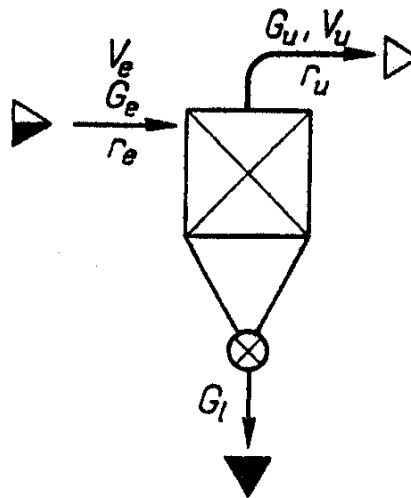
A levegő szilárd halmazállapotú szennyezői a porok, így a szilárd anyagok leválasztása alatt, porleválasztást kell érteni. A porleválasztás részletes ismertetése előtt elengedhetetlen az eljárással összefüggő alapfogalmak tisztázása. Ehhez tekintsük a porleválasztó berendezés sematikus vázlatát /**18. ábra**/, működési elvét, ahol a mennyiségek lábindexei:

- ◆ e: porleválasztás előtt
- ◆ u: porleválasztó után
- ◆ leválasztott
- ◆  $V$  [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] szennyezett levegő térfogata
- ◆  $G$  [ $\text{kg}/\text{h}$ ] por tömegárama
- ◆  $r$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] a levegő porterhelése
- ◆  $G_u$ : levegőben lévő por tömegárama a leválasztó után
- ◆  $G_l$ : a porleválasztó által leválasztott por tömegárama
- ◆  $r_u$ : a porleválasztóból kilépő levegő porterhelése.

A porleválasztás illetve a porleválasztó jellemzésére az alábbi két jellemző szolgál:

- ◆ Összportalanítási fok  $/\varepsilon_{\delta}/$
- ◆ Fokozat, vagy frakcióportalanítási fok  $/\varepsilon_f/$

**Összportalanítási fok  $/\varepsilon_{\delta}/$ :** megmutatja, hogy a porleválasztó berendezés a rajta áthaladó por tömegének hányad részét képes leválasztani.



18. ábra A porleválasztás vázlata

$$\varepsilon_{\delta} = \frac{G_e - G_u}{G_e} \cdot 100 = \frac{G_l}{G_e} \cdot 100 = \frac{G_l}{G_l + G_u} \cdot 100 \quad [\%]$$

Az összportalanítási fok meghatározásához mérni kell a porleválasztón áthaladó gázáram jellemzőit. Az  $\varepsilon_{\delta}$  számításához az alábbi három mérési módszernél meghatározott jellemzőkből lehet kiindulni.

- a./ mérjük a leválasztott pormennyiséget és a tisztított gáz porterhelését  $/G_l, r_u/$
- b./ mérjük a leválasztott pormennyiséget  $/G_l/$  és a tisztítatlan gáz porterhelését  $/r_e/$
- c./ mérjük a tisztított és tisztítatlan gáz porterhelését.  $/r_u, r_e/$

A porleválasztóba belépő légáramnak  $/V_e/$  ki kell lépni a leválasztóból, ezért

$$V_e = V_u = V$$

feltétel mindig teljesül.

Így a  $\varepsilon_{\delta}$  meghatározása az egyes mérések eredményeiből:

$$\varepsilon_{\delta} = \frac{G_l}{G_l + r_u \cdot V} \cdot 100 \quad [\%]$$

$$\varepsilon_{\delta} = \frac{G_l}{r_e \cdot V} \cdot 100 \quad [\%]$$

$$\varepsilon_{\delta} = \frac{r_e - r_u}{r_e} \cdot 100 \quad [\%]$$

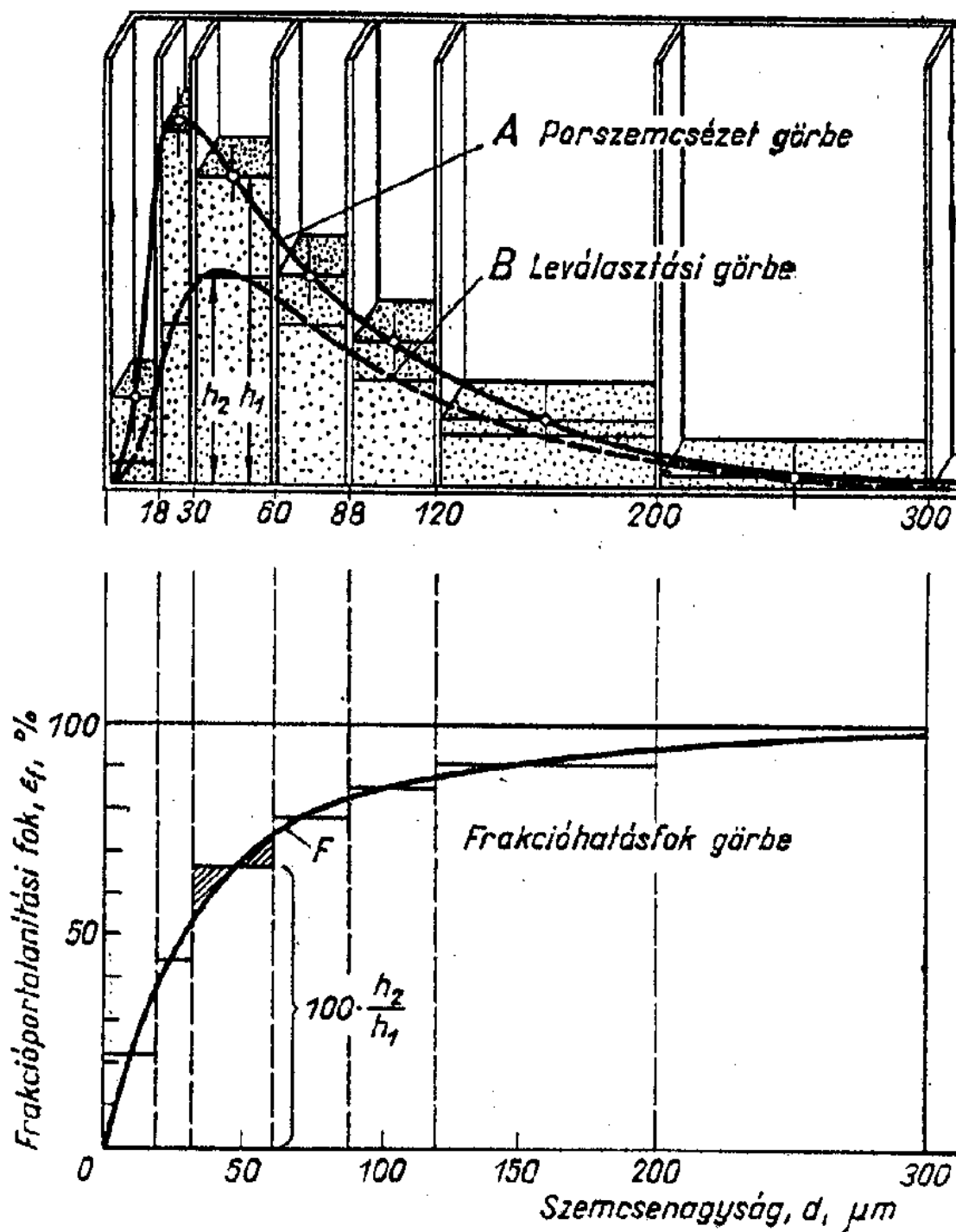
#### Fokozat, vagy frakcióportalanítási fok / $\varepsilon_f$ /

Megmutatja, hogy a porleválasztó a szennyezőanyag /por/ egyes frakcióit milyen összportalanítási fokkal /hatásfokkal/ választja le. A frakcióportalanítási fok a porleválasztó minőségi jellemzője, mert értéke a por szemcsézettől független. Meghatározása az alábbiak szerint történik. Ha a leválasztandó porhalmazt fracionáljuk, és az egyes frakciókat egy olyan üvegfalú tartályba töltjük, ahol az egyes frakciók fallal vannak egymástól elválasztva /**19. ábra**/. Akkor a frakciók lépcsőzetesen helyezkednek el a tartályban. Az egyes lépcsők középvonalainak végpontjait folytonos görbével összekötve kapjuk az A jelű görbét, mely nem más, mint leválasztandó porhalmaz porszemcsézet görbéje.

A porhalmazt a porleválasztón újból átengedve, majd a fracionálást ismét elvégezve a B jelű görbéhez jutunk. A két görbe értékeiből a **19. ábra** alsó ábrája szerinti szerkesztéssel jutunk a frakcióportalanítási görbéhez / $\varepsilon_f$ /.

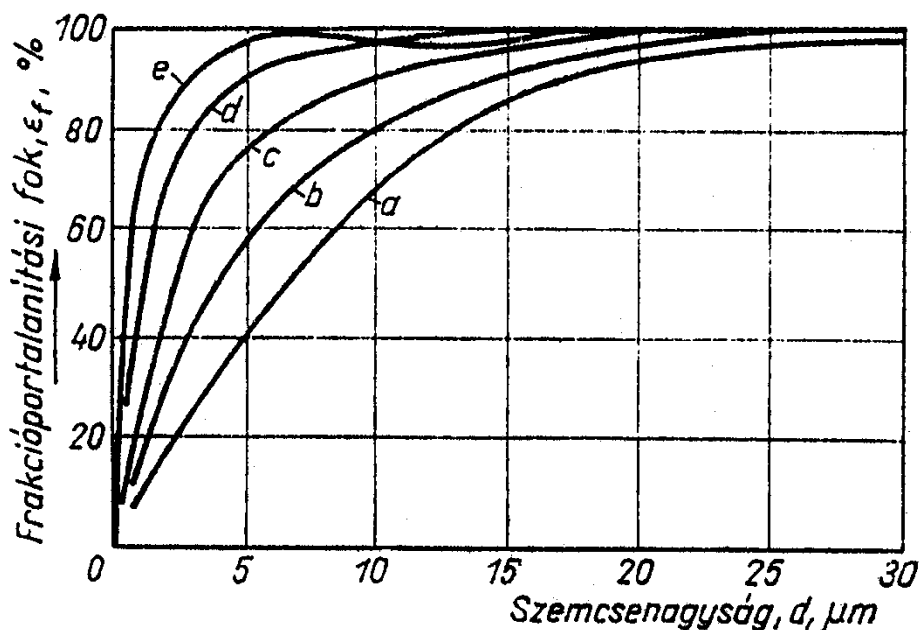
A **19. ábra** különböző minőségű porleválasztók frakcióportalanítási görbéit tüntettük fel. Így az „a” jelű görbe porkamra, a „b”, „c”, „d” jelű görbék centrifugális leválasztó, míg az „e” jelű görbe az elektrofilter frakcióportalanítási görbéje. Könnyen belátható, hogy egy porleválasztó porleválasztása annál jobb, minél jobban közelíti az  $\varepsilon_f$  görbe az  $\varepsilon_f=100\%$ -ot jelző vízszintes egyenest.





19. ábra A porszemcsészet és frakcionálási fok görbéinek értelmezése





20. ábra Különböző minőségű porlevásztók frakcióportalanítási görbéi

A légszennyező porok levegőből történő eltávolítására a korábban már említetteknek megfelelően rendszerint száraz és nedves levásztókat alkalmazunk. A száraz levásztó berendezések működésük során elsősorban a különféle fizikai elveket használják fel (például leggyakrabban a nehézségi erőt alkalmazzák), a nedves levásztókban pedig mosófolyadékokkal végzik a szennyező részecskék eltávolítását.

A porok levásztására alkalmas berendezések sajátosságait összefoglalóan a 21. táblázatban soroljuk fel.

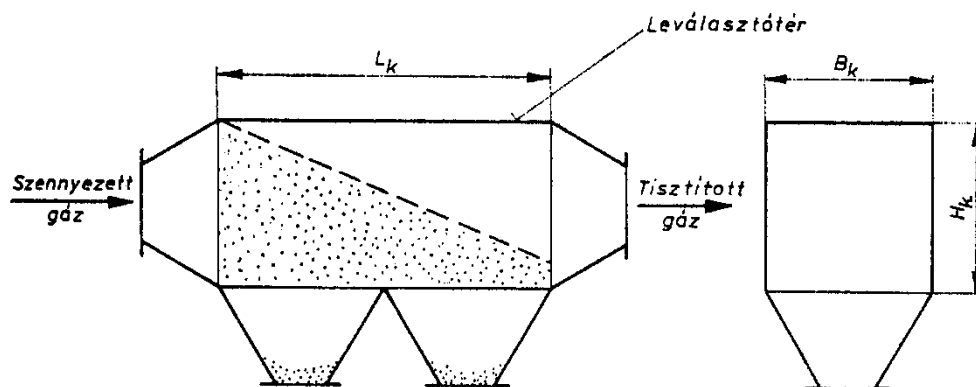
#### 10.1.1.1. Száraz porlevásztók

##### 10.1.1.1.1. Ülepítő vagy porkamrák

A legegyszerűbb berendezések közé tartoznak. Az áramló levegőt vagy gázt egy nagyobb térbe vezetve a gáz sebessége erősen lecsökken, miközben a magával szállított por nagyobb szemcséi a nehézségi erő hatására leülepednek a kamra aljára. Ezért nagyobb szemcsészetű /50-100  $\mu\text{m}$ / porok levásztására alkalmazzák.

A porkamrák általában vízszintesen elhelyezett hosszúkás, belül üres, négyszögletes testek. A tisztítandó gáz bevezető nyílása a kamra egyik hosszanti homlokfelületén, a tisztított gáz kilépő nyílása, pedig az ezzel szemben lévő homlokfelületen, vagy a kamra bevezető nyílásával ellentétes végén oldalt vagy felül van elhelyezve.

A porkamra elvi vázlat a **21. ábra** látható.



**21. ábra** A porkamra vázlat

A porkamrákat úgy kell méretezni, hogy azokban a gáz sebessége olyan legyen, hogy a már leülepedett port ne ragadja – újból – magával. Ezért a kamrában sehol ne legyen nagyobb a gáz sebessége, mint 3 m/s.

A porkamrával leválasztható legkisebb szemcse mérete:

$$d_{e\min} = \sqrt{\frac{18 \cdot \eta \cdot V}{g \cdot B_k \cdot L_k \cdot (\rho_{por} - \rho_{gáz})}} \quad [\text{m}]$$

ahol:

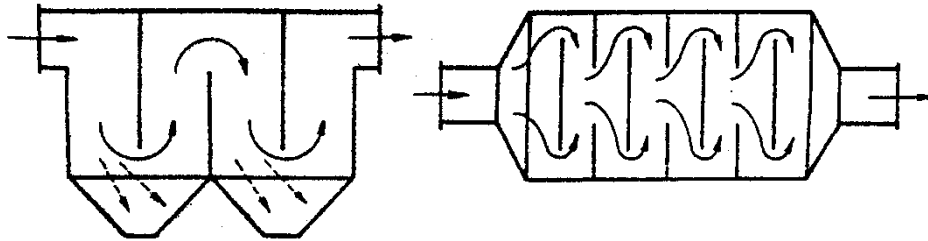
- ◆  $V$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] a porkamrán átvezetett gáz térfogatárama.
- ◆  $\eta$  [ $\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$ ] a porkamrán átvezetett gáz dinamikus viszkozitása.
- ◆  $g$  [ $\text{m}/\text{s}^2$ ] a gravitációs gyorsulás
- ◆  $B_k, L_k, H_k$  [m] a porkamra méretei (16. ábra)
- ◆  $\rho_{por}$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] a por sűrűsége
- ◆  $\rho_{gáz}$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] a porkamrán átvezetett gáz sűrűsége

#### 10.1.1.1.2. Irányváltásos leválasztók

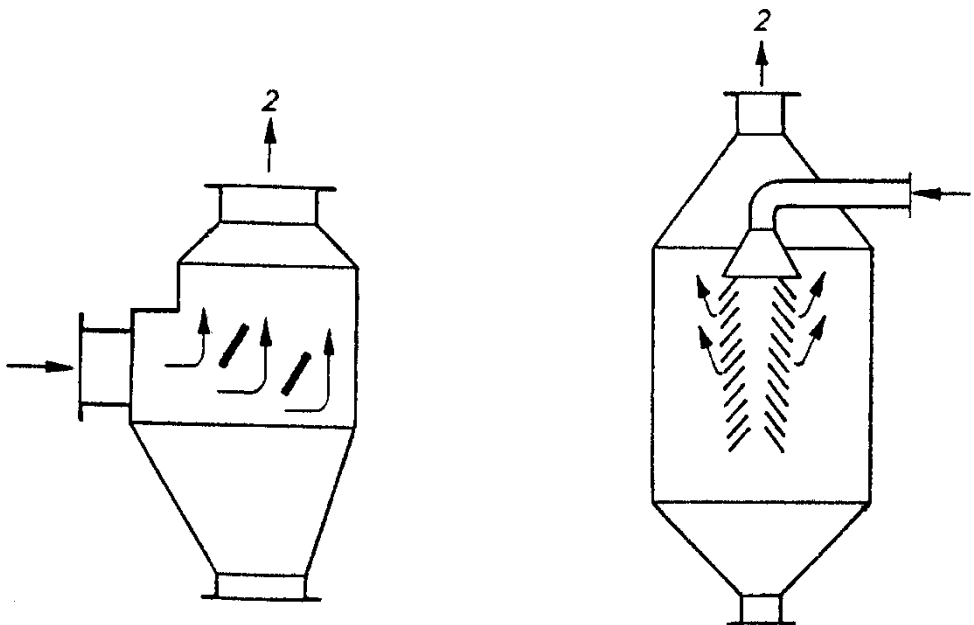
A porkamrák hatásosságát fokozni lehet, ha azokba terelőlapátokat építenek be. Ezzel a gázt hirtelen irányváltoztatásra kényszerítik. Ennek eredményeként a porszemcsére – a gravitációs erőn kívül – a centrifugális erő is hatni fog, és a szemcsét – a ráható erők – a kamra oldalához, illetve aljához kényszerítik.

Az irányváltásos leválasztók lehetnek:

- ◆ a gázáram megosztása nélkül működő leválasztó /22. ábra/
- ◆ gázáram megosztásával működő leválasztó /23. ábra/



22. ábra Gázáram megosztása nélkül működő irányváltásos leválasztó



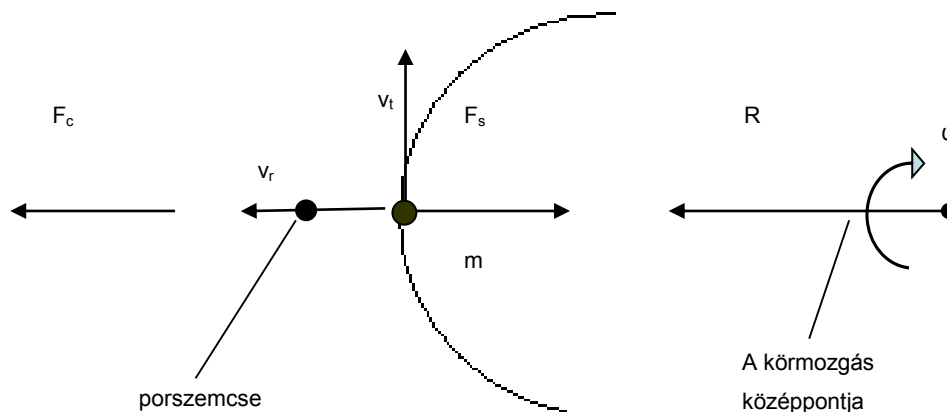
23. ábra Gázáram megosztásával működő irányváltásos leválasztó

#### 10.1.1.1.3. Centrifugális leválasztók

Ezekben a leválasztókban a porszemcsék ívelt pályákon haladnak, és többször körbe futnak a leválasztó térben. A körmozgás következtében a porszemcsére centrifugális erő is fog hatni.

### Porszemcse mozgása centrifugális erőterben

A mozgás jellemzőit a **24. ábra** tartalmazza.



### **24. ábra Porszemcse mozgása centrifugális erőterben**

Centrifugális erőterben a részecskére ható a centrifugális erő:

$$F_C = m \cdot R \cdot \omega^2 \quad [\text{N}]$$

és az elmozdulással szemben ható súrlódási erő:

$$F_S = v_r \cdot 3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d_e \quad [\text{N}]$$

Az összefüggésekben:

- $m$  [kg] - a porrészecske tömege
- $R$  [m] - a porrészecske távolsága a forgási középponttól
- $\omega$  [1/s] - a forgás szögsebessége
- $v_r$  [m/s] - a porrészecske sugár irányú sebessége
- $v_t$  [m/s] - a porrészecske tangenciális sebessége
- $\eta$  [kg/ms] - a disperziós közeg dinamikus viszkozitása
- $d_e$  [m] - a porrészecske átmérője

Ha a porrészecskét gömb alakúnak tételezzük fel, akkor  $\rho_{por}$  fajsúly esetén a részecske tömege:

$$m = \frac{d_e^3 \cdot \pi}{6} \cdot \rho_{por} \quad [\text{kg}]$$

A szögsebességet a  $v_t$  érintő irányú sebességgel kifejezve:

$$\omega = \frac{v_t}{R} \quad [1/\text{s}]$$

A fentiek behelyettesítésével a részecskére ható centrifugális erő:

$$F_c = \frac{d_e^3 \cdot \pi}{6} \cdot \rho_{por} \cdot \frac{v_t^2}{R} \text{ [N]}$$

A porszemcse sugár irányú sebessége akkor állandósul, ha a ráható súrlódási és centrifugális erő egyenlő, azaz:

$$F_c = F_s$$

$$\frac{d_e^3 \pi}{6} \cdot \rho_{por} \cdot \frac{v_t^2}{R} = 3\pi \cdot \eta \cdot d_e \cdot v_r$$

Ebből a porszemcse sugár irányú sebessége:

$$v_r = \frac{d_e^2 \cdot \rho_{por} \cdot v_t^2}{18 \cdot R \cdot \eta}$$

#### 10.1.1.1.4. Centrifugális porleválasztók, ciklonok

Egyik legelterjedtebb és leggyakrabban alkalmazott gáztisztító berendezés a ciklon (**25. ábra**). A gázban diszpergált szilárd részecskék leválasztása céljából a szennyezett gázt nagy sebességgel, tangenciálisan vezetjük be a ciklon hengeres részébe. A ciklonban spirál alakú, lefelé áramló örvény keletkezik, miáltal a szilárd részecskékre a súrlódáson és nehézségi erőn kívül sugár irányú, centrifugális erő is hat. A szilárd részecskék a ciklon falán sebességüket veszítik és a nehézségi erő hatására a ciklon alsó kúpos részébe, és innen a porgyűjtő kamrába jutnak. A szilárd részeketől nagyrészt mentesített gáz, pedig a ciklon merülő csövén keresztül jut tovább. A centrifugális erő nagysága a henger átmérőjével fordítottan arányos. Ezért újabban kis átmérőjű ciklonok alkalmazásával jobb portalanítási hatásfokot érnek el.

A porszemcse sebességgel mozog a leválasztóban. A képletet átrendezve, számítható az a minimális szemcseméret, amelyet a leválasztó még le tud választani, ez:

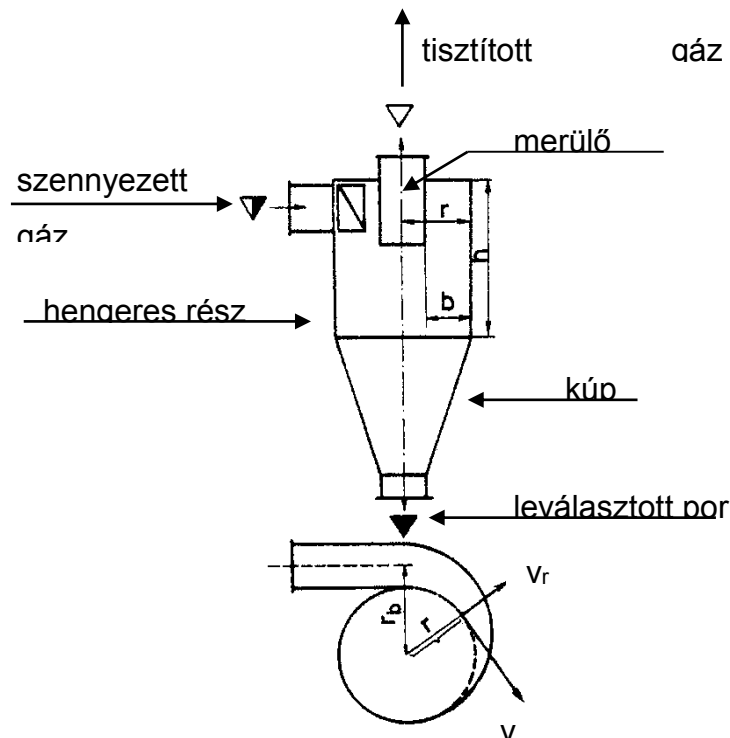
Az összefüggésben szereplő  $R$  a ciklon sugara, a  $v_t$  a ciklonba áramló levegő tangenciális sebessége (perdülete). Így a leválasztható minimális határ szemcseméret annál kisebb minél

- ◆ kisebb a ciklon sugara (átmérője)
- ◆ nagyobb a gáz perdülete.

Így megkülönböztetünk:

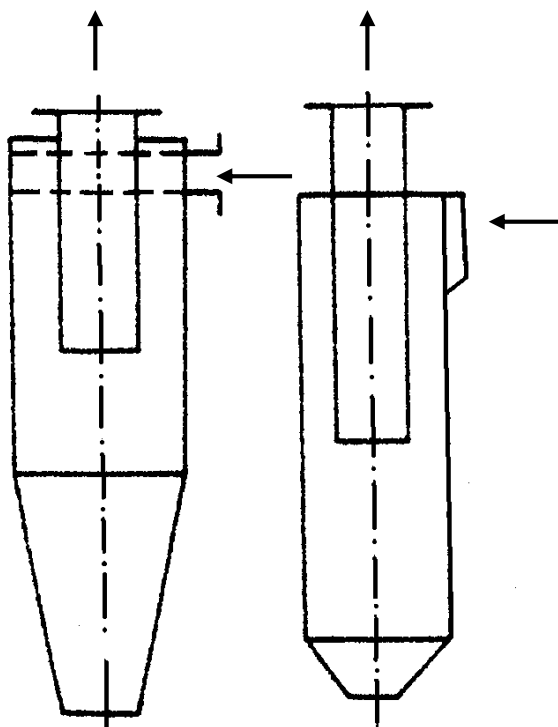
- a, Ciklonokat (**25. ábra**), melyeknél gyakorlatilag az egész gázmennyiséget egy, vagy néhány készülékben tisztítják meg. A készülék  $60\mu\text{m}$  szemcseméreténél nagyobb porok leválasztására alkalmas.
- b, Multiciklonokat (**26. ábra**), melyeknél annyi kisméretű ciklont alkalmaznak párhuzamosan, amennyi a teljes gázmennyiség tisztításához szükséges. A készülék  $30\text{-}60\mu\text{m}$  szemcseméretű porok leválasztására alkalmas.
- c, Örvénycsőeket (**27. ábra**), melyek átmérője egész kicsi és rendszerint közös házba foglalva építik be. A perdületet ezeknél terelőlapok biztosítják. A készülékek  $5\text{-}30\mu\text{m}$  szemcseméretű porok leválasztására alkalmas.

A leválasztható határszemcse és a leválasztás hatásfokának értéke nagymértékben függ a gáz perdületétől, ezért a leválasztási hatásfok javítása érdekében egyre inkább csökkentették a ciklonok átmérőjét. Így azonos belépési gázsebesség esetén nagyobb centrifugális erő biztosítható. A porleválasztók kapacitásának fokozása érdekében a ciklonokat párhuzamosan kapcsolják (**27. ábra**). Hasonló módon építik ki a multiciklonokat és az örvénycsőeket (**27. ábra**) is.



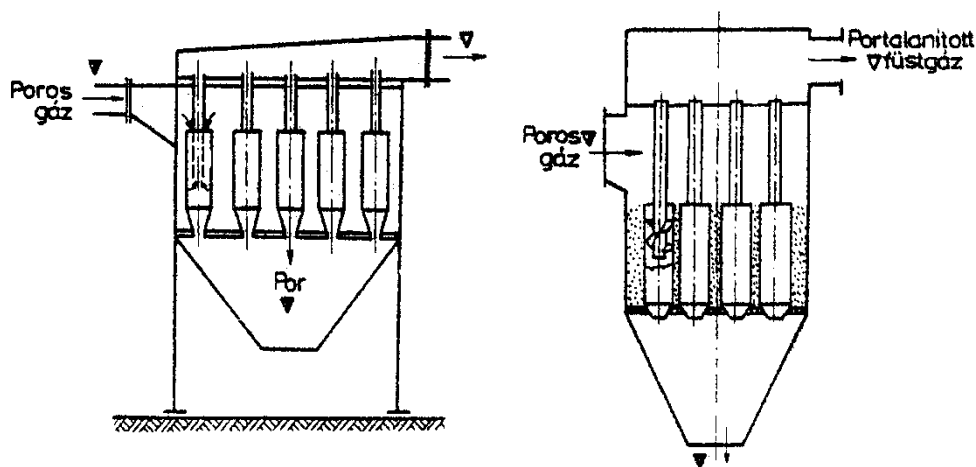
**25. ábra** Ciklon

Különböző kis átmérőjű ciklon típusokat szemléltet a **26. ábra**.



**26. ábra Multiciklon; Örvénycső; Kis átmérőjű ciklonok**

A ciklonok különösebb gondozást nem igényelnek, fenntartási költségük jelentéktelen. Széles hőmérséklet-tartományban alkalmazhatók. Egy adott ciklonnál az ellenállás, a sebesség – azaz a légmennyiség – négyzetével arányos. A leválasztási fok változása és az ellenállás változása közötti összefüggés azonban a ciklon kialakításától függ. Általában minden ciklonnál bizonyos ellenállásérték felett a leválasztási fok gyakorlatilag állandó marad. Hátrányként a jelentős kopást kell kiemelni.



**27. ábra Párhuzamosan kapcsolt multiciklonok és örvénycsővek**

A ciklonok hátránya, hogy jó hatásfokot csak 60 µm feletti szemcsék esetében nyújtanak.

#### 10.1.1.1.5. Szűrés

A szűrés a legelterjedtebb és legrégebben alkalmazott porleválasztási módszer. A szűrés lényege, hogy a portartalmú gázokat porózus szűrőrétegen átvezetve a porszemcsék a szűrőrétegre feltapadva visszamaradnak.

A porszemcsék visszatartását – leválasztását – a következő erők idézhetik elő:

- ◆ tehetetlenségi erő
- ◆ molekuláris diffúzió
- ◆ villamos erő
- ◆ ütközési erő

A porszemcsét illetve a tisztítandó gázt a szűrőszövetre vezetve a porszemcsék igyekeznek körüláramolni – kikerülni – a szűrőszövet szálait. Eközben a porszemcse mozgásának irányát megváltoztatja és ekkor hat rá a tehetetlenségi erő.

A molekuláris diffúzió a gázmolekulák hő mozgása miatt jön létre. A diffúzió miatt a porleválasztás hatásfoka akkor nő, ha csökken a vivőgáz sebessége, a szűrőszövet elemiszál átmérője és a leválasztandó porszemcse mérete.

A tisztítandó gázt a szűrőrétegen átáramoltatva a porszemcsék és a szűrőközeg is elektrosztatikusan feltöltődhet. A létrejövő villamos töltés polaritása, töltéssűrűsége és a töltésmegoszlása - a porszemcsék és a szűrőközeg között - befolyásolja a porszemcsék a szűrőközegen való leválasztását.

A porszemcséket a szűrőrétegen való átáramlásakor alapvetően a szitahatás tartja vissza, de a leválasztáshoz szükség van a porszemcsék szűrőközегre való feltapadására is. A szemcsék feltapadása, vagyis a hatékony porleválasztás a tapadóerőnek és az ezzel ellentétesen ható, a már feltapadt porszemcséknek a gázáramba való visszavezetését előidéző, erőknek az arányától is függ. Ez utóbbiak lehetnek áramlási és villamos erők. A szűrés hatékonyságának növelése céljából a tapadóerő növelésére kell törekedni.

A szűrési folyamat három fázisra bontható:

- ◆ a gázban diszpergált részecskének elmozdulása a porózus rendszer – szűrőközeg - felé



- ◆ az egyedi részecskék leválasztása a porózus rendszerhez való tapadó képesség és a szitahatás révén
- ◆ a por eltávolítása a szűrőközezből, a szűrő tisztítása.

### Szűrőanyagok

A szűrőközegek lehetnek:

- ◆ szövetek
- ◆ rendezetlen szálhalmazok
- ◆ különböző töltetek
- ◆ szinterezett szemcsés anyagok

#### Szövetek

Szövési eljárással készült szűrőszövet pórusossága a szövéshez használt fonal vastagságától és az alkalmazott szövési technológiától függően különböző méretű lehet. Anyaguk, lehet növényi, állati és vegyi eredetű. A növényi eredetűek a gyapot, len, és a kender. Az állati eredetűek a gyapjú és a különböző állati szőrök. A mesterségesen előállított műszálból készült szűrőanyagokat is alkalmaznak. Ilyenek a poliamid, poliészter, polipropilén stb. A felsorolt anyagok közül a gyapjú és a gyapot szűrési tulajdonságai kiválóak, mert bennük az elemi szálak felülete nem sima, hanem belőlük vékony szálacskák állnak ki. Ezért az ilyen anyagokkal jobb szűrési hatásfokot lehet elérni.

#### Rendezetlen szálhalmazok

A szűréssel szembeni igények növekedésével /hogyan minél kisebb méretű porszemcséket válasszanak le/ a filcek alkalmazása előtérbe került. A filc nem más, mint a szabálytalanul elrendeződött szálhalmazból készített paplan. A paplan készítés során a szálhalmazt paplanná préselik, és nyílhegyű tűk rendszerével „átvarrva” rögzítik a paplan alakot. Ezzel biztosítják a rostok egymással való összekapcsolódását. Az így kialakított filc /paplan/ nagyon tömött. Az összenemezelt anyag pórusossága 80 % felett van. A szűrőbetét szilárdságának növelése érdekében a paplan két – külső - élének felületére szövetet rögzítenek /varrnak/. Így a filc mechanikai szilárdsága javul.

A filcek anyaga megegyezik szűrőszövetek anyagával.

### Különböző töltetek

Magas hőmérsékletű gázok tisztítására használják.

Lehetnek:

- ◆ Gyűrűk, golyók fémből és kerámiából
- ◆ Zúzalékok, kőzetek
- ◆ Kavics

A porszűrők előnye a széles felhasználási terület, a 99 %-ot meghaladó portalanítási hatások és alkalmazhatók 0,1 – 0,01  $\mu$ m méretű szemcsékre is. Hátrányuk, hogy korlátozott hőmérséklet-tartományban használhatók, a legtöbb szövetanyag élettartama rövid, ezért gyakori karbantartást igényel.

Elsősorban a vegyi, textil- és élelmiszer-ipari üzemekben, továbbá a cement és kerámia iparban használatosak. Legfontosabb alkalmazási területük a szellőztető- és klímaberendezések levegőjének folyamatos tisztítása.

A porszűrők jellemző adatait a **21. táblázat** foglaltuk össze.

### **21. táblázat. Porszűrők jellemzői**

Jellemző	Szövetrost szűrők	Réteges szűrők
Áramlási sebesség, m/s	0,005 – 0,1	1 2
Felületi terhelés, m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> *h)		3600 - 7200
természetes szál as anyag szövet	150 - 350	
műszál szövet	100 – 300	
üvegrost szövet	20 – 100	
filc	120 – 150	
Nyomásesés, Pa	200 - 1500	30 - 300
Portalanítási hatások, %	95 – 99,9	90 - 95
Műveleti tartomány (szemcseméret), $\mu$ m	< 0,01	> 0,5

10.1.1.1.6. *Elektrosztatikus leválasztók*

**Szilárd részecske mozgása elektromos erőterben**

Két elektróda által létesített elektromos erőterbe kerülő – töltéssel rendelkező – szilárd részecske, töltésével ellentétes töltésű elektróda felé mozog. Mozgásának sebességét  $v$ / gyakran a részecske vándorlási sebességének nevezik. Ez a vándorlási sebesség két erőből függ:

- ◆ az elektródák között kialakuló elektrosztatikus erőből  $F_E$ /
- ◆ a részecske mozgását akadályozó súrlódási erőből  $F_S$ /

A részecske egyenletes vándorlási sebességét a két erő egyensúlya határozza meg:

$$F_E = F_S$$

Az elektrosztatikus erő nagysága:

$$F_E = E \cdot Q \text{ [N]}$$

ahol

- ◆  $E$  [V/m] : villamos térerősség
- ◆  $Q$  [C] : részecske villamos töltése.

A töltés  $Q$ / nagysága

$$Q = \frac{E \cdot \varepsilon \cdot d_e^2}{4} \text{ [C]}$$

ahol:  $\varepsilon$  [F/m] részecske anyagának dielektromos állandója (permittivitás)

$d_e$  [m] részecske mérete

Ezzel: 
$$F_E = E \cdot Q = \frac{E^2 \cdot \varepsilon \cdot d_e^2}{4} \text{ [N]}$$

A részecske mozgását akadályozó súrlódó erő:  $F_S = 3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d_e \cdot v$  [N]

ahol:  $\eta \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right]$  : gáz dinamikus viszkozitása.

A két erő egyensúlyából a részecske vándorlási sebessége ( $v$ )

$$F_S = F_E$$

$$3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d_e \cdot v = \frac{E^2 \cdot \varepsilon \cdot d_e^2}{4}$$

$$v = \frac{E^2 \cdot \varepsilon \cdot d_e}{12 \cdot \pi \cdot \eta} \text{ [m/s]}$$

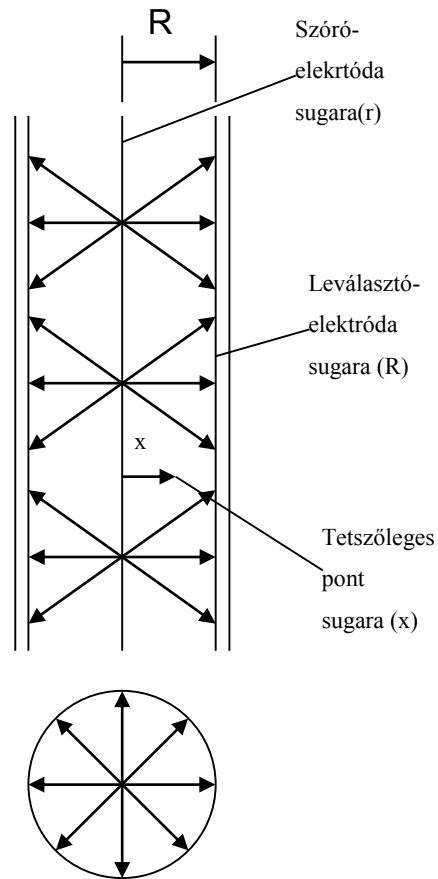
#### 10.1.1.1.7. Elektrosztatikus porleválasztók működése

Az elektrosztatikus leválasztó működésének alapja, hogy két elektróda között /szóró és leválasztó/ elektromos erőteret hozunk létre azért, hogy az elektródákra nagy feszültségű egyenáramot kapcsolunk. Ha az elektródákra kapcsolt feszültség (potenciálkülönbség) elég nagy, a szóró elektróda közvetlen környezetében az elektromos térerősség olyan nagy lesz, hogy az ott lévő gázmolekulák ionizálódnak. Pozitív és negatív töltésű ionok, szabad elektronok és semleges molekulák lesznek jelen a térben. A megfelelő ionizációhoz az elektródákra kb. 10-25 kV egyenfeszültséget kell kapcsolni. Ez a kellően nagy potenciálkülönbség a fegyverzetek között a szóró elektróda körül olyan nagy térerőt biztosít, hogy hatására létrejön a koronakisülés. Ezért a szóró elektróda közvetlen környezetét koronaternek vagy aktív térnek nevezik. A koronakisülésnél a szóró elektróda körzetében, jellegzetes fény és hangjelenség kíséretében jön létre az ionizáció. A jelenséget felvillanó kékes fény és zizegő hangjelenség kíséri. A koronakisülés kétféle lehet, attól függően, hogy a szóró elektródán pozitív vagy negatív töltés szabadul fel. Az előbbi esetében pozitív, az utóbbi esetében negatív koronakisülés jön létre. Az ipari gyakorlatban – általában – negatív koronakisülést alkalmaznak.

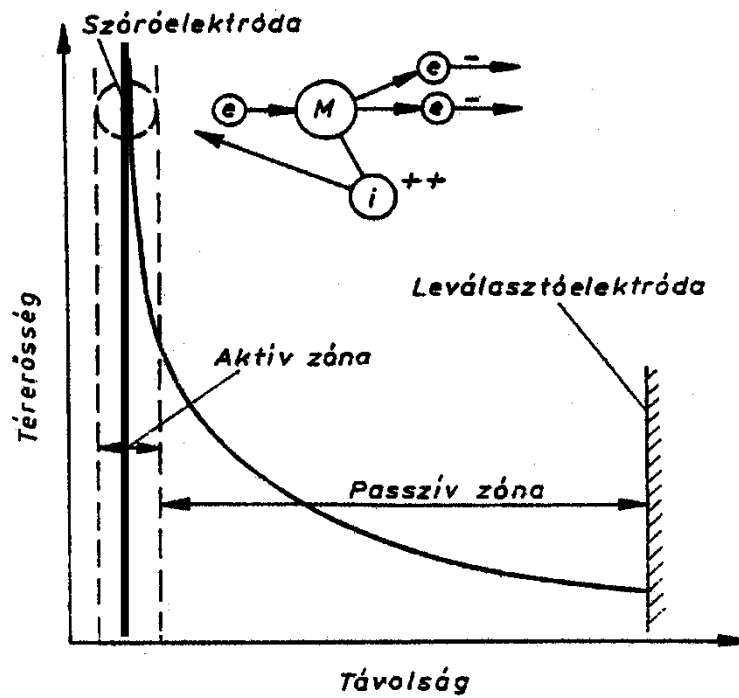
A negatív koronakisülésnél a gázban lévő szabad elektronok a gázmolekulákkal ütközve további elektronok képződését idézik elő. A létrejövő negatív töltések az aktív zónát elhagyva, a földelt leválasztó elektróda felé áramolnak. Ezáltal a teljes leválasztó teret elektromos töltésekkel telítik. A gázzal a koronaterbe jutó porszemcsék a pozitív és negatív töltésű ionokkal ütköznek és felveszik töltésüket. Így a szóró elektródával azonos, negatív töltésű porszemcsék a pozitív töltésű leválasztó elektróda felé mozognak. Míg a pozitív töltésűvé vált porszemcsék a szóró elektróda felé mozognak.

A koronateren kívüli teret passzív zónának (térnek) nevezik. A koronaterbe /aktív zónába/ kerülő részecske bármilyen töltést felvehet, míg a passzív zónába kerülő porszemcse csak a szóró elektróda töltését veheti fel. A zónák elhelyezkedését a **28. ábra** mutatja.

A negatív töltésűvé vált porszemcsék a leválasztó elektróda felé, míg a pozitív töltésűvé vált porszemcsék a szóró elektróda felé mozognak. Az elektródának ütközve a porszemcsék elvesztik sebességüket és a leválasztó aljára hullnak. Mint a **29. ábra** kitűnik a geometriai méretek miatt – a porleválasztóba került porszemcsék elenyésző része kerül az aktív zónába, így a porszemcsék – szinte teljes egészében – a szóró elektróda töltését veszik fel.



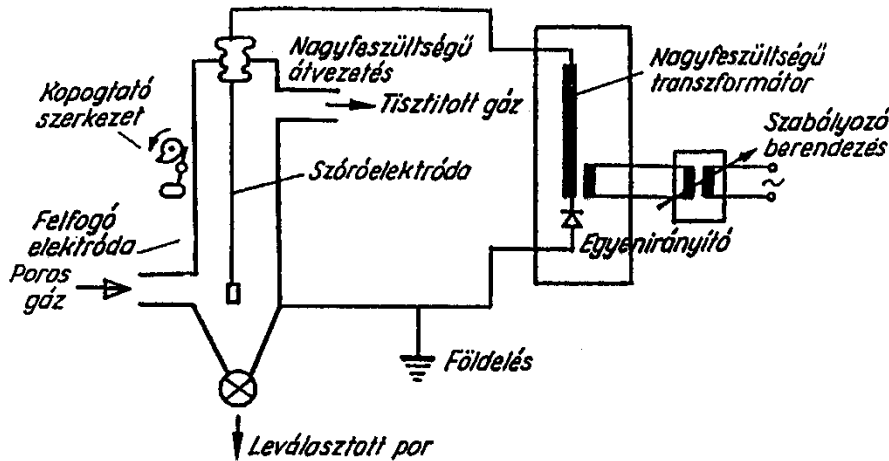
28. ábra A kialakuló elektromos mező sémája



29. ábra Az elektromos térerősség változása és a zónák elhelyezkedése.

A gyűjtő elektródára feltapadt porszemcséket az elektródáról el kell távolítani. Ez kopogtatás útján történik. A gyűjtő elektródáról lehulló por a leválasztó aljában gyűlik össze és egy forgócellás kiadagoló távolítja el a leválasztóból.

A **30. ábra** mutatja be az elektrofilter elvi vázlatát.



**30. ábra** Az elektrofilter elvi vázlata

A lemezes leválasztók portalanítási hatásfoka DEUTSCH képlete szerint:

- ahol  $w_f$  - a por vándorlási sebessége az elektródhoz, [m/s]  
 $l$  - a leválasztó elektród hossza, [m]  
 $v_g$  - a gáz áramlási sebessége, [m/s]  
 $s$  - a szóró és a leválasztó elektródok távolsága, [m].

Előnyük, hogy 0,1  $\mu\text{m}$ -nél kisebb szemcseméretű részecskék, mégpedig nem csak porok, hanem sav- és kátrányos ködök leválasztására is alkalmasak. A száraz állapotban leválasztott porok a folyamatban újra felhasználhatók. Ellenállásuk csekély, karbantartási igényük kicsi. Normál esetekben 800 °C gázhőmérsékletig használhatók.

Hátrányuk a nagy beruházási költség és helyigény.

Számos előnyük miatt sok iparágban használják: hőerőművek füstgázainak, kohógázok, ércfeldolgozó üzemek véggázainak tisztítására, cement-gyárakban, szénelőkészítő, őrlő- és szárítóüzemekben, stb. A ködök közül elsősorban sav-, olaj- és kátrányködök leválasztásában játszanak fontos szerepet.

Az elektrosztatikus leválasztók adott esetben agglomerátorként is üzemeltethetők: bennük pl. a finom koromszemcsék nagyobb részékké állnak össze, tömörödnek, amelyek ezt követően ciklonban elkülöníthetők a gázáramból.

A villamos leválasztók főbb jellemző adatait a **22. táblázat** láthatjuk.

**22. táblázat. A villamos leválasztók főbb jellemző adatai**

összportalanítási hatásfok	95 – 99,5 %
gázsebesség	0,8 – 4 m/s
számított vándorlási sebesség	0,01 – 0,3 m/s
leválasztó elektródok fajlagos felülete	2 – 50 m <sup>2</sup> /(1000 m <sup>3</sup> * h)
leválasztó elektród hossza	2,5 – 5 m
fajlagos energiaszükséglet	0,05 – 1 kWh/1000 m <sup>3</sup>
nyomásveszteség	20 – 100 Pa

10.1.1.2. Nedves porleválasztás

A nedves gáztisztítás a legrégebbi módszere a portalanításnak és az egyéb gázalakú szennyezők eltávolításának.

Legnagyobb előnye, hogy megfelelően megválasztott mosófolyadékkal a szilárd és gázalakú szennyezők leválasztása egy lépésben megvalósítható. Tűz- és robbanásveszélyes poroknál, illetve amikor a hordozó gáz tűz- és robbanásveszélyes, kizárólag a nedves portalanítás alkalmazható. Beruházási költsége és helyigénye kisebb, mint az ugyanolyan hatásfokkal rendelkező száraz berendezésé.

A nedves leválasztó hátránya, hogy a levegő szennyező komponensei a gáztisztítás során a folyadék fázisba kerülnek: annak további tisztításáról tehát gondoskodni kell. Hátránya továbbá, hogy a készülék üzemeltetési költsége magasabb, mint az ugyanolyan leválasztási hatásfokkal rendelkező száraz leválasztóé, valamint az, hogy télen a szabadba telepített készülék lefagyhat.

A nedves porleválasztás elmélete ma még nem teljesen kidolgozott arra nézve, hogy a leválasztási hatásfok előre, nagy biztonsággal számolható legyen.

A nedves porleválasztást technológiai folyamatok és portalanító berendezések esetén egyaránt használják. A szilárd szennyező anyag leválasztással egyidejűleg a szennyező gázok is eltávolíthatók. Csak olyan anyagok távolíthatók el, amelyek a mosó folyadékkal nedvesíthetők és a gázszenyező anyag képes oldódni a mosófolyadékban. Általában mosófolyadékként vizet

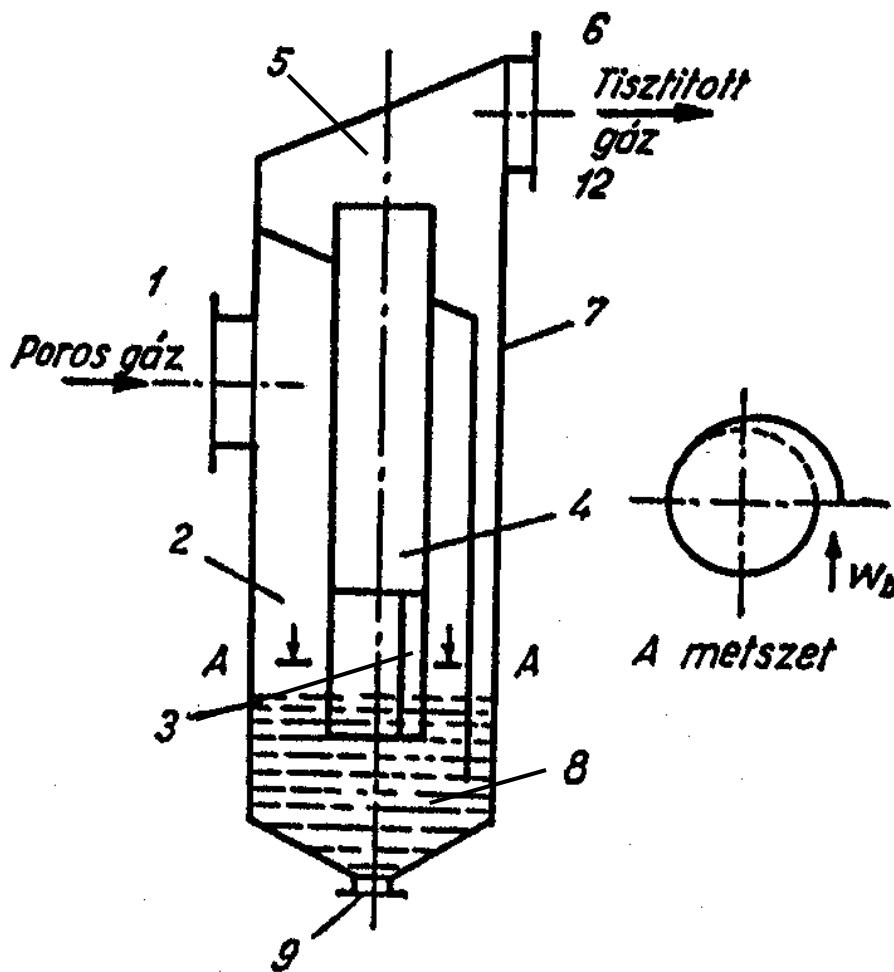
használunk. A leválasztóból kilépő tisztított gáz – sok esetben – mosófolyadék részecskéket visz magával, ezért leválasztásáról (kicsapatasáról) külön kell gondoskodni. A mosófolyadékban lekötött szennyeződések a mosófolyadékkal együtt távoznak a berendezésből.

### FCL típusú leválasztók

A leválasztó elvi kialakítása a **31. ábra** látható

A poros levegő az (1) jelű nyíláson lép a (2) porülepítő térbe. A porülepítő teret a tiszta gáztérrel a leválasztó csövek /4/ kötik össze. A leválasztó csövek alsó része úgy van kiképezve (A metszet), hogy a csövekbe a gáz tangenciálisan lép be.

A résen (3) nagy sebességgel belépő gáz a leválasztó ülepítő teréből a vizet magával ragadja, elporlasztja. A poros gáz a leválasztó csőben keveredik a vízzel. Az elporlasztott víz-gáz-por keverék ezután az (5) jelű térbe jut, ahonnan a gáz a kilépőnyíláson elhelyezett leválasztó lemezen a gyűjtőtérbe kerül.



**31. ábra** FCL leválasztó elvi kialakítása

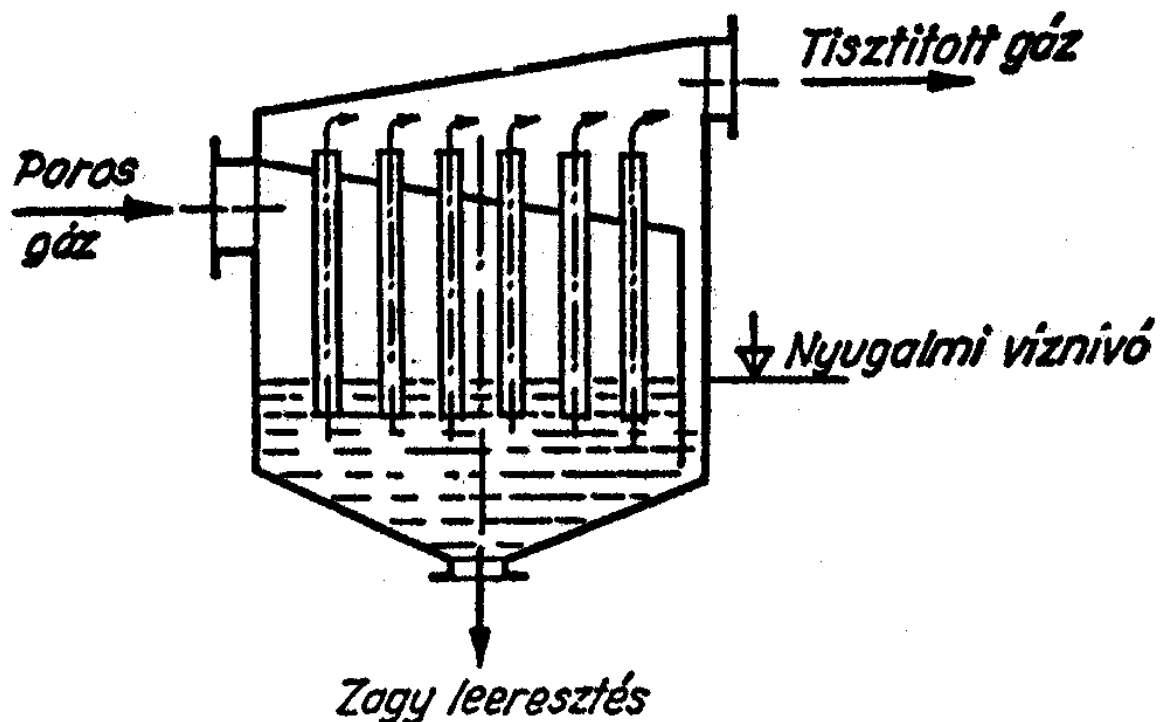


A por a (8) jelű térben ülepedik, ahonnan a zagy megfelelő telítődése után a leeresztő csöveken (9) keresztül elvezethető.

A leválasztási hatás a  $w_b$  belépési sebesség (31. ábra A-metszet) növelésével fokozható. E sebesség változtatását a készülékben levő víznívó megfelelő beállításával érhetjük el.

/A víznívó beállítását, ill. üzem közben állandó értéken tartását automatikus szabályozó berendezés végzi./

Mivel a leválasztó csövek réselése kicsi, ezért az örvénycsövekhez hasonlóan egy berendezésbe több csövet építenek (32. ábra)

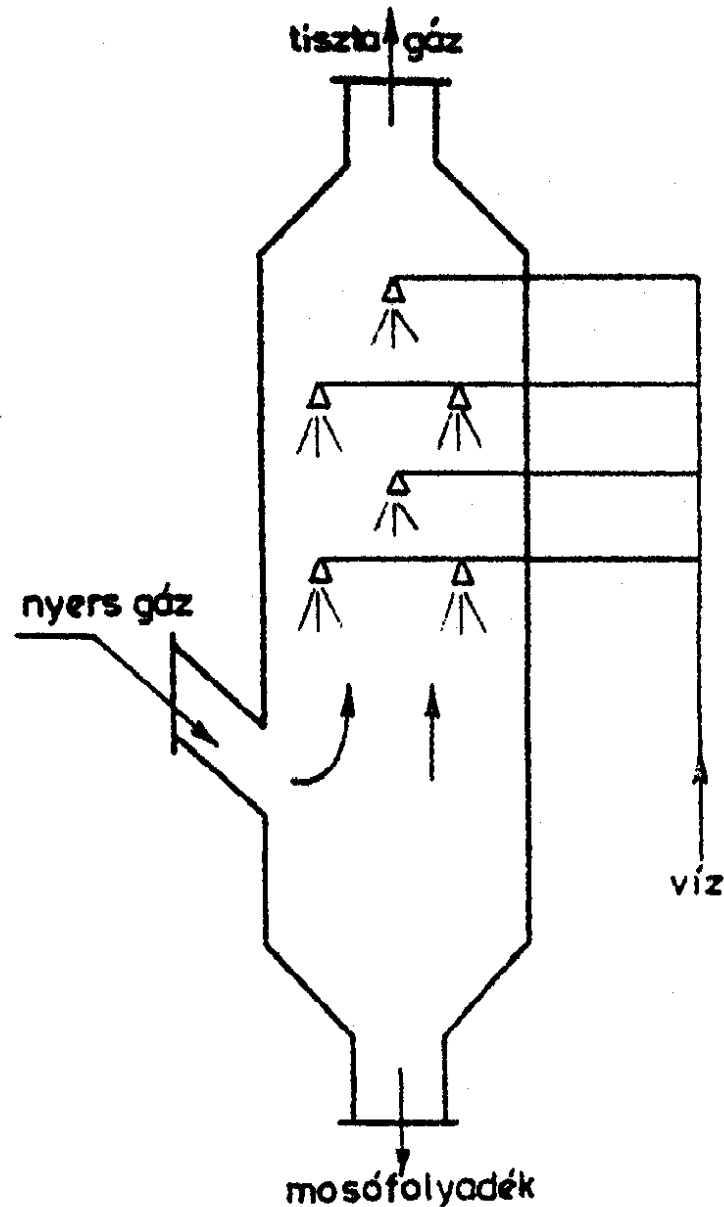


32. ábra FCL típusú leválasztó

### Porlasztásos mosótorony

A gáztisztítási technikában a szétporlasztott mosófolyadék nagy felülete révén előnyös érintkezést biztosít a gázban lévő porszemcsékkel és az oldható gázkomponensekkel. A gyakorlatban alkalmazott porlasztásos mosótoronyok hengeres vagy hasáb alakú berendezések, amelyekben a tisztítandó gázkeverék alulról felfelé áramlik. A mosófolyadékot pedig a torony különböző helyein, de mindig több helyen különböző porlasztó-megoldással a gázárammal

szembe porlasztják. A legnagyobb ilyen berendezések elérik a 6 méter átmérőt és a 30-40 méter magasságot. Amennyiben hosszú tartózkodási időre van szükség, úgy a gázsebességet 1 m/s alatt tartják, de jól üzemelnek 1-3 m/s gázsebességnél is. Ilyen esetben a sebességből adódóan a finomabb folyadékcseppek kihordása miatt feltétlenül cseppfogókat kell alkalmazni. Egy porlasztásos mosótorony elvi vázlatja látható a 33. ábra. A nyersgáz haladási irányában négy helyen történik a folyadék porlasztása. A porlasztókúp alakja és mérete függ a porlasztó típusától és az alkalmazott nyomástól.

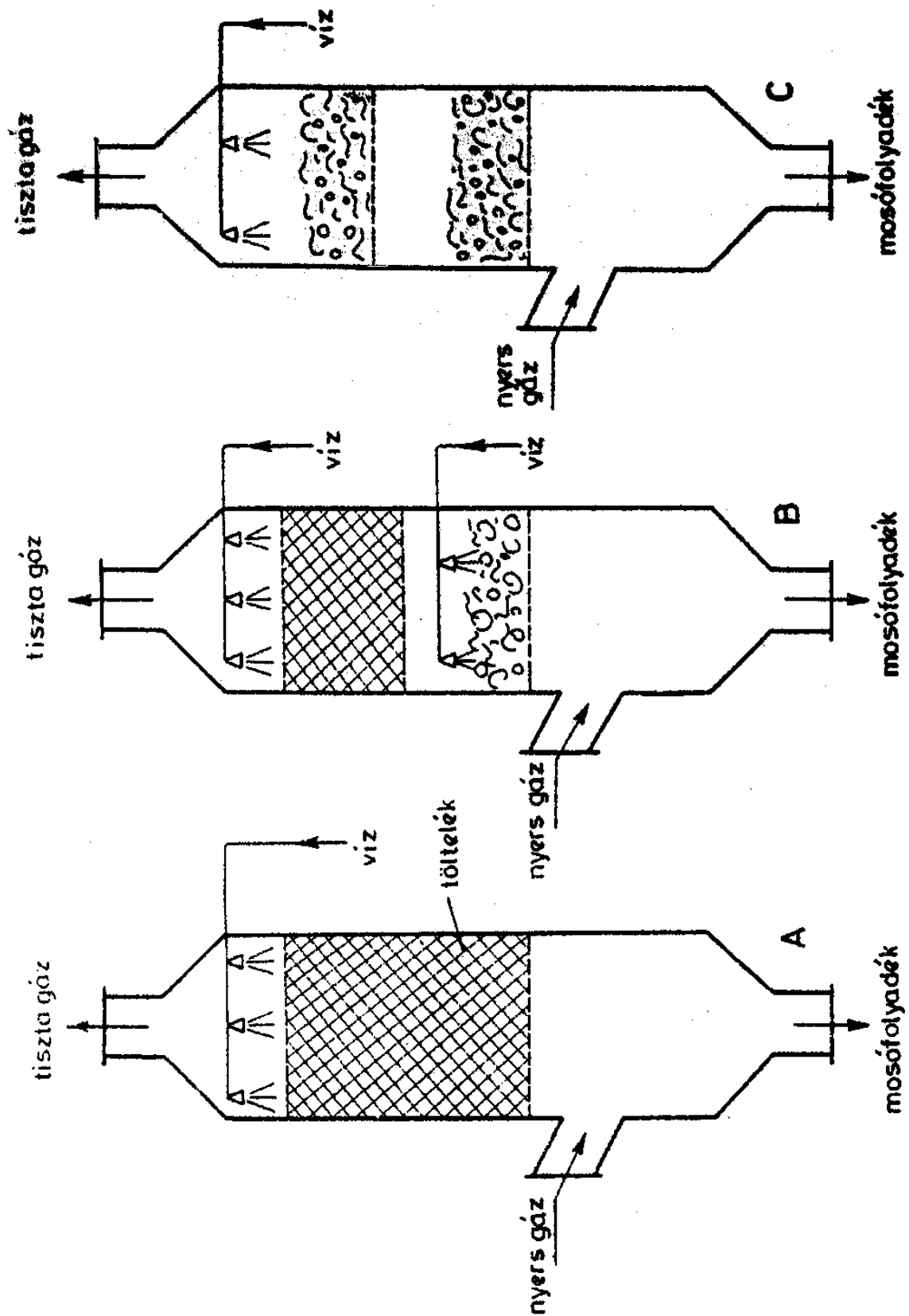


33. ábra Porlasztásos mosótorony

### Töltelékes tornyok

A gáztisztítási eljárásokra alkalmas berendezések a töltelékes tornyok is, amelyek Rashiggyűrűvel vagy más felületnövelő szilárd anyaggal töltött, felül folyadékkal locsolt berendezések. A gáz és folyadék ellenáramban halad és nagy érintkezési felületen a gázok oldódása lejátszódik és bizonyos mértékű portalanítás is megvalósítható. Portalanításra az eldugulás veszélye nélkül csak kis porkoncentrációk és durva /nagy szabad keresztmetszetű/ töltelékek esetén alkalmazhatók. A töltet egyenletes nedvesítése érdekében a folyadék szétoszlatásáról gondoskodni kell. Műveleti alapösszefüggései jól kimunkáltak az irodalomban. Igyekeznek a gázsebességet lehetőleg növelni, így az elárasztási pont közelében kedvezőbbek az anyag- és hőátadási viszonyok. Egy tisztán töltelékes torony vázlatát látható a **34. ábra „A”** jelű képen. A poros gázok esetében gyakran más típusú berendezésekkel kombinálva alkalmazzák. A **34. ábra B** képe egy porlasztásos – töltetes tányéros kombinációt mutat, amelyben a felső részen töltetes, az alsó részen a porlasztótér alatt, pedig egy megfelelően megválasztott tányérszerkezeten habréteget hoznak létre.

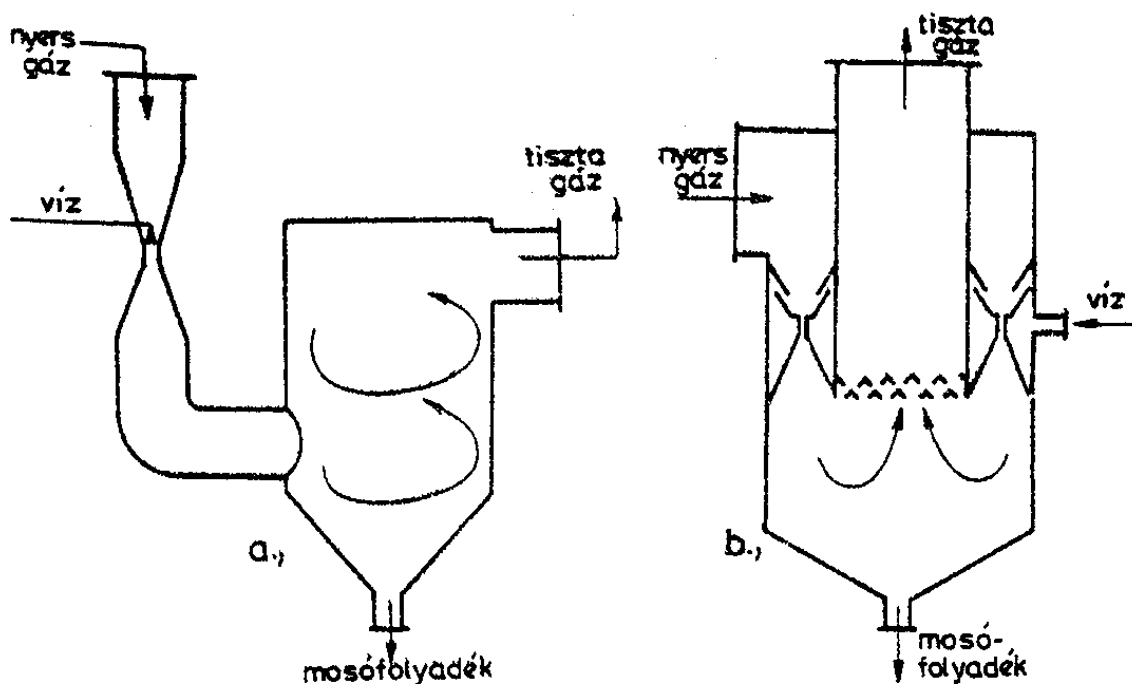
A műszaki fejlődés egyik jelentős állomása a gömbtöltetes mosók alkalmazása, **34. ábra C** képe. Ezen mosóknál nagy szabadfelszínű résejt tányérokra /5-6 mm széles rések, 40-60 % szabad felszín/ 15-25 mm átmérőjű üreges polietilén golyókat helyeztek el különböző rétegvastagságban. A műanyag golyócskák növelik a gáz-folyadék rétegben a keveredést.



34. ábra Tökéletes tornyok

### Venturi mosó

A Venturi mosó a nagysebességű berendezések közé tartozik. A berendezésben a tisztítandó gáz a Venturi-torok előtti összeszűkülő csőszakaszban felgyorsul, sebessége néhány száz m/s is lehet és a torok előtt körkörösén vagy néhány helyen folyadékot porlasztanak a gázáramba. A nagysebességű gázáramban a folyadékszemcsék további méretcsökkenése következik be és a Venturi-torokban nagyon jó érintkezést biztosító szűrő réteget képez, amely a legfinomabb porszemcséket is kimossa a gázból, illetve oldja az oldható gázkomponenseket. A berendezés diffuzor részében csökken a gázsebesség és cseppekké áll össze a ködszerűen szétporlasztott folyadék, amelyet ütköző kamrában vagy ciklonokban választanak el a gáztól. A 35. ábra látható Venturi mosók közül az /a/ egy olyan megoldást ábrázol, ahol egyetlen Venturi torokban tisztítjuk a gázt és a szennyezett mosófolyadékot ciklonokban választjuk le. A /b/ rész ábra pedig a belső csőben körkörösén elhelyezett több Venturi torokban végzi a gáztisztítást és ütköztetés révén választja le a mosófolyadékot. Ismertek változtatható toroknyílással gyártott berendezések is, amelyek más-más gázmennyiségre átállíthatók.



35. ábra Venturi mosóberendezések

#### 10.1.1.2.1. Rotációs mosók

A rotációs mosókban a folyadékcseppek létrehozásához és a mosófolyadék a gáz – por diszperz rendszerrel való intenzív keveredéséhez forgó szerelvényeket alkalmaznak. A gázsebesség a leválasztóban széles határok között ingadozhat.

#### 10.1.1.2.2. Tányéros tornyok

A poros gáz és a folyadék érintkeztetése különböző perforációkkal ellátott tányérokon valósul meg. A tányéron dinamikus, állandóan megújuló habréteg alakul ki nagy érintkezési fázisfelülettel és igen jó keveredéssel. Ebben az intenzív habrétegben történik meg a por kiválása a gázból. A gáz lineáris sebessége a berendezésben 0,5 – 3,5 m/s.

**23. táblázat. Nedves porleválasztó berendezések**

	Mosótornyok		Dinamiku vagy örvénymosók	Rotációs mosók	Tányéros oszlopok	Venturi mosók
	Üres perm.	Töltetes				
Határ szemcseméret	2 – 4 µm	1 – 4 µm	0,6 – 0,9 µm	0,8 – 1 µm	0,3 – 0,5 µm	< 0,1 – 0,3µm
Nyomásvesz- teség, Pa	150 - 200	200 - 300	1500 - 3000	200 - 400	400 - 1000	3000 – 20 000
Víz-levegő arány	4 – 5 dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	2 – 5 dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>		0,8 - 3,5 dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	0,8 – 1,5 dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	0,5 – 5 dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Energia- felhasználás	1 – 3 kWh/ 1000 m <sup>3</sup>	0,2 – 1,5 kWh/ 1000 m <sup>3</sup>	1 2 kWh/ 1000 m <sup>3</sup>	2 – 6 kWh/ 1000 m <sup>3</sup>	0,5 – 1,5 kWh/ 1000 m <sup>3</sup>	1,5 – 7 kWh/ 1000
Összlev. hatásfok	80 %	90 %	93 %	90 %	98 %	< 99 %
Lineáris sebesség	1 – 2 m/s	1 – 2 m/s	8 – 20 m/s	2 – 3 m/s	0,7 – 3,5 m/s	50-150 m/s

### **10.1.2. Gáz halmazállapotú szennyezőanyagok leválasztása**

**(Örvös Mária-Molnár Károly)**

Gáz halmazállapotú szennyezőanyagok az energiatermelés és felhasználás, különböző ipari tevékenységek, valamint meghibásodások következtében kerülnek a környezetbe.

A levegő legfontosabb gáz-halmazállapotú szennyezőiként említhetők: a SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, NO, NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, HF, HCl, Cl<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, egyéb szénhidrogének, aldehidek, ketonok, merkaptánok stb.

A levegőt szennyező gázkomponensek a hordozógázban (levegőben vagy füstgázban) kisebb vagy nagyobb koncentrációban találhatók. A hordozógáztól való elkülönítésük, leválasztásuk, emissziós határértékre történő csökkentésük legtöbbször valamilyen más közeggel - száraz, szilárd anyaggal történő - érintkeztetéssel valósítható meg. E művelet során különböző fázisokat – könnyű és nehéz fázist - hozunk kapcsolatba egymással. Folyadékban történő elnyeletésnél – abszorpciónál - a könnyű fázist a gázelegy, a nehéz fázist a folyadék alkotja. Szilárd felületen történő gáztisztítási eljárásoknál – adszorpciónál – a könnyű fázis a gázelegy, a nehéz fázis a szilárd anyag.

Az abszorpciós és adszorpciós gáztisztítás folyamata jól modellezhető és vizsgálható a fázisok közötti anyagátbocsátással. Az átbecsátás során a diffundáló komponens az egyik fázisból a másik fázisba lép át, ott elnyelődik vagy megkötődik. A hordozógázból leválasztandó komponens a továbbiakban diffundáló komponensnek nevezzük.

Az állandósult állapotú gáztisztítás készülékeiben folytonos vagy fokozatszerű érintkeztetés valósul meg. A készülékek fokozatszerű (tányéros) vagy folytonos érintkeztetésű (töltetes) készülékekre oszthatók. Nem állandósult állapotú műveleteknél az anyagátbocsátás jelensége hasonlóan megy végbe az állandósult műveletnél ismertetettel, itt azonban a készüléket elhagyó gáz koncentrációja a működési idő függvényében nem állandó, azaz ezek a készülékek a működtetés szempontjából szakaszos üzeműek.

#### **Anyagátbocsátás fázisok között**

##### *Koncentrációk értelmezése*

Fázisok közötti diffúzió esetén a koncentráció megadásának számos módja lehetséges. Ezen megadási módok között általában a művelet szempontjából jól értelmezhető, vagy a jelenség

szempontjából célszerűt szokás használni. Jól megválasztott koncentráció esetén a művelet leírásakor számos egyszerűsítésre adódhat lehetőség.

Könnyű és nehéz fázis diffúziója során a koncentrációkat tömegtört; tömegarány vagy moltört; mol-arány koncentrációkkal szokták jellemezni.

A könnyű fázis **tömegárama**:

$$m_G = m_{GD} + m_{GS} \quad (1)$$

ahol:

$m_G$ - a könnyű fázis tömegárama

$m_{GD}$ - a diffundáló komponens tömegárama a könnyű fázisban

$m_{GS}$ - a nem diffundáló (inert) komponens tömegárama a könnyű fázisban

A könnyű fázis **tömegtört koncentrációja**:

$$c_y = \frac{m_{GD}}{m_G} = \frac{m_{GD}}{m_{GD} + m_{GS}} \quad (2)$$

A könnyű fázis **tömegarány koncentrációja**:

$$C_Y = \frac{m_{GD}}{m_{GS}} \quad (3)$$

A könnyű fázis **molárama**:

$$G = G_D + G_S \quad (4)$$

ahol:

$G$  - a könnyű fázis molárama

$G_D$  - a diffundáló komponens molárama a könnyű fázisban

$G_S$  - a nem diffundáló (inert) komponens molárama a könnyű fázisban

A tömegek és a mól-tömegek felhasználásával a könnyű fázis moláramai:

$$G_D = \frac{m_{GD}}{M_D} \quad \text{és} \quad G_S = \frac{m_{GS}}{M_{GS}}$$



ahol:

$M_D$  - a diffundáló komponense moltömege

$M_{GS}$  - a nem diffundáló könnyű fázis moltömege

A könnyű fázis mól-tört koncentrációja:

$$y = \frac{G_D}{G} = \frac{G_D}{G_D + G_S} = \frac{\frac{m_{GD}}{M_D}}{\frac{m_{GD}}{M_D} + \frac{m_{GS}}{M_{GS}}} \quad (5)$$

A könnyű fázis mol-arány koncentrációja:

$$Y = \frac{G_D}{G_S} = \frac{\frac{m_{GD}}{M_D}}{\frac{m_{GS}}{M_{GS}}} \quad (6)$$

A nehéz fázis tömegárama:

$$m_L = m_{LD} + m_{LS} \quad (7)$$

ahol:

$m_L$  - a nehéz fázis tömegárama

$m_{LD}$  - a diffundáló komponens tömegárama a nehéz fázisban

$m_{LS}$  - a nem diffundáló (inert) komponens tömegárama a nehéz fázisban

A nehéz fázis tömegtört koncentrációja:

$$c_x = \frac{m_{LD}}{m_L} = \frac{m_{LD}}{m_{LD} + m_{LS}} \quad (8)$$

A nehéz fázis tömegarány koncentrációja:

$$C_X = \frac{m_{LD}}{m_{LS}} \quad (9)$$

A nehéz fázis molárama:

$$L = L_D + L_S \quad (10)$$

ahol:

- L - a nehéz fázis molárama
- $L_D$  - a diffundáló komponens molárama a nehéz fázisban
- $L_S$  - a nem diffundáló (inert) komponens molárama nehéz fázisban

A tömegek és a mól-tömegek felhasználásával:

$$L_D = \frac{m_{LD}}{M_D} \quad \text{és} \quad L_S = \frac{m_{LS}}{M_{LS}}$$

ahol:

- $M_{LS}$  - a nem diffundáló komponens mól-tömege (nehéz fázisban)

A nehéz fázis mól-tört koncentrációja:

$$x = \frac{L_D}{L} = \frac{L_D}{L_D + L_S} = \frac{\frac{m_{LD}}{M_D}}{\frac{m_{LD}}{M_D} + \frac{m_{LS}}{M_{LS}}} \quad (11)$$

A nehéz fázis molarány koncentrációja:

$$X = \frac{L_D}{L_S} = \frac{\frac{m_{LD}}{M_D}}{\frac{m_{LS}}{M_{LS}}} \quad (12)$$

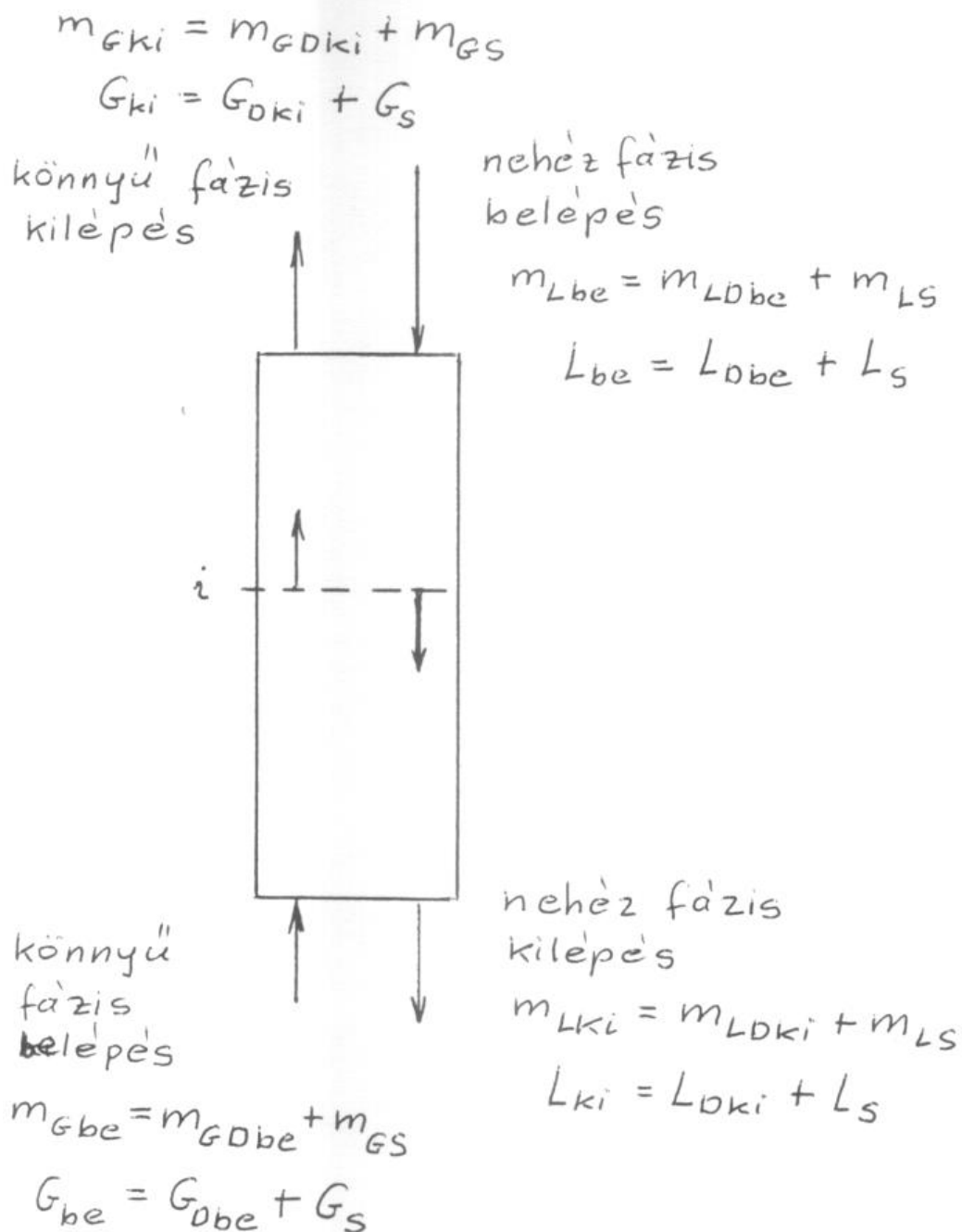
A fentiek szerint értelmezett koncentrációk esetén kis koncentráció tartományban fennáll az alábbi közelítés:

$$y \approx Y \quad \text{valamint} \quad c_y \approx C_Y$$

$$x \approx X \quad \text{valamint} \quad c_x \approx C_X$$

### Mérlegegyenletek a diffundáló komponensre

Vizsgáljuk meg a **36. ábra** látható készüléket, amelyben pl. abszorpció vagy adszorpció játszódik le. Írjuk fel a diffundáló komponens mérleget a belépési és a kilépési pontok között, ha ellenáramú rendszert vizsgálunk és a készüléken belül nincs sem hozzávetetés sem elvétel.



**36. ábra** Könnyű és nehéz fázisok ellenáramú érintkeztetése

Tömegtört koncentrációkkal:

$$m_{Gbe} \cdot c_{y_{be}} + m_{Lbe} \cdot c_{x_{be}} = m_{Gki} \cdot c_{y_{ki}} + m_{Lki} \cdot c_{x_{ki}}$$

Tömegarány koncentrációkkal:

$$m_{GS} \cdot C_{Y_{be}} + m_{LS} \cdot C_{X_{be}} = m_{GS} \cdot C_{Y_{ki}} + m_{LS} \cdot C_{X_{ki}}$$

Mivel  $m_{GS}$  és  $m_{LS}$  állandó

$$m_{GS}(C_{Y_{be}} - C_{Y_{ki}}) = m_{LS}(C_{X_{ki}} - C_{X_{be}}) \quad (13)$$

Fenti egyenlet bal oldala a könnyű fázis oldaláról kihajtott diffundáló komponens tömegáramát, míg jobb oldala a nehéz fázisba diffundált tömegáramát adja.

Móltört koncentrációkkal:

$$G_{be} \cdot y_{be} + L_{be} \cdot x_{be} = G_{ki} \cdot y_{ki} + L_{ki} \cdot x_{ki}$$

Mólarány koncentrációkkal:

$$G_S \cdot Y_{be} + L_S \cdot X_{be} = G_S \cdot Y_{ki} + L_S \cdot X_{ki}$$

GS és LS állandóságának felhasználásával:

$$G_S(Y_{be} - Y_{ki}) = L_S(X_{ki} - X_{be}) \quad (14)$$

Fenti egyenlet bal oldala a könnyű fázis oldaláról kihajtott diffundáló komponens mól áramát, jobb oldala pedig a nehéz fázisban elnyelt diffundáló komponens mól áramát adja.

### Munkavonal egyenlete

A 37. ábra látható ellenáramú érintkeztető tetszés szerinti  $i$  keresztmetszetére felírható a diffundáló komponens anyagmérleg egyenlete.

Tömegarány koncentrációkkal:

$$m_{GS} \cdot C_{Y_{be}} + m_{LS} \cdot C_X = m_{GS} \cdot C_Y + m_{LS} \cdot C_{X_{ki}}$$

A koncentrációk közötti kapcsolat, a munkavonal egyenletét adja:

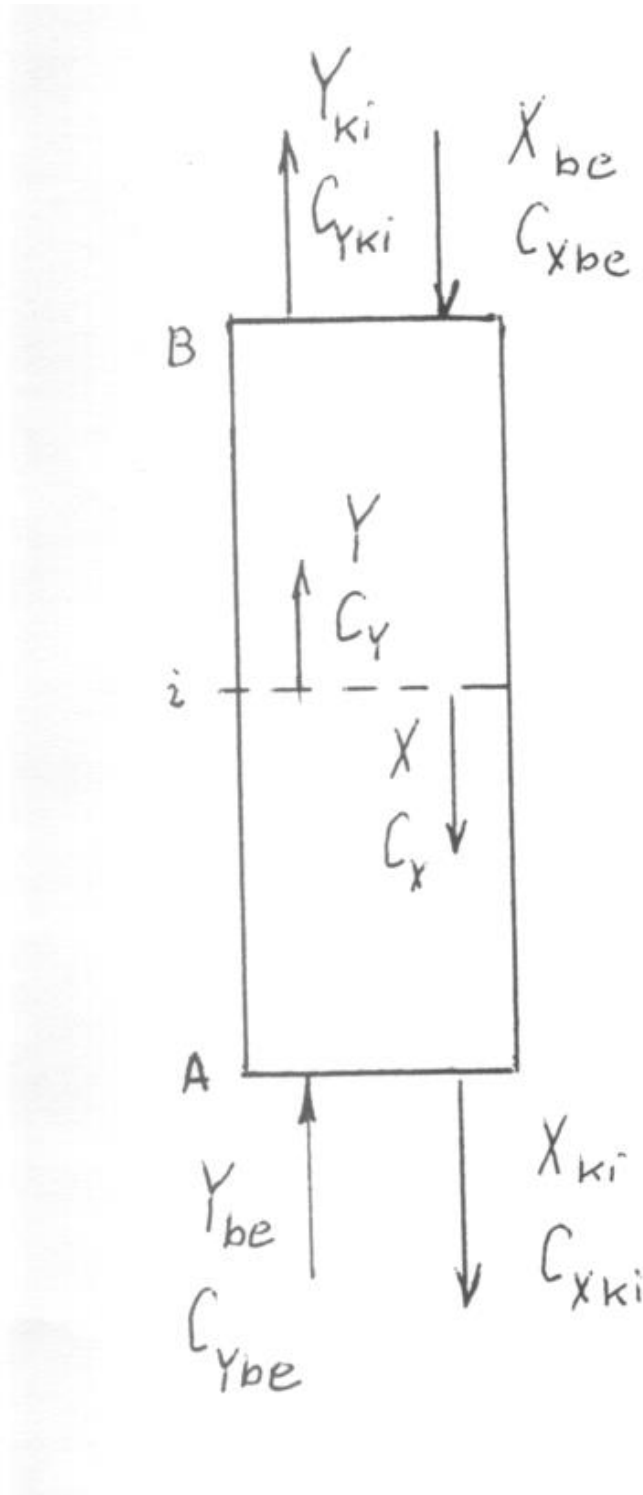
$$C_Y = C_{Y_{be}} - \frac{m_{LS}}{m_{GS}}(C_{X_{ki}} - C_X) \quad (15)$$

Mól-arány koncentrációkkal:

$$G_S \cdot Y_{be} + L_S \cdot X = G_S \cdot Y + L_S \cdot X_{ki} \quad (16)$$

A koncentrációk között fennálló kapcsolat:

$$Y = Y_{be} - \frac{L_S}{G_S} (X_{ki} - X) \quad (17)$$



37. ábra Az ellenáramú érintkeztető elvi ábrája

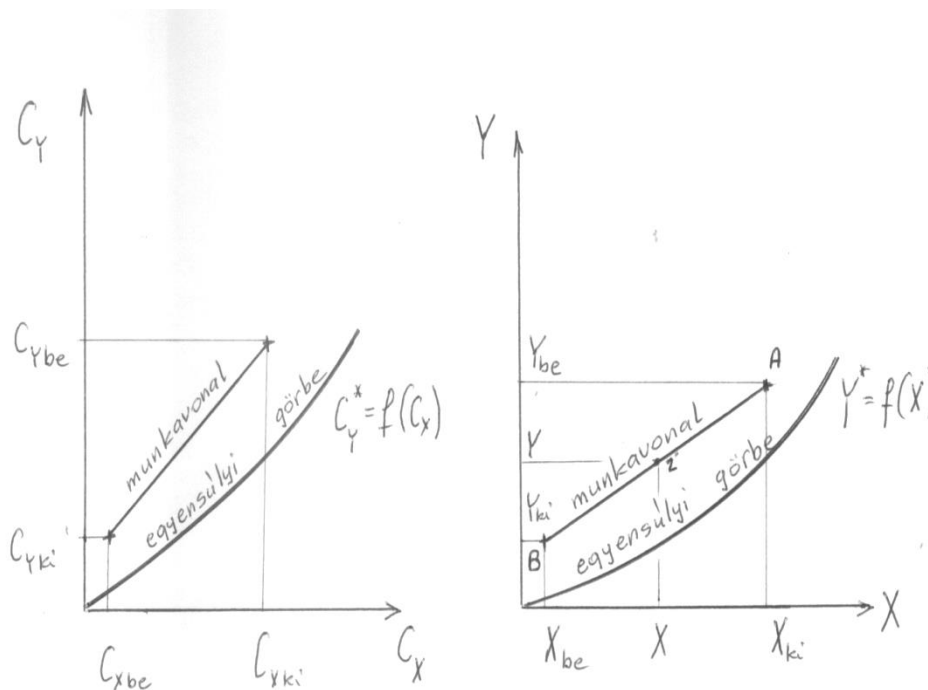
A fázisérintkeztető bármely keresztmetszetére felírt  $C_Y = f(C_X)$  és  $Y = f(X)$  kapcsolat (15) és (17) egyenletekkel megadott munkavonal egyenletét adja.

Hasonlóképpen felírható a munkavonal egyenlete tömegtört és móltört koncentrációkkal is.

### Egyensúlyi görbe

Könnyű és nehéz fázis közötti érintkezés során egyensúly alakulhat ki. Ez a dinamikus egyensúly azt jelenti, hogy a fázishatár felületen megkötődő és az azt elhagyó komponensek száma megegyezik. A fázisok között elméletileg elérhető egyensúly leírására az ún. egyensúlyi görbe szolgál. Az egyensúlyi görbe elméleti és gyakorlati megadására számos módszer létezik [4,5,10]. Az egyensúlyi görbe leírására általában az egyes műveleteknél alkalmazott praktikus koncentrációkat használják, ezért itt is a munkavonal megadására alkalmazott koncentrációkkal tárgyaljuk az egyensúlyi viszonyokat. Az egyensúlyi görbe a könnyű és nehéz fázis koncentrációi között létrejövő kapcsolatot mutatja, különböző paraméterek (pl. hőmérséklet vagy nyomás állandóság) mellett. A 33. ábrán  $C_Y^* = f(C_X)$  és  $Y^* = f(X)$  koncentrációkkal értelmezett egyensúlyi görbékét ábrázoltuk. Az egyensúlyi görbe és a munkavonal – tömeg- és mólarány koncentrációkkal felírt kapcsolatát - 33. ábra mutatja.

Az általunk tárgyalt diffúziós esetekben - abszorpció és adszorpció esetén – ahol a diffúzió a könnyű fázis irányából a nehéz fázis irányába megy végbe, a munkavonal és az egyensúlyi görbe elhelyezkedése a **38. ábra** látható.



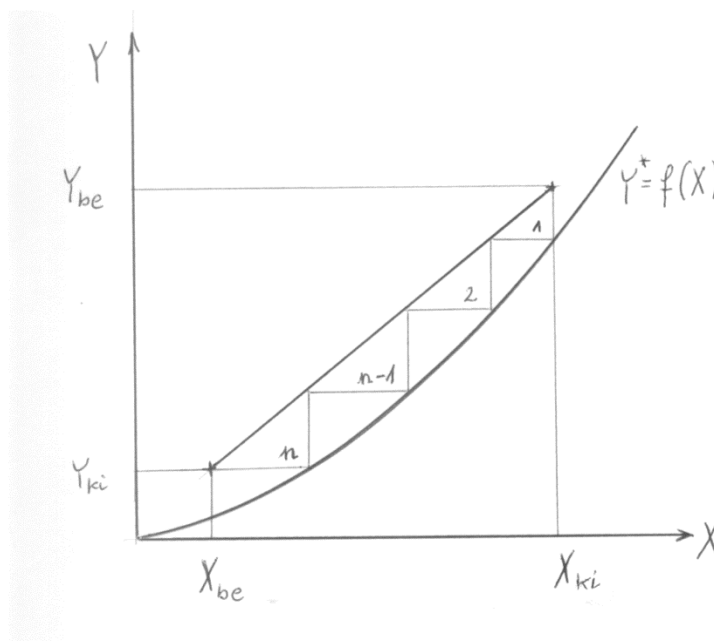
**38. ábra A munkavonal és az egyensúlyi görbe tömegarány és molarány koncentrációk esetén**

**Fokozatszerű fázisérítkeztetést megvalósító készülék**

A fázisok érintkeztetése szempontjából, az állandósult állapotú műveletéknél, a készülékekben a fázisok érintkeztetése fokozatszerűen vagy folytonosan valósulhat meg. Fokozatszerű érintkeztetés esetén a fázisok érintkezési helyén az ún. fokozatoknál a fázisokat elhagyó koncentrációkat egyensúlyinak feltételezzük, ezért az ilyen fokozatot egyensúlyi fokozatnak nevezzük. Az egyensúlyi fokozatot elhagyó fázisok koncentrációja az egyensúlyi görbén van. Ezen az elven alapul az elméleti fokozatok számának meghatározása. E fejezet keretein belül az adszorpció és az abszorpció jelenségét tárgyaljuk. A műveletek részletesebb elemzésénél adódó egyszerűsítések miatt, a fokozatok számának meghatározását abszorpció esetében általában molarány, míg adszorpció esetén tömegarány koncentrációkkal megadott egyensúlyi görbe és a munkavonal esetén szokták tárgyalni.

Fokozatszerű érintkeztetés esetén, az elméleti fokozatok számának meghatározási elméletét [4] részletesen ismerteti. Ez az eljárás az egyensúlyi görbe és a munkavonal között ún. lépcsőzéssel határozza meg a fokozatok számát. A munkavonaltól elindulva a **39. ábra** szerint az elméleti fokozatok száma megszerkeszthető.

A fent ismertetett módszer a koncentráció-változáshoz szükséges ún. elméleti fokozatok számát adja. Az illusztráló ábra alapján az elméleti fokozatok száma:  $n=4$ . A valóságos fokozatszám a hatásfok ismeretében határozható meg.



**39. ábra Az elméleti fokozatok számának meghatározási elve**

## Folytonos fázisérítkeztetést megvalósító készülék

A folytonos fázisérítkeztetést megvalósító készülékeknél a könnyű és a nehéz fázis ellenáramban áramlik, folyamatos érintkezés valósul meg a készülékben, azaz működés szempontjából a készülék egyes helyein az időtől függetlenül mindig ugyanaz a koncentráció alakul ki.

Vizsgáljuk a **40. ábra** látható ellenáramú érintkeztető modelljét, amelynél a fázisok érintkeztetését ún. töltetek valósítják meg. A töltetek feladata fázisok érintkező felületének megnövelése, amely alkalmazásával az anyagátadás lényegesen javítható. A töltetek jellemző tulajdonsága az ún. fajlagos érintkező felület, definíció szerint a térfogategységben lévő érintkező felületet adja:

$$a = \frac{dA}{dV} = \frac{dA}{A_0 dH} \quad [\text{m}^2/\text{m}^3] \quad (18)$$

ahol:

- a - fajlagos érintkező felület
- dA - az elemi érintkező felület
- dV - az elemi térfogat
- A<sub>0</sub> - a készülék üres keresztmetszete
- dH - az elemi magasság

A fázisok közötti diffúziós áram a koncentráció megadásától függően többféleképpen értelmezhető. A továbbiakban – az egyszerűség kedvéért - csak az egyenes munkavonalat származtató koncentrációkkal írjuk fel az anyagátbocsátást.

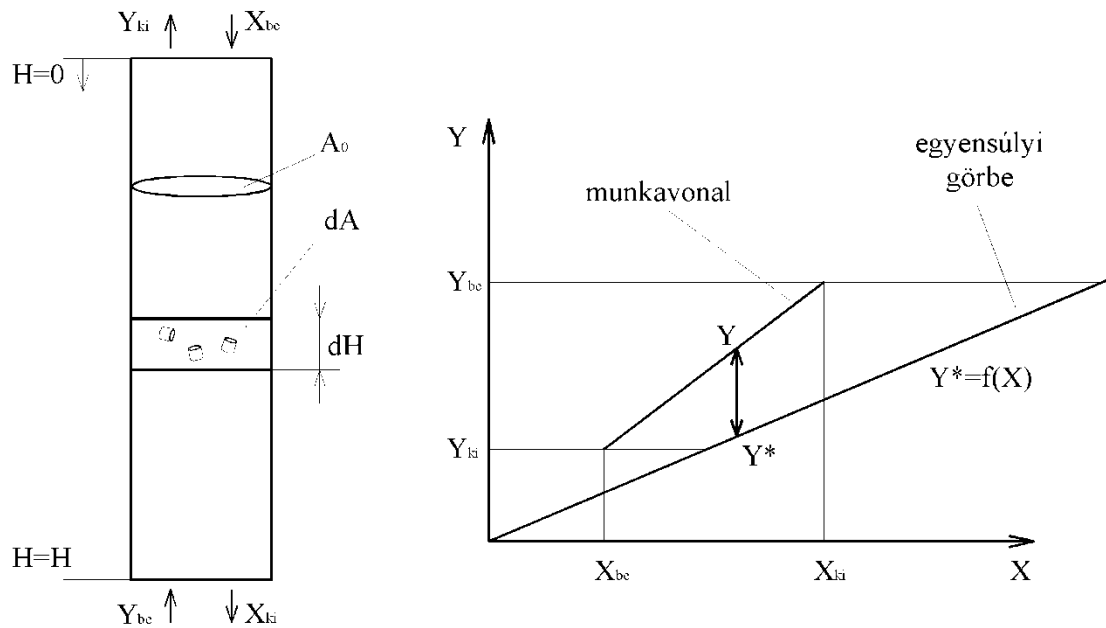
Az anyagáram a tömegarány koncentrációkkal:

$$N_c = K_{cY} (C_Y - C_Y^*) = K_{cX} (C_X^* - C_X) \quad [\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}]$$

ahol

- N<sub>c</sub> - tömegáram sűrűség
- K<sub>cY</sub> - anyagátbocsátási tényező könnyű fázis oldali hajtóerőkkel [kg/m<sup>2</sup>/s]
- K<sub>cX</sub> - anyagátbocsátási tényező nehéz fázis oldali hajtóerőkkel [kg/m<sup>2</sup>/s]





#### 40. ábra Folytonos fázisérítkeztes elve

Az anyagáram a molarány koncentrációkkal:

$$N = K_Y(Y - Y^*) = K_X(X^* - X) \quad [\text{kmol/m}^2/\text{s}]$$

ahol  $N$  - moláram sűrűség

$K_Y$  - anyagátbocsátási tényező könnyű fázis oldali hajtóerővel  
[ $\text{kmol/m}^2/\text{s}$ ]

$K_X$  - anyagátbocsátási tényező nehézfázis oldali hajtóerővel  
[ $\text{kmol/m}^2/\text{s}$ ]

A vizsgált  $dA$  felületen a diffundáló komponens áram felírható tömeg- és moláram formájában is. A továbbiakban csak molarány koncentrációval tárgyaljuk a jelenséget.

$dA$  felületen a diffúziós áram a könnyű fázis oldaláról felírva:

$$N \cdot dA = d(G_S \cdot Y) = K_Y(Y - Y^*)dA \quad (19)$$

A diffúziós áram a nehéz fázis oldaláról:

$$N \cdot dA = d(L_S \cdot X) = K_X (X^* - X) dA \quad (20)$$

A könnyű fázis oldaláról vizsgálva (18) és (19) egyenletek felhasználásával:

$$G_S dY = K_Y (Y - Y^*) a A_0 dH \quad (21)$$

Az egyenlet rendezésével:

$$dH = \frac{G_S}{K_Y a A_0} \cdot \frac{dY}{Y - Y^*}$$

A kijelölt határok között az integrálás az alábbi összefüggést adja, abban az esetben, ha az állandókat kiemeljük.

Mivel  $G_S = \text{áll}$ ,  $K_Y = \text{áll}$ ,  $a = \text{áll}$ ,  $A_0 = \text{áll}$ .

$$\int_{H=0}^{H=H} dH = \frac{G_S}{K_Y a A_0} \int_{Y_{ki}}^{Y_{be}} \frac{dY}{Y - Y^*}$$

Az előírt koncentráció változáshoz szükséges töltet magasság a könnyű fázis oldaláról értelmezett jellemzők felhasználásával:

$$H = \int_{H=0}^{H=H} dH = \frac{G_S}{K_Y a A_0} \int_{Y_{ki}}^{Y_{be}} \frac{dY}{Y - Y^*} = H_{YE} \cdot N_{YE} \quad (22)$$

ahol:

az egyesített könnyű fázis oldali átviteli egységmagasság:  $H_{YE} = \frac{G_S}{K_Y a A_0}$

az egyesített könnyű fázis oldali egységszám:  $N_{YE} = \int_{Y_{ki}}^{Y_{be}} \frac{dY}{Y - Y^*}$

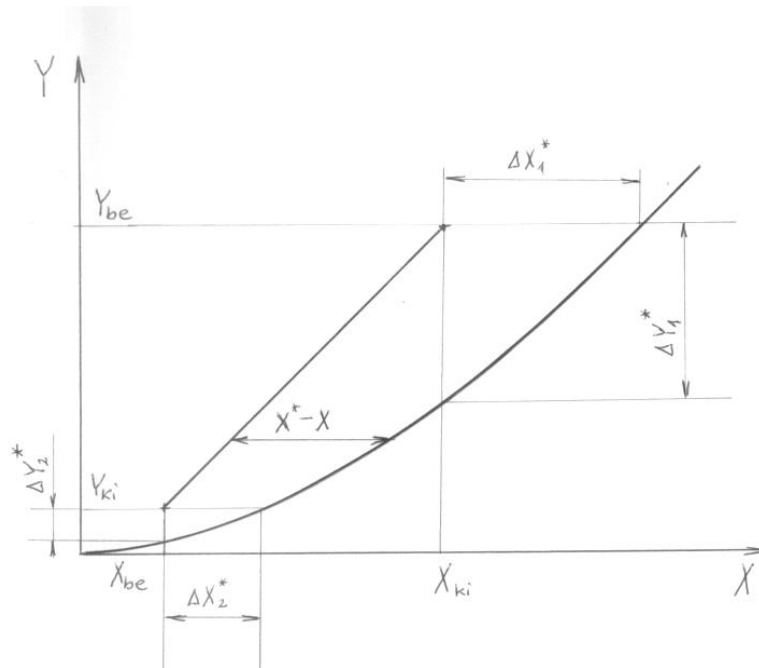
Az átviteli egységszám zárt alakban is felírható abban az esetben, ha a munkavonal és az egyensúlyi görbe is egyenes vagy egyenesnek tekinthető:

$$N_{YE} = \frac{Y_{be} - Y_{ki}}{\Delta Y_1^* - \Delta Y_2^*} \cdot \ln \frac{\Delta Y_1^*}{\Delta Y_2^*}$$

ahol a **41. ábra** jelöléseinek megfelelően

$\Delta Y_1^*$ : nagyobbik molarány-különbség,

$\Delta Y_2^*$ : kisebbik molarány-különbség.



#### 41. ábra Az átviteli egység szám meghatározása

A könnyű fázisnál bemutatott módszerhez hasonlóan a nehéz fázis oldaláról is meghatározható a koncentráció változáshoz szükséges töltet magasság.

(18) és (20) egyenlet felhasználásával:

$$L_S \cdot dX = K_X (X^* - X) a \cdot A_0 \cdot dH \quad (23)$$

A fenti egyenlet rendezésével:

$$dH = \frac{L_S}{K_X a A_0} \cdot \frac{dX}{X^* - X} \quad (24)$$

A kijelölt határok között az integrálás az alábbi összefüggést adja, abban az esetben, ha

$L_S = \text{áll}$ ,  $K_X = \text{áll}$ ,  $a = \text{áll}$ ,  $A_0 = \text{áll}$ .

$$\int_{H=0}^{H=H} dH = \frac{L_S}{K_X a A_0} \int_{X_{be}}^{X_{ki}} \frac{dX}{X^* - X}$$

Az előírt koncentráció változáshoz szükséges töltet magasság a nehéz fázis oldaláról értelmezett jellemzők felhasználásával:

$$H = \int_{H=0}^{H=H} dH = \frac{L_S}{K_X a A_0} \int_{X_{be}}^{X_{ki}} \frac{dX}{X^* - X} = H_{XE} \cdot N_{XE} \quad (25)$$

ahol:

az egyesített nehéz fázis oldali átviteli egységmagasság:  $H_{XE} = \frac{L_S}{K_X a A_0}$

az egyesített nehéz fázis oldali egységszám:  $N_{XE} = \int_{X_{be}}^{X_{ki}} \frac{dX}{X^* - X}$

Az átviteli egységszám zárt alakban is felírható abban az esetben, ha a munkavonal és az egyensúlyi görbe is egyenesnek tekinthető:

$$N_{XE} = \frac{X_{ki} - X_{be}}{\frac{\Delta X_1^* - \Delta X_2^*}{\ln \frac{\Delta X_1^*}{\Delta X_2^*}}}$$

ahol a **41. ábra** jelöléseinek megfelelően

$\Delta X_1^*$ : nagyobbik molarány-különbség,

$\Delta X_2^*$ : kisebbik molarány-különbség.

## 10.2. Adszorpció

### 10.2.1. Az adszorpció elméleti alapjai

Gőz, gáz vagy folyadék szilárd felületen történő megkötődését adszorpciónak nevezzük. Az adszorbensek porózus szerkezetű anyagok, nagy belső felülettel rendelkeznek. A nagy belső felület az anyag ultramikroporózus szerkezetének köszönhető. A leggyakrabban alkalmazott adszorbensek az aktív szén vagy koks, a szilikagél, az aktív alumínium-oxid, és zeolitok (molekulasziták). Legfontosabb tulajdonságaikat a **24. táblázat** tartalmazza.

Az adszorpció művelete az adszorberben játszódik le, amely során a hordozógázból leválasztandó gáz- vagy gőzkomponens az adszorbens felületén megkötődik. A hordozógázból leválasztott, az adszorbens felületén megkötött anyagot adszorptívumnak nevezzük.

Az adszorpció lehet fizikai vagy kémiai. Fizikai adszorpciónál az elnyeletendő gáz vagy gőz az adszorbens felületén kizárólag fizikai erők hatására kötődik meg. Kémiai adszorpció során az adszorbens a gázt vagy gőzt elnyeli és egyidejűleg kémiai kötés is létrejöhet. A megkötődési jelenség a van der Waals-erő hatására alakul ki úgy, hogy az adszorbens kapillárisaiban kapilláris kondenzáció játszódik le.

#### 24. táblázat. Adszorpciós tulajdonságok összehasonlítása [ 6 ]

Tulajdonság	Aktív szén	Aktív Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Szilikagél	Molekulaszita
Szemcseméret [mm ]	1,7-4	2-6	2-8	3-6
Gázsebesség [cm/s]	10-60	12,5-50	12,5-50	15-25
Nyomáscsökkenés 1 m adszorbens rétegen [Pa ]				
10 cm/s gázsebességnél	300	450	300	300
30 cm/s gázsebességnél	1300	1450	1300	1450
Adszorpciós hőmérséklet [ °C ]	5-50	0-25	5-35	15-40
Regenerálási hőmérséklet [°C]	105-115	175-320	155-175	200-300
Fajlagos felület [m <sup>2</sup> /g]	500-1500	300-350	250-850	500-1000
Térfogattömeg [kg/m <sup>3</sup> ]	250-450	700-800	400-800	600-900

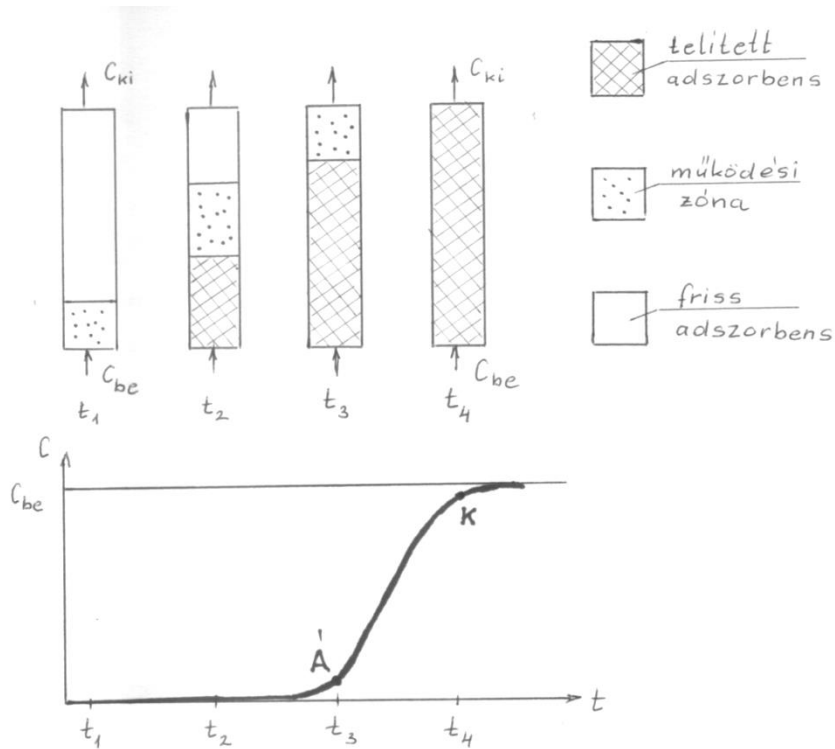
Minél több belső kapilláris van és minél kisebb az átmérője, annál több gőzt vagy gázt képes felvenni. Az adszorbens annyi gőzt képes elnyelni, amennyi a kapillárisokon belüli gőznyomást egyensúlyba hozza a vivőgázban levő elnyeletendő gáz parciális nyomásával. Az adszorpciós folyamatot hőfejlődés kíséri, az adszorpciós hő számítására [4] közöl módszereket és értékeket. A teljes adszorpciós folyamat a gáz megkötődéséből, az adszorpcióból; a megkötött gáznak az adszorbens felületéről történő kihajtásából, a deszorpcióból áll. A deszorpció teszi lehetővé, hogy az adszorbens szabad felülete újabb gáz megkötésére legyen alkalmas, ezt a folyamatot az adszorbens regenerálásának is nevezik. A regenerálást legtöbbször hőközléssel, vagy nyomás csökkentéssel vagy öblítőgázzal végzik.

Az adszorpciós folyamatoknál a művelet történhet szakaszosan ún. nyugvó ágyas adszorberekben, vagy folyamatosan ún. mozgóágyas adszorberekben.

A nyugvóágyas adszorpcó során a szennyezett gáz belépési helye közelében az adszorbens telítődik az adszorptívummal (a megkötendő anyaggal), beáll a dinamikus adszorpciós egyensúly. Ez a réteg további adszorptívumot megkötni nem képes, ezért a folyamatban résztvevő zóna előre vándorol az adszorbens rétegben. A folyamat során kialakul egy telített zóna, egy anyagátadási vagy működési zóna és egy az adszorbeálendő anyaggal még nem érintkezett réteg.

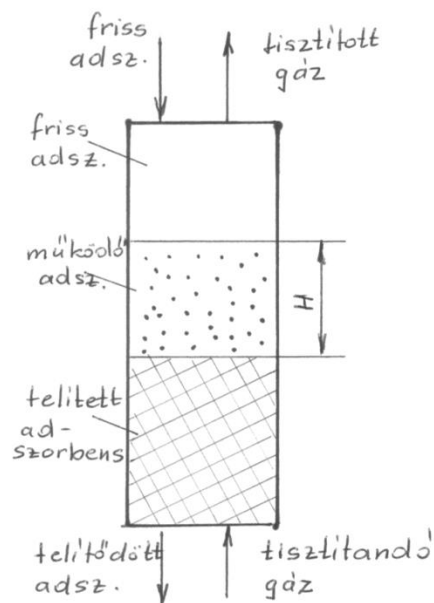
A **42. ábra** a nyugvó ágyas adszorpció jelenségét ábrázoltuk. A  $t_1$  időpillanattal jelölt esetben az állandó belépési koncentrációjú gázból az adszorbens felületén megkötendő gáz a működési zónában kerül megkötésre a felette lévő zónában eredeti koncentrációjú, friss adszorbens helyezkedik el. A  $t_2$  időpillanatban az adszorberben kialakul az adszorptívumot felvenni nem képes ún. telített zóna, a megkötődés a felette elhelyezkedő működési zónában történik. A legfelső adszorbens réteg gyakorlatilag nem vesz részt a folyamatban. A  $t_3$  idővel jelölt esetben a kilépési koncentráció megemelkedik, mivel a működési zóna elérte a kilépés közeli réteget. Ezt a pontot áttörési pontnak nevezzük. A nyugvó ágyas adszorber utolsó működési fázisa az, amikor az ágy teljes magasságában telítetté válik, a kilépési koncentráció rohamosan megemelkedik és a belépési értékhez tart. A működés ezen szakaszát jellemző pontot kimerülési pontnak nevezzük.

Ezeknél a készülékeknél az adszorbens telítődésekor – a feladat jellegéből adódóan vagy az áttörési pontnál (Á) vagy a kimerülési pontnál (K) – lekapcsolják a tisztítandó áramot a telítődött adszorberről és azt a másik készülékbe vezetik. A kimerült adszorbensnél elindítják a regenerálási ciklust.



**42. ábra** A nyugvó ágyas adszorpció elve

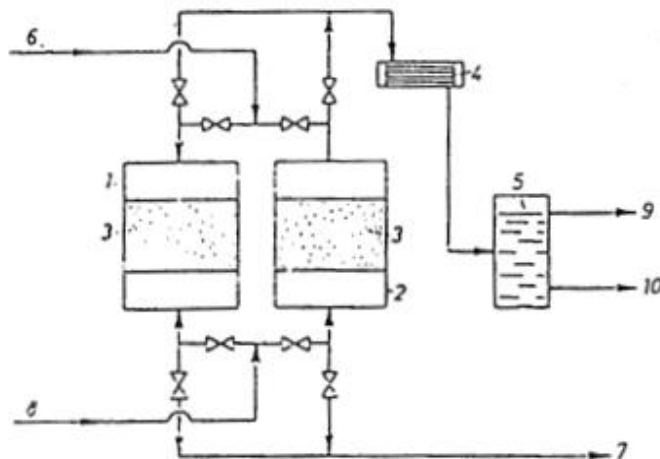
A mozgó ágyas adszorpciónál a készülékben a tisztítandó gáz és az adszorbens is mozog. A 43. ábra megfelelően a megkötődés, az adszorpció az ún. adszorpciós zónában megy végbe. A működési zónát elhagyó tisztítandó gáz ezután gyakorlatilag friss adszorbenssel találkozik, ezért a kilépési gáz koncentrációja állandó.



**43. ábra** A mozgó ágyas adszorpció elve

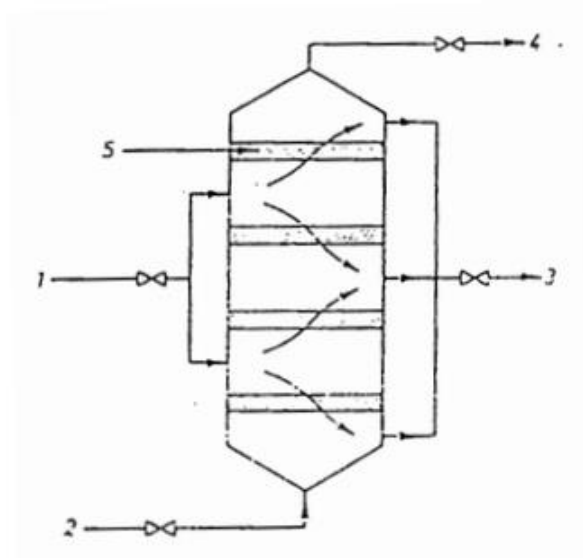
### 10.2.1.1. Adszorber kialakítások

A szakaszos üzemű adszorberekből általában két vagy több egységet kapcsolnak össze, ezzel a tisztítás folyamatosága biztosítható. A **44. ábra** két egységből álló nyugvóágyas adszorber elvi vázlatát látható. Az adszorbens ágyat rendszerint ömlesztetten helyezik el az adszorber rácsszerkezetén, de lehetséges olyan megoldás is, ahol egymás fölött az adszorbens ágyakat osztva alakítják ki, mint azt a **45. ábra** mutatja.



1,2. adszorber, 3. aktív szén-ágy, 4. kondenzátor, 5. dekantáló, 6. szennyezett gáz, 7. tisztított gáz, 8. vízgőz vagy forró gáz, 9. könnyű komponens, 10. nehéz komponens

**44. ábra** Két egységből álló adszorber elvi vázlatát

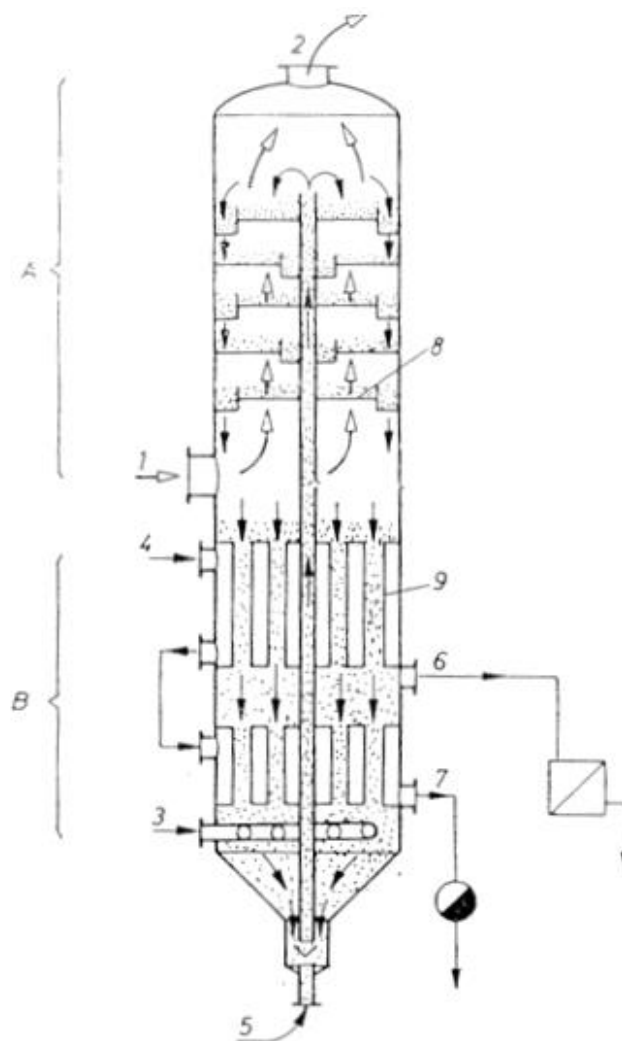


1. szennyezett gáz, 2. vízgőz, 3. tisztított gáz, 4. gőz a kondenzátorba, 5. aktív szén

**45. ábra** Négyágyas adszorber vázlatát



A mozgó adszorbens ágygal működő adszorberben nemcsak a tisztítandó gáz, hanem az adszorbens is mozog. Ezeket általában nagy mennyiségű gáz tisztítására alkalmazzák. Az adszorpció és deszorpció folyamatos üzemű megvalósítását mutatja a **46. ábra**. Itt az adszorpció és a deszorpció egy készülékben játszódik le. A tisztítandó gáz az 1. belépési csonttól felfelé áramlik, a 2. kilépési csont felé, miközben ellenáramban találkozik a tálcákról lefelé mozgó adszorbenssel. A kimerült, adszorptívummal telítődött adszorbens regenerálása gőzzel történik. A regenerálást követően a friss adszorbenst, a szállító gáz az 5. vezetéken keresztül juttatja ismét a berendezés tetejére.

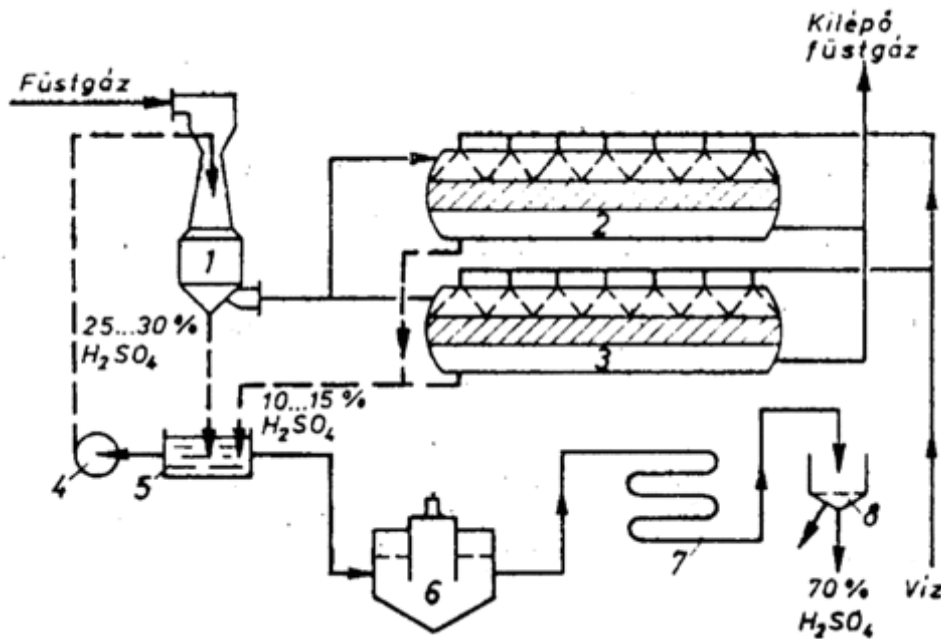


A. adszorpciós rész, B. deszorpciós rész, 1. tisztítandó gáz, 2. tisztított gáz, 3. gőzbevezetés, 4. fűtőgőz, 5. adszorbens szállító gáz, 6. visszanyert anyag gőze, 7. kondenzvíz, 8. szitatálca, 9. előmelegítő csövek

**46. ábra** Mozgóágyas folyamatos üzemű adszorber

### 10.2.2. Adszorpciós elven működő füstgáztisztítási eljárások

A füstgázok kén-dioxid mentesítésénél alkalmazott adszorpciós eljárások között említhető meg a Szulfacid eljárás, amelyben a füstgáz kéndioxid tartalmát úgy nyerik ki, hogy a portalanított füstgázt lehűtés után nyugvó aktív szén ágyra vezetik. Az aktív szén megköti a kén-dioxidot, majd levegő hatására kén-trioxiddá alakul, amelyet a füstgázban jelenlévő vízgőz kénsavvá alakít. Az aktív szénből a kénsavat vízzel kimossák, így 10-15 %-os kénsavat nyernek, amelyet a füstgáz hűtésére használnak fel. A Venturi-mosóban a füstgáz lehül és a kénsav 25-30 %-ra történő töményedése következik be. A **Szulfacid** eljárás elvi vázlatát a **47. ábra** mutatja.



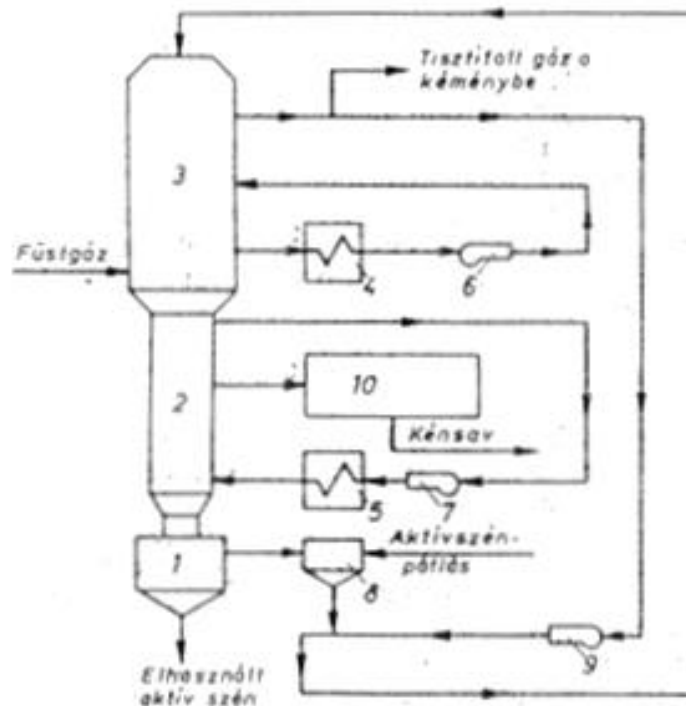
1. Venturi-mosó, 2. 3. nyugvó aktív szén ágy, 4. keringető szivattyú, 5. tartály, 6. merülőfejes kénsavbepárló, 7. savhűtő, 8. savszűrő

#### 47. ábra Szulfacid eljárás elvi vázlata

A kén-dioxid tartalom csökkentésének adszorpciós elvet alkalmazó másik eljárása a **Reinluft eljárás**, amelynél tőzegből előállított félkokszt vagy ún. oxikokszt (feketeszénből 50 %-os oxidáció után kokszosítással nyerik, melynek szilárdsági tulajdonságai kedvezőbbek, mint a tőzegé) alkalmaznak adszorbens anyagként. Az eljárás reaktora két részből áll, az adszorberből és a regenerálóból. Kapcsolási vázlata a **48. ábra** látható.

A 150 °C -ra lehűtött füstgázt az adszorber-rész alsó szakaszába vezetik. A füstgázban lévő kéndioxid kénsavvá alakul, az előző eljárásnál ismertetett módon. A füstgáz egy részét hőcserélőn keresztül visszavezetik, hogy az adszorberben a hőmérséklet megemelkedését

elkerüljék. A kéndioxid mentes füstgáz a torony tetején lép ki. A kénsavval telített aktív szén a torony deszorber részébe vándorol. Itt 370 - 450 °C -os inert gázzal deszorbeáltatják az aktív szénben lévő kénsavat, amely kén-trioxidra és vízre bomlik. A kén-trioxidot az aktív szén kéndioxiddá redukálja és széndioxid keletkezik. A regenerálóból távozó gáz 10-15 % kéndioxidot tartalmaz, amelyet a kénsavüzemben dolgoznak fel.



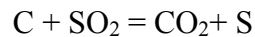
1. aktív szén osztályozó, 2. regeneráló (deszorber), 3. adszorber, 4. hűtő, 5. előmelegítő, 6.7.9. fűvők, 8. aktív szén adagoló, 10. kénsavüzem

#### 48. ábra Reinluft eljárás elvi vázlatja

A harmadik, gyakran alkalmazott adszorpciós elvű gáztisztítási eljárás a Bergbau-Forschung eljárás. Az eljárás végtermékeként elemi kén keletkezik, kapcsolási vázlat a **49. ábra** látható. A kén-dioxid mozgó aktív kokszt ágyban adszorbeálódik. A füstgáz az ágyon keresztirányban áramlik át, a kén-dioxid kénsavvá történő átalakulása megtörténik. Az adszorber alja felé vándorló aktív kokszt telítődés után a regenerálóba kerül, ahol 800 °C hőmérsékletű homokkal keverve 650 °C -ra melegszik. Ezen a hőmérsékleten bekövetkezik a deszorpció, a bomlási és a redukációs folyamat (a kénsav elbomlik  $\text{SO}_3$ -ra és  $\text{H}_2\text{O}$ -ra, majd a szén a  $\text{SO}_3$ -at  $\text{SO}_2$ -vé redukálja). A regenerálóból távozó aktív kokszt homok keveréket mechanikus úton, szitálással választják szét. Az aktív kokszt lehűtés után vezetik vissza az adszorberbe, míg a homokot

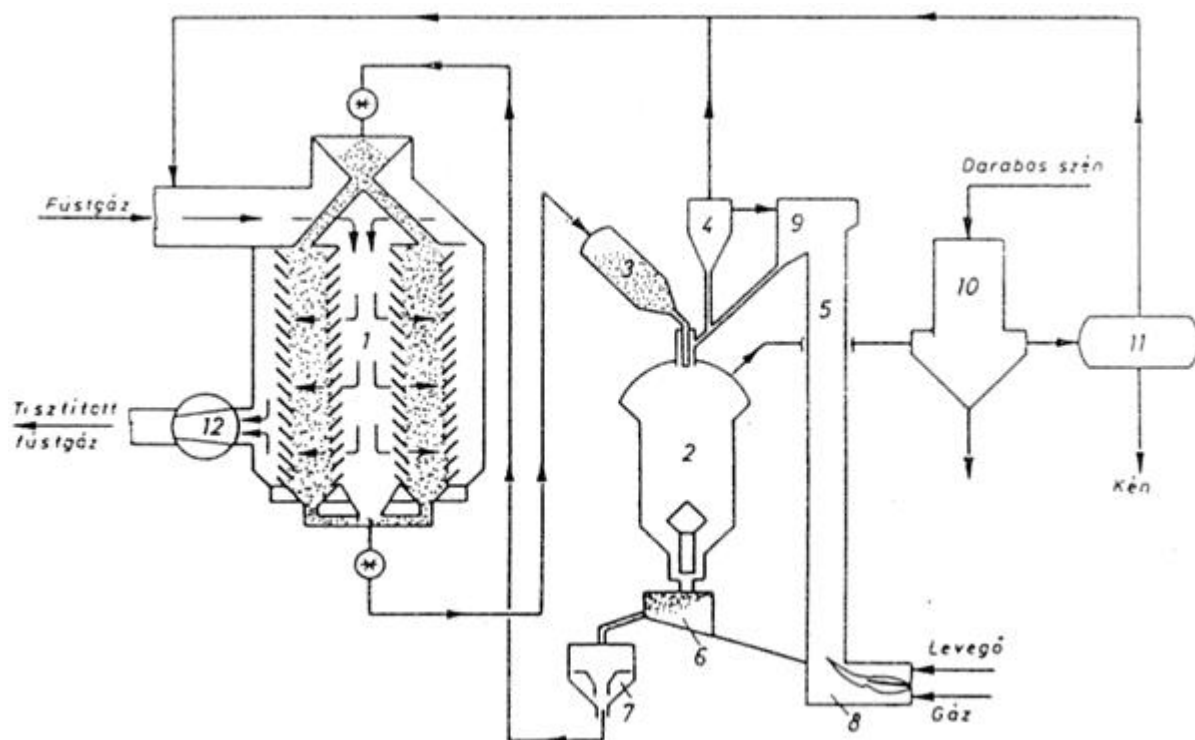
ismét felmelegítik és a füstgáz segítségével juttatják az adszorberbe. A deszorberből nyert kb. 20 tf%-os SO<sub>2</sub> gázt elemi kénné alakítják.

Ez az átalakulás az alábbi egyenlet szerint történik:



A reakció 90-95 %-os konverzióval 600-800 °C -on megy végbe darabos szénrel töltött reaktorban. A gőz formában kiváló ként kondenzátorban gyűjtik össze.

Az adszorpciós kén-dioxid mentesítés elvét alkalmazzák azok az eljárások, ahol az adszorbens anyagot a füstgázáramba injektálják. Az injektálás módjára különböző megoldások léteznek. A SO<sub>2</sub> leválasztására leggyakrabban CaCO<sub>3</sub>-t alkalmaznak, de alkalmazható adszorbens anyagként Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, Ca<sub>3</sub>O<sub>4</sub> is. A szilárd adszorbensnek a füstgázba történő injektálásával nemcsak a SO<sub>2</sub>, hanem egyéb gázkomponensek is pl. HCl vagy dioxin/furán vegyületek is eltávolíthatók.



1. vándorlóágyas reaktor, 2. deszorber, 3. aktívkoksz bunker, 4. ciklon, 5. pneumatikus szállítóberendezés, 6. aktívkoksz osztályozó, 7. koksz hűtő, 8. gázkemence, 9. homokfogó kamra, 10. redukáló reaktor, 11. kénválasztó, 12. füstgázventilátor

**49. ábra Bergbau-Forschung eljárás elvi vázlat**

### **10.3. Abszorpció**

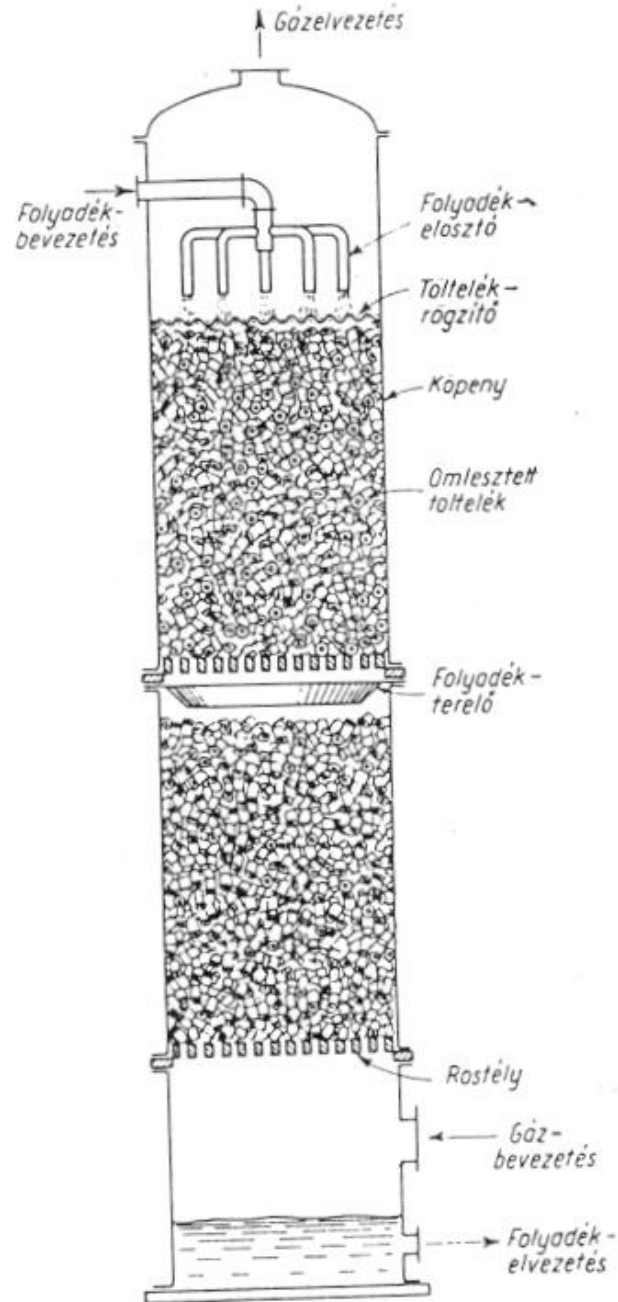
A gázabszorpció olyan szétválasztási művelet, amelynél a gázelegyet folyadékkal érintkeztetjük, és ennek következtében a gáz egy vagy több komponense a folyadékba diffundál és ott elnyelődik. Az abszorpció során a gáz és a folyadékrészek fizikai kötést vagy kémiai kötést hozhatnak létre, eszerint különböztethetünk meg fizikai abszorpciót vagy kémiai reakcióval kísért abszorpciót: kemisorpciót. A diffúzió annál jobban meg végbe, minél jobb érintkeztetést sikerül biztosítani a fázisok között. A folyadék és a gáz/gőz találkozási felület növelése érdekében a készülékbe tölteteket vagy ún. tányérokat helyeznek el. A töltetes oszlopokban az abszorpció a töltetek felületén ún. folyamatos fázisérítkeztetéssel valósul meg, míg a tálcás/tányéros oszlopokban az érintkeztetés fokozatszerű.

#### **10.3.1. Abszorber kialakítások**

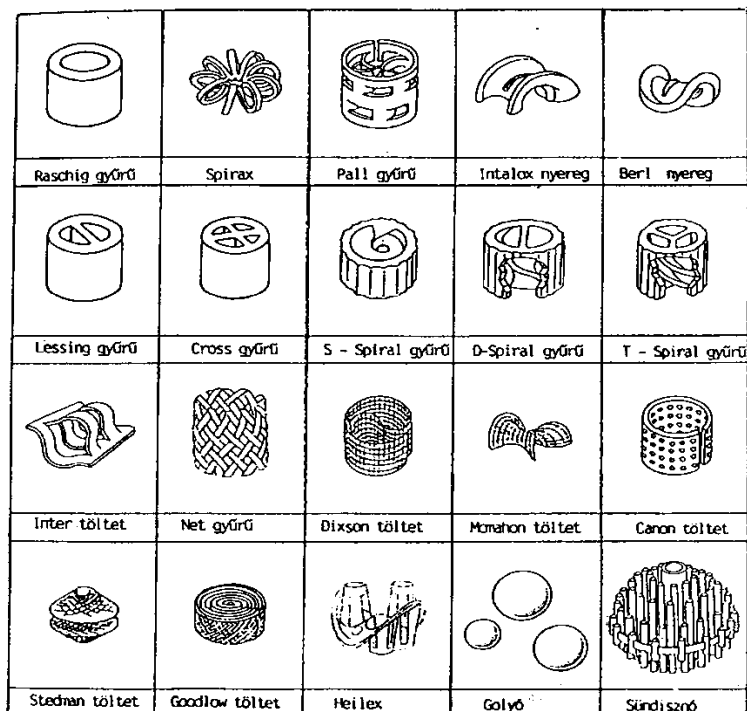
A tálcás és a töltetes tornyok előnyösen használhatók gázkomponensek leválasztására, folyadékban történő elnyelésére, azonban az eltömődés veszélye miatt csak korlátozottan használhatók olyan esetekre, amikor a kémiai reakció során szilárd részek keletkeznek. Ha a tisztítandó gáz por- és gázszennyezést is tartalmaz - a porkoncentrációtól függően - általában a porszennyezés leválasztására előleválasztót alkalmaznak, majd ezt követi a gázkomponens leválasztására szolgáló abszorber. Kémiai reakcióval kísért abszorpció esetén vagy szilárd részecskét is tartalmazó gázok tisztítására az abszorberek azon kialakítása jöhet csak szóba, ahol az eltömődés veszélye nem állhat elő.

A gázkomponensek folyadékban történő megkötése annál hatásosabb, minél intenzívebb a gáz-folyadék érintkeztetése.

A töltetes tornyokba - az érintkezési felület megnövelésére - különböző kialakítású rendezett vagy rendezetlen töltelékelemeket helyeznek. A töltelékes torony felépítése az **50. ábra** látható. A tölteléktestekkel szembeni kívánalom, hogy a megtöltött készülékegység térfogatára vonatkoztatott érintkező felülete (a) nagy legyen és rendelkezzen a közegek áramlása szempontjából megfelelő áramlástani jellemzőkkel. Ez utóbbi azt jelenti, hogy a töltelék szabad térfogathányada ( $\epsilon$ ) nagy legyen. A tölteléktesteknek a már említett tulajdonságokon kívül megfelelő szilárdsági jellemzőkkel és vegyi ellenálló képességgel kell rendelkezniük. Az **50. ábra** néhány ömlesztett (rendezetlen) tölteléktest kialakítása és jellemző adatai láthatók.



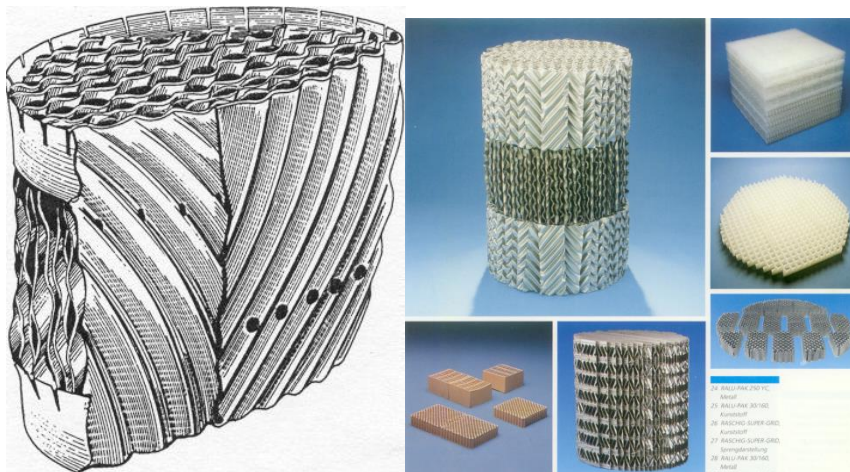
**50. ábra** A töltetes torony felépítése



Töltet típus	Fajlagos felület a [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]	Szabad térfogathányad ε [%]
Raschig gyűrű (kerámia)		
Ø 5x5x1,0 mm	1000	62
Ø 10x10x 1,8 mm	440	69
Ø 15x15x2,0 mm	310	71
Ø 50x50x5,0 mm	95	79
Lessing gyűrű (fém)		
¼"	1010	60
1"	242	80
2"	134	90
Pall gyűrű (fém)		
5/8"	361	90
1"	207	93
2"	102	96
Berl nyereg (kerámia)		
¼"	899	60
½"	466	63
1"	249	69
Intalox nyereg (kerámia)		
¼"	984	75
½"	623	78
1"	256	77,5

51. ábra Néhány ömlesztett tölteléktest kialakítása és jellemző adata

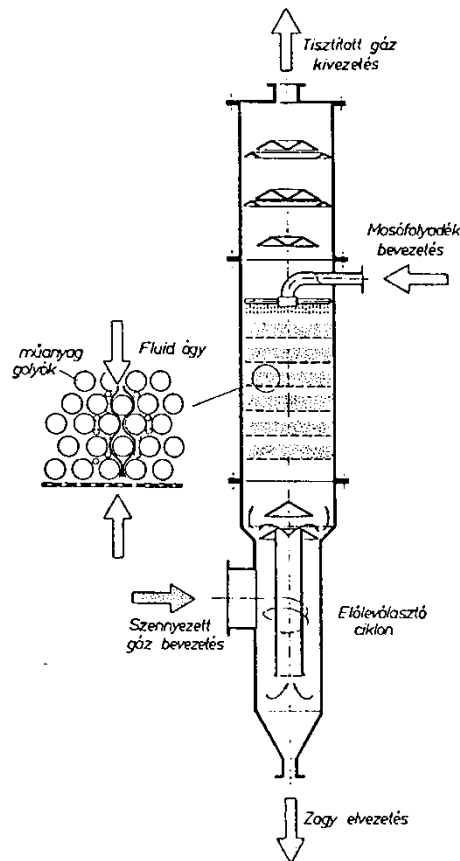
A tölteléktestek anyaga lehet kerámia, fém és műanyag, a nedvesítés, a súly és a korróziós igényeknek megfelelően. A rendezett vagy csomagöltetek egyre nagyobb arányban nyernek alkalmazást a diffúziós műveleteknél, mivel az egységnyi térfogatban nagy belső felületet tudnak kialakítani kedvező nyomásesés mellett. A csomagöltetek hullámosított, hajtogatott, szorosan egymás mellé helyezett lemezekből, drótszövetekből stb. állnak. A szalagokat, szitákat szorosan egymás mellé helyezve csomagokká, adott magasságú egységekké formálják. A feladat megvalósításához, az anyagátadáshoz szükséges magasságot a csomagok egymás fölé helyezésével biztosítják. Az **52. ábra** néhány rendezett töltet kialakítást mutat.



**52. ábra** Néhány rendezett töltet kialakítás

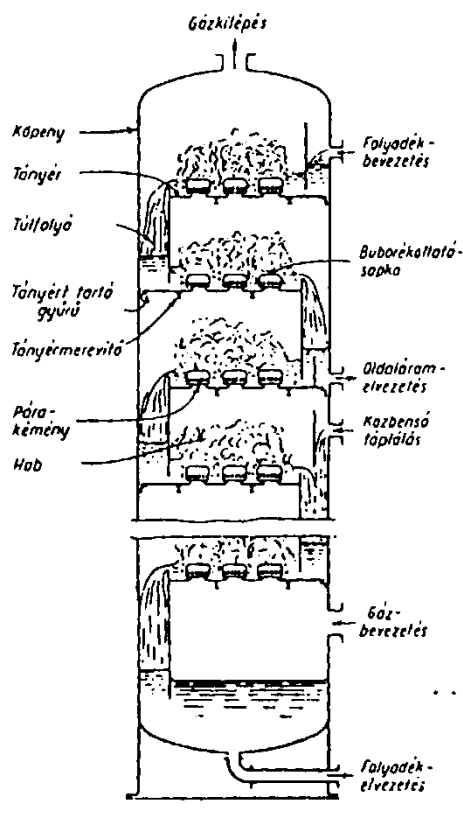
A mozgóréteges mosók az eltömődés veszélye nélkül alkalmasak egyidejű por és gáztisztításra. Az **53. ábra** egy több kaszkádos fluid diszperz kolonna látható. Az egyes fokozatokon különböző kialakítású és sűrűségű töltet helyezkedik el, amely fluid állapotban, intenzív mozgása és keveredése miatt megakadályozza az eltömődést. A tisztítandó gáz alulról halad felfelé, az egyes fokozatokon intenzív érintkeztetés valósul meg. A folyadék a permetező fej segítségével diszperz fázisúvá válik, amely nagy érintkezési felületet biztosít, ezért előnyösen alkalmazható abszorpciós feladatokra is. A töltetek fluid tartományában a nyomásesés gyakorlatilag állandó.





**53. ábra** Mozgóréteges mosó működési vázlat

A tálcás tornyok függőleges, hengeres készülékek. A tisztítandó gáz a torony alján lép be, a tálcákon lévő perforációkon, nyílásokon, szelepeken vagy réseken keresztüljutva a torony fejrészénél lép ki. A mosófolyadékot a torony fejrészénél vezetik be, és az a tálcák túlfolyóin keresztül jut le az alatta lévő tányérra, majd a torony aljára. A réseken áthaladó gáz a tálcán lévő folyadékkal intenzíven keveredik és ezáltal a két fázis között végbemegy az anyagátadás. A tálcás mosókat a beépített tálcák típusa szerint különböztetik meg: buboréksapkás, szitatányéros, szeleptálcás, rács tálcás, billenőelemes stb. A beépített tálcák az érintkeztetés szempontjából egy-egy fokozatot jelentenek. Az előír koncentráció változáshoz annyi tálcát szükséges a készülékbe beépíteni, ahány fokozat a korábban ismertetett számítási mód alapján szükséges. Egy buboréksapkás torony vázlatát az **54. ábra** mutatja.



54. ábra Buboréksapkás torony felépítése

### 10.3.2. Abszorpciós elven működő füstgáztisztítás

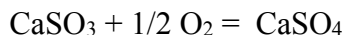
A füstgáz kén-dioxid tartalmát csökkentő eljárások közül az erőművek legnagyobb része nedves-abszorpciós füstgáztisztító eljárást alkalmaz. Ezeknél a legnagyobb gondot a melléktermékként keletkező szennyvíz illetve iszap elhelyezése jelenti.

A legelső és máig is széles körben alkalmazott füstgáz kén-dioxid csökkentési módszer a földalkáli vegyületekkel történő nedves mosás. Leginkább a mészkőpor, dolomitpor, oltott mész és magnézium-oxid használatos. Az 55. ábra egy meszes abszorpciós eljárás kapcsolási vázlata látható, ahol abszorbensként mésztejet vagy finom szemcsézetű mészkőpor 8-13 %-os szuszpenzióját alkalmazzák a füstgáz mosására.

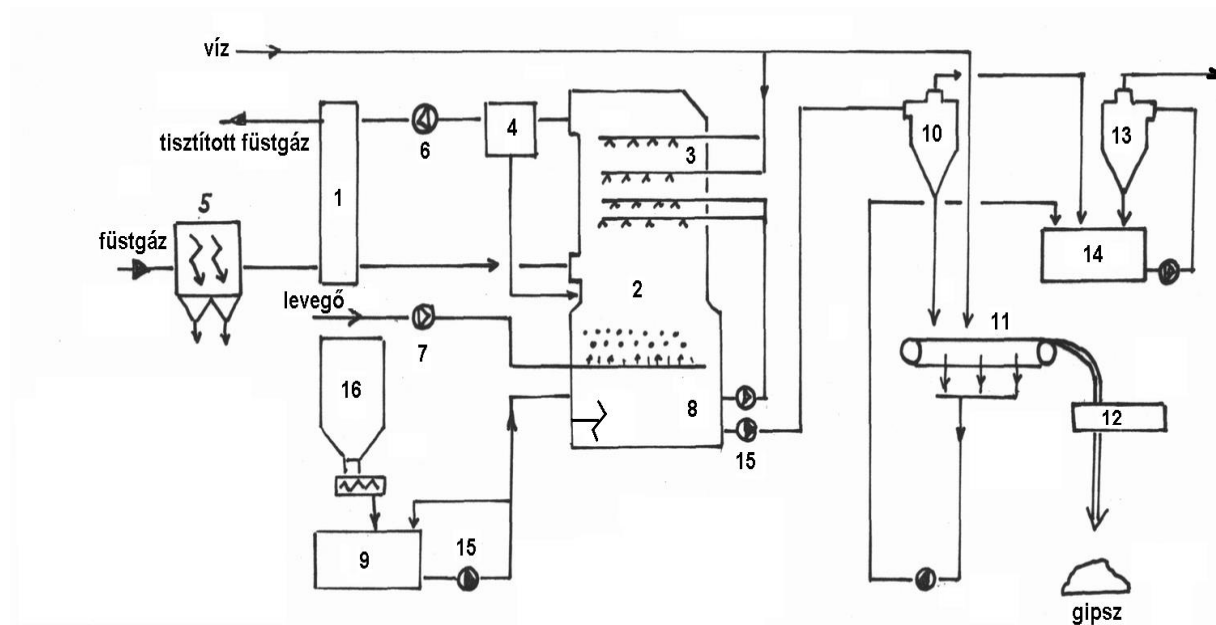
Az eljárás legfontosabb egysége az abszorber, melyben az alábbi reakciók játszódnak le:



Az abszorber alján bevezetett oxidáló levegő hatására gipsz keletkezik:



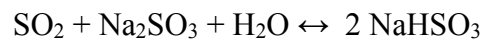
A reakciók során keletkező gipsz értékesíthető és felhasználható, ha az tiszta, szennyeződéstől mentes, ezért a füstgáztisztító rendszerbe belépő füstgázt a szilárd szennyeződésektől egy hatásos porleválasztóban leválasztják. A nedves mosóban az abszorpció hatásossága a hőmérséklet csökkentésével javul, valamint az abszorbens folyadékvesztése is kevesebb, ha a füstgáz hőmérsékletét hőcserélőben lecsökkentik. Az itt keletkező hő az abszorberből kilépő füstgáz visszamelegítésére fordítható. A füstgáz cseppektől való mentesítésére és visszamelegítésére a kéményben jelentkező savharmatponti problémák miatt van szükség. Az abszorpció lefolytatása olyan készülékben lehetséges, amelyben az eldugulás veszélye nem jelentkezik, ezért legtöbbször permetező, vagy mozgóréteges (fluid diszperz) stb. mosókat alkalmaznak. A keletkező gipsz jól ülepedő iszap formájában van jelen, amelyet hidrociklonokban és vákuum-szűrőben választanak el a vizes fázistól.



1. hőcserélő, 2. abszorber, 3. permetező elemek, 4. cseppleválasztó, 5. porleválasztó, 6. ventilátor, 7. oxidációs levegő ventilátor, 8. abszorber tartály, 9. mészhidrát tartály, 10. hidrociklon, 11. vákuum szalag-szűrő, 12. gipsz szárító, 13. vízkezelés, 14. recirkulációs tartály, 15. szivattyú, 16. mészke tartály

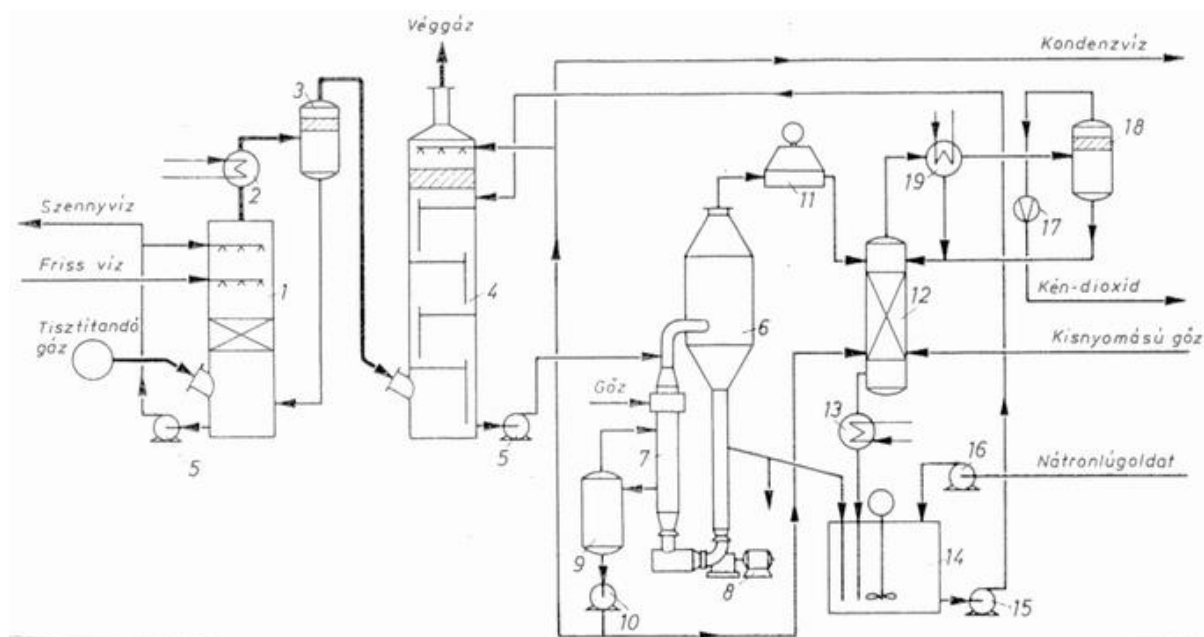
### 55. ábra Meszes-abszorpciós füstgáztisztítás

A nedves füstgáz kén-dioxid mentesítés egy másik, igen elterjedt változata a nátriumvegyületekkel történő tisztítás. Abszorbensként a nátronlúg vagy a nátriumsók vizes oldatát alkalmazzák. A nátriumsók oldhatósága a meszes szuszpenziós eljárásokban alkalmazott abszorbens anyagok és a belőlük képződött termékek oldhatóságát felülmúlja, így a nátriumvegyületekkel történő füstgáz mosáskor a lerakódási, eldugulási és eróziós problémák elmaradnak. A legismertebb nátriumvegyületes eljárás a Wellman-Lord eljárás, amely alapreakciója:



Regeneráláskor a reakció úgy megy végbe, hogy  $\text{SO}_2$  szabaduljon fel.

Az **56. ábra** bemutatott eljárásnál a füstgáz először a kvencs toronyba jut, ahol lehül és a szilárd komponensek leválasztásra kerülnek. Az abszorberben ellenáramban találkozik a mosófolyadékkal. A mosófolyadék a regenerálás után visszatáplált szulfitoldat, amelyet szükség esetén NaOH-oldattal erősítenek fel és a mosófolyadék-gáz optimális értékének megfelelően keringetnek. Az abszorber alján összegyűlő biszulfitos mosófolyadékot a bepárlóba táplálják. A bepárlóban keletkező kristályzagyot ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) elválasztják az anyalúgtól. A kristályos  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  az oltótartályba jut és oldatként kerül vissza az abszorberbe. A bepárlóból távozó vízgőz kb. 10 %  $\text{SO}_2$ -t tartalmaz. A vízgőz kondenzáltatása után a  $\text{SO}_2$  tartalom kb. 60 %-ig növelhető. A lekondenzált vizet a nátriumsulfit-oldó tartályba vezetik, így az oldatban lévő  $\text{SO}_2$ -t is hasznosítják. A keletkező  $\text{SO}_2$ -t vagy kénsavgyártásnál használják fel vagy elemi ként állítanak elő belőle.



1. vizes előmosó, 2. 11.13. 19. hőcserélő, 3.18. cseppléválasztó, 4. abszorber, 5. 8.10.15.16. szivattyú, 6.7. bepárló kristályosító, 8. kondenzvíz tartály, 12. kihajtó oszlop, 14. oldótartály, 17. kén-dioxid kompresszor

**56. ábra** A Wellmann-Lord eljárás elvi vázlatja

#### 10.4. Kondenzáció

A kondenzációs eljárások során a gázáramból a gáz halmazállapotú szennyeződések úgy távolítják el, hogy folyékony halmazállapotúvá teszik. Ezt vagy a nyomás növelésével vagy a hőmérséklet csökkentésével, vagy e kettő kombinációjával lehet megvalósítani. A kompresszorok nagy üzemeltetési és karbantartási költsége miatt azonban a levegőtisztaság-védelem területén általában a hőmérséklet csökkentés módszerét alkalmazzák.

A kondenzációt elsősorban nagy oldószertartalmú száraz gázok részleges kicsapására használják előleválasztóként.

A kondenzáció végső hatásfoka az alkalmazott hőmérséklettől függ. Ha egy párat tartalmazó gázt lehűtünk, belőle a pára lekondenzálódik. Azt a hőmérsékletet, ahol ez megtörténik, harmatponti hőmérsékletnek nevezzük. További hőmérséklet csökkentés esetén az alkotó parciális nyomása csökken. Minél kisebb a parciális gőznyomás, annál kisebb a szennyeződés koncentrációja a levegő áramban.

A kondenzációs elven működő rendszerek általában 90%-nál nagyobb hatásfokkal működnek. A szükséges kondenzációs hőmérsékletet a gáz szennyezőanyagainak és az elérni kívánt gáztisztaság mértékének ismeretében kell meghatározni.

A levegőtisztaság-védelemben a kondenzáció három különböző módszerrel valósítható meg:

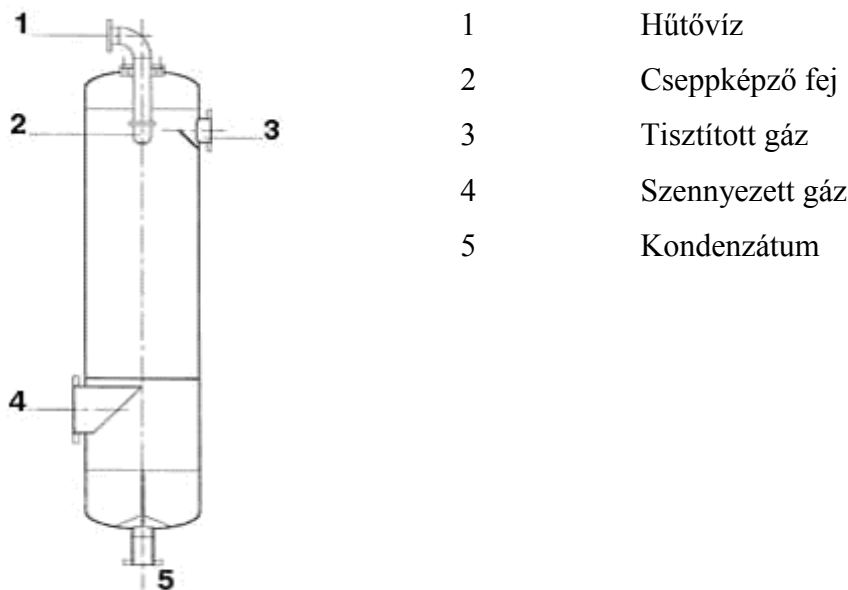
- Hagyományos kondenzáció
- Hűtőgépes kondenzáció
- Kriogén rendszerű kondenzáció

### Hagyományos kondenzáció

A hagyományos rendszerekben levegő vagy víz segítségével lecsökkentik a gázáram hőmérsékletét 4°C-ra. Hűtőfolyadék/sóoldat alkalmazásával akár -18°C is elérhető.

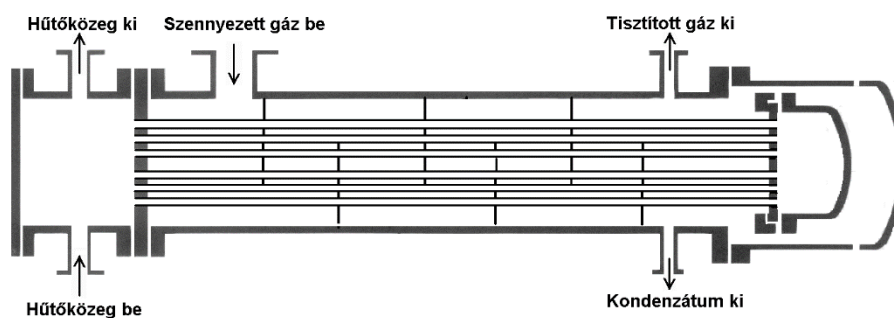
Hagyományos rendszerekben keverő kondenzátor vagy felületi kondenzátor alkalmazható.

A keverő kondenzátor (57. *ábra*) lényegében egy nedves mosó (permetező kolonna vagy tányéros oszlop), amelyben közvetlenül érintkezik a gázáram a hűtő folyadékkal, általában vízzel. A keverő kondenzátorok legfőbb előnye az egyszerűség és olcsóság. Hátrányuk, hogy a kondenzált szennyeződések és a víz összekeverésével növekszik a szennyvízkezelés, illetve a szennyeződés visszanyerésének költsége.



57. *ábra* Keverő kondenzátor

Felületi kondenzátorként általában csőköteges hőcserélőt alkalmaznak. (58. *ábra*) Ezekben a berendezésekben egy hengeres köpeny számos, a köpeny tengelyével párhuzamos, kis átmérőjű csövet vesz körbe. A hűtőközeg, ami általában víz vagy sóoldat, a csövekben áramlik, míg a gáz a köpenyben, a csöveken kívül. A gáz áramlását terelő lemezek beépítésével lehet módosítani. A hő a gázból a csőfalakon át a hűtőközegbe áramlik, így a gáz hőmérséklete lecsökken, a gőz halmazállapotú szennyeződések kondenzálódnak.



**58. ábra** Vízszintes csőköteges kondenzátor

Felületi hőcserélőként bordáscsöves hőcserélőt is lehet alkalmazni. Ezekben a készülékekben a szennyezett gáz a külső felületükön bordákkal ellátott csövekben áramlik. A hő a szennyezett gázból a csőfalon és a bordákon át a külső felület mentén mozgó, a szennyezett gáznál alacsonyabb hőmérsékletű hűtő levegőbe áramlik, így a szennyezett gáz lehül, a szennyező komponens kondenzálódik.

A felületi kondenzátorok beszerzési és karbantartási költsége sokkal nagyobb, mint a keverő kondenzátoroké, de előnyük, hogy a leválasztott szennyező anyag nem keveredik a hűtőfolyadékkal, és így nincs szükség további szétválasztásra (pl. szennyvíztisztításra).

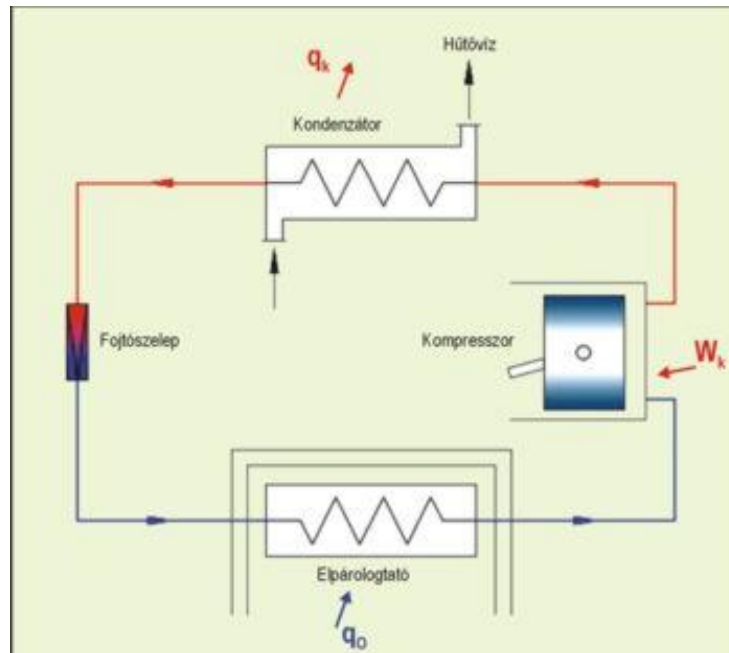
### Hűtőgépes kondenzáció

A hűtőgépes rendszerek komprimált hűtőközeget használnak és  $-100\text{ °C}$  körüli hőmérsékleten működnek. Az alkalmazandó hűtőközeg környezetvédelmi szempontok alapján kerül kiválasztásra. (pl. gyúlékonyság, ózonlyuk károsító hatás)

A hűtőközeg egy négy egységből álló hűtőkörfolyamatban kering.

- ◆ Egy csőköteges hőcserélő csöveiben áramlik, lehűtve a köpenyterben áramló szennyezett gázt, és kondenzálva az abban levő szennyező gázokat. A folyadék halmazállapotú hűtőközeg a felvett hő hatására elpárolog. (**59. ábra** elpárologtató)
- ◆ A hűtőközeg páráját komprimálják (**59. ábra** kompresszor)
- ◆ Egy bordáscsöves hőcserélő csöveibe vezetik, ahol a hő átadódik a csövek külső felületén a bordák között áramló hűtő levegőbe, és így a hűtőközeg ismét folyadék halmazállapotúvá válik. (**59. ábra** kondenzátor).

- ◆ A komprimált hűtőközeg ezután átáramlik egy expanziós szelepen, lecsökken a nyomása és így tér vissza a szennyezett gáz hűtésére szolgáló csököteges hőcserélőbe.



59. ábra Hűtőkörfolyamat

Hűtőgépes kondenzáció esetén a szennyezett gáz nedvességtartalma a hűtés során lecsapódik és megfagy, fennáll a jegesedés veszélye. Az esetleges jegesedést úgy lehet megakadályozni, hogy a szennyezett gázáramot a kondenzáció előtt egy 4°C körül üzemelő csököteges hőcserélőn át vezetik. Itt a nedvességtartalom kondenzálódik és csak ezután lép be a nedvességmentes szennyező gáz a fent leírt, a szennyező gáz kondenzációjára szolgáló alacsonyabb hőmérsékletű rendszerbe.

### Kriogén kondenzáció

Egyes esetekben a véggázban levő szennyező gázok kondenzációjához akár

-150°C-nál alacsonyabb hőmérsékletre is szükség lehet. Ezt a hőmérséklet tartományt kriogén rendszerek alkalmazásával lehet elérni.

A kriogén rendszerek hűtőközegként cseppfolyós gázokat (nitrogén, szén-dioxid) alkalmaznak.

A **nitrogén (N<sub>2</sub>)** semleges inert gáz, szokásos környezeti feltételek között nem lép reakcióba más anyagokkal. Az általunk belélegzett levegőnek mintegy 78%-át alkotja. Légköri nyomáson -196 oC-on cseppfolyósodik. Előállítás a levegőből történik levegőszétválasztással.

A **szén-dioxid (CO<sub>2</sub>)** természetes forrásokból, vagy ipari folyamatokból származik. Normál feltételek mellett (0 °C és 1 bar nyomás) ez is semleges, szagtalan, íztelen, színtelen, nem éghető gáz. Légköri nyomáson a CO<sub>2</sub> csak szilárd (szárazjég), vagy gáz halmazállapotú lehet. A

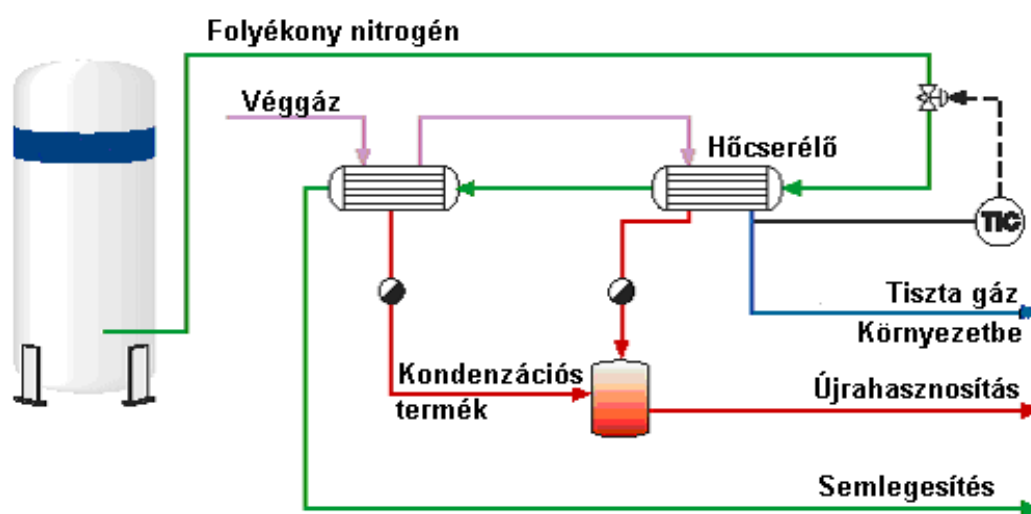


folyékony CO<sub>2</sub> csak 5,18 bar feletti nyomáson létezik. A folyékony CO<sub>2</sub> tárolása körülbelül 17 bar nyomáson történik -25 °C-on.

Kriogén rendszerek alkalmazásával akár -196 °C-os üzemi hőmérséklet is elérhető. Kialakításuk viszonylag egyszerű, működésükhöz hűtőegységre nincs szükség, és mivel a hűtőközeg semleges, felhasználás után a légkörbe üríthető.

A legegyszerűbb kriogén rendszerekben csököteges hőcserélőt alkalmaznak. A csöveken belül áramló cseppfolyós gáz hőt vesz fel a köpenyoldalon áramló szennyezett gázból, a gáz hőmérséklete lecsökken, a benne levő szennyeződés kondenzálódik. A hőfelvétel hatására a cseppfolyós gázból gáz halmazállapotú lesz, ami semlegesíthető és a légkörbe üríthető.

A **60. ábra** egy folyékony nitrogént alkalmazó kriogén kondenzációs technológia folyamatábrája látható. A véggáz szennyeződésének kondenzációja két sorbakapcsolt csököteges hőcserélőben történik. A véggáz és a folyékony nitrogén ellenáramban haladnak. Az egyik hőcserélőben a véggáz előhűtése történik, a másikban pedig a szennyező alkotók kondenzációja.



**60. ábra** A kriogén kondenzációs technológia vázlatja

Ilyen különösen alacsony hőmérsékleten előfordulhat, hogy a szennyeződés a csövek külső felületén deresedést okoz. E probléma elkerülésére szükség lehet egy párhuzamosan kapcsolt hőcserélőre. Míg az egyik hőcserélőt dértmentesítik, a másik üzemel.

Megoldás lehet a kettős hőcserélő rendszer is. Az első hőcserélőben a cseppfolyós gázt arra használják, hogy a cirkuláló hűtő folyadékot lehűtse éppen a szennyeződés fagyáspontja fölé,

Ez a folyadék tovább áramlik a második hőcserélőbe, ahol a szennyeződés kondenzálására használják, majd visszatér az első hőcserélőbe.

A cseppfolyós gázokat közvetlen érintkeztetésű rendszerekben is alkalmazhatják. Ezekben a rendszerekben nincs jegesedési probléma, mivel nincsenek különösen alacsony hőmérsékletű felületeik. A cseppfolyós gázt porlasztófejeket keresztül egy nyitott kamrába injektálják, ahol közvetlenül érintkezik a szennyezett gáz árammal. A kamra szigeteléssel van ellátva, hogy a hőmérsékletét a lehető legalacsonyabb értéken lehessen tartani. A kamra falának külső felületére fűtőszálat lehet elhelyezni, a belső felület esetleges jegesedésének eltávolítására.

#### **10.4.1. Termikus véggáz-tisztítás**

Az oldószeres technológiákkal dolgozó területeken az elmúlt években a munkahely biztonsága és a dolgozók egészségvédelme kapcsán a maximális munkahelyi oldószer koncentráció betartása mellett újabb betartandó cél is előtérbe került, a károsanyag kibocsátás csökkentése. Az illékony szerves vegyületek (VOC) kibocsátási határértékeinek megállapítása az éves oldószer felhasználás alapján történik.

A különböző emisszió csökkentési lehetőségek közül a  $\text{mg}/\text{Nm}^3$ -tól a  $\text{g}/\text{Nm}^3$ -ig terjedő koncentrációtartományban, illetve a pár száztól a pár százezer  $\text{Nm}^3/\text{h}$ -ig terjedő véggáz áramok esetén az ismert tisztítási eljárások közül a termikus oxidáció bizonyult a leggazdaságosabbnak és legüzembiztosabbnak.

A termikus oxidáció történhet utóégetőben vagy közvetlen fűtésű égetőkben. A termikus eljárások tisztítási elve a véggázban lévő szénhidrogének termikus oxidációja (elégetése) széndioxidá és vízzé.

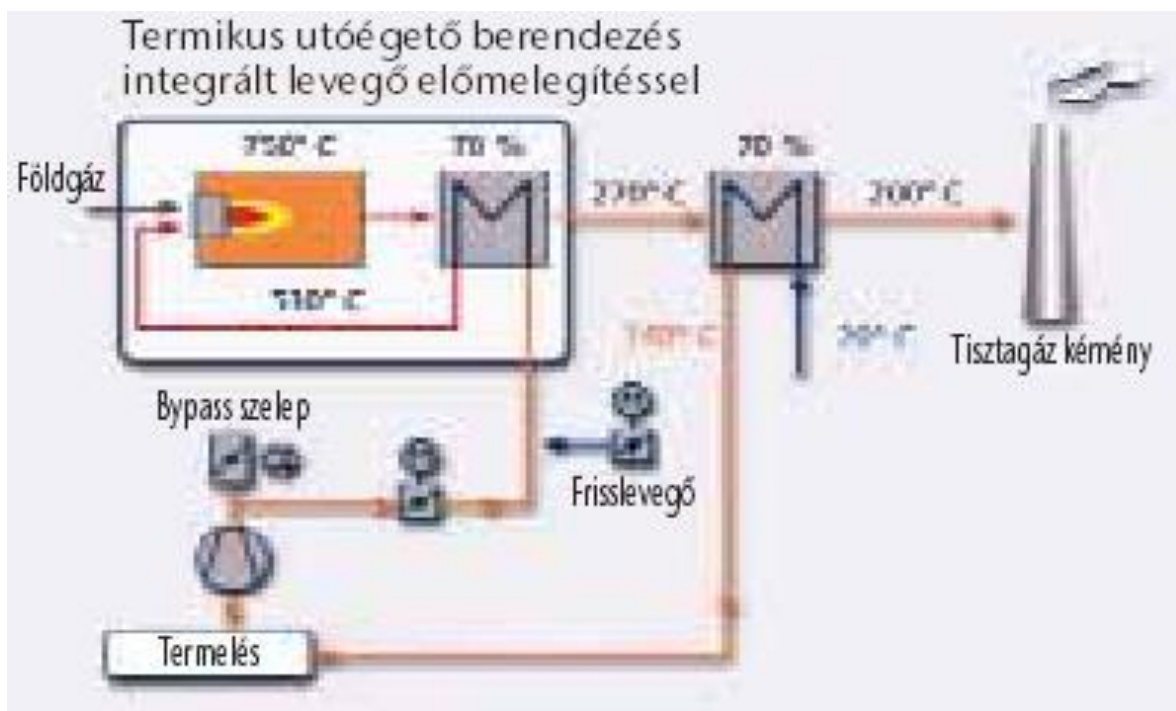
Az oxidáció tisztán termikus berendezésekben  $750\text{--}850\text{ }^\circ\text{C}$ -on, katalitikus eljárás esetén  $350\text{--}450\text{ }^\circ\text{C}$ -on megy végbe. Azaz a belépő gáz hőmérséklete és ezen hőfokszintek közötti hőmérséklet-különbségnek megfelelő hőmennyiség bevitelére van szükség ahhoz, hogy a folyamat lejátszódjon. A gázban jelen lévő oldószerektől függően  $3\text{--}5\text{ g}/\text{Nm}^3$  koncentráció fölött az oxidáció önfenntartóvá válik, vagyis a gázban jelen lévő oldószerek elégeésekor felszabaduló égéshő elegendő a folyamat fenntartására. Ennél kisebb koncentráció esetén azonban kívülről, például földgáz betüzelésével kell a hiányzó hőmennyiséget pótolni. Ahhoz, hogy a termikus véggáz tisztítás üzemeltetési költségei egy elfogadható szinten maradjanak, a hőenergia nagyfokú visszanyerésére van szükség. A következő termikus utóégető berendezés típusok ismertek:

- Termikus utóégető rekuperatív hőhasznosítással,

- Termikus utóégető regeneratív hőhasznosítással,
- Katalitikus utóégető,
- Koncentrációnöveléssel kombinált termikus utóégető.

### Termikus rekuperatív utóégető (61. ábra)

A hőhasznosítás a berendezésbe integrált hőcserélőben, falon át való hőátadással történik. Az utóégetőből kilépő forró tisztított gáz előmelegíti a beérkező véggázt egy lemezes, csőköteges, vagy más hagyományos hőcserélőben. Így az ún. belső hőhasznosítási hatásfok viszonylag alacsony. A véggáz maradék hőtartalmát egy külső hőcserélőben (melegvíz előállítás, technológia hőigényének fedezése stb.) kell visszanyerni.



61. ábra A termikus rekuperatív utóégető működési vázlat

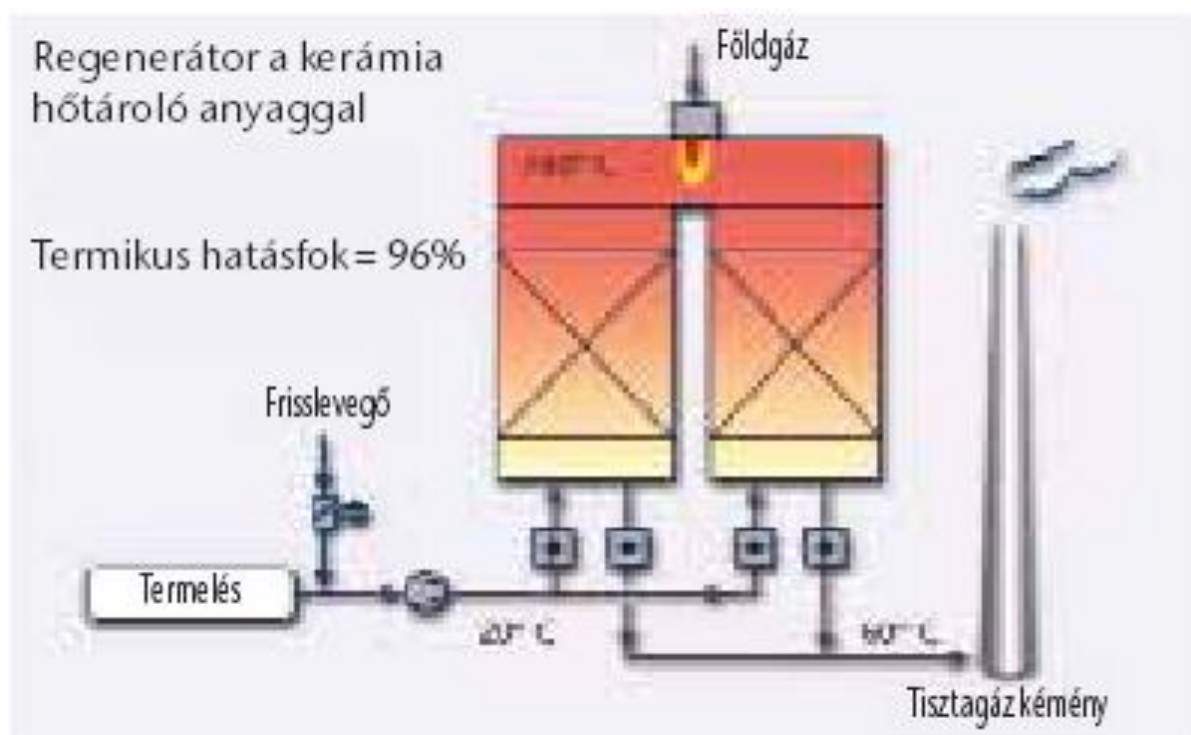
Jellemzői:

- Tisztítandó véggázáram: 2000–55 000 Nm<sup>3</sup>/h,
- Égetőkamra hőmérséklete: 750–780 °C,
- Belső hőhasznosítás hatásfoka: max. 76%,
- Alkalmazás – közepes–nagy koncentrációk; külső hőhasznosítás.

### Termikus regeneratív utóégető

A regeneratív termikus oxidációhoz szükség van két vagy több kerámia ágyra, amelyek hőtárolóként működnek. Ezeken az ágyakon felváltva áramlik át a forró tisztított gáz és az oxidációhoz előmelegítendő szennyezett véggáz.

A **62. ábra** látható folyamatábrán az égő alatti két kamra nagy hőkapacitású kerámiatestekkel van töltve. Az égőtől érkező tisztított forró gáz átáramolva az egyik kerámiaágyon, átadja hőtartalmát, felmelegíti azt, és így lehülve, a kéményen át az atmoszférába távozik. Ekkor az automatikus működtetésű pillangószelepek megváltoztatják a gáz útját, és a hideg tisztítandó gáz most ezen az ágyon keresztül áramlik az égőhöz. Kinyerve annak hőtartalmát, az égetéshez közeli hőmérsékletre előmelegedve lép az égőtérbe, majd a másik ágyat fölmelegítve távozik a berendezésből. Ezek a ciklusok mintegy 120–180 másodpercenként váltakozva követik egymást. Ezzel a módszerrel a berendezés hőhasznosítási hatásfoka mintegy 95-96%.



**62. ábra** A termikus regeneratív utóégető működési vázlat

Jellemzői:

- Tisztítandó véggázáram: 500–120 000 Nm<sup>3</sup>/h,
- Égetőkamra hőmérséklete: 800–850 °C,
- Belső hőhasznosítás hatásfoka: max. 96%,
- Alkalmazás: alacsony–közepes koncentrációk esetén

### **Katalitikus utóégető**

Ha katalizátorral segítjük az oxidációt, a folyamat sokkal alacsonyabb hőfokszinten megy végbe.

*A katalizátor felépítése:*

- Aktív katalizátor anyag, ami kémiai elősegíti a szükséges reakciót. Illékony szerves oldószerek (VOC) oxidációja esetén nemes fémek (platina, palládium, ródium) és bizonyos fém-oxidok alkalmazhatók.
- Hordozó anyag: általában inert, nagy porozitású fém-oxid (alumínium, szilícium, titán), nagy fajlagos felülettel (150-300 m<sup>2</sup>/kg). Az aktív katalizátor anyagot vékony rétegben felhordják a hordozó anyag belső felületére.
- Mechanikai tartószerkezet, ami a katalizátor egység fizikai szerkezetét biztosítja. Állhat formázott elemekből (alumínium golyók) vagy lehet különböző kialakítású (fém fólia, monolit kerámia)

A katalizátorok kétféle szerkezeti kialakításban használhatók:

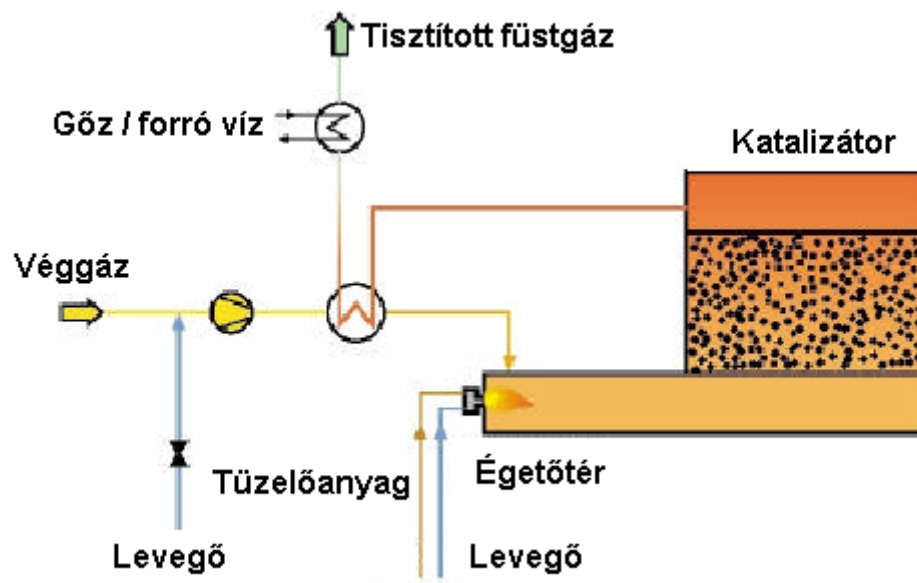
- Töltött ágy: az anyagot ömlesztve betöltik egy tartályba, ahol egy rögzített perforált lemez tartja. A véggáz átáramlik a katalizátor ágyon, miközben keveredik, és a katalizátor felülettel érintkezik.
- Monolit katalizátor: A katalitikusan aktív anyag számára kerámiából vagy fémből készült sejtek biztosítják a megfelelő tartószerkezetet. A véggáz a monolit szerkezet csatornáin át áramlik. Bár a gáz és szilárd fázis érintkezése nem olyan hatékony, mint töltött ágyaknál, és a katalizátor mérgekkel szemben kevésbé ellenállóak, a monolit egységek üzemére jellemző kis nyomásesés miatt elterjedten alkalmazzák.

A katalitikus utóégetőben az oxidáció 350–450 °C-on megy végbe, tisztán termikus berendezésekben 750–850 °C-on. Az alacsonyabb hőmérséklet biztonságtechnikai, szerkezetianyag-kiválasztási szempontból jóval kedvezőbb helyzetet teremt.

Általánosságban elmondható, hogy amennyiben kizárható a katalizátormérgek (kén, nehézfémek, stb.) jelenléte, és a tisztítandó gáz mennyisége nem haladja meg a 12 000–15 000 Nm<sup>3</sup>/h mennyiséget, akkor a katalitikus utóégetés a leggazdaságosabb. Ennél nagyobb gázmennyiség áramlástan okokból olyan nagy berendezést igényel, hogy az azt kitöltő katalizátormennyiség ára már gazdaságtalanná teszi ezt a megoldást. A katalizátor garantált élettartama 2 év, várható élettartama 7–12 év.

A rendszer alapvető elemei (63. ábra):

- Ventilátor, ami a levegő áramoltatását biztosítja;
- Hőcserélő, ami az égetőbe lépő véggáz előmelegítésére szolgál;
- Égő, ami felhevíti a gázt a katalizátor aktiválási hőmérsékletre;
- Katalizátor ágy.



63. ábra Katalitikus utóégető működési vázlat

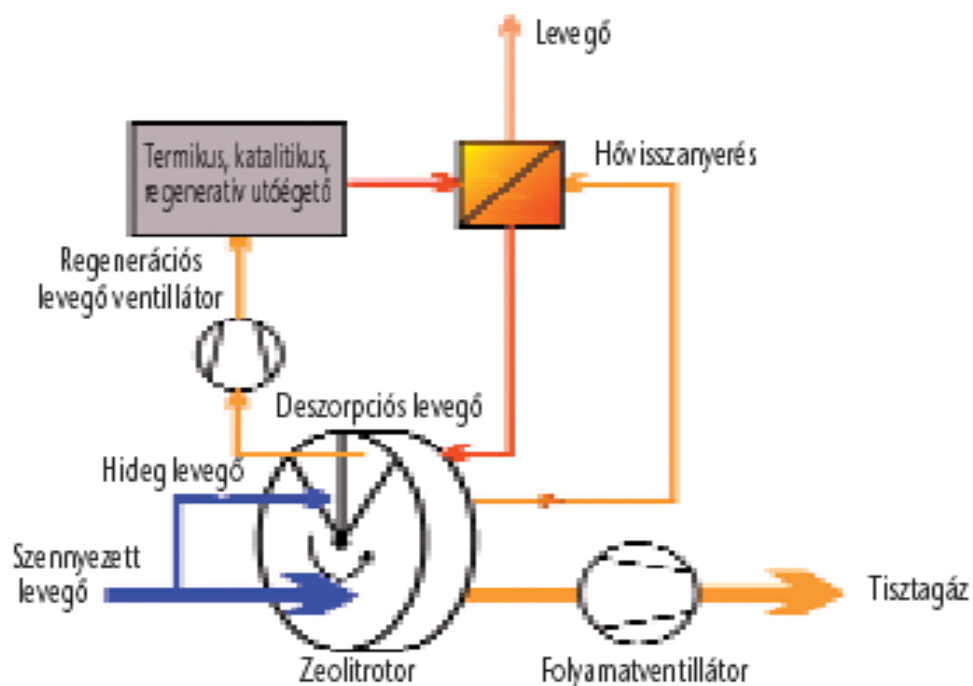
Jellemzői:

- Tisztítandó véggáz áram: 1000–15 000 Nm<sup>3</sup>/h,
- Égetőkamra hőfoka : 250–450 °C,
- Alkalmazás: alacsony–közepes koncentrációknál, katalizátormérgek távollétében.

### Koncentrációnöveléssel kombinált termikus utóégető (64. ábra)

Igen nagy gázmennyiségek és alacsony károsanyag-koncentráció esetén egy adszorpciós felkoncentráló egység segítségével nagymértékben csökkenthetők a termikus utóégető berendezés méretei.

A felkoncentráció egységgel bármely oxidációs technológia kiegészíthető. A tisztítandó gáz átáramlik a folyamatosan forgó, adszorbens anyagból (pl. zeolitból) készült rotoron. Itt a gázból az illékony szerves alkotók adszorbeálódnak és a tisztított gáz a légkörbe távozik. Az adszorbens anyagból a megkötött szénhidrogéneket kis mennyiségű meleg levegővel deszorbeálják, és így egy megnövelt koncentrációjú véggáz áram keletkezik, amelynek a további tisztítása egy termikus utóégető berendezésben történik. Miután az adszorpció alacsony hőmérsékleten megy végbe, a koncentrációs folyamat csak hideg véggáz esetén gazdaságos.



**64. ábra Koncentrációnöveléssel kombinált termikus utóégető**

Jellemzői:

- Tisztítandó véggáz térfogatárama: 20 000–200 000 Nm<sup>3</sup>/h,
- Alkalmazás: nagyon alacsony koncentrációk, véggáz hőmérséklet <35 °C.

## 10.5. Biológiai véggáz-tisztítás

A véggáz tisztítás hagyományos fizikai és kémiai módszerei mellett az illékony szerves oldószerek eltávolítására egyre inkább előtérbe kerül a gazdaságos biológiai eljárások alkalmazása.

## Általános jellemzők

A biológiai véggáz tisztítás technológiai berendezései a bioreaktorok:

- bioszűrők,
- permetezett bioszűrők,
- bio gázmosók
- membrános bioreaktorok.

A működés elve ezen reaktorok mindegyikénél hasonló. Az illékony szerves vegyületeket tartalmazó levegő átáramlik a bioreaktoron, ahol a szerves alkotók a gázfázisból folyadék fázisba jutnak. A mikroorganizmusok (pl. baktériumok, gombák) a folyadék fázisban növekednek és szükségük van a levegőből eltávolított komponensekre. A biológiai lebontásért felelős mikroorganizmusok normál esetben különböző organizmusok keverékeként növekednek. Így a különféle baktériumok, gombák és protozonok mikrobiológiai közösségként működnek. A mikroorganizmusok általában vékony rétegekben, úgynevezett biofilmekben helyezkednek el. A levegőben levő szennyeződések a legtöbb esetben a mikroorganizmusok számára szén forrásként, a növekedéshez és a létfenntartáshoz szükséges energia forrásként szolgálnak. Némely gázok, például a komposztálás során felszabaduló gáz sokféle (akár néhány száz) vegyi anyagból állnak. A mikrobiológiai közösséget úgy kell kialakítani, hogy képes legyen mindezen anyagok egyidejű eltávolítására, illetve átalakítására. A mikroorganizmusoknak a működésükhöz és új cellák kialakításához alapvető tápanyagokra és növekedést elősegítő elemekre van szükségük. Ide tartoznak a nitrogén, a foszfor, a kén, a vitaminok és a nyomelemek. Általában ezek a tápanyagok és elemek nem találhatóak meg a véggázban, ezért kívülről kell biztosítani.

A fent említett négy reaktor típus között alapvető különbségek vannak. Megkülönböztethetők például a mikroorganizmusok elrendezése szerint (fix vagy diszperz), a vizes fázis reaktorban elfoglalt helyzete szerint (mozgó vagy álló). Az utóbbi jelentősen befolyásolja a rendszer anyagátadási jellemzőit. A jelenleg véggáz tisztításban alkalmazott bioreaktorok négy alapvető típusának ismertetése az alábbi fejezetekben található.

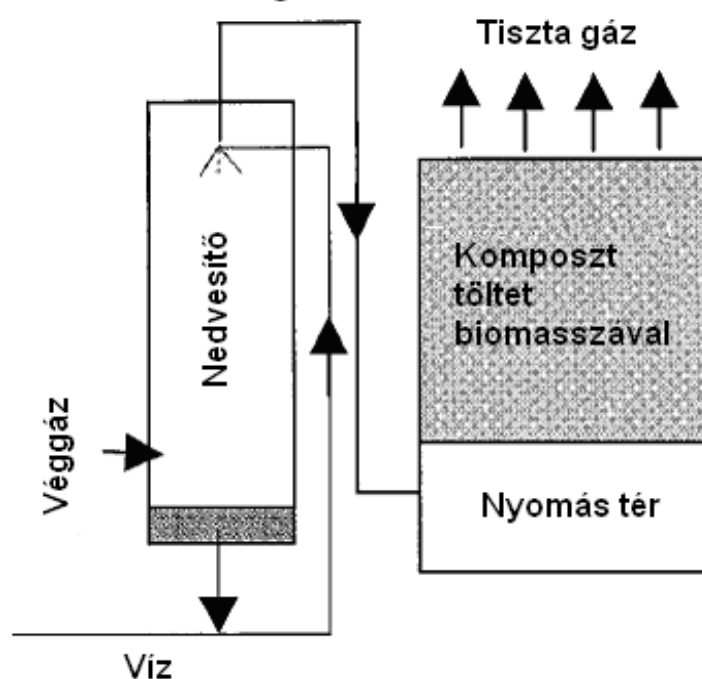
### Bioszűrő

A bioszűrőben a szennyezett levegő egy szerves hordozó anyaggal (komposzttal, termőfölddel, vagy fakéreggel) töltött ágyon áramlik át (**65. ábra**). A levegő a benne levő szennyező alkotókat átadja a töltet anyagon kialakuló és növekedő biofilmnek. A mikroorganizmusok



növekedéséhez szükséges táplálékot a szerves anyagok biztosítják. A biofilmet egy vékony folyadék réteg borítja. Fontos szabályzó paraméter a hordozó mátrix nedvesség tartalma, amelynek 40 és 60 % között kell lennie (g/g). A kiszáradás elkerülésére a levegőt a biofilterbe lépés előtt nedvesíteni kell. Amennyiben a véggáznak nagy a szilárd részecske tartalma (azaz a véggáz egy aeroszol), a nedvesítő kamra elé egy szűrőt kell beépíteni. Ez megakadályozza a bioszűrő eltömődését.

Mivel a folyadékfázis nem mozog, és nagy felületen oszlik el, a bioszűrőben vízben gyengén oldódó szerves anyagok is lebonthatók. A bioszűrőt nagy gáztömegek tisztítására használják (akár 200 000 m<sup>3</sup>/h térfogatáram esetén is).



**65. ábra** A bioszűrő elvi folyamatábrája

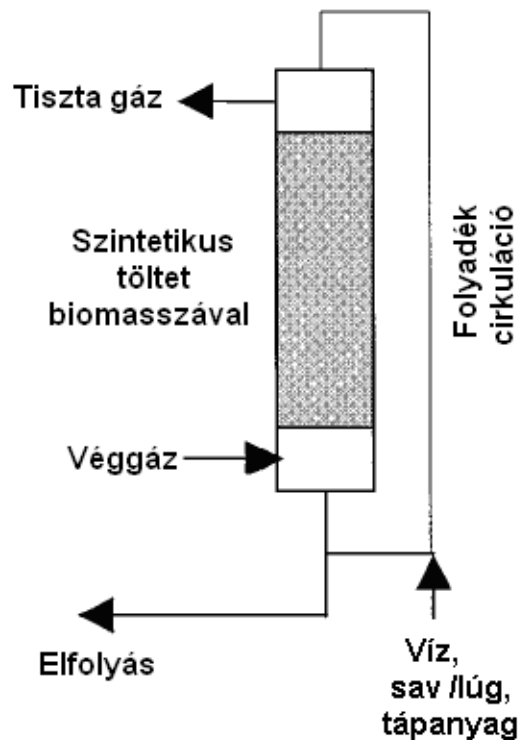


**66. ábra** A mikroorganizmusok elhelyezkedése a bioszűrőben (nagyítás)

A **66. ábra** látható, hogy a bioszűrőben a komposzt részecskéket vékony víz réteg és gáz buborékok veszik körül.

### Permetezett bioszűrő

A permetezett bioszűrő esetében a bioszűrőhöz hasonlóan a szennyező anyag a gáz fázisból átadódik a biofilmre, amely a töltet anyagok felületén képződik (**67. ábra**). A töltet anyag ebben az esetben vegyileg inert anyag, például műanyag gyűrű. Mivel ezekben az inert anyagokban tápanyag nem áll rendelkezésre, ezért a reaktorban egyen-, vagy ellenáramban keringtetik a folyadék fázist és így jutnak tápanyaghoz a mikroorganizmusok.



**67. ábra** A permetezett bioszűrő elvi folyamatábrája



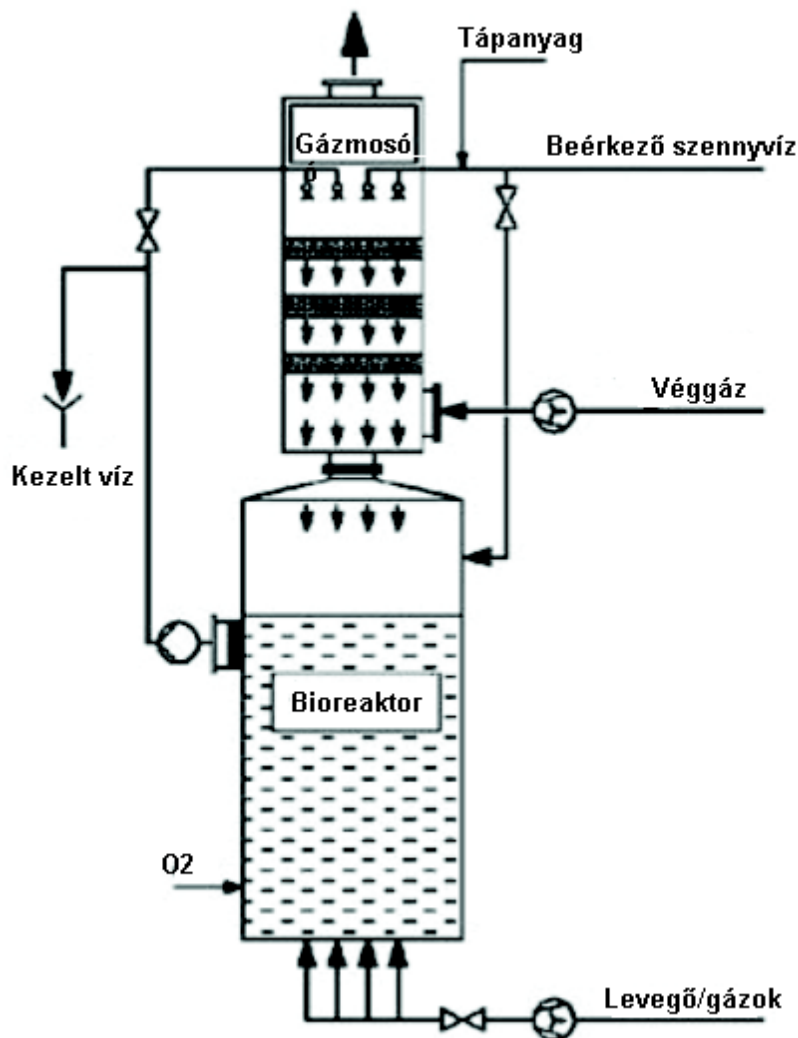
**68. ábra** A mikroorganizmusok elhelyezkedése a permetezett bioszűrőben (nagyítás)

A **68. ábra** látható, hogy a permetezett bioszűrőben a hordozó anyagot részben víz, részben biomassza, részben gáz borítja.

Alkalmazási területe: halogén- és kéntartalmú vegyületeket, valamint ammóniát tartalmazó véggázok tisztítása.

### Biológiai gázmosó (biomosó)

A biomosó két reaktorból áll. (69. ábra) Az első egység egy abszorpciós torony, amely a szennyező anyagot folyadék fázisban megköti. Ez a folyadék fázis lép be a második reaktorba, ami egyfajta eleven iszapos egység. Ebben az egységben a szennyező anyagokat lebontó mikroorganizmusok vízben lebegő pelyhek formájában vannak jelen. Az egységből kifolyó folyadékot az abszorpciós oszlopban a véggázzal egyen-, vagy ellenáramban cirkuláltatják.



69. ábra A biomosó elvi folyamatábrája



**70. ábra A mikroorganizmusok elhelyezkedése a biomasóban (nagyítás)**

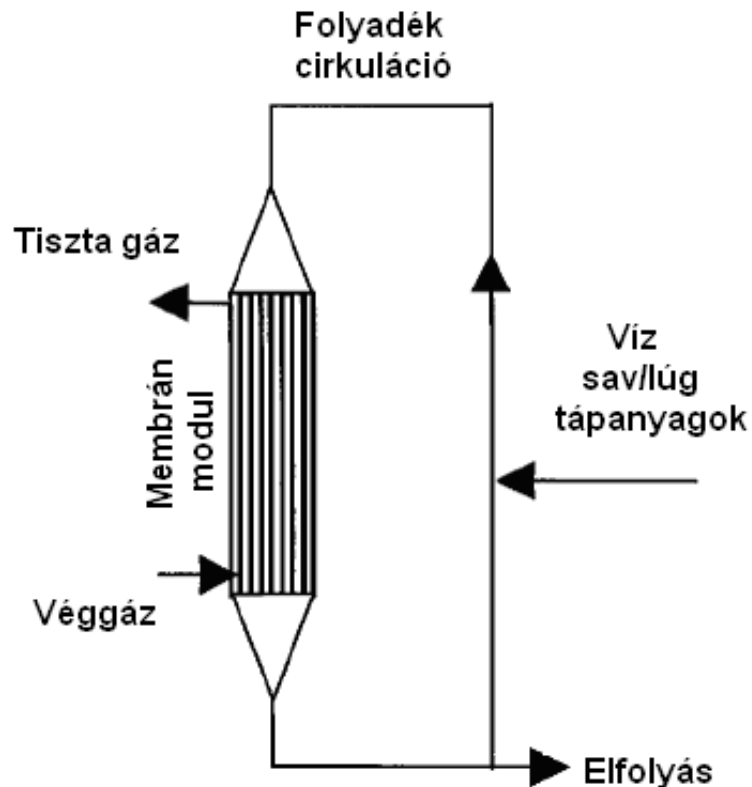
A **70. ábra** láthatók a biomasó bioreaktorában a baktériumpelyhek illetve szemcsék. Ez a technológia kielégítő hatásfokkal működik, ha a szennyező anyag jól oldódik a vízben. A szennyező gyengébb vízoldhatósága esetén anyagátadási problémák merülnek fel. Gyakorlati előnye, hogy helyszükséglete, azonos térfogatáram esetén a bioszűrőnél sokkal kisebb.

Jellemző alkalmazási területe:

- 50 000 m<sup>3</sup>/h-nál kisebb térfogatáram,
- 1000 mg C/ m<sup>3</sup> –nél kisebb átlagos koncentráció,
- 50-70 °C hőmérséklet.

**Membrán bioreaktor**

A membrán egyik oldala a tápanyagot is hordozó folyadék fázissal kerül kapcsolatba, míg a másik oldala a véggáz árammal. A tápanyagban gazdag folyadék fázist beoltják a szennyeződés lebontására alkalmas mikroorganizmusokkal. Ezek a mikroorganizmusok önmagukból egy a membránhoz kapcsolódó biofilmet alakítanak ki. Amint a szennyeződések átvándorolnak a megkülönböztetett áthaladást biztosító membránon, belépnek a tápanyagban gazdag folyadék fázisba és lebontásra kerülnek. A folyadék fázist egy tartályban kezelik, ahol a tápanyag frissítésre kerül, az oxigén ellátás biztosított, és a pH és hőmérséklet értékek szabályozottak. Különböző membrán típusok, úgymint poláris vagy hidrofób membránok, és különböző kialakítású membránok, úgymint cső- és síklapmembránok alkalmazhatók.



**71. ábra** A membrán bioreaktor elvi folyamatábrája

A **71. ábra** látható a membrán modul egyik oldalán a biomasszával és a tápanyagban gazdag folyadékkal, másik oldalán a véggázzal.

Ipari példák biológiai véggáz-tisztítás alkalmazására:

- ◆ élelmiszeripar: aromagyártás, kávépörkölés;
- ◆ lakkozó üzem véggáz tisztítás;
- ◆ talajtisztítás során keletkező véggázok kezelése;
- ◆ szennyvíztisztítók gázainak kezelése (kén-hidrogén, szerves kénvegyületek)

## 10.6. Kénmentesítési technológiák

(Hanus István)

Jelenleg a világon az antropogén forrásokból származó kén-kibocsátások a természetes forrásokból származókat valamelyest meghaladják és évi mintegy 87 illetve 60 millió tonnára becsülik mennyiségüket.

A légkör kéntartalma elsősorban kén-dioxid formában jelenik meg. A kén-dioxid kibocsátás *antropogén forrásai* a következők:

- fosszilis tüzelőanyagok égetése, motorhajtóanyagok felhasználása,
- biomassza égetése,
- egyes technológiai folyamatok, elsősorban a kénsavgyártás

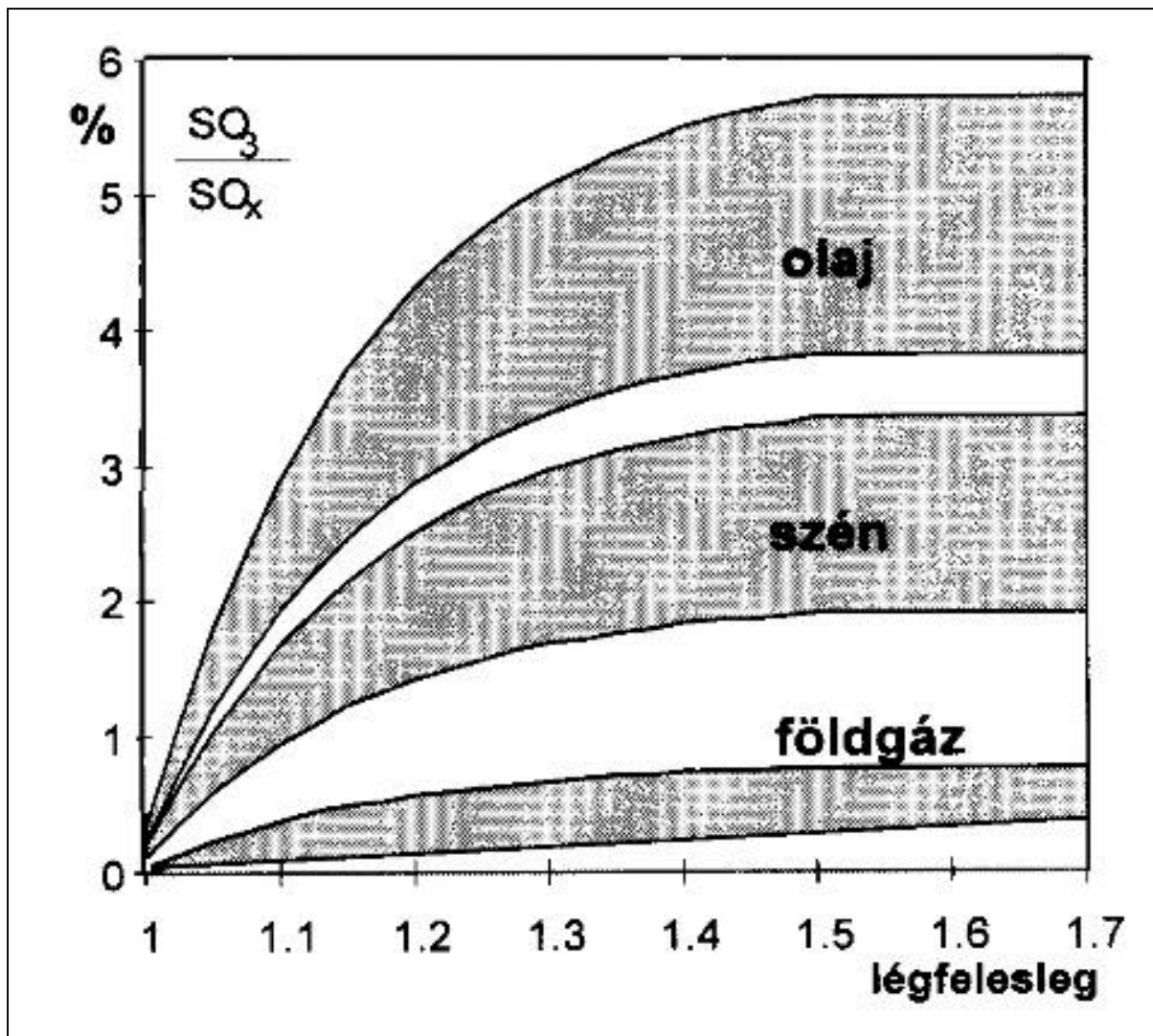
*Természetes forrásnak* a következők tekinthetők:

- vulkáni tevékenységek,
- kénes vízelelő helyek, források
- talaj-emissziók,
- óceánok kibocsátása,
- biológiai bomlások
- szerves anyagok bomlása.

A légkörből a kén-dioxid nedves és száraz kihullással, kimosódással távozik, illetőleg a légtérben lévő OH gyökökkel, valamint számos fotokémiai folyamatból származó oxidálószerrel kémiai reakció útján szulfátot, aeroszolt alkot, amely koagulálódva elősegíti a kihullását.

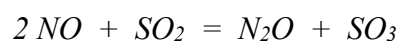
Korábbi részletes vizsgálatok azt mutatták, hogy az ország egészét tekintve az emberi tevékenységekhez kapcsolódó kénkibocsátás 95 - 98 %-a a tüzelőanyag felhasználásokból származik. A technológiai kibocsátások főleg a kénsavgyártáshoz, a kohászathoz kapcsolódnak, bár itt is külön kell választani a felhasznált fűtőanyagokból, pl. kohókocsz, származó kénkibocsátásokat.

A tüzelőanyagokban a kén jelen lehet szerves (merkaptánok, szulfidok, diszulfidok, heterociklusos komponensek), vagy szervetlen (szulfidok, szulfátok, piritkén) vegyületekben, illetőleg elemi kén formájában. A szulfidok, szulfátok és az elemi kén jelentősége általában kicsi. Hazai szeneinknél a pirit-kén általában több mint a szerveskén. Az éghető kén-tartalmat a szulfidok, a pirites kén és a szerves kén jelentik, míg a többi a hamuban marad. Így a teljes kéntartalmat éghető kénre és hamukénre oszthatjuk.



72. ábra Kén-trioxid képződés fosszilis tüzelőanyagok égésekor

A fosszilis tüzelőanyagok égetése során az üzemanyag kéntartalma kén-dioxiddá alakul, ami a füstgázzal a környezetbe jutva károsíthatja az ember egészségét, továbbá jelentős mértékben hozzájárul a talaj, a felszíni vizek savasodásához, ami ártalmas a növényzetre és az épített környezetre egyaránt. A kén-dioxid mellett, ha kisebb mennyiségben is - a tüzelőanyag szeretlen komponenseinek közreműködésével - kén-trioxid is keletkezik (72. ábra), ami vízzel reagálva közvetlenül kénsavat képez. A kénsav a jelentős mértékű savas környezetromboló hatása mellett károsítja a nitrogén-oxidok ártalmatlanítására használt katalizátorokat is. Kén-trioxid a következő módon is képződhet a tüztérben:



A füstgázban képződő kén-trioxid és az összes képződő kén-oxid aránya azonban függ az alkalmazott levegőfeleslegtől is (lásd **72. ábra**), hiszen az oxigén koncentrációjának növekedése növeli a kén-dioxid továbboxidálódásának esélyét.

Érdeemes megemlíteni, hogy széntüzelés esetén általában csak a szerves kén ég el – valamint a piritkén oxidálódik – és jut a füstgázba, a szervesetlen vegyületek formájában jelenlévő kén többnyire a hamuban marad, és azzal távozik a tüztérből. Ez abból a szempontból is lényeges, hogy az ásványi szenek esetében jelenleg csak a szervesetlen kéntartalom csökkentésére állnak rendelkezésre hatékony eljárások, ezek alkalmazása jelentősen növeli a költségeket, de összhatásában nem érik el céljukat.

A tüzelőanyag szerves kéntartalma sem jut el minden esetben és teljes mennyiségében a füstgázba, mert a képződő  $\text{SO}_2$  *in situ* reagálhat a hamu bázikus komponenseivel (Ca, Na, K, Mg). Ha a bázikus vegyületek részaránya kicsi (szilikátos jellegű hamu), akkor a szerves kén döntő része megjelenik a füstgázban, míg nagy bázicitású (karbonátos) hamu esetén jelentős mértékű megkötődésre számíthatunk. Ennek következtében a kénmentesítési technológiák tervezésekor nemcsak a tüzelőanyag szerves és szervesetlen kéntartalmát, hanem a hamu összetételét is számításba kell venni.

A kén-oxidok környezetkárosító hatása a savasodás mellett a reduktív (London-típusú) szmog formájában nyilvánul meg, ez a hatás azonban nemcsak a kibocsátóhely közvetlen környezetében jelentkezik, hanem a légáramlatokkal eljutva regionális környezetszennyezőként viselkedik. Az 1980-as években, elsősorban a közvélemény erős nyomására, nemzetközi egyezmények születtek a tüzelésből származó kén-dioxid kibocsátásának korlátozására. Az 1987-ben hatályba lépett „**Kén-dioxid Jegyzőkönyv**” aláírói (az EU tagállamok mellett többek között hazánk is) vállalták, hogy 1993-ig legalább 30 %-kal csökkentik az  $\text{SO}_2$ -kibocsátást (bázisév: 1980). Magyarország az egyezménynek eleget tett, mert az 1980-as 1632 kt/év-ről nemhogy csak az előírt 1142 kt/év értékre, hanem 757 kt/év-re csökkent a kibocsátás. Ebben természetesen sok tényező játszott szerepet, lényegesek a következők:

- ◆ nagymértékű energiahordozó-váltás (szén → földgáz);
- ◆ fosszilis tüzelőanyagok arányának csökkenése a villamosenergia-termelésben (a Paksi Atomerőmű indítása);
- ◆ kőolajipari termékek kéntartalmának csökkentése;
- ◆ ipari termelés visszaesése.



Az 1994-ben elfogadott újabb *Jegyzőkönyv* szerint a csatlakozó országok egyedileg meghatározott ütemezés és szintek szerint kötelesek kén-dioxid kibocsátásukat tovább csökkenteni vagy legalább tartani. Magyarország esetében az 1980-as bázisévhez viszonyítva 2000-ig 45 %-kal, 2005-ig 50 %-kal, és 2010-ig 60 %-kal kell csökkenteni az országos összes kén-dioxid kibocsátást (azaz 2010-ben nem haladhatja meg a 653 kt/év értéket. Ennek elérésére a korábbi lehetőségek már nem elégségesek, új megoldásokat kell találni, ezek a következők lehetnek:

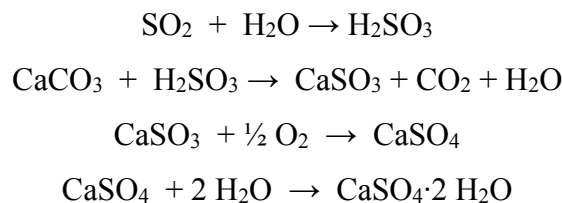
- ◆ tüzelőanyag helyettesítés (alternatív energiaforrások);
- ◆ alacsony kéntartalmú szén erőművi használata;
- ◆ VLSC kőolajtermékek (motorhajtóanyagok és fűtőolajok) előállítása és használata (*VLSC = very low sulphur content - nagyon alacsony kéntartalmú*);
- ◆ kén-dioxid leválasztása erőművi tűzterekben;
- ◆ füstgáz-tisztítási technológiák alkalmazása, fejlesztése.

#### **10.6.1. Kén-dioxid eltávolítás füstgázokból**

Legrégebbi eljárások egyike a mésszel vagy krétával (mészkővel) lúgosított víz alkalmazása a kén-dioxid kinyerésére (**73. ábra**). Az eljárás részfolyamatai:

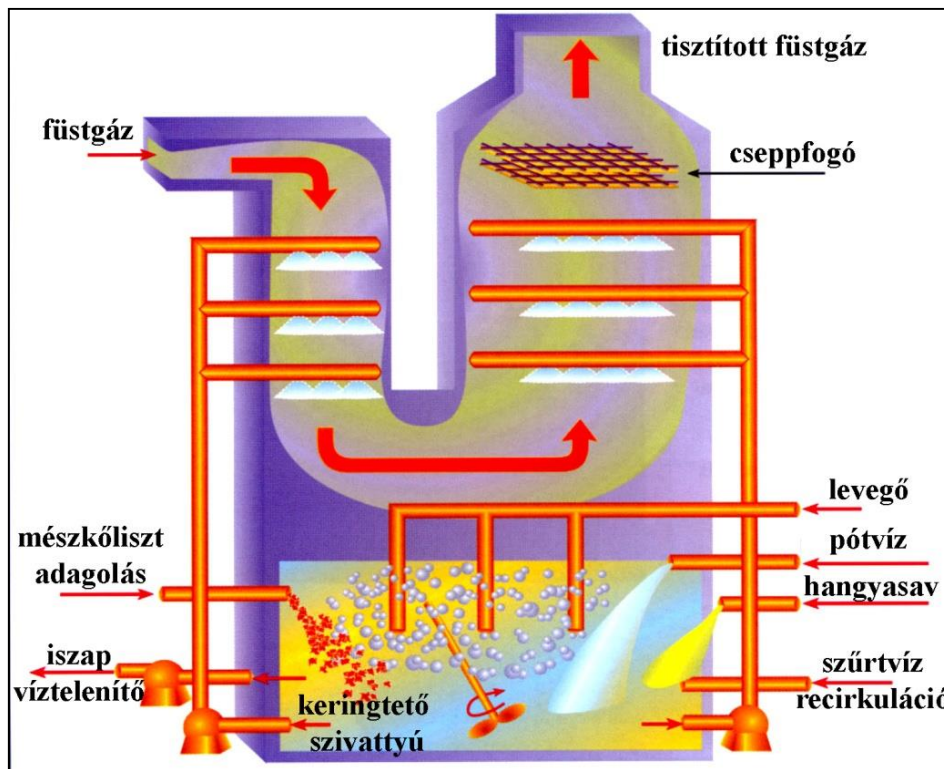
- ◆ gázelőkezelés
- ◆ reagenselőkezelés (mészkő őrlés)
- ◆ abszorpció/reakció
- ◆ hulladékkezelés

Jellemző reakciók:



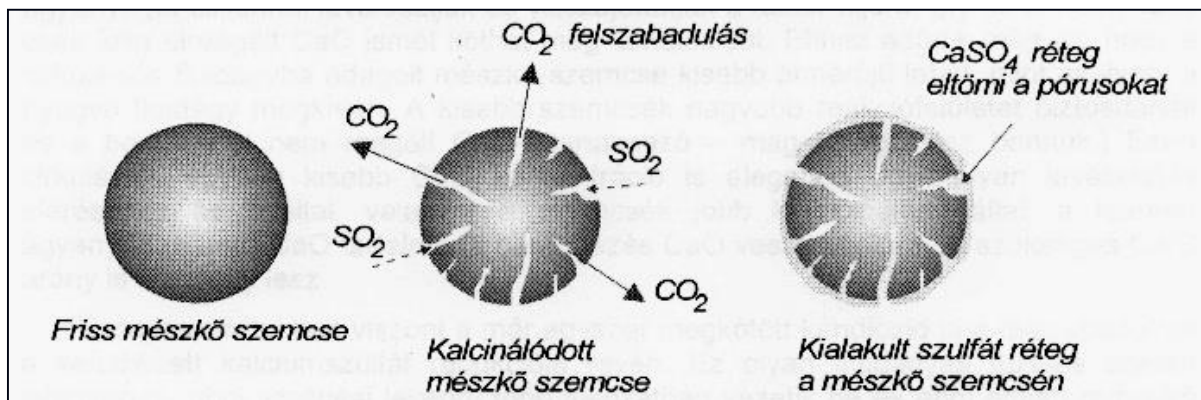
Ilyen tisztítók már 1933-tól üzemelnek Angliában, napjainkban is az egyik legelterjedtebb megoldás a szénerőművek esetén: A belépő gáz  $\text{SO}_2$  koncentrációja 2500 ppm, a kéntelenítés hatásfoka 90-95 %, a mészfogyasztás 800-900 kg  $\text{Ca}(\text{OH})_2 \text{ h}^{-1}$ , a termék 95 %-os  $\text{CaSO}_4 \cdot 2$

H<sub>2</sub>O., ami kalcinálás után építőipari célokra (gipsz), vagy gipszkarton készítésére felhasználható.



73. ábra Meszes füstgáztisztító rendszer elvi technológiai folyamatábrája

Az eljárás hátrányaként kell említenünk, hogy a mosótoronyból kilépő füstgáz hőmérséklet 50 °C körüli, ezért újra fel kell melegíteni annak érdekében, hogy a kéményen át ki lehessen vezetni, illetve elkerüljék a kondenzálódó víz hatására bekövetkező korróziót.



74. ábra A mészkő és a kén-dioxid reakciója

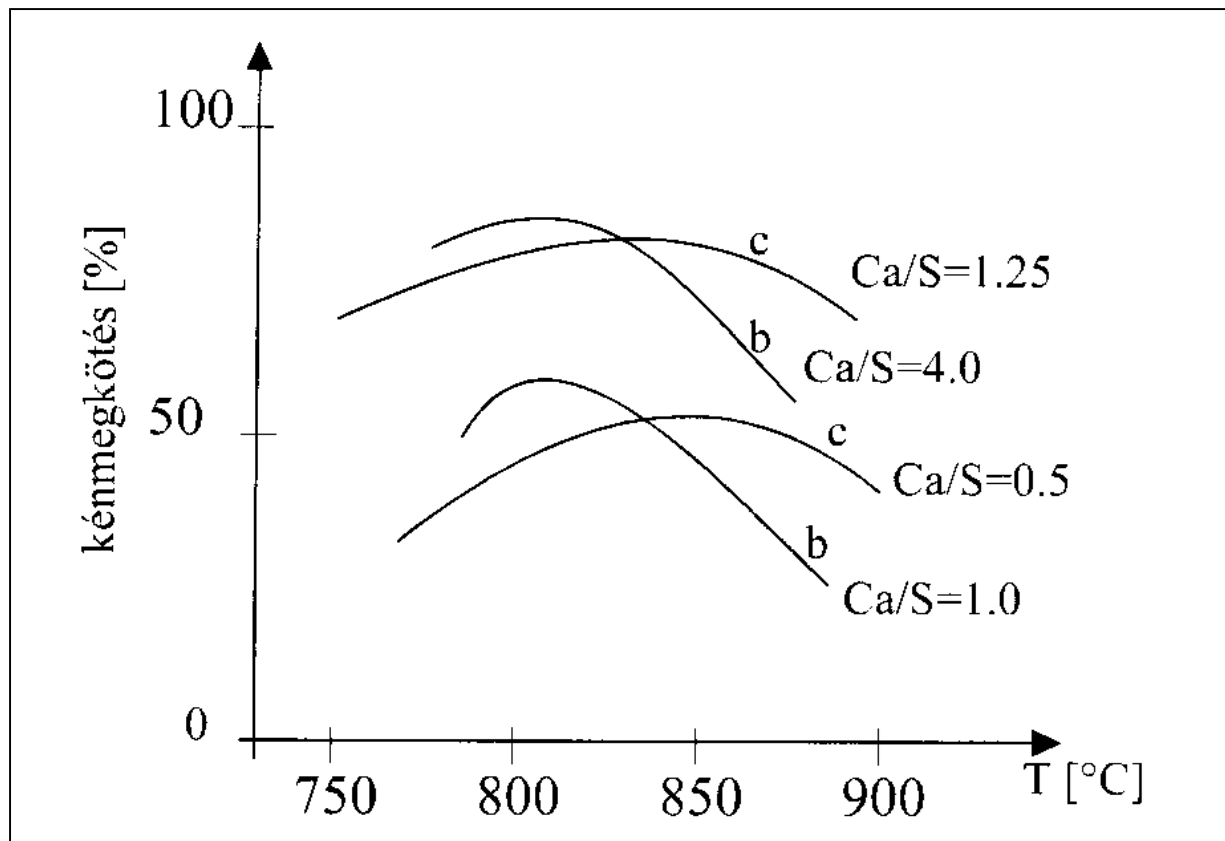
Lehetséges eljárás azonban a „száraz” kéntelenítés is, ilyenkor a fluidizációs kazánba, ahol porszenet vagy iszapszenet használnak tüzelőanyagként mészkő-örleményt is adagolnak, és

gázfázisban játszódik le a mészkőből képződő CaO és az SO<sub>2</sub> közötti reakció (74. ábra). Az elsődleges folyamatban (kalcinálás) képződő szén-dioxid eltávozik a szemcséből és ennek révén pórusrendszer alakul ki, és így nagy reaktív felület áll rendelkezésre az SO<sub>2</sub> megkötéséhez. A képződő CaSO<sub>4</sub> moláris térfogata azonban 2,7-szer nagyobb, mint a kalciumoxidé, és 1,25-szöröse az eredeti CaCO<sub>3</sub>-énak. Ez azt jelenti, hogy a képződő kalciumszulfát viszonylag gyorsan elzárja a pórusokat, hacsak a szemcse nem tartalmaz nagyobb mennyiségben MgCO<sub>3</sub>-ot, azaz a reakcióban célszerűen dolomitot kell alkalmazni. Dolomit esetében ugyanis a MgCO<sub>3</sub> kalcinálódása révén többlet pórusok jönnek létre, viszont a MgO csak nagyon lassan lép reakcióba a kén-dioxiddal, így a CaSO<sub>4</sub> képződésére a elegendő tér áll rendelkezésre (a képződő gipsz viszont a szennyezés miatt kevésbé értékesíthető).

Bár sztöchiometriailag egy SO<sub>2</sub> molekula megkötéséhez elegendő lenne egy CaCO<sub>3</sub> molekula (Ca/S = 1), a pórusok eltömődése miatt a mészkőszemcse belseje szinte mindig kihasználatlan marad. Ebből következően a legkedvezőbb tüzelési viszonyok esetén sem lehet 1,4-nél kisebb Ca/S aránnyal 90 %-os kénmegkötést elérni. A gyakorlatban ez azt jelenti, hogy a mészkövet feleslegben kell adagolni, ami egyrészt a mészkőkihasználást rontja, másrészt a termék minőségét kedvezőtlenül befolyásolja.

A fluidágyas tüzelés közbeni kénleválasztás hatásfoka sok tényezőtől függ, melyek közül a következőket emeljük ki:

- ◆ a tüztér hőmérséklete;
- ◆ a fluidágy sűrűsége és a recirkulációs arány (cirkulációs fluidágnál);
- ◆ Ca/S arány;
- ◆ a füstgáz tartózkodási ideje a tüztérben (tüztérmagasság);
- ◆ a tüztér kialakítása, a szekunder levegő aránya, bevezetési magassága, levegőfelesleg-tényező;
- ◆ tüztérnyomás, CO<sub>2</sub>-koncentráció;
- ◆ az adalékanyag összetétele, szemcsemérete, pórusmérete, pórusméret-eloszlása;
- ◆ a kőszén összetétele és fizikai tulajdonságai.



75. ábra A kénmegkötés hatásfokának hőmérsékletfüggése fluidágyas tüzelés során, különböző Ca/S arányoknál

A tüztér hőmérséklet a szorbens reaktivitásán keresztül tudja befolyásolni a kén megkötését. A reaktivitás a hőmérséklettel növekszik és 800-850 °C körül éri el a maximumot, mint ezt a 75. ábra is mutatja. Ezen hőmérséklet fölött a reaktivitás csökken, mert a képződő szulfát eltömi a pórusokat. A szükséges szorbens mennyisége az összetételtől is függ, azaz hogy mennyi és milyen kénmegkötő komponens van benne (elsősorban Ca). Optimálisnak a  $Ca/S = 1,25 - 15$  tartomány tekinthető, a túladagolás nem javítja a hatásfokot (lásd 75. ábra).

Nátronlúgot, nátronlúgot és meszet együtt (*kettős lúgos mosás*), magnézium-oxidot (*Mag-Ox eljárás*), nátrium-karbonát oldatot (*Wellman-Lord eljárás*) szokás még alkalmazni a kén-dioxid eltávolítására.

A nedves füstgáz kéntelenítés egy másik, igen elterjedt változata a **nátriumvegyületekkel** történő tisztítás. Abszorbensként a nátronlúg (NaOH vagy  $Na_2CO_3$ ) vagy a nátriumsók vizes oldatát alkalmazzák. A nátriumsók oldhatósága a meszes szuszpenziós eljárásokban alkalmazott abszorbens anyagok és a belőlük képződött termékek oldhatóságát felülmúlja, így a Na-vegyületekkel történő füstgáz mosáskor a lerakódási, eldugulási és eróziós problémák elmaradnak. A legismertebb nátriumvegyületes eljárás a *Wellman-Lord* eljárás, amely reakció a következők:

Elnyeletés:  $\text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 2 \text{NaHSO}_3$

$\text{NaHSO}_3 \leftrightarrow \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5 + \text{H}_2\text{O}$

Mosóoldat regenerálás:  $2 \text{NaHSO}_3 \leftrightarrow \text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5 \leftrightarrow \text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{SO}_2$

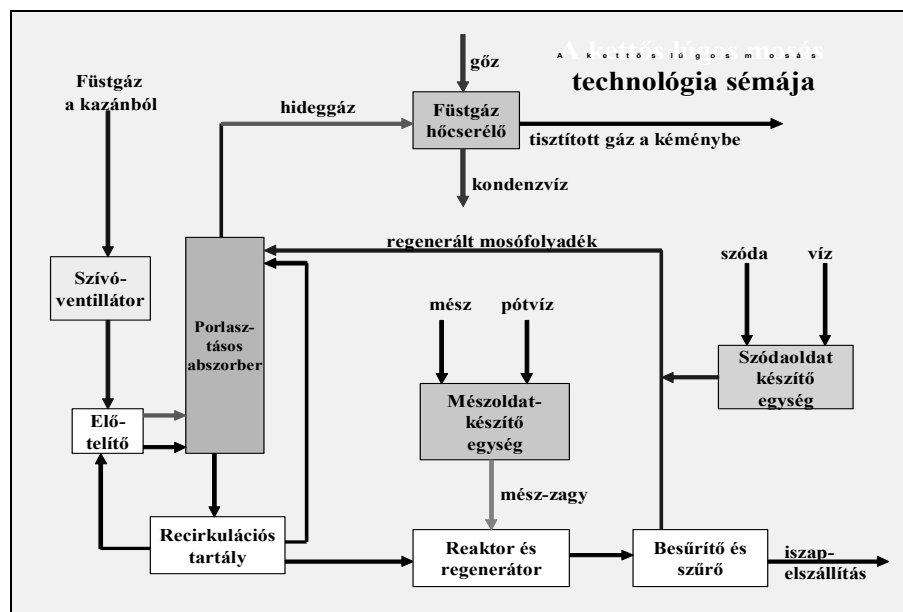
Mellékreakciók:  $2 \text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{SO}_3 \leftrightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{Na}_2\text{SO}_5$

$\text{Na}_2\text{SO}_3 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \leftrightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4$

$2 \text{Na}_2\text{SO}_3 + 2 \text{NaHSO}_3 \leftrightarrow 2 \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$

Nátrium-veszteség pótlása:  $\text{NaHSO}_3 + \text{NaOH} \leftrightarrow \text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O}$

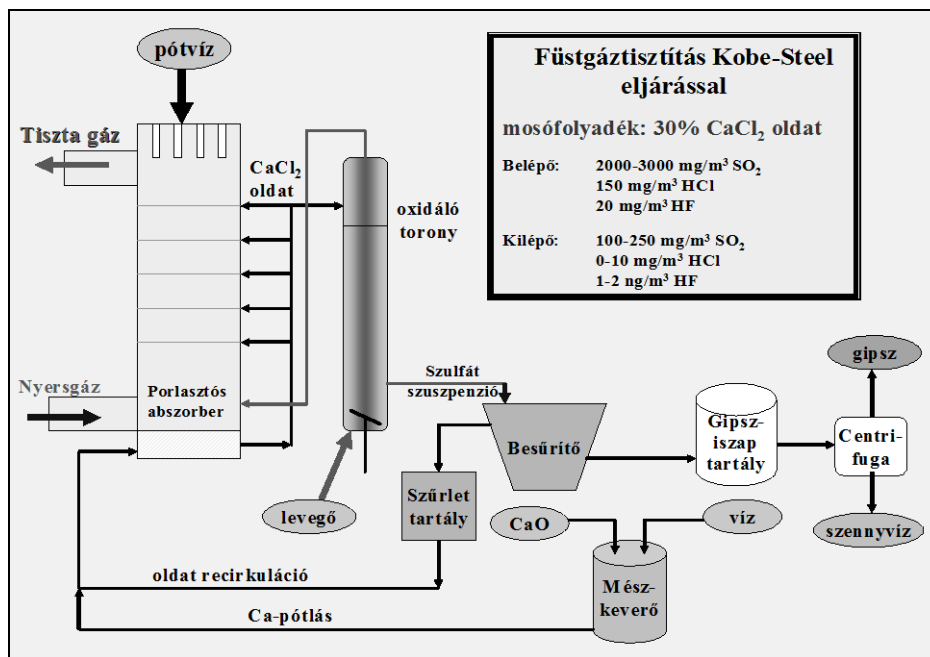
Regeneráláskor a reakció úgy megy végbe, hogy  $\text{SO}_2$  szabaduljon fel, ami kénsavgyártásra, vagy - és ez a gyakoribb eset - a Claus-eljárásban hasznosítható, ha rendelkezésre áll a kőolajszármazékok kéntelenítéséből származó kén-hidrogén. A mosófolyadék a regenerálás után visszatáplált szulfitoldat, amelyet szükség esetén NaOH-oldattal erősítenek fel és a mosófolyadék-gáz optimális értékének megfelelően keringetnek. Az abszorber alján összegyűlő biszulfitos mosófolyadékot a bepárlóba táplálják. A bepárlóban keletkező kristályzagyot ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) elválasztják az anyalúgtól. A kristályos  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  az oltótartályba jut és oldatként kerül vissza az abszorberbe. A bepárlóból távozó vízgőz kb. 10 %  $\text{SO}_2$ -ot tartalmaz. A vízgőz kondenzáltatása után a  $\text{SO}_2$  tartalom kb. 60 %-ig növelhető. A kondenzált vizet a nátriumszulfit-oldó tartályba vezetik, így az oldatban lévő  $\text{SO}_2$ -t is hasznosítják.



76. ábra Füstgázkéntelenítés kettős lúgos mosással

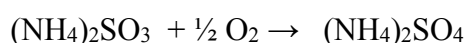
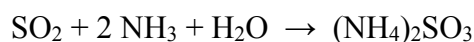
A nátronlúgos technológiák hátrányaként feltétlenül meg kell említenünk azt, hogy ezek a vegyületek jelentősen drágábbak, mint a CaO, így célszerű a regenerálást megoldani. Ezt a lehetőséget mutatja be **76. ábra** látható kettős lúgos eljárás, melyben az SO<sub>2</sub> kinyerése Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> oldattal történik, s az elhasznált mosóoldatot egy másik egységben oltott mészs adagolásával oldják meg.

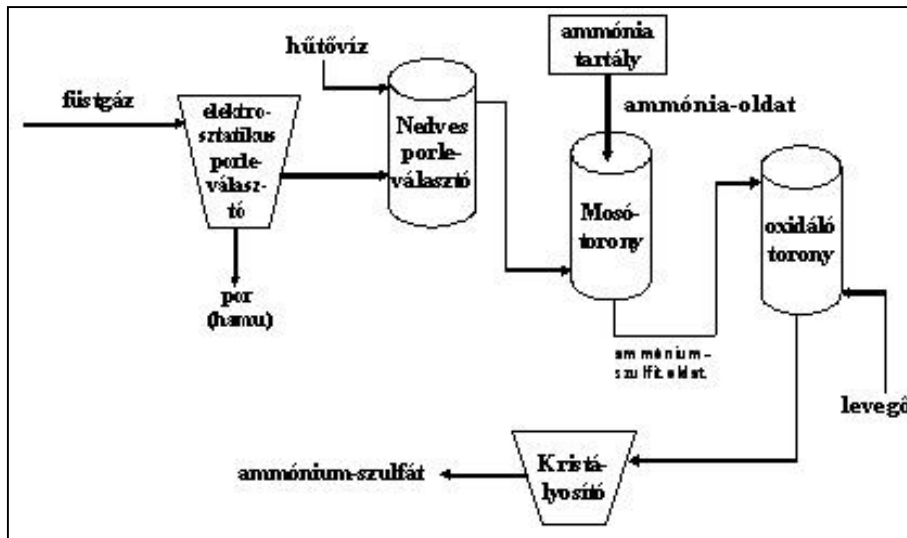
Érdekes megoldást alkalmaz a *Kobe-Steel-eljárás* (**77. ábra**) ahol mosófolyadékként 30 %-os CaCl<sub>2</sub>-oldatot használnak. A kén-dioxid kinyerése porlasztásos abszorberben, többszörös recirkuláció alkalmazásával történik. A CaSO<sub>3</sub> tartalmú oldat ezután egy oxidáló toronyba kerül, majd a szulfát szuszpenzióból ülepités és centrifugálás után nyerik ki a kristályvizet kalcium-szulfátot, amit égetés után építőipari gipszként hoznak forgalomba.



**77. ábra Füstgázkéntelenítés Kobe-Steel eljárással**

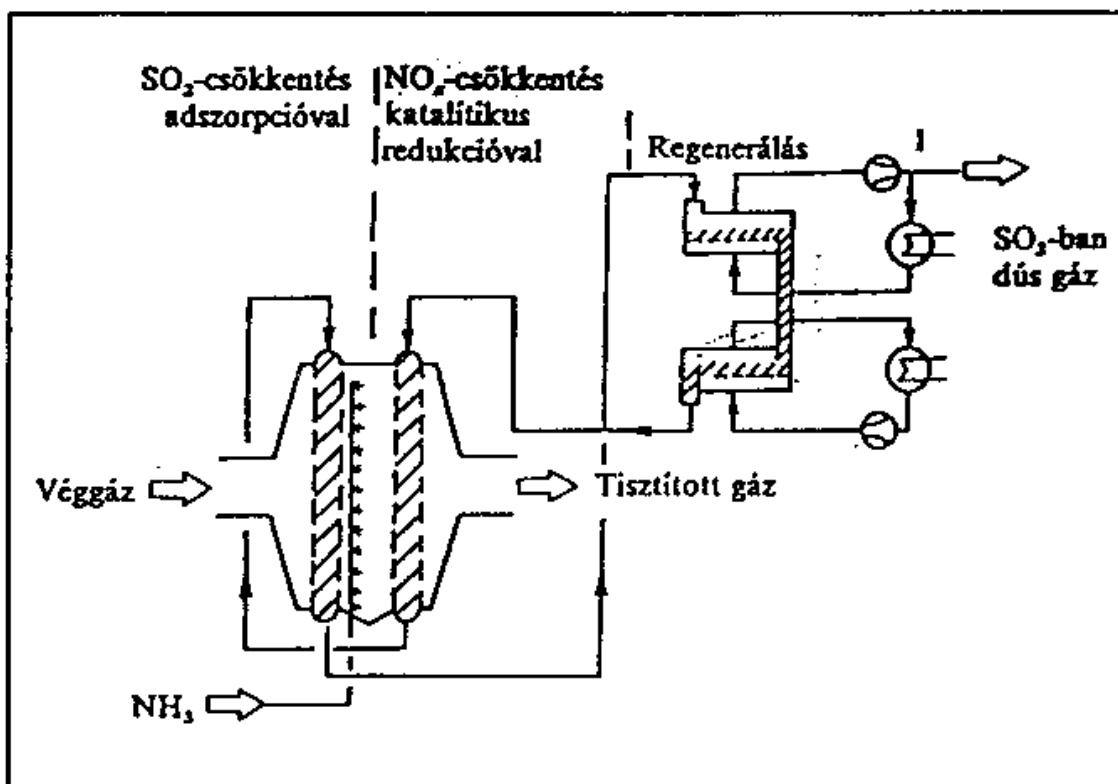
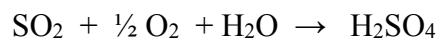
Elterjedt eljárás a *Walther-féle ammóniás kéntelenítés* (**78. ábra**), amely a következő reakciókkal írható le ( a termék műtrágyaként hasznosítható):





78. ábra Walther-féle ammóniás kéntelenítés

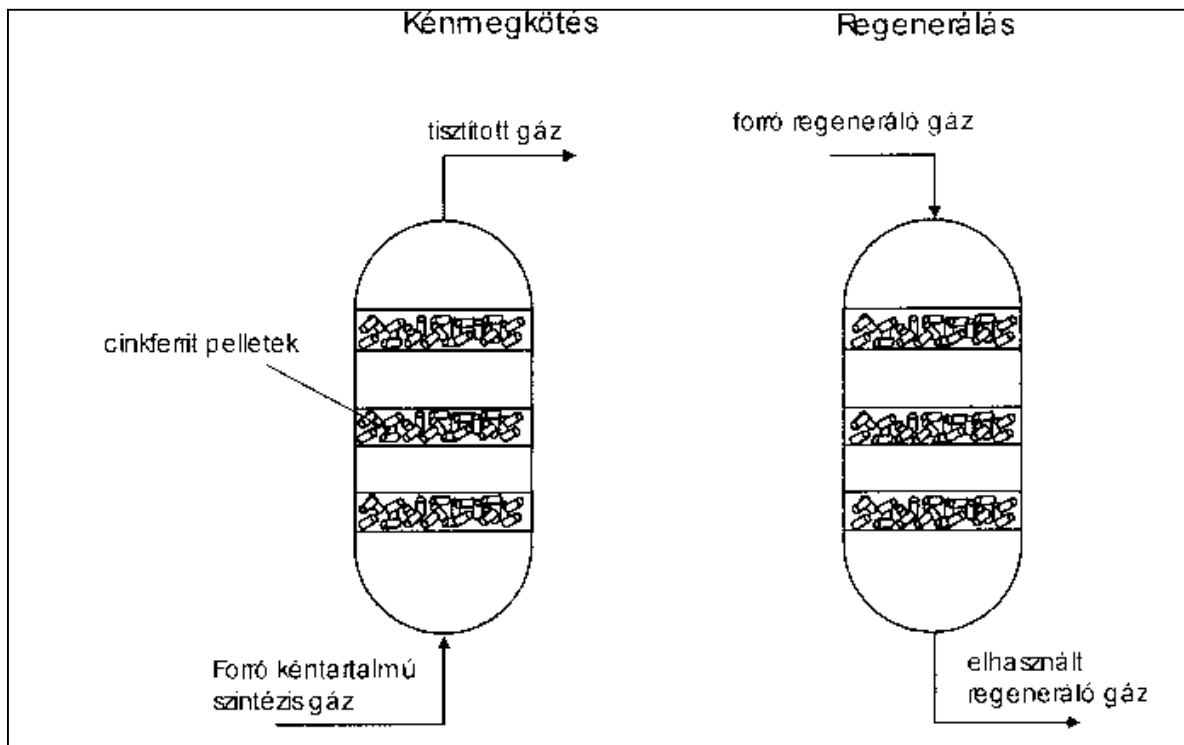
Füstgázok tisztításra - ritkábban ugyan - de *száraz eljárások*at is használhatunk. Az aktívszén adszorbenssel dolgozó „*Reinluft*” eljárásnál 150 °C hőmérsékleten kénsav képződése közben történik az SO<sub>2</sub> megkötődése:



79. ábra A Bergbau-Forschung szimultán SO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> eltávolító rendszere

Az aktívszén regenerálása ~ 400 °C hőmérsékleten történik a kénsav elgőzölgötetésével.

A *Bergbau-Forschung* eljárásnál (79. ábra), ami az SO<sub>2</sub> és az NO<sub>x</sub> szennyezés szimultán eltávolítására szolgál, a kén-dioxid megkötése az előzővel megegyező módon történik. Az aktívszén regenerálása viszont magasabb hőmérsékleten (600 °C) játszódik le, ahol a kénsav már elbomlik, viszont ammóniával az NO<sub>x</sub> katalitikusan elbontható.



**80. ábra Cinkferrites kéntelenítés állógyas reaktorban**

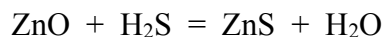
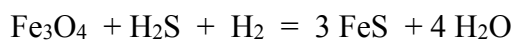
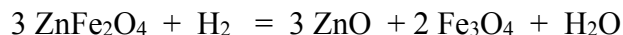
Az előbbi eljárásoknál jóval nagyobb szerepe van a H<sub>2</sub>S, vagy a CS<sub>2</sub> eltávolítására szolgáló magas hőmérsékletű száraz eljárásoknak.

A leggyakrabban cink bázisú (cinkferrit - ZnO és Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> keveréke = ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) regenerálható szorbenseket használnak ilyen körülmények között, amelyekkel akár 99 %-os kénmegkötést is el lehet érni. A cinkferrit használata esetén a hőmérsékleti határt a 650 °C jelenti, mert itt az Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tartalom FeO-dá redukálódik, sőt 677 °C-on a ZnO bomlása is megindul.

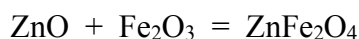
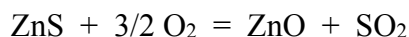
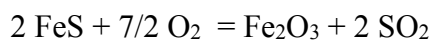
A **80. ábra** egy cinkferrittel működő állógyas berendezés működési elvét mutatjuk be. A készülékben az adszorbens etázs-szerűen, egymás fölötti rétegekben helyezik el, ezeken keresztül áramlik a tisztítandó gáz. Regeneráláskor váltócsappal átkapcsolják a gázáramokat és



oxigén vagy levegő segítségével visszaoxidálják az adszorbens. A működés (reaktív adszorpció) során lejátszódó reakciók:

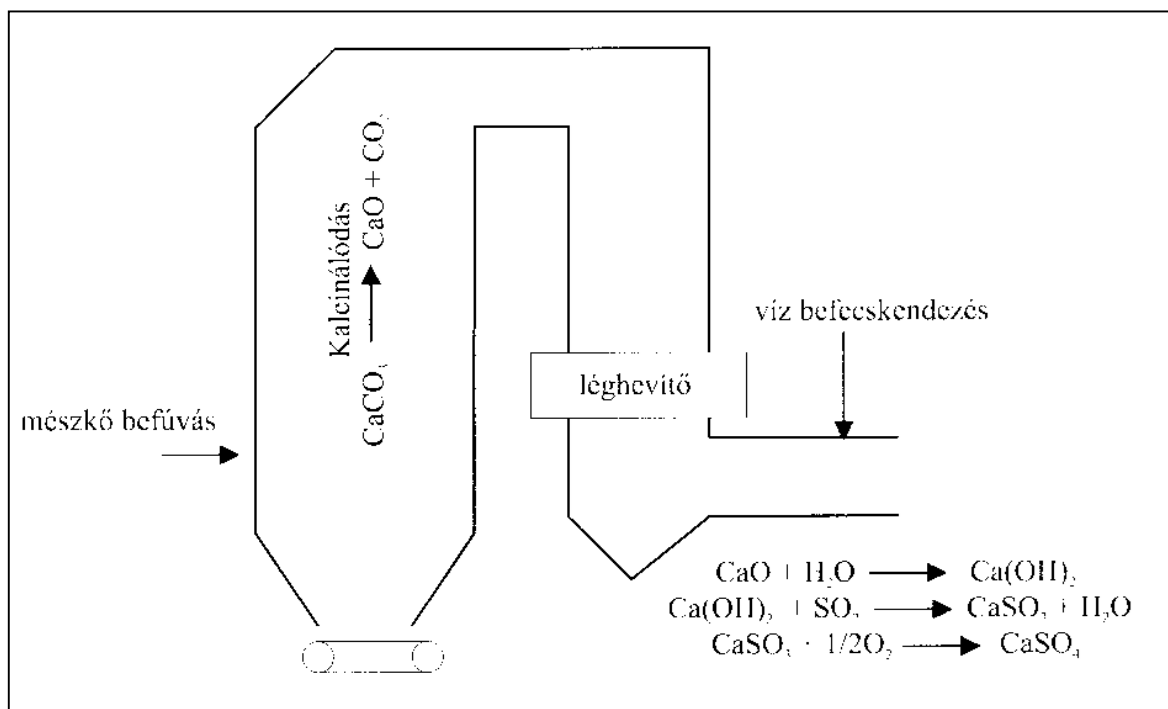


A regenerálást forró levegővel végezve:



Újabb az olcsóbb vasoxidot használják fel a folyamatban, igaz így az elérhető kénmegkötés csak 90-95 %-os, de az üzemelési hőmérséklet is alacsonyabb (50-500 °C). A vasoxidos eljárás nem állóágas berendezésben, hanem a megfelelő szemcseméretű pelletizált adszorbenst fluidizált rétegben hozzák érintkeztetésbe a kénhidrogén vagy COS, CS<sub>2</sub>, merkaptán, stb. tartalmú gázzal.

Meg kell még említenünk a kén-dioxid eltávolítására használatos módszerek közül a felszár az eljárásokat is, melyek közül a legelterjedtebb a finn Tampella társaság által kifejlesztett LIFAC technológia (81. ábra).



81. ábra A LIFAC eljárás működési sémája

A LIFAC eljárás során a kazán magas hőmérsékletű részein a mészkövet fúvatnak be a tűztérbe, ahol a kénmegkötésnek a fluidágyas berendezésben is lejátszódó folyamatai mennek végbe (CaO képződés és szulfátizáció), azonban a rövid tartózkodási idő miatt itt a kénmegkötés sokkal alacsonyabb hatásfokú. Ezért a kazán alacsonyabb hőmérsékletű (~ 200 °C) részein vizet fecskendeznek be, ami a mészkőből képződött CaO-dal reagál, mészhidrát [Ca(OH)<sub>2</sub>] jön létre, ami megköti a maradék kén-dioxidot.

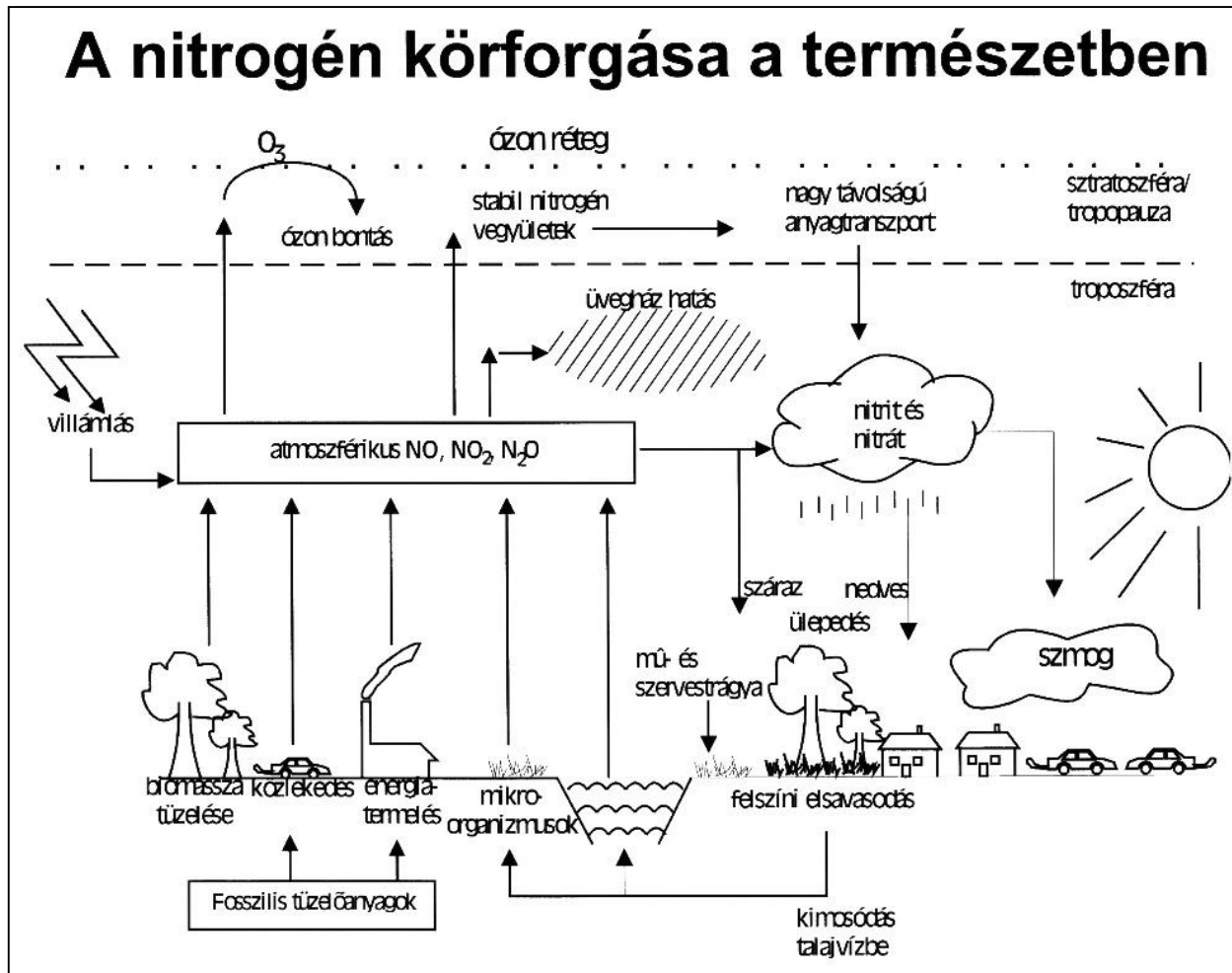
Az így keletkező CaSO<sub>3</sub>, CaSO<sub>4</sub> és az el nem reagált Ca(OH)<sub>2</sub> a pernyével együtt a porleválasztóban eltávolítható. Az eljárás hátrányaiként említhető a viszonylag alacsony (75-85 %-os) kéneltávolítási hatásfok, a nagyobb mértékű mészkőfelhasználás, illetve az, hogy a termékek nem értékesíthetők, sőt elhelyezésük csak megfelelően kialakított depóniában történhet. Előnye viszont, hogy beruházási költsége és energiaigénye nagyon alacsony, és könnyen beépíthető utólagosan is a már működő erőművekbe, továbbá egyszerűsége folytán az üzembiztonsága is kimagasló.

## 10.7. Nitrogén-oxidok eltávolítása: DENOX-eljárások

*(Hnus István)*

A savas esőkért - mint azt korábban említettük - elsősorban a kénoxidok a felelősek, de gondot okoznak egyéb szennyezőanyagok (korom, füst, a tökéletlen égés során keletkező CO, szénhidrogének) és a fotokémiai szmog kialakulásában főszerepet játszó nitrogén-oxidok is, melyek természeti körforgását a **82. ábra** szemlélteti.

A nitrogénnek és az oxigénnek hét (alkotóelemeikhez képest termodinamikailag stabil vagy instabil) módosulata ismeretes (NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, NO<sub>3</sub>), melyek közül az első háromnak van jelentős környezeti (károsító) szerepe, összefoglalóan ezek jelentik a komplex hatású NO<sub>x</sub> szennyeződést.



82. ábra A nitrogén körforgása

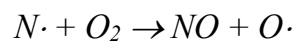
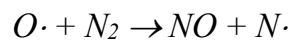
### 10.7.1. A nitrogén-oxidok forrásai

Nitrogén-oxidok a természetben is képződnek - villámlás, vulkáni tevékenység során, denitrifikáló baktériumok tevékenysége által, stb. Bizonyos ipari technológiák (szerves kémiai eljárások, üvegipar, salétromsavgyártás) is lehetnek  $NO_x$  kibocsátók, melyek helyileg jelentős mennyiségű szennyezést okozhatnak. A légtérbe történő kibocsátásukért azonban döntő mértékben a fosszilis tüzelőanyagok és a biomassza égetése (belső égésű motorok, repülőgépek, ipari tüzelőberendezések és hőerőművek) a felelős. Éves emissziójukat 1998-ban  $35-58 \cdot 10^{12}$  kg-ra becsülték, mennyiségük évente 2,5-3 %-kal növekszik.

A szikragyújtású benzinmotorokhoz képest a dízel motorok a CO és a szénhidrogén emisszió tekintetében "tisztábbak"; aldehid, korom, SO<sub>x</sub> és NO<sub>x</sub> kibocsátásuk azonban lényegesen nagyobb, így az utóbbi években tapasztalható növekvő "dízelesedés" nagyobb légköri NO<sub>x</sub> terhelést eredményez.

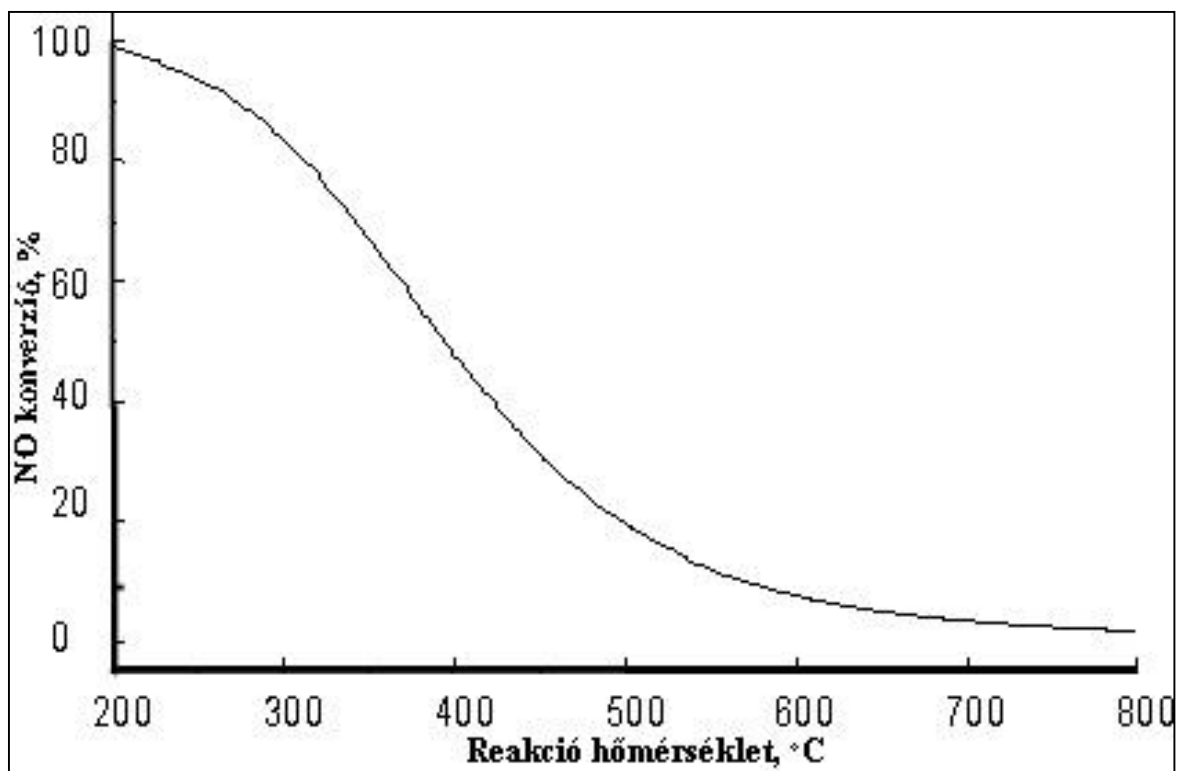
A hőerőművek füstgázaiban, illetve a belsőégésű motorok véggázaiban megjelenő  $\text{NO}_x$  (túlnyomó része, kb. 80%-a  $\text{NO}$ ) eredete szerint háromféle lehet:

- ♦ **termikus  $\text{NO}_x$ :** magas hőmérsékleten a betáplált levegőben lévő  $\text{N}_2$  és  $\text{O}_2$  között lejátszódó reakcióban keletkezik. *Zeldovics* szerint, aki az 1940-es években először foglalkozott ezzel a kérdéssel, a mechanizmus a következő lépéseket tartalmazza:



A reakciósebesség a hőmérséklet emelésével nő, belsőégésű motorokban jelentkező 1300 - 1500 °C-on a termikus  $\text{NO}_x$  képződés már jelentős mértékű lehet.

- ♦ **tüzelőanyag  $\text{NO}_x$ :** a tüzelőanyag nitrogéntartalmú vegyületeinek oxidációjával képződik. Homogén, illetve heterogén (hamu) oxidációs reakciókban alakulhat ki. A reakció független a lánghőmérséklettől és az oxidálódó szerves vegyület jellegétől. Redukáló lángokban a  $\text{NO}$  kialakulása visszaszorul.



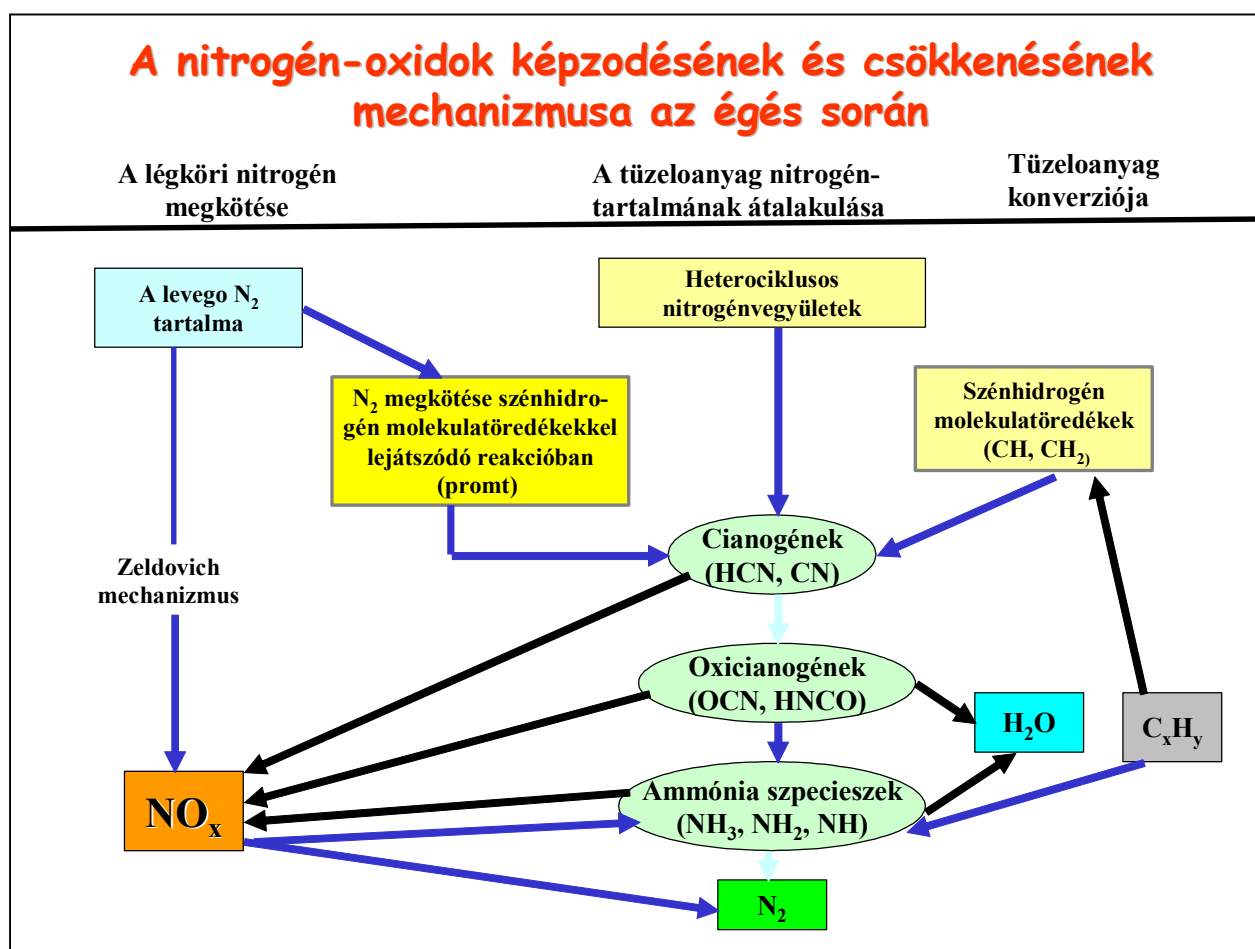
83. ábra Az  $\text{NO}$  oxidációhőmérsékletfüggése

- ♦ **Indukált  $\text{NO}_x$ :** az átmeneti termékként képződő  $\text{HCN}$  oxidációja során jön létre. Az előbbivel ellentétben oxigénszegény lángokra jellemző, ugyanakkor képződési sebessége alig függ a hőmérséklettől.

Az égés hőmérsékletén képződő NO a füstgázzal lép ki a levegőbe, ahol a hőmérséklet csökkenésével fokozatosan NO<sub>2</sub>-dá alakul át. Az



reakció exoterm egyensúlyi folyamat, azaz alacsony hőmérséklet kedvez az NO<sub>2</sub> képződésének (84. ábra). Ráadásul ez az egyik olyan kivételes reakció, melynél a reakció sebessége is növekszik a hőmérséklet csökkenésével; ez reakciókinetikai megfontolások alapján azt jelzi, hogy összetett reakcióval állunk szemben.

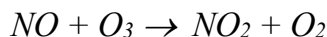
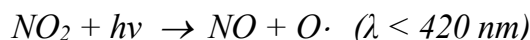


84. ábra A nitrogén-oxidok képződésének és átalakulásának mechanizmusa lángokban

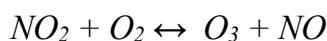
A 84. ábra a nitrogén-oxidok képződésének és csökkenésének mechanizmusát mutatja be, az égés során - mint látható - nemcsak oxidációs, hanem különféle redukációs folyamatok is lejátszódhatnak, így lehetőség nyílik HCN vagy NH<sub>3</sub> képződésére is.

### 10.7.2. A nitrogén-oxidok károsító hatásai

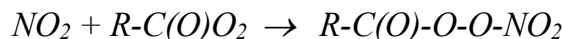
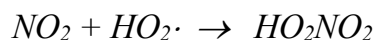
A sztratoszférában lévő nitrogén-oxidok szerepet játszanak az ózonréteg bontásában:



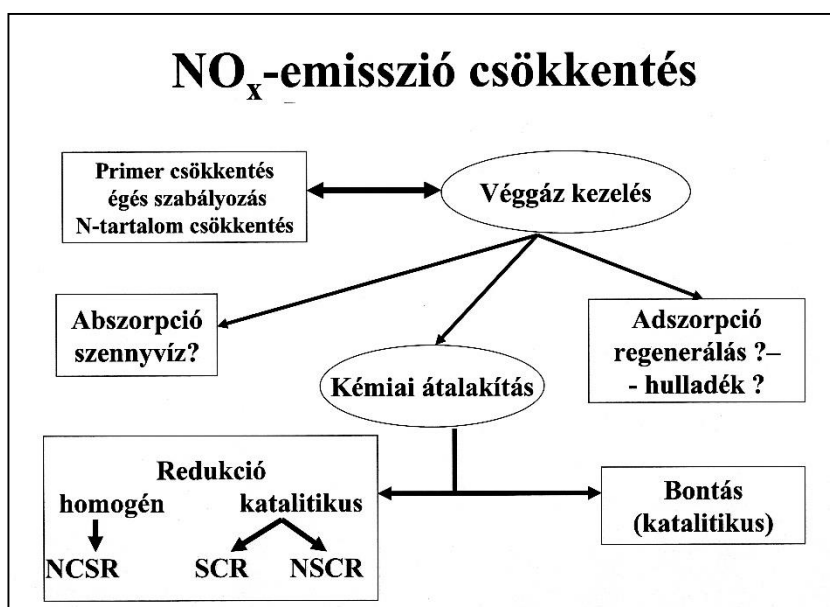
Az atmoszféra alsó rétegeiben viszont épp ózonképző képességükkel okoznak gondot. A "Los Angeles" típusú oxidáló füstköd akkor alakul ki, ha hőmérsékletinverzió lép fel egy szénhidrogénnel és nitrogén oxidokkal szennyezett légtér felett, és erős az UV sugárzás. Bár a folyamatról már tudjuk, hogy gyökös láncreakció, pontos mechanizmusa nem ismeretes. A nitrogén-oxidok szerepe valószínűleg a következő bruttó reakció szerint kvázi-egyensúlyi ózonkoncentráció fenntartása:



A NO<sub>2</sub> és az ózon egyéb reakciói során kialakuló aktív gyökök rekombinációja salétromsav, persalétromsav és peroxi-acetil-nitrát (PAN) képződéséhez vezet:



Ezek a kémiailag agresszív vegyületek száraz vagy nedves kiülepedéssel (savas esők) elhagyhatják az atmoszférát, és így a felszíni vizek és a talaj elsavasodását okozhatják.



85. ábra A nitrogén-oxid emisszió csökkentésére alkalmas eljárások

A nitrogén-oxidok ( $NO$  és  $NO_2$ ) egészségkárosító hatással is bírnak, szemet, nyálkahártyát irritáló vegyületek, hatásukat kis vízoldhatóságuk miatt az egész légzőrendszerre kifejtik. Kötőhártya-gyulladás, tüdővizenyőt, súlyosabb esetekben tüdővérzést okozhatnak, károsítják a máj méregtelenítő rendszerét. A nyirokszövetek duzzadását, lépmeagnagyobbodást idézhetnek elő.

### **10.7.3. Az $NO_x$ emisszió csökkentését szolgáló eljárások**

A  $NO_x$  kibocsátást csökkentő eljárások (napjaink terminológiájával élve: a DENOX-technológiák) két csoportba sorolhatók - az **elsődleges** (vagy közvetlen) eljárások arra irányulnak, hogy a keletkezést gátolják meg, a **másodlagos** (közvetett) módszerek célja a véggáz kezelés, melynek lényege a már képződött  $NO_x$  mennyiségének redukálása fizikai kémiai vagy kémiai eljárásokkal.

Az elsődleges eljárások az égés szabályozása köré csoportosíthatók, így vagy az égési folyamat körülményeinek, vagy az égetőrendszernek a módosításából állnak. Alapvetően három lehetőséggel számolhatunk:

- (1) a relatív oxigénkoncentráció csökkentése,
- (2) a lánghőmérséklet, illetve az égési zónában a tartózkodási idő redukálása,
- (3) a tüzelőanyag nitrogéntartalmának csökkentése.

Ide tartoznak a következő eljárások (a teljesség igénye nélkül):

- ◆ gőz vagy víz injektálása az égéstérbe;
- ◆ füstgáz recirkuláció;
- ◆ alacsony levegőfelesleggel történő égetés;
- ◆ szakaszos égetés;
- ◆ kazánon belüli redukció (másodlagos üzemanyaggal);
- ◆ ezek kombinációja.

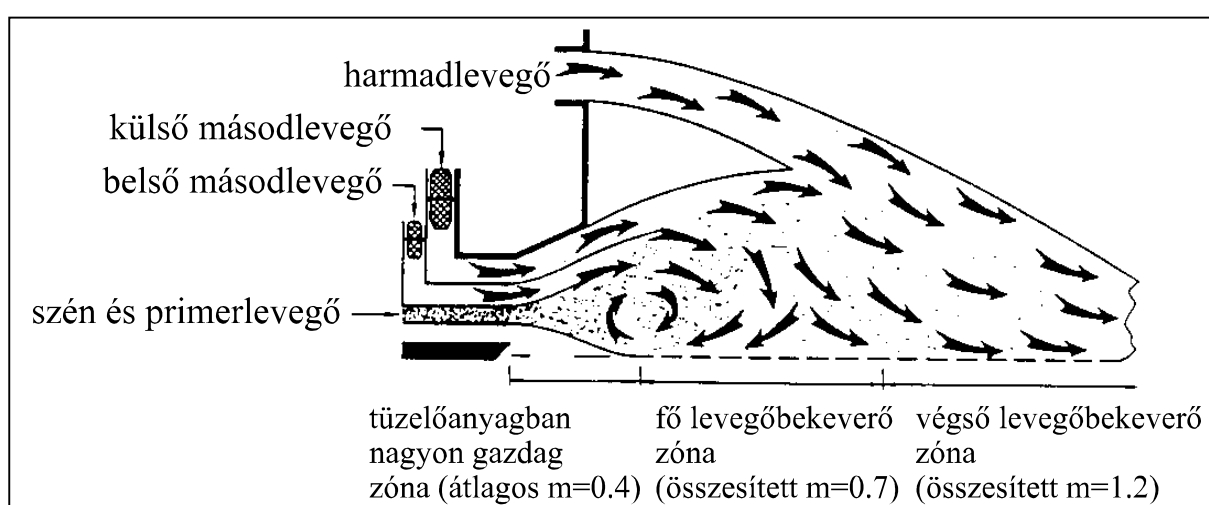
Az égési hőmérséklet csökkentése megoldható az adiabatikus égési hőmérséklet csökkentésével, aminek egyik lehetősége a belépő levegő hőmérsékletének csökkentése, azaz hideg levegővel történő égetés, vagy ugyanez érhető el az  $m = 1$ -nél nagyobb levegőfelesleg alkalmazásával, esetlegesen inert anyag bekeverésével.

A másik módszer az  $NO_x$ -szegény égő kialakítása (**86. ábra**) ami a tényleges égési hőmérséklet csökkentésével oldható meg, de idesorolható az intenzívebb hűtés (fajlagos tüztér-terhelés

csökkentése), az égés elnyújtása (többfokozatú tüzeléssel, az üzemanyag lassú bekeverésével, esetlegesen vízbefecskendezéssel vagy az  $O_2$  koncentráció csökkentésével).

A **25. táblázat** az elsődleges módszerekkel az erőművi kazánoknál elérhető százalékos  $NO_x$ -emissziócsökkentést foglaltuk össze, s megállapítható, hogy ezek a módszerek viszonylag nagymértékű csökkentést tesznek lehetővé, alkalmazásukkal sok esetben elérhetők még az egyre szigorodó határértékek is.

A nedves eljárások nem katalitikusak, kis mennyiségű  $NO_x$  ún. „kémiai kimosására”, azaz abszorpciójára alkalmasak. Előnyük, hogy alkalmazásukkal párhuzamosan el lehet távolítani a nitrogén- és kén-oxidokat.



**86. ábra**  $NO_x$ -szegény égő kialakítása

**25. táblázat.** A különböző megoldásokkal elérhető  $NO_x$  emissziócsökkentések

	Sarokégős szénportüzelés	pakura/gudron tüzelés	földgáztüzelés
$NO_x$ szegény égő	10...30%	10...30%	20...40%
füstgáz recirkuláció	5...15%	10...35%	20...70%
égési levegő hőmérsékletének csökkentése	10...40%	10...30%	10...60%
kétfokozatú égetés	10...30%	10...30%	10...30%
redukáló gázégő	—	30...50%	30...50%
együtt	35...60%	40...70%	50...80%

Hátrányaik felsorolása jóval hosszabb, ugyanis (1) igazán megfelelő oldószer nem ismeretes - miután a  $NO$  vízben nem oldódik, vizes oldatban való abszorpció előtt  $NO_2$ -dá kell oxidálni, ami költséges, és (2) a képződő melléktermékek között nitrátok és nitritek szerepelnek, melyek így a szennyvízbe kerülhetnek, ahonnan az eltávolítása gondot okoz.



A nedves DENOX eljárásoknak két típusa van: (1) az oxidációs-redukciós és a (2) komplex abszorpciós módszer. Az első esetén az oxidációt háromféleképpen végezhetjük: katalitikusan, gázfázisban ózon vagy klór-dioxid oxidálószerrel, illetve folyadék fázisban  $\text{KMnO}_4$ ,  $\text{NaClO}_2$  vagy  $\text{HNO}_3$  felhasználásával.

A nitrogén-dioxid tartalmú gázt utána  $\text{NaOH}$ ,  $\text{NH}_3$  vagy  $\text{Ca(OH)}_2$  tartalmú oldatokkal érintkeztetjük. Ismeretes három abszorpciós lépésből álló eljárás is. Az első lépésben a kéntelenítést végzik savanyított ammónium-szulfit oldatban. Utána a gáz  $\text{NO}$  tartalmát ózonnal oxidálják, majd ammónia-oldatban nyeletik el a képződő  $\text{NO}_2$ -ot. Az utolsó mosási folyamatban a maradék ózont és  $\text{NO}_2$ -ot nyeletik el az első lépés során képződő oldatban.

A második típusú eljárásban vas(II)etiléndiamin-tetraacetát oldatban nyeletik el a nitrogén- és kén-oxidokat párhuzamosan. A mellékreakciók (1) a szulfit oxidációja szulfáttá és ditionáttá, (2) a vas(II) átalakulása inaktív  $\text{Fe(III)EDTA}$  komplexszé és (3) a  $\text{NO}$  parciális redukciója nitrogén-kén-tartalmú összetevőkké vagy  $\text{N}_2\text{O}$ -dá.

A **száraz DENOX eljárások** számos előnnyel rendelkeznek - kisebb befektetési költség, egyszerűség, kevesebb hulladék képződése, magasabb  $\text{NO}_x$  eltávolítási hatások. Az egyik kézenfekvő megoldás az **adszorpció** lenne, azonban olyan adszorbenst, mely a nitrogén-oxidokat kellő hatásokkal kötné meg, napjainkig még nem találtak. A vizsgált zeolit molekulaszűrők, szilikagél, aktív szén adszorbensek, melyek más komponensek elválasztására alkalmask, itt nem bizonyultak hatásosnak alacsony adszorpciós kapacitásuk következtében.

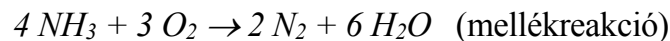
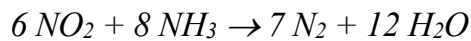
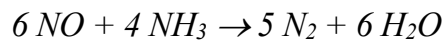
A jelenleg működő megoldások a kilépő gázok  $\text{NO}_x$  komponenseinek redukcióját alkalmazzák.

A redukciós eljárásoknak négy csoportját különböztetjük meg:

- (1) nem-szelektív, nem-katalitikus redukció (NSNCR);
- (2) szelektív nem-katalitikus redukció (SNCR);
- (3) nem-szelektív katalitikus redukció (NSCR);
- (4) szelektív katalitikus redukció (SCR).

A **nem-szelektív, nem-katalitikus redukció** (NSNCR) során nagy redukálószer (szénhidrogén) felesleget alkalmaznak. A redukáló ágens először a véggázban lévő oxigént fogyasztja el, utána lép reakcióba a nitrogén-oxidokkal. A folyamat viszonylag magas (750-800 °C) hőmérsékleten játszódik le, így energiaigényes. A teljes  $\text{NO}_x$  redukcióhoz jelentős szénhidrogén-felesleg szükséges, így a  $\text{C}_x\text{H}_y$  emisszió további gondot okoz, ezért alkalmazása nem terjedt el széles körben.

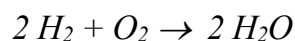
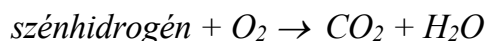
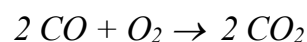
**A szelektív nem-katalitikus redukció (SNCR)** eljárásban ammóniát használnak redukálószerként, ami preferáltan a nitrogén-oxidokkal reagál, és a homogén gázfázisú reakcióban a nitrogén-oxidokat elemi nitrogénné és vízzé redukálja:



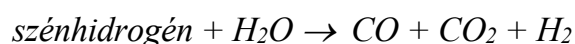
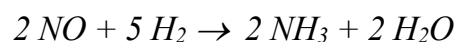
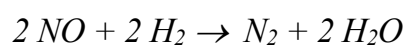
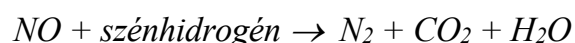
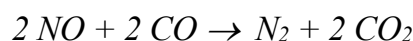
A reakció igen szűk hőmérsékletintervallumban megy végbe optimálisan (850 - 1050 °C), és aránylag magas  $\text{NH}_3/\text{NO}_x$  arányt igényel, ami további gondokat okozhat (ammónia emisszió, sóképződés). Az eljárás nem alkalmas mozgó források esetén, hisz az ammónia tárolása és adagolása nehezen megoldható, valamint széntüzelésű erőművekben, mert a szálló hamu adszorbeálhatja az ammóniát.

**A nem-szelektív katalitikus redukció (NSCR)** módszer főként gépjárművek konvertereinél alkalmazott eljárás, mint azt már korábban is bemutattuk. A háromutas katalitikus konverterben használatos katalizátor általában kerámiából készített monolitvázon rögzített  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  hordozót tartalmaz, s azon katalitikus hatású komponenseket (*Pt*, *Rh*, *Pd*). Sztöchiometrikus levegő/üzemanyag keverékaránynál, 400-600 °C közötti hőmérsékleten alakítja át a három (fő)szennyező komponenst (*CO*, maradék szénhidrogének és  $\text{NO}_x$ ) a következő bruttó egyenletek szerint:

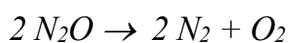
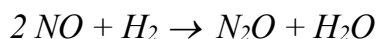
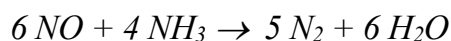
oxidáció (*Pt* és *Pd*):



*NO* redukció (*Rh*):



kisebbségi valószínűséggel lejátszódó reakciók:



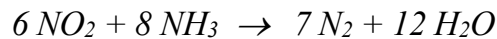
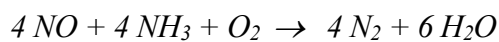
Az eljárás alkalmazásakor problémát okoz, ha a levegő/benzin arány eltér a sztöchiometriktól: az újabb motorkonstrukciók által kedvelt "szegény" keverék (levegőfelesleg) alkalmazása a  $\text{NO}_x$  redukciót meredeken csökkenti, "dús" keverék esetén pedig az oxidációs reakciók hatásfoka csökken. A nemesfémek alkalmazása költségessé teszi, ezek visszanyerése még nem megoldott, s újabb megfigyelések szerint légkörbe jutásuk egészségkárosító hatással bír. További kutatások folynak a katalizátor, a hordozó fejlesztésére, a hidegperiódus hatásának csökkentésére (a katalizátorrendszer elektromos előmelegítése, a katalitikus konverter motorközeli elhelyezése, indító katalizátor alkalmazása, szénhidrogén tárolás a hidegindítás alatt, stb). Napjaink fejlesztésének kulcskérdése a katalizátor élettartamának, a szennyezőkkel szembeni ellenállásának növelése is.

A szelektív katalitikus redukció (SCR) során a nitrogén-oxidokat ammóniával történő reakcióban alakítják nitrogénné és vízzé 150 - 450 °C hőmérséklettartományban alkalmas katalizátor felületén. Az ammóniával ellentétben a további vizsgált redukálószerkezetek ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , szénhidrogének) nem szelektívek, először a füstgázban jelenlévő oxigénnel reagálnak el. Katalizátorként hordozós nemesfémeket (Pt, Pd), keverékokat - elsősorban  $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$  - vagy módosított zeolitokat alkalmaznak.

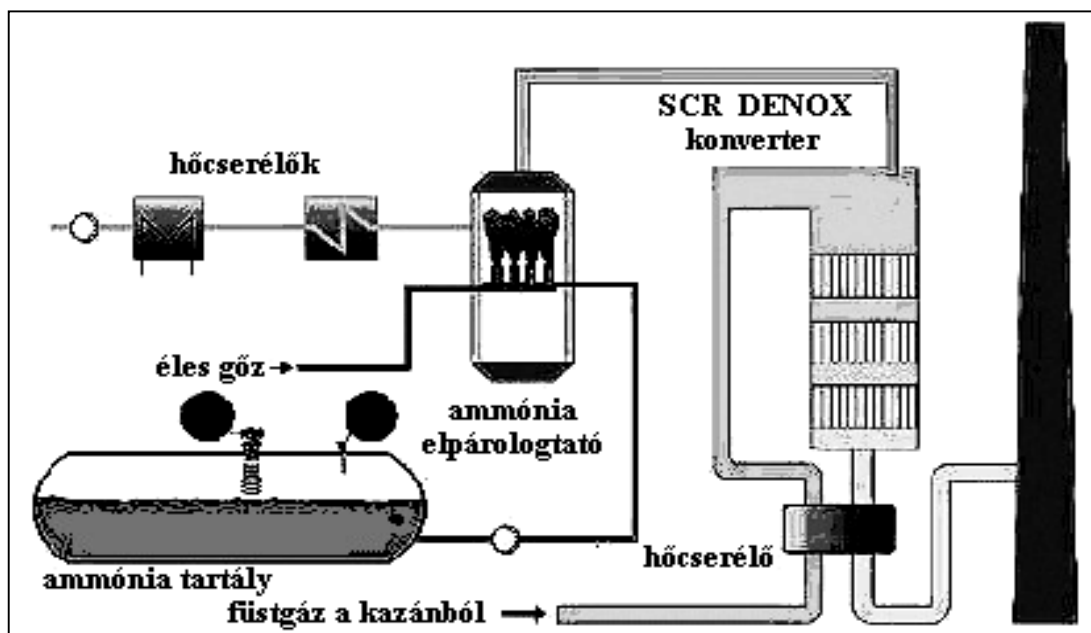


87. ábra Erőművi SCR konverter (fém-monolitváz) katalizátor:  $\text{V}_2\text{O}_5\text{-TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$

A hordozós vanádium-oxid (főként a vanádium-oxid - titán-oxid) katalizátor, melynek gyakorlati kialakítása a **87. ábra** látható - nagy aktivitással rendelkezik a következő bruttó egyenletekkel leírható reakciókban:



További előnye ennek a katalizátornak, hogy SO<sub>2</sub>-dal szemben ellenálló. Az elégséges 0,6-0,9 NH<sub>3</sub>/NO<sub>x</sub> mólarány következtében az ammónia emisszió csak 1-5 ppm. Hátrányt jelent, hogy a rendszernek három eleme van (megfelelő reaktorban elhelyezett katalizátor, ammónia injektor rendszer és ammónia tároló egység), amelyek működtetését bonyolulttá teszik (**88. ábra**).



**88. ábra** SCR eljárás alkalmazása erőművi fűtőgázok NO<sub>x</sub>-tartalmának átalakítására

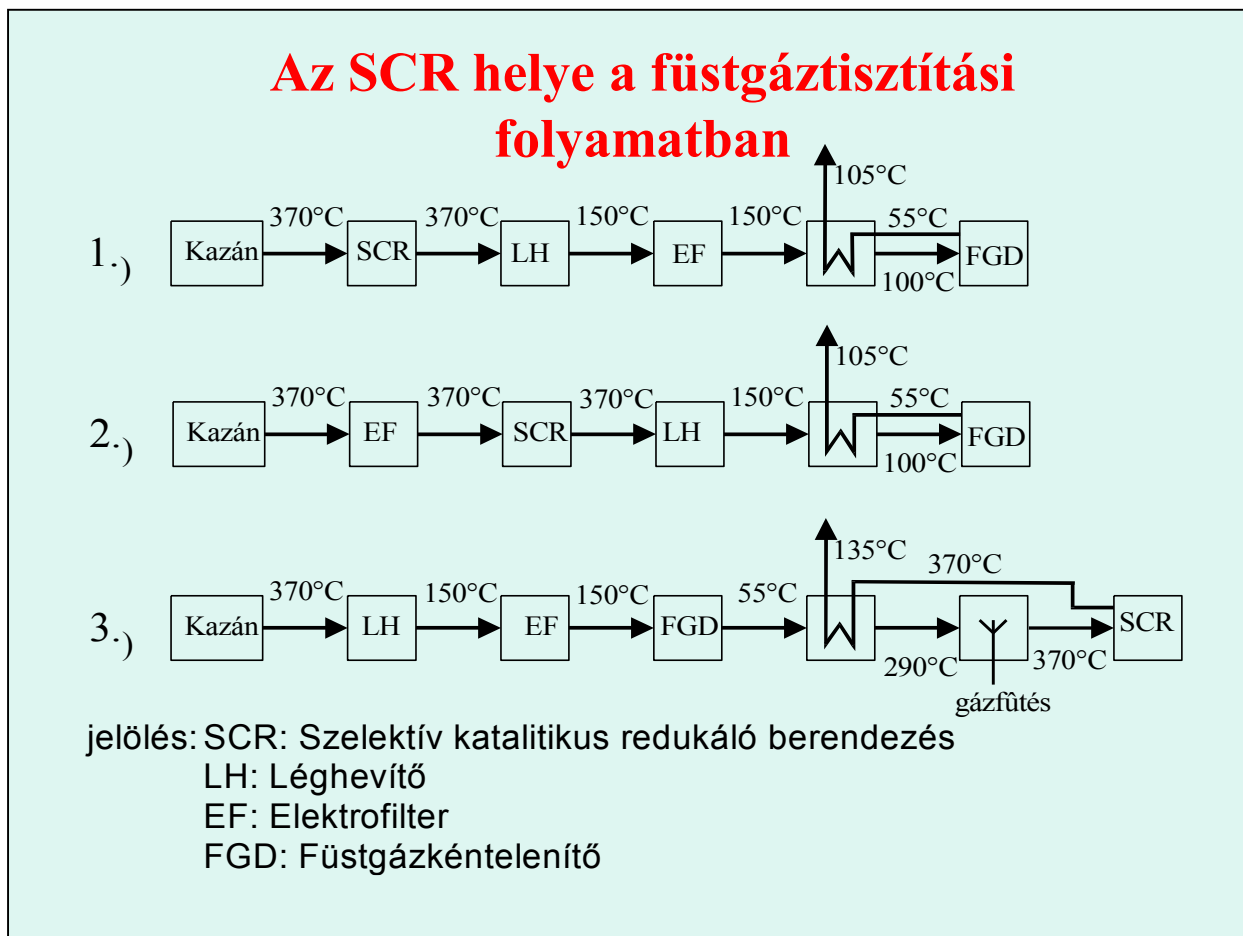
Ezek a berendezések elsősorban stacionárius források (például erőművi fűtőgázok) kezelésére használhatók, hiszen az ammónia tartály és adagoló egység jelentős korlátozó tényező a mozgó források (gépjárművek) esetén.

A katalizátor aktivitása idővel csökken, a dezaktiválódásban a következő folyamatok játszanak szerepet:

- ◆ a magas hőmérséklet miatti öregedés, ugyanis 450 °C fölött az ammónia oxidálódik, ami exoterm reakció lévén lokális túlmelegedést okoz és a V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> megolvadhat;
- ◆ katalizátormérgek, SO<sub>x</sub>, a 350 °C alatt képződő ammóniumsulfátok, elsősorban az NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub>, valamint azok a fémoxidok, melyek a hamuban vannak jelen (ezek döntően széntüzeléskor zavaróak).
- ◆ a poros közeg mechanikai koptató hatása.

A katalizátor nem egyszerre megy tönkre, mert több sorba kapcsolt egységből áll, az átlagos élettartam a tüzelőanyagtól függ. A tapasztalatok szerint az átlagos élettartam a következő:

- széntüzelés: 2-3 év;
- fűtőolajtüzelés: 4-5 év;
- gáztüzelés: 5-6 év.



### 89. ábra Az SCR helye a füstgáztisztítási folyamatban

Az elmondottakból következik, hogy a katalizátor működése szempontjából a  $350 - 370^{\circ}\text{C}$  a kedvező hőmérséklettartomány, hiszen az alsó hőmérsékletkorlát alatt az ammóniumsulfát képződése, míg  $400^{\circ}\text{C}$  fölött az ammónia oxidációja rontja az  $\text{NO}_x$  átalakítás hatásfokát.

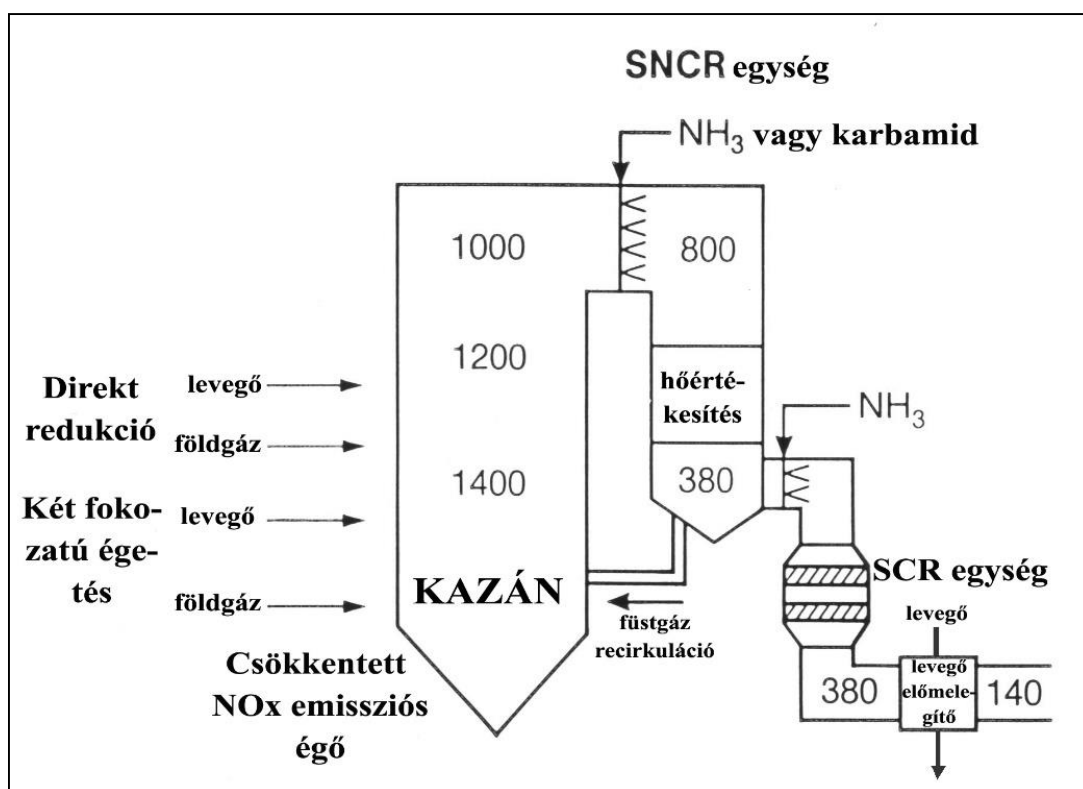
Mivel az SCR számára csak egy szűk hőmérséklettartomány megfelelő, a katalitikus konvertert általában a kazán és a levegő-előmelegítő egység között helyezik el (**89. ábra**). A katalizátor élettartamának szempontjából egy olyan kapcsolási sorrend lenne az optimális, ahol mind a

porleválasztó egység, mind a kéntelenítő megelőzné az SCR-t, hiszen így ki lehetne küszöbölni a pernye koptató hatását és a képződő  $\text{SO}_3$  sem tenné tönkre a katalizátort.

Ha csak a koptató hatást akarjuk elkerülni, akkor a **89. ábra** látható 2. kapcsolást alkalmazhatjuk, ahol a porleválasztó (döntően elektrosztatikus egység vagy porszűrő) megelőzi az SCR-t. Ebben az esetben azonban speciális,  $400\text{ °C}$  hőmérséklet fölött is működtethető porleválasztókat kell alkalmaznunk. A 3. kapcsolás lenne a legmegfelelőbb a katalizátor élettartama és a nitrogén-oxidok redukciója szempontjából, de ez sokkal bonyolultabb, mint a másik kettő. Ezzel a kapcsolással viszont a katalizátor élettartama széntüzelés esetén is megközelítheti a gáztüzelésnél jellemző értéket.

Érdemes megemlíteni, hogy mivel olajtüzelésnél nem szükséges porleválasztó alkalmazása, az 1. és 2. kapcsolás megegyezik, és csak a 3. különbözik. Földgáztüzelésnél viszont füstgázkéntelenítésre sincs szükség, így csak az 1. kapcsolás szerinti sorrend jöhet számításba.

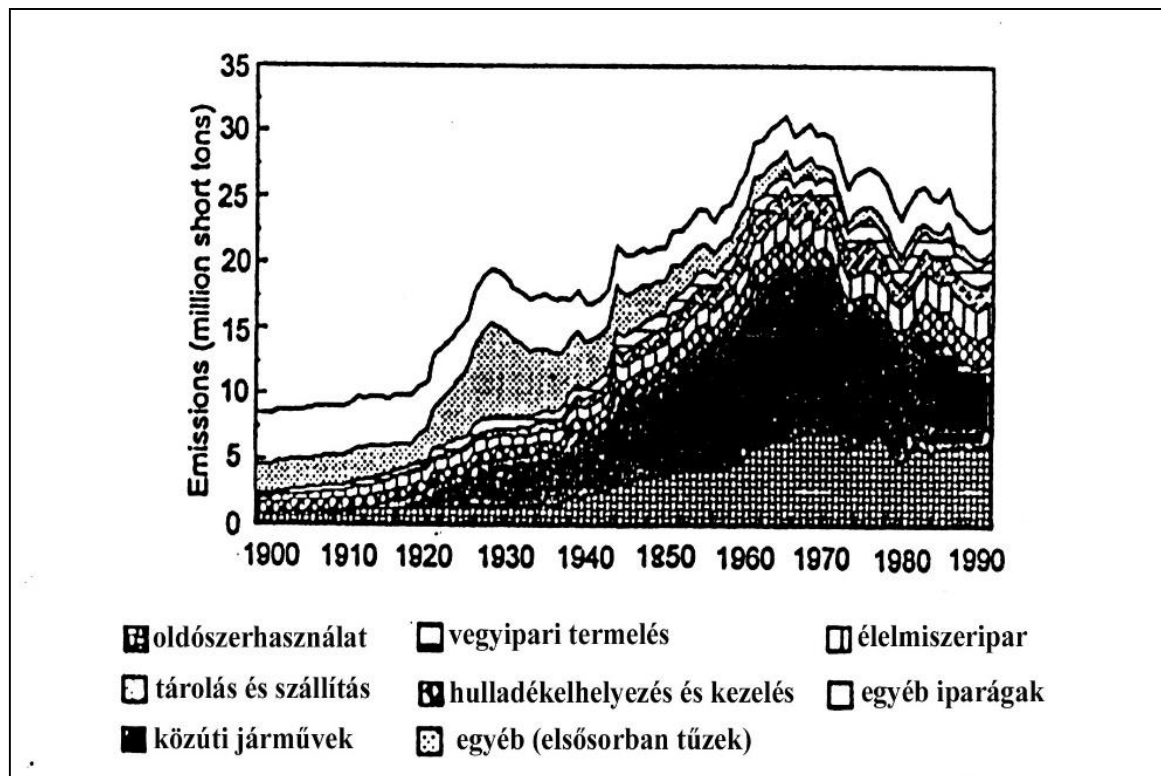
A nitrogén-oxidok eltávolítási lehetőségeit foglalja össze a **90. ábra**, mely szerint elsődleges módszerek, így a *többszintű égőfej kialakítás*, a *lánghőmérséklet csökkentése*, illetve a *szelektív nem-katalitikus* vagy a *szelektív katalitikus redukció* lehet a választott megoldás. Természetesen ezek közül nem szükséges (és lehetséges) az összes módszer együttes bevezetése, technológiai és gazdasági megfontolások alapján lehet kiválasztani az optimális megoldást.



**90. ábra** Az erőművi füstgázok  $\text{NO}_x$ -mentesítési lehetőségei

## 10.8. Illékony szerves vegyületek (VOC) légszennyezése

(Hanus István)



91. ábra A légtérbe kibocsátott VOC szennyezés forrásai, illetve mennyiségi adatainak változása a 20. században

A levegőtisztaságvédelem egyik különleges, és napjainkban egyre inkább előtérbe kerülő - területe az illékony szerves vegyületek (angolul: *Volatile Organic Compounds*: VOC, vagy VOCs) által okozott szennyezés, illetve ennek szabályozása. Ezek a vegyületek sokféle forrásból kerültek a légtérbe, és az 1970-es évekig semmiféle szabályozás nem történt ezen a téren, így a kibocsátott mennyiség erőteljes növekedést mutatott (91. ábra)

A VOC-szennyezés összetételét tekintve meglehetősen komplex, hiszen ebbe tartoznak az üzemanyag előállításakor, forgalmazásakor és használatakor levegőbe kerülő alifás és aromás szénhidrogének, vagy a festékek, lakkok különféle komponenseket (alifás, aromás szénhidrogének, oxigéntartalmú vegyületek: ketonok, észterek, éterek), nitro- vagy halogén-származékok. De éppígy ide sorolhatók a vegytisztításban használatos klórtartalmú zsíroldoszerek, a hűtőtechnikában és töltőgázként alkalmazott freonok, a tűzoltókészülékek halon töltetei, a levegőbe kerülő növényvédőszeres vagy éppen a szaghatású anyagok, melyek nagyon kis koncentrációban már komoly környezeti ártalomnak minősülhetnek még akkor is,

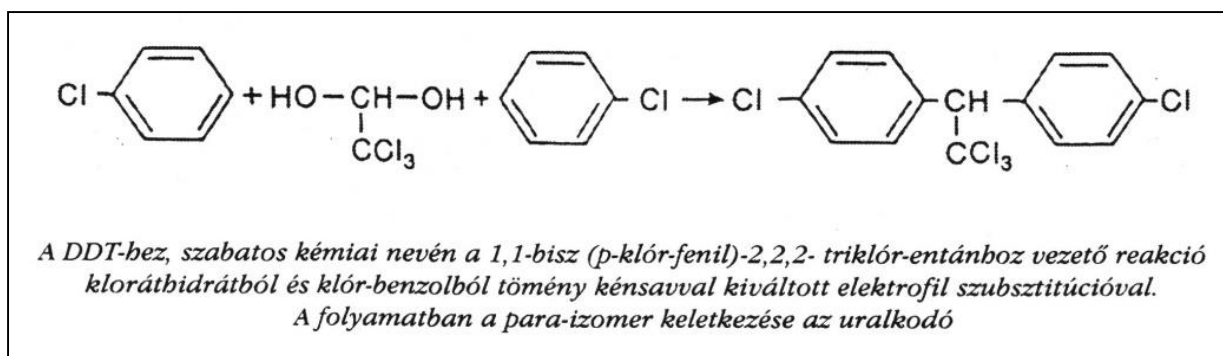
ha koncentrációjuk nem éri el az egészségügyi határértékeket. A teljes spektrum bemutatása jóval meghaladná a jegyzet terjedelmét, ezért csak egy-két területet elemzünk részletesebben, ezek a halogéntartalmú szerves vegyületek (X-VOCs), illetve a szaghatású anyagok.

### 10.8.1. Klórtartalmú vegyületek és környezeti hatásaik

Az utóbbi évtizedekben a vegyipar sok olyan klórtartalmú szénhidrogént állított elő, amelyeket az élet különböző területein, pl. növényvédelem (DDT), műanyagok (PVC, teflon) vagy hűtéstechnika (freonok) hatékonyan lehet használni. Az előnyös tulajdonságok egy része a szén-klór kötés erősségével és a vegyületek ebből adódó stabilitásával függ össze. A tömeges felhasználásnál azonban ez az előnyös tulajdonság környezetvédelmi hátránnyá válik, ugyanis ezek a vegyületek nagyon lassan bomlanak le, illetve a képződő hulladékok megsemmisítése is gondot okoz.

#### 10.8.1.1. A DDT és hasonló vegyületek

Erre a problémára először a DDT alkalmazása során derült fény. A diklór-difenil-triklór-etánt (DDT) már a XIX. század végén előállították a **92. ábra** látható módon.

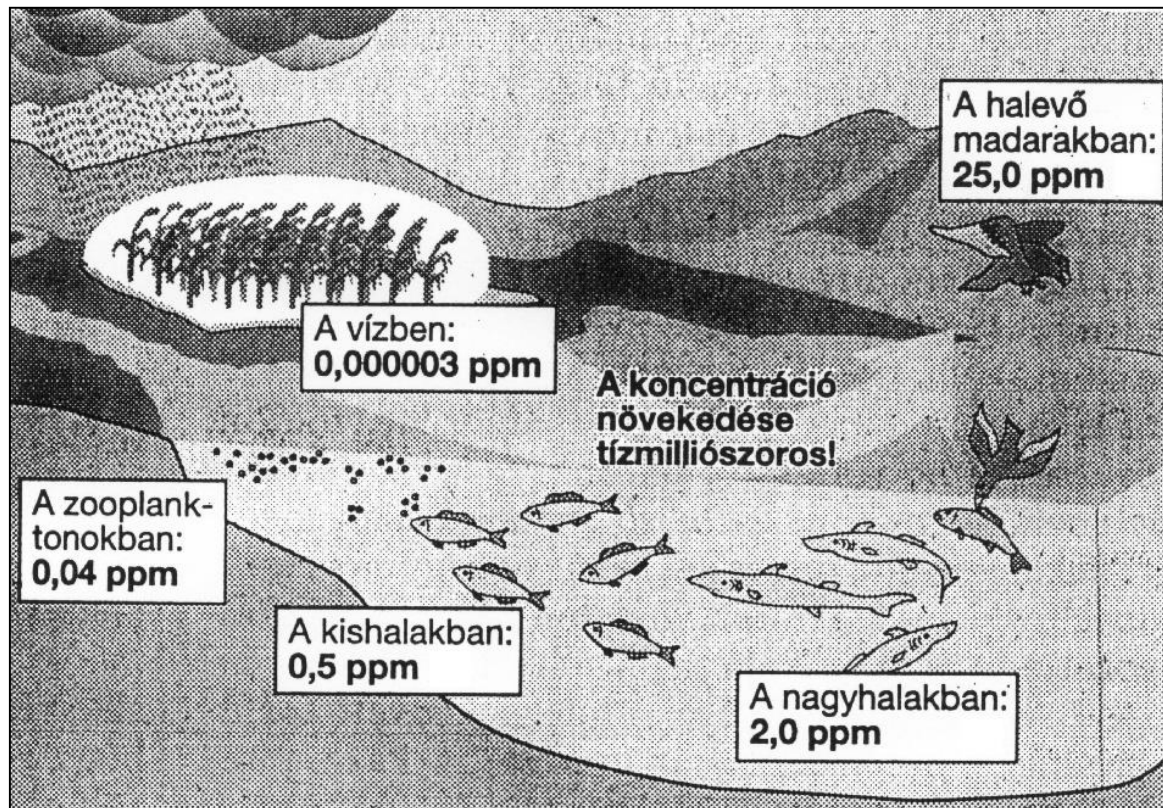


#### 92. ábra A DDT előállítása.

Döntően a p,p'-származék keletkezik a reakcióban, de kb. 15 %-ban az o,p'-vegyület is képződik melléktermékként. A '40-es évekig a DDT-nek nem volt gyakorlati jelentősége, amíg Paul Müller svájci kutató szisztematikus vizsgálatokat végezve szerves klórvegyületek rovarölő hatásával kapcsolatban ki nem derítette, hogy ez a régen ismert, egyszerűen és olcsón előállítható anyag a rovarokra rendkívül hatásos kontakt mérge, míg melegvérű állatokra és emberre ártalmatlan (vélték akkor). A II. világháború vége felé még a szövetséges csapatok győzelmében is szerepet játszott a tífuszt terjesztő tetvek elpusztítása révén.



A használatával kapcsolatos lelkesedés a háború után is folytatódott a szúnyogok, legyek, colorado bogarak (krumplibogár) irtásában. 1948-ban a DDT-vel kapcsolatos kutatásaiért *Paul Müller* kapta meg az élettani (orvosi) *Nobel*-díjat.



93. ábra A DDT felhalmozódása a táplálék láncban

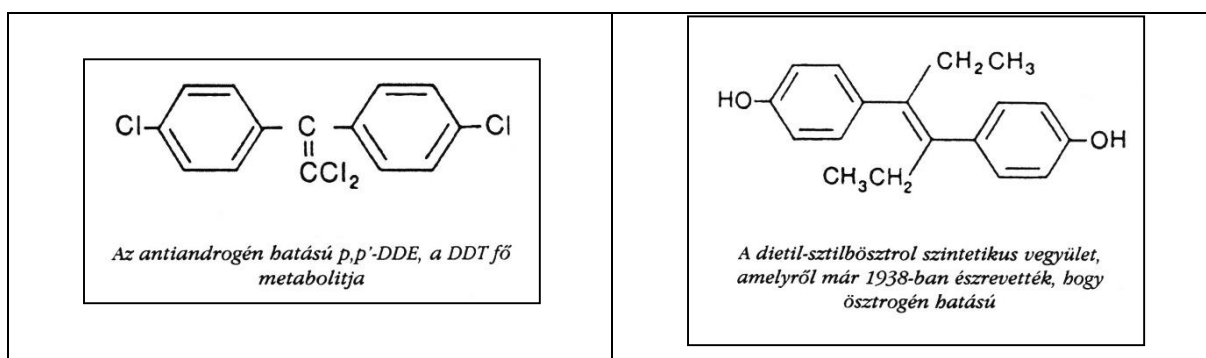
A tömeges használatot azonban negatív tapasztalatok is kísérték. A szer nem szelektív hatású, a hasznos rovarokat is pusztítva ökológiai zavarokat okozott. A kártékony rovarokban rezisztencia alakult ki, aminek ellensúlyozására a kiszórt adagok mennyiségének növelésével próbálkoztak. Rendkívül hátrányosnak bizonyult az a kezdetben kedvezőnek hitt tulajdonság is, hogy a természetben hosszú ideig nem bomlik le. A talajvízzel a folyókba és tavakba jutva felhalmozódott az algákban, és a táplálékláncon át a halakba, majd a madarakba került, szervezetükben felhalmozódott, és vagy a pusztulásukhoz vezetett, vagy gátolta szaporodásukat (93. ábra).

Rachel Carson a „Néma tavasz” című, 1962-ben megjelent könyvében drámai erővel hívta fel a figyelmet a DDT használatának káros következményeire. Ez volt a környezetvédő mozgalmak kibontakozásának kezdete is. A negatív tapasztalatok hatására a 60-as évek végén a fejlett országokban betiltották a DDT, és mellette a HCH (hexaklór-ciklohexán) használatát

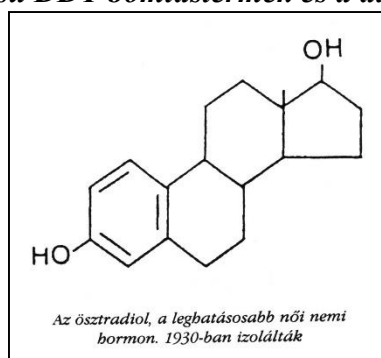
is. Hazánkban az elsők között, 1968-ban került a tiltott szerek listájára. Bizonyos trópusi területeken (Brazília, Mexikó, az egyenlítői Afrika) azonban a kisebbik rosszat választva időnként még ma is bevetik a maláriát terjesztő szúnyogok ellen.

Úgy tűnik azonban, hogy több mint harminc évvel a betiltás után sincs még vége a DDT-sztorinak. Nemrég számoltak be arról, hogy patkányokon végzett kísérletek szerint a DDT fő metabolitja, a HCl kihasadással képződő *p,p'*-DDE (lásd a **94. ábra**) hatásos antiandrogén anyag, amely a magzati életben gátolja a férfijelleg kialakulását, az ivarszervek normális kifejlődését.

Ahhoz, hogy egy anyag androgén (férfiasító) vagy ösztrogén (nőiesítő) hatású legyen nem kell feltétlenül szteroidnak, azaz szteránvázas vegyületnek lennie, mint a nemi hormonok. Régóta ismert, hogy a **94. ábra** látható dietil-sztilbösztrol, térkitöltése és a két hidroxil csoport egymástól való távolsága miatt, meg tud kötődni ugyanazokon a hormon receptorokon és hasonló hatást tud kifejteni, mint a **95. ábra** látható leghatásosabb ösztrogén, az ösztradiol.



**94. ábra** Az antiandrogén hatású DDT bomlástermék és a dietil-sztilbösztrol.



**95. ábra** Az ösztradiol szerkezeti képlete.

Használatának betiltása ellenére a DDT még ma is kimutatható azoknak a szervezetében (májban és zsírtestekben), akiket a 60-as évekig komolyabb terhelés ért. Így a DDT is oka lehet a napjainkban a férfiakat érintő ártalmas, antiandrogén (férfiatlanító) hatásoknak.

### 10.8.1.2. A freonok környezeti hatásai

Néhány évtizeddel később, a freonok esetében is a szén-klór kötés stabilitása okozott bajt.

A klór-fluor-szénhidrogéneket (CFC-k) az 1930-as években fejlesztették ki az ammónia és a kén-dioxid hűtőanyagok biztonságos alternatívájaként. Számos előnyös tulajdonságuk révén széles körben kerültek alkalmazásra: stabilis vegyületek, nem reakcióképesek, nem mérgezők, nem gyúlékonyak, szagtalanok, íztelenek, kicsi a hővezetőképességük, stb.

Felhasználási területeik a következők:

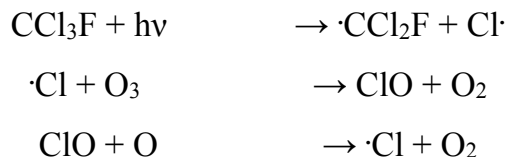
- ◆ hűtőközegek hűtő-, fagyasztó-, légkondicionáló berendezésekben,
- ◆ aeroszolok (szórópalackok) hajtógázai,
- ◆ műanyag habok gyártása: habosítók, szigetelőanyagok,
- ◆ tűzoltóanyagok,
- ◆ elektronikai berendezések, nyomtatott áramkörök, precíziós mechanikai elemek tisztítása,
- ◆ száraz vegytisztítás, textiltisztítás.

1988-ban több, mint egymillió tonna volt a termelés. Ekkorra a felhasználásban már visszaestek az aeroszolok (hajtógáz), de nőtt a hűtő-, tisztító- (elektronikai ipar) és habosítószerke (poliuretánhab) gyártása.

A freon név az első gyártó, a DuPont cég által adott és védetté is nyilvánított elnevezés. A nemzetközileg elfogadott jelölés a clorofluorocarbons angol név három betűje: CFC. Hidrogéntartalmú vegyületeknél ez HCFC, míg klórt nem tartalmazóknál HFC. Ezt követi két (az egy szénatomos), ill. három (a több szénatomos vegyületeknél) számjegy, amiből a szabályok alapján kikövetkeztethető a vegyület összetétele. Izomereket egy plusz kisbetűvel különböztetnek meg, pl: CFC-12 = CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>, míg HFC-134a = CH<sub>2</sub>FCF<sub>3</sub>.

A freonok használatának káros következményeire először 1974-ben M.J. Molina és F.S. Rowland a Nature című folyóiratban publikált cikke hívta fel a figyelmet. Ebben megállapították, hogy a levegőbe kerülő, kémiaiag nagyon stabil freon molekulák nem bomlanak el, átlagos élettartamuk a 100 évet is meghaladja. Eközben lassan a magas légkörbe, a 20-40 km magasban lévő sztratoszférába kerülnek, ahol az ultraibolya sugárzás erőssége már elég a szén-klór kötés elbontásához (a szén-fluor kötés erősebb, az itt sem bomlik el). A keletkező klóratom, mint párosítatlan elektronnal rendelkező, nagyon reakcióképes szabad gyök

elbontja az ózon molekulákat. Ez a földi életet a káros ultraibolya sugárzástól védő ózonpajzs jelentős „elvékonyodásához” vezet.



A **26. táblázat** látható a legnagyobb mennyiségben használt freonok élettartama és ózontartó képessége (ODP=ozone depletion potential), a CFC-11 adataira, mint egységnyi értékre vonatkoztatva. Az ábra másik táblázatában az üvegházhatásban játszott szerepük (GWP = global warming potential) van feltüntetve. Ez azonban a CO<sub>2</sub> tízezerszer nagyobb hatásához képest nem jelentős. A freonok káros szerepe tehát döntően az ózontartásban jelentkezik.

**26. táblázat. A freonok ózontartó képessége és üvegház hatása.**

<i>CFC-k ózontartó képessége (ODP) és élettartama az atmoszférában</i>			
<b>Vegyület</b>	<b>Képlet</b>	<b>Élettart./év</b>	<b>ODP</b>
<b>CFC-11</b>	CCl <sub>3</sub> F	75	1,0
<b>CFC-12</b>	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	111	1,0
<b>CFC-113</b>	CCl <sub>2</sub> FCClF <sub>2</sub>	90	0,8
<b>CFC-114</b>	CClF <sub>2</sub> CClF <sub>2</sub>	185	1,0
<b>CFC-115</b>	CClF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	380	0,6

<i>CFC-k üvegházhatásban játszott szerepe (GWP, CFC-11-re vonatkoztatva)</i>		
<b>Vegyület</b>	<b>Képlet</b>	<b>GWP</b>
<b>CFC-11</b>	CCl <sub>3</sub> F	1
<b>CFC-12</b>	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	2,8-3,4
<b>CFC-113</b>	CCl <sub>2</sub> FCClF <sub>2</sub>	1,3-1,4
<b>CFC-114</b>	CClF <sub>2</sub> CClF <sub>2</sub>	3,7-4,1
<b>CFC-115</b>	CClF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	7,4-7,6
<b>Szén-dioxid</b>	CO <sub>2</sub>	1,5 · 10 <sup>4</sup>

Molina és Rowland cikke hatásos volt a figyelem fölkelésében (1995-ben kémiai Nobel-díjat kaptak), és az ENSZ Környezeti Programja Bizottságot hozott létre azzal a céllal, hogy rendszeresen értékeljék az ózonréteg állapotát. Ezek a jelentések fokozatos romlást jeleztek, aminek eredményeként 1985-ben Bécsben megállapodás született arról, hogy sürgős védelmi lépésekre van szükség. Ennek hatására született meg 1987. szeptember 16-án a híres Montreáli Jegyzőkönyv („Montreal Protocol”, amely a **26. táblázat** látható freonok termelésének és felhasználásának csökkentését írta elő.

A szeptember 16-i dátum is érdekes, mert később ez a nap lett az ózon világnapja, amikor is külön propagandát kap az ózon Magyarországon is a „Védd, hogy védhessen!” jelszóval.

A paraméterek közben nem javultak, ezért az 1990-es Londoni Módosítás ezen vegyületek használatának teljes betiltását irányozta elő 2000-re, ami az 1992-es Koppenhágai Módosítás által tovább szigorodott, és előre jött 1996-ra. Ekkortól kezdve tilos ezen vegyületek használata a fejlett országokban, és így Magyarországon is. A fejlődő országokra ez 2010-ben lép érvénybe. Ezzel 1996-ban tizedére esett vissza a Montreáli Jegyzőkönyvben szereplő, ún. „kemény” freonok termelése. Előállt viszont egy felemás helyzet, mert pl. Mexikó, mint fejlődő ország gyárthatja ezeket az anyagokat, aminek az a következménye, hogy Mexikó és az USA határán ma a kábítószercsempészet után a második legnagyobb üzlet a betiltott freonok csempészése.

**27. táblázat. A Montreáli Jegyzőkönyvben szereplő vegyületek**

Vegyület	ODP	Légköri élettartam, év	Fő alkalmazások
Klór-fluor-szénhidrogének (CFC-k):			
CCl <sub>3</sub> F (CFC-11)	1,0	75	lágy és kemény poliuretánhab, hűtés, légkondicionálás
CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub> (CFC-12)	1,0	111	kemény poliuretán és más műanyag habok, hűtés, légkondicionálás, aeroszolok, sterilizálás, élelmiszer-fagyasztás
C <sub>2</sub> Cl <sub>3</sub> F <sub>3</sub> (CFC-113)	0,8	90	oldószer
C <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> F <sub>4</sub> (CFC-114)	1,0	185	kemény nem poliuretán habok, hűtés, légkondicionálás
C <sub>2</sub> ClF <sub>5</sub> (CFC-115)	0,6	380	hűtés, légkondicionálás
Halonok			
CBrClF <sub>2</sub> (halon-1211)	3,0	25	hordozható tűzoltó készülékek
CBrF <sub>3</sub> (halon-1301)	10,0	110	habbal oltó rendszerek
C <sub>2</sub> Br <sub>2</sub> F <sub>4</sub> (halon-2402)	6,0	?	haboltók

*A Montreáli Jegyzőkönyvben szereplő vegyületek, 1987*

A **28. táblázat** mutatja, hogy a Koppenhágai Módosításban további klórtartalmú vegyületek használatának betiltását (pl. szén-tetraklorid, metil-kloroform) illetve korlátozását is előírták.

Így pl. korlátozták, és 2030-tól tilos lesz a hidrogéntartalmú, ún. „lágý” freonok, a HCFC-k használata. Ezek légköri élettartama és ózonbontó képessége ugyan jóval kisebb, mivel HCl molekula kihaladásával már a látható fény hatására is bomlanak, így csak kis részük jut fel az ózonrétegig.

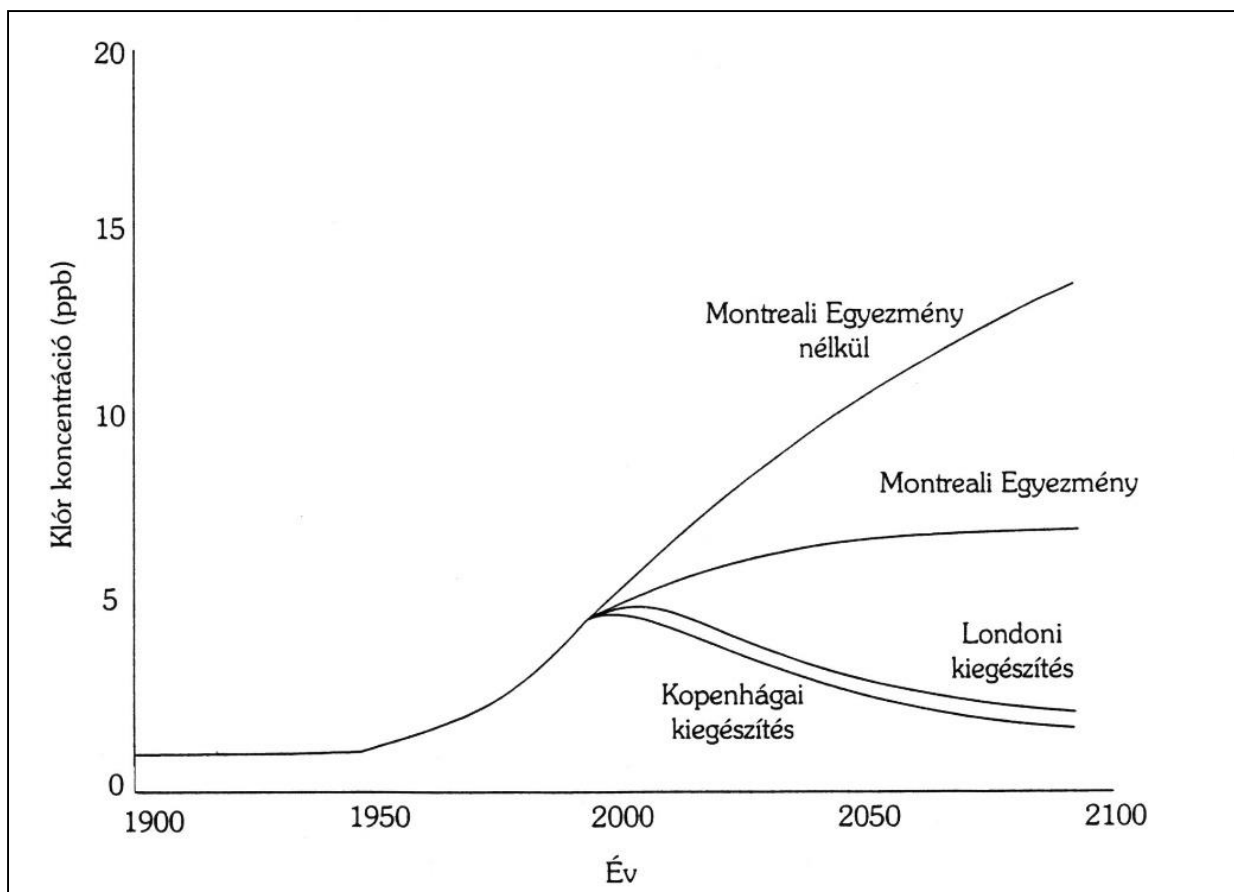
A **96. ábra** azt illusztrálja, hogy szükség volt a Montreáli egyezmény után további szigorításokra, mert csak így válik visszafordíthatóvá az ózonfogyás folyamata, de még legalább 50 év kell, hogy a légkörben a freonok használata előtti kis klór koncentráció visszaálljon, és az eredeti ózonszint újra kialakuljon.

**28. táblázat. A Koppenhágai Módosításban (1992) szereplő vegyületek**

A Koppenhágai Módosításban szereplő anyagok, 1992			
Bázisév	Csoport	Anyag	Csoportonként országosan felhasználható max. éves mennyiség a bázisévhez képest
1986	I. telített CFC-k	CFC-11	1996. I. 1-től 0%
		CFC-12	
		CFC-113	
		CFC-114	
		CFC-115	
1989	II. telített halonok		1994. I. 1-től 0%
	I. egyéb telített CFC-k		1996. I. 1-től 0%
	II. szén-tetraklorid	CCl <sub>4</sub>	1996. I. 1-től 0%
	III. metil-kloroform	CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub>	1996. I. 1-től 0%
Átmeneti helyettesítők	I. HCFC-k		1996. I. 1-től 2400 t/év 2030. I. 1-től 0 t/év
	II. telítetlen halonok		1996. I. 1-től 0%

A következő kérdés az, hogy mivel tudjuk helyettesíteni a betiltott freonokat. A szórópalackoknál egyrészt előtérbe kerültek a pumpás megoldások (pl. a kozmetikai iparban), másrészt hajtógázként pedig szén-dioxidot, propán-butánt, pentánokat használnak. Az utóbbiak hátránya, hogy szénhidrogének lévén gyúlékonyak, tűzveszélyesek. A hűtéstechnikában is próbálkoznak cseppfolyós szénhidrogének alkalmazásával. A betiltottak helyettesítésére a HCFC-k, a „lágý” freonok ideiglenesen, és a klórt nem tartalmazó „zöld” freonok, a HFC-k pedig korlátozás nélkül használhatók.

A napjainkban forgalmazott hűtőszekrények jelentős részében HFC-134a (CH<sub>2</sub>FCF<sub>3</sub>) cirkulál hűtőközegként. A **29. táblázat** ezeknek a helyettesítőknek az ózonbontó képessége és üvegházhatása látható.



96. ábra A légköri klór-koncentráció alakulása a Montreáli egyezmény és módosításainak betartása esetén.

29. táblázat. A helyettesítő anyagok ózontartó képessége és üvegházhatása

Vegyület	Képlet	Élettartam/év	ODP	GWP
HCFC-22	$\text{CHClF}_2$	13,3	0,03	0,36
HCFC-123	$\text{CHCl}_2\text{CF}_3$	1,4	0,01	0,02
HCFC-124	$\text{CHClFCF}_3$	5,9	0,03	0,10
HCFC-141b	$\text{CH}_3\text{CCl}_2\text{F}$	9,4	0,10	0,14
HCFC-142b	$\text{CH}_3\text{CClF}_2$	19,5	0,05	0,44
HCFC-225ca	$\text{CHCl}_2\text{CF}_2\text{CF}_3$	2,5	0,02	0,04
HCFC-225cb	$\text{CHClFCF}_2\text{CClF}_2$	6,6	0,02	0,12
HFC-32	$\text{CH}_2\text{F}_2$	6		0,13
HFC-125	$\text{CHF}_2\text{CF}_3$	36		0,74
HFC-134a	$\text{CH}_2\text{FCF}_3$	14		0,29
HFC-143a	$\text{CH}_3\text{CF}_3$	55		1,1
HFC-152a	$\text{CH}_3\text{CHF}_2$	1,5		0,03

*Helyettesítő anyagok ózontartó képessége és üvegházhatása*

A káros freonok további használatának betiltása után még mindig marad egy kérdés, hogy mi történjen a már korábban gyártott és jelenleg a működő hűtőszekrényekben,

légkondicionálókban lévő freonokkal, hogy azok már ne kerüljenek a légkörbe. Ezt a freon mennyiséget az eszközök javítása, leselejtezése során zárt rendszerben kell összegyűjteni. Hazánkban is megvan a szakember gárda (zöld igazolvánnyal rendelkező hűtőgép szerelők) ennek elvégzésére.

Ha elegendő mennyiségű és megfelelő tisztaságú freon áll rendelkezésre, akkor a legjobb módszer a hidrogénes redukcióval történő átalakítás, a katalitikus hidrodeklórozás. Ennek során a betiltott freonból helyettesítő anyagot, a „rossz” freonból „jó” freont nyerhetünk, CFC-ből HCFC ill. HFC állítható elő.

A szelektív redukció alapja az, hogy a C-F kötések több mint 100 kJ/mol-lal erősebbek, mint a C-Cl kötések, ezért csak a Cl atomok cserélődnek H-re, a F atomok nem. Hidrogénező katalizátorként aktív szén hordozóra felvitt fém palládium használható.

Ha a tisztaság nem megfelelő az átalakításhoz, akkor oxidatív lebontás jöhet szóba akár katalitikus úton, akár hulladékégetéssel. Katalitikus módszerekkel alacsonyabb hőmérsékletre kell felmelegíteni az anyagot, mint hulladékégetésnél. Utóbbi esetben CO<sub>2</sub>, HCl, Cl<sub>2</sub>, HF és F<sub>2</sub> a végtermékek, amelyeket lúgos közegben történő elnyeletéssel kell ártalmatlanítani. Nagyon lényeges, hogy az égetés során 1200 °C-ot el kell érni, vagy ilyen hőmérsékletű utóégetőt kell alkalmazni, hogy biztosan ne képződjenek dioxinok.

#### 10.8.1.3. A poliklórozott aromás vegyületek környezeti hatásai

A poliklórozott vegyületek szintén komoly környezeti veszélyforrásként jelennek meg. Ezek közé tartoznak a poliklórozott bifenilek (PCB-k), a poliklórozott dibenzo-dioxinok (PCDD-k) és dibenzo-furánok (PCDF-k), melyek szerkezeti képletei a **97. ábra** láthatók.

A poliklórozott bifenileket kedvező dielektromos tulajdonságaik és lángállóságuk miatt szigetelő folyadékként a 30-as évek kezdete óta használják transzformátorokban és kondenzátorokban. Transzformátortüzek alkalmával derült ki, hogy belőlük nagyon veszélyes PCDD-k és PCDF-k képződnek.

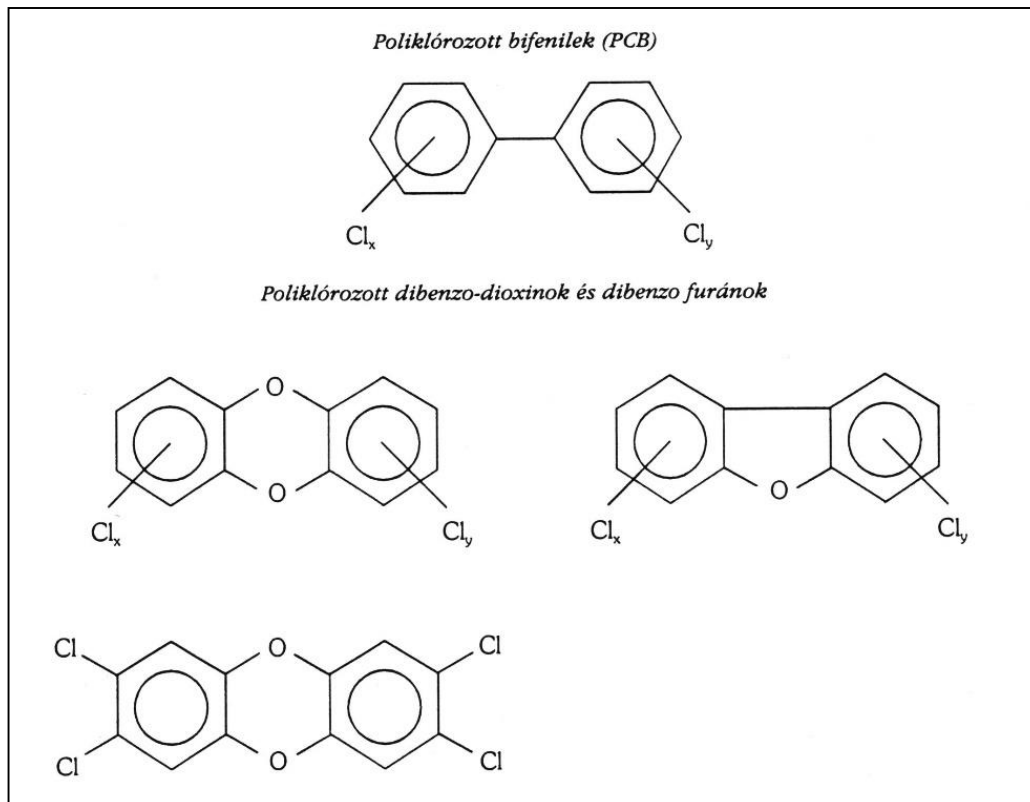
A poliklórozott dibenzo-dioxinoknak és dibenzo-furánoknak nincs gyakorlati felhasználása, sose gyártották őket közvetlenül, csak melléktermékként keletkeztek, és kerültek ki a környezetbe, pl. Vietnámban az amerikaiak által használt lombtalanító anyag, a hírhedt „agent orange” esetében. (Nevét a narancssárga hordókról kapta, amiben szállították.) Másik forrásuk az, hogy nagy termodinamikai stabilitásuk miatt könnyen képződnek klórtartalmú aromás vegyületek égetése során 500-800 °C-os tartományban. 1200 °C felett viszont már nem stabilak



és elbomlanak. A PCDD-k közül a legveszélyesebb rákkeltő a **97. ábra** látható szimmetrikus, 2,3,7,8-tetraklór származék, a híres-hírhedt „Seveso-dioxin”.

Az utóbbi évtizedben hazánkban a környezetünket veszélyeztető klórtartalmú vegyületek elhelyezésének veszélyeit és ártalmatlanításának lehetőségeit Garé község neve szimbolizálja. Ebben sajnos a szakmai problémákat politikai motívumok is bonyolítják, így ez a kérdés a magyar környezetvédelem „állatorvosi lovává” vált, ha szabad ezzel a képzavarral élni.

A Budapesti Vegyiművek 1987-ig évtizedeken keresztül gyártott fenoxi-ecetsav alapú gyomirtót. A melléktermékként felszaporodó, elsősorban tetraklór-benzolt tartalmazó hulladékot Baranyában helyezte el. 1979-ig a Garé község mellett hivatalosan létesített veszélyes hulladék lerakóban, acél hordókban 16 ezer tonna klórtartalmú anyagot helyeztek el. Miután kiderült, hogy lyukadnak a hordók és szivárog a klórtartalmú aromás vegyületeket tartalmazó összetett anyag, 1990-ben határozat született a tároló 2000. év végéig történő felszámolására. A pályázat első győztese helyben épített volna biztonságos égetőt, a következő nyertes Dorogon tervezte, míg a végül külföldön, Ausztriában és Németországban égették el ezt az anyagot. A probléma a határidő lejárta után ugyan, de lassan megoldódott, napjainkban a talajszennyezés kezelése történik.



**97. ábra Környetkárosító poliklórozott szénhidrogének.**

## Ábrajegyzék

1. ábra. A Föld átlaghőmérséklete az utolsó 100 évben .....	23
2. ábra: A Föld átlaghőmérséklete az utolsó 100.000 évben .....	23
3. ábra: CO <sub>2</sub> és a hőmérséklet kapcsolata .....	25
4. ábra Szeged főbb kapcsolódó útjainak forgalma [Szerkesztette: Pitrik J.].....	94
5. ábra A közúti forgalom eloszlása és „box” modellje [Forrás: PITRIK J. 2003a; PITRIK J. 2001].....	94
6. ábra Járműspecifikus forgalmi adatbázis .....	97
7. ábra A terjedés empirikus modellje (utcakanyon vázlata)[Szerkesztette: Pitrik J.; Forrás: BEDE G.–GÁCS I. 1980] .....	104
8. ábra A terjedés empirikus modellje (empirikus összefüggés, jelölések, Maple kép) [Szerkesztette: Pitrik J.; Forrás: BEDE G.–GÁCS I. 1980] .....	104
9. ábra A szektorra átlagolt koncentráció számítás környezete és értelmezése csomópontba integrált kibocsátás figyelembevételével [Szerkesztette: Pitrik J.] .....	105
10. ábra A CO szennyezés eloszlása x és Q függvényében, szabványos transzmissziós modell számítás eredménye (Szeged, Bertalan híd szegedi hídfő –1990, 2000) [Szerkesztette: Pitrik J.; Jelölés: Q–kibocsátás, mg/s; x–forrástól való távolság, m; C–koncentráció,mg/m <sup>3</sup> )].....	108
11. ábra Dinamikus olfaktométer működési blokkdiagramja.....	116
12. ábra Szerves anyag hulladéklerakókban végbemenő fermentatív lebomlásának négy jellegzetes szakasza.....	126
13. ábra. Hulladéklerakó-gáz kiszellőztető kúrendszer .....	128
14. ábra. Gázgyűjtő vezeték rekultivált hulladéklerakón .....	129
15. ábra. Hulladéklerakó-gáz égető-berendezés .....	129
16. ábra. Savas gázmigráció által kipurított növényzet .....	130
17. ábra. Az agresszív hulladéklerakó-gáz hatásai .....	130
18. ábra A porleválasztás vázlata.....	134
19. ábra A porszemcsézet és frakcionálási fok görbéinek értelmezése .....	136
20. ábra Különböző minőségű porleválasztók frakcióportalanítási görbéi .....	137

21. ábra A porkamra vázlata .....	138
22. ábra Gázáram megosztása nélkül működő irányváltásos leválasztó .....	139
23. ábra Gázáram megosztásával működő irányváltásos leválasztó .....	139
24. ábra Porszemcse mozgása centrifugális erőterben .....	140
25. ábra Ciklon.....	142
26. ábra Multiciklon; Örvénycső; Kis átmérőjű ciklonok .....	143
27. ábra Párhuzamosan kapcsolt multiciklonok és örvénycsövek.....	143
28. ábra A kialakuló elektromos mező sémája .....	149
29. ábra Az elektromos térerősség változása és a zónák elhelyezkedése.....	149
30. ábra Az elektrofilter elvi vázlata.....	150
31. ábra FCL leválasztó elvi kialakítása .....	152
32. ábra FCL típusú leválasztó .....	153
33. ábra Porlasztásos mosótorony.....	154
34. ábra Tökéletes tornyok.....	156
35. ábra Venturi mosóberendezések .....	157
36. ábra Könnyű és nehéz fázisok ellenáramú érintkeztetése.....	163
37. ábra Az ellenáramú érintkeztető elvi ábrája .....	165
38. ábra A munkavonal és az egyensúlyi görbe tömegarány és molarány koncentrációk esetén.....	167
39. ábra Az elméleti fokozatok számának meghatározási elve .....	167
40. ábra Folytonos fázisérítkeztetés elve .....	169
41. ábra Az átviteli egység szám meghatározása.....	171
42. ábra A nyugvó ágyas adszorpció elve.....	175
43. ábra A mozgó ágyas adszorpció elve.....	175
44. ábra Két egységből álló adszorber elvi vázlata.....	176
45. ábra Négyágyas adszorber vázlata.....	176
46. ábra Mozgóágyas folyamatos üzemű adszorber .....	177
47. ábra Szulfacid eljárás elvi vázlata.....	178
48. ábra Reinluft eljárás elvi vázlata.....	179
49. ábra Bergbau-Forschung eljárás elvi vázlata .....	180
50. ábra A töltetes torony felépítése .....	182

51. ábra Néhány ömlesztett tölteléktest kialakítása és jellemző adata .....	183
52. ábra Néhány rendezett töltet kialakítás .....	184
53. ábra Mozgóréteges mosó működési vázlata .....	185
54. ábra Buboréksapkás torony felépítése .....	186
55. ábra Meszes-abszorpciós füstgáztisztítás.....	187
56. ábra A Wellmann-Lord eljárás elvi vázlata .....	189
57. ábra Keverő kondenzátor .....	190
58. ábra Vízszintes csőköteges kondenzátor.....	191
59. ábra Hűtőkörfolyamat .....	192
60. ábra A kriogén kondenzációs technológia vázlata.....	193
61. ábra A termikus rekuperatív utóégető működési vázlata.....	195
62. ábra A termikus regeneratív utóégető működési vázlata .....	196
63. ábra Katalitikus utóégető működési vázlata .....	198
64. ábra Koncentrációnöveléssel kombinált termikus utóégető .....	199
65. ábra A bioszűrő elvi folyamatábrája .....	201
66. ábra A mikroorganizmusok elhelyezkedése a bioszűrőben (nagyítás).....	201
67. ábra A permetezett bioszűrő elvi folyamatábrája .....	202
68. ábra A mikroorganizmusok elhelyezkedése a permetezett bioszűrőben (nagyítás) .....	202
69. ábra A biomosó elvi folyamatábrája.....	203
70. ábra A mikroorganizmusok elhelyezkedése a biomosóban (nagyítás).....	204
71. ábra A membrán bioreaktor elvi folyamatábrája .....	205
72. ábra Kén-trioxid képződés fosszilis tüzelőanyagok égésekor .....	207
73. ábra Meszes füstgáztisztító rendszer elvi technológiai folyamatábrája.....	210
74. ábra A mészkő és a kén-dioxid reakciója .....	210
75. ábra A kénmegkötés hatásfokának hőmérsékletfüggése fluidágyas tüzelés során, különböző Ca/S arányoknál .....	212
76. ábra Füstgázkéntelenítés kettős lúgos mosással .....	213
77. ábra Füstgázkéntelenítés Kobe-Steel eljárással .....	214
78. ábra Walther-féle ammóniás kéntelenítés.....	215
79. ábra A Bergbau-Forschung szimultán SO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> eltávolító rendszere .....	215

80. ábra Cinkferrites kéntelenítés állóágyas reaktorban .....	216
81. ábra A LIFAC eljárás működési sémája .....	217
82. ábra A nitrogén körforgása .....	219
83. ábra Az NO oxidációhőmérsékletfüggése .....	220
84. ábra A nitrogén-oxidok képződésének és átalakulásának mechanizmusa lángokban .....	221
85. ábra A nitrogén-oxid emisszió csökkentésére alkalmas eljárások.....	222
86. ábra NO <sub>x</sub> -szegény égő kialakítása .....	224
87. ábra Erőművi SCR konverter (fém-monolitváz) katalizátor: V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -TiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ..	227
88. ábra SCR eljárás alkalmazása erőművi füstgázok NO <sub>x</sub> -tartalmának átalakítására .....	228
89. ábra Az SCR helye a füstgáztisztítási folyamatban .....	229
90. ábra Az erőművi füstgázok NO <sub>x</sub> -mentesítési lehetőségei .....	230
91. ábra A légtérbe kibocsátott VOC szennyezés forrásai, illetve mennyiségi adatainak változása a 20. században .....	231
92. ábra A DDT előállítása. ....	232
93. ábra A DDT felhalmozódása a táplálék láncban .....	233
94. ábra Az antiandrogén hatású DDT bomlástermék és a dietil-sztilbösztrol. ....	234
95. ábra Az ösztradiol szerkezeti képlete.....	234
96. ábra A légköri klór-koncentráció alakulása a Montreáli egyezmény és módosításainak betartása esetén. ....	239
97. ábra Környezetkárosító poliklórozott szénhidrogének. ....	241

## Táblázatjegyzék

1. táblázat. Alapgázok a légkörben .....	10
2. táblázat. Legfontosabb üvegházhatású gázok jellemzői .....	21
3. táblázat. Karbon kibocsátás .....	24
4. táblázat. A füstködök jellemzői .....	39
5. táblázat. Az USA-ban 1975-ben kibocsátott főbb légszennyező anyagok becsült mennyisége, Mt/év .....	45
6. táblázat. Leggyakoribb szennyező anyagok mérgező és halálos koncentrációit .....	54
7. táblázat. Passzív monitorok .....	78
8. táblázat. TEI Model 43C jellemző adatai .....	79
9. táblázat. Otto- és dízelmotorok károsanyag kibocsátása .....	88
10. táblázat. Napi forgalomterhelési adatsor, Szeged (egységjármű/nap).....	93
11. táblázat. A modellszámítás eredményei: Füstgázkibocsátás kapcsolódó közúti forgalom esetén, Szeged [Szerkesztette: Pitrik J.].....	95
12. táblázat. Szegedi gépjármű forgalom eloszlása .....	95
13. táblázat. Forgalmatszámítási adatok, „box” modell Szeged [Szerkesztette: Pitrik J.] .....	98
14. táblázat. CO emissziós normaszor [Források: MSZ 19950; MSZ 21854-1990; MSZ-07-4448-1991; MSZ 21878-85; 6/1990 (IV.12) KÖHÉM; AM Személygépkocsi műhelyadatok. Szakirodalmi kiadó – Aargauer Tagblatt AG, Aarau, 1992.] .....	99
15. táblázat. Emissziós modell alapadatok (forgalom, forgalmi rangsor, CO kibocsátás, szennyezési rangsor), Szeged, régi híd (Belvárosi) szegedi hídfő, 1990, 2000 [Szerkesztette: Pitrik J.] .....	102
16. táblázat. Néhány szaganyag, ezek szagának jellege és az általuk okozott szag szagküszöbértéke .....	112
17. táblázat. Néhány bűzös technológia szennyezett levegőjének szagkoncentrációja .....	116
18. táblázat. Egyszerűsített bomlási ciklus .....	124

19. táblázat. Hulladéklerakókban képződő fermentációs lebomlás eredményeképpen képződő gázkeverék átlagos összetétele .....	126
20. táblázat. Szennyező anyagok leválasztási eljárásai levegőből .....	132
21. táblázat. Porszűrők jellemzői .....	146
22. táblázat. A villamos leválasztók főbb jellemző adatai.....	151
23. táblázat. Nedves porleválasztó berendezések .....	158
24. táblázat. Adszorpciós tulajdonságok összehasonlítása [ 6 ] .....	173
25. táblázat. A különböző megoldásokkal elérhető NO <sub>x</sub> emissziócsökkentések .....	224
26. táblázat. A freonok ózombontó képessége és üvegház hatása.....	236
27. táblázat. A Montreali Jegyzőkönyvben szereplő vegyületek .....	237
28. táblázat. A Koppenhágai Módosításban (1992) szereplő vegyületek.....	238
29. táblázat. A helyettesítő anyagok ózombontó képessége és üvegházhatása .....	239