

6.3. Fluidizáció

6.3.1. Elméleti összefoglalás

A fluidizáció jelenségével a vegyiparban több helyen találkozhatunk. Példaként megemlítjük a fluidizációs szárítót, a fluidizációs pirit-pörkölőt, sőt több heterogén katalitikus reakció is fluidizált katalizátorszemcséken játszódik le.

Ha valamely fluidum szemcsés anyagon keresztül áramlik és az áramlási nyomásesés eléri a szemcsés réteg egységnyi rácsfelületre eső archimedesi súlyát, a réteg fellazul és az áramlási sebesség további növelésével a szemcsék lebegni kezdenek. A nyomásesés nem nő tovább, hanem konstans értéket vesz fel. Az így kialakuló ún. rácsnyomás ([1] 102. old.):

$$\Delta p = L(1 - \varepsilon)(\rho_p - \rho_f)g \quad (6.3-1)$$

ahol

L	a fluidizált réteg magassága
ε	a fajlagos hézagterfogat
ρ_p	a töltet sűrűsége
ρ_f	a fluidum sűrűsége

A töltet által elfoglalt oszlopmagasság, ha nem lenne hézag a szemcsék között, L_0 lenne (hézagmentes töltetmagasság).

$$L_0 = L(1 - \varepsilon) \quad (6.3-2)$$

Ez az érték állandó a fluidizáció során, tehát a nyomásesést a továbbiakban egységnyi redukált töltetmagasságra vonatkoztatjuk.

$$\frac{\Delta p}{L_0} = (\rho_p - \rho_f)g \quad (6.3-3)$$

Az áramlási nyomásesés a töltött oszlopok hidrodinamikai ellenállására levezetett összefüggés segítségével is kiszámítható:

$$\frac{\Delta p}{L_0} = 4f_m \frac{1}{d_p} \frac{v_0^2 \rho_f}{2} \quad (6.3-4)$$

ahol $v_0 = \bar{v}$ az üres oszlopra vonatkoztatott áramlási sebesség, m/s;

f_m	a súrlódási tényező;
d_p	a fluidizált részecskék átmérője, m.

Fluidizált állapotban a részecskére ható erők egyensúlyban vannak, azaz a közeg-ellenállási erő egyenlő az archimedesi súllyal.

$$\frac{D^2 \pi}{4} L_0 (\rho_p - \rho_f) g = \frac{D^2 \pi}{4} L_0 4 f_m \frac{1}{d_p} \frac{v_0^2 \rho_f}{2} \quad (6.3-5)$$

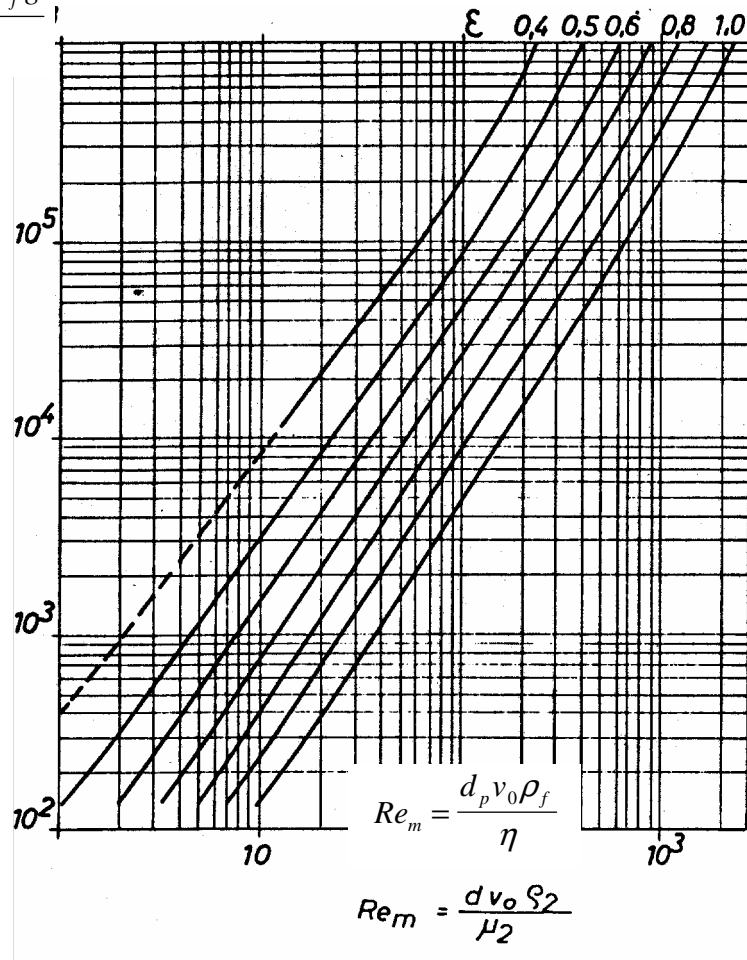
ahol

D a fluidizációs cső átmérője

A (6.3-5) egyenlőség átrendezésével kapjuk $f_m Re_m^2$ kifejezést, melynek értéke a Reynolds-szám függvénye.

$$f_m Re_m^2 = \frac{d_p^3 (\rho_p - \rho_f) \rho_f g}{2 \eta^2} = \frac{1}{2} Ar \quad (6.3-6)$$

$$f_m Re_m^2 = \frac{d_p^3 (\rho_p - \rho_f) \rho_f g}{2 \eta^2}$$



6.3-1. ábra

$f_m Re_m^2 - Re_m$ diagram fluidizációhoz

A 6.3-1. ábrán $f_m Re_m^2$ értéke látható a $Re_m = \frac{d_p v_0 \rho_f}{\eta}$ függvényében. A görbeseleg paramétere a relatív hézagterfogat (ε). Az ábra a kezdeti (v_0^*) és kihordási sebesség (v_0^{**}), illetve a fluidizált réteg magasságának számítására használható.

A kezdeti fluidizációs sebesség Ergun képletének felhasználásával is számítható. Nyugalmi állapotban a nyomásesés a töltött oszlopon [1]¹:

$$\Delta p = \frac{L}{d_p} \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \right) \left[1,75 + \frac{150(1-\varepsilon)}{Re_m} \right] v_0^2 \rho_f \quad (6.3-7)$$

Az (6.3-1) és (6.3-7) kifejezésekkel megadott nyomásesés a fluidizáció kezdetén fellépő erőegyensúly állapotában egyenlő, amelyből a következő kifejezést kapjuk:

$$Ar = \frac{Re_m^*}{\varepsilon^3} [1,75 Re_m^* + 150(1-\varepsilon)] \quad (6.3-8)$$

A nyugalomban lévő töltet ε értékét a (6.3-8) kifejezésbe helyettesítve és Re_m^* -ot kifejezve számítható v_0^* értéke.

$$Re_m^* = \frac{d_p v_0^* \rho_f}{\eta} = \frac{-150(1-\varepsilon) + \sqrt{[150(1-\varepsilon)]^2 + 1,75 \cdot 4\varepsilon^3 Ar}}{2 \cdot 1,75} \quad (6.3-9)$$

A kihordási sebesség az egyedi test ülepedési végsebességének számításával is meghatározható, mivel ekkor $\varepsilon = 1$. A (6.3-6) összefüggéssel definiált Archimedes-szám (Ar) a szemcse méretének ismeretében számítható ([1], 110. old.), majd a [1] 4.1. ábráján megadott általánosított ülepedési diagram felhasználásával meghatározzuk a Ljascsenko-szám (Lj) értékét, amelyből megkapjuk a keresett kihordási sebességet ($Re_m^{**} = \sqrt[3]{Lj \cdot Ar}$). Ha a kihordási sebesség nagy érték, feltételezhetjük, hogy az ülepedés a Newton tartományban történik ($C_D=0,44$). Ekkor az Archimedes- és a Ljascsenko-szám között a következő összefüggés áll fenn:

$$Lj^{2/3} = \frac{4}{3} \cdot \frac{Ar^{1/3}}{0,44} \quad (6.3-10)$$

¹ Re_p és Re_m definíciója azonos.

A kihordási sebességhez tartozó Reynolds-szám (6.3-10) felhasználásával:

$$Re_m^{**} = (L_j \cdot Ar)^{1/3} = \left(\frac{4}{3 \cdot 0,44} \right)^{1/2} Ar^{1/2} = 1,7408 \sqrt{Ar} . \quad (6.3-11)$$

6.3.2. A mérés leírása

A fluidizáló berendezés vázlata a 6.3-2. ábrán látható. A fluidizáció jelenségét 110 mm belső átmérőjű üvegcsőben tanulmányozzuk. A szemcsés anyag sűrűségét, a 102 és 103 számú rotaméterek kalibrációs táblázatait valamint a 210 és 213 számú mérőperemek geometriai adatait a készülék mellett kifüggesztett tábláról olvashatjuk le. A ventilátor megindítása előtt a 204 és 207 szelepek kivételével az összes szelepet lezárjuk.

A ventilátor megindítása után a 203 szelep kinyitásával legalább három különböző rotaméter állásnál (102 sz. rotaméter) mérjük a fluidizált rétegen létrejövő nyomásesést, a töltetmagasság közvetlenül cm-ben olvasható le.

Ezután a 205 szelep kinyitásával a 103 rotaméteren mérünk tovább (204 szelep elzárandó) ismét legalább 3 rotaméter állásnál. Az áramlási sebességet a 206 szeleppel szabályozzuk. Az előzőekhez hasonlóan a rotaméter felső méréshatárának elérése után a 210 mérőperemmel, majd – ha a 209 szelep teljes nyitása után sem történik kihordás – a 213 mérőperemmel mérjük az áramló levegő mennyiségét.

A mért nyomásesésből a térfogatáram az ismert módon számítható².

6.3.3. A mérés kiértékelése:

Ábrázoljuk log-log papíron az összetartozó $\Delta p/L_0 - v_0$ értékeket (v_0 az üres oszlopra számított lineáris áramlási sebesség).

Jelöljük meg a fluidizáció kezdetének és a kihordás kezdetének megfelelő mérési adatokat a diagramon és a mérési jegyzőkönyvben.

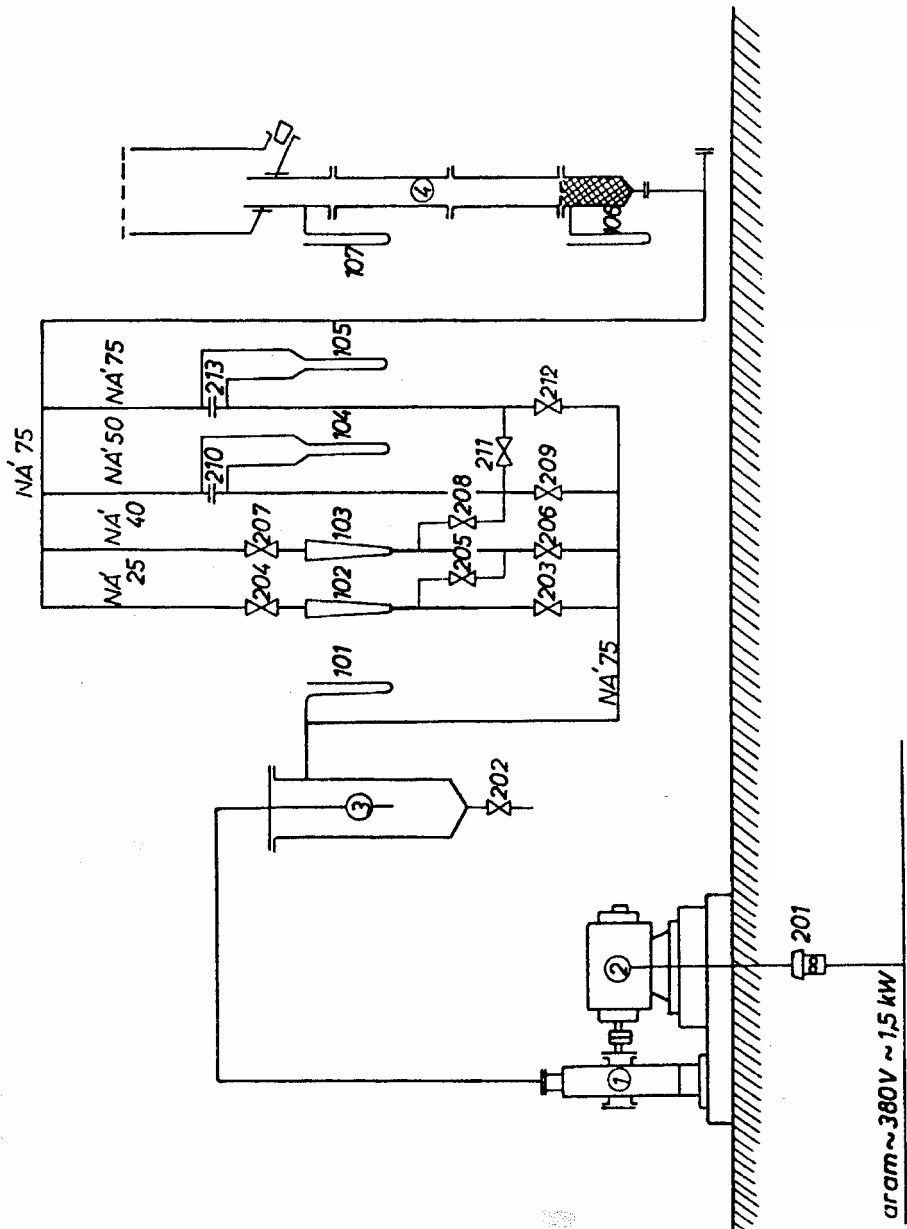
Ismert térfogatú (ajánlott: $V=100 \text{ cm}^3$) szemcsés anyag súlyát (G) megmérve számítsuk ki a nyugvó töltet látszólagos fajsúlyát (δ) és relatív hézagterfogátát (ε).

² A mérőperemen átáramló fluidum térfogatáramának számítására az MSZ 1709/14 szabvány egyenleteket közöl, melyek jelen leirat mellékletében és a Vegyipari Géptan jegyzetben megtalálhatók.

$$\varepsilon = \frac{V - G/\rho_p}{V} = 1 - \frac{\delta}{\rho_p} \quad (6.3-12)$$

Számítsuk ki az oszlopban levő töltet súlyát és hasonlítsuk össze a fluidizált állapotban a tölteten létrejövő nyomáscsökkenés mért értékéből származó nyomóerővel:

$$\frac{D^2 \pi}{4} L(1 - \varepsilon)(\rho_p - \rho_f)g = \frac{D^2 \pi}{4} \Delta p \quad (6.3-13)$$



6.3-2. ábra
 Fluidizációs kísérleti berendezés (gáz - szilárd)

Számítsuk ki a nyomásesést a (6.3-4) képlet segítségével is. A képletben szereplő f_m értéke nyugalmi töltet esetén a mért Re_m értékhez a 6.3-1. diagramról leolvasott $f_m Re_m^2$ -ből számítandó, fluidizált állapotban pedig a (6.3-6) összefüggéssel számított $f_m Re_m^2$ értékből adódik. A levegő sűrűsége a tökéletes gáztörvényből számítható. A részecskék átmérőjének meghatározásához mérjük le ismert számú ($n = 20 \dots 50$ db) gömböcskét analitikai mérleggel, a mért tömeget jelölje m . A mért adatokból számítható az átlagos szemcseátmérő:

$$d_p = \sqrt[3]{\frac{6m}{n\pi\rho_p}} \quad (6.3-14)$$

(A nyomásesés számítása fenti módon csak két-két mérési pontra végzendő el, és pedig egy $v_0 \cong 0,1 \dots 0,3$ m/s közötti tetszőleges értékre illetve a fluidizáció kezdete utáni első mérési pontra, ahol még jól meghatározható az L töltetmagasság). A nyugalomban lévő töltet nyomásesését számítsuk ki Ergun (6.3-7) képlettel minden, a fluidizáció kezdetét megelőző mérési pontban.

Számítsuk ki, hogy a kihordási sebesség hányszorosa a fluidizáció megindulásakor mért sebességnek.

A méréseket két különböző (legalább 12 cm) töltet magasságnál végezzük el.

Méréseinket a következő táblázatokba foglaljuk össze:

V térfogatú szemcsés anyag mért súlya $G =$

V térfogat =

Redukált töltetmagasság $L_0 = 1$. mérésorozat:

2. mérésorozat:

n darab gömböcske tömege $m =$

Lemért gömböcskék száma $n =$

A gömböcskék átlagos átmérője $d_p =$

Sor-szám	Rotaméter állás	Mérőperem		W m ³ /s	v_0 m/s	L m	Töltet Δp				ϵ
		h mm	Δp Pa				mért		$\Delta p/L_0$ mért (6.3-7)*		
							h mm	Δp Pa			

* csak a fluidizáció kezdetét megelőző mérési pontokban!

A fluidizáció kezdetét megelőző és az azt követő pontokra végzett számításaink eredményeiből készítsük el az alábbi táblázatokat:

Nyomásesések összehasonlítása	1. mérésorozat		2. mérésorozat	
	$L_{nyugvó} =$	$L_{fluid} =$	$L_{nyugvó} =$	$L_{fluid} =$
$W, \text{ m}^3/\text{s}$				
$\Delta p_{mért}$				
$\Delta p_{számított}$ (6.3-4. képlet)				
$\Delta p_{rácsnyomás}$ (6.3-3. képlet)				
$\Delta p_{sz} / \Delta p_m \cdot 100 \%$				
$\Delta p_r / \Delta p_m \cdot 100 \%$				

Kezdeti fluidizációs sebesség, v_0^* , m/s		Kihordási sebesség, v_0^{**} , m/s	
mért 1. sorozat 2. sorozat		mért 1. sorozat 2. sorozat	
számított 6.3-1. diagramból (6.3-9) -ből		számított 6.3-1. diagramból [1] 4.1. ábrájáról (6.3-11) -ből	

Irodalom:

[1.] Fonyó Zs., Fábry Gy.: Vegyipari művelettani alapismeretek. Nemzeti Tankönyvkiadó, 1998.

Készítette: Hunek József
Deák András

Ellenőrizte: Fonyó Zsolt

Melléklet a Fluidizáció című méréshez: Mérőperemen átömlő fluidum térfogatáramának számítása $D - D/2$ megcsapolás esetén³

$$W = CE\varepsilon \frac{d^2 \pi}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

ahol d a mérőperem belső átmérője, m

Δp mért nyomáscsökkenés, Pa

ρ a fluidum sűrűsége, kg/m³

E belépési tényező, $E = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}}$

$\beta = \frac{d}{D}$ átmérő viszony, D a csővezeték belső átmérője, m

ε expansziós szám. Folyadék áramlásakor $\varepsilon = 1$, gázok áramlása esetén

$$\varepsilon = 1 - (0,41 + 0,35\beta^4) \frac{\Delta p}{\kappa p_1}, \quad \text{ha } \Delta p \leq 0,25 p_1.$$

p_1 a mérőperem előtt mért nyomás, Pa

κ adiabatikus kitevő, levegőre $\kappa = 1,4$.

C sebességi tényező

$$C = 0,5959 + 0,0390 \frac{\beta^4}{1-\beta^4} + 0,0312\beta^{2,1} - 0,0158\beta^3 - 0,1840\beta^8 + \\ + 0,0029\beta^{2,5} \left(\frac{10^6}{Re_D} \right)^{0,75}$$

$$Re_D = \frac{Dv\rho}{\eta} = \frac{4W\rho}{D\pi\eta}$$

Mivel a C sebességi tényező függ a Re_D értékétől, tehát az ismeretlen térfogatáramtól, a számítás iterációt igényel. Microsoft Excel használata esetén válasszuk az automatikus iterációs számítási lehetőséget⁴, és ennek megfelelően írjuk be az egyes cellákba a számítási összefüggéseket (a Re_D -t számító cellában hivatkozunk a W -t számító cellára).

³ Lásd a Vegyipari Géptan II. jegyzet 74-77. oldalait.

⁴ Az "Eszköztár" menüben válasszuk a "Beállítások" sort, majd a "Számítások" ablakot aktivizálva a bal egérgombbal kattintsunk az "Iteráció" melletti négyzetre (az iteráció megengedett számán ne változtassunk).