

6.4. Nyomásesés mérése Raschig-gyűrűkkel töltött oszlopokon

6.4.1. Bevezetés

A töltött oszlopokban vagy rendezetlenül elhelyezett tölteléktestek, vagy pedig rendezett, drótból, lemezből vagy szövetből készült töltetek (betétek) helyezkednek el abból a célból, hogy a fázis-határfelületeket növeljék. Ez a félüzemi laboratóriumi gyakorlat az egyik leggyakrabban alkalmazott rendezetlen töltetes oszlop mérésével és értékelésével foglalkozik.

6.4-1. táblázat. Rendezetlen töltetek jellemző adatai*

Típus	d_a mm	ω m^2/m^3	ε m^3/m^3	δ kg/m^3
porcelán Raschig- gyűrű	10x10x1,8	440	0,65	900
	15x15x2,0	310	0,70	700
	25x25x3,0	195	0,73	620
	35x35x4,0	140	0,76	570
	50x50x5,0	98	0,77	555
porcelán Pall-gyűrű	25x25x3	220	0,75	620
	35x35x4	165	0,78	540
	50x50x5	120	0,78	555
polipropilén Pall-gyűrű	15x15	350	0,88	120
	25x25	220	0,91	76
	35x35	160	0,93	65
	50x50	110	0,93	65
	90x90	86	0,94	54
fém Pall-gyűrű	10x10x0,3	515	0,94	520
	15x15x0,3	360	0,95	385
	25x25x0,4	215	0,95	310
	35x35x0,6	145	0,95	330
	50x50x0,8	105	0,96	320
porcelán Berl-nyerg gyűrű	10x10	660	0,65	900
	15x15	430	0,66	700
	25x25	260	0,70	620
	35x35	178	0,73	570
	50x50	120	0,70	555

* A Raschig AG, D 6700 Ludwigshafen/Rhein prospektusa alapján

Az 6.4-1. táblázat áttekintést ad néhány fontos rendezetlen tölteléktípus jellemző adataról és méretéről. A 6.4-2. táblázatban a töltetekkel szemben támasztott követelményeket foglaltuk össze. Különösen fontos az a követelmény, hogy nagy elválasztó hatásfok járjon együtt kismértékű nyomásveszteséggel. Az egyik legrégebben használt töltet a Raschig-gyűrű.

A Raschig-gyűrűvel töltött oszlopokat igen széles körben használják a vegyiparban, elsősorban folyadék és gáz (gáz-mosó, abszorber, kihajtás), ill. folyadék és gőz ellenáramú érintkeztetésére (rektifikáló oszlop). (Először 1873-ban használtak Raschig-gyűrűt.) Ezenkívül hő-regenerátorban és gázfázisú katalitikus reakciónál használnak Raschig-gyűrűt töltetként ill. katalizátor hordozóként (gázfázisú-áramlás).

6.4-2. táblázat. A töltetekkel szemben támasztott követelmények

-
- Nagy elválasztóhatás
 - Nagy terhelhetőség
 - Kis nyomásveszteség
 - Nagy képesség az adott fázisegyenletlenség kiegyenlítésére és az oldalirányú fáziselkeverésre
 - Kis hajlandóság a pataképzésre és a radiális áramlásra, jó nedvesítés
 - Kielégítő mechanikai szilárdság nyomással és lökéssel szemben
 - Jó tisztíthatóság
 - Kis előállítási költségek
-

A Raschig-gyűrűre jellemző, hogy magassága egyenlő a külső átmérővel.

A töltött oszlop előnye a tányéros oszloppal szemben, hogy szerkezete egyszerűbb, ezért a beruházási költség kisebb. A gázfázis keveredése is jobb, mint a tányéros oszlopban és ez döntő fontosságú, ha a gázoldali anyagátadási tényező nagysága szabja meg az anyagátadás sebességét.

A töltött oszlop hátránya, hogy a terhelés ingadozásokkal szemben lényegesen érzékenyebb, mint a harangtányéros oszlop. A Raschig-gyűrűket főként kerámiából, fémből (saválló lemez), impregnált grafit stb. készítik, ezért a töltött oszlop súlya lényegesen nagyobb, mint a tányéros oszlopé. Újabban ezt a hátrányt is kiküszöbölték műanyag töltetek bevezetésével.

A tölteléktesteket a következő mennyiségekkel jellemzik: lineáris méretek, fajlagos felület (ω , ill. számos helyen a) és fajlagos szabad térfogat (ε). A töltet fajla-

gos felülete (ω , m^2/m^3): a tölteléktestek mértani felületének összege 1 m^3 oszlop-térfogatban. A töltet fajlagos szabad térfogata ε (m^3/m^3) a szabadon maradt térfogat 1 m^3 töltött térfogatban.

A töltet fajlagos szabad térfogata számszerűen megegyezik a fajlagos szabad áramlási keresztmetszet átlagértékével (m^2/m^2).

Fel kell a figyelmet hívni arra, hogy a táblázatokban megtalálható adatok csak közelítő értékek, mivel ω , ε és δ értéke a töltet rendezettségétől is függ.

A töltött oszlop méretezésénél, az anyagátbocsátás sebességére jellemző HTU érték mellett rendkívül fontos az oszlopon fellépő nyomásesés ismerete, különösen hőérzékeny anyag vákuumban történő rektifikálásánál. Ezenkívül a nyomásesés jellemző a töltött oszlopban kialakuló kétfázisú áramlás jellegére. Először a száraz tölteten fellépő nyomáseséssel foglalkozunk.

A száraz töltet ellenállása

Amikor a gáz száraz tölteten halad keresztül, három hidrodinamikai tartományt (lamináris, átmeneti, turbulens) különböztetünk meg. Az egyfázisú áramlás hidrodinamikai viszonyait a Reynolds-szám nagysága határozza meg.

$$Re_p = \frac{d_p \bar{v} \rho}{\eta} \quad (6.4-1)$$

ahol \bar{v} az üres oszlopkeresztmetszetre vonatkoztatott gázsebesség (m/s)

ρ a gáz sűrűség (kg/m^3)

η a gáz dinamikus viszkozitása ($\text{kg}/\text{m s}$)

d_p a Raschig gyűrű jellemző mérete (m)

$$d_p = 6 \frac{1 - \varepsilon}{\omega} (m) \quad (6.4-2)$$

A tölteléktestek jelenléte miatt az áramlás már kisebb sebességnél turbulens, mint üres csőben.

Brauer (1957) kereskedelmi tölteteket tartalmazó oszlopokon mért adatai alapján Reichelt (1974) továbbfejlesztette a tömör szemcsékkel töltött oszlopok nyomásesésének számítására kidolgozott Ergun összefüggést ([1.] 95. old. 3.64). Raschig gyűrűre:

$$\Delta p = \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \left[1,75 + \frac{150(1 - \varepsilon)}{Re_p E^{n-1}} \right] \frac{\ell}{d_R} \bar{v}^2 \rho \quad (6.4-3a)$$

ahol

$$d_R = d_p E^{n-1} \quad (6.4-3b)$$

$$E = \frac{1 - \left(\frac{d_i}{d_a}\right)^2}{1 + \frac{2}{3} \frac{d_i}{d_a} - \frac{1}{3} \left(\frac{d_i}{d_a}\right)^2}, \quad \text{ún. üregtérfüggvény} \quad (6.4-3c)$$

$$n = \frac{(D/d_i)}{\left[\varepsilon(D/d_i)^2\right]^{0,4} + \left[0,01\varepsilon(D/d_i)^2\right]^{0,75}} \quad (6.4-3d)$$

d_i a Raschig gyűrű belső átmérője (m)

d_a a Raschig gyűrű külső átmérője (m)

D az oszlop belső átmérője (m)

ℓ a töltetréteg magassága (m)

A (6.4-3a) - (6.4-3d) összefüggések érvényességi tartománya:

$$1,6 < D/d_a < 42 \quad \text{és} \quad 0,56 < \varepsilon < 0,97.$$

Kast egyenlete (1964) szintén az Ergun összefüggés továbbfejlesztett változatának tekinthető, amely a lamináris-, átmeneti- és turbulens tartományra is érvényes:

$$\Delta p = \mu \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \left[\frac{2,03(1 - \varepsilon)^{0,1}}{Re_p^{0,1}} + \frac{72(1 - \varepsilon)}{Re_p} \right] \frac{\ell}{d_p} \bar{v}^2 \rho \quad (6.4-4)$$

ahol μ empirikus szorzótényező, értéke függ a töltet típusától, méretétől, az oszlop átmérőjétől. Raschig gyűrűre értéke a mérettől függően 3,10 és 3,60 között változik.

Ha a töltet átmérő/oszlop átmérő arány (d_a/D) nagyobb 1/20-nál, akkor a töltetek a fal mentén nem tudnak olyan szorosan elhelyezkedni, mint az oszlop belsejében. Így az oszlop fala mellett a hézagterefogat (ε) nagyobb az átlagosnál. A falnak ez a hatása ε -ra kb. két töltet-átmérőnyi mélységig terjed a rétegbe. Ez a falhatás a legkülönbözőbb alakú részecskék esetén megfigyelhető. Mivel a hézagterefogat az oszlop-keresztmetszetben nem egyenletesen oszlik el, ezért a sebességeloszlás sem lesz egyenletes, a fal melletti gyűrű alakú keresztmetszetben az áramlási sebesség nagyobb az átlagértéknél. Ha $d_a/D > 1/20$, akkor minden esetben a faltól kb. 1,5 töltet átmérőnyire sebességmaximumot találunk.

A falhatást a (6.4-3a) egyenletben az E kitevőjében szereplő n (6.4-3d) kifejezése veszi figyelembe, a (6.4-4) összefüggésben pedig μ empirikusan meghatározott értéke tartalmazza.

Kétfázisú áramlás hidrodinamikája töltött oszlopon

A töltött oszlopban lejátszódó anyagátbocsátási folyamatot az áramlási viszonyok erősen befolyásolják. A kétfázisú áramlás jellege három tényezőtől függ: *töltet mérete, folyadék és gáz fizikai kémiai tulajdonságai, terhelés*. Mi csak az utóbbi hatását fogjuk vizsgálni.

Állandó folyadékterhelés mellett a gázsebesség növelésének függvényében vizuálisan a következő tartományokat figyelhetjük meg:

1. Szabad áramlás tartománya. Kis gázsebesség. A folyadék vékony rétegben, patakokban csorog lefelé. A töltet felületének csak kis részét nedvesíti a folyadék, ezért a két fázis érintkezési felülete kicsi. A gáz áramlása nem idéz elő látható változást a folyadékáramlás jellegében. A folyadék betáplálás következtében a töltet szabad keresztmetszete a száraz állapothoz képest nem csökken lényegesen.
2. Az átmeneti tartományban a fázisok kölcsönhatása még nem jelentős. A nedvesített felület nő. Az átmenet az 1. és 2. tartomány között nem éles.
3. Turbulens folyadékfilm tartománya. A gázsebesség további növelésekor a folyadékkal nedvesített töltetfelület jelentős mértékben megnő. A gázáram helyenként felszakítja a folyadékfilmet, a film felülete örvénylő. A gáz kinetikus energiájának egy része arra használódik fel, hogy lefékezi, torlasztja a folyadékot az oszlopban. A gázáramlásra rendelkezésre álló szabad keresztmetszet csökken.
4. Gáz-diszpergálás tartománya. A gázsebességet tovább növelve a folyadék kitölti a szabad térfogatot. A gáz csak buborékok formájában tud a tölteten levő folyadék rétegen áttörni. A gáz diszpergálva van a folyadékban. A gáz diszpergálása a legszűkebb keresztmetszetben következik be először, ez bárhol kialakulhat a tölteléktestek rendezetlen betöltése miatt. A két fázis érintkezése igen bensőséges, ennek következtében az anyagátbocsátás lényegesen jobb, mint az előző tartományokban.
5. Elárasztás. A gázsebesség olyan nagy, hogy megakadályozza a folyadék lefelé csorgását. Ennek következtében újabb folyadék mennyiség gyűlik össze az oszlopban, végül az egész szabad térfogat megtelik folyadékkal és a töltet felett is folyadékréteg lesz.

Nyomáskereső kétfázisú áramlásnál

A kétfázisú áramlásnál a folyadék elfoglalja a szabad térfogat egy részét. Az oszlopban összegyűlt folyadék térfogatot (V_L) megmérve, számítható ε_L

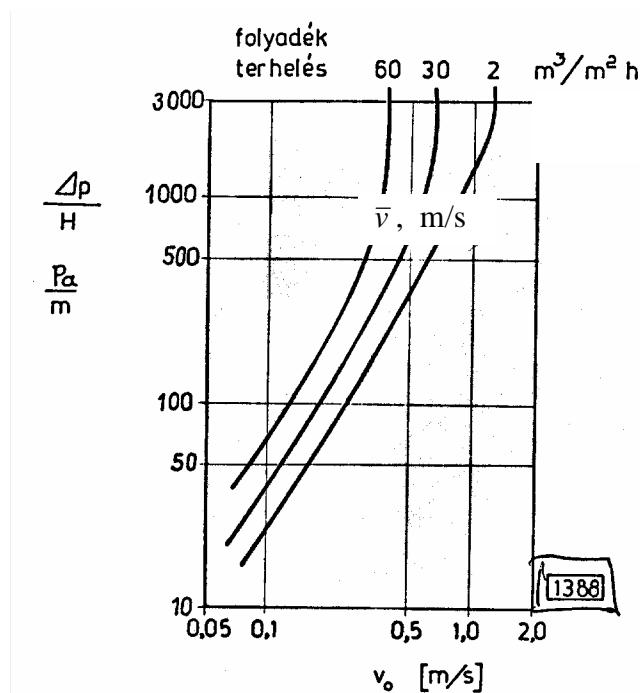
$$\varepsilon_L = \frac{V_L}{V} \quad \text{a folyadék hold-up (m}^3\text{/m}^3\text{)} \quad (6.4-5)$$

V az üres oszlop térfogata.

A nedvesített tölteten fellépő nyomásesésre hasonló összefüggés érvényes, mint a száraz töltet esetén. Ebben az esetben f értéke a fajlagos folyadékterhelés nagyságától is függ. Kereskedelmi töltetek nyomásesésének számítására Leva állított fel egyszerű általánosított egyenletet:

$$\frac{\Delta p}{l} = \left(\frac{1C}{l} \cdot \frac{\Delta p}{l} \cdot \alpha \cdot 10^{\beta L} \left(\frac{G^2}{\rho} \right) \right), \text{ Pa/m} \quad (6.4-6)$$

ahol L és G a folyadék ill. a gáz (gőz) keresztmetszet egységre vonatkoztatott tömegáramai ($\text{kg/m}^2\text{s}$), az α és β pedig az alkalmazott töltet típusától és méretétől függő állandók (l. [1.] 785. oldalán a 20.4. táblázatot). Pl. 13 mm-es kerámia Raschig töltetre $\alpha = 10$ és $\beta = 0,1$.



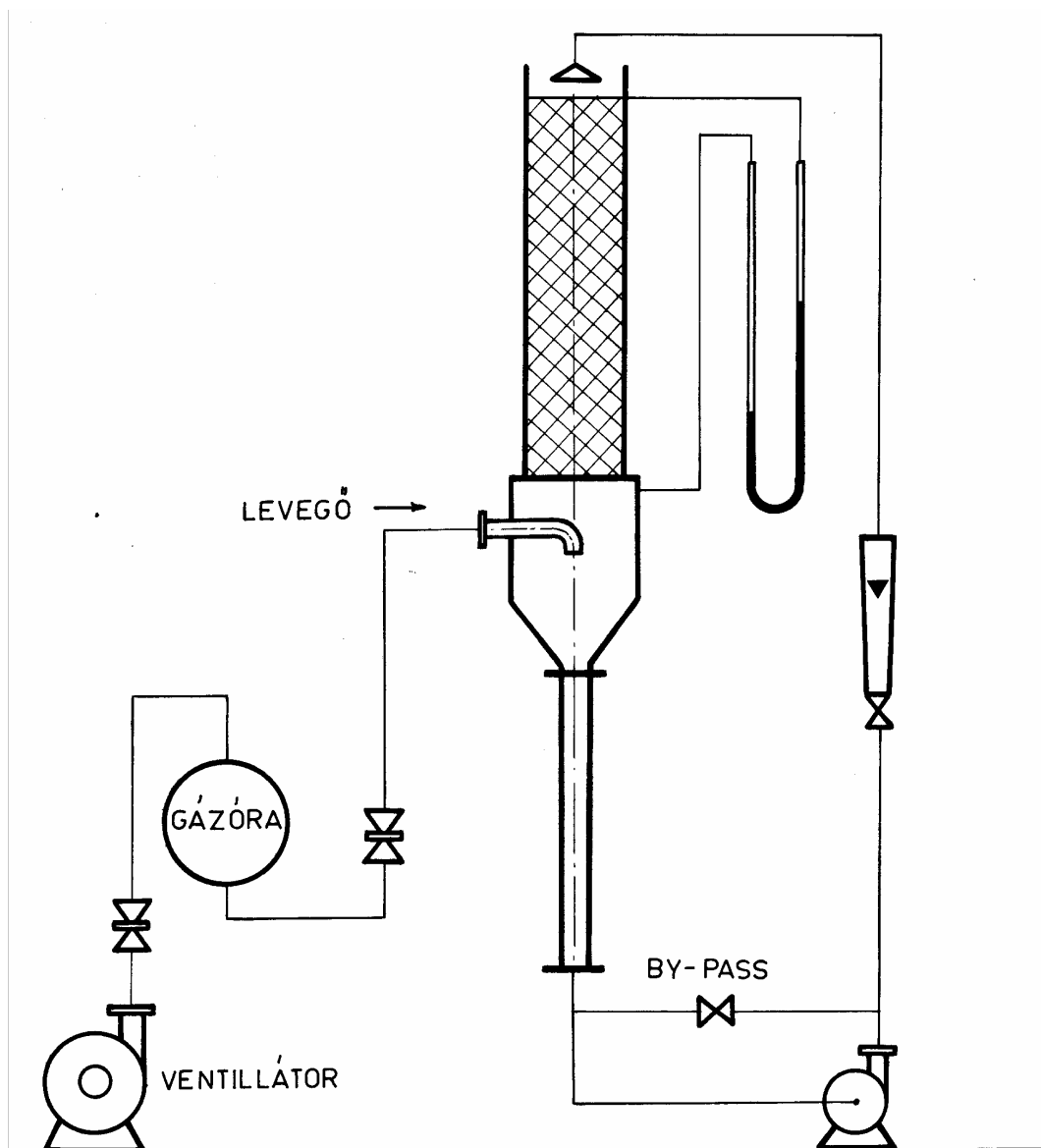
6.4-1. ábra. A nyomásesés függése a \bar{v} gázsebességtől
8 mm-es Raschig gyűrű, $\varepsilon = 0,921$. Oszlop átmérő: 41,5 mm

A nyomásesés minden hidrodinamikai tartományban kifejezhető a (6.4-6) összefüggéssel lényegében azonos egyszerű hatvány függvény formájában (lásd a 6.4-1. ábrát)

$$\frac{\Delta p}{\ell} = C \bar{v}^m \quad (6.4-7)$$

6.4.2. Kísérleti berendezés leírása

A félüzemi berendezés felépítését vázlatosan a 6.4-2. ábra mutatja. Az oszlop belső átmérője $D = 110$ mm, a töltött szakasz magassága $\ell = 1000$ mm. Az oszlop 15 mm-es (falvastagsága 2,5 mm) mázatlan kerámia Raschig-gyűrűkkel van feltöltve ($\omega = 310$ m²/m³; $\varepsilon = 0,70$ m³/m³). A töltött szakaszon fellépő nyomáscsökkenést vízzel töltött U-csöves manométerrel mérjük. (A rendezett töltetszerkezetet tartalmazó oszlophoz vezető csővezetékben lévő tolózárnak zárva kell lennie. Ellenőrizzük a mérés megkezdése előtt.)



6.4-2. ábra.
Töltött oszlop mérése

6.4.3. Mérési utasítás

1. Először a száraz töltet ellenállását mérjük különböző gázsebességeknél (maximum 10 mérési adat). A mérés megkezdése előtt a ventilátor szállítóvezetékében lévő tolózár teljesen elzárjuk. A ventilátort bekapcsolva a tolózár nyitásával beállítjuk a gáz térfogatáramot a kívánt értékre.

2. A mérésvezető által megadott fajlagos folyadékterhelésnél meghatározandó a nedvesített töltet ellenállása és a folyadék hold-up a gázsebesség függvényében (6-8 mérési adat). Vizuális megfigyelés alapján jegyezzük fel, hogy melyik hidrodinamikai tartományban dolgozunk. A folyadék hold-up különösen a gáz diszpergálás és az elárasztás tartományában csak lassan (néhány perc alatt) éri el a stacioner értéket. Minden mérésnél meg kell várni, míg beáll a stacionárius állapot (Δp értéke nem változik). A kerülő (by-pass) vezetékben található szelepet csak annyira zárjuk el, hogy a folyadékszállítás megfelelő legyen.

A tölteten összegyűlt víz-térfogat (V_L) mérése: A tölteten visszatartott folyadék térfogata egyenlő a folyadék-térfogat változással az alsó üveghengerben. (Az üvegcső belső átmérője 46 mm.) Ha a hold-up mérésére szolgáló üvegcsőben a víznívó nagyon lecsökkent, akkor ismert térfogatú vizet töltünk mérőhengerből a töltött oszlopba felső végén. Ezt a vízmennyiséget feljegyezzük, és a továbbiakban V_L számításánál figyelembe vesszük.

6.4.4. Mérési adatok kiértékelése

1. Száraz töltet ellenállása

A (6.4-3a...d) és a (6.4-4) egyenletek alapján számítandó a száraz töltet (Δp) nyomáscsökkenése [a (6.4-4) egyenletben $\mu = 3,1$]. A mért és a számított Δp értékeket ábrázoljuk a gázsebesség (\bar{v}) függvényében log - log koordináta rendszerben (1. diagram).

2. Nedves töltet ellenállása

A konstans fajlagos folyadék terhelés mellett mért ($\Delta p/\ell$) értékeket ábrázoljuk \bar{v} függvényében (2. diagram). Ugyancsak ábrázolják a (6.4-6) egyenlettel számított ($\Delta p/\ell$) értékeket is. A mérési pontokat egyenes szakaszokkal összekötve határozzuk meg a \bar{v} hatványkitevőjét az egyes hidrodinamikai tartományokban. Rajzoljuk fel a hold-up ε_L - \bar{v} összefüggést is log - log koordináta rendszerben (3. diagram).

Irodalom:

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

Készítette: Sawinsky János
Deák András

Ellenőrizte: Fonyó Zsolt