



Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Kar
Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet

Hulladékok előkészítése száraz nehézkozeges eljárással Diplomamunka

Készítette: Földesi Áron

Előkészítéstechnikai mérnök

Belső Konzulens: Dr. Nagy Sándor
(egyetemi docens)

Külső Konzulens: Dr. Gombkötő Imre
(címzetes egyetemi docens)

2018. 05. 17.

Miskolc, 2018.

Eredetiségi Nyilatkozat

Alulírott Földesi Áron, a Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Karának hallgatója büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és aláírással igazolom, hogy ezt a diplomatervet meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és a diplomatervben csak az irodalomjegyzékben felsorolt forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Miskolc, 2018.05.17

a hallgató aláírása

MISKOLCI EGYETEM Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Kar

Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet

A hallgató neve:..... Neptun-kódja:

Első konzultáció, az utolsó előtti tanulmányi félév szorgalmi időszakában a második hónap utolsó munkanapjáig: a téma elfogadása, tájékoztatás a rendelkezésre álló forrásokról.

A diplomamunka/szakdolgozat témája:.....

Az egyetemi konzulens neve, beosztása, tanszéke:

A jelölt köteles a témát a

z első konzultáció határidejéig a tanszéki adminisztrációban nyilvántartásba véteni.

A jelölt által javasolt témát elfogadom:

Miskolc,

konzulens aláírása

A jelölt által javasolt témát jóváhagyom:

Miskolc,

tanszékvezető aláírása

Második konzultáció, az utolsó előtti tanulmányi félév szorgalmi időszakában a harmadik hónap utolsó munkanapjáig: a feldolgozott források, valamint a diplomamunka/szakdolgozat vázlatának bemutatása, címének véglegesítése.

A diplomamunka/szakdolgozat címe:

Miskolc,

konzulens aláírása

Harmadik konzultáció, az utolsó előtti tanulmányi félév vizsgaidőszakának utolsó napjáig: a forrá- sokat feldolgozó fejezet kéziratának beadása:

Miskolc,

konzulens aláírása

Negyedik konzultáció, az utolsó tanulmányi félév szorgalmi időszak második hónap utolsó munkanapjáig: a kész szöveg kéziratának beadása első változatban:

Miskolc,

konzulens aláírása

Ötödik konzultáció, a beadási határidő előtt legalább tíz munkanappal: a kész munka bemutatása abban a formában, ahogy a jelölt be kívánja adni:

Miskolc,

konzulens aláírása

A diplomamunkát formai szempontból beadhatónak ítélem:

Miskolc,

konzulens aláírása

Összefoglaló

Diplomamunkám során egy olyan fluidizációt alkalmazó nehézkes eljárást szeretnék bemutatni, amely számos kedvező tulajdonsága ellenére nem terjedt el. Ezenfelül diplomamunkám célja bemutatni, hogy ez az eljárás potenciálisan alkalmazható az előkészítés-technikában, ezen belül hulladékok sűrűség szerinti osztályozásában. Ennek bebizonyításához első lépésként építettem egy laboratóriumi berendezés ami képes stabil fluidágyat létrehozni. Ehez megkerestem a fluidizáció szempontjából legmegfelelőbb szemcsefrakciót, majd a frakció kiválasztását követően sikeres kísérletet tettem elektronikai hulladék szétválasztásával fluidágyban.

Summary

During my thesis I would like to present a separation process using fluidization which, despite its many beneficial properties, did not spread. In addition, the purpose of my thesis work is to demonstrate whether this process can be applied potentially in processing technique, including the density classification of waste. To this I built a laboratory equipment that is capable of creating a stable fluidbed. Then I found the most suitable particle fraction from the fluidization eye. Following the selection of the fraction, an successful experiment was made to separate electronic waste in a fluid bed.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	6
2 Szemcsére ható erők fluidumokban	7
2.1. Szemcse stacionárius mozgása áramló fluidumokban.....	12
Szemcse mozgása áramló közegben	14
2.2 Szemcsehalmazok mozgása	15
2.3 Hátráltatott szemcsemozgás.....	16
2.4 Szemcsehalmazok ülepedése	17
3. Fluidizáció.....	18
3.1 Fluidizáció alkalmazási területei.....	19
3.2 Fluidizáció lépései	21
3.4 Fluidizációt befolyásoló tényezők.....	22
3.4.1 Sűrűség.....	22
3.4.2 Porozitás	23
3.4.3 Nyomásveszteség.....	23
3.4.4 Átáramlási sebesség	26
3.4.5 Szemcseméret.....	27
4. Kísérleti vizsgálatok.....	30
4.1 Laboratóriumi fluidizációs berendezés és mérőkör.....	30
4.2 Mért paraméterek és mérőeszközök.....	31
4.2.1 Nyomás mérése.....	31
4.2.2 Légesebbség és légáram mérése	32
4.2.3 Halmazsűrűség meghatározása	33
4.3 Fluidizáció optimalizálása	34
4.3.1 Kísérletek a 0/0,3mm-es frakcióval:	34
4.3.2 Kísérletek a 0,3/0,5mm-es frakcióval:.....	38
4.3.3 Kísérletek a 0/0,22mm-es frakció:	38
4.3.4 Kísérletek a 0,22/0,3mm-es frakció:	41
4.3.5 Az optimális frakció kiválasztása	43
4.4 Hulladék szétválasztási kísérletek fluidiagyban.....	45
5. Konklúzió.....	53
Felhasznált Irodalom.....	56
Köszönetnyilvánítás	
Mellékletek	
1. Melléklet: Fluidizációs kísérletek eredményei	
2. Mellékletek Szétválasztási kísérletek eredményei	
3. Melléklet Egyes szemzés vizsgálatok (Digitális melléklet)	

1. Bevezetés

Hulladékok előkészítésben a hulladékáramok mechanika előkészítése során lehetőség van az egyes durva alkotók egymástól való szétválasztására, amennyiben azok kellőképpen feltárássra kerültek. A fémeket is tartalmazó hulladékok feldolgozása során a költségek fedezetének jelentős részét a magas piaci árú fémek értékesítéséből származó bevétel adja. Azonban leggyakrabban a feladott hulladékáramban a fémek keverten, vagy műanyaggal és egyéb szennyezőkkel jelennek meg. A nagy tisztaságú fémtermékek előállításánál, az ún. nehézközeges szétválasztási eljárások kiemelt helyet töltenek be, merthogy széles szemcseméret-eloszlású, nagyméretű anyagszemcse feladása is lehetséges, valamint üzemi kapacitás mellett a gravitációs eljárások közül, az egyik legélesebb szétválasztás érhető el.

A nehézközeges szétválasztás működésének alapja, hogy ha egy közegbe testeket helyezünk, akkor a közegnél kisebb sűrűségű test felúszik, mert a testre ható felhajtóerő meghaladja a testre ható gravitációs erő nagyságát, míg a közegnél nagyobb sűrűségű test esetén a gravitációs erő haladja meg a felhajtóerő nagyságát és emiatt lesüllyed.

Az ipari gyakorlatban könnyebb hozzáférhetőségük és egyéb kedvező tulajdonságaik miatt a valódi folyadékokkal szemben finomra őrölt szilárd szemcséket tartalmazó szuszpenziókat használnak. A szuszpenzió sűrűségét a megfelelően nagy testsűrűségű szilárdanyag térfogati koncentrációjának beállításával szabályozhatjuk. A módszer hátrányát az adja, hogy egyrészt a magas szilárdanyag koncentráció mellett a közeg viszkozitása jelentősen megnő, valamint reológiai tulajdonságai is kedvezőtlenül változnak. Ennek kiküszöbölésére a szuszpenziót folyamatosan regenerálni kell, amely jelentős kiegészítő berendezésekkel oldható csak meg. Továbbá hidrofób anyagok szétválasztása esetén a közegnél nehezebb szemcsék is termékbe kerülhetnek, ami ronthatja az elválasztás élességét. Ezen felül az esetek többségében vízkezelés és szárítás alkalmazására is szükség lehet, amely az üzemeltetési költségeket jelentősen megnövelheti.

Diplomamunkámban egy olyan kevésbé elterjedt eljárást szeretnék bemutatni, amely a nehézközeges eljárás előnyeinek megtartása mellett, de a nedves módszerek hátrányai nélkül képes a szétválasztást megvalósítani. Az eljárás alapja egy ún. aeroszuszenzió létrehozására, amely nem más, mint monodiszperz finom szemcsék levegővel történő örvényágyának kialakítása fluidizációval. A fluidizáció finom részecskékből álló szilárd anyagalmaz fellazítása felfelé áramló gázárammal, a sebességet úgy választva meg, hogy anyagszállítás ne történjen.

Diplomamunkám célja egy olyan nehézkezes aeroszuszeziós szepearátor kialakítása volt, amely képes egy stabil fluidágy létrehozására. Ezenfelül céloom bemutatni, hogy az aeroszuszeziós eljárás potenciálisan alkalmazható az előkészítés-technikában, ezen belül hulladékok sűrűség szerinti osztályozásában.

2 Szemcsére ható erők fluidumokban

A fluidizáció megértéséhez először meg kell ismernünk, hogy ha egy közegbe szemcsét helyezünk, akkor arra milyen erőhatások érvényesek.

A fluidumokban lévő szemcsékre általában sokféle erő hat, ezért bonyolult mozgásjelenségek adódnak. A folyamatok modellezéséhez azonban, bizonyos erők indokolt figyelem kívül hagyásával lényeges egyszerűsítések lehetségesek.

A részecskékre ható egyik legfontosabb erő a tömegelő, amely az alábbi módon írható le:

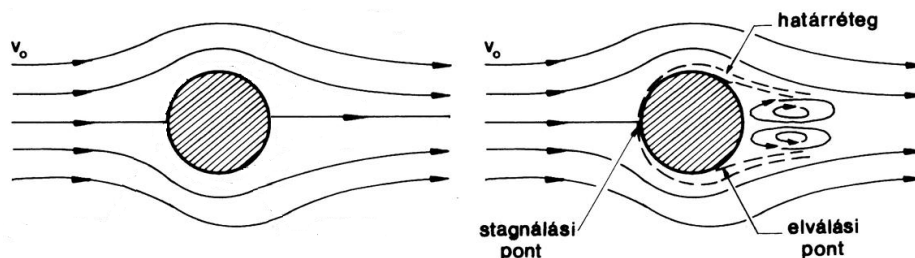
$$F_m = m_s a = V_s \rho_s a$$

amelyben a m_s és a V_s a szemcse tömege, ill. téfogata, ρ_s a sűrűsége, és az a az erőtérben a gyorsulás. Gravitációs erőtérben az $a=g$, ahol a g a gravitációs gyorsulás.

A felületi erők közül körüláramláskor általában egy forgató nyomaték és egy erő hat. Az előbbi egy F_E ellenállási erőre és egy erre merőleges erőösszetevőre az F_D dinamikus felhajtóerőre bontható:

$$F = F_E + F_D$$

Az ellenállási erő az áramló fluidumokba helyezett részecske felületén, a határrétegben fellépő súrlódás következménye. Valamely test súrlódásmentes és súrlódásos körüláramlását a 2. ábra mutatja be szemléletesen.



2. ábra Szemcsék súrlódásmentes és súrlódásos körüláramlása

(Fonyó és Fábry, 2004)

A szemcse súrlódásmentes körül áramlása esetén, a körmetszet kerületén két torlópont alakul ki és a folyadék részecskék a szemcse felületéről nem válnak le, ezért a szemcsére erő nem hat. Súrlódásos körüláramlásnál a szemcse felületén határreteg képződik, amelyben a nyomás az áramlás irányával megegyezően először csökken, majd növekszik és a határreteg a szemcséről leválik. A szemcse mögött ekkor holtter keletkezik, ahol örvények jönnek létre, amik egymás után leszakadnak a szemcséről. A nyomás a holtter felőli oldalon lecsökken, mivel a folyadék energiájának jelentős részét az örvények felemésztik. A szemcsére ezért az áramlás irányába mutató nyomóerő hat, amelyet más néven a szemcse alakellenállásának nevezünk. Tehát a szemcse ellenállása abból ered, hogy a súrlódás miatt a szemcse hátsó részén a nyomás kisebb, mint a súrlódásmentes fluidumok esetében lenne. Az elválási pont előtti felületen ébredő súrlódó erők áramlási irányával megegyező irányú eredője a szemcse súrlódási ellenállása. A szemcse ellenállásának mértéke, ezen belül a súrlódási- és alak ellenállási arányát nagymértékben befolyásolja, hogy a test felületén hol válik le a határreteg. A leválás helyét pedig a test alakja és az áramlás lamináris vagy turbulens jellege, azaz a Reynolds-szám határozza meg.

A szemcse körüli áramlásra leírt erőviszonyok bármely más alakú áramba helyezett testre vonatkozóan is alapvetően érvényesek. Az un. áramvonalas testek esetében az alakellenállás minimális, az ellenállási erő túlnyomóan a súrlódásból származik, míg az éles határvonalakat mutató testeknél pl. kockáknál az alakellenállás a döntő. Az áramvonalas, görbe felszínű testeknél a leválás helye jelentősen függ a Reynolds-számtól is, emiatt ezeket Reynolds-számra érzékeny testeknek nevezik. Az éles szögletű testek esetében a leválás helyét főleg az alak dönti el a Reynolds-számtól függetlenül, emiatt ezeket Reynolds-számra érzéketlen testeknek nevezzük.

Ha egy szemcsét áramlásba helyezünk, akkor a rá ható ellenálló erő részben a test felszínén fellévő súrlódó erők összességéből ered, ami meghatározható a τ csúsztató feszültség ismeretében, valamint a A_s felület menti normális nyomáseloszlásból származik:

$$F_E = \int_{A_s} \tau \cos\varphi dA_s + \int_{A_s} p \cos\varphi dA_s$$

Ezt az integrált eddig, csak gömbszemcse körüláramlására határozták meg, newtoni közegben történő áramlást feltételezve:

$$F_E = 3\pi\mu x w_0$$

amelyben az x a szemcseátmérő, μ a folyadék abszolút viszkozitása és a w_0 a szemcse relatív sebessége.

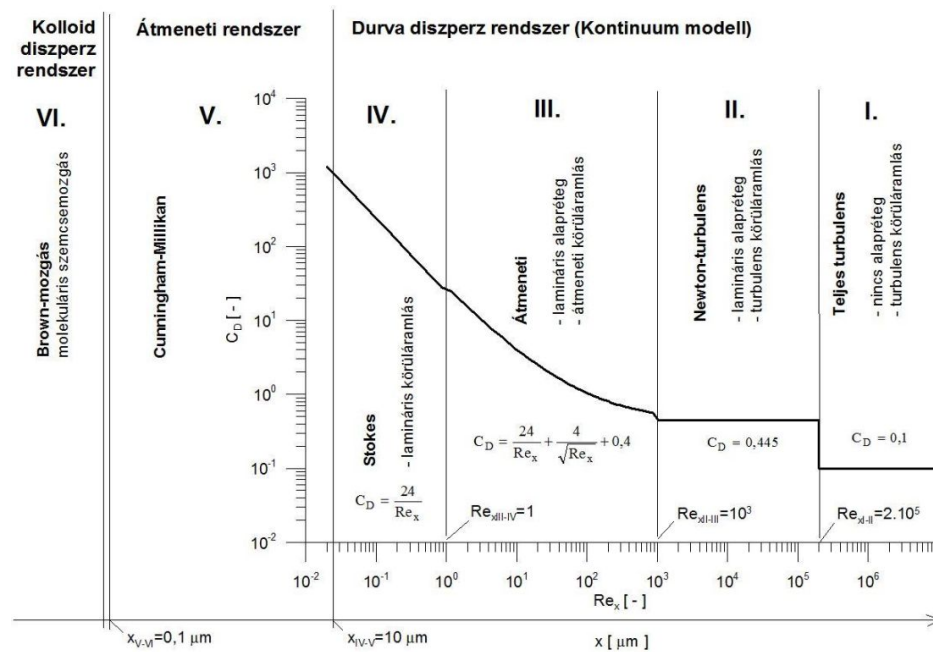
Közegben állandósult áramlása esetén a szemcsére ható F_E ellenállási erőt az általában az alábbi módon fejezhető ki:

$$F_E = C_D A_s \frac{\rho_f}{2} w_0 w_0$$

amelyben A_s a szemcséknek az áramlás irányára merőlegesen vett legnagyobb keresztmetszete, ρ_f a folyadék sűrűsége, C_D az ellenállási tényező és w_0 a szemcse sebessége. Az egyenletből a w_0 mérésével, a folyási tulajdonságok, valamint a szemcse és a közeg fizikai jellemzőinek ismeretében lehet a C_D ellenállási tényezőt meghatározni.

Egyenes vonalú egyenletes áramlást, lamináris vagy gyengén turbulens körüláramlást, geometriailag hasonló szemcséket és newtoni viselkedésű folyadékot feltételezve az ellenállási-tényező már csak a Reynolds szám (Re_x) függvénye. Például nyugvó, vagy lamináris áramlású közegben történő részecskemozgás esetén az áramlás általában lamináris, vagy gyengén turbulens. Azonban ha a folyadék áramlása turbulens, akkor a turbulencia foka is befolyásolja az ellenállást.

Az newtoni közegben süllyedő gömb alakú szemcse esetén az ellenállási tényező és a Reynolds-szám kapcsolatát a 3. ábra mutatja be.



3. ábra Newtoni közegben süllyedő gömb alakú szemcse ellenállási tényező diagramja (Faitli és társai, 2017)

Az ún. Stokes tartomány ($Re_x < 0,1$) esetén az ellenállási törvény a tehetetlenségi erők elhanyagolásával kapott megoldás eredménye, amelyet Stokes kis Reynolds-számú lamináris

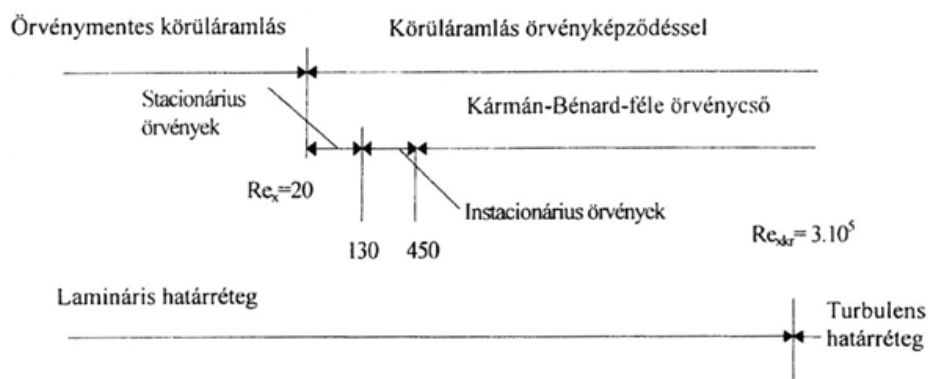
áramlásba helyezett gömb vizsgálatával kapott, a tömegezők elhanyagolásával, stacionárius esetben. Ebben a tartományban a határréteg-leválásból adódó alakellenállás nem lép fel. Ekkor Stokes szerint az ellenállás tényező:

$$C_D = \frac{24}{Re_x}$$

amelyben Re_x a Reynolds-szám, ami az inerciaerők és a súrlódó erők hányadosa.

Gömb körüláramlásakor a $Re_x < 20$ tartományban a folyadék áramlása örvénymentesnek tekinthető. $Re_x > 20$ tartományban már örvényképződés lép fel, ezen belül a $20 < Re_x < 130$ szakaszon stacionárius örvényképződés tapasztalható, a $130 < Re_x < 450$ szakaszon instacionárius örvények keletkeznek, az $Re_x > 450$ értéknél az ún. turbulens keverőáramlás keletkezik. A határrétegben megvalósuló áramlást tekintve a $Re_x < 3 \cdot 10^5$ tartományban a test felületén lamináris, míg $Re_x > 3 \cdot 10^5$ esetén turbulens a határréteg. A $Re_x = 3 \cdot 10^5$ értéket nevezzük kritikus Reynolds-számnak (Re_{xkrit}).

Az örvényképződés és a Reynolds-szám közötti kapcsolatot a 4. ábra foglalja össze:



4. ábra Az örvényképződés és a Reynolds-szám kapcsolata

(Tarján 1997)

Az ellenállás tényező a teljes $0 < Re_x < Re_{xkrit}$ tartományban az ún. Kaskas közelítő összefüggéssel írható fel:

$$C_D = \frac{24}{Re_x} + \frac{4}{\sqrt{Re_x}} + 0,4$$

$Re_x > Re_{xkrit}$ értékeknél a C_D előbb kb. 0,07-re csökken, majd ezután kb. 0,3 nő vissza. Az ellenállás-tényezőre felírt közelítő egyenlet $0 < Re_x < 1$ tartományban a Stokes-összefüggéshez közeli, emiatt azt Stokes-tartománynak nevezik: $10^3 < Re_x < 2 \cdot 10^3$ esetén közelítő egyenlet értéke állandó, gömb esetén $C_D = 0,44 \sim 0,49$. Ezt Newton figyelte meg először, emiatt ezt Newton-tartománynak is nevezik. A Stokes- és a Newtoni-tartomány közötti rész,

azaz $1 < Re_x < 10^3$ szakasz az ún. átmeneti tartomány, ahol a C_D értékét a Kaskas-egyenlettel lehet meghatározni.

A gyakorlatban azonban főleg szabálytalan alakú szemcsékről van szó, ami miatt a szemcsére hat az F_D dinamikus felhajtóerő, ami a szabálytalan nyomáeloszlás következménye. Meghatározása:

$$F_D = C_D A_s \rho_f \frac{w_0^2}{2}$$

amelyben A_s a szemcséknek az áramlás irányára merőlegesen vett legnagyobb keresztmetszete, ρ_f a folyadék sűrűsége, C_D az ellenállási tényező és w_0 az áramlás sebessége.

A dinamikus felhajtóerő esetén C_D ellenállási tényező a Re_x mellett a szemcse alakjától és a rááramlás irányától is függ. Szimmetrikus részecskénél a szabályos rááramlás esetén az F_D erő nem lép fel, azonban határrétegben való áramláskor szimmetrikus szemcsék esetén is aszimmetrikus az áramlás, amelynél az F_D a faltól elfelé irányul. Az aszimmetrikus szemcsék esetén az $F = F_E + F_D$ eredő erőn kívül egy forgató nyomaték is fellép, azaz forgás esetén egy nyomatékot is le kell győzni.

Az eddig nem tárgyalt szemcsékre ható erők közül az F_A felhajtóerőt lényeges még figyelembe venni, amely az alábbi összefüggéssel írható fel:

$$F_A = -V_s \rho_f a$$

amelyben a V_s a részecske térfogata, a ρ_s a folyadék sűrűsége.

Az instacionárius mozgást végző testek esetén a szemcsékre még hat egy F_T tehetetlenségi erő is, amely stacionárius áramlás esetén:

$$F_T = -V_s \rho_s \dot{v}_s$$

amelyben a V_s a részecske térfogata, a ρ_s a szemcse sűrűsége, a \dot{v}_s pedig a szemcse gyorsulása.

Instacionárius mozgás esetén még figyelembe kell venni F_j járulékos inerciaerő is, amely meghatározásakor abból indulnak ki, hogy nemcsak a részecske tömegét kell felgyorsítani, hanem a részecskékkel együtt mozgó fluidum tömegét is, amelyet a részecsketérfogat j -ed részével vesznek figyelembe:

$$F_j = -j V_s \rho_s \dot{v}_s$$

amelyben a V_s a részecske térfogata, a ρ_s a szemcse sűrűsége, a \dot{v}_s pedig a szemcse gyorsulása.

Gömb esetén a $j=0,5$, a hengereknél pedig $j=1$. Azonban gázban történő szemcsemozgás esetén ezt az erőt nem lényeges figyelembe venni, csak valódi folyadékok esetén.

2.1. Szemcse stacionárius mozgása áramló fluidumokban

Az előzőeket összefoglalva kijelenthetjük, hogy a szemcsék és a fluidumok relatív mozgásakor különösen bonyolult viszonyok adódnak. Azonban ha a részecske és a fluidum mozgása is stacionáriusnak tekinthető, akkor a folyamatok modellezése lényegesen egyszerűbb.

Szemcsék egyenes vonalú stacionárius mozgásakor három erőt szükséges figyelembe venni: a tömeget, a felhajtóerőt és az ellenállási erőt. A szemcsék és a folyadék gyorsulása ekkor zérus, ezért dinamikus felhajtóerő (F_D), tehetetlenségi erő (F_T) és járulékos erő nem lép fel. Gravitációs erőtér esetén gömb alakú szemcsére az alábbi erők hatnak (5. ábra):

- Súlyerő:

$$F_G = m_s g = \frac{x^3 \pi}{6} \rho_s g$$

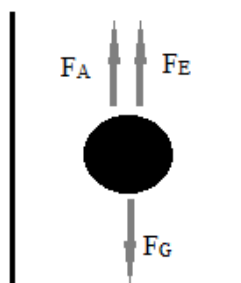
- Felhajtóerő:

$$F_A = -V_s \rho_f g = \frac{-x^3 \pi}{6} \rho_f g$$

- Ellenállás:

$$F_E = C_D A_s \frac{\rho_f}{2} w_0 w_0 = C_D \frac{d^2 \pi \rho_f}{4} \frac{w_0 w_0}{2}$$

amelyben a m_s a szemcse tömege, x a szemcse átmérője, A_s a szemcséknek az áramlás irányára merőlegesen vett legnagyobb keresztmetszete, ρ_f a folyadék sűrűsége ρ_s a szemcse sűrűsége, C_D az ellenállási tényező, w_0 az áramlás sebessége és g a nehézségi gyorsulás



5. ábra Szemcsékre ható erők

(szerző saját szerkesztése)

A stacionárius szemcsemozgásnál ható erők egyensúlya az alábbi egyenlettel írható le:

$$F_G + F_A + F_E = 0$$

azaz a szemcse sebességére vonatkozó általános egyenlet:

$$w_0 w_0 = \frac{-4x \rho_s - \rho_f}{3C_E \rho_s} g$$

amelyből a sebesség relatív nagysága:

$$|w_0| = \sqrt{\frac{4xg}{3C_E} \frac{|\rho_s - \rho_f|}{\rho_s} g}$$

Ha $\rho_f < \rho_s$, akkor a relatív sebesség a nehézségi gyorsulással ellentétes irányú. Gömb alakú szemcse folyadékokban vagy gázokban való süllyedése esetén a relatív sebesség $w_0 = -v_0$, v_0 ilyenkor a részecske un. süllyedési végsebessége:

$$v_0 = \sqrt{\frac{4xg}{3C_E} \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_s}}$$

Stokes tartományban a süllyedési végsebesség ($C_E = 24/Re_x$):

$$v_0 = \frac{gx^2}{18\mu} \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_s}$$

Newtoni tartományban pedig ($C_E = 0,44$):

$$v_0 = \sqrt{3gx \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_s}}$$

A süllyedési végsebességnek a teljes $0 < Re_x < 2 \cdot 10^5$ érvényes általános meghatározásához két dimenzió nélküli mentiséget kell bevezetni:

- Archimedes-szám:

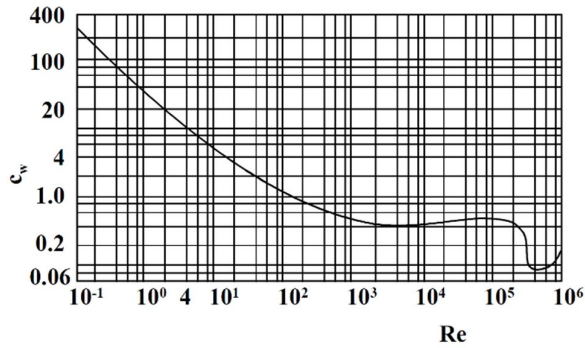
$$Ar = \frac{gx^3}{\mu} \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_s}$$

- Ljaszenko-szám:

$$Lj = \frac{v^3}{\mu g} \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f}$$

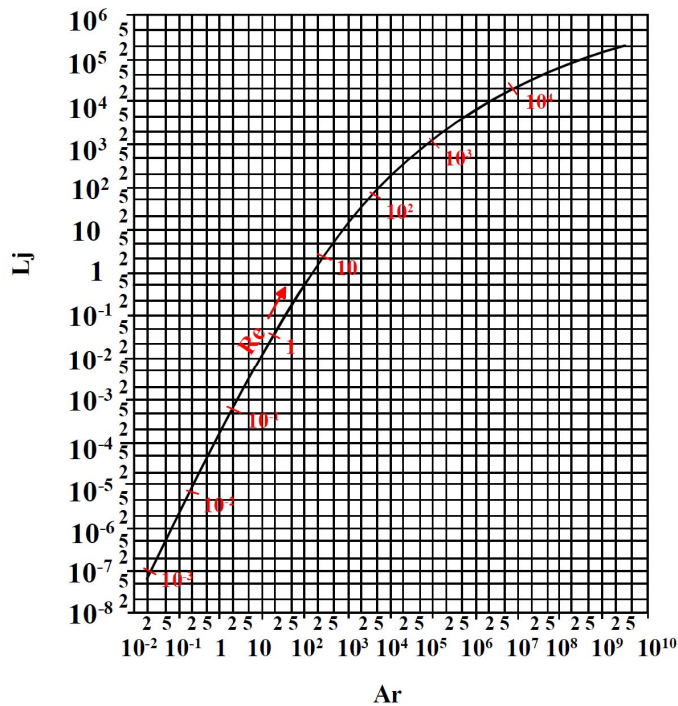
Gömb alakú szemcse esetén C_E ellenállási tényező csak a Re_x -szám függvénye, ezért az előbbi két egyenletben is csak a Re_x -számtól függ, és így a Reynolds-szám kiiktatásával közvetlenül meghatározható a $Lj = f(Ar)$ összefüggés.

Ha kísérletekkel vagy számítással meghatározzuk a $C_E = C_E(Re_x)$ függvényt (6.ábra), akkor a fenti két egyenlet felhasználásával megszerkeszthetjük az $Lj = f(Ar)$ diagramot (7.ábra), amelynek ismertében adott x , ρ_s , ρ_f , μ anyagjellemzőknél a v_0 süllyedési végsebesség meghatározható. (Tarján, 1997)



6. ábra Ellenállás tényező a Reynolds-szám függvényében

(Tomas, 2012)



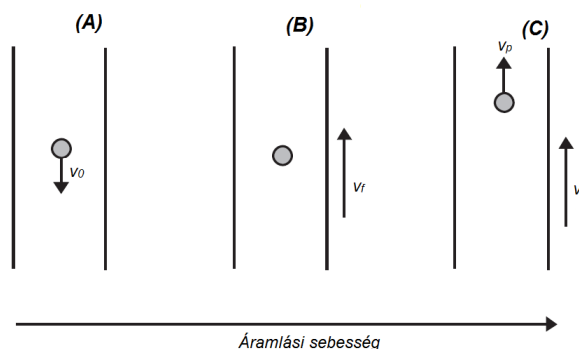
7. ábra $L_j=f(Ar)$ diagramm

(Tomas, 2012)

Szemcse mozgása áramló közegben

A fentiekben megismerhettük, hogy egy szemcsére milyen erők hatnak, ha valamilyen közegbe helyezük őket. Ezenfelül érdemes még megvizsgálni, hogy egy szemcse áramló folyadékokban miként viselkedik. Ha egy szemcsét egy álló közegbe helyezünk, akkor az súlyából adódóan lesüllyed. Ha viszont a közeg sebességét egyenletesen növeljük, akkor elérünk egy olyan értéket, amikor a szemcse süllyedési végsebessége (v_0), és az áramlási sebessége (v_f) pontosan kiegyenlíti egymást, ekkor egy egyensúlyi helyzet jön létre és a

szemcse lebegni kezd (8. ábra (A)). A sebességet tovább növelve az áramlás irányába felfelé mozdul el a szemcse v_p sebességgel ($v_p = v_f - v_0$).

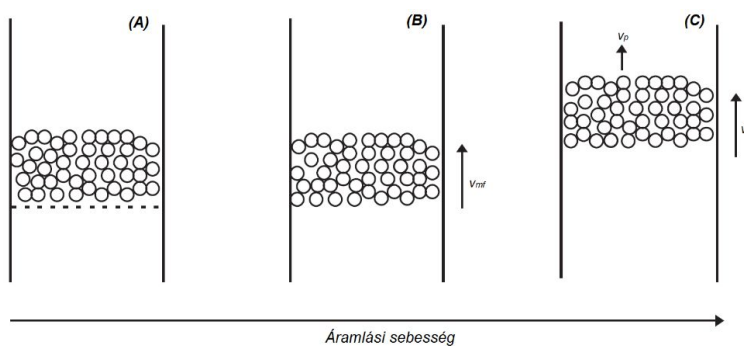


8. ábra Szemcse mozgása áramló közegben

(Gibilaro, 2001)

2.2 Szemcsehalmazok mozgása

A legtöbb technikai folyamatnál, nem egyes szemcsékkel, hanem szinte kizárólag szemcsehalmazokkal foglalkozunk, ilyen a fluidizáció is. Emiatt érdemes megvizsgálnunk, hogy több szemcse együtt hogyan mozoghat, és köztük milyen hatások léphetnek fel. (Tarján, 1997) Ehhez képzeljünk el egy csövet melybe egy szitalapot teszünk, amelyre a szita résméreténél nagyobb szemcseméretű anyaghalmazt helyezünk (8. ábra (A)). Ha a szitarácson keresztül egyenletesen levegőt áramoltatunk elérünk egy olyan állapotot, ahol a szemcseágy fellazul és megemelkedik, ekkor a szemcsékre ható gravitációs erő és az ellenállási erők egyensúlya jön létre (8. ábra (B)). Ez az állapot minimális fluidizációs állapotként ismeretes, az ehhez szükséges sebességet pedig minimális fluidizációs sebességnek, vagy fellazulási határsebességnek nevezzük (v_{mf}). A levegő sebességet tovább növelve a szemcseágy felfelé mozog v_t sebességgel ($v_t = v_f - v_p$) (8. ábra (B)). (Gibilaro, 2001; Dévay, 2013)



9. ábra Szemcsehalmaz mozgása áramló közegben

(Gibilaro, 2001)

2.3 Hátráltatott szemcsemozgás

Egyenetlen szemcse és egy szemcsehalmaz mozgása között lényeges különbség lehet. Előbbi esetben úgy tekinthetjük, mint ha a szemcse nyugvó közegben mozogna v_0 sebességgel, utóbbi esetben a süllyedő szemcsék által kiszorított és felfelé áramló közegben valósul meg a szemcsemozgás v'_0 sebességgel. A két sebesség hányadosa az ellenáram hatását (φ_E) veszi figyelembe:

$$\varphi_E = \frac{v'_0}{v_0}$$

A közegben lévő szemcse mozgását egy második jelenség is hátráltatja, az ún. csoport-turbulencia (φ_T).

$$\varphi_T = \frac{v_{0H}}{v_0}$$

A csoport-turbulencia azáltal jön létre, hogy a szemcsék közötti kapillárisokba a sebességeloszlás térben és időben is jelentősen változó. A nagysága pedig a szemcsemérettől és a szemcsék közötti távolságtól is függ.

A szemcsék mozgását hátráltató hatások összevonásával kapjuk a csoport-hatás tényezőt (φ_H):

$$\varphi_H = \varphi_E \varphi_T = \frac{v_{0H}}{v_0}$$

Monodiszperz rendszereknél a φ_E és a φ_T egyedül a koncentrációtól (c_v) függenek:

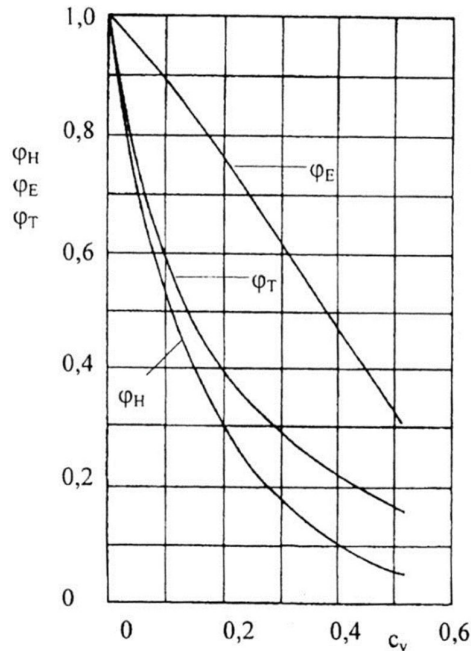
$$\varphi_E = \frac{1}{1 + \frac{c_v}{(1 - c_v^2)}}$$

$$\varphi_T = \frac{1 - c_v}{1 + \frac{1.2}{\sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{12c_v}\right)^2} - \frac{1}{2}}}$$

A fenti egyenletek felhasználásával a csoport ellenállási tényező:

$$\varphi_T = \frac{1 - c_v}{\left[1 + \frac{1.2}{\sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{12c_v}\right)^2} - \frac{1}{2}}\right] \left[1 + \frac{c_v}{(1 - c_v^2)}\right]}$$

A koncentráció növelésével a szemcsék mozgásának hátráltatása jelentősen növekszik (10. ábra), főleg a csoport-turbulencia miatt.



10. ábra Hátráltatási tényező a koncentráció függvényében

(Tarján, 1997)

2.4 Szemcsehalmazok ülepedése

Szemcsehalmazok közegben való mozgásának vizsgálatánál figyelembe kell venni az ülepedést is. Az ülepedés a nehézségi erő, vagy a centrifugális erő hatására jön létre.

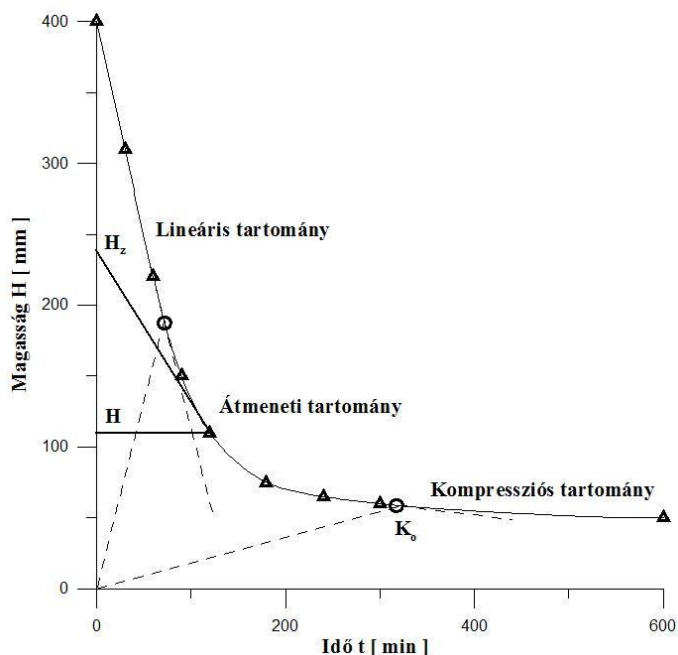
Az ülepedés jelenségénél négy fő ülepedési típust lehet megkülönböztetni: egyes szemcsék ülepedése, zónás ülepedés, az átmeneti ülepedés és a kompressziós ülepedés (11. ábra). A szemcsehalmaz ülepedését legegyszerűbben az ún. Bach-kísérlettel lehet bemutatni. A kísérlet során egy hengeres tartályt feltöltünk a vizsgálni kívánt szuszpenzióval, majd megfigyeljük a már említett ülepedési szakaszokat.

Egyes szemcsék ülepedése ,akkor valósul meg ha a szemcsék méretüknek, alakjuknak és sűrűségüknek megfelelően süllyednek. Ekkor nem alakul ki éles elválasztó felület az ülepedő rétegben.

A henger alján fokozatosan vastagodó anyagréteg képződik. Ekkor alakul ki a második ülepedési típus, a zónás ülepedés, ahol a szemcsék süllyedési sebessége méretüktől függetlenül állandó és a szuszpenzió koncentrációja gyakorlatilag változatlan. Ekkor a tiszta folyadék és az ülepedési zóna határa az idő függvényében megközelítőleg lineárisan változik. A süllyedő szuszpenzió fölött, éles határfelülettel elválasztva tiszta vagy csak kisméretű szemcséket tartalmazó folyadékréteg alakul ki.

Ezután az anyagréteg és a tiszta folyadékoszlop magassága már csak kevésbé növekszik, és a szedimentáció sebessége lassan csökken, ezt a szakaszt nevezzük átmeneti ülepedésnek. Ez a tartomány az un. kompressziós pontig tart (K_0), ami után az ülepedési zóna eltűnik és az összes szemcse a tömörült rétegbe kerül.

A kompressziós ponttól az anyagréteg magassága már csökken, a tiszta folyadék magassága kis sebességgel tovább növekszik. Ezt a tartományt a kompressziós zónának nevezzük.



11. ábra Az ülepedő szuszpenzió magassága az idő függvényében

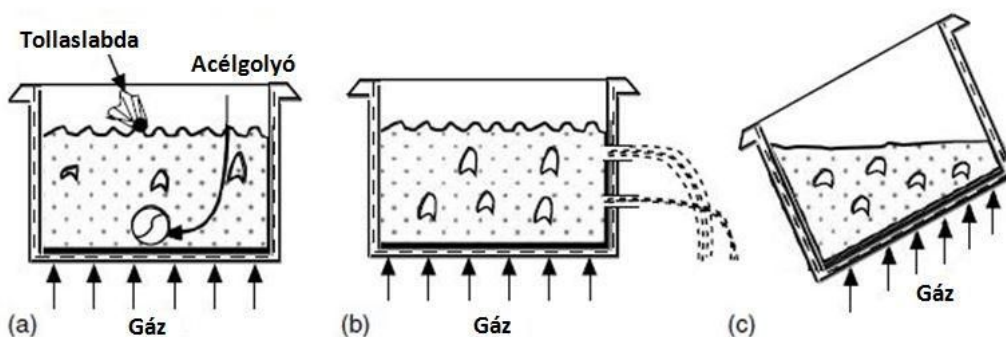
(Faitli és társai, 2017)

3. Fluidizáció

A fluidizáció kifejezést szemcsés szilárd anyagalmazok és fluidumok adott érintkezési módjának leírására alkották. A jelenség bemutatásához képzeljünk el egy lekerekített szemcséjű kvarc homokból álló szemcsehalmazt, amit egy henger alakú permeábilis fenéklappal lezárt edénybe helyezünk el. Ha levegő áramlik át a fenéklapon keresztül, van olyan sebesség, amely elérésekor a homokágy éppen lebeg. Ekkor a szemcsék elkülönülnek egymástól, amelynek hatására könnyebben mozgathatókká válnak. Ebben az állapotban a levegővel kevert anyagágy az alábbi tulajdonságokat mutatja:

- ha a tartály oldalát megütjük, felszínén hullámok keletkeznek (Leva 1964)
- az anyagágnak hidrosztatikai nyomása van,

- az ágy halmaz sűrűségénél nagyobb sűrűségű anyagok lesüllyednek, a kisebb sűrűségű anyagok a felszínen maradnak (1. ábra (a));
- a szilárd anyag a tartályon lévő nyíláson keresztül kiáramlik, ami főként vízszugárhoz hasonlítható (1. ábra (b))
- az ágy felülete mindig vízszintes marad, a tartályt megdöntve is (1. ábra (c))
- az ágy alkalmazkodik a tartály alakjához;
- a jelentős keveredésből adódóan az ágy hőmérséklete közel egyenletes eloszlású (Basu, 2006).



1. ábra Fluidizáció bemutatása

(Basu, 2006)

Tekintettel arra, hogy a fenti tulajdonságok folyadékok jellemzői, bebizonyosodik, hogy a szilárd anyagból álló ágy fluidummá alakult. Innen kapta a jelenség a fluidizáció nevet. (Leva, 1964)

3.1 Fluidizáció alkalmazási területei

1900-as évek elején, egy német feltaláló, Brötz alkalmazta először a fluidizációt. A víztisztításban használt gyors homokszűrőknél, a lerakódások miatt a homokágy elveszti áteresztőképességét. A homokszűrő tisztítására Brötz folyékony ellenirányú öblítést alkalmazott, amely során a homokágy fellazul és a szennyező anyagok kimoshatóak. A homokágy fellazulása egy jó példa a folyékony közeggel történő fluidizációra.

Az első találmányt, amely ténylegesen fluidizációt alkalmaz Phillips és Bulteel szabadalmazta 1910-ben. A feltalálók gáz és finom eloszlású katalizátor érinkezését vizsgálták. Kísérleti berendezésükben a gáz egy kamrába szállítja a katalizátort, ahol a reakció híg fluidizált fázisban megy végbe, majd a termékek a katalizátort egy visszanyerő edénybe viszik.

Az első ipari jellegű fluidizáló berendezés a Winkler-féle gázgenerátor volt, melyet szén elgázosítására fejlesztettek ki a BASF-nál 1921-ben Németországban. A generátor függőleges henger alakú köpenybe, finoman elosztott barnaszenet táplálnak. A gyártandó gáz minőségétől függően levegőt, vagy levegő és víz keverékét vezetnek be a fenékrendszerbe, ahol a reakció végbemegy. (Leva, 1967)

A fluidizációt először Wurster alkalmazta a gyógyszeriparban 1956-ban tabletták bevonására, majd 1960-ban granulálásra. Az 1970-es évektől az egész iparágban széleskörűen elterjedt ez a technika. (Dévay, 2013)

Napjainkban a fluidizációt alkalmazó technikák számos iparág területén elterjedtek, amelyekből a legfontosabbak:

- Energiaátalakítás
 - Gőzfejlesztés
 - Elgázosítás
 - Égés
- Petrokémiai folyamatok
 - Folyékony katalitikus krakkolás (FCC)
 - Fischer-Tropsch szintézis
- Ásványelőkészítés
 - Az alumínium-oxid kalcinálása
 - Ércpek pörkölése
 - Vasércpek prereduksiója
 - A cementgyártásnál alkalmazott kalcináció
- Vegyipar és gyógyszerészet
 - Szulfát, klorid lebomlása
 - Butános oxidáció maleinsavanhidritre
 - Metanol és olefinek átalakítása
- Mechanikai és termikus eljárás technika
 - Szárítás
 - A részecskék bevonása
 - Hőcserélő és füstgáztisztítás
 - Hőkezelés (Basu, 2006)

3.2 Fluidizáció kialakulása

A fluidizáció egy speciális esete a szemcsehalmozon történő átáramlásnak, amely során nyugvó és mozgó anyagréteget különböztetünk meg. Nyugvó anyagréteg akkor alakul ki, ha a szemcsék egymáshoz képest mozdulatlanul helyezkednek el, ekkor az anyagréteg áll. Mozgó anyagréteg esetén a szemcsék még érintkeznek egymással, de az egész réteg mozog.

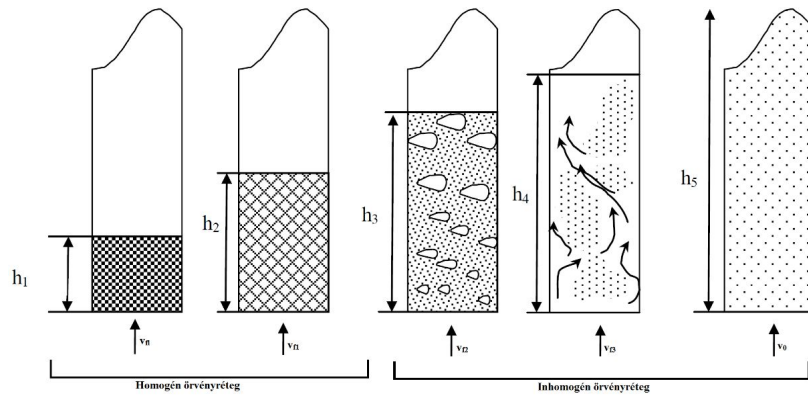
A fluidizáció kialakulásának vizsgálatához ismét képzeljük el egy tartályt, amelynek fenéklapja áteresztő és ezen alulról felfelé levegőt áramoltatunk. A fentiekben leírtak alapján, ha az áramlási sebesség eléri egy pontot, a réteg fluidizálása következik be. Ekkor a szemcsék közötti pórustérfogat megnövekszik, a gáz-szilárd rendszer keveredik, amely hatására örvénylő anyagréteg, ún. örvényréteg alakul ki.

Az nyugvó szemcsehalmozon történő átáramláskor a nyugvó anyagágy mindaddig megmarad, míg a beáramlási sebesség (v_f) kisebb a fellazítási sebességnél (v_{fl}). A nyugvó anyagréteg kisebb porozitású, mint az éppen fellazult állapotban lévő anyagréteg és a rétegmagassága is kisebb akkor.

Örvényréteg akkor alakul ki, ha az anyagágyat az átáramló gáz olyan mértékben fellazítja, hogy a szemcsék helycserét, helyváltoztatást végezhetnek. A helyzetváltoztatás lehet az áramlás irányával megegyező, ellentétes, de lehet keresztirányú is. Ha a v_f áramlási sebesség eléri a v_{fl} sebességet, akkor a szemcsére ható ellenálló erők a tömegerőkkel azonosak és a szemcsék a közegben lebegni kezdenek. Az örvényréteg a v_{fl} fellazulási határsebességtől a v_0 felső határsebességig tart, amely tartományban az örvényréteg fluidágyként viselkedik.

Az örvényréteg a teljes sebességtartomány alapján ($v_{fl}-v_0$), homogén és inhomogén örvényréteg-tartományra osztható. Homogén tartomány esetén a v_{fl} sebességig a szemcsék egyenletes eloszlásúak és a halmaz porozitása térben és időben állandó. Az inhomogén tartományban v_{f2} sebességnél légbuborékok, v_{f3} sebességnél szemcsecsomók, vagy különálló szemcsecsoportok alakulnak ki.

Ha a sebesség meghaladja a v_0 felső határsebességet, vagyis a szemcsék süllyedési végsebességét, akkor anyagszállítás valósul meg, ilyenkor instacionárius örvényréteg alakul ki. (Tarján, 1997)



12. ábra Örvényréteg kialakulása

(Tarján, 1997)

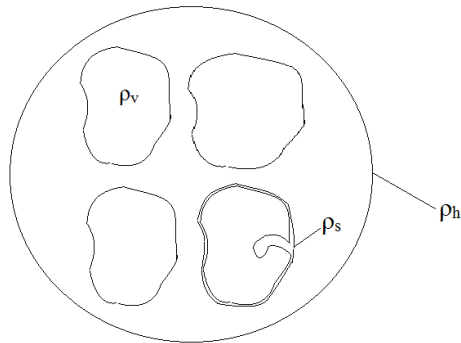
3.4 Fluidizációt befolyásoló tényezők

A fluidizálás vizsgálatához nélkülözhetetlen a fluidizációt befolyásoló fizikai paraméterek megismerése. A legfontosabb ilyen anyag és halmaz tulajdonságok a porozitás, az áramlás sebessége, a nyomás, a sűrűség és a szemcseméret.

3.4.1 Sűrűség

Egy zárt alakzat térbeli kiterjedésének mértéke a térfogat, a tömege pedig az anyag mennyiségével arányos. A sűrűség a zárt alakzatban lévő anyag tömegének és az alakzat térfogatának a hányadosa ($\rho = m/V$), mértékegysége pl. kg/m^3 . Azonban több esetben előfordul olyan, amikor a zárt alakzatot nem tölti ki teljesen az anyag, vagy több és akár többféle halmazállapotú anyagfajta tölti ki. Ilyenkor a teljes térfogatra vonatkoztatott sűrűséget nevezzük látszólagos sűrűségnek. Ha a zárt alakzatot egy anyagfajta folytonosan kitölti, a tömeg és térfogat hányadosa az ún. valódi sűrűséget adja (ρ_v).

Azonban ha szemcsékből álló halmazt pl. homokágyat vizsgálunk, akkor az ágyréteg valószínűleg háromfázisú diszperz rendszer. A homokszemcsék felületén durva nedvesség található és közöttük gáz halmazállapotú levegő. Ekkor a halmaz teljes térfogatra vett látszólagos sűrűségét, halmaz sűrűségnek (ρ_h) nevezzük. Ha egy szemcsét vizsgálunk a halmazból, akkor a szemcsében lehet belső zárvány vagy pórus, amelyben akár más szilárd, folyékony vagy gáz halmazállapotú anyag is lehet, ill. az a szemcse kémiai kötésben is tartalmazhat pl. vizet. Amikor a zárt térbeli alakzatot egy kiragadott szemcsére vonatkoztatjuk és osztjuk a szemcse tömegével, az így kapott látszólagos sűrűséget szemcsesűrűségnek nevezzük. Fontos megemlíteni azt is, hogy ekkor azok a nyitott pórusok amelyekbe a tényleges diszperziós közeg nem tud behatolni, szintén részei a szemcse térfogatának. A fent leírt sűrűségeket a 15. ábra mutatja be. (Faitli és társai, 2017)



12. ábra Valódi (ρ_v), szemcse (ρ_s) és halmaz sűrűség (ρ_h)

(Szerző saját szerkesztése)

3.4.2 Porozitás

Egy szemcsékből álló anyagréteg porózus közegnek tekinthető. A porozitás a pórusok térfogatának és az anyaghalmaz teljes térfogatának a hányadosa:

$$\varepsilon = \frac{V - V_s}{V}$$

amelyben a V a teljes anyaghalmaz, V_s a szemcse térfogata.

A porozitás kiszámolható a fentiekben említett halmaz (ρ_h) és szemcse sűrűségéből (ρ_t) is:

$$\varepsilon = \frac{\rho_t - \rho_h}{\rho_t}$$

Fluidizáció során a fellazulási hatarsebességnél, nagyobb sebességnél az örvényréteg magassága és vele együtt a porozitása is megnő. A porozitás és a sebesség kapcsolata az alábbi összefüggéssel adható meg:

$$\frac{h}{h_L} = \frac{1 - \varepsilon_L}{1 - \varepsilon}$$

amelyben h_L az örvényréteg magassága, ε_L az örvényréteg porozitása, h a nyugvó ágy magassága, ε pedig a porozitása.

3.4.3 Nyomásveszteség

Nyomásveszteség nyugvó ágy esetén

Anyagrétegen a gáz ellenállással áramlik át, amely nyomásvesztést okoz. A szemcsék mérete, eloszlása, valamint a halmazban való elrendeződése miatt az áramlási tér geometriája rendkívül bonyolult, ezért a nyomásesés meghatározása csak jelentősen leegyszerűsített, de a mérnöki gyakorlatot kielégítő helyettesítő modellek vizsgálatával válik lehetővé.

Az első ilyen modell Darcy nevéhez fűződik, melyet később Kozeny és Carman fejlesztettek tovább. Az ún. csőköteges modell lényege, hogy az anyagréteg pórusterfogatát

nagyszámú azonos átmérőjű, egymással párhuzamos csatornára osztották, melynek hossza megegyezik az anyaggy magasságával, vastagsága pedig az un. hidraulikai átmérő.

A fajlagos nyomásveszteség általános összefüggése:

$$\frac{\Delta p}{h} = (v_{f\varepsilon}, d_h, \varepsilon, \mu, \rho_f)$$

amelyben $v_{f\varepsilon}$ a közepes áramlási sebesség a pórusokban, a d_h a pórusrendszer közepes hidraulikai átmérője, ρ_f és μ a gáz abszolút viszkozitása és sűrűsége.

A d_H hidraulikai átmérő a csőáramlásból vett jellemző, amely egyes csatornákra vonatkozik. Ehhez azonban a csőfalon fellépő feszültségek azonosságát és a nyomásesés valamint csúsztató feszültségek lineáris kapcsolatát szükséges feltételezni.

Meghatározásával foglalkozó Blake, majd Carman az alábbi összefüggést alkották:

$$d_H = 4 \frac{V - V_s}{A_s}$$

amelyben, $V - V_s$ a szabad térfogat, más néven áramlási térfogat, A_s pedig a nedvesített felület, azaz a szemcsék felületének összege. Mivel az anyagréteg teljes térfogata kifejezhető a szemcsék térfogatával és a porozitással is, ezért az előbbi egyenletnek másik alakja:

$$d_H = 4 \frac{\varepsilon V_s}{1 - \varepsilon A_s}$$

A kapillárisokban az áramlás a legtöbb esetben stacionárius és lamináris, a fluidum sebességnek meghatározása pedig a Hagen-Poiseuille összefüggéssel lehetséges:

$$v_{fk} = \frac{d_k^2 \Delta p}{32\mu h}$$

amelyben d_k a kapilláris átmérője, v_{fk} a keresztmetszeti átlagsebesség, h a kapilláris magassága.

A teljes keresztmetszetre meghatározott v_f sebességet az alábbi egyenlet adja meg:

$$v_f = \varepsilon v_{fk} = \varepsilon \frac{d_k^2 \Delta p}{32\mu h}$$

A v_f sebesség. és a hidraulikai átmérő ismeretében a fajlagos nyomásveszteség képlete az alábbi módon változik:

$$\frac{\Delta p}{h} = (v_f, d_s, \varepsilon, \mu, \rho_f)$$

Ennek meghatározásához azonban még meg kell határoznunk a Fanning ellenállástényezőt (λ_F):

$$\lambda_F = \frac{\varepsilon^3}{1 - \varepsilon} \frac{\Delta p}{\rho_f v_f^2} \frac{d_s}{h}$$

Reynolds-szám képletébe a porozitást és a hidraulikus átmérő bevonásával az alábbi egyletet kapjuk:

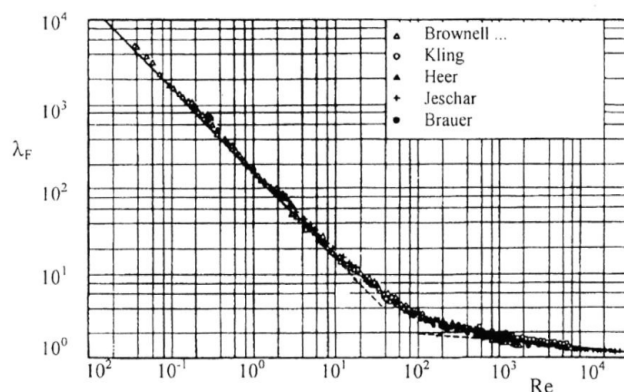
$$R = \frac{1}{1 - \varepsilon} \frac{v_f d_s \rho_s}{\mu}$$

A fentebb leírt áramlási jellemzőkkel a nyugvó szemcsehalmazon történő átáramlás esetén a nyomásvesztéget meghatározhatjuk, ha ismerjük az ellenállás tényező és Reynolds-szám kapcsolatát (az ellenállás-összefüggést), amely meghatározása kísérletekkel lehetséges:

$$\lambda_F = f(\text{Re})$$

Gömbszemcsékből álló szemcsehalmaz ellenállás tényezője a 13. ábrán látható. Az ezt közelítő összefüggést Brauer a következő képen írta le:

$$\lambda_F = \frac{160}{R} \frac{3,1}{R^{0,3}}$$



13. ábra Gömbszemcsék halmazán való átáramlás ellenállástényezője

(Tarján, 1997)

Azonos alakú ls nagyságú szemcsés anyagokra az alábbi függvénnyel közelíthető:

$$\lambda_F = \frac{150}{R} + 1,75$$

A fentiek ismeretében az azonos gömbszemcséknél, vagy azonos alakú és méretű szemcsés anyagoknál a fajlagos nyomásvesztés-egylet:

$$\frac{\Delta p}{h} = \frac{150(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu}{d_s} + \frac{1,75(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho_s}{d_s} v_f^2$$

Ez az egyenlet a lamináris, az átmeneti, és a turbulens tartományban is érvényes.

Nyomásvesztés mozgó ágy esetén

A fentebb említettek alapján, ha az átáramlás sebessége eléri a fellazulási sebességet (a minimum fluidizálási sebességet) örvényréteg alakul ki. Ekkor a szemcsékre ható erők a tömegerőkkel azonosak:

$$\Delta p A = V_s (\rho_s - \rho_f)$$

A szemcsék V_s térfogata, kifejezhető a fellazult ágy porozitásával (ε_L) és a térfogatával (V_f), ekkor:

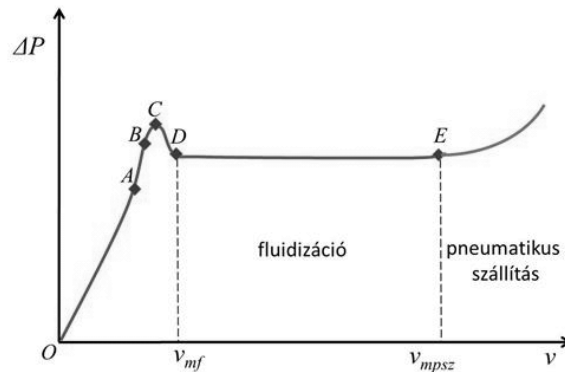
$$V_s = V_L (1 - \varepsilon_L) = A h_L (1 - \varepsilon_L)$$

A felnti összefüggést felhasználva az örvényréteg nyomásvesztése:

$$\Delta p = g h_L (1 - \varepsilon_L) (\rho_s - \rho_f)$$

, amely a sebességtől független és a fluidágy bármely pontjára érvényes. (Tarján, 1997)

A szemcserendszeren átáramló fluidumnak a kezdeti ágymagasságra vonatkoztatott nyomásesését az áramlási sebesség függvényében a 14. ábra foglalja össze. A fluidum nyomásesése először az A pontig a sebességgel arányosan, majd nagyobb sebességnél a sebesség négyzetével nő (A-B). A B és a C pontok között a szemcsék elkezdnek lebegni és rendeződnek a legkisebb ellenállás irányában. A maximum sebesség, (C) elérése után a réteg fellazulásával már csökken az ellenállás, ami a nyomáskülönbség csökkenésében mutatkozik meg (C-D). A minimális fluidizációs sebesség (D) pont) elérését követően a D-E pontok között történik a fluidizáció, a részecskék elválnak egymástól és a fluidumban egyenként lebegnek. Ebben a tartományban Δp alig változik, adott anyagmennyiség esetén a sebességtől, illetve a halmaz fellazulásától független. (Dévay, 2013)



14. ábra Fluidumok nyomásesése az áramlás sebességének függvényében

(Dévay, 2013)

3.4.4 Átáramlási sebesség

Ahogy már a fentiekben említésre került, a szemcsehalmazon való lamináris átáramlással legelőször Darcy foglalkozott (kísérleti modell), aki az alábbi összefüggést dolgozta ki a teljes keresztmetszetre vonatkozó beáramlási sebesség meghatározásához:

$$v_f = \frac{\dot{Q}}{A} = K_D \frac{\Delta p}{\mu}$$

amelyben a Q az áramló közeg térfogatárama, a az anyagkeresztmetszet, Δp az ágy nyomásvesztése, h a magassága. A K_D az anyagágyra jellemző átteresztő képesség:

$$K_D = \frac{\varepsilon d_k^2}{32}$$

A Dary féle kísérleti modellt tovább fejlesztve Kozeny és karman megalkották a pórusmodell, és a beáramlási sebesség meghatározásához a következő összefüggést adták meg (Kozeny-Carman egyenlet):

$$v_f = \frac{\frac{36k(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu h}{d_s^2}}{\Delta p}$$

Az egyenlet tartalmaz egy korrekciós tényezőt is, amely figyelembe veszi az anyagágy vastagságának és a csatornák hosszának a pórusok tekervényessége miatt bekövetkezett megnövekedését ($k_1=(h_c/h)^2$), ill. az áramlási csatornák változó keresztmetszetét a szemcsék méretének és alakjának eltérései miatt (k_2). A k_2 -t kísérleti alapon adják meg.

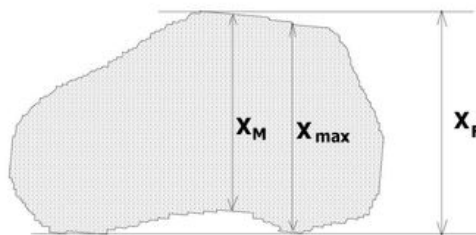
$$k = k_1 k_2$$

Ha az örvényréteg a fellazult fluidágy állapotát elhagyja, a kapillárisokban, a lamináris áramlás helyett már turbulencia alakul ki, ekkor a beáramlás sebessége: (Tarján, 1997)

$$v_f = \sqrt{\frac{d_s g \varepsilon_L^3}{1,75} \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} - 1 \right)}$$

3.4.5 Szemcseméret

A fluidizációt nagymértékben befolyásolja szemcse mérete is és a szemcseméret eloszlása is. A szemcsehalmazokól a megfelelő frakciókat osztályozással pl. szitálással, alítjuk elő. A szemcsék nagyságát legtöbbször egyetlen mérettel adjuk meg, a szemcsemérettel, ami a szemcsének egyik jellemző hossz mérete (16. ábra). A szemcseméret lehet a közepes szemcseátmérő, ami a szemcséhez véletlenül rendelt párhuzamos három érintősík átlagos távolsága (x_{max}). A másik ilyen jellemző hossz méret a statisztikus szemcseátmérő, amit a szemcse-vetületén adott iránnyal párhuzamosan húzott egyenes-szakaszok hossza, ilyen a Ferret-féle átmérőt (x_F), ami a mérés irányára merrőleges érintők távolsága, és a Martin-féle (területfelező) átmérő (F_M), ami a vizsgált szemcsét két egyenlő részre osztja. (Mannheim, 2009)



15. ábra Jellemző szemcseméretetek

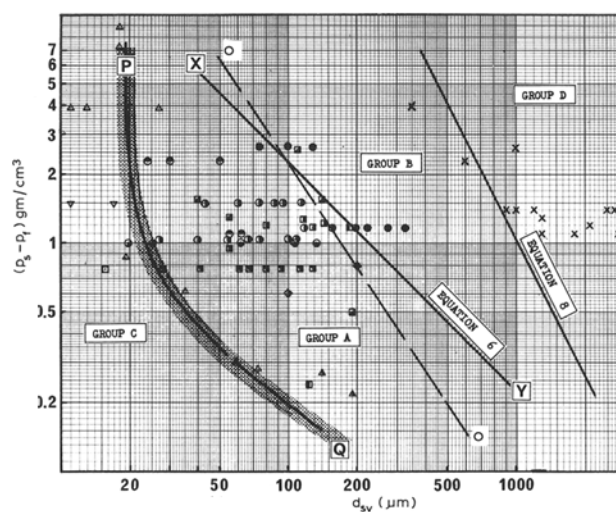
(Mannheim, 2009)

A szemcseméret hatását a fluidizációra Geldart vizsgálta, aki felismerte hogy különböző szemcseméretű anyagoknál az ágyban kialakuló örvényrétegek lényegesen máshogy viselkednek. Ebből adódóan négy szemcseméret csoportra osztotta a különböző szemcseméretű fluidizálható anyagokat:

- **A-csoport:** Ebbe a csoportba a viszonylag kis szemcseméretű (20-100 μm) és sűrűségű ($<1400\text{kg/m}^3$) szemcsék tartoznak. Az ilyen szemcsékből álló anyagalmaz esetébe a kialakuló örvényréteg előtt, az ágy vastagsága jelentősen megemelkedik a fellazulási pontig, majd a fluidágy kialakulása után a buborékképződés meglehetősen intenzív lesz. A buborékoktól mentes sűrű fázisban, valamint a buborékok és a sűrű fázis között jelentős gázcserre, és keveredés alakul ki. A légáram növelésével az ágyba lévő szemcsék között asszimmetrikusan kezdenek rendeződni, majd a sebességet tovább növelve a szemcsék közt turbulens áramlás alakul ki, ami hatására az ágyban zik-zakos alakban csatornák alakul ki.
- **B-csoport:** Ebben a csoportba sorolt szemeknek a szemcsemérete 40-500 μm közt van, a sűrűsége pedig 1400-4500 kg/m^3 . Ezeknél az anyagoknál a fluidágyban buborékképződés, csak fellazulási sebesség (minimális fluidizációs sebesség) elérésekor alakulnak ki. Az ágy megemelkedése ekkor lényegesen kisebb, valamint a fluidágy az áramlás megszűnésével gyorsan összeomlik. A buborékok miatti porkiáramlás csekély, a buborékok különálló egységként finom szemcsék nélkül törnek fel. A buborékok emelkedése gyorsabb, mint a légáram sebessége, mérete pedig lineárisan növekszik az ágy magasságával és a gázsebességgel. A sűrű fázisban, valamint a buborékok és a sűrű fázis között, ebben az esetben jelentős gázcserre nem alakul ki, a keveredés sem olyan intenzív az ágyban, mint az A csoport esetén. A légáram növelésével a szemcsék ugyancsak asszimmetrikus eloszlása alakul ki, de ebben az esetben a szemek az

ágyfal irányába rendeződnek. Az áramlási sebesség növelésével, azonban a kapillárisokban turbulens áramlás nem alakul ki. Az ilyen szemcsehalmaz fluidizálás csak valamilyen mechanikai hatás segítségével pl. vibrálás segítségével lehetséges.

- **C-csoport:** A 20-30 μm alatti szemcsetartomány. Az ilyen méretű szemcsehalmaz nagyon nehéz fluidizálási a szemcsék közötti igen erős kohézió miatt. Az ilyen finom szemcsékből álló halmazokban a légáram hatására cső alakú csatornák alakulnak ki. A sűrű ágy és a gázáram közötti keveredés elenyésző.
- **D-csoport:** Ebbe a csoportba a nagy méretű 600 μm fölötti, valamint a nagyon magas sűrűség szemcsék tartoznak. Az ilyen szemcsékből álló fluid ágy esetén az ágyban a buborékok lassabban emelkednek mint a légáram sebessége. Az ágyban a légáram jelentősen magas, de a szemcsék keveredése, valamint a sűrű közeg és a levegő közötti gázcseré minimális. A szemcsék körüli pórusokban felléphet turbulens áramlás is, amely a részecskék elkopását, félórlódását okozhatja. A fenteinkből láthatjuk, hogy az ilyen anyaghalmazok fluidizálása meglehetősen nehéz és hatalmas léáramot igényel, a részecskék nagy mérete és sűrűsége miatt. (Geldart, 1973)



16. ábra Szemcseméret csoportok

(Geldart, 1973)

4. Kísérleti vizsgálatok

A fluidizációval történő szétválasztás vizsgálatához, először olyan laboratóriumi berendezést kellett terveznem és kialakítanom, amely képes stabil fluidágyat létrehozni.

A berendezés megépítése után meg kellett találnom azt a szemcseméretfrakciót és ágymagasságot, amely a fluidizáció szempontjából a legmegfelelőbb. Ehhez kvarchomokot használtam, amelyből 0/0,22mm-, 0/0,3mm-, 0,22/0,3mm-, 0,3/0,5mm-es frakciókat állítottam elő.

Ezekből a frakciókból a berendezést feltöltve 50mm-es, 70mm-es és 85mm-es ágyvastagságokat alakítottam ki. A szemcseágy fluidizálása közben mértem az ágy magasságának növekedését, valamint a nyomást és a légsebességet a fluidizáció teljes tartományában, a fellazulástól a kihordásig.

Az eredmények alapján kiválasztottam a fluidizáció szempontjából a legmegfelelőbb szemcsefrakciót és ezt a frakciót magnetitből állítottam elő. A magnetitet kohézív, valamint nehezen fluidizálható viselkedése miatt homokkal kevertem, így létrehozva egy a magnetitnél kisebb, de a homoknál nagyobb halmazsűrűségű diszperz anyagot, ami viszont már jól fluidizálható.

A szétválasztandó anyag elektronikai hulladék volt, amely főleg műanyagot, és fémeket tartalmazott.

Kísérleteim során először azt vizsgáltam, hogy a feladott anyag alakja hogyan befolyásolja a szétválasztást. Ehhez különböző alakú műanyag és fém szemcséket választottam ki és többször feladtam őket a fluidágyra különböző tartózkodási idő, nyomás és légsebesség értékek mellett. Végül a mintákat összeöntve és egyszerre feladva is vizsgáltam a szétválasztást.

4.1 Laboratóriumi fluidizációs berendezés és mérőkör

A stabil fluidágy létrehozásához kifejlesztett eszköz, egy 60l-es műanyag edényből áll, melynek aljára, 5db 20mm-es belső átmérőjű műanyag cső lett behelyezve, egymással párhuzamosan, melyek oldalról össze lettek kapcsolva. A csövek két oldalán alulról 1,5mm átmérőjű rések kerültek kialakításra, melyek egymással 90°-os szöget zárnak be. Ezekből a résekből egy oldalon 15db található, egymástól 20mm távolságra. A levegő ezeken a lyukakon keresztül, alulról jut be az anyagágyhoz, azért alulról, hogy a szemcsék a résekbe ne tudjanak bekerülni, és eltömíteni azt.

Az edényben lévő csőrendszer a Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet laboratóriumának sűrített levegő rendszeréhez lett hozzá csatlakoztatva, amely maximum 6bar légnyomást tudott biztosítani a rendszernek.

A berendezés kialakítása után, kikellet építenem egy szabályzó és mérő rendszert, hogy vizsgálataim sikeresen elvégezhetőek lehessenek. A levegő beáramlását egy nyomásszabályzóval tudtam befolyásolni, ami közvetlenül a levegő rendszer csapja után került beszerelésre. A nyomásszabályzó és a berendezés egy flexibilis csővel lett összekötve, amelynek a közepére egy acél Venturi-cső lett behelyezve egy digitális nyomásmérővel összekapcsolva, a csőben lévő légsebesség és tömegáram mérése céljából.

A berendezést és a mérőkört a 18.ábra szemlélteti, melyen (1.) a nyomászbolyszót, (2.) a Venturi-csövet, (3.) a nyomásmérőt, (4.) a berendezést jelzi.



17. ábra Kísérleti berendezés és mérőkör

(szerző saját szerkesztése)

4.2 Mért paraméterek és mérőeszközök

Minden adott modellanyagnál az ágymagasságok kialakítása után megmértem a töltet tömegét, a nyomást, a beömlő levegő sebességét, valamint az ágyvastagság változását két pontnak a paramétereit, a fluidizáció kezdetétől egészen a kihordásig. Ezt a folyamatot minden szemcsefrakciónál elvégeztem.

4.2.1 Nyomás mérése

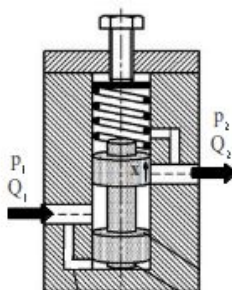
Kísérleteim során a nyomást nem csak mérni, hanem szabályozni is tudtam a fentiekben említett nyomás szabályzó szelep (19. ábra) segítségével. A nyomásszabályzóba be lett

szerelve egy Bourdon-csőves nyomásmérő, amelyről le tudtam olvasni az éppen aktuális nyomás értékét. A nyomást addig növeltem a rendszerben, ameddig az ágy fel nem lazult és a fluidzáció el nem indult. Azonban a nyomás nem csak az anyagágy okozta nyomásesés leküzdésére fordul, hanem a berendezésnek is van nyomásvesztesége, ami mivel a berendezés tulajdonképpen egy bonyolult csőrendszer, a csövek falsúrlódásából adódik, melynek meghatározása:

$$\Delta p = \lambda \frac{L}{D} \frac{v_f}{2} \rho_f$$

, amelyben Δp a nyomásesés, λ a csősúrlódási tényező, L a teljes csőrendszer hossza, D a csövek belső átmérője, v_f az áramlás sebessége ρ_f pedig a fluidum sűrűsége.

Diplomamunkámban a továbbiakban közölt nyomás értékek a nyomásszabályzóról leolvasott nyomások. A csősúrlódásból adódó nyomásveszteségtől megszabadított értékek az 1. Mellékletben megtalálhatóak.



19. ábra Nyomásszabályzó

(Veres, 2012)

4.2.2 Légsebesség és légáram mérése

A légsebesség mérését egy Venturi-cső segítségével végeztem el. A Venturi-csövet áramlási sebességek méréséhez használják, de lehetőséget biztosít a térfogatáram meghatározására is. Zárt csővezetékbe épített konfúzorból és diffúzorból áll, melyek között rövid, állandó keresztmetszetű szakasz van. Az elrendezés a konfúzor előtti és utáni nyomás különbségének mérésére alkalmas (Stein, 2014), amelyből a sebességek meghatározása:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho \left(1 - \frac{A_2}{A_1}\right)^2}}$$

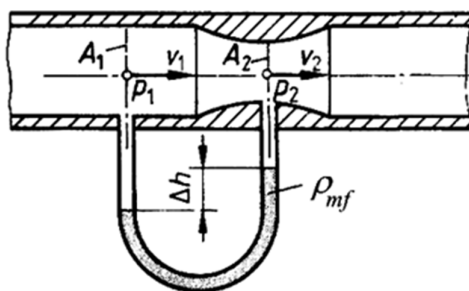
$$v_1 = v_2 \frac{A_2}{A_1}$$

, amelyben a v_1 a nagyobb keresztmetszethez (A_1) tartozó sebesség, a v_2 a szűkítéshez tartozó sebesség (20. ábra). A diplomamunkámban közölt sebesség eredmények a csőrendszerre vonatkoznak, melyből a töltet fluidizációjához szükséges légáram mennyiségét is meg tudtam határozni:

$$\dot{Q}_f = v_f * A$$

, amelyben v_f a fluidum (levegő) sebessége, az A a cső keresztmetszete.

A levegő sebessége és a légáram, a kompresszor vagy ventilátor kiválasztásánál az egyik legfontosabb paraméterek.

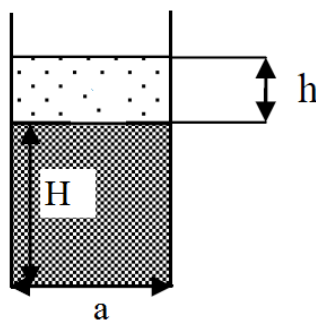


20. ábra Venturi-cső

(Stein, 2014)

4.2.3 Halmazsűrűség meghatározása

Amikor a szemcseágyon keresztül levegőt áramoltatunk át, a levegő a szemcsék közötti részt feltölti, melynek hatására a kezdeti nyugvó anyagréteg magassága (H) megemelkedik és létrejön a h magasságú fluidágy (21. ábra).



21. ábra Szemcseágy magasságának változása

(Szerző saját szerkesztése)

Ekkor a szemcseágy halmazsűrűsége a töltet tömegének (m_t) és térfogatának a hányadosa (V_t):

$$\rho_h = \frac{m_t}{V_t}$$

A V_t térfogat a téglatest alakú berendezés méreteit ismerve könnyen meghatározható. A berendezésben lévő töltet, azonban nem tölti ki az egész edényt, mivel a csőrendszer elfoglalja az edény egy részét. Emiatt a töltet térfogatának meghatározásakor figyelembe kell venni a csőrendszer térfogatát is.

$$V_t = abh - \frac{d^2\pi}{4} h_{cs}$$

amelyben a az edény szélessége, b az edény hossza, h a szemcsehalmaz magassága, d a cső átmérője h_{cs} pedig a hossza.

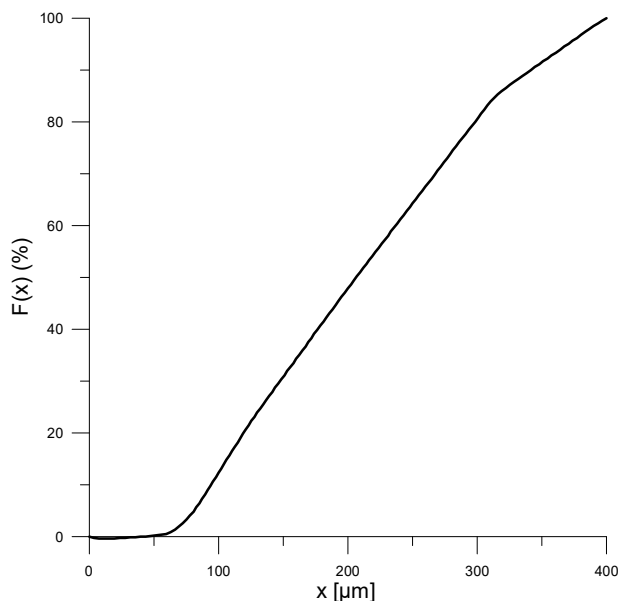
Méréseim során V_t -t meghatároztam a a nyugvó ágy és fellazult ágy esetén is, melyből megismerhettem az ágy fellazulásának mértékét.

4.3 Fluidizáció optimalizálása

A fluidizáció szempontjából legkedvezőbb szemcseméretfrakció megtalálásához kvarchomokot használtam, melyből 0/0,22mm-, 0/0,3mm-, 0,22/0,3mm-, 0,3/0,5mm-es frakciókat állítottam elő. A felhasznált kvarchomok szemcsesűrűsége $2,35\text{g/cm}^3$ volt. A szemcse frakciókat az intézet műhelycsarnokában lévő Ferraris szita segítségével állítottam elő, azért, mert nagy tömegű szemcsehalmazra volt szükségem.

4.3.1 Kísérletek a 0/0,3mm-es frakcióval:

Először a 0 és 0,3mm közötti frakcióból álló töltet fluidizálódását vizsgáltam meg, 50mm-, 70mm-, 80mm-es ágymagasságok mellett. A mérés első lépéseként meghatároztam a szemcsefrakció eloszlását, melyet a 22. ábra mutat be. A kísérletek során mért és számított eredmények az 1. Mellékletben találhatóak.



22. ábra 0/3mm-es homokfrakció eloszlása

(szerző saját szerkesztése)

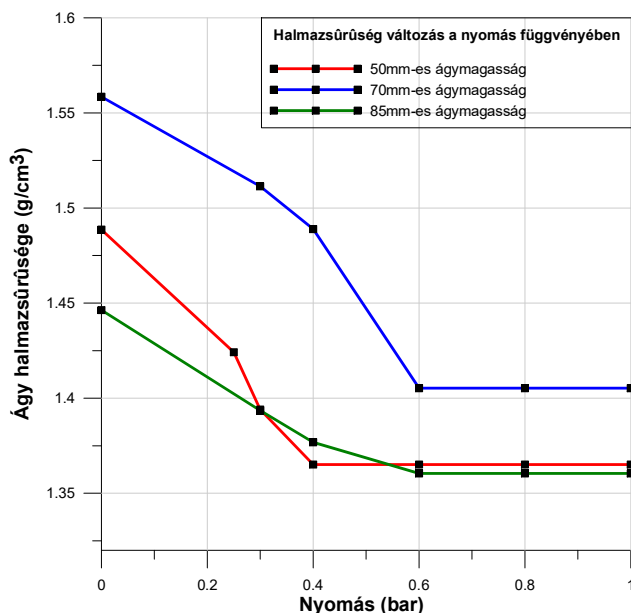
A berendezés modellanyaggal való feltöltése után, az ágyon keresztül elkezdtem levegőt áramoltatni és vizsgáltam, hogyan viselkedik a fluidágy. A kezdeti állapotban az ágy halmazsűrűsége $1,49 \text{ g/cm}^3$ volt. A 50mm-es kezdeti ágyvastagságnál a halmaz $0,25 \text{ bar}$ nyomáson már fellazult, magassága 2mm-ert emelkedett és elkezdett fluidizálódni. Ekkor a beáramló levegő sebessége $26,67 \text{ m/s}$, a fluidágy megemelésehez szükséges légáram pedig $7,54 \text{ m}^3/\text{h}$ volt. A sebesség további növelésével az ágyvastagság tovább emelkedett nagyon intenzív buborékképződés mellett. $0,4 \text{ bar}$ nyomásnál és $31,26 \text{ m/s}$ -os légsebességnél az ágy elérte a 54mm-es maximális magasságát, ekkor az ágy halmazsűrűsége $1,36 \text{ g/m}^3$ -re csökkent. $0,8 \text{ bar}$ nyomás és $41,87 \text{ m/s}$ -os légsebességnél a finom szemcsék kihordása megkezdődött, ekkor ezek a szemek a légárammal már elkezdtek elhagyni a fluidágyat, majd a nyomást tovább növelve 1 bar -nál a kihordás már jelentősen intenzívvé vált

A következő lépésben a berendezést már 70mm-re töltöttem fel, és újra vizsgáltam a fluidizált ágy változásait. Ekkor nyugvó állapotban a töltet halmazsűrűsége $1,56 \text{ g/cm}^3$ volt. 70mm-es ágyvastagságnál a halmaz az előző esetenél nagyobb nyomáson $0,3 \text{ bar}$ -nál lazult fel, magassága 2mm-ert emelkedett. Ekkor a csőben áramló levegő sebessége $27,98 \text{ m/s}$ és az ágyba jutó légáram $7,9 \text{ m}^3/\text{h}$ volt. A sebesség további növelésével az ágyvastagság ugyan tovább nőtt, de a buborékképződés már kevésbé volt intenzív. 6 bar nyomásnál az ágy elérte maximális magasságát, ami ez esetben 57mm volt. Ekkor az ágy halmazsűrűsége $1,4 \text{ g/m}^3$ -ra csökkent. $0,8$

bar nyomás és 41,75m/s-os légsebességnél a finom szemcsék kihordása megkezdődött, majd a nyomást tovább növelve 1bar-nál a kihordás jelentőssé vált.

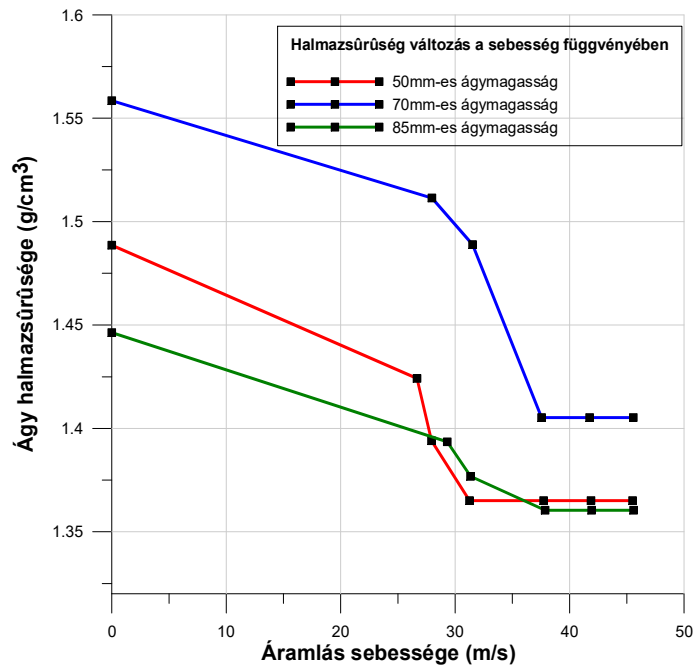
Ezután az anyagágy magasságát tovább növeltem 85mm-ig. Ekkora a nyugvó töltet halmazsűrűsége $1,45\text{g/cm}^3$ volt. A halmaz az előző esethez hasonlóan 0,3 barnál lazult fel, magassága ekkor egy kissé magasabbra 88mm-re emelkedett, a levegő sebessége ekkor $29,30\text{m/s}$, a beáramló légáram pedig $8,28\text{ m}^3/\text{h}$ volt. A buborékképződés ennél az ágymagasságnál volt a legcsekélyebb. 0,6bar nyomásnál a fluidágy elérte maximális magasságát, ami ebben az esetben 90mm volt. Ekkor az ágy halmazsűrűsége $1,36\text{g/m}^3$ -ra változott. A finom szemcsék kihordása 0,76bar-nál kezdődött meg el.

A különböző ágymagasságú 0/0,3mm-es frakcióból álló töltet fluidizálása során tapasztalt halmazsűrűség változásokat a nyomás függvényében a 23. ábra, a sebesség függvényében a 24. ábra, a légáram függvényében pedig a 25. ábra szemlélteti.



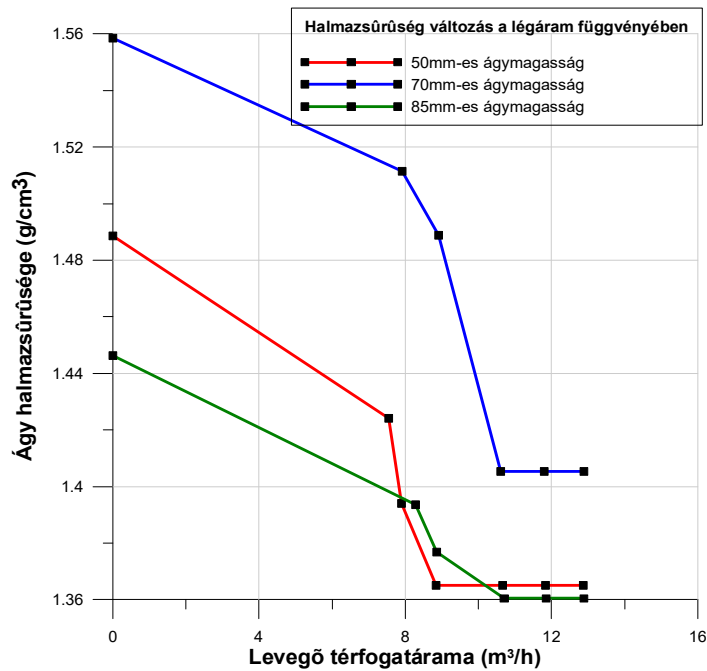
23. ábra 0/0,3mm-es frakció sűrűségváltozása a nyomás függvényében

(szerző saját szerkesztése)



24. ábra 0/0,3mm-es frakció sűrűségváltozása a sebesség függvényében.

(szerző saját szerkesztése)



25. ábra 0/0,3mm-es frakció sűrűségváltozása a légáram függvényében.

(szerző saját szerkesztése)

4.3.2 Kísérletek a 0,3/0,5mm-es frakcióval:

Másodszor a 0,3 és 0,5mm közötti frakció fluidizálhatóságát vizsgáltam. Ez az anyagalmaz esetén azonban nem sikerült elérnem a fellazulást és a minimum fluidizációs állapotot. A maximális 6bar nyomás beállítása mellett is a szemcsealmaz nyugalomban maradt, örvényréteg nem alakult ki. Ez annak tudható be, hogy ekkora nyomás mellett sem tudtak a szemcsék elmozdulni egymástól. Ennek tudatában az optimális töltetet, az ennél finomabb frakciók között kerestem

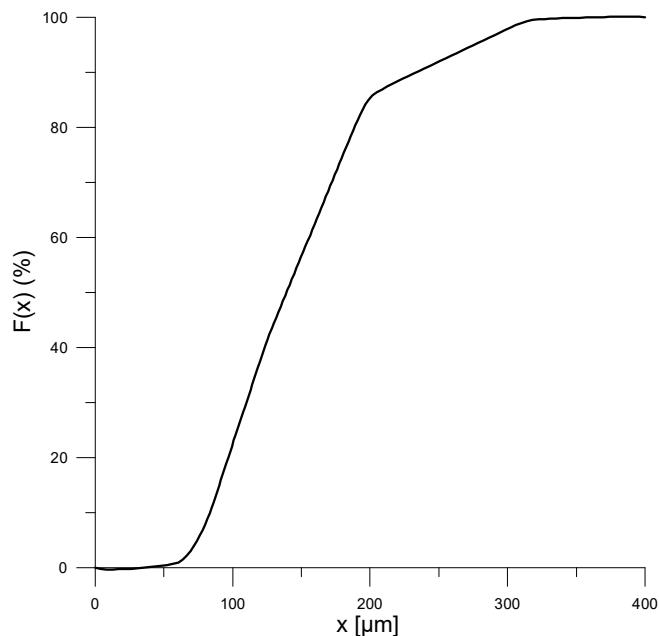
4.3.3 Kísérletek a 0/0,22mm-es frakció:

Következő lépésben egy 0 és 0,22mm közötti szemcsefrakció fluidizálhatóságát vizsgáltam, melynek szemcseméret eloszlását a 26. ábra szemlélteti. A kezdeti állapotban az ágy halmazsűrűsége $1,46 \text{ g/cm}^3$ volt. 50mm-es ágyvastagságnál a halmazt már 0,18bar nyomáson sikerült fellazítani, ekkor magassága 2mm-ert emelkedett és kialakult a fluidiágy. Ekkor a beáramló levegő sebessége $22,53 \text{ m/s}$, a fluidiágy megemelésehez szükséges légáram pedig $6,36 \text{ m}^3/\text{h}$ volt. A sebesség további növelésével az ágyvastagság tovább emelkedett, a buborékképződés igen intenzív volt. 0,5bar nyomásnál és $33,53 \text{ m/s}$ -os légsebességnél az ágy elérte a 56mm-es maximális magasságát, ekkor az ágy halmazsűrűsége $1,29 \text{ g/m}^3$ -ra csökkent. A 0,6 bar nyomás és $37,74 \text{ m/s}$ -os légsebességnél megkezdődött a finom szemcsék kihordása, majd 0,76bar-nál a kihordás már intenzívvé vált.

A következő lépésben újra 70mm-re töltöttem fel a berendezést. Ekkor nyugvó állapotban a töltet halmazsűrűsége $1,57 \text{ g/cm}^3$ volt. Ennél az ágyvastagságnál a töltet 0,2 bar nyomáson fluidizálódott a magassága pedig 6mm-ert emelkedett. Ekkor a csőben áramló levegő sebessége $24,81 \text{ m/s}$, és az ágyba jutó légáram $7,01 \text{ m}^3/\text{h}$ volt. A sebesség további növelésével az ágyvastagság tovább nőtt, csekély buborékképződés mellett. 0,28bar nyomásnál a az ágy elérte 80mm-es maximális magasságát, ekkor a légsebesség értéke a $37,55 \text{ m/s}$ volt. A megelégedés hatására az ágy halmazsűrűsége $1,35 \text{ g/m}^3$ -re csökkent. 0,76 bar nyomás és $41,75 \text{ m/s}$ -os légsebességnél a szemcsék kihordása megkezdődött.

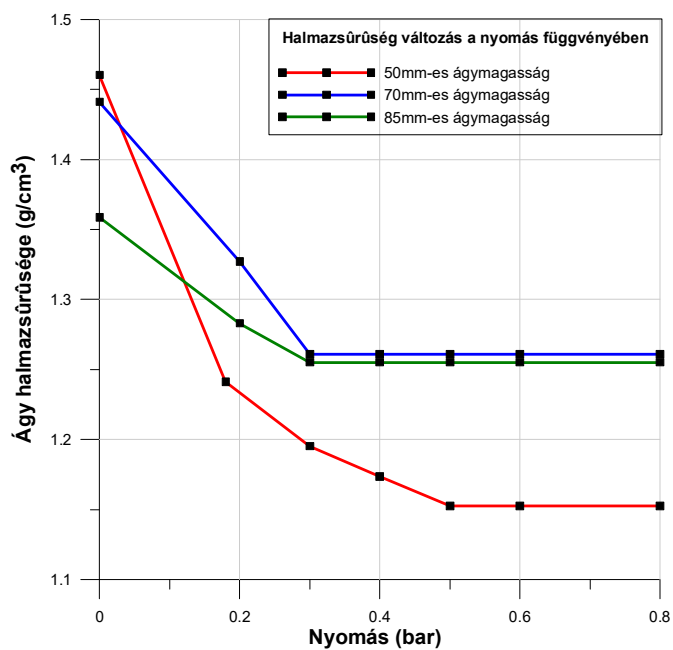
Ezután a töltet magasságát tovább növeltem 85mm-ig. A nyugvó ágy halmazsűrűsége $1,45 \text{ g/cm}^3$ volt. A szemcsealmaz 0,3bar-nál lazult fel, ekkor érte el a minimum fluidizációs állapotot., magassága ekkor 3mm-ert emelkedett. 0,6bar nyomásnál és $37,19 \text{ m/s}$ -os légsebességnél az ágy ismét elérte maximális magasságát, ami ebben az esetben 92mm volt. Ekkor az ágy halmazsűrűsége $1,34 \text{ g/m}^3$ -re csökkent. 0,8 bar nyomás és $41,92 \text{ m/s}$ -os légsebesség mellett a finom szemcsék kihordása megkezdődött.

A 0/0,22mm-es frakcióból álló töltet fluidizálása során tapasztalt halmazsűrűség változást a nyomás függvényében a 27. ábra szemlélteti, a sebesség függvényében a 28. ábra, a légáram függvényében pedig a 29. ábra szemlélteti.



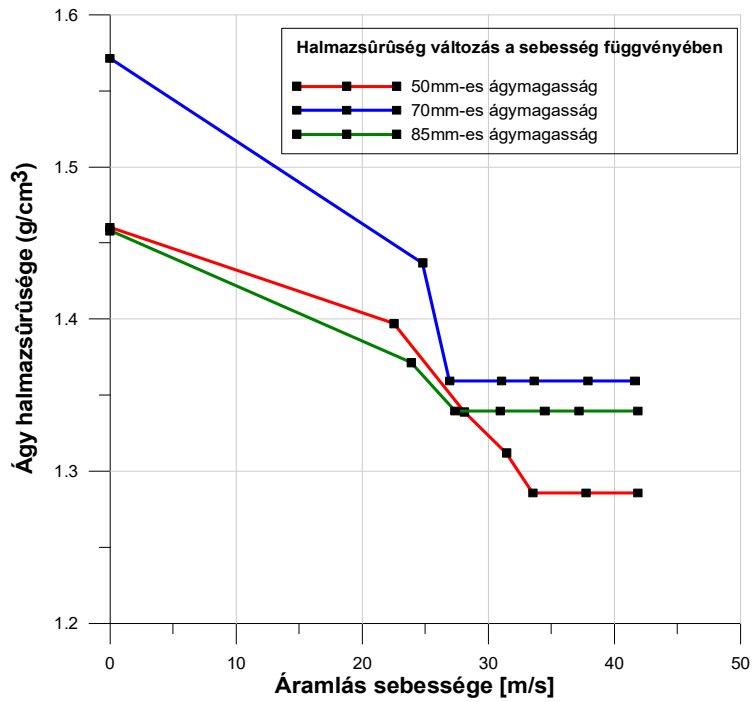
26. ábra 0/22mm-es homokfrakció eloszlása

(szerző saját szerkesztése)

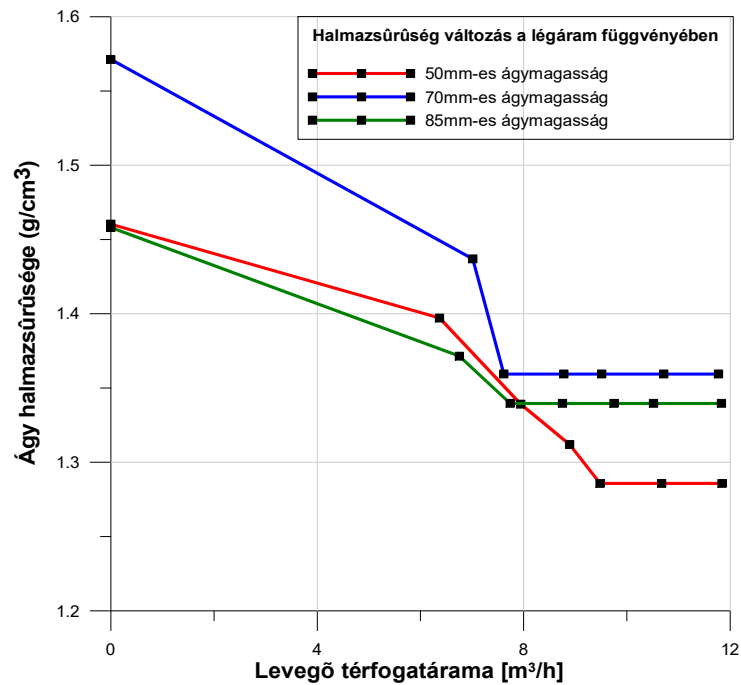


27. ábra 0/0,22mm-es frakció sűrűségváltozása a nyomás függvényében

(szerző saját szerkesztése)



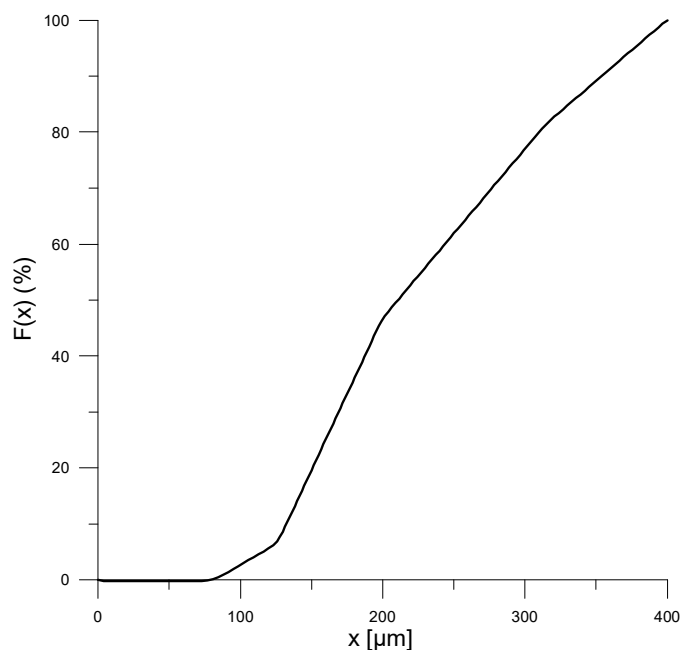
28. ábra 0/0,3mm-es frakció sűrűségváltozása a sebesség függvényében.
(szerző saját szerkesztése)



29. ábra 0/0,3mm-es frakció sűrűségváltozása a légáram függvényében.
(szerző saját szerkesztése)

4.3.4 Kísérletek a 0,22/0,3mm-es frakció:

Utolsó kísérletem 0,22 és 0,3mm közötti szemcsefrakcióval végeztem, melynek szemcseméret eloszlását a 30. ábra szemlélteti.



30. ábra 0.22/0.30mm-es homokfrakció eloszlása

(szerző saját szerkesztése)

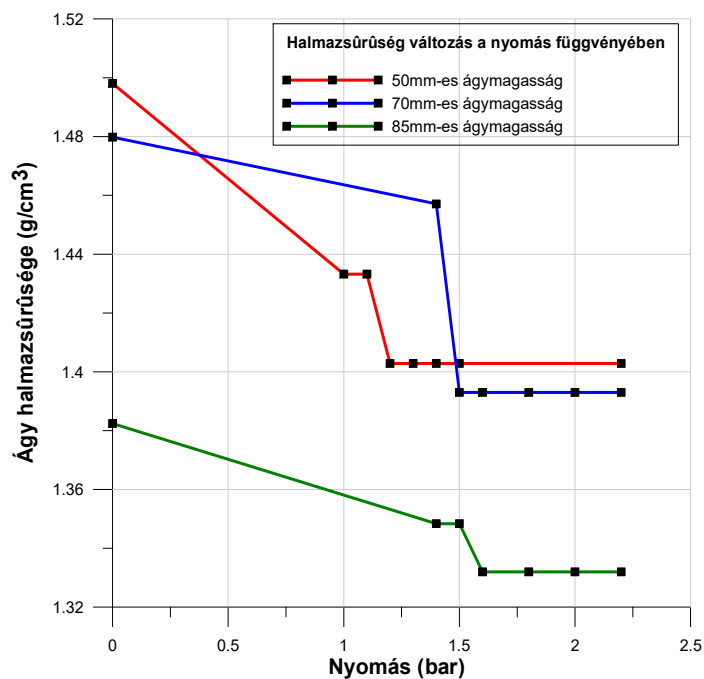
50mm-es ágyvastagságnál a 0,22/0,3mm-es szemcsefrakció kezdeti halmazsűrűség $1,5\text{g/cm}^3$ volt. A halmazt 1bar nyomáson tudtam fluidizálni, ekkor magassága 2mm-ert emelkedett. Ekkor a beáramló levegő sebessége $45,48\text{m/s}$, a fluidágy megemeléséhez szükséges légáram pedig $12,86\text{m}^3/\text{h}$ volt. A sebesség további növelésével az ágyvastagság kevésbé de tovább emelkedett. 0,5bar nyomásnál és $33,53\text{m/s}$ -os légsebességnél az ágy elérte maximális magasságát a 56mm-t. Az ágy halmazsűrűsége maximálisan fellazult állapotban $1,249\text{g/m}^3$ volt. 1,5 bar nyomás és $53,26\text{m/s}$ -os sebességnél mellett kezdődött meg a kihordás.

A következő lépésben 70mm-re töltöttem fel a berendezést. Ekkor nyugvó állapotban a szemcsehalmaz halmazsűrűsége $1,48\text{g/cm}^3$ volt. Ennél az ágyvastagságnál a töltet 1,4 bar nyomáson fluidizálódott, magassága pedig 2mm-ert emelkedett. Ekkor a csőben áramló levegő sebessége $48,64\text{m/s}$, és az ágyba jutó légáram térfogatárama $12,86\text{m}^3/\text{h}$ volt. A sebesség további növelésével már csak 2mm nőtt, ekkor a légsebesség értéke a $53,05\text{m/s}$, a nyomása $1,43\text{bar}$ volt. A megemelkedés hatására az ágy halmazsűrűsége $1,39\text{g/m}^3$ -ra csökkent. A kihordás 2bar-nál kezdődött el.

Utolsó lépésben az ágyvastagság 85mm volt. Nyugvó állapotban a töltet halmazsűrűsége $1,38\text{g/cm}^3$ volt. A töltet $1,34\text{bar}$ nyomáson fluidizálódott, a magassága pedig 87mm -re emelkedett. Ekkor a csőben áramló levegő sebessége $51,86\text{m/s}$, és az ágyba jutó légáram térfogatárama $12,86\text{m}^3/\text{h}$ volt. A sebesség további növelésével már csak 2mm nőtt, ekkor a légsebesség értéke a $53,05\text{m/s}$, a nyomásé $1,5\text{bar}$ volt. A megemelkedés hatására az ágy halmazsűrűsége csökkent ($1,33\text{g/m}^3$). A kihordás 2bar -nál kezdődött el.

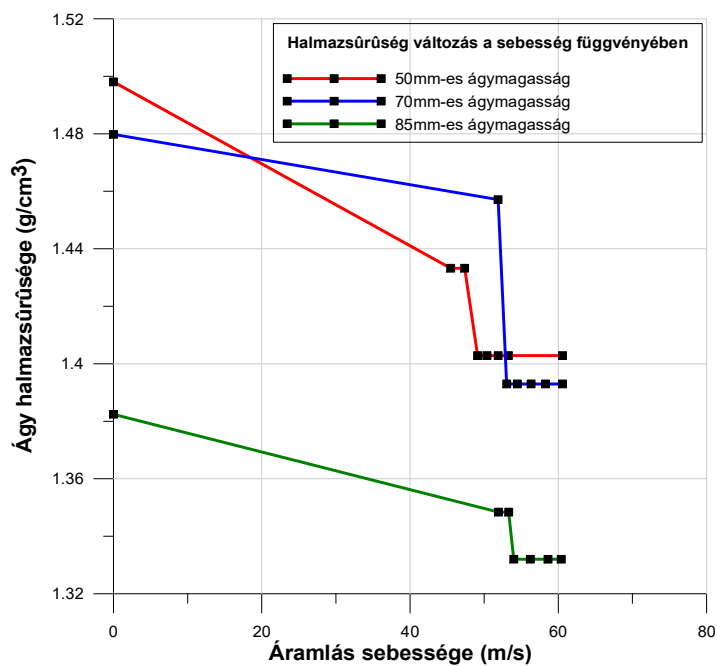
A $0,22/0,3\text{mm}$ -es frakcióból álló töltetknél tapasztalt halmazsűrűség változást a nyomás függvényében a 31. ábra szemlélteti, a sebesség függvényében a 32. ábra, a légáram függvényében pedig a 33. ábra szemlélteti.

Ennél a frakciónál jelentkezett a legkevésbé a buborékképződés, azonban a buborékok mérete nagyobb volt.



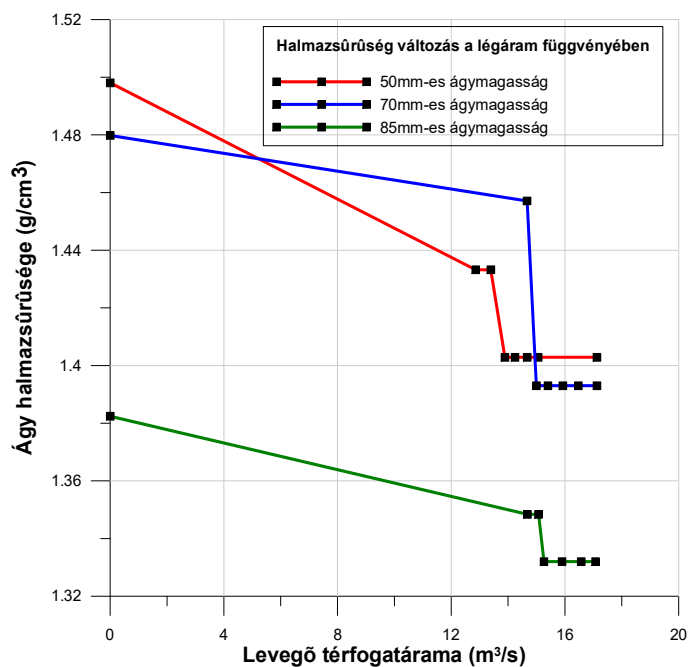
31. ábra $0,22/0,3\text{mm}$ -es frakció sűrűségváltozása a nyomás függvényében

(szerző saját szerkesztése)



32. ábra 0,22/0,3mm-es frakció sűrűségváltozása a sebesség függvényében.

(szerző saját szerkesztése)

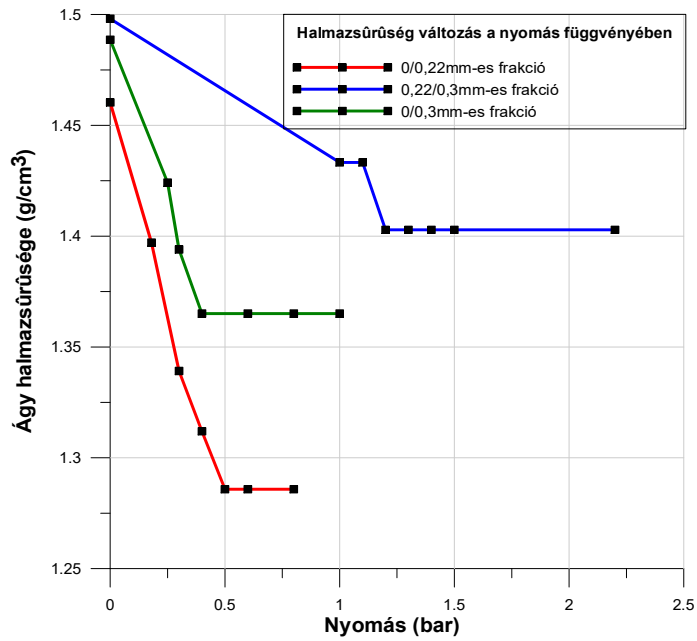


33. ábra 0/0,3mm-es frakció sűrűségváltozása a légáram függvényében.

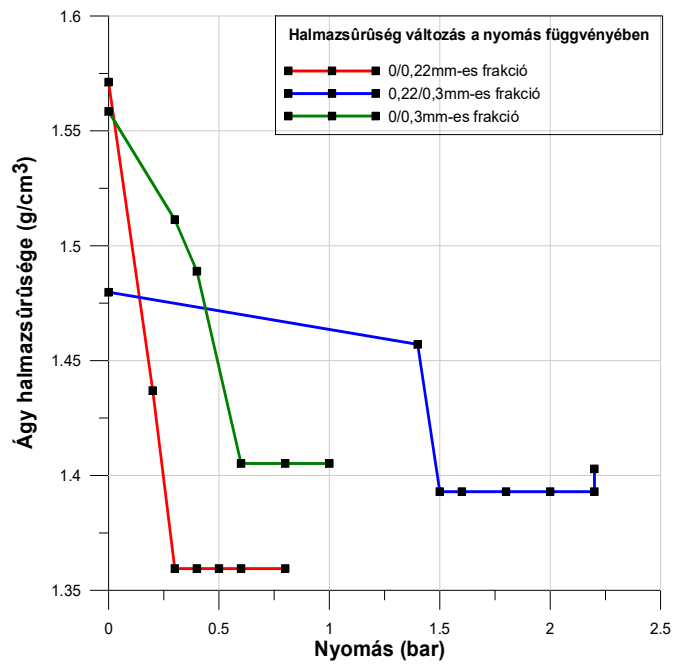
(szerző saját szerkesztése)

4.3.5 Az optimális frakció kiválasztása

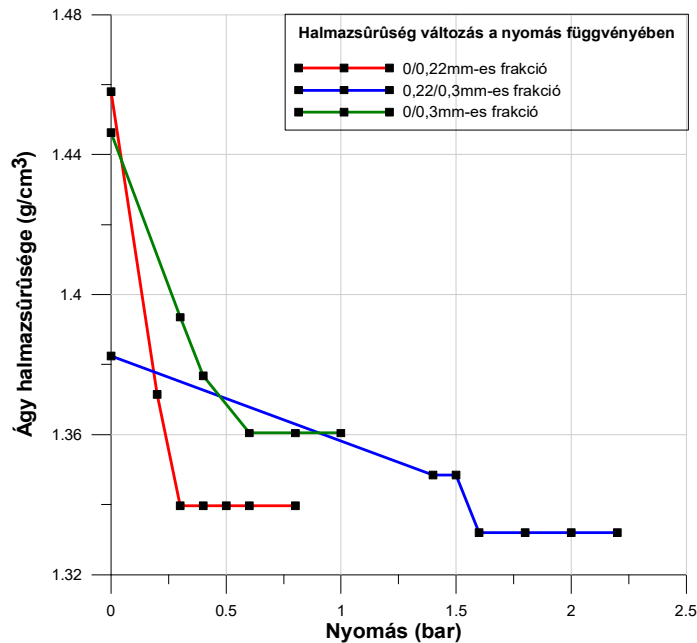
Az optimális frakció kiválasztásához, először érdemes a három frakció ugyanazon ágymagasságok mellett kapott eredményeket együtt ábrázolni (34.-36.ábra).



34. ábra Sűrűségváltozás a nyomás függvényében, 50mm-es ágymagasság esetén
(szerző saját szerkesztése)



35. ábra Sűrűségváltozás a nyomás függvényében, 70mm-es ágymagasság esetén
(szerző saját szerkesztése)



36. ábra Sűrűségváltozás a nyomás függvényében, 85mm-es ágymagasság esetén
(szerző saját szerkesztése)

A diagramokból láthatjuk, hogy mind a három ágyvastagságnál a 0/0,22mm-es szemcseméretfrakciót lehetett, a legkisebb nyomáson fluidizálni, vagyis ezen frakcióból álló töltetnek volt a legkisebb a nyomásvesztése. Valamint a legnagyobb fellazulás (halmazsűrűség csökkenés) is ennél a frakciónál volt tapasztalható. Ezek miatt ez a frakció volt a legkönnyebben fluidizálható, a legkisebb energiaköltséggel.

4.4 Hulladék szétválasztási kísérletek fluidiágyban

A fent említett eredmények alapján a szétválasztási kísérlethez 0/0,22mm-es szemcseméretet választottam, melyet előállítottam magnetitből. A magnetit kohézió viselkedése nem volt fluidizálható, mert a légáram hatására az anyagágyban csatorna alakú rések keletkeztek, és a levegő ezeken keresztül távozott a rendszerből.

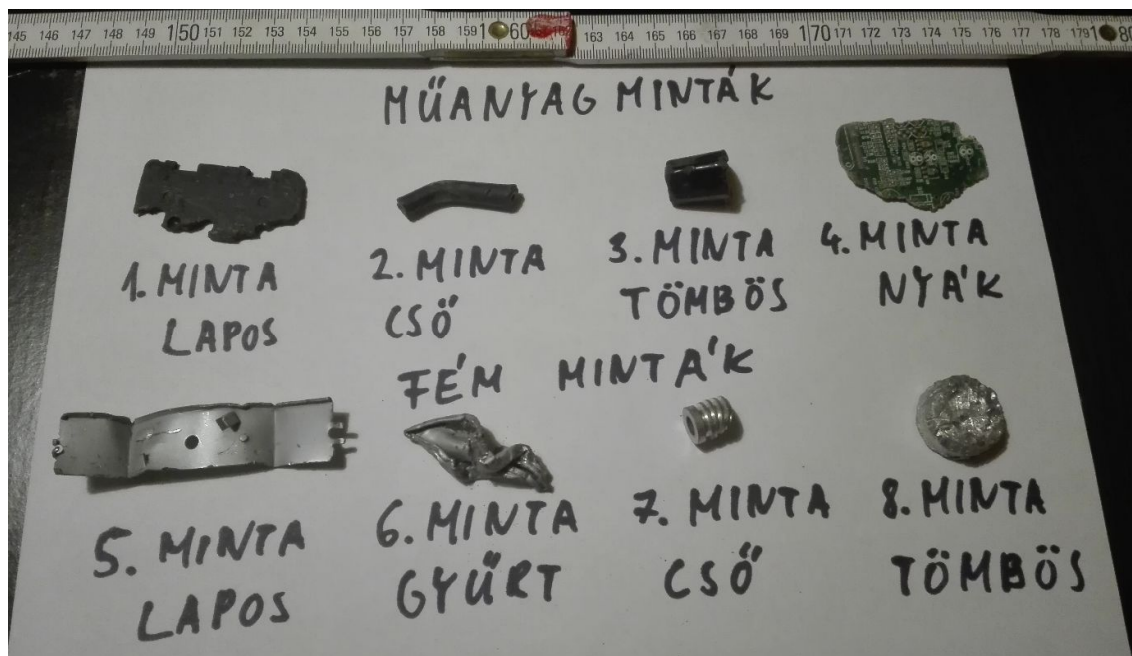
A magnetit kohéziójának csökkentése érdekében homokkal kevertem azt, így létrehozva egy a magnetitnél kisebb, de a homoknál nagyobb halmazsűrűségű diszperz anyagot, ami viszont már jól fluidizálható. A keverékben a magnetit tömegkoncentrációja 45% volt.

A szétválasztani kívánt anyag elektronikai hulladék volt, amely főleg műanyagot, és fémet tartalmazott.

Kísérleteim során először azt vizsgáltam, hogy a feladott anyag alakja hogyan befolyásolja a szétválasztást. Ehhez 4db műanyag és 4db fém szemcsét választottam ki, melyek

alakjukban különböztek, volt köztük lapos, gyűrt, tömbös és cső alakú szemcse is. Első lépésben meghatároztam a minták sűrűségét piknométer segítségével.

A kiválasztott mintadarabok a 37.ábrán láthatóak.

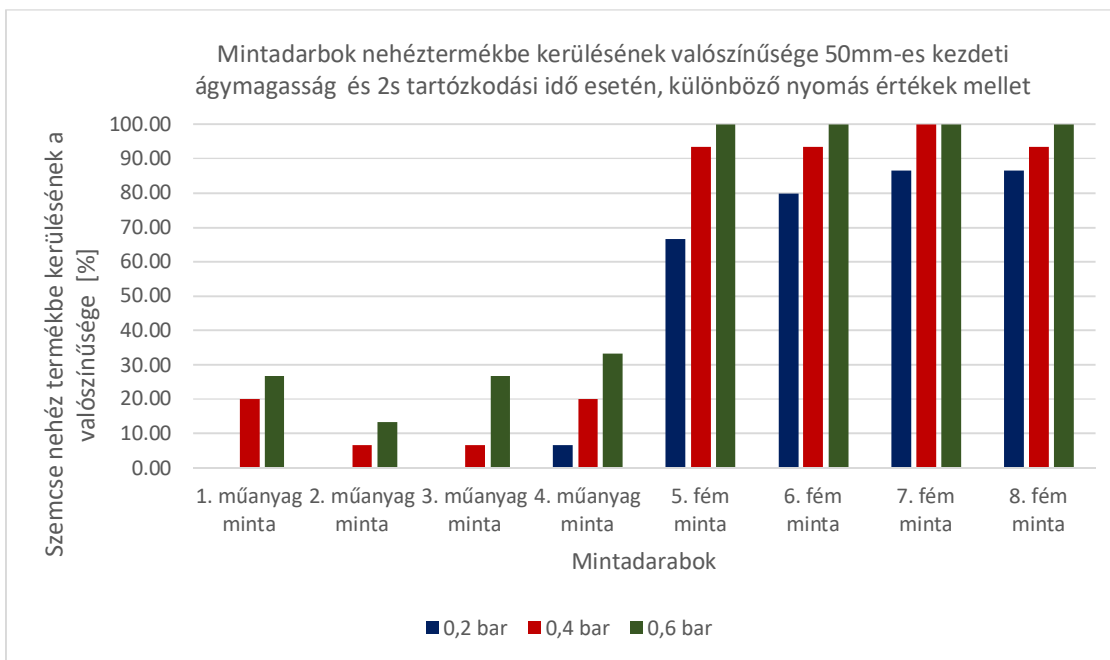


37. ábra Mintadarabok

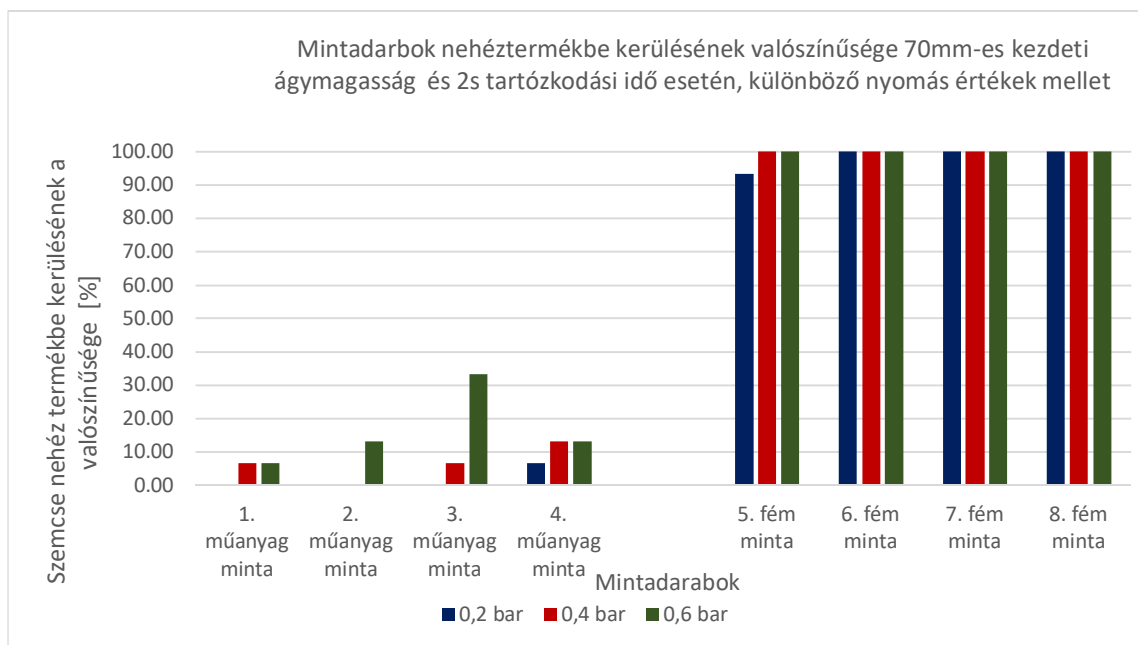
(szerző saját szerkesztése)

A mintaanyagok közül az 1. minta ($\rho_s=1,03\text{g/cm}^3$) egy lapos alakú műanyag, a 2. minta ($\rho_s=1,12\text{g/cm}^3$) egy műanyagcső, a 3. minta ($\rho_s=1,05\text{ g/cm}^3$) egy gyűrt alakú műanyag, a 4. minta ($\rho_s=1,07\text{ g/cm}^3$) egy lapos alakú nyomtatott áramkör, az 5. minta ($\rho_s=6,61\text{ g/cm}^3$) egy lapos fém, a 6. minta ($\rho_s=4,95\text{ g/cm}^3$) egy gyűrt alakú fém, a 7. minta ($\rho_s=6,04\text{ g/cm}^3$) egy fémcső és a 8. minta ($\rho_s=2,66\text{ g/cm}^3$) egy fémtömb volt.

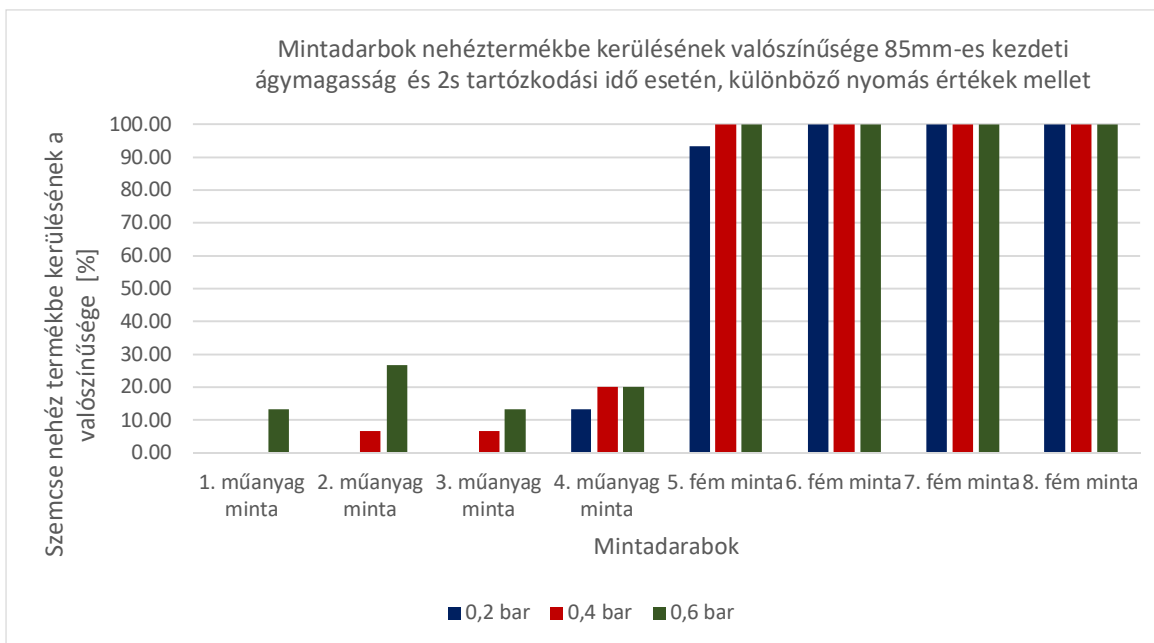
A berendezésben a fent említett homok-magnetit keverékből 50mm-es, 70mm-es és 85mm-es magasságú anyaggyakat alakítottam ki. A 50mm-es ágy kezdeti halmazsűrűsége $1,64\text{g/cm}^3$, 70mm-esnek $1,76\text{g/cm}^3$ 85mm-es töltetnek pedig $1,62\text{g/cm}^3$ volt. A keverék töltet jól fluidizálható volt. 0,18barnál nyomásnál már fellazult, majd 0,38bar nyomásnál pedig elérte maximális magasságát, amely során a 50mm-es ágy 5mm-t, a 70mm-es ágy 11mm-t, a 85mm-es töltet pedig 9mm emelkedett. Majd a mintákat minden alkalommal 15 alkalommal adtam fel a fluidágyra, 2, 3 és 6 másodperc tartózkodási idő, valamint 0,2bar, 0,4 bar és 0,6 bár beállított nyomás mellett, melyet a nyomásszabályzó szelep segítségével állítottam be. A kísérlet végén meghatároztam a a mintadarabok nehéz termékbe kerülésének valószínűségét. A különböző tartózkodási idők mellett kapott eredményeket a 38-46.ábra szemléltet.



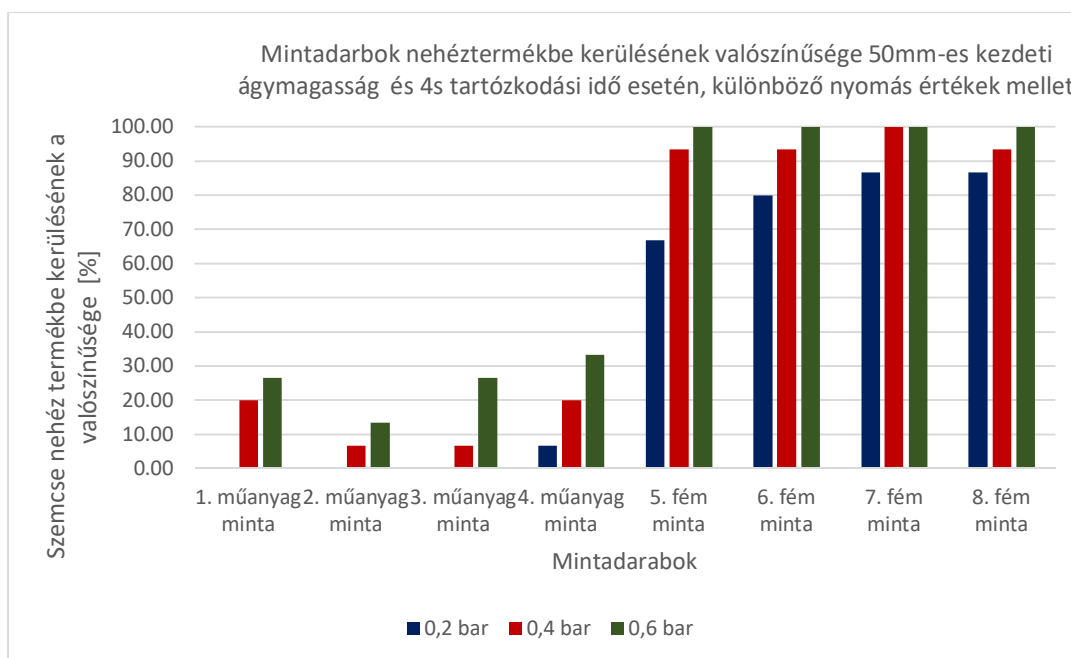
38. ábra Mintadarabok nehéz termékbe kerülésének valószínűsége 50mm-es kezdeti ágymagasság és 2s tartózkodási idő esetén, különböző nyomás értékek mellett
(szerző saját szerkesztése)



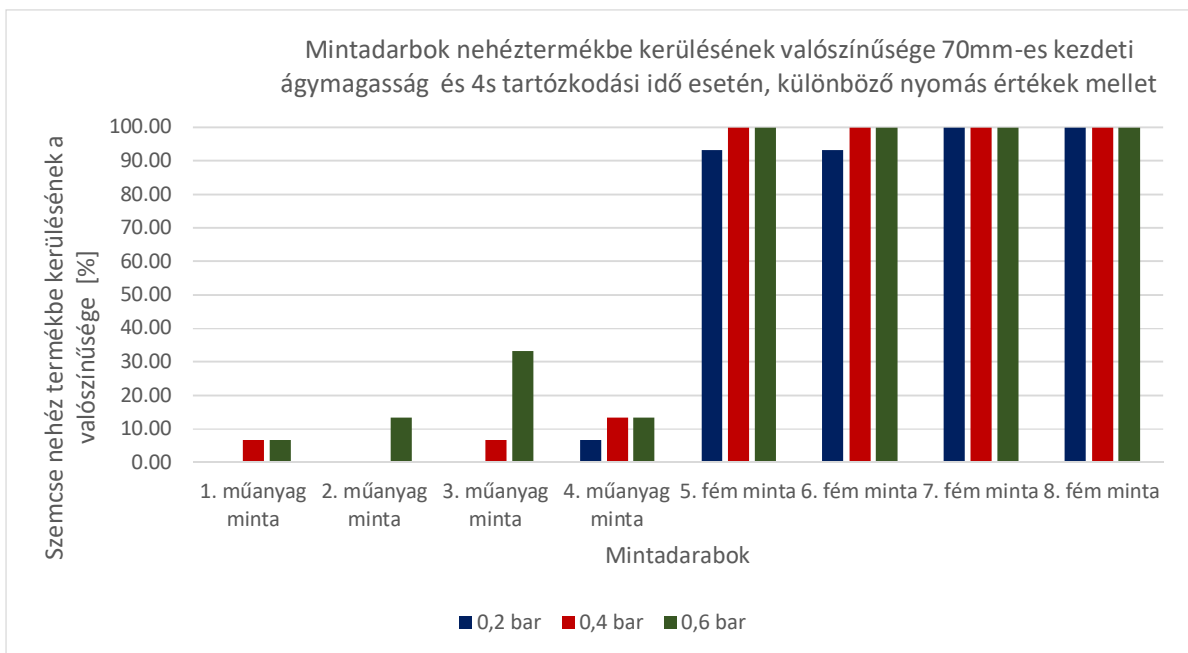
39. ábra Mintadarabok nehéz termékbe kerülésének valószínűsége 70mm-es kezdeti ágymagasság és 2s tartózkodási idő esetén, különböző nyomás értékek mellett
(szerző saját szerkesztése)



40. ábra Mintadarabok nehéz termékbe kerülésének valószínűsége 85 mm-es kezdeti ágymagasság és 2s tartózkodási idő esetén, különböző nyomás értékek mellett
(szerző saját szerkesztése)

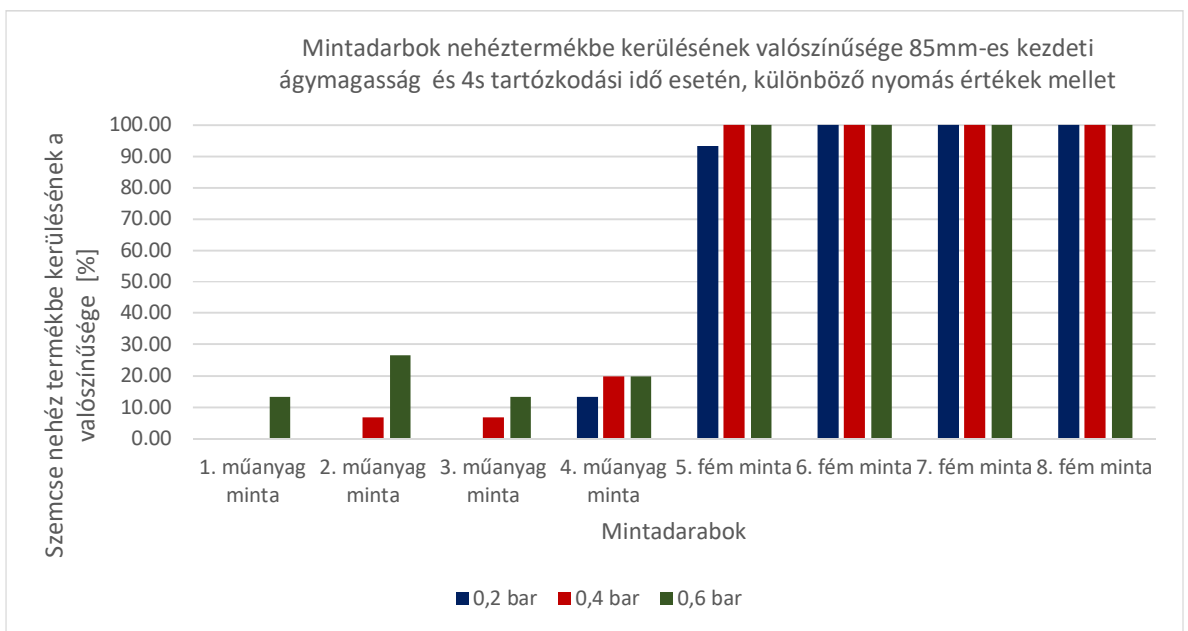


41. ábra Mintadarabok nehéz termékbe kerülésének valószínűsége 50mm-es kezdeti ágymagasság és 4s tartózkodási idő esetén, különböző nyomás értékek mellett
(szerző saját szerkesztése)



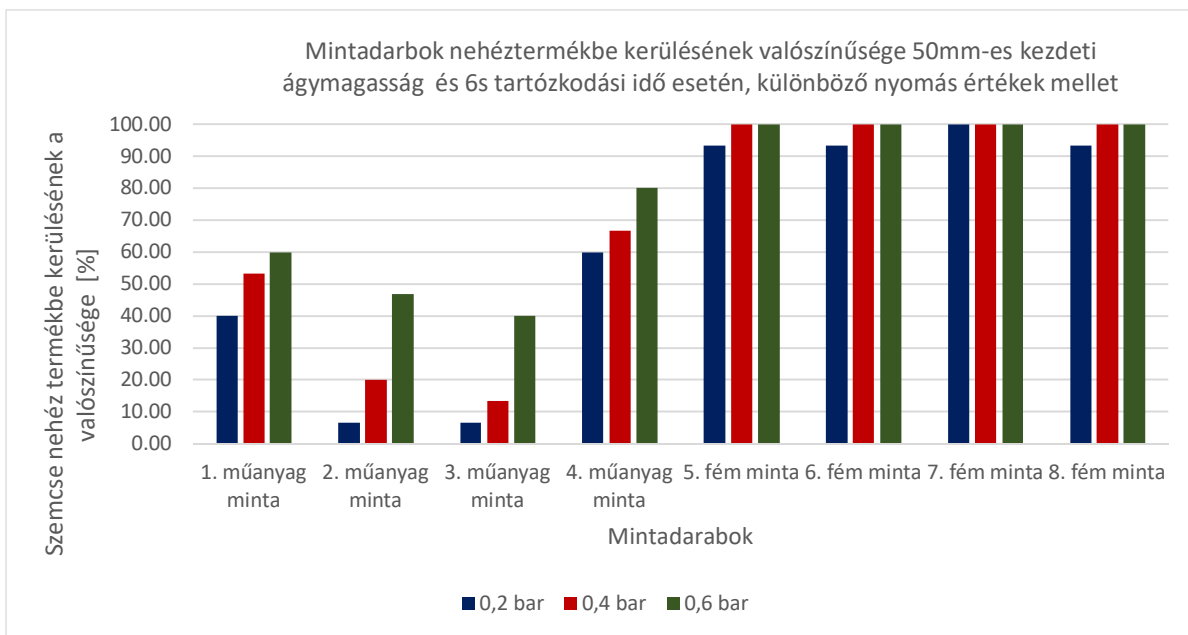
42. ábra Mintadarabok nehéz termékbe kerülésének valószínűsége 70mm-es kezdeti ágymagasság és 4s tartózkodási idő esetén, különböző nyomás értékek mellett

(szerző saját szerkesztése)

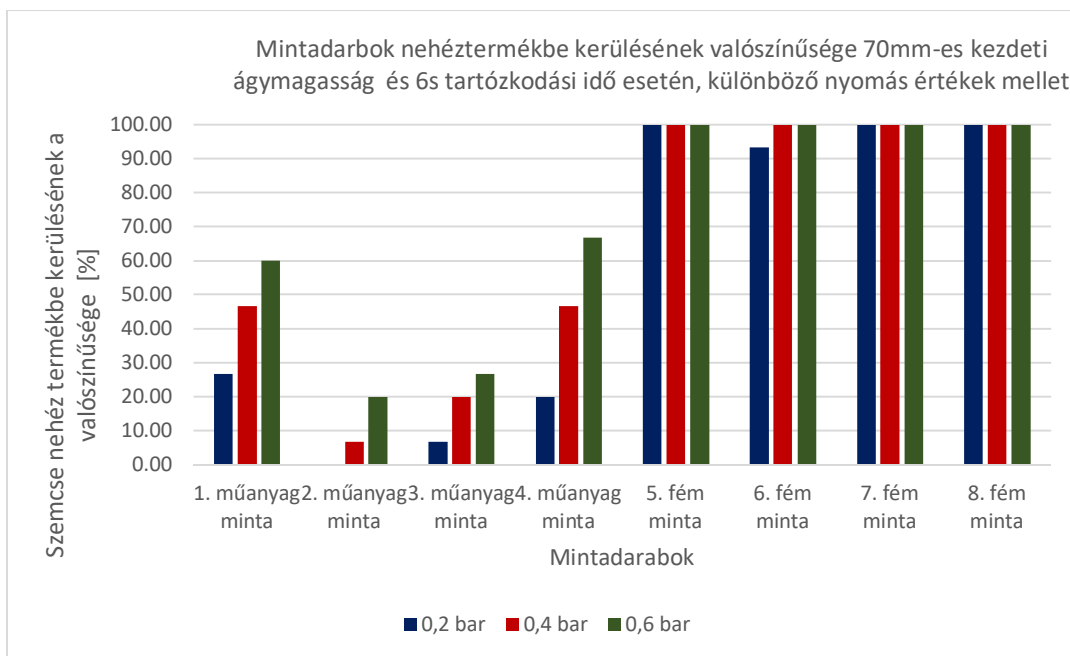


43. ábra Mintadarabok nehéz termékbe kerülésének valószínűsége 85mm-es kezdeti ágymagasság és 4s tartózkodási idő esetén, különböző nyomás értékek mellett

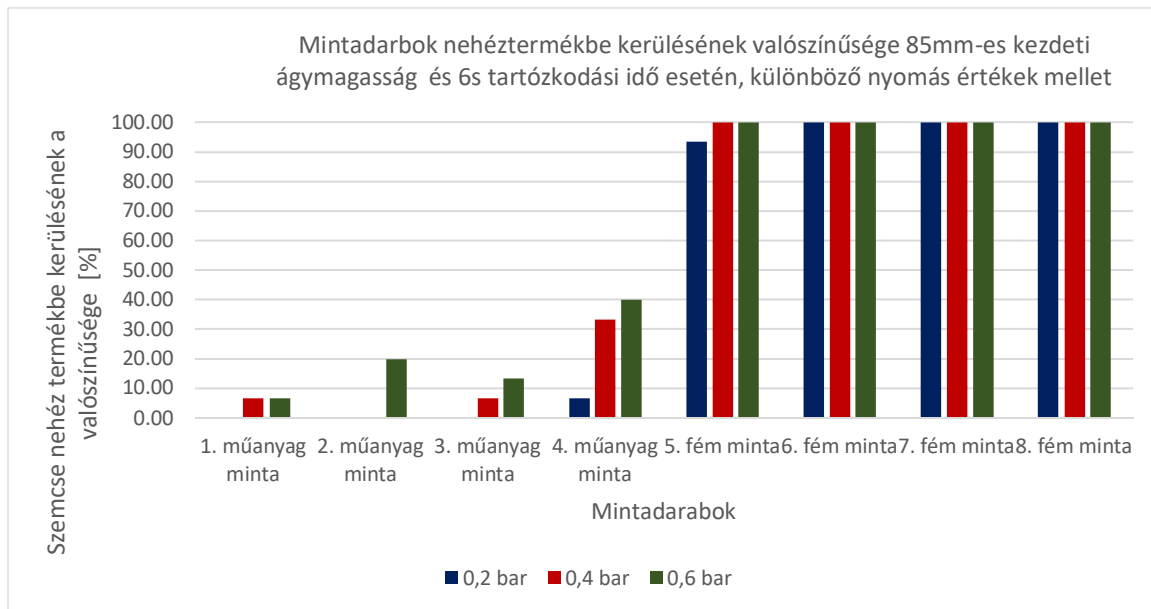
(szerző saját szerkesztése)



44. ábra Mintadarabok nehéz termékbe kerülésének valószínűsége 85mm-es kezdeti ágymagasság és 6s tartózkodási idő esetén, különböző nyomás értékek mellett
(szerző saját szerkesztése)



45. ábra Mintadarabok nehéz termékbe kerülésének valószínűsége 70mm-es kezdeti ágymagasság és 6s tartózkodási idő esetén, különböző nyomás értékek mellett
(szerző saját szerkesztése)



46. ábra Mintadarabok nehéz termékbe kerülésének valószínűsége 85mm-es kezdeti ágymagasság és 6s tartózkodási idő esetén, különböző nyomás értékek mellett
(szerző saját szerkesztése)

A fenti eredményekből láthatjuk, hogy az 85mm-es ágyban a műanyag szemcsék nagyobb számban süllyedtek le és kerültek a nehéz termékbe, aminek az oka az intenzív buborékképződés. A finom szemcsék a buborékokkal keveredve feltörnek a fluidágy tetejére és rászóródnak a szemcsékre, ami megnöveli a minták látszólagos sűrűségét, emiatt elkezdnek lesüllyedni. Ez a jelenség főleg a lapos szemcsékre volt igaz nagyobb felületük miatt, azonban a műanyagcső feladásánál például alig volt tapasztalható. A magasságot növelve a buborékképződés csökkent, emiatt ez a jelenség hatása is.

Az alak hatását tekintve, az ábrából jól látszik, hogy a műanyagok közül a lapos minta, és a lapos NYÁK minta nehéz termékbe kerülése a legvalószínűbb, ez 6s-os tartózkodási idő mellett még jellemzőbb, ekkor a lapos szemcsék nagyobb valószínűséggel lesüllyedtek, mint fentmaradta. Emiatt ez a tartózkodási idő az elválasztásra nézve nem ajánlott.

A legkisebb ágyvastagnál a fém minták is többször fennmaradtak, amelynek az lehet az oka, hogy ebben a magasságban még az örvényréteg nem tud kellőképp kialakulni, hiszen a fellazulás (halmazsűrűség csökkenés) is mindig ez az ágy esetén volt a legkisebb.

A szétválasztás szempontjából a legmagasabb 85mm-es ágy volt a legkedvezőbb. Ezen az ágyon a műanyagok a legtöbb esetben fennmaradtak még a 6s-os tartózkodási idő mellett is, a fémek pedig egy esetet kivéve mindig lesüllyedtek. Valamint ez a magasság mellett a tartózkodási idő sem befolyásolja olyan mértékben a szétválasztást, hiszen még 6s-os

tartózkodási idő mellett is elfogadható az elválasztás élessége, ami a többi ágyvastagságnál már nem igaz.

A műanyag szemcsék a 0,2bar-nál létrehozott fluidágyon maradtak fent a legnagyobb valószínűséggel, de a fém szemcsék a kisebb fellazulás miatt lassabban süllyedtek le. 0,4bar-nál létrehozott fluidágyon a műanyag szemcsék még nagy valószínűséggel fennmaradtak, és a fém szemcsék majdnem biztosan lesüllyedtek. 0,6bar-nál a fluidágy azonban már elkezdett szétesni, és a műanyag szemcsék is sok esetben lesüllyedtek.

A tartózkodási időt figyelembe véve, a műanyag szemcsék 2s-ig még közel biztosan fennmaradtak az ágyon, azonban a lapos fém szemcsénél előfordult, hogy a 2s nem volt elég a süllyedéshez. A 4s-nál a műanyag szemcsék még nagy számban fennmaradtak, a fémek pedig minden esetben lesüllyedtek, kivéve az 5mm-es szemcseágytetején. 6-s tartózkodási időnél viszont, a buborékoknak több idejük van eltemetni a szemcséket, emiatt az ebben az időintervallumban a műanyagok is nagyobb valószínűséggel süllyedtek el, főleg nagyobb nyomás értéknél.

A mintadarabok alakját nézve elmondható, hogy a nagyobb felületű szemcsék jobban lebegnek a fluidágy felületén, de a műanyagoknál, a fent említett betemetődés a szétválasztásra meglehetősen kedvezőtlenül hat. A gyűrt, hengeres (cső) szemcsék viszont jól úsznak az ágyon. A műanyagcső még 6s-után is tartósan fennmaradt, az ágy tetején, még akkor is, amikor a finom szemcsék kihordása már megkezdődött.

Az egyes minták vizsgálata után a mintákat összeöntöttem és újra feladtam, az előző kísérletben a szétválasztás tekintetében legmegfeleőbbben viselkedő 85mm-es fluidágyra, az előző kísérletben használt paraméterek (nyomások, tartózkodási idők) mellett. A feladás után lemértem a fennmaradt és lesüllyedt termék tömegét, valamint ebből kiválogattam a műanyag és a fém szemeket és azokat is megmértem, majd meghatároztam a kihozatalokat.

2s tartózkodási idő és 0,2bar nyomás mellett, a fennmaradt termékben a műanyag 100% felúszott a fém 33%-ával együtt, ennek oka, hogy a lapos fém mintaszemcsének sem volt ideje lesüllyedni. 0,4bar-nál az összes műanyag lebegett, a fémek pedig elsüllyedtek. A nyomást tovább növelve, 0,6bar-nál már a műanyag 26%-is lesüllyedt a fémekkel együtt.

A tartózkodási időt 4-ra növelve, 0,2bar nyomás mellett, a fennmaradt termék 100%-ban műanyag volt, a lesüllyedt anyag pedig tiszta fém. 0,4bar nyomásán a feladott műanyag 40% lesüllyedt, 0,6bar-nál 46% lesüllyedt.

A tartózkodási időt 6s-ig növelve, 0,2bar nyomás mellett, a termékek ismét tiszta műanyag és fém volt, a lesüllyedt termék. 0,4bar nyomásán a feladott műanyag 40% lesüllyedt, 0,6bar-nál 60% süllyedt le.

A fenti eredményekből láthatjuk, hogy a legélesebb szétválasztást 0,2bar nyomáson, 4s és 6s tartózkodási idő mellett tudtam elérni.

A kísérletek során mért, és számolt eredmények a 2. Mellékletben találhatóak. Az egyes szemcséknél végzett kísérlet pedig a CD-n található a digitális 3. Mellékletben.

5. Konklúzió

A fluidizációval történő szétválasztás vizsgálatához, először egy laboratóriumi berendezést kellett terveznem és kialakítanom, amely képes stabil fluidizációra. Ezt a feladatom sikeresen elvégeztem, a diplomamunkámban leírt berendezés képes stabil fluidágyat létrehozni, és a hozzá kialakított mérőkörrel sikeresen megtudtam mérni a fluidizáció vizsgálatának szempontjából szükséges paramétereket (nyomás, légsebesség, ágyemelkedés).

A berendezés homokkal való optimalizálása során kvarchomokból 0/0,22mm-; 0/0,3mm-; 0,22/0,3mm- és 0,3/0,5mm-es frakciókat állítottam elő. Ezek a szemcsefrakciók közül az első hármat sikeresen tudtam fluidizálni, melyek közül a 0/0,22mm-es frakció mutatott a legkedvezőbb tulajdonságokat. Ennél az anyagnál tapasztaltam a legnagyobb fellazulást és a legkisebb nyomásvesztést.

Emiatt a szétválasztáshoz egy 0/0,22mm-es magnetit frakciót állítottam elő. Azonban a magnetitet nem tudtam fluidizálni a berendezésben, mert a szemcsék között, olyan nagy volt a kohézió, hogy a légáram hatására csak rések keletkeztek a tölteten, melyeken keresztül távozott a levegő, a szemcsék megmozdítása nélkül. Emiatt a magnetitet homokkal kevertem, létrehozva, egy a magnetitnél kisebb, de a homoknál nagyobb halmazsűrűségű ($\rho = 1,7 \text{ g/cm}^3$) anyagot. A keverékben a magnetit tömegkoncentrációja 40% volt.

Az ezzel a keverékkel szétválasztani kívánt anyag elektronikai hulladék volt, amelyből kiválasztottam 4db műanyag és 4db fém mintaanyagot, melyek alakjukban különböztek. A mintákat külön külön adtam fel különböző paraméterek (ágymagasság, nyomás, tartózkodási idő) mellett. A kísérletből megtudtam, hogy a kisebb ágymagasságú (50mm-es) töltettel, az intenzív buborékképződés miatt, a finom rész a fluidágy felületére feltör, és a légáram az anyag felületére hordja azt, ezzel megnövelve a látszólagos sűrűségét, emiatt a szemcse süllyedni kezd. Tulajdonképpen ekkor a töltet szemcséi betemetik a szétválasztandó anyagot, ami főleg a lapos műanyagok felúszására volt hatással. Azonban az ágy magasságának növelésével és az optimális tartózkodási idő megtalálásával, ez a jelenség hatása jelentősen csökkenthető. A tömbös, hengeres alakú műanyagok az ágyon sokkal stabilan lebegtek, valamint a fémek esetében a lapos szemcse süllyedése lassabb volt, a tömbös gyűrt szemcséké gyors. Az

egymintás kísérlet során a 2s- és a 4s-os tartózkodási idők voltak a legkedvezőbb, valamint a műanyag nehéz termékbe kerülésének valószínűsége 85mm-es ágymagasság, 0,2bár nyomás, mellet volt a legkisebb, a fellazításhoz szükséges légáram ekkor $7\text{m}^3/\text{h}$ volt.

Következő lépésben a mintaanyagot összeöntöttem, és újra feladtam a fluidágyra, melynek kezdeti ágymagassága a túlzott buborékképződés elkerülése miatt 85mm-re lett beállítva. Ekkor 0,2bar nyomásnál, és 4s-tartózkodási időnél eltudtam érni a legsikeresebb szétválasztást, ekkor az összes műanyag minta a fluidágy tetején maradt, a fémek pedig elsüllyedtek.

A kísérleteim eredményeit figyelembe véve a fluidicióra és a fluidágyban történő szétválasztásra az alábbi megállapításokat és javaslatokat tudom tenni:

- A 0 és 0,22mm közötti szemcsefrakcióból egy jól kezelhető stabil fluidágyat lehet létrehozni. A 0,3mm-nél nagyobb szemcséket az diplomamunkámban leírt berendezésben nem lehet fluidizálni.
- Ha fluidágyban kívánunk anyagot sűrűség szerint szétválasztani, óvakodni kell a túlzott buborékképződéstől, mert ronthatja a szétválasztás hatásfokát.
- A magasabb (>50mm) ágyak esetén a fluidizáció stabilabb, az ágy fellazulása nagyobb, a buborékképződés csekély, amely tulajdonságok kedvezően hatnak a szétválasztásra. Ezenfelül az ágymagasságot növelve, a tartózkodási idő sem befolyásolja olyan mértékben az elválasztást. Kísérleteim során én a legnagyobb 85mm-es ágyon tudtam a legélesebben szétválasztást elérni.
- A szétválasztandó anyag alakját figyelembe véve, a tömött, gyúrt szerkezetű szemcséket élesebben szétlehet választani, mint a laposakat.
- Magnetit ágyat fluidizálni nehéz feladat, az ágy nagy nyomásvesztése, és a szemcsék közötti kohézió miatt. Emiatt a magnetitet fluidizációs szeparálásnál felhasznált töltet anyagának nem ajánlom.
- Magnetit és homok keverékéből, létre lehet hozni egy olyan töltetet, amely ugyan a magnetit halmazsűrűségénél valamelyest kisebb, de jól fluidizálható.
- A magnetit és homok keverékéből álló fluidágy jól alkalmazható elektronikai hulladékok szétválasztására. A szeparáció szempontjából a 4s-os tartózkodási idő a legkedvezőbb volt a legkedvezőbb.
- Végezetül, a kísérleteimet összegezve elmondhatom, hogy a fluidizációs szétválasztás lehetséges, és potenciálisan alkalmas agyagok sűrűség szerint szétválasztására, ahogy azt eredményeim is bizonyítják. Azonban egy ilyen

berendezésnél, különösen fontos a szétválasztás szempontjából az optimális töltet (halmazsűrűség, fluidizálhatóság), és üzemi paraméter (nyomás, légsebesség, légáram) megtalálása, valamint az üzemeltetésnél a technológiai fegyelem betartása. Azonban az üzemeltetőt kárpótolja, hogy száraz technológia használatánál, nincsenek sem vízkezelési, sem szárítási költségek. Emiatt az aeroszuszenziós szeparátor választása, akár kedvezőbb is lehet, mint a nedves technológia.

Felhasznált Irodalom

- DR. Tarján Iván: Mechanikai eljárás technika (Miskolci Egyetemi Könyvkiadó, Miskolc, 1997) 39-108,
- DR. Fonyó Zsolt és DR. Fábry György (2004): Vegyipari műveletleni alapismeretek (Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2004) 18-37,
- Prabir Basu (2006): Combustion and gasification in fluidized beds (CRC Press., 2006) 21-25,
- DR Dévay Attila (2013): A gyógyszer technológia alapjai (Pécsi Tudományegyetem Gyógyszer technológiai és Biofarmáciai Intézet, Pécs, 2013) 381-383,
- Gibilaro L.G. (2001): Fluidization – dynamics. (Butterworth-Heinemann, Oxford, 2001) 3-4,
- D. Geldart (1973): Types of Gas Fluidization, Powder Technology, 7, 285-292
- DR. J. Tomas (2012): Particle Separation in Fluid Flow Mechanical Process Engineering 04.12.2012
- Max Leva (1964): Fluidizáció (Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1964) 14-17,
- Faitli József, Gombkötő Imre, Mucsi Gábor, Nagy Sándor és Antal Gábor: Mechanikai Eljárás technikai Praktikum (Miskolci Egyetem Kiadó, Miskolc, 2017) 51, 205,
- Veres György (2012): Hidraulika és pneumatika (Pannon Egyetem, 2012) 86,
- Stein Vera (2014): Géptan (Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest, 2014) 86
- Dr. Mannheim Viktória (2009): Vegyipari technológiák berendezései (MSc, levelező) Előadásjegyzet 2009, Miskolci Egyetem, Vegyipari Gépek Tanszék
<http://docplayer.hu/14966184-Vegyipari-technologiak-berendezesei-msc-levelezo.html> (2018.05.16.)

Köszönetnyilvánítás

Elsőként szeretnék köszönetet mondani konzulenseimnek, Dr. Nagy Sándor egyetemi docensnek, valamint Dr. Gombkötő Imre címzetes egyetemi docensnek, hogy útmutatásukkal és hasznos tanácsaikkal támogatték diplomamunkám elkészítése során. Valamint köszönetet szeretnék mondani Dr. Faitli József egyetemi docensnek, hogy tudásával, és javaslataival segítette munkám előrehaladását.

Szeretném még megköszönni a műhelycsarnokban dolgozó laboránsoknak és technikusoknak, különösképpen Vass Lászlónak és Kövesi Viktornak hogy segítettek a berendezés építésében, valamint méréseim sikereres elvégzésében.

Végül szeretném megköszönni összes tanáromnak, azt a fáradhatatlan munkát, amivel segíttek megszerezni mind azt a hasznos tudást, amely nélkül diplomamunkám nem készülhetett volna el.

Köszönöm szépen!

Földesi Áron