

Dr. Lajos Tamás, Dr. Suda Jenő Miklós

POR LEVÁLASZTÁSA GÁZOKBÓL

előadásjegyzet

Az alábbi tantárgyakhoz ajánlott jegyzet:

BMEGEÁTAG04 Levegő-, víztisztaság-védelem, hulladékkezelés
BME GPK, Gépészmérnöki alapszak, Folyamattechnika szakirány (BSc)

BMEGEÁTAGT1 Környezetvédelem műszaki alapjai
BME GTK, Műszaki menedzser alapszak (BSc)

BMEGEÁTKM01 Ipari levegőtisztítás
BME VBK, Környezetmérnök alapszak (BSc)

BMEGEÁTMKK4 Áramlások modellezése a környezetvédelemben
BME VBK Környezetmérnök mesterszak (MSc)

Utoljára módosítva: 2016.09.15.

2016

Áramlástan Tanszék
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS

- 1 AZ AEROSZOLOK ÉS JELLEMZÉSÜK
 - 1.1 AEROSZOLOK
 - 1.2 PORTARTALMÚ GÁZOK JELLEMZÉSE
 - 1.3 PORKIBOCSÁTÁSI ÉS PORTERHELÉSI ADATOK
 - 1.4 A POR HATÁSA AZ EGÉSZSÉGRE

- 2 A SZEMCSEHALMAZOK JELLEMZÉSE
 - 2.1 SZEMCSE ELOSZLÁSOK GYŰJTŐFÜGGVÉNYE ÉS SŰRŰSÉGFÜGGVÉNYE
 - 2.2 SZEMCSE ELOSZLÁSOK JELLEMZÉSE, LEÍRÁSA
 - 2.3 KÖZELÍTŐ FÜGGVÉNYEK

- 3 PORSZEMCSÉKET TARTALMAZÓ KÖZEG ÁRAMLÁSA (SZEMCSEDI NAMIKA)
 - 3.1 A PORTARTALMÚ GÁZ MOZGÁSÁT LEÍRÓ EGYENLETEK
 - 3.2 A PORSZEMCSÉKRE HATÓ ÁRAMLÁSI EREDETŰ ERŐ
 - 3.3 A SZEMCSEDINAMIKA ALAPEGYENLETE
 - 3.4 A PORSZEMCSE PÁLYÁJÁNAK SZÁMÍTÁSA

- 4 TÖMEG SZERINTI ELOSZLÁS GYŰJTŐFÜGGVÉNYÉNEK MEGHATÁROZÁSA SZEDIMENTÁLÁSSAL

- 5 A POR EMISSZIÓ MÉRÉSE VEZETÉKBEN ÁRAMLÓ KÖZEGBEN
 - 5.1 A MÉRENDŐ MENNYISÉGEK
 - 5.2 MÉRÉSI MÓDSZEREK
 - 5.3 A MINTAVÉTELEZÉS MÓDJA
 - 5.4 A HELYES MÉRÉS TOVÁBBI FELTÉTELEI

- 6 PORTALANÍTÁSI FELADATOK
 - 6.1 PORTARTALMÚ GÁZOK KELETKEZÉSE
 - 6.2 PORTARTALMÚ GÁZOK ELSZÍVÁSA ÉS SZÁLLÍTÁSA A LEVÁLASZTÓHOZ
 - 6.3 A POR LEVÁLASZTÁSA
 - 6.4 GÁZSZÁLLÍTÓ BERENDEZÉS, KIBOCSÁTÁS, LÉGPÓTLÁS

- 7 A POR LEVÁLASZTÁSA GÁZOKBÓL
 - 7.1 LEVÁLASZTÁSI FOK, FRAKCIÓLEVÁLASZTÁSI GÖRBE
 - 7.2 A LEVÁLASZTÁS DEFINÍCIÓJA
 - 7.3 A LEVÁLASZTÓK TÍPUSAI

- 8 A PORTARTALMÚ GÁZOK SZŰRÉSE
 - 8.1 A SZŰRŐK JELLEMZŐI
 - 8.2 A SZŰRŐK CSOPORTOSÍTÁSA
 - 8.3 A MÉLYSÉGI SZŰRŐK
 - 8.4 A FELÜLETI SZŰRŐK
 - 8.5 SZŰRŐANYAGOK
 - 8.6 A MÉLYSÉGI ÉS FELÜLETI SZŰRŐK ÖSSZEHOSONLÍTÁSA

IRODALOMJEGYZÉK

Copyright © Áramlástan Tanszék 2016

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Minden jog fenntartva. A publikáció bármely formában történő felhasználása csak a szerzői jog tulajdonosának írásos engedélyével lehetséges.

BEVEZETÉS

A természetes eredetű vagy mesterségesen előállított, legkülönbözőbb anyagú és összetételű részecskékkel (porokkal, ködökkel, folyadékpermettel, cseppekkel vagy füsttel) gyakran találkozhatunk a mindennapi életben is. Az ipari környezetben előforduló, főleg füstgázokban megtalálható részecskék leválasztása, vagy a különböző technológiákhoz kapcsolódó levegőtisztítási, szűrési feladatok során kezelendő szemcsék áramló gázban való viselkedésének megismerése és a szemcsehalmazok jellemzése alapvetően fontos az ipari leválasztó berendezések tervezhetősége szempontjából. Az élő és élettelen környezetünket, egészségünket is károsíthatják valamely mértékben ezek a részecskék. A leválasztó ill. szűrő berendezések alkalmazásának nyilvánvaló környezetvédelmi jelentősége mellett számos ipari technológiának, eljárásnak vagy műveletnek elengedhetetlen része vagy akár előfeltétele a gáz szennyező részecskéktől való megtisztítása, vagy akár gazdaságossági szempontból történő visszanyerése, felfogása.

A konyhasó, a kakaópor, a cement, vagy a gipszet alkotó részecskék, a nyomtatópatronban lévő festék pigment szemcséi, a növénypermetező vagy festékszóró pisztoly által létrehozott cseppek, permet, a tüzelőberendezésbe beporlasztott olajcseppek, vagy a járművekben a befecskendezés során keletkező üzemanyag spray: általánosan természetes vagy mesterséges eredetű, szilárd vagy folyadék halmazállapotú részecskékből álló szemcsehalmazok alkotóelemei a legritkább esetben azonos méretű, alakú szemcsék. A valóságban általában polidiszperz eloszlású szemcsehalmazokkal találkozhatunk, amelyek alkotóelemei amorf részecskék. Az igen eltérő tulajdonságú, méretű és alakú részecskékből álló szemcsehalmazok kezeléséhez pedig elengedhetetlen azok jellemzése, a többnyire gáz halmazállapotú szállító közegben való viselkedésük, mozgásuk ismerete.

A szándékosan előállított részecskék (pl. festékszórásnál a spray) vagy a technológia nem kívánt melléktermékként (pl. csiszolás során) keletkező szemcsék gázból való leválasztása, szűrése a környezetvédelmi előírások szigorodásával (pl. a szálló porokra vonatkozó PM_{10} , $PM_{2.5}$) egyre jelentősebb leválasztási feladatot jelent a gáztisztítás területén. Ez nem csak az új követelményeket teljesítő új leválasztók tervezését, telepítését és üzemeltetését jelenti, hanem a meglévő berendezéseknek a szigorúbb követelményeknek megfelelő áttervezését is. A porleválasztás területén a leggyakrabban eróművi füstgáztisztítási feladattal találkozunk, de az ipari leválasztás témakörébe tartozik akár a kórházi műtők légtér-sterilitásának biztosítása, vagy akár járműipari levegő-, olaj- és üzemanyagszűrők tervezése is.

A tárgy keretében főleg az ipari porleválasztási / szűrési feladatot ellátó légtisztító berendezésekre jellemző mérettartományú szemcsehalmazokkal: jellemzően az ún. aeroszollokkal foglalkozunk. Megismerjük az aeroszolok főbb tulajdonságait, fajtáit. Röviden elemezzük az emberi légzőszerveket, a tüdőt károsító mérettartományt. Tárgyaljuk a szemcsehalmaz-eloszlás főbb jellemzőit, mely segítségével meghatározhatjuk pl. az átlagos szemcseméretet. A szemcsedinamika fejezetben a szemcsehalmazokat alkotó részecskék gázáramlásbeli mozgását elemezzük, vizsgáljuk a szemcsékre ható erőket, a leválasztási folyamatban fontos szerepet játszó mechanizmusokat és porszemcse áramláskövetési tulajdonságait. A légvezetékben áramló gáz porkoncentráció mérésével kapcsolatos ismeretek kapcsán a helyes mintavételezés feltételeinek összefoglalása után különböző tipikus mintavételező szonda kialakításokat ismertetünk. A leválasztó berendezésekre felírt anyagmérleg alapján definiáljuk a jellemző összleválasztási, összáteresztési, ill. a frakcióleválasztási fokot, melyek segítségével az éles / valós leválasztást jellemezni tudjuk. Megismerünk különféle felépítésű leválasztó berendezéseket, így foglalkozunk ülepítők, zsalus leválasztók, ütközéses leválasztók, mosótornyok, Venturi-mosók, ciklonok, cseppleválasztók, elektrosztatikus leválasztók és felületi/mélységi szűrők felépítésével és elvi működési jellemzőivel, a leválasztás és szűrés mechanizmusával.

Az aeroszollokkal foglalkozó tananyag az általános mérnöki gyakorlathoz képest nagyságrendekkel kisebb, „szokatlan” mérettartományú részecskékkel foglalkozik ($1 \mu m = 10^{-3} mm = 10^{-6} m$). A részecske méret jellemzésére –ideális gömb alakot feltételezve – az átmérőt használjuk, melynek jele d_p .

Azonban sok esetben, pl. a szemcsehalmazok eloszlásának jellemzésére szolgáló mérettől függő $Q(x)$ gyűjtő- és $q(x)$ sűrűségfüggvények leírásában a matematikai kezelésmód miatt a szemcseátmérőre az x jelölést is használjuk.

A tárgyalt mérettartományt néhány szemléletes példán keresztül mutatjuk be.

Az emberi hajszál 40÷100 mikron mérettartományba esik. Egy 30 cm hosszú és 50 mikron átmérőjű hajszál hossza mentén 6000db 50 mikron átmérőjű részecskét tudnánk felsorakoztatni.

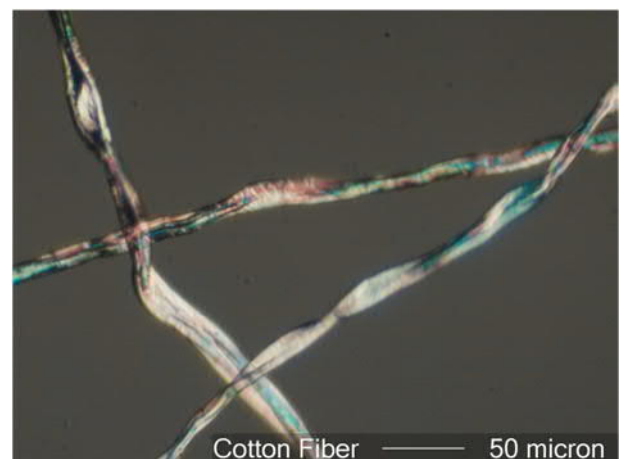
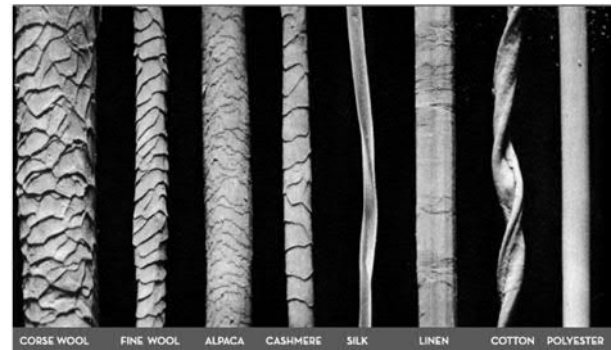
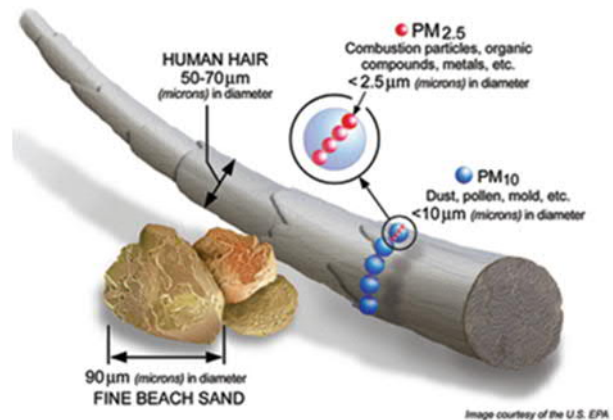
Az emberi fejen átlagosan 120db/cm² sűrűséggel kb. 20000db hajszál található. Ha hajmosás után minden hajszálon kb. 0.1mm vastagságú vízfilm réteg marad, akkor a rövid (pl. 3cm hosszú) hajon összesen kb. csak 0,018kg, míg a hosszú (pl. 30cm) hajszálakon összesen 0,18kg víz marad. Ezért tarthat kb. 10-szer annyi ideig a hosszú női hajszáritása, mint a férfiaké.

Az emberi ujjhegy felbontási képessége 40 mikron körüli. Ezért egy, az emberi ujjhegy érzékelését, tapintási tulajdonságait megközelítő robot-ujj kifejlesztése nagy kihívás (ld. Morelle, 2006).

A ruhaszövet anyaga finom, vékony (természetes vagy mesterséges) szálakból szőtt szálszerkezet. Annál puhább és hajlékonyabb a szövetanyag, minél vékonyabb és finomabb szálból szövik a textíliát. Az extrafinom ausztrál gyapjúszálból szőtt pulóverjeiről, ingjeiről, nyakkendőiről, híres Ermenegildo Zegna által alapított olasz Zegna divatcég 1963-ban hozta létre a Vellus Aurerum nevű díjat: minden évben a legfinomabb fonalat előállító termelőt a nyájról származó gyapjú tömegével egyenlő mennyiségű arannyal jutalmazták. 2002-ben a nyertes 10,3 mikronos szálátmérőt ért el.

A Balatonon sem ritka, orkán erejű széllel kísért erős viharban a fulladásos balesetek egy része nem a vízfelszín alatt, hanem a vízfelszín fölött következik be. Az esőcseppek és a hullámok tetejéről a szél által leszakított cseppek igen sűrű, átláthatatlan permetet alkotva a vízfelszín fölött kb. 1÷1.5 méteres magasságig lehetlenné teszik a belégzést: a levegővel vízcseppek is jutnak a tüdőbe, amely fulladást okoz. Ez sűrű, parányi vízcseppeket tartalmazó réteg orkán erejű szélviharban még a legjobb úszókra is veszélyes.

Az ipar tömeggyártási termékei közül a csapágygolyók felületi érdességének van a legszigorúbb tűrése a 0.01 mikronos tűréshatáron belül kell lennie. Ennél a méretnél a hajszál átmérője kb. 5000-szer nagyobb!



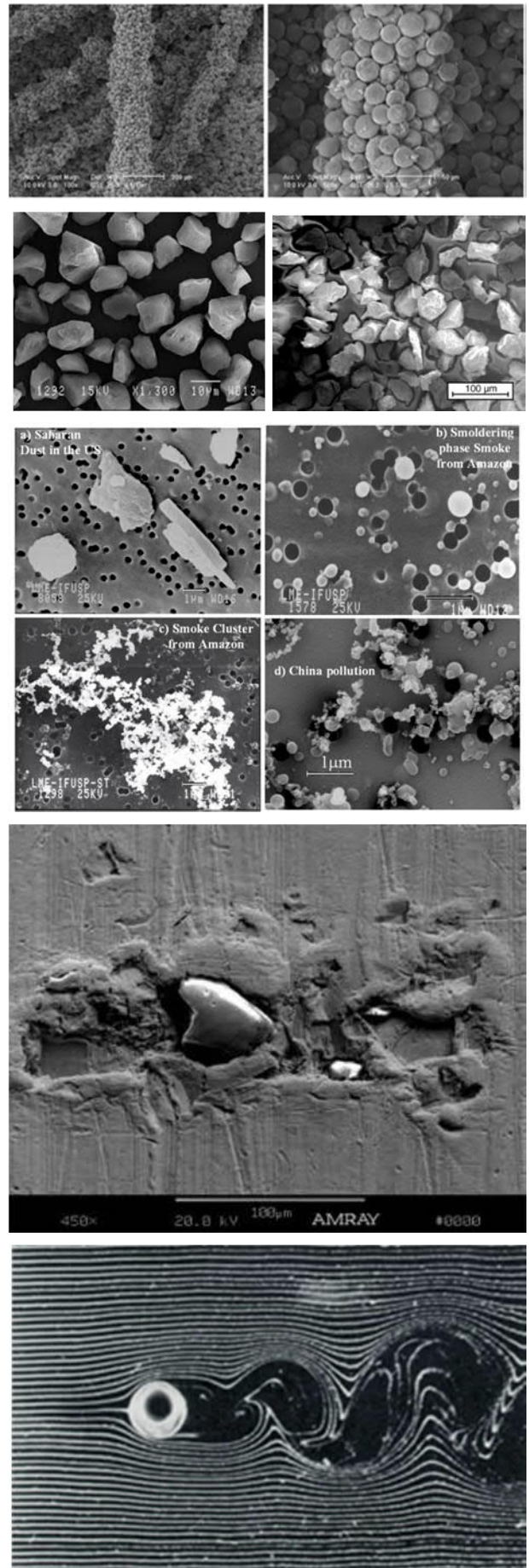
Egy mai korszerű alumínium felületi bevonat 20 mikronos részecskékből áll.

Járműmotorok üzemanyag-rendszerének elemei (üzemanyag befecskendező fúvóka, vezérlő szelepek, adagoló elemek) illesztési, tűrési értékeinek szokásos értéke 5 mikron. A standard („15 mikronos”) üzemanyagszűrők a 2 mikronos szemcsék kb. felét továbbengedik a szűrőn, azok így az illesztési felületeket jelentős mértékben koptatják. Az újabb „ultrafinom” szűrőt tartalmazó szűrők utáni üzemanyagban az 5 mikronnál kisebb szemcsék darabszáma már jelentős mértékben lecsökken: a 2 mikron méretű szemcséknek már 98%-át leválasztják, így az illesztési felületek kopását okozó részecskékből jelentősen kevesebb van jelen az ilyen szűrő után.

Tintasugaras nyomtatófejen több ezer 10 mikronos mikrofúvóka található, amelyek a fotóminőségű nyomtatáshoz szükséges kb. 2 pikoliteres cseppeket állítják elő (1 pikoliter = 10^{-12} liter).

Ha egy szál cigaretta elszívása során keletkező füst (kórom) részecskéket azonos átmérőjű gömbnek tételezzük fel, akkor pl. 0.5 mikronos átmérőjű részecskékből ~5000 milliárd *db*-ot jelent. Amennyiben egy szál cigaretta elszívása esetén az összes belélegzett füst kilélegzése után a tüdőben –optimista becslésként– mindössze a részecskék 1%-a marad bent, akkor pl. a 0.5 mikron átmérőjű részecskékből az összesen 2^{23} *db* végső tüdőhólyagocska (alveolus) mindegyikébe is még kb. 6000 *db* kerül!

A korszerű Lézer Doppler Anemométeres (LDA) áramlási sebesség méréseknél alkalmazott *tracer* (áramlást követő) olajköd részecskék ~99%-ban a 0,1÷3 mikron közötti átmérő-tartományba esnek. Ilyen olajköd részecskékből álló „füstcsíkot” láthatunk gyakran a szélcsatornában áramlás láthatóvá tételi kísérletekről készült felvételeken.



1 AZ AEROSZOLOK ÉS JELLEMZÉSÜK

1.1 AEROSZOLOK

Az ipari levegőtisztaság-védelemmel, portartalmú gázok tisztításával foglalkozó tananyag az ún. aeroszokok vizsgálatára korlátozódik.

AEROSZOL: szilárd és/vagy folyékony halmazállapotú részecskék (szemcsék, cseppek) *kvázistabil* eloszlása gázban. A kvázistabil jelző azt jelenti, hogy a gáz és a diszperz részecskéhalmaz (poros gáz elegy) tulajdonságai (pl. koncentráció, méreteloszlás) időben nem változnak lényegesen: közel állandóak. Normál állapotú levegőben *kvázistabilnak* tekinthető az a részecskéhalmaz, amelyben a szilárd szemcsék vagy cseppek mérete a $0.01\mu\text{m} \leq d_p \leq 50\mu\text{m}$ mérettartományba¹ esik. Az aeroszokok szemcseméret-tartomány felső határánál nagyobb szemcsék a súlyerő következtében már olyan nagy sebességgel süllyednek (ülednek) a nyugvó levegőben, hogy számuk a vizsgált térfogatban időben igen gyorsan változik, tehát az eloszlás már nem tekinthető kvázistabilnak. (A szemcsék kiülepedését befolyásolhatja a vizsgált térben a gáz áramlása: pl. termikus feláramlást okozhat egy szoba padlójának napsugárzás miatti felmelegedése.) Ha pedig a részecskék átmérője kisebb, mint az aeroszokok szemcseméret-tartomány alsó határa, akkor a kb. $10^{-4} \div 10^{-2}$ μm mérettartományú gázmolekulák hőmozgása következtében a részecskék igen gyors mozgást végeznek (ld. a közel azonos nagyságrendbe eső $\lambda=0.065\text{mm}$ értékű gázmolekulák közepes szabad úthosszát), aminek eredményeként viszonylag hamar érintkeznek, ütköznek, összetapadnak más részecskével, így ennek következtében a szemcsehalmaz darabszáma és a szemcseméret is gyorsan változik az idő függvényében, azaz a szemcsehalmaz már ismét nem tekinthető kvázistabil eloszlásúnak.

Az aeroszokok a következő fajtákra oszthatók: *por*, *füst* és a *köd*.

POR	FÜST	KÖD
<ul style="list-style-type: none"> • szilárd halmazállapot, • fénymikroszkóppal látható, • $x \geq 0.2 \mu\text{m}$ méret, • keletkezés: többnyire töréssel, kopással vagy oldószer elpárolgással 	<ul style="list-style-type: none"> • folyadék cseppek vagy szilárd szemcsék • $x \leq 1\mu\text{m}$ átmérő, • keletkezés: kondenzáció útján, vagy molekula állapotból kémiai reakcióval • Szemcséi általában láncszerű képződményeket alkotnak. 	<ul style="list-style-type: none"> • folyadékcseppekből áll, • amelyek vagy kondenzációval gőzfázisból, vagy mechanikai úton porlasztással keletkezhetnek. • A köd lényeges tulajdonsága, hogy a folyadékfázis a saját gőzével egyensúlyban van.

1.2 PORTARTALMÚ GÁZOK JELLEMZÉSE

1.2.1 Porszemcsék méretének meghatározása

Gömb alakú porszemcsék esetén a szemcsék méretét a gömb x átmérőjével jellemezzük. Azonban a valóságban előforduló porszemcsék amorf, általában nem gömb alakú részecskék. Hogyan lehet az igen változatos alakú szemcsék méretét jellemezni? Erre többféle módszert alkalmazhatunk.

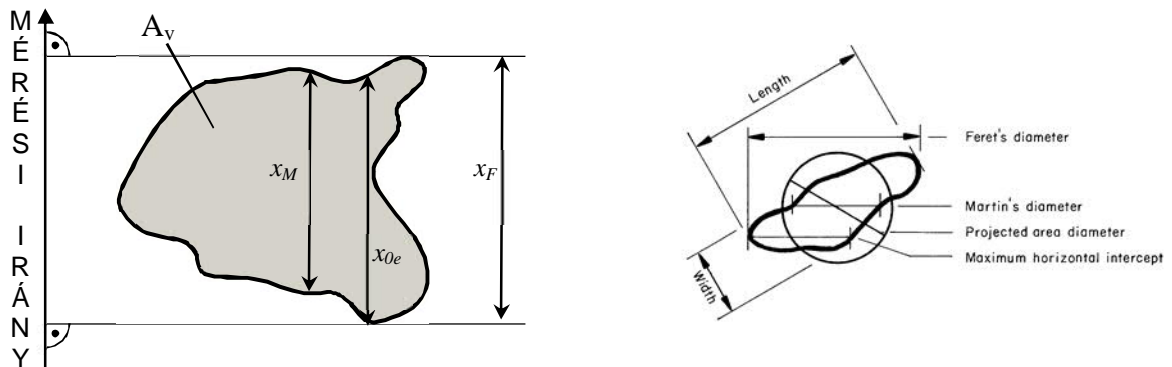
¹ A megadott szemcseméret-tartomány határok többnyire nagyságrendi útmutatást adnak, tehát talán helyesebb lenne úgy fogalmazni, hogy pl. az aeroszokok szemcseméret-tartománya a kb. néhány ezred mikron és a kb. néhány tíz mikron méret közötti mérettartományt jelenti. A továbbiakban az egyszerűség kedvéért mellőzzük a „kb. néhány...” megfogalmazást, de kihangsúlyozzuk, hogy ezen szemcseméret-tartomány határok a téma szakirodalma számára sem jelentenek szigorúan kötött mérethatárokat, bár többnyire a $0.001\mu\text{m} \leq x \leq 10\mu\text{m}$ mérettartomány fordul elő, mint az aeroszokokat alkotó szemcsék jellemző mérettartománya.

1. SZITÁLÁS: A porszemcséket pl. a szemcsehalmaz szitálásával lehet szétválasztani. A szitán áteső szemcsék méretéről (átmérőjéről) azt mondhatjuk, hogy méretük kisebb, a fennmaradó szemcsékről pedig, hogy méretük nagyobb, mint az adott szita nyílásainak az átmérője.
2. Bevezették az EGYENÉRTÉKŰ ÁTMÉRŐ fogalmát, mely az adott valós részecske valamely tulajdonságával azonos tulajdonságú, tehát ezen tulajdonság tekintetében azzal egyenértékű, de egy ideális gömb alakú részecske átmérőjét definiálja.

2.1 GEOMETRIAI EGYENÉRTÉKŰSÉG

2.1.1 MÉRET ALAPJÁN: Másik lehetőség a szemcsehalmazról mikroszkóp **segítségével készített felvételek kiértékelésével** az ún. "geometriai egyenértékű átmérő" meghatározása. Ilyenkor a szemcsék véletlenszerűen helyezkednek el a mérési irányhoz képest. Az **1.1 ábrán** látható három, különböző módon definiált átmérő:

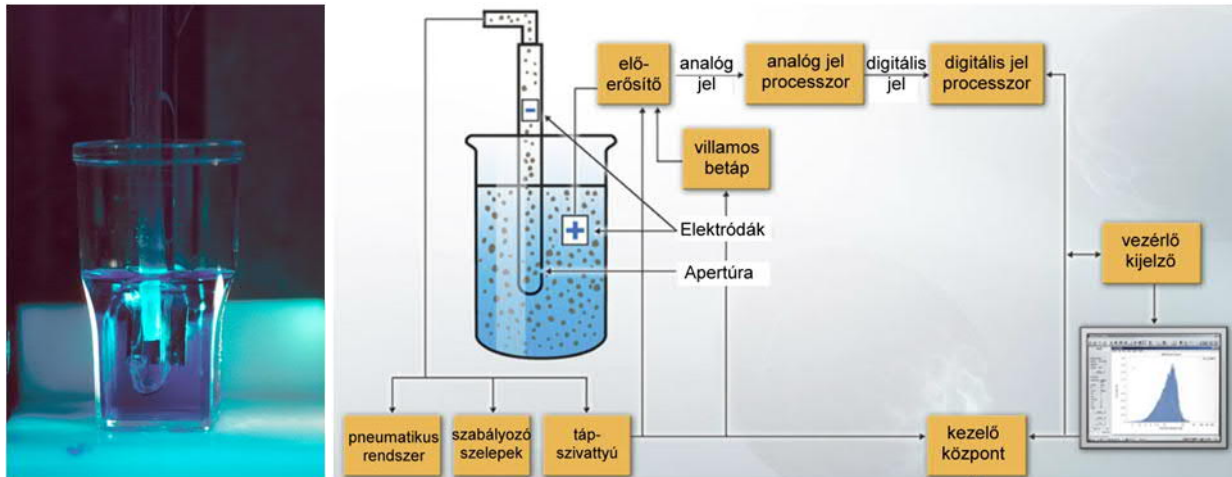
- x_F FERET-átmérő: mérési irányra merőleges érintők közötti távolság,
- x_M MARTIN-átmérő: szemcse vetületi felületét felező, mérési iránnyal párhuzamos húr hossza,
- x_{0e} az adott mérési irányban a leghosszabb húr mérete.



1.1 ábra Képkieértékeléssel meghatározható jellemző geometriai méretek

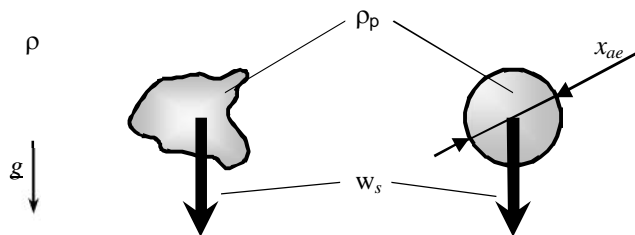
2.1.2 GEOMETRIAI EGYENÉRTÉKŰSÉG – FELÜLET ALAPJÁN: Meghatározható a szemcse képen látható **vetületi felülete**, A_v . Az egyik lehetőség, hogy a geometriailag egyenértékű átmérőt egy azonos vetületi felületű gömb alakú szemcse átmérőjeként $x_A = \sqrt{4A_v/\pi}$ definiáljuk. Másik lehetőség, hogy különböző irányokból meghatározott vetületi felület átlagából (A_k) meghatározható a szemcse felülete: $A = 4 \cdot A_k$, ha nincs a szemcse felületének konkáv része. Azonos felületű gömb alakú szemcsének az átmérője lehet ebben az esetben a geometriailag egyenértékű átmérő: $x_A = \sqrt{A/\pi}$.

2.2 VILLAMOS EGYENÉRTÉKŰSÉG: A porszemcse halmaz ún. *Coulter Counter* mérési eljárás esetében egy kapillárison át áramlik a mérendő szemcsehalmazt tartalmazó elektrolit. A kapillárisban áramló elektrolit **elektromos ellenállásának változása** arányos az éppen benne lévő szemcse V térfogatával. A térfogatból közvetlenül meghatározható geometriailag egyenértékű átmérő: azonos térfogatú, gömb alakú szemcse átmérője: $x_v = \sqrt[3]{6V/\pi}$.



1.2 ábra A Coulter Counter mérőberendezés fotója és működési vázlata¹

2.3 AERODINAMIKAI EGYENÉRTÉKŰSÉG: Igen gyakran az x_{ae} ún. **áramlástan**i, vagy **aerodinamikai egyenértékű átmérőt** használjuk, ami egy, a valós szemcsével azonos sűrűségű olyan ideális gömb átmérője, amely a szemcsét körülvevő (légnemű vagy cseppfolyós) közegben a nehézségi erőter hatására az adott szemcsével azonos, állandósult sebességgel süllyed² (ld. 1.3 ábra), azaz megegyezik a süllyedési sebességük (w_s [m/s], ld. később).



1.3 ábra Az aerodinamikai egyenértékű átmérő meghatározásának módja

Kis szemcseméretknél (nagyon kicsi süllyedési sebességük miatt) ehelyett centrifugában vizsgáljuk a szemcsék kirakódását.

2.4 OPTIKAI EGYENÉRTÉKŰSÉG: Definiálhatjuk a nem gömb alakú porszemcse x_o jelű ún. **optikailag egyenértékű átmérőjét**, amely a szemcse által visszavert fény intenzitásával azonos intenzitású fényt visszaverő, azonos anyagból készült gömb alakú szemcse átmérője.

Ha értékelni kívánunk egy adott szemcseméret megoszlást, először mindig tisztázzuk, hogy milyen módon definiálták és határozták meg az x szemcseátmérőt! Adott porszemcse különböző módon definiált és meghatározott átmérő értékei között akár 1:3 eltérés is lehet.

A szemcse térfogattól és felületből számolt geometriai egyenértékű átmérők (x_v és x_A) ismeretében definiálhatjuk a szemcsék alaki tényezőjét (szfericitását³): $\psi = (x_v/x_A)^2$, amely tényező számértéke tart az 1-hez, minél inkább gömbszerű a szemcse.

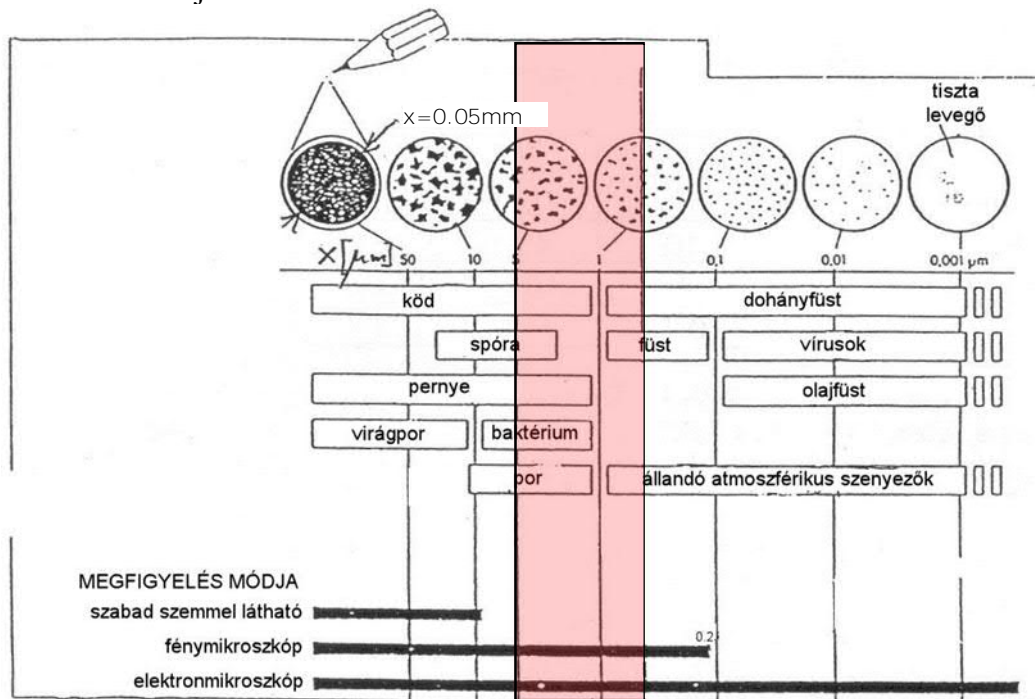
1.2.2 Porfajták jellemző szemcseátmérő- és süllyedési sebesség tartománya

¹ forrás: Beckman Coulter Counter®, www.beckmancoulter.com

² A w_s magyarul süllyedési vagy ülepedési sebesség angol nyelvterületen használatos megfelelője a *settling velocity*.

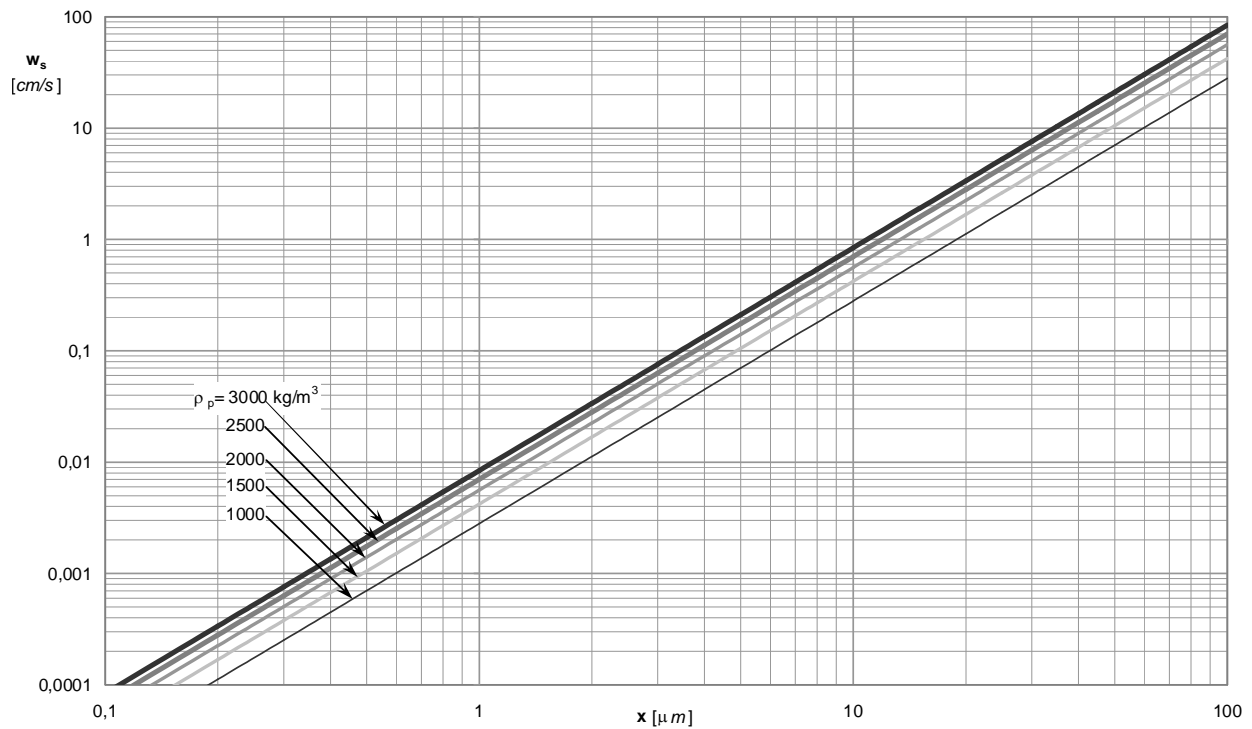
³ szfericitás: az ideális gömb alaktól való eltérést kifejező alaki tényező, ld. sphere

Ábrázoljuk az **1.4a ábrán** logaritmikus léptékben a különböző porfajtákra jellemző szemcseátmérő intervallumokat. Összehasonlításként látható egy hegyes ceruzával készített 0.05mm átmérőjű pont 250-szeres nagyítása, amelyhez hasonlíthatók a különböző méretű, ugyancsak 250-szeres nagyításban ábrázolt szemcsék. Az ábra legalján látható, hogy mely méretű szemcsék figyelhetők meg szabad szemmel, fénymikroszkóppal és elektronmikroszkóppal. Az ábrában feltüntettük azt a $0.5\mu\text{m} \leq x \leq 5\mu\text{m}$ szemcseátmérő tartományt, amely a tüdőt különösen károsítja. Ennek okát az 1.4 pontban később ismertetjük.



1.4a ábra A különböző aeroszolokban lévő szemcsék mérete

Tájékoztatóként a **1.4b ábrán** felvittük a szemcsék közelítő süllyedési sebességét is, azt a w_s közelítő sebességét, amellyel az adott méretű, átlagos sűrűségű ($1000\div 3000\text{kg/m}^3$) szemcsék normál állapotú nyugvó levegőben süllyednek.



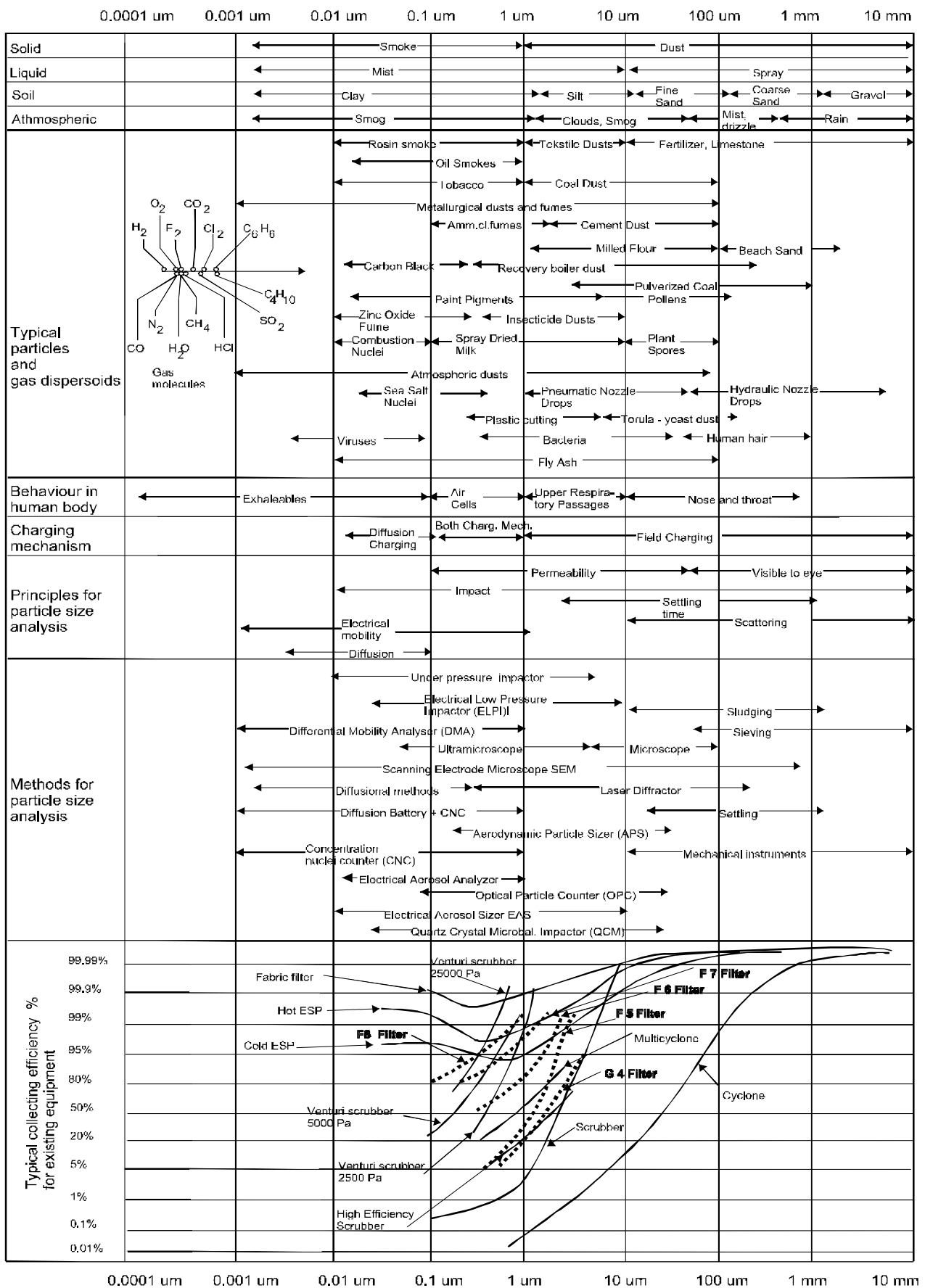
1.4b ábra Gömb alakú, különböző sűrűségű porszemcsék süllyedési sebessége normál állapotú levegőben

További két összefoglaló táblázatot mutat az 1.4c és 1.4d ábra, melyek a $10^{-4} \div 10^3$ mikronos méret-tartományban adnak áttekintést az aeroszolok fajtáiról, tipikus, leggyakrabban előforduló szemcsék, részecskék jellemző méreteiről.

	Particle Diameter, μm										
	0.001	0.01	0.1	1	10	100	1000				
Measurement Scale	Angstrom	1nm 10^{-9}m	10nm 10^{-8}m	100nm 10^{-7}m	$10^0\mu\text{m}$ 10^{-6}m	$10^1\mu\text{m}$ 10^{-5}m	$10^2\mu\text{m}$ 10^{-4}m	$10^3\mu\text{m}$ 10^{-3}m			
Designated Size Ranges		Nanometer	Submicrometer	Micrometer							
		Ultrafine	Fine	Coarse							
		Free Molecule	Transition	Continuum Region							
Aerosol Definitions			Fume		Dust						
					Fog, Mist						
			Smog			Spray					
			Smoke		Cloud Droplets						
Typical Aerosol Size Ranges			Metal Fumes		Cement Dust						
			Sea Salt Nuclei		Coal Dust						
			Oil Smoke		Coal Fly Ash						
			Tobacco Smoke		Machining Fluids						
			Diesel Smoke		Paint Spray						
	Atmospheric Aerosol	Nuclei	Accumulation Mode	Coarse Particle Mode							
Typical Bioaerosol Size Ranges		Viruses		Bacteria	Pollen						
				Fungal Spores							
Sampling Definitions			PM-10								
			PM-2.5								
			Thoracic Particles								
			Respirable Particles								
Wavelength of Electromagnetic Radiation			Ultraviolet	Visible	Infrared						
	X-Rays			Solar							
Other	Gas Molecules		Mean Free Path (STP)		Red Blood Cell	Human Hair	Visible to Eye				
			Proteins								
					Std. Sieve Opening	400	200	100	60	40	20

1.4c ábra Összefoglaló táblázat - I.¹

¹ forrás: Aerosol & Particulate Research Laboratory



1.4d ábra Összefoglaló táblázat - II.¹

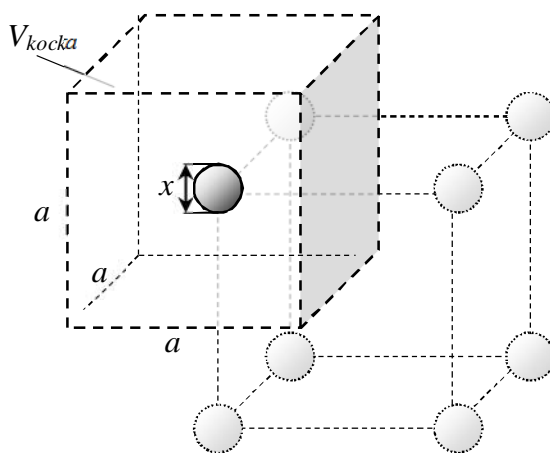
¹ forrás: Goodfellow-Tahti, "Industrial Ventilation Design Guidebook" | 2001 | ISBN: 0122896769 | London : Academic

1.2.3 Porszemcsék átlagos távolsága aeroszolokban

A portartalmú gázok jellemzőinek jobb megismeréséhez vizsgáljuk meg, hogy mekkora a szemcsék egymáshoz képesti átlagos távolsága! Egy egyszerű modell segítségével megítélhetjük, hogy a kezelendő poros gázok, mint általában kétfázisú elegyek híg vagy sűrű elegyek, azaz pl. mekkora a szemcsék térfogati aránya.

Tételezzük fel, hogy $\rho_p = 2000 \text{ kg/m}^3$ sűrűségű, **monodiszperz**, azaz állandó átmérőjű (jelen esetben $x = 3 \mu\text{m}$) szemcséket tartalmaz a vizsgált levegő. Tegyük fel továbbá, hogy az aeroszol sajátosságait például egy tüzelőberendezés füstgáz vezetékének három különböző pontján vizsgáljuk. Az első mintavételezési hely legyen közvetlenül a kazánból való kilépésnél, ahol az ún. nyersgáz koncentrációja $c = 10 \text{ g/m}^3$. A második legyen egy rosszul működő leválasztó után, ahol a tisztagáz oldali koncentráció értéke $c = 1 \text{ g/m}^3$. Végül a harmadik aeroszol koncentrációja legyen egy általában megfelelően működő leválasztó utáni állapotra jellemző $c = 0.1 \text{ g/m}^3$ (100 mg/m^3) koncentráció érték.

Tekintsük az alábbi **1.5 ábrán** látható egyszerű modellt, amely a gázban lévő porszemcsék elhelyezkedését modellezi olyan módon, mintha azok egy „ a ” oldalhosszúságú kocka csúspontjaiban helyezkednének el.



1.5 ábra Egyszerű modell porszemcsék átlagos távolságának meghatározására

A fenti modell alapján a vizsgált teljes térrészt n db ilyen egyetlen szemcsét tartalmazó V_{kocka} térfogatú térrészre osztva a $c[\text{kg/m}^3]$ koncentrációra:

$$c = \frac{n \cdot m_p}{n \cdot V_{kocka}} = \frac{n \cdot \frac{x^3 \cdot \pi}{6} \cdot \rho_p}{n \cdot a^3},$$

illetve fenti alapján a szemcsék egymástól mért relatív távolságára (a/x) így:

$$\frac{a}{x} = \sqrt[3]{\frac{\rho_p \cdot \pi}{6 \cdot c}}$$

kifejezés adódik, ahol $n[\text{db/m}^3]$ a vizsgált térfogatban lévő porszemcsék darabszáma, $c[\text{kg/m}^3]$ a szemcsék koncentrációja; $a[\text{m}]$ a porszemcsék átlagos távolsága; $x[\text{m}]$ a porszemcse átmérő; $\rho_p[\text{kg/m}^3]$ a por anyagának sűrűsége.

A fenti egyszerű megfontolások alapján megállapítható, hogy pl. $x = 3 \mu\text{m}$ szemcseátmérő és $c = 10 \text{ g/m}^3$ koncentráció érték esetén a szemcsék egymástól mért átlagos távolsága az átmérő 47-szerese, amiből kiszámítható, hogy 1 cm^3 térfogatban 350 000 db szemcse van.

Az alábbi táblázat a fenti három különböző koncentráció értékre mutatja a fenti értékeket.

c [g / m^3]	$\frac{a}{x}$	n [db / cm^3]
10	47	350 000
1	101	35 000
0.1	218	3 500

Vegyük figyelembe, hogy az $1mm^3$ térfogatban maximálisan kb. 37millió db $3\mu m$ átmérőjű gömb alakú szemcse férne el, ha egymást közvetlenül érintve helyezkednének el!

A fenti megfontolásból látható, hogy:

- a szokásos porkoncentrációk esetén a portartalmú gáz igen "híg" gáz-por elegy (ha $10cm$ lenne egy szemcse átmérője, akkor a szomszéd részecskék egymástól átlagosan kb. 5, 10 ill. 22 méterre lennének a fenti 10, 1 ill. 0,1 g/m^3 koncentrációk esetén!), valamint
- még a szokásos mértékben megtisztított kis koncentrációjú gázban is igen nagy darabszámú részecske van!

1.3 PORKIBOCSÁTÁSI ÉS PORTERHELÉSI ADATOK

A levegőben lebegő porokat (szállópороkat) eredetük szerint 3 csoportra osztjuk:

- TERMÉSZETES POROK:

- kozmikus eredetű (az egész Földön kb. $10^7 t / év$)
- szerves porok (pl. vulkánkitörésből légkörbe jutó por, hamu; sivatagi por; tengeri só)
- szerves porok (pl. növényzet maradványai, mikrobák, virágporok)

- TECHNIKAI POROK: technológiai folyamatok során, aprítás, őrlés, osztályozás, szárítás, gázból kondenzáció révén jönnek létre.

- HULLADÉKPOROK:

- településeken keletkezők (közutakon, épületekből származó porok, földanyagok)
- gyártási folyamatok következtében keletkezők (szénbányászat, ércelőkészítés, hegesztés, motorok kipufogó gázai, csiszolás, köszörülés)
- tüzelőberendezésekben keletkezők (pernye, korom).

A levegő portartalma tekintetében Magyarország területének 1.7%-a erősen, 6.2%-a mérsékelten szennyezett. Kedvezőtlen, hogy a szennyezés főként sűrűn lakott területeken lép fel, ezért a por-szennyezésnek különösen kitett területeken a lakosság jelentő része, negyede-ötöde él. A légszennyeződés tekintetében különösen érintett a fővárosi agglomeráció és Észak-Dunántúl.

A kibocsátás a gazdasági folyamatoknak megfelelően változik, általában jelentősen csökken a por kibocsátás: 1980 és 2000 között negyedére, ezen belül igen jelentősen csökkent az ipar, az energia-termelés kibocsátása, miközben a közlekedés lényegében nem változott. A kilencvenes évek második felében az ipar az összes por (évente mintegy 100.000 tonna) 40%-át, a lakosság 25%-át, a hőerőművek és a közlekedés 13-13%-át bocsátotta ki. A levegőben lebegő por átlagos koncentrációi az alábbiak:

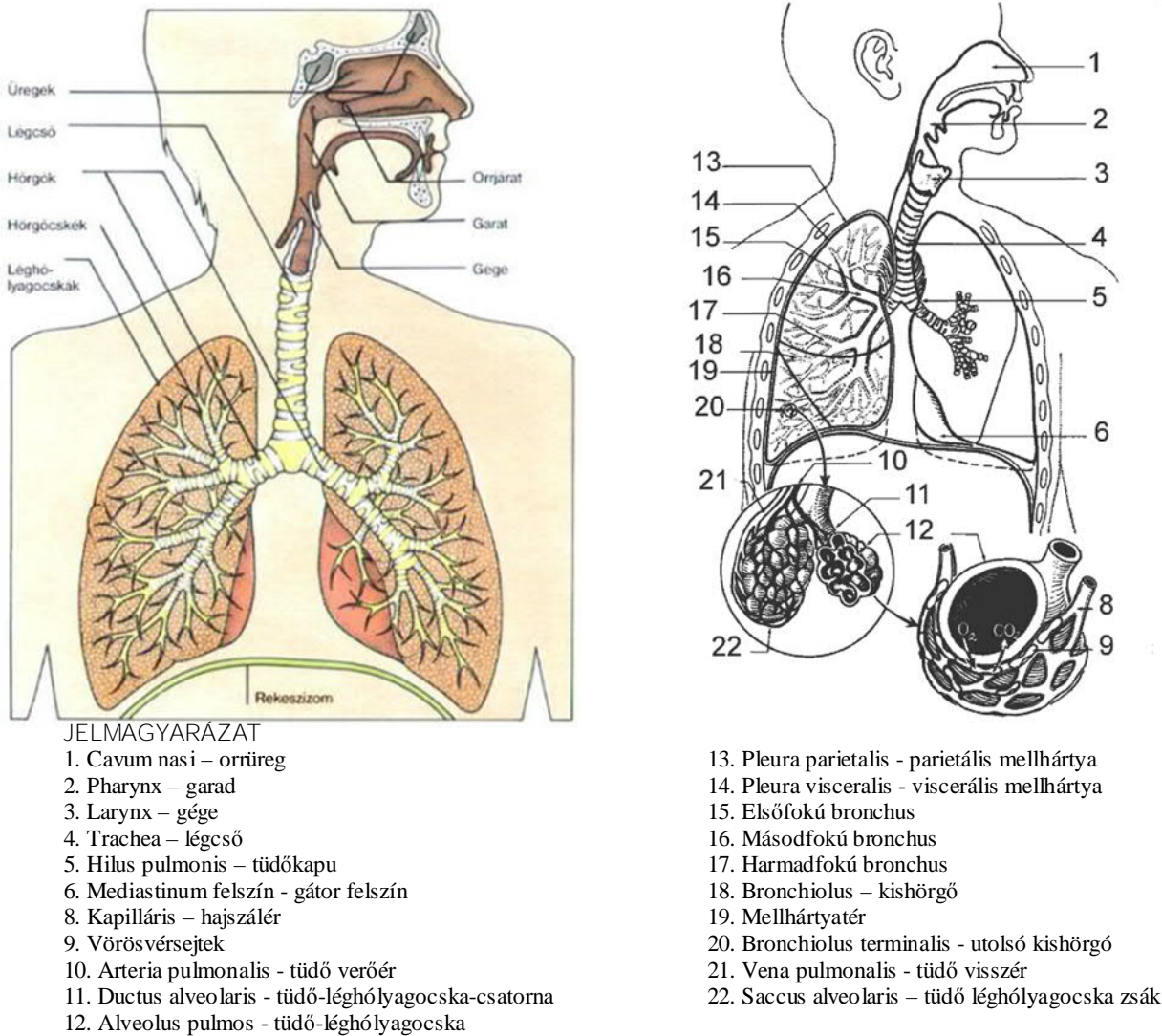
HELY	KONCENTRÁCIÓ		
	mg / m^3	db / cm^3	$db / cm^3 \geq 0.1\mu m$
<i>hegyek</i>	0.01	200 ÷ 1.000	2
<i>sík, szabad terület</i>	0.02	2.000 ÷ 10.000	15
<i>város</i>	0.1 ÷ 0.4	5.000 ÷ 100.000	100
<i>ipartelep</i>	0.2 ÷ 2		1500
<i>nagyváros utcája</i>	1 ÷ 3		200 ÷ 3000

A porszórás (por kirakódása talajra, épületekre, stb.) városokban $10 \div 100 g / m^2 / hónap$, ami kb. ugyanennyi $tonna / km^2 / év$ porszórásnak felel meg. A különböző technológiák por-kibocsátása az alábbi koncentráció értékekkel jellemezhető:

TECHNOLÓGIA	$c [g / m^3]$	TECHNOLÓGIA	$c [g / m^3]$
cementgyártás	5 ÷ 30	ólom kohászat, kemence	5 ÷ 20
szénportüzelésű erőművek	15 ÷ 20	szárítás	10 ÷ 100
vaskohászat	10 ÷ 40	bauxit őrlés	10 ÷ 30

1.4 A POR HATÁSA AZ EGÉSZSÉGRE

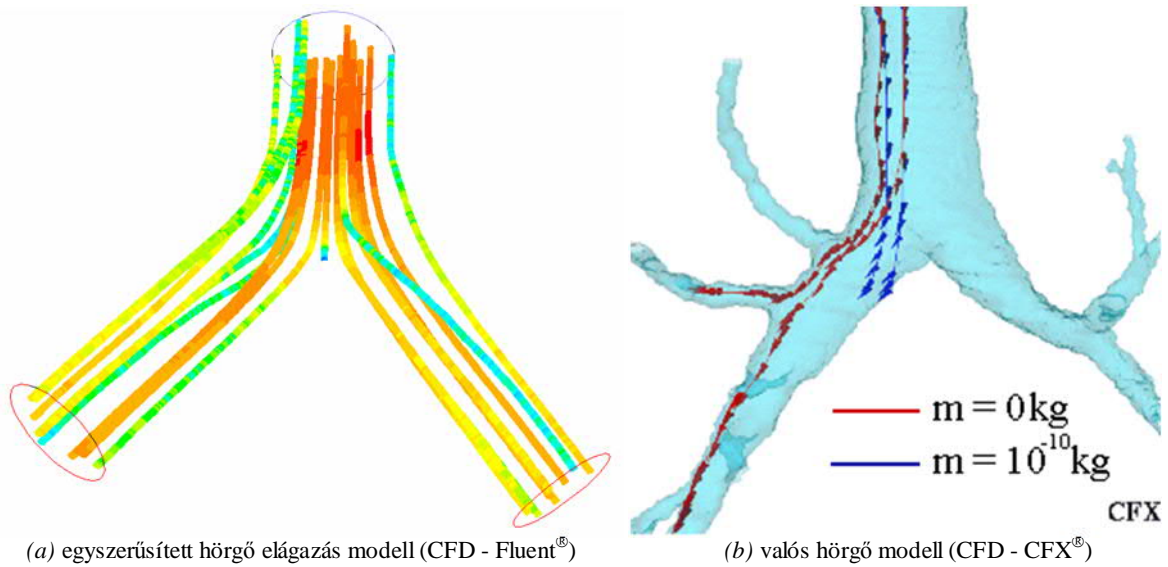
Az emberi tüdőre veszélyes $0.5\mu\text{m} \leq x \leq 5\mu\text{m}$ szemcseátmérő tartomány a tüdőt különösen károsítja. Ahogy azt már az 1.4a és 1.4d ábrákon is jelöltük, az orron vagy a szájon át belélegzett levegőből az $5 \div 10\mu\text{m}$ átmérőnél nagyobb szemcsék nagy részét a felső légutak választják le, az ennél kisebb szemcsék egy része viszont lejut a hörgőkbe és hörgőcskébe (ld. **1.6 ábra**), amelyek számos (23-ad íziglen) elágazáson keresztül vezetnek az $\text{O}_2 - \text{CO}_2$ cserét végző tüdőhólyagocskákhoz.



1.6 ábra Az emberi légzés szervei: felső-alsó légutak, tüdő és az alveolus

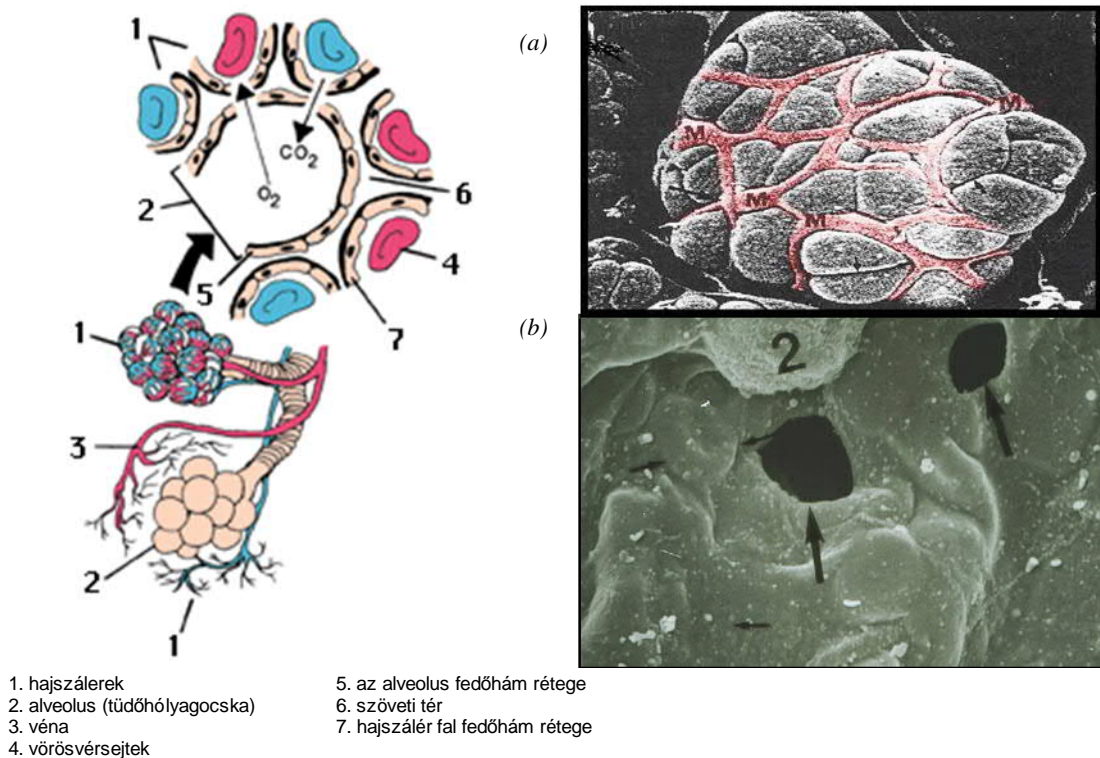
A belélegzett nagyobb porszemcsék egy része tehetetlenségénél fogva az elágazásokra jellemző gázáramlás görbült áramvonalairól lesodródva eléri a hörgők nyálkás falát és azon feltapad. Az **1.7 ábra** néhány porszemcse mozgását mutatja egy elágazó hörgőben az áramlás numerikus szimulálásával meghatározva. A 1.7 ábra (b) képe egy emberi hörgő valós geometriai modelljében számolt porszemcse pályákat mutat: a piros színű pálya az $m=0\text{kg}$ tömegű porszemcse pályáját, azaz a levegő áramlását teljes mértékben követő porszemcse pályáját mutatja (ez a be- és kilélegzett levegővel együttmozgó részecskék áramlásának megfelelő pálya), a kék színű áramvonal pedig a $m=10^{-10}\text{kg}$, azaz egy kb. 50 mikron méretű porszemcsének a hörgőelágazásban gázáramlásról való lesodródását mutatja be. A nagyobb szemcsék tehetetlenségük következtében így a fal nyálkás felületébe ütközve a gázáramból kikerülnek. A hörgők falát nyálkát termelő csillós sejtek alkotják. A csillók a nyálkát

a beletapadt porszemcsékkel együtt néhány $mm/perc$ sebességgel felfelé hajtják, így a hörgőkön lerakódott porszemcsék kikerülnek a légutakból.



1.7 ábra Porszemcsék mozgása egy hörgő elágazásban

A tüdőhólyagocskákba (1.8 ábra) így csak az $5 - 6\mu m$ méretűnél kisebb szemcsék jutnak, amelyek közül a $0.5\mu m$ -nél kisebb porszemcsék nagy része együtt mozog a belégzés/kilégzés folyamán be-ill. kiáramló levegővel, azaz, ha belégzésnél bejutnak a tüdőhólyagocskába, kilégzésnél azokból el is távoznak. A $0.5\mu m$ méretűnél kisebb porszemcsék így nem károsítják a szerkezetet. A hólyagocskában lerakódó szemcséket normál esetben fagociták támadják meg és távolítják el.

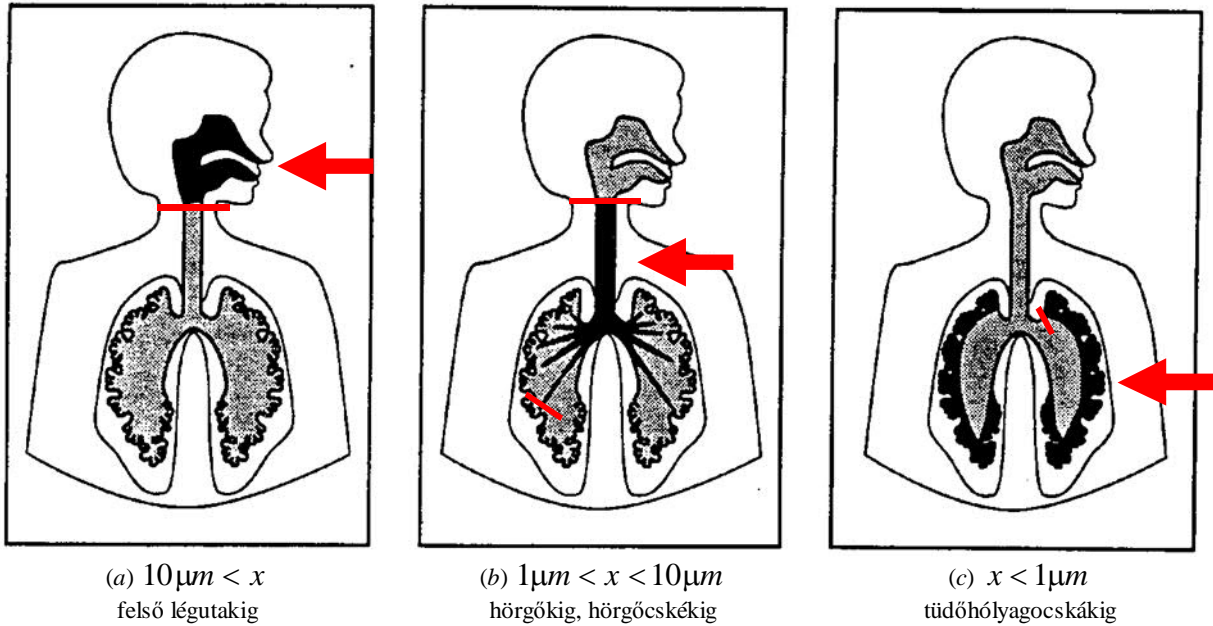


1.8 ábra Tüdőhólyagocska felépítési vázlat (bal oldalon) és elektronmikroszkópos felvételei: a) kívülről b) belülről

A tüdőhólyagocskákban lerakódott szemcsék közül azonban az éles szemcsék (pl. szénpor) felsértik a hólyagocskák felületét (fedőhám réteget), más anyagok (pl. a szilícium) magukat a fagocitákat

károsítják. Mindezek a tüdőhólyagocskák felületén hegesedést okoznak, azaz annak aktív felületét csökkentik, ami végzetes is lehet, mivel itt történik O_2 tüdőhólyagocskákat körülvevő hajszálerekbe történő bediffundálása, illetve a CO_2 kilélegezendő levegőbe való kidiffundálása az alveolus ritka sejtekből álló laza fedőhámrétegen keresztül (ld. 1.8 ábra). Az alveolus hámrétegének hegesedése következtében így a tüdő aktív felülete igen nagy mértékben csökkenhet. Fentiek miatt tekintjük a tüdőhólyagocskában lerakódó (abba belépő, és kilégzéskor nem távozó) $0.5\mu m \leq x \leq 5\mu m$ mérettartományba eső szemcséket különösen veszélyesnek a tüdő károsodása szempontjából.

A következő szemléltető **1.9 ábrán** látható a különböző mérettartományba eső porszemcsék lerakódási helye a légutakban és a tüdő területein.



1.9 ábra Különböző méretű részecskékre jellemző lerakódási hely (fekete színnel jelölve)

Fentiek miatt pl. a **39/2013. (II. 14.) Korm. rendelet a dohánytermékek előállításáról, forgalomba hozataláról és ellenőrzéséről, a kombinált figyelmeztetésekről, valamint az egészségvédelmi bírság alkalmazásának részletes szabályairól** c. rendelet alapján a 4. pont 6§(2) szerint az 5. melléklet szerinti kombinált (szöveg+kép) figyelmeztetést kell alkalmazni a dohánytermékek csomagolásán.

2 A SZEMCSEHALMAZOK JELLEMZÉSE

Monodiszperznek nevezzük azt a méreteloszlású szemcsehalmazt, amelyben a szemcsék átmérője azonos ($x = \text{áll.}$).

Polidiszperz az a szemcsehalmaz, amelyben lévő szemcsék átmérője különböző ($x_{\min} < x < x_{\max}$). Polidiszperz szemcsehalmazokat a jellemzés céljától függően különböző módokon jellemezzük.

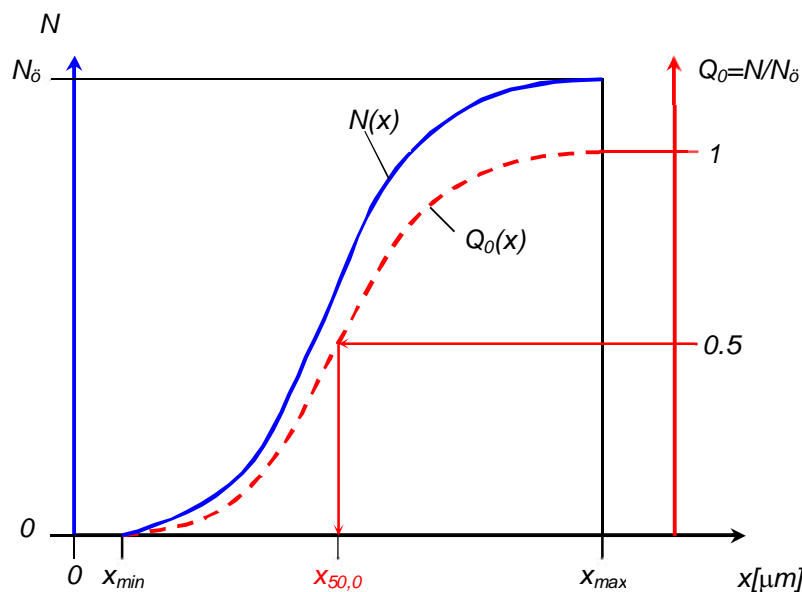
2.1 SZEMCSE ELOSZLÁSOK GYŰJTŐFÜGGVÉNYE ÉS SŰRŰSÉGFÜGGVÉNYE

2.1.1 A szemcsehalmaz darabszám szerinti eloszlásának gyűjtőfüggvénye: $Q_0(x)$

Egy szemcsehalmaz darabszám szerinti eloszlásának $Q_0(x)$ gyűjtőfüggvény értéke megadja a szemcsehalmazban egy adott x átmérőnél kisebb szemcsék számának arányát. Legyen adva N_0 [db] porszemcséből álló halmaz, amelyet jellemezni kívánunk. A porszemcse halmazt bocsássuk át különböző nyílásméretű szitákon (szitasoron), majd készítsünk egy diagramot, amelyben a vízszintes tengelyen lévő x nyílásátmérőhöz (ami megegyezik a szitán áteső legnagyobb porszemcse átmérőjével, a szita lyukméretével) felvisszük az áteső porszemcsék számát, az $N(x)$ értékét. Az így kapott diagram (ld. **2.1 ábra** $N(x)$ görbe) azonban nem eléggé informatív, a különböző számú szemcséből álló halmazok nehezen hasonlíthatók össze. Ezért vezették



be a $Q_0 = \frac{N}{N_0}$ viszonyszámot, és ezt visszük fel az x függvényében. Így megkapjuk a porszemcse halmaz darabszám szerinti eloszlásának gyűjtőfüggvényét, ld. **2.1. ábra** $Q_0(x)$ görbe.



2.1 ábra A szitasoron áteső porszemcsék száma: $N(x)$ [—], a szemcsehalmaz darabszám szerinti eloszlásának gyűjtőfüggvénye: $Q_0(x)$ [- - -], valamint a szemcsehalmaz darabszám szerinti eloszlásának közepes átmérője: $x_{50,0}$

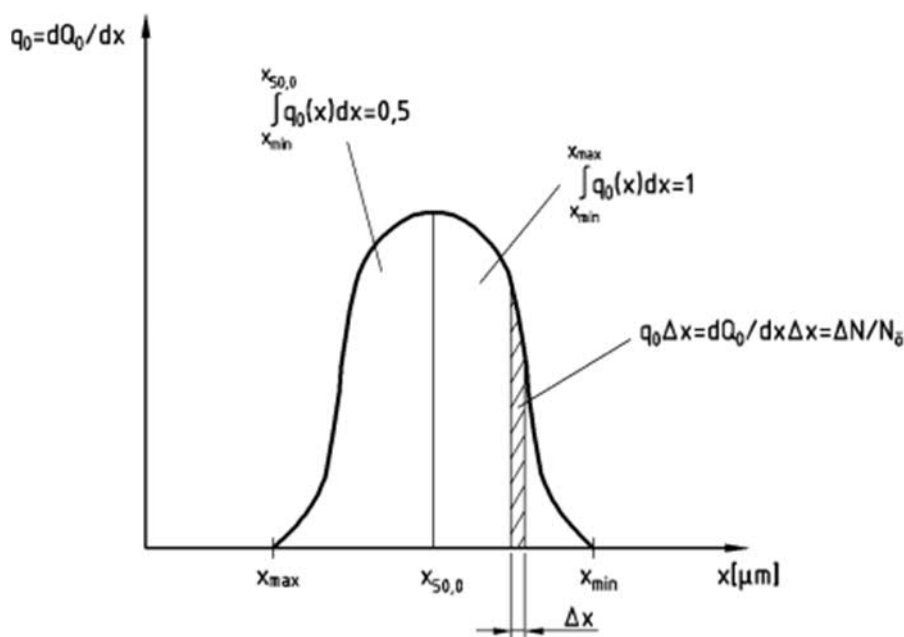
A $Q_0(x)$ ismeretében az x és $x + \Delta x$ mérethatárok közé eső porszemcsék ΔN száma megadható:

$$\Delta N = N_0 \cdot \frac{dQ_0}{dx} \cdot \Delta x. \quad (2.1)$$

A $\frac{dQ_0}{dx} \cdot \Delta x$ kifejezés a Q_0 értékének Δx menti megváltozását (azaz az adott x méretnél kisebb átmérőjű porszemcsék száma összes porszemcse számhoz viszonyított arányának x és $x + \Delta x$ átmérő tartományba eső megváltozását adja. Ezt N_0 -vel megszorozva a Δx mérettartományba eső szemcsék száma adódik.

2.1.2 A szemcsehalmoz darabszám szerinti eloszlásának **sűrűségfüggvénye**:
 $q_0(x) = dQ_0/dx$

Látjuk, hogy a $Q_0(x)$ gyűjtőfüggvény meredeksége fontos jellemző: megmutatja, hogy egy adott Δx szélességű szemcseátmérő tartományba mennyi szemcse tartozik. Ezért vigyük föl a szemcseátmérő (x) függvényében a $q_0(x) = dQ_0/dx$ értékeit, azaz a darabszám szerinti gyűjtőfüggvény differenciálhányadosát. Az így kapott $q_0(x)$ diagramot a szemcseméret darabszám szerinti eloszlása sűrűségfüggvényének nevezzük (ld. **2.2. ábra**). Az (x) és az ($x + \Delta x$) mérethatárok közé eső görbe alatti terület megmutatja az adott szemcseméret tartományba eső szemcsék számának arányát az összes szemcse számához képest. Fentiek alapján belátható, hogy a teljes görbe alatti terület egy-
sényi.



2.2. ábra A szemcsehalmoz darabszám szerinti eloszlásának sűrűségfüggvénye $q_0(x)$, a darabszám szerinti közepes átmérője $x_{50,0}$

2.1.3 Egy szemcsehalmoz *darabszám* szerinti **gyűjtő**függvényének és **sűrűség**függvényének meghatározása

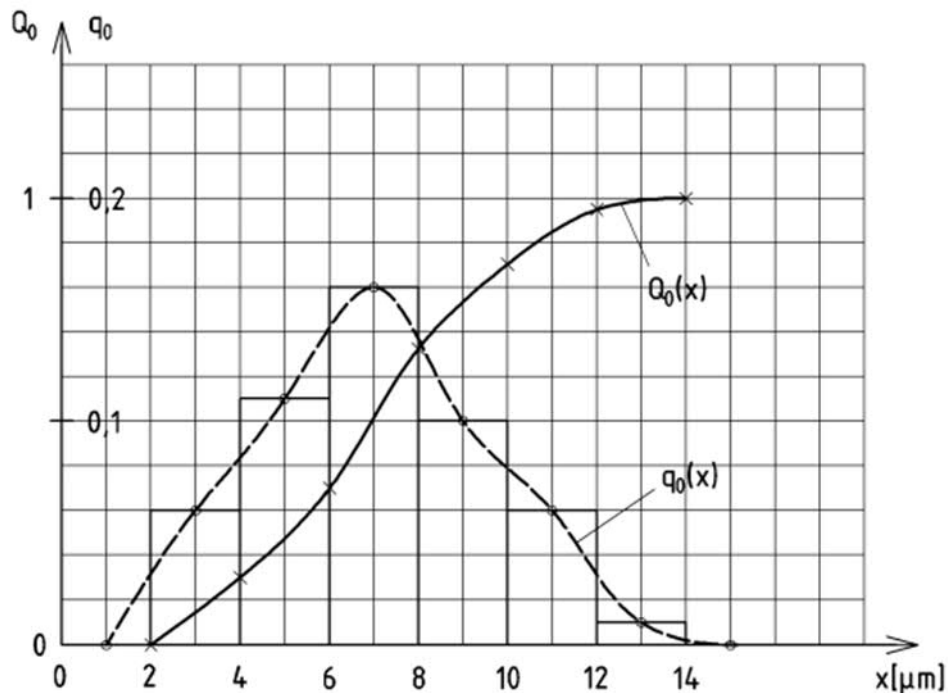
Az alábbi **2.1. táblázat** egy számpéldával mutatja meg, hogy hogyan lehet meghatározni egy adott szemcsehalmoz darabszám szerinti eloszlásának gyűjtőfüggvényét és sűrűségfüggvényét, a $Q_0(x)$ és $q_0(x) = dQ_0/dx$ függvényeket. A táblázat első oszlopában a szemcseátmérő intervallumok határai (a sziták lyukméretei x_i [μm]) láthatók. A második oszlopban a $\Delta x_i = 2 \mu m$ szélességű (ld. 3.

oszlop) szemcseátmérő intervallumok (frakciók) középértékei: \bar{x}_i [μm]. A szemcsehalmaz összes szemcséjének száma 50db . A negyedik oszlopban az egyes szita lyukméreteknél áteső szemcsék számát (N_i [db]), az ötödikben pedig az egyes szemcseméret intervallumokba eső szemcsék számát ΔN_i [db] vittük fel. A hatodik oszlopban a darabszám szerinti eloszlás gyűjtőfüggvényének értékei ($Q_0(x_i)=N_i/N_0$) láthatók ugyancsak az x_i [μm] intervallum határokánál. Végül, a hetedik oszlopban a darabszám szerinti eloszlás sűrűségfüggvényének ($q_0(\bar{x}_i)=\Delta Q_0/\Delta x_i$) értékei láthatók az átmérő intervallumok középértékeinél. A táblázat 8., 9. és 10. oszlopai későbbi anyagrészekhez tartoznak.

2.1. táblázat

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
x_i μm	\bar{x}_i μm	Δx_i μm	N_i db	ΔN_i db	$Q_0(x_i) = \sum N_i / N_0$	$q_0(\bar{x}_i) = \Delta Q_0 / \Delta x_i$	$\bar{x}_i q_{0i} \Delta x_i$	$\bar{x}_i^2 q_{0i} \Delta x_i$	$\bar{x}_i^3 q_{0i} \Delta x_i$
0									
	1	2		0	0	0	0	0	0
2			0		0				
	3	2		6	0.12	0.06	0.36	1.08	3.24
4			6		0.12				
	5	2		11	0.22	0.11	1.1	5.5	27.5
6			17		0.34				
	7	2		16	0.32	0.16	2.24	15.68	109.76
8			33		0.66				
	9	2		10	0.56	0.1	1.8	16.3	145.8
10			43		0.86				
	11	2		6	0.86	0.06	1.32	14.52	159.72
12			49		0.98				
	13	2		1	0.98	0.01	0.26	3.38	43.94
14			50		1				
	15	2		0	1	0	0	0	0
				$N_0 = 50$		$\sum q_0(\bar{x}_i) \cdot 2 = 1$	$M_{1,0} = 7.08$ $\bar{X}_{1,0} = 7.08 \mu\text{m}$	$M_{2,0} = 56.46$ $\bar{X}_{2,0} = 7.51 \mu\text{m}$	$M_{3,0} = 489.9$ $\bar{X}_{3,0} = 7.88 \mu\text{m}$

Az alábbi **2.3 ábrán** a fenti számpéldából rajzolt gyűjtőfüggvény és a sűrűségfüggvény látható.



2.3. ábra A számpélda szerinti szemcsehalmaz darabszám szerinti eloszlásának Q_0 gyűjtőfüggvénye és q_0 sűrűségfüggvénye

2.1.4 A szemcsehalmaz *felület* szerinti eloszlásának gyűjtőfüggvénye és sűrűségfüggvénye: $Q_2(x)$ és $q_2(x)$

A szemcsehalmaz felület szerinti eloszlása gyűjtőfüggvényének: $Q_2(x)$ függvény adott x szemcse-átmérőhöz tartozó értéke megmutatja az adott x átmérőnél kisebb átmérőjű szemcsék felületének arányát a szemcsehalmaz összes felületéhez képest. Az alábbi összefüggés számlálójában a $(0 \div x)$ szemcseméret tartományba eső szemcsék felülete, a nevezőben pedig a szemcsehalmaz teljes felülete szerepel.

$$Q_2(x) = \frac{\int_0^x x^2 \pi N_0 \frac{dQ_0}{dx} dx}{\int_0^\infty x^2 \pi N_0 \frac{dQ_0}{dx} dx} = \frac{\int_0^x x^2 q_0 dx}{\int_0^\infty x^2 q_0 dx} \quad (2.2)$$

A $q_2(x)$, a szemcsehalmaz felület szerinti sűrűségfüggvénye a $Q_2(x)$ gyűjtőfüggvény differenciálásával határozható meg:

$$q_2(x) = \frac{x^2 q_0(x)}{\int_0^\infty x^2 q_0 dx}, \quad (2.3)$$

hiszen egy változó felső határú integrál felső határ szerinti differenciálhányadosa megegyezik az integrálandó függvénnyel.

2.1.5. A szemcsehalmaz *tömeg vagy térfogat* szerinti eloszlásának gyűjtőfüggvénye és sűrűségfüggvénye: $Q_3(x)$ és $q_3(x)$

A $Q_3(x)$ függvény adott x szemcseátmérőhöz tartozó értéke megmutatja, hogy egy adott x átmérőnél kisebb átmérőjű szemcsék tömege vagy térfogata a szemcsehalmaz tömegének vagy térfogatának mekkora részét teszi ki:

$$Q_3(x) = \frac{\int_0^x x^3 \frac{\pi}{6} N_0 \frac{dQ_0}{dx} dx}{\int_0^\infty x^3 \frac{\pi}{6} N_0 \frac{dQ_0}{dx} dx} = \frac{\int_0^x x^3 q_0 dx}{\int_0^\infty x^3 q_0 dx}, \quad (2.4)$$

A (2.2), (2.3) és (2.4) kifejezésekben

- a $q_0 dx = (dQ_0/dx) dx$ a dx átmérő tartományba eső porszemcsék számának összeshez viszonyított aránya
- $q_0 dx N_0$ a dx átmérő tartományba eső porszemcsék száma
- ezt megszorozva x értékkel (ld. alább), illetve majd $x^2 \pi$ -vel illetve $x^3 \pi/6$ -tal, az adott dx átmérő tartományba eső porszemcsék összesített átmérőjét, felületét ill. térfogatát kapjuk.
- ezt integrálva 0 és adott x határok között az x -nél kisebb összes szemcsére vonatkozó adatokat, 0 és ∞ között integrálva az egész szemcsehalmazra vonatkozó megfelelő adatokat kapjuk.

A szemcsehalmaz $q_3(x)$ térfogat szerinti sűrűségfüggvényét a

$$q_3(x) = \frac{x^3 q_0(x)}{\int_0^\infty x^3 q_0 dx} \quad (2.5)$$

összefüggéssel határozzuk meg.

2.2 SZEMCSE ELOSZLÁSOK JELLEMZÉSE, LEÍRÁSA

Az eloszlásokat helyzetparaméterrel és az eloszlás szélességével jellemezzük. Az előző az eloszlás helyzetét mutatja a szemcseátmérő koordinátán, a második az eloszlás kiterjedésére, azaz a halmazban lévő szemcsék átmérőjének tartományára utal.

2.2.1 Helyzetparaméterek

Középérték

Az $x_{50,r}$ értéke megadja, hogy mekkora az a szemcseátmérő, amelynél kisebb és nagyobb szemcsék darabszáma, felülete, térfogata (tömege) ugyanakkora, azaz $Q(x_{50,r}) = 0.5$.

A **2.1** és **2.2 ábrákon** bejelöltük az $x_{50,0}$ értéket. A szemcseátmérő ($x_{50,r}$) nevezőjében lévő "r" betű a mennyiségi jellemző, jelentése $r = 0, 1, 2, 3$ értékekre:

- $r = 0$: darabszám,
- $r = 1$: hossz (átmérő),
- $r = 2$: felület,
- $r = 3$: térfogat (vagy adott sűrűség esetén a tömeg).

Az átlagos szemcseátmérő

Ha adott a szemcsehalmaz darabszám szerinti sűrűségfüggvénye q_0 , az alábbi összefüggéssel határozható meg a szemcsehalmaz \bar{x} átlagos szemcseátmérője:

$$\bar{x} = \frac{1}{N_{\bar{0}}} \int_0^{\infty} x \cdot N_{\bar{0}} \cdot q_0 dx = \int_0^{\infty} x \cdot q_0 dx. \quad (2.6)$$

Az átlagos átmérőjű, felületű és térfogatú szemcsék átmérőjének számításának egyszerűsítésére célszerű bevezetni a szemcseeloszlás momentumát (nyomatékát). A szemcseeloszlás k . momentuma az alábbi módon definiálható:

$$M_{kr} = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} x^k q_r(x) dx. \quad (2.7)$$

ahol "k" az integrálban lévő x átmérő kitevője.

A (2.7) és (2.6) összefüggések összevetésével látható, hogy az \bar{x} átlagos szemcseátmérő az $M_{1,0}$ -val, azaz (mivel $r=0$) a q_0 eloszlás $k=1$ momentumával egyenlő.

Határozzuk meg a szemcsehalmazban lévő szemcsék átlagos térfogatát:

$$\bar{x}_{3,0} \frac{\pi}{6} = \frac{1}{N_{\bar{0}}} \int_0^{\infty} x^3 \frac{\pi}{6} N_{\bar{0}} \frac{dQ_0}{dx} dx = \frac{\pi}{6} \int_0^{\infty} x^3 q_0(x) dx = \frac{\pi}{6} M_{3,0}. \quad (2.8)$$

A fenti kifejezés első integráljában

- $(dQ_0/dx)dx = q_0 dx$ kifejezés a dx átmérő tartományba eső porszemcsék számának összeshez viszonyított aránya

- $(dQ_0/dx)dx N_{\bar{0}}$ kifejezés a dx átmérő tartományba eső porszemcsék száma

- ezt megszorozva $x^3 \pi/6$ -tal a dx átmérő tartományba eső porszemcsék összesített térfogatát kapjuk.

- ezt integrálva 0 és ∞ között a szemcsehalmazban lévő összes szemcse térfogata adódik, amelyet elosztva a szemcsék számával megkapjuk az átlagos térfogatú szemcse térfogatát.

A 2.8 összefüggés $\pi/6$ -tal való egyszerűsítése után látható, hogy az átlagos térfogatú szemcse átmérője ($\bar{x}_{3,0}$) a momentumából az alábbi módon fejezhető ki: $\bar{x}_{3,0} = \sqrt[3]{M_{3,0}}$. Általánosítva fennáll:

$$\bar{x}_{k,r} = \sqrt[k]{M_{k,r}}. \quad (2.9)$$

Látható, hogy az átlagos átmérőjű szemcsére kapott (2.6) összefüggés megfelel a (2.9) kifejezésnek $k=1, r=0$ esetén, azaz $\bar{x} = \bar{x}_{1,0}$. Egy adott szemcsehalmaz átlagos felületű szemcséjének átmérője az $\bar{x}_{2,0} = \sqrt{M_{2,0}}$, az átlagos térfogatú szemcséé pedig az $\bar{x}_{3,0} = \sqrt[3]{M_{3,0}}$ összefüggéssel számolható. A

2.1 táblázatban egy szemcsehalmazra az alábbi módon végeztük el a szemcseeloszlás 1., 2. és 3. momentumának a meghatározását:

$$M_{k,0} = \sum \bar{x}_i^{-k} q_0(\bar{x}_i) \Delta x_i. \quad (2.10)$$

Kiszámolva a momentumokat, a $\bar{x}_{k,0} = \sqrt[k]{M_{k,0}}$ összefüggéssel határoztuk meg az átlagos átmérőjű, felületű és térfogatú szemcse átmérőjét: $\bar{x}_{1,0} = 7.08$, 7.51 és $7.88 \mu\text{m}$.

Az eloszlás momentumának egyik alkalmazásaként határozzuk meg egy adott szemcsehalmaz esetén a szemcse térfogatra vonatkoztatott fajlagos felületet:

$$S_V = 6 \frac{\bar{x}_{2,0}^{-2} \pi}{\bar{x}_{3,0}^{-3} \pi} = 6 \frac{M_{2,0}}{M_{3,0}} = f \frac{M_{2,0}}{M_{3,0}}$$

ahol az f együttható értéke gömb esetén 6. A **2.1 táblázatban** tárgyalt szemcsehalmazra gömb alakú szemcséket feltételezve ez az érték: $0.691 \mu\text{m}^2/\mu\text{m}^3 = 691000 \text{ m}^2/\text{m}^3$.

Másik alkalmazásként határozzuk meg a gázban lévő, ismert méreteloszlású por tömegkoncentrációját c (kg/m^3), ha ismerjük a darabszám szerinti koncentrációt: c_N (db/m^3). Az átlagos térfogatú szemcse térfogata: $\bar{V} = k_V \bar{x}_{3,0}^{-3}$, ahol k_V alakparaméter, gömb esetén értéke $\pi/6$.

A (tömeg)koncentrációt az alábbi módon fejezhetjük ki:

$$c = c_N \rho_p k_V \bar{x}_{3,0}^3 = c_N \rho_p k_V M_{3,0}.$$

2.2.2 Az eloszlás szélessége

A szemcseméret eloszlás szélességét a legkisebb és legnagyobb szemcse átmérőjével (x_{\min} és x_{\max}) adhatjuk meg. Ennek meghatározása nehéz feladat, és pl. egy kiugróan nagy szemcse átmérőjének figyelembe vétele félrevezető információt jelenthet, ezért célszerűbb pl. az $x_{0,05,0}$ illetve $x_{0,95,0}$ átmérők megadása. Ezek értékei a darabszám szerinti megoszlásban megmutatják azon szemcseátmérőket, amelynél kisebb illetve nagyobb szemcsék számának aránya 5%.

Az eloszlás szélességére jellemzőek még az eloszlásokat közelítően leíró összefüggések egyes paraméterei (pl. a σ szórás, ld. 2.2.4. pont).

2.2.3 Eloszlások átszámítása

Hogyan határozható meg pl. a felület szerinti gyűjtőfüggvény és sűrűségfüggvény értéke a szemcseátmérő függvényében, ha adott egy szemcsehalmaz darabszám szerinti eloszlásának gyűjtőfüggvénye. A (2.2) összefüggésben látható módon kifejezzük az eloszlás felület szerinti gyűjtőfüggvényét. Felismerjük, hogy a jobb oldali tag nevezője nem más, mint az eloszlás $M_{2,0}$ momentuma. Ennek behelyettesítésével kapjuk:

$$Q_2(x) = \frac{\int_0^x x^2 \pi N_0 \frac{dQ_0}{dx} dx}{\int_0^\infty x^2 \pi N_0 \frac{dQ_0}{dx} dx} = \frac{\int_0^x x^2 q_0 dx}{\int_0^\infty x^2 q_0 dx} = \frac{1}{M_{2,0}} \int_0^x x^2 q_0 dx. \quad (2.11)$$

A sűrűségfüggvény a gyűjtőfüggvény szemcseméret szerinti differenciálhányadosa:

$$q_2(x) = \frac{1}{M_{2,0}} x^2 q_0(x). \quad (2.12)$$

Hogyan kell eljárni, ha a térfogat (vagy a tömeg) szerinti eloszlás ismert, és keressük a darabszám szerinti eloszlás gyűjtő- és sűrűségfüggvényét?

$$Q_0(x) = \frac{\int_0^x (x^3 \frac{\pi}{6})^{-1} V_0 \frac{dQ_3}{dx} dx}{\int_0^\infty (x^3 \frac{\pi}{6})^{-1} V_0 \frac{dQ_3}{dx} dx} = \frac{\int_0^x x^{-3} q_3 dx}{\int_0^\infty x^{-3} q_3 dx}, \quad q_1(x) = \frac{1}{M_{-3,3}} x^{-3} q_3(x). \quad (2.13)$$

A (2.13) kifejezésben

- a $q_3 dx = (dQ_3/dx) dx$ kifejezés a dx átmérő tartományba eső porszemcsék térfogatának összeshez viszonyított aránya,
- $q_3 dx V_0$ kifejezés a dx átmérő tartományba eső porszemcsék térfogata, ahol V_0 az összes szemcse térfogata,
- ezt elosztva $x^3 \pi/6$ -tal, az adott x átmérőjű szemcse térfogatával, az adott dx átmérő tartományba eső porszemcsék darabszámát kapjuk.
- ezt integrálva 0 és adott x határok között az x -nél kisebb szemcsék darabszámát, 0 és ∞ között integrálva az összes szemcse darabszáma adódik.

2.3 KÖZELÍTŐ FÜGGVÉNYEK

A tapasztalat azt mutatta, hogy a különböző eredetű porhalmazok gyűjtőfüggvényeinek leírására jól alkalmazhatók közelítő függvények. Ezek közös jellemzője, hogy két paramétert tartalmaznak, amelynek értékét az adott eloszláshoz kell illeszteni. Az egyik az eloszlás helyzetét mutatja a szemcseátmérő koordinátán, a másik pedig az eloszlás "szélességét" jellemzi.

A hatványfüggvény (Gaudin, Andrejev, Schuhmann) eloszlás

$$Q_3(x) = \left(\frac{x}{x_{\max}} \right)^m$$

alakú. Az eloszlásnak, amely *log-log* diagramban ábrázolva egyenes, két paramétere van: a legnagyobb szemcse átmérője (x_{\max}) és az "m" kitevő.

Az RRSB (Rosin, Rammler, Sperling, Bennet) eloszlás az alábbi alakú:

$$Q_3(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{x'} \right)^n \right],$$

ahol x' és n a paraméterek. A kifejezésből adódik, hogy x' a $Q_3(x')=0.632$ gyűjtőfüggvény értékhez tartozó szemcseátmérő.

Amíg az előző két eloszlást általában szemcsehalmazok térfogat (tömeg) szerinti eloszlása gyűjtőfüggvényének leírására alkalmazzák,

a log-normál (Kolmogorov) eloszlást valamennyi (darabszám, felület, stb. szerinti) eloszlására:

$$Q_r(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^t \exp \left(- \frac{t^2}{2} \right) dt, \quad \text{ahol} \quad t = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{x}{x_{50,r}}$$

A kifejezésben az $x_{50,r}$ az eloszlás helyzetét mutatja meg, a σ szórás pedig az eloszlás szélességét. A közelítő függvényeket és alkalmazásukat a vonatkozó szabványok részletezik.

3 PORSZEMCSÉKET TARTALMAZÓ KÖZEG ÁRAMLÁSA (SZEMCSEDI NAMI KA)

3.1 A PORTARTALMÚ GÁZ MOZGÁSÁT LEÍRÓ EGYENLETEK

A portartalmú gáz részecskéinek gyorsulását a térerőből, a nyomásból és a csúsztatófeszültségekből keletkező erőkön kívül a porszemcséről a gázra átadódó erők is befolyásolják. A gázban lévő porszemcsék nagy száma miatt azonban nem lehetséges minden egyes porszemcsének a gáz mozgására való hatását külön-külön figyelembe venni. Ezért gáz mozgásegyenletét úgy írjuk fel, hogy a térben eloszlott porszemcséről (a por fázisról) a gázra átadódó erőket egy \underline{t} erőtérrrel helyettesítjük, és ezzel az erőtérrrel kiegészítjük a "tisztá" gázra vonatkozó Navier-Stokes egyenletet:

$$\frac{\partial \underline{v}}{\partial t} + \text{grad} \frac{v^2}{2} - \underline{v} \times \text{rot} \underline{v} = \underline{g} - \frac{1}{\rho} \text{grad} p + \nu \Delta \underline{v} + \underline{t}. \quad (3.1)$$

ahol $\underline{t} [N/kg_{gáz}]$ a porszemcséről 1 kg gázra adódó erő, amely a $\underline{t} = -\frac{n \sum F_p}{\rho_g}$ összefüggéssel határozható meg, ahol

$n (db/m^3)$: a szemcse darabszám szerinti koncentrációja

$\sum F_p (N/db)$: egy porszemcsére ható erők eredője (amely közelítőleg az F_e áramlási ellenállás erővel egyenlő, mivel a szemcsére ható erőhatások az áramlási ellenállás erővel összevetve rendszerint elhanyagolhatóak.)

$\rho_g (kg/m^3)$: a gáz sűrűsége

(Ha a gázról egy porszemcsére F_e ellenállás-erő adódik át, tehát egy porszemcséről a gázra $(-F)$. Egy m^3 térfogatú gázban n db szemcse van, egy kg gáz térfogata pedig $1/\rho$.)

Mivel lehetetlen lenne a nagy számú porszemcse mozgását és a gáz kölcsönhatását külön-külön nyomon követni, a porszemcse fázist kontinuumnak tekintjük, amelynek mozgását az alábbi egyenlet írja le:

$$\frac{d\underline{u}_p}{dt} = \underline{g} - \frac{1}{\rho_p} \text{grad} p + \frac{\sum F_p}{m_p}. \quad (3.2)$$

ahol $\underline{u}_p [m/s]$ a porszemcse fázis sebessége,
 $m_p [kg]$ egy porszemcse tömege,
 $\rho_p [kg/m^3]$ a porszemcse anyagának sűrűsége,
 $g [m/s^2]$ a Föld nehézségi erőterének térerőssége.

(Miatán jelen esetben viszonylag kis sűrűségű gázban mozgó szemcséket vizsgálunk, elhanyagoljuk pl. a szemcsével együtt gyorsuló gáz-rész hatását tartalmazó ún. „virtuális tömeg” erőhatás tagot, vagy a forgó szemcsére vagy nyíróáramlásban mozgó szemcsére ható, ill. egyéb erőhatásokat. Ha egy m_p tömegű porszemcsére $\sum F_p$ erő hat, akkor egységnyi tömegű porra $\sum F_p/m_p$.)

A (3.2) egyenlet a porszemcse fázis mozgásegyenlete, amelynek bal oldala a porszemcse fázis gyorsulása. A nyomás változásból származó tag a $\rho_p [kg/m^3]$ nagy értéke következtében elhanyagolható (azaz a kis térfogatú szemcsékre a nyomás térbeli változásból származó erővel nem kell számolni), ezért írható:

$$\frac{d\underline{u}_p}{dt} = \underline{g} + \frac{\sum F_p}{m_p}. \quad (3.3)$$

A porszemcsére ható erőt fenti alakból kifejezve, majd a (3.1) Navier-Stokes egyenletbe behelyettesítve a következő egyenletet kapjuk:

$$\frac{d\underline{v}}{dt} = \underline{g} - \frac{1}{\rho} \text{grad}p + \underline{v} \Delta \underline{v} - \frac{n \cdot m_p}{\rho_g} \cdot \left(\frac{d\underline{u}_p}{dt} - \underline{g} \right). \quad (3.4)$$

ahol $n \cdot m_p = c_p [kg/m^3]$ a por tömeg szerinti koncentrációja (a továbbiakban koncentrációja). Átalakítás után adódik:

$$\frac{d\underline{v}}{dt} + \frac{c_p}{\rho_g} \frac{d\underline{u}_p}{dt} = \left(1 + \frac{c_p}{\rho_g}\right) \underline{g} - \frac{1}{\rho_g} \text{grad}p + \underline{v} \Delta \underline{v}. \quad (3.5)$$

A (3.5) egyenlet a gáz és a por fázis együttes mozgásegyenlete, ami 3 (x , y és z irányú egyensúlyt kifejező) komponens egyenletet jelent. Ehhez járul a porfázis (3.3) mozgásegyenlete, ami további 3 komponens egyenlet.

A kontinuitás egyenlete a gázra (elhanyagolva a porszemcsék "kiszorító" hatását):

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \text{div}(\rho_g \underline{v}) = 0. \quad (3.6)$$

és a por fázisra:

$$\frac{\partial c_p}{\partial t} + \text{div}(c_p \underline{u}_p) = 0. \quad (3.7)$$

A porszemcsére ható erő $\underline{F}_p = \underline{F}_p(\underline{v}, \underline{u}_p, \dots)$ kifejezése (ld. később) további 3 komponens egyenletet ad. Összesen tehát 11 differenciálegyenletből álló egyenletrendszer írja le a portartalmú gáz áramlását, amelyekben az alábbi 11 ismeretlen van:

$$v_x, v_y, v_z, u_{px}, u_{py}, u_{pz}, F_{p,x}, F_{p,y}, F_{p,z}, p, c_p.$$

Nyilvánvaló, hogy a fenti egyenletrendszer megoldása igen nehéz feladat. Hogyan lehetne egyszerűsíteni a feladatot? Ha

- a porkoncentráció lényegesen kisebb a gáz sűrűségénél, azaz $\frac{c_p}{\rho_g} \ll 1$, valamint
- a por fázis gyorsulása $\frac{d\underline{u}_p}{dt}$ azonos nagyságrendbe esik a gáz $\frac{d\underline{v}}{dt}$ gyorsulásával,

akkor $\frac{c_p}{\rho_g} \frac{d\underline{u}_p}{dt} \ll \frac{d\underline{v}}{dt}$, azaz a (3.5) egyenlet bal oldalának második tagja és a jobboldalon az első

tagban az 1 mellett a c_p/ρ_g elhanyagolható. Ekkor a gázra felírt mozgásegyenletből a porszemcsék hatását kifejező tagok kiesnek, azaz a porszemcséknek a gáz áramlására gyakorolt hatását elhanyagolhatjuk. (Természetesen fordítva nem igaz, a gáz még kis koncentrációk esetén is befolyásolja a porszemcsék mozgását.)

Ily módon, a fenti feltételek fennállása esetén a differenciálegyenlet rendszer ketté válik, azaz porszemcsék mozgását a gáz mozgásától függetlenül vizsgálhatjuk, ami igen nagy mértékben egyszerűsíti a jelenség leírását:

- először a tiszta gáz áramlását számoljuk ki vagy mérjük meg, majd
- kiszámoljuk a porszemcsék pályáját az áramló gázban.

Térfogati arány (α_p) és tömegarány (M)

A két-, vagy többfázisú áramlások vizsgálatánál - főként a primer közegbeli turbulencia-módosítással foglalkozó szakirodalomban - leginkább elterjedt paraméter az alábbi kifejezéssel definiálható α_p térfogati arány, ahol az 1.5 ábra jelöléseit használjuk fel, miszerint az egész poros gáz térfogatot feloszthatjuk n db a^3 térfogatú résztérfogatra, amely kocka térrészekben egy-egy porszemcse helyezkedik el. A teljes poros gázelegy térfogati arányára így:

$$\alpha_p = \frac{n \cdot V_p}{n \cdot V_g} = \frac{\frac{x^3 \pi}{6}}{a^3} = \frac{c_p}{\rho_p} \qquad \alpha_p = \frac{c_p}{\rho_p}$$

kifejezés adódik ahol a két fázis, jelen esetben a poros gáz elegyben a por V_p és a gáz V_g térfogatának aránya szerepel. (igen híg elegyekről van szó, tehát a/x Hasonló megfontolások alapján az ún. M tömegarány is definiálható:

$$M = \frac{n \cdot m_p}{n \cdot m_g} = \frac{\rho_p \frac{x^3 \pi}{6}}{\rho_g a^3} = \frac{\rho_p c_p}{\rho_g \rho_p} = \frac{c_p}{\rho_g} \qquad M = \frac{c_p}{\rho_g}$$

A térfogati arány és a tömegarány közötti átszámítás a fázisok sűrűség aránya ismeretében egyszerűen adódik (jelen esetben a gáz és porszemcse esetében a sűrűségaránya kb. 10^{-3} nagyságrendű, így M tömegarány kb. három nagyságrenddel nagyobb, mint a térfogati arány):

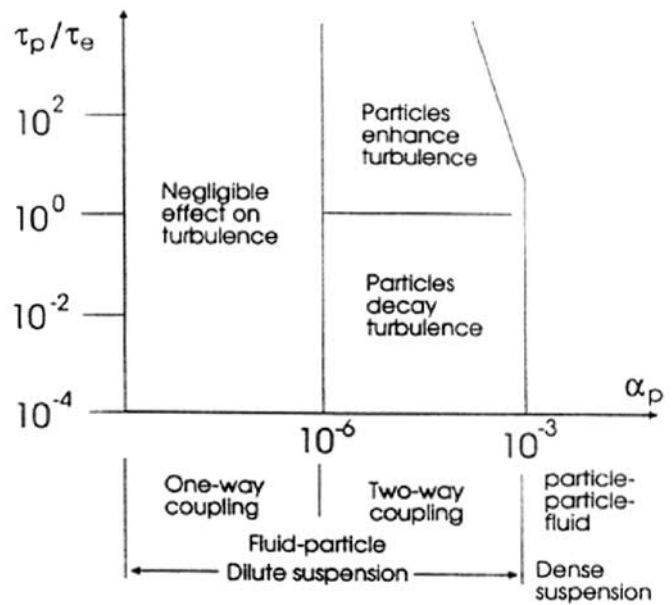
$$\frac{M}{\alpha_p} = \frac{\rho_p}{\rho_g}, \qquad \text{vagy} \qquad \frac{\alpha_p}{M} = \frac{\rho_g}{\rho_p}$$

Táblázat Porszemcsék egymástól mért relatív távolsága (a/x), a c_p porkoncentráció és a ρ_p porsűrűség függvényében; valamint az N [db/mm^3] darabszám szerinti koncentráció a ρ_p porsűrűség függvényében adott $x=1,5\mu m$ porszemcse átmérő esetén.

a/x		ρ_p [kg/m^3]		
		800	1500	2500
c_p [g/m^3]	0,0001	1612	1988	2357
	0,001	748	923	1094
	0,01	347	428	508
	0,1	161	199	236
	1	75	92	109
	10	35	43	51
	100	16	20	24

n [db/mm^3]		ρ_p [kg/m^3]		
		800	1500	2500
c_p [g/m^3]	0,0001	0,07	0,04	0,02
	0,001	0,7	0,4	0,2
	0,01	7	4	2
	0,1	71	38	23
	1	707	377	226
	10	7074	3773	2264
	100	70736	37726	22635

ELGHOBASHI (1994) kétfázisú áramlásokban a fázisok közötti kölcsönhatásokat vizsgáló összefoglaló munkája szerint egy kétfázisú elegy az α_p térfogati arány szerint két fő tartományra: a sűrű ($\alpha_p > 10^{-3}$) és híg ($\alpha_p < 10^{-3}$) elegyekre osztható. A gáz és a diszperz fázisok közötti kölcsönhatások turbulencia módosításban játszott szerepének megítélésére ELGHOBASHI által javasolt térkép a mellékelt ábra: a térfogati arány (α_p) és a porszemcse STOKES-szám ($St_p = \tau_p / \tau_e$) jellemző értéktartományában. A porfázis és a szállító gáz közeg τ időléptékeinek hányadosával definiált Stokeszám nem más, mint a korábban bevezetett ún. Ψ tehetetlenségi paraméter.



- a) Az $\alpha_p > 10^{-3}$ tartomány a sűrű szuszpenziókra jellemző, ahol gáz és porszemcsék közötti kétirányú kölcsönhatás mellett az egyes porszemcsék közötti kölcsönhatás (ütközés, összetapadás) is jellemző¹.
- b) Az $\alpha_p < 10^{-3}$ tartomány a híg elegyekre jellemző tartomány, melyen belül [ELGHOBASHI \(1994\)](#) a diszperz fázis primer fázisra gyakorolt hatás szempontjából külön kezeli a $10^{-6} < \alpha_p < 10^{-3}$ és a $\alpha_p < 10^{-6}$ tartományokat az alábbiak szerint:

b1) A $10^{-6} < \alpha_p < 10^{-3}$ tartományon² belül az adott porszemcsére jellemző STOKES-szám (St_p) alapján eldönthető, hogy a diszperz fázis gázáramlásra gyakorolt hatása a szállító gáz áramlási sebességeterére jellemző turbulencia intenzitás növelésében ($St_p > 1$) vagy csökkenésében ($St_p < 1$) jelentkezik-e – az egyfázisú áramlásra jellemző turbulencia intenzitáshoz képest.

b2) A kétfázisú gáz-részecske elegyek $\alpha_p < 10^{-6}$ térfogati arány tartományban már rendkívül hígak, ebben az esetben a diszperz fázis gázáramlásra gyakorolt hatása bármely St_p porszemcse STOKES-szám tartományban elhanyagolható³, állapítja meg [ELGHOBASHI \(1994\)](#).

Táblázat Térfogati arány (α_p) a c_p porkoncentráció és a ρ_p porsűrűség függvényében, valamint az M tömegarány a c_p porkoncentráció és a ρ_g gázsűrűség függvényében.

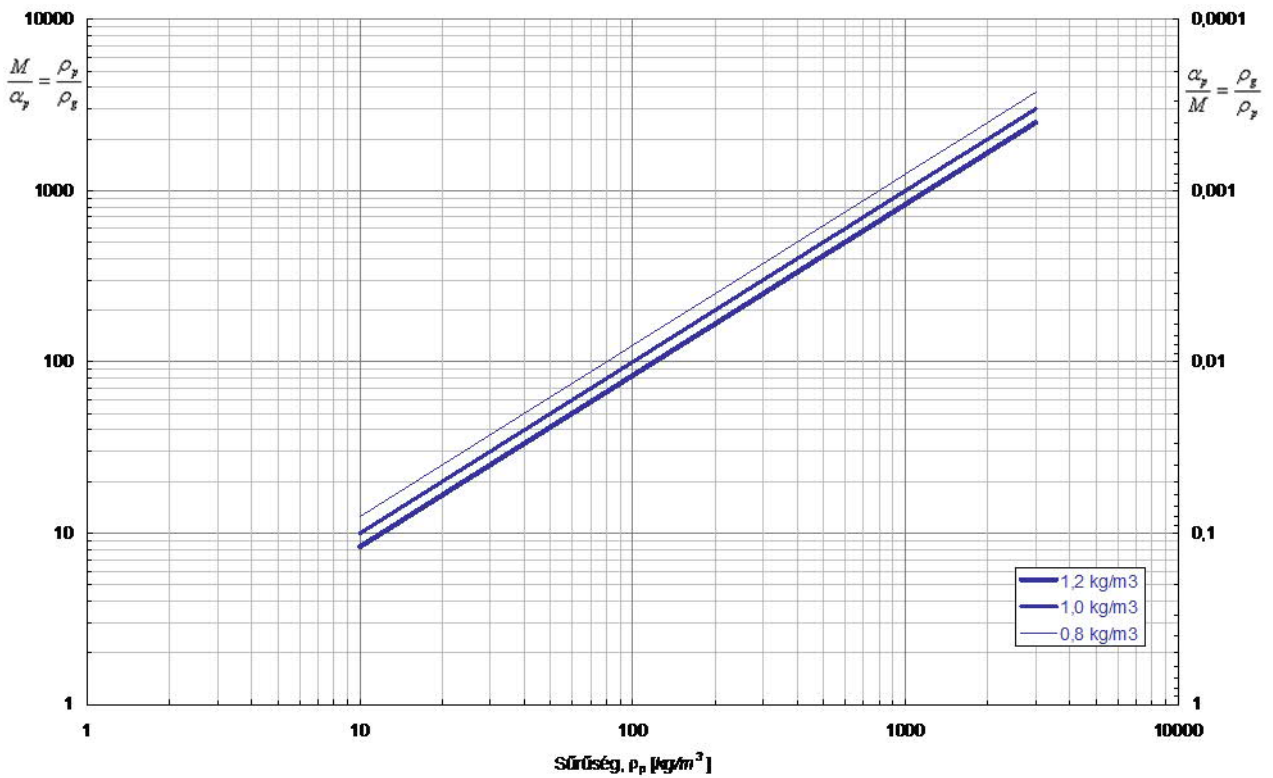
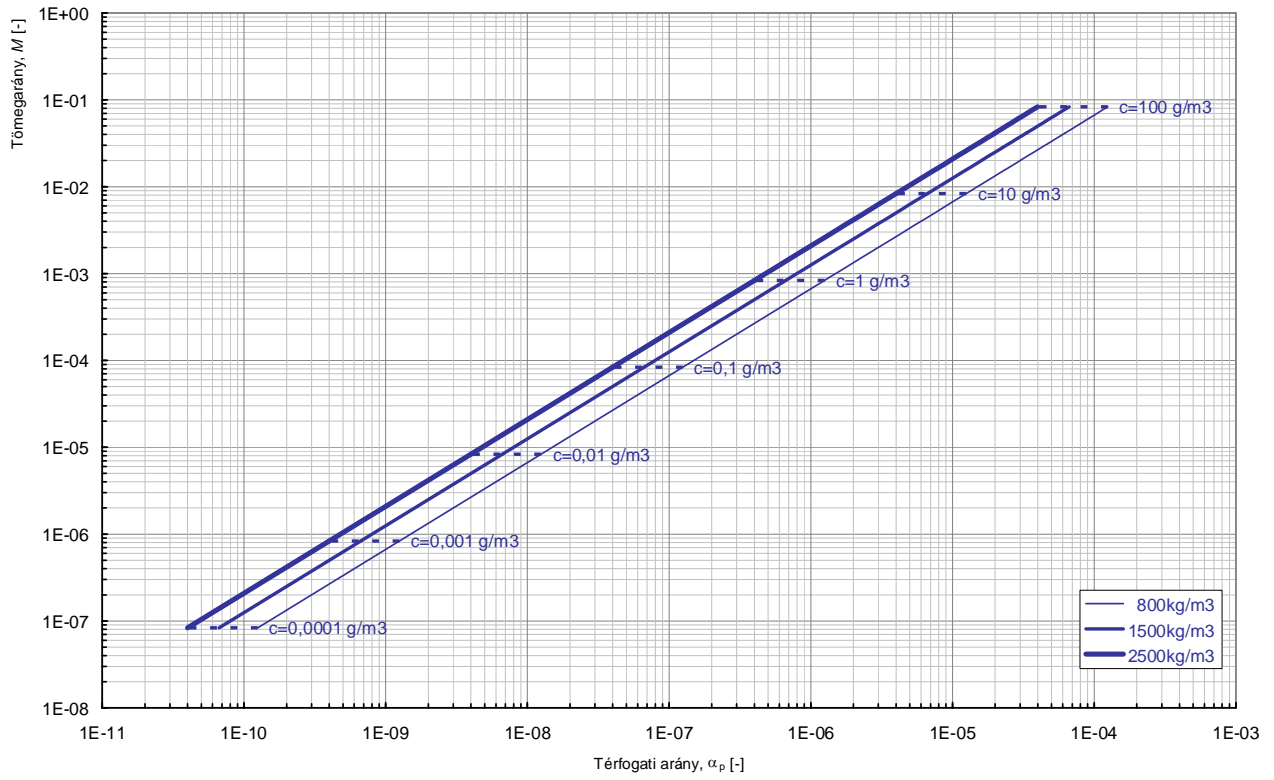
α_p		ρ_p [kg/m ³]		
		800	1500	2500
c_p [g/m ³]	0,0001	$1,3 \cdot 10^{-10}$	$6,7 \cdot 10^{-11}$	$4,0 \cdot 10^{-11}$
	0,001	$1,3 \cdot 10^{-9}$	$6,7 \cdot 10^{-10}$	$4,0 \cdot 10^{-10}$
	0,01	$1,3 \cdot 10^{-8}$	$6,7 \cdot 10^{-9}$	$4,0 \cdot 10^{-9}$
	0,1	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$6,7 \cdot 10^{-8}$	$4,0 \cdot 10^{-8}$
	1	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$6,7 \cdot 10^{-7}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$
	10	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$6,7 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$
	100	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$6,7 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$

M		ρ_g [kg/m ³]		
		0,8	1,0	1,2
c_p [g/m ³]	0,0001	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$8,3 \cdot 10^{-8}$
	0,001	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$8,3 \cdot 10^{-7}$
	0,01	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$8,3 \cdot 10^{-6}$
	0,1	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$8,3 \cdot 10^{-5}$
	1	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$8,3 \cdot 10^{-4}$
	10	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-3}$
	100	$1,3 \cdot 10^{-1}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$8,3 \cdot 10^{-2}$

¹ A (levegő↔porszemcse) kölcsönhatás mellett a (porszemcse↔porszemcse) kölcsönhatások is jellemzőek a sűrű ($\alpha_p > 10^{-3}$ térfogati arányú) kétfázisú elegyekre. (levegő↔porszemcse↔porszemcse)

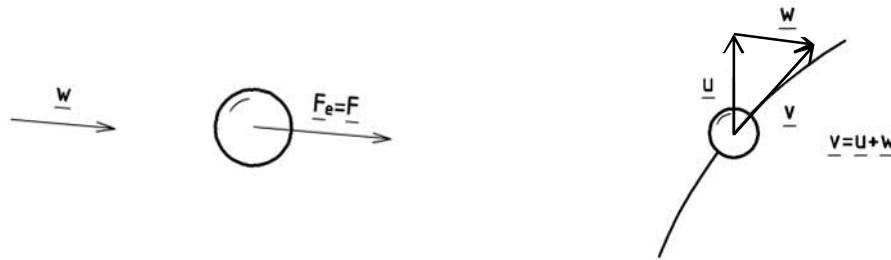
² „two-way coupling”: a „kétirányú”, azaz (levegő→porszemcse) ill. (porszemcse→levegő) kölcsönhatások tartománya. (levegő↔porszemcse)

³ „one-way coupling”: az „egyirányú”, azaz csak (levegő→porszemcse) kölcsönhatások tartománya.



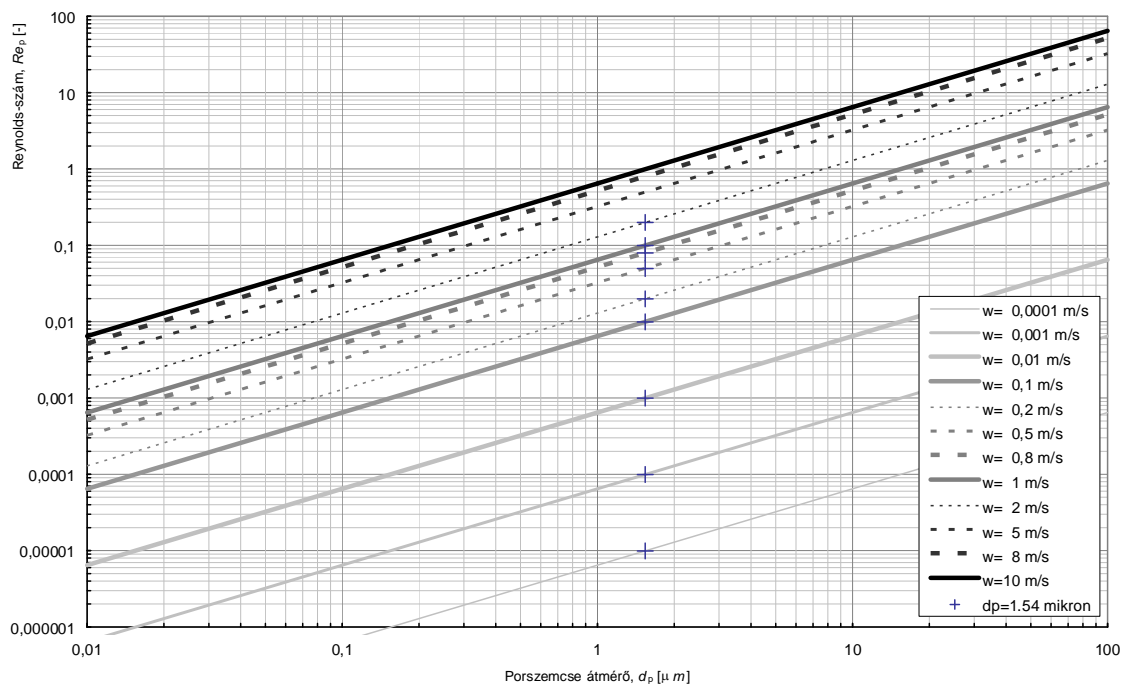
3.2. A PORSZEMCSÉKRE HATÓ ÁRAMLÁSI EREDETŰ ERŐ

Ha nem forog a szemcse, a gömb alakúnak feltételezett szemcsékre ható F_e áramlási ellenállás erő megegyező irányú és irányítású a w relatív sebességgel, ld **3.1 ábra**.



3.1. ábra A szemcsére ható áramlási ellenállás erő

A porszemcse körüli áramlást jellemző $Re_p = \frac{w x}{\nu}$ kifejezéssel definiált Reynolds-szám értéke kicsi, ebből következően a sűrűdésből származó erők dominálnak. Porszemcse Reynolds-szám értékeit a szemcseátmérő és w relatív sebesség függvényében az alábbi diagramban ábrázoltuk:



3.1b ábra Porszemcse Reynolds-szám értékei a szemcseátmérő és w relatív sebesség függvényében

A gömb alakú szemcsére ható áramlási ellenállás erő a gömb felületén keletkező, a nyomásból és a csúsztatófeszültségből származó erők eredője. STOKES megoldotta gömb körüli áramlásra a linearizált¹ a Navier-Stokes egyenletet, és a gömbre ható erőre az

$$F_e = 3 \pi \mu x w \quad (3.8)$$

¹ A Navier-Stokes egyenlet linearizálása a következőket jelenti. A Reynolds szám értéke a tehetetlenségi erők és sűrűdés erők arányát jellemzi. A porszemcsék körüli áramlás esetén a Re értéke kicsi, azaz a tehetetlenségi erők elhanyagolhatók a sűrűdés erőkhez képest. Ezért Stokes a Navier-Stokes egyenlet tehetetlenségi erőket kifejező bal oldalát 0-val tette egyenlővé. Ezt az eljárást, amelyenél a differenciálegyenlet nemlineáris tagjait elhanyagoljuk, linearizálásnak nevezzük.

összefüggést kapta, amit Stokes képletnek nevezünk. A kifejezésben a \underline{w} relatív sebességvektora a $\underline{v} = \underline{u} + \underline{w}$ kifejezés szerint, a 3.1 ábrán látható módon megadottak szerint értelmezett, ahol

\underline{v} az abszolút (gáz) sebesség,

\underline{u} a porszemcse sebessége,

\underline{w} a (porszemcséhez képesti) relatív sebesség.

Az ellenálláserő a relatív sebességgel párhuzamos és megegyező irányítású.

Ez az összefüggés $Re_p < 0.25$ esetén érvényes jó közelítéssel. Az ellenállástényező definíciója:

$$c_e = \frac{|F_e|}{\frac{\rho}{2} v^2 \frac{x^2 \pi}{4}} \quad (3.9a)$$

F_e helyébe a Stokes képletet (3.8) helyettesítve egyszerűsítés után az alábbi kifejezés adódik az ellenállástényezőre.

$$c_e = \frac{24}{Re_p} \quad (3.9b)$$

Nagyobb Reynolds-számokra kiterjesztve, $Re_p < 5$ tartományban az OSEEN által javasolt összefüggéseket célszerű alkalmazni:

$$c_e = \frac{24}{Re_p} \cdot \left(1 + \frac{3}{16} Re_p\right) \quad Re_p < 5 \quad (3.10a)$$

$$c_e = \frac{24}{Re_p} \cdot \left(1 + \frac{Re_p^{2/3}}{6}\right) \quad 3 < Re_p < 400 \quad (3.10b)$$

Továbbá közöljük a [MICHAELIDES \(1997\)](#) által meghatározott kifejezést, mely egészen $Re_p=1000$ értékig alkalmazható jó közelítéssel, és így pl. kétfázisú áramlások numerikus szimulációjánál célszerű alkalmazni:

$$c_e = \frac{24}{Re_p} \cdot \left(1 + 0,15 \cdot Re_p^{0,687}\right) \quad 0,1 < Re_p < 1000 \quad (3.10c)$$

3.3. A SZEMCSEDINAMIKA ALAPEGYENLETE

A szemcsedinamika alapegyenlete a porszemcsék mozgását írja le. A szemcsére ható súlyerő és áramlási ellenállás erő összege egyenlő a szemcse tömegének és gyorsulásának szorzatával:

$$\frac{x^3 \pi}{6} \rho_p \frac{d\underline{u}_p}{dt} = \frac{x^3 \pi}{6} \rho_p \underline{g} + 3\pi \mu x \underline{w} \quad \left| \cdot \frac{l_0}{v_0^2} \right. \quad (3.11)$$

Az egyenletet dimenziótlanítsuk, azaz szorozzuk be az $\frac{l_0}{v_0^2}$ kifejezéssel, amelyben v_0 jellemző sebesség (m/s), l_0 pedig egy jellemző hossz méret (m).

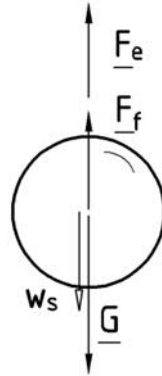
$$\frac{x^3 \pi}{6} \rho_p \frac{d\underline{u}_p}{dt} = \frac{x^3 \pi}{6} \rho_p \underline{g} + 3\pi \mu x \underline{w} \quad \left| \cdot \frac{l_0}{v_0^2} \right.$$

Átrendezés után a dimenziótlanított porszemcse mozgásegyenlet:

$$\frac{d \frac{u_p}{v_0}}{d \frac{t}{l_0/v_0}} = \frac{g l_0}{v_0^2} + \frac{18 \mu l_0}{x^2 \rho_p v_0} \frac{w}{v_0} \quad (3.12)$$

Porszemcsék süllyedési (ülepedési) sebessége (w_s)

"Mellékszámításként" vizsgáljuk meg, hogy milyen sebességgel süllyed a ρ_p sűrűségű porszemcse a nyugalomban lévő ρ_g sűrűségű közegben, ld. **3.2 ábra!**



3.2. ábra A nehézségi erőterben süllyedő porszemcse

Írjuk fel a nehézségi erőterben, nyugvó közegben állandó w_s sebességgel süllyedő gömb alakú, x átmérőjű porszemcsére ható erők egyensúlyát! A kezdeti gyorsuló szakasztól eltekintve ekkor már nem gyorsul a szemcse, tehát a rá ható erők eredője zérus: a szemcsére ható G súlyerővel az F_e Stokes-féle ellenállás-erő és az F_f felhajtóerő tart egyensúlyt:

$$G = F_e + F_f.$$

Feltételeztük, hogy az adott esetben a Stokes képlet érvényes, azaz a gömbszerű szemcse köráramlására érvényes Reynolds-szám a képlet érvényességi tartományán belül van. A Stokes képletben a relatív sebesség most nyugvó közegben a porszemcse w_s süllyedési sebességével egyezik meg. A hidrosztatikai eredetű felhajtóerő nem hanyagolható el, ha pl. a szemcse nem levegőben, hanem folyadékban süllyed, amelynek sűrűsége a szemcse sűrűség nagyságrendjébe esik.

$$\frac{x^3 \pi}{6} \rho_p g = \frac{x^3 \pi}{6} \rho_g g + 3\pi \mu x w_s \quad (3.13)$$

Kifejezve a w_s süllyedési sebességet a

$$w_s = \frac{x^2 (\rho_p - \rho_g) g}{18\mu} \quad (3.14)$$

alak adódik. Ha pl. gázban süllyed a szemcse, azaz ha a porszemcse sűrűségéhez képest a közeg sűrűsége elhanyagolható, így írható, hogy:

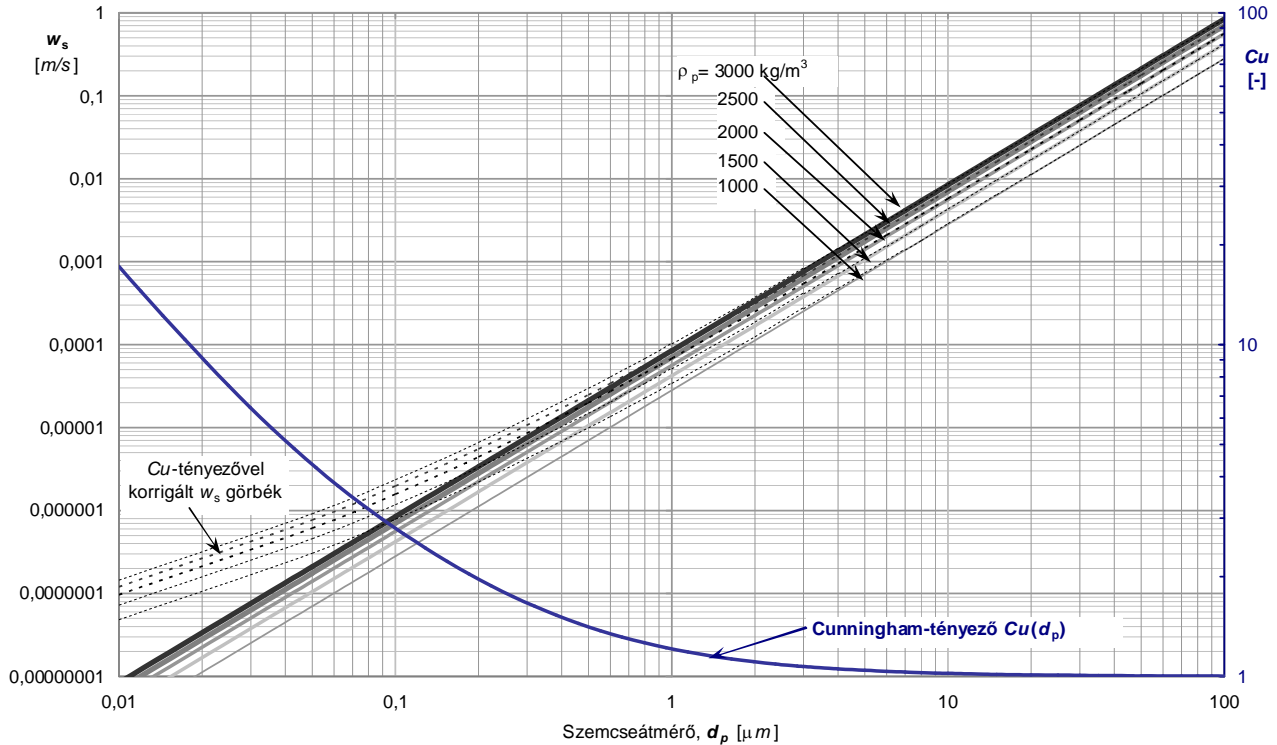
$$\boxed{\rho_p \gg \rho_g} \text{ feltétel esetén a süllyedési sebesség } w_s = \frac{x^2 \rho_p g}{18\mu}. \quad (3.15)$$

Ha a gázban süllyedő porszemcsék már olyan kis méretűek, hogy az átmérőjük a gázmolekulák szabad úthosszával (szobahőmérsékleten $\lambda = 0.065 \mu m$) összemérhető, akkor a süllyedési sebesség a tapasztalatok szerint megnő a szemcsére ható ellenállás-erő csökkenése miatt. Ez esetben egy korrekciós tényezőt kell alkalmaznunk: a w_s süllyedési sebesség (3.14) ill. (3.15) összefüggését meg kell szorozni az ún. CUNNINGHAM-féle korrekciós tényezővel, amely alábbi egyszerűsített alakjában (ld. 3.16a) szereplő konstans $A \approx 1,4$ értékű.

$$Cu = 1 + \frac{2 A \lambda}{x} \quad (3.16a)$$

$$Cu = 1 + 1,246 \cdot \frac{2\lambda}{d_p} + 0,42 \cdot \frac{2\lambda}{d_p} \cdot e^{-0,87 \frac{2\lambda}{d_p}} \quad (3.16b)$$

Az alábbi diagramon a szemcsék nyugvó levegőben kiszámolt w_s süllyedési sebességét, illetve a szubmikronos mérettartományra való tekintettel annak a Cu -tényezővel korrigált ($w_s \cdot Cu$) értékeit is ábrázoltuk. Az ábrán a süllyedési sebesség görbék mellett külön a Cu -tényező (3.16b) kifejezés alapján számolt értékeit (kék vonallal jelölve: ld. jobboldali függőleges tengely) ábrázoltuk.



Porszemcse süllyedési sebessége (w_s) és a Cunningham-féle korrekciós tényező (Cu)

Tehetlenségi paraméter (Ψ)

A (3.12) kifejezéssel megadott porszemcse dimenzióatlanított mozgásegyenletében a továbbiakban felhasználjuk a porszemcse fent (3.15) kifejezéssel megadott w_s süllyedési sebességét. A (3.12) kifejezésben a továbbiakban a szemcsére ható súlyerő hatását elhanyagolva, és a (g/w_s) behelyettesítésével végzett átalakítás után a porszemcse mozgását leíró dimenzióatlan mozgásegyenlet az alábbi formában írható:

$$\frac{d \frac{u_p}{v_0}}{d \frac{t}{l_0/v_0}} = \frac{g \cdot l_0}{w_s \cdot v_0} \frac{w}{v_0} \quad (3.17)$$

A fenti kifejezés jobb oldalán lévő dimenzióatlan csoport reciprokaként vezessük be az ún. Ψ tehetlenségi paramétert:

$$\Psi = \frac{w_s \cdot v_0}{g \cdot l_0} \quad (3.18)$$

Jelöljük a (3.17) kifejezésben ' -vel a dimenzióatlan mennyiségeket, pl. $\underline{u}'_p = \frac{u_p}{v_0}$. A dimenzióatlan porszemcse sebesség (\underline{u}'_p), dimenzióatlan idő (t') és dimenzióatlan relatív sebesség (\underline{w}') tagokat, és a

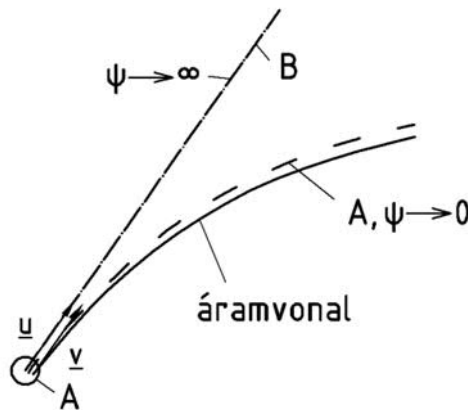
tehetetlenségi paramétert tartalmazó dimenziótlan porszemcse mozgásegyenlet: így az alábbi (3.19) kifejezés szerint írható.

$$\frac{d\underline{u}_p'}{dt'} = \frac{1}{\Psi} \underline{w}' = \frac{1}{\Psi} (\underline{v}' - \underline{u}_p') \quad (3.19)$$

3.4. A PORSZEMCSE PÁLYÁJÁNAK SZÁMÍTÁSA

Ha a porszemcsék áramlásra gyakorolt hatása elhanyagolható (ld. a (3.5) összefüggés alapján tett megállapításokat), akkor a "tisza" gáz ismert (mért vagy kiszámolt) sebességterében a fenti összefüggés segítségével lehetőség van a porszemcse pályájának számítására. Ismert \underline{v}' sebességtér esetén a porszemcse pályája a (3.19) egyenlet pl. numerikus megoldásával határozható meg.

A (3.19) kifejezés tehetetlenségi paraméter szerinti vizsgálata az alábbi egyszerű következtetések levonására ad lehetőséget. Tekintsünk egy, a **3.3 ábrán** látható közeg áramvonalat, amelyet a \underline{v} áramlási sebesség vektor minden pontjában érint. Legyen az „A” pontban a porszemcse sebessége (az \underline{u}_p szállítósebesség) adott. Mitől függ a porszemcse pályája? Követi-e a porszemcse a gázáramlás (görbült) áramvonalait?



3.3. ábra Szállító közeg áramvonala és a porszemcsék pályája a Ψ tehetetlenségi paraméter függvényében

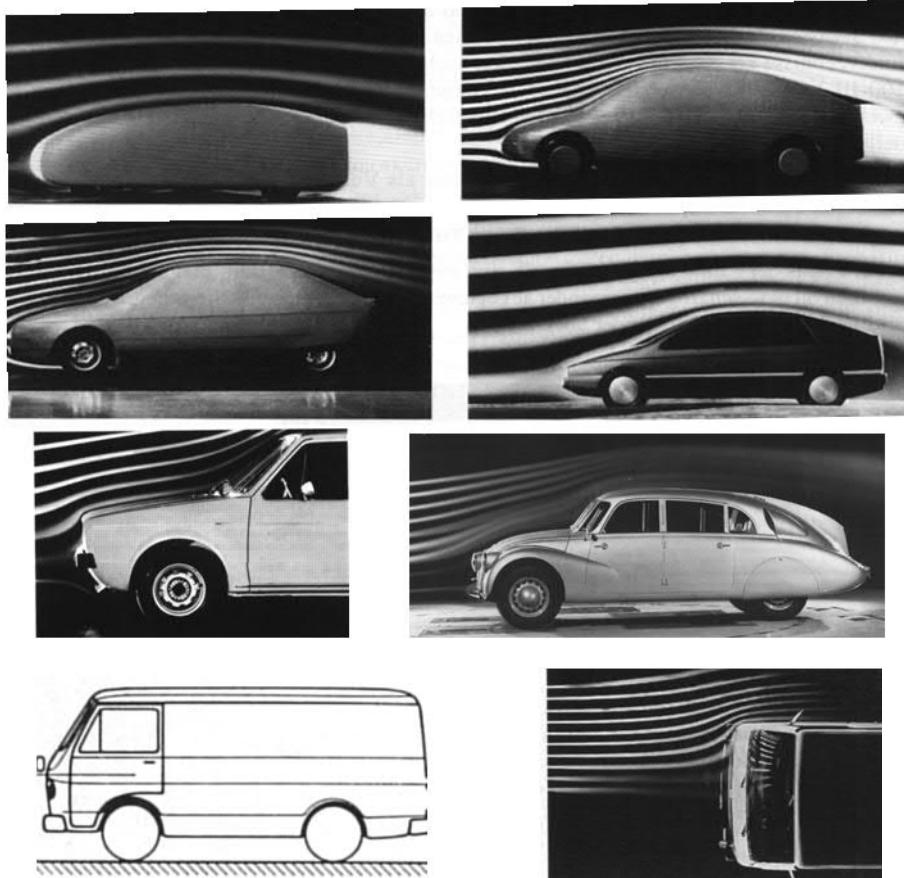
Tegyük fel, hogy a Ψ tehetetlenségi paraméterre írható $\Psi \rightarrow 0$, azaz a porszemcse igen kicsiny, a süllyedési sebessége $w_s \rightarrow 0$. Ebben az esetben még kis relatív sebesség (ld. 3.1 ábra) is igen nagy gyorsulást idéz elő, azaz ha $(\underline{v}' - \underline{u}_p') \neq 0 \Rightarrow \frac{d\underline{u}_p'}{dt'} \rightarrow \infty$. Tehát ebben az esetben, amikor az áramlási ellenállás erők mellett a porszemcse tehetetlensége elhanyagolható, a porszemcse az áramvonalon halad, követi annak görbületét (A jelű pálya).

Nagyméretű porszemcse esetén $\Psi \rightarrow \infty$, azaz nagy a süllyedési sebesség, $\frac{1}{\Psi} \rightarrow 0$, ezért $\frac{d\underline{u}_p'}{dt'} \rightarrow 0$.

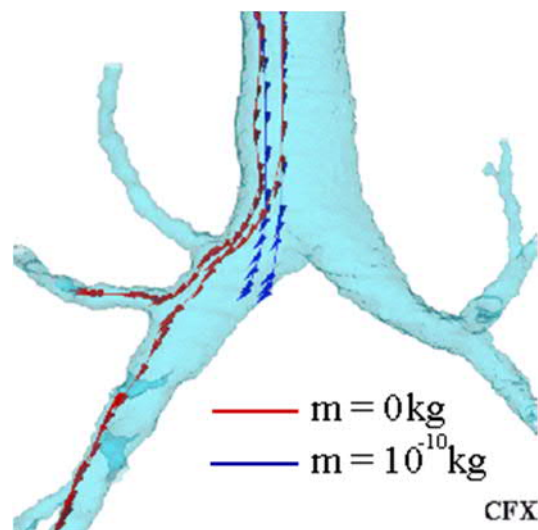
Ebben az esetben ugyanis a tehetetlenséghez képest elhanyagolható az áramlási ellenállás erő. A (3.19) mozgásegyenletben ez úgy mutatkozik meg, hogy a relatív sebességet egy zérushoz tartó mennyiséggel szorozzuk meg, azaz a porszemcse nem gyorsul, egyenes pályán, a saját eredeti u sebesség vektorának megfelelő pályán halad (B jelű pálya).

A valóságban a porszemcsék ψ tehetetlenségi paramétere 0 és ∞ közötti érték, azaz pályájuk az ábrán az A és B jelű görbe között fut. Minél nagyobb a Ψ értéke, annál nagyobb görbületi sugarú íven mozog a porszemcse, annál jobban "lesodródik" az áramvonalról tehetetlensége folytán. Egy példával lehet a fent elmondottakat szemléltetni. Tapaszthatjuk, hogy az autó szélvédőjé-

re/karosszériájának bizonyos részeire menet közben felütköznek a bogarak. Annál több, minél nagyobb az autó sebessége, és minél nagyobbak a bogarak (azaz minél nagyobb a Ψ tehetetlenségi paraméterük), illetve minél meredekebb a szélvédő, azaz minél nagyobb görbületűek a relatív sebességtér áramvonalai (ld. **3.4a ábra**). A felütköző bogarak nem képesek követni a relatív sebességtér áramvonalait, ezért arról lesodródva nekicsapódnak a szélvédőre. Míg jellemzően a jobban hátradöntött szélvédőn csak nagyobb méretűek, a jármű haladási irányára merőleges felületein (hűtőrács, első lámpán, lökhárítón) pedig a kisebb méretű bogarak is megtalálhatók.



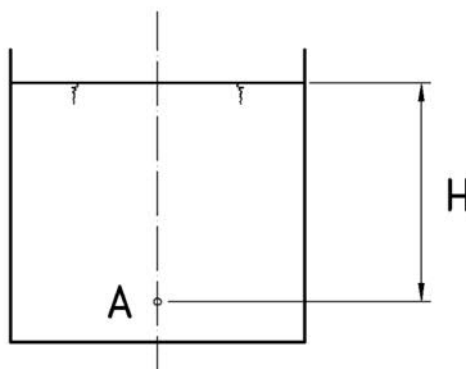
3.4a ábra Szélcsatorna kísérletek során járműmodellek körüli láthatóvá tett görbült áramvonalak



3.4b ábra „Súlytalan” ($m=0\text{kg}$, $\Psi=0$) áramlást követő porszemce (piros vonal) és egy kb. 40 mikron átmérőjű ($m=10^{-10}\text{kg}$ tömegű, $\Psi\approx 250$) porszemce (kék vonal) pályák numerikus szimulációval kiszámítva egy hörgő (ld. 1.7 ábra) elágazásban

4. TÖMEG SZERINTI ELOSZLÁS GYŰJTŐFÜGGVÉNYÉNEK MEGHATÁROZÁSA SZEDIMENTÁLÁSSAL

Egy szemcsehalmaz tömeg szerinti eloszlás gyűjtőfüggvényének szedimentálással való meghatározásakor a következőképpen járunk el. A **4.1 ábrán** látható edényben lévő ismert tulajdonságú mérőfolyadékban a porszemcséket egyenletesen elkeverjük, majd $t_0=0$ időpillanatban a H mélységben lévő „A” pontból pipettával meghatározott mennyiségű folyadékmintát veszünk. A mintát szárítószekrényben kiszárítjuk és a benne lévő porszemcsék tömegét súlyméréssel meghatározzuk, amiből a c_0 kezdeti porkoncentráció adódik. A mintában a szemcsék teljes elkeveredése következtében valamennyi mérettartományba eső porszemcse ugyanúgy van reprezentálva, mint a teljes szemcsehalmazban. A művelet egymás utáni t_i időpillanatokban is elvégezzük, és ugyanígy meghatározzuk a $c_i < c_0$ koncentráció értékeket.



4.1. ábra Szemcseméret eloszlás mérés szedimentálással

A később vett folyadékmintákban azért kisebb a koncentráció értéke, mert t_i időtartam alatt egy meghatározott x_i átmérőnél nagyobb méretű szemcsék már kirakódtak a folyadékból, lesüllyedtek az „A” mintavételi pont alá. (x_i annak a porszemcsének az átmérője, amely az adott folyadékban t_i időtartam alatt éppen H mélységre, a folyadék felszínéről a mintavételi pontig süllyedt.) Tehát a mintavételi pontban annyival csökkent a koncentráció, amennyi a $x \geq x_i$ átmérőjű szemcsék tömegének aránya a szemcsehalmaz tömegéhez képest, azaz a c_i/c_0 hányados értéke éppen egyenlő az $Q_3(x_i)$ -vel, a tömeg (v. térfogat) szerinti gyűjtőfüggvény x_i -hez tartozó értékével.

Határozzuk meg x_i értékét, ha ismerjük t_i -t! A süllyedési sebesség (3.14) kifejezését felhasználva felírható a t_i és az x_i szemcseátmérő kapcsolata:

$$t_i = \frac{H}{w_{si}} = \frac{18 \mu H}{x_i^2 (\rho_p - \rho_g) g},$$

amiből kifejezhető a t_i -hez tartozó x_i értéke:

$$x_i = \sqrt{\frac{18 \mu H}{t_i g (\rho_p - \rho_g)}}.$$

Különböző időpontokban, egymás után folyadékmintát véve meghatározhatók a térfogat szerinti gyűjtőfüggvény különböző pontjai. A térfogat szerinti gyűjtőfüggvény ismeretében kiszámítható a darabszám szerinti ill. felület szerinti gyűjtőfüggvény is (ld. (1.13) összefüggés).

A mérési módszer alkalmazásánál az egyik nehézséget az egyenletes porszemcse eloszlás előállítása okozza a nyugvó folyadékban t_0 pillanatban. Másik probléma, hogy a porkoncentráció a mérőfolyadékban nem lehet nagy, mert a süllyedő nagyobb szemcsék a kisebb szemcséket is magukkal sodorhatják, ha közel vannak egymáshoz. Ha viszont kicsi a koncentráció, és kevés folyadékot ve-

szünk ki a pipettával (hogy ne befolyásoljuk jelentősen a viszonyokat a mérőedényben), akkor kis koncentráció értékeket szükséges pontossággal történő meghatározása jelent nehézséget. Kis szemcseméreteknél centrifuga alkalmazásával csökkenthető a mérési idő.

E módszer továbbfejlesztéseként automata mérleggel mérik a szemcsemegoszlást, amelynek serpenyője az „A” mintavételi pont mélységében (ld. **4.1 ábra**) van. A serpenyőre hat erő kiüledő porszemek súlya miatti időbeni változásából meghatározható a keresett tömeg szerinti gyűjtőfüggvény.

Megjegyzendő, hogy a szedimentálással az áramlástanai vagy aerodinamikai egyenértékű átmérő függvényében határozzuk meg a tömeg szerinti gyűjtőfüggvényt.

Az optikai mérési módszerek és a számítástechnika területén végbement gyors fejlődés eredményeként a szemcsehalmazok jellemzőinek mérése területén egyre jobban tért hódítanak az optikai módszerek. Ezeknél a szemcsehalmazt áramló gázban elkeverik, az áramló gázban egy megvilágítanak egy mérőtérfogatot, és mérik az azon keresztülhaladó egyes porszemcsékről visszaverődött fény intenzitását. Ezzel az optikailag egyenértékű átmérő függvényében határozzuk meg a szemcsehalmaz átmérő vagy felület szerinti gyűjtőfüggvényét.

5 A POR EMISSZIÓ MÉRÉSE VEZETÉKBEN ÁRAMLÓ KÖZEGBEN

5.1. A MÉRENDŐ MENNYISÉGEK

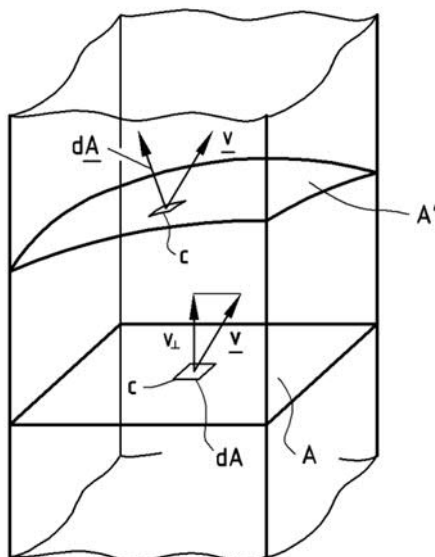
5.1.1. Az átlagos koncentráció

A továbbiakban tételezzük fel, hogy a porszemcse sebessége megegyezik a gáz áramlási sebességével $\underline{u}_p = \underline{v}$. Ez a feltételezés a gyakorlati esetekben jó közelítés, hiszen pl. a kéményben áramlás gáz sebességhez képest elhanyagolható a porszemcsék gázhoz képesti süllyedési sebessége.

Az átlagos koncentrációt a vezeték **5.1 ábrán** látható, általánosan felvett A' keresztmetszetében az alábbi összefüggéssel határozhatjuk meg:

$$\bar{c} = \frac{\int_{A'} c v dA}{\int_{A'} v dA} \quad (5.1)$$

A tört számlálója a por tömegáramot, a nevező a gáz térfogatáramot tartalmazza.



5.1. ábra Csővezeték keresztmetszet és átáramló mennyiségek

Ha az A mérési keresztmetszetet a vezeték tengelyére merőlegesen vesszük fel, és v_{\perp} -sel jelöljük a keresztmetszetre merőleges (azaz tengelyirányú) sebességkomponenst, akkor az átlagos koncentrációra írható:

$$\bar{c} = \frac{\int_A c v_{\perp} dA}{\int_A v_{\perp} dA} \quad (5.2)$$

Miután a sebesség és koncentráció értékeket csak a keresztmetszet n számú, ΔA részterületekhez tartozó pontjaiban tudjuk meghatározni, a koncentráció értékére közelítően adódik:

$$\bar{c} \approx \frac{\sum_{i=1}^n c_i v_{\perp i} \Delta A_i}{\sum_{i=1}^n v_{\perp i} \Delta A_i} \quad (5.3)$$

Ha a részterületek azonos $\Delta A = A/n$ nagyságúak, akkor írható:

$$\bar{c} \approx \frac{\sum_{i=1}^n c_i v_{\perp i}}{\sum_{i=1}^n v_{\perp i}} \quad (5.4)$$

5.1.2. A keresztmetszeten másodpercenként áthaladó por tömeg

A keresztmetszeten másodpercenként áthaladó por tömeg az alábbi összefüggéssel számítható:

$$q_m = \bar{c} \cdot q_v$$

ahol $q_m [kg / s]$ a por tömegáram,
 $\bar{c} [kg / m^3]$ az átlagos koncentráció,
 $q_v [m^3 / s]$ pedig a gáz térfogatáram,

amely a 5.1 ábra alapján a ΔA_i keresztmetszetek és az adott mérési pontban érvényes áramlási sebesség keresztmetszetre merőleges sebesség komponensek szorzatának összegeként számítható.

$$q_v = \sum_{i=1}^n v_{\perp i} \Delta A_i \quad (5.5)$$

Belátható, hogy időben változó viszonyok esetén csak akkor kapunk helyes értéket, ha a keresztmetszet n számú pontjában a helyi sebesség cső tengely irányú komponensét és a koncentrációt egy időpillanatban mérjük. Ez a gyakorlatban megvalósíthatatlan, hiszen legalább 12 db, de sokszor akár 100db drága mérőeszközt kellene párhuzamosan üzemeltetni. Ezért egy mérőműszer alkalmazása esetén a mérési módszer alkalmazásának fontos feltétele, hogy a **mérés időtartama alatt az üzemi állapot nem változhat.**

5.2. MÉRÉSI MÓDSZEREK

Az átlagos koncentráció és a por tömegáram meghatározására szolgáló módszerek két csoportra, a közvetett és közvetlen módszerek csoportjára oszthatók.

5.2.1. Közvetett módszerek

A közvetett módszerek a koncentráció vagy tömegáram és a szemcsehalmaz valamilyen mérhető fizikai mennyisége (pl. optikai tulajdonság: fény elnyelés, fény visszaverődés; vagy villamos tulajdonság: statikus feltöltődés) közötti kapcsolatot használják ki. Tekintettel arra, hogy ezek a módszerek nem képesek pl. az áramlási sebességnek megfelelő súlyozásra (ld. 5.4) összefüggés) és általában nem képesek az egész mérési keresztmetszet viszonyait érzékelni, használatukat mindig megelőzi a közvetlen módszerrel történő kalibrálás.

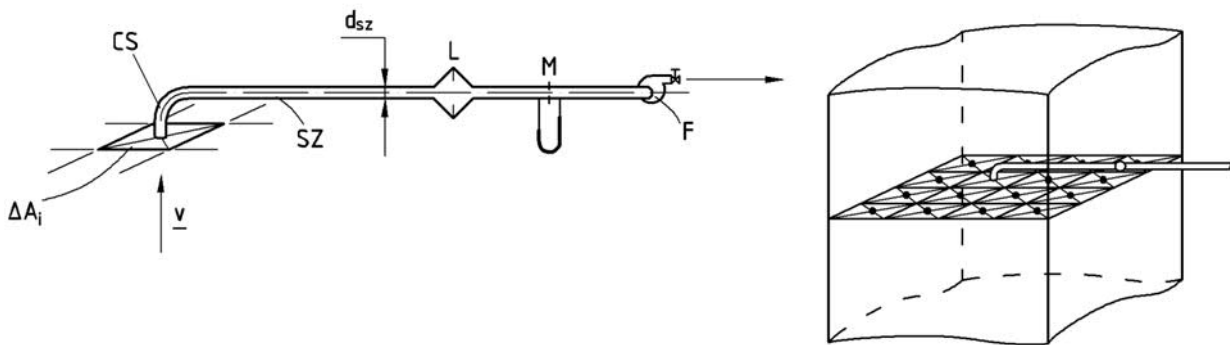
E módszerek még ilyen esetben is csak tájékoztató értékeket adnak. Nagy előnyük ugyanakkor, hogy időben változó viszonyok közelítő követésére is alkalmasak, ezért pl. erőművek kéményein kibocsátott por koncentrációjának folyamatos ellenőrzésére jól alkalmazhatók.

5.2.2. A közvetlen módszer

Közvetlen módszernek a mintavételen alapuló gravimetrikus mérést nevezzük, amelynek lényege, hogy a mérési keresztmetszetről gázmintát veszünk úgy, hogy az a mérési időtartama alatt a mérési keresztmetszeten átáramló gáz sajátosságaira vonatkozóan reprezentatív legyen. A gázmintát egy mintavevő szondával szívjuk le. Ennek legfontosabb része egy, a gázáramlással szembe néző

leszívócsonk (a **5.2 ábrán** **CS**-vel jelölve), amelynek d_{sz} átmérője általában 10 és 50 mm közötti érték. A leszívócsonkból a gáz az **SZ** jelű szondaszáron keresztül az **L** jelű leválasztóba jut, amely a gázmintában lévő port leválasztja és gyűjti. Innen a gáz az **M** jelű térfogatáram mérő részbe (pl. egy mérőperemmel ellátott csőbe) áramlik. A gázmintát egy változtatható légszállítású fúvó (**F** jelű) szívja át a mintavevőn.

A szondával a mérési keresztmetszet n számú, általában egyenlő nagyságú részfelületéhez tartozó mintavételi pontjaiból (ld. 5.2 ábra) szívunk le az alább meghatározandó feltételek között gázmintát, leválasztjuk a benne lévő port és mérjük a gázminta térfogatát. A mintavétel befejezése után megmérjük a leválasztóban összegyűjtött por tömegét és elosztjuk a leszívott gázminta térfogatával. Ha a gázminta a főgázáramra nézve reprezentatív, akkor az így kapott mért c_M koncentráció érték megegyezik a vezetékben áramló közeg átlagos koncentrációjával.



5.2. ábra A mintavételezésen alapuló porkoncentráció mérés

5.3. A MINTAVÉTELEZÉS MÓDJA

5.3.1. Hogyan kell gázmintát venni?

Az előzőekben bemutatuk, hogy a mérési keresztmetszetben lévő átlagos koncentráció jó közelítéssel az alábbi, (5.4) összefüggéssel határozható meg, ha az egyes mennyiségek a mérési keresztmetszetet egyenlő nagyságú részterületeihez tartoznak.

$$\bar{c} \approx \frac{\sum_{i=1}^n c_i v_{\perp i}}{\sum_{i=1}^n v_{\perp i}}$$

A szondával leszívott gázmintában az átlagos porkoncentráció a

$$\bar{c}_M = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{d_{szi}^2 \pi}{4} v_{szi} \Delta t_i c_{szi}}{\sum_{i=1}^n \frac{d_{szi}^2 \pi}{4} v_{szi} \Delta t_i} \quad (5.6)$$

összefüggéssel írható fel, ha összesen n mérési pontban szívunk le gázmintát és az i -edik mintavételi pontban az összefüggésben alkalmazott jelölések

v_{szi} : a leszívási sebesség a leszívócsonkban

c_{szi} : porkoncentráció a szondában

d_{szi} : a szonda átmérője

c_i : a mérendő helyi koncentráció és

Δt_i : ideig végezzük a mintavételezést (elszívást) az adott mérési pontban.

A (5.6) összefüggés számlálójában az összes mintavételi pontban gyűjtött por mennyisége, nevezőjében pedig az összes leszívott térfogat van.

Milyen feltételek teljesülése esetén helyes a mintavétel, azaz milyen feltételek mellett lehet a (5.6) összefüggést az (5.4) összefüggéssel azonos alakra hozni? Szorozzuk meg és osszuk el az (5.6) kifejezés számlálóját és a nevezőjét a szonda előtti áramlási sebesség csőtengely irányú komponensével, tehát szorozzuk be a számlálót és nevezőt is a $(v_{\perp i} / v_{szi})$ hányadossal:

$$\bar{c}_M = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{d_{szi}^2 \pi}{4} v_{szi} \Delta t_i c_{szi} \frac{v_{\perp i}}{v_{\perp i}}}{\sum_{i=1}^n \frac{d_{szi}^2 \pi}{4} v_{szi} \Delta t_i \frac{v_{\perp i}}{v_{\perp i}}}$$

Amennyiben a fenti kifejezésben szereplő d_{szi} leszívócsonk átmérő, Δt_i mintavételezési idő, és $(v_{szi} / v_{\perp i})$ sebességhányados állandó érték, vagyis minden mintavételezési pontban azonos, azaz

$$\boxed{d_{szi}^2 \frac{v_{szi}}{v_{\perp i}} \Delta t_i \equiv \text{állandó}} \quad (5.7)$$

szorzat értéke is állandó, akkor a számlálóban és a nevezőben egyaránt kiemelhető, és egyszerűsíthető. Egyszerűsítés után az összefüggés az alábbi (5.8) alakba megy át.

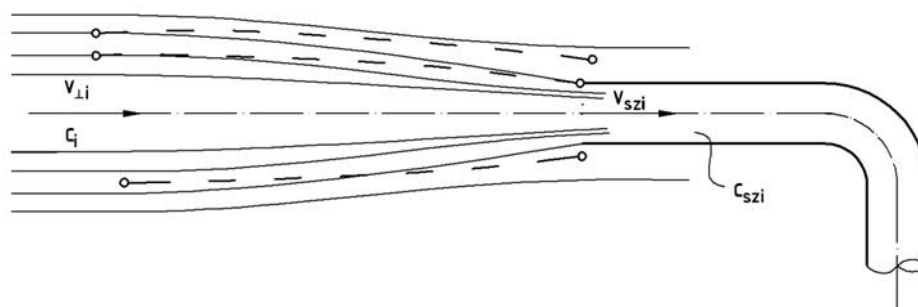
$$\bar{c}_M \approx \frac{\sum_{i=1}^n c_{szi} v_{\perp i}}{\sum_{i=1}^n v_{\perp i}} \quad (5.8)$$

Az (5.7) feltétel pl. akkor teljesül, hogyha minden pontban azonos átmérőjű szondával veszünk mintát, minden pontban ugyanannyi ideig szívjuk le a mintát és a leszívási sebesség és a helyi gázsebesség mérési keresztmetszetre merőleges komponensének hányadosa minden mintavételi pontban azonos. Ebben az esetben csaknem elértük a célunkat: a c_M kifejezése igen hasonlónak vált a (5.4) kifejezéshez.

5.3.2. Milyen sebességgel kell leszívni a gázmintát?

A (5.4) és (5.6) kifejezések akkor egyeznek meg, ha a $c_{szi} = c_i$, azaz a szondában lévő gázban a por koncentrációja megegyezik a szonda felé áramló gázban lévő koncentrációval. Mi szükséges ennek a feltételnek a teljesüléséhez?

Ábrázoljuk a szonda leszívócsonkjára közeli áramlási teret (ld. 5.3 ábra)!



5.3. ábra Áramvonalak és porszemcse pályák a leszívócsonk előtt $v_{szi} > v_{\perp i}$ esetén

Folytonos vonallal jelöltük a gáz áramvonalakat abban az esetben, ha a mintavételezési sebesség nagyobb mint a helyi gázáramlási sebesség: $v_{sz} > v_{\perp}$. A szondába ekkor a szondafej átmérőjénél nagyobb átmérőjű keresztmetszetből jut poros gáz, de az abban lévő porszemcsék – a nagy tehetetlenségi paraméterű részecskék – a gázáramvonalról lesodródhatnak (ld. szaggatott vonallal jelölt porpályák), így nem jutnak be a szondába. Tehát a $v_{sz} > v_{\perp}$ esetén a szondával elszívott mintában kisebb össztömegű por van: a minta porkoncentrációja kisebb, mint a valós. Ilyen sebességű mintavételezéskor tehát hibát követhetünk el, ha a poros gáz nagy tehetetlenségű porszemcséket tartalmaz.

Elemezzük tehát a porkoncentráció mérésben elkövetett hibát az elszívási sebesség tekintetében!

a) $v_{sz} > v_{\perp}$

Belátható a fenti 5.3. ábrához tett megjegyzéseink alapján, hogy ha $v_{sz} > v_{\perp}$ azaz nagyobb a mintavételi sebesség, mint a helyi áramlási sebesség, a leszívócsonk előtt az áramvonalak görbültek lesznek (ld. **5.3 ábra**). A porszemcsék tehetetlenségük következtében az áramvonalak görbületi sugaránál nagyobb görbületi sugarú pályán haladnak, ezért egy részük nem juthat be a gázzal együtt a szondába, azaz a szondában a minta porkoncentrációja kisebb lesz, mint az adott mérési pontra jellemző, mérendő helyi valós porkoncentráció.

$$v_{sz} > v_{\perp} \quad \Rightarrow \quad c_{sz} < c_i,$$

b) $v_{sz} < v_{\perp}$

Fentieket figyelembe véve belátható, hogy amennyiben a mintavételezési sebesség viszont kisebb a helyi áramlási sebéségnél, a szonda előtti torlódás miatt a görbült áramvonalakon tehetetlenségük miatt besodródó többlet porszemcsék miatt viszont a szondában lévő porkoncentráció nagyobb lehet mint a helyi mérendő érték a porszemcsék tehetetlenségi paramétere függvényében.

$$v_{sz} < v_{\perp} \quad \Rightarrow \quad c_{sz} > c_i$$

c) $v_{sz} = v_{\perp}$

Ha a leszívási sebesség megegyezik a helyi áramlási sebességgel, az áramvonalak párhuzamosak, így ilyen esetben a porszemcsék nem sodródhatnak le a gáz áramvonalokról, együtt haladnak a gázzal, azaz a mért porkoncentráció a szondában megegyezik a leszívócsonk előtti helyi mérendő koncentrációval. Tehát ha

$$\frac{v_{sz}}{v_{\perp}} = 1 \quad \Rightarrow \quad c_{sz} = c_i,$$

azaz az ún. **izokinetikus** (a helyi áramlási sebességgel azonos sebességű) **mintavétel** esetén teljesül a mért és helyi koncentráció azonosságára vonatkozó feltétel.

Megjegyezzük, hogy ha $\psi \rightarrow 0$, tehát a porszemcsék követik a gáz áramvonalakat, akkor a szondán mért koncentráció függetlenül a mintavételi sebességtől a helyi koncentráció értéket adja ($c_{sz}/c=1$). Így tetszőleges (de az (5.7) feltétel értelmében a helyi áramlási sebességgel arányos) sebességgel vehetünk mintát anélkül, hogy hibát követnénk el. Azonban $\psi > 0$ esetén izokinetikus elszívástól eltérő mintavételezési sebességet alkalmazva hibát követhetünk el a porkoncentráció mérésében.

5.3.3. Mekkora hiba követhető el, ha eltérünk az előírt mintavételi sebességtől?

Az izokinetikus elszívási sebességet nem könnyű pontosan beállítani, hiszen mérni kell hozzá a helyi sebességet és ennek függvényében a mintavételező szonda térfogatáramát pl. fordulatszám szabályozással finoman változtatni, hogy a mintavételezési (elszívási) sebességet a kívánt értékre beállítsuk.

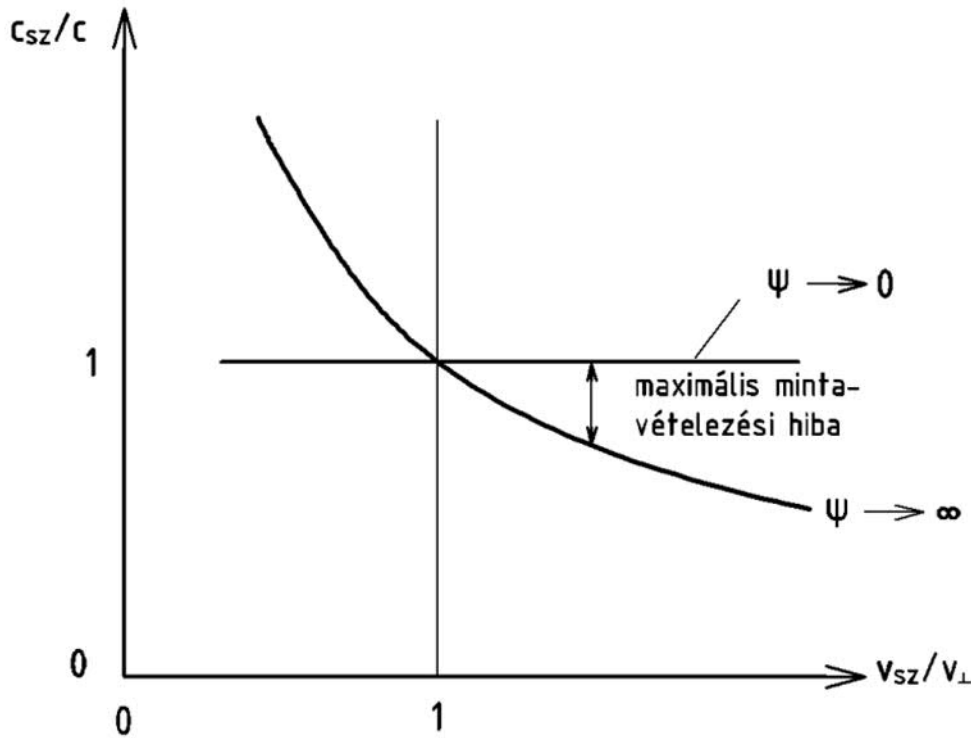
Mekkora hiba adódik, ha az izokinetikustól eltérő sebességgel szívjuk le a gázmintát?

A szondában kialakuló porkoncentrációra írható:

$$c_{sz} = \frac{v_{\perp} \frac{d_{sz}^2 \pi}{4} c}{v_{sz} \frac{d_{sz}^2 \pi}{4}} = \frac{v_{\perp} c}{v_{sz}}$$

melyből egyszerű átalakítással az **5.4 ábrán** ábrázolt ($\psi \rightarrow \infty$ görbe) (5.9) kifejezést kapjuk.

$$\frac{c_{sz}}{c} = \frac{1}{v_{sz}/v_{\perp}} \quad (5.9)$$



5.4. ábra A mintavételezés során elkövethető maximális hiba a mintavételezési sebesség és a tehetetlenségi paraméter függvényében

A fenti ábrán látható, hogy ha $\psi \rightarrow 0$, tehát a kisméretű porszemcsék tehetetlensége kicsi, tehát a porszemcsék követik az áramvonalakat, akkor a szondán mért koncentráció függetlenül a mintavételezési sebességtől a helyi koncentráció értéket adja ($c_{sz}/c=1$). Így tetszőleges (de az (5.7) feltétel értelmében a helyi áramlási sebességgel arányos) sebességgel vehetünk mintát anélkül, hogy hibát követnének el (**5.4 ábra** $\psi \rightarrow 0$ értékekhez tartozó $c_{sz}/c=1$ értékű egyenes).

Ha $\psi \rightarrow \infty$, azaz az igen nagy porszemcséket figyeljük, melyek a leszívócsonk d_{sz} átmérőjével megegyező átmérőjű kör alakú keresztmetszeten belül a leszívócsonk felé áramló gázból egyenesen bejutnak a szondába, tehát függetlenül a mintavételezési sebességtől, a gáz áramvonalak alakulásától a nagy tehetetlenségű ($\psi \rightarrow \infty$) porszemcsék bármilyen mintavételezési sebességnél hibát okoznak a koncentráció mérésben, kivéve az izokinetikus mintavételezés esetét.

A nem izokinetikus mintavételezés esetén koncentráció mérésében elkövethető **maximális hiba** értékét a $\psi \rightarrow 0$ értékhez tartozó vízszintes egyenes ($c_{sz}/c=1$) és a $\psi \rightarrow \infty$ értékhez tartozó görbe közötti távolság jelöli ki. Például az (5.9) kifejezés szerint ha a helyi áramlási sebességnél kisebb (pl. 80%-os) v_{sz} elszívási sebességet alkalmazunk, akkor a koncentráció mérésben elkövethető maximális hiba értéke $1/0.8=1.25$, azaz 25%-al nagyobb a c_{sz} szondával mért koncentráció, mint a helyi, valós, mérendő c érték.

5.4. A HELYES MÉRÉS TOVÁBBI FELTÉTELEI

Állandó üzemállapot biztosítása

A mintavétel során – mint említettük – az üzemállapot nem változhat meg. Ha pl. egy erőmű elektrosztatikus leválasztója mögött egy $4m \times 3m$ keresztmetszetű csatornában 12×8 pontban azaz 96 pontban veszünk gázmintát, 2 perces pontonkénti mintavételi időtartammal számolva 3 óra 12 perc szükséges a mintavételhez, ami alatt állandó üzemállapotot kell tartani.

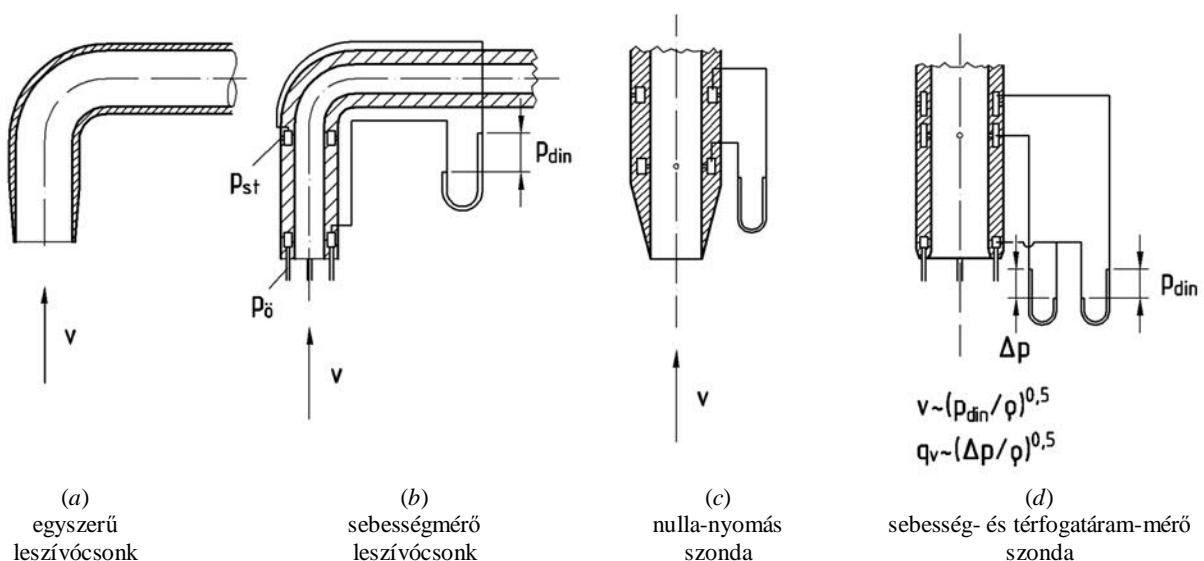
Porlerakódás elkerülése – szondaszár fűtés + belsőtéri leválasztó

Nyilvánvaló követelmény, hogy csak a mintavevő leválasztóján rakódhat le a por, máshol pl. a szondaszár falán nem lehet jelentős lerakódás, mert az meghamisítja a mérést. A kéményből meleg füstgáz áramlik a szondába, amelyben a szűrő előtt lehülhet. A füstgáz nedvességtartalma kondenzálódik, ha hőmérséklete eléri a harmatpontot. Ilyen esetben a gázban keletkező vízcseppek "kimossák" a gázmintát a portartalmának nagy részét. Az elfogadhatatlanul nagy mérési hibát a szondaszár fűtésével vagy a főgázáramon belül, a leszívócsonk közelében elhelyezkedő u.n. belsőtéri leválasztó alkalmazásával kerülhetjük el.

Leszívócsonk kialakítások

A **5.5 ábrán** néhány jellegzetes leszívócsonk kialakítás elvi vázlata látható.

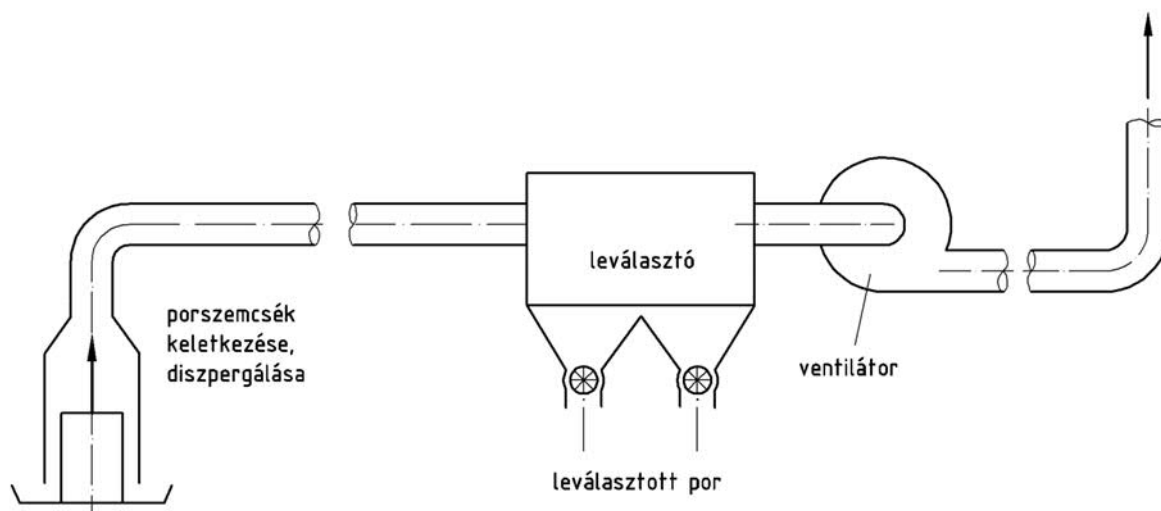
Az (a) jelű, **egyszerű leszívócsonk** egy vékonyfalú cső, amelynek alkalmazásakor a mintavételt megelőzi az áramlási sebesség mérése a mintavételi pontokban. E leszívócsonk hátránya, hogy alkalmazása esetén az áramlási viszonyok mintavétel során bekövetkező változása nem regisztrálható. Ezt teszi lehetővé a (b) jelű ún. **sebességmérő leszívócsonk**, amellyel a Prandtl-csővel megegyező elven lehet mérni a helyi gázsebességet és megfelelő átszámítások után be lehet állítani az izokinetikus mintavételi sebességet. A (c) jelű leszívócsonk az ún. **nulla nyomás szonda**, amely (súrlódásmentes közeg feltételezésével) izokinetikus mintavételt biztosít, ha a belső és külső palástján kivezetett statikus nyomások különbsége zérus. Valóságban az áramlási veszteségek következtében a megfúvási irányra igen érzékeny hibát követünk el a leszívócsonk alkalmazásával. Az Áramlástan Tanszéken kifejlesztett (d) jelű **sebesség- és térfogatáram mérő szonda** a helyi sebesség és a leszívott térfogatáram mérésére egyaránt alkalmas. Előnye, hogy mindkét mennyiséget ugyanazon a gázállapoton méri, így az izokinetikus elszívás beállításához nincs szükség a hőmérsékletek és nyomások mérésére és számítások végzésére.



5.5. ábra Leszívócsonk konstrukciók

6 PORTALANÍTÁSI FELADATOK

Ebben a fejezetben a teljesség igénye nélkül mutatjuk be a portalanítási feladatok közös elemeit, kiemelve a fontosnak tartott környezetvédelmi, műszaki és gazdaságossági megfontolásokat. A fejezetben abban a sorrendben tárgyaljuk a portalanító berendezések egyes elemeit, ahogyan a poros gáz áramlik a keletkezéstől a tisztított gáz kibocsátásáig: porszemcsék keletkezése - porszemcsék diszpergálása gázban - portartalmú gáz elszívása - szállítása a leválasztóhoz - a por leválasztása - gázszállító berendezés - a tisztított gáz kibocsátása - légpótlás. Egy portalanító rendszer vázlatát a **6.1. ábrán** látható.



6.1. ábra A portalanító rendszer vázlatát

6.1. PORTARTALMÚ GÁZOK KELETKEZÉSE

A portartalmú gázok létrejöttének két mozzanatát különböztethetjük meg: a 6.1.1. alfejezetben tárgyalt porszemcsék keletkezését, és a 6.1.2. alfejezetben tárgyalt porszemcsék diszperzióját, elkeveredését a gázban.

6.1.1. A porszemcsék keletkezése

A porszemcsék tárgyalásunk szempontjából kétféleképpen keletkezhetnek:

- A)** valamely cél elérése érdekében szándékosan hozunk létre porszemcséket, vagy
- B)** technológiák, folyamatok kedvezőtlen melléktermékeként jönnek létre porszemcsék.

ad **A)** Porszemcséket (szilárd szemcséket, vagy folyadékcseppeket) többféle célból hozunk létre szándékosan. Az egyik gyakori cél a kémiai reakcióik (pl. égés) meggyorsítása a tömegre vonatkozó felület megnövelésével, (szénpor, katalizátorok, mosópor), valamilyen anyag egyenletes elosztása egy másik anyagban (pigment festékekben, cementpor betonban, cukor csokoládéban), tárgyak vékony réteggel való egyenletes bevonására (festékcseppek, bevonatok, permetezőszerek). Ilyen esetekben mind a keletkezett por mennyisége, mint pedig a szemcsék mérete előírt, azt az alkalmazott technológia határozza meg.

ad **B)** Porszemcsék vagy cseppek létrejönnek technológiák nem kívánt melléktermékeként is: kémiai reakciók (pl. korom képződés égésnél), aprítás, köszörülés, bányászat, szárítás, talajművelés, szilárd anyagok felületének mechanikai igénybevétele (kopás), stb. Ebben az esetben a porszemcsék mennyisége és mérete nem tervezett: az alkalmazott technológia, az abban szereplő anyagok, a létrejött folyamat, jelenség paramétereinek függvénye.

6.1.2. A létrejött porszemcsék diszperziója, elkeveredése a gázban

A porszemcsék gázban való elkeveredése tárgyalásunk szempontjából ugyancsak kétféle lehet:

- a) a porszemcsék szándékos, tervezett diszpergálása gázban
- b) porszemcsék nem szándékos diszperziója, elkeveredése gázban.

ad a) A szándékosan létrehozott porszemcsék (vagy folyadékcseppek) egy részénél szándékos a szemcsék diszpergálása a gázban. Így pl. a szénportüzelésnél ezzel biztosítható, hogy az égéshez szükséges oxigén a szemcsehalmaz nagy felülete közelében rendelkezésre álljon. Katalizátorok alkalmazása esetén hasonló a helyzet.

ad b) A szándékosan létrehozott porszemcse halmazok nagy részénél a porszemcsék gázban való elkeveredése nem szándékos, nem tervezett. Az előző csoportba tartozik, pl. a szándékosan por formában létrehozott cement levegőbe jutása a szállítószalagra való feladásakor. Vannak esetek, amikor a szemcsék levegővel való kapcsolatba hozása része a technológiának, azonban a levegőben való diszperzió kedvezőtlen kísérőjelenség (pl. festékszórás). A technológiák, folyamatok kedvezőtlen melléktermékeként létrejövő porszemcséknek egy része keveredik el, diszpergálódik gázban (pl. köszörülés során a levegőbe jutó por, az égésnél keletkező koromszemcsék).

A szilárd szemcsék vagy cseppek alapvetően kétféle módon diszpergálódnak, keverednek el gázban:

- α) a gázban lezajlott folyamat (pl. kémiai reakció) során keletkeznek, aminek tipikus példája az égés, vagy
- β) a szemcsék és a gáz között létrejövő, vagy létrehozott relatív sebesség következtében kerülnek a gázba a szemcsék.

A porszemcsék keletkezése és diszpergálása tekintetében az alábbi kombinációk lehetségesek.

6.1 táblázat A porszemcsék keletkezésének és diszpergálásának kombinációi

Aa	A) szándékosan hozunk létre porszemcséket	Ab	A) szándékosan hozunk létre porszemcséket
	a) a porszemcsék szándékos, tervezett diszpergálása gázban		b) porszemcsék nem szándékos diszperziója, elkeveredése gázban
Ba	B) a porszemcsék technológiák, folyamatok kedvezőtlen melléktermékei	Bb	B) a porszemcsék technológiák, folyamatok kedvezőtlen melléktermékei
	a) a porszemcsék szándékos, tervezett diszpergálása gázban		b) porszemcsék nem szándékos diszperziója, elkeveredése gázban

Tudjuk, hogy a levegőtisztaságvédelem egyik alapvető módszere a szennyező (esetünkben a környezetbe kerülő gázban diszpergált porszemcsék, folyadékcseppek) keletkezésének megakadályozása, a keletkező mennyiség csökkentése. Vizsgáljuk meg, hogy a **6.1. táblázatban** látható egyes kombinációk esetén milyen intézkedéseket lehet hozni a környezetszennyezés gazdaságos minimalizálására!

ad **Aa eset**. (Szándékosan hozunk létre porszemcséket és azokat szándékosan, tervezetten diszpergáljuk a gázban.) Ebben az esetben kötött a porszemcsék mennyisége, előírtak jellemzőik, ezért csak a technológia teljes megváltoztatásával lehet (esetleg) megelőzni a portartalmú gáz keletkezését (pl. szénportüzelés helyett gáztüzelés). Ilyen esetben általában a megfelelő hatékonyságú és gazdaságos leválasztó alkalmazása a célravezető megoldás.

ad **Ab eset**. (Szándékosan létrehozott porszemcsék nem szándékos diszperziója, elkeveredése gázban.) Ha az előírt tulajdonsággal rendelkező porszemcsék gázban lezajlott folyamat (pl. kémiai reakció) során keletkeznek (azaz már keletkezésük során eloszlanak a gázban), a poros gáz keletke-

zésének csökkentése technológiai fejlesztéssel csak egyes esetekben lehetséges (pl. elektrosztatikus erőter alkalmazása festékszórásnál). Más esetekben a megfelelő hatékonyságú és gazdaságos leválasztó alkalmazása a célravezető megoldás. Amikor a porszemcsék nem a gázban keletkeznek, általában sok lehetőség van aeroszol keletkezésének megakadályozására, mennyiségének mérséklésére: ezek közül a legfontosabbak a zárt technológiák alkalmazása, a keletkező szemcsék megkötése a keletkezés helyén (pl. vízpermettel) ill. ha ez nem lehetséges, a keletkező porszemcsék és a gáz közötti relatív sebesség csökkentése, megszüntetése.

ad **Ba eset.** (Technológiák, folyamatok **kedvezőtlen** melléktermékeiként létrejövő porszemcsék **szándékos, tervezett** diszpergálása gázban.) Ez a kombináció – mivel alapvetően szándékosan nem okozunk kárt – általában nem jöhet létre, így nem foglalkozunk vele, de a gyakorlati életben természetesen előfordulhat ilyen eset is.

ad **Bb eset.** (Technológiák, folyamatok kedvezőtlen melléktermékeiként létrejött porszemcsék nem szándékos diszperziója, elkeveredése gázban.) Ez az eset igen gyakran előfordul. Kétféle módon csökkenthetjük az aeroszol mennyiségét:

- a keletkező szemcsék mennyiségének csökkentésével vagy jellemzőik változtatásával (pl. méretük növelésével), amelyre technológia fejlesztés, vagy technológia váltás a lehetséges módszer, vagy
- a melléktermékként keletkezett porszemcsék elkeveredésének megakadályozása, csökkentése, amelyre az „aB” esethez hasonlóan különösen akkor van lehetőség, amikor a porszemcsék nem a gázban keletkeznek (zárt technológiák alkalmazása, a keletkező szemcsék megkötése a keletkezés helyén, ill. ha ez nem lehetséges, a keletkező porszemcsék és a gáz közötti relatív sebesség csökkentése, megszüntetése).

6.2. PORTARTALMÚ GÁZOK ELSZÍVÁSA ÉS SZÁLLÍTÁSA A LEVÁLASZTÓHOZ

A 6.1. pontban szereplő kombinációk valamelyikének megfelelő technológia következményeként lebegő porszemcséket, folyadéksepeket tartalmazó gáz keletkezik. A legegyszerűsebb volna a porszemcséket az aeroszol keletkezésének helyben eltávolítani a gázból, azonban ez általában nem lehetséges. Két, egymással összefüggő feladatot kell tehát elvégezni:

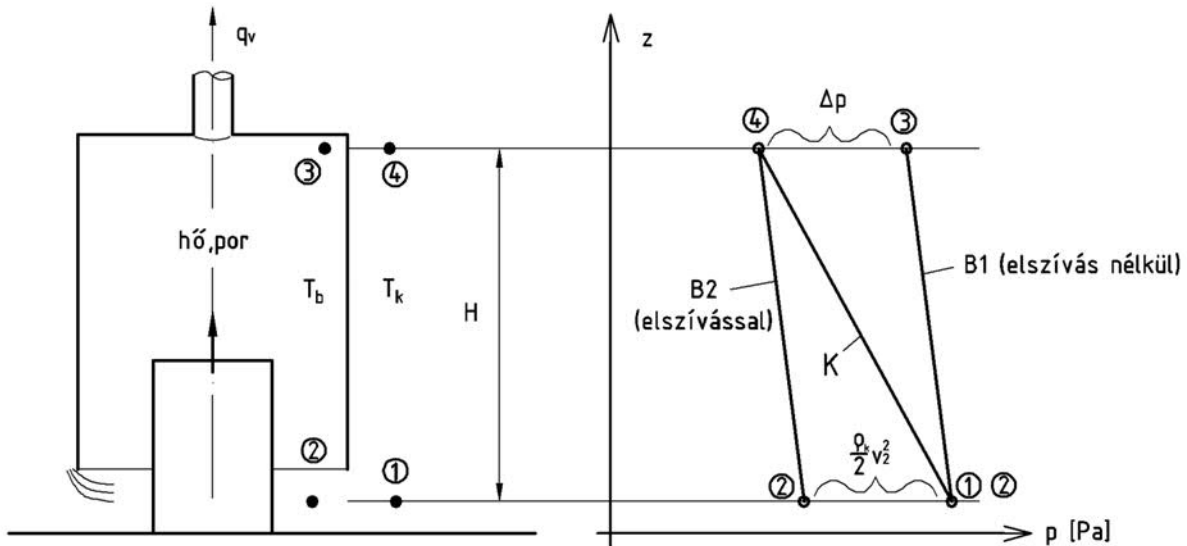
- a) meg kell akadályozni, hogy a portartalmú gáz a keletkezés helyéről a környezetbe áramoljon, és
- b) el kell szállítani a portartalmú gázt a leválasztó berendezéshez.

Az a) feladatot úgy oldhatjuk meg, hogy a poros gáz keletkezésének helyét pl. burkolatokkal körülhatároljuk, és a körülhatárolt térből a portartalmú gázt csővezetéken keresztül elszívjuk. (Mivel egy elszívó nyílástól távolodva a sebesség igen rohamosan, a távolság négyzetével arányosan csökken, a porforrás gondos körülhatárolása nélkül nem lehet gazdaságosan eltávolítani a poros gázt.) Általában nem lehetséges teljesen körülhatárolni a porforrást: a technológia, a működés megköveteli a környezet felé nyitott felületeket (pl. futószalagok közötti átadásnál, vagy festőfülkénél).

Ha szándékosan hozunk létre porszemcséket és azokat szándékosan, tervezetten diszpergáljuk ismert mennyiségű gázban, akkor adott az elszívandó gázmennyiség (pl. kazánoknál). Más esetekben úgy kell a keletkező poros gázt elszívni, hogy a burkolat működés miatt szükséges nyílásain (és a burkolat sérülése vagy elemeinek elmozdulása esetén keletkező réseken) keresztül ne lépjen ki a portartalmú gáz a környezetbe. A poros gáz ott lép ki a környezetbe, ahol nyomása nagyobb, mint a külső nyomás, vagy ahol a nyílás irányú áramlását nem képes lelassítani a nyíláson kívüli nagyobb nyomás.

A **6.2. ábrán** egy burkolat látható, alul körben egy résen át van kapcsolatban a környezettel, és amelyen belül hőfejlődés közben por keveredik el a gázzal. Hogyan határozható meg a portartalmú

levegő környezetbe való kilépését megakadályozó minimális elszívott mennyiség? Miután a burkolat alatti gáz melegebb, mint a külső levegő, a burkolat sérülése esetén a Föld nehézségi erőterében a hőmérséklet különbség által létrejövő sűrűségkülönbségből származó nyomáskülönbség okozza a poros gáz kilépését. A burkolat mellett feltüntetjük a külső nyomás függőleges menti változását ("K" jelű egyenes). Ha nincsen elszívás, az alsó résen keresztül kiegyenlítődik a nyomás, ezért a belső nyomás függőleges menti változását bemutató "B1" jelű egyenes az alsó rés magasságában metszi a "K" jelű egyenest. (A belső nyomás a kisebb sűrűség következtében kevésbé rohamosan csökken felfelé.) Látható, hogy a burkolat legmagasabb pontján a legnagyobb a belső (3. pont) és a külső (4. pont) nyomás különbsége:



6.2. ábra Burkolat alól elszívandó gáz mennyiségének meghatározása

$$\Delta p = p_3 - p_4 = (\rho_k - \rho_b) g H = \rho_k g H \left(1 - \frac{T_k}{T_b} \right). \quad (6.1)$$

(Az összefüggésben T_b a belső átlaghőmérséklet. Feltesszük, hogy a burkolat alatti gáz gázállandója közelítően megegyezik a levegőével.)

Olyan mennyiségű gázt kell elszívni, amely a burkolat legfelső pontjában is megakadályozza a meleg poros gáz kiáramlását. Ez a feltétel akkor teljesül, ha a külső és belső nyomás változását leíró egyenesek a burkolat legfelső pontjában metszik egymást, azaz, ha a belső nyomást a "B2" egyenes írja le. Belátható, hogy a burkolat alján a külső és belső nyomás között a (6.1) összefüggéssel kifejezett Δp nyomáskülönbségnek kell kialakulnia ahhoz, hogy a fenti feltétel teljesüljön. Írjuk fel a Bernoulli egyenletet a burkolat alján egy külső 1. pont és a rés után összehúzódott áramlási keresztmetszetben lévő 2. pont között:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho_k g H \left(1 - \frac{T_k}{T_b} \right) = \frac{\rho_k}{2} v_2^2 \quad (6.2)$$

Ismert adatok mellett a fenti összefüggésből meghatározható a v_2 sebesség, amelyet megszorozva a rés geometriai felületével (A [m^2]) a levegő ρ_k sűrűségével és az α kontrakciós tényezővel, megkapjuk a minimálisan elszívandó gáz tömeget. (Ha ismerjük a burkolat alatt felszabaduló hő nagyságát, a T_b belső átlaghőmérséklet becslést ellenőrizhetjük, ill. a korrigált értékkel a számítást újra elvégezhetjük.) Annak érdekében, hogy biztosan ne lépjen ki levegő a burkolat alól az elszívott le-

vegő mennyiségét valamelyest célszerű megnövelni, depressziót biztosítva ezáltal a burkolat legmagasabb pontján is.

Vannak portalanítási feladatok, ahol nem határozható meg a fenti módon a szükséges elszívandó mennyiség. Ilyen esetekben a nyitott keresztmetszetekben megvalósítandó sebességeket, az ún. zárósebességeket kézikönyvekből vesszük, amelyek gyakorlati tapasztalatok alapján meghatározott értékeket javasolnak. A nyitott keresztmetszetek ismeretében meghatározható az elszívott mennyiség. Az elszívott mennyiség helyes megválasztása igen fontos és tapasztalatot is igénylő feladat, amelynek jelentős kihatása van mind környezetvédelmi mind gazdasági tekintetben.

Az elszívott poros gázt csővezetéken keresztül szállítjuk el a leválasztóhoz (ld. **6.1. ábra**). A csővezeték méretezésénél a minimális sebességet az határozza meg, hogy el kell kerülni a porszemcsék lerakódását a csőben. Másrészt törekedni kell arra, hogy a csővezeték beruházási költségéből adódó amortizáció és az üzemeltetési költség (a ventilátor hajtásához szükséges energia költség) éves összege minimális legyen (gazdaságos csőméret). Minél nagyobb sebességet választunk ugyanis, annál kisebb a cső mérete, annál kisebb a beruházási költség, viszont annál nagyobb a rendszer áramlási vesztesége, ezáltal az energiaköltség. Egyes esetekben fontos szempont lehet a keletkező zaj, ami korlátozhatja a sebességet a csőben.

6.3. A POR LEVÁLASZTÁSA

A poros gázt szállító csővezeték az adott leválasztási feladatra használt leválasztó berendezés belépőcsomójához csatlakozik, amelynek feladata a porszemcsék, folyadékcspekpek előírt hányadának leválasztása, és a leválasztott por összegyűjtése és elszállításának lehetővé tétele. A ventilátor általában a leválasztó után helyezkedik el (ld. **6.1. ábra**), mert így előzhető meg a járókerék porszemcsék által okozott kopása és a járókerék kiegyensúlyozatlanságát okozó por lerakódás. Emiatt a leválasztók döntő többségében a külső nyomásnál kisebb nyomás, depresszió uralkodik. Ez azért is előnyös, mert a csővezeték és a leválasztó tömítetlenségein keresztül nem kerül ki szennyező a környezetbe. Ugyanakkor fontos a gondos tömítés – különösen a portalanító rendszer leválasztóig terjedő részén, beleértve a leválasztót is – mert a külső levegő tömítetlenségeken keresztül történő beáramlása (amelynek helyét nehéz meghatározni) csökkenti az elszívórendszer által a portalanítás helyén elszívott gázmennyiséget, és egyéb károkat (pl. a lehülés miatt korróziót) is okozhat.

A leválasztó berendezésnek össze kell gyűjtenie és elszállíthatóvá kell tennie a leválasztott port. Az előző feladatra általában a leválasztó alján lévő bunker szolgál, az utóbbira pedig a bunkerek aljához csatlakozó kihordó berendezések, amelyek anélkül hordják ki a leválasztott port a leválasztó porgyűjtő bunkeréből, hogy a depresszió hatására levegő áramolna be a leválasztóba (ld. később). A portalanító rendszer szerves része a leválasztott por elszállítása és megfelelő módon történő tárolása, megsemmisítése, újrafelhasználása.

A tömítetlenségek különösen kritikusak lehetnek a leválasztó azon helyein, ahol a por összegyűlik (pl. a bunkerben), mert a tömítetlenségeken beáramló levegő port ragad magával és szállít a megtisztított gázba.

Az egész portalanító rendszer, de különösen a leválasztó karbantartása, üzemének rendszeres ellenőrzése igen fontos feladat. Ennek elmaradása üzemzavarokhoz (pl. a leválasztó elrakódásához, eltömődéséhez), és ezáltal környezetszennyezéshez, ill. a technológiai berendezés működésképtelenné válásához vezethet.

Itt említjük meg a porrobbanás jelenségét, amely a porok jelentős részénél előfordulhat anyagtól függő koncentráció intervallumban. A porrobbanást – ha a feltételei adottak – valamilyen elegendően nagy hőmérsékletű és energiájú impulzus (pl. elektrosztatikus feltöltődés miatt létrejövő kisülés, szikra) válthatja ki. A porrobbanás megelőzésére intézkedéseket teszünk a szikraképződés megakadályozására, a mégis létrejövő robbanás pusztító hatásának mérséklésére a leválasztó falának egy részét nagy méretű, vékony, a robbanás esetén könnyen felhasadó lemezből (hasadó tárcsa) készítjük.

6.4. GÁZSZÁLLÍTÓ BERENDEZÉS, KIBOCSÁTÁS, LÉGPÓTLÁS

A portalanító rendszer vesztesége a térfogatáramhoz képest általában viszonylag kicsi, ezért legtöbbször ventilátorral áramoltatjuk a gázt, amelyet általában a leválasztó után helyezünk el. A por által okozott kopás és a por lerakódása okozhat üzemzavart a ventilátornál, amelynek esélye jól működő leválasztó után a kis szemcseméretű és koncentrációk következtében általában kicsiny. Tapadó poroknál célszerű a ventilátor járókerekek időnkénti megvizsgálása, vagy a tengely rezgés ellenőrzése.

A megtisztított gázt általában kibocsátjuk a környezetbe, figyelembe véve a vonatkozó előírásokat. Általában a környező épületekhez képest olyan magas kéményen keresztül bocsátjuk ki a megtisztított, de porszemcséket a megengedettnél nem nagyobb mértékben tartalmazó gázt, hogy az ne juthasson be a szél hatására keletkező áramlási nyomba, és ne áramolhasson vissza az épületek nyílászáróhoz, a friss levegő beszívó nyílásokhoz, a talaj közelébe.

Épület csarnokában, helyiségében elhelyezett portalanító rendszer működése során levegőt szív ki az adott csarnokból, helyiségből, amelynek pótlásáról gondoskodni kell. (A leválasztó által megtisztított levegőt általában nem lehet visszavezetni a helyiségbe.) Ha ezt elmulasztjuk, és pl. hidegben az ajtókat és ablakokat bezárjuk előfordulhat, hogy a helyiség határoló falain nincsen elegendő rés, ami a valóságban elszívott gáz mennyiségének csökkenését okozhatja. Ez, ha pl. oldószert is elszív a portalanító rendszer a környezeti- és egészségkárosodáson túlmenően az oldószer feldúsulás következtében pusztító robbanást is okozhat.

A portalanító rendszer által elszívott levegő pótlásáról (beleértve a befűjt levegő téli előmelegítéséről) megfelelő légpótló berendezés működtetésével gondoskodni kell, és ahogyan az elszívó berendezéshez, úgy a légpótló rendszer működéséhez is reteszelni kell a technológiát végrehajtó berendezés működését, azaz ha bármelyik nem működik, a technológia berendezésnek is le kell állnia.

7. A POR LEVÁLASZTÁSA GÁZOKBÓL

A leválasztás különböző hatások működtetése annak érdekében, hogy a porszemcséket a gázból el-távolítsuk, és a gázba való visszajutásukat megakadályozzuk. Mielőtt a leválasztás egyes elemeit tárgyalnánk, megvizsgáljuk, hogy hogyan definiálható a leválasztás minősége.

Mivel a vizsgálataink során a szemcsemérettől függő mennyiségekkel matematikai műveleteket végzünk, így a könnyebb kezelhetőség miatt a szemcseátmérő jele ezentúl d_p helyett x .

7.1. LEVÁLASZTÁSI FOK, FRAKCIÓLEVÁLASZTÁSI GÖRBE

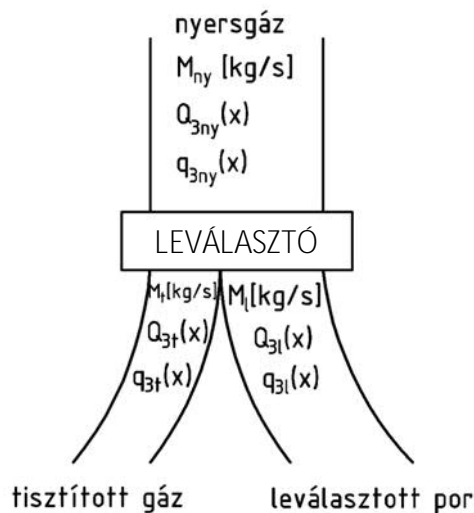
A leválasztó működését a leválasztási fokkal jellemezzük. Miután a tisztítandó gázban lévő porhal-maz polidiszperz (azaz a szemcsék mérete változó), és a porleválasztó a különböző méretű porszemcséket különböző hatékonysággal választja le, célszerű definiálni az egyes szemcseméret intervallumokba, frakciókba tartozó szemcsék leválasztását jellemző frakcióleválasztási fokot.

7.1.1. Mennyiségi mérleg

A **7.1. ábrán** egy leválasztó mennyiségi mérlege látható. A mennyiségi mérleg vonatkozhat megál-lapodás szerint a szemcsék számára, felületére, tömegére (térfogatára) is. Tekintettel arra, hogy a legfontosabb jellemzők a leválasztóba egységnyi idő alatt belépő és abból kilépő portömegre vonat-koznak, ezért a következőkben a tömegre (térfogatra) vonatkozó mennyiségi mérleggel és leválasztási fokokkal foglalkozunk. A por tömegáram jele itt M [kg/s],

- „ny”: a tisztítandó "nyersgázra" és a benne lévő porra az "ny" index,
- „l”: a leválasztott porra a "l" index,
- „t”: a leválasztóból kilépő megtisztított gázra és a benne lévő porra a "t" index

vonatkozik.



7.1. ábra Egy leválasztó berendezés belépő és kilépő oldalán definiált por tömegáram és szemcseeloszlás jellemzői

A 7.1 ábrán látható módon a leválasztóba por M_{ny} tömegárammal **lép be**, a nyersgázban lévő por-szemcse halmaz tömeg szerinti eloszlásának x szemcseátmérőtől függő gyűjtőfüggvénye $Q_{3ny}(x)$, a sűrűségfüggvénye pedig $q_{3ny}(x)$. Hasonlóképpen definiáljuk a **leválasztott** por tömegáramot és a szemcseeloszlás jellemzőit, és a **tisztított** gázban maradó por tömegáramát és a szemcseeloszlás jellemzőit.

A leválasztó berendezés belépő és kilépő oldalán a por tömegárama (azaz a másodpercenkénti be-ill. kilépő por tömeg) a tömegmegmaradás tételéből következően meg kell egyezzen, így a leválasztó berendezésre vonatkozó **mennyiségi mérleg** az alábbi módon írható fel:

$$M_{ny} = M_l + M_t \quad (7.1)$$

7.1.2. Az összleválasztási és összáteresztési fok

Osszuk el a (7.1) összefüggés mindkét oldalát a nyersgázban lévő por tömegárammal:

$$1 = \frac{M_1}{M_{ny}} + \frac{M_t}{M_{ny}} = E + P \quad (7.2)$$

A fenti kifejezésben az

$$E = M_1 / M_{ny} \quad (7.3)$$

definiálja az **összleválasztási fokot**, a

$$P = M_t / M_{ny} \quad (7.4)$$

definiálja az **összáteresztési fokot** (az un. **penetrációt**).

Fejezzük ki az összleválasztási fokot másképpen, a leválasztó előtti c_{ny} [kg/m³] és utáni c_t [kg/m³] koncentrációval! Miután a gázban lebegő porszemcsék mérete (süllyedési sebessége) általában kicsi, jó közelítésként elfogadható, hogy a szemcsék együtt mozognak a gázzal. Ha feltesszük, hogy a gáz hőmérséklete, sűrűsége (és így q_v [m³/s] térfogatárama) nem változik számottevően a leválasztóba való belépés és kilépés között, akkor írható:

$$M_{ny} = q_v c_{ny}, \quad M_t = q_v c_t, \quad M_1 = q_v (c_{ny} - c_t) \quad (7.5)$$

Behelyettesítve (7.5) kifejezésekből az M_1 és M_{ny} képleteit a (7.3) összefüggésbe, a q_v -vel való egyszerűsítés után látható, hogy az összleválasztási fok a belépő nyersgázoldali és a kilépő tisztagáz oldali porkoncentrációk hányadosával kifejezhető.

$$E = \frac{M_1}{M_{ny}} = \frac{c_{ny} - c_t}{c_{ny}} = 1 - \frac{c_t}{c_{ny}} \quad (7.6)$$

A leválasztó berendezés porleválasztásra vonatkozó hatásossága az E összleválasztási fokkal, mint egyetlen 0÷1 (azaz 0÷100%) értékek közötti mérőszámmal jellemezhető, amelyet a ki- ill. belépő oldalon mért porkoncentrációk hányada segítségével számíthatunk. Ezek a mennyiségek a leválasztó be- ill. kilépő oldalára telepített porkoncentráció mérőszondákkal jól mérhetők, a porkoncentráció-mérő szondák a monitoring rendszerbe beköthetők és online információt adhatnak a berendezése üzeméről, annak összleválasztási fokáról.

Azonban az E összleválasztási fok értéke nem ad olyan részlet-információt a berendezés porleválasztásra vonatkozó hatásosságáról, hogy mely méretű porszemcsék leválasztására megfelelő vagy nem megfelelő a berendezés. A különböző berendezések (ülepítők, ciklonok, elektrofilterek, szűrők stb.) jósága, hatásossága igen eltérő a szemcseméret-tartomány függvényében. Erről a következő alfejezetben tárgyalt frakcióleválasztási fok ad információt.

7.1.3. A frakcióleválasztási fok

Az aeroszolok polidiszperz portartalmának leválasztása kétféle lehet:

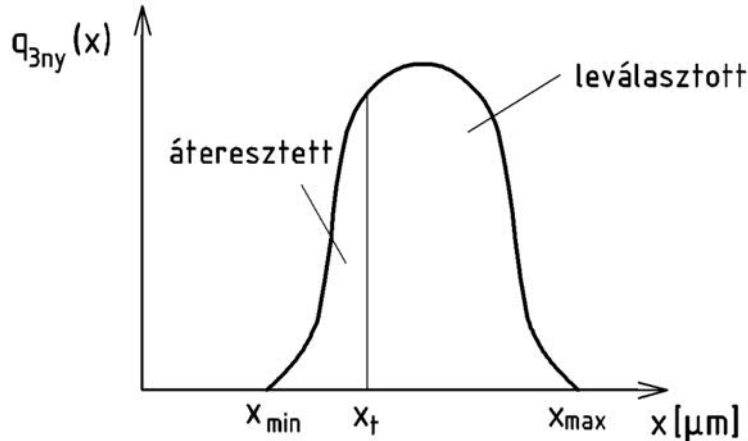
- ideális (éles) leválasztás,
- valóságos leválasztás.

ad a) Az ideális (éles) leválasztás esetében a leválasztó berendezés az x_t szemcseméretnél nagyobb valamennyi szemcsét leválasztja, az x_t -nél kisebbeket pedig átengedi a tisztagáz oldalra. Ezért a

nyersgáz porszemcséi tömeg szerinti eloszlásának sűrűségfüggvényéből (ld. **7.2. ábra**) az alábbi módon fejezhető ki az E összleválasztási és P összáteresztési fok:

$$E = \int_{x_t}^{x_{\max}} q_{3ny} dx, \quad P = \int_{x_{\min}}^{x_t} q_{3ny} dx, \quad E + P = 1. \quad (7.7)$$

A poros gázok tisztítása során ilyen éles leválasztás a műszaki gyakorlati életben általában nem fordul elő.



7.2. ábra Az ideális (éles) leválasztás

ad b) A valóságos leválasztás során a berendezés egy x_1 szemcseméret alatt minden porszemcsét átenged a tisztagáz oldalra, egy $x_1 < x < x_2$ szemcseméret tartományban a növekvő méretű szemcsékből egyre többet választ le, majd egy x_2 szemcseméret fölött valamennyi porszemcsét leválasztja, ld. **7.3 ábra** felső ábra része.

Tekintsük ismét nyersgáz porszemcséi tömeg szerinti eloszlásának sűrűségfüggvényét (ld. **7.3. ábra**)! Az x_1 és x_2 szemcseméret között vegyünk fel egy dx szélességű szemcseméret tartományt, és írjuk fel az (x) és $(x+dx)$ szemcseméret-határok közötti szemcsékre vonatkozó tömegmérleget:

$$M_{ny} q_{3ny} dx = M_t q_{3t} dx + M_l q_l dx \quad (7.8)$$

Osszuk el a (7.8) kifejezés mindkét oldalát $(M_{ny} dx)$ szorzattal:

$$q_{3ny} = \frac{M_t}{M_{ny}} q_{3t} + \frac{M_l}{M_{ny}} q_{3l} = P q_{3t} + E q_{3l} \quad (7.9)$$

Definiáljuk a **frakcióleválasztási fokot** (azaz egy (x) és $(x+dx)$ szemcseméret-határok közötti mérettartományhoz (un. frakcióhoz) rendelhető leválasztási fokot) az alábbi módon:

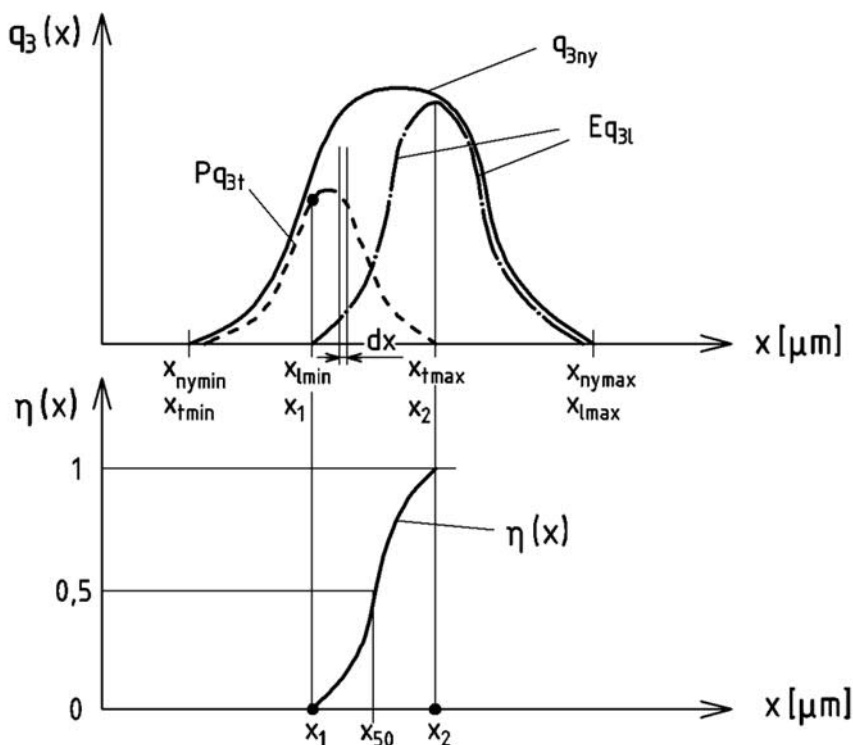
$$\eta(x) = \frac{dM_l(x)}{dM_{ny}(x)} = \frac{M_l q_{3l}(x) dx}{M_{ny} q_{3ny}(x) dx} = \frac{E q_{3l}}{q_{3ny}} \quad (7.10)$$

A (7.10) kifejezésben szereplő dM_l és dM_{ny} mennyiségek az x és $x+dx$ szemcseátmérő-határok közötti intervallumba tartozó leválasztott és nyersgázban lévő porszemcsék tömegárama.

A (7.9) és (7.10) összefüggések interpretációja látható a **7.3. ábrán**, ahol a $q_{3ny}(x)$ nyersgáz portartalmának sűrűségfüggvénye mellett felvittük a leválasztott porhalmaz sűrűségfüggvényének E-szeresét és a tisztított gáz portartalma sűrűségfüggvényének P szeresét. Látható, hogy $x \leq x_1$ tarto-

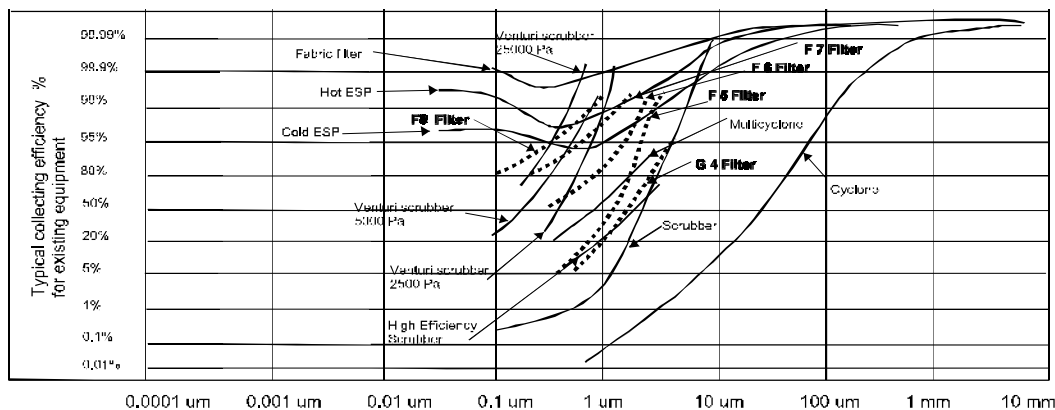
mányban a q_{3ny} és a Pq_{3t} sűrűségfüggvények a (7.9) szerint szükségszerűen egybeesnek. (Az x_1 egybeesik az x_{lmin} -mal, azaz a leválasztott porra vonatkozó sűrűségfüggvény legkisebb abszcissa értékével.) Ebben a szemcseméret tartományban a (7.9) értelmében a leválasztó minden porszemcsét átérészt, a leválasztási fok: $E = 0$. Az $x \geq x_2$ tartományban a q_{3ny} és az Eq_{3t} esik egybe, azaz a leválasztó valamennyi porszemcsét leválaszt (ld. (7.10) összefüggés). (Az x_2 egybeesik az x_{tmax} -mal, azaz a tiszta gázban lévő porhalmazra vonatkozó sűrűségfüggvény legnagyobb abszcissa értékével.)

A 7.3. ábra alsó részén vittük fel az x szemcseméret függvényében a Eq_{3t} és a q_{3ny} hányadosát, az $\eta(x)$ frakcióleválasztási hatásfokot, amelynek értéke x_1 és x_2 között 0-ról 1-re növekszik. A frakcióleválasztási hatásfok értéke megmutatja, hogy a nyersgázban lévő, adott méretű szemcse hány százalékát választja le a leválasztó berendezés.



7.3. ábra A frakcióleválasztási görbe és frakcióleválasztási fok

Az 1.4d ábra legalsó részén már bemutattuk különböző leválasztó berendezések (ciklon, multiciklon, mosótorny, Venturi-mosó, szűrő, elektrofilter) szokásos frakcióleválasztási fok görbéit. Általában elmondható, hogy egyrészt a szemcseméret csökkenésével drasztikusan csökken a berendezések frakcióleválasztási foka, így a különböző szemcseméretű portartalom leválasztására optimalizált berendezések (elő- és főleválasztóként való) soros kapcsolásával a poros gázok széles mérettartományban hatékonyan megtisztíthatók.



7.2. A LEVÁLASZTÁS DEFINÍCIÓJA

A leválasztó berendezések feladata a porszemcsék (folyadék cseppek) eltávolítása a gázból és a gázba való visszakerülésük megakadályozása. Ez a feladat úgy valósítható meg, hogy a szemcséket egymással, szilárd testtel, vagy folyadékkal érintkezésbe hozzuk. Így a szemcsék egymáshoz, a szilárd felülethez tapadhatnak, vagy a folyadékkal zagyot alkothatnak, a porhalmaz kezelhetővé (összegyűjthetővé, szállíthatóvá) vált. Ehhez a porszemcséket általában el kell mozdítani a gázhoz képest. Vannak esetek, amikor a porszemcsék véges kiterjedésük folytán akkor is érintkezésbe lépnek szilárd testtel, ha nem mozdulnak el a gázhoz képest: egy olyan áramvonalon mozognak, amely a szilárd testet a porszemcse sugaránál kisebb távolságra megközelíti (pl. fennakadnak egy méretüknél kisebb lyukméretű szitán). Ezt a folyamatot **befogásnak** nevezzük. A leválasztás tehát különféle hatások működtetése annak érdekében, hogy a porszemcséket az áramló gázhoz képest általában elmozdítva egymással, szilárd testtel, vagy folyadékkal érintkezésbe hozzuk, és így kezelhetővé tegyük.

7.2.1. A porszemcséket a gázhoz képest el kell mozdítani

Ahhoz, hogy a szemcséket eltávolítsuk a gázból, általában el kell mozdítani azokat a gázhoz képest (különben a gázzal együtt távoznának a leválasztóból). Ezt az elmozdítást az áramlási ellenállás erő gátolja. Tehát keresni kell és ki kell használni olyan erőket, hatásokat, amelyek a szemcséket az áramlási ellenállás erővel szemben elmozdítják a gázhoz képest. Ilyen lehet pl. a

- súlyerő**, amelynek hatására a porszemcse süllyed a gázban,
- szemcsék tehetetlensége**, amelynek folytán a porszemcsék görbült áramvonalak esetén nagyobb görbületű pályán haladnak, mint az áramvonal, (mintegy "kisodródnak" az áramvonallal, ld. **3.3. ábra**), tehát elmozdulnak a gázhoz képest,
- diffúzió**, amely a gázmolekulák hőmozgása következtében mozdítja el a gázhoz képest a kis porszemcséket,
- elektrosztatikai eredetű erő**, amely töltések között jön létre és pl. töltéssel rendelkező szemcsék mozgását befolyásolja.

7.2.2. A porszemcse halmazt kezelhetővé kell tenni

Annak érdekében, hogy a gázhoz képest elmozdított porszemcsék ne kerüljenek ismét a gázáramba, valamilyen módon "meg kell kötni" azokat, hogy kezelhetők, azaz szállíthatók, tárolhatók legyenek. Ezt a porszemcsék egymással, valamilyen szilárd felülettel vagy folyadékkal való érintkezésbe hozásával érjük el.

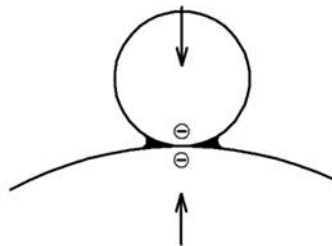
- Az egymással érintkezésbe hozott porszemcsék összetapadnak (koaguláció), nagy süllyedési sebességű szemcsecsoportot alkotnak, ami kezelhető (pl. a porszívó zsákjából az összetapadt szemcsék anélkül önthetők ki a szeméttárolóba, hogy nagyobb mennyiségben ismét a levegőbe jutnának).
- Ha a szemcsék feltapadnak valamely szilárd felületre, akkor azzal együtt válnak kezelhetővé. Így, pl. az autók porszűrőjére tapadt porszemcséket a szűrővel együtt távolítjuk el.
- Ha folyadékkal, pl. vízzel kerülnek kapcsolatba a szemcsék, azzal zagyot képeznek, amely szivattyúzható, tárolható, a víz elpárologtatásával a porszemcse halmaz feltárható.

Milyen hatások eredményeként válik a porszemcse halmaz kezelhetővé?

- Ha a porszemcse és a szilárd felület (illetve egy másik porszemcse) elegendően közel vannak egymáshoz **van der Waals erő** lép fel az atomjaik között. Ennek hatótávolsága kicsi (az atomok méretével mérhető össze), nagysága függ a kölcsönhatásba lépő atomok számától és minőség-

től függ. A távolság növekedésével ez az erő igen gyorsan (a távolság 7. hatványával) csökken. A néhány μm átmérőjű porszemcsék súlyának sokszorososa lehet a Van der Waals erő.

- β) Az aprítás során illetve dörzselektromos jelenségek következtében a szemcsék töltésre tehetnek szert, ily módon **elektrosztatikus vonzerő** alakulhat ki a szilárd szemcsék ill. a szemcsék és más szilárd felület között. Ez az erő viszonylag kicsiny, de a távolsággal kevésbé gyorsan csökken, azaz "távolra hat".
- γ) A harmadik hatás a **felületi feszültség**. A szemcsék között ill. a szemcsék és a szilárd felület között folyadékhidak alakulnak (**7.4. ábra**). A felületi feszültség eredményeként a folyadék felszín görbületi középpontja felé eső oldalon nagyobb a nyomás. A felületi feszültség hatására az érintkezési felületen a külső nyomásnál kisebb nyomás alakul ki, amely összetapasztja a szemcséket. A folyadékhidak kapilláris kondenzáció révén jöhetnek létre. A felületi feszültség befolyásolja pl. a nedves leválasztóknál a porszemcsék bejutását a folyadékseppbe. A folyadékot elérő porszemcse az adhézió következtében tapad bele a folyadékrétegbe.



7.4. ábra Folyadékhid szemcsék között

Az egyes leválasztó típusok különböző erőket, hatásokat használnak fel a porszemcsék elmozdítására és kezelhetővé tételére.

7.3. A LEVÁLASZTÓK TÍPUSAI

Ebben az alfejezetben röviden bemutatjuk és rendszerezzük a különböző leválasztó típusokat. A leválasztók típusok áttekintésekor célszerű azt figyelni, hogy mely hatás érvényesül a por gázhoz képesti elmozdításában és kezelhetővé tételében.

7.3.1. Az ülepítőők

A porszemcséket tartalmazó gázt az elszívás helyéről viszonylag nagy (10-15 m/s) sebességgel szállítjuk a leválasztóba, hogy elkerüljük a por lerakódását a csővezetékben. Az ülepítő (**7.5. ábra**) viszonylag nagy keresztmetszetű zárt tér, amelyben a gáz áramlását lecsökkentjük, hogy a tartózkodási időt (azt az időtartamot, amíg a gáz végigáramlik a leválasztón) megnöveljük. Ez alatt az idő alatt a szilárd szennyezők a súlyerő hatására kirakódik az ülepítő alsó részén elhelyezkedő porgyűjtő bunkerbe, ahol összetapadnak és kihordásra kerülnek. A bunker oldalfalainak hajlásszögét úgy kell meghatározni, hogy a por folyamatosan kicsússzon belőle, ne boltozódjon be.

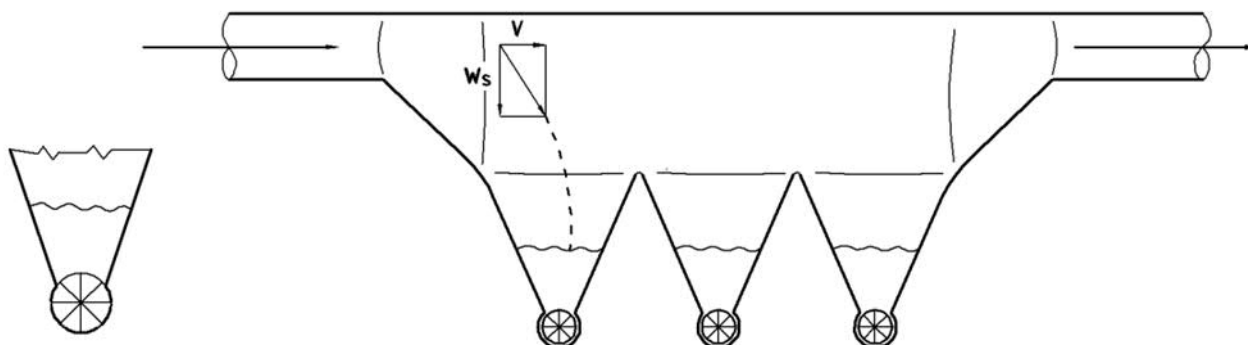
Említettük már, a porleválasztókat általában az elszívási hely és a ventilátor között helyezik el, azaz bennük a nyomás kisebb, mint a külső nyomás. A leválasztóban összegyűlt port tehát úgy kell kihordani, hogy közben elkerüljük a levegő betörését. Ezért alkalmazunk forgócellás adagolókat (**7.5. ábra**) vagy kihordócsigákat. A forgócellás adagolónál a hengeres házban sugár irányú lapok forgognak. A ház és a lapok közötti rés kicsiny, így a nyomáskülönbség hatására csak kevés külső levegő áramlik a bunkerbe. A bunkerből a forgó lapok által határolt cellákba hull a leválasztott por, amely a cellák elfordulásával az adagoló alsó kilépőnyílásához kerül, azon keresztül pl. egy konténerbe hull. A kihordócsigák a húsdarálóhoz hasonló szerkezetek. A csiga egy koncentrikusan elhelyezkedő hengerben forog. A tömítés a csiga és a henger fala közötti kis távolsággal és a csiga por mozgás irányában csökkenő menetemelkedésével érhető el, aminek hatására a por összetömörödik és a hen-

ger falának szorul. A por kihordók igen fontos és (pl. kopásra) kényes szerkezetek, amelyek helyes megválasztására és rendszeres karbantartására gondot kell fordítani.

Az ülepítőket alárendelt célokra, nagy szemcséknél pl. forgács leválasztásánál alkalmazzák.

Az ülepítőknél

- a porszemcséket a gázhoz képest a súlyerő mozdítja el (a),
- a szemcsék egymással lépnek kapcsolatba (A), és
- a porhalmazt a van der Waals erő teszi kezelhetővé (α).



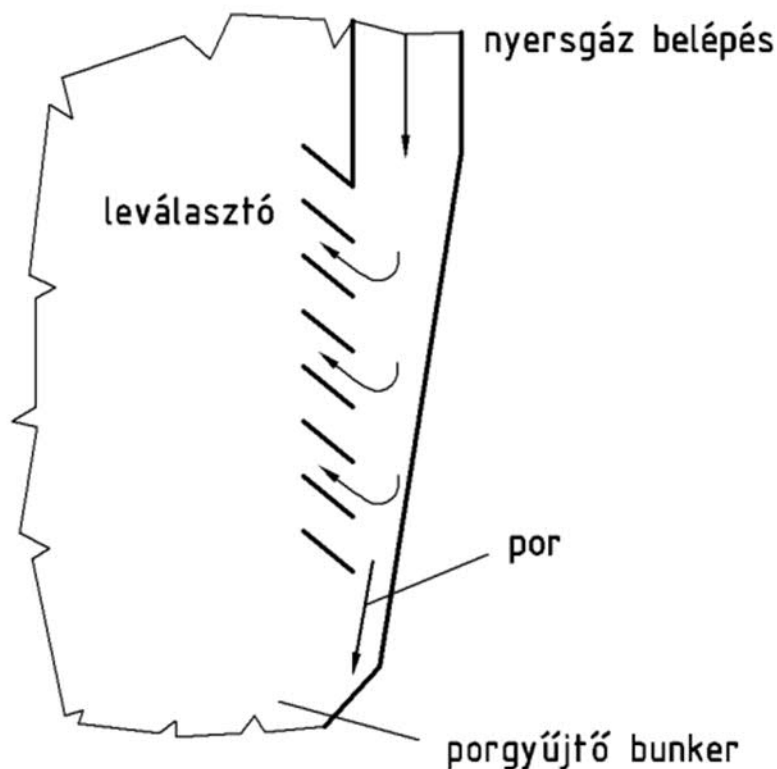
7.5. ábra Ülepítő forgócellás adagolóval

7.3.2. A zsalus előleválasztók

A zsalus előleválasztók (7.6. ábra) terelőlapátjai elterelik az áramlást, aminek következtében annak áramvonalai görbültek lesznek. A porszemcsék tehetetlenségüknél fogva nem tudják követni az irányváltásokat, ezért a gázhoz képest elmozdulnak. Ilyen módon a továbbáramló gáz portartalma csökkenthető. A zsalus leválasztót általában más leválasztók (pl. szűrők) előleválasztójaként a nagy szemcsék eltávolítására alkalmazzuk.

A zsalus előleválasztónál

- a porszemcséket a gázhoz képest tehetetlenségük mozdítja el (b).



7.6. ábra Zsalus előleválasztó

7.3.3. Az ütközéses leválasztók

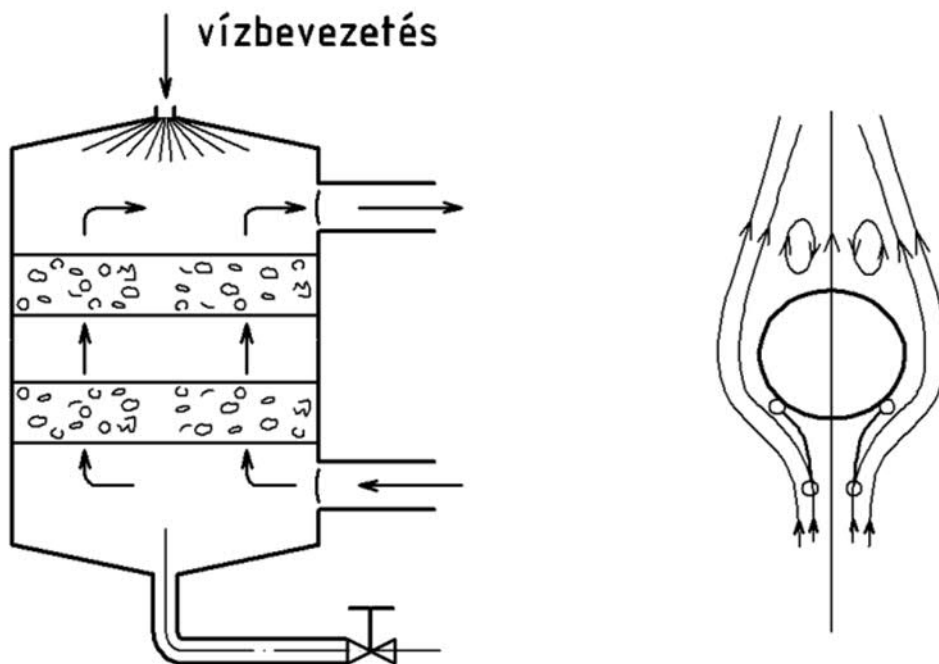
Az ütközéses leválasztók ugyancsak az áramló gáz elterelése révén fejtik ki hatásukat. Egyik megoldás lehet pl. ha egy két végén perforált lemezzel lezárt hengeres edénybe pl. műanyagból készült gyűrűket helyeznek, amelyek porózus réteget alkotnak. A kerámiagyűrűk felületét valamilyen folyadékkal (általában vízzel) vonjuk be. A gyűrűket megkerülő áramlás áramvonalai görbültek lesznek, így tehetetlenségük hatására a porszemcsék eléri a gyűrűk felületét, és beleragadnak a folyadékba. A szemcsékre ható súlyerő és a diffúzió is hozzájárul a porszemcsék gázhoz képesti elmozdulásához. A leválasztó atmoszással regenerálható. Olcsó eljárás, alárendelt célra alkalmazzák.

Az ütközéses leválasztóknál a szemcsék

- főként tehetetlenségük (b), kisebb mértékben a súlyerő (a) és a diffúzió (c) következtében mozdulnak el a gázhoz képest,
- szilárd testeken kialakított folyadékfóliával (C) és a már lerakódott porszemcsékkel (A) lépnek érintkezésbe, és
- a felületi feszültség (γ) teszi a szemcsehalmazt kezelhetővé.

7.3.4. A mosótorny

A mosó tornyok esetén folyadékot (általában vizet) használnak a gáz tisztítására. A vizet a torony tetején porlasztják be a térbe (7.7. ábra), a poros gáz alulról felfelé áramlik. A poros gáz először a torony alsó részén elhelyezkedő, az előzőekben tárgyalt ütközéses leválasztón áramlik át, amelyben lévő elemeket (pl. gyűrűket) a felülről beporlasztott víz von be folyadékfilmmel. A gázban lévő por jelentős része a torony alsó részén elhelyezkedő **ütközéses leválasztóban** rakódik le, amelyet a lehulló vízcseppek folyamatosan regenerálnak (azaz kimosnak). Az ütközéses leválasztóból kilépő gázban lévő porszemcsék nagy részét pedig a lehulló vízcseppek választják le. A felfelé áramló gáznak ugyanis meg kell kerülnie a vízcseppeket (7.7. ábra), ami irányelaterelést, görbült áramvonalakat eredményez. A porszemcsék főként tehetetlenségük folytán érik el az azoknál sokkal nagyobb süllyedési sebességű cseppek felületét és azokkal együtt mozognak tovább. (Eső után ezért tiszta a levegő.) A leválasztott szemcsék a vízzel zagyot alkotnak, ami a berendezés alján kiereszthető és pl. kiszárítható. Az eljárás leválasztási foka nem elegendő, hogy a fokozatosan növekedő környezetvédelmi követelményeknek eleget tegyen.



7.7. ábra Mosótorny és egy lefelé hulló vízcsepp körüláramlása

A mosó tornyokban a porszemcsék

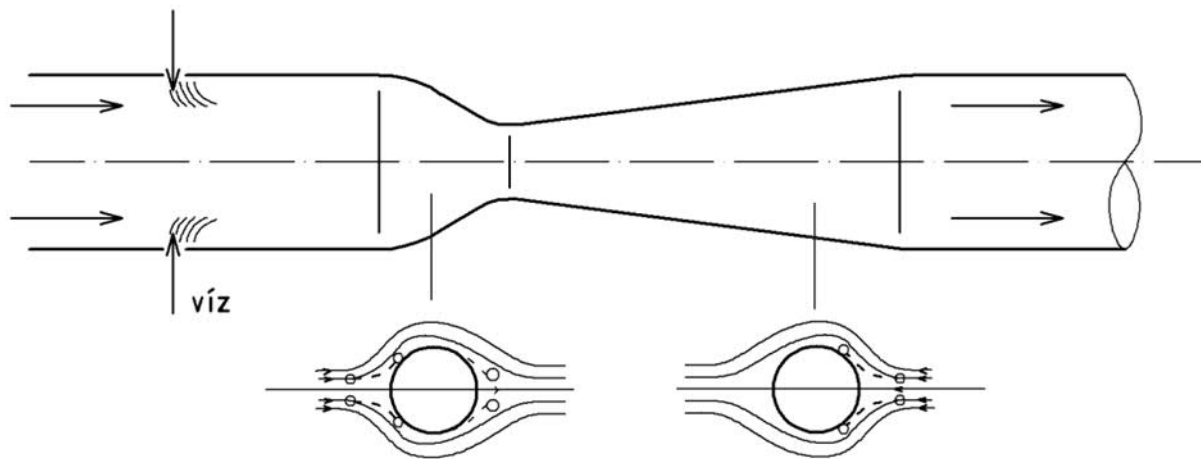
- főként tehetetlenségük (b), kisebb mértékben a súlyerő (a) és a diffúzió (c) következtében mozognak el a gázhoz képest,
- szilárd testeken kialakított folyadékréteggel és folyadékcseppekkel (C) lépnek érintkezésbe, és
- a felületi feszültség (γ) teszi a szemcsehalmazt kezelhetővé.

7.3.5. A Venturi mosó

A Venturi mosó legfontosabb része egy konfúzorból és diffúzorból álló ún. Venturi cső (7.8. ábra), amelybe nagy sebességgel vezetik be a tisztítandó poros gázt. A Venturi cső előtt vizet vezetnek a nagy sebességgel áramló tisztítandó gázba, amelyet a gáz elporlaszt. A tisztítandó gázban így a néhány μm átmérőjű és szubmikronos ($x < 1 \mu\text{m}$) porszemcsék mellett nagy számban jelennek meg az egy-két nagyságrenddel nagyobb átmérőjű vízcseppek. A konfúzorban gyorsul az áramlás. A kisebb méretű porszemcsék jobban követik a gáz sebességének változását, mint a nagy vízcseppek. Ezért a gáz a 7.8. ábrán látható módon megkerüli a vízcseppeket. A görbült áramvonalak miatt a porszemcsék tehetetlenségüknél fogva és a diffúzió, valamint a súlyerő hatására elérik a vízcseppek felületét és azok belsejébe jutnak. Hasonló jelenség játszódik le a diffúzorban, azzal a különbséggel, hogy itt a lassuló gáz és a tehetetlenségük következtében kevésbé lassuló vízcseppek közötti sebességkülönbséget a vízcseppek "előresietése" okozza. A port tartalmazó vízcseppeket nagy méretüknél fogva könnyen leválaszthatjuk pl. egy ciklon leválasztóval (ld. később). A Venturi leválasztóval nagy áramlási sebességek mellett, nagy energia- és vízfogyasztás árán igen jó leválasztási fok érhető el.

A Venturi mosónál

- a porszemcsék főként tehetetlenségük (b), kisebb mértékben a súlyerő (a) és a diffúzió (c) következtében, a porszemcséket tartalmazó nagyobb folyadékcseppek pedig tehetetlenségük (b) folytán mozognak el a gázhoz képest,
- a porszemcsék folyadékcseppekkel (C) lépnek érintkezésbe, és
- a felületi feszültség (γ) teszi a szemcsehalmazt kezelhetővé.



7.8. ábra A Venturi mosó vázlat

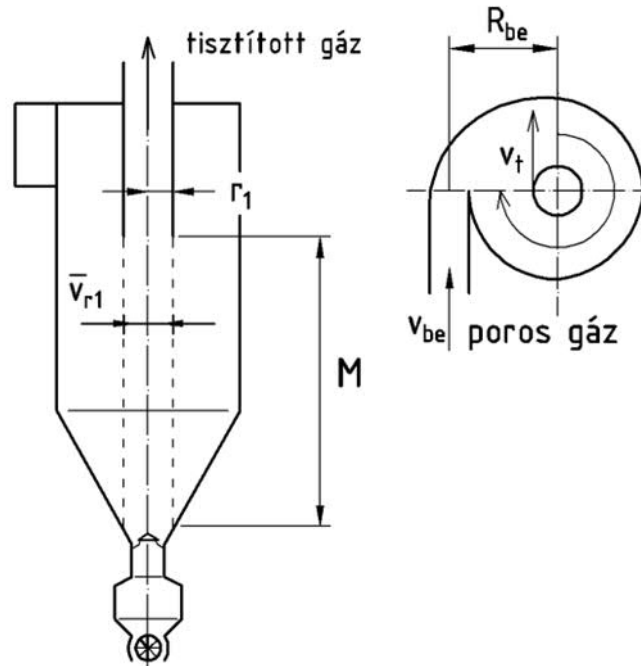
7.3.6. A ciklon leválasztók

A ciklon leválasztók függőleges tengelyű hengeres házat, annak alján elhelyezkedő kúpos porgyűjtő bunkert és por kihordó szerkezetet tartalmaznak (7.9. ábra). A poros gázt a henger felső részén vezetjük be érintőlegesen. A gáz belépésnél bekövetkező irányelterelésénél a nagyobb porszemcsék tehetetlenségüknél fogva rögtön elérik a ciklon hengeres falát és azon spirál alakú pályán a bunkerbe csúsznak. A gáz-részek forgó mozgást végeznek, miközben egyre kisebb sugarú köröket tesznek meg. Eközben a porszemcsék tehetetlenségüknél fogva nem követik az egyre kisebb görbületi sugarú áramvonalakat, "kisodrónak", elérik a ciklon falát, azon spirál alakban lecsúsznak és a

bunkerban nagyobb szemcsehalmazokba tapadnak össze. A bunker felett egy kúp helyezkedik el, amely megakadályozza, hogy a ciklon tengelyében kialakuló örvény behatoljon a bunkerba és ki-hordja az abban lévő port. A megtisztított gáz a hengert lefedő lapon át felülről koncentrikusan benyúló merülőcsövön át távozik a ciklonból.

Ciklonok esetén a porszemcsék

- tehetetlenségük folytán mozdulnak el a gázhoz képest (b),
- a szemcséket egymással (A) hozzuk kapcsolatba a bunkerben, és
- a porhalmazt a Van der Waals erő (α) teszi kezelhetővé.



7.9. ábra Ciklon leválasztó

Egy igen egyszerűsített modell alkalmazásával vizsgáljuk meg a ciklon működését, leválasztási fokát befolyásoló tényezők hatását. Keressük annak a porszemcsének az x_h átmérőjét (határ szemcseátmérő), amit a ciklon éppen leválaszt.

A 7.9. ábrán látható a merülőcső meghosszabbításában felvett, r_1 sugarú, henger alakú keresztmetseten vizsgáljuk a porszemcsére ható erők egyensúlyát. Az x_h sugarú szemcse a gázzal megegyező

v_{1t} tangenciális sebességgel mozog az r_1 sugarú körpályán. E mozgás fenntartásához $\frac{x_h^3 \pi}{6} \rho_p \frac{v_{1t}^2}{r_1}$

sugár irányú, centripetális erőre van szükség, amit az r_1 sugáron keringő porszemcse és a v_{1r} sebességgel radiálisan befelé áramló közeg közötti kölcsönhatás, az áramlási ellenállás erő szolgáltat. Ezért írható:

$$\frac{x_h^3 \pi}{6} \rho_p \frac{v_{1t}^2}{r_1} = 3\pi \mu x_h v_{1r}, \quad (7.11)$$

ahol a gáz v_{1r} sebessége $\bar{v}_{1r} \cong \frac{q_v}{2r_1 \pi M}$. A kísérleti tapasztalatok figyelembe vételével közelítsük a

tangenciális áramlási sebesség sugár irányú eloszlását a potenciális örvényével: $v_{1t} = \frac{R_{be} v_{be}}{r_1}$, ahol

v_{be} a tangenciális beáramlási sebesség, R_{be} a beáramlási keresztmetszet átlagos sugara (ld. **7.9. ábra**).

A (7.11) összefüggésből kifejezve a v_{lr} radiális sebességet behelyettesítés után adódik:

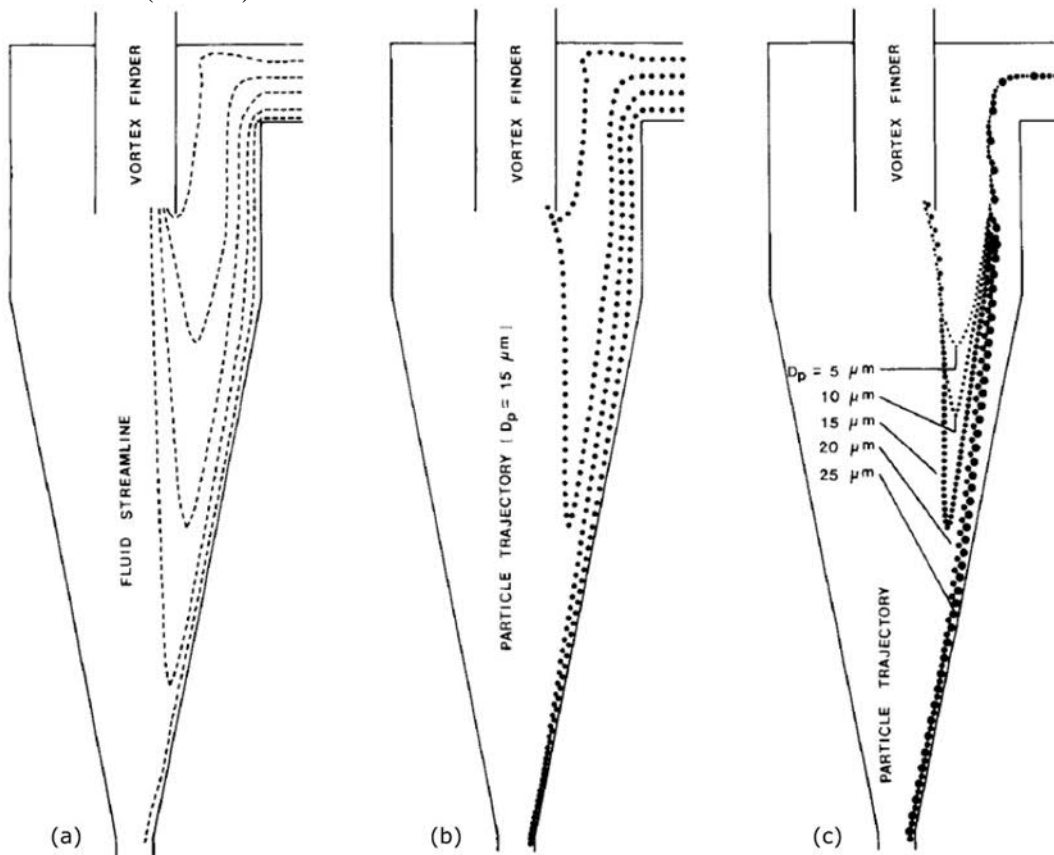
$$\frac{v_{be}^2 R_{be}^2}{r_1 r_1^2} \frac{x_h^2}{18 \mu} \rho_p = v_{lr} = \frac{q_v}{2 r_1 \pi M}, \text{ amiből a határ szemcseátmérőt kifejezve kapjuk:}$$

$$x_h = \sqrt{\frac{9}{\pi} \frac{r_1}{R_{be} v_{be}} \sqrt{\frac{\mu q_v}{\rho_p M}}}. \quad (7.12)$$

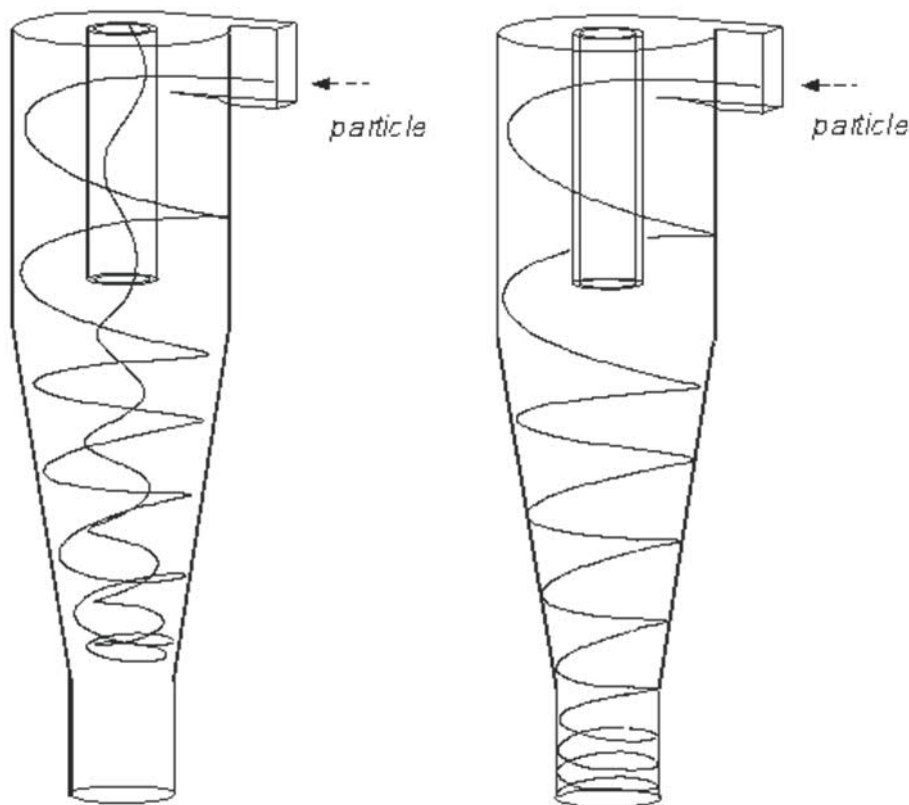
A kifejezésből egyebek között látható, hogy adott tulajdonságú gáz és porszemcse és adott térfogat-áram esetén a beáramlási sebesség és beáramlási sugár növelésével csökkenthető a határszemcse átmérő.

Az r_1 sugarú hengeren a valóságban nem egyenletes a radiális beáramlás sebessége, valamint a turbulencia és az áramlási viszonyok ciklon tengelye menti változása következtében nincs éles határ a leválasztott és átjutó szemcsék átmérője között. Ezért a kapott összefüggés csak igen közelítő eredményt ad, inkább a különböző tényezők hatásának érzékeltetésére alkalmas, semmint adatok számszerű meghatározására.

Az alábbi 7.10. és 7.11. ábrákon láthatók a ciklon házban kiszámolt porpályák kis ill. nagy tehetlenségi paraméterű (méretű) szemcsékre.



7.10. ábra Ciklon leválasztóban porszemcse mérettől függő pályái



(a) particle of small diameter

(b) particle of large diameter

7.11. ábra Ciklon leválasztóban porpályák

Összefoglalás

Az előzőekben áttekintettünk néhány leválasztó típust, amelyek két nagy csoportba, a száraz és nedves leválasztók csoportjába sorolhatók. A nedves leválasztók előnye, hogy a por leválasztása mellett gáznemű szennyezők leválasztására és a gáz hűtésére, nedvesítésére is alkalmasak. Hátrányuk a víz és tisztításának költsége, a korrózió és télen a berendezés szétfagyásának veszélye.

Az áttekintett leválasztók mindegyikénél nagy szerepet játszott a szemcsék tehetetlensége, amelyet

a $\psi = \frac{w_s v_0}{g l_0}$, tehetetlenségi paraméter fejez ki. Adott szemcsehalmaz és gáz tulajdonságok esetén

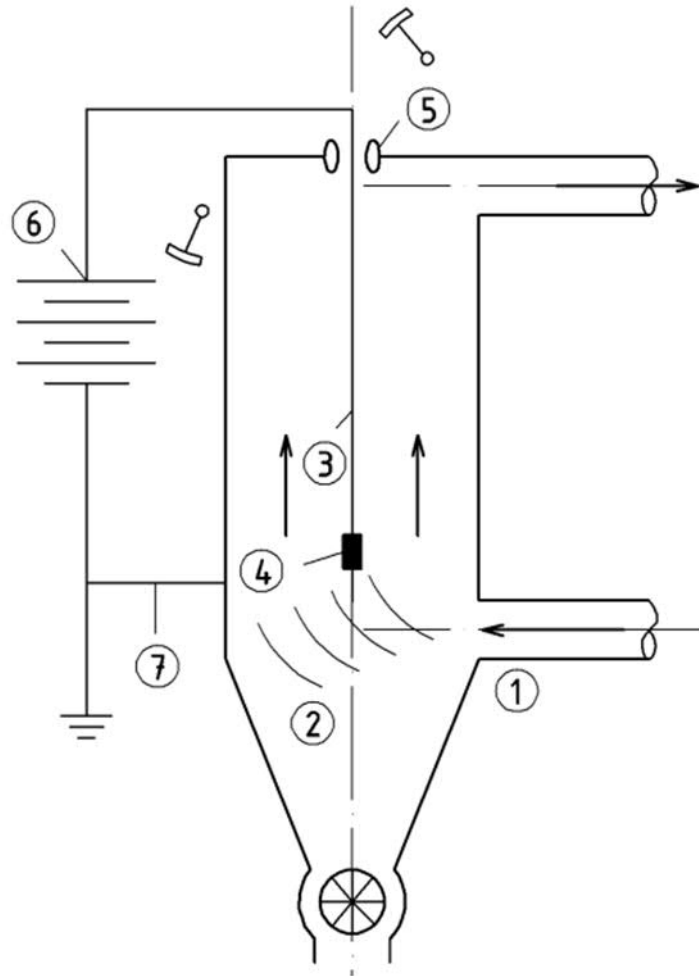
az áramlási sebesség növelésével növelhetjük a tehetetlenségi paraméter értékét és ezzel a leválasztási fokot, ami viszont növeli a leválasztó berendezések áramlási ellenállását és ezáltal az energiaszükségletet.

7.3.7. Az elektrosztatikus porleválasztók

Az elektrosztatikus porleválasztók az előzőekben (7.3.4. pont) vázlatosan bemutatott Venturi mosóval és a következő, **8. fejezetben** részletesen tárgyalt szűrőkkel együtt a portalanítási feladatok széles körénél általában eleget képesek tenni a legszigorúbb környezetvédelmi előírásoknak.

Az elektrosztatikus porleválasztók működési elvét a **7.12. ábra** szemlélteti. A hengeres elektrofilter házba alul (1) lép be a poros gáz, amely egy terelőlapát-sor (2) alkalmazásának eredményeként közel egyenletes sebességgel áramlik felfelé a házban. A ház tengelyében egy kis átmérőjű huzal (3) van, amelyet egy aljához rögzített súly (4) feszít ki. A huzalt szigetelésen (5) keresztül vezetjük ki a tartályból és kötjük egy nagy egyenfeszültségű biztosító áramforrás negatív pólusához (6). Az áramforrás pozitív pólusát földeljük és összekötjük a házzal (7).

Növelve az egyenfeszültséget a ház méretétől (az elektródák távolságától) függő értéknél (néhány 10 kV) létrejön a **koronakisülés** a huzal (amelyet szóróelektródának nevezünk) és a ház (felfogóelektróda) között. A koronakisülés (töltések mozgása gázon keresztül) során a kis átmérőjű szóróelektróda körül a villamos erőtér erőssége nagy, ami miatt a gázban lévő szabad elektronok sugárirányban (a pozitív felfogóelektróda irányában) gyorsulnak, gázmolekulákkal ütköznek, majd amikor elegendő energiára tesznek szert az újabb ütközés során elektront ütnek ki a gázmolekulák elektronhéjából. Most már két elektron gyorsul és üt ki újabb elektronokat: létrejön az "elektronlavinna" és a szabad elektronokkal megegyező számú pozitív gázion, amelyek a szóróelektródára ütközve újabb szabad elektronokat generálnak, amelyek fenntartják a folyamatot. (Az elektronlavinna sziszegő hangot adó kékes szikra szerű képződmény, ebből származik a koronakisülés elnevezés.)



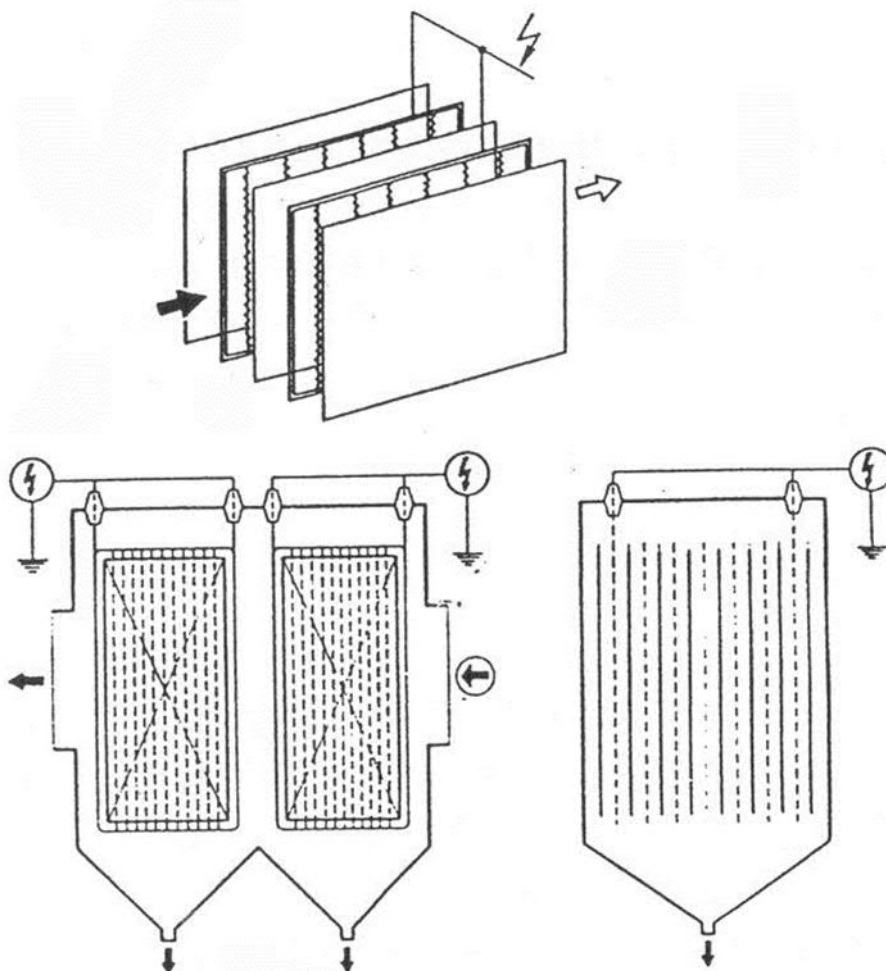
7.12. ábra Az elektrosztatikus porleválasztó működése

A szóróelektródától távolodva csökken a térerősség, megszűnik a szabad elektronok keletkezése, de a keletkezett nagy számú elektron az erőtér hatására kifelé mozog. Ezeket az elektronokat a gázban lévő elektronaffin (szabad elektronokat felvevő) molekulák (pl. O_2 , SO_2) fogják be, így negatív töltésű gázionok keletkeznek, amelyek az erőtér hatására az erővonalak mentén vándorolnak kifelé és ráakódnak a gázban lévő, "útjukba kerülő" porszemcsékre, azaz a szemcsék negatív töltésűek lesznek. A porszemcsék egy adott (telítési) töltést képesek felvenni, mert ennek elérése után a szemcse negatív töltése taszítja az azonos töltésű további gázionokat.

A felfelé áramló gázban lévő negatív töltésű porszemcsék a térerősség hatására kifelé mozognak, elérik a ház falát és arra, ill. a már korábban leválasztott porszemcsékre feltapadnak. A ház falát felfogóelektródának is nevezzük. A feltapadást a töltések kölcsönhatása és a van der Waals erők biztosítják. A ház falára, a felfogóelektródára és a szóróelektródára feltapadt porszemcséket el kell

távolítani, amit azok kopogtatásával (8, 9) lehet megvalósítani. Az összetapadt porszemcsék a porgyűjtő bunkerba hullanak.

Az elektrosztatikus porleválasztók általában nem henger, hanem hasáb alakúak, és a gáz vízszintes irányban áramlik lemez alakú felfogóelektrodák által képezett "utcákban", amelyek közepén helyezkednek el a szóróelektrodák (ld. **7.13. ábra**).



7.13. ábra Szokásos elektrosztatikus porleválasztó felépítés

Az elektrosztatikus porleválasztóknál a szemcsék

- az elektrosztatikai eredetű erők (d) következtében mozdulnak el a gázhoz képest,
- a felfogóelektrodával (B) és a már lerakódott porszemcsékkel (A) lépnek érintkezésbe, és
- a van der Waals erő (α), és esetenként az elektrosztatikai eredetű erők (β) teszi a szemcsehalmazt kezelhetővé.

8. A PORTARTALMÚ GÁZOK SZŰRÉSE

8.1. A SZŰRŐK JELLEMZŐI

A szűrők elemi szálakból álló porózus rétegek (szövetek, filcek). Vizsgáljuk meg egy adott szűrő sajátosságait! Legyen az 1 m^2 szűrőanyag tömege $m_f = 0.4 \text{ kg/m}^2$, a szűrőréteg vastagsága $s = 0.004 \text{ m}$, a szűrő elemi szálainak átmérője $d_f = 20 \mu\text{m}$ (pl. gyapjú vagy gyapotszál átmérője). Legyen az elemi szál anyagának sűrűsége $\rho_f = 1000 \text{ kg/m}^3$. Az "f" index a szakirodalomnak megfelelően a szálát (fibre) jelenti.

A szilárd rész és az összes térfogat aránya, a szoliditás:

$$\alpha = \frac{V_f}{V} = 1 - \varepsilon, \quad (8.1)$$

ahol a V_f a szűrőszálak, V pedig a szűrőréteg térfogata, ε a porozitás. A szoliditás értéke esetünkben

$$\alpha = \frac{m_f}{\rho_f s} = 0.1. \quad (8.2)$$

(Az α értéke szűrőknél általában néhány századtól 0.2 - 0.3-ig terjed).

Mennyi az összes szűrőszál hossza, mekkora az elemi szálak felülete 1 m^2 szűrőanyagban? Az egyéni felületű szűrőrétegben lévő elemi szálak hossza:

$$L_{f1\text{m}^2} = \frac{V_f}{d^2 \pi / 4} = 1.27 \cdot 10^6 \text{ m/m}^2, \quad (8.3)$$

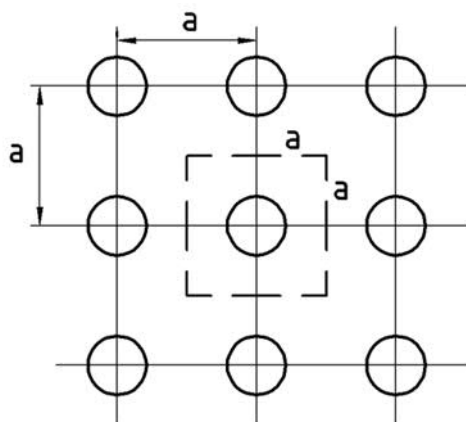
felületük

$$A_{f1\text{m}^2} = L_{f1\text{m}^2} d \pi = 80 \text{ m}^2 / \text{m}^2. \quad (8.4)$$

Tételezzük fel, hogy a szálak rendezetten helyezkednek el, és egy "a" osztású négyzetháló csomópontjain mennek át a szűrő felületével párhuzamosan (**8.1. ábra**). Mekkora a távolságra lehetnek egymástól a szálak? Fejezzük ki a szoliditást és ebből a szálak távolságát:

$$\alpha = \frac{d_f^2 \pi}{4a^2} \Rightarrow \frac{a}{d_f} = \sqrt{\frac{\pi}{4\alpha}} = 2.8.$$

Ha tehát a szálak átmérője $d_f = 20 \mu\text{m}$, akkor a szálak egymástól közel $60 \mu\text{m}$ távolságban, a 4 mm vastag rétegben kb. 70 sort alkotva helyezkednek el. A szálak felülete közötti távolság közel $40 \mu\text{m}$.



8.1. ábra A szűrőszálak elhelyezkedésének modellje

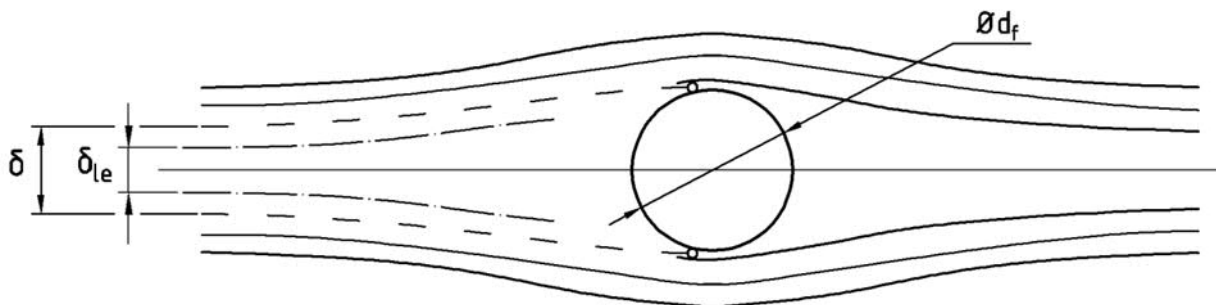
A szűrőkkel szubmikronos ill. néhány mikron átmérőjű szemcséket választunk le. A szűrő tehát nem úgy működik, mint a szokásos értelemben vett szűrő (pl. téstaszűrő, vagy szita), amelynél a

rések mérete kisebb, mint a szűrendő tárgy mérete. A szűrő működését az egyedülálló szál leválasztási mechanizmusával mutatjuk be.

A szűrőréteg két oldala között Δp nyomáskülönbséget létrehozva áramlás indul meg a rétegen keresztül, amelynek átlagos sebessége v_f [m/s] a szűrési sebesség. Az elemi szálak körül a kis Reynolds számnak megfelelő áramlás alakul ki, amelyben a gáz viszkozitása dominál.

A szál hatására az áramvonalak görbültek lesznek, így a porszemcsék tehetetlenségük (és más, az alábbiakban részletezett hatások) eredményeként felütköznek a szál felületére. A szálra felütköző porszemcsék mennyiségét egy δ rétegvastagsággal jellemezzük: a szálra annyi szemcse ütközik fel, amennyi a δ vastagságú rétegen belül áramlik a szál felé (ld. **8.2. ábra**). (A δ_{le} jelentésével később foglalkozunk.) Az egyedülálló szál működését a φ felütközési fokkal jellemezzük, amelyet a felütköző szemcsék mennyiségét jellemző δ rétegvastagság elemi szál átmérőhöz való viszonyításával kapunk meg (ld. **8.2. ábra**):

$$\varphi = \frac{\delta}{d_f} . \quad (8.5)$$



8.2. ábra Az egyedülálló szál

8.2. A SZŰRŐK CSOPORTOSÍTÁSA

Amint azt az előzőekben láttuk, a szűrőrétegbe belépő portartalmú gázból a por az elemi szálakra rakódik le. A lerakódott porszemcsék részt vesznek a további porszemcsék szűrésében, és a lerakódott por térfogata következtében nő a szűrőréteg szoliditása. Ezért a szűrés folyamán mind a leválasztási fok, mind pedig a szűrőrétegen keresztüli nyomásvesztés nő.

A porlerakódás a szűrőréteg nyersgáz oldala közelében a legintenzívebb, ezért a szűrőréteg jellemzőitől és a szűrés körülményeitől függő idő elteltével a szűrő felületén összefüggő porréteg alakul ki, amely átveszi a szűrőszálakból álló réteg szerepét: a szűrés további időtartama alatt porszemcsék e felületi porrétegen válnak le alapvetően a befogás miatt: a porszemcsék véges kiterjedésük folytán fennakadnak a porréteg méretüknél kisebb pórusain.

Ha a por a szűrőréteg belsejében, az elemi szálakra rakódik le, akkor **mélységi szűrésről** beszélünk, ha pedig a porréteg felületén, akkor **felületi szűrésről**. E kétféle szűrés igen jelentősen különbözik egymástól, ezért külön-külön tárgyaljuk.

8.3. A MÉLYSÉGI SZŰRŐK

8.3.1. A porszemcsék felütközése az elemi szálon

Vizsgáljuk meg, hogy milyen hatások hozzák a porszemcséket érintkezésbe az elemi szálakkal és milyen erők tartják ott.

A porszemcsék

- a) befogás
 b) a súlyerő,
 c) a tehetetlenség,
 d) a diffúzió és
 e) az elektrosztatikai eredetű erők
 hatására érik el a szálak felületét.

ad a) A **befogás** révén akkor ütközik fel egy porszemcse az elemi szálra, ha a porszemcse olyan áramvonalon halad, amelynek elemi szál felületétől mért legkisebb távolsága kisebb, vagy egyenlő a porszemcse sugarával (**8.3. ábra, B**). Ez esetben a szemcse akkor is felütközik a szálra, ha nem mozdul el a gázhoz képest.

A porszemcséknek a befogás következtében az elemi szálra történő felütközését jellemző φ_B felütközési fokot (ld. (8.5) kifejezés) az alábbi összefüggésből lehet jó közelítéssel kiszámolni:

$$\varphi_B = \frac{1 - \alpha \cdot R^2}{Ku \cdot (1 + R)}, \quad (8.6)$$

ahol

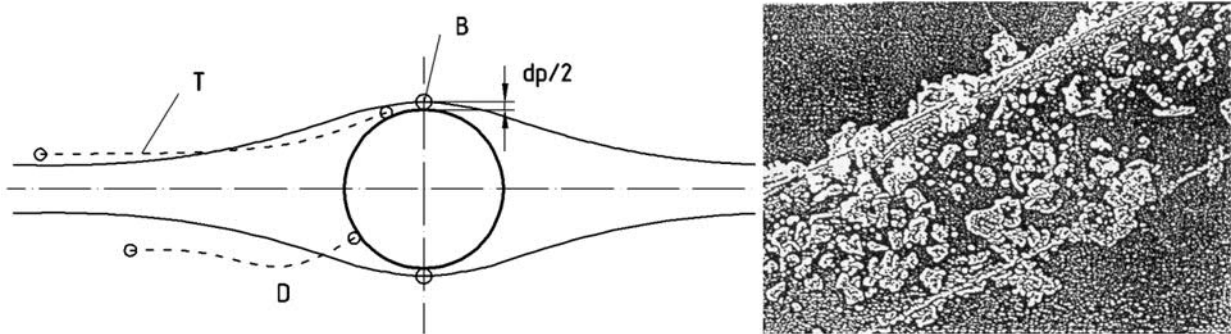
$$R = \frac{x}{d_f} \quad (8.7)$$

α a szoliditás (ld. (8.1) kifejezést), és

$$Ku = -0.5 \cdot \ln \alpha - 0.75 + \alpha - 0.25 \alpha^2 \quad (8.8)$$

az un. Kuwabara tényező.

Kuwabara 1959-ben publikált cikkében elemi szálak (az áramlásra merőlegesen álló hengerek) rendszerében kialakuló áramlás leírására adott kis Reynolds számokra érvényes összefüggéseket, amelyeket a Navier-Stokes egyenlet linearizálásával határozott meg. Ezekben szerepel a róla elnevezett Ku tényező.



8.3. ábra Porszemcsék felütközése egyedülálló szálon

ad b) A **súlyerő** hatására a porszemcsék elmozdulnak a gázhoz képest és elérik az elemi szál felületét (**8.4. ábra**). Függőlegesen lefelé történő áramlásnál a gravitáció hatása nagyobb, mint feláramlásnál. Lefelé áramlás esetén a súlyerő miatti felütközési fokra (φ_G) írható:

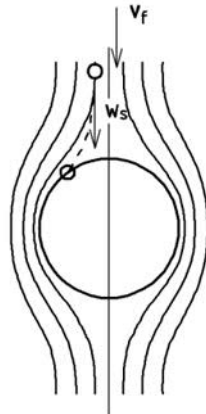
$$\varphi_G = \frac{w_s}{v_f} (1 + R), \quad (8.9)$$

ahol w_s [m/s] a porszemcse süllyedési sebessége (ld. (3.14)) és v_f [m/s] a szűrési sebesség (a szűrőrétegen átáramló gáz sebessége).

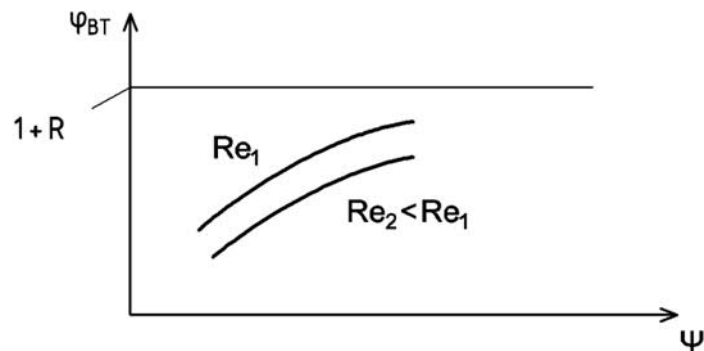
ad c) A **tehetetlenség** hatására a szemcsék a görbült áramvonalakénál nagyobb görbületi sugáron haladnak és elérik a szál felszínét (**8.3. ábra, T**). A **8.5. ábra** a tehetetlenségi paraméter függvényében mutatja a φ_{BT} felütkezési fok alakulását a tehetetlenség és a befogás együttes hatása következtében: $\varphi_{BT} = f(\Psi)$, az elemi szátra vonatkozó Reynolds szám

$$Re_f = \frac{v_f \cdot X}{\nu} \quad (8.7)$$

két különböző értékénél. Ha csökken a Re szám, a sűrűdés hatására a szál előtt "korábban" kezdenek görbülni az áramvonalak (ezért görbületi sugaruk nagyobb), a szál felülete közelében pedig a sebesség csökken, ezért mind a tehetetlenség, mind pedig a befogás miatti felütkezési fok csökken. Belátható, hogy a görbék $\Psi \rightarrow \infty$ esetén a $\varphi_{BT} = 1 + R$ értékhez tartanak.



8.4. ábra Felütkezés a súlyerő következtében



8.5. ábra A tehetetlenség és a befogás miatti felütkezési fok alakulása

A szakirodalom az alábbi, nagyszámú kísérlet alapján kialakított összefüggést javasolja a tehetetlenség és a befogás hatására létrejövő felütkezésre jellemző φ_{BT} felütkezési fok meghatározására:

$$\varphi_{BT} \cong 1.03 + (0.5 \cdot Re_f - 1.5) \cdot 0.85^{\Psi+0.5}, \quad (8.8)$$

ahol Re_f az elemi szátra vonatkozó Reynolds szám (ld. (8.7) kifejezést), Ψ pedig a tehetetlenségi paraméter, amely a

$$\Psi = \frac{v_f w_s}{g d_f} = \frac{v_f \rho_p X^2}{18 \mu d_f} \quad (8.9)$$

összefüggéssel fejezhető ki (ld. (3.18) kifejezést). Az összefüggés $1 < \Psi < 10$, $0.01 < Re_f < 1$ és $\varphi_{BT} > 0.1$ tartományban közelítően helyesen írja le a felütközési fok értékét. A tehetetlenség általában a nagyobb méretű ($x > 1\mu\text{m}$) szemcsék esetén dominál, ezért ezek felütközésének számításánál alkalmazzuk a (8.8) összefüggést.

ad d) A **diffúzió** a nagy sebességgel mozgó gázmolekulák és a kis méretű porszemcsék közötti kölcsönhatás következménye: a szemcsék rendezetlen mozgást végeznek (ld. **8.3. ábra, D**). A diffúzió miatti felütközési fokra írható:

$$\varphi_D = 2.6 \left(\frac{1-\alpha}{Ku} \right)^{1/3} Pe^{-2/3}, \quad (8.10)$$

ahol α a szoliditás (8.1), Ku a Kuwabara tényező (8.8), $Pe = \frac{v_f d_f}{D_p}$ a Peclet szám, ahol v_f [m/s] a szűrési sebesség és D_p [m²/s] a porszemcsére vonatkozó diffúziós tényező. Ez utóbbit a

$$D_p = \frac{k T}{3\pi \mu x} Cu \quad (8.11)$$

összefüggéssel fejezhetjük ki, ahol $k=1.381 \cdot 10^{-23}$ J/mol/K a Boltzmann állandó, T [K] a gáz hőmérséklete, Cu a Cunningham tényező (3.16). Látható, hogy a Peclet szám, és így a felütközési fok annál nagyobb, minél nagyobb a hőmérséklet és minél kisebb a szemcse és az elemi szál átmérője, a sebesség és a viszkozitás.

Kis szemcséknél ($x < 1\mu\text{m}$) a diffúzió és a befogás dominál a felütközési fokban, ezért ilyen esetben a

$$\varphi_{BD} = \beta_1 \left(\frac{1-\alpha}{Ku} \right)^{1/3} Pe^{-2/3} + \beta_2 \frac{1-\alpha}{Ku} \frac{R^2}{1+R} \quad (8.12)$$

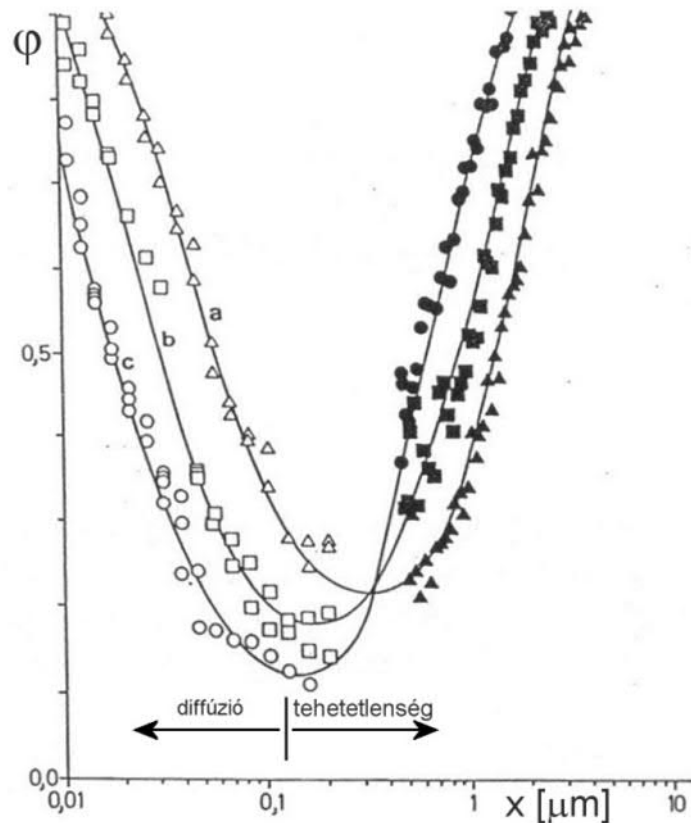
összefüggéssel számolható a felütközési fok, ahol $\beta_1=1.6$ és $\beta_2=0.6$ értéket javasol a szakirodalom.

ad e) A porszemcsék **elektrosztatikai eredetű vonzóerő** hatására történő felütközése a porszemcsék és az elemi szál töltésének nagyságától, valamint egyebek között a gáz sebességétől, viszkozitásától, a szemcse és a szál átmérőjétől függenek.

8.3.2. Domináns hatások a szemcsék felütközésében

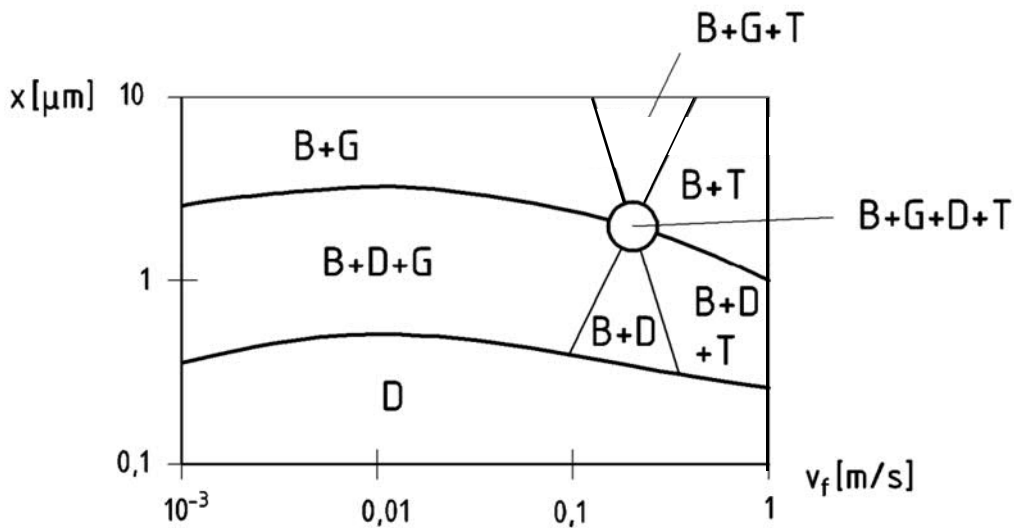
A **8.6. ábrán** három különböző szűrési sebességnél vittük fel a szemcseátmérő függvényében a befogás, a tehetetlenség, a diffúzió és a súlyerő együttes hatását jellemző felütközési fok mért értékeit. Látható, hogy a φ_{BTDG} felütközési fok értékének $0.1-1\mu\text{m}$ szemcseátmérő tartományban minimuma van, amely nagyobb szűrési sebességnél balra mozdul el, miközben a φ_{BTDG} értéke csökken.

E kellemetlen jelenség oka az, hogy a kis átmérőjű porszemcsék esetén (az ábrán üres jelek) a diffúzió, a nagyobbaknál (az ábrán kitöltött jelek) a tehetetlenség és a befogás hatása dominál, de növekvő szemcseátmérő esetén a diffúzió hatása lecsökken, mielőtt a másik két hatás felerősödne.



8.6. ábra A felütközési fok változása a szemcseátmérő és a szűrési sebesség függvényében

A 8.7. ábrán láthatók azok a szűrési sebesség és szemcse átmérő területek, amelyeken az egyes hatások dominálnak a porszemcsék elemi szálakra való felütközésében.



8.7. ábra Domináns hatások a porszemcsék szálakra való felütközésében

Az ábrából levonható a következtetés, hogy

- a diffúzió kis szemcseméretknél dominál,
- befogás szerepe nagyobb szemcseméretknél a teljes szűrési sebesség tartományban jelentős,
- a súlyerőnek nagyobb szemcseméretknél és kisebb sebességeknél van szerepe,
- nagyobb szűrési sebességeknél és nagyobb szemcseméretknél a tehetetlenség szerepe jelentős a szemcsék felütközésben.

8.3.3. A szemcsék feltapadása, leválasztása az elemi szálon

Az elemi szátra felütköző szemcsék

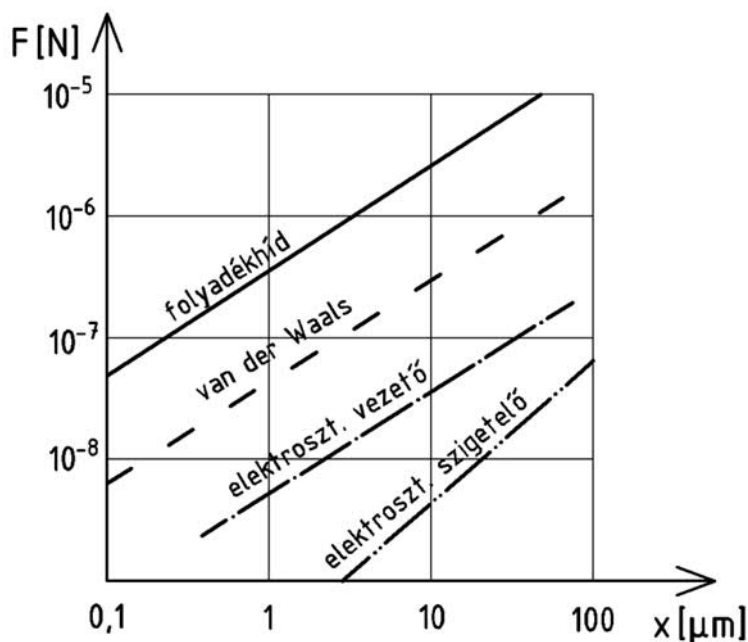
- a van der Waals erő,
- az elektrosztatikai eredetű vonzóerő és
- a felületi feszültségből származó erő

hatására feltapadnak a szátra, vagy a már korábban leválasztott szemcsékre, azaz a felsorolt erők hatására kezelhetővé válnak.

A **8.8. ábrán** a szemcseátmérő függvényében látható adott szemcse-szál párosításra a különböző erőhatások változása. Megállapítható, hogy valamennyi erő nő a szemcseméret függvényében, a legnagyobb a felületi feszültségből származó erő, egy nagyságrenddel kisebb a van der Waals erő, és ennél 1-2 nagyságrenddel kisebb az elektrosztatikus vonzóerő, amely jelentősen függ a szemcse és a szál vezetőképességétől. Az erők kisebb mértékben csökkennek a szemcseméret csökkenéssel, mint a szemcsék tömege (súlya), ezért minél kisebb a szemcse annál inkább hajlamos az agglomerációra.

Jellemezzük a (8.5) összefüggéshez hasonlóan az elemi szátra feltapadt szemcsék mennyiségét, azaz az elemi szál leválasztási fokát, amit η -val jelölünk:

$$\eta = \frac{\delta_{le}}{d_f}, \quad (8.13)$$



8.8. ábra A szemcsék és az elemi szál között ébredő erők

ahol δ_{le} [m] annak a rétegnek a vastagsága, amelyen belül a szál felé mozgó szemcsék száma megegyezik azon szemcsék számával, amelyek felütköznek, és **feltapadnak** a szátra (ld. **8.2. ábra**).

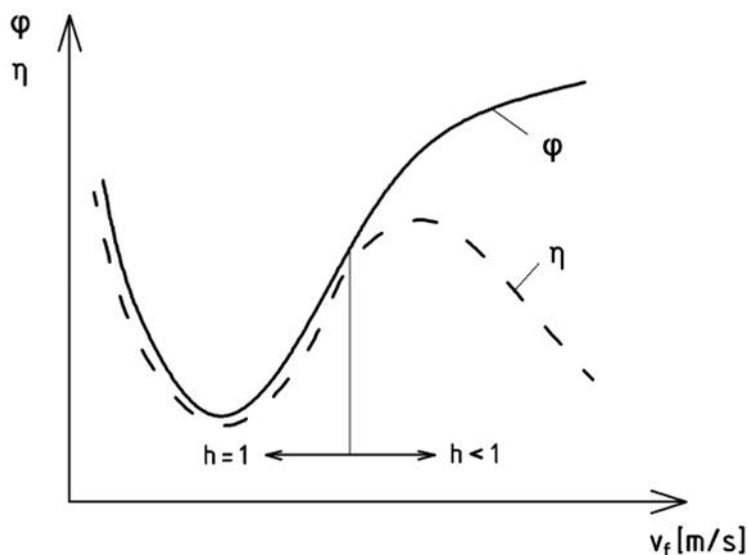
Tekintsük a **8.9. ábrát**, ahol folytonos vonallal vittük fel egy adott szemcseméret esetén az egyedülálló szál felütközési fokának (φ) számolt (és kísérletekkel ellenőrzött) változását a szűrési sebesség függvényében. Szaggatott vonallal ábrázoltuk az egyedülálló szál leválasztási fokának (η) mért változását.

Kis szűrési sebességeknél látható a felütközési fok előzőekben tárgyalt minimuma (ami azért jön létre, mert a diffúzió és a többi hatás "nem ér össze"). A φ és η görbék egy adott sebesség értékig

együtt haladnak, utána elválnak: a felütközési fok a várakozásnak megfelelően nő, a leválasztási fok pedig kevésbé nő, utána csökken. Megállapítható tehát, hogy kis szűrési sebességeknél a felütközési és leválasztási fok értéke megegyezik: $\varphi = \eta$, azaz valamennyi felütköző szemcse fel is tapad, azaz leválasztásra kerül. Nagyobb sebességeknél azonban $\eta < \varphi$, tehát a szűrőszálra felütköző szemcsék egy része feltapad, más része visszapattan vagy a felütközés során a szemcse egy már leválasztott porszemcsét kiüt a helyéről. Ha az elemi szálát pl. olajréteggel bevonjuk, a teljes szűrési sebesség tartományban egybeesik a φ és az η értéke, ami azt bizonyítja, hogy a felületi feszültség hatására a szemcsék visszapattanása az elemi szál felületéről megszűnik (a szálát elérő szemcsék "beleragadnak" az olajrétegbe).

Definiáljuk az elemi szálakat elérő szemcsékből feltapadók részarányát a h feltapadási valószínűséggel:

$$h = \frac{\text{feltapadt szemcsék száma}}{\text{felütközött szemcsék száma}}. \quad (8.14)$$



8.9. ábra Az egyedülálló szál felütközési és leválasztási fokának változása a szűrési sebesség függvényében

Ezek után az egyedülálló szál leválasztási foka kifejezhető a feltapadási valószínűséggel is:

$$\eta = \varphi h \quad (8.15)$$

A szemcsék egy része visszapattanásának oka, hogy a felütközéskor rugalmas deformáció formájában energia tárolódik a szemcsében és a szálban, mely értéke kis sebességek esetén kisebb, mint a Van der Waals erő (és ahol jelentkezik, az elektrosztatikus vonzóerő) legyőzéséhez szükséges munka, tehát a szemcse feltapad a szálra. A sebesség növelésével nő a rugalmas deformáció, így egyre több porszemcse pattan vissza. Ez a bonyolult jelenség az anyagpárosítástól, a szemcsék alakjától és a szálra korábban feltapadt szemcsék számától függ. Minél nagyobb a sebesség, a szemcseátmérő, és minél "keményebb" az elemi szál, annál kisebb h értéke. A szál átmérőjének növelése, a szemcsék és a szál érdességének növekedése növeli a feltapadási valószínűség értékét.

Nagy számú kísérleti vizsgálat eredményeként határozták meg az alábbi közelítő összefüggést a feltapadási valószínűségre:

$$h = 1.37 \Psi^{-1.09} \text{Re}_f^{-0.37}. \quad (8.16)$$

A mélységi szűrővel megvalósítható leválasztást tehát nem csak a felütközési fok, hanem a felütközési fok és a feltapadási valószínűség szorzata, a leválasztási fok határozza meg. Ahol a diffúzió dominál (1 μ m-nél kisebb szemcseátmérők és mérsékelt, legfeljebb 0.1 m/s nagyságrendű szűrési sebesség) ott a szemcseméret és/vagy a szűrési sebesség kicsi, ezért a feltapadási valószínűség 1, azaz a leválasztási fokra írható

$$\eta = \varphi_{BD} = \beta_1 \left(\frac{1-\alpha}{Ku} \right)^{1/3} Pe^{-2/3} + \beta_2 \frac{1-\alpha}{Ku} \frac{R^2}{1+R}, \quad (8.17)$$

ahol $\beta_1 = 1.6$ és $\beta_2 = 0.6$.

A feltapadási valószínűség figyelembe vétele abban a szemcseméret tartományban érdekes, ahol a tehetetlenség erők dominálnak. ebben a tartományban a leválasztási fok értékét közelítően az

$$\eta = \varphi_{BT} h \cong [1.03 + (0.5 \cdot Re_f - 1.5) \cdot 0.85^{\Psi+0.5}] (1.37 \Psi^{-1.09} Re_f^{-0.37}) \quad (8.18)$$

összefüggéssel számolhatjuk. Elemezve az összefüggést megállapíthatjuk, hogy akkor kapunk viszonylag nagy elemi szál leválasztási fokot, ha kis szemcséket nagyobb, nagyobb szemcséket pedig kisebb szűrési sebességgel választjuk le.

A mélységi szűrőknél a szemcsék

- tehetetlenségük (b), a diffúzió (c), a súlyerő (a) és elektrosztatikai eredetű erők (d) következtében mozdulnak el a gázhoz képest,
- az elemi szálakkal (B) és a már lerakódott porszemcsékkel (A) lépnek érintkezésbe, és
- a van der Waals erő (α), és esetenként az elektrosztatikai eredetű erők (β) és/vagy a felületi feszültség (γ) teszi a szemcsehalmazt kezelhetővé.

8.3.4. A szűrőréteg leválasztási foka

Ha ismerjük az egyedülálló szál leválasztási fokát, hogyan számolhatjuk ki egy szűrőréteg leválasztási fokát?

A szűrőréteg leválasztási fokát (E) a (7.6) összefüggéssel definiáltuk:

$$E = \frac{c_{ny} - c_t}{c_{ny}} = 1 - \frac{c_t}{c_{ny}}, \quad (8.19)$$

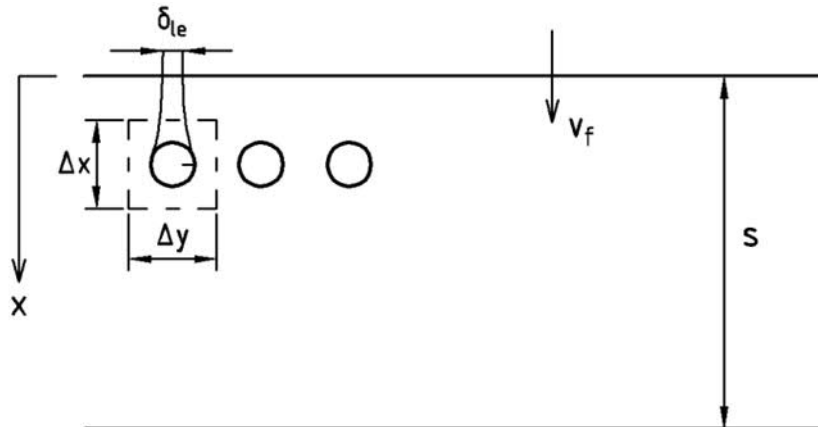
ahol c [kg/m³] a porkoncentráció, az "ny" és "t" indexek a nyersgázra és a tisztított gázra vonatkoznak.

Vizsgáljuk meg, hogy milyen kapcsolat van az egyedülálló szál és a szűrőréteg leválasztási foka között adott méretű szemcsék esetén! Tételezzük föl, hogy az elemi szálak rendezetten helyezkednek el a szűrőrétegben: a szálak egymástól mért távolsága Δx , Δy (**8.10. ábra**).

Határozzuk meg, hogy áramlás irányában x és $x + \Delta x$ koordinátákkal jellemzett síkok között milyen mértékben változik a koncentráció:

$$\Delta c = - \frac{\delta_e}{\Delta y} c. \quad (8.20)$$

A (8.19) összefüggés azt fejezi ki, hogy Δy szélességű rétegbe belépő porszemcsék közül a szál a δ_{le} szélességű rétegnek megfelelő mennyiségű szemcsét választ le, azaz a koncentráció csökkenés a helyi koncentráció $\delta_{le}/\Delta y$ -szorososa.



8.10. ábra A szűrőréteg modellje

A számlálót és nevezőt ugyanazzal a kifejezéssel megszorozva egyszerűsítések után adódik:

$$\Delta c = -\frac{\delta_{le}}{\Delta y} c \frac{d_f \pi \Delta x}{d_f \pi \Delta x} = -c \eta a \frac{1}{\pi} \Delta x,$$

ahol

$$a \text{ [m}^2/\text{m}^3] = A_{sz}/V_{sz} = d_f \pi / (\Delta x \Delta y)$$

az 1 m hosszúságú szál felülete és a szálhoz tartozó szűrőréteg-térfogat hányadosa, azaz az egységnyi szűrő térfogatra jutó leválasztási felület, amit **fajlagos szűrőfelületnek** nevezünk.

Az elemi szálakat mintegy folytonossá téve a térben, a fenti összefüggés szétválasztható differenciálegyenletté alakítható át:

$$\int_{c_{ny}}^c \frac{dc}{c} = \int_0^x -\eta \frac{a}{\pi} dx \Rightarrow c = c_{ny} e^{-\int_0^x \eta \frac{a}{\pi} dx} \quad (8.21)$$

$x=0$ -tól a teljes szűrőréteg vastagságon keresztül $x=s$ -ig integrálva eredményül a tisztított gázban lévő por koncentrációja adódik: $c=c_t$. A c_t/c_{be} hányadost kifejezve és a szűrőréteg leválasztási fokának (8.19) képletébe helyettesítve adódik:

$$\boxed{E = 1 - e^{-\int_0^s \eta \frac{a}{\pi} dx}} \quad (8.22)$$

ahol s [m] a szűrőréteg vastagsága.

Ha $a=\text{áll.}$, $\eta=\text{áll.}$, azaz a szűrőréteg mélysége függvényében nem változnak a szűrő tulajdonságai és az egyedülálló szál leválasztási foka sem, akkor

$$E = 1 - e^{-\eta \frac{a}{\pi} s} \quad (8.23)$$

A szűrési folyamatban a korábban már lerakódott porszemcsék is szerepet játszanak. A porszemcsék lerakódnak a szálakra, esetenként láncszerű képződményeket, mintegy további elemi szálakat képeznek és így növelik a fajlagos szűrő felületet, azaz a szűrő működésének időtartama alatt nő a leválasztási fok.

8.3.5. A szűrők nyomásvesztésének meghatározása

A nyomásvesztés számításánál a legelterjedtebb Kuwabara módszert alkalmazzuk. 1m hosszúságú elemi szála ható erő (F_{1m} [N/m]) az alábbi módon fejezhető ki:

$$F_{1m} = \mu v_f F^* [\text{N/m}], \quad (8.24)$$

ahol

$$F^* = \frac{4\pi}{Ku}. \quad (8.25)$$

A (8.25) kifejezésben a Ku a már említett Kuwabara tényező, amely a szűrőréteg szoliditásától, α -tól függ:

$$Ku = -0.5 \ln \alpha - 0.75 + \alpha - 0.25\alpha^2. \quad (8.26)$$

A Δp nyomásvesztés egyenlő az 1 m² felületű szűrőrétegben lévő L_{1m^2} hosszúságú szála ható erővel:

$$\Delta p = F_{1m} L_{1m^2}, \quad (8.27)$$

ahol az 1 m² felületű szűrőrétegben lévő szálak összes hossza:

$$L_{1m^2} = \frac{4 s \alpha}{d_f^2 \pi}, \quad (8.28)$$

azaz az 1 m² felületű szűrőrétegben lévő szűrőszál térfogat ($s \cdot \alpha$) és a szűrőszál keresztmetszet hányadosa.

(8.27) kifejezésbe behelyettesítve (8.24), (8.25) és (8.28) összefüggést a szűrőréteg nyomásvesztésére:

$$\Delta p = \mu v_f \frac{4\pi}{Ku} \frac{4 s \alpha}{d_f^2 \pi} = \frac{16}{Ku} s \alpha \frac{\mu v_f}{d_f^2} \quad (8.29)$$

adódik.

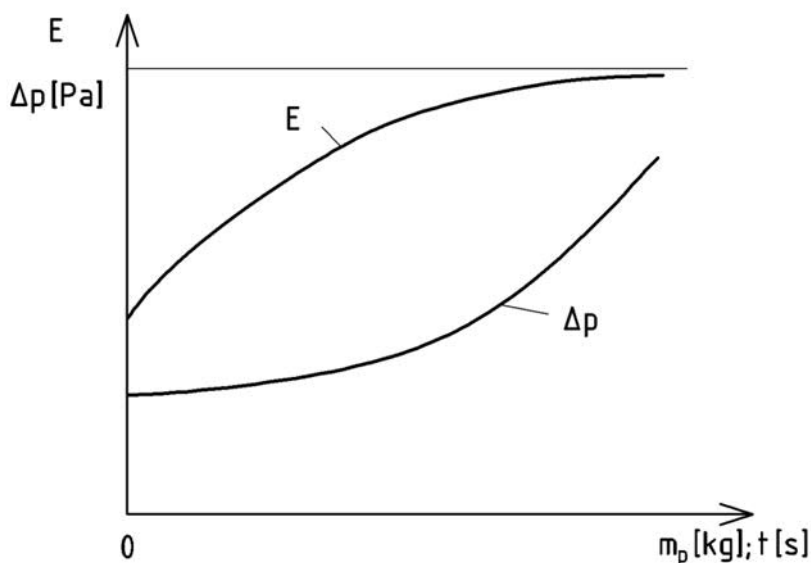
A fenti összefüggésekből látható, hogy a nyomásvesztés a szűrési sebességgel és a dinamikai viszkozitással és az 1 m² szűrőrétegben lévő szálak hosszával (átmérőjüktől függetlenül, ld. (8.27) összefüggés) egyenesen arányosan változik.

Sokszor szálakat (dendriteket) alkotnak az elemi szálakra lerakódott, összetapadt porszemcsék, melyek összes hossza nagy lehet, tehát nagy mértékben megnövelhetik a szűrőréteg ellenállását. Ezért

a fenti képletből számolható nyomásvesztéséget lényegesen meghaladhatja a poros szűrőréteg nyomásvesztése.

A **8.11. ábrán** látható, hogy a szűrőrétegbe belépett por tömeg (amely időben állandó szűrési sebességet és belépő porkoncentrációt feltételezve arányos a szűrő működésének időtartamával) függvényében mind a szűrőréteg leválasztási foka, mind pedig nyomásvesztése jelentősen növekedhet. Az üzemi sajátosságok időfüggése a mélységi szűrők leghátrányosabb sajátossága.

Itt jegyezzük meg, hogy a mélységi szűrők szálai és feltapadt porszemcsék közötti erők olyan nagyok, hogy azok eltávolítására (a szűrő regenerálására) általában nincsen lehetőség. A szűrési sebességnél 1-2 nagyságrenddel nagyobb gázsebességre, vagy a szálak igen nagy, és a szűrő struktúráját veszélyeztető, vagy tönkretévő gyorsulására (poroló) lenne szükség a szemcsék eltávolításához, a szűrő regenerálásához. Ezért, ha a szűrőréteg nyomásvesztése (azaz adott szűrő gáz térfogatáram esetén a szűrés energiaigénye) egy adott határt meghalad, az eltömődött szűrőt tisztával kell kicserélni (pl. autó légszűrő). A nagy porfelvevő, portároló képesség érdekében a mélységi szűrők általában viszonylag vastagak (vastagságuk néhány cm) és laza szerkezetűek (a szoliditásuk viszonylag kicsi $\alpha < 0.1$). A mélységi szűrők laza szerkezetéből adódóan nyomásvesztésük viszonylag kicsi, ezért viszonylag nagy szűrési sebességgel működnek. Miután a mélységi szűrők nem regenerálhatók, porfelvevő képességük korlátozott (négyzetméterenként 1-3 kg por), alkalmazásuk csak kis, néhány mg/m^3 koncentrációjú gázok szűrésére lehet azokat gazdaságos.



8.11. ábra A leválasztási fok és a nyomásvesztés változása a szűrőbe belépő pormennyiség függvényében

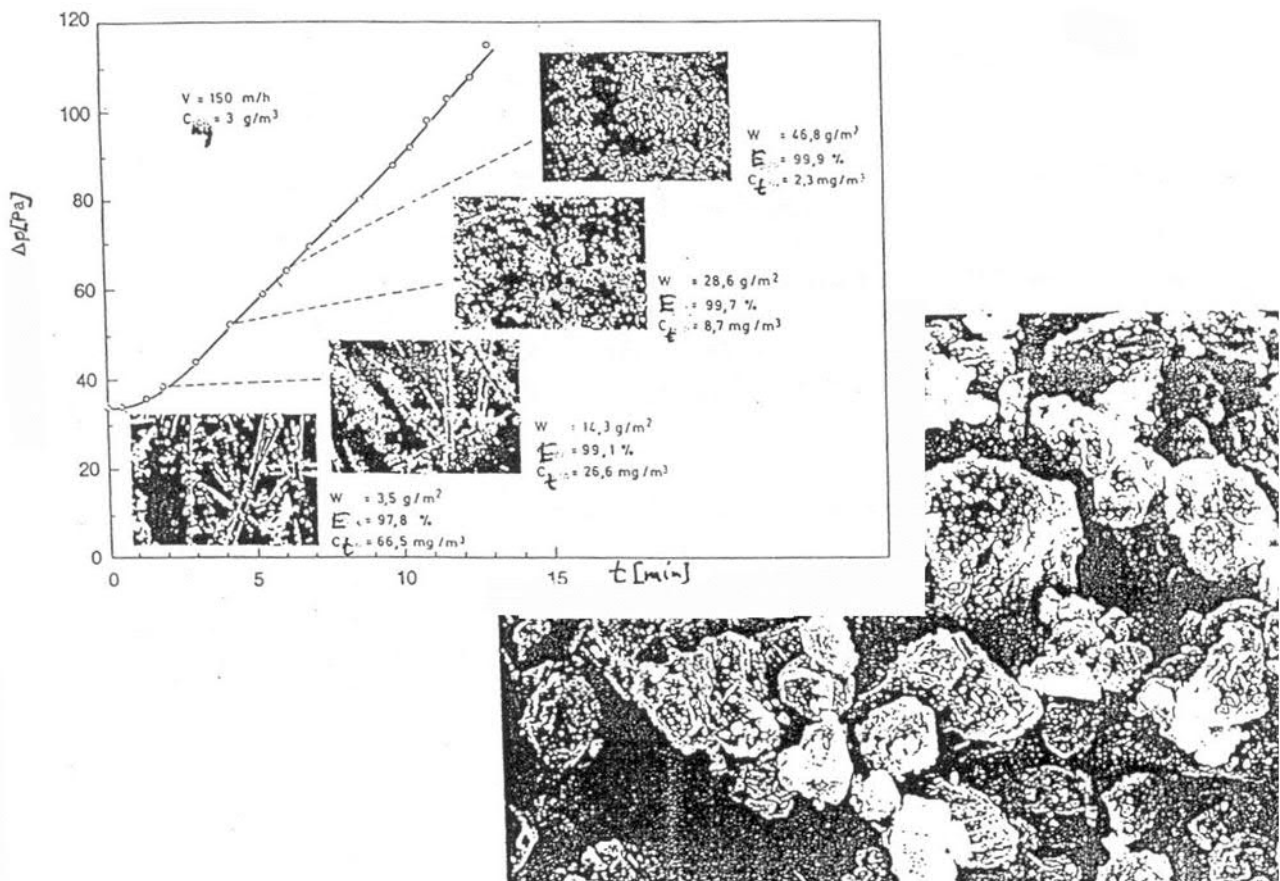
Tekintsünk példaként egy szűrőt, amely porfelvevő képessége az eltömődésig, azaz a nyomásvesztés megengedett legnagyobb értékének eléréséig $m_p = 1 \text{ kg}/\text{m}^2$, a szűrési sebesség legyen $v_f = 0.5 \text{ m/s}$ és nyersgáz koncentráció pedig $c_{ny} = 2 \text{ mg}/\text{m}^3$. Jó közelítésként feltéve, hogy a szűrő az összes port leválasztja, a szűrővel az eltömődésig $V = m_p / c_{ny} = 1 / (2 \cdot 10^{-6}) = 500.000 \text{ m}^3$ gáz szűrhető. 1 s alatt 0.5 m^3 gáz áramlik át a szűrőn, így a szűrő működési ideje: $t = 10^6 \text{ s}$, azaz 277 óra, ami folyamatos üzemben 12 nap. Nyilvánvaló, hogy a mélységi szűrők általában nem alkalmazhatók a technológiai folyamatoknál gyakran előforduló g/m^3 nagyságrendű porkoncentrációjú gázok szűrésére, hiszen pl. $1 \text{ g}/\text{m}^3$ koncentrációnál valamivel több, mint félóránként kellene azokat cserélni. Ilyen célra a regenerálható szűrőket alkalmazzuk, amelyek lehetővé teszik a leválasztott por ciklikus eltávolítását, a szűrőréteg szűrési képességének helyreállítását. Ezekkel a szűrőkkel a következő fejezet foglalkozik.

8.4. A FELÜLETI SZŰRŐK

8.4.1. A felületi porréteg kialakulása

A szűrési folyamat elején, amikor a szűrőréteg mélységi szűrőként működik, a porszemcsék a tiszta szűrő mélységében nem egyenletesen rakódnak le az elemi szálakra, hiszen a szűrőréteg mélysége mentén csökken a porkoncentráció. Ezért a nyersgáz belépés közelében több, mélyebben kevesebb szemcse rakódik le. A szűrőréteg működésének első fázisában, amikor mélységi szűrőként működik, a szálakra feltapadt szemcsék növelik a leválasztás hatását, így a belépés közelében még több, beljebb pedig kevesebb szemcse választódik le. Ez az önmagát erősítő folyamat vezet el a szűrőréteg felületén a szűrő működése első fázisának végén egy **összefüggő porréteg** kialakulásához, amely átveszi az elemi szálak szerepét: a továbbiakban, a szűrőréteg működésének második fázisában döntően ez a réteg választja le a porszemcséket. Az elemi szálakból álló szűrőréteg feladata főként a porréteg "alátámasztása" marad.

A felületi porréteg kialakulását a szűrő megfigyelésén túl a nyomásvesztés mérésével lehet jól követni. A szűrő működésének első fázisában (mélységi szűrés) nyomásvesztése egyre rohamosabban nő a szűrt portömeg (a szűrési idő) függvényében (ld. **8.11. ábra**). Belátható, hogy az összefüggő porréteg kialakulása után (második fázis) a szűrőszálak és a közöttük lerakódott por nyomásvesztése tovább nem változik, a felületi porréteg nyomásvesztése viszont vastagságával, azaz a szűrt por mennyiségével arányos.



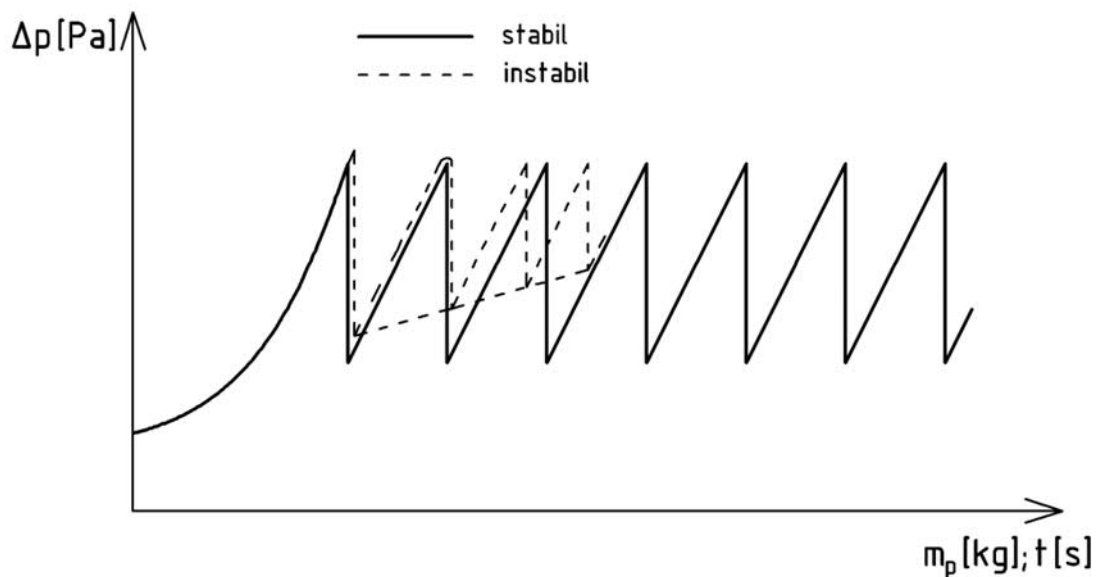
8.12. ábra Az összefüggő porréteg kialakulása a szűrő felületén

Következésképpen a nyomásvesztés első fázisban alulról domború görbéje a szűrő működésének második fázisában egyenessé válik. (Vastag porrétegek esetén a porrétegre ható, nyomásból származó erő "összeroppanthatja", tömörítheti a porréteget, ami miatt a nyomás lefutásában ugrások és meredekség változások figyelhetők meg.)

A **8.12. ábra** a szűrési idő függvényében mutatja egy szűrőréteg nyomásvesztésének változását (a szűrési sebesség 150 m/h, a nyersgáz koncentráció 3 g/m^3). A nyomásgörbe egyes pontjaihoz az elemi szálakról készült felvételek, valamint adatok tartoznak: W [g/m^2] szűrő által leválasztott por tömeg (a szűrő porterhelése), E a szűrő leválasztási foka és c_t [g/m^3] a tisztított gázban lévő por koncentrációja. Látható, hogy a szűrő elrakódása a nyomásvesztés és a leválasztási fok jelentős növekedésével jár: az eltömődési folyamat végén a szűrő felületén kialakul egy összefüggő porréteg (ami az ábrán nagyítva is látható), amely igen hatékonyan leválasztja a porszemcséket. Ezért ekkor a kilépő gázban lévő por koncentrációja igen kicsiny, 2.3 mg/m^3 értékű.

A szűrés második fázisát folyamatosan vastagodó összefüggő porréteg jellemzi, amelyben viszonylag kis méretű pórusok vannak, ezért igen hatékonyan választja le a porszemcséket. A felületi porréteg kialakulásának két igen fontos és előnyös következménye van:

- A porréteg, kialakulása után, hatékony leválasztási sajátosságai következtében megvédi a szűrőréteg belsejét az eltömődéstől.
- Az elemi szálakra lerakódott porszemcsékkel szemben, amelyek gyakorlatilag nem távolíthatók el, a szűrő felületén keletkező porréteg eltávolítható, és ilyen módon a szűrő regenerálható. A ciklikusan regenerált szűrő hosszú ideig használható a nyersgáz tisztítására, azaz felhasználásával a szűrőréteg portároló képességénél nagyságrendekkel nagyobb mennyiségű por választható le. Ezért a regenerálható (felületi) szűrőkkel lehetővé válik nagy porkoncentrációjú nyersgázok tisztítása.



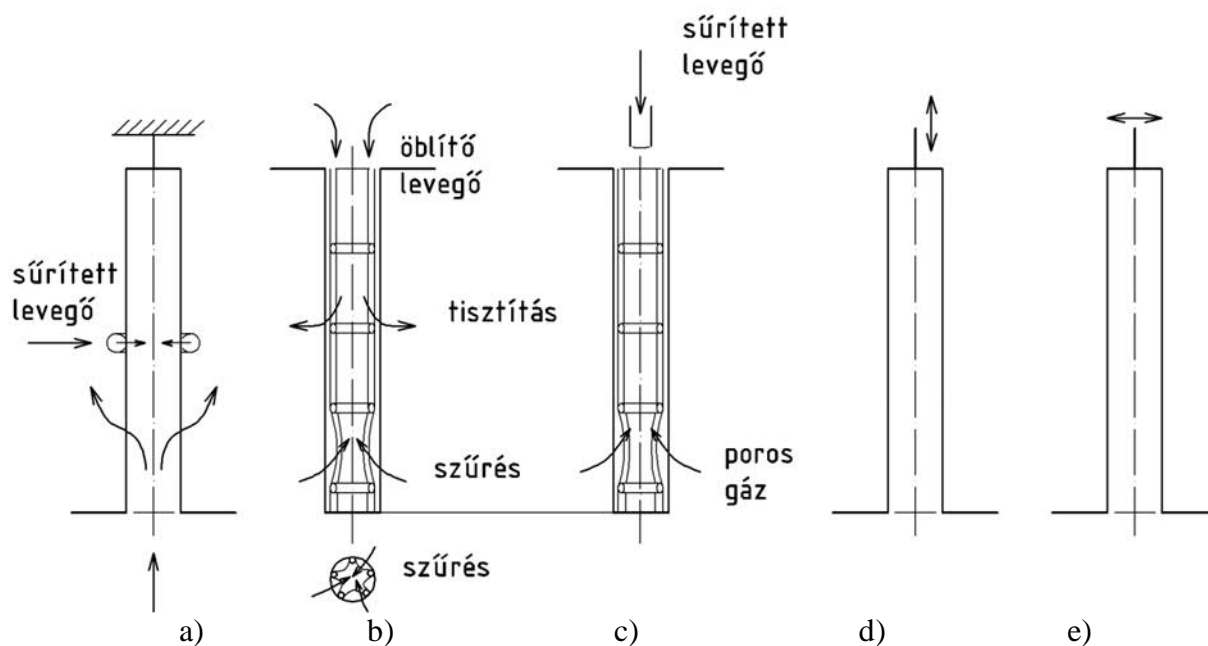
8.13. ábra A felületi szűrő nyomásvesztésének változása a szűrés során

A felületi szűrők nyomásvesztésének időbeli változását a **8.13. ábrán** látható "fűrészfog alakú" görbe mutatja. A tiszta szűrőn először kialakul a felületi porréteg, majd néhány kezdeti visszatisztítási (regenerálási) ütem után beáll egy stabil működés, amikor a felületre lerakódott porréteget azonos időszakonként rendszeresen eltávolítva (ld. később) a szűrő nyomásvesztése két érték között változik.

A **8.13. ábra** stabil működést mutat, amikor a nyomásvesztés lefutása a visszatisztítási ciklusokban reprodukálódik. A szűrőanyag, a szűrési sebesség, a visszatisztítás módja helytelen megválasztása esetén a ciklikus visszatisztítás során folyamatosan nő a visszatisztítás utáni nyomásvesztés, ami arra utal, hogy kevesebb por távozik el a szűrőről, mint amennyi egy ciklus alatt felkerül rá, azaz a szűrő fokozatosan eltömődik (instabil működés, ld. **8.13. ábra**).

8.4.2. Szűrő visszatisztítás, a porréteg eltávolítása

A felületi szűrők működésének egyik legfontosabb része a szűrőréteg felületén elhelyezkedő porréteg eltávolítása. A szűrőréteget általában hengeres zsákok, tömlők (ritkábban táskák) formájában alkalmazzák (8.13. ábra), amelyeknek a tisztítás módjától függően a belső vagy a külső felületén keletkezik a porréteg. A porréteg eltávolításához szükséges olyan erők működtetése, amelyek a porréteg és a szűrőréteg közötti vonzóerők ellenében működve a porréteget leválasztják a szűrőzsák felületéről. Az erők eredetüket tekintve áramlási eredetű vagy tehetetlenségi erők, vagy ezek kombinációi lehetnek.



8.14. ábra Visszatisztítási módszerek (a, b, c, d, e)

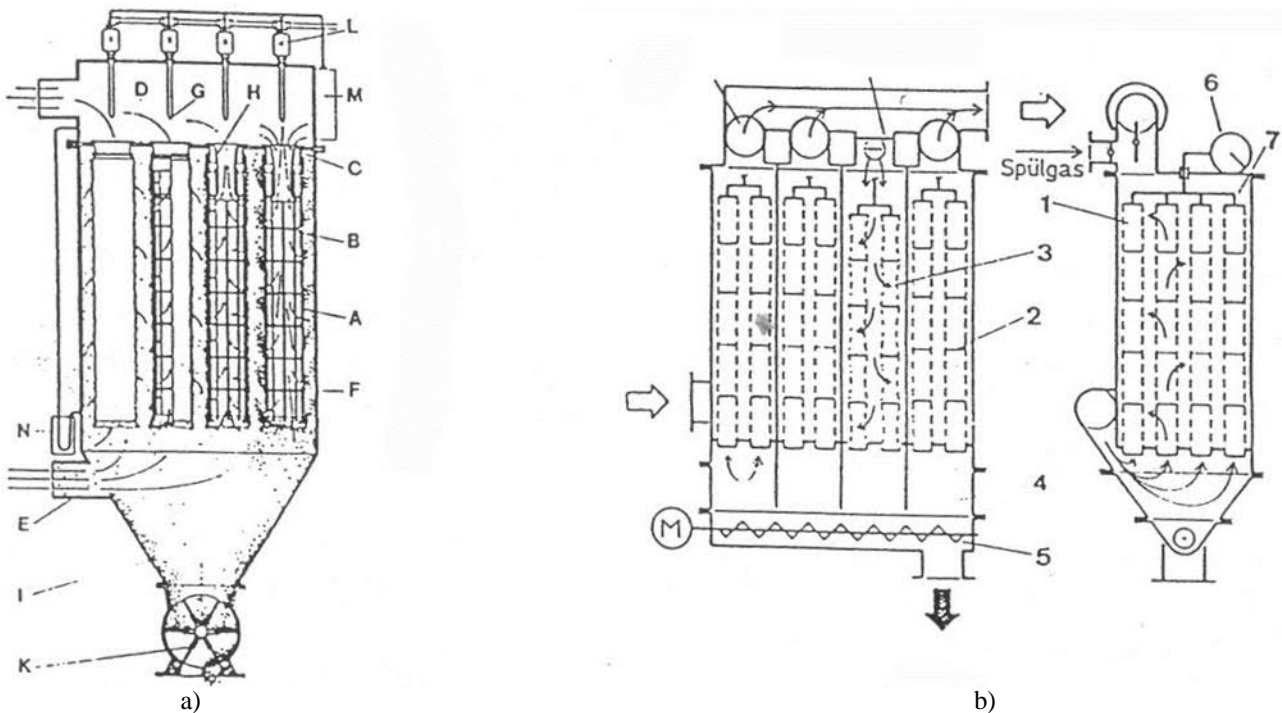
Ha a szűrés során a zsák belsejében rakódik le a por, a szűrőzsákon keresztül belülről kifelé áramlik a gáz, a zsák kifeszül. Ha egy, a belső kerületén réssel ellátott gyűrűt mozgatunk a zsák hossza mentén (8.14.a. ábra), és a résen keresztül sűrített levegőt fújunk át a szűrőn, az a belső felületre lerakódott porréteget az áramlási ellenállás erő hatására fellazítja, a zsák felületéről eltávolítja. Az összetapadt, és ezért viszonylag nagy süllyedési sebességű porszemcse konglomerátumok a nyersgáz áramlással szemben lehullanak a zsákok alatt elhelyezkedő porgyűjtő bunkerbe. Ennél az elrendezésnél a nyersgáz szűrése a tisztítás alatt folyamatosan zajlik (a szűrőzsákokat nem kell lekapcsolni az elszívó rendszerről a visszatisztítás alatt).

Gyakrabban alkalmazzák a szűrőzsákokat legkevésbé igénybe vevő ellenáramú áramlású visszatisztítási módszert. Ennél a zsákon keresztül az áramlási irány kívülről befelé, tehát a szűrőzsák külső felületére rakódik le a porréteg. Ilyen esetben szűrőkosarat kell alkalmazni, hogy a zsák az áramlási erők ellenében is kifeszülve maradjon. A szűrőréteg ráfeszül a tartó vázra, (kosárra, 8.14.b. ábra). A visszatisztítandó szűrőzsákokat leválasztják az elszívásról, a tiszta gáz oldalt a légkörrel osszenyitják. Miután a nyersgáz oldalon a nyomás kisebb, mint a külső nyomás, a szűrési sebességgel ellenkező irányú áramlás indul meg a szűrőzsák falán keresztül, amely ennek hatására deformálódik (a porréteg összetöredezik), kifeszül. A mechanikai hatások és a porrétegre ható, azt a szűrőről leválasztani törekvő áramlási ellenállás erő a porréteg összetapadt porszemcséit eltávolítja a szűrőzsák külső felületéről, és azok a zsák alatti porgyűjtő bunkerbe esnek.

Hasonló módon működik a sokkal intenzívebb visszatisztítást lehetővé tevő sűrített levegős lefúvatói módszer, amelynél vagy a visszatisztított szűrőzsák elszívásról való lekapcsolásával, vagy

anélkül egy, a zsák nyitott végénél elhelyezett fúvókából néhány tizedmásodpercen keresztül 3-6 bar nyomású sűrített levegő sugarat fújnak a zsákba (**8.14.c. ábra**). A szűrőréteg és a külső felületén a porréteg az áramlási eredetű erők hatására sugárirányban gyorsulva mozog, majd hirtelen kifeszül, lefékeződik. Ekkor a porréteget az arra ható tehetetlenségi erő leválasztja a zsák felületéről, és az összetapadt porszemcsék a porgyűjtő bunkerbe hullanak. A **8.15. a. ábra** egy sűrített levegő lefúvatású szűrőberendezést mutat, amelynek zsákjait visszatisztítás közben nem választjuk le az elszívásról. (Miközben a jobboldali zsákot tisztítják, a bal oldali három zsák szűrési ütemben működik.) A porbunkerbe hullott port forgócellás adagolóval távolítják el.

A szűrőzsák visszatisztítási módszerek másik csoportjába a mechanikus módszerek tartoznak, amelyeknél a szűrési iránya mindig belülről kifelé (szűrőkosár nem használható). A visszatisztítás alatt a szűrőzsákot lekapcsolják az elszívásról, megszüntetve ezzel a zsák kifeszülését és a porréteget a szűrőre szorító áramlási eredetű erőt. A szűrőzsák nyitott végét alul rögzítik egy, a nyersgáz és tiszta gáz teret elválasztó lemezen készített nyílások körüli peremhez. A visszatisztítási ütemben a zsák felső részét meghatározott ideig függőlegesen mozgatják (kopogtatják, felemelik, majd leejtik) vagy vízszintesen lengetik (**8.14.d., e. ábra**). A zsák tisztításának intenzitása (és ezzel az igénybevétele is) függ a mechanikus tisztítás paramétereitől (pl. a tisztítási ütemek száma, a rázás frekvenciája, amplitúdója, stb.). A **8.15. b. ábrán** egy kombinált mechanikus és ellenáramú átöblítéses szűrőberendezés látható. A szűrési irány belülről kifelé. Míg a balról harmadik szűrőcsoportot tisztítják, a többi szűrőcsoport szűrési ütemben működik. A harmadik szűrőcsoportot (szűrőkamrát) a felül látható két csappantyú elforgatásával leválasztjuk az elszívásról és az atmoszférára nyitjuk, és megindítjuk a 6. jelű excentert, amely a 7. jelű felfüggesztésen keresztül függőleges irányban rázza a szűrőzsákot. A szűrőzsákokba 2. jelű karikákat varrnak annak érdekében, hogy a szűrőzsákok az öblítőlevegő hatására ne záródjanak össze. A bunkerbe hullott port kihordó csigával távolítják el.



8.15. ábra Zsákos szűrő berendezések (a,b)

A zsákok visszatisztításának megválasztásánál követelmény a stabil működés (ld. előbb), ugyanakkor fontos szempont a visszatisztítás hatásossága, egyenletessége a zsák hossza mentén, az energiaigény (sűrített levegős lefúvatásnál) és a zsákok igénybevétele. Ez utóbbit nagy mértékben befolyásolja a zsák felerősítésének, befogásának, kifeszítésének módja.

A zsákok nagyobb igénybevétele és a nagy energiaköltség mellett azért sem célszerű a zsákokat "túltisztítani", mert a porréteg teljes eltávolítása esetén az új porréteg kialakulásáig jelentősen csökken a leválasztási fok. Általánosságban megállapítható, hogy a regenerálható felületi szűrőknél, amelyek leválasztási foka általában kiemelkedően jó (ezért terjed alkalmazásuk), a tiszta gázban található porszemcsék döntő többsége a visszatisztítás során keletkező mechanikai hatások következtében jut át a szűrőzsákon.

A tisztított zsákok elszívásról történő lekapcsolása bonyolultabb konstrukciót (és a meghibásodás lehetőségének növekedését) eredményez, ugyanakkor jelentősen javítja a visszatisztítás eredményességét. A szűrés közben sűrített levegővel tisztított zsákoknál ugyanis a sűrített levegő áramlásának megszűnését követően a leválasztott porszemcsék jelentős része a nyersgázzal együtt azonnal visszatér a szűrőzsák felületére.

A mélységi szűrőknél (a szűrés kezdeti időszakától eltekintve) a szemcsék

- általában a befogás révén mozdulnak el a gázhoz képest,
- a már lerakódott porszemcsékkel (A) lépnek érintkezésbe, és
- a van der Waals erő (α), és esetenként az elektrosztatikai eredetű erők (β) és/vagy a felületi feszültség (γ) teszi a szemcsehalmozatot kezelhetővé.

8.5. SZŰRŐANYAGOK

A szűrőberendezések működési elvéből következően a leválasztásban döntő szerepe van a szűrőanyagoknak. Zsákos szűrő berendezéseknél a szűrőanyag költsége a teljes költség 10-15%-át teszi ki. Ezért fontos feladat olyan megoldásokat alkalmazni, amelyek lehetetlenné teszik pl. a szűrőzsákok rövid időn belüli tönkremenetelét (pl. a megengedettnél nagyobb hőmérsékletű gáz átáramlása a szűrőkön, vagy a szűrők „elsárosodása” a nyersgáz nagy víztartalma következtében), ill. amelyek biztosítják a szűrőzsákok viszonylag hosszú élettartamát.

A szűrőanyagok gyártásuk szerint vagy szövetek, vagy filcek (nemezok) lehetnek. Előzőt sodrott fonalakból szövessel állítják elő, utóbbi elemi szálak halmaza, amelyet a szálak közötti súrlódás tart össze. A szálak közötti erőhatás növelhető a filc hőkezelésével, vagy/és adalékanyagok alkalmazásával. (A hőkezelés azért is fontos lehet, mert a szűrőréteg hő hatására zsugorodik, és ennek a használatbavétel előtt kell lejátszódnia, különben a zsugorodás veszélyezteti a szűrőberendezés működőképességét.) Nagyobb igénybevétel esetén használják a tűzött filcet, ahol a szűrőrétegen át speciális tűvel elemi szálakat húznak át. Még nagyobb igénybevételnél a filcet szövettel (támasztószövettel) kombinálják.

A szűrőanyagok megválasztásánál legfontosabb kritérium a szürendő gáz hőmérséklete, valamint sav vagy lúg tartalma. Ennek ismeretében megválasztható a szűrő anyaga. Szűrőket egészen 1000°C gáz hőmérsékletig használhatunk, de a nagy hőmérsékletű gázok tisztítására alkalmazható szűrőanyag ára igen magas.

Ezt követően kell figyelembe venni, hogy a szűrőanyagot mélységi, vagy felületi szűrőként kívánjuk használni. Előző esetben a szűrőréteg mechanikai igénybevétele kicsiny, a nagy portároló képesség fontos, ezért általában filc szerkezetű, kis szoliditású, viszonylag nagy (cm nagyságrendű) vastagságú szűrőt használunk. Felületi szűrőknél a viszonylag kisebb igénybevételű (ellenáramú öblítéses vagy mechanikus) visszatisztítás esetén szövetet, nagyobb igénybevétel esetén tűzött filcet alkalmazunk. A szoliditás sokkal nagyobb, hogy minél gyorsabban kialakuljon a felületi porréteg, a szűrőréteg vékony, 3-5 mm vastagságú. A szűrő felületét tapadós porok esetén forró hengerek között simítjuk, hogy elősegítsük a porréteg leválását, kevéssé tapadó poroknál pedig bolyhozással kerüljük el a "túltisztítást".

8.6. A MÉLYSÉGI ÉS FELÜLETI SZŰRŐK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

SZŰRŐ JELLEMZŐ	MÉLYSÉGI SZŰRŐ	FELÜLETI SZŰRŐ
por lerakódás	szűrőréteg belsejében elemi szálakra	szűrőréteg felületére
regenerálhatóság	nincsen, mert a por általában nem távolítható el az elemi szálakról, ezért az elrakódott szűrő cserélendő	van, mert a szűrő felületén kialakuló porréteg ciklikusan eltávolítható, azaz az elrakódott szűrő tisztítandó
nyersgáz porkoncentráció	kicsi (mg/m^3 nagyságrendű), mert a szűrő nem regenerálható, és portároló képessége korlátozott	nagy (g/m^3 nagyságrendű), mert a szűrő ciklikusan regenerálható
szoliditás	kicsi ($\alpha < 0.1$), mert fontos a portároló képesség, a kis áramlási ellenállás, és viszonylag kicsi a mechanikai igénybevétel	nagy ($\alpha = 0.2 - 0.4$), mert elő kell segíteni a felületi porréteg kialakulását, és nagyobb a szilárdsági igénybevétel
vastagság	nagy (cm nagyságrendű), mert fontos a nagy portároló képesség	kicsi (3-5 mm), mert a visszatisztításnál fontos a szövet deformálhatósága, és így csökkenthető a nyomásvesztés
szűrési sebesség	nagy ($v_f = 0.5 - 2 \text{ m/s}$), mert viszonylag kicsi a nyomásvesztés a szűrőrétegen keresztül	kicsi (v_f néhány cm/s), mert nagy a nyomásvesztés a porrétegen keresztül
szűrő jellemzők változása időben	működés közben folyamatosan növekvő, 1-hez tartó leválasztási fok és növekvő nyomásvesztés jellemző	visszatisztítási ciklusonként ismétlődően növekvő leválasztási fok és nyomásvesztés jellemző
folyamatok elméleti leírása	kidolgozottabb	kevésbé kidolgozott

IRODALOMJEGYZÉK

- Lajos, T. (2004) *Por leválasztása gázokból* (egyetemi előadás jegyzet)
- Lajos, T. (2015) *Az áramlástan alapjai* (egyetemi tankönyv)
- Lajos, T. (2002) *Basics of vehicle aerodynamics* (invited lecture presentation, University of Rome „La Sapienza“)
- Morelle, R. (2005) *Robot device mimics human touch*, BBC News 2006. June 8.
- Goodfellow-Tahti (2001) *Industrial Ventilation Design Guidebook*, London Academic Press, ISBN: 0122896769
- Aerosol & Particulate Research Laboratory (honlap)
- Beckman Coulter Counter Manual (honlap)