

# Levegő- és vízvédelem

2018

Kémiai és Környezeti Folyamatmérnöki Tanszék

Vegyésszmérnöki és Biomérnöki Kar

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Előadó: Valentínyi Nóra

tanársegéd

Levegőtisztaság-védelem módszerei.  
Emisszió-csökkentés aktív eljárással  
(alap- és/vagy segédanyag változtatása,  
technológiai módosítás).

# Emisszió-csökkentés módszerei

- ▶ Energiahordozók struktúrájának megváltoztatása,
- ▶ A tüzelőanyagok, vagy a füstgáz kéntelenítése,
- ▶ Magas kémények építése,
- ▶ Porleválasztás,
- ▶ Zárt technológiák alkalmazása,
- ▶ Gáztisztítás,
- ▶ Az üzemek áttelepítése,
- ▶ Gépjárművek emissziójának szabályozása,
- ▶ Megújuló energiaforrások alkalmazása.

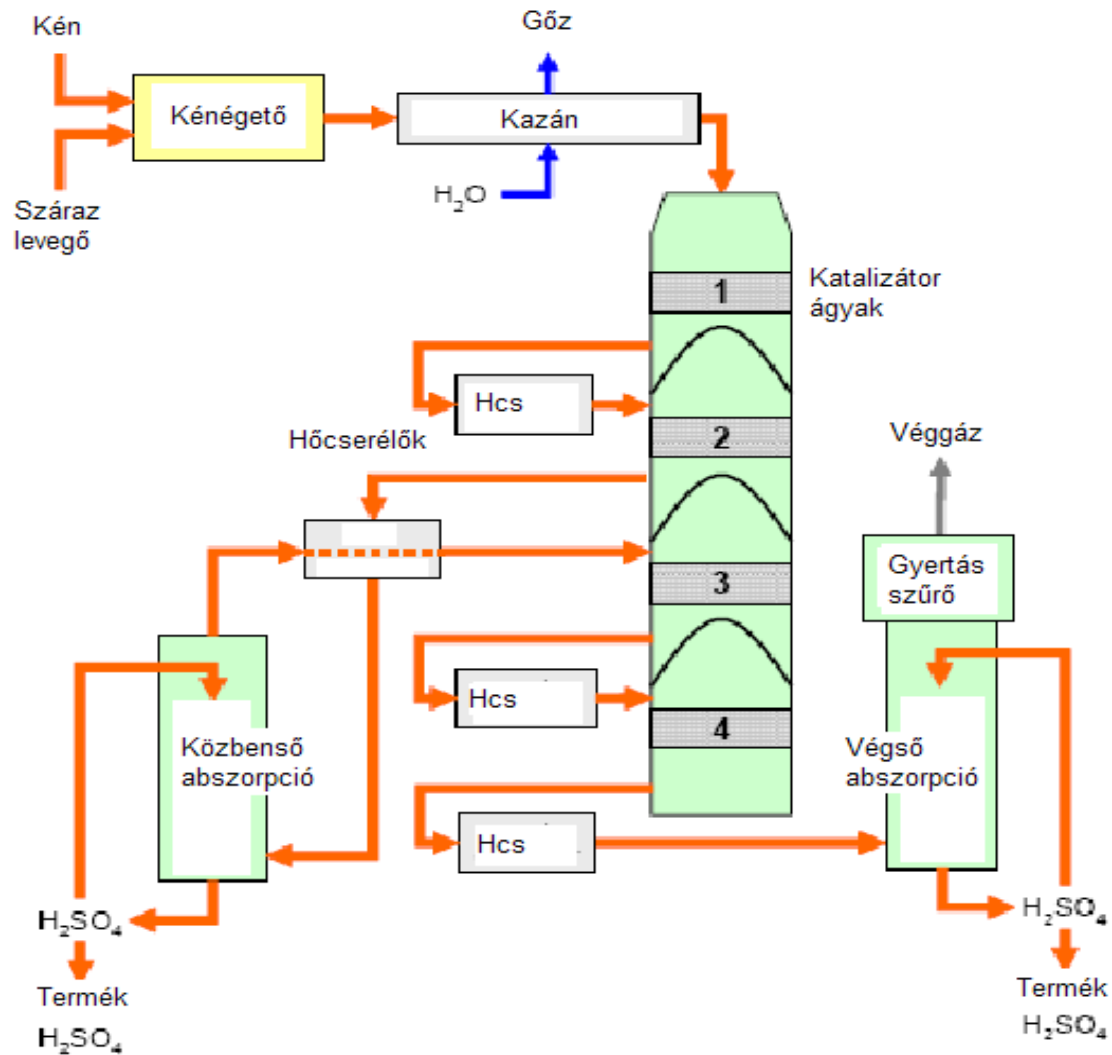
# Aktív módszerek

- ▶ Technológiai módosítása
- ▶ Tisztább alap-, és segédanyagok alkalmazása,
- ▶ Alap-, és segédanyagok káros komponensektől való mentesítése,
- ▶ Technológiai fegyelem betartása

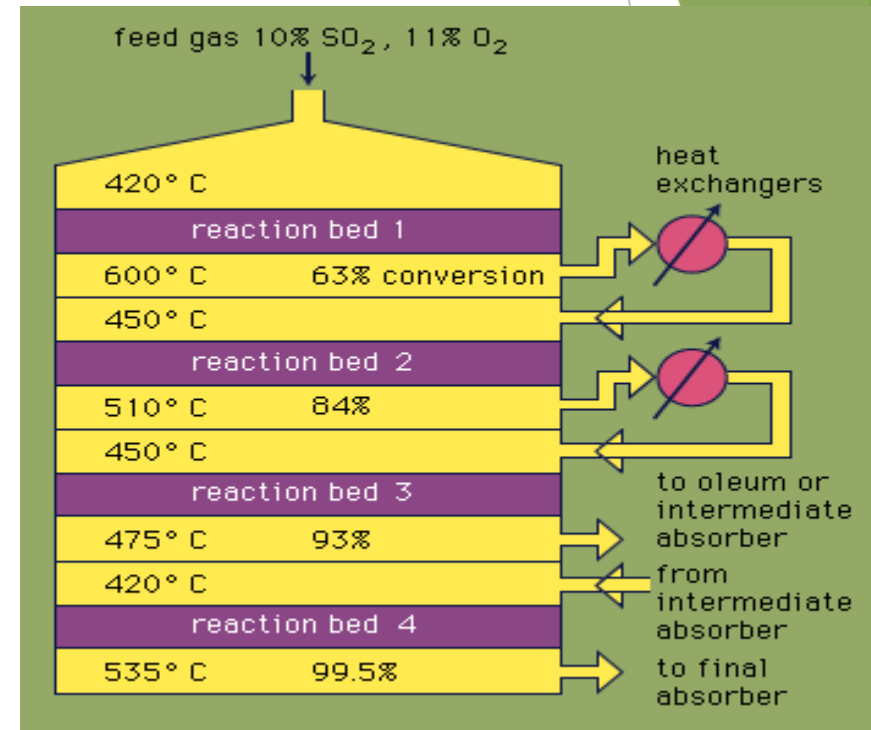
# Technológia módosítása

- ▶ Példa: Kontakt kénsavgyártás
  - ▶ a konverzió javítására, így a légszennyező  $\text{SO}_2$  mennyiségének csökkentésére a technológiában ún. közbenső elnyeletést alkalmaznak

# Kontakt kénsavgyártás (2 konverzió, 2 abszorpció)



katalizátor:  $V_2O_5$ , szilikagél hordozón  
 promótor:  $Cs_2SO_4$



# Technológia módosítása

## ▶ Klór-alkáli elektrolízis

- ▶ A klór előállítására szolgáló három eljárás: higanyos, diafragmás, membrános
- ▶ **Klór:** PVC és poliuretán, az aromás klórvegyületek, a propilénoxid, a klórozott szénhidrogén oldószerek és szervesetlen klórvegyületek előállítása
- ▶ elsősorban abban különböznek egymástól, hogy miképpen oldják meg az anódon keletkező klór és a katódon képződő lúg és hidrogén elválasztását.
- ▶ a higanykatódos eljárás helyett membráncellás technológiát vezetnek be a higanyemisszió megszüntetésére
- ▶ Az egyik legnagyobb elektromos energia fogyasztó eljárás
- ▶ BAT referencia dokumentum

# Technológia módosítása

## Klór-alkáli elektrolízis

- ▶ az anódon a klorid ionok oxidálódnak és klórgáz keletkezik,  
$$\text{NaCl} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$$
$$2 \text{Cl}^- (\text{old}) \rightarrow \text{Cl}_2 (\text{g}) + 2 \text{e}^-$$
- ▶ a katódon a higanyos eljárásnál nátrium/higany amalgám képződik, amiből a bontóban vízzel hidrogén és NaOH keletkezik,
- ▶ a membrános és diafragmás cellákban vízbontás megy végbe hidrogén és  $\text{OH}^-$  ionok képződése mellett.





# Technológia módosítása

## Klór-alkáli elektrolízis

### ▶ Higanykatódos eljárás:

A higanyos cella működése azon alapul, hogy a hidrogén túlfeszültsége nagy a higanyon, ezért a nátrium válik le.

A sóban lévő szennyezések (pl. V) csökkenthetik ezt a túlfeszültséget, emiatt hidrogén válhat le a Hg katódon és bejuthat a klórgázba ->

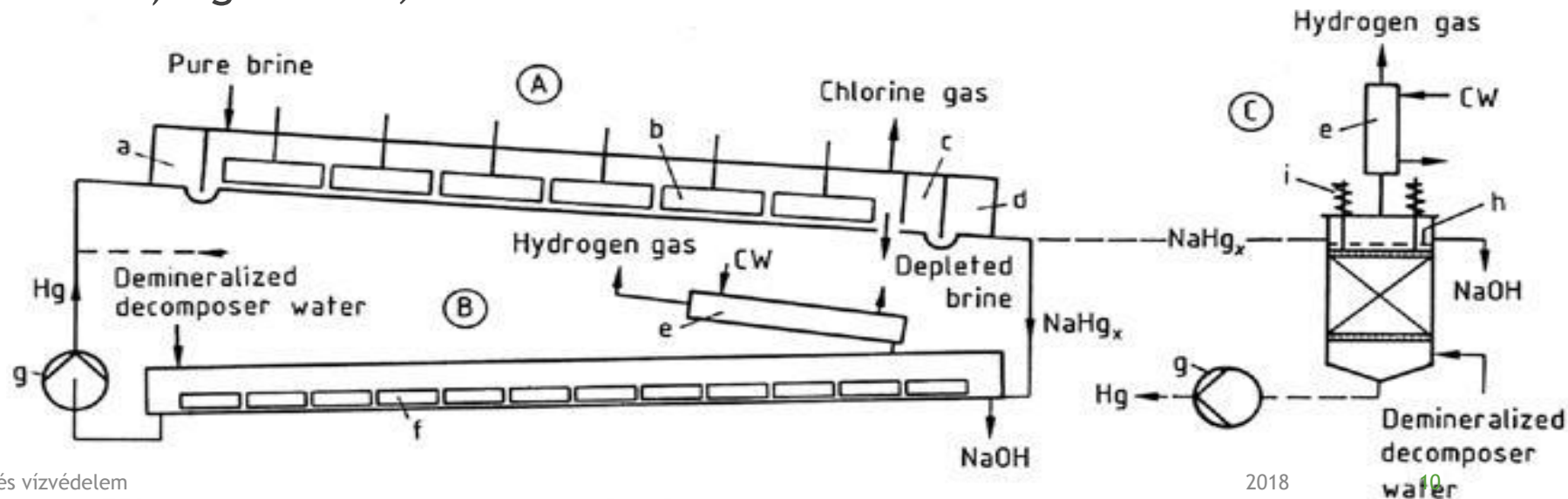
veszélyes, mert a hidrogén a klórral is, ugyanúgy mint az oxigénnel, már 4%-os mennyiségben robbanó elegyet alkot.

# Technológia módosítása

## Klór-alkáli elektrolízis

### ► Higanykatódos eljárás:

- A) Elektrolizáló (Hg) cella: a) Hg bevezetés; b) Anódok; c) végrekesz; d) mosórekesz
- B) Vízszintes bontócella: e) Hidrogén gáz hűtő; f) Grafit lemezek; g) Hg szivattyú
- C) Függőleges bontócella: e) Hidrogén gáz ; g) Hg szivattyú; h) Hg elosztó;



# Technológia módosítása

## Klór-alkáli elektrolízis

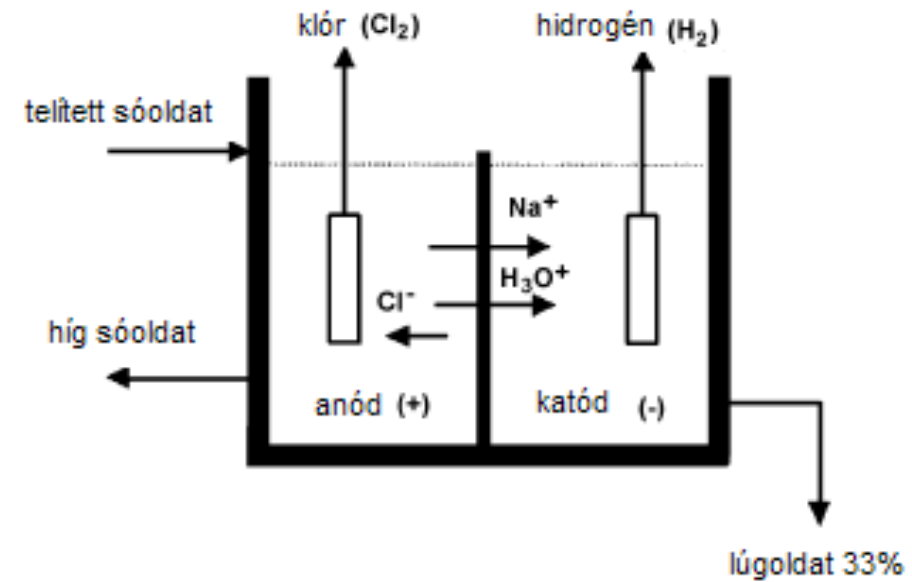
- ▶ **Higanykatódos eljárás környezeti problémái:**
  - ▶ Sok elektromos energiát használ fel => itt az elektromos energiát nyersanyagnak kell tekinteni
  - ▶ A higanycellás és diafragma-cellás létesítmények a talajt és élővizeket higannyal és PCDD/azbeszttel szennyezték nagymértékben,
  - ▶ A higanycellás létesítményekből hosszú időn át jutott ki levegőbe, vízbe, termékekbe és hulladékként higany, amely dimetil-higannyá metabolizálódva a táplálékláncba jutott.
  - ▶ A higanyszennyezés fő forrása a gyártási hulladékok, számottevő az elfolyó víz.
  - ▶ Az idők folyamán lerakott higanyos hulladékok veszélyeztetik a talajt.
  - ▶ A higany az alkalmazás helyén a berendezésekbe, anyagokba is diffundálhat, felszívódhat, amalgamozódhat.
- ▶ **Előnye:**
  - ▶ A keletkező klórgáz jóformán alig tartalmaz oxigént és a marónátron oldat 50 %-nál is töményebb lehet

# Technológia módosítása

## Klór-alkáli elektrolízis

### ▶ Membrános eljárás:

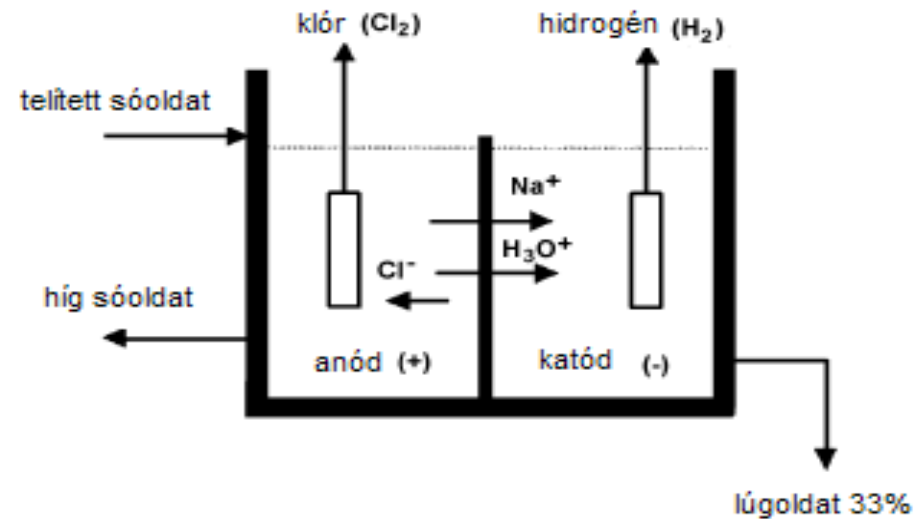
- ▶ az anódot és a katódot vízzáró, ionvezető membrán választja el
- ▶ anódtérben: sóoldat, a klorid ionok klórrá oxidálódnak
- ▶ A nátrium ionok a membránon átjutva a katódtérbe
- ▶ katódtérben: lúgoldat, ide vezetik be az ionmentes vizet, amiből  $H^+$  és  $OH^-$  ionok lesznek, utóbbiak a nátrium ionokkal 32-35%-os töménységű lúgot adnak
- ▶ A kimerült sóoldatot szilárd NaCl hozzáadásával, a lúgoldatot bepárlással töményítik.
- ▶ katód anyaga nikkelt vagy saválló acél, felületén katalitikus hatású bevonattal
- ▶ Az anód Ti, nemesfémoxid bevonattal
- ▶ A membrán anyaga perfluorozott polimer, amin karboxil csoportok vannak a katódos oldali rétegben, míg az anódos oldalon szulfonsav csoportokat építenek a polimer rétegbe, a membránt teflon szálakkal erősítik. Élettartamuk 2- 5 év közötti.



# Technológia módosítása

## Klór-alkáli elektrolízis

- ▶ A membrán lehetővé teszi az anódtérbe befolyó sóoldatból a  $\text{Na}^+$  ionok és egy kevés víz katódtérbe jutását, de a klorid ionok és a klórgáz nem jut át a membránon. A katódtérben keletkező  $\text{OH}^-$  ionok sem jutnak át az anódtérbe.
- ▶ Az anódtérben klórgáz, a katódtérben hidrogéngáz keletkezik.
- ▶ Az eljárás előnyei:
  - ▶ Kis teljes energia igény,
  - ▶ kis beruházási költség,
  - ▶ olcsó cella működtetés,
  - ▶ tiszta lúg (de be kell párolni!),
  - ▶ kis érzékenység a cella terhelés változásra és leállásra



# Technológia módosítása - Klór-alkáli elektrolízis

## ▶ Diafragmás eljárás:

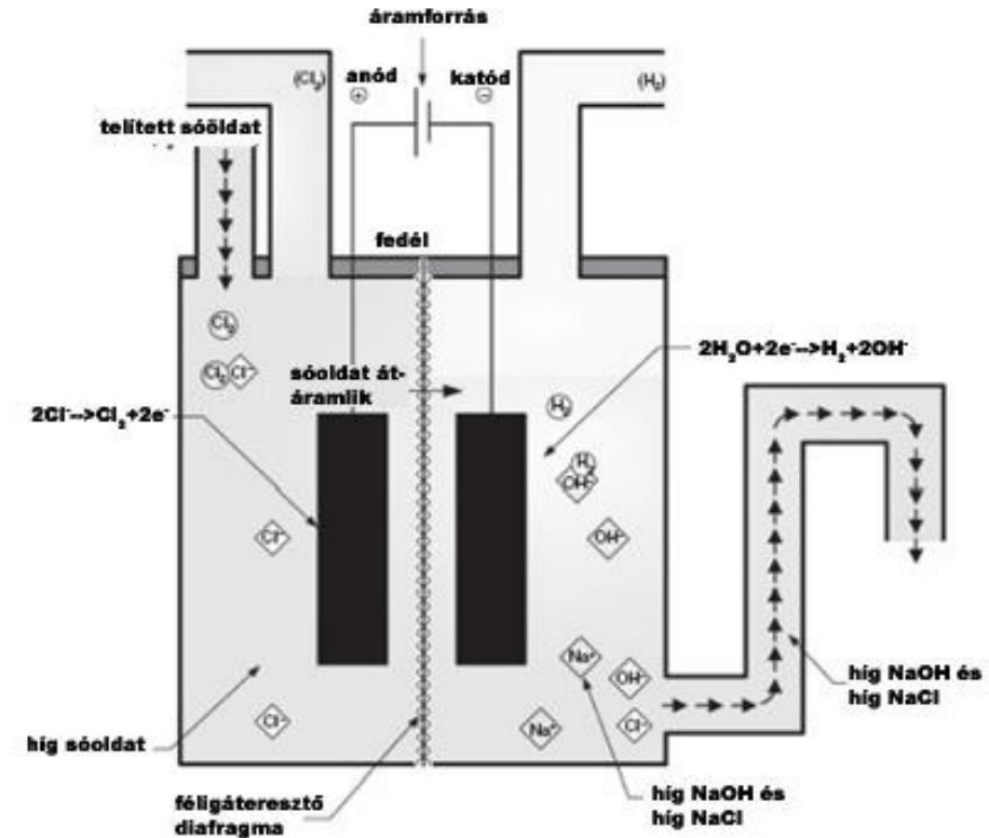
- ▶ egyetlen cellában megy végbe az elektrolízis
- ▶ anód- és a katódteret 25 % fluorokarbon-szálat tartalmazó („modifikált”) azbeszt-diafragma választja el (ma: PTFE-teflon) -> kioxidálódott klór a kiredukálódott hidrogénnel ne keveredjen klórdurranógázzá
- ▶ tisztított sólé anódtérbe -> átszivárog a katódtérbe
- ▶ 25 %-os sóoldat sótartalmának kb. fele elbomlik
- ▶ elfolyó oldatban kb. 11% nátronlúg és 18% nátrium-klorid van

## ▶ A diafragmacellás eljárás előnyei:

- ▶ a higanykatódosénál alacsonyabb az üzemi feszültsége,
- ▶ a membráncellásénál kevésbé tiszta sóléval is működtethető

## ▶ Környezeti veszély:

- ▶ Ha a folyamatban azbesztes diafragmát alkalmaznak, óhatatlan veszélyforrás az azbeszt környezetbe jutása.



# Aktív módszerek: Hatásfok növelése

- ▶ Erőművekben:
  - ▶ hagyományos széntüzelés 37%-ával szemben szénportüzelésnél 42 %,
  - ▶ gáztüzelésnél 45 %,
  - ▶ kombinált ciklusú gáz-, és gőzturbinás erőműben 53 % érhető el
- ▶ A füstgázok termikus NO<sub>x</sub>-tartalma jelentősen csökkenthető a tüzeléstechnológia (légfelesleg, tartózkodási idő, hőmérséklet, égőtér kialakítása, NO<sub>x</sub>-szegény égők) módosításával

# NO képződés mechanizmusai

## ▶ A nitrogén-oxidok

(NO<sub>x</sub>: NO, nitrogén-monoxid és NO<sub>2</sub>, nitrogén-dioxid) a tüzelés során három módon keletkezik:

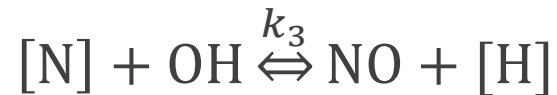
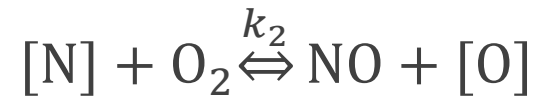
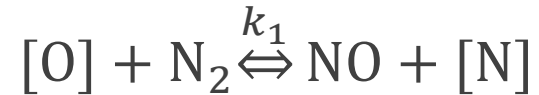
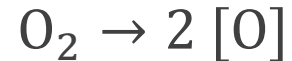
- ▶ a tüzelőanyag kémiaiilag kötött (szerves) nitrogéntartalmából,
- ▶ az égési levegő nitrogénjéből termikus NO<sub>x</sub>-képződési mechanizmussal, vagy
- ▶ az égési levegő nitrogénjéből prompt NO<sub>x</sub>-képződési mechanizmussal



# NO képződés mechanizmusai

## Termikus NO képződés:

- ▶ Zeldovich-mechanizmus (1947) szerint:



- ▶ Befolyásoló paraméterek:

- ▶ Nitrogén és az oxigén koncentrációja (légfelesleg tényező)
- ▶ Legmagasabb láng hőmérséklet
- ▶ Legmagasabb hőmérsékletű zónában tartózkodás ideje
- ▶ Tüzelőanyag minősége
- ▶ Tüzelés módja

# Termikus NO képződést befolyásoló tényezők

- ▶ Légfelesleg-tényező ( $\lambda$ )

$$\lambda = \frac{n_{lev.be}}{n_{lev.sztöch.}}$$

- ▶ Legmagasabb láng hőmérséklet

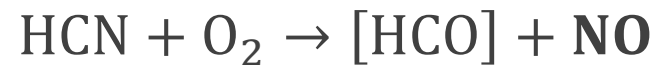
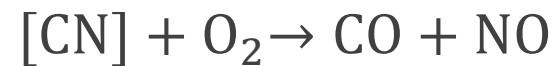


$$\lg K_p = \frac{p_{\text{NO}}^2}{p_{\text{N}_2} \times p_{\text{O}_2}} = -\frac{9460}{T} + 1,0884$$

# NO képződés mechanizmusai

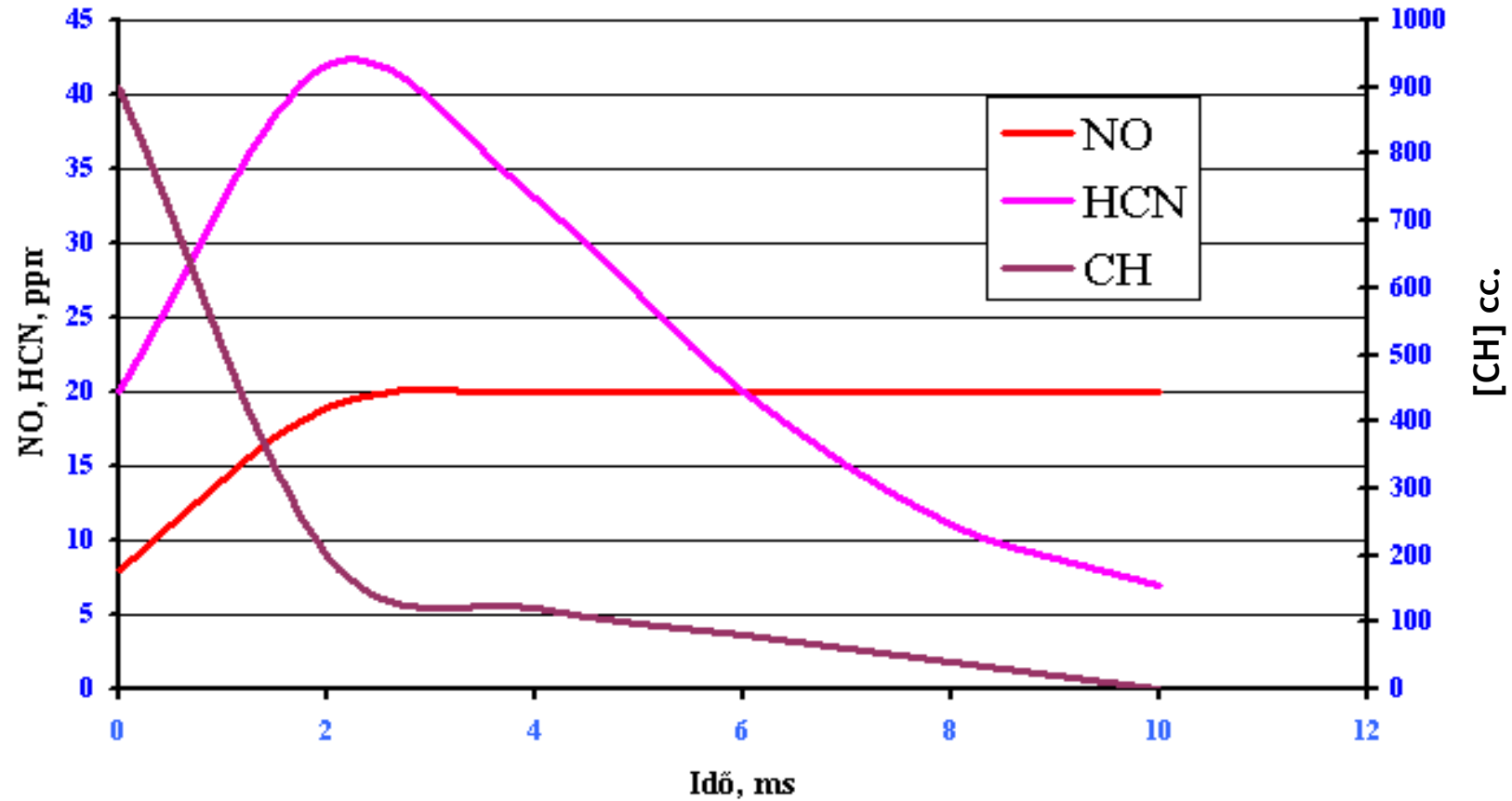
## Prompt NO képződés

- ▶ Fenimore-mechanizmus szerint:



- ▶ Képződési körülmények:
  - ▶ alacsony hőmérsékletű,
  - ▶ tüzelőanyagban gazdag régiókban,
  - ▶ rövid tartózkodási időnél

# Koncentrációk alakulása az időben



# NO képződés mechanizmusai

## Tüzelőanyag NO képződés

### ► Különböző tüzelőanyagok nitrogén-tartalma

Tüzelőanyag	Nitrogéntartalom, %
nyersolaj	0,5-08
könnyű párlat	0,07
tüzelőolaj	0,2-0,4
nehézpárlat	0,7-1,4
szén	0,3-2,0
földgáz	0

# Tüzelőanyag NO képződés mechanizmusai

- ▶ Bomlás vegyületeken és gyökökön keresztül ( $\text{NH}_3$ ,  $[\text{NH}_2]$ ,  $\text{HCN}$ , stb.)



- ▶ Nitrogéngyökön keresztül

- ▶ Befolyásoló tényezők:

- ▶ tüzelőanyag nitrogén-tartalma,
- ▶ oxigén koncentráció (légfelesleg tényező csökkentésével csökkenthető),
- ▶ hőmérséklet és a nitrogén vegyület típusa.

# Termikus NO képződés

- ▶ Előfordulása: magas hőmérsékletű ( $t > 1000$  °C) tüzeléseknél
- ▶ Forrása: levegő nitrogén- és oxigén-tartalma
- ▶ Képződés helye: főként a láng utáni zónában
- ▶ Befolyásol: hőmérséklet- és oxigénkoncentráció
- ▶ Reakciósebesség: lassú
- ▶ Tüzelőanyag: gáz és folyadék tüzelőanyag
- ▶ Csökkentés lehetősége: tüzelési körülmények módosítása (légfelesleg csökkentés)

# Prompt NO képződés

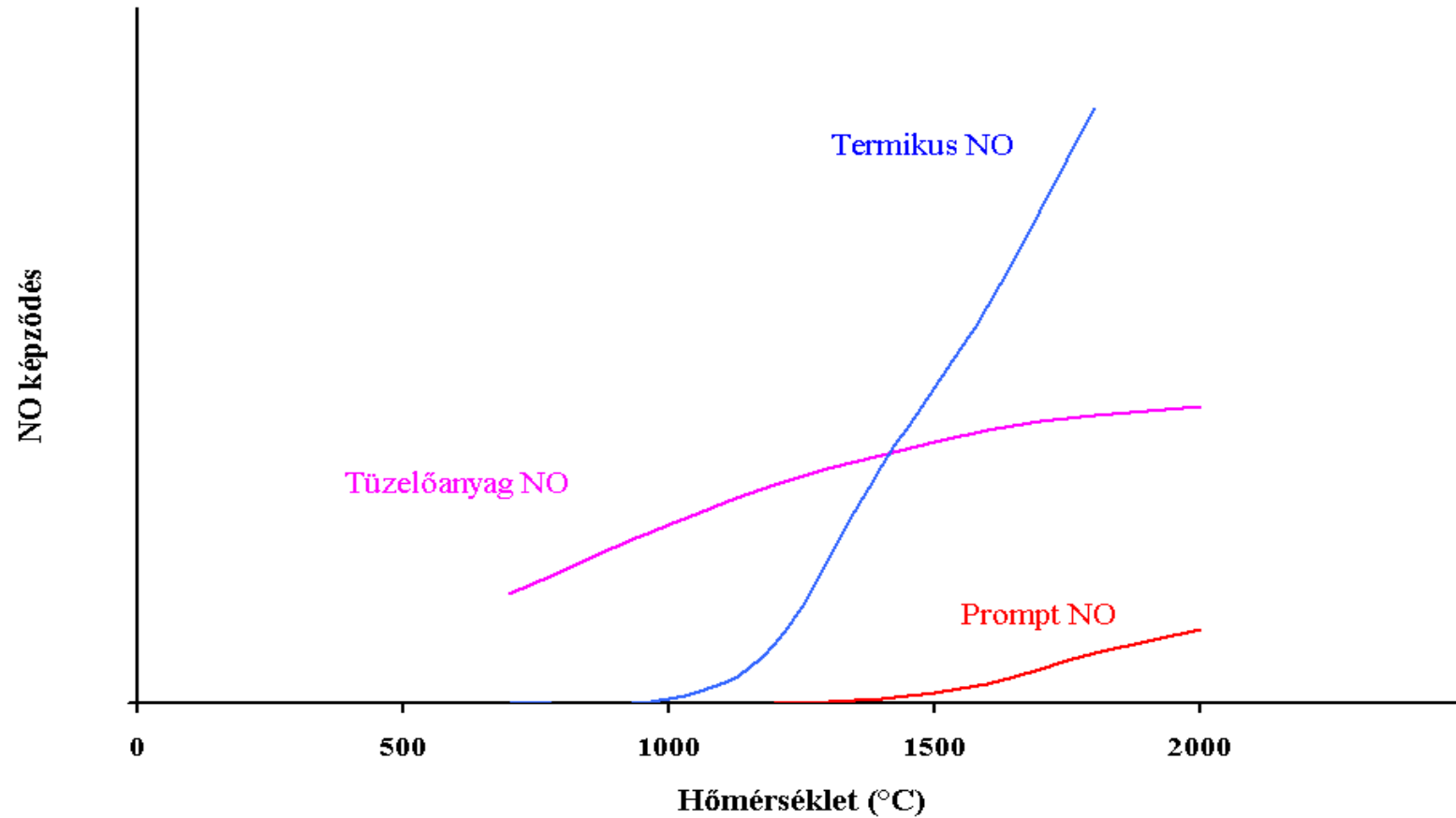
- ▶ Előfordulása: szénhidrogénben dús égetésnél
- ▶ Forrása: levegő nitrogén- és oxigén-tartalma, CH gyökök
- ▶ Képződés helye: lángban
- ▶ Befolyásol: szénhidrogén- és oxigéntartalom
- ▶ Reakciósebesség: gyors
- ▶ Tüzelőanyag: szénhidrogén alapú tüzelőanyag
- ▶ Csökkentés lehetősége: légfelesleg növelése



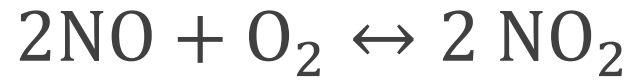
# Tüzelőanyag NO képződés

- ▶ Előfordulása: szén- és olajtüzelésnél
- ▶ Forrása: tüzelőanyag nitrogén és levegő
- ▶ Képződés helye: lángban
- ▶ Befolyásol: tüzelőanyag nitrogén-tartalom,
- ▶ Reakciósebesség: gyors
- ▶ Tüzelőanyag: nitrogéntartalmú tüzelőanyag
- ▶ Csökkentés lehetősége: tüzelési körülmények módosítása (légfelesleg csökkentés)

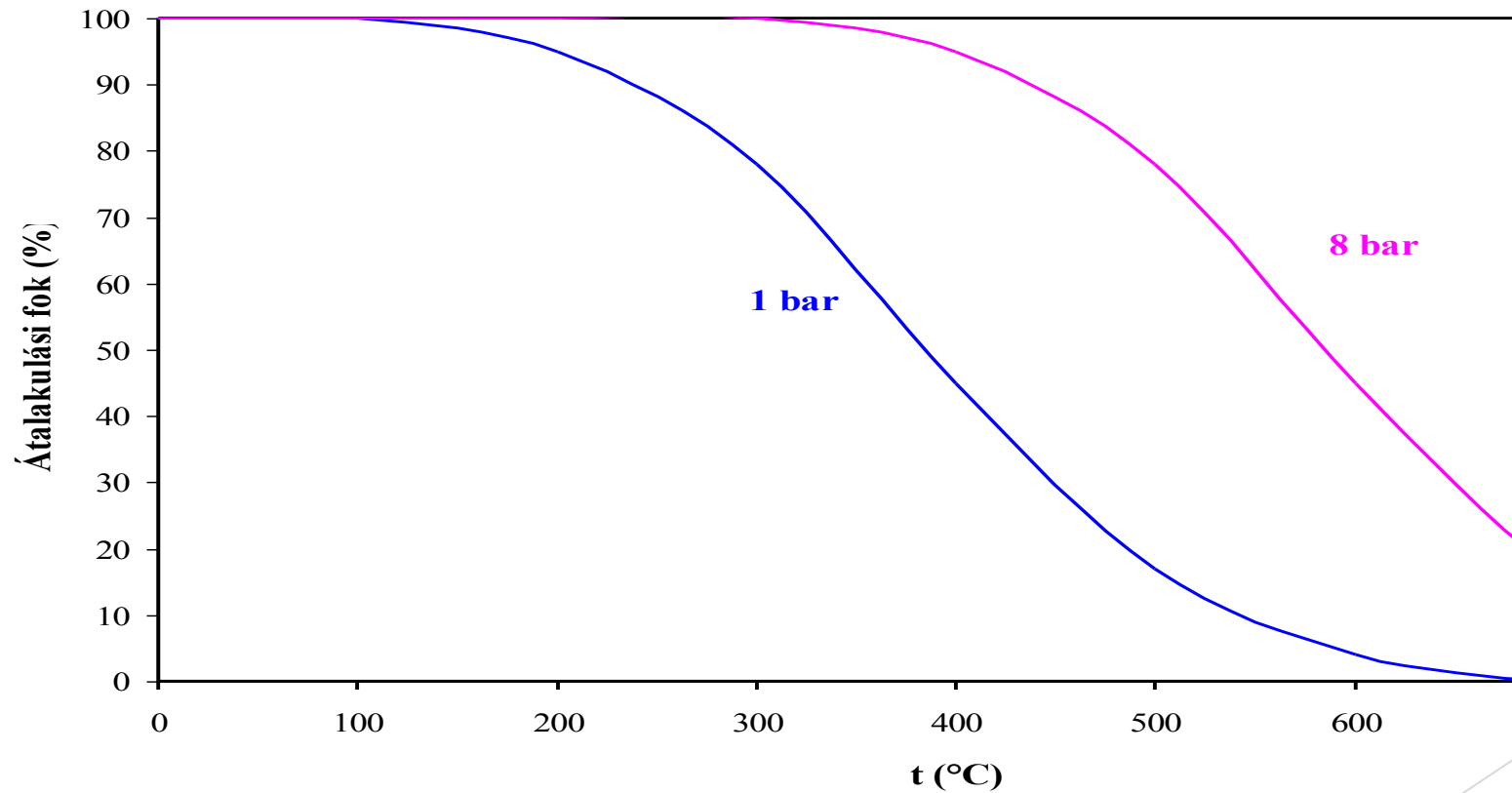
# Hőmérséklet hatása az NO képződési mechanizmusokra



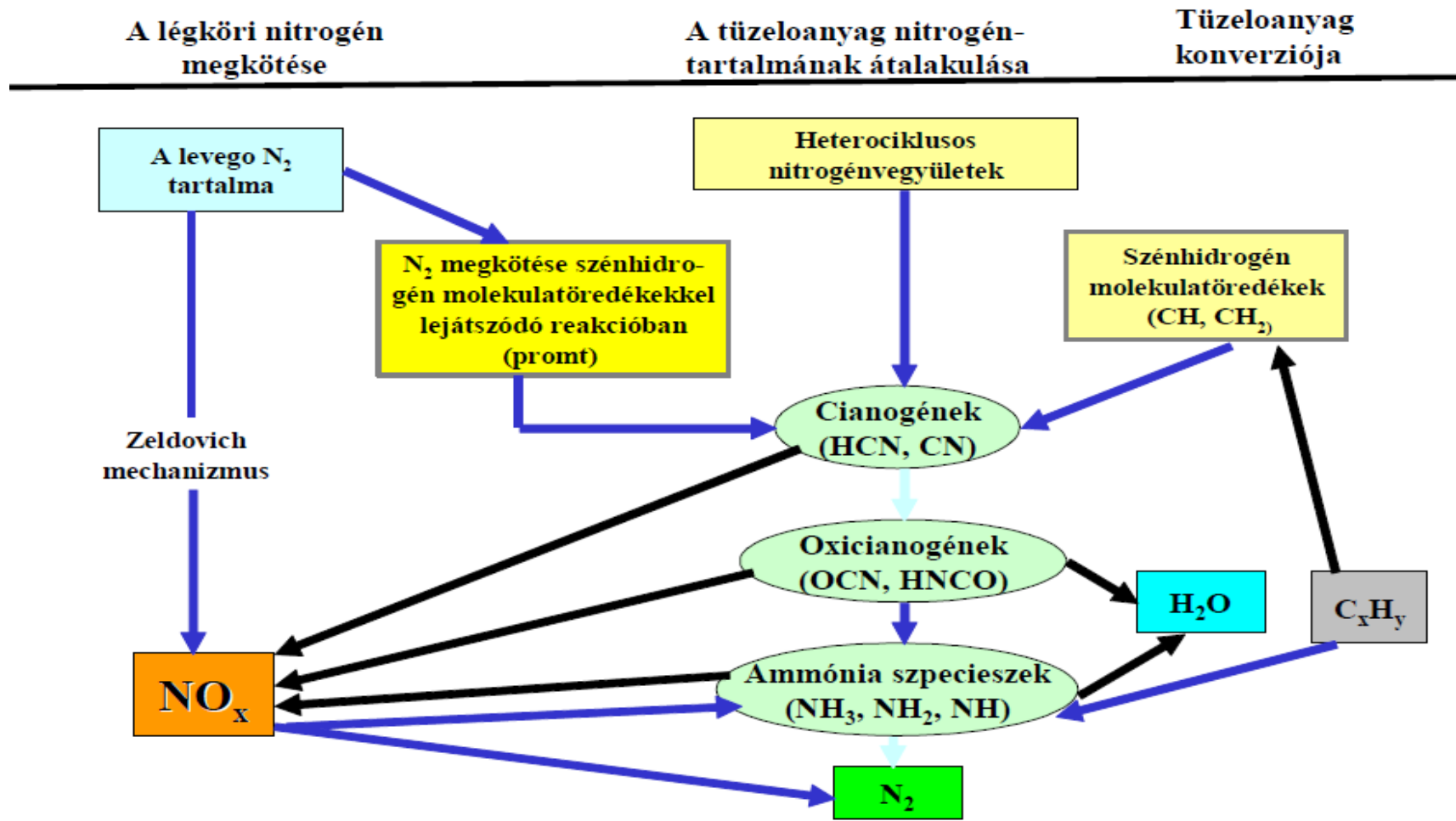
# Az NO => NO<sub>2</sub> átalakulás



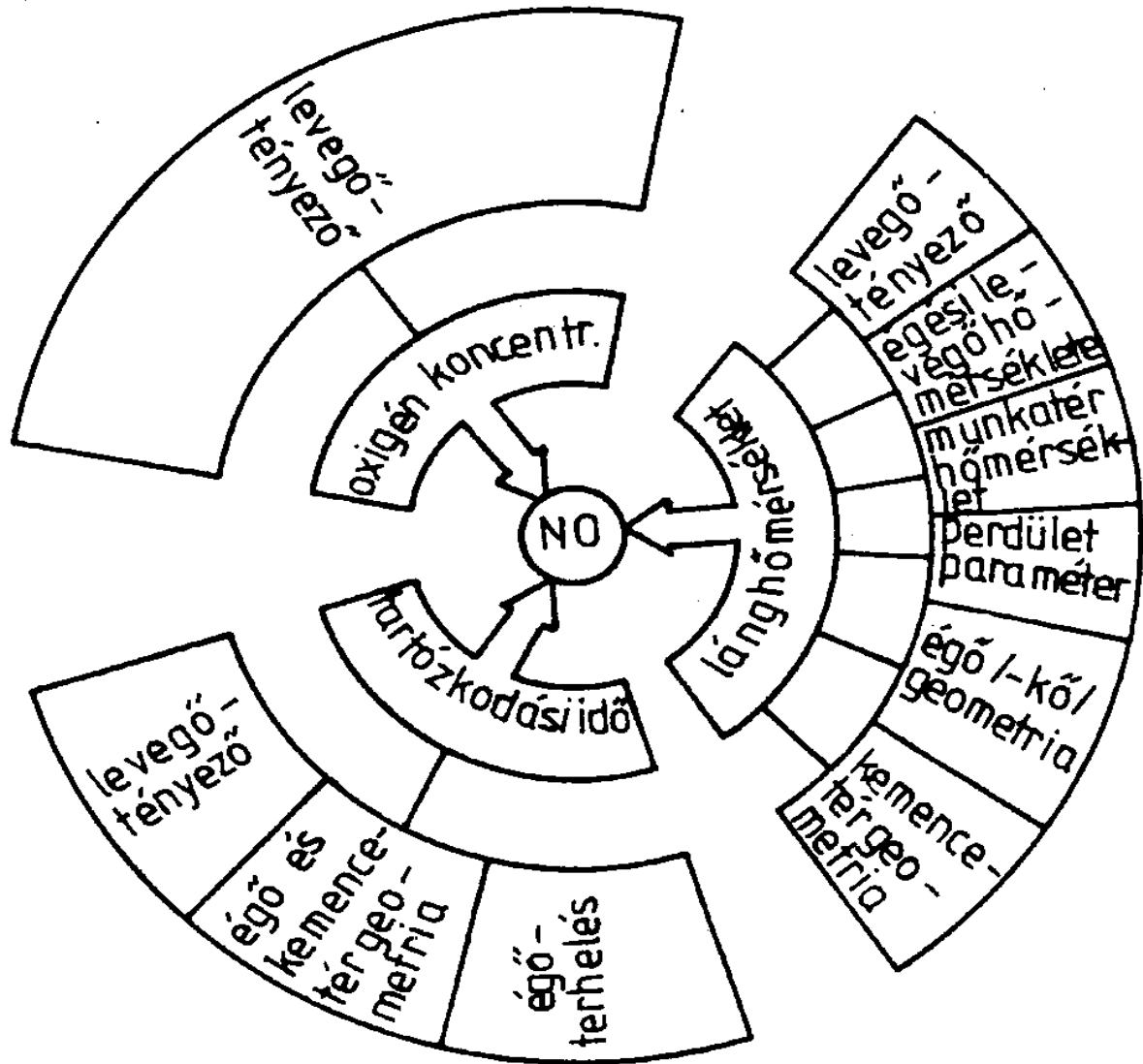
$$\Delta H_r = -56,5 \text{ kJ/mol}$$



# A nitrogén-oxidok képződésének és átalakulásának mechanizmusa lángokban



# NO képződést befolyásoló paraméterek



# NO<sub>x</sub>-tartalom csökkentése

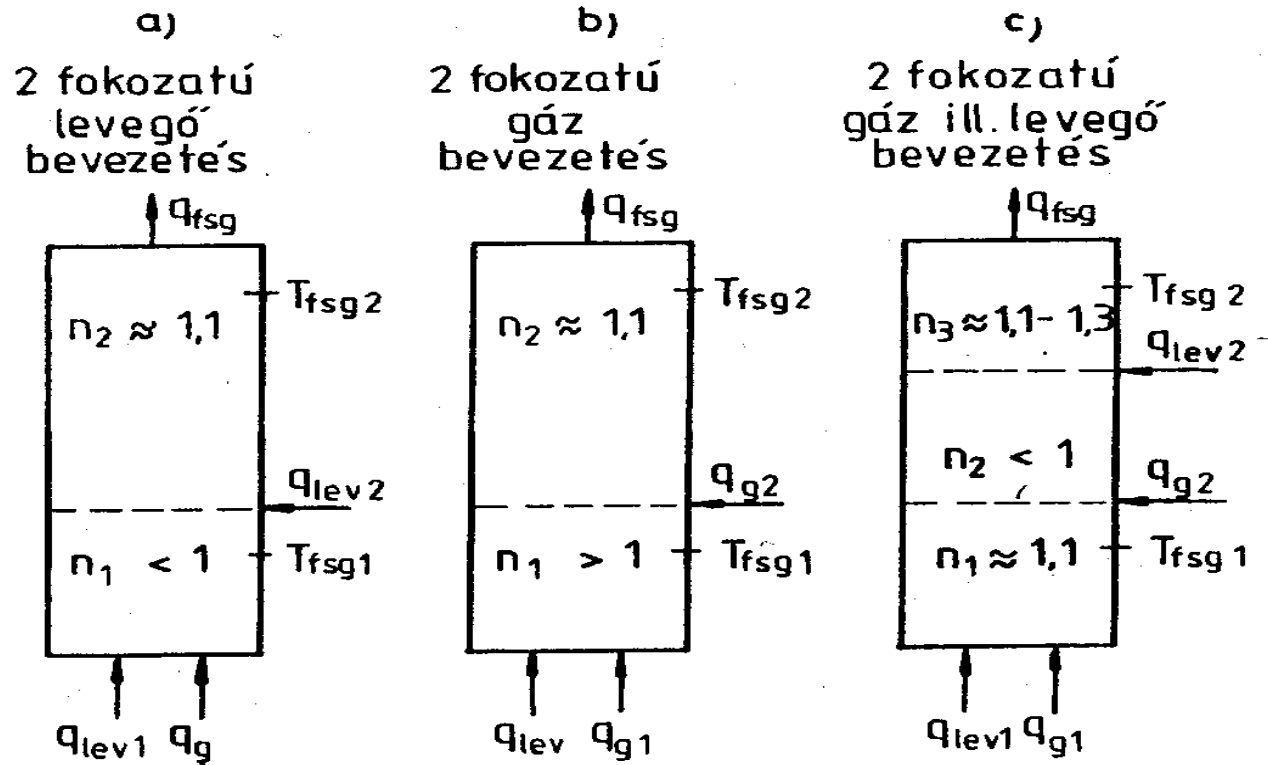
- ▶ Két- vagy többfokozatú tüzelés
  - ▶ égési levegő több fokozatban való bevezetése,
  - ▶ a tüzelőanyag több fokozatban való elégetése
  - ▶ az égési levegő és a tüzelőanyag többfokozatú bevezetése
- ▶ Füstgáz visszavezetése az égetési folyamatba
- ▶ Kombinált eljárások

# A különböző megoldásokkal elérhető NO<sub>x</sub> emisszió-csökkentések

Erőművi kazánoknál elérhető százalékos NO<sub>x</sub>-emissziócsökkentés:

	Sarokégős szénportüzelés	pakura/gudron tüzelés	földgáztüzelés
NO <sub>x</sub> 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%

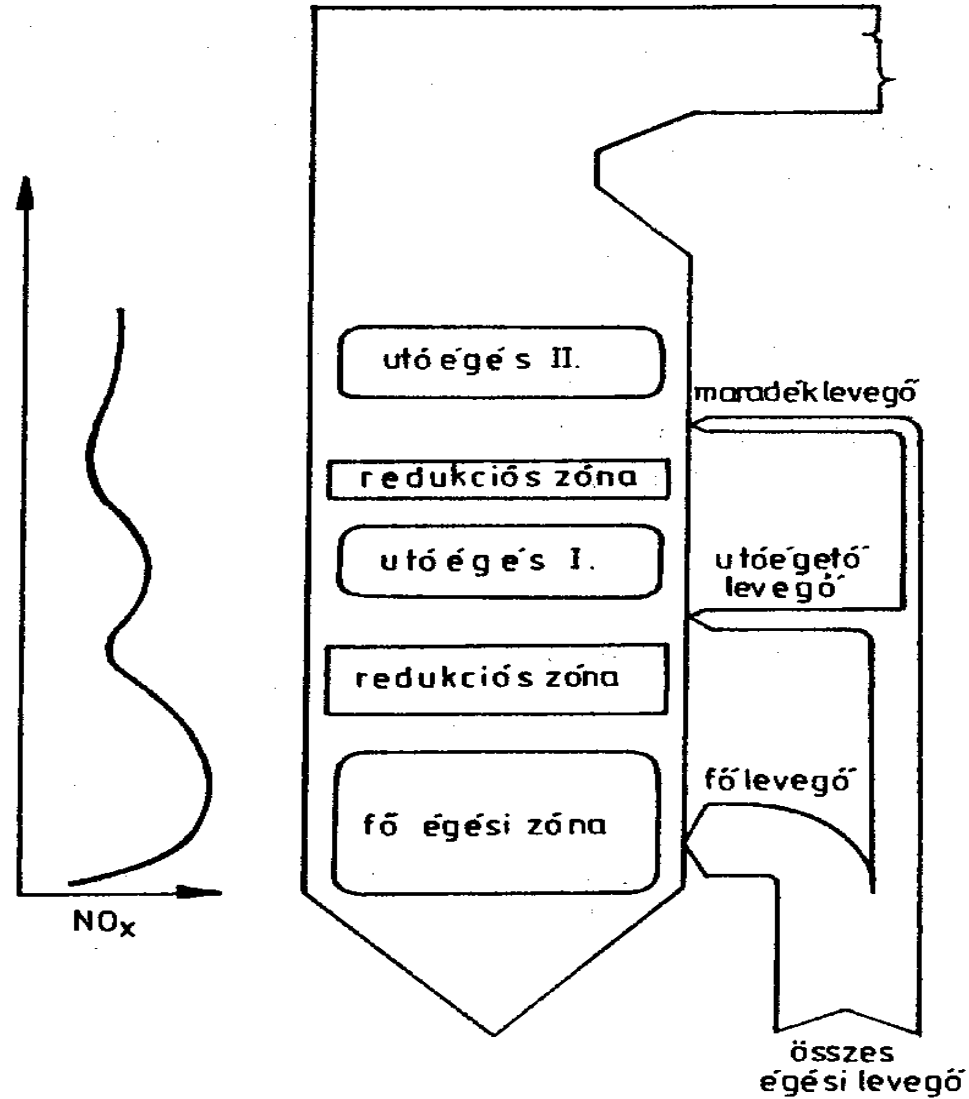
# Többszintű égés



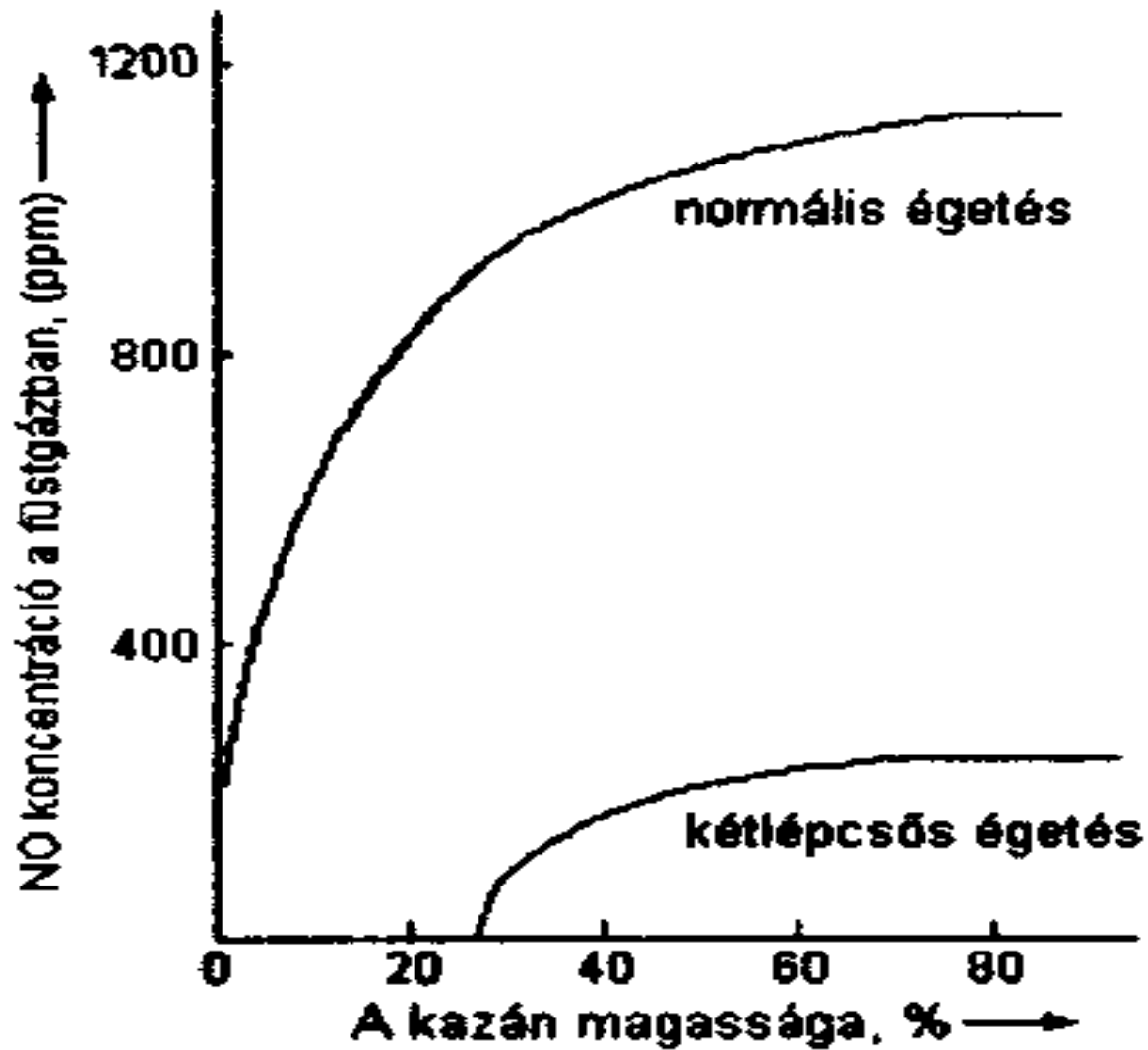
$q_{fsg}, q_{lev}, q_g$  - füstgáz ill. levegő, gáz  
térfogatáramok,  $m^3/h$   
 $n$  - levegőteńyező  
 $T$  - hőmérséklet



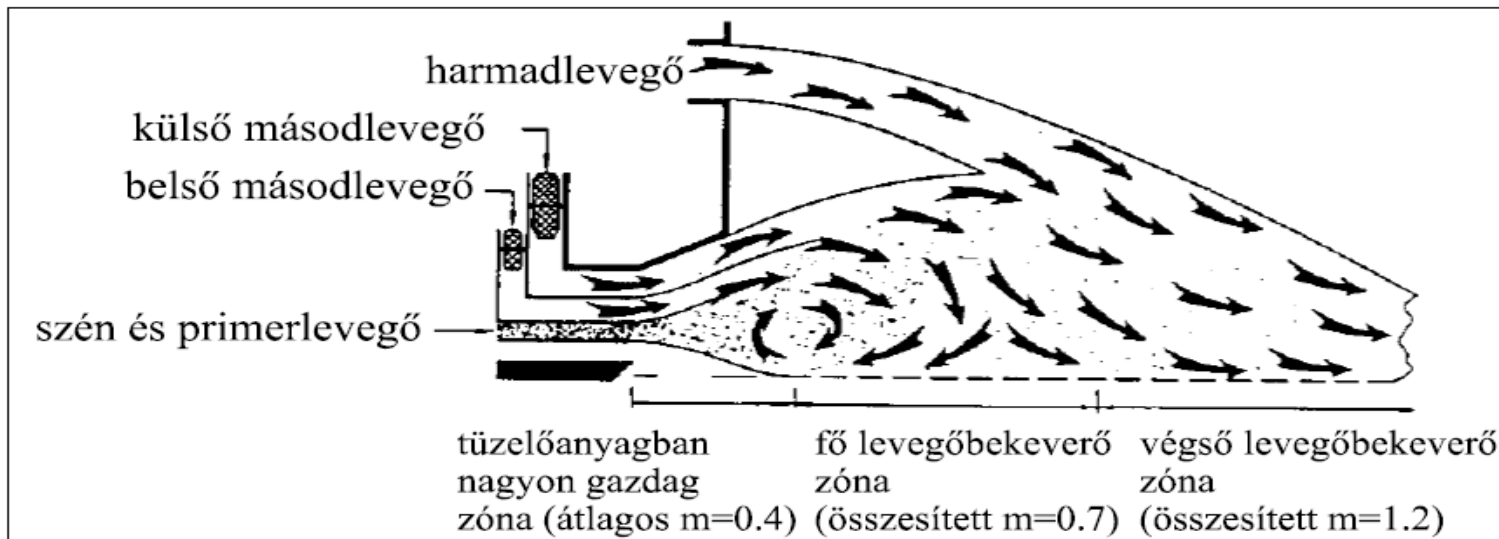
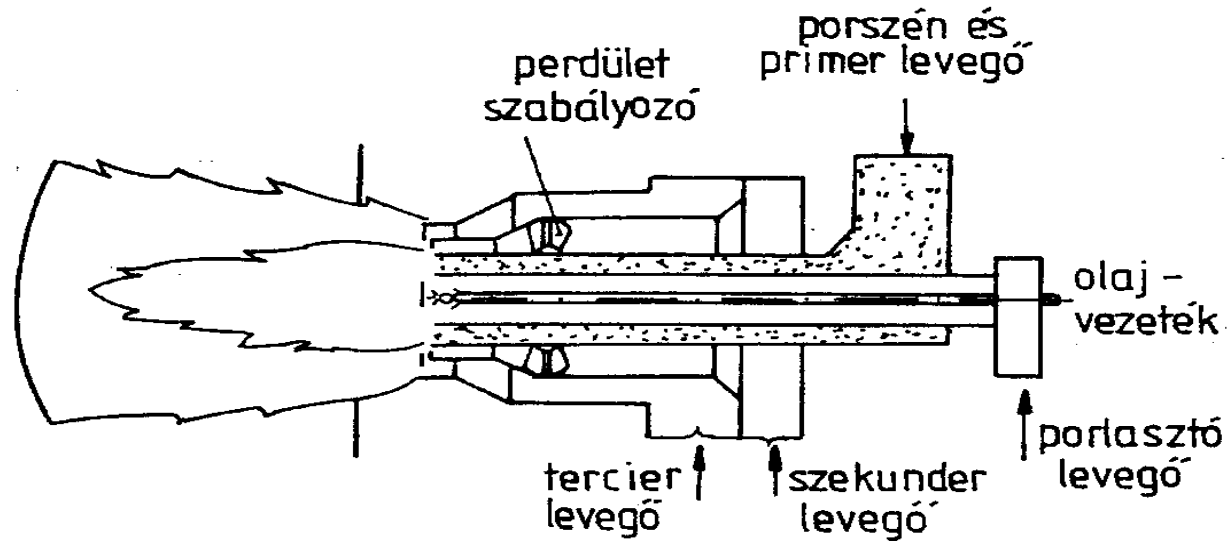
# Tűztéri fokozatos égetés



# NO keletkezése normális és kétfokozatú égetésnél



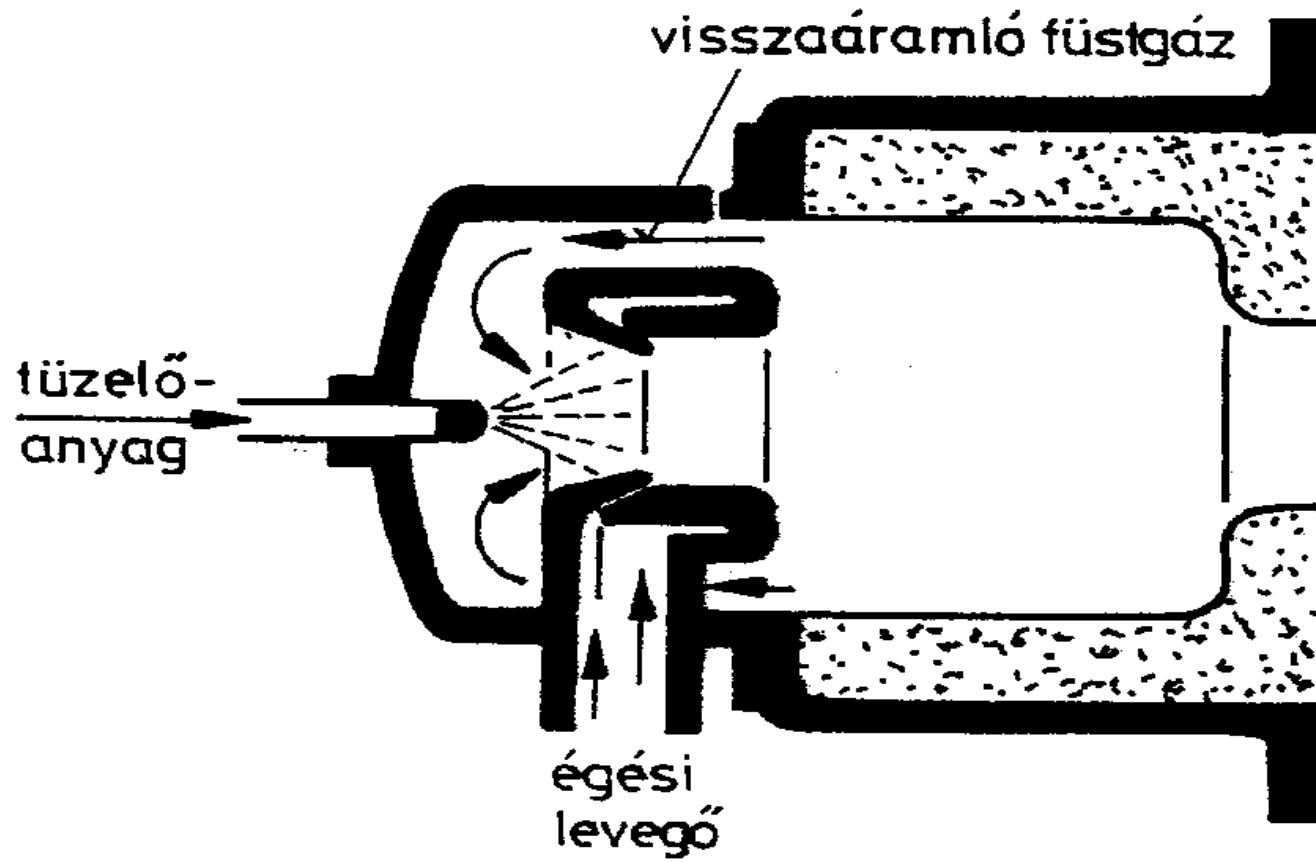
# Égő háromfokozatú levegő-bevezetéssel



# Füstgáz visszavezetése az égési folyamatba

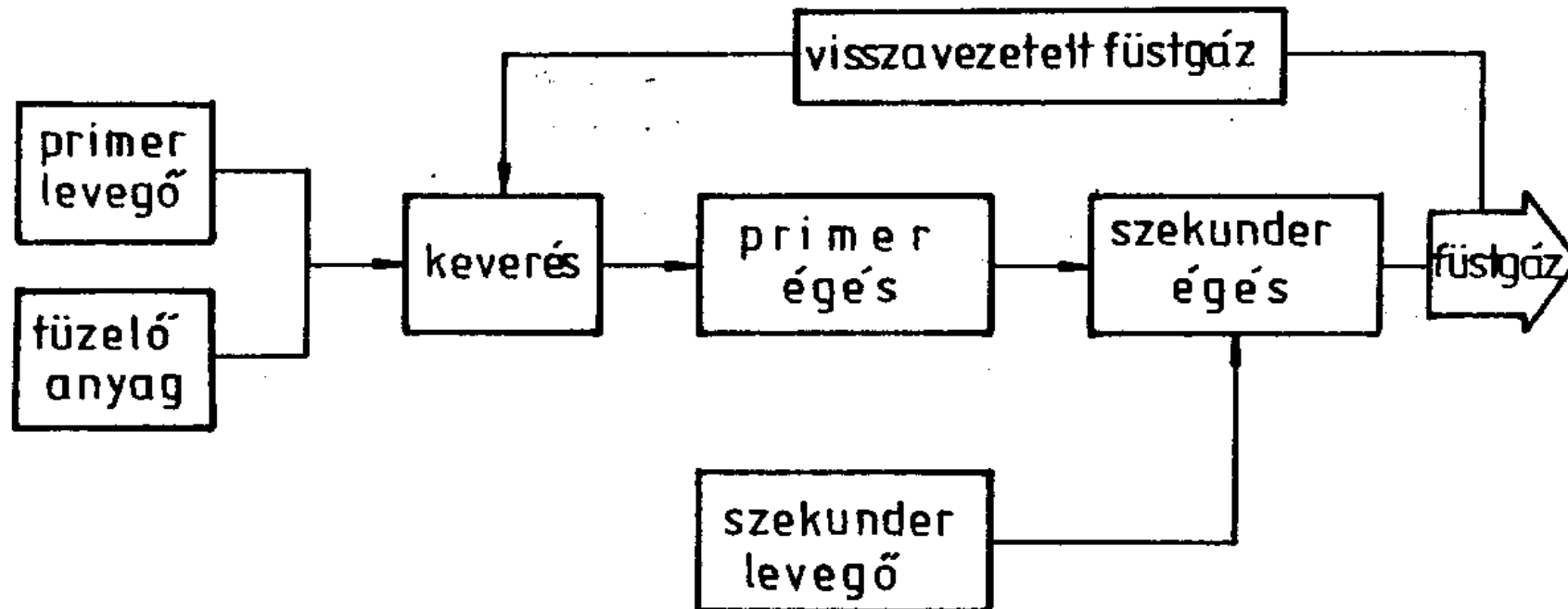
- ▶ Füstgáz fajhője (a víztartalom miatt) > tüzelőanyag-levegő elegyére → tüzelőanyag-levegő elegyhez keverve csökken a lánghőmérséklet
- ▶ Alkalmazás:
  - ▶ Olajtüzelő
  - ▶ Gáztüzelő berendezések
- ▶ Belső visszavezetés
  - ▶ égési levegő keverése a füstgázzal
  - ▶ lángon belüli recirkuláció
- ▶ Külső visszavezetés
- ▶ Visszavezetett mennyiség általában ~10%
- ▶ CO - NO => optimalizálás

# Belső visszavezetés

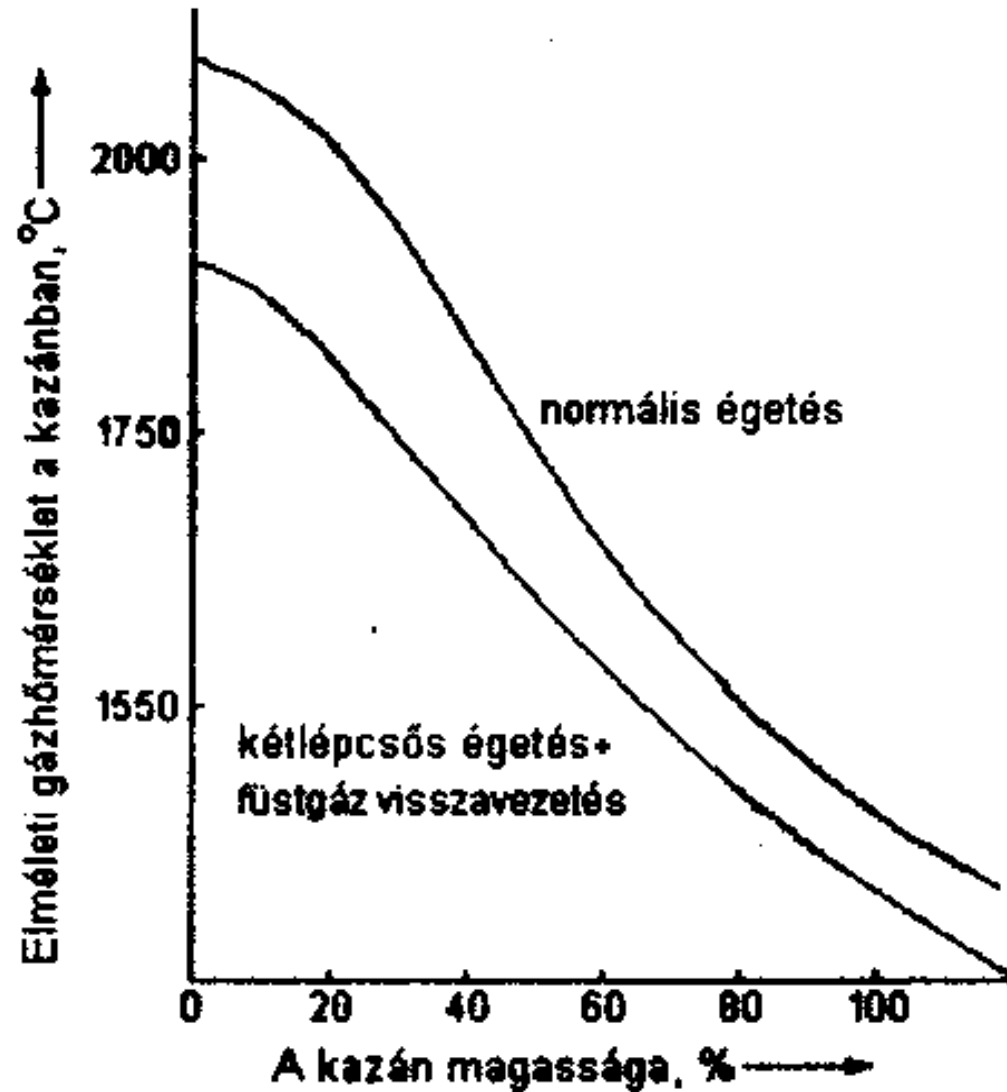


# Kombinált eljárás

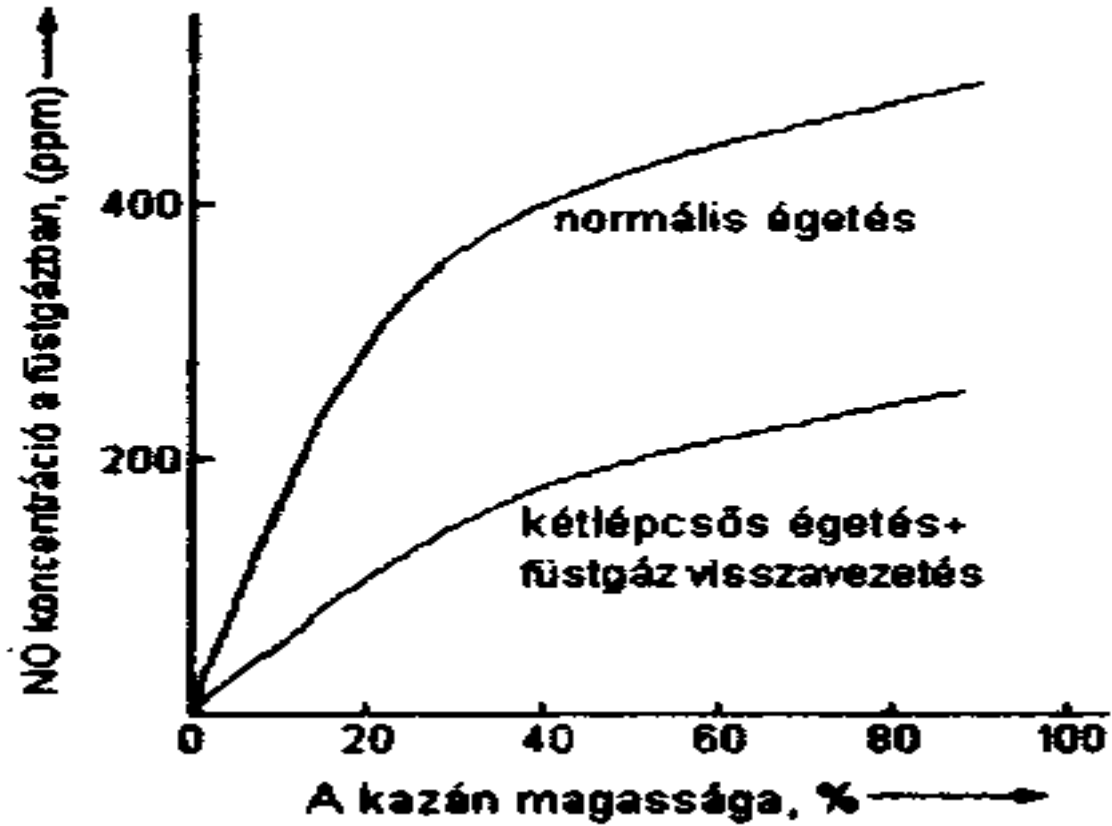
- ▶ Többfokozatú tüzelés és füstgáz-visszavezetés



# Hőmérséklet alakulása a kazánban



# NO képződés





# Aktív eljárások: Alap-, és segédanyagok változtatása

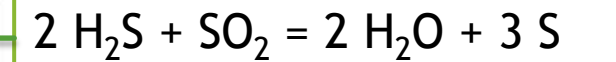
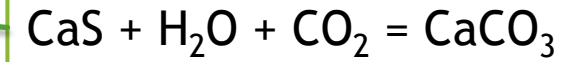
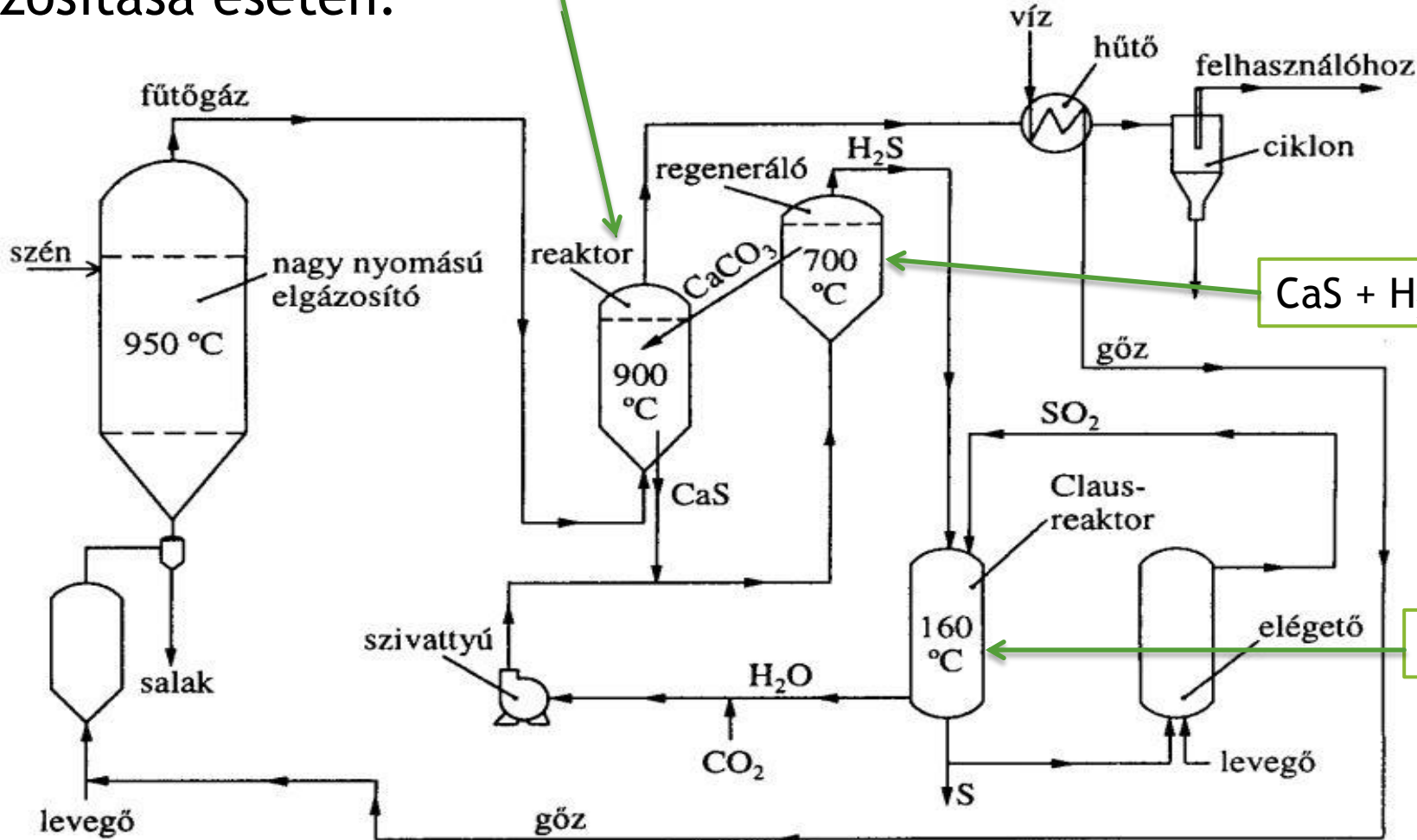
- ▶ Foszforsav-gyártásnál:
  - ▶ a fluorapatit kénsavas feltárásánál nagy mennyiségű HF kerül a levegőbe -> fluorapatit ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ ) helyett **hidroxiapatitot** ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ ) alkalmazva **víz keletkezik** a gyártás során
- ▶ Szerves oldószerek segédanyagként való alkalmazásának kerülése
- ▶ Vizes diszperziós festékeket alkalmazása
- ▶ Zsírtalanításra vizes ultrahangos készülékek alkalmazása

# Aktív eljárások: Alap-, és segédanyagok változtatása

- ▶ Alapanyagok felhasználás előtt történő károsanyag-mentesítése, csökkentése
  - ▶ motorbezzinek előírásai ólom-, kén-, benzol- és egyéb aromásanyag-tartalmat illetően,
  - ▶ a földgáz kén-, és pormentesítése a bányászat helyén
  - ▶ szenek elgázosításával nyert füstgázok felhasználás előtti tisztítása
- ▶ A diffúz források kibocsátása csak aktív módon csökkenthető, a szennyezések utólagos leválasztásával már nem

# Alap-, és segédanyagok változtatása

Kéntelenítés szén  
elgázosítása esetén:



Fűtőgázok nagy hőmérsékletű, fluidágyas kéntelenítése

Passzív (csővégi) módszerek:  
fizikai (porok és gázok leválasztása),  
kémiai és biológiai eljárások.

Véggáz-tisztítási példák, füstgáztisztítás,  
közlekedési emissziók csökkentése.

# Levegőszennyezés elleni védekezés kompromisszuma



Kellő anyagi ráfordítással  
teljesen megszüntethető  
lenne a  
környezetszennyezés



A gazdasági lehetőségek  
azonban végesek



# Levegőszennyezés elleni védekezés lehetőségei

- ▶ Energiahordozók struktúrájának megváltoztatása,
- ▶ A tüzelőanyagok vagy a füstgázok kéntelenítése,
- ▶ Porleválasztás,
- ▶ Zárt technológiák alkalmazása,
- ▶ Gáztisztítás,
- ▶ Az üzemek áttelepítése,
- ▶ A gépkocsik emisszió-szabályozása, stb.

# Levegőszennyezés elleni védekezés

- ▶ Tisztításra olcsó és hatékony megoldást kell találni
- ▶ A tisztítás mértékét előírások határozzák meg, nem gazdaságossági megfontolások!
- ▶ A tisztítási hatásfok növelésével a költségek exponenciálisan nőnek
- ▶ Az elválasztott komponensekkel a továbbiakban mi történik?

# A tisztítási eljárások lehetőségei

- ▶ A szennyező anyagok ártalmatlan anyagokká alakítása (végleges).
- ▶ A szennyező anyagok hasznosítható alakban történő visszanyerése és visszavezetése a technológiába.
- ▶ A tisztítás során a szennyező komponensek csak **dúsulnak**, és a keletkező szennyvíz, szilárd hulladék, iszap, elhasznált adszorbens vagy mosófolyadék **további elhelyezéséről gondoskodni kell**.





# A tisztítási eljárások módja

## ▶ Száraz üzemű berendezések:

- ▶ a szennyezők különböző fizikai tulajdonságai és fizikai módszerek alapján történik a leválasztás
- ▶ Ha a szennyező anyag értékes, a száraz leválasztás után újra hasznosítható.
- ▶ A száraz eljárás feltétele, hogy a levegőből gőzök ne kondenzálódjanak.

## ▶ Nedves eljárások

- ▶ gázok és porok együttesen is eltávolíthatóak
- ▶ gáz magas hőmérséklete sem korlátozó tényező
- ▶ nagyobb energiaigény, korrózióveszély, keletkező mosófolyadékot tovább kell kezelni

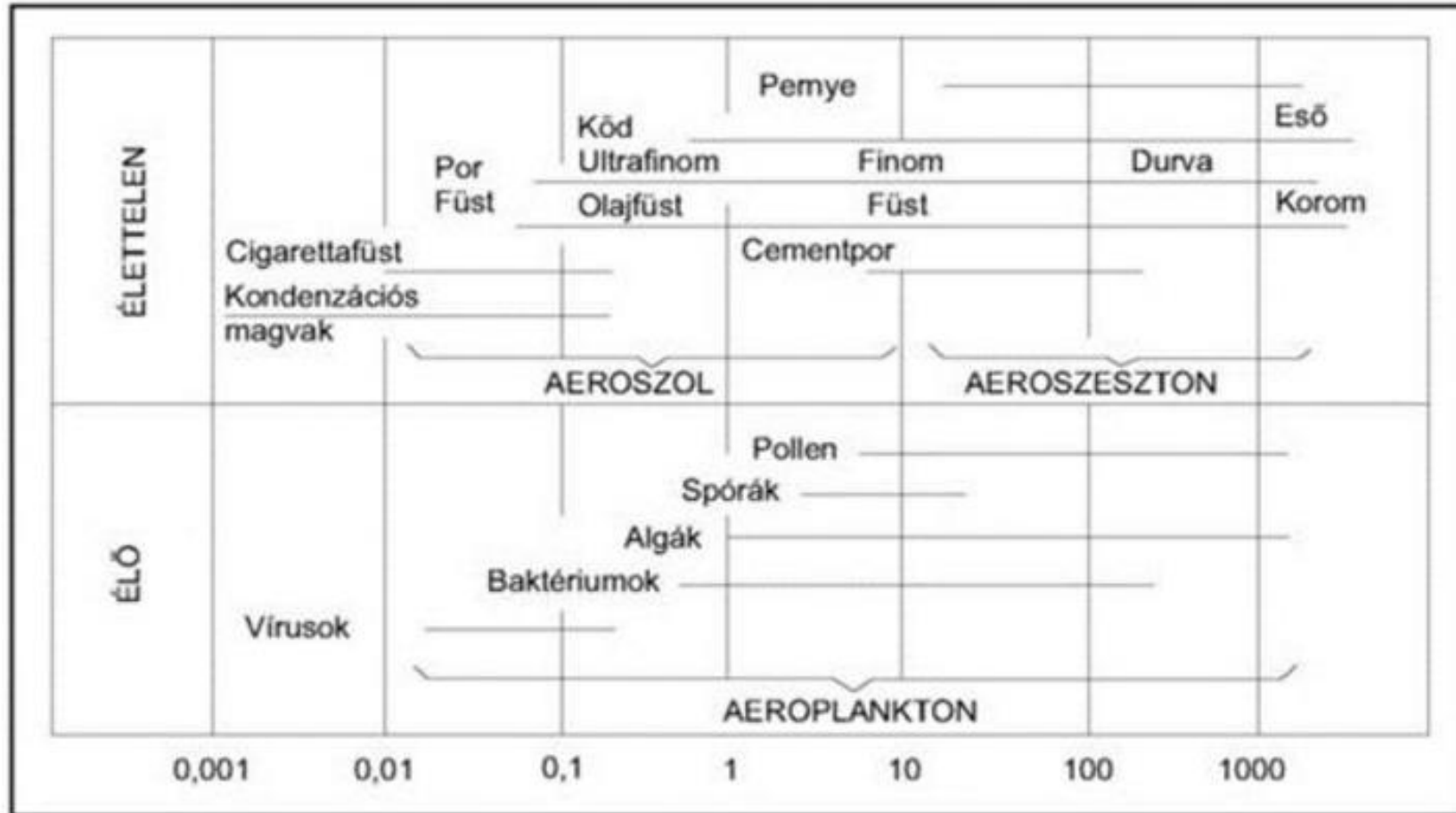
# Szennyező anyagok leválasztási eljárásai levegőből

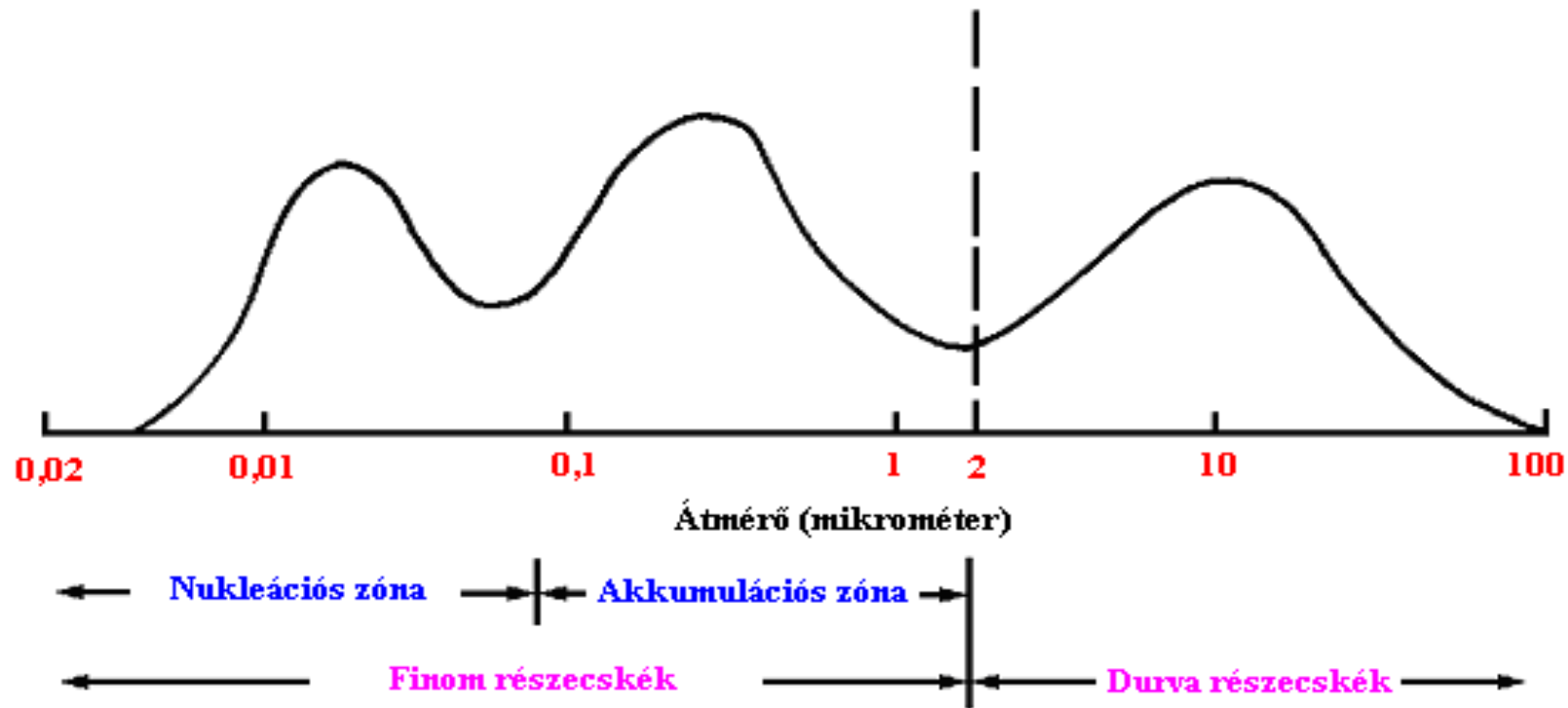
Szilárd szennyezők	
Száraz leválasztás	Nedves leválasztás
tömegerőn alapuló leválasztás	leválasztó mozgó alkatrész nélkül
szűrőhatáson alapuló leválasztás	leválasztó mozgó alkatrésszel
elektrosztatikus leválasztás	nedves elektrosztatikus leválasztás
Gáz halmazállapotú szennyezők	
Szennyező anyag leválasztása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

# Szilárd anyagok leválasztása

- ▶ Por: olyan tetszőleges alakú és összetételű szilárd halmazállapotú részecskékből és gázból álló heterogén diszperz rendszer, amelyben a részecskék mérete széles határok között változik, de legnagyobb vetületi méretük 2000  $\mu\text{m}$ -nél kisebb.
- ▶ Forrásuk:
  - ▶ természetes (talaj és kőzetek mállása, erdőtüzek, vulkánkitörések, stb.)
  - ▶ mesterséges (törés, aprítás, kopás, csiszolás, stb.)

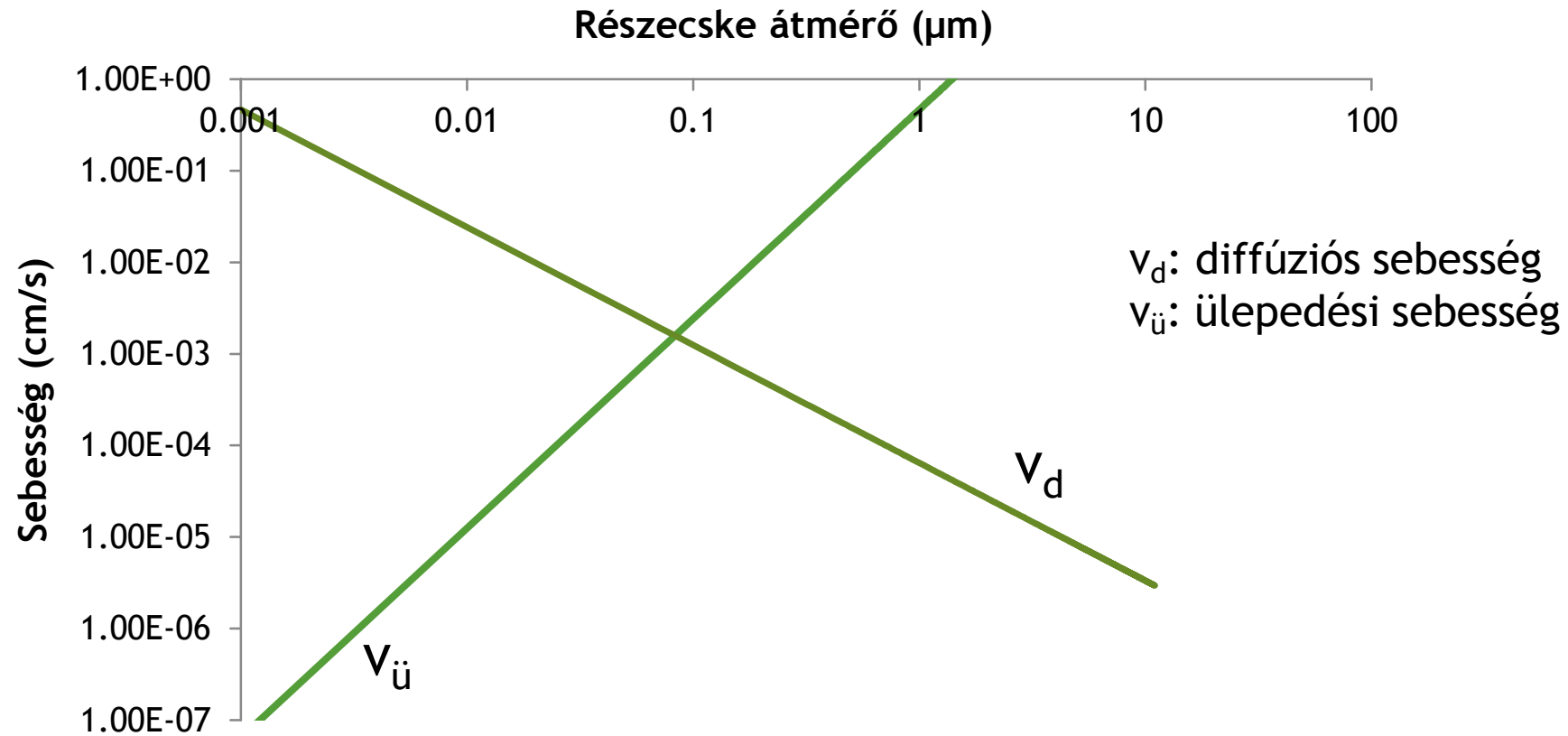
# Az atmoszférában található részecskék mérete





- A 2  $\mu\text{m}$ -nél kisebb részecskék a finom részecskék
- nukleációs és akkumulációs zóna
- gőzök kondenzációjával vagy gázok szilárd részecskéket eredményező kémiai reakciójával keletkeznek
- kondenzációs aeroszolok
- levegőből nem ülepednek ki

# Ülepedési és diffúziós sebesség



# Szilárd anyagok leválasztása

## ▶ Alakjuk szerint:

- ▶ **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.),
- ▶ szálak, **fibrilláris** részecskék: ezek egy irányban erősen megnyúltak (szálak, pálcikák, tűk, stb.).

# Szilárd anyagok leválasztása

- ▶ összefüggésekben az egyszerűbb kezelhetőség érdekében gömbátmérőt alkalmaznak
- ▶ tökéletesen gömb alakú részecskék a legritkább esetben fordulnak elő =>
- ▶ Egyenértékű gömbátmérő:
  - ▶ szitálás szerinti ekvivalens átmérő ( $d_{sz} = \sqrt{d_1 \cdot d_2}$ )
    - ▶  $d_1$  az adott nyílású szitán áteső,
    - ▶  $d_2$  az adott nyílású szitán fennmaradó részecske átmérője
  - ▶ térfogat szerinti egyenértékű átmérő ( $d_v$ )
  - ▶ terület szerinti egyenértékű átmérő ( $d_A$ )
  - ▶ ülepedés szerinti ekvivalens átmérő ( $d_e$ )
  - ▶ formafaktor ( $\varphi=f/F$ )



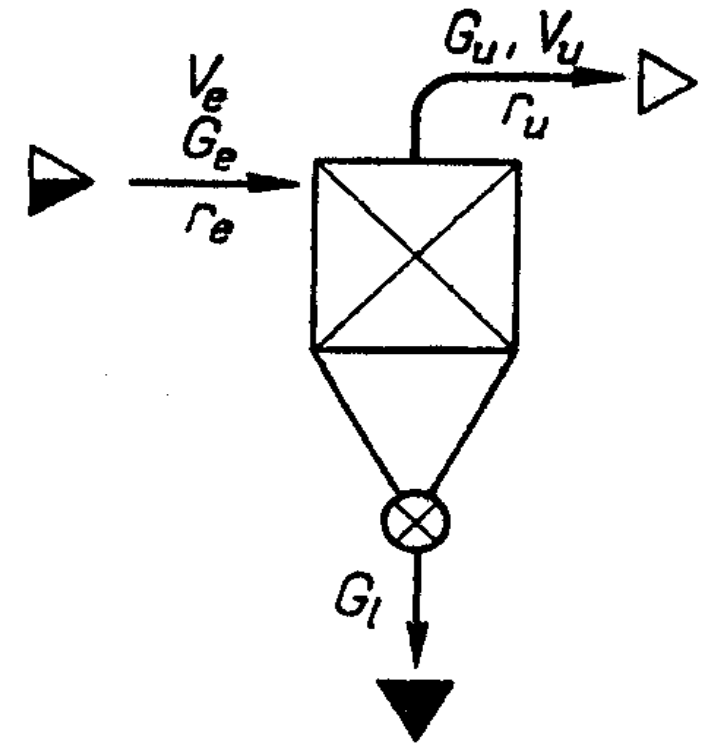
# Porleválasztók

A porleválasztás illetve a porleválasztó jellemzése:

- ▶ Összportalanítási fok ( $\varepsilon_{\ddot{o}}$ ):

$$\varepsilon_{\ddot{o}} = \frac{G_e - G_u}{G_e} \cdot 100 = \frac{G_l}{G_e} \cdot 100 = \frac{G_l}{G_l + G_u} \cdot 100$$

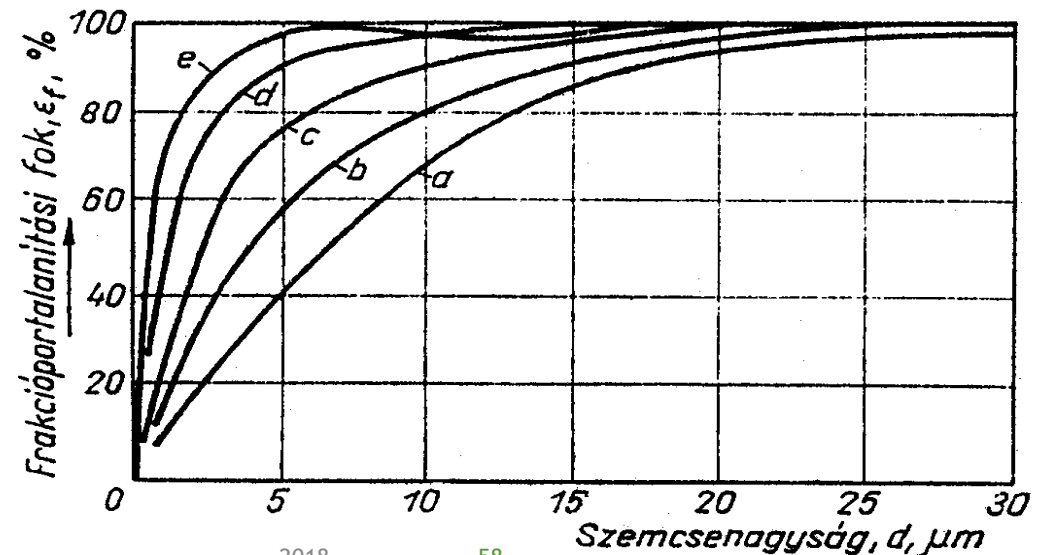
- ▶  $G_e$ : por tömegárama a belépő gázban [kg/h]
- ▶  $G_u$ : por tömegárama a porleválasztó után [kg/h]
- ▶  $G_l$ : a porleválasztó által leválasztott por tömegárama [kg/h]

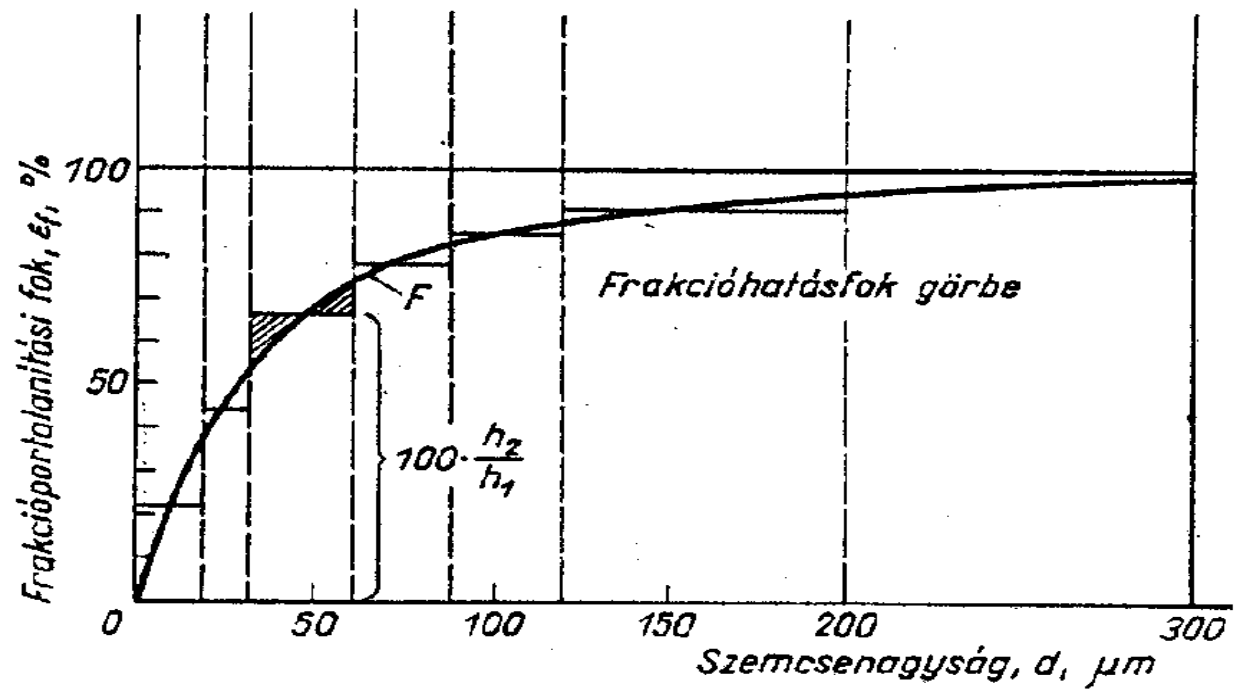
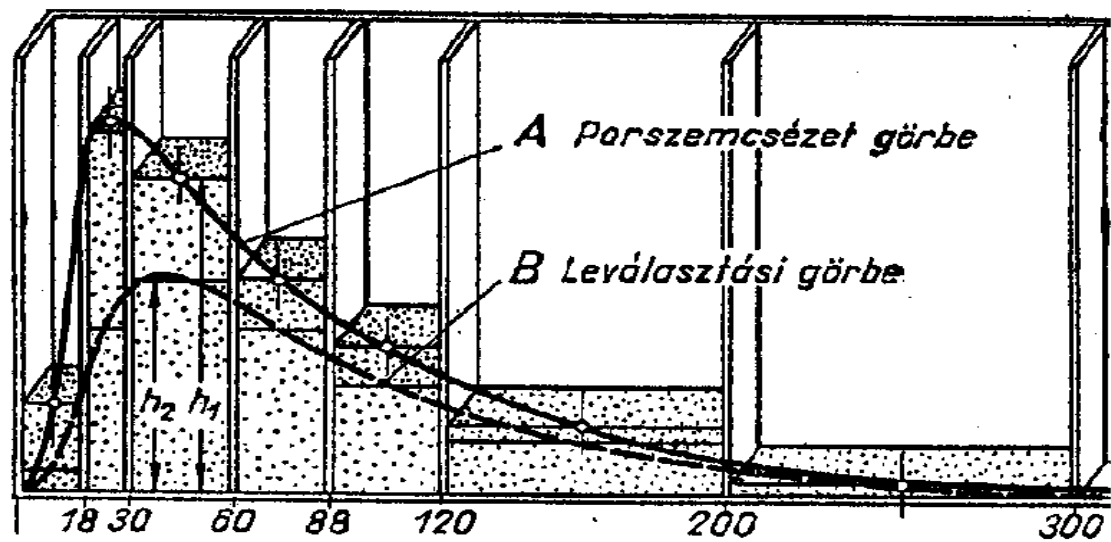


# Porleválasztók

A porleválasztás illetve a porleválasztó jellemzése:

- ▶ Fokozat, vagy frakcióportalanítási fok ( $\epsilon_f$ ) :
  - ▶ a porleválasztó a szennyezőanyag (por) egyes frakcióit milyen összportalanítási fokkal (hatásfokkal) választja le.
  - ▶ minőségi jellemző, mert értéke a por szemcsézettől független
- ▶ „a” jelű görbe porkamra,
- ▶ „b”, „c”, „d” jelű görbék centrifugális leválasztó,
- ▶ „e” jelű görbe az elektrofilter



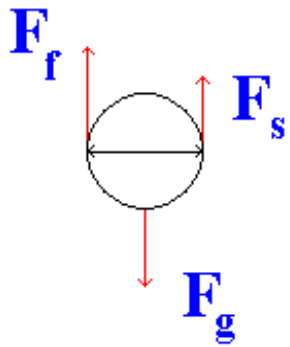


# Nehézségi erő elvén működő porleválóasztás

- ▶ Porrészecske mozgása nehézségi erőterben

$$F_g = mg = \rho_p V_p g = \rho_p \frac{d^3 \pi}{6} g \quad F_f = \rho_f V_p g = \rho_f \frac{d^3 \pi}{6} g$$

$$F_s = 3v_{\ddot{u}} \eta d \pi \quad v_{\ddot{u}} = \frac{d^2 g (\rho_p - \rho_f)}{18 \eta}$$



$v_{\ddot{u}}$  - ülepedési sebesség, m/s,

$d$  - a szemcse átmérője, m,

$\rho_{p,f}$  - a szemcse, illetve a vivőgáz sűrűsége, kg/m<sup>3</sup>,

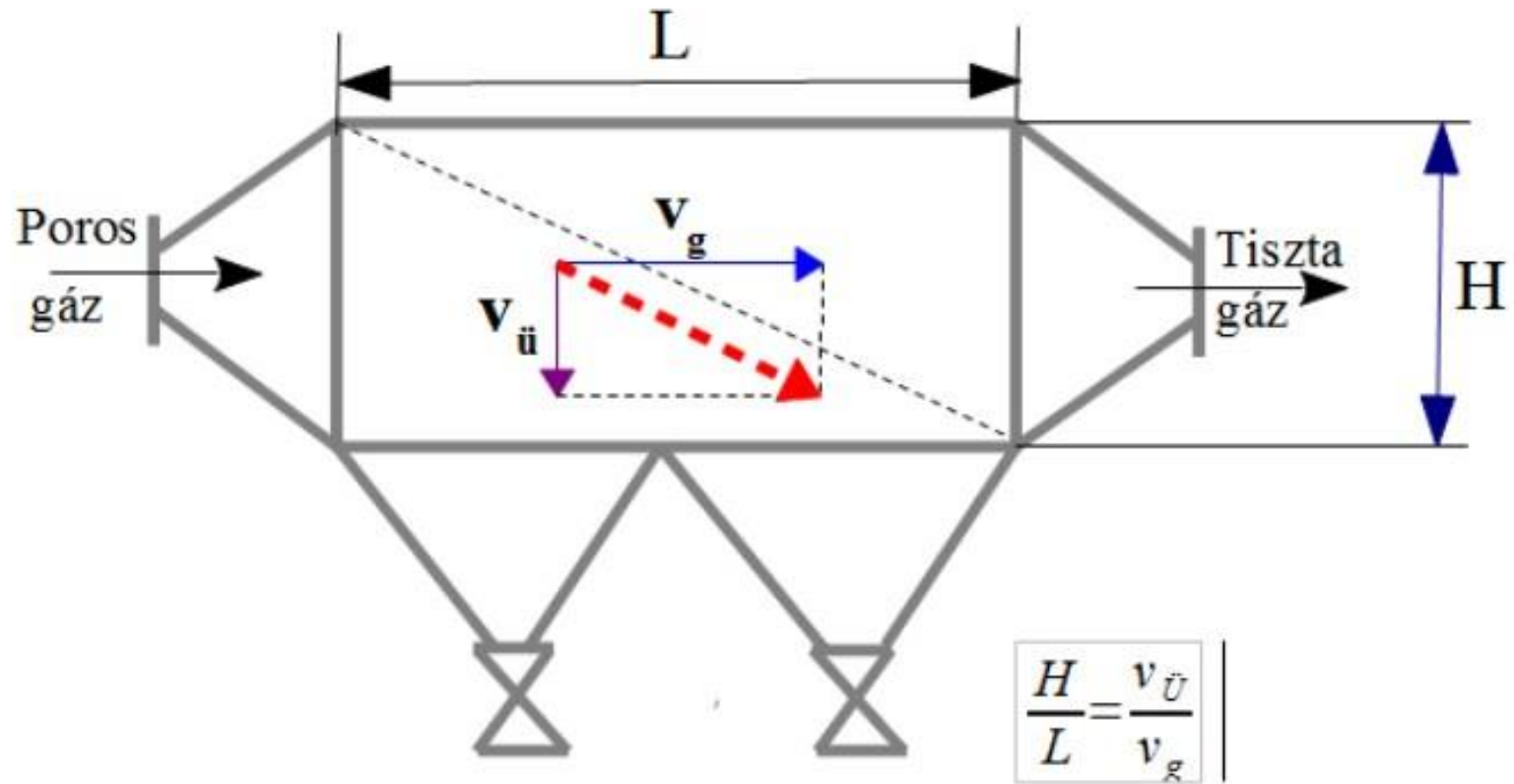
$g$  - a nehézségi gyorsulás, m/s<sup>2</sup>,

$\eta$  - a dinamikus viszkozitás kg m<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>.

# Stokes-törvény érvényessége

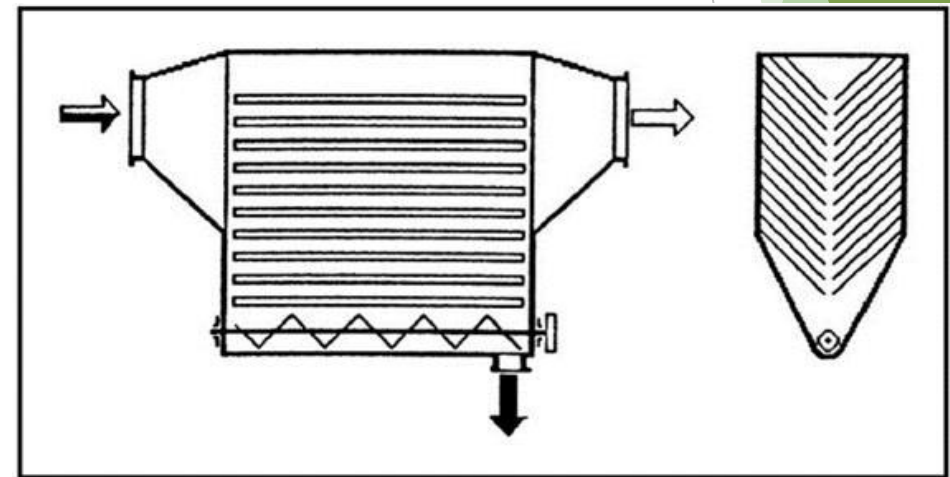
- ▶ **Porkoncentráció**
- ▶ **Agglomeráció**
  - ▶ van der Waals erők,
  - ▶ kapilláris kondenzáció,
  - ▶ elektrosztatikus kölcsönhatás
- ▶ **Részecskeméret**
  - ▶ 10  $\mu\text{m}$ -nél nagyobb átmérőjű szemcsék választhatók le,
  - ▶ 50  $\mu\text{m}$ -nél nagyobb átmérőjű szemcsék leválasztásában **hatékony**

# Ülepítő kamra



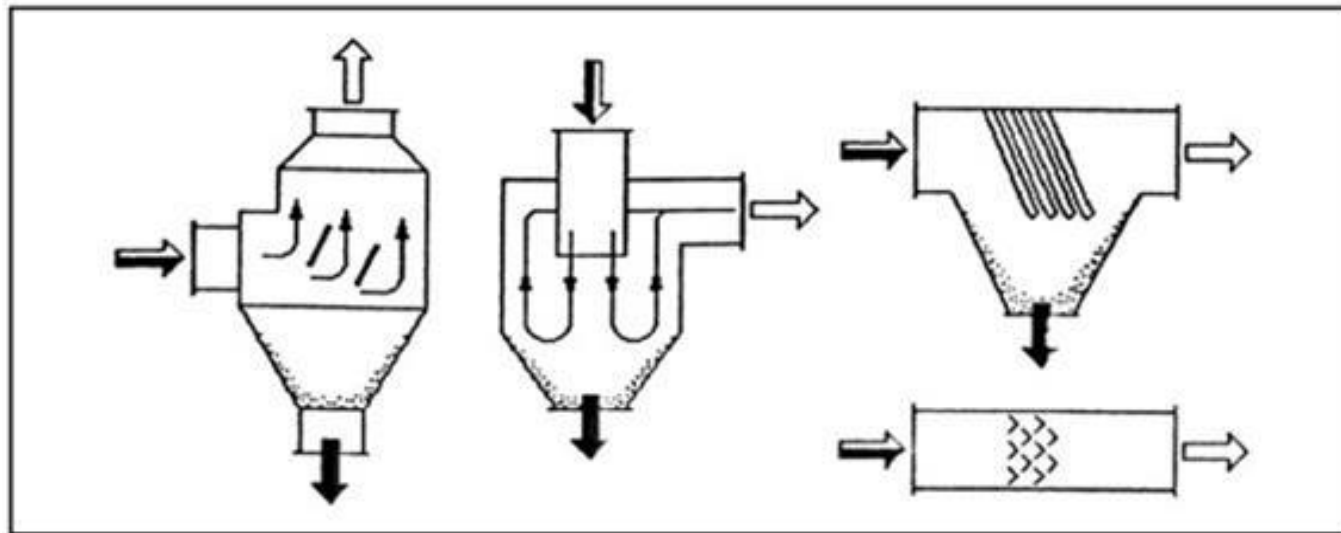
# Ülepítő kamra

- ▶ gázsebesség:
  - ▶ maximálisan 3 m/s de a gyakorlatban 1 m/s körül
  - ▶ kiülepedett port ne ragadja ismételten magával
- ▶ leülepedő szemcsék mérete a az ülepedési magasság/kamrahossz viszonytól függ: minél kisebb, annál jobb frakcionálás
  - ▶ => hányados csökkentésére az áramlás irányával párhuzamos betétlapok
  - ▶ 30-60  $\mu\text{m}$ -es szemcsék leválasztására
  - ▶ egyszerű szerkezet, a kis beruházási és karbantartási költség,
  - ▶ az áramlással szembeni csekély ellenállás,
  - ▶ a hőmérséklettel és a korrózióval kapcsolatban csak a szerkezeti anyagok szabnak határt



# Ülepítő kamra

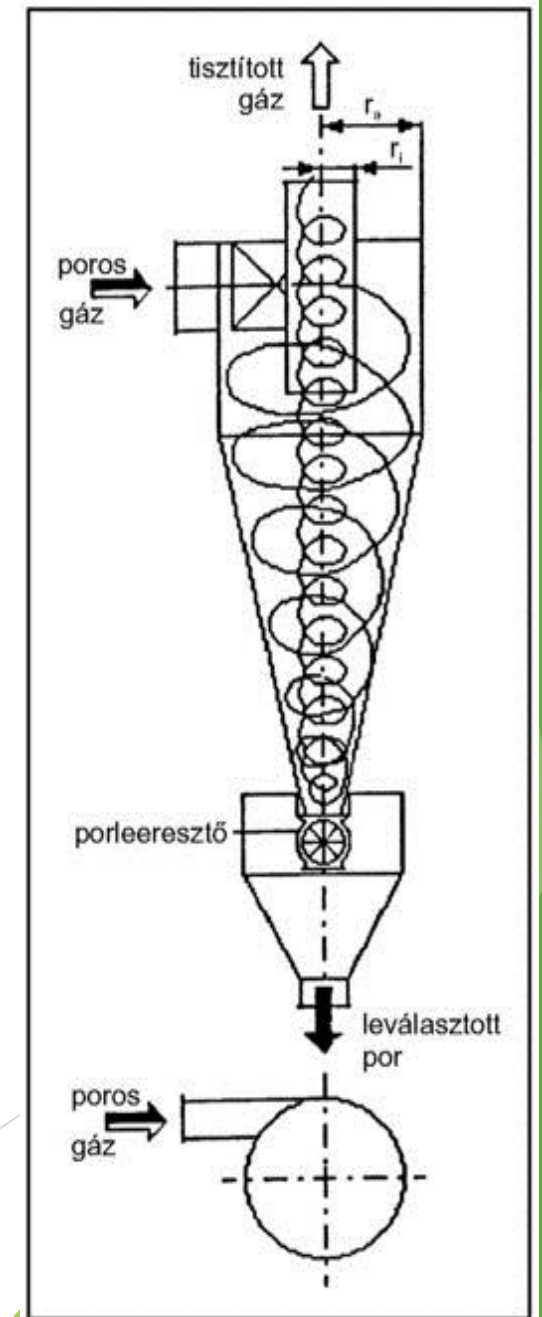
- ▶ Irányváltás => a szemcsék nagyobb tehetetlenségük miatt igyekeznek megtartani eredeti irányukat, a terelőlapoknak ütközve kiválnak a gázáramból





# Centrifugális erőhatására végbemenő porleválasztás

- ▶ szennyezett gáz nagy sebességű tangenciális bevezetése
- ▶ spirál alakú, lefelé áramló örvények
- ▶ nehézségi erőn kívül sugár irányú centrifugális erő is hat
- ▶ részecskék a ciklon falának ütköznek, és a nehézségi erő hatására a ciklon alsó, kúpos részébe, majd innen a porgyűjtő kamrába esnek



# Centrifugális erőhatására végbemenő porlevélasztás

Centrifugális erő:

$$F_c = m_p \frac{v_t^2}{R}$$

ahol:

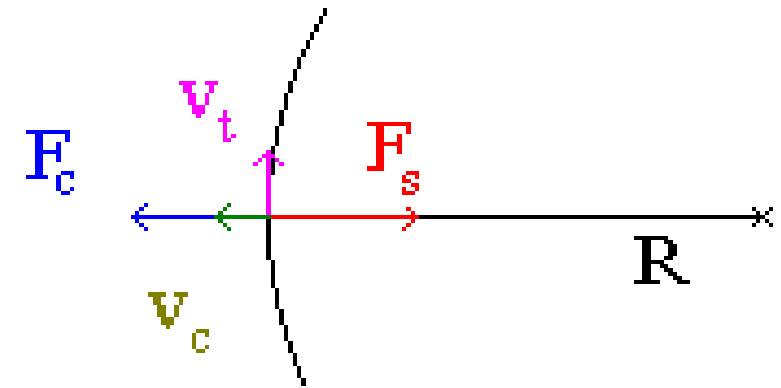
- ▶  $m_p$  - a részecske tömege (kg),
- ▶  $v_t$  - a részecske tangenciális sebessége (m/s),
- ▶  $R$  - a ciklon sugara (m).

Közegellenállás:

ahol:

$$F_s = 3d_p v_c \pi \eta$$

- ▶  $v_c$  - a részecske vándorlási sebessége (m/s),
- ▶  $\eta$  - a közeg dinamikai viszkozitása (Pas)
- ▶  $\rho_{p,g}$  - a szemcse illetve a vivőgáz sűrűsége (kg/m<sup>3</sup>),
- ▶  $d$  - a szemcse átmérője (m)



vándorlási sebesség:

$$v_c = \frac{d^2 v_t^2 (\rho_p - \rho_g)}{18R\eta}$$

# Ciklon típusok

## ▶ Egyszerű ciklonok:

- ▶ adott mennyiségű szennyezett gáz tisztítására egyetlen készülék elegendő legyen

## ▶ Multiciklonok:

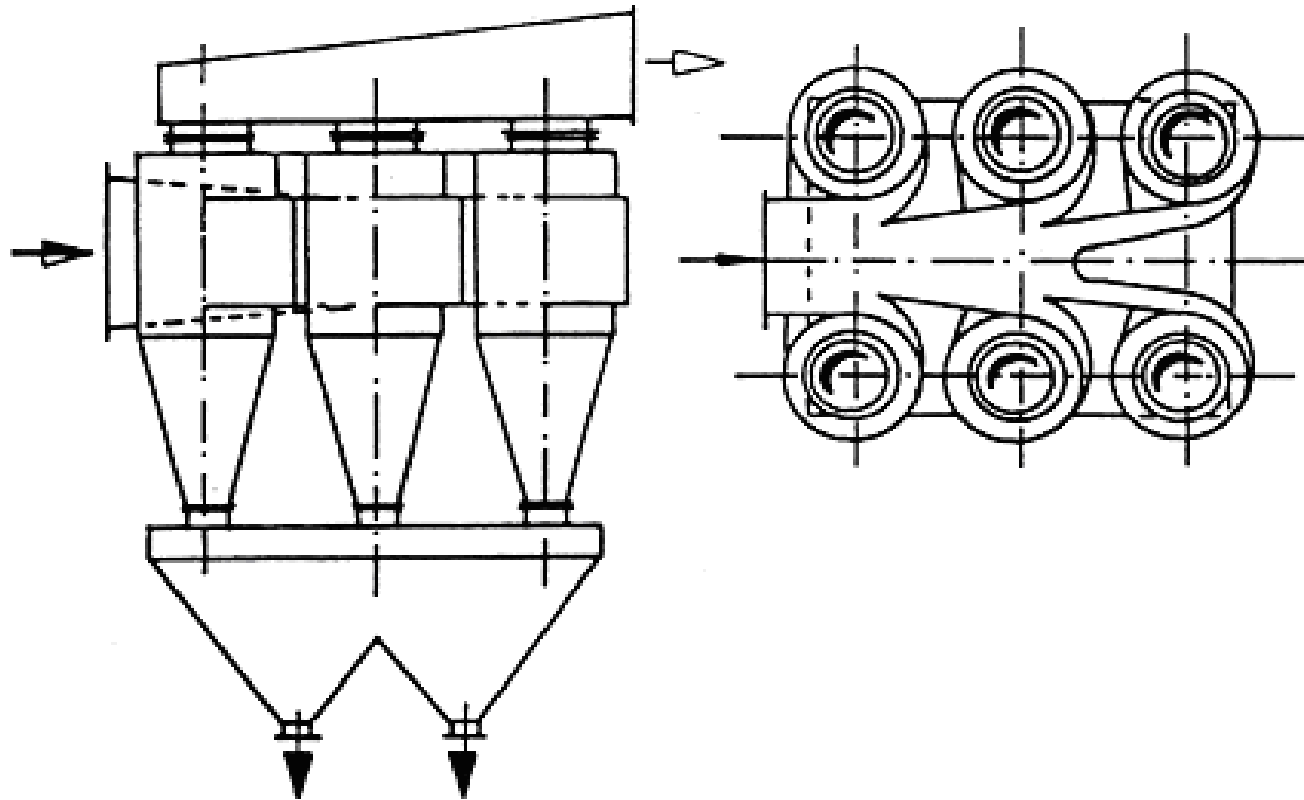
- ▶ több kisméretű ciklon párhuzamosan kapcsolva, hogy a teljes gázmennyiség tisztítható legyen

## ▶ Örvénycsövek:

- ▶ kis átmérő
- ▶ perdületes áramlást perdítő elemekkel, irányelaterelő lapokkal
- ▶ a kívánt gázmennyiség tisztítására több örvénycsövet alkalmaznak, amelyeket csoportokban helyeznek el

# Centrifugális erőhatására végbemenő porlevélasztás

- ▶ Multiciklon, örvénycső



# Centrifugális erőhatására végbemenő porleválasztás

## Előnyök:

- ▶ különösebb gondozást nem igényelnek,
- ▶ üzemeltetési költségük jelentéktelen
- ▶ Széles hőmérséklettartományban alkalmazhatók
- ▶ egyszerű ciklonok : az 50  $\mu\text{m}$ -es szemcséket választják le jól
- ▶ multiciklonok 10  $\mu\text{m}$ -es,
- ▶ örvénycsövek pedig 5-10  $\mu\text{m}$ -es szemcsék leválasztására is alkalmasak

## Hátrányok:

- ▶ gázárammal szembeni nagy ellenállás,
- ▶ nagy sebességű porrészecskék igen erőteljes koptató hatása

# Szűréssel történő porlevélasztás

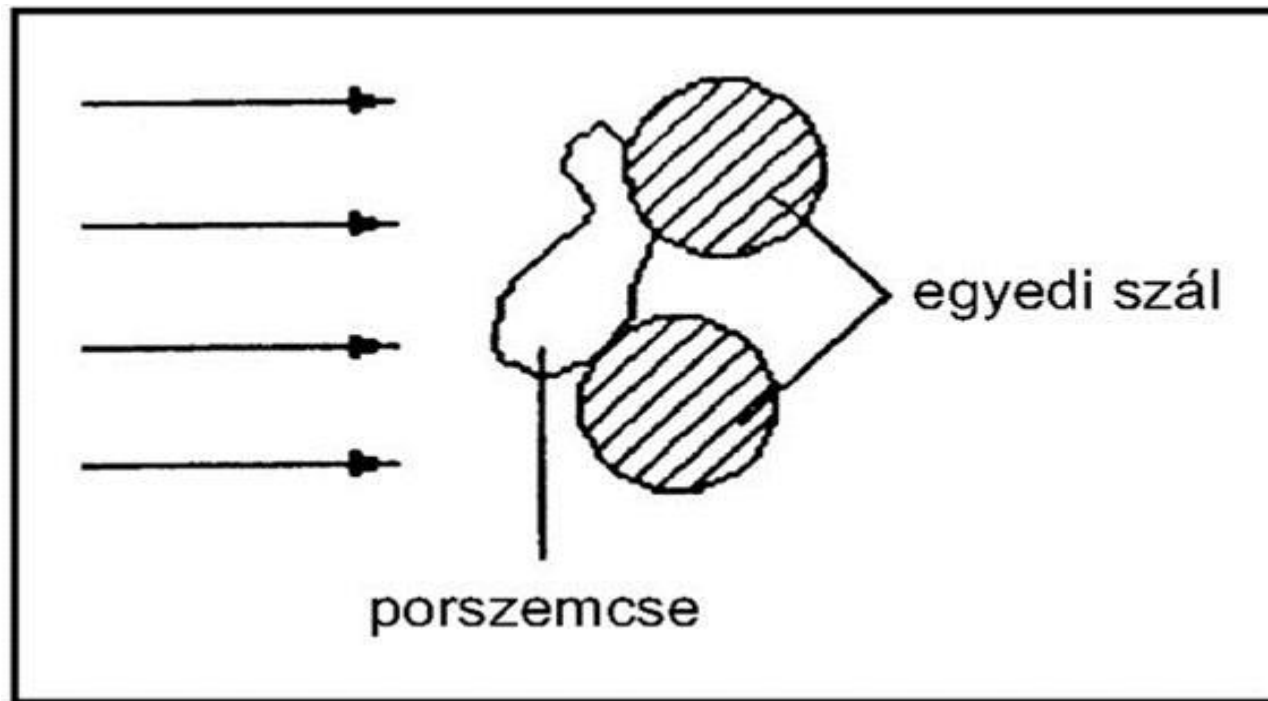
- ▶ Porózus szűrőréteg => szűrőhatás
- ▶ Szűrőréteg: szövet, rostos vagy szemcsés anyag
- ▶ Szűrő kiképzés: tömlős, táskás, szemcseágyas, rostágyas, gyertyaszűrő.
- ▶ Hőmérséklettűrés:
  - ▶ természetes szálak: 100 °C,
  - ▶ műanyagok: 250 °C,
  - ▶ üvegszál: 350 °C,
  - ▶ kerámia (pl. alumínium-szilikát) : 800-1000 °C.

# Szűréssel történő porleválásztás

- ▶ **szűrőszövetek** legfontosabb tulajdonságai: a leválasztó-képesség, kopásállóság, üzemi nyomásveszteség, porozitás, vastagság, rostok mérete és fajtája, felületi tulajdonságok, elektromos töltés
- ▶ **szemcse** legfontosabb tulajdonságai: szemcsenagyság, sűrűség, alak, elektromos töltés, felületi tulajdonságok
- ▶ **szűrt közeg** legfontosabb tulajdonságai: viszkozitás, sűrűség, hőmérséklet, nedvességtartalom, szűrési sebesség

# Szűrőkor lejátszódó folyamatok 1.

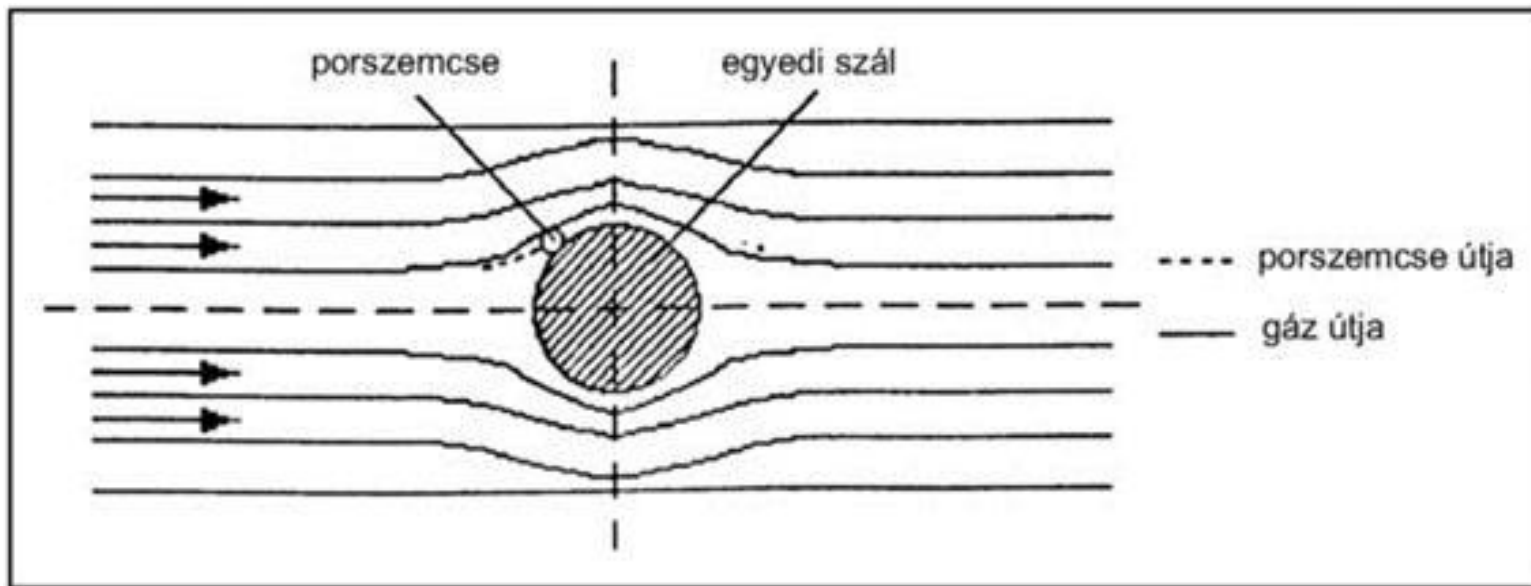
- ▶ **Szűrőhatás:** minden olyan porszemcse visszatartódik, amelynek mérete nagyobb, mint a szövedékben jelenlévő pórus





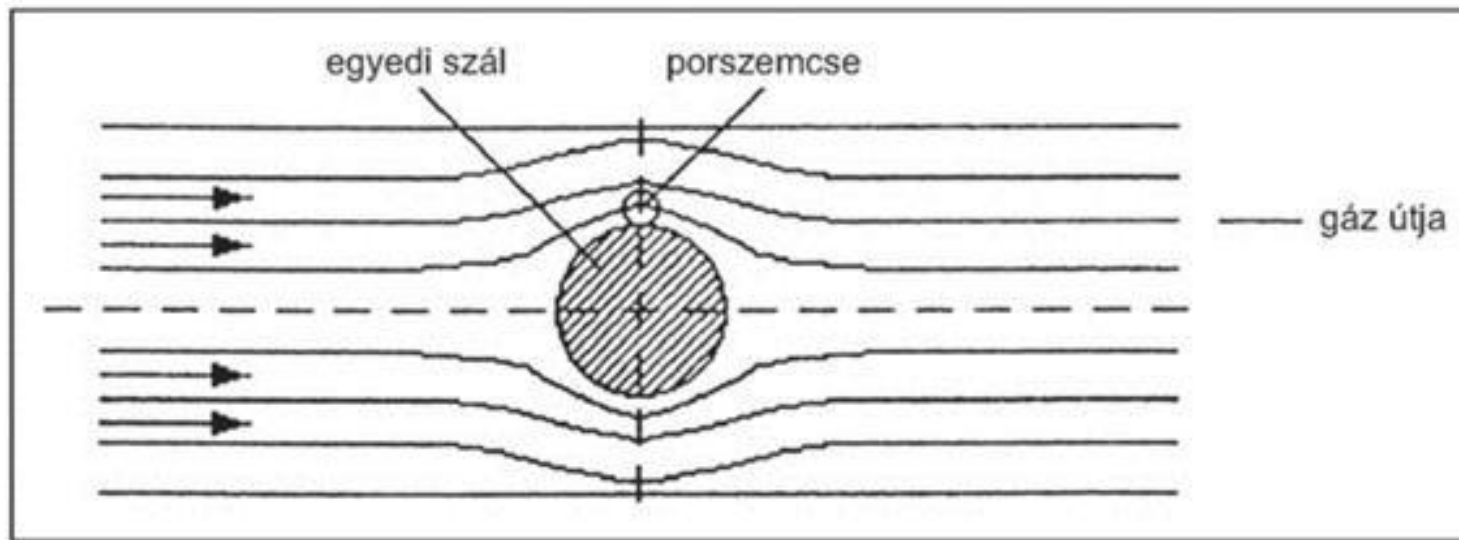
# Szűrőkor lejátszódó folyamatok 2.

- ▶ **Tehetetlenségi ütközés vagy impakt hatás:** a részecskék a tehetetlenségük következtében az áramlási vonalakat elhagyják, és ha valamilyen akadállyal (pl. szűrőszállal) érintkezésbe kerülnek, a hatásos tapadási erők következtében leválasztódnak.



# Szűrőkor lejátszódó folyamatok 3.

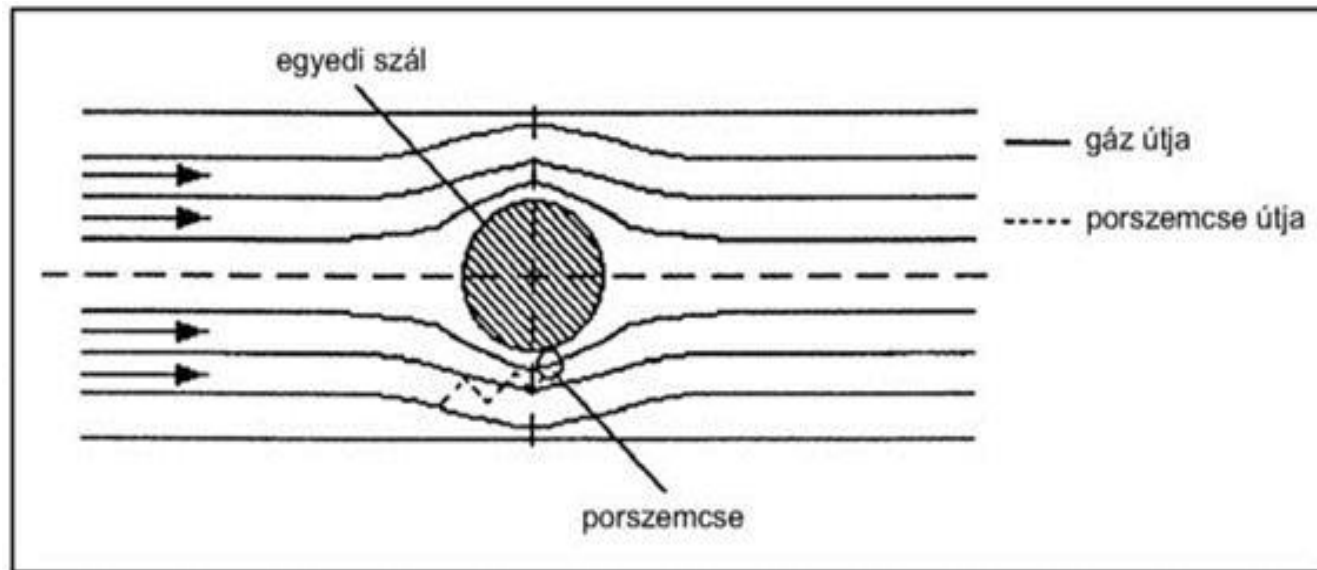
- ▶ **Záróhatás vagy közvetlen befogás:** szemcse kisebb, követi az áramlási vonalakat, a szállal érintkezik, a tapadó erők következtében megkötődik



# Szűrőkor lejátszódó folyamatok 3.

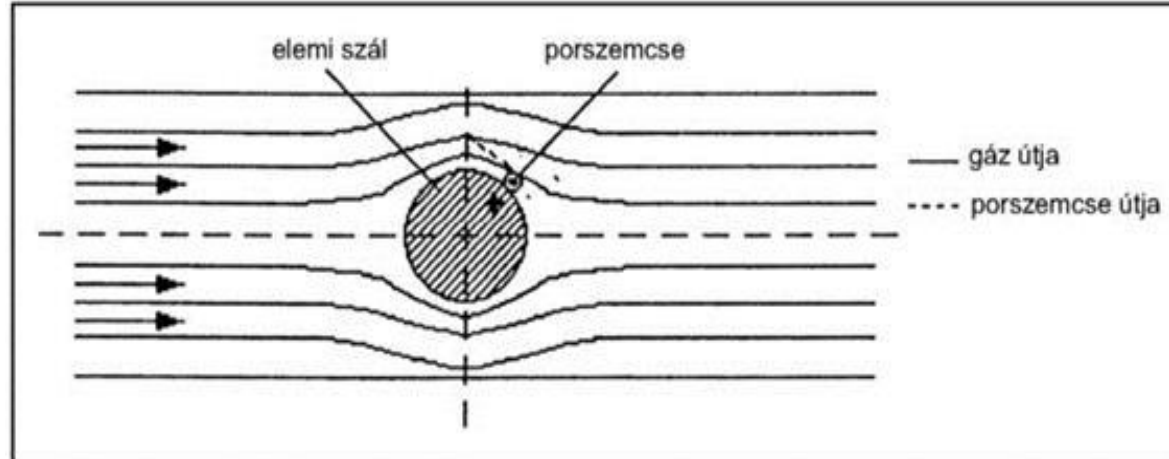
- ▶ **Diffúziós hatás:** 1  $\mu\text{m}$ -nél kisebb méretű porszemcsék -> Brown-féle mozgás

Rendezetlen, zezugos mozgás, az áramlási akadállyal érintkeznek és ott leválasztódnak

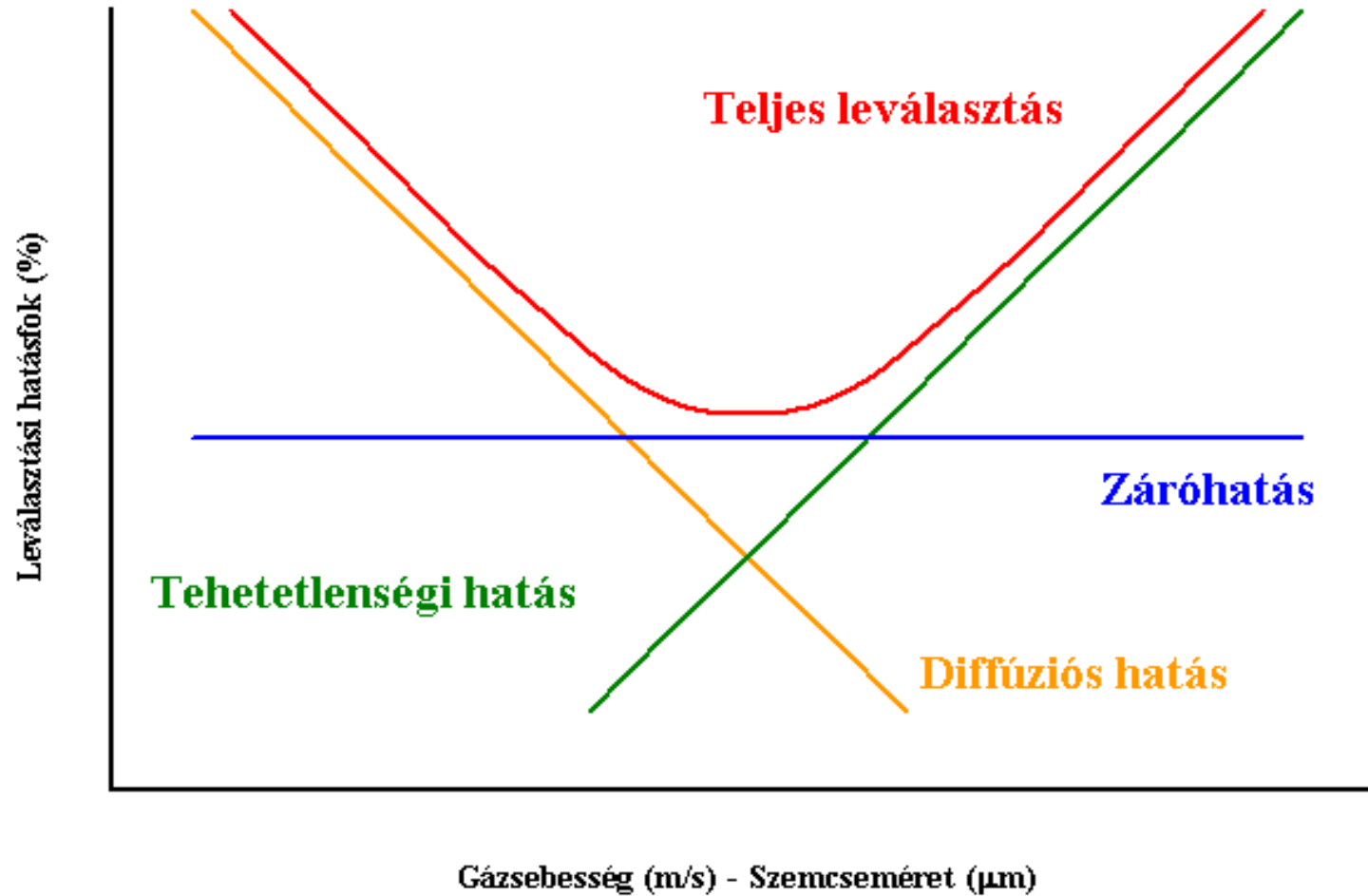


# Szűrőkor lejátszódó folyamatok 4.

- ▶ **Elektrosztatikus hatás:** porszemcsék, szövetshálak elektrosztatikailag töltődhetnek.
- ▶ -> elektromos erők: érintkezésbe kerülő anyagok mozgás-és tapadásviselkedését módosítják

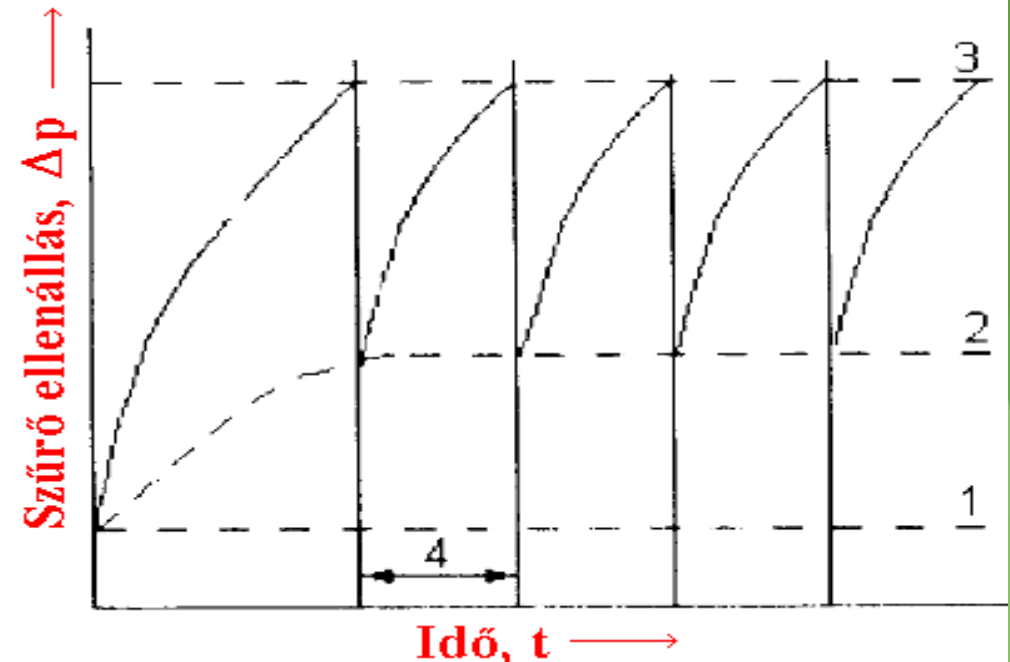


# A leválasztási hatások változása a gázsebesség és a szemcseméret függvényében



# Szűréssel történő porleválásztás

- ▶ Utóbbi években merev szűrőelemek:
  - ▶ hatékonyabban tisztíthatók, a tisztítási energia teljes egészében a részecskék eltávolítására fordítódik és nem veszik el a zsák mozgása illetve mozgatása miatt
- ▶ A szövet felületén állandóan növekvő porréteg alakul ki, átveszi a szűrőközeg szerepét.
- ▶ Nő a réteg vastagsága -> nyomásveszteség is nő -> a port adott időközökben el kell távolítani a szövedékről



- 1- tiszta szűrőszövet ellenállása
- 2 - visszamaradó ellenállás
- 3 - szűrőszövet + porréteg ellenállása
- 4 - két szűrőtisztítás közötti idő

# Szűrési folyamat jellemzői

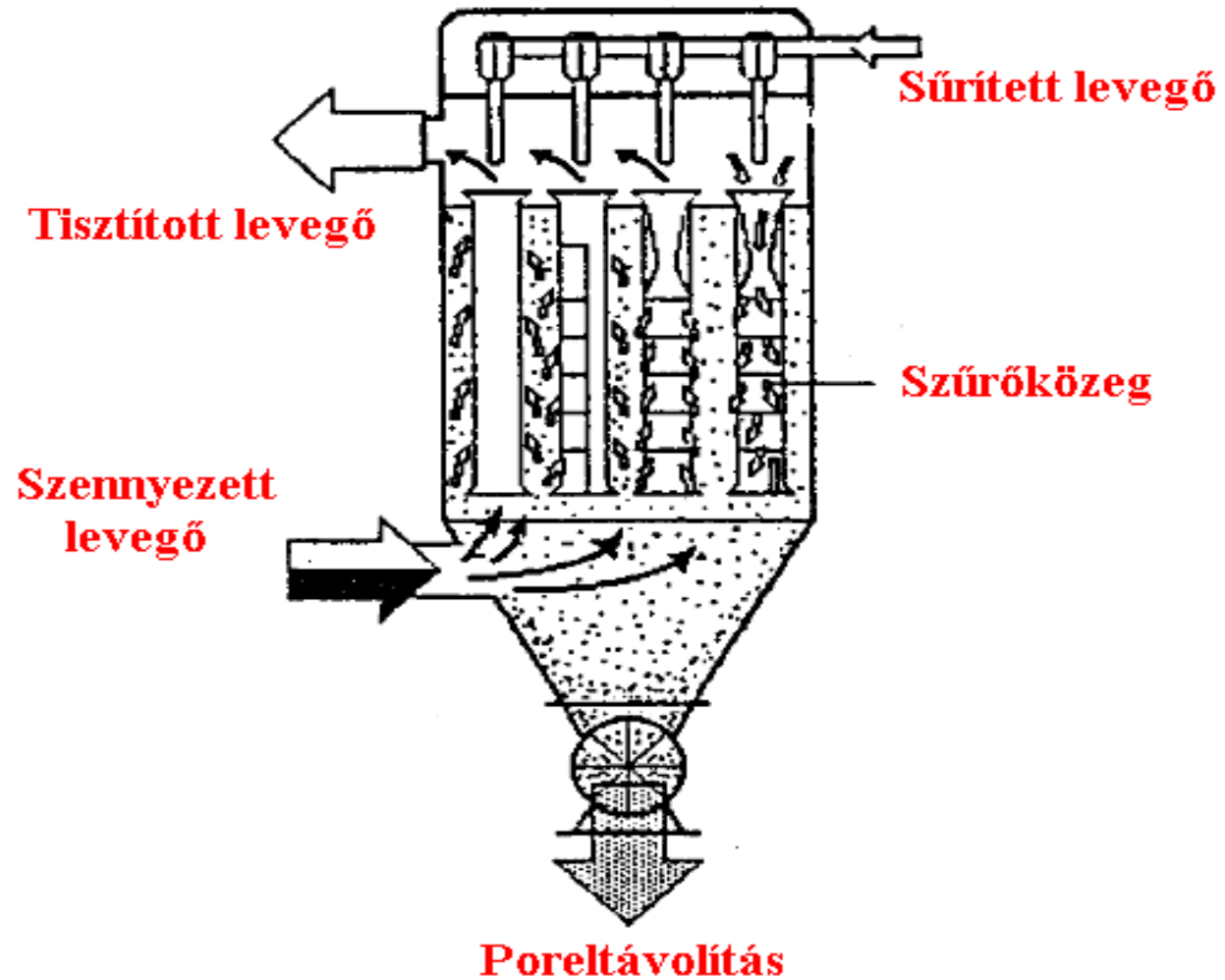
- ▶ Felületi terhelés:

$$U_f = V / A_f$$

- ▶ ahol:

- ▶  $U_f$  - felületi terhelés (m/h, m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>h))
- ▶  $V$  - a tisztítandó gáz térfogatárama (m<sup>3</sup>/h)
- ▶  $A_f$  - a szűrőközeg felülete (m<sup>2</sup>).
- ▶ Értéke: 50-150.
- ▶ Leválasztási hatások:  $d_p = 0,5 \text{ mm} \Rightarrow 99 \%$
- ▶ Nyomásveszteség: 600-1500 Pa

# Zsákos porszűrő





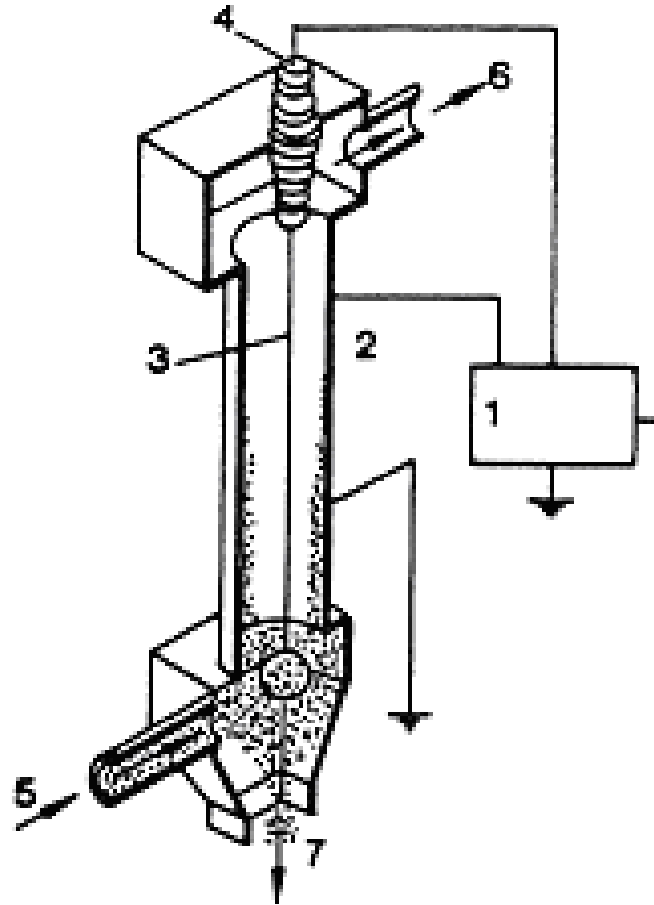
# Elektrosztatikus porleválasztás

A gázban lebegő, elektromos töltésű porrészecskék az ellentétes pólusú felület felé haladnak és ott leválasztódnak.

- ▶ kis szemcseméretű, szilárd és cseppfolyós halmazállapotú részecskék leválasztására alkalmas
- ▶ A berendezések ellenállása kicsi, 10-60 Pa
- ▶ Széles hőmérséklet-intervallum (450° C-ig)
- ▶ Olcsó karbantartás, kis üzemeltetési költség
- ▶ Beruházási költség, helyigény nagy
- ▶ Elérhető leválasztási hatások 98-99,9%
- ▶ 0,1 µm-es szemcsék leválasztására is alkalmas

# Csőes elektrofilter

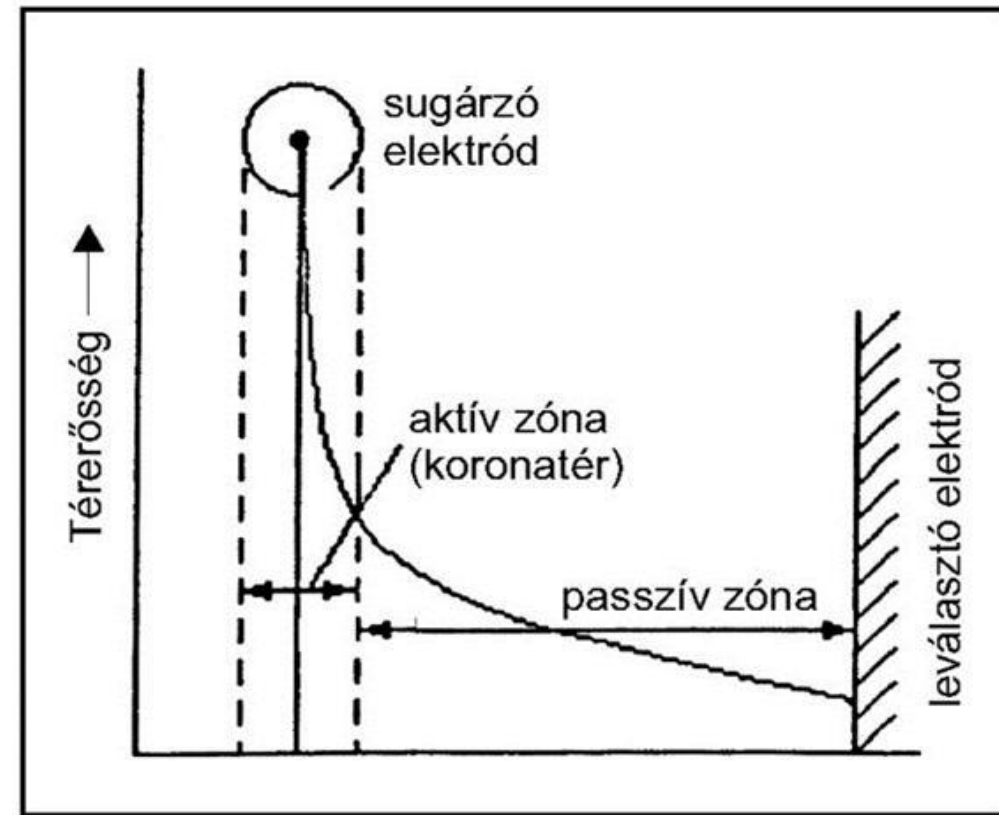
- ▶ 1 - egyenirányító,
- ▶ 2 - leválasztó elektród,
- ▶ 3 - sugárzó elektród,
- ▶ 4 - szigetelés,
- ▶ 5 - poros gáz belépés,
- ▶ 6 - tiszta gáz elvezetés,
- ▶ 7 - leválasztott por



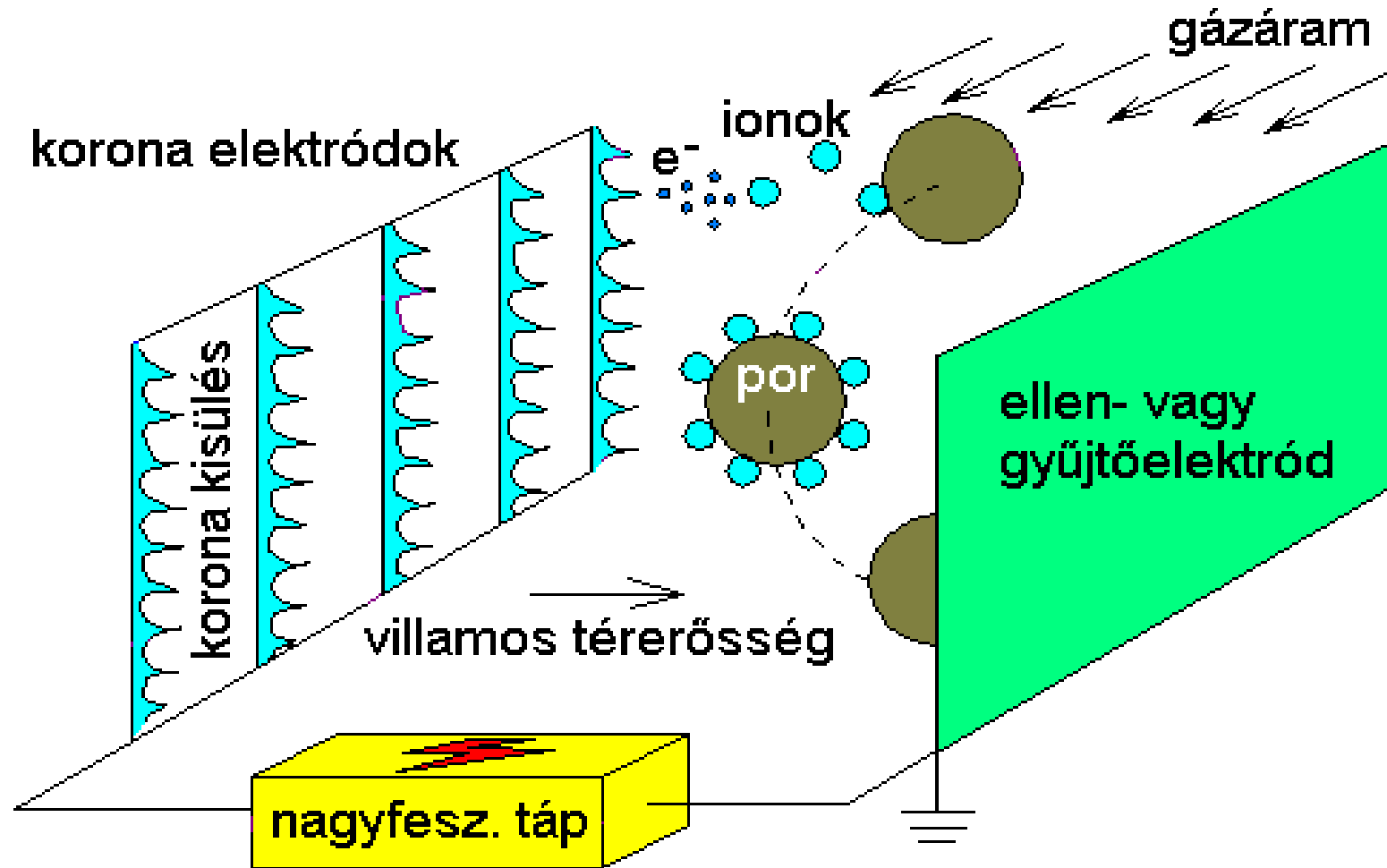
# Elektromos térerősség

$$E_x = \frac{U}{x \cdot \ln \frac{R}{r}}$$

- ▶ ahol:
- ▶  $E_x$  - az elektromos térerősség értéke (V/m)
- ▶  $U$  - az elektródokra kapcsolt feszültség (V),
- ▶  $x$  - a vizsgált pont távolsága a geometriai középponttól (m),
- ▶  $R$  - a leválasztó elektród sugara (m),
- ▶  $r$  - a sugárzó elektród sugara (m).



# Elektrosztatikus porleválasztó

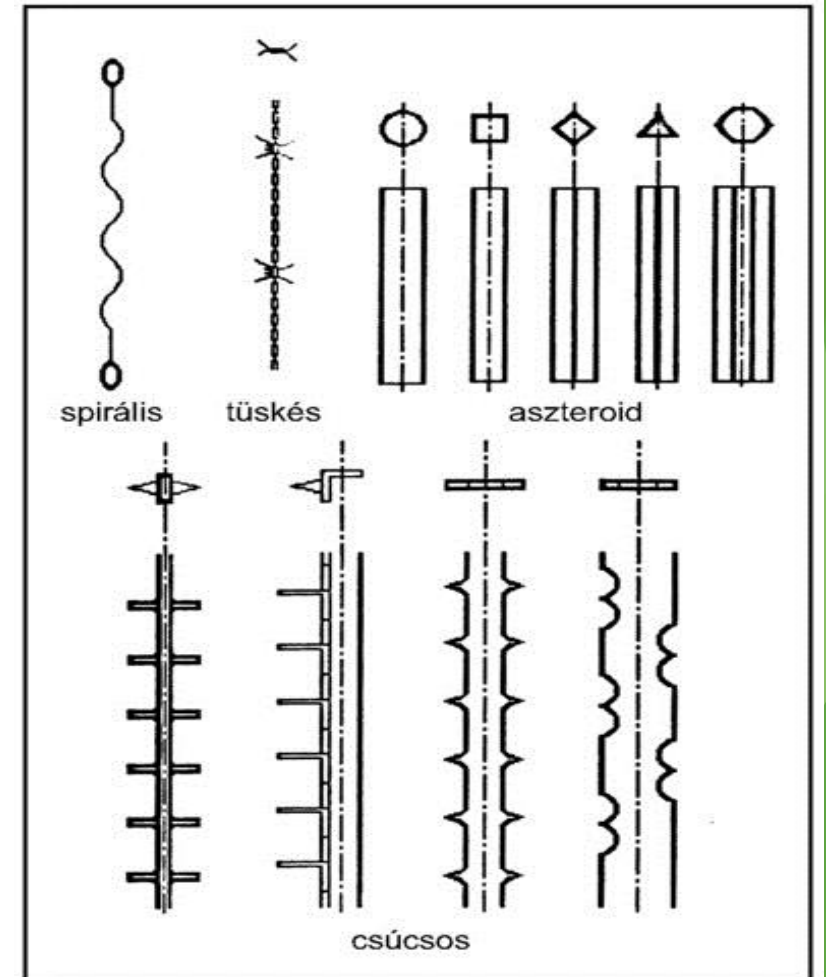


# Elektrosztatikus porleválasztó

- ▶ Töltésfelvétel:
  - ▶  $d_p > 0,5 \mu\text{m}$  ütközéssel,
  - ▶  $d_p < 0,2 \mu\text{m}$  iondiffúzióval
  - ▶  $0,2 < d_p < 0,5 \mu\text{m}$  ütközés és diffúzió
- ▶ Koronatérben a porrészecskék pozitív vagy negatív töltést vehetnek fel
- ▶ A sugárzó (szóró-) elektróddal azonos töltésű porrészecskék a leválasztó elektród felé mozognak, az ellentétes töltésűek pedig a sugárzó elektródon válnak le.

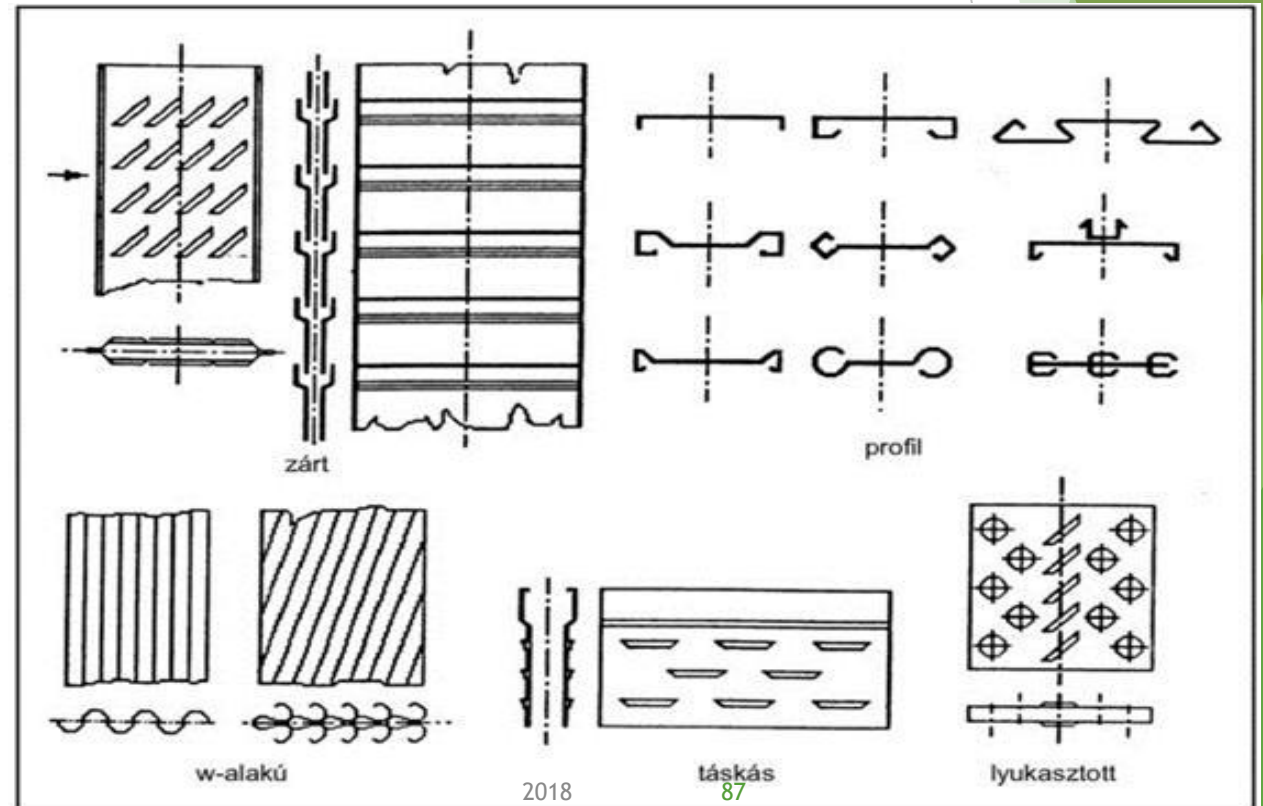
# Szóróelektród

- ▶ koronatéren kívül (passzív zóna) ionok nem keletkeznek -> szóróelektróddal egyező töltésű ionok, részecskék leválasztó elektród felé (ez dominál)
- ▶ Átütési feszültség felett szikrák
- ▶ szóróelektród általában negatív töltésű, mert így kevesebb átütés (leválasztótérben elektronok)
- ▶ pozitív koronaterben az  $O_3$  képződés kevesebb



# Leválasztó elektród

- ▶ Korábban csöves elrendezésű, függőleges átáramlású leválasztók
- ▶ kör vagy méhsejt rendszer
- ▶ ma: vízszintes átáramlású, lap-leválasztó elektródok
- ▶ áramlási holtter :
  - nincs visszakeveredés
- ▶ leválasztó elektródokról a porrészecskéket rázással, vibráltatással, kopogtatással vagy vizes mosással távolíthatjuk el.



# Elektrosztatikus porleválasztás

Részecske leválasztás 3 részfolyamata:

- ▶ a porrészecske vándorlása az elektromos tér hatására,
- ▶ a részecske kiválása a leválasztó elektródon, töltésvesztés,
- ▶ a részecske eltávolítása az elektródról.

A porleválasztás hatásfoka: Deutsch-féle összefüggés :

$$\varepsilon_{\ddot{o}} = 100 - 100 \cdot \exp\left(-\frac{2v_r L}{v_g R}\right)$$

- ▶  $\varepsilon_{\ddot{o}}$  - az összleválasztási hatásfok,
- ▶  $v_r$  - a részecske vándorlási sebessége, m/s,
- ▶  $L$  - a leválasztó elektród hossza, m,
- ▶  $v_g$  - a gáz lineáris sebessége a leválasztó készülékben, m/s,
- ▶  $R$  - a sugárzó és a leválasztó elektród közötti távolság, m.



# Elektrosztatikus porleválasztás

## Hatásfok növelhető:

- ▶ az elektródokra kapcsolt egyenfeszültség növelésével
- ▶ vivőgáz relatív nedvességtartalmának növelése
- ▶ hőmérséklet emelés
- ▶ Kén-trioxid, kénsav vagy ammónia vivőgázba juttatása (véggázban nem jelennek meg)

# Elektrosztatikus porleválasztás alkalmazása

- ▶ széntüzelésű erőművek pernyeleleválasztásra
- ▶ hulladékégetőnél gáztisztításra
- ▶ cementgyártásnál, timföld előállításakor,
- ▶ vas-és acélgyártásnál,
- ▶ színesfém-és papíriparban

## **Nedves elektrosztatikus porleválasztó:**

- ▶ a leválasztott de le nem hullott részecskéket vizes mosással távolítják el
- ▶ hátrány: leválasztott anyag nem száraz

# Nedves porleválasztás

## ▶ Előny:

- ▶ megfelelő mosófolyadékkal a szilárd és gázalakú szennyező komponensek egyidejű eltávolítása
- ▶ tűz- és robbanásveszélyes poroknál kizárólag
- ▶ beruházási költség és helyigény kicsi

## ▶ Hátrány:

- ▶ szennyezők folyadék fázisba -> tovább tisztítandó
- ▶ üzemeltetési költsége magasabb
- ▶ télen a szabadban lefagyhat

# Nedves porleválasztás

## Részfolyamatok:

- ▶ a porrészecske és a folyadékcsepp vagy folyadékfilm találkozása,
- ▶ a porrészecske behatolása a folyadékfilmbe vagy folyadékcseppbe, megkötődése azok felületén,
- ▶ a részecske távozása a mosófolyadékkal a leválasztó térből.

## Átadási folyamat függ:

- ▶ a folyadék és a gáz közötti érintkezési felület nagyságától
- ▶ a két fázis közötti relatív sebességkülönbségtől

# Nedves porleválasztás

Leválasztási mechanizmusok:

- ▶ tehetetlenségi ütközés ( $d_p > 1\mu\text{m}$ ),
- ▶ Brown-mozgás ( $d_p < 1\mu\text{m}$ ),
- ▶ termoforézis,
- ▶ kondenzációs mag

Nedvesítés

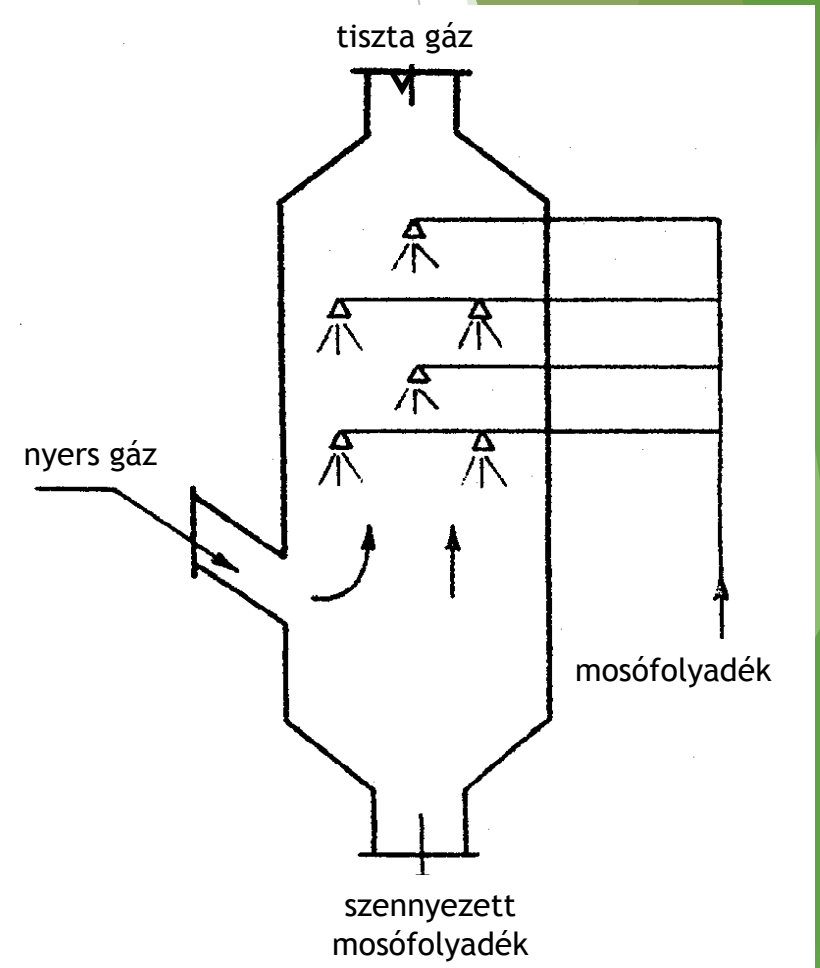
Nedves leválasztó berendezések

# A leválasztás jellemzői

- ▶ **Határszemcse-méret ( $d$ ,  $\mu\text{m}$ )**
  - ▶ az a legkisebb szemcseméret ( $\mu\text{m}$ ), amelyet az adott leválasztó készülék 50%-os leválasztási hatásokkal leválaszt
- ▶ **Nyomásveszteség ( $\Delta p$ , Pa)**
- ▶ **Folyadék-gáz arány ( $F/G$ ,  $\text{dm}^3$  folyadék/ $\text{m}^3$  gáz)**
  - ▶ mennyi folyadékot kell majd további kezelésnek alávetni
- ▶ **Energiafelhasználás ( $E$ , kWh/1000  $\text{m}^3$  gáz)**
- ▶ **Leválasztási hatások ( $\eta$ , %)**
- ▶ **Gázáramlás sebessége ( $v_G$ , m/s)**

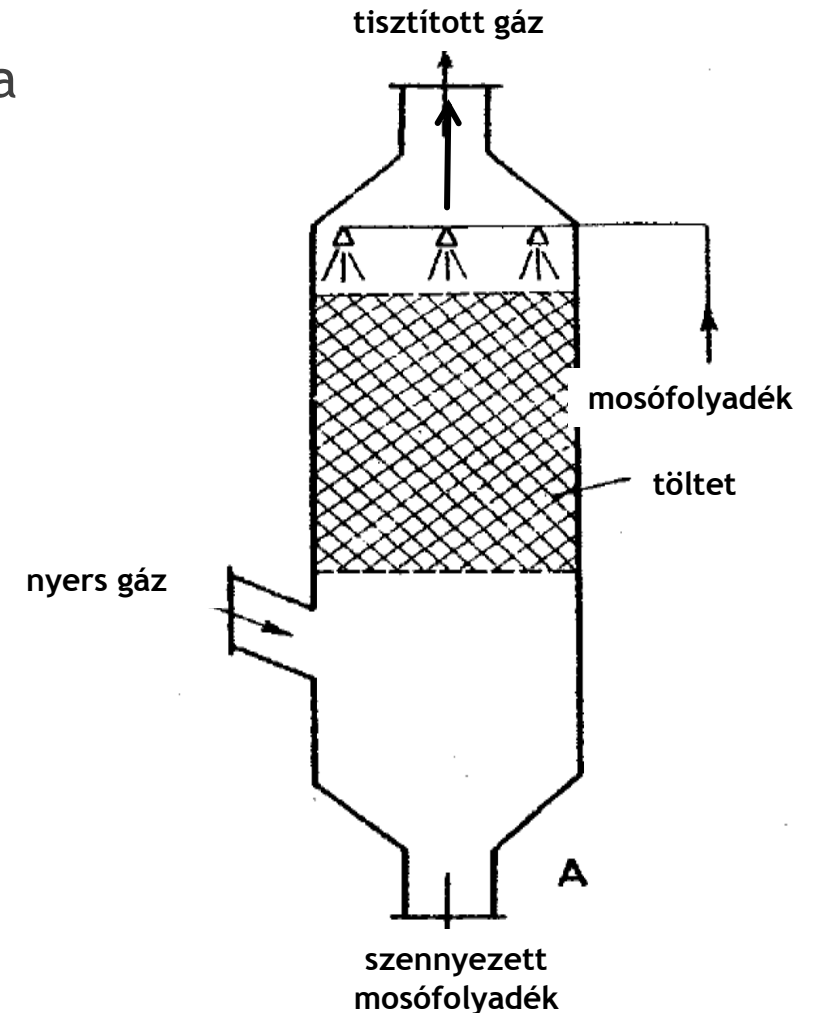
# Porlasztásos készülékek

- ▶ gáz ellenáramban halad a torony felső részén beporlasztott mosófolyadékkal
- ▶ előleválasztásra alkalmas
- ▶  $d = 2-4 \mu\text{m}$
- ▶  $\Delta p = 150-200 \text{ Pa}$
- ▶  $F/G = 4-5 \text{ m}^3/\text{m}^3$
- ▶  $E = 1-3 \text{ kWh}/1000\text{m}^3$
- ▶  $\varepsilon_{5\mu\text{m}} = 80 \%$
- ▶  $v_G = 1-3 \text{ m/s}$



# Töltetes tornyok

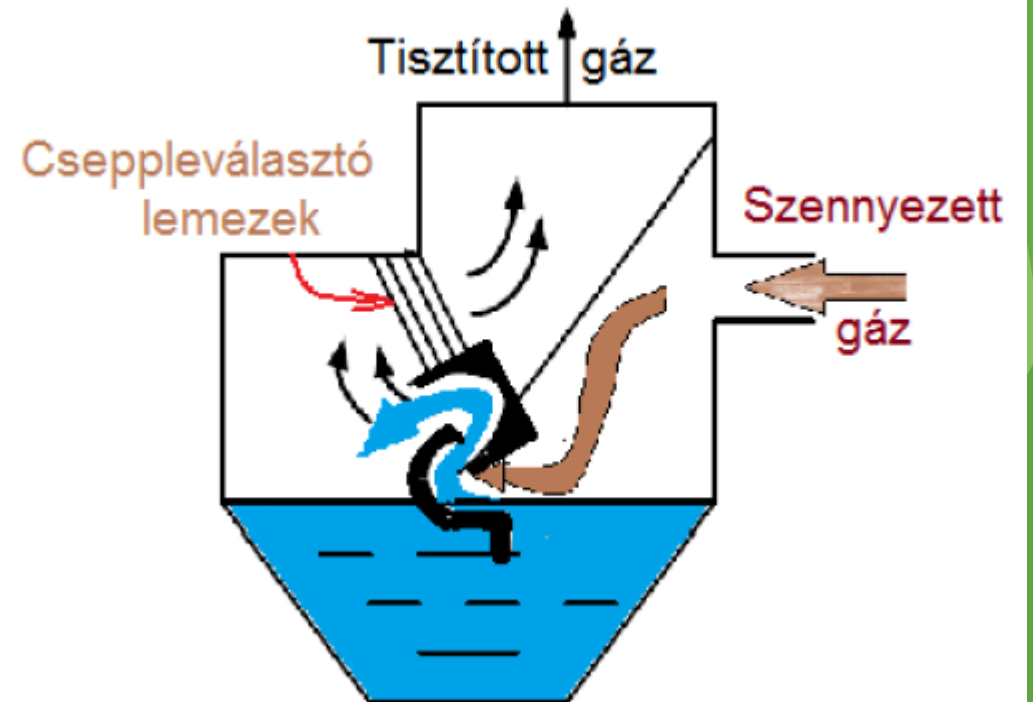
- ▶ töltetrétegben a gáz sokszoros sebesség és irányváltoztatásra kényszerül
- ▶ abszorpció, szilárd, folyékony szennyezők leválasztása
- ▶ töltet: Raschig-gyűrű, Berl-nyereg, egyéb szilárd anyag
- ▶  $d = 1-4 \mu\text{m}$
- ▶  $\Delta p = 200-300 \text{ Pa}$
- ▶  $F/G = 2-5 \text{ m}^3/\text{m}^3$
- ▶  $E = 0,5-1,5 \text{ kWh}/1000\text{m}^3$
- ▶  $\varepsilon_{5\mu\text{m}} = 90 \%$
- ▶  $v_G = 1-2 \text{ m/s}$





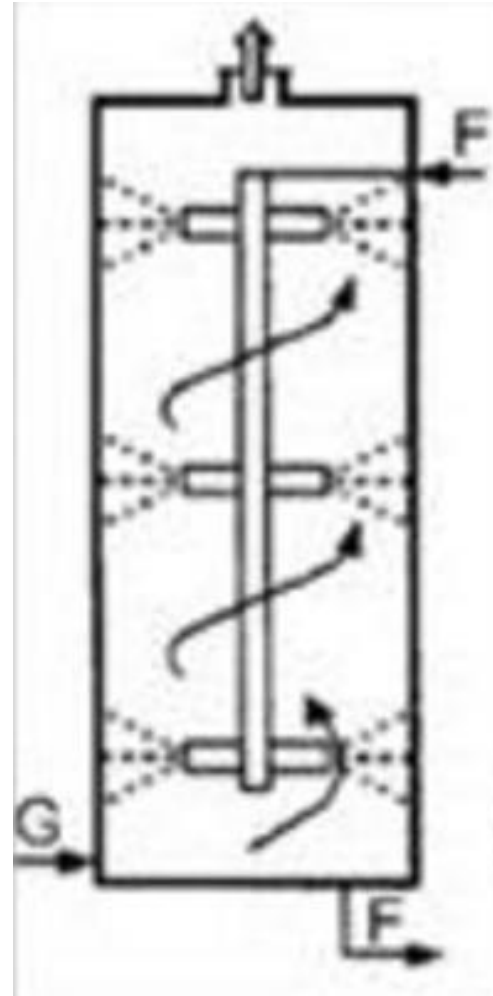
# Dinamikus vagy örvény mosók

- ▶ poros gázt nagy sebességgel a folyadékfelszínnek ütköztetik
- ▶ előleválasztódás
- ▶ folyadékrétegben intenzív keveredésű csatorna
- ▶  $d = 0,6-0,9 \mu\text{m}$
- ▶  $\Delta p = 1500-3000 \text{ Pa}$
- ▶  $F/G = -$
- ▶  $E = 1-2 \text{ kWh}/1000\text{m}^3$
- ▶  $\varepsilon_{5\mu\text{m}} = 93 \%$
- ▶  $v_G = 8-20 \text{ m/s}$



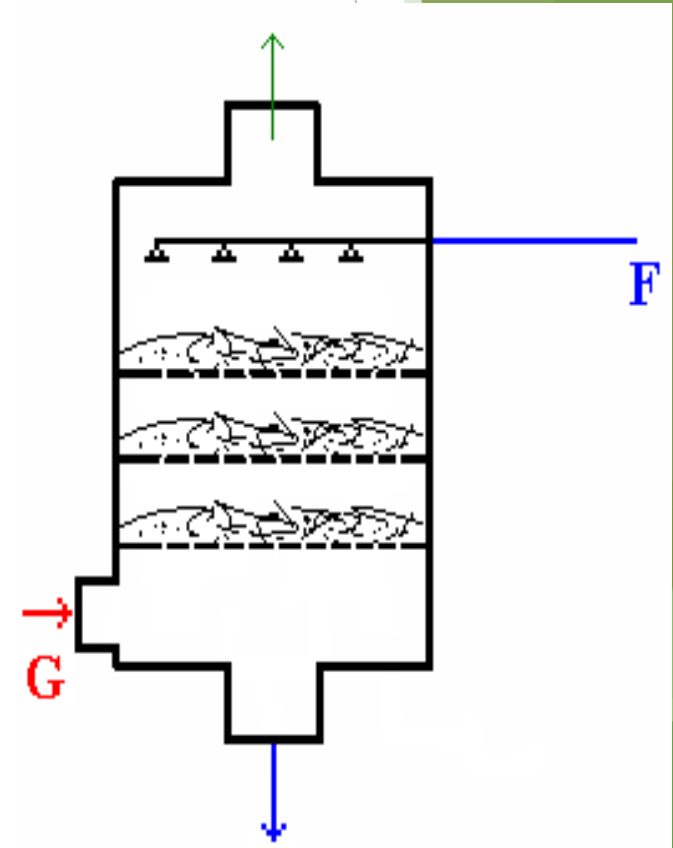
# Rotációs mosók

- ▶ intenzív keveredéséhez forgó szerelvények
- ▶  $d = 0,8-1 \mu\text{m}$
- ▶  $\Delta p = 200-400 \text{ Pa}$
- ▶  $F/G = 0,8-3,5$
- ▶  $E = 2-6 \text{ kWh}/1000\text{m}^3$
- ▶  $\varepsilon_{5\mu\text{m}} = 90 \%$
- ▶  $v_G = 2-3 \text{ m/s}$



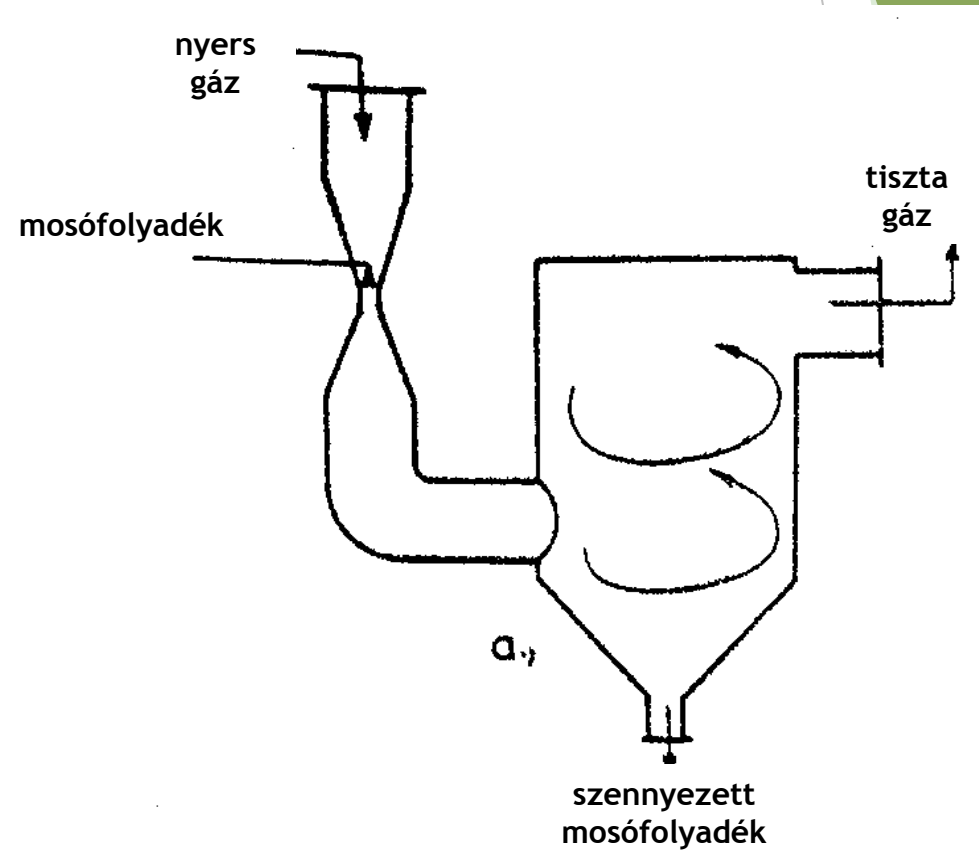
# Tányéros tornyok

- ▶ perforációkkal ellátott tányérok
- ▶ dinamikus, állandóan megújuló habréteg, nagy érintkezési felület
- ▶  $d = 0,3-0,5 \mu\text{m}$
- ▶  $\Delta p = 400-1000 \text{ Pa}$
- ▶  $F/G = 0,8-1,5$
- ▶  $E = 0,5-1,5 \text{ kWh}/1000\text{m}^3$
- ▶  $\varepsilon_{5\mu\text{m}} = 98 \%$
- ▶  $v_G = 0,7-3,5 \text{ m/s}$



# Venturi-mosó

- ▶ konfúzor + torok + diffúzor
- ▶ mosófolyadék a torokba, vagy elé
- ▶  $d < 0,1-0,3 \mu\text{m}$
- ▶  $\Delta p = 3000-20000 \text{ Pa}$
- ▶  $F/G = 0,5-5$
- ▶  $E = 1,5-7 \text{ kWh}/1000\text{m}^3$
- ▶  $\epsilon_{5\mu\text{m}} > 99 \%$
- ▶  $v_G = 50-150 \text{ m/s}$



# Gázalmazállapotú szennyezőanyagok leválasztása

# Gáztisztítás

- ▶ Legfontosabb gáz-halmazállapotú szennyezők:  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ , egyéb szénhidrogének, aldehidek, ketonok, merkaptánok stb.
- ▶ elkülönítésük, leválasztásuk legtöbbször valamilyen más közeggel - száraz, szilárd anyaggal - történő érintkeztetéssel valósítható meg
- ▶ adszorpció, abszorpció
- ▶ diffúziós folyamat
- ▶ jól modellezhető anyagátbocsátás
- ▶ folytonos (töltetes) vagy fokozatszerű (tányéros) érintkeztetés

# Abszorpció

- ▶ Gázok és gőzök folyadékokban történő elnyeletése
- ▶ fizikai abszorpció:
  - ▶ elnyeletett komponens nem lép kémiai reakcióba az abszorbenssel (megfordítható)
- ▶ kémiai abszorpció (kemisorpció):
  - ▶ komponens az abszorbenssel kémiai vegyületet képez (lehet reverzibilis)
- ▶ kapcsolás deszorberrel -> abszorbens újrahasználható
- ▶ Abszorbens: szelektív, jól regenerálható, olcsó

# Abszorpció

- ▶ Henry-törvény:

$$p_A = H \cdot x_A$$

- ▶ Dalton-törvény:

$$p_A = P \cdot y_A$$

$$\left. \begin{array}{l} p_A = H \cdot x_A \\ p_A = P \cdot y_A \end{array} \right\} y_A = m \cdot x_A$$
$$m = H/P$$

$p_A$ : komponens parciális nyomása  
 $H$ : Henry állandó  
 $x_A$ : folyadék fázisbeli móltört  
 $P$ : össznyomás  
 $y_A$ : gáz fázisbeli móltört  
 $m$ : megoszlási/fázisegyensúlyi tényező

- ▶ gáz alakú szennyeződésekét folyadék fázisba visszük át:
  - ▶ abszorbeálható komponens diffúziója a gáz fő tömegéből a folyadék-gáz határrétegig,
  - ▶ a gázcseppkének átmenete a folyadék-gáz határrétegen,
  - ▶ az abszorbeált gázmolekula diffúziója a folyadék belsejébe.
- ▶ kémiai reakció esetén csökken az oldott gáz egyensúlyi nyomása, ez segíti a folyamat lefolyását, megnöveli az abszorpció kapacitást és hatásfokot.

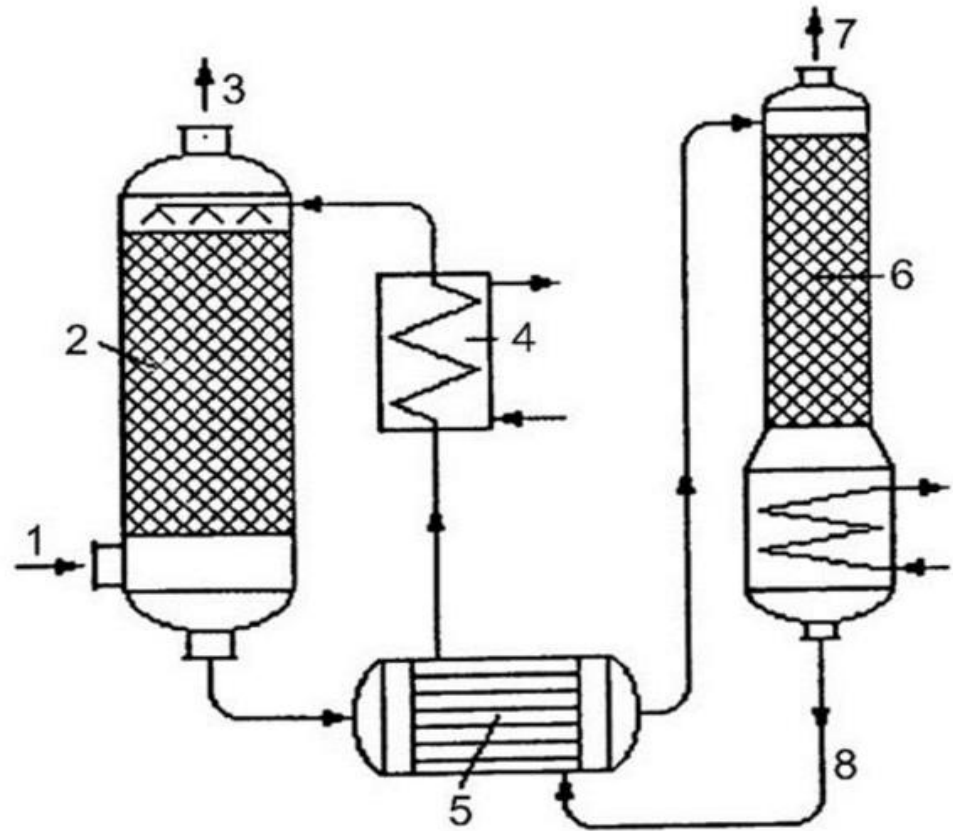


# Abszorbens követelmények

- ▶ a koncentráció csökkenés nagy legyen a gáz és folyadék között,
  - ▶ lényegesen nagyobb azoknak a gázoknak az oldhatósága, amelyek kémiai reakcióba is lépnek az oldószerrel
- ▶ lehető legnagyobb érintkezési fázisfelület,
- ▶ kedvező hőmérséklet és nyomásviszonyok
  - ▶ a hőmérséklet emelésével csökken az oldhatóság
  - ▶ minél nagyobb a gáz nyomása a folyadék felett, annál nagyobb az oldhatósága
- ▶ kis viszkozitású abszorpciós folyadék

# Abszorpciós berendezések

- ▶ Mint a porleválasztásnál, de itt a töltetes berendezések elterjedtek, nincs eltömődés
- ▶ buboréksapkás tornyok
- ▶ filmabszorberek
  1. a szennyezett gáz
  2. abszorpciós berendezés
  3. tisztított gáz kilépése
  4. hűtő
  5. hőcserélő
  6. deszorbeáltató kolonna
  7. deszorbeált gáz
  8. tiszta abszorpciós közeg
- ▶ füstgázok  $\text{SO}_2$ -mentesítése,
- ▶ műtrágya-gyártás véggázainak tisztítása,
- ▶ hulladékégetők véggázainak mosása



# Adszorpció

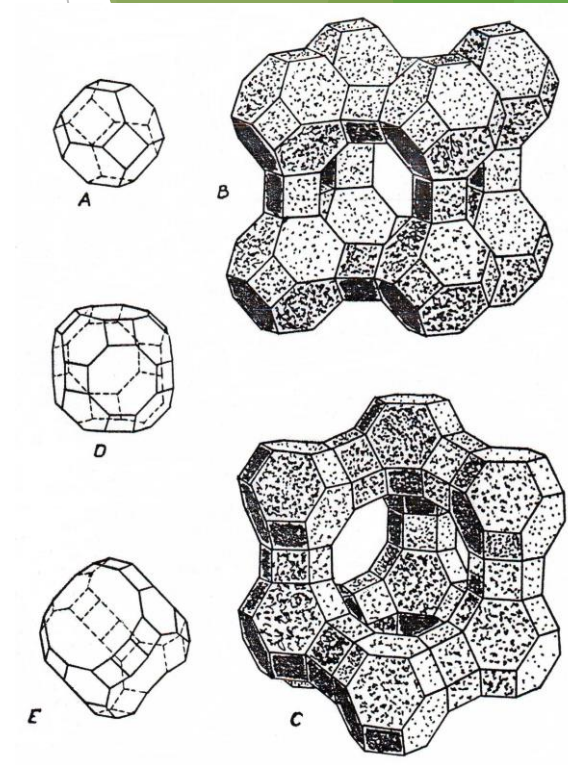
- ▶ Gőz, gáz vagy folyadék szilárd felületen történő megkötődése (adszorbens-adszorptívum/adszorbeátum)
- ▶ gázsárítás, oldószer-visszanyerés, ipari véggázok tisztítása
- ▶ nagy fajlagos felületű, pórusos szilárd anyagok: aktív szén, szilikagél, zeolitok
- ▶ (heterogén katalitikus reakciók)
- ▶ Fizikai (fizikai erők hatására (van der Waals), regenerálható), kémiai (kémiai kötés)
- ▶ adszorpció hő: adszorpciókor szabadul fel, adszorpció energia mértéke
  - ▶ nagysága mutatja, hogy fizikai adszorpció vagy kemoszorpció játszódott-e le.
- ▶ egyensúly esetén a megkötött gázmennyiség függ:
  - ▶ anyagi tulajdonságoktól,
  - ▶ hőmérséklettől,
  - ▶ anyag gáztérbeli koncentrációjától
  - ▶ érintkezési időtől

# Adszorpció

- ▶ Kapilláris kondenzáció
  - ▶ Az adszorbens annyi gőzt képes elnyelni, amennyi a kapillárisokon belüli gőznyomást egyensúlyba hozza a vivőgázban levő elnyeletendő gáz parciális nyomásával
- ▶ Hőfejlődéssel jár
- ▶ Regenerálást legtöbbször hőközléssel, nyomás-csökkentéssel vagy öblítőgázzal
  - ▶ elnyelt komponens visszanyerése nagyobb koncentrációban
  - ▶ aktív szén deszorpció általában telített vízgőzzel
  - ▶ gőzös deszorpció esetén utána szárítani kell
- ▶ Aktív szenes adszorpció:
  - ▶ bűzelhárítás
  - ▶ töltőállomásoknál a tankból kiáramló levegő tisztítására

# Adszorpció

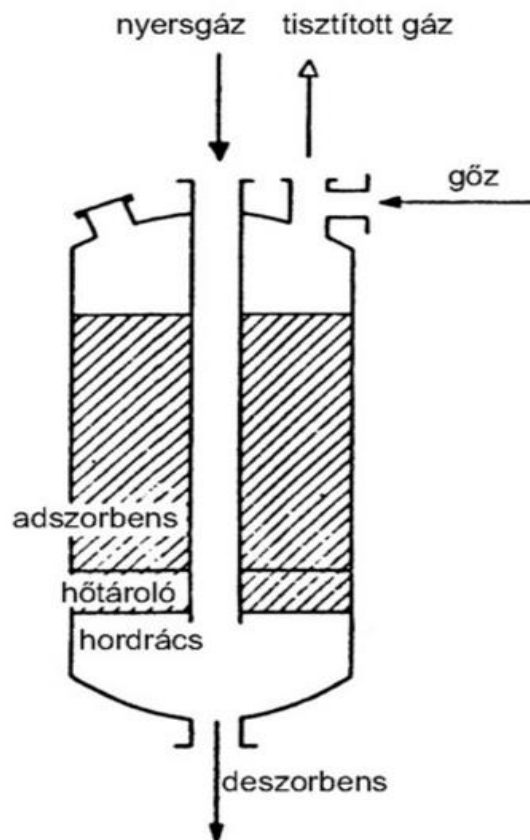
	Aktív szén	Aktív Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Szilikagél	Molekulaszita
Fajlagos felület m <sup>2</sup> /g	500-1500	300-350	250-850	500-1000
Mikropórus-térfogat cm <sup>3</sup> /g	0,6-0,8	0,4	0,3-0,45	0,25-0,3
Makropórus-térfogat cm <sup>3</sup> /g	0,5-0,8	0,1	0,05-0,1	0,35-0,4



# Adszorpció

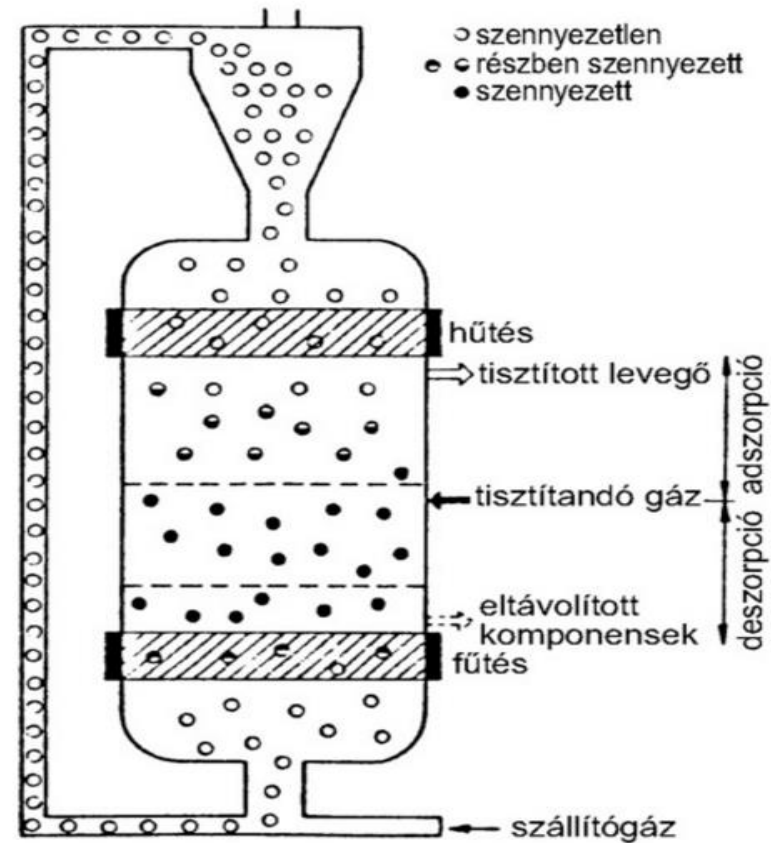
szakaszosan:

Álló ágyas adszorber



folyamatosan:

Mozgóágyas adszorber



# Adszorbens követelmények

- ▶ kis gázkoncentráció esetén is megfelelő aktivitás
- ▶ könnyű deszorpció,
- ▶ az adszorbens aktivitását, mechanikai szilárdságát a többszöri adszorpciós-deszorpciós ciklus ne befolyásolja,
- ▶ a gázokkal szemben vegyileg ellenálló legyen,
- ▶ nagy szelektivitás



# Kondenzáció

- ▶ gőz, illetve a gőzt tartalmazó gáz hőmérsékletének csökkentésével illetve nyomásának növelésével
- ▶ levegőtisztaság-védelemben elsősorban a hőmérséklet csökkenéses eljárás
- ▶ kondenzátorban valósítható meg
  - ▶ direkt (közvetlen): hűtő és cseppfolyósítandó anyagok közvetlen érintkezés
    - ▶ permetező
    - ▶ folyadéksugár
    - ▶ keverő-vagy barometrikus kondenzátorok
  - ▶ indirekt (közvetett):
    - ▶ csőköteges
    - ▶ léghűtéses kondenzátor



# Kondenzáció

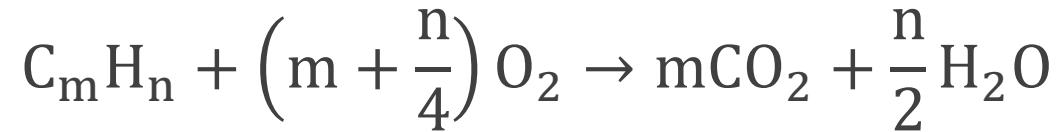
- ▶ indirekt kondenzátor:
  - ▶ gőzök eredeti koncentrációban kondenzálódnak
  - ▶ kondenzátum közvetlenül felhasználható
- ▶ direkt kondenzátor:
  - ▶ leválasztandó komponenst nagy hígításban
  - ▶ pl. desztillációval nyerhető vissza (költséges)
- ▶ kondenzációs műveletek: nagy kiindulási szennyező koncentrációnál,
- ▶ abszorpció: közepes,
- ▶ adszorpció: kis szennyező koncentrációnál alkalmazható

# Termikus véggáztisztítás

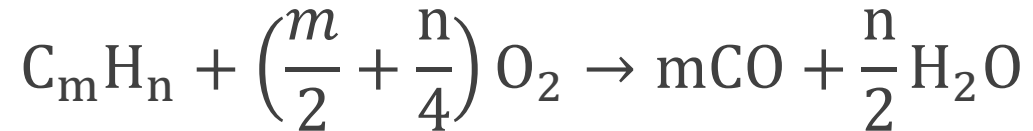
- ▶ szerves anyagok (szénhidrogének vagy bűzös vegyületek) ártalmatlanítására, amelyeket nem érdemes visszanyerni, de károsak, tűzveszélyesek, kellemetlenek
- ▶ üzemeltetési költségek hővisszanyeréssel csökkenthetők
- ▶ az éghető szennyező anyag koncentrációja a véggázban az alsó éghetőségi határ alatt => kiegészítő fűtőanyag szükséges a nagy hőmérsékletre hevítéshez

# Termikus véggáztisztítás

- ▶ szénhidrogének tökéletes égése:



- ▶ oxigénhiányos égetés: szén-monoxid



- ▶ oxigénfelesleg esetén is: kezdetben CO keletkezik, majd a CO csak az ezt követő oxidáció után alakul át a CO<sub>2</sub>-vé:

lassú folyamat, megfelelő tartózkodási idő

- ▶ tökéletes égéshez az elégetendő véggázban 2-3% levegőfelesleg szükséges

# Termikus véggáztisztítás

- ▶ Klórozott vegyületek esetén:  $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{HCl}$  és  $\text{Cl}_2$  keletkezik
- ▶  $\text{Cl}_2$  korrozív -> vízfelesleggel  $\text{HCl}$  keletkezik



- ▶ vízfelesleg a koromképződést is gátolja ( $\text{CO}$ ):  $\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2 + \text{CO}$
- ▶ hőmérséklet az égetőtérben:  $800\text{-}1200^\circ\text{C}$
- ▶  $\text{CO}$  tökéletes égése már  $700\text{-}800^\circ\text{C}$ -on
- ▶  $800^\circ\text{C}$  felett már termikus  $\text{NO}_x$  keletkezhet
- ▶ tartózkodási idő:  $0,3\text{-}1$  sec
- ▶ eltávolítás hatásossága  $>90\%$
- ▶ ha a véggázok visszavezetése nem gazdaságos, de hőtartalma a stabil elégetéshez elegendő: fáklyázás

# Katalitikus oxidáció

- ▶ kisebb hőmérséklet a katalizátornak köszönhetően, aktiválási energia szintje csökken
- ▶ égetési hőmérséklet: 800-1200 °C -> 200-400 °C
- ▶ kis koncentrációjú szennyezések ártalmatlanítására
- ▶ üzemeltetési költség 40-50%-kal kisebb
- ▶ DE: katalizátor mérgekre, koncentrációra ügyelni kell
- ▶ 160-1600 kJ/Nm<sup>3</sup> közé eső fűtőértékű gázok katalitikus égetéssel

# Katalitikus oxidáció

- ▶ katalizátor szilárd: heterogén katalízis
- ▶ részfolyamatok:
  - ▶ komponensek diffúziója a katalizátor felületére és pórusaiba,
  - ▶ a reagensek aktivált adszorpciója a katalizátor aktív centrumain,
  - ▶ a terméket eredményező felületi reakció,
  - ▶ a reakciótermék deszorpciója a katalizátor felületéről és pórusaiból,
  - ▶ a reakciótermék diffúziója a gázok fő tömegébe

# Katalitikus oxidáció

- ▶ katalizátorok:
  - ▶ nemesfémek: Pt, Rh, Pd (kevésbé érzékeny katalizátor mérgekre)
  - ▶ fém-oxidok (magasabb hőm.): Cu, Cr, Ni, Fe, Ti, Zn
  - ▶ bűzös, vagy mérgező szerves anyagok esetén
- ▶ Követelmények:
  - ▶ nagy aktivitás (jó porozitása és nagy fajlagos felület)
  - ▶ lehető legnagyobb térsebesség
  - ▶ kicsi nyomásveszteség
  - ▶ nagy szelektivitás
  - ▶ hosszú élettartam
  - ▶ termikus stabilitás
  - ▶ kémiai ellenálló képesség: alumínium-szilikát (halogének, savak, Hg, Pb, As, stb.)
  - ▶ mechanikai stabilitás (finom por ellen)
  - ▶ gyulladási-és üzemelési hőmérséklete megfelelően kicsi

# Katalitikus redukció

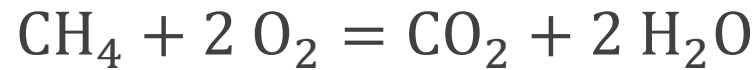
## Példa

- ▶ NO<sub>x</sub> tartalmú hulladékgázok esetén:

katalitikus redukció nemesfém katalizátoron CH<sub>4</sub>-el:



- ▶ metánfelesleg esetén előbb az O<sub>2</sub>-vel reagál:



- ▶ majd NO N<sub>2</sub>-é:



- ▶ redukáló gáz: CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, szintézisgáz (75% H<sub>2</sub>) és NH<sub>3</sub> (csak az NO<sub>x</sub> redukálás után reagál O<sub>2</sub>-vel ->kisebb felesleg, de drágább)
- ▶ előmelegítés: 150-400 °C

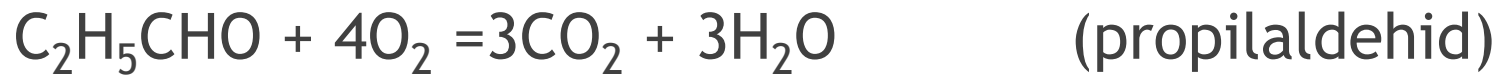


# Biológiai véggáztisztítás

- ▶ vízben oldódó gázszenyezések lebontása
- ▶ vizes szuszpenzióban lévő vagy szilárd anyagon rögzített mikroorganizmusokkal
  - ▶ rögzített: bioszűrők vagy biofilterek , bioreaktorok (csepegtetőtest)
  - ▶ szuszpenzó: biomosó
- ▶ mikroorganizmusok szennyvíztisztító üzemből, ritkábban a talajból, specifikus baktériumtörzsek (rövidebb adaptációs idő)
- ▶ kis hőmérsékleten, megfelelő pH-tartományban

# Biológiai véggáztisztítás

- ▶ oxidációs folyamat: levegő szükséges
- ▶ saját testtömegüket építik, energiát nyernek a szerves szennyezőkből
- ▶ átalakítás pl:



- ▶ nagy gázmennyiség biológiailag lebontható, kis koncentrációjú szennyezéseinek esetén
- ▶ előnyök: olcsó, üzembiztos, társadalmilag elfogadott

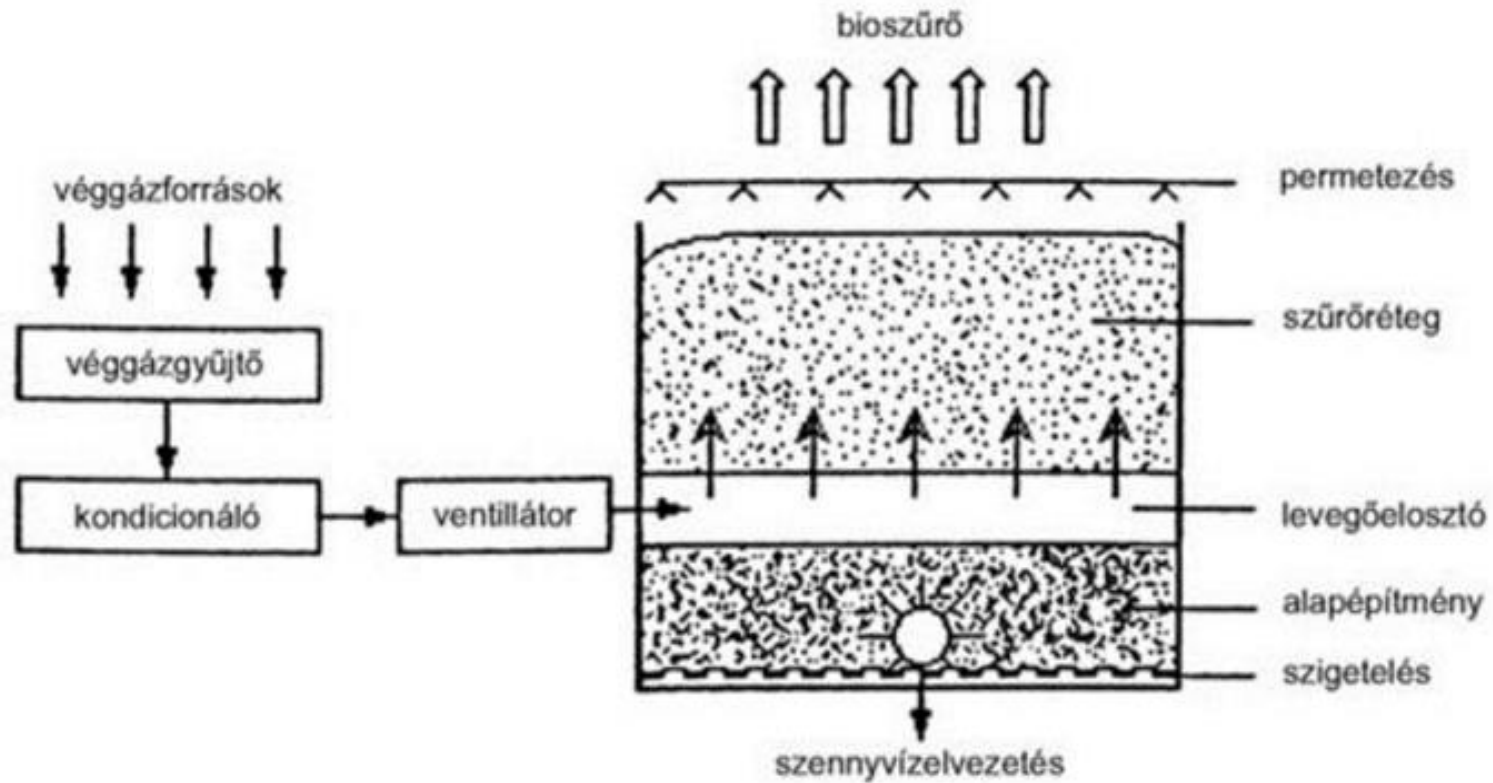
# Biológiai véggáztisztítás

- ▶ Biológiai lebontás módjai:
  - ▶ a szerves vegyület a lebontás során közti termékeken keresztül stabil szervetlen vegyületekké  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$  stb. alakul át,
  - ▶ a lebomlás közbülső termék szintjén megreked,
  - ▶ azok az anyagok, amelyek a mikroorganizmusok számára sem szén-, sem energiaforrásként nem jöhetnek szóba, megfelelő szubsztrátumok jelenlétében kometabolizmus útján alakíthatók át

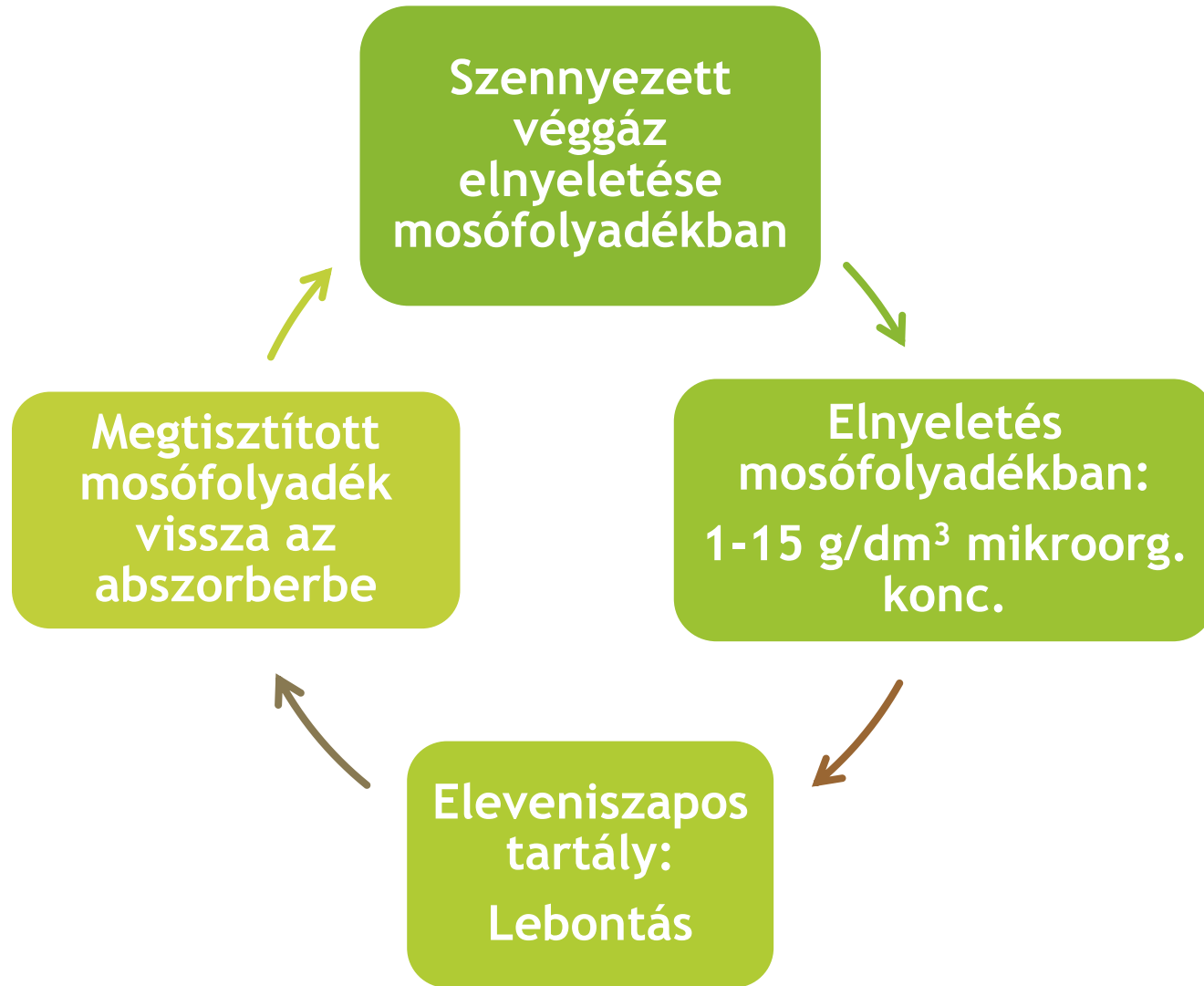
# Biológiai véggáztisztítás

- ▶ ha nem jut elég  $O_2$  a biofilmhez: diffúziós gátlás => nemkívánatos szerves vegyületek keletkezése  
-> intenzív levegőztetés
- ▶ eredetileg szennyvíztisztítók bűzeinek megszüntetésére
- ▶ bioszűrő anyaga: komposzt, rözse, széna, tőzeg, fakéreg, stb.

# Biológiai szűrő felépítése



# Biomosók

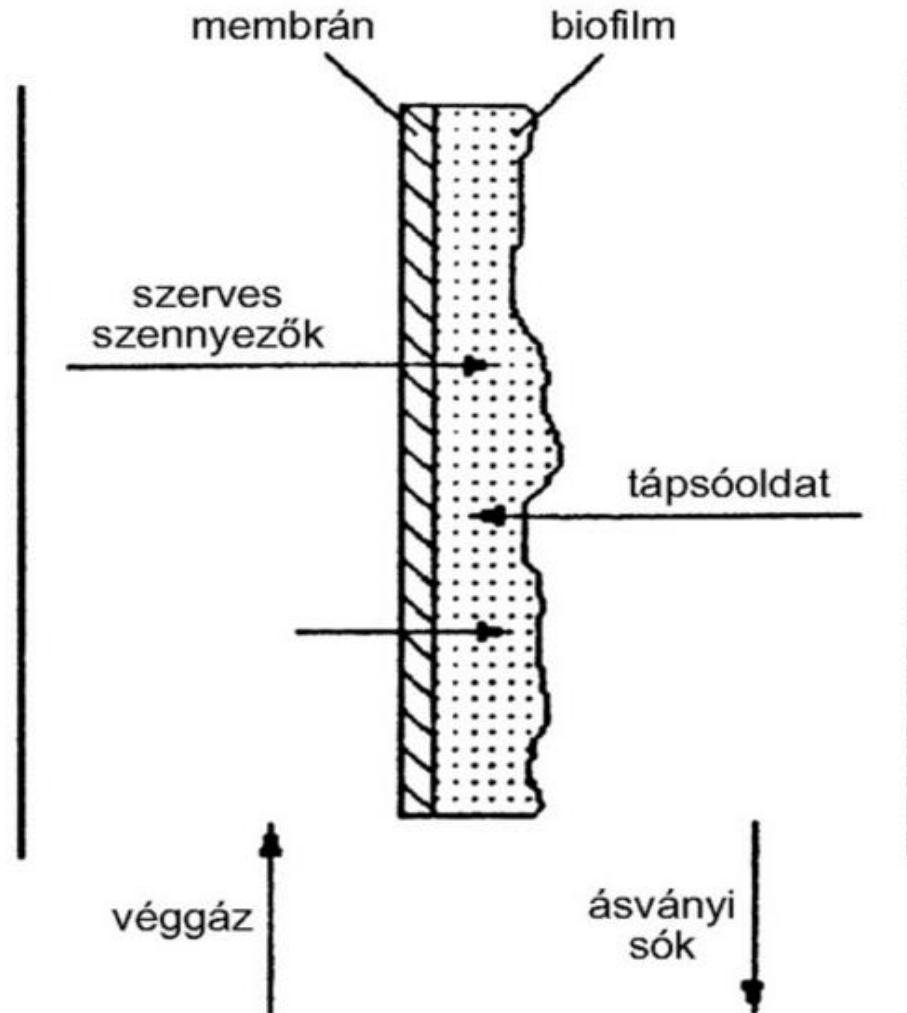


# Biológiai véggáztisztítás

- ▶ **Biokatalitikus véggáztisztítás:**
  - ▶ szuszpendált aktív szén a biofilm hordozója
  - ▶ immobilizált mikroorganizmusok nagyobb átalakítási teljesítménye
- ▶ **Bioreaktorok vagy csepegtetőtestes bioszűrők:**
  - ▶ mikroorg-ok mesterséges tölteten
  - ▶ felülről vízcsepegtetés
  - ▶ alulról tisztítandó gáz
  - ▶ abszorpciós és lebontási folyamat egy helyen

# Membrán bioreaktor

Vízben rosszul oldódó szerves szennyezők esetén

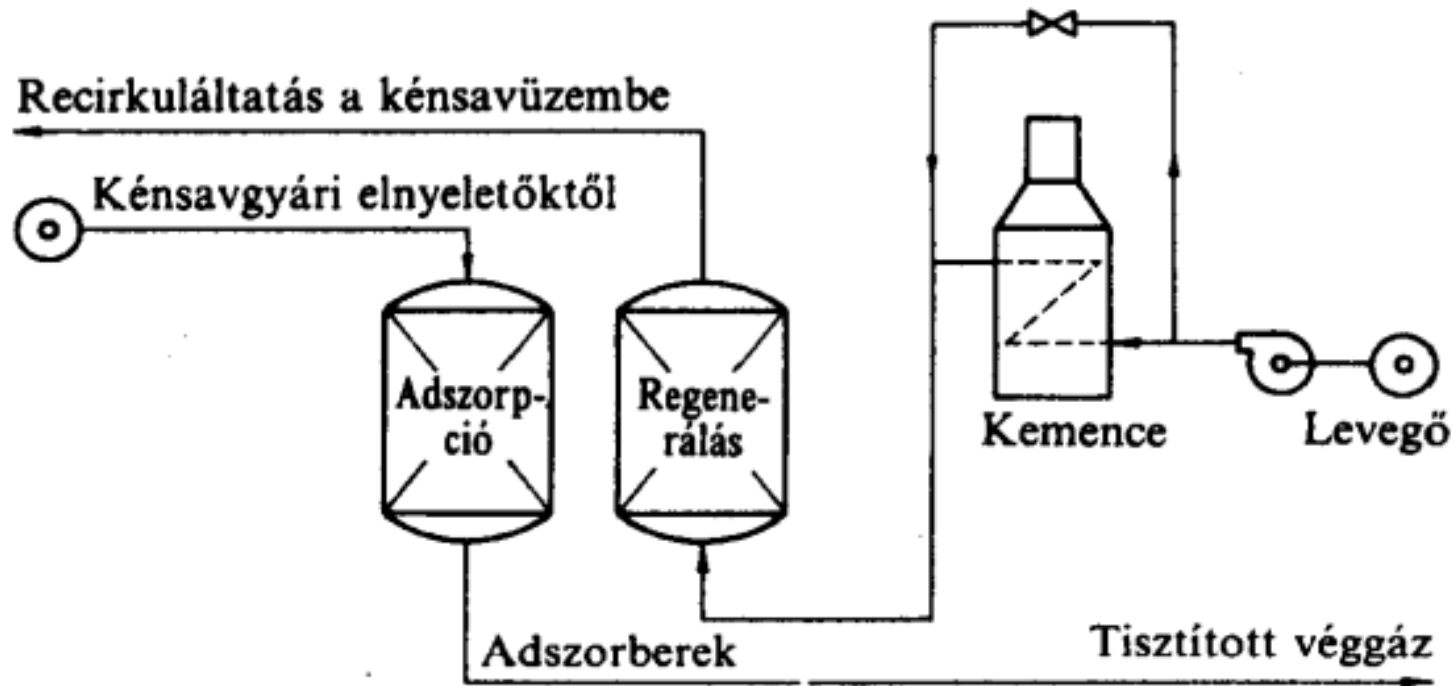




# Vegyipari emissziók csökkentése

- ▶ **Kénmentesítés:**
- ▶ **PuraSiv S eljárás:** Kontakt kénsavgyártás (lásd korábban) véggázában  $\text{SO}_2$  kezelésére:
  - ▶  $\text{SO}_2$ -vel telített molekulaszita ágyak melegítése után a levegővel deszorbeált  $\text{SO}_2$ -ot a kénsavgyárba visszavezetik. Tisztított véggázban 15-25 ppm  $\text{SO}_2$

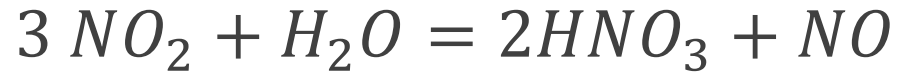
# Union Carbide PuraSiv S eljárás



A Coulton Chemicals PuraSiv S molekulaszűrős rendszerének folyamatábrája

# Vegyipari emissziók csökkentése

- ▶ A salétromsavgyártás véggázainak NO<sub>x</sub>-mentesítése:



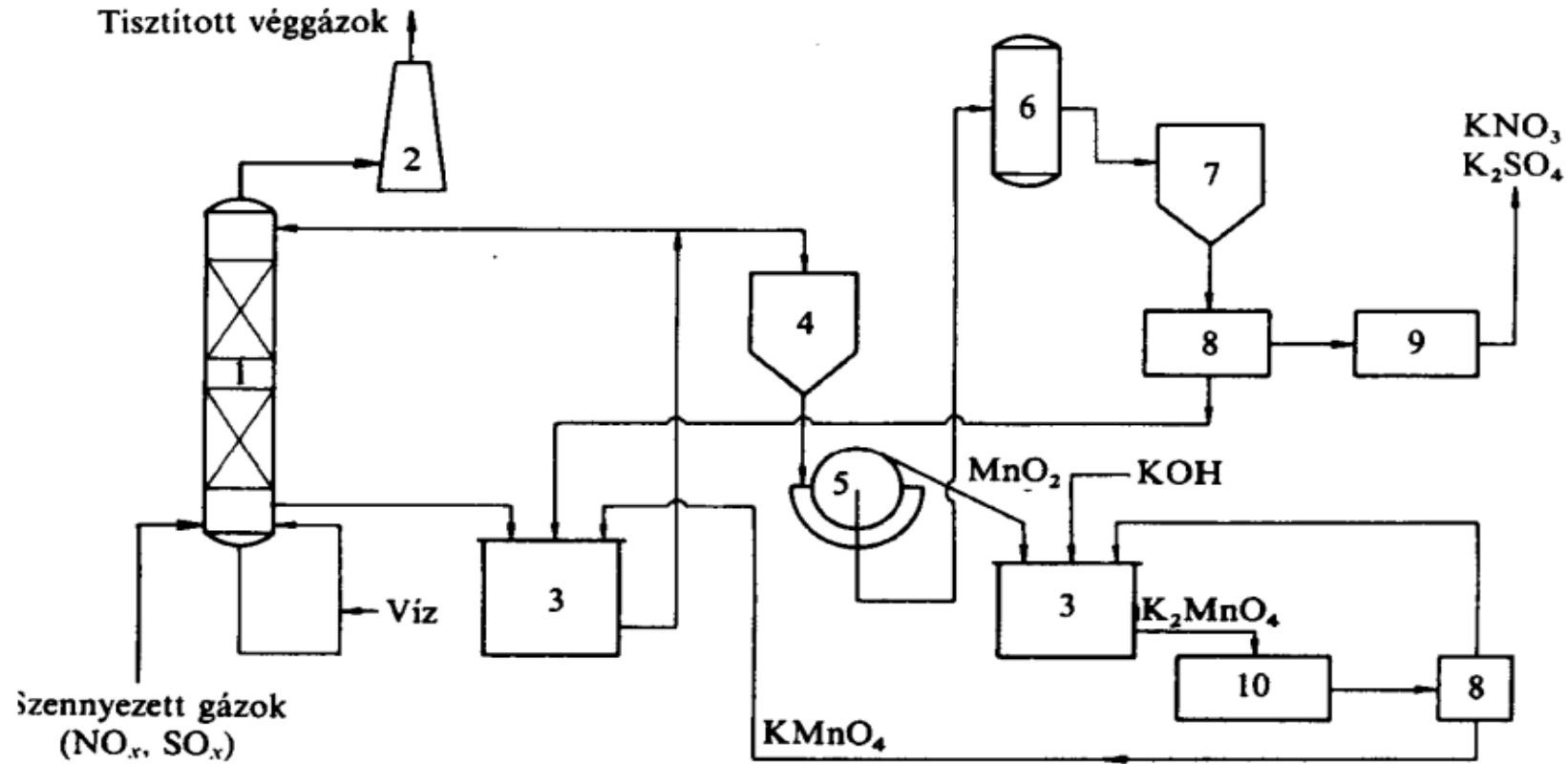
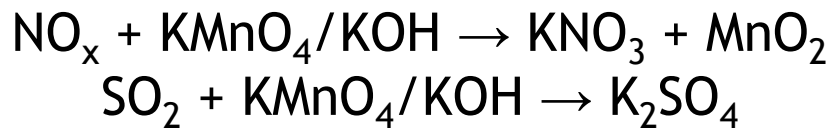
- ▶ NO<sub>2</sub> 2/3-a alakul csak át
- ▶ 3 v. 4 sorba kapcsolt elnyelető torony 96,3%, ill. 98,7% hatásfokot adna
- ▶ további csökkentés katalitikus reakcióval, vagy lúggal elnyeletés (NaOH, szódaoldat, CaO-os mésztej, stb.)
- ▶ salétromsavgyárban célszerű a molekulaszitán való adszorpció -> NO<sub>x</sub> recirkuláltatható

Pt-hálós konverterben  
NH<sub>3</sub> elégetése-> NO,  
NO<sub>2</sub>

NO oxigénnel NO<sub>2</sub>-dá  
alakul

NO<sub>2</sub> elnyeletése vízben  
-> HNO<sub>3</sub>

# Mitsubishi-eljárás

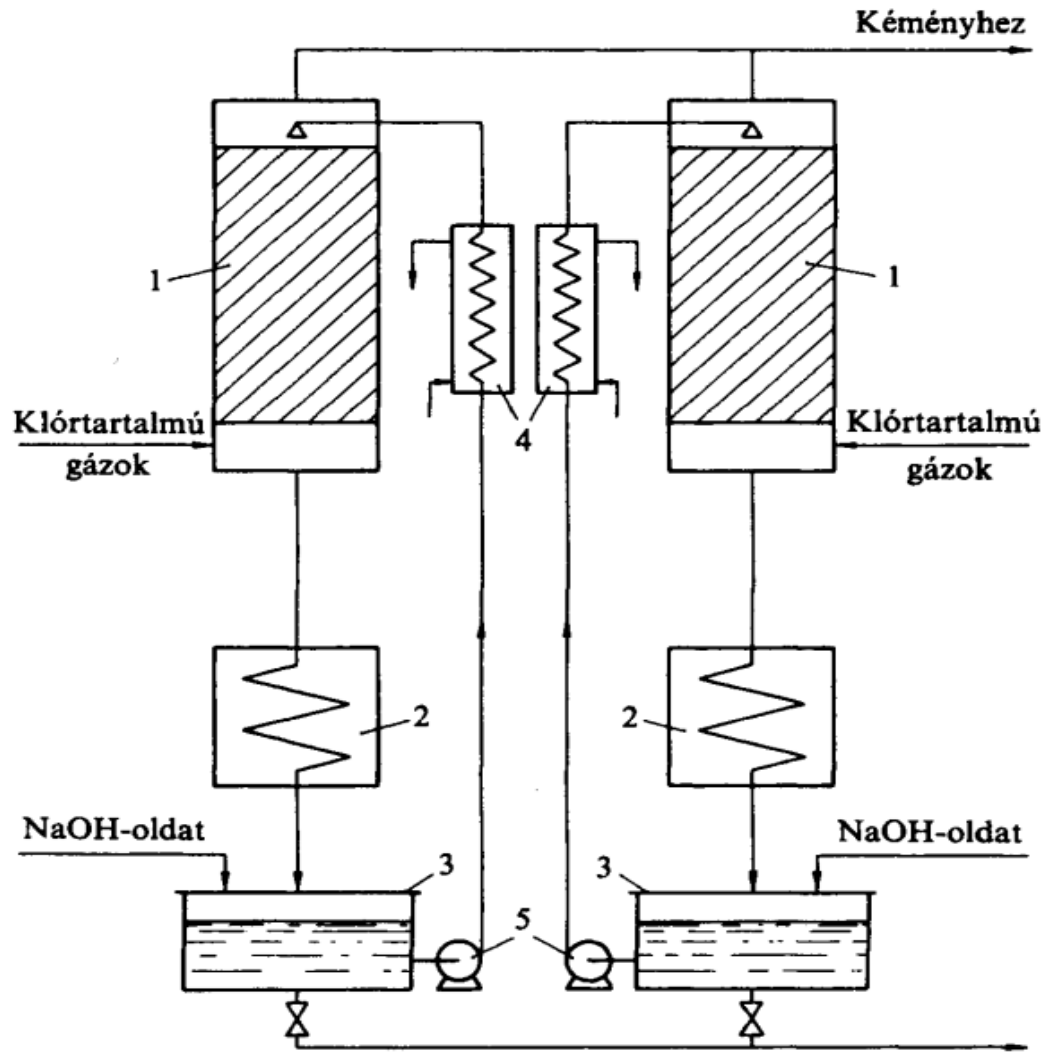


A Mitsubishi-eljárás folyamatábrája

1 – abszorber, 2 – kémény, 3 – tartály, 4 – sűrítő, 5 – szűrő, 6 – bepárló, 7 – kristályosító,  
8 – szeparátor, 9 – szárító, 10 – elektrolizálócellák

- 200 ppm NO<sub>x</sub>  
75%-ának
- 100 ppm SO<sub>2</sub>  
100%-ának  
eltávolítása

# Cl<sub>2</sub>-mentesítés: Na-hipoklorit gyártás



Nátrium-hipoklorit-oldat gyártásának folyamatvázlata

1 – abszorberek, 2 – hűtők, 3 – oldattároló tartályok, 4 – hűtők, 5 – szivattyúk



- 20-22%-os NaOH hűtött oldatával
- Raschig-gyűrűs oszlopokra
- Na-hipoklorit fehéritésre, fertőtlenítésre

# Cl<sub>2</sub>-mentesítés: CCl<sub>4</sub>-es mosással

- ▶ Klórgáz klórozott szerves oldószerekben jól oldódik -> eredmény 1 ppm-nél kevesebb klór a véggázban
- ▶ CCl<sub>4</sub>-ből melegítéssel és expandálással a klórt kidesztillálják, cseppfolyósításhoz visszavezetik

# Tüzelőanyagok és füstgázok kémentelenítése

# Vegyipari emissziók csökkentése: Kénmentesítés

- ▶ Természetes és antropogén kénkibocsátás a világon 60 és 87 millió tonna
- ▶ Antropogén források:
  - ▶ fosszilis tüzelőanyagok égetése, motorhajtóanyagok felhasználása,
  - ▶ biomassa égetése,
  - ▶ egyes technológiai folyamatok, elsősorban a kénsavgyártás
- ▶ Természetes források:
  - ▶ vulkáni tevékenységek,
  - ▶ kénes vízlelő helyek, források
  - ▶ talaj-emissziók,
  - ▶ óceánok kibocsátása,
  - ▶ biológiai bomlások
  - ▶ szerves anyagok bomlása.



# Vegyipari emissziók csökkentése: Kénmentesítés

- ▶ Magyarország: a kénkibocsátás 95 - 98 %-a a tüzelőanyag felhasználásokból származik
- ▶ Tüzelőanyagokban
  - ▶ szerves formában: merkaptánok, szulfidok, diszulfidok, heterociklusos komponensek
  - ▶ szervesetlen formában: szulfidok, szulfátok, piritkén
  - ▶ elemi kén
- ▶ Csoportosítás:
  - ▶ éghető kén: szulfid, pirités kén, szerves kén
  - ▶ hamu kén

# Vegyipari emissziók csökkentése: Kénmentesítés

- ▶ Kéntartalom  $\text{SO}_2$ -dá alakul:
  - ▶ emberi egészség károsítása
  - ▶ talaj, a felszíni vizek savasodása
  - ▶ ártalmas a növényzetre, épített környezetre
- ▶  $\text{SO}_3$  tartalom:
  - ▶ vízzel kénsavat képez
  - ▶ a kénsav a  $\text{NO}_x$ -mentesítésre használt katalizátorok számára mérgező
  - ▶ Képződhet a tüztérben is:
$$2 \text{NO} + \text{SO}_2 = \text{N}_2\text{O} + \text{SO}_3$$
- ▶  $\text{SO}_2/\text{SO}_3$  arány a légfeleslegtől függ

# Vegyipari emissziók csökkentése: Kénmentesítés

- ▶ széntüzelés esetén
  - ▶ csak a szerves S ég el, kerül füstgázba,
  - ▶ pirit kén oxidálódik
  - ▶ szervesetlen kénformák hamuban maradnak
- ▶ kéncsökkentő eljárások szén esetén a szervesetlen kénre állnak rendelkezésre (mérsékelt hatás)
- ▶ a szerves eredetű  $\text{SO}_2$  is reagálhat a hamu bázikus komponenseivel (Ca, Na, K, Mg)-> a hamu összetételét is figyelembe kell venni

# Égetés előtti kénmentesítés

## Szén fizikai tisztítása:

- ▶ szén törése 50 mm-nél kisebb darabokra: szervesetlen kén és hamuképző ásványok felszabadulása
- ▶ szitálás: durva, közepes és finom frakciók
- ▶ flotálás: hamu és kén komponensek elválasztása a porítás előtt, a nehezebb ásványok lesüllyednek
- ▶ szárítás: vákuum szűrés, centrifuga, ciklon segítségével választják el a vizet, majd forró levegős szárítás
- ▶ Pirit ( $\text{FeS}_x$ ), As, Se, Hg és a hamuképzők 60%-a eltávolítható
- ▶ az összes kén 10-25%-a távolítható el így

# Égetés előtti kénmentesítés

## Szén kémiai tisztítása:

- ▶ lúgos oldatokkal, oxidatív mosás, klóros mosás
- ▶ hátrány: szén tulajdonságainak megváltoztatása
- ▶ Előtisztítás hátránya:
  - ▶ költséges
  - ▶ energiaigényes
  - ▶ mosófolyadékkal mérgező fémek távoznak, amit kezelni kell

# Égetés előtti kénmentesítés

## Olaj-, gázfinomítás:

- ▶ A nyersolaj, földgáz kéntartalma katalizátorméreg a későbbi finomítás során
- ▶ Szigorú környezetvédelmi szabályozás kényszerítő erejű
- ▶ Elemi kén fontos mellékterméke az olajfinomításnak, alapanyaga a műtrágya-gyártásnak és kénsavgyártásnak.
- ▶ A kén komponenseket aminokkal abszorbeálják , majd az abszorbenst regenerálják, a  $\text{H}_2\text{S}$ -t pedig koncentrálnak (>50-60%  $\text{H}_2\text{S}$ ), majd tovább kezelik

# Claus-eljárás

## Termikus lépés:

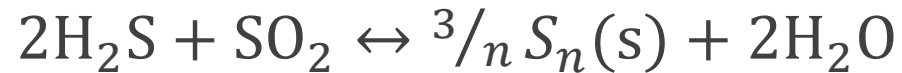
- ▶ A kén-hidrogén 1/3-a  $\text{SO}_2$ -dá oxidálódik:



- ▶ a keletkező gázáramban  $\text{H}_2\text{S}:\text{SO}_2 = 2:1$

## Katalitikus lépés:

- ▶  $\text{H}_2\text{S}$  reagál  $\text{SO}_2$ -dal elemi S képződése közben



( $\Delta H = -108 \text{ kJ/mol}$ )  $200\text{-}350 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $n=8$  általában

- ▶ katalizátor: aktív Al, bauxit, Co, Mo hidrogénező katalizátorok
- ▶ S elválasztása: hűtés, kondenzálás
- ▶ 2 ill. 3 lépésben 95 ill. 97%-os hatásfok



# Tüzelőanyag helyettesítés

- ▶ Szén a legszennyezettebb, földgáz a „legtisztább” energiaforrás
- ▶ folyékony és gáz tüzelőanyagokból nem keletkezik hamu -> belső égésű motorok, turbinák
- ▶ szén-olaj együttégetés
- ▶ szén alapú kazán könnyen alakítható gázüzeművé
- ▶ gázolaj helyettesítése földgázzal, vagy propánnal a VOC szennyezést csökkenti
- ▶ biodízel: kén-, nitrogén emisszió majdnem 0, szilárd részecskékről változó adatok

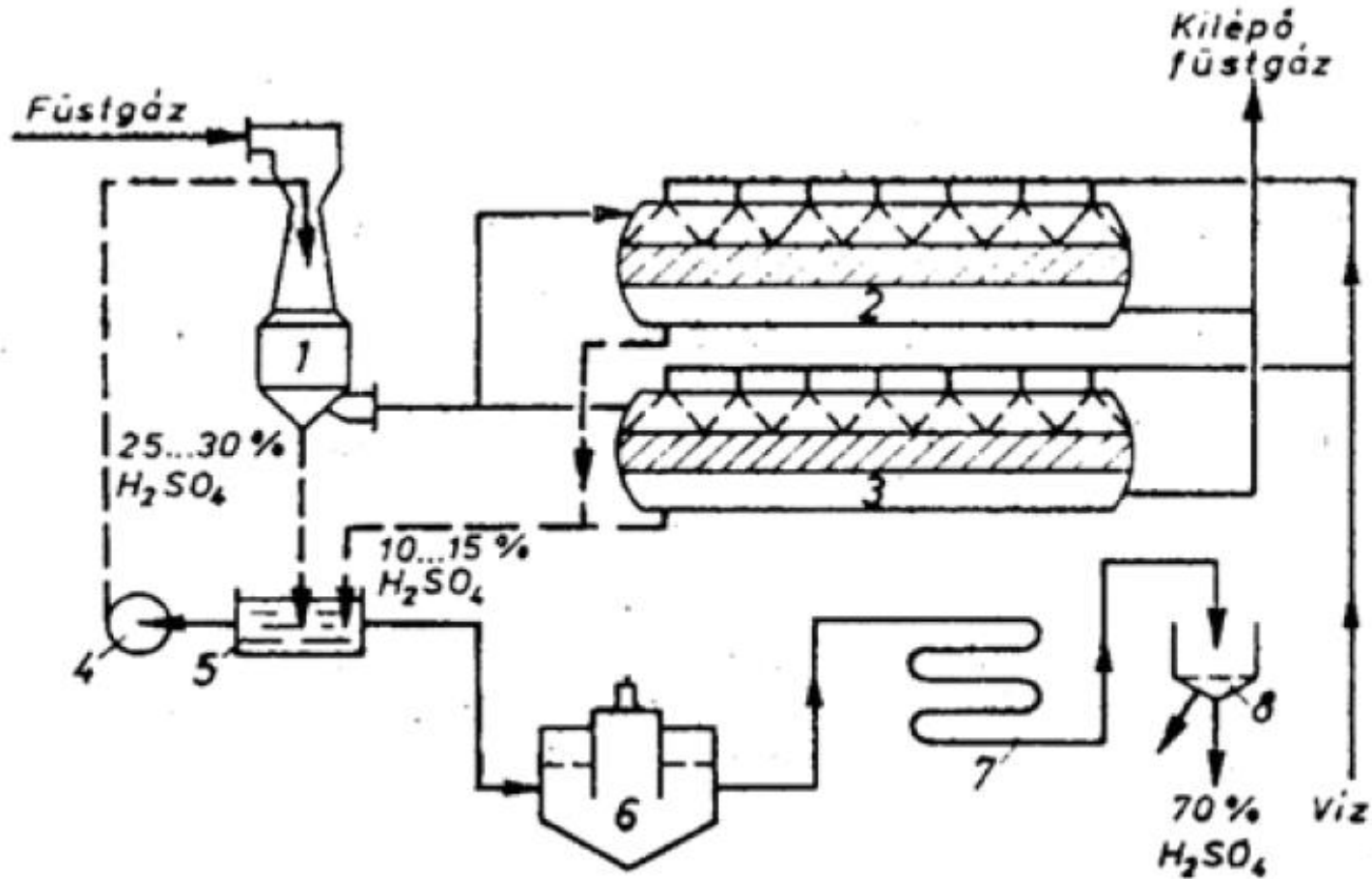


# Adszorpciós elven működő kéntelenítők

## Szulfacid eljárás:

- ▶ portalanított, lehűtött füstgázt aktív szén ágyra vezetik,
- ▶ a  $\text{SO}_2$   $\text{SO}_3$ -dá alakul a levegő oxigénjének hatására
- ▶  $\text{SO}_3 + \text{vízgőz} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$
- ▶ aktív szénből a  $\text{H}_2\text{SO}_4$ -at vízzel kimossák  $\rightarrow$  10-15%-os  $\text{H}_2\text{SO}_4$  oldat  $\rightarrow$  füstgáz hűtésére Venturi mosóban  $\rightarrow$  25-30%-ra töményedés

# Szulfacid-eljárás



1. Venturi-mosó, 2. 3. nyugvó aktív szén ágy, 4. keringtető szivattyú, 5. tartály, 6. merülőfejes kénsavbepárló, 7. savhűtő, 8. savszűrő

# Adszorpciós elven működő kéntelenítők

## Reinluft eljárás

- ▶ adszorbens: tőzegtől félkoks, oxikoks
- ▶ adszorber:
  - ▶ 150° C-ra hűtött füstgáz bevezetése
  - ▶  $\text{SO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$
  - ▶ tisztított füstgáz torony tetején kilép
- ▶ deszorber:
  - ▶ kénsav deszorbeálása a telített aktív szénről 370-450° C-on ->  $\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O}$
  - ▶  $\text{SO}_3$  a szénen  $\text{SO}_2$ -dá redukálódik +  $\text{CO}_2$
  - ▶ 10-15%  $\text{SO}_2$ -ot tartalmazó gáz kénsavüzembe

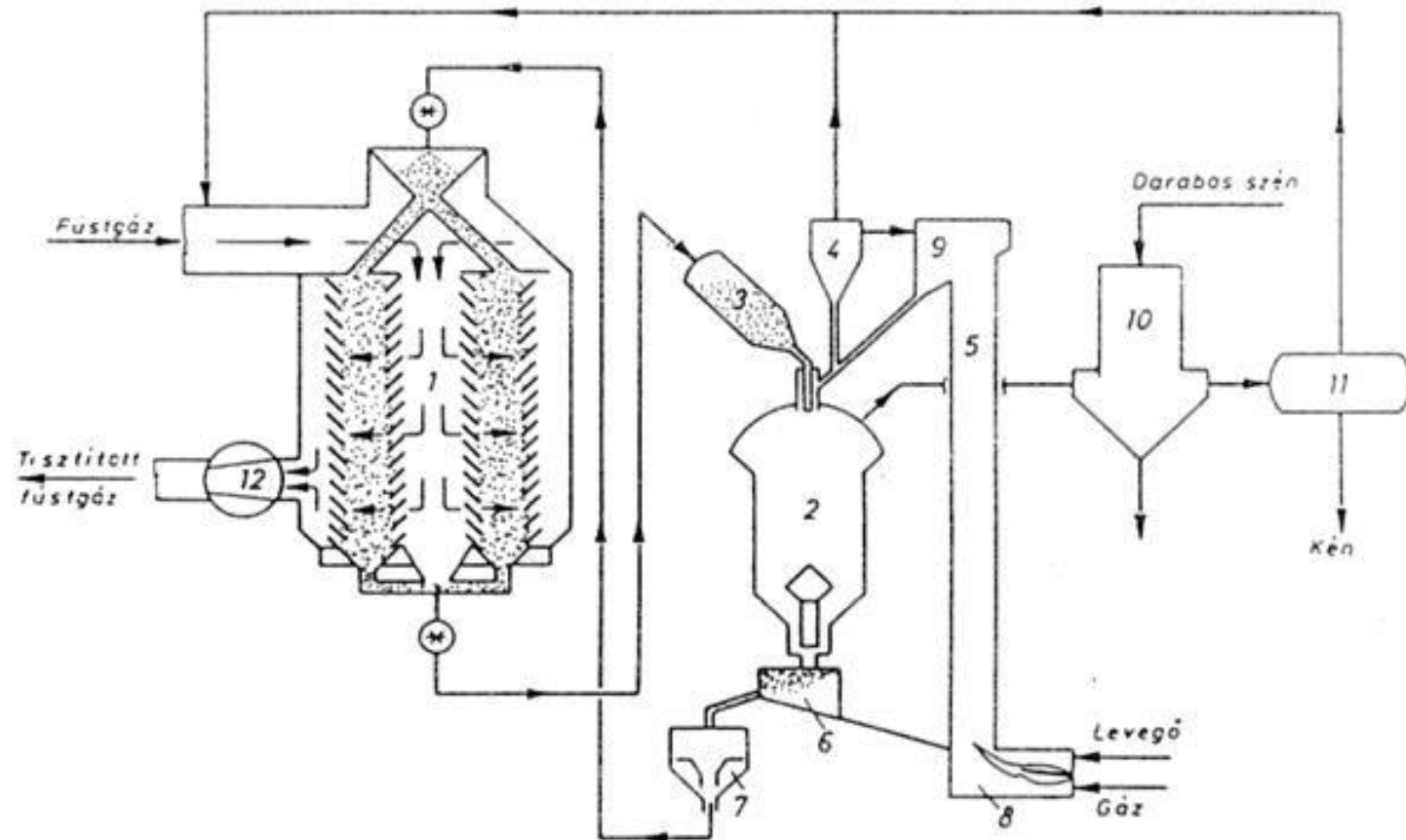
# Adszorpció elven működő kéntelenítők

## Bergbau-Forschung eljárás (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> szimultán leválasztás)

- ▶ adszorbens: mozgó aktív kokszt ágy
- ▶ adszorber:
  - ▶ SO<sub>2</sub> -> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>
  - ▶ közel szelektív ammóniás NO<sub>x</sub> redukció valósul meg
$$\text{NO}_x + \text{NH}_3 \rightarrow \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$$
  - ▶ adszorber alja felé vándorló aktív kokszt telítődés után a regenerálóba
- ▶ deszorber:
  - ▶ 800°C-os homokkal keverve 650°C-on: deszorpció, bomlás, redukció
  - ▶ H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>->SO<sub>3</sub>+H<sub>2</sub>O
  - ▶ szén a SO<sub>3</sub>-at SO<sub>2</sub>-vé redukálja
  - ▶ aktív kokszt, homok elválasztása szitálással -> kokszt vissza az adszorberbe
  - ▶ 600-800°C-on 20 tf%-os SO<sub>2</sub> -> elemi S :  $\text{C} + \text{SO}_2 = \text{CO}_2 + \text{S}$
  - ▶ kéngőzt lekondenzáltatják

# Bergbau-Forschung eljárás

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



# Adszorpció elven működő kéntelenítők

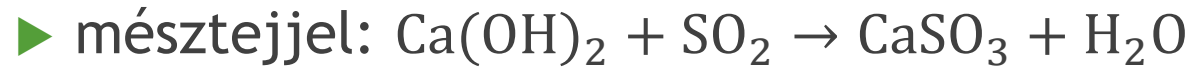
- ▶ adszorbens anyag a füstgázáramba injektálása
- ▶ adszorbens:  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Ca}_3\text{O}_4$
- ▶  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ , dioxin, furán is eltávolítható

# Nedves-abszorpciós füstgáztisztítás

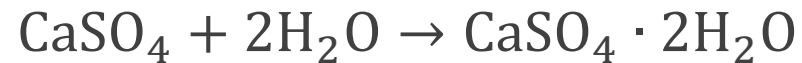
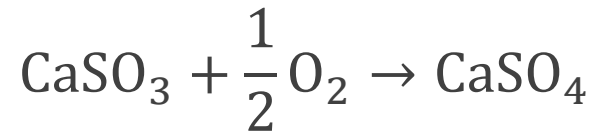
- ▶ A nedves „mosók” a kénmentesítési eljárások 87%-át teszik ki
- ▶ Előny: elnyelető folyadék mozgatása, kezelése könnyű; gáz-folyadék tömegátadás jó
- ▶ Hátrány: a keletkező szennyvíz és iszap elhelyezése
- ▶ Legrégebbi eljárás: földalkáli vegyületekkel történő nedves mosás
- ▶ mészkőpor (kénmentesítők 82%-a), dolomitpor, oltott mész, magnézium-oxid

# Meszes abszorpciós eljárás

- ▶ abszorber: mésztej vagy finom szemcsézetű mézskőpor 8-13 %-os szuszpenziója



- ▶ alul bevezetett levegő hatására gipsz:

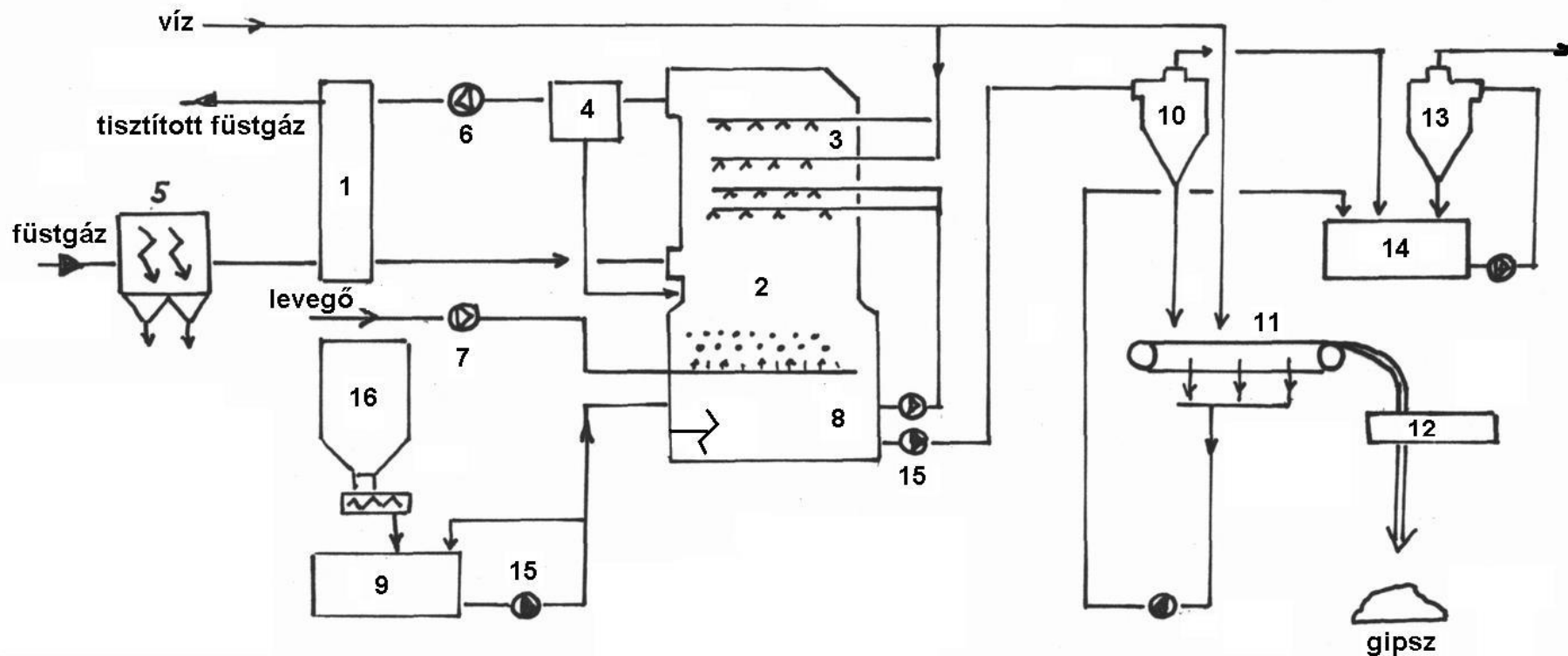


- ▶ a gipsz értékesíthető
- ▶ abszorpció hatásfoka a hőmérséklet csökkenésével nő, folyadékveszteség is kevesebb -> füstgáz hűtése
- ▶ utána az abszorberből kilépő füstgáz visszamelegítése:
  - ▶ savharmatponti problémák miatt



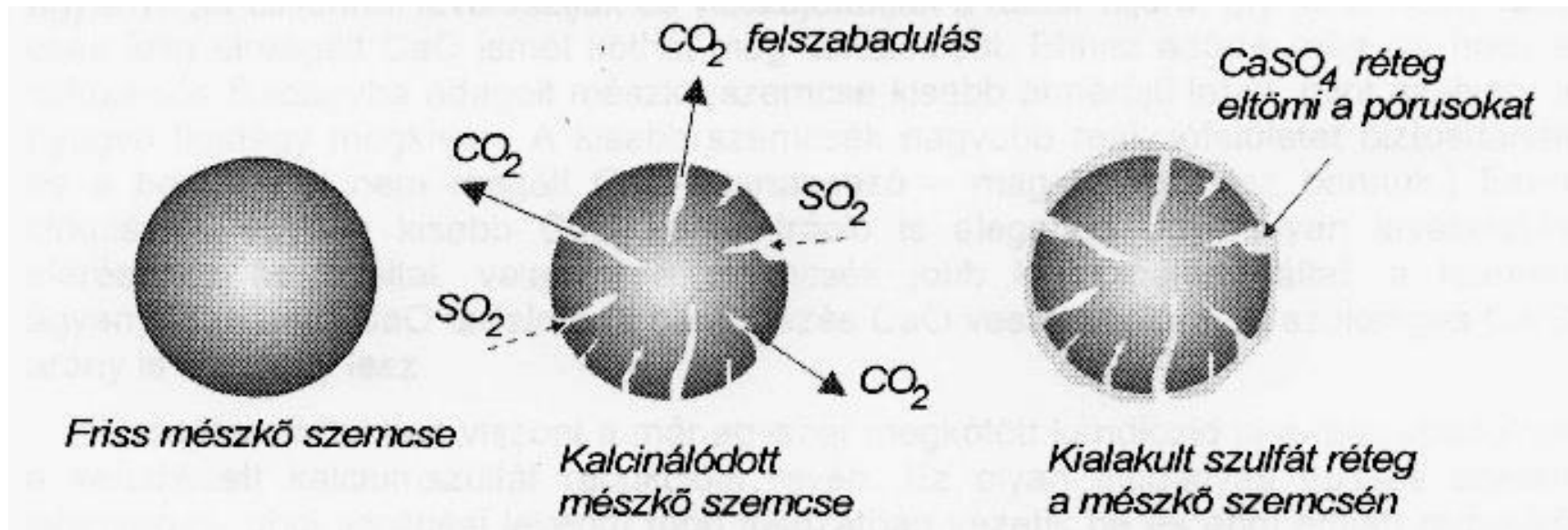
# Meszes-abszorpció eljárás

1. hőcserélő, 2. abszorber, 3. permetező elemek, 4. csepplévasztó, 5. porlevélasztó, 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. mészkő tartály



# A mészkeő és a kén-dioxid reakciója száraz eljárásnál

- Fluidizációs kazánban porszénhez mészkeőpor adagolása

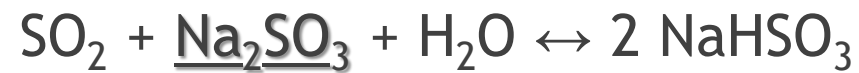


# Abszorpció Na-vegyületekkel

- ▶ Abszorbens: nátronlúg vagy a nátriumsók vizes oldata
- ▶ nincs eldugulás, lerakódás, erózió

## Wellman-Lord eljárás

Elnyeletés:



Mosóoldat regenerálás:

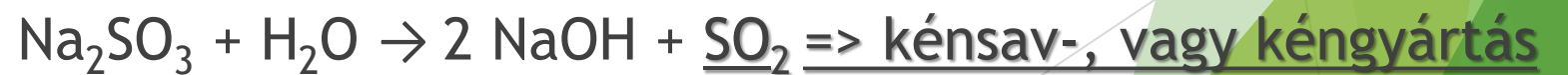


Mellékreakciók:



Nátrium-veszteség pótlása:  $\text{NaOH} + \text{NaHSO}_3 \leftrightarrow \text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O}$

Regenerálás 110°C-on:



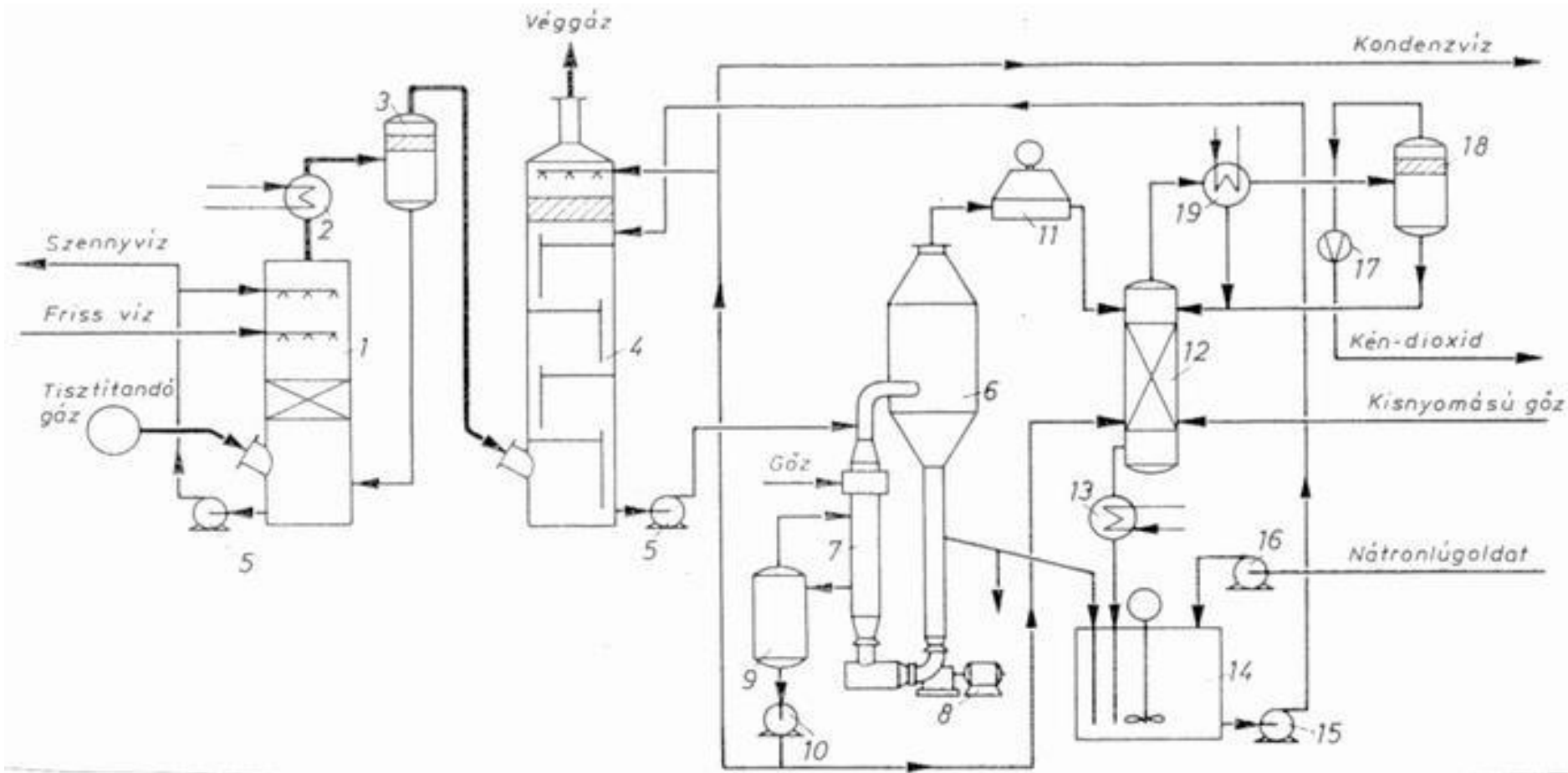
# Abszorpció Na-vegyületekkel

## Wellman-Lord eljárás

- ▶ füstgáz kvencs toronyba: hűtés, szilárd komponensek leválasztása
- ▶ abszorberben ellenáramú szulfitos mosófolyadékkal mossák
- ▶ biszulfitos mosófolyadék bepárlóba
- ▶ kristályzagy ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) elválasztása az anyalúgtól
- ▶ keletkező 60%  $\text{SO}_2$ -t tartalmazó gázt kénsavgyártásnál használják fel vagy elemi ként állítanak elő belőle

# Wellman-Lord eljárás

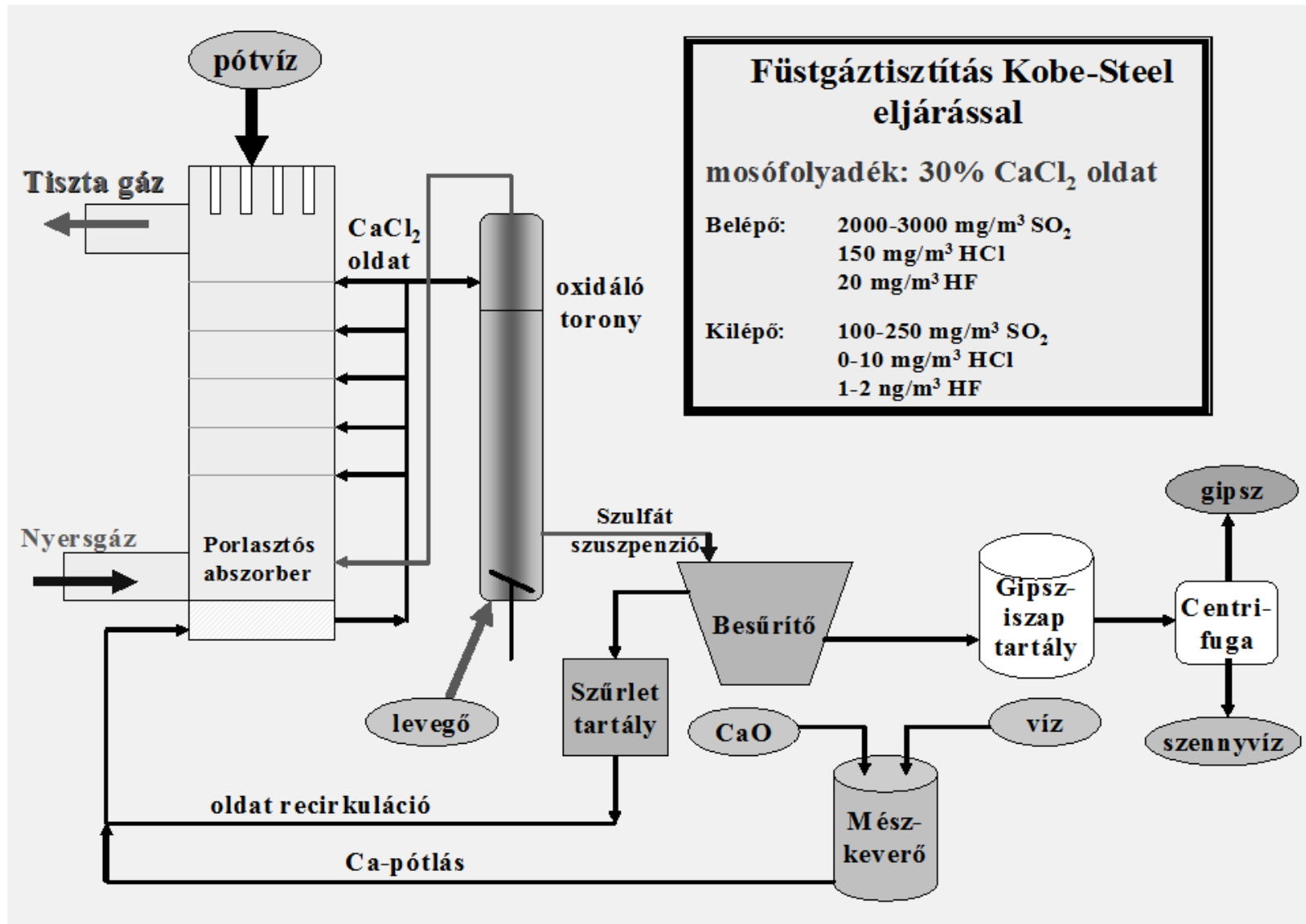
1. vizes előmosó, 2. 11.13. 19. hőcserélő, 3.18. csepplévasztó, 4. abszorber, 5. 8.10.15.16. szivattyú, 6.7. bepárló kristályosító, 8. kondenzvíz tartály, 12. kihajtó oszlop, 14. oldótartály, 17. kén-dioxid kompresszor



# Kobe-Steel-eljárás

- ▶ mosófolyadékként 30 %-os  $\text{CaCl}_2$ -oldat
- ▶ porlasztásos abszorberben
- ▶ többszörös recirkuláció
- ▶  $\text{CaSO}_3$  tartalmú oldat oxidáló toronyba -> szulfát szuszpenzió
- ▶ ülepités és centrifugálás -> kristályvizes kalcium-szulfát -> égetés után építőipari gipszként hoznak forgalomba

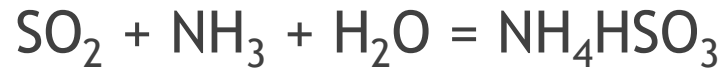
# Kobe-Steel-eljárás



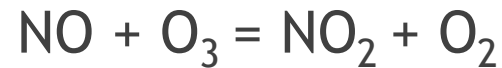
# Nedves DENOX eljárások

## ► Oxidációs - redukációs eljárás

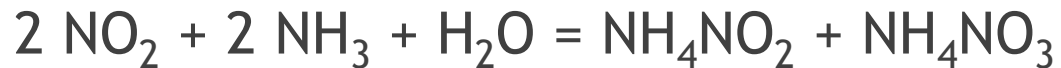
1. lépés: Kéntelenítés ammónium-szulfid oldatban:



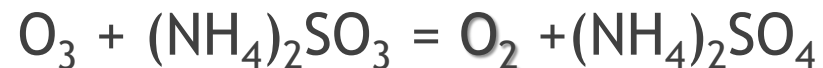
2. lépés: NO-tartalom oxidálása ózonnal:



3. lépés: Elnyeletés  $\text{NH}_3$ -oldatban:



4. lépés: Mosás, maradék  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$  elnyeletése:





# Nedves DENOX eljárások

- ▶ Abszorpció - redukció
- ▶ Vas(II)etiléndiamin-tetraacetát oldatban nyeletik el a nitrogén- és kén-oxidokat párhuzamosan:



# Száraz DENOX eljárások

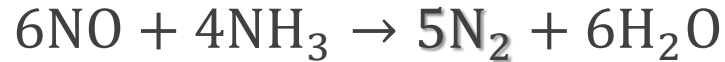
- ▶ **Előnyök:**
  - ▶ kisebb befektetési költség,
  - ▶ egyszerűség,
  - ▶ kevesebb hulladék képződése,
  - ▶ magasabb NOx eltávolítási hatások
- ▶ **Adszorpció itt nem alkalmazható:**
  - ▶ nincs hatásos adszorbens (zeolit, szilikagél, aktív szén nem hatásosak)
- ▶ **A redukciós eljárásoknak négy csoportja:**
  - ▶ nem-szelektív, nem-katalitikus redukció (NSNCR);
  - ▶ szelektív nem-katalitikus redukció (SNCR);
  - ▶ nem-szelektív katalitikus redukció (NSCR);
  - ▶ szelektív katalitikus redukció (SCR).

# Nem-szelektív, nem-katalitikus redukció (NSNCR)

- ▶ nagy redukálószer (szénhidrogén) felesleg
- ▶ a redukáló ágens először a véggázban lévő oxigént fogyasztja el, utána lép reakcióba a nitrogénoxidokkal
- ▶ magas hőmérsékleten: 750-800 °C -> energiaigényes
- ▶ teljes NO<sub>x</sub> redukcióhoz jelentős szénhidrogén-felesleg szükséges -> C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> emisszió további gondot okoz
- ▶ alkalmazása **nem terjedt el** széles körben

# Szelektív nem-katalitikus redukciós (SNCR)

- ▶ redukálószer: NH<sub>3</sub> preferáltan a nitrogén-oxidokkal reagál



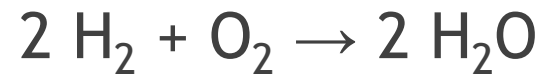
- ▶ homogén gázfázisú reakció, szűk hőm. intervallum: 850 - 1050 °C
- ▶ magas NH<sub>3</sub>/NO<sub>x</sub> arány -> ammónia emisszió
- ▶ nem alkalmazható:
  - ▶ mozgó források esetén: az ammónia tárolása és adagolása nehezen megoldható
  - ▶ széntüzelésű erőművekben: a szálló hamu adszorbeálhatja az ammóniát

# Nem-szelektív katalitikus redukció (NSCR)

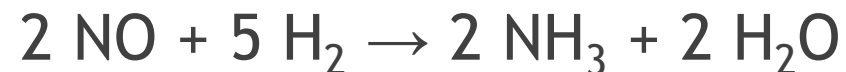
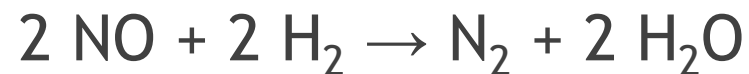
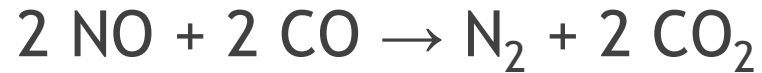
- ▶ gépjármű katalizátorokban: kerámiából készített monolitvázon rögzített  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  hordozón katalitikus hatású komponensek (*Pt*, *Rh*, *Pd*)
- ▶ sztoichiometrikus levegő/üzemanyag arány
- ▶ 400-600 °C alakítja át a CO, CH, NO<sub>x</sub> komponenseket

# Nem-szelektív katalitikus redukció (NSCR)

► oxidáció (*Pt* és *Pd*):

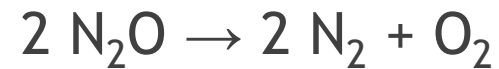
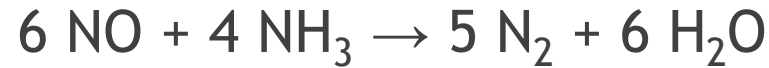


► *NO* redukció (*Rh*):



# Nem-szelektív katalitikus redukció (NSCR)

- ▶ kisebb valószínűséggel lejátszódó reakciók:



- ▶ Ha a levegő/benzin arány nem sztöchiometrikus:
  - ▶ légfelesleg (szegény keverék): NO<sub>x</sub> redukció csökken
  - ▶ dús keverék esetén: oxidációs reakciók hatásfoka csökken
- ▶ nemesfémek miatt költséges, visszanyerésük nem megoldott, egészségkárosító hatás
- ▶ hidegperiódus hatását csökkenteni kell
  - ▶ katalizátor elektromos előmelegítése
  - ▶ motorközeli elhelyezése
  - ▶ indítókatalizátor alkalmazás, stb.
- ▶ **Fontos: katalizátor élettartamának, a szennyezőkkel szembeni ellenállásának növelése**

# Szelektív katalitikus redukció (SCR)

- ▶  $\text{NO}_x$ -kat ammóniával nitrogénné és vízzé alakítják
- ▶ 150-450° C, alkalmas katalizátoron
- ▶ CO,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , szénhidrogének nem szelektívek, először oxigénnel reagálnak
- ▶ katalizátor:
  - ▶ hordozós nemesfémeket (Pt, Pd),
  - ▶ keverékoksidok ( $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$  )
  - ▶ módosított zeolitok

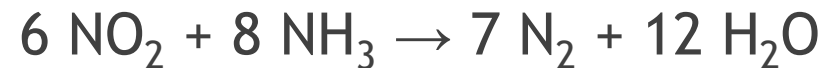


Erőművi SCR konverter  
(fém-monolitváz) katalizátor:  
 $\text{V}_2\text{O}_5\text{-TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$



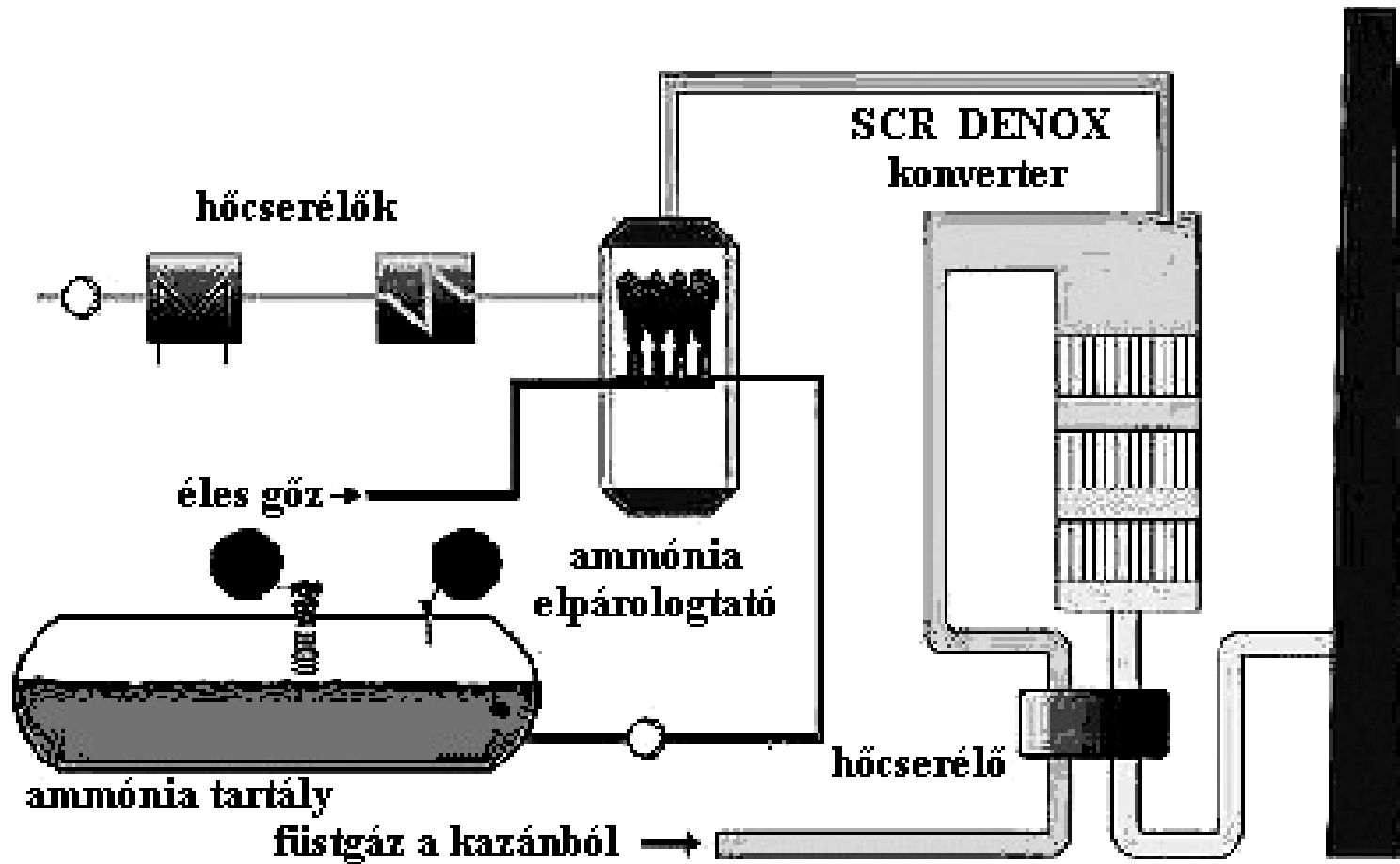
# Szelektív katalitikus redukció (SCR)

- ▶ hordozós vanádium-oxid (nagy aktivitás):



- ▶  $\text{SO}_2$ -dal szemben ellenálló
  - ▶ 0,6-0,9  $\text{NH}_3/\text{NO}_x$  mólarány  $\rightarrow$  ammónia emisszió csak 1-5 ppm
  - ▶ rendszernek három eleme:
    - ▶ megfelelő reaktorban elhelyezett katalizátor,
    - ▶ ammónia injektor rendszer
    - ▶ ammónia tároló egység
- > működtetése bonyolult

# SCR eljárás alkalmazása erőművi füstgázok NO<sub>x</sub>-tartalmának átalakítására



# Szelektív katalitikus redukció (SCR)

- ▶ elsősorban helyhez kötött források esetén ( $\text{NH}_3$  tartály, adagoló mozgatása problémás)
- ▶ katalizátor dezaktiválódás:
  - ▶ a magas hőmérséklet miatti öregedés:  
450° C fölött az ammónia exoterm oxidációja -> lokális túlmelegedés ->  $\text{V}_2\text{O}_5$  megolvadhat
  - ▶ katalizátormérgek:
    - ▶  $\text{SO}_x$ ,
    - ▶ 350° C alatt képződő ammóniumsulfátok ( $\text{NH}_4\text{HSO}_4$ )
    - ▶ hamuban lévő fénoxidok (széntüzeléskor)
  - ▶ a poros közeg mechanikai koptató hatása

# Szelektív katalitikus redukció (SCR)

- ▶ több sorba kapcsolt egység
- ▶ élettartam a tüzelőanyagtól függ:
  - ▶ széntüzelés: 2-3 év;
  - ▶ fűtőolaj-tüzelés: 4-5 év;
  - ▶ gáztüzelés: 5-6 év.

▶ 350-370°C a kedvező tartomány

▶ <350°C  $\text{NH}_4\text{HSO}_4$

▶ >370°C  $\text{NH}_3$  oxidálódás

▶ élettartam szempontjából ideális:

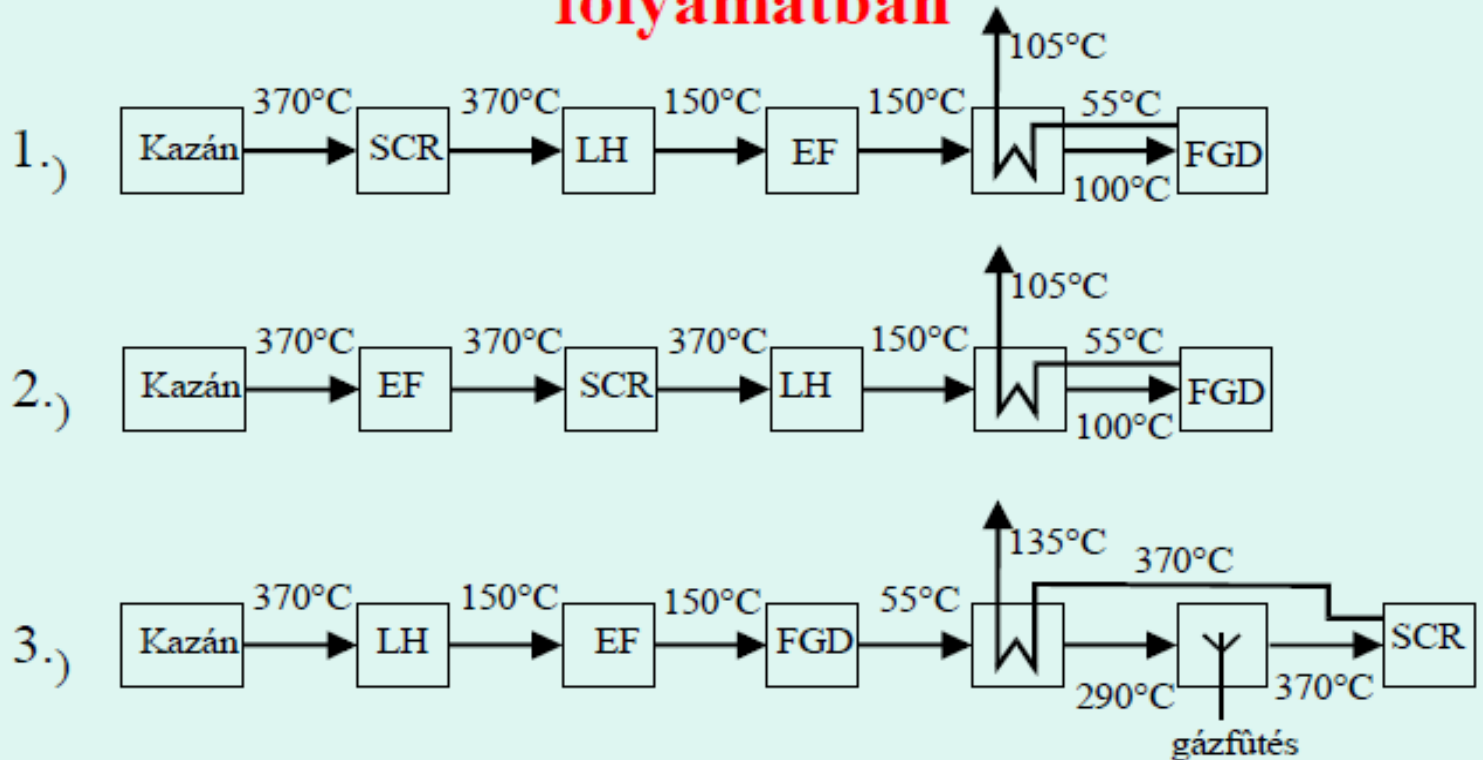
▶ EF (koptató hatás),

▶ FGD (SOx kat.méreg) megelőzi az SCR-t

▶ olajtüzelés: EF nem kell

▶ földgáztüzelés: FGD nem kell

## Az SCR helye a füstgáztisztítási folyamatban



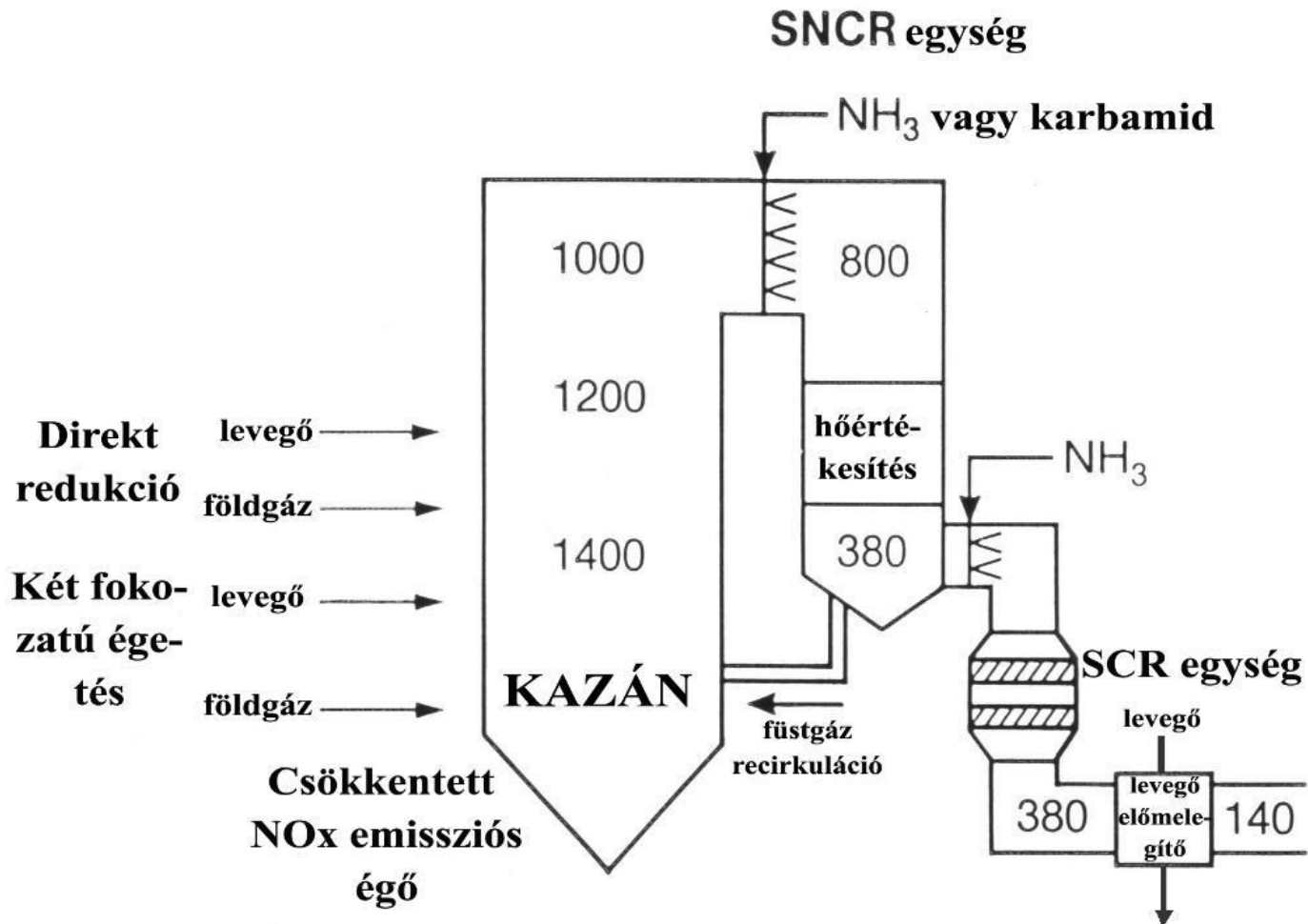
jelölés: SCR: Szelektív katalitikus redukáló berendezés

LH: Léghevítő

EF: Elektrofilter

FGD: Füstgázkéntelenítő

# Összefoglaló ábra: NO<sub>x</sub> mentesítési technológiák



# Gépkocsik káros emissziójának csökkentése

- ▶ Belső égésű motorok a hajtóanyag elégetésével nyert hőenergiát mechanikai munkává alakítják át, kipufogógázt bocsátanak ki
- ▶ Kipufogógázokban kb. 400 féle összetevő: csak a  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2O$  környezetbarát
- ▶ Sajátos tulajdonságú környezet-szennyezés:
  - ▶ ősszel - télen: inverziós szmog
  - ▶ nyáron: Los Angeles típusú szmog

# Gépkocsik káros emissziójának csökkentése

- ▶ Emissziót befolyásoló tényezők:
  - ▶ motor konstrukció
  - ▶ üzemeltetési körülmények
  - ▶ üzem-, kenőanyagok összetétele
  - ▶ kipufogógáz-tisztító berendezéstől



# 77/2009. (XII. 15.) KHEM-IRM-KvVM együttes rendelet a közúti járművek környezetvédelmi felülvizsgálatának szabályairól

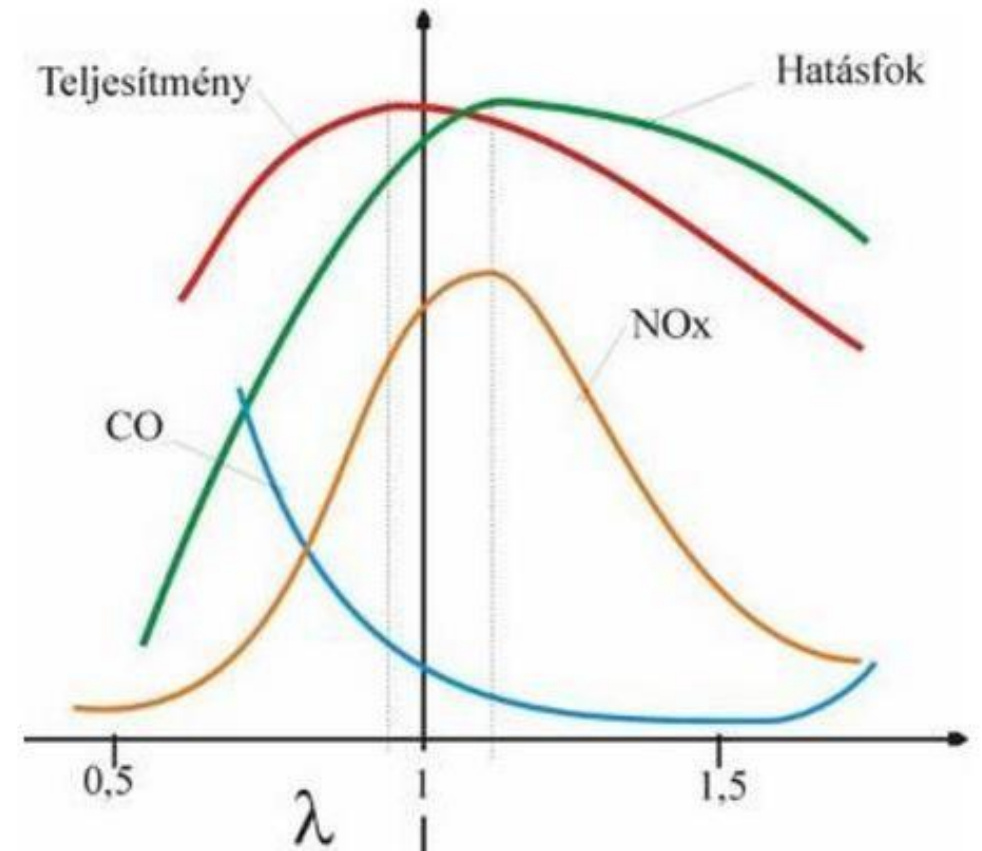
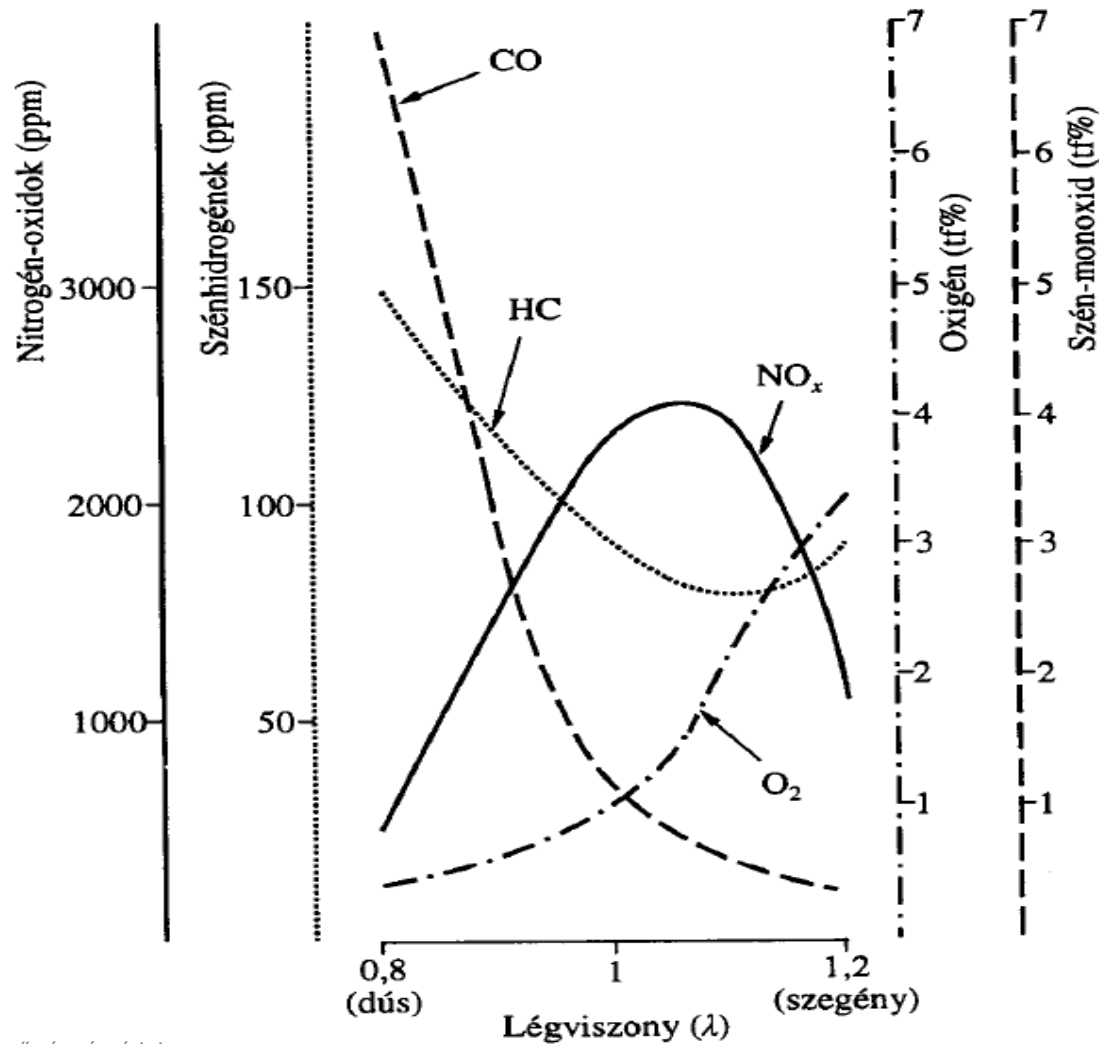
- ▶ Hagyományos benzinmotoros járművek és szabályozatlan keverékképzésű, katalizátoros járművek vizsgálata
- ▶ A szabályozott keverékképzésű, katalizátoros (benzinmotoros) jármű felülvizsgálata
- ▶ Kompresszió gyújtású motorral szerelt járművek vizsgálata
- ▶ Monovalens gáznemű tüzelőanyaggal (pl. földgáz, LPG, hidrogén) üzemelő járművek
- ▶ Bivalens (kettős) tüzelőanyaggal működő járművek
  - ▶ Gáznemű üzemanyag/motorbenzin,
  - ▶ Gáznemű üzemanyag/kompressziós gyújtású motorok üzemanyaga,
  - ▶ Elektromos hajtás/belsőégésű motoros üzem

# Magyarország közúti gépjármű állománya

	Közúti járművek száma év végén (db)	Közúti személygépjárművek száma év végén (db)	Közúti gépjárművek száma év végén (db)	Közúti autóbuszok száma év végén (db)	Közúti tehergépjárművek száma év végén (db)
1985. év		1 435 937		24 854	157 136
1990. év		1 944 553		26 121	224 061
1995. év		2 245 395		20 223	292 144
2010. év	4 123 481	2 984 063	3 608 834	17 641	403 114
2014. év	4 317 752	3 107 695	3 778 002	17 923	417 536

Komponens megnevezése	Otto-motornál	Dízelmotornál	Hatás
			<b>Nem mérgezők:</b>
Nitrogén (N <sub>2</sub> )	74-77 tf%	76-78 tf%	nem szennyező
Oxigén (O <sub>2</sub> )	0,1-3 tf%	2-14 tf%	nem szennyező
Vízgőz (H <sub>2</sub> O)	3-6 tf%	0,5-6 tf%	nem szennyező
Széndioxid (CO <sub>2</sub> )	5-12 tf%	1-6 tf%	szennyező
			<b>Mérgezők:</b>
Szénmonoxid (CO)	0,5-10 tf%	100-2000 ppm	nem rákkeltő
Nitrogénoxidok (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>	igen erős rákkeltő

# Otto-motor kipufogógáz összetétele légviszony függvényében



# Légviszony, légfelesleg ( $\lambda$ - tényező)

- ▶ meghatározza, hogy benzinben dús vagy szegény a motor hengereiben elégetendő keverék
- ▶ Az Otto-motor a legnagyobb teljesítményt  $\lambda = 0,8$  körüli légfeleslegnél (viszonylag dús keverék) szolgáltat,
- ▶ káros anyag összetétele legkedvezőbb a  $\lambda = 1$  körüli értéknél, az elméletileg szükséges levegőmennyiségnél

# Emisszió csökkentése Otto-motorok esetén

- ▶ Hármass hatású („háromutas”) katalizátor együttes alkalmazása
- ▶ CO, szénhidrogének, NO<sub>x</sub>-ek a Pt és Rh katalizátorral nagy hatásfokkal tisztíthatók 1-es légviszony mellett
- ▶ Elektronikusan vezérelt keverékképző berendezés, vezérlő jelet az un. lambda-szonda ( $\lambda$  - szonda) szolgáltatja
  - ▶ Ha a kipufogógázban szabad oxigén van -> módosítja a az adagolt benzin mennyiségét
- ▶ Ólommentes benzin szükséges (katalizátor mérge) => ólommentes benzinek 1999-től
- ▶  $\lambda = 1,3$ -nál üzemeltetés: kevés károsanyag keletkezik (közvetlen befecskendezésű, katalizátoros Otto-motoroknál)
- ▶ Füstgáz visszavezetés: csökken a motorban a csúcshőmérséklet: NO<sub>x</sub> csökkenés, kedvezően hat továbbá a tüzelőanyag fogyasztásra, zajszintre, és a füstgáz hőmérsékletre

# Emisszió csökkentése dízelmotorok esetén

- ▶ Elsősorban a nitrogén-oxidokra, a koromra és a szilárd részecskékre irányul
- ▶ Elő-befecskendezési szög
- ▶ NOx csökkentés: elektronikusan szabályozott kipufogógáz visszavezetés
- ▶ Szénhidrogének mérséklése katalizátor alkalmazásával, de a S-tartalom miatt nő a szulfát részecskék aránya
- ▶ Magas (1400 - 1800 bar) befecskendezési nyomás
- ▶ Dugattyú és a henger közötti hézag csökkentésével a CH emisszió jelentősen csökkenthető

# Energia-felhasználás

- ▶ A belső égésű vagy robbanómotor a primer energiaforrás (pl. kőolaj) energia-tartalmának 9 - 10 %-át hasznosítja mechanikai munkaként
- ▶ A korszerű motorokkal elérhető teljes hatások ugyanakkor 27 - 32 %
- ▶ Energia megtakarítási lehetőségek
  - ▶ Primer
  - ▶ szekunder és
  - ▶ terciér
- ▶ Legjelentősebb: tömegközlekedés preferálása az egyéni közlekedéssel szemben!!!



# Energia megtakarítási lehetőségek

- ▶ Primer: motorok fejlesztése, hatásfokuk növelése:
  - ▶ égésterének fejlesztése,
  - ▶ elektronikusan szabályozott keverékképzés,
  - ▶ kompresszió viszony növelése,
  - ▶ magasabb égési véghőmérséklet megengedése,
  - ▶ a motor belső mechanikai veszteségeinek mérséklése

# Energia megtakarítási lehetőségek

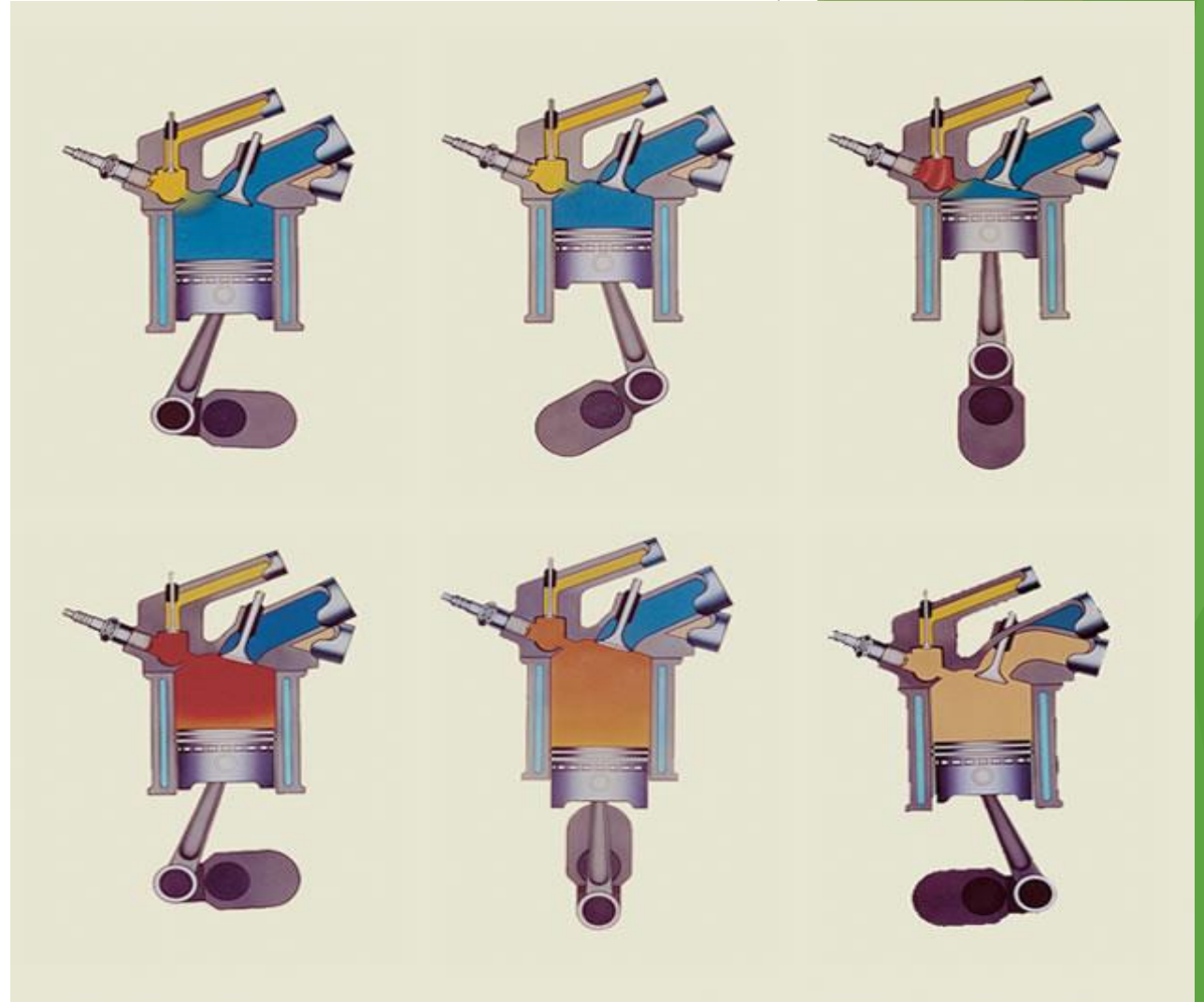
- ▶ Szekunder: gépjárműfejlesztés:
  - ▶ gépjármű légellenállásának csökkentése,
  - ▶ a hajtáslánc harmonizálása és belső veszteségének mérséklése,
  - ▶ a gumiabroncsok fejlesztése,
  - ▶ a fékezés megvalósítása energia rekuperációval,
  - ▶ a vezető és utastér klimatizálása hulladék hővel.

# Energia megtakarítási lehetőségek

- ▶ Tercier: járművet üzemeltető és a közlekedést tervező mérnökök tevékenysége
  - ▶ 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.

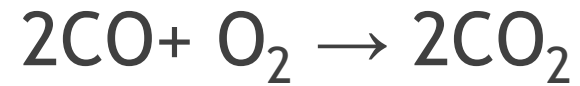
# Honda CVCC motor

- ▶ Segédkamra: dús keverék
- ▶ Főkamra: sovány keverék
- ▶ Csúcshőm. kisebb
- ▶  $O_2$  felesleg  $\rightarrow$  CO, CH-ek oxidációja



# Kétutas katalizátor: oxidációs katalizátor

- ▶ Szénmonoxid oxidációja széndioxiddá:

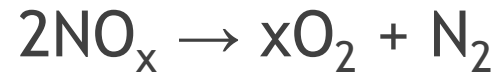


- ▶ Elégetlen szénhidrogén oxidálása széndioxiddá és vízzé:

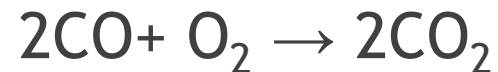


# Háromutas katalizátor: oxidációs katalizátor

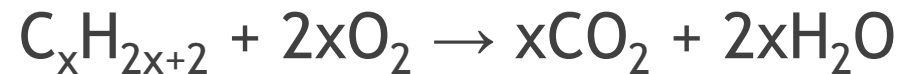
- ▶ Nitrogénoxidok redukciója oxigénre és nitrogénre:



- ▶ Szénmonoxid oxidációja széndioxiddá:



- ▶ Elégetlen szénhidrogén oxidálása széndioxiddá és vízzé:



- ▶ Leghatásosabb, ha a belépő füstgáz sztöchiometrikus közelében van (1 kg benzin esetén 14,6 - 14,8 kg levegő)

- ▶ ha több a levegő: oxidáció túlsúlya
- ▶ ha több az üzemanyag: NO<sub>x</sub> redukció túlsúlya

# Dízel motorok katalizátorai

- ▶ Leggyakoribb: oxidációs katalizátor:
  - ▶  $O_2$  felesleg: CO oxidálásához  $CO_2$ -vé, és a CH-ek oxidálásához vízzé és  $CO_2$ -vé
  - ▶ 90%-os hatásfok körül
  - ▶  $NO_x$ -et nem távolítja el
  - ▶ => füstgáz összetételének változtatása:
    - ▶ szelektív katalitikus redukció (SCR)
    - ▶  $NO_x$  leválasztók ( $NO_x$  abszorberek)
- ▶ korom: koromleválasztók, illetve dízelrészecske-szűrők (DPF)

# Dízel motorok katalizátorai

## ▶ NOx eltávolítás:

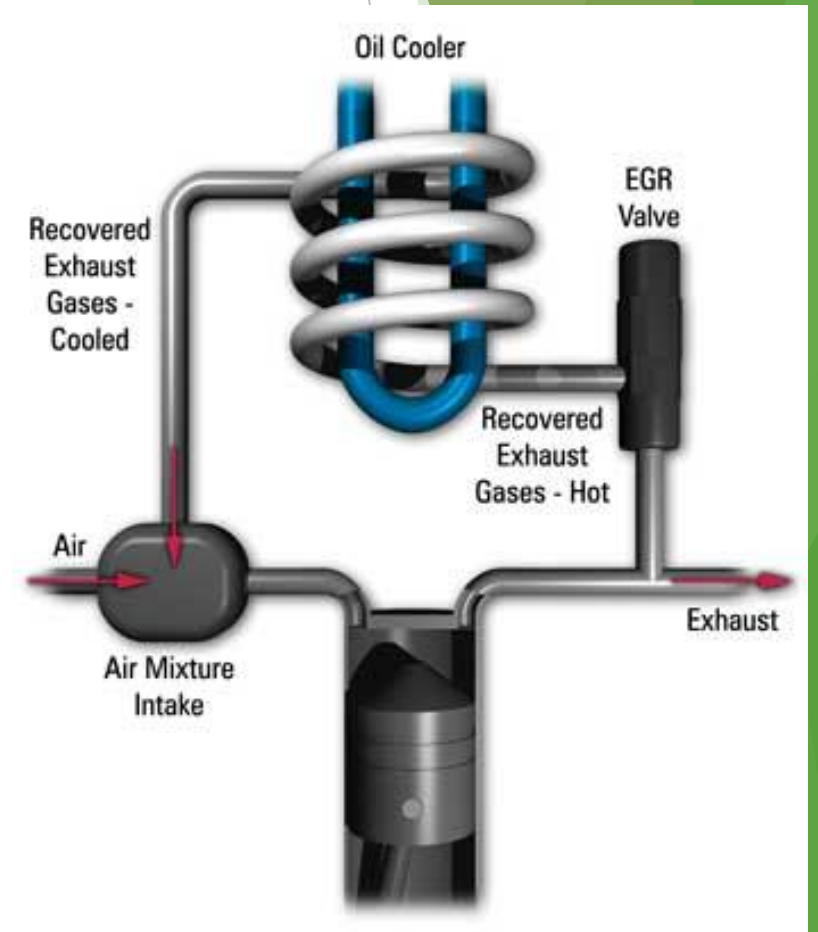
### ▶ EGR (Exhaust Gas Recirculation):

- ▶ kipufogógáz egy részének a szívási rendszerbe visszavezetésével csökken a kibocsátott nitrogénoxidok mennyisége,

### ▶ LNT/NAC (Lean NOx Trap vagy NOx Adsorber Catalyst)

### ▶ urea-SCR, más néven AdBlue

- ▶ karbamid oldatot fecskendeznek a kipufogógázba mely egy speciális katalizátorba lép be
- ▶ előny: oxidáló környezetben is lehet a NOx-okat redukálni





# Katalizátorok hátrányai

- ▶ sztöchiometrikus keverék: több tüzelőanyagot használ, mint a szegény keverék → növeli a CO<sub>2</sub>-kibocsátását
- ▶ (szegény keveréknél viszont az NO<sub>x</sub> csökkentés problematikus)
- ▶ CO, CH-eket CO<sub>2</sub>-dá alakítja: ez üvegházhatású gáz (+N<sub>2</sub>O kibocsátás)
- ▶ Pd, Pt előállítása hozzá hatalmas szennyezéssel jár

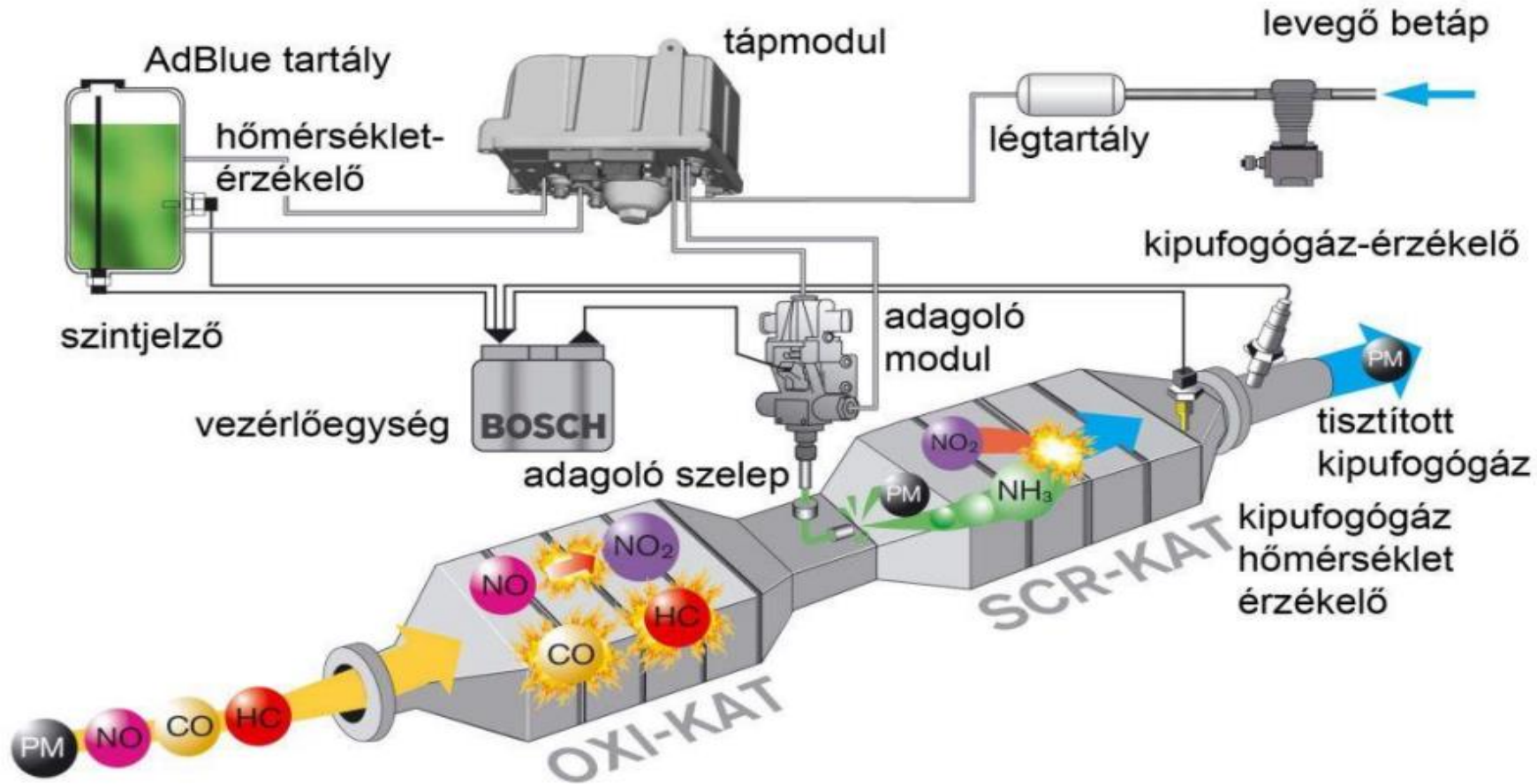
# Norilsk - Oroszo.: Ni, Cu, Co, Pt, Pd, C bányászat



# OBd: on-bord diagnostic system

- ▶ **Hőmérséklet szenzorok (hőmérők):**
  - ▶ figyelmeztet, ha a katalizátor hőmérséklete a 750 °C-os határt túllépi
  - ▶ egy a katalizátor előtt, egy utána
  - ▶ katalizátorok 200 °C felett kezdenek csak működni
- ▶ **Oxigén szenzorok**
  - ▶ zárt körű szabályzórendszer alapja, szikragyújtású motorok esetén,
  - ▶ katalitikus konverter után is az O<sub>2</sub> -tartalom ellenőrzésére
- ▶ **NOx szenzorok**
  - ▶ drága -> csak akkor, ha a dízelmotorokat szelektív katalitikus redukcióval látják el, vagy ha NOx-elnyeletést alkalmaznak

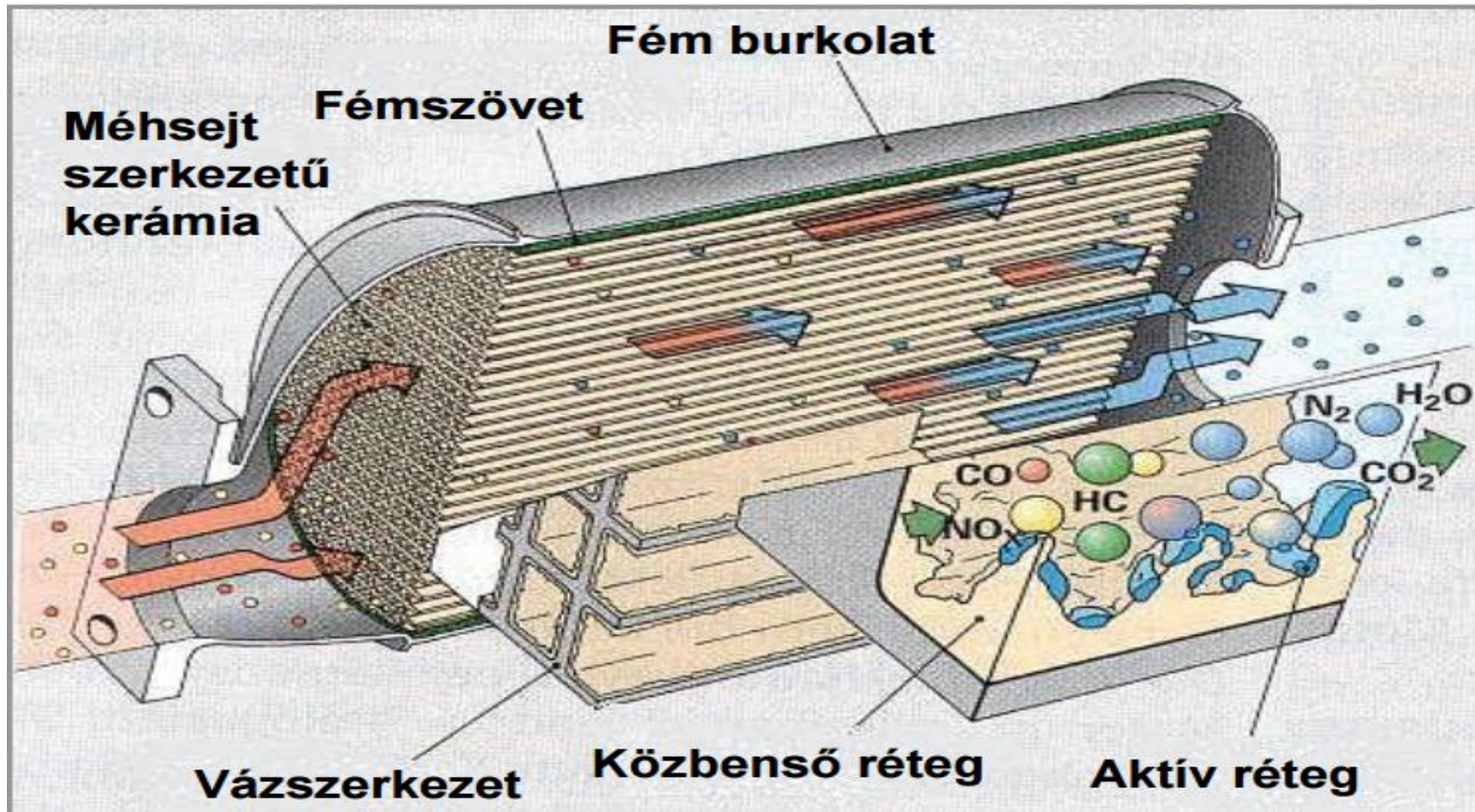
# Dízelmotor kipufogógáz-tisztító rendszere



<http://medic-car.hu/tudastar/>



# Háromutas katalizátor



<http://medic-car.hu/tudastar/>