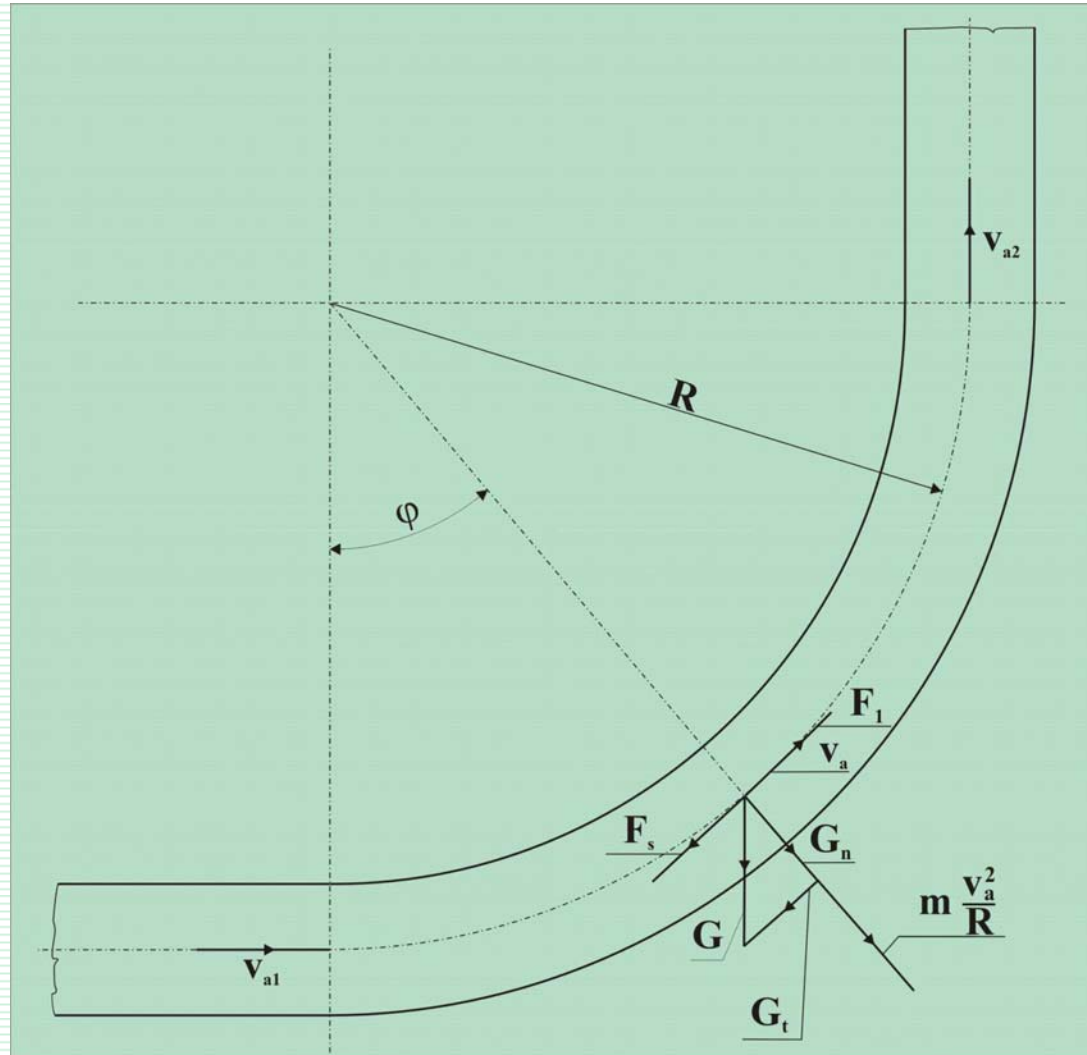


Keverékek áramlása. 6. előadás

Készítette: dr. Váradi Sándor



Vízszintesből függőlegesbe forduló ív mozgásegyenlete





Aerodinamikai előrehajtó erő: $F_1 = C_e \cdot A_o \cdot \frac{\rho_g}{2} \cdot w^2$

Centrifugális erő: $F_c = m \cdot \frac{v_a^2}{R}$

Súrlódó erő: $F_s = \mu \cdot (G_n + F_c) = \mu \cdot m \cdot (g \cdot \cos \varphi + \frac{v_a^2}{R})$

Súlyerő tangenciális összetevője: $G_t = m \cdot g \cdot \sin \varphi$



$$F_d = F_1 - F_s - G_t$$

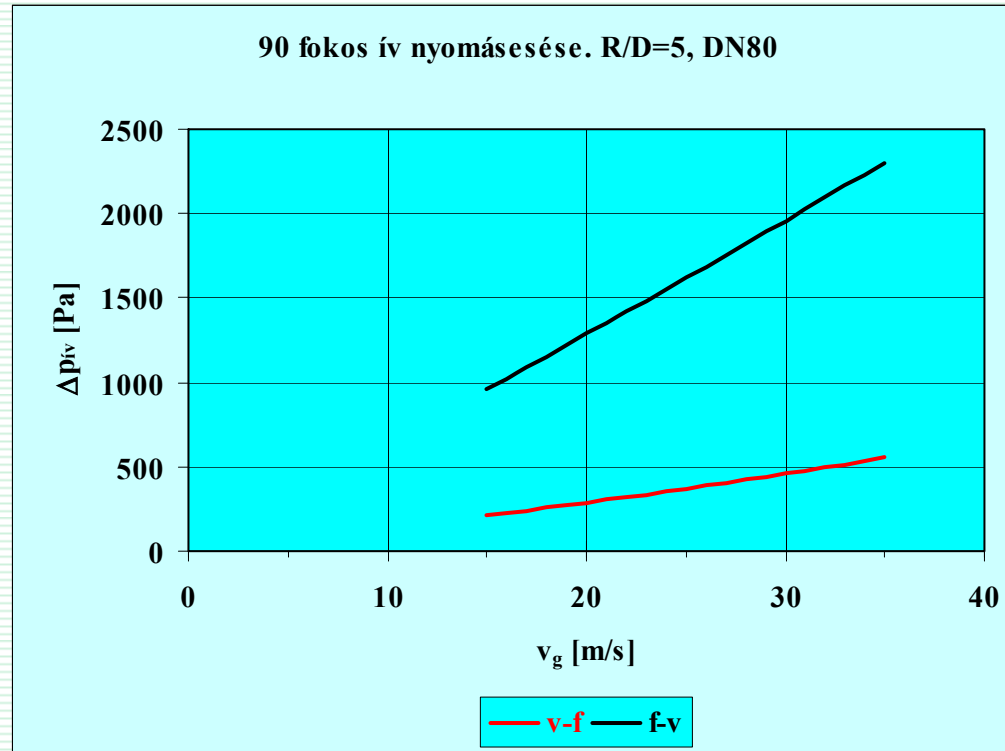
$$m \cdot \frac{dv_a}{dt} = C_e \cdot A_o \cdot \frac{\rho_g}{2} \cdot (v_g - v_a)^2 - \mu \cdot m \cdot \left(g \cdot \cos \varphi + \frac{v_a^2}{R} \right) - m \cdot g \cdot \sin \varphi$$

ahol: $v_a = R \cdot \frac{d\varphi}{dt}$ $dt = \frac{R}{v_a} \cdot d\varphi$ $B = C_e \cdot A_o \cdot \frac{\rho_g}{2}$

$$\frac{dv_a}{d\varphi} = \frac{R}{m} \left[\left(B - \frac{\mu m}{R} \right) v_a + \frac{B v_g^2 - m g (\mu \cos \varphi + \sin \varphi)}{v_a} - 2 B v_g \right]$$



A differenciál egyenlet: - nem integrálható - numerikus közelítő módszerrel megoldható



A függőlegesből vízszintesbe forduló ív nyomásesése a legnagyobb, mivel itt a legnagyobb az ív utáni egyenes csőszakaszbeli határsebesség, aminek az eléréséhez szükséges gyorsítási nyomásesés is itt a legnagyobb.



Porleválasztók osztályozása: (classification of dust separators)

A, Teljesítmény szerint (according to power)

1. ipari berendezésekben (nagyobb porterhelés) $\varepsilon_{\text{ö}} = 70 - 98\%$

$\varepsilon_{\text{ö}}$: összportalanítási fok (total dedusting grad)

$0.4 - 50 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ porkoncentrációjú gázok tisztítása,
a leválasztott
por folyamatos eltávolítására



Ide tartoznak:

- porkamrák (lásd az ábrákat a következő diákon)
- centrifugális porleválasztók (ciklon, multiciklon)
- szövetszűrők (lásd az ábrákat a következő diákon)
- nedves leválasztók
- elektrofilterek

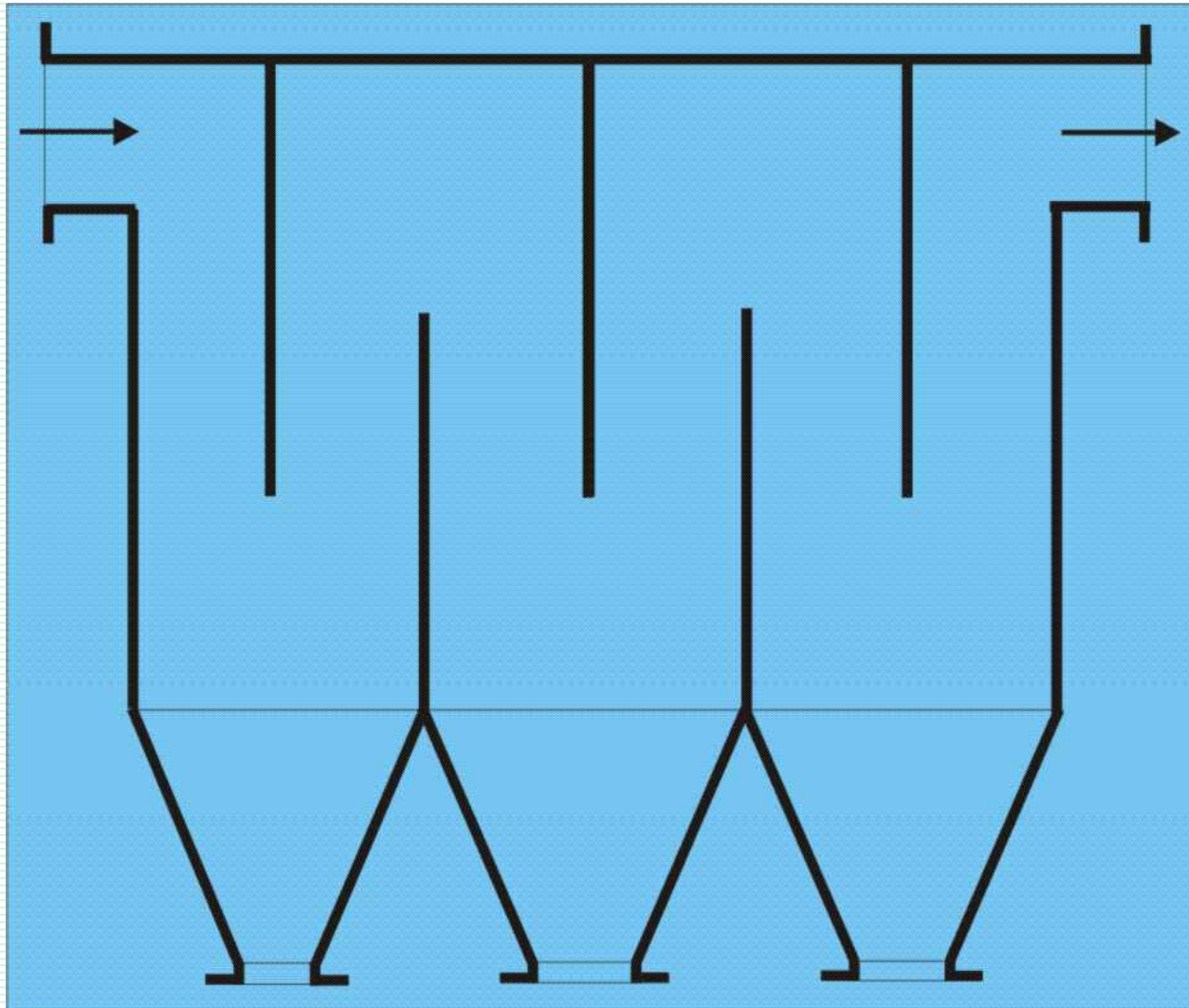
2. Kisebb porterhelésre, de nagyobb tisztításra $\varepsilon_o \geq 99\%$

$2 - 50 \frac{mg}{m^3}$ porterhelésű gázok tisztítására

Ide tartoznak:

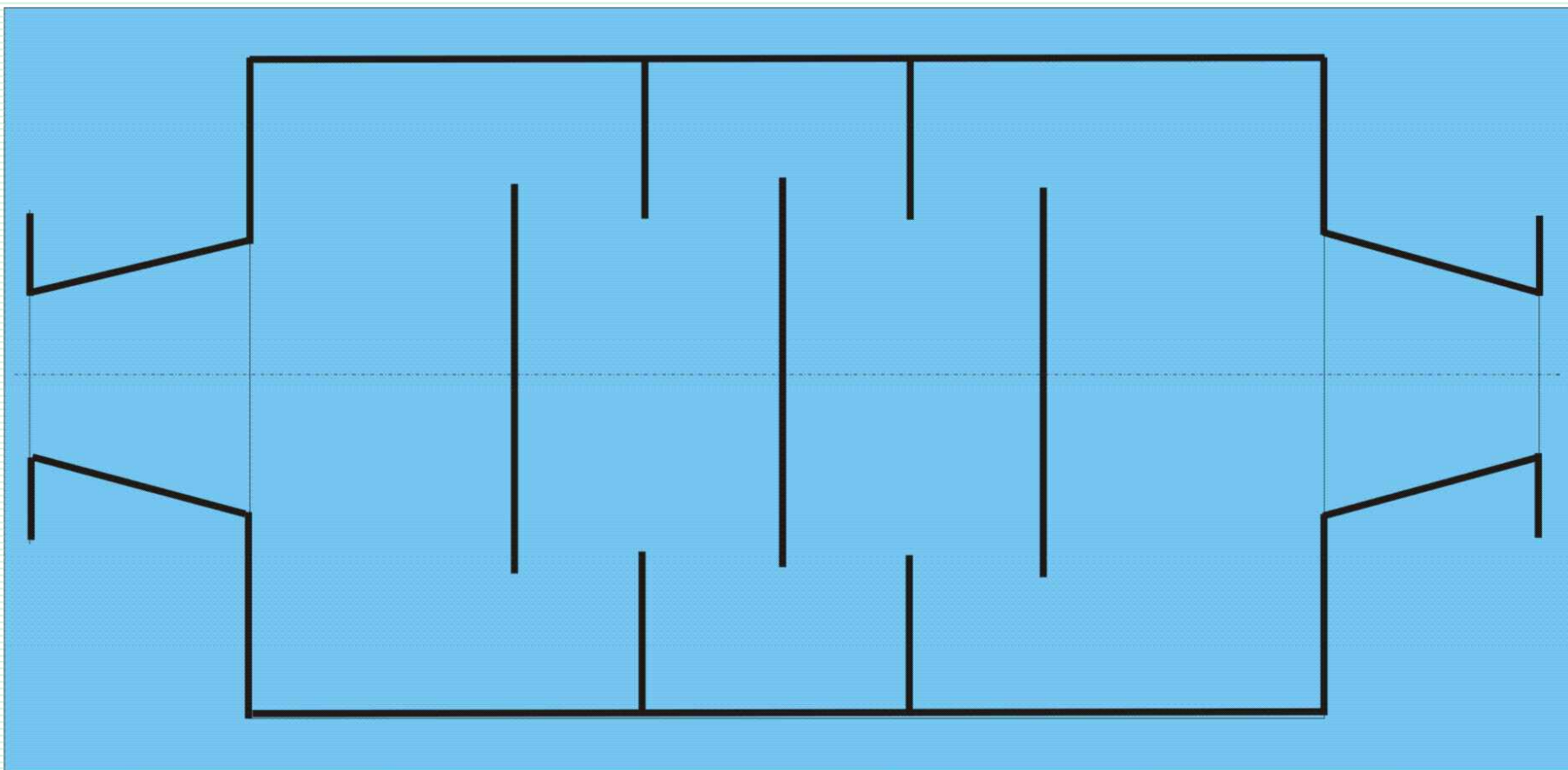
-különböző légszűrők

Porkamra keresztmetszete függőleges gázáram-elterelésekkel

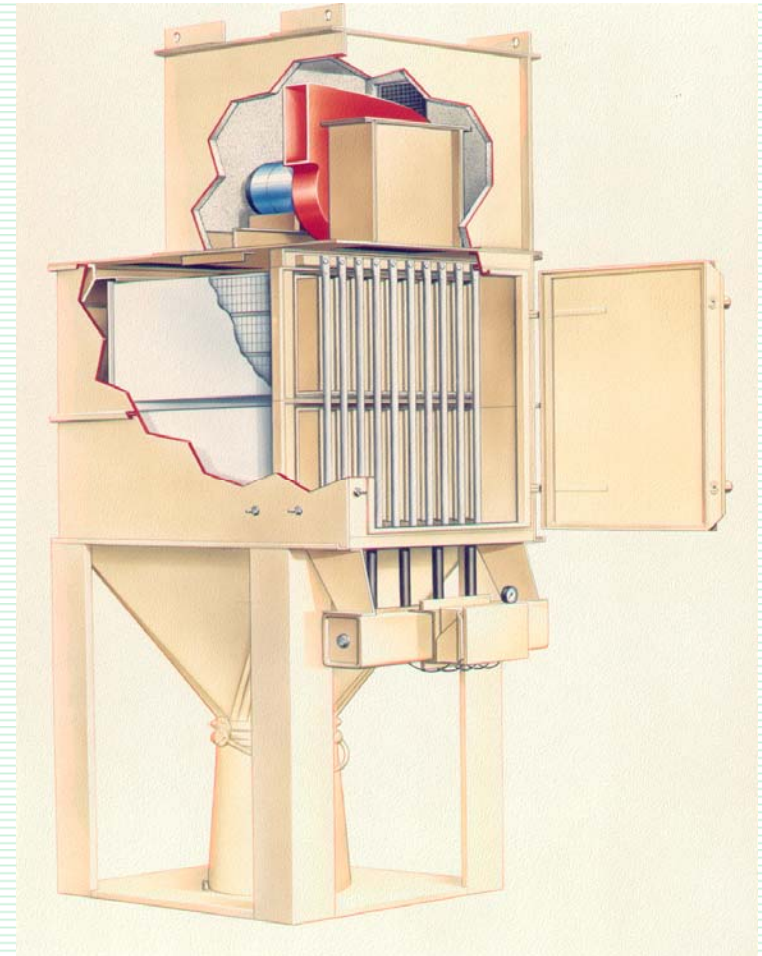
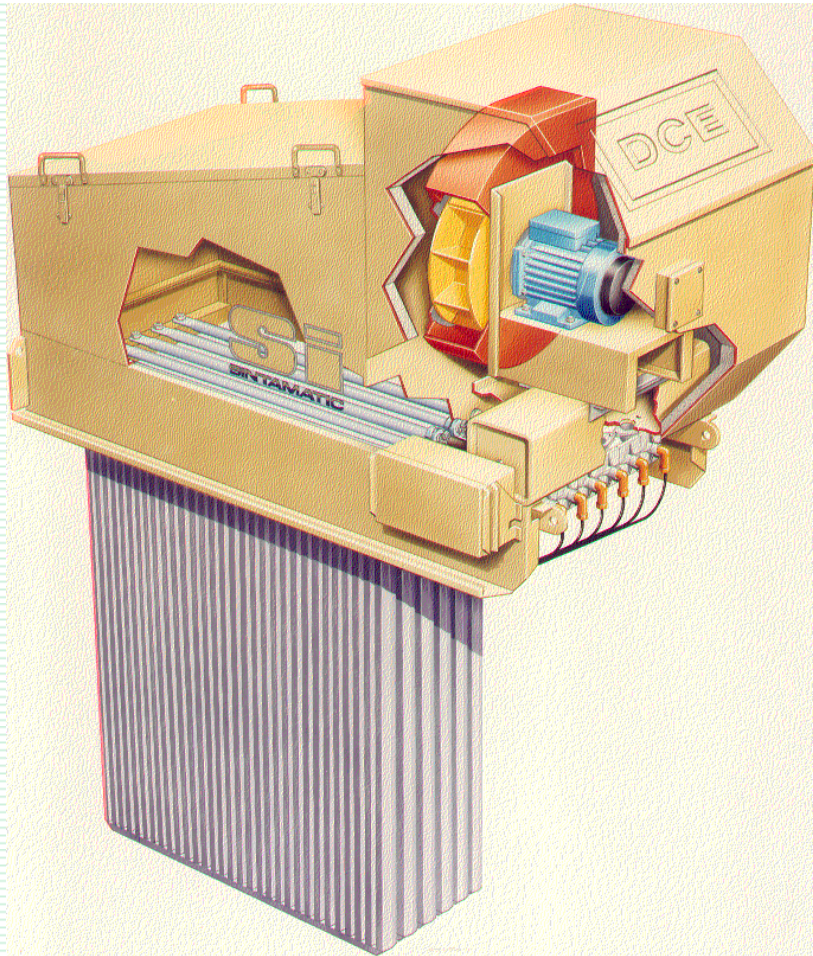




Porkamra hosszmet szete vízszintes gázáram-elterelésekkel

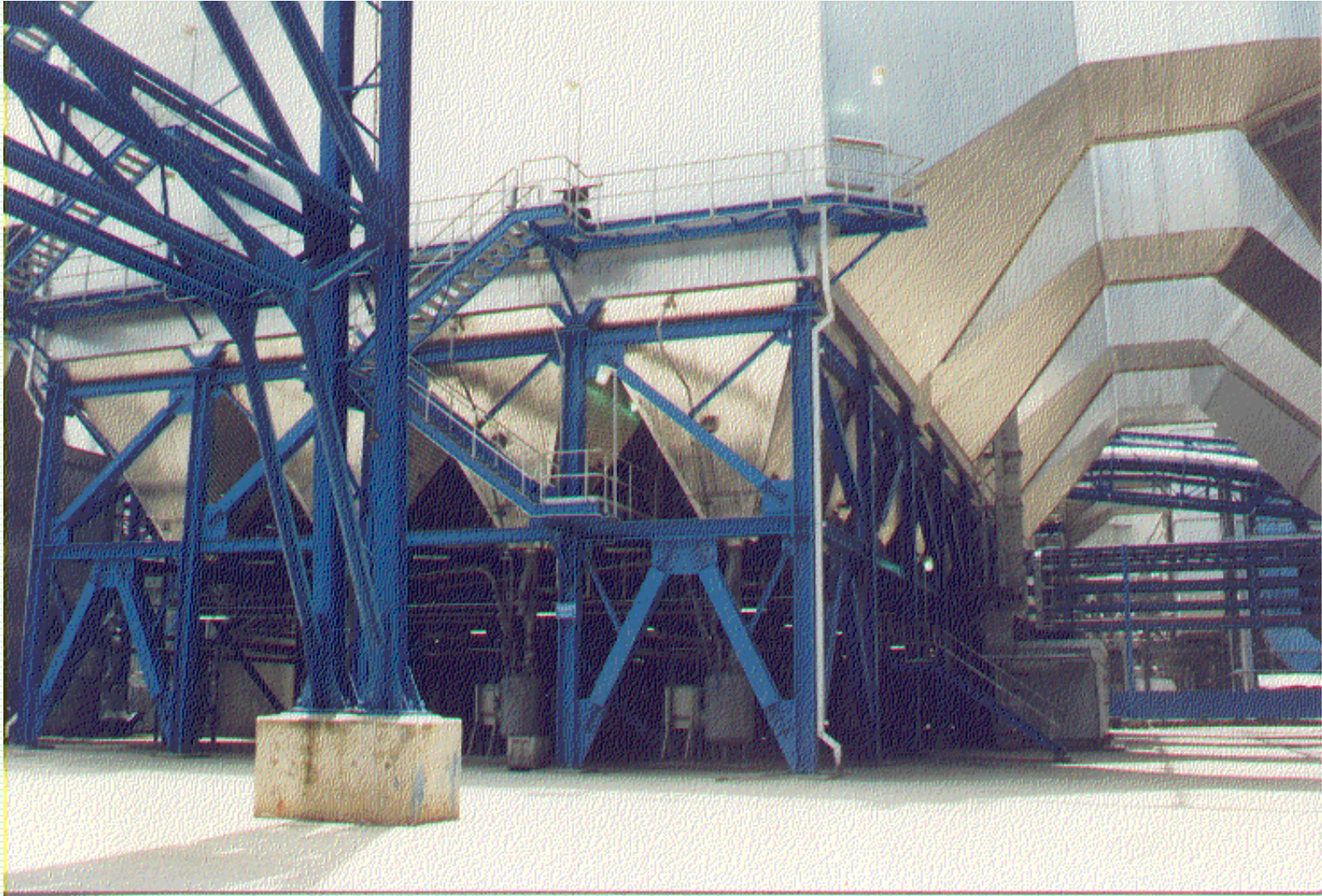


Szövetszűrők beépítése





Elektrofilter. Indonézia. Suralaya. 32 anyagleadó tölcser





B, Működésük szerint (according to operating method)

- nehézségi erővel működő szerkezetek (porkamrák)
- irányeltereléses porleválasztók (különleges porkamrák)
- ütközéses és zsalus leválasztók
- centrifugális leválasztók (ciklonok)
- durva töltőanyaggal készült rétegszűrők (pad filter)
- lamellás vagy spirál töltőanyagú rétegszűrők
- nedves porleválasztók
- elektrosztatikus leválasztók

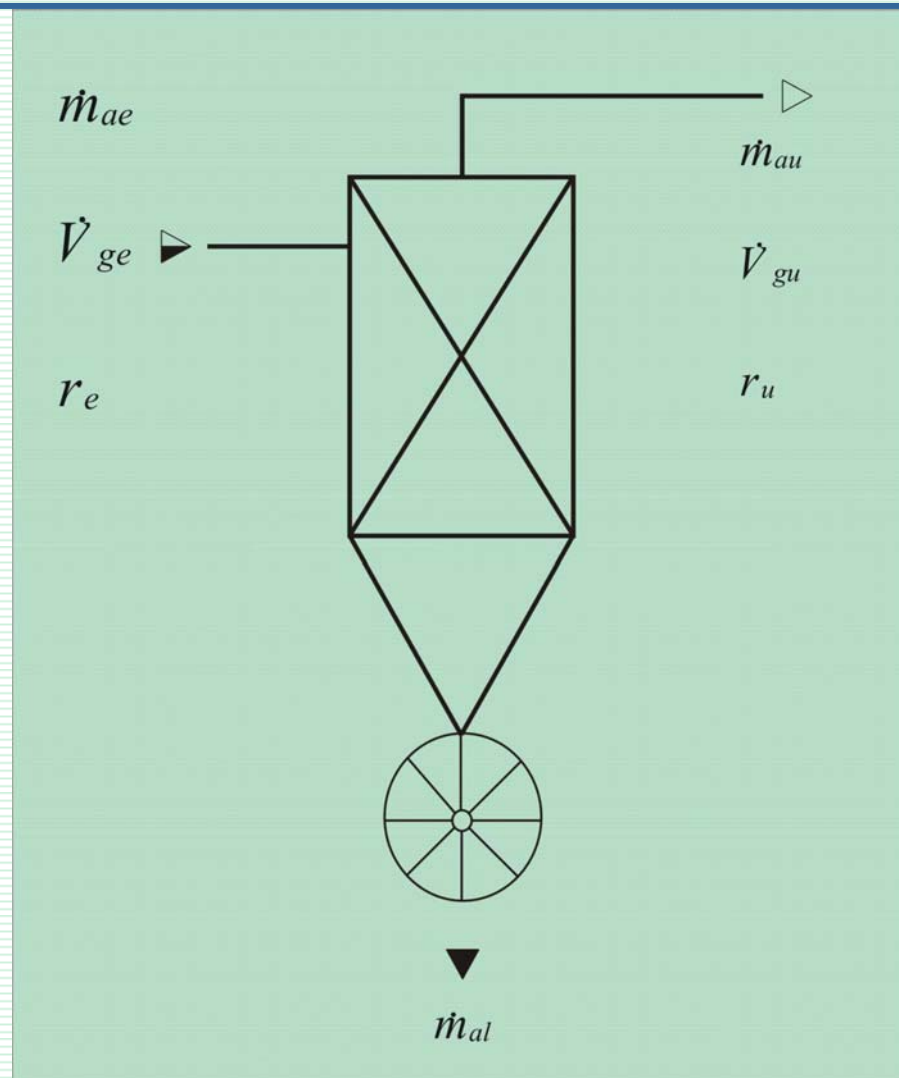


A porleválasztók minőségi jellemzői (qualitative characteristics of dust separators)

- $\varepsilon_{\text{ö}}$ össz- és ε_f frakcióportalanítási fok
- T- terhelés változás hatása a szerkezet működésére
- K- különböző tulajdonságú porok befolyása a porleválasztásra
 - porleválasztók ellenállása
 - porleválasztók energiaszükséglete
 - erózió ill. kopásállóság
 - üzemben-tartási költségek
 - beruházási költségek
 - beszerzési és gyártási lehetőség
 - helyszükséglet



Összportalanítási fok ($\varepsilon_{\ddot{o}}$)





\dot{m}	Tömegáram	$[kg / s, g / s]$
\dot{V}	Térfogatáram	$[m^3 / s]$
r	<u>porterhelés</u>	$[kg / m^3; g / m^3]$

$$r = \frac{\dot{m}}{\dot{V}}$$

vagy koncentráció

$$\dot{m}_{ae} = \dot{m}_{au} + \dot{m}_{al}$$

Mérleg egyenlet

$$\varepsilon_{\ddot{o}} = \frac{\dot{m}_{ae} - \dot{m}_{au}}{\dot{m}_{ae}} = \frac{\dot{m}_{al}}{\dot{m}_{ae}} = \frac{\dot{m}_{al}}{\dot{m}_{au} + \dot{m}_{al}}$$

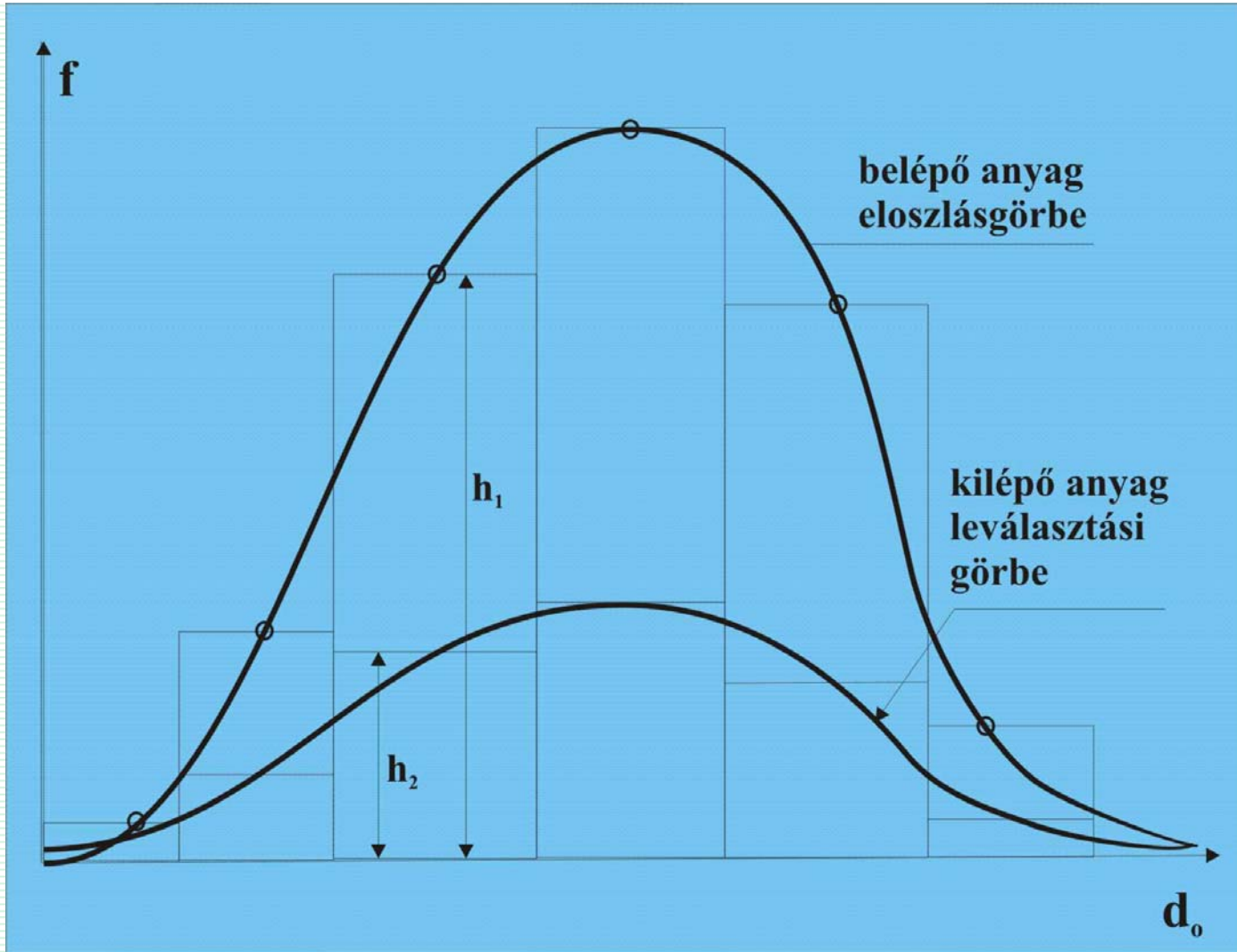
méréstechnikai probléma!



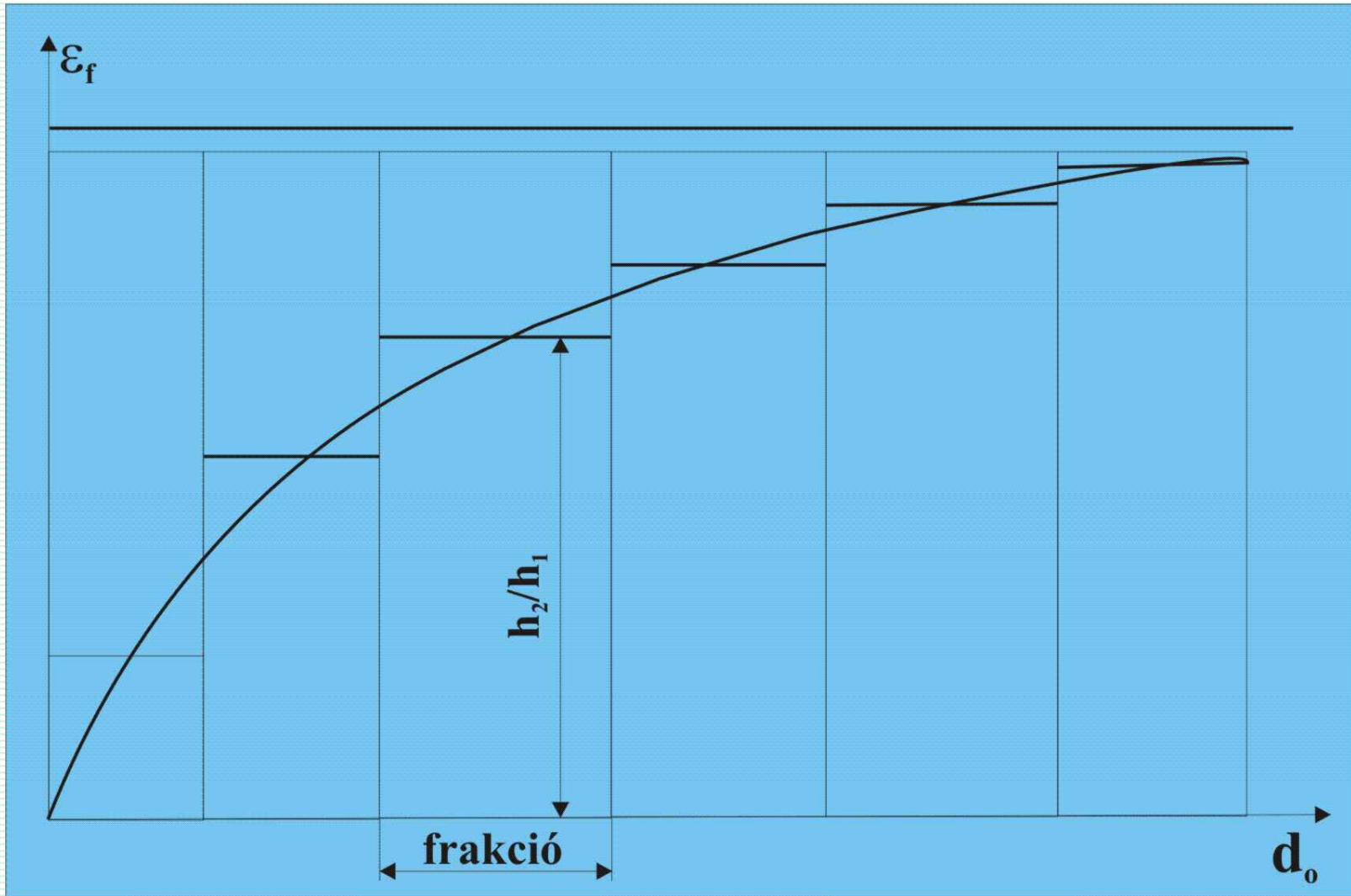
laborban (ha $\dot{V}_{ge} = \dot{V}_{gu}$)

$$\varepsilon_{\ddot{o}} = \frac{\dot{m}_{ae} - \dot{m}_{au}}{\dot{m}_{ae}} = \frac{r_e \cdot \dot{V}_{ge} - r_u \cdot \dot{V}_{gu}}{r_e \cdot \dot{V}_{ge}} = \frac{r_e - r_u}{r_e} = 1 - \frac{r_u}{r_e}$$

Szemcseméret gyakorisági görbe



Frakcióportalanítási fok (ε_f) (fraction dedusting grad)





Szitaanalízissel meghatározott tapasztalati sűrűségfüggvény

- Válasszunk egyre bővülő lyukméretű szitasorozatot

$$x_0 < x_1 < x_2 \dots < x_i < \dots < x_{N-1} < x_N$$

- A szítálandó anyagminta tömege „ M_0 ”
- Legyen az „ $i+1$ ”-edik szitán átesett, de az „ i ”-edik szitán fennmaradt frakciótömeg jele „ M_i ”
- Képezzük az „ m_i ” hányadost, az un. relatív frakciótömeget

$$m_i = \frac{M_i}{M_0}$$

- A szemcseméret tapasztalati sűrűség függvénye az a lépcsős függvény amelynek az $[x_i, x_{i+1}]$ intervallum fölé eső területe éppen az intervallumba esés „ m_i ” *relatív gyakoriságát* adja meg. Legyen $\Delta x_i = x_{i+1} - x_i$, ekkor a tapasztalati sűrűség függvény „ f_i ” ordinátája



$$f_i = \frac{m_i}{\Delta x_i}$$

- Ezt az „ R_i ” összeget hívjuk az „ i ” -edik szitához tartozó relatív szitamarádénak

$$R_i = \sum_{j=i}^{N-1} m_j = \sum_{j=i}^{N-1} f_j \Delta x_j$$

- Az intervallum *átlagos szemcsemérete* legyen „ $x_{i\text{átl}}$ ”, ami az alábbi módon számítható

$$x_{i\text{átl}} = \frac{x_i + x_{i+1}}{2}$$

- Az egész „ M_0 ” tömegű szitált minta *közepes szemcseméretének* értékét a következő súlyozott átlag adja



$$x_{mköz} = \sum_{i=0}^N f_i \Delta x_i x_{iátl} = \sum_{i=0}^N m_i x_{iátl}$$

- **Az elemzésre használt laboratóriumi sziták nyílásméretei szabványosítva vannak, s általában mértani sorozatot alkotnak, az egyes országokban eltérő hányadossal (Magyarországon ez a hányados $\sqrt[20]{10}$)**



A porleválasztók nyomásvesztesége

- A porleválasztók nyomásveszteségét vagy az ellenállás-tényezővel (ζ), vagy a nyomásveszteség mért értéksorozatával adják meg. A nyomásveszteségen mindig össznyomás-veszteséget kell érteni ($\Delta p_{\ddot{o}}$).
- Az ellenállás-tényező ismeretében a nyomásveszteség:

$$\Delta p_{\ddot{o}} = \zeta \frac{\rho_g}{2} w^2$$

Ahol ρ_g a leválasztóba belépő gáz sűrűsége (adott hőmérsékleten és nyomáson) [kg/m^3], w az az áramlási sebesség, amelyre az ellenállás-tényező vonatkozik [m/s], ζ mértékegység nélküli szám



A nyomásveszteség értéksorozatát valamilyen áramlási sebességre vagy tömegáramra, ill. térfogatáramra vonatkoztatják.

$$\Delta p_{\ddot{o}} = f(w); \quad \Delta p_{\ddot{o}} = f(\dot{m}); \quad \Delta p_{\ddot{o}} = f(\dot{V}) = f(q)$$

Az ellenállás-tényezőt mindig valamilyen sebességre vonatkoztatják. Ez általában a belépési sebesség, de pl. nedves ciklonok esetén szokásos az ún. axiális sebességre vonatkoztatni. Úgyszintén figyelmet kíván az is, hogy a

$$\Delta p_{\ddot{o}} = \zeta \frac{\rho_g}{2} w^2$$

összefüggést csak turbulens áramlás esetére szabad felírni.



Az irodalomban sok helyen közölt

$$\Delta p_{\ddot{o}} = \zeta \frac{\rho_g}{2} w^n$$

felírási módot kerülni kell, mert az ellenállás-tényező dimenziója az „n” kitevő számértékétől függ. Nem tiszta turbulens áramlás esetén célszerű a nyomásveszteséget értéksorozattal megadni.

A szűrőtípusú porleválasztókba beépített különféle szűrőanyagokban az áramlás gyakran lamináris, de a levegő hozzá-, ill. elvezetésére kiképzett szerkezetben turbulens. Ezekben az esetekben még akkor sem számítható pontosan a nyomásveszteség, ha a szűrőanyag nyomásvesztesége számítással vagy méréssel meghatározható.



A porleválasztó energiaszükséglete

- A porleválasztók energiaszükséglete két részből tevődik össze: *ventilációs* energiaigényből és *segédenergia*-igényből.
- A *ventilációs* energiaigény a porleválasztó össznyomásveszteségéből és a gáz térfogatáramából számítható. A hajtás teljesítményszükséglete tehát

$$P = \frac{q \Delta p_{\ddot{o}}}{\eta_{\ddot{o}}}$$

ahol $\eta_{\ddot{o}}$ a ventilátor és a hajtás összhatásfoka



A *segédenergia*-igényen a leválasztó kifogástalan működéséhez szükséges segédberendezések különféle energiaigényét (pl. sűrített levegő, víz, elektromos energia stb.) értjük



A por koptató hatása

A kopásról általában

A különböző gépi berendezések kopáskárai jelentősek.
Az ezzel foglalkozó tudományág: a *tribológia*.

A különböző kopásokat a *hatásmechanizmusuk* alapján csoportosíthatjuk. Ezek szerint megkülönböztetünk:

- ❑ adhéziós (csúszó)
- ❑ abrázíós (ledörzsölő)
- ❑ kifáradásos
- ❑ kirágódásos
- ❑ kémiai (korróziós) és
- ❑ eróziós kopást.



Az áramló gázokban lévő szilárd szemcsék koptató hatása elsősorban a gáz sebességétől és a szilárd anyag koncentrációjától függ.

A koptatási kísérletek során megkülönböztetnek kis sebességű tartományt ($w \leq 40$ m/s) és nagy sebességű tartományt ($w \geq 40$ m/s) ; a szemcse-koncentráció szerint kis ($r \leq 30$ g/m³) és nagy ($r \geq 30$ g/m³) koncentrációjú tartományt.



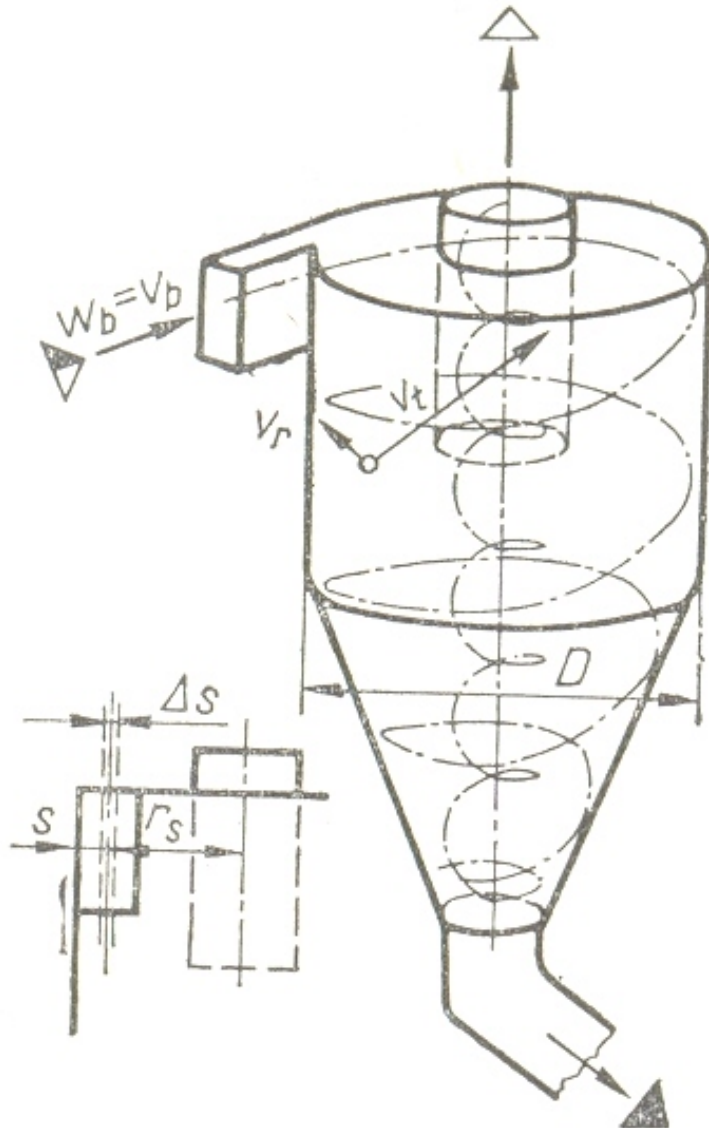
A csővezetékben áramló gázban diszpergált anyagok koptató hatását a következő paraméterek befolyásolják

- ❑ Az ütköző szemcsék sebessége
- ❑ Az ütközési szög
- ❑ Az ütköző szemcsék mérete, tömege, formája, szilárdsága, anyagjellemzői
- ❑ A koptatott anyag szilárdsági tulajdonságai és anyagjellemzői
- ❑ A diszperz rész (hordozó gáz) korróziós hatása, hőmérséklete

A koptatási kísérletek során megállapították, azonos körülmények között a lekoptatott anyagmennyiség egyenesen arányos a felületre ütköző szemcsék összes energiájával



Ciklon



- háromdimenziós áramlás
- a ciklon működési elve
 - belépő sebesség
 - tangenciális sebesség
 - radiális sebesség

v_b

v_t

v_r



Közelítő feltételek:

- a szemcsék mozgás közben egymást nem zavarják
- a nehézségi erőter a centrifugálishoz képest elhanyagolható (field of gravity force) (field of centrifugal force)
- a szemcsék mozgására a Stokes-törvény érvényes
- gömbszemcsét feltételezünk
- a belépésnél a gázsebesség és a szemcseeloszlás egyenletes
- Rosin, Rammler és Intelmann: a ciklonban a gáz és a szemcse csavarmenetben – a belépő sebességgel egyenlő nagyságú, állandó kerületi sebességgel mozog (peripheral speed)

A szakirodalomban közelítő számítási módszerek, kísérleti eredmények és ezek felhasználásával empirikus összefüggések ismereteseek.



Jellemző méretek

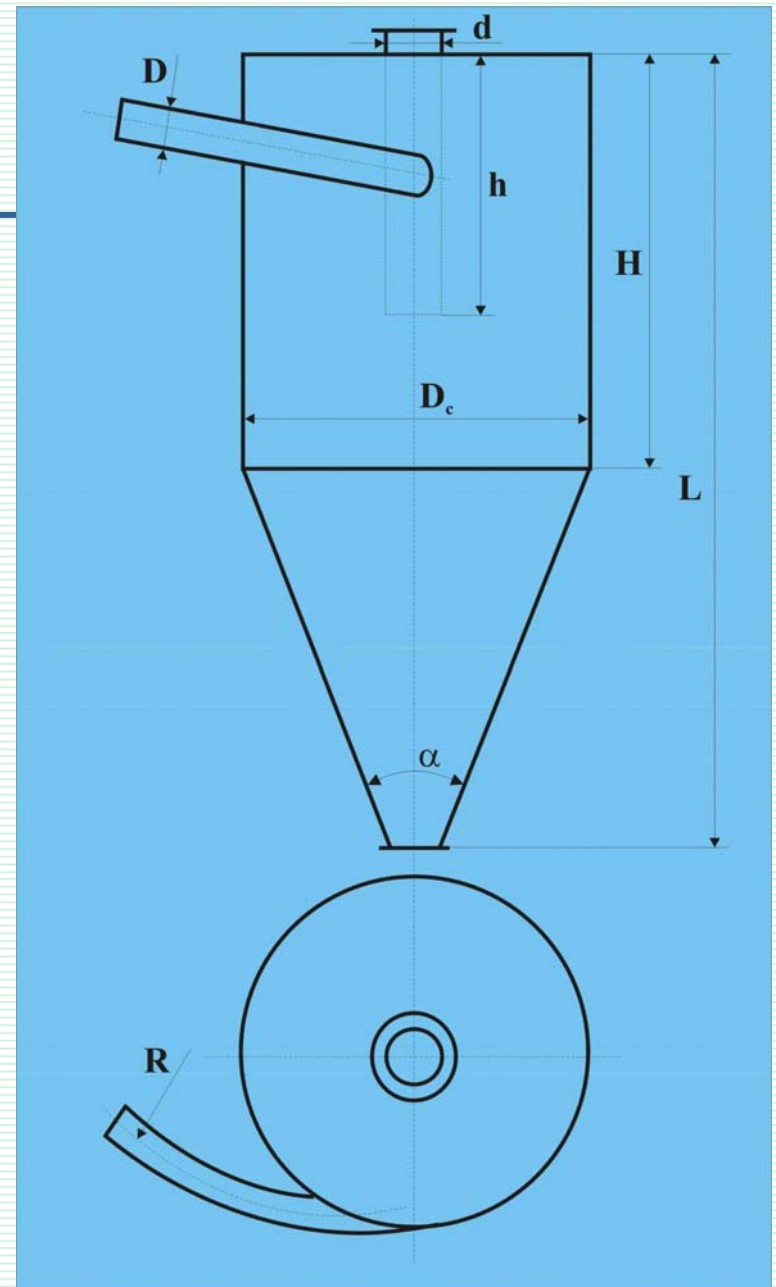
$$D_c \geq 5D$$

$$H = (1 \div 1,2)D_c$$

$$d = (1 \div 1,2)D$$

$$h = (0,5 \div 0,7)D_c$$

$$\alpha \leq 30^\circ$$





- az íves csőben nincs sugárirányú befelé áramlás, ezzel javul a leválasztás
- célszerű a külső paláston bevezetni a porszemcséket

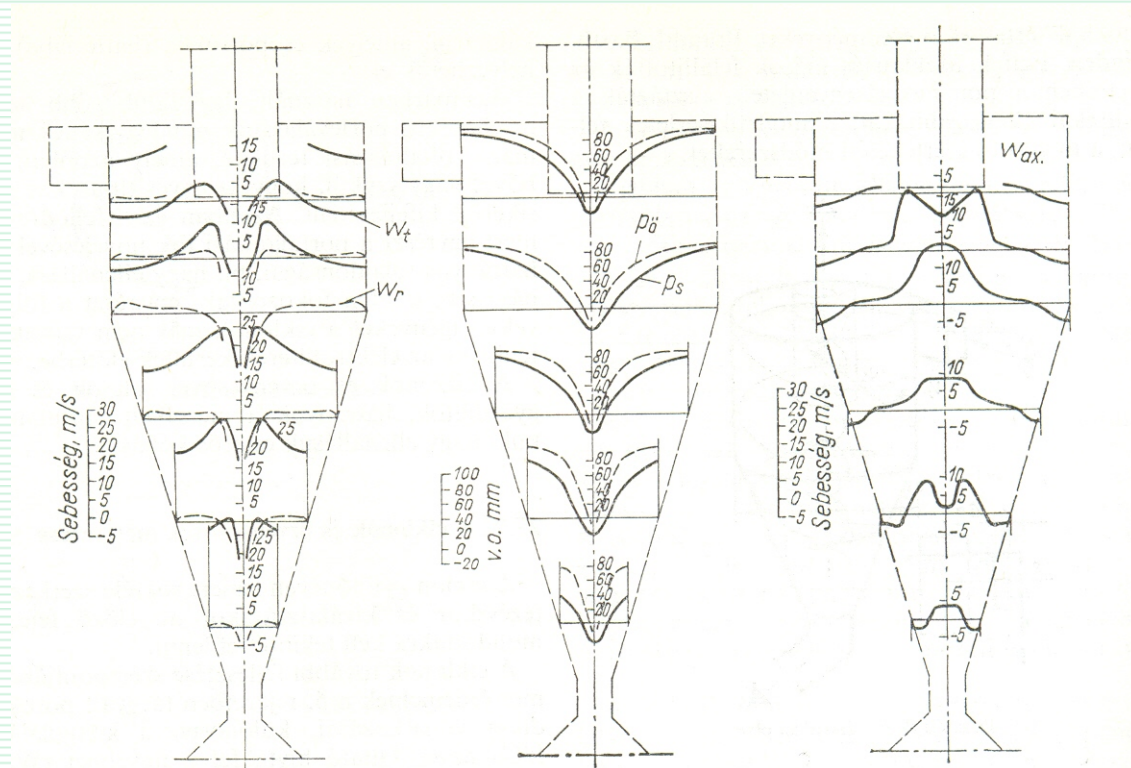


A ciklon áramképe (flow pattern of cyclone)

örvény: forgatag+mag
Vortex swirl core

primer sebesség: V_t

szekunder sebesség: V_r, V_{ax}



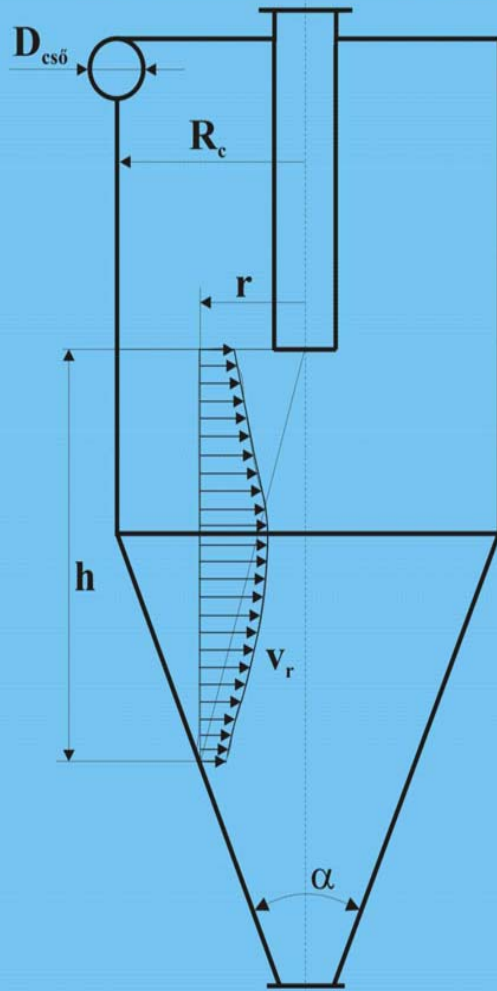


-a forgatagban elől a leválasztás

$F_{ae} > F_{cp}$: a szem kimegy

$F_{ae} < F_{cp}$: a mag részbe kerülő szemcse
leválasztás helyett kimegy

-a leválasztás szempontjából a „ v_r ” komponens vizsgálata
a lényeges



$$h = k \cdot r$$

$$v_{r\text{átl}} = \frac{Q_g}{A_{\text{palást}}} = \frac{v_{\text{cső}} \cdot \frac{D_{\text{cső}}^2 \cdot \pi}{4}}{2 \cdot r \cdot \pi \cdot h}$$

$$v_{r\text{max}} = \varphi \cdot v_{r\text{átl}}$$



$$v_{r \max} = \varphi \cdot \frac{v_{cső} \cdot D_{cső}^2}{8 \cdot r^2 \cdot k}$$

k és φ a sebességeloszlástól és a ciklon geometriájától függő tényező

Veszteségmentes forgatag (perdület állandóság) $v_t \cdot r = \text{áll.}$

Valóságban ($n = 0,5 - 0,6$) $v_t \cdot r^n = \text{áll.}$



Határhelyzetben a szemcse kering az " r " sugarú pályán

$$F_c = F_{ae}$$

$$\frac{m_1 \cdot v_t^2}{r} = 3 \cdot \pi \cdot \mu_g \cdot d_0 \cdot w_r \quad w_r = v_r$$

$$v_t \Big|_{r=R_c} = v_{cső} \quad \text{ahol} \quad r = R_c = \frac{D_c}{2}$$



hha

$$v_t \cdot r^{0,5} = \text{áll.} \quad \rightarrow \quad v_t^2 = v_{cs\ddot{o}}^2 \cdot \frac{D_c}{2r}$$

$$\frac{d_0^3 \cdot \pi}{6} \cdot \rho_a \cdot \frac{v_{cs\ddot{o}}^2 \cdot D_c}{2 \cdot r^2} = 3 \cdot \pi \cdot \mu_g \cdot d_0 \cdot \frac{\varphi}{k} \cdot \frac{v_{cs\ddot{o}} \cdot D_{cs\ddot{o}}^2}{8 \cdot r^2}$$



Mivel egyszerűsítéskor „r” kiesik, az egyensúlyi helyzet bármely helyen vizsgálható

$$d_0 = \sqrt{\frac{9}{2} \cdot \frac{\varphi}{k}} \cdot \sqrt{\frac{\mu_g}{\rho_a} \cdot \frac{D_{cső}^2}{v_{cső}} \cdot \frac{1}{D_c}} \quad \text{melyből:} \quad \sqrt{\frac{9}{2} \cdot \frac{\varphi}{k}} = K$$

K : a ciklonra jellemző, a sebességeloszlástól függő tényező
ha értéke kicsi, akkor a kis szemcséket is leválasztja

$$K = 3 \div 6$$

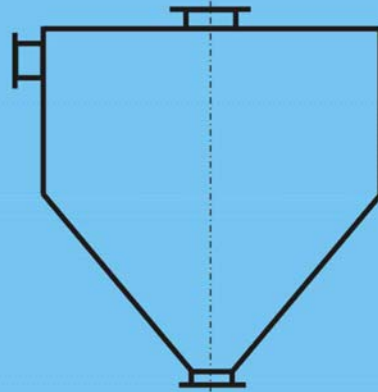
jó ciklongeometria esetében

$$K \gg 6$$

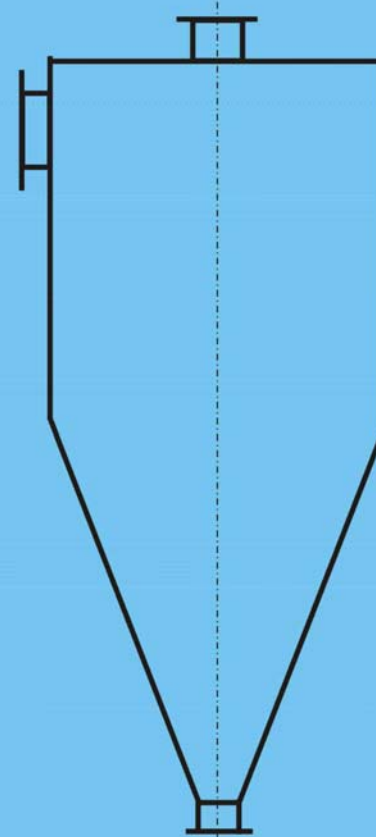
kedvezőtlen ciklon alaknál

ha $d_0 \downarrow$ akkor: $v_{cső} \uparrow; D_c \uparrow; \rho_a \uparrow; \mu_g \downarrow$

mivel $v_{cső} \uparrow$ a $\Delta p_c \uparrow$ (ez az ára a jobb leválasztásnak)



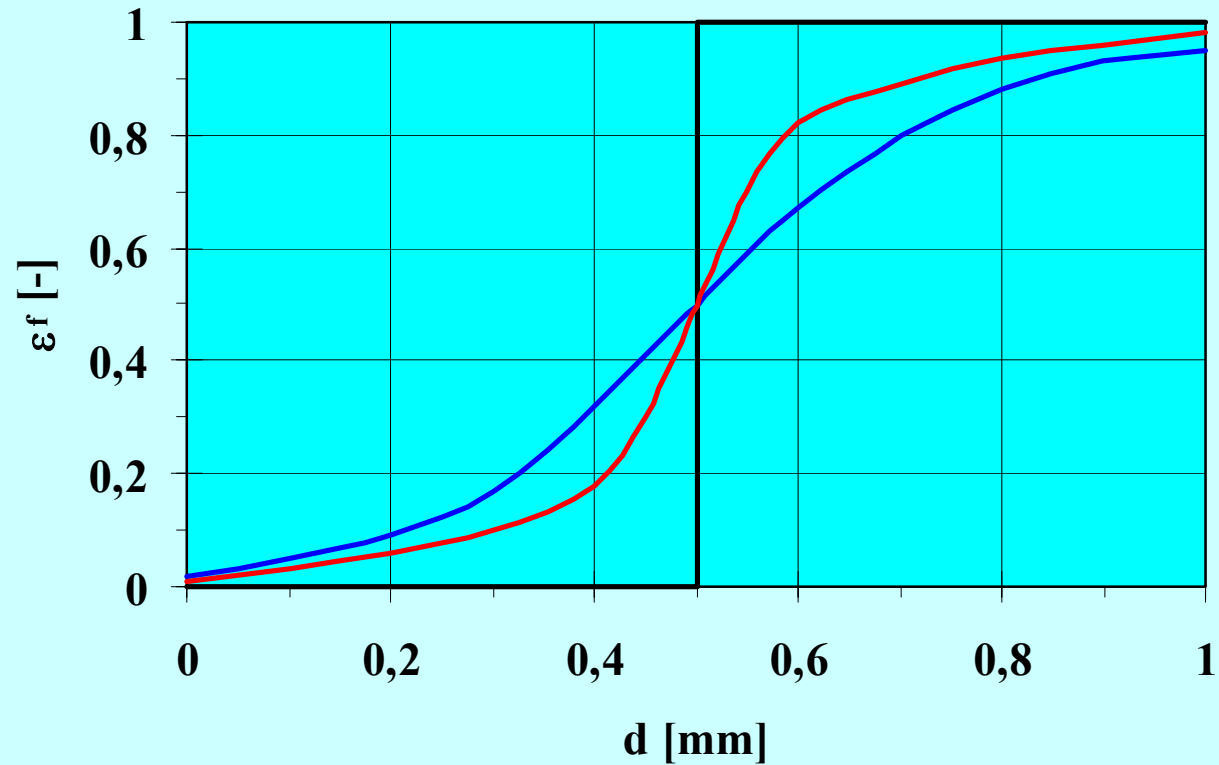
a, rövid, tömzsi
ciklon



b, hosszú, karcsú
ciklon



Frakció portalanítási fok



— elméleti — tömzsi — karcsú



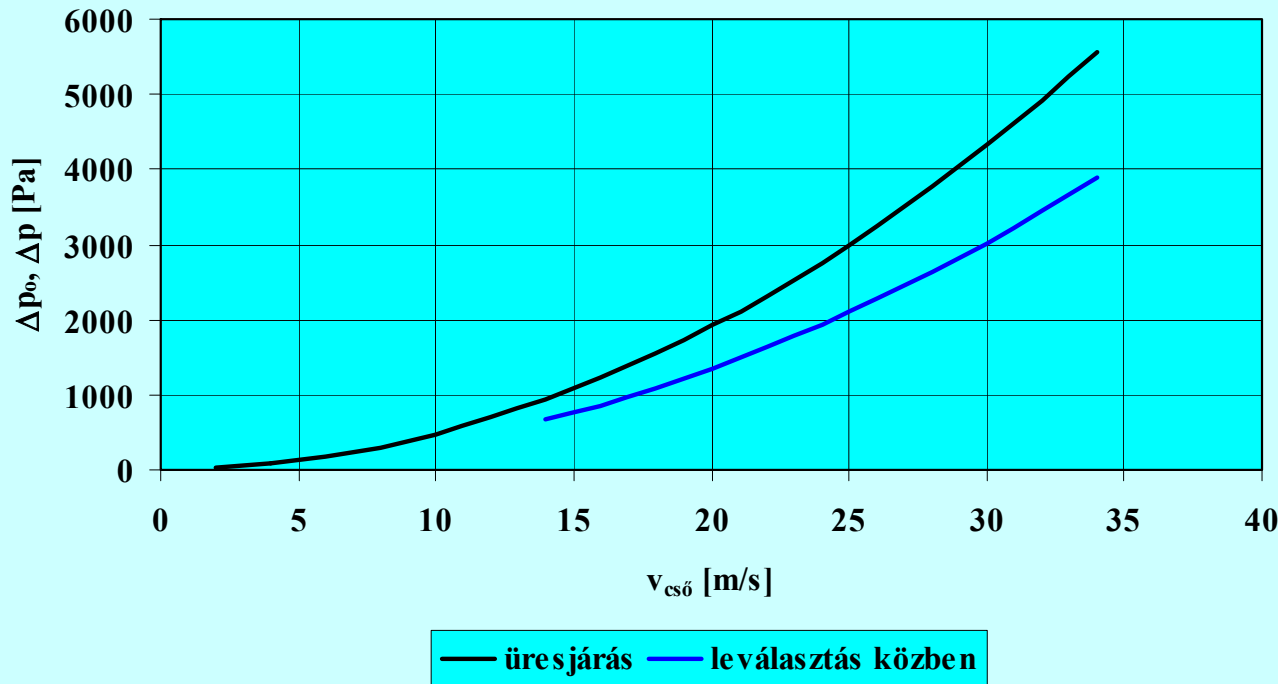
A ciklon nyomásesése

$$\Delta p_{co} = \xi_{co} \cdot \frac{\rho_g}{2} \cdot v_{cső}^2$$

$$\xi_{co} = 6 \div 10$$

ha

Ciklon nyomásesése



$$\dot{m}_a \neq 0$$

$$\Delta p_c$$

$$\xi_c < \xi_{co}$$

$$\xi_c = k_c \cdot \xi_{co}$$

$$k_c < 1$$



Finom szemcsés anyagnál (pl:liszt)

$$k_c = 0,85$$

Durva szemcsés anyagnál (pl:búza)

$$k_c = 0,6 \div 0,7$$



Részecskék mozgása elektromos erőterben

- ❑ Ha a por-gáz keveréket elektromos erőterben vezetjük keresztül, úgy a szemcsék feltöltődnek és a töltésükkel ellentétes elektróda felé vándorolnak.
- ❑ Az elektrosztatikus erő a térerősség és a részecske villamos töltésének szorzatával egyenlő, azaz $F_E = EQ$ ahol
 - ❑ F_E [kgm/s²] - a részecskére ható elektrosztatikus erő
 - ❑ E [V/m=kgm/s³/A] - a villamos térerősség
 - ❑ Q [Coulomb=As] - a villamos töltés nagysága
- ❑ A Q töltés a térerősségtől, a részecske méretétől és a részecske anyagának dielektromos állandójától függ



$$Q = \frac{E p x^2}{4}$$

- p – állandó (a dielektromos állandó függvénye; (*Barth, W.: Brennstoff-Wärme-Kraft 8, Heft 1, 1 1956*))

- Behelyettesítve kapjuk

$$F_E = \frac{E^2 p x^2}{4}$$

- A részecske mozgása közben fellépő súrlódó erőt a Stokes-formulából fejezhetjük ki ($Re=1$)

$$F_E = F_{st}$$

$$\frac{E^2 p x^2}{4} = 3\pi \mu_g v_E x$$

ahol μ_g [kg/m/s] – a gáz dinamikai viszkozitása

v_E [m/s] – az elektrosztatikus erőter hatására létrejövő részecskeváándorlás sebessége

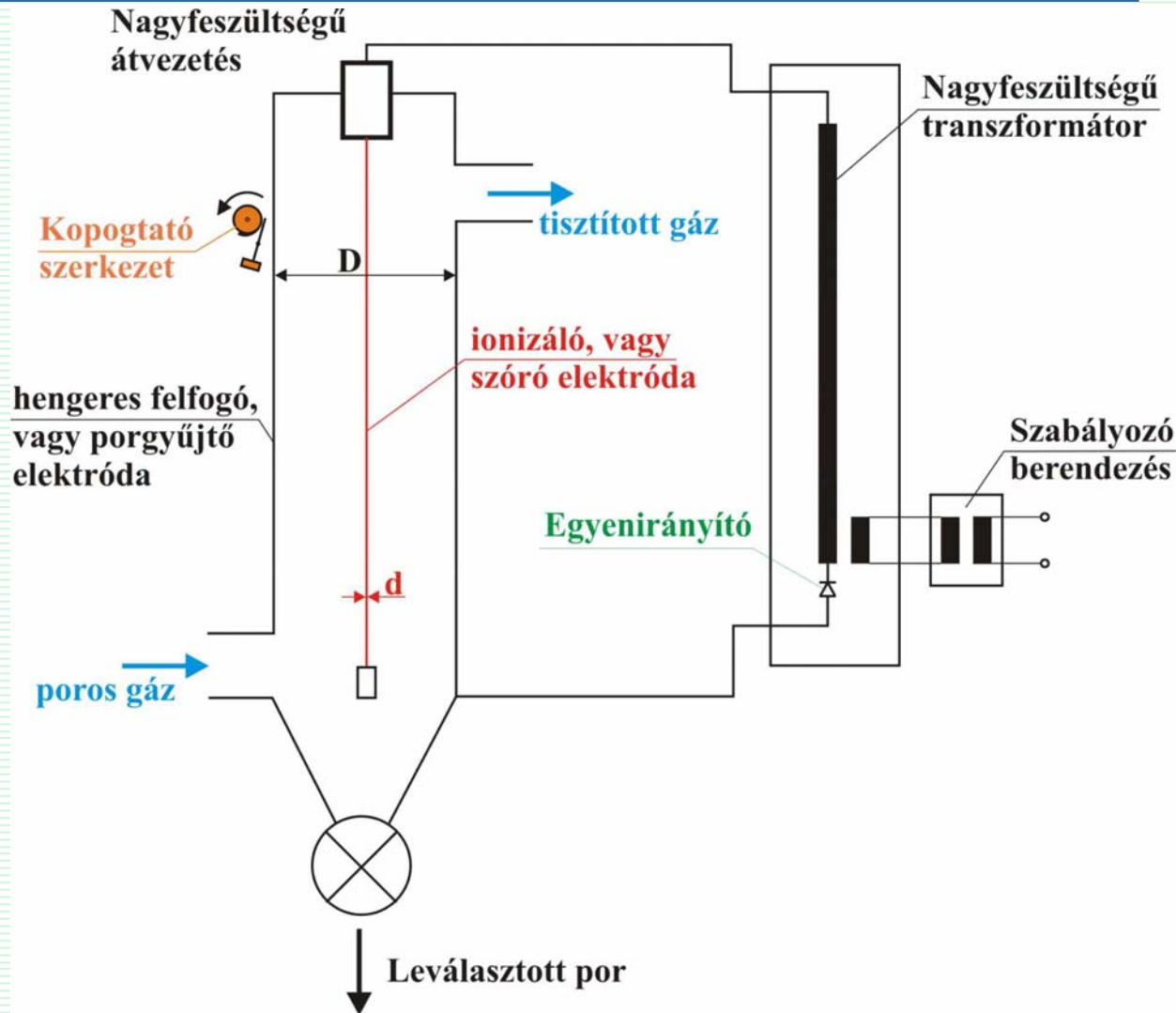


- Az egyenletet v_E -re rendezve kapjuk

$$v_E = \frac{E^2 \rho x}{12\pi \mu_g}$$



Az elektrofilter elvi működési vázlata





Ha az ionizáló elektródát a nagyfeszültségű egyenáram negatív, a porgyűjtő elektródát pedig a pozitív pólusra kapcsoljuk és az elektródákat átütés-biztosan szigeteljük, úgy az elektródák között elektromos tér keletkezik. A térerőt az elektrosztatikus térbe helyezett egységnyi töltésre ható erővel mérjük.

Ha a térerőt az ionizáló elektródától „ r ” [m] távolságban „ E ”-vel jelöljük, úgy

$$E = \frac{U}{r \ln \frac{D}{d}}$$

ahol U [kV] – az elektródák közötti feszültségkülönbség

d [m] - az ionizáló elektróda átmérője

D [m] - a porgyűjtő elektróda átmérője



- Az ionizáló elektróda negatív töltésű, tehát a gázionok az elektróda irányába vándorolnak. A „ w ” vándorlási sebességet elsősorban az elektromosan töltött részecskékre ható „ F_E ” erő határozza meg. Ez az erő két tényezőtől függ:

- a részecskéknél átadott elemi töltések számától és a
- térerőtől

- Az „ n_E ” elemi töltések száma az alábbi arányossággal írható fel $n_E \sim fE x^2$

ahol x [m] – a részecske mérete

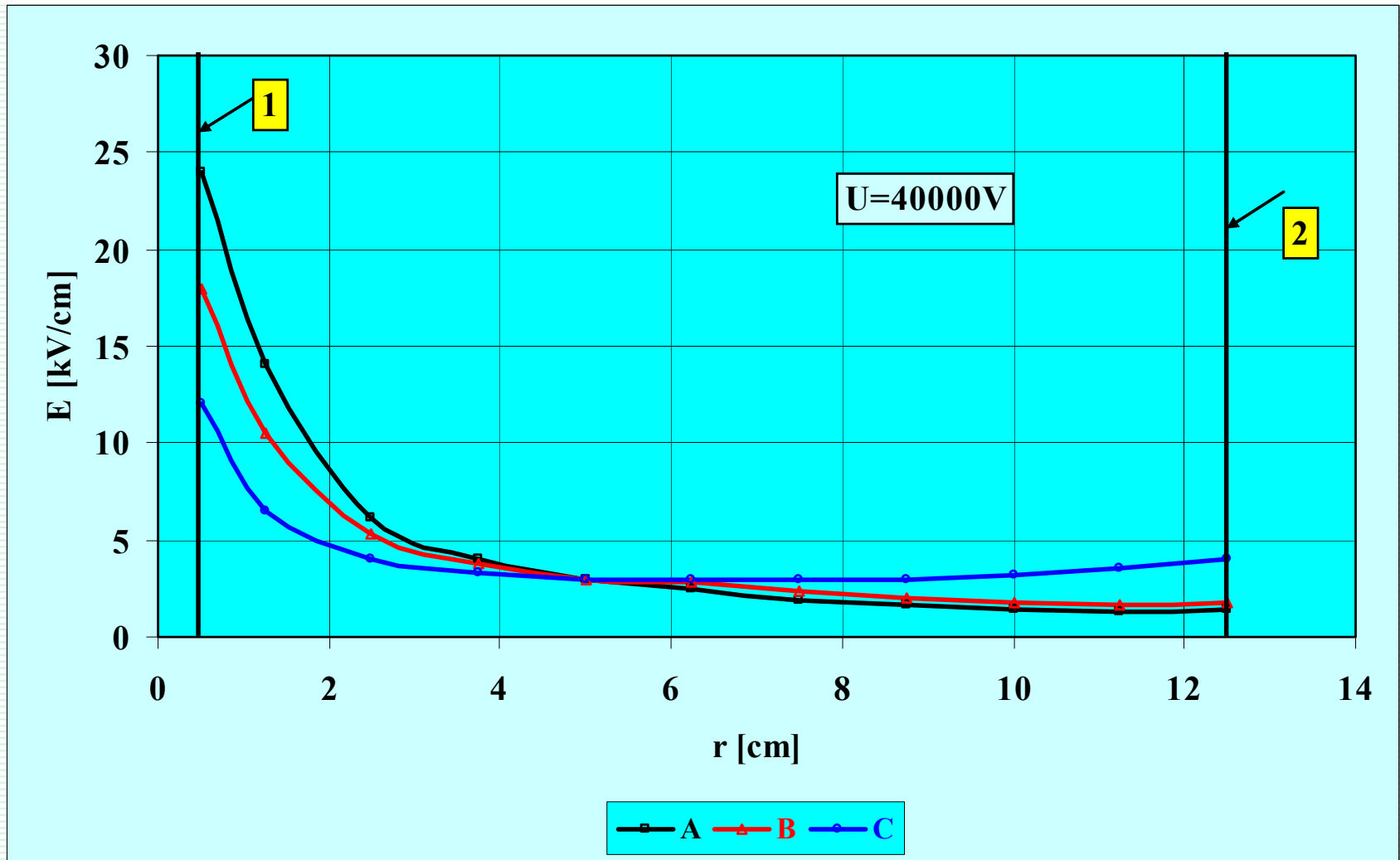
$$f = 1 + 2 \frac{\delta_E - 1}{\delta_E + 2}$$

δ_E – a részecske dielektromos állandója

E [kV/m] – a térerő



Az „ E ” térerő változása az „ r ” távolság függvényében





**Az elektródák alábbi méretviszonyánál ($D/d > 3$)
állandósult kisülés, az ún. koronajelenség áll elő**

Az előző ábrán az „1”-el jelölt felület az ionizáló elektródát, a „2”-vel jelölt pedig a porgyűjtő elektróda felületét jelképezi. A görbék a térerő változását adják a két elektróda között, az „A” jelű görbe a korona jelenség kialakulása előtt, a „B” jelű görbe a korona jelenség kialakulása után, a „C” görbe pedig a korona jelenség kialakulása és a poros gáz bevezetése után.

A részecskére ható erő arányos a részecskének átadott töltetek számával és a térerővel:

$$F_E \sim n_E E \sim f E^2 x^2$$

A részecskére ható erőből a vándorlási sebesség számítható



Elméleti megfontolások alapján – az összefüggések levezetésének mellőzésével – a frakcióportalanítási fok síklemezes elektródával rendelkező elektrofilterek esetében *W. Deutsch* szerint a következőképpen számítható

$$\varepsilon_f = 1 - e^{-\frac{v_e L}{a_x w_g}}$$

Ahol v_e [m/s] – a részecske vándorlási sebessége az elektrosztatikus erőterben

L [m] - az elektróda hossza

a_x [m] - az elektródák közötti távolság

w_g [m/s] - a gázáram sebessége (az erőterben)



Hengeres leválasztó esetén az előző összefüggés értelemszerűen alkalmazható:

$$\varepsilon_f = 1 - e^{-\frac{v_e L}{r_a W_g}}$$

ahol r_a [m] – a leválasztó henger (gyűjtőelektróda) sugara

Alakítsuk át az előző egyenletet az alábbiak szerint

$$\frac{L}{r_a W_g} v_e = f v_e = \ln \frac{1}{1 - \varepsilon_f}$$

Az összefüggés szerint a frakcióportalanítási fok az „ $f v_e$ ” szorzat növelésével nő. Ennek megértéséhez vizsgáljuk az „ x ” méretű szemcse kiválásához szükséges időt



$$\tau = \frac{z}{v_e}$$

Ahol v_e [m/s] – a közepes kiválási sebesség (a sebességvektor merőleges a kiválasztó elektróda felületére

z [m] - a részecske és a porgyűjtő elektróda közötti távolság a belépéskor.

Tételezzük fel, hogy a gáz sebességeloszlása egyenletes és jelöljük a gázsebességet „ w_g ”-vel

$$w_g = \frac{q}{r_a^2 \pi}$$

ahol q [Nm³/s] – a gáz térfogatárama



Ha az „ x ” méretű szemcsék a gázzal haladnak, akkor

$$\tau_t = \frac{L}{w_g} \quad \text{ideig tartózkodnak a leválasztóban.}$$

Legrosszabb esetben $z = r_a$ és az „ x ” méretű szemcse kiválásához szükséges idő

$$\tau = \frac{r_a}{V_e}$$

Ha $\tau < \tau_t$ tehát a részecske kiválásához szükséges idő rövidebb, mint a tartózkodási idő, akkor minden szemcse kiválik. $\varepsilon_f = 1$

Ha a gázsebességet növeljük a „ τ_t ” csökken és csak azok a részecskék válnak ki, amelyek a belépésnél „ z ” távolságban, vagy közelebb voltak a porgyűjtő elektróda falához.



Azok a részecskék, amelyeknek a faltól számított távolsága (belépéskor) „z”-nél nagyobb a porleválasztó teréből kilépnek, ugyanis a kiválásukhoz szükséges idő nagyobb mint a tartózkodási idő $\varepsilon_f < 1$.

Összefoglalva tehát a frakcióportalanítási fok a *tartózkodási idő*től és a *kiválási sebességtől* függ. A tartózkodási idő a készülék hosszától és a gáz áramlási sebességétől függ. A hossz növelése és a sebesség csökkentése egyaránt a készülék geometriai méreteit növeli, tehát költséges megoldás.