Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar
Kémiai és Környezeti Folyamatmérnöki Tanszék

Félüzemi fluidizációs mérőberendezés tervezése

TDK-dolgozat

Készítette:

Kató Zoltán

Vegyészmérnöki szak (BSc)

Általános vegyipari és folyamatmérnöki specializáció

Témavezető: **Dr. Benkő Tamás**
Adjunktus
BME Kémiai és Környezeti Folyamatmérnöki Tanszék

2014

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés 5
2. Irodalmi áttekintés 6
2.1 A fluidizáció elméleti háttere 6
2.1.1 A fluidizáció jelensége 6
2.1.2 Fluidizáció folyadékkal 8
2.1.3 A töltetre jellemző paraméterek 8
2.1.4 Nyomásesés álló ágyon 9
2.1.5 A fluidizációhoz szükséges minimális hézagtérfogat meghatározása 10
2.1.6 A rácsnyomás meghatározása 11
2.1.7 A fluidizációhoz szükséges minimális térfogatáram meghatározása 11
2.1.8 A fluidizált ágy kiterjedése 13
2.1.9 A kihordási sebesség számítása 15
2.2 A fluidizáció gyakorlati alkalmazása 15
2.2.1 A fluidizált ágy alkalmazásának előnyei 15
2.2.2 A fluidizáció alkalmazása 15
2.3 A fluidizációhoz kapcsolódó mérőeszközök 17
2.3.1 A térfogatáram mérésére szolgáló eszközök 17
2.3.2 A nyomáskülönbség mérése 20
3. Célkitűzés 21
4. Számítások 22
4.1 Tervezési megkötések 22
4.2 Az oszlop magasságának meghatározása 22
4.3 A töltet kiválasztása 22
4.4 Az oszlop átmérőjének meghatározása 28
4.5 Az oszlophoz tartozó segédberendezések tervezése 33
4.5.1 Áramlásrendező tervezése 33
4.5.2 Töltettartó rács tervezése 35
4.5.3 A kihordást megakadályozó rács tervezése 35
4.5.6. Nyomásesés számítása az oszlopon 38
4.6 A mérőberendezések és szelepek méretezése és elhelyezése 39
4.6.1 Mérőperem tervezése 39
4.6.2 Rotaméterek méréshatárának meghatározása 44

4.6.3 A berendezés vázlatos rajza 44
4.6.4 Szelepek méretezése 45
5. Összefoglalás 49
6. Irodalomjegyzék 50
7. Függelék 51
7.1 Jelölésjegyzék 51
7.2 Hallgatói segédlet a fluidizációs méréshez 53

1. Bevezetés

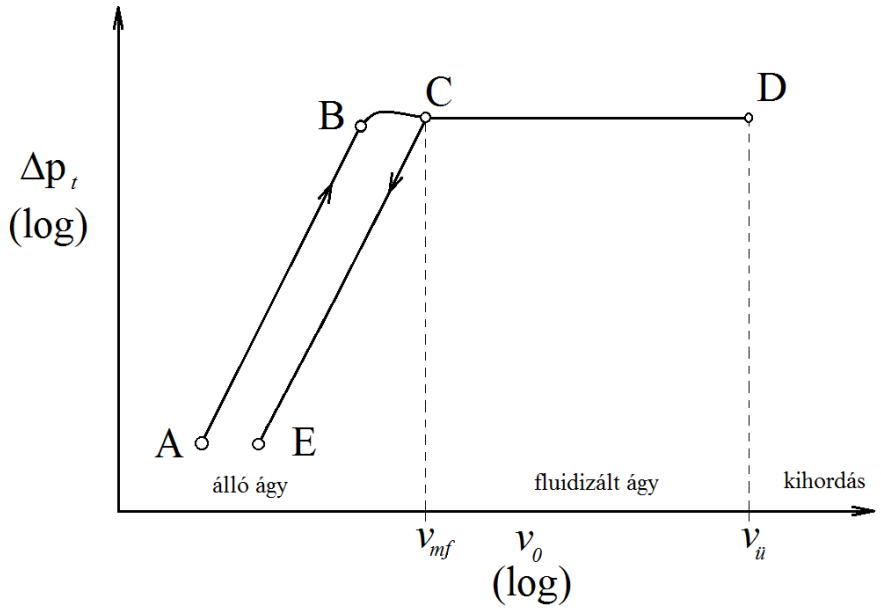
2013 nyarán lezajlott a Vegyipari Műveletek Félüzemi Laboratórium költöztetése a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem K épületéből az újonnan felépített DCs épületbe. Egyes mérőberendezések átköltöztetése állapotuk miatt nem volt lehetséges. Ezek közé tartozott a fluidizációs mérés elvégzésére szolgáló oszlop, és a hozzá tartozó áramlásmérők is. A Kémiai és Környezeti Folyamatmérnöki Tanszék megbízásából a tudományos diákköri munkám keretében egy új mérőberendezést terveztem, amely alkalmas a fluidizáció jelenségének vizsgálatára. Az oszlopban a megrendelő kérésére szilárd anyag fluidizációja történik víz által, így a tervezés során – ahol lehetséges volt – kifejezetten folyadékkal történő fluidizációra vonatkozó összefüggéseket használtam fel. A víz nagy sűrűsége miatt kiemelt figyelmet fordítottam az áramlástani számításokra és a segédberendezések megfelelő méretezésére. A kész terveket átadtam a kivitelezőnek. A készülékkel a hallgatók egy olyan jelenséget vizsgálhatnak majd laboratóriumi mérés keretében, amit az élelmiszer- és vegyipar számos területén alkalmaznak.

2. Irodalmi áttekintés

2.1 A fluidizáció elméleti háttere

2.1.1 A fluidizáció jelensége

Ha egy töltött csőben áramló fluidum üres oszlopra vonatkoztatott áramlási sebességét (v_0) növeljük és közben mérjük a töltet nyomásesését, majd ezeket logaritmikus skálán ábrázoljuk, akkor a *2.1 ábrán* látható görbét kapjuk [1,2].



2.1. ábra: Nyomásesés a tölteten v_0 függvényében [1]

Az A és B pontok közötti szakaszon a töltet nyugalomban van. Itt az Ergun-képlet értelmében a nyomásesés először a sebességgel arányosan, majd nagyobb áramlási sebességeknél a sebesség négyzetével nő (logaritmikus skálán ábrázolva ez közel egyenest ad). Ez azonban felfelé áramló fluidumban csak addig érvényes, míg az így számított nyomásesés el nem éri a töltetnek az 1 m^2 rácsfelületre eső archimedesi súlyát (B pont). E pillanatban a részecskék – amennyiben szoros elrendeződésűek voltak - fellazulnak, és kezdenek elrendeződni a legkisebb ellenállás irányába. A sebesség növelésével az ellenállás tovább nő, majd egy maximum után kissé csökken, mivel az elrendeződés, fellazulás jobban csökkenti az ellenállást, mint ahogy a sebesség növelné azt. A C pont után a részecskék elválnak egymástól, és a fluidumban egyenként lebegnek. Ez a pont a fluidizáció kezdőpontja,

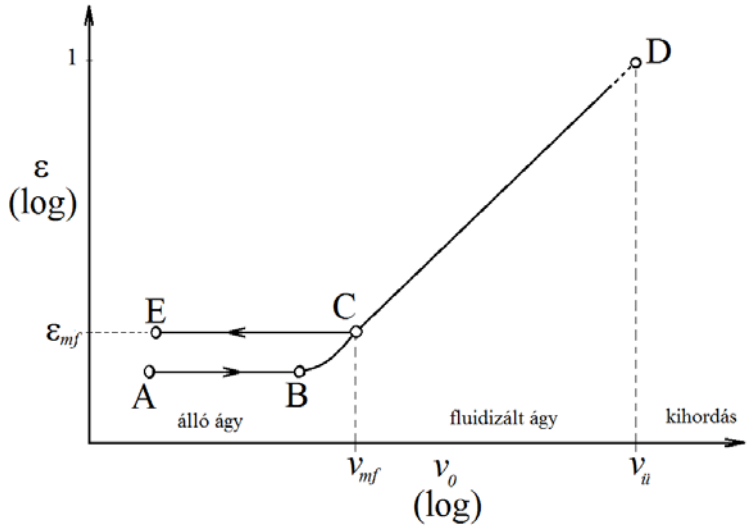
az ehhez tartozó áramlási sebesség pedig a minimális fluidizációs sebesség (v_{mf}). Ha a sebességet tovább növeljük, az ágy kiterjed és a nyomásesés állandó marad. Ezt a konstans nyomásesést, amit rácsnyomásnak is szoktak nevezni a következő képlettel számíthatjuk [3]:

$$\Delta p_r = L(1-\varepsilon)\left(\rho_p - \rho_f\right)g \qquad (2.1.1.1)$$

A képletben ε a relatív hézagtérfogatot jelenti, melyet a következő képlettel határozhatunk meg:

$$1-\varepsilon = \frac{M}{\rho_p AL} \qquad (2.1.1.2)$$

M az oszlopban lévő töltet tömege, *A* az oszlop keresztmetszetének a területe, *L* a fluidizált ágy magassága. A (2.1.1.1-2) képletekből következik, hogy *L*(1- ε) konstans. Fluidizált állapotban tehát a nyomásesés a relatív hézagtérfogat - és az ágymagasság - folyamatos növekedése miatt állandó mindaddig, míg a fellazulás el nem éri azt a mértéket, melynél már az egyes részecskék oly távol vannak egymástól, hogy nem befolyásolják egymást (D pont). Ezen a ponton megkezdődik a kihordás, a sebességet tovább növelve valamennyi részecske távozik az oszlopból az áramló fluidummal együtt. Ideális esetben, ha nincs falhatás és a fluidum áramlási sebessége a teljes keresztmetszet mentén állandó, a D ponthoz tartozó áramlási sebesség az egyedi test ülepedési végsebessége ($v_{ü}$). Ha a kihordás bekövetkezése előtt elkezdjük csökkenteni az áramlási sebességet, a nyomásesés a DCE görbe mentén változik. Ennek oka, hogy ülepedéskor a töltet nem szorosan, hanem véletlenszerűen rendeződik. Az így kialakuló hézagtérfogat a fluidizációhoz szükséges minimális hézagtérfogat (ε_{mf}). Ha ez után újra növeljük az áramlási sebességet, a nyomásesés az ECD görbe mentén változik, ha ezt követően csökkentjük az áramlási sebességet, ismét a DCE görbe mentén változik a nyomásesés. A *2.2 ábrán* is az előbbiekben ismertetett folyamat látható, a logaritmikus tengelyeken a relatív hézagtérfogatot és áramló fluidum üres oszlopra vonatkoztatott áramlási sebességét ábrázolva.



2.2.ábra: Relatív hézagtérfogat v_0 függvényében [1]

2.1.2 Fluidizáció folyadékkal

Folyadékkal történő fluidizálás esetén a sebesség növekedésével együtt jár a fellazulás és a részecskék turbulens mozgása. A folyadék és a részecskék együttes mozgása mintegy homogén fázist képez, ezért homogén fluidizálásnak nevezik. Ez az állapot sokban hasonlít a klasszikus gázállapothoz: a részecskék olyan szabadon mozognak a homogén közegben, mint a gázmolekulák a gázfázisban [3]. Ha ezt az állapotot nem sikerül megvalósítani, heterogén fluidizációról beszélünk. A két fluidizációs típus közötti határt a Froude-szám szabja meg:

$$Fr = \frac{v_0^2}{g * d_p} \qquad (2.1.2.1)$$

Ha *Fr* <1 homogén fluidizációról, ha *Fr* >1 heterogén fluidizációról beszélünk. Folyadéknál rendszerint a kihordásig sem éri el a Froude-szám az 1-es értéket, ezért a folyadékok fluidizációja mindig homogén marad [3].

2.1.3 A töltetre jellemző paraméterek

Szilárd anyagokat alkalmazó műveletek esetén fontos a részecskék megfelelő jellemzése. A jellemző méret egy vagy több hosszérték, ami a részecskét jellemzi. Például, egy gömb jellemző mérete az átmérő, egy henger jellemző méretei az átmérő és a magasság. A mérnöki gyakorlatban alkalmazott egyenletek általában egyetlen, a részecskére jellemző

hosszméret ismeretét követelik meg. Gömb esetén ez a gömb átmérője, egyéb - akár szabálytalan – részecskékre a következő jellemző méretek határozhatók meg [1]:

a) Térfogati átmérő ($d_{p(V)}$)

Annak a gömbnek az átmérője, melynek térfogata megegyezik a vizsgált részecske térfogatával. (V_p a vizsgált részecske térfogata)

$$d_{p(V)} = \left(\frac{6V_p}{\pi}\right)^{1/3} \tag{2.1.3.1}$$

b) Felületi-térfogati átmérő ($d_{p(SV)}$)

Annak a gömbnek az átmérője, melynek felület/térfogat aránya azonos a részecske felület/térfogat arányával. (A_p a vizsgált részecske felülete)

$$d_{p(SV)} = \left(\frac{6V_p}{A_p}\right) \tag{2.1.3.2}$$

Nem gömb alakú testek jellemzője a szfericitás, mely a gömbalaktól való eltérést fejezi ki. Definíció szerint:

$$\phi = \frac{a\ részecskével\ azonos\ térfogatú\ gömb\ felszíne}{a\ részecske\ felszíne} \tag{2.1.3.3}$$

A (2.1.1.1-3) egyenletekből következik, hogy:

$$d_{p(SV)} = \phi d_{p(V)} \tag{2.1.3.4}$$

2.1.4 Nyomásesés álló ágyon

Az iparban gyakran alkalmaznak olyan készülékeket, amelyeknek belsejét tölteléktestekkel töltik ki. A töltött oszlopok feladata általában az, hogy növeljék a fázisok érintkezési felületét. A szemcsék vagy tölteléktestek között hézagok, üregek, csatornák, kis kapillárisok vannak. Ezekben áramlik a fluidum [3].

A töltetes készülék hidraulikai ellenállása nagyobb az üres készülék ellenállásánál. A nyomásesést a tölteten az Ergun-képlettel számíthatjuk, mely a lamináris és turbulens tartományra is érvényes [3].

$$\Delta p = v_0^2 \rho_f \left(\frac{L}{\phi d_{p(V)}}\right) \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \left[\frac{150(1-\varepsilon)}{\phi Re_p} + 1{,}75\right] \tag{2.1.4.1}$$

$$\mathrm{Re_p} = \frac{d_{p(V)} v_0 \rho_f}{\eta_f} \qquad (2.1.4.2)$$

Alkalmazhatóságának feltétele, hogy nem áll elő csatornaképződés és nincs jelentős falhatás, ennek elkerülése végett az oszlopátmérő a tölteléktest átmérőjének legalább 8-10-szerese [3].

2.1.5 A fluidizációhoz szükséges minimális hézagtérfogat (ε_{mf}) meghatározása

Fluidizációs oszlopok tervezésénél szükséges a fluidizációhoz szükséges minimális hézagtérfogat (ε_{mf}) ismerete. Ha egy töltet hézagtérfogata ez alatt van, akkor a rajta keresztül áramló fluidum nyomásesése a hézagtérfogat növekedése mellett addig nő, míg a hézagtérfogat értéke el nem éri ε_{mf}-et. Ekkor megkezdődik a fluidizáció.

Ez az érték sima felületű, egyforma gömbökből álló töltetre általában 0,4, de a részecske alakjának változásával jelentősen változhat [1]. Leva a fluidizációhoz szükséges minimális hézagtérfogat meghatározásához egy diagramot javasolt, melyről a szemcseátmérő és az anyagi minőség ismeretében leolvasható a keresett ε_{mf}. A diagram hátránya, hogy csak 0,4 mm-es $d_{p(V)}$-ig használható, korlátozott számú anyagra [2].

A fluidizációhoz szükséges minimális hézagtérfogat Chen szerint a töltet szfericitásának függvénye:

$$\varepsilon_{mf} = \frac{0{,}415}{\phi^{0{,}483}} \qquad (2.1.5.1)$$

Az egyenlet érvényességi tartománya $0{,}2 < \phi \leq 1$ és $d_{p(V)} > 0{,}05$ mm [1].

A fluidizációhoz szükséges minimális hézagtérfogat egyszerűen mérhető, amennyiben a töltet és a fluidizációhoz használt fluidum rendelkezésre áll. A legpontosabb, hogyha a mérést a tervezett fluidizációs oszlopban végezzük: az ismert tömegű és sűrűségű töltetet fluidizáljuk, majd hirtelen elzárjuk a folyadékot. A részecskék térfogatának és az ágy térfogatának hányadosa (1 - ε_{mf}) -et adja. Ha a mérés ilyen módon nem megvalósítható, 0,8-nál nagyobb szfericitású töltet ε_{mf} értékére megfelelő becslést adhat az is, ha egy mindkét végén zárt hengerbe ismert mennyiségű töltetet rakunk, majd a hengert lezárjuk és hirtelen megfordítjuk. ε_{mf} az előző módszerrel analóg módon számítható. Mindkét módszernél ügyelni kell rá, hogy a méréshez elég töltetet használjunk fel, vagyis a nyugalmi töltetmagasság legalább a méréshez használt oszlop átmérőjének kétszerese legyen [1].

2.1.6 A rácsnyomás meghatározása

A fluidizáció jelensége akkor kezdődik, amikor a töltet ellenállásából származó erő megegyezik a töltet archimedesi súlyával, azaz egységnyi felületre vonatkoztatva a töltet nyomásesése egyenlő a rácsnyomással. A rácsnyomás [3]:

$$\Delta p_{\mathrm{r}} = \frac{\text{archimedesi súly}}{\text{keresztmetszet}} = \frac{\mathrm{V}(\rho_{\mathrm{p}}-\rho_{\mathrm{f}})\mathrm{g}}{\mathrm{A}} = \frac{\mathrm{L}(1-\varepsilon)\mathrm{A}(\rho_{\mathrm{p}}-\rho_{\mathrm{f}})\mathrm{g}}{\mathrm{A}} \tag{2.1.6.1}$$

$$\Delta p_r = L(1-\varepsilon)(\rho_p - \rho_f)g = L_0(\rho_p - \rho_f)g \tag{2.1.6.2}$$

2.1.7 A fluidizációhoz szükséges minimális térfogatáram (W_{mf}) meghatározása

A fluidizációhoz szükséges minimális térfogatáram (W_{mf}) a fluidizációhoz szükséges minimális áramlási sebesség (v_{mf}) és az oszlop keresztmetszetének szorzataként számítható. Az oszlop keresztmetszete annak átmérőjétől függ, ami tervezési paraméter, v_{mf} viszont a töltet és a fluidum tulajdonságainak függvénye.

$$v_{mf} = f(\varepsilon_{\mathrm{mf}}, d_{p(V)}, \phi, \rho_p, \rho_f, \eta_f) \tag{2.1.7.1}$$

A fluidizáció kezdetekor $\varepsilon = \varepsilon_{\mathrm{mf}}$, és a töltet nyomásesése megegyezik a rácsnyomással. A (2.1.4.1) és (2.1.6.2) egyenleteket egyenlővé téve, $v_0 = v_{mf}$-et és $\varepsilon = \varepsilon_{\mathrm{mf}}$-et behelyettesítve:

$$\frac{\Delta p_r}{L} = (1-\varepsilon_{\mathrm{mf}})(\rho_p - \rho_f)g = \frac{150\, v_{mf}\, \eta_f (1-\varepsilon_{\mathrm{mf}})^2}{\phi^2 d_{p(V)}^2 \varepsilon_{mf}^3} + \frac{1{,}75 v_{mf}^2\, \rho_f (1-\varepsilon_{\mathrm{mf}})}{\phi\, d_{p(V)} \varepsilon_{mf}^3} \tag{2.1.7.2}$$

Az egyenlet némi átrendezéssel a fluidizációhoz szükséges minimális Reynolds-számra nézve (Re_{mf}) másodfokú egyenletté alakítható.

$$Re_{mf}^2 + \frac{150}{1{,}75}\frac{(1-\varepsilon_{\mathrm{mf}})}{\phi} Re_{mf} - \frac{\phi\, \varepsilon_{mf}^3\, Ar}{1{,}75} = 0 \tag{2.1.7.3}$$

, ahol

$$Re_{mf} = \frac{d_{p(V)} v_{mf}\, \rho_f}{\eta_f} \tag{2.1.7.4}$$

és

$$Ar = \frac{d_{p(V)}^3 \rho_f (\rho_p - \rho_f) g}{\eta_f^2} \tag{2.1.7.5}$$

A (2.1.7.3.) egyenlet valós gyöke:

$$Re_{mf} = \sqrt{C_1^2 + C_2 Ar} - C_1 \tag{2.1.7.6}$$

, ahol

$$C_1 = \frac{150(1-\varepsilon_{mf})}{2\phi(1{,}75)} = 42{,}86\frac{(1-\varepsilon_{mf})}{\phi} \tag{2.1.7.7}$$

és

$$C_2 = \frac{\phi \varepsilon_{mf}^3}{1{,}75} = 0{,}5714\phi\varepsilon_{mf}^3 \tag{2.1.7.8}$$

Re_{mf} számításához a fenti módszer szerint ε_{mf} és ϕ ismerete szükséges. Mivel ez a számítási módszer meglehetősen érzékeny az ε_{mf} értékére, továbbá az Ergun-egyenlet konstansai nem teljes körűen elfogadottak, az egyes kutatók által kísérletek alapján javasolt C_1 és C_2 értékek a kísérleti adatokkal jobb egyezést adhatnak [1]. Ezek előnye még, hogy segítségükkel ε_{mf} és ϕ pontos ismerete nélkül is meghatározható a fluidizációhoz szükséges minimális Reynolds-szám.

Lucas és társai a következő értékeket javasolták [4]:

C_1	C_2	feltétel
29,5	0,0357	$0{,}8 \leq \phi \leq 1$
32,1	0,0571	$0{,}5 \leq \phi < 0{,}8$
25,2	0,0672	$0{,}1 < \phi < 0{,}5$

Chen szerint tetszőleges alakú részecskékre C_1 és C_2 a következő képletekkel számolható, ha ϕ ismert vagy jól becsülhető [5]:

$$C_1 = 33{,}07\phi^{0{,}1} \tag{2.1.7.9}$$

és

$$C_2 = \frac{0{,}0408}{\phi^{0{,}45}} \tag{2.1.7.10}$$

2.1.8 A fluidizált ágy kiterjedése

Ha a fluidizációhoz szükséges minimális térfogatáramnál nagyobb térfogatáramú folyadékot engedünk az oszlopra, a nyomásesés konstans marad, és egyenlő lesz a rácsnyomással. Fluidizált állapotban tehát a nyomásesés a relatív hézagtérfogat folyamatos növekedése miatt állandó mindaddig, míg a fellazulás el nem éri azt a mértéket, melynél már az egyes részecskék oly távol vannak egymástól, hogy nem befolyásolják egymást, és rájuk nézve már érvényes az egyedi test ülepedési végsebessége. E pillanatban megkezdődik a kihordás: a töltet nem marad az oszlopban, hanem az áramló fluidummal együtt távozik [3].

Fluidizációs oszlopok tervezésekor fontos, hogy az áramlási sebesség függvényében ki tudjuk számolni a relatív hézagtérfogatot, így a fluidizált ágy magasságát. Az e célra kifejlesztett, elméleti úton levezethető egyenletek közül kiemelkedik a Grbavčić és társai által javasolt egyenlet. A kutatók az összefüggés levezetéséhez kontinuitási és momentum egyenleteket, valamint peremérték-probléma megoldásokat használtak fel [6]. Ez az egyenlet bármilyen áramlási tartományban alkalmazható, és jól leírja a 180 és 920 közötti ülepedési Reynolds-szám tartományban tetszőleges alakú részecskék viselkedését. Hátránya, hogy alkalmazásához ismerni kell a töltet ülepedési határsebességét ($v_{ü}$), a fluidizációhoz szükséges minimális hézagtérfogatot (ε_{mf}) és áramlási sebességet (v_{mf}).

Tetszőleges alakú testek ülepedési Reynolds-számát, ebből pedig ülepedési sebességét Haider és Levenspiel szerint a következő egyenletekkel számolhatjuk [7]:

$$Re_{ü} = Ar^{1/3}\left(\frac{18}{Ar^{2/3}} + \frac{2{,}335 - 1{,}744\phi}{Ar^{1/6}}\right)^{-1} \qquad (2.1.8.1)$$

$$Re_{ü} = \frac{d_{p(V)} v_{ü} \rho_f}{\eta_f} \qquad (2.1.8.2)$$

Az egyenlet érvényességi tartománya $0{,}5 \leq \phi < 1$ és $25000 < Re_{ü}$.

A (2.1.8.1-2) egyenletekkel a végtelen térre vonatkoztatott ülepedési sebességet számolhatjuk. Ha figyelembe szeretnénk venni, hogy a test egy véges kiterjedésű oszlopban ülepedik, korrekciót kell alkalmazni. A *k* korrekciós tényező és a végtelen térre vonatkoztatott ülepedési sebesség szorzata a korrigált ülepedési sebesség.

$$v_{ü}' = k v_{ü} \qquad (2.1.8.3)$$

A korrekciós tényező számítására az irodalomban számos összefüggés található. Azt, hogy ezek közül melyik a legmegfelelőbb, az ülepedési Reynolds-szám és a töltet alakjának figyelembevételével kell eldönteni [8].

A korrigált ülepedési sebesség ($v'_{ü}$), fluidizációhoz szükséges minimális hézagtérfogat (ε_{mf}) és áramlási sebesség (v_{mf}) meghatározása után a Grbavčić és társai által javasolt egyenlet segítségével tetszőleges hézagtérfogathoz számíthatjuk az üres oszlopra vonatkoztatott áramlási sebességet:

$$v_0 = v_{mf}\left[\frac{\varepsilon^3(1-\varepsilon)\alpha'_{mf}}{\varepsilon_{mf}^3(1-\varepsilon_{mf})\alpha'}\right]^{1/2} \tag{2.1.8.4}$$

, ahol

$$\frac{\alpha'}{\alpha'_{mf}} = (1-B_2) + \frac{1}{\lambda_B}\left\{1-\left[\lambda_B\left(\frac{\varepsilon-\varepsilon_{mf}}{1-\varepsilon_{mf}}\right)+B_1\right]^2\right\}^{1/2} \tag{2.1.8.5}$$

$$B_1 = \left[1+\left(\frac{v_{mf}^2}{v'^2_{ü}\varepsilon_{mf}^3}\right)\right]^{-1/2} \tag{2.1.8.6}$$

$$B_2 = \frac{(1-B_1^2)^{1/2}}{(1-B_1^2)^{1/2}-B_1} \tag{2.1.8.7}$$

$$\lambda_B = (1-B_1^2)^{1/2} - B_1 \tag{2.1.8.8}$$

A fenti egyenletnél jóval egyszerűbb, empirikus összefüggést javasolt Richardson és Zaki [2]:

$$\frac{v_0}{v_{ü}} = k\varepsilon^n \tag{2.1.8.9}$$

, ahol *k* a falhatásért felelős paraméter, *n* pedig egy kísérletileg meghatározható kitevő. Az *n* kitevő gömbökre jól becsülhető, más testekre azonban a mai napig sem sikerült megbízható összefüggést felállítani [8]. Ennek ellenére Pjontek és Macchi kísérletei alapján kijelenthető, hogy a Newton-tartományban ($Re_{ü}$ > 500) ülepedő homogén testek esetén $n \approx 2{,}4$, amennyiben $\phi > 0{,}8$ [8].

2.1.9 A kihordási sebesség számítása

A kihordási sebesség az egyedi test ülepedési végsebességének számításával is meghatározható. Ilyenkor ε = 1. Az ülepedési sebességet – és így a kihordási sebességet – a fentebb ismertetett (2.1.8.1-3) egyenletekkel határozhatjuk meg. Megfigyelhető még, hogy a (2.1.8.4) egyenlet határértéke ε = 1-nél $v_{ü}^{'}$.

$$\lim_{\varepsilon \to 1} v(\varepsilon) = v_{ü}' \qquad (2.1.9.1)$$

2.2 A fluidizáció gyakorlati alkalmazása

2.2.1 A fluidizált ágy alkalmazásának előnyei

A fluidizált ágyaknak számos előnye van az álló ágyakkal szemben. Ha a töltet fluidizált állapotba kerül, folyadékhoz hasonlóan kezd viselkedni: a gázzal fluidizált szilárd anyag felszíne forró folyadékhoz hasonlít. A gázzal fluidizált ágyon lebegnek az ágynál kisebb sűrűségű testek, a nagyobb sűrűségű testek pedig elsüllyednek. A fluidizált ágy folyadékszerű viselkedése lehetővé teszi, hogy a szilárd anyagot folyadékként kezeljük. Ily módon a szilárd anyag folyamatos adagolása és elvétele is lehetségessé válik [1].

A fluidizált ágy alkalmazásának nagy előnye az ágyon belüli szinte tökéletes keveredés, ami lehetővé teszi, hogy erősen exoterm vagy endoterm reakcióknál is egyenletes hőmérséklet-eloszlást biztosítsunk. A kiváló keveredés miatt a szilárd-fluidum érintkeztetés is sokkal intenzívebb, mint álló ágyak esetén, ezért jobb hő- és anyagátadási tényezőkkel számolhatunk [1].

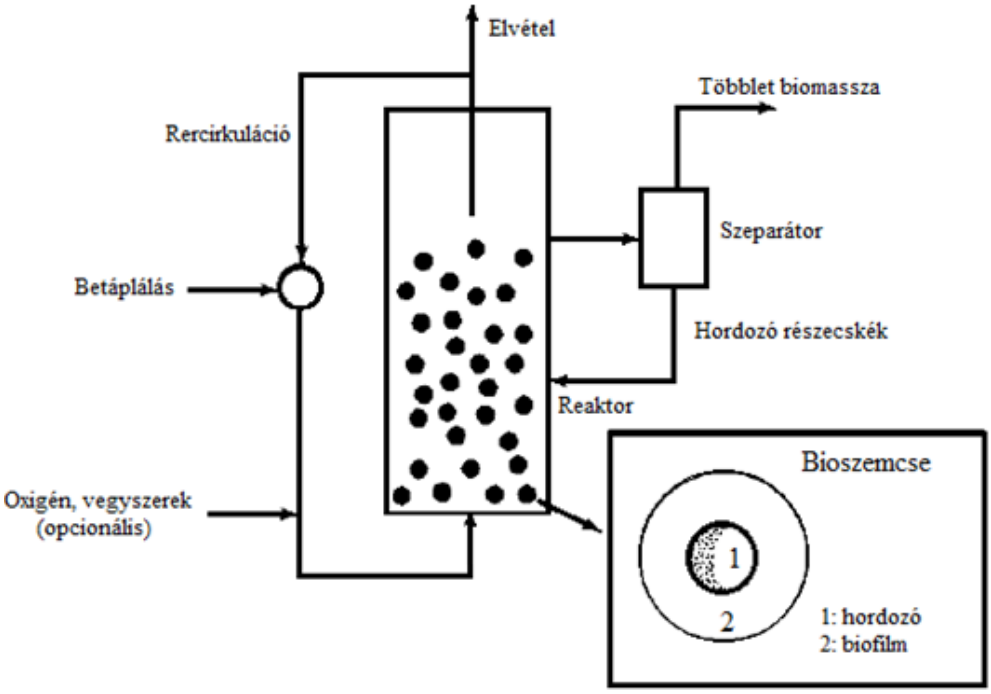
2.2.2 A fluidizáció alkalmazása

A fluidizáció legelterjedtebb alkalmazásai a gáz-szilárd fluidizációt alkalmazó rendszerek, például a kőolajiparban használt fluid katalitikus krakk (FCC), az élelmiszeriparban gyakran alkalmazott fluidizációs szárító és a szén égetésére kifejlesztett fluidizációs égetők.

A folyadékkal fluidizált ágyak alkalmazásai közül némelyik, mint a szemcsés anyagok osztályozása több mint száz éves, de egyesek, mint a fluidizált ágyas elektrolízis és fluidizált ágyas bioreaktor napjaink kutatásának eredményei. Az ipari és kereskedelmi jelentőségük a gáz-szilárd fluidizációt alkalmazó technológiák jelentőségével még nem összemérhető [1].

A szilárd-folyadék fluidizáció egyik legelterjedtebb alkalmazása a fluidizált ágyas bioreaktorokkal történő szennyvízkezelés. Ezekben a reaktorokban gyakran képződik gáz, de amennyiben a gáz hidrodinamikailag elhanyagolható, a reaktor kétfázisú fluidizációként kezelhető. Ilyen reaktorokban általában szilárd hordozóhoz kötött enzimeket alkalmaznak. Az inert hordozóra felvitt enzimek, valamint a felületen megkötődött mikroorganizmusok egybefüggő bevonatot, egy úgynevezett biofilmet alakítanak ki, melyen végbemennek az enzimkatalizált reakciók. Az inert hordozóra és a biofilmre gyakran összefoglaló névvel bioszemcseként utalnak. A szennyvízkezelésnél leggyakrabban alkalmazott hordozók a homok és az aktív szén. Ez utóbbi szimultán adszorbeálja a szerves szennyeződéseket is. A biofilm növekedésének hatására megváltozik a bioszemcse mérete és effektív sűrűsége, ennek hatására pedig a fluidizációs tulajdonságai is. Ez a jelenség megnehezíti a reaktor tervezését és üzemeltetését [1].

Egy tipikus fluidizált ágyas bioreaktort mutat be a *2.3. ábra*. A bevezetett szennyvíz az oszlopban alulról fölfelé áramlik, és fluidizálja a bioszemcséket. A reakcióelegy egy része az oszlop oldalán eltávolítható. Az eltávolított reakcióelegyből hidrodinamikai vagy mechanikai módszerekkel leválasztható a felesleges biomassza, a részecskék pedig visszavezethetők az oszlopba. A tisztított szennyvíz az oszlop tetején lép ki. Ennek egy része – ha szükséges – refluxként visszavezethető az oszlop aljára. A betáplált szennyvízhez oxigént vagy vegyszereket is lehet adagolni ügyelve arra, hogy ez ne zavarja a biokatalitikus folyamatokat [1].



2.3. ábra: Fluidizált ágyas bioreaktor vázlata [1]

A fluidizált ágyas bioreaktor előnyei más, bioszemcséket alkalmazó bioreaktorokhoz képest:

- nem érzékeny a dugulásra, oldhatatlan szennyeződésekre
- alacsonyabb nyomásesés
- jobb hő- és anyagátadás
- a biofilm vastagságának könnyebb szabályozhatósága
- nagyobb felületen növekedhet a biofilm
- a bioszemcsék könnyen eltávolíthatók a rendszerből a felesleges biomassza leválasztásának céljából

A folyadékkal történő fluidizáció felhasználásának egy másik, érdekes módja a hő tárolása fázisváltó anyagokban. A fázisváltó anyagot kapszulákba töltik, majd a kapszulákat vízzel fluidizálják. Ilyen fázisváltó anyag például a Glauber-só ($Na_2SO_4*10H_2O$), mely 32,4 °C-on endoterm, reverzibilis fázisátalakulás során vízmentes Na_2SO_4-tá és vízzé alakul. A fázisok intenzív érintkeztetése miatt jó hőátadás érhető el, de ami még fontosabb: a hőkapacitás közel száz ciklus után sem változik [1].

2.3 A fluidizációhoz kapcsolódó mérőeszközök

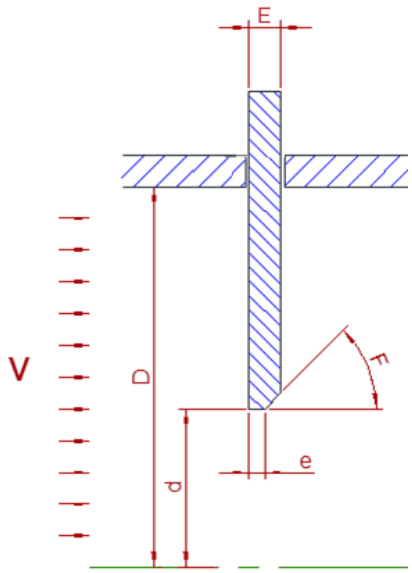
A fluidizáció jelenségének vizsgálatához szükség van a térfogatáram és az oszlop nyomásesésének mérésére.

2.3.1 A térfogatáram mérésére szolgáló eszközök

A köbözés a legpontosabb módszer, mert alapmérésre: térfogat, vagy tömeg és idő mérésére van visszavezetve, hibája helyes mérés esetén legfeljebb 0,5-1,0 %. Azt az időt mérjük, amely alatt adott térfogatú folyadék a vezetékből kiömlik. Hátránya, hogy a kalibrált köbözőedény elhelyezésére a csővezetéket meg kell szakítani. A térfogatáram pillanatnyi értékét ezzel a módszerrel nem lehet meghatározni: csak időbeli átlagértéket szolgáltat [9].

A térfogatáramot leggyakrabban szűkítéses elven működő áramlásmérőkkel mérjük. A csőkeresztmetszet szűkítésével az áramlást felgyorsítjuk, és az nyomáscsökkenést okoz. Mérjük a nyomásesést és abból, valamint a geometriai adatokból a Bernoulli-egyenlet és a kontinuitási tétel segítségével levezethető összefüggés alapján számítjuk a térfogatáramot. A

szűkítéses áramlásmérőknek több változata ismert, ezek közül a mérőperemet a legegyszerűbb elkészíteni [10].



2.4.ábra Mérőperem vázlata [11]

A mérőperem a térfogatáram pillanatnyi értékét méri. Előnye, hogy egyszerű elkészíteni, és ha a vonatkozó szabványnak megfelelően van kialakítva, nem kell kalibrálni. Tervezésekor és beépítésekor tehát a vonatkozó szabvány szerint kell eljárni [11]. A szabvány rögzíti a mérőperem főbb méreteit, ezek arányát, a nyomáskülönbség mérésének módját, a térfogatáram számítását valamint a mérőperem előtt és után szükséges egyenes csőszakasz hosszát. Amennyiben *D-D/2* megcsapolással mérjük a nyomásesést, és betartjuk a szabvány előírásait, a mérőperemen átfolyó folyadék térfogatárama a következőképpen számítható [10]:

$$W = CE_m \frac{d^2\pi}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_{flu}}} \tag{2.3.1.1}$$

, ahol

$$E_m = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}} \tag{2.3.1.2}$$

$$\beta = \frac{d}{D} \tag{2.3.1.3}$$

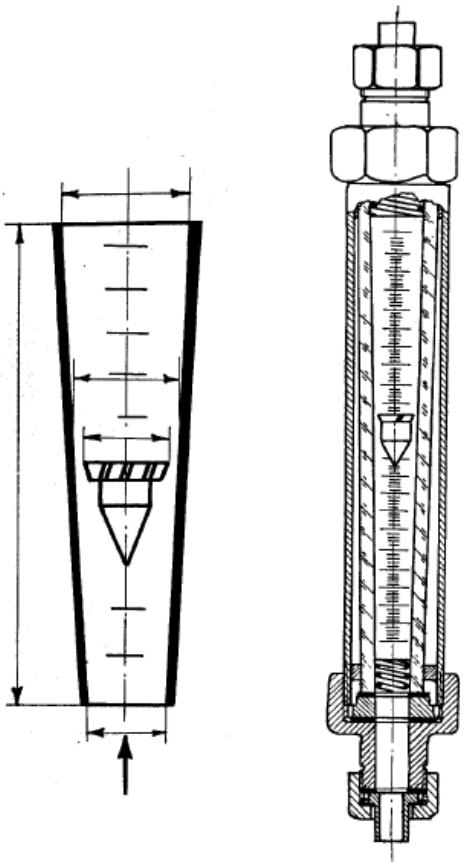
$$C = 0{,}5959 + 0{,}0390\frac{\beta^4}{1-\beta^4} + 0{,}0312\beta^{2{,}1} - 0{,}0158\beta^3 - 0{,}1840\beta^8 + 0{,}0029\beta^{2{,}5}\left(\frac{10^6}{Re_D}\right)^{0{,}75} \tag{2.3.1.4}$$

$$Re_D = \frac{D * \rho_{flu} * v}{\eta_{flu}} \qquad (2.3.1.5)$$

A sebességi tényező függ a Reynolds-számtól, a Reynolds-szám függ az áramlási sebességtől, az pedig függ a kiszámítandó térfogatáramtól. A probléma iterációval oldható meg.

A mérőperem hátránya – a nagy maradandó nyomásveszteség mellett – hogy csak 5 cm-nél nagyobb átmérőjű csövekben, és csak a szabványban meghatározott Reynolds-szám tartományban használható. Ha kis térfogatáramot szeretnénk mérni, más mérőeszközt kell alkalmaznunk [9].

A rotaméter szintén az áramlási keresztmetszet szűkítésével dolgozik, de itt a nyomásesés állandó (az úszó súlyával arányos) és a szűkítés mértéke változik: az alulról fölfelé bővülő keresztmetszetű csőben lebegő úszó annyira emelkedik fel, hogy az úszó által szabadon hagyott keresztmetszetben áramló fluidum lineáris sebessége az állandó nyomáseséshez tartozó állandó érték legyen. Az úszót a felfelé áramló fluidum annál magasabbra emeli, minél nagyobb a térfogatáram. Az úszó helyzetét az üvegcsőre maratott skálán olvassuk le [9,10].

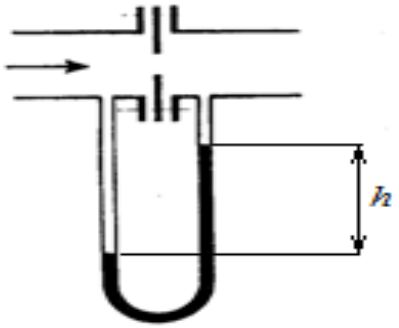


2.5.ábra: Rotaméter [9]

A rotamétereket a gyártó cég kalibrálva szállítja. Nagy folyadékmennyiségek mérésére súlyos úszó szükséges, ami nagy nyomásesést jelent – ilyen esetben előnyösebb a mérőperem használata. A rotaméter is a térfogatáram pillanatnyi értékét jelzi [9].

2.3.2 A nyomáskülönbség mérése

A fluidizációs oszlopon történő nyomásesés legegyszerűbben kétfolyadékos differenciálmanométerrel mérhető. Ugyanilyen mérőeszköz használható a mérőperemen fellépő nyomásesés mérésére is. A folyadéktöltésű manométerek mérési hibája helyes használat esetén 0%, reakcióidejük rövid.



2.6.ábra: Kétfolyadékos differenciálmanométer folyadéknyomás mérésére [9]

A folyadéktöltés helyes megválasztásával az érzékenység és a méréshatár széles határok között változtatható. Fontos, hogy referenciafolyadéknak olyan anyagot válasszunk, ami nem elegyedik az áramló közeggel. A nyomáskülönbség a leolvasott *h* szintkülönbség alapján az áramló folyadék és a referenciafolyadék sűrűségének ismeretében a következő képlettel számolható [9]:

$$\Delta p = h\left(\rho_{ref} - \rho_{flu}\right)g \qquad (2.3.2.1)$$

3. Célkitűzés

TDK munkám célja egy félüzemi fluidizációs mérőberendezés tervezése volt. A berendezés kialakítására a BME DCs épületében 2m x 2m x 0,5 m hely állt rendelkezésre. A tervezéskor fontos szempont volt, hogy a berendezés gazdaságosan megépíthető és üzemeltethető legyen, valamint szilárd anyag fluidizációja történjen benne folyadék által. Ebből kifolyólag olyan berendezést tervezése volt a célom, melynek üzemeltetéséhez nincs szükség szivattyúra, hanem közvetlenül az épületben lévő vízvezetékről üzemeltethető.

A fluidizációs oszlop nyomásesésének mérésére U-csöves kétfolyadékos differenciálmanométer állt rendelkezésre, így azt is szem előtt kellett tartani, hogy a nyomásesés ezzel kényelmesen mérhető legyen. Az alkalmazott áramlásmérők között a tanszék kérésére egy mérőperemnek is kell lennie, hogy a hallgatók a mérés keretében megismerkedjenek ennek használatával, valamint az iteráció alkalmazásával. A tervezés során ezért a mérőperemre vonatkozó szabvány előírásait is szem előtt kellett tartani.

A számításokhoz szükséges paramétereket (vízvezetékből biztosítható térfogatáram maximális értéke, a vízvezetékben uralkodó nyomás) a DCs épületben megmértem. A méréseknél azt is figyelembe vettem, hogy a laborban a tervezett fluidizációs méréssel egy időben más mérések is fognak vizet fogyasztani, és ezek alapján megbecsültem a később rendelkezésre álló vízáramot.

A számítások ellenőrzése végett azok helyességét kísérletekkel ellenőriztem. Megmértem a töltet ülepedési határsebességét (30. oldal) és a fluidizációhoz szükséges relatív hézagtérfogatát (31. oldal).

4. Számítások

4.1 A tervezési megkötések

A tervezés során a tanszék kérésére a következő szempontokat kellett figyelembe venni:

- A készülékben szilárd anyag fluidizációja történjen folyadék (víz) által
- A méréshez szükséges folyadék térfogatárama a lakossági vízvezetékből biztosítható legyen szivattyú alkalmazása nélkül
- A mérőberendezés a lehető legnagyobb legyen a fenti feltételek betartása mellett
- A mérőberendezés kialakítására 2m x 2m x 0,5 m hely áll rendelkezésre
- A fluidizációs oszlop üvegből, a csővezetékek rozsdamentes acélból készüljenek
- A mérés során felhasznált folyadék térfogatárama rotaméterrel és mérőperemmel is mérhető legyen
- A nyomásesések a rendelkezésre álló szerves folyadékkal (ρ_{ref} = 1500 kg/m^3) töltött kétfolyadékos differenciálmanométerrel kényelmesen mérhetők legyenek

4.2 Az oszlop magasságának meghatározása

A mérőberendezés kialakítására 2m x 2m x 0,5 m hely áll rendelkezésre. A tervezés egyik szempontja, hogy a mérőberendezés a lehetőségekhez képest a legnagyobb legyen, de szem előtt kell tartani azt is, hogy elég hely legyen a csővezetékeknek és az oszlop előtti áramlásrendezőnek. Az oszlop magasságának így 1,5 m-t választottam.

4.3 A töltet kiválasztása

Az oszlopban lévő töltet mennyiségének meghatározásakor szem előtt tartottam, hogy a mérés során nagy relatív hézagtérfogatoknál is lehessen adatokat felvenni. A számításnál azt a megkötést tettem, hogy amikor a fluidizált ágy teljesen kitölti az oszlopot, a relatív hézagtérfogat 0,9 legyen. Ha ezt behelyettesítjük az

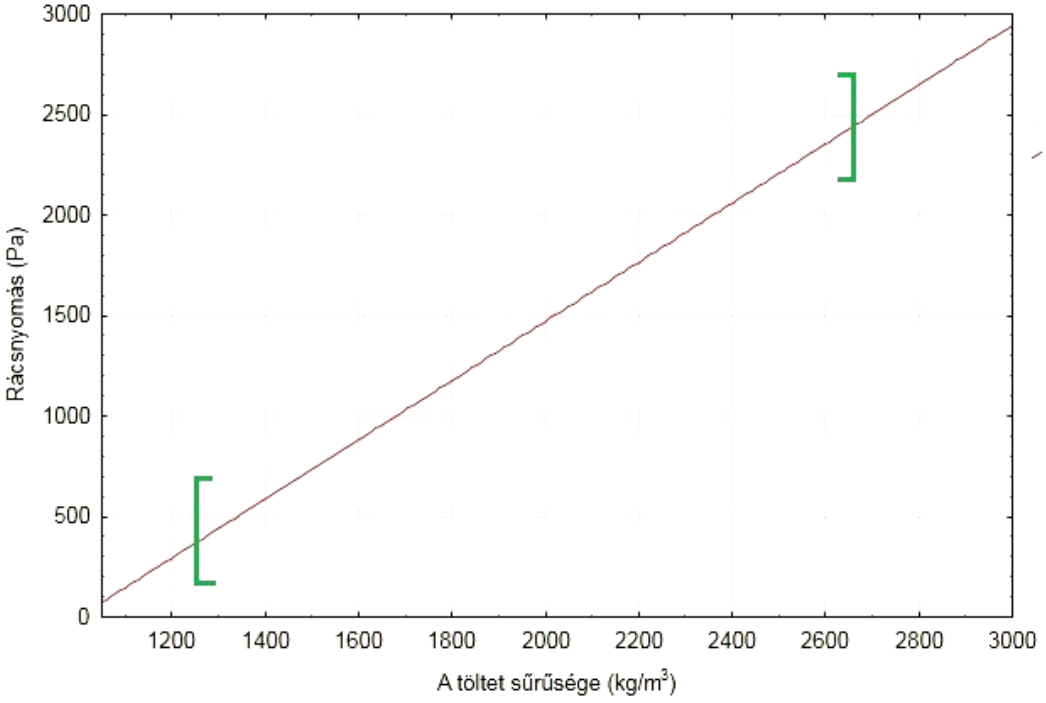
$$L_0 = L(1 - \varepsilon) \tag{4.3.1}$$

egyenletbe, a hézagmentes töltetmagasságra 1,5 m-es ágymagasság esetén 0,15 m adódik.

Adott hézagmentes töltetmagasság esetén a (2.1.6.2) egyenlet értelmében a sűrűség egyértelműen meghatározza a rácsnyomást. A rácsnyomás kétfolyadékos differenciálmanométerrel lesz mérhető, melyben a referenciafolyadék sűrűsége adott, 1500 kg/m^3. Ahhoz, hogy az oszlop nyomásesése kényelmesen mérhető legyen, meg kell szabni a rácsnyomás alsó és felső határát. A felső határt az alapján választottam, hogy a manométer két szára közti különbség ne legyen nagyobb, mint 0,5 m. A (2.3.2.1) egyenletbe behelyettesítve a rácsnyomás maximális értékére 2450 Pa adódik. A (2.1.6.2) egyenlet átrendezésével a következő egyenletet kapjuk:

$$\rho_p = \rho_f + \frac{\Delta p_r}{L_0\, g} \tag{4.3.2}$$

A rácsnyomás helyére 2450 Pa-t behelyettesítve $\rho_{p,max} \approx$ 2670 kg/m^3 adódik. A rácsnyomás minimális értékének meghatározásakor azt vettem kiindulópontnak, hogy a minimális rácsnyomás negyedénél a manométer két szára közti különbség legalább 2 cm legyen. Ez lehetővé teszi még a fluidizáció kezdete előtt legalább 3 mérési pont felvételét úgy, hogy a legkisebb érték relatív hibája is legfeljebb 5% legyen (amennyiben a manométer szárai közti különbség 1 mm abszolút hibával állapítható meg). A (2.3.2.1) egyenletbe $h = 0{,}02$ m-t behelyettesítve, és ezt néggyel megszorozva a rácsnyomás minimális értékére 392 Pa adódik. A (4.3.2) egyenletbe ezt behelyettesítve a töltet sűrűsége legalább 1270 kg/m^3 kell, hogy legyen ($\rho_{p,min} \approx$ 1270 kg/m^3).



4.1. ábra: Rácsnyomás a töltet sűrűségének függvényében

(választható ρ_p tartomány jelölve)

A fenti számítás eredményét szemlélteti a *4.1. ábra.* Látható, hogy a töltet sűrűségének 1270 és 2670 kg/m^3 közé kell esnie (zöld intervallum). Néhány, az előbbi intervallumba tartozó sűrűségű anyag sűrűségét adja meg a *4.1. táblázat.* Ahhoz, hogy ezek közül választani lehessen, egyéb szempontokat is figyelembe kell venni.

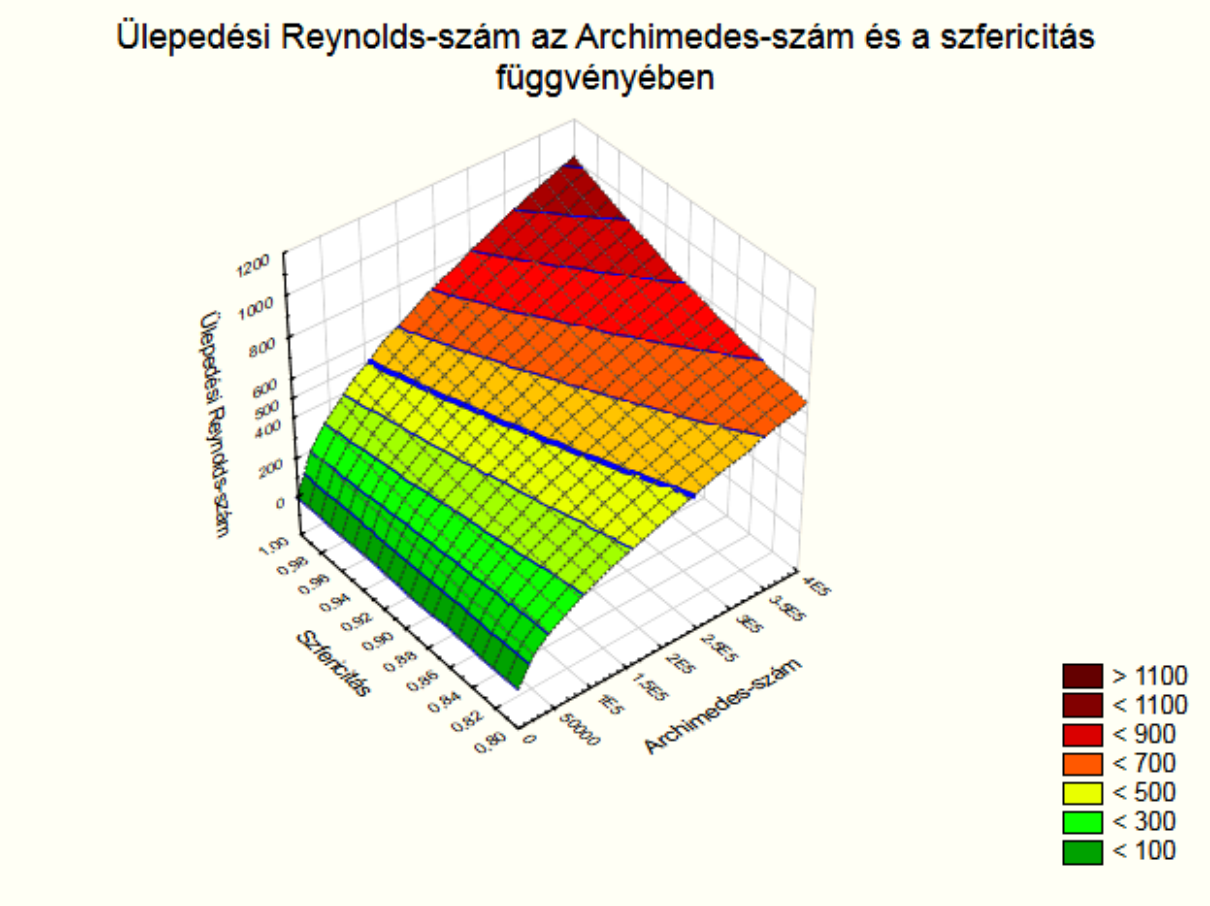
az anyag neve	sűrűsége (kg/m^3)
agyag	1790-2600
benzoesav	1300
cellulóz	1520
gumi	990-2000
homok	2600
kaolin	2100
oxálsav	1663
poli(tetreafluor-etilén)	2100-2300
poli(viilidén-fluorid)	1760-1770
poli(vinil-klorid)	1350-1450
poli(vinilidén-klorid)	1700
tégla	1890-2600
üveg	2300-3000

4.1. táblázat: választható ρ_p tartománynak megfelelő néhány szilárd anyag sűrűsége [2;12]

Az egyik, talán legfontosabb szempont, hogy az anyag ne oldódjon vízben, és lehetőleg ne is korrodálódjon. Ez a szempont kizárja a szerves savakat (benzoesav, oxálsav).

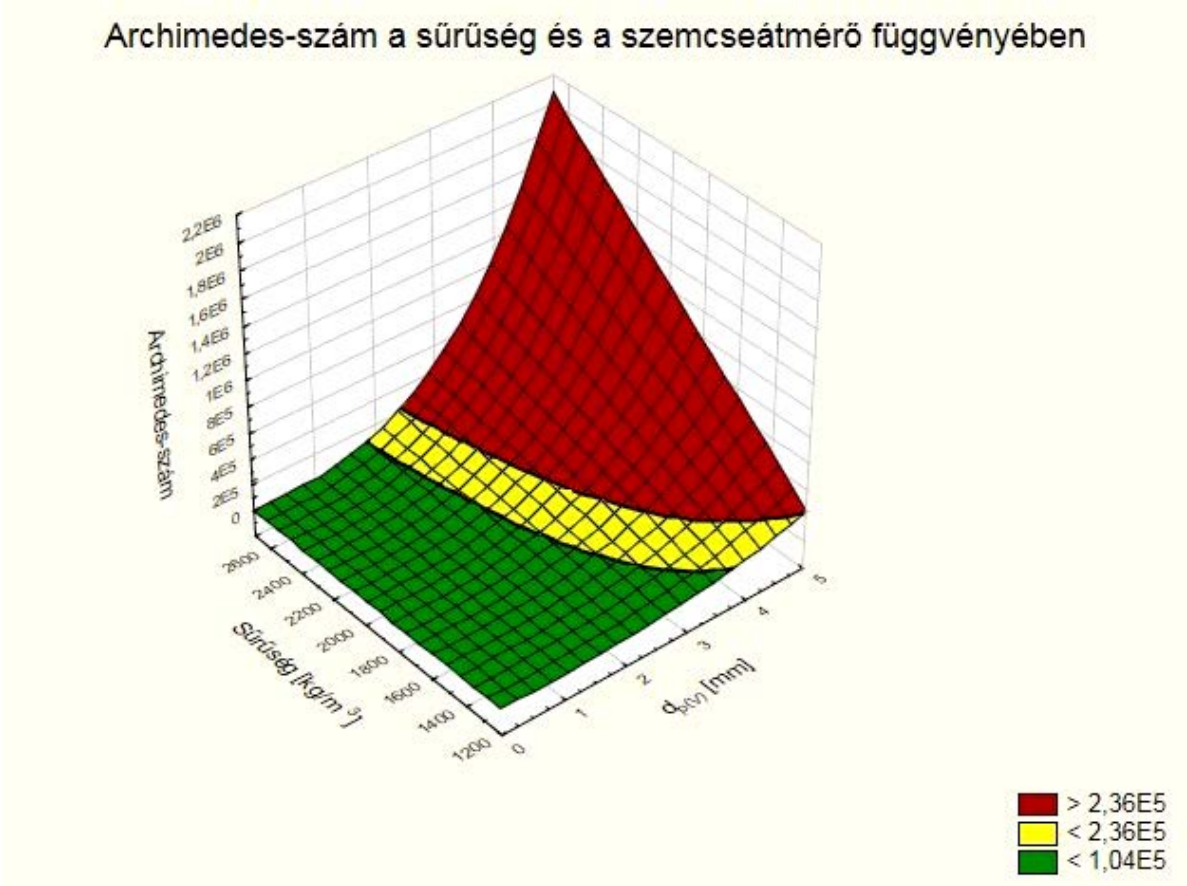
A következő szempont, hogy a töltet egyforma, lehetőleg a gömbalaktól nem túlságosan eltérő ($0{,}8 < \Phi \leq 1$) részecskékből álljon. A legtöbb, lekerekített test, valamint a 0,5 és 2,5 közötti magasság/átmérő arányú hengerek is eleget tesznek ennek a feltételnek [13].

A számítást leegyszerűsíti, és a kísérletet is látványosabbá teszi, ha töltetnek nem porszerű, hanem nagyobb szemcsékből álló anyagot választunk. Továbbá, ha az ülepedési Reynolds-szám nagyobb, mint 500, a (2.1.8.9) egyenlet tervezésre és a (2.1.8.4) egyenlet eredményeinek ellenőrzésére is használható, mivel az *n* kitevő értéke ebben a tartományban $\approx 2{,}4$. Az ülepedési Reynolds-szám az (2.1.8.1) egyenlet szerint a szfericitás és az Archimedes-szám függvénye, ezek növekedésével pedig monoton nő. A *4.2. ábrán* a vastag kék vonal jelöli az 500-as ülepedési Reynolds-számot.



4.2. ábra: Az ülepedési Reynolds-szám függése az Archimedes-számtól és a szfericitástól (vastag kék vonal: 500-as ülepedési Reynolds-szám)

Az egyenletből számítható, hogy az 500-as ülepedési Reynolds-szám eléréséhez $\Phi = 1$ esetén $Ar = 1{,}04*10^5$ és $\Phi = 0{,}8$ esetén $Ar = 2{,}36*10^5$. Az Archimedes-számnak tehát a fenti értékeknél nagyobbnak kell lennie. Az Archimedes-szám a töltet jellemző méretének és sűrűségének függvénye (*4.3. ábra*). A töltet sűrűsége legfeljebb 2700 kg/m^3 lehet. Az ábráról is látható, hogy ebben a tartományban a szemcseátmérőnek meg kell haladnia egy bizonyos értéket, hogy a részecske ülepedési Reynolds-száma 500-nél nagyobb legyen. A *4.3. ábrán* a piros tartományban található szemcsék ülepedési Reynolds-száma 0,8-nál nagyobb szfericitás esetén mindig nagyobb, mint 500, a sárga tartományba eső szemcsék ülepedési Reynolds-száma a szfericitástól függően lehet nagyobb, mint 500, a zöld tartományba eső szemcsék ülepedési Reynolds-száma soha nem éri el az 500-at. Célszerű olyan töltetet választani, mely tulajdonságai alapján a diagram piros részére esik. Mivel a töltet sűrűsége a *4.1. ábra* alapján legfeljebb 2670 kg/m^3 lehet, a részecske átmérőjének a (2.1.7.5) képlet értelmében legalább $d_{p(V)}$ =2,4 mm-nek kell lennie, hogy az Archimedes-szám, és így az ülepedési Reynolds-szám elég nagy legyen.



4.3. ábra: Archimedes-szám a sűrűség és a szemcseátmérő függvényében

Ezek a feltételek kizárják a homokot, a téglaport és a teflont, mivel ezek nem elérhetők az adott méretben.

A fennmaradó anyagok közül a PVC-re esett a választás. Ennek oka, hogy olcsó és granulátumként az adott méretben könnyen beszerezhető. További előnye, hogy az üveggel ellentérben nem átlátszó, így az üvegoszlopban történő fluidizációja látványosabb. A Szórádi Kft. által rendelkezésünkre bocsájtott, lágyítómentes PVC granulátum a *4.1 fénykép*en látható, adatait a *4.2. táblázat* tartalmazza.

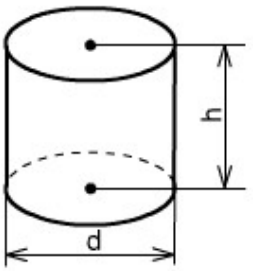
4.1. fénykép: a töltetként használt anyag

$d = 4 \pm 0{,}2\ mm$

$h = 3 \pm 0{,}3\ mm$

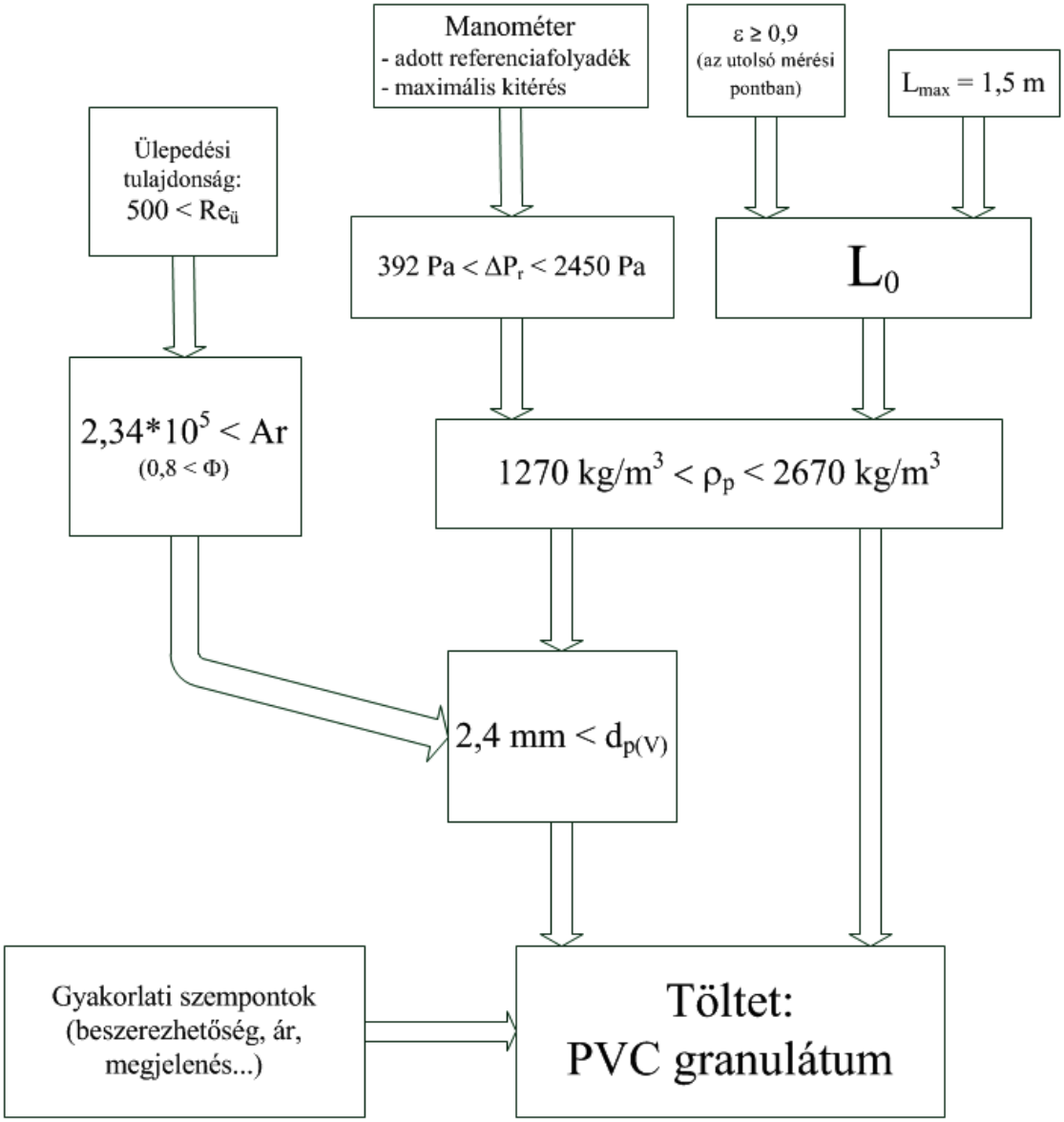
$\Phi = 0{,}865 \pm 0{,}05$

$\rho_p = 1440 \pm 0{,}05\ kg/m^3$



4.2. táblázat: a töltet jellemzői

A töltet kiválasztásának folyamatát foglalja össze a *4.4. ábra*:



4.4. ábra: a töltet kiválasztásának folyamatábrája

4.4 Az oszlop átmérőjének meghatározása

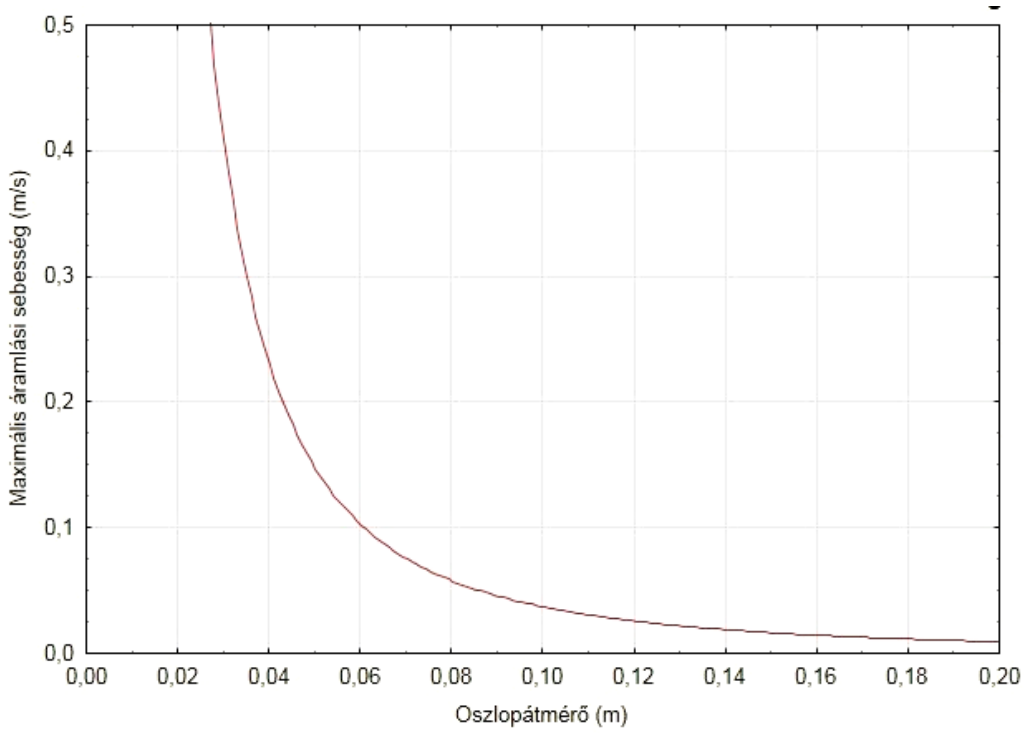
Az oszlop átmérőjének meghatározásakor két szempontot kell figyelembe venni: a méréshez szükséges folyadék térfogatárama a lakossági vízvezetékből biztosítható legyen szivattyú alkalmazása nélkül és a mérés során legalább négy mérési ponthoz tartozó térfogatáram mérőperemmel mérhető legyen.

Megmértem, hogy a vízvezetékből biztosítható maximális térfogatáram 35 liter/perc. Mivel a laborban más vízfogyasztók is vannak, az oszlopot ezek figyelembevételével kell méretezni. Méréseim alapján kijelenthető, hogy ez legkedvezőtlenebb esetben is a maximális térfogatáram 50%-a (17,5 liter/perc). A térfogatáram adott oszlopátmérő és áramlási sebesség mellett a következő képlettel számolható:

$$W = \frac{d_c^2 \pi}{4} v_0 \tag{4.4.1}$$

W helyére $W_{max} = 17{,}5\ lit/min = 2{,}91*10^{-4}\ m^3/s$-ot behelyettesítve és az egyenletet átrendezve megkapjuk az összefüggést, amivel az adott oszlopátmérő mellett biztosítható maximális áramlási sebesség számolható:

$$v_{max} = \frac{3{,}71*10^{-4}}{d_c^2} \tag{4.4.2}$$



4.5. ábra: Áramlási sebesség az oszlopátmérő függvényében 17,5 lit/min térfogatáram esetén

Ahhoz, hogy az oszlopátmérőt ez alapján meg lehessen határozni, ki kell számolni, hogy milyen áramlási sebesség kell ahhoz, hogy a fluidizált ágy kitöltse az egész oszlopot. Ekkor az ágymagasság 1,5 m, a relatív hézagtérfogat pedig a (4.3.1) egyenlet szerint 0,9. Az ehhez tartozó áramlási sebességet kétféleképpen számíthatjuk: a (2.1.8.4) és (2.1.8.9) egyenletekkel. Mindkét módszerhez ismerni kell a töltet ülepedési határsebességét és a korrekciós tényezőt. Az ülepedési határsebesség számításához az (2.1.8.1-2) képletek szerint minden adott. Az adatokat behelyettesítve $Re_{ü}$ = 650, $v_{ü}$ = 0,156 m/s adódik.

A falhatásért felelős *k* paraméter 10-nél kisebb magasság/átmérő arányú hengerek esetén Chabbra szerint [14]:

$$k = 1 - 1{,}33\,\frac{d_{p(V)}}{d_c} \tag{4.4.3}$$

Az eredmények - és a (2.1.8.1-2) valamint (4.4.3) képletek - helyességét igazolja az általunk elvégzett kísérlet is. 6 cm belső átmérőjű hengerben mértük, hogy a töltet ülepedő részecskéi mennyi idő alatt tesznek meg ismert távolságot, miután beállt a stacionárius sebesség. Az eredmények átlaga 0,138 m/s, ami szinte pontosan megegyezik a (2.1.8.1-2) és (4.4.3) egyenletekből számolt 0,142 m/s-al. A mért ülepedési határsebességek a [0,132 m/s; 0,146 m/s] tartományba estek.

A (4.4.3) egyenletben szerepel az oszlop átmérője, a cél pedig pont ennek a meghatározása. Az oszlopátmérő alsó határa legyen a töltettel egyenlő térfogatú gömb átmérőjének tízszerese, hogy ne lépjen fel jelentős falhatás [3]. Ez 4,16 cm. Az oszlopátmérő felső határának meghatározásához ki kell számolni, hogy legfeljebb milyen átmérőjű oszlopban biztosítható olyan térfogatáram, melyhez tartozó áramlási sebesség mellett a fluidizált ágy kitölti az egész oszlopot. Ezt kétféleképpen lehet elvégezni: a (2.1.8.9) és (2.1.8.4-8) egyenletekkel, valamint az így kapott eredmények (4.4.2)-vel történő összevetésével. A (2.1.8.9) egyenlet alkalmazásához szükség van a korrigált ülepedési sebességre és a relatív hézagtérfogatra. A relatív hézagtérfogat az utolsó mérési pontban a korábban leírtak szerint legyen 0,9. Így a (2.1.8.9) és (4.4.3) egyenleteket összevonva, majd behelyettesítve, figyelembe véve, hogy $d_{p(V)}$ = 0,00416 m és $n \approx 2{,}4$:

$$\frac{v_0}{0{,}156\ m/s} = \left(1 - 1{,}33\,\frac{0{,}00416m}{d_c}\right) 0{,}9^{2{,}4} \tag{4.4.4}$$

Az egyenlet megadja az összefüggést az oszlopátmérő, és az 1,5 m-es ágymagassághoz tartozó áramlási sebesség között. Ezt összevetve a (4.4.2) egyenlettel megkapjuk, hogy legfeljebb mekkora oszlopátmérő mellett valósítható meg az 1,5 m-es ágymagasság.

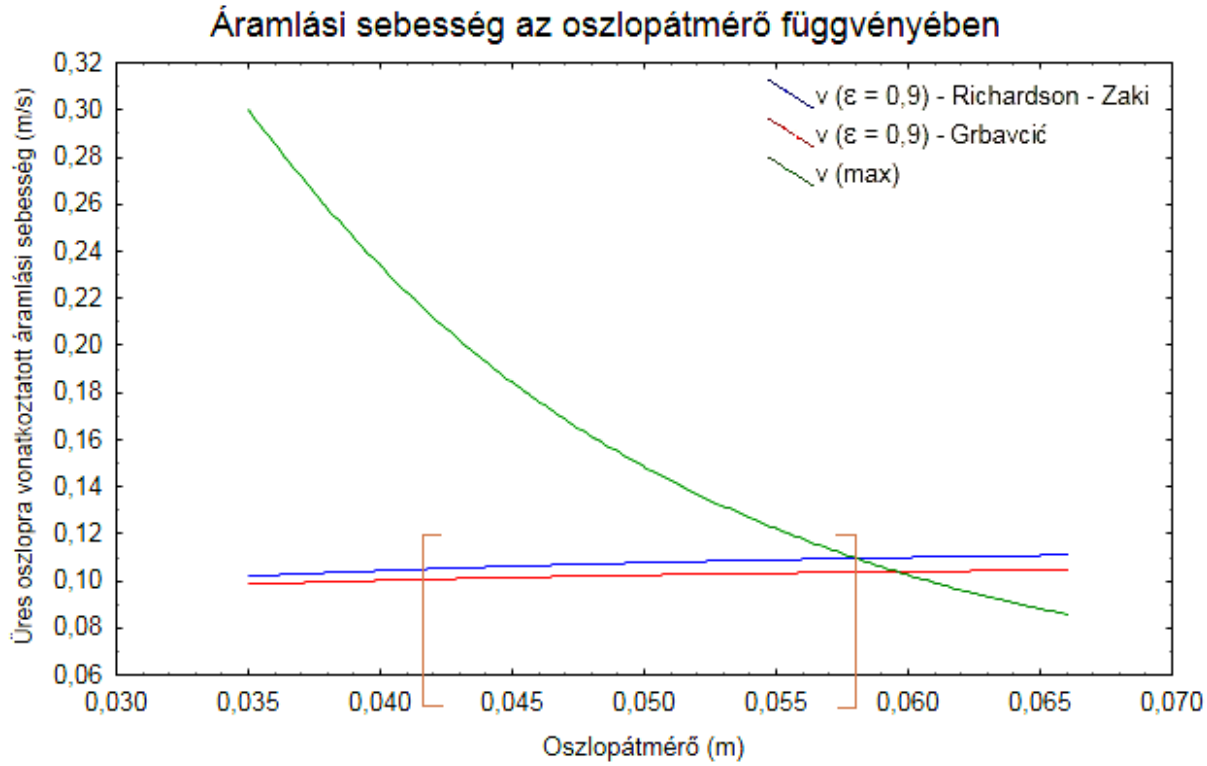
Ellenőrzésképpen érdemes kiszámolni a 0,9-es relatív hézagtérfogathoz tartozó áramlási sebességet a (2.1.8.4-8) egyenletekkel is, mivel a (4.4.4) egyenlet 2,4-es kitevője csak becslés. Ehhez ismerni kell a fluidizáció kezdetéhez tartozó áramlási sebességet és a fluidizációhoz szükséges minimális hézagtérfogatot is. A fluidizációhoz szükséges minimális hézagtérfogat meghatározására a (2.1.5.1) képletet használtam, majd ennek helytállóságát a 2.1.5. fejezetben ismertetett méréssel is ellenőriztem. Egy 1000 ml-es, 6 cm belső átmérőjű mérőhengerbe ismert tömegű töltetet töltöttem. A hengert megtöltöttem vízzel, összeráztam, majd mértem a kiülepedő ágy magasságát. A (2.1.1.2) képlettel meghatároztam ε_{mf} – et. Az így számított adatok (0,445, 0,448, 0,453) közel esnek a (2.1.5.1) képlettel számított eredményhez (0,445). A továbbiakban $\varepsilon_{mf} = 0{,}45$-el számoltam.

A fluidizáció kezdetéhez tartozó áramlási sebességet a 2.1.7 fejezetben ismertetett három különböző módszerrel határoztam meg. Az eredményeket a *4.3. táblázat* mutatja.

módszer	v_{mf} (m/s)
(2.1.7.7-8)	0,0226
Lucas	0,0192
(2.1.7.9-10)	0,0211
átlag	0,0210

4.3.táblázat: A kiválasztott töltet fluidizációjához szükséges áramlási sebesség

A továbbiakban az eredmények átlagával, v_{mf} = 0,021 m/s-al számoltam. Az (2.1.8.4-8) egyenlet alkalmazásához így már minden adott. Az egyenletekkel tetszőleges oszlopátmérőkhöz számítható a 0,9-es relatív hézagtérfogathoz tartozó áramlási sebesség. Az eredményeket a *4.6. ábra* szemlélteti.



4.6. ábra: az egyes oszlopátmérőkhöz 0,9-es relatív hézagtérfogat mellett a kiválasztott töltet adataiból számított, üres oszlopra vonatkoztatott áramlási sebesség. A zöld görbe a 4.5. ábrán is szereplő, 17,5 lit/min térfogatáram esetén biztosítható maximális áramlási sebességet jelöli.

A diagramon a kék görbe a (2.1.8.9) egyenlettel számolt, a piros görbe a (2.1.8.4-8) egyenletekkel számolt áramlási sebességet szemlélteti. A zöld görbe a *4.4. ábrán* is szereplő, adott oszlopátmérő mellett biztosítható maximális áramlási sebességet jelenti. A diagramról látható, hogy az oszlopátmérő felső határa a (2.1.8.9) egyenlettel számolt módszer szerint 5,8 cm, a (2.1.8.4-8) egyenlettel számolt módszer szerint 5,9 cm.

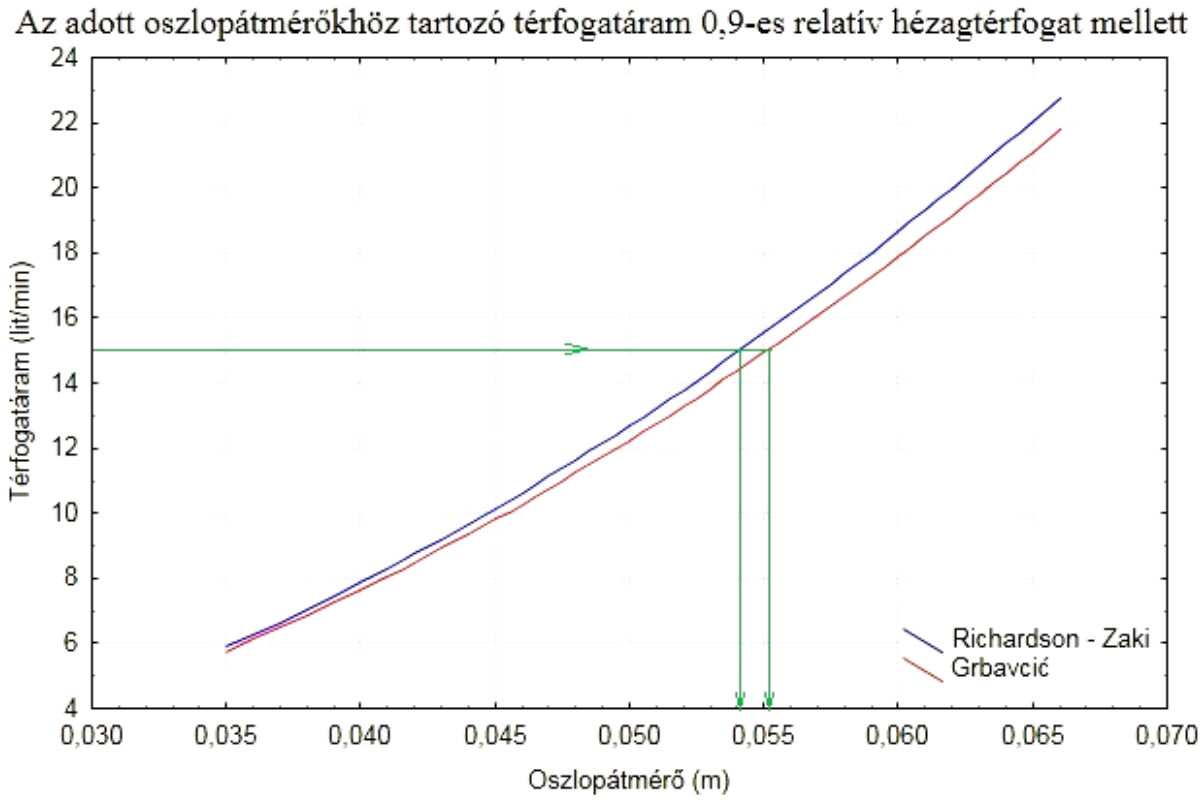
Az oszlop pontos átmérőjének kiválasztásakor szem előtt kell tartani azt is, hogy a mérés során legalább négy mérési ponthoz tartozó térfogatáram mérőperemmel mérhető legyen. A mérőperem csak bizonyos térfogatáram fölött alkalmazható. Ezt a térfogatáramot a megfelelő szabvány megkötései által számíthatjuk [11]:

$$Re_D > 5000 \tag{4.4.5}$$

$$Re_D = \frac{vD\rho_f}{\eta_f} = \frac{4W\rho_f}{D\pi\eta_f} \tag{4.4.6}$$

$$50\ mm < D < 1000\ mm \tag{4.4.7}$$

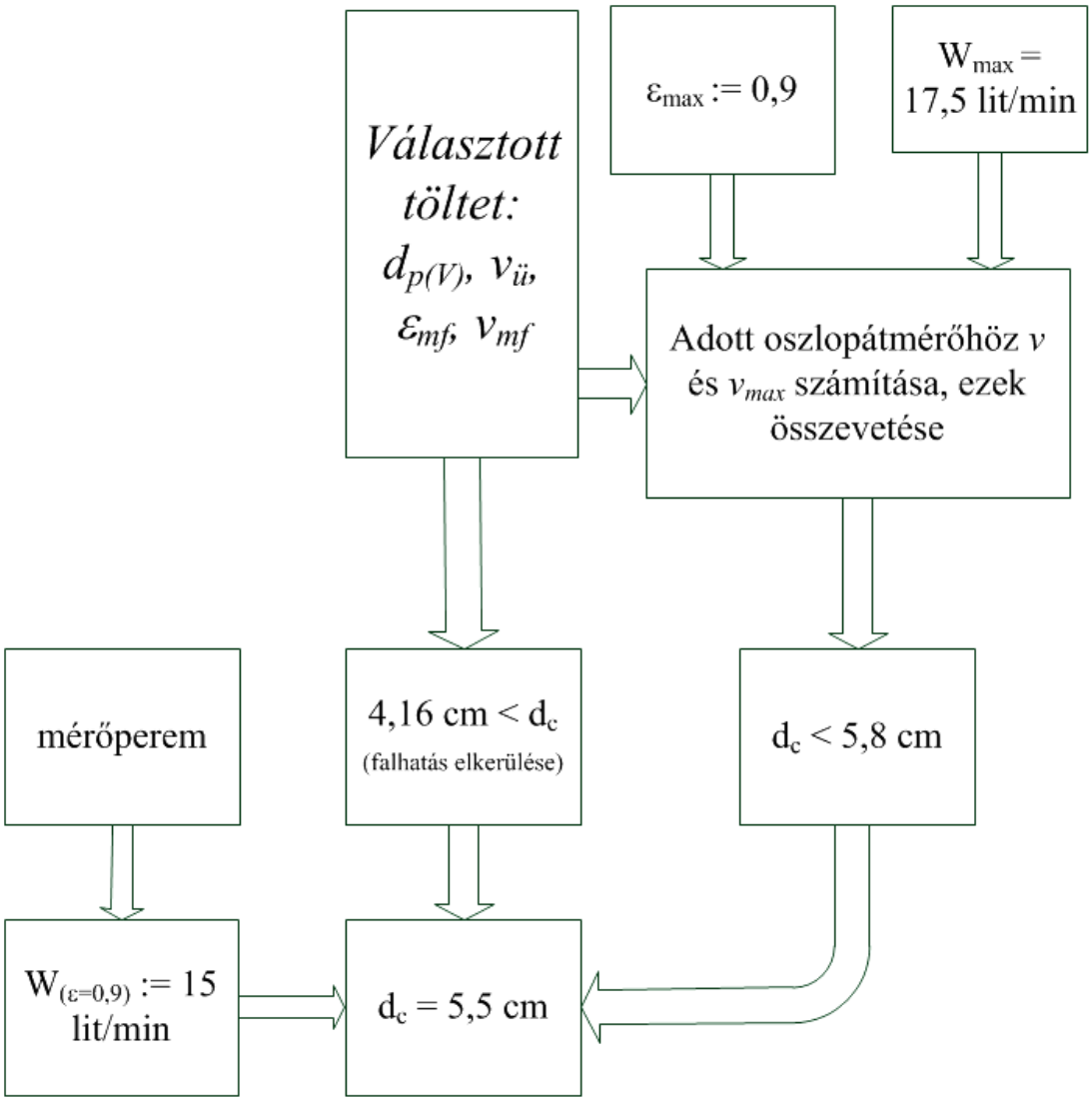
A víz sűrűségét és viszkozitását, valamint a minimális átmérőt behelyettesítve a minimális térfogatáramra 11,8 lit/min adódik. Ahhoz, hogy legalább négy mérési pontot egymástól viszonylag távol fel lehessen venni célszerű olyanra tervezni az oszlopot, hogy az utolsó mérési pontnál a térfogatáram ≈15 lit/min legyen. A *4.7. ábra* az egyes oszlopátmérőkhöz tartozó térfogatáramokat szemlélteti a *4.6. ábrán* látható áramlási sebességek és 0,9-es relatív hézagtérfogat mellett.



4.7. ábra: Térfogatáram 0,9-es relatív hézagtérfogat mellett az oszlopátmérő függvényében

A diagramról látható, hogy 15 liter/perchez ≈0,055 m-es oszlopátmérő tartozik. Az oszlop átmérőjét ezért 5,5 cm-nek választottam.

Az oszlopátmérő meghatározásának folyamatát foglalja össze a *4.8. ábra:*



4.8. ábra: az oszlopátmérő meghatározásának folyamatábrája

4.5 A fluidizációs oszlophoz tartozó segédberendezések tervezése

4.5.1 Töltettartó rács tervezése

A töltettartó rácson helyezkedik el a nyugalomban lévő töltet. Tervezésekor fontos szempont, hogy a rácson alacsony legyen a nyomásesés, de a rács elbírja a töltetet. A rács területe megegyezik az oszlop keresztmetszetének területével, ez $2{,}34*10^{-3}$ m^2. A töltet tömege a hézagmentes töltetmagasságnak, a töltet sűrűségének és az oszlop keresztmetszetének szorzataként adódik, ez 0,51 kg. A töltettartó rácsnak ez alapján legalább 2120 N/m^2 terhelést kell kibírnia deformáció nélkül. Tetszőleges rácson Perry szerint a nyomásesés a következő képlettel számítható [15]:

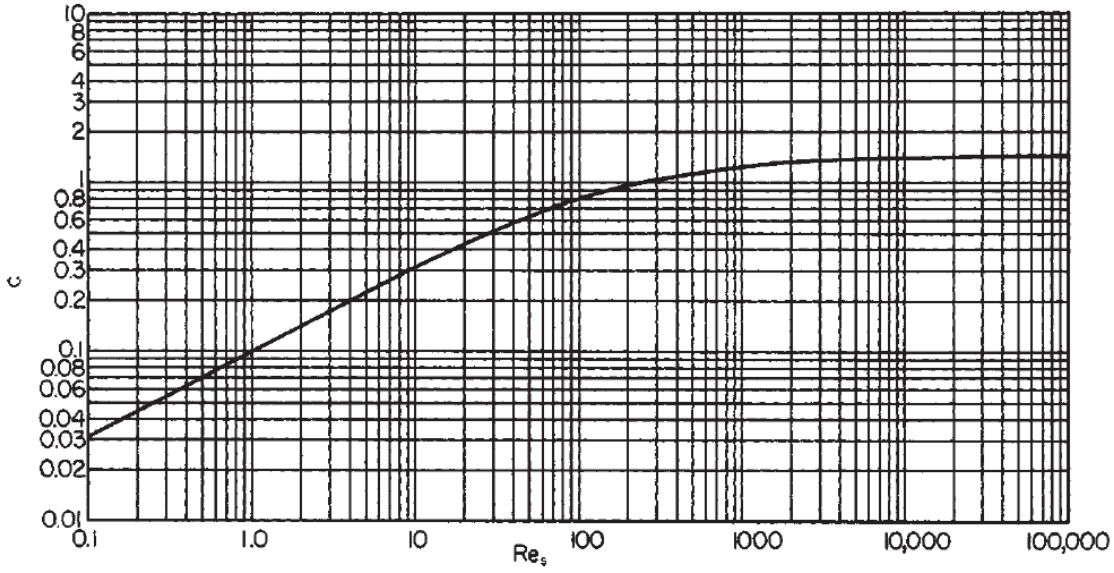
$$\Delta p = K \frac{v^2 \rho_f}{2} \tag{4.5.1.1}$$

, ahol

$$K = \frac{1}{c^2}\left(\frac{1-\alpha^2}{\alpha^2}\right) \tag{4.5.1.2}$$

Az egyenletben *c* egy paraméter, melynek függését a rács Reynolds-számától (Re_s) a *4.9. ábra* adja meg. A rács Reynolds-száma:

$$Re_s = \frac{D_s v \rho_f}{\alpha \eta_f} \tag{4.5.1.3}$$



4.9. ábra: A (4.5.1.2) egyenlet c paraméterének függése a rács Reynolds-számától [15]

Az előző egyenletekben szereplő α a rácson található nyílások felületének és a rács teljes felületének a hányadosa. Amennyiben a rács négyzetes, α a következő képlettel számítható:

$$\alpha = \frac{D_s}{D_s + D_r} \tag{4.5.1.4}$$

Itt D_s a lyukak mérete, D_r a rácsot alkotó anyag vastagsága. A tervezéskor tekintsük a nyomásesés szempontjából legkedvezőtlenebb esetet. Ekkor a fluidum üres oszlopra vonatkoztatott áramlási sebessége ≈0,11 m/s. Ahhoz, hogy a nyomásesés a lehető legalacsonyabb legyen, a (4.2.1.1-4) képletek értelmében minél vékonyabb anyagból kell készíteni a rácsot, minél nagyobb lyukakkal. A lyukak legyenek 2,5 mm oldalhosszúságú négyzetek, ezeken még biztosan nem fog átesni a töltet. A rács anyagának 1 mm vastag drótot választottam, így a nyomásesés a (4.5.1.1-4) képletekkel számolva 13 Pa. Ez elhanyagolható a rácsnyomáshoz képest (647 Pa), de a rács elbírja a töltetet (a drót folyáshatára a számított terhelésnél nagyságrendileg nagyobb), tehát a töltettartó rács használható [15].

4.5.2 A kihordást megakadályozó rács tervezése

Az oszlop tetejére is célszerű elhelyezni egy rácsot, hogy a töltet még véletlenül se hagyhassa el az oszlopot és ne tömítse el a mérőcsonkot. Ennek a rácsnak már nem kell megtartania a töltetet, tehát a rácsot alkotó anyag terhelhetősége nem fontos szempont. A minél kisebb nyomásesés érdekében célszerű a rácsot úgy tervezni, hogy szabad felülete a lehető legnagyobb legyen. Ez úgy érhető el, ha a rács vékonyabb drótból készül. Ha a lyukak itt is 2,5 mm oldalhosszúságú négyzetek, és a rács anyagának vastagsága 0,5 mm, a nyomásesés ezen a rácson 0,11 m/s áramlási sebességnél 5 Pa.

4.5.3 Áramlásrendező tervezése

A töltettartó rács előtt helyezkedik el az angol szakirodalomban „calming section”-ként emlegetett szakasz. Ez egy, a fluidizációs oszloppal megegyező átmérőjű csőszakasz (üres vagy töltött), melynek feladata a radiálisan egyenletes áramlási sebesség biztosítása és ez által a csatornaképződés megakadályozása. A továbbiakban erre a szakaszra áramlásrendezőként fogok hivatkozni.

Az áramlásrendező hossza általában az oszlop átmérőjének néhányszorosa. Ez a szakasz általában gömbökkel vagy Raschig-gyűrűkkel, gyakran a fluidizációhoz használt töltettel van megtöltve. Kialakítására nem vonatkoznak szigorú szabályok, az egyetlen megkötés az, hogy a nyomásesés az áramlásrendezőn (Δp_d) „elegendően nagy” legyen. Jackson szerint az áramlásrendező nyomásesése és a rácsnyomás hányadosának legalább 0,06-nak kell lennie, amennyiben az oszlop átmérője nagy (≈1m) és a fluidizáció folyadékkal történik [16]. Ha az oszlop átmérője kisebb, kisebb nyomásesés is elegendő lehet. Pontos összefüggések hiányában a tervezéskor azt a megkötést tettem, hogy a fluidizáció kezdetének pillanatában (ekkor $v=v_{mf}=0{,}021$ *m/s*) legyen

$$\frac{\Delta p_d}{\Delta p_r} = 0{,}06 \qquad (4.5.3.1)$$

Az áramlásrendező kialakítására üveg Raschig-gyűrűk állnak rendelkezésre, melynek adatait a *4.4. táblázat* mutatja.

$d = 4{,}5\ mm$

$h = 4{,}5\ mm$

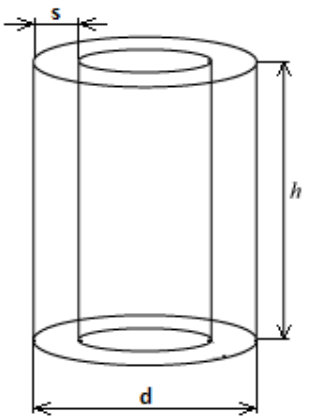
$s = 0{,}9\ mm$

$\Phi = 0{,}51$

$\rho_R = 2600\ kg/m3$

$\varepsilon = 0{,}68$

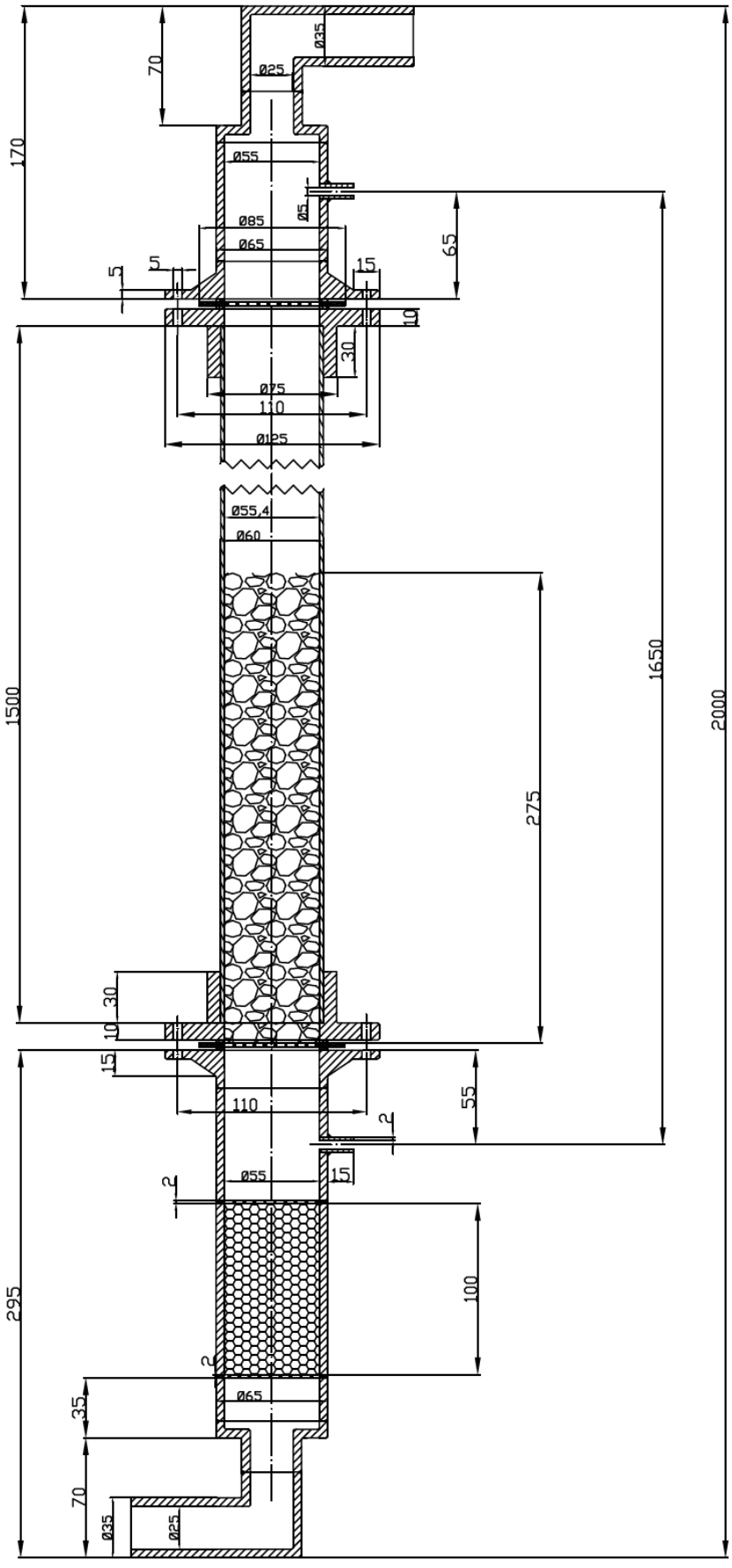
$\omega = 850\ m^2/m^3$



4.4. táblázat: az áramlásrendezőként használt Raschig-gyűrűk jellemzői

A Raschig-gyűrűkön történő nyomásesést a Borus A., Deák A.: Vegyipari félüzemi praktikum c. könyvben leírtak alapján számoltam ki [9]. A számítások alapján a rendelkezésre álló Raschig-gyűrűkből legalább 9,5 cm magasságú töltött oszloprész kell, hogy a (4.5.3.1) egyenlet teljesüljön. A töltött oszloprész magasságát 10 cm-nek választottam.

Az oszlop rajza a *4.10. ábrán* látható.



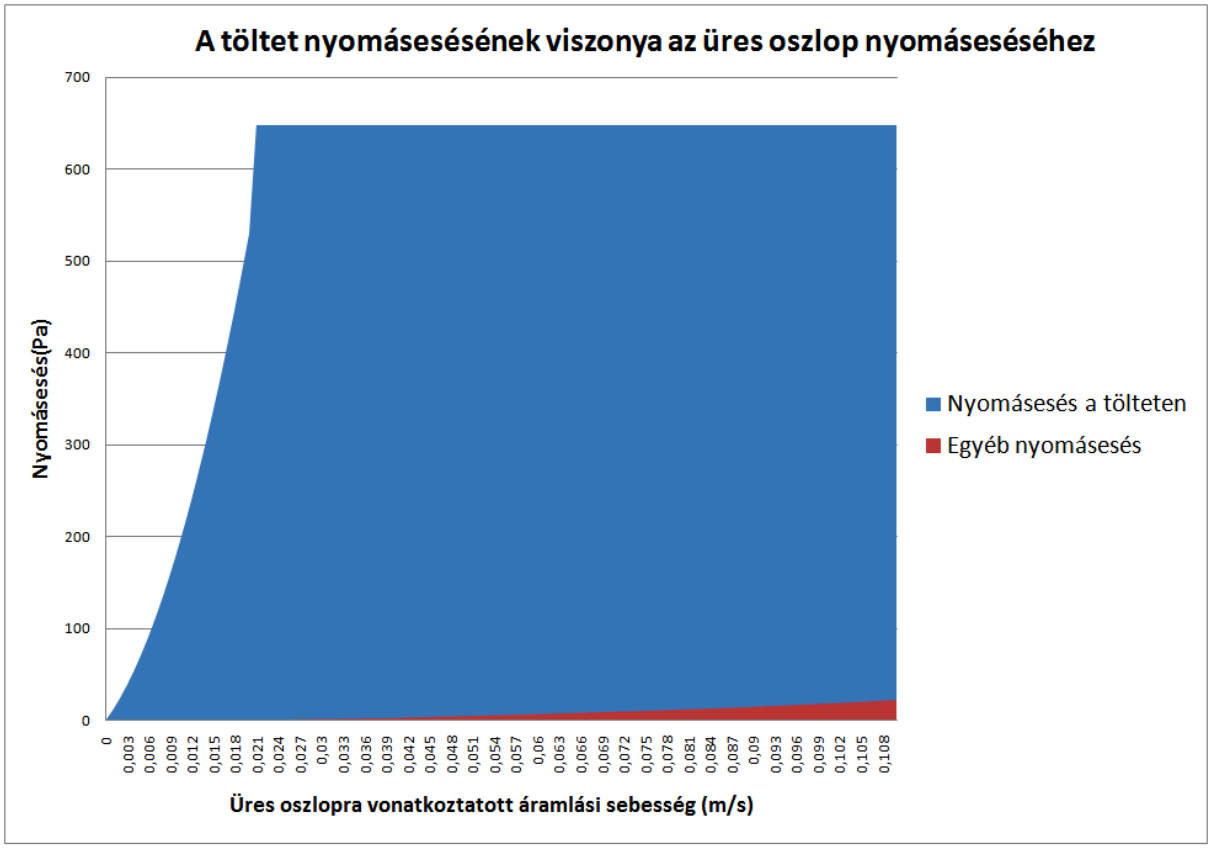
4.10. ábra: A fluidizációs oszlop metszete

4.5.4 Nyomásesés számítása az oszlopon

Az oszlopon elvégzendő mérés célja a fluidizáció jelenségének tanulmányozása. Fontos, hogy a mérés során megfigyelhető legyen a *2.1. ábrán* látható jelenség, vagyis az áramlási sebesség növekedésével az oszlopon mért nyomásesés ne változzon. A töltet nyomásesése a (2.1.1.1) egyenlet szerint a fluidizáció kezdete után konstans, azonban zavaró lehet az üres oszlop, valamint a rácsok nyomásesése, ami a sebességgel négyzetesen növekszik. Az üres oszlop nyomásesését a Fanning-egyenlettel számolhatjuk ki [3]:

$$\Delta p = f \frac{L_s}{D_c} \frac{v_0^2 \rho_f}{2} \tag{4.5.4.1}$$

, ahol L_s a csőszakasz hossz, f a csősúrlódási tényező. A csősúrlódási tényező a Reynolds-szám és a relatív érdesség függvénye. A nyomásesés számításánál figyelembe vettem, hogy a *4.10. ábra* szerint a mérőcsonkok között 1,65 m távolság van, melyből 1,5 m üveg, 0,15 m rozsdamentes acél. Az üveg abszolút érdességét 0,0015 mm-nek, a rozsdamentes acél abszolút érdességét 0,05 mm-nek vettem [17]. A relatív érdesség az abszolút érdesség és a csőátmérő hányadosa. Az egyes relatív érdességekhez és Reynolds-számokhoz tartozó csősúrlódási tényezőket Moody-diagramról olvastam le [3]. A rácsok nyomásesését a (4.5.1.1-4) egyenletekkel számoltam. A töltet nyomásesését nyugvó állapotban az Ergun-képlettel - (2.1.4.1.) egyenlet -, fluidizált állapotban a (2.1.6.2.) képlettel számoltam ki. Az eredményeket az üres oszlopra vonatkoztatott áramlási sebesség függvényében ábrázoltam, figyelembe véve, hogy a mérés során az üres oszlopra vonatkoztatott áramlási sebesség legfeljebb 0,11 m/s lesz. Az eredményeket a *4.11. ábra* szemlélteti.



4.11. ábra: A töltet nyomásesésének viszonya az üres oszlop nyomáseséséhez (a 4.5.4 fejezet alapján számolva)

A *4.11. ábrán* a kék tartomány szemlélteti a töltet nyomásesését, a piros tartomány az üres oszlop és a két rács nyomásesésének az összegét. A kék és a piros tartomány összege megadja a manométerrel mérhető nyomásesést. A diagramról látható, hogy a fluidizáció kezdetekor (v_0 = 0,021 m/s) gyakorlatilag csak a tölteten történik nyomásesés, és a mérés utolsó pontjában is csak 25 Pa az „egyéb” nyomásesés. Az eredmények alapján a súrlódási nyomásesés a vizsgált tartományban elhanyagolható a tölteten történő nyomáseséshez képest. Ez a kísérleti v_0-Δp diagram megrajzolásakor nem okoz számottevő eltérést, továbbra is megfigyelhető, hogy a nyomásesés lényegében nem nő tovább a fluidizált tölteten.

4.6 A mérőberendezések és szelepek méretezése és elhelyezése

4.6.1 Mérőperem tervezése

Mérőperemek tervezésekor mindig a hatályos szabvány szerint kell eljárni [11]. A szabvány által megadott, (4.4.5-6) egyenletekből adódik, hogy

$$\frac{W}{D} > 3{,}93 * 10^{-3}\ \frac{m^2}{s} \qquad (4.6.1.1)$$

A 4.4. fejezetben leírtak alapján a mérőperemnek alkalmasnak kell lennie arra, hogy 15 liter/perces térfogatáram mérhető legyen vele. Ezt az értéket átváltva és a (4.6.1.1) egyenletbe behelyettesítve $D < 6{,}37$ cm adódik. Ebben az esetben azonban a mérőperemet csak az utolsó mérési pontban lehet használni. Ha azt akarjuk, hogy több mérési pontot is fel lehessen venni, célszerű 12 liter/min-re méretezni a mérőperemet. Így $D < 5{,}1$ cm adódik. Ebből kifolyólag a mérőperem belső átmérőjét a szabvány által megengedett legkisebb értéknek, 5 cm-nek választottam.

Mivel az átmérő a szabvány által megengedett legalacsonyabb érték, a nyomásesést célszerű D-D/2 megcsapolással mérni – a szabvány által megengedett egyéb megcsapolások, például sarokmegcsapolás kivitelezése ilyen kicsi átmérő esetén meglehetősen nehézkes. Hogy a megcsapolás szabványos legyen, a mérőperem befolyó oldalán a mérőperemtől D távolságra egy 5 mm (a szabvány szerint 0,13 D-nél kisebb) átmérőjű lyukat kell fúrni a csőbe, majd ezzel egy vonalban, az áramlás irányával párhuzamosan, a mérőperem kifolyó oldalán, a mérőperemtől bemenő oldalától D/2 távolságra is kell egy 5 mm átmérőjű lyukat fúrni a csőbe, és ezek között mérni a nyomáskülönbséget.

A mérőperem tervezésének következő lépése az átmérőviszony megválasztása. Az átmérőviszonyt úgy kell kiválasztani, hogy mellette a nyomásesés (2.1.6.2) szerint kisebb legyen, mint 2450 Pa, és a mérőperemet a szabvány szerint be lehessen építeni. A szabvány közli az átmérőviszony függvényében a mérőperem előtt illetve után szükséges egyenes csőszakasz hosszát. Ez az érték az átmérőviszony növekedésével nő, ebből kifolyólag célszerű minél kisebb átmérőviszonyú mérőperemet tervezni. Ezzel ellentétes szempont azonban, hogy az átmérőviszony csökkenésével a (2.3.1.1-5) egyenletek szerint meredeken nő az adott térfogatáramhoz tartozó nyomásesés. A megfelelő átmérőviszony kiválasztásakor egyszerre kell figyelembe venni ezeket a szempontokat.

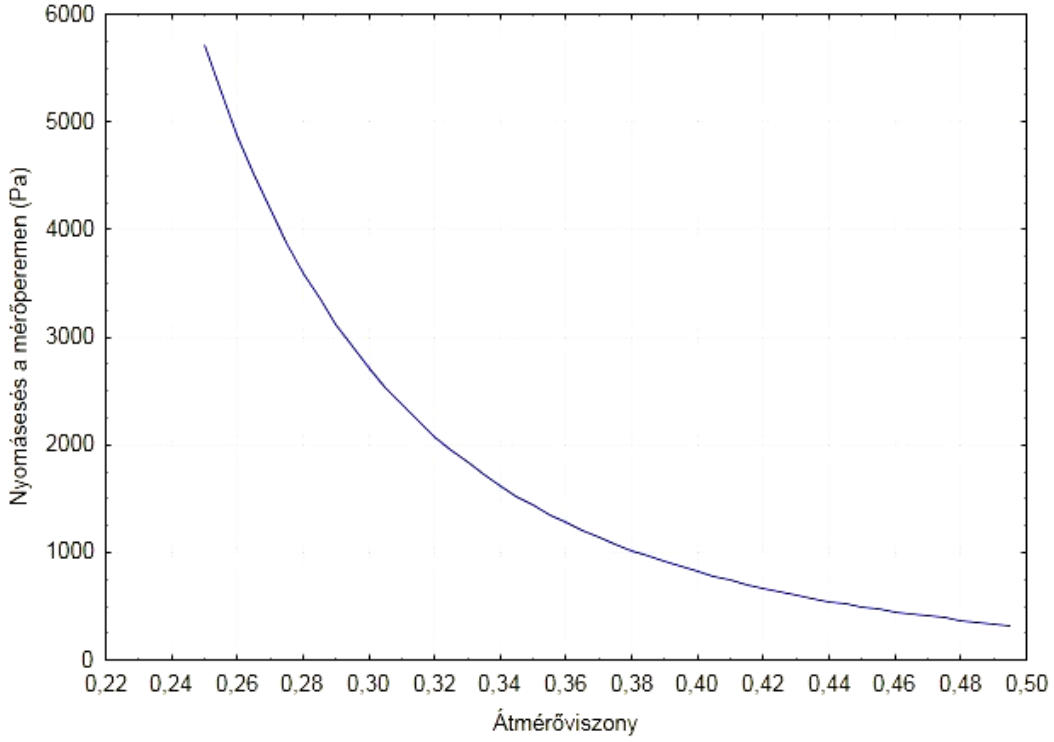
A mérőperem előtt illetve után beépítendő egyenes csőszakasz hosszának nem szabad meghaladnia az 1,8 m-t, mivel a berendezés kialakítására 2 m magas hely áll rendelkezésre, és a mérőperem után még egy, a szakaszolást szolgáló csapnak, valamint utána egy T-idomnak is helyet kell biztosítani. Ahhoz, hogy a szabvány szerint meg lehessen határozni a mérőperem előtt szükséges egyenes csőszakasz hosszát, ismerni kell a mérőperem előtti két zavaró elemet. Anyagtakarékossági szempontból nem célszerű az egész csőszakaszt 5 cm belső átmérővel elkészíteni. Az első zavaró elem a mérőperem előtt ezért legyen egy koncentrikus bővítés, ami a szabvány szerint egy 10 cm-es szakaszon az áramlási keresztmetszetet 2,5 cm-ről 5 cm-re bővíti. A második zavaró elemnek egy 90°-os könyököt

választottam, ami az áramlás síkján nem változtat. A szabvány alapján, ezzel a kialakítással a mérőperem átmérőviszonya legfeljebb 0,4 lehet. A *4.5. táblázat* ezt szemlélteti, figyelembe véve, hogy D = 0,05 m, az első zavaró elem egy D/2-ről D-re történő bővítés, a második pedig egy 90°-os könyök.

β	A mérőperem és az első zavaró elem közötti egyenes csőszakasz hossza [m]	Az első és a második zavaró elem közötti egyenes csőszakasz hossza [m]	A mérőperem utáni egyenes csőszakasz hossza [m]	Összesen [m]
0,2	0,3	0,55	0,2	1,15
0,4	0,6	0,55	0,3	1,45
0,5	1	0,55	0,3	1,85
0,6	1,3	0,55	0,35	2,2
0,67	1,4	0,55	0,35	2,3
0,75	1,8	0,55	0,4	2,75

4.5. táblázat: a mérőperem előtt és után beépítendő egyenes csőszakasz hossza a hatályos szabvány alapján számolva [11]

A következő diagramon látható a 15 liter/perces térfogatáramhoz tartozó nyomásesés az átmérőviszony függvényében.



4.12. ábra: Nyomásesés a mérőperemen az átmérőviszony függvényében 15 lit/min térfogatáram mellett

Az átmérőviszony alsó határát az szabja meg, hogy az ehhez tartozó nyomásesés 15 liter/perces térfogatáram mellett az adott manométeren legfeljebb 0,5 m kitérést okozzon (a 4.3 fejezetben leírtak szerint ez az érték 2450 Pa). Az ehhez tartozó átmérőviszony a diagram alapján 0,31. Az átmérőviszonynak tehát 0,31 és 0,4 közé kell esnie. Az átmérőviszonyt 0,4-nek választottam, mert a mérőperemmel így akár 25 liter/perces térfogatáram is mérhető, ha a megadott differenciálmanométert alkalmazzuk a nyomásesés mérésére. Ez lehetővé teszi, hogy a mérőperemet más mérésekhez is használni lehessen.

A szabvány a mérőperem vastagságára is kitér. A *2.4. ábra* jelölései szerint

$$E \leq 0{,}05\ D \text{ , ha } D \leq 0{,}064\ m,\ E \leq 3{,}2\ mm \tag{4.6.1.1}$$

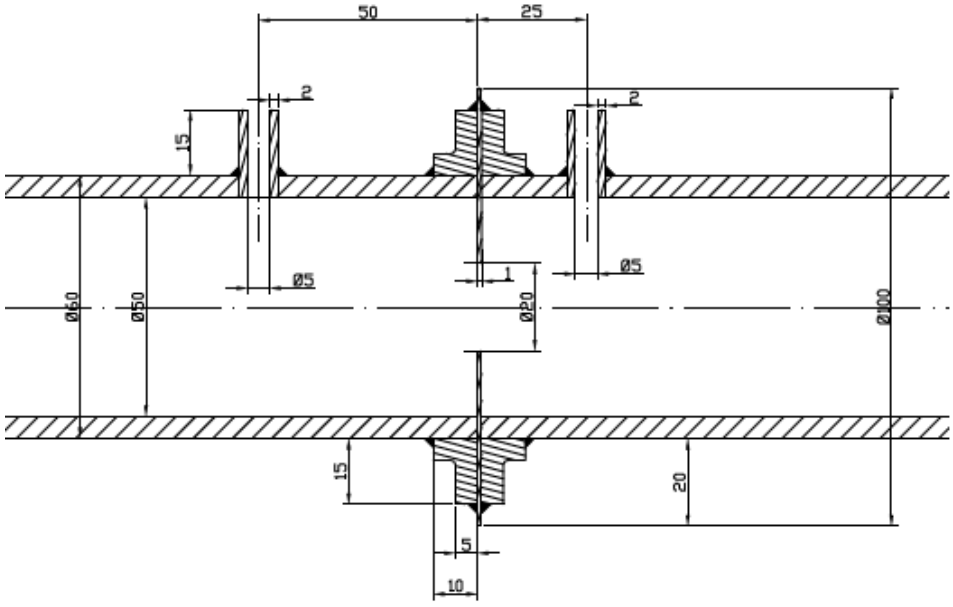
$$0{,}005\ D \leq e \leq 0{,}02\ D \tag{4.6.1.2}$$

$$e \leq E \tag{4.6.1.3}$$

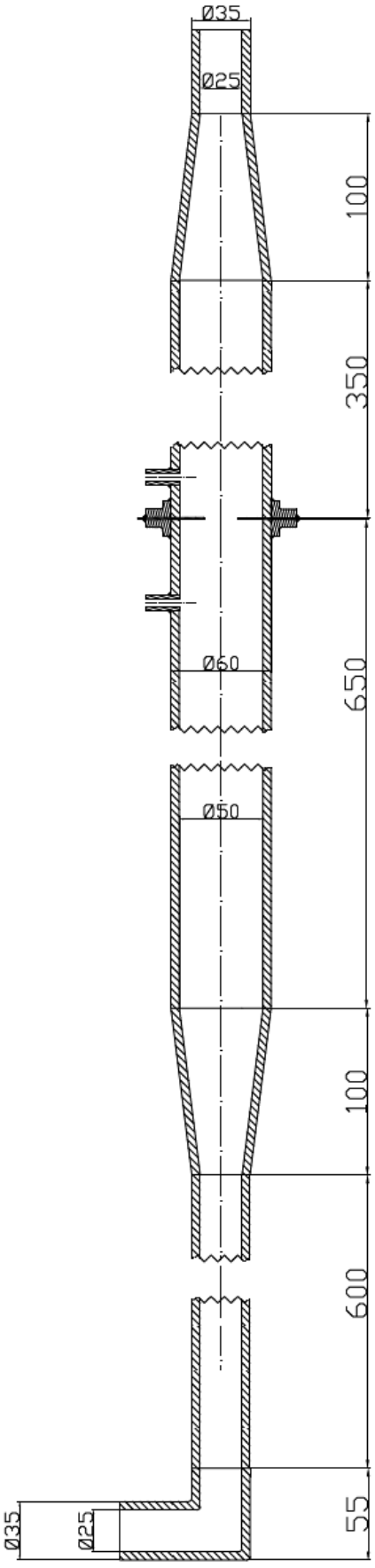
$$F = 45 \pm 15° \text{ (ha } e \neq E) \tag{4.6.1.4}$$

A szabvány előírásai alapján, a könnyű kialakíthatóságot szem előtt tartva $E = e = 1\ mm$-t választottam. Mivel a csővezetékek rozsdamentes acélból készülnek, a mérőperem anyaga is legyen rozsdamentes acél.

A mérőperem kialakítását és üzembe helyezésének módját a *4.13-14. ábrák* szemléltetik. A zavaró elemek közti távolságok meghatározásakor tekintettel voltam a szabványra, valamint törekedtem a rendelkezésre álló hely maximális kihasználására.



4.13. ábra: a mérőperem keresztmetszeti képe



4.14. ábra: a mérőperem beépítése

4.6.2 Rotaméterek méretezése

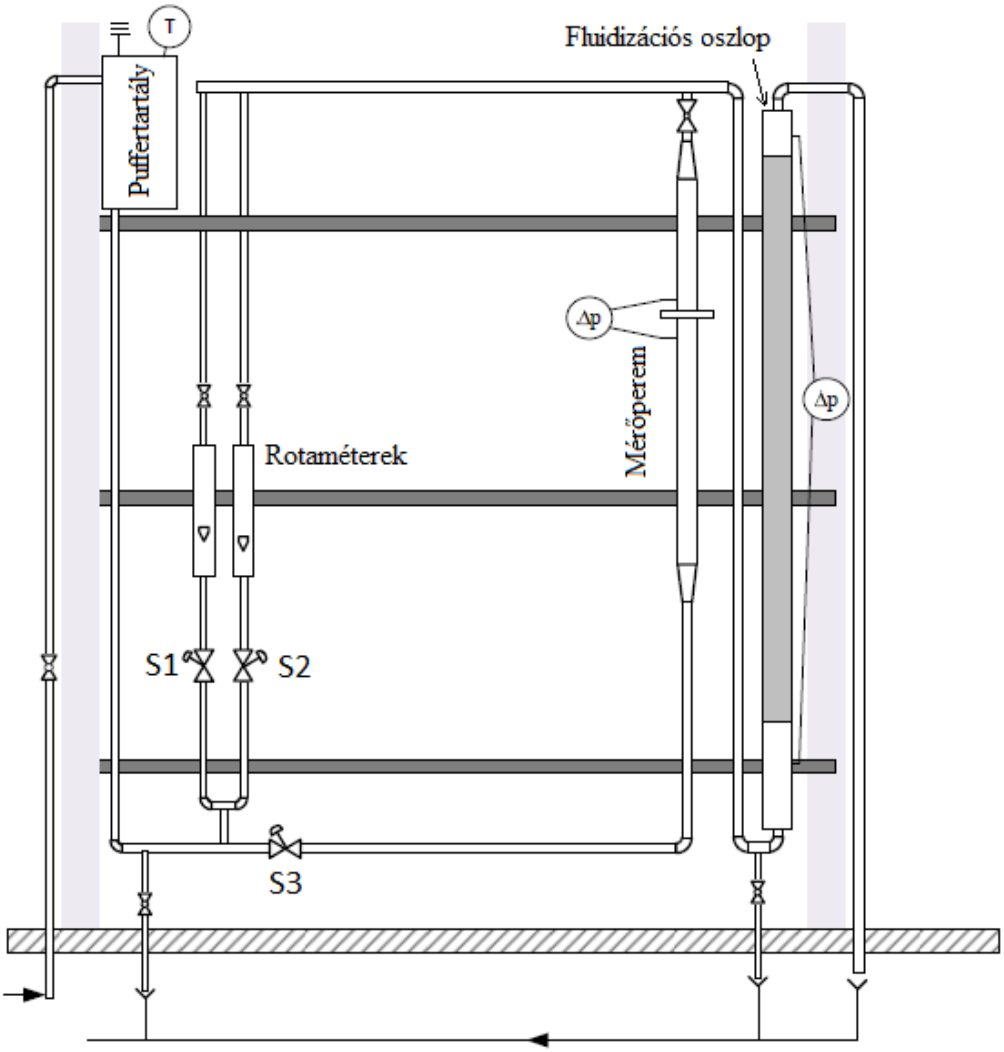
Szabványos mérőperem csak 11,8 liter/perc (≈700 liter/óra) fölötti térfogatáramok mérésére alkalmas. Ahol a térfogatáram ennél kisebb, célszerű rotamétert használni.

A mérés célja a fluidizáció jelenségének tanulmányozása, ezért célszerű egy olyan rotamétert is beépíteni, melyről a fluidizáció kezdetéhez tartozó sebesség kis relatív hibával leolvasható. A *4.3. táblázat* és az oszlopátmérő ismeretében kijelenthető, hogy a töltet ≈180 liter/óra térfogatáramnál kezd fluidizálni. A kezdeti fluidizációs sebesség mérésére ezért egy 250 liter/óra felső méréshatárú rotamétert választottam.

A mérőperem csak ≈700 liter/órás térfogatáram fölött használható, ezért szükséges egy másik rotaméter beépítése is. Ennek felső méréshatára legyen 1000 liter/óra, így van átfedés a rotaméter és a mérőperem alkalmazhatósági tartományai között.

4.6.3 A berendezés vázlatos rajza

A berendezés vázlatos rajza a *4.15. ábrán* látható. Az S1 szelep után található a 250 liter/óra felső méréshatárú rotaméter, az S2 szelep után pedig a 250 liter/óra felső méréshatárú rotaméter. A berendezés alján leeresztőcsapok találhatók. Az ábra bal felső sarkában látható puffertartály feladata a vízvezetékekben történő nyomásingadozás hatásának csökkentése. A puffertartály - mely egy 0,2 m átmérőjű, 0,4 m magas henger - úgy van méretezve, hogy benne mindig legalább annyi víz legyen, amennyi a mérőberendezés többi részében (oszlop, áramlásmérők, csővezetékek) összesen. A puffertartályban történik a víz hőmérsékletének mérése, melynek alapján a pontos sűrűség- és viszkozitásértékek meghatározhatók, valamint itt található egy légtelenítő szelep is.



4.15. ábra: A félüzemi fluidizációs berendezés vázlatos rajza

4.6.4 Szelepek méretezése

A mérés során a térfogatáram ≈150-900 lit/h között változik. Ennek szabályozása a nagy terjedelem miatt nem oldható meg egyetlen szabályozószeleppel, ezért minden térfogatáram-mérőeszköz elé külön szabályozószelepet kell rakni. A 250 lit/h méréshatárú rotaméter előtti szelepet S1, az 1000 lit/h méréshatárú rotaméter előtti szelepet S2, a mérőperem előtti szelepet S3 jelöli (*4.15. ábra*).

A méretezés szabályozószelepeknél tulajdonképpen az úgynevezett átfolyási szám ($k_{v,max}$) értékének megállapítását jelenti. Ez megadja a szabályozószelepen történő 1 bar nyomásesés hatására átáramló, 1 relatív sűrűségű áramot abban az esetben, ha a szelep teljesen nyitva van. A szelepen átáramló folyadék térfogatárama $k_{v,max}$, a szelep nyomásesése és az áramló folyadék sűrűségének ismeretében a következő képlettel számítható[18]:

$$W = k_{v,max} * \sqrt{\frac{\Delta p_{sz}}{\rho_{rel}}} \quad (4.6.4.1)$$

, ahol ρ_{rel} a szelepen átáramló fluidum 20°-os víz sűrűségéhez viszonyított relatív sűrűsége, Δp_{sz} a szelepen létrejövő nyomásesés bar dimenzióban. Ahhoz, hogy meghatározott feladat ellátására alkalmas szabályozószelep $k_{v,max}$ értékét meghatározzuk, meg kell becsülni a szelepen történő nyomásesést. Mivel a torlónyomás állandó, a teljes rendszer nyomásesése a szabályozószelep és az egyéb szerelvények között oszlik meg. Teljesen zárt szabályozószelep esetében a teljes nyomás a szelepen esik, hiszen nulla a folyadékáram. A másik véglet a teljesen nyitott szabályozószelep, amikor már nem nő tovább a folyadékáram, mert a szelepen történő nyomásesés csak ennyi folyadékot képes a rendszeren, beleértve a szelepet, átjuttatni. Ez a nyomásesés érték a szelep méretezéséhez fontos, hiszen a legrosszabb esetre méretezünk, tehát, amikor a legkisebb a nyomásesés és a legnagyobb a folyadékáram. A szelepnek ennyit kell „tudnia", ehhez az üzemállapothoz határozzuk meg az átfolyási számot [18].

A DCs hallgatói laboratóriumában végzett mérések alapján kijelenthető, hogy a csővezetékben a földszinten legalább 4,6 bar nyomás uralkodik (ez az érték úgy lett meghatározva, hogy figyelembe vettem az egyéb vízfogyasztókat is). Ahhoz, hogy a szelepet a (4.6.4.1) egyenlet szerint méretezni lehessen, ismerni kell a szelepen történő nyomásesést. Ahhoz, hogy ezt ki becsülni lehessen, ismerni kell a szelepen kívüli szerelvények nyomásesését.

A szelep nyomásesésének számításához ismerni kell a teljes rendszer súrlódási nyomásveszteségét (Δp_v). A Bernoulli-egyenlet szerint: [15]

$$p_1 + \frac{v_1^2 \rho_f}{2} + \rho_f g h_1 = p_2 + \frac{v_2^2 \rho_f}{2} + \rho_f g h_2 + \Delta p_v \quad (4.6.4.2)$$

A szelep nyomásesése akkor a legkisebb, amikor a legnagyobb az áramlási sebesség. A számítást ezért célszerű a tervezett legnagyobb térfogatáramra, 15 liter/percre elvégezi. Az oszlop teteje a földszinthez képest 7 m magasan van, a csővezeték átmérője a csapból kilépve 0,75 inch, az oszlop tetején 1 inch, h_2-h_1 = 7 m, v_1 = 0,877 m/s, v_2 = 0,493 m/s. A rendszer a légkörre nyitott, tehát p_2 = 101325 Pa, p_1 a laboratóriumban végzett mérések alapján legalább 4,6 bar. Ezeket behelyettesítve, és a (4.6.4.2) egyenletet átrendezve a nyomásveszteség:

$$\Delta p_v = 2{,}91\ bar = \Delta p_e + \Delta p_{sz} \quad (4.6.4.3)$$

Δp_e a nyomásesés a rendszer elemein, a szelepen kívül. Ennek számításakor figyelembe vettem, hogy a térfogatáram mérőperemmel mérhető, tehát az S1 és S2 szabályozószelepek teljesen zárva vannak. Az áramlás az S3 szelepen és a mérőperemen keresztül történik. A kör keresztmetszetű, egyenes csőszakaszok nyomásveszteségét a (4.5.4.1) egyenlettel, a töltött oszloprészek nyomásveszteségét a (2.1.4.1) és (2.1.6.2) egyenletekkel, a mérőperem nyomásesését a (2.3.1.1) egyenlet átrendezésével, az egyéb idomok nyomásveszteségét a következő képlettel számoltam:

$$\Delta p = \zeta \frac{v^2 \rho_f}{2} \tag{4.6.4.4}$$

, ahol ζ a veszteségtényező, melyet kézikönyv alapján határoztam meg az egyes idomokra [15]. A számítások eredménye alapján $\Delta p_e = 0{,}1$ bar, tehát a szelepen a (4.6.4.3) egyenlet szerint legrosszabb esetben is 2,81 bar nyomáseséssel lehet számolni. Ezt az értéket használtam fel a szabályozószelepek méretezésére. A szelep méretezésekor exponenciális karakterisztikát tételeztem fel. A könnyebb szabályozhatóság érdekében még egy megkötést tettem: a kívánt térfogatáramot a szelep akkor engedje át, ha az 75 %-ban nyitva van. A szabályozószelepek $k_{v,max}$ értéke az előző megkötés és a (4.6.4.1) egyenlet alapján (kerekített értékek):

Szelep	$W_{z=0,75}$ (lit/h)	$k_{v,max}$ (lit/h)
S1	250	310
S2	700	880
S3	1000	1250

4.6. táblázat: az egyes szabályozószelepek átfolyási száma

5. Összefoglalás

A Kémiai és Környezeti Folyamatmérnöki Tanszék megbízásából a tudományos diákköri munkám keretében egy olyan mérőberendezést terveztem, amely a tervezési megkötések betartása mellett alkalmas a fluidizáció jelenségének vizsgálatára. Az oszlopban szilárd anyag fluidizációja történik vizes közegben.

Munkám során elvégeztem a fluidizációs oszlop méretezését, a töltet kiválasztását és beszerzését. Emellett elvégeztem a méréshez szükséges áramlásmérők tervezését, többek között egy mérőperem a hatályos szabvány előírásainak megfelelő részletes megtervezését is. A tervezés során nagy hangsúlyt fektettem a berendezés elhelyezésére szánt terület maximális kihasználására, valamint arra, hogy a mérés szivattyú alkalmazása nélkül is elvégezhető legyen. Az oszlop és a mérőperem méretezése után azok tervrajzát is elkészítettem AutoCAD 2007 programmal. A terveket átadtam kivitelezésre.

A továbbiakban ismertettem a mérés tervezett folyamatát, melyhez egy hallgatói segédletet is készítettem. A készülékkel a hallgatók egy olyan jelenséget vizsgálhatnak laboratóriumi mérés keretében, amit az élelmiszer- és vegyipar számos területén alkalmaznak.

Jövőbeni terveim között szerepel a mérőberendezés beüzemelésében történő részvétel, a hallgatói leirat pontosítása a kész berendezés tulajdonságainak megfelelően, valamint a mérési adatok összehasonlítása az irodalmi bevezetőben található egyenletekkel számított eredményekkel.

6. Irodalomjegyzék

[1] Wen-Ching Yang: Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems, Routledge, 2003

[2] Leva M.: Fluidizáció, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1964

[3] Fonyó Zs., Fábry Gy.: Vegyipari művelettani alapismeretek, Nemzeti Tankönyvkiadó, 2004

[4] Lucas A, Arnaldos J, Casal J, Puigjaner L.: Improved equation for the calculation of minimum fluidization velocity, Ind Eng Chem Process Des Dev 25:426–429, 1986.

[5] Chen JJJ.: Comments on „Improved equation for the calculation of minimum fluidization velocity", Ind Eng Chem Res 26:633–634, 1987

[6] Grbavčić ZB, Garić RV, Hadjismalović DzE, Jovanović S, Vuković DV, Littman H, Morgan III MH.: Variational model for prediction of the fluid–particle interphase drag coefficient and particulate expansion of fluidized and sedimenting beds, Powder Technology 68:199–211, 1991

[7] Haider A, Levenspiel O.: Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles, Powder Technology 58:63–70, 1989

[8] Pjontek, D., Macchi, A.: Hydrodynamic comparison of spherical and cylindrical particles in a gas–liquid–solid fluidized bed at elevated pressure and high gas holdup conditions. Powder Technol. 253, 657–676, 2014

[9] Fonyó Zs., Deák A., Sawinsky J.: Vegyipari félüzemi praktikum, Műegyetemi Kiadó, 2000

[10] Kósa L., Lukenics J., Verba A.: Vegyipari géptan II., BME Printer Kft., 2012

[11] MSZ EN ISO 5167:2-2003

[12] Mark J. E.: Polymer Data Handbook, Oxford University Press, 1999

[13] Li T., Li S. X.,Zhao J., Lu P., Meng L.Y.: Sphericities of non-spherical objects, Particuology, 10 (1), 97‑104, 2012

[14] Chhabra, R.P.: Wall effects on free-settling velocity of non-spherical particles in viscous media in cylindrical tubes. Powder Technol. 85, 83–90, 1995

[15] Perry R. H., Green D. W.: Perry's Chemical Engineers' Handbook, McGraw-Hill, 1999

[16] Jackson R.: The Dynamics of Fluidized Particles, Cambridge University Press, 2000

[17] Tihanyi L.: Súrlódási tényező – A gázhálózati modellek kulcsparamétere, Kőolaj és Földgáz 35. (135.) 7-8., 81-85, 2002

[18] Mizsey P.: Folyamatirányítási rendszerek, Typotex kiadó, 2011

7. Függelék

7.1 Jelölésjegyzék

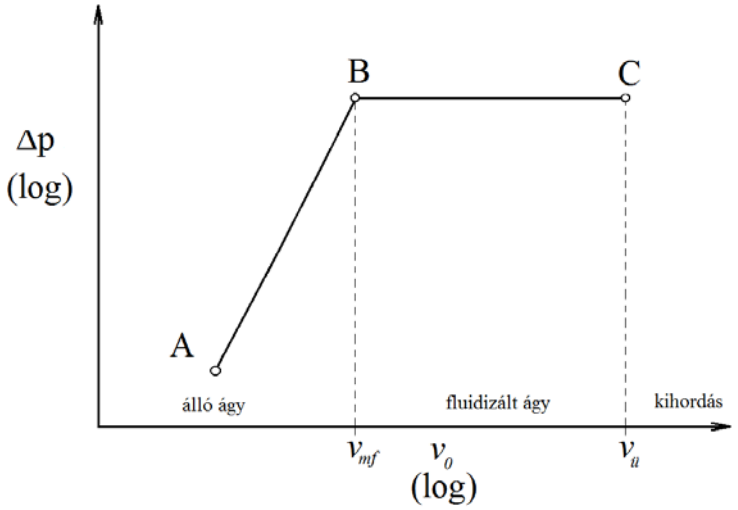
Jelölés	*Megnevezés*	*Mértékegység*
A	*felület*	m^2
A_p	*tetszőleges részecske felülete*	m^2
Ar	*Archimedes-szám*	-
B_1	*a Grbavčić-egyenlet paramétere*	-
B_2	*a Grbavčić-egyenlet paramétere*	-
c	*Re_s-től függő paraméter*	-
C	*átfolyási szám*	-
C_1	*a (2.1.7.6) egyenlet paramétere*	-
C_2	*a (2.1.7.6) egyenlet paramétere*	-
d	*a mérőperem kisebb átmérője*	m
D	*a mérőperem nagyobb átmérője*	m
d_c	*oszlopátmérő*	m
D_c	*csőszakasz átmérője*	m
d_p	*egy test jellemző mérete*	m
$d_{p(V)}$	*térfogati átmérő*	m
$d_{p(SV)}$	*felületi-térfogati átmérő*	m
D_s	*lyukak mérete rácson*	m
D_r	*a rácsot alkotó anyag vastagsága*	m
e	*a mérőperemre jellemző méret*	m
E	*a mérőperemre jellemző méret*	m
E_m	*a mérőperem átmérőviszonyától függő paraméter*	-
f	*csősúrlódási tényező*	-
F	*a mérőperemre jellemző szög*	°
Fr	*Froude-szám*	-
g	*gravitációs gyorsulás*	m/s^2
h	*magasságkülönbség a manométer szárai között*	m
h_1	*a Bernoulli-egyenlet 1-es pontjának magassága*	m
h_2	*a Bernoulli-egyenlet 2-es pontjának magassága*	m
k	*az ülepedési sebesség korrekciós faktora*	-
K	*a rács nyomásesésének szorzó tényezője*	-
$k_{V,max}$	*szelep átfolyási száma*	m^3/s
L	*a töltet magassága*	m
L_0	*hézagmentes töltetmagasság*	m
L_s	*csőszakasz hossza*	m
M	*a töltet tömege*	kg
n	*a Richardson-Zaki egyenlet kitevője*	-
p_1	*nyomás a Bernoulli-egyenlet 1-es pontjában*	Pa
p_2	*nyomás a Bernoulli-egyenlet 2-es pontjában*	Pa
Re_D	*a mérőperemre jellemző Reynolds-szám*	-
Re_{mf}	*a fluidizációhoz szükséges minimális Reynolds-szám*	-
Re_p	*egy részecskére jellemző Reynolds-szám*	-
Re_s	*rács Reynolds-száma*	-
$Re_{ü}$	*ülepedési Reynolds-szám*	-

v	*áramlási sebesség*	*m/s*
V	*térfogat*	m^3
v_0	*a fluidum üres oszlopra vonatkoztatott áramlási sebessége*	*m/s*
v_1	*áramlási sebesség a Bernoulli-egyenlet 1-es pontjában*	*m/s*
v_2	*áramlási sebesség a Bernoulli-egyenlet 2-es pontjában*	*m/s*
v_{max}	*maximális áramlási sebesség*	*m/s*
v_{mf}	*a fluidizációhoz szükséges minimális áramlási sebesség*	*m/s*
V_p	*tetszőleges részecske térfogata*	m^3
$v_ü$	*ülepedési határsebesség*	*m/s*
$v_ü$’	*korrigált ülepedési határsebesség*	*m/s*
W	*térfogatáram*	m^3/s
W_{max}	*maximális térfogatáram*	m^3/s
W_{mf}	*a fluidizációhoz szükséges minimális térfogatáram*	m^3/s
z	*a szelep nyitottságának aránya*	-
α	*a rács szabad felületének aránya*	-
α'/α'_{mf}	*a Grbavčić-egyenlet súrlódási tényezője*	-
β	*átmérőviszony*	-
Δp	*nyomáskülönbség*	*Pa*
Δp_d	*nyomásesés az áramlásrendezőn*	*Pa*
Δp_e	*nyomásesés a rendszer elemein, a szelepen kívül*	*Pa*
Δp_r	*rácsnyomás*	*Pa*
Δp_{sz}	*nyomásesés szelepen*	*Pa*
Δp_t	*nyomásesés a tölteten*	*Pa*
Δp_v	*súrlódási nyomásveszteség*	*Pa*
ε	*relatív hézagtérfogat*	-
ε_{mf}	*a fluidizációhoz szükséges minimális relatív hézagtérfogat*	-
ζ	*veszteségtényező*	-
η_f	*fluidum dinamikai viszkozitása*	*Pas*
λ_B	*a Grbavčić-egyenlet paramétere*	-
ρ_f	*fluidum sűrűsége*	kg/m^3
ρ_p	*töltet sűrűsége*	kg/m^3
ρ_R	*Raschig-gyűrű anyagának sűrűsége*	kg/m^3
ρ_{ref}	*referenciafolyadék sűrűsége*	kg/m^3
ρ_{rel}	*relatív sűrűség*	kg/m^3
Φ	*szfericitás*	-
ω	*fajlagos töltetfelület*	m^2/m^3

7.2 Hallgatói segédlet a fluidizációs méréshez

Elméleti összefoglalás

Ha egy töltött csőben áramló fluidum üres oszlopra vonatkoztatott áramlási sebességét (v_0) növeljük és közben mérjük a töltet nyomásesését, majd ezeket logaritmikus skálán ábrázoljuk, akkor - amennyiben az oszlop lazán van töltve - a következő görbét kapjuk [1]:



Az A és B pontok közötti szakaszon a töltet nyugalomban van. Itt az Ergun-képlet értelmében a nyomásesés először a sebességgel arányosan, majd nagyobb áramlási sebességeknél a sebesség négyzetével nő (logaritmikus skálán ábrázolva ez közel egyenest ad). A nyomásesés számítása álló ágy esetén a következő képlettel történik:

$$\Delta p = v_0^2 \rho_f \left(\frac{L}{\phi d_{p(V)}}\right) \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \left[\frac{150(1-\varepsilon)}{\phi Re_p} + 1{,}75\right] \qquad (1)$$

,ahol

L a töltött oszloprész magassága [m]

ε a fajlagos hézagtérfogat [-]

v_0 az üres oszlopra vonatkoztatott áramlási sebesség [m/s]

ρ_f a fluidum sűrűsége [kg/m^3]

$d_{p(V)}$ a töltet egy szemcséjével azonos térfogatú gömb átmérője [m]

Φ a töltet szfericitása [-]

Re_p a töltet Reynolds-száma (=$d_{p(V)} v_0 \rho_f / \eta_f$, ahol η_f a fluidum dinamikai viszkozitása)

Ez azonban felfelé áramló fluidumban csak addig érvényes, míg az így számított nyomásesés el nem éri a töltetnek az 1 m^2 rácsfelületre eső archimedesi súlyát (B pont). A B pont után a részecskék elválnak egymástól, és a fluidumban egyenként lebegnek. Ez a pont a fluidizáció kezdőpontja, az ehhez tartozó áramlási sebesség pedig a minimális fluidizációs sebesség (v_{mf}). Ha a sebességet tovább növeljük, az ágy kiterjed és a nyomásesés állandó marad. Ezt a konstans nyomásesést, amit rácsnyomásnak is szoktak nevezni a következő képlettel számíthatjuk [2]:

$$\Delta p_r = L(1-\varepsilon)(\rho_p - \rho_f)g \qquad (2)$$

,ahol

ρ_p a töltet sűrűsége [kg/m^3]

A fluidizáció kezdetéhez szükséges áramlási sebességet úgy számíthatjuk, ha az (1) és (2) egyenleteket egyenlővé tesszük. Az így kapott egyenlet átrendezésével egy Reynolds-számra nézve másodfokú egyenletet kapunk:

$$Re_{mf}^2 + \frac{150}{1{,}75}\frac{(1-\varepsilon_{mf})}{\phi} Re_{mf} - \frac{\phi \varepsilon_{mf}^3 Ar}{1{,}75} = 0 \qquad (3)$$

,ahol

ε_{mf} a fluidizációhoz szükséges minimális hézagtérfogat (lazán töltött oszlop esetén egyenlő a nyugalmi hézagtérfogattal) [-]

Ar Archimedes-szám [-]

Re_{mf} a fluidizációhoz szükséges minimális Reynolds-szám ($=d_{p(V)}v_{mf}\rho_f/\eta_f$)

Az Archimedes-szám a következő képlettel számítható:

$$Ar = \frac{d_{p(V)}^3 \rho_f (\rho_p - \rho_f) g}{\eta_f^2} \qquad (4)$$

A (3) egyenlet valós gyöke:

$$Re_{mf} = \sqrt{C_1^2 + C_2 Ar} - C_1 \qquad (5)$$

,ahol

$C_1 = 42{,}86*(1-\varepsilon_{mf})/\Phi$

$C_2 = 0{,}5714*\Phi^* \varepsilon_{mf}^3$

Re_{mf} számításához a fenti módszer szerint ε_{mf} és ϕ ismerete szükséges. Mivel ez a számítási módszer meglehetősen érzékeny az ε_{mf} értékére, továbbá az Ergun-egyenlet konstansai nem teljes körűen elfogadottak, az egyes kutatók által kísérletek alapján javasolt C_1 és C_2 értékek a jobb egyezést adhatnak a mérési adatokkal [1]. Ezek előnye még, hogy segítségükkel ε_{mf} és ϕ pontos ismerete nélkül is meghatározható a fluidizációhoz szükséges minimális Reynolds-szám. Lucas és társai a következő értékeket javasolták [3]:

C_1	C_2	feltétel
29,5	0,0357	$0{,}8 \leq \phi \leq 1$
32,1	0,0571	$0{,}5 \leq \phi < 0{,}8$
25,2	0,0672	$0{,}1 < \phi < 0{,}5$

Chen szerint tetszőleges alakú részecskékre C_1 és C_2 a következő képletekkel számolható, ha ϕ ismert vagy jól becsülhető [4]:

$C_1 = 33{,}07\Phi^{0,1}$

$C_2 = 0{,}0408/\Phi^{0,45}$

A (2) képletből és a rácsnyomás állandóságából következik, hogy $L(1-\varepsilon)$ konstans. Fluidizált állapotban tehát a nyomásesés a relatív hézagtérfogat - és az ágymagasság - folyamatos növekedése miatt állandó mindaddig, míg a fellazulás el nem éri azt a mértéket, melynél már az egyes részecskék oly távol vannak egymástól, hogy nem befolyásolják egymást (C pont). Ezen a ponton megkezdődik a kihordás, a sebességet tovább növelve valamennyi részecske távozik az oszlopból az áramló fluidummal együtt. Ideális esetben, ha nincs falhatás és a fluidum áramlási sebessége a teljes keresztmetszet mentén állandó, a C ponthoz tartozó áramlási sebesség az egyedi test ülepedési végsebessége ($v_{ü}$).

Az ülepedési határsebességhez tartozó Reynolds-szám a következő képlettel számítható [5]:

$$Re_{\text{ü}} = Ar^{1/3}\left(\frac{18}{Ar^{2/3}} + \frac{2{,}335-1{,}744\phi}{Ar^{1/6}}\right)^{-1} \quad (6)$$

,ahol

$Re_{ü}$ az ülepedési Reynolds-szám ($=d_{p(V)}v_{ü}\rho_f/\eta_f$)

Az ülepedési Reynolds-számból kifejezhető a test ülepedési határsebessége. A (6) egyenlettel a végtelen térre vonatkoztatott ülepedési sebességet számolhatjuk. Ha figyelembe szeretnénk venni, hogy a test egy véges kiterjedésű oszlopban ülepedik, korrekciót kell alkalmazni. A *k* korrekciós tényező és a végtelen térre vonatkoztatott ülepedési sebesség szorzata a korrigált ülepedési sebesség.

$$v_{ü}^{'} = kv_{ü} \quad (7)$$

A korrekciós tényező számítására az irodalomban számos összefüggés található. Azt, hogy ezek közül melyik a legmegfelelőbb, az ülepedési Reynolds-szám és a töltet alakjának figyelembevételével kell eldönteni [6].

A fluidizált ágy kiterjedésének leírására szolgál a Richardson és Zaki által javasolt egyenlet:

$$\frac{v_0}{v_{\text{ü}}} = k\varepsilon^n \quad (8)$$

,ahol *k* a falhatásért felelős paraméter, *n* pedig egy kísérletileg meghatározható kitevő. Az *n* kitevő gömbökre jól becsülhető, más testekre azonban a mai napig sem sikerült megbízható összefüggést felállítani. Ennek ellenére Pjontek és Macchi kísérletei alapján kijelenthető, hogy a Newton-tartományban ($Re_{ü} > 500$) ülepedő homogén testek esetén $n \approx 2{,}4$, amennyiben $\phi > 0{,}8$ [6].

A fluidizáció gyakorlati alkalmazása

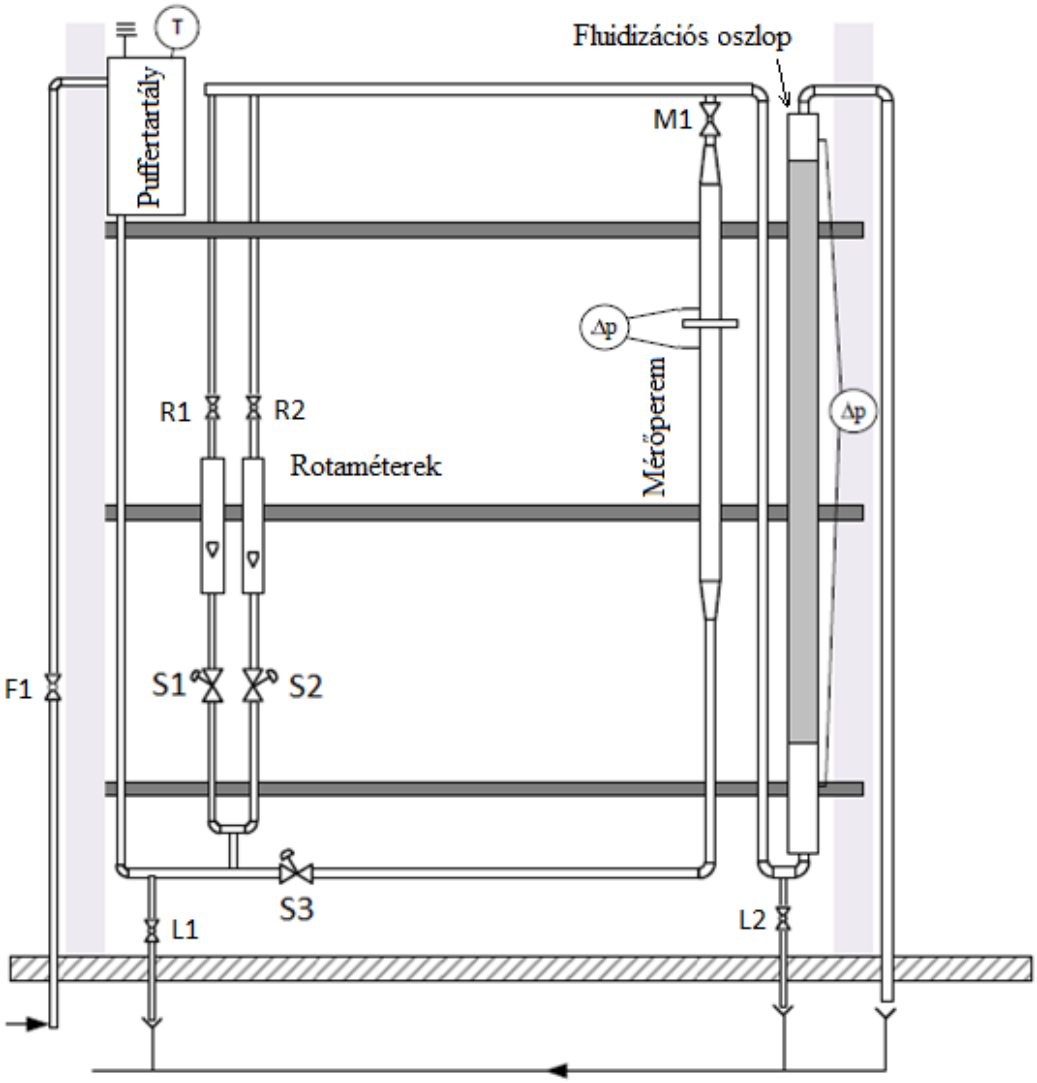
A fluidizált ágyaknak számos előnye van az álló ágyakkal szemben. Ha a töltet fluidizált állapotba kerül, folyadékhoz hasonlóan kezd viselkedni: a gázzal fluidizált szilárd anyag felszíne forró folyadékhoz hasonlít. A gázzal fluidizált ágyon lebegnek az ágynál kisebb sűrűségű testek, a nagyobb sűrűségű testek pedig elsüllyednek. A fluidizált ágy folyadékszerű viselkedése lehetővé teszi, hogy a szilárd anyagot folyadékként kezeljük. Ily módon a szilárd anyag folyamatos adagolása és elvétele is lehetségessé válik.

A fluidizált ágy alkalmazásának nagy előnye az ágyon belüli szinte tökéletes keveredés, ami lehetővé teszi, hogy erősen exoterm vagy endoterm reakcióknál is egyenletes hőmérséklet-eloszlást biztosítsunk. A kiváló keveredés miatt a szilárd-fluidum érintkeztetés is sokkal intenzívebb, mint álló ágyak esetén, ezért jobb hő- és anyagátadási tényezőkkel számolhatunk [1].

A fluidizáció legelterjedtebb alkalmazásai a gáz-szilárd fluidizációt alkalmazó rendszerek, például a kőolajiparban használt fluid katalitikus krakk (FCC), az élelmiszeriparban gyakran alkalmazott fluidizációs szárító és a szén égetésére kifejlesztett fluidizációs égetők. A folyadékkal fluidizált ágyak alkalmazásai közül érdemes megemlíteni a szennyvízkezelésnél alkalmazott fluidizált ágyas bioreaktort valamint a fluidizációs elektrolízist.

A mérés leírása

A mérőberendezés vázlata a következő ábrán látható:



A fluidizáció jelenségét 55 mm belső átmérőjű üvegcsőben tanulmányozzuk. A fluidizált PVC granulátum adatai:

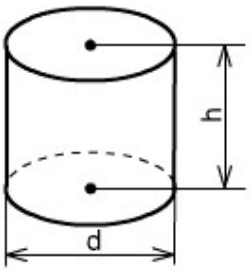
$d = 4\ mm$

$h = 3\ mm$

$\Phi = 0{,}865$

$\rho_p = 1440\ kg/m^3$

$\varepsilon = 0{,}45$



A rotaméterek méréshatára 0-250 lit/h illetve 100-1000 lit/h. Kalibrációs adataikat a készülék mellett elhelyezett tábláról olvashatjuk le. A mérőperem nagyobb átmérője (D) 5 cm, kisebb átmérője (d) 2 cm. A mérőperemen mért nyomásesésből a mellékletben található képletekkel számítható a térfogatáram. A nyomásesés mérése az oszlopon és a mérőperemen kétfolyadékos differenciálmanométerrel történik, melyben a referenciafolyadék sűrűsége 1500 kg/m^3.

A (7-8) egyenletekben megtalálható *k* korrekciós tényező értéke hengerre:

$$k = 1 - 1{,}33\frac{d_{p(V)}}{d_c}$$

, ahol d_c az oszlop belső átmérője

A nyugvó töltet magasságából az $L_0 = L(1-\varepsilon)$ képlet alapján számítsuk ki a hézagmentes töltetmagasságot (L_0). Az F1 csap megnyitása előtt zárjuk el az összes csapot és szelepet. Nyissuk meg teljesen az F1 csapot, majd az R1 csapot is. Ez után nyissuk meg lassan az S1 szelepet, és legalább 5 különböző rotaméter állásnál jegyezzük fel a térfogatáramot, a nyomásesést az oszlopon, az ágy magasságát, valamint a víz hőmérsékletét a puffertartályban. Ezután zárjuk az S1 szelepet, és ezzel egyidejűleg megnyitjuk az S2 szelepet és az R2 csapot. Zárjuk az R1 csapot, majd ismét legalább 5 különböző rotaméter állásnál jegyezzük fel a térfogatáramot, a nyomásesést az oszlopon, az ágy magasságát, valamint a víz hőmérsékletét a puffertartályban. Amikor a térfogatáram megközelíti a 700 liter/órát, zárjuk az S2 szelepet, és ezzel egyidejűleg megnyitjuk az S3 szelepet és az M3 csapot. Legalább 4 különböző nyomásesésnél jegyezzük fel a nyomásesést a mérőperemen, a nyomásesést az oszlopon, az ágy magasságát, valamint a víz hőmérsékletét a puffertartályban. Biztosítsuk, hogy egyszerre mindig csak egy rotaméteren vagy mérőperemen haladjon át a teljes térfogatáram! A mérés végeztével zárjuk el az F1 csapot, majd nyissuk meg az összes csapot és szelepet (az L1 és L2 leeresztő csapokat is!).

A mérés kiértékelése

1. A töltet adataiból határozzuk meg a töltet egy szemcséjével azonos térfogatú gömb átmérőjét [$d_{p(V)}$]
2. A leolvasott hőmérsékletadatokból határozzuk meg a víz sűrűségét, majd ennek felhasználásával minden mérési pontban határozzuk meg a manométeren mért szintkülönbségből a nyomásesést
3. A rotaméter kalibrációs diagramjai, illetve a mérőperemen mért nyomásesések alapján határozzuk meg minden mérési pontra a térfogatáramot
4. A térfogatáram adatokból számítsuk ki az üres oszlopra vonatkoztatott áramlási sebességet
5. A mért ágymagasságokból L_0 ismeretében számítsuk ki minden mérési pontban a relatív hézagtérfogatot
6. Ábrázoljuk log-log diagramon a nyomásesést az üres oszlopra vonatkoztatott áramlási sebesség függvényében, valamint a relatív hézagtérfogatot az áramlási sebesség függvényében. Jelöljük a fluidizáció kezdetét, és olvassuk le az ehhez tartozó áramlási sebességet
7. Számoljuk ki a fluidizáció kezdetéhez szükséges áramlási sebességet a (3-5) egyenletekkel, a megadott háromféle C_1-C_2 értékpárokat behelyettesítve. Hasonlítsuk össze a diagramról leolvasott értékkel!
8. A fluidizációt megelőző mérési pontokban számítsuk ki a nyomásesést az (1) egyenlettel. Hasonlítsuk össze a mérési adatokkal!
9. A mért rácsnyomást hasonlítsuk össze a (2) egyenletből számított értékkel!
10. Számítsuk ki, hogy a fluidizáció kezdete után az egyes áramlási sebességekhez a (6-8) egyenletek szerint milyen relatív hézagtérfogat tartozik, ha a (8) egyenletben található *n* kitevőt 2,4-nek vesszük. Az eredményeket hasonlítsuk össze a mérési adatokkal, értékeljük az eltérést! A (8) egyenlet linearizálásával, a fluidizált ágy mérési adataira egyenest illesztve határozzuk meg az *n* kitevő valódi értékét, valamint a korrigált ülepedési sebességet!
11. Eredményeinket foglaljuk össze táblázatban!

Sor-szám	Mérő-eszköz	t [°C]	Rota-méter állás [lit/h]	Mérőperem		W [lit/h]	v_0 [m/s]	L [m]	Töltet Δp			ε	
				Δh [mm]	Δp [Pa]				mért		számított	mért L alapján**	számított (8) egyenlettel n=2,4
									Δh [mm]	Δp [Pa]	Δp [Pa]*		
1	Kisebb rotaméter												
2													
3													
4													
5													
6	Nagyobb rotaméter												
7													
8													
9													
10													
11	Mérőperem												
12													
13													
14													
15													

*Álló ágy esetén az (1) egyenlettel, fluidizált ágy esetén a (2) egyenlettel

** Az $L_0 = L(1-\varepsilon)$összefüggés segítségével

A töltet jellemzői			
$d_{p(V)}$			m
v_{mf}	leolvasott		m/s
	Ergun		m/s
	Lucas		m/s
	Chen		m/s
$v_{ü}$'	(6-7)		m/s
	(8) linearizá-lásával, a mérési adatokból		m/s
n			

Nyomásesések összehasonlítása		
mért rácsnyomás		Pa
számított rácsnyomás		Pa
relatív hiba		%

Irodalom

[1] Wen-Ching Yang: Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems, Routledge, 2003

[2] Fonyó Zs., Fábry Gy.: Vegyipari művelettani alapismeretek, Nemzeti Tankönyvkiadó, 2004

[3] Lucas A, Arnaldos J, Casal J, Puigjaner L.: Improved equation for the calculation of minimum fluidization velocity, Ind Eng Chem Process Des Dev 25:426–429, 1986.

[4] Chen JJJ.: Comments on „Improved equation for the calculation of minimum fluidization velocity", Ind Eng Chem Res 26:633–634, 1987

[5] Haider A, Levenspiel O.: Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles, Powder Technology 58:63–70, 1989

[6] Pjontek, D., Macchi, A.: Hydrodynamic comparison of spherical and cylindrical particles in a gas–liquid–solid fluidized bed at elevated pressure and high gas holdup conditions. Powder Technol. 253, 657–676, 2014

Készítette: Kató Zoltán

Ellenőrizte: Dr. Benkő Tamás

Melléklet a Fluidizáció című méréshez: Mérőperemen átömlő folyadék térfogatáramának számítása D-D/2 megcsapolás esetén

$$W = CE_m \frac{d^2\pi}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_{flu}}}$$

, ahol

$$E_m = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}}$$

$$\beta = \frac{d}{D}$$

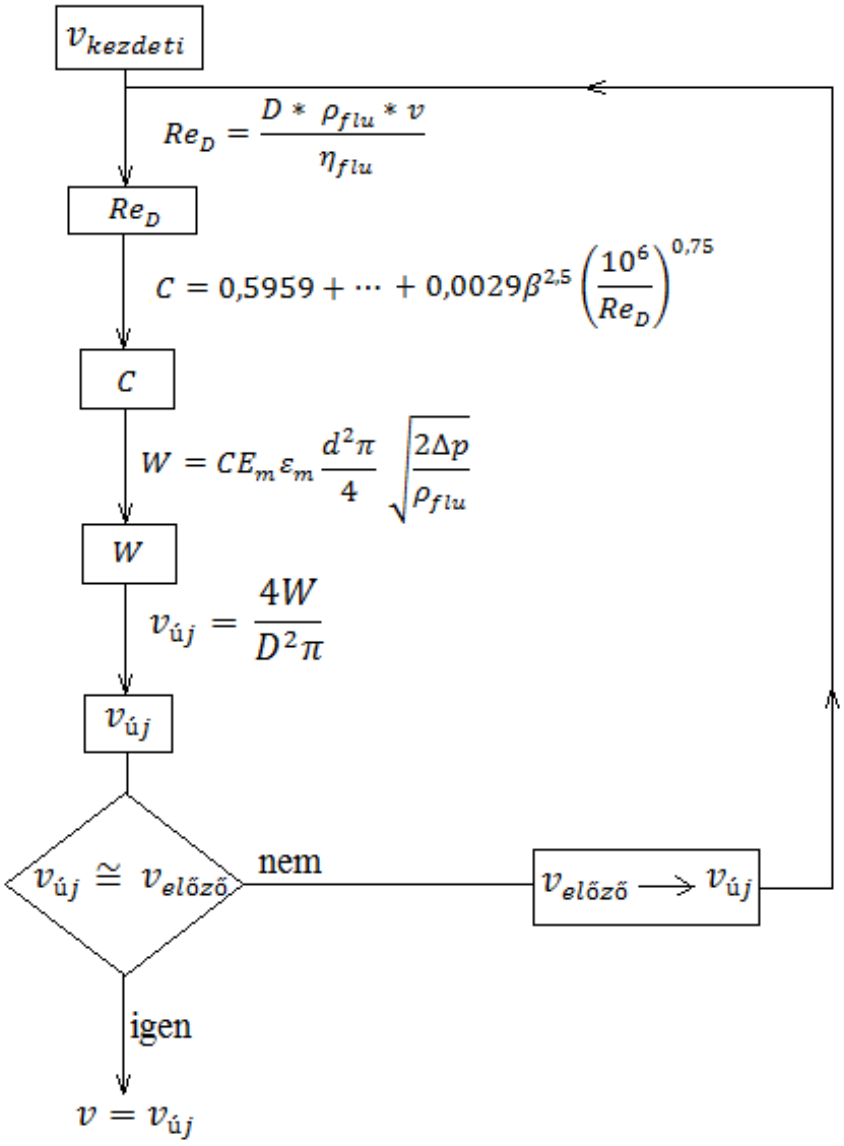
$$C = 0{,}5959 + 0{,}0390\frac{\beta^4}{1-\beta^4} + 0{,}0312\beta^{2{,}1} - 0{,}0158\beta^3 - 0{,}1840\beta^8 + 0{,}0029\beta^{2{,}5}\left(\frac{10^6}{Re_D}\right)^{0{,}75}$$

$$Re_D = \frac{D * \rho_{flu} * v}{\eta_{flu}}$$

Az egyes jelölések jelentése és mértékegysége:

W	térfogatáram	[m^3/s]
C	sebességi tényező	[-]
E_m	az átmérőviszonytól függő tényező	[-]
d	a mérőperem belső átmérője	[m]
Δp	a mérőperemen mért nyomásesés	[Pa]
ρ_{flu}	a fluidum sűrűsége	[kg/m^3]
ηf_{lu}	a fluidum viszkozitása	[Pas]
Re_D	a mérőperem Reynolds-száma	[-]
D	a csővezeték belső átmérője	[m]

A mérés során ismerni kell a fluidum hőmérsékletét, mert a fluidum sűrűsége és viszkozitása függ ettől. A sebességi tényező függ a Reynolds-számtól, a Reynolds-szám függ az áramlási sebességtől, az pedig függ a kiszámítandó térfogatáramtól. A probléma iterációval oldható meg. Az iteráció blokkdiagramja:


$v_{kezdeti}$
$Re_D = \frac{D * \rho_{flu} * v}{\eta_{flu}}$
Re_D
$C = 0{,}5959 + \cdots + 0{,}0029\beta^{2{,}5}\left(\frac{10^6}{Re_D}\right)^{0{,}75}$
C
$W = CE_m\varepsilon_m\frac{d^2\pi}{4}\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_{flu}}}$
W
$v_{új} = \frac{4W}{D^2\pi}$
$v_{új}$
$v_{új} \cong v_{előző}$
nem
$v_{előző} \rightarrow v_{új}$
igen
$v = v_{új}$