



Miskolci Egyetem
Műszaki Földtudományi Kar
Nyersanyagelőkészítési és Környezeti
Eljárástechnikai Intézet



Fémhulladék szétválasztása aeroszuspenziós fluidágyas
technológiával
Szakdolgozat

Készítette:
Lukács Dániel
Műszaki Földtudományi alapszak (BSc)
Nyersanyagelőkészítési és eljárás technikai szakirány

Konzulensek:

Dr. Nagy Sándor
intézetigazgató, egyetemi docens

Dr. habil. Faitli József
intézi tanszékvezető, egyetemi docens

Miskolc, 2019

Alulírott Lukács Dániel, a Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Karának hallgatója büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és aláírással igazolom, hogy a Fémhulladék szétválasztása aeroszuszenziós fluidágyas technológiával című diplomamunka/szakdolgozat (a továbbiakban: dolgozat) önálló munkám, a dolgozat készítése során betartottam a szerzői jogról szóló 1999. évi LXXVI. tv. szabályait, valamint az Egyetem által előírt, a dolgozat készítésére vonatkozó szabályokat. A dolgozatban 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. Kijelentem, hogy az elektronikusan feltöltött és a papír alapú dokumentum mindenben megegyezik. Jelen nyilatkozat aláírásával tudomásul veszem, hogy amennyiben bizonyítható, hogy a dolgozatot nem magam készítettem vagy a dolgozattal kapcsolatban szerzői jogsértés ténye merül fel, a Miskolci Egyetem megtagadja a dolgozat befogadását és ellenem fegyelmi eljárást indíthat. A dolgozat befogadásának megtagadása és a fegyelmi eljárás indítása nem érinti a szerzői jogsértés miatti egyéb (polgári jogi, szabálysértési jogi, büntetőjogi) jogkövetkezményeket.

Miskolc, 2019. május 17.

.....

A hallgató aláírása

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés	1
2.	Szakirodalmi áttekintés	3
2.1.	Szemcsére ható erők áramló közegben	3
2.2.	Süllyedési végsebesség	9
2.3.	Hátráltatott szemcsemozgás	13
2.4.	Fluidizáció	15
2.4.1.	Történelmi áttekintés	18
2.4.2.	A Fluidizációt befolyásoló tényezők	19
3.	Anyagok és módszerek.....	29
3.1.	Anyagok	29
3.1.1.	Piknométeres sűrűség meghatározás	30
3.1.2.	Halmazsűrűség és porozitás	31
3.1.3.	Szemcsealak	33
3.1.4.	Szemcseméret-eloszlás	34
3.2.	Módszerek	35
3.2.1.	Por reológiai vizsgálatok.....	36
3.2.2.	Kísérleti berendezés és mérőkör.....	37
3.2.3.	Venturi cső	39
3.2.4.	Gravitációs erő a fluidágyban.....	40
3.2.5.	A szétválasztandó szemcsék süllyedési sebessége:	41
3.2.6.	A szétválasztandó anyagba szorult vas őrlemény:	42
4.	Kísérletek, eredmények	44
4.1.	FT4 por reológiai mérések	44
4.1.1.	Kísérletek 0-100 µm-es vas őrleménnyel.....	44
4.1.2.	Kísérletek 100-160 µm-es vas őrleménnyel.....	44

4.1.3.	Kísérletek 160-200 μm -es vas őrléménnyel.....	45
4.1.4.	Kísérletek 200-250 μm -es vas őrléménnyel.....	45
4.1.5.	Kísérletek 250-315 μm -es vas őrléménnyel.....	46
4.1.6.	Kísérletek 315-400 μm -es vas őrléménnyel.....	47
4.1.7.	Kísérletek 200-300 μm -es cirkon-oxiddal	47
4.2.	Áramlási sebességek	48
4.3.	Gravitációs erő a fluidágyban.....	49
4.4.	Süllyedési mélység mérése:.....	53
4.5.	Vaspor eltávolítása a szemcsékből:	54
5.	Konklúzió	55
6.	Summary.....	58

1. Bevezetés

Ásványi nyersanyagok és hulladékok előkészítése során gyakran találkozunk azzal a problémával, hogy különböző szilárd halmazállapotú anyagokat kell szétválasztani. A szeparáláshoz a különböző anyagok eltérő fizikai tulajdonságait használjuk ki, mint például a sűrűség, elektromos vezetőképesség, mágneses szuszceptibilitás, vagy pedig a hőtani tulajdonságok.

Két fém szétválasztása esetén elterjedt módszer a sűrűség szerinti szétválasztás, azon belül is a nehézközeges szétválasztás. Ennél a módszernél a kisebb sűrűségű szemcse felhajtóerejének a nagysága meghaladja a szemcsére ható gravitációs erőjét, így az nehézközeg felszínére úszik. A közegnél nagyobb sűrűségű szemcséknél a felhajtóerő kisebb, mint a rájuk ható gravitációs erő, ezáltal azok a közegbe merülnek. A közeget valódi folyadékok nagyon ritkán alkotják, mivel a megfelelő sűrűségűek a legtöbb esetben nagyon drágák, illetve gyakorta erősen toxikusak is. A gyakorlatban ezért szuszpenziókat használnak. A szuszpenziók két részből állnak: finom szemcsékből és folyadékból. A szuszpenzió sűrűségét befolyásolhatjuk a szemcsék sűrűségével, illetve mennyiségével, tehát a koncentrációjával. A szuszpenziók használatánál azonban felmerülhetnek különböző problémák, mint például a szemcsék ülepedése, melynek következtében a szuszpenzió minősége romlik, ezért folyamatosan regenerálni kell azt. Fontos még belátni azt, hogy a nehézközeges technológiák jelentős mennyiségű vizet használnak fel. A Föld vízkészletének megóvása érdekében a vízhasználat csökkentésére minden iparágban törekedni kell, beleértve a mechanikai eljárás technikát is.

Intézetünket az Inter-Metal Recycling Kft. csepeli hulladékfeldolgozó üzeme kereste meg azzal a feladattal, hogy dolgozzon ki megfelelő technológiát, melynek segítségével alumínium és réz hulladékot lehet szétválasztani. Szakdolgozatomban erre teszek kísérletet, és egy olyan nehézközeges eljárást vizsgállok, illetve alkalmazok, mely a klasszikus értelemben vett szilárd-folyadék szuszpenzió helyett, úgynevezett aero-suszpenziót használ. Az aero-suszpenziók levegő és szilárd fázisból állnak. Ha levegőt alulról megfelelő sebességgel vezetünk a finom szemcsékből álló szemcseágyba, akkor a levegő fellazítja azt. Ezt a jelenséget nevezzük fluidizációnak. Ilyenkor az anyagalmaz folyadékszerű fizikai tulajdonságokat mutat. Ebben a folyadékszerű közegben is véghez lehet vinni az eltérő sűrűségű szemcsék szétválasztását, mellőzve ezzel a vizes technológiák hátrányait.

Szakedolgozatomban törekedtem a már meglévő szakirodalom összegyűjtésére, és egy olyan kísérleti berendezés kialakítására mely hatékonyan képes az alumínium és a réz szétválasztására. A kísérleti berendezésen egy iparban használatos szeparátor működésének modellezését tűztem ki célul és különböző javaslatokat teszek a nagyüzemű gép optimális működési paramétereivel kapcsolatban.

2. Szakirodalmi áttekintés

2.1. Szemcsére ható erők áramló közegben

Az áramló fluidumban (gázban, vagy folyadékban) lévő szemcsére általában sokféle erő hat, ezért ebből kifolyólag bonyolult mozgásjelenségek adódnak. A folyamatok modellezésekor azonban bizonyos erők elhanyagolhatóak, így a modell lényegesen leegyszerűsíthető. Egy szemcsére ható tömegelő (pl. nehézségi erő) az alábbi módon írható fel:

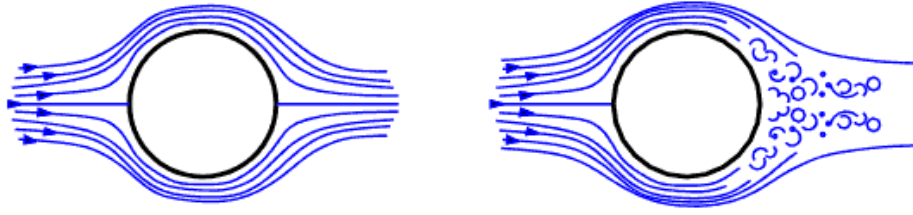
$$F_m = m_s * a = V_s * \rho_s * a$$

ahol m_s a szemcse tömege, V_s a térfogata, ρ_s a sűrűsége, az a pedig az erőterben a gyorsulás. A gyorsulás nehézségi erőter esetén $a = g$.

A felületi erők közül rááramláskor, illetve körüláramláskor a szemcsére általános esetben egy forgatónyomaték és egy erő hat. A forgatónyomaték felbontható F_E ellenállási erőre és egy erre merőleges komponensre, az F_D dinamikus felhajtóerőre:

$$F = F_E + F_D$$

Ha egy szemcse fluidumban mozog, akkor mindig fellép az áramlás irányába eső erőösszetevő, az ellenállás. Az ellenállás az áramló fluidumba helyezett szemcse felületén a határrétegben fellépő súrlódás és a felületi nyomáseloszlás következménye. Valóságos folyadék- és szemcse esetén mindig van súrlódás, legfeljebb a súrlódás olyan kicsi, hogy elhanyagolható, ilyenkor beszélünk súrlódásmentes körüláramlásról. Súrlódásos körüláramlás esetén, a szemcse felületén határréteg képződik, amelyben a nyomás az áramlás irányában először csökken, majd pedig növekszik és a határréteg a szemcséről leválik. Holttér keletkezik a szemcse mögött, amelyben örvények alakulnak ki és ezek egymás után leszakadnak a szemcséről. Az örvények felemésztik a fluidum energiájának nagy részét, ezért a szemcse mögötti holtterben a nyomás lecsökken. Ennek következtében a szemcsére az áramlás irányába mutató nyomóerő hat, amelyet a szemcsenyomási- vagy alakellenállásnak nevezünk. (Tarján, 1997). A szemcsék súrlódásos és súrlódásmentes körüláramlását az 1. ábra mutatja.



1. ábra: Gömb alakú szemcse ideális és valóságos körüláramlása (Forrás: Internet)

A leválási pont előtti felületszakaszon sűrűlő erő ébred, amelynek eredője szintén az áramlás irányába mutat, ez a sűrűlő ellenállás. Ennek az ellenállásnak a nagyságát, ezen belül és a sűrűlő- és alakellenállás arányát nagymértékben befolyásolja a leválás helye. A leválás helyét pedig a test alakja, valamint az áramlás lamináris vagy turbulens jellege, azaz a Reynolds-szám határozza meg. Az x méretű szemcse Reynolds-számra vonatkozó összefüggés a következőképpen írható fel:

$$Re = \frac{\rho_k * v * x}{\eta}$$

ahol ρ_k a közeg sűrűsége, v az áramlási sebesség, η pedig a közeg dinamikai viszkozitása. Az éles határvonalakkal rendelkező testek esetén az ellenállás nagy része a test alakjából adódik, ezért Reynolds-számra érzéketlen testeknek nevezik őket. Az áramvonalas, görbe felületű testek esetén az ellenállás mértéke a felületen ébredő sűrűlő ellenállástól, azaz a Reynolds-számtól is függ, ezért ezeket a testeket Reynolds-számra érzékeny testeknek nevezik. Egy fluidáramba helyezett szemcsére ható ellenálló erő egyrészt a test felületén fellépő sűrűlő erőkől adódik, mely a τ csúszató feszültség ismeretében kiszámítható. Az ellenálló erő másik része a 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 integrál eddig csak newtoni folyadék és gömbszemcsére határozták meg. Az integrálást elvégezve:

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

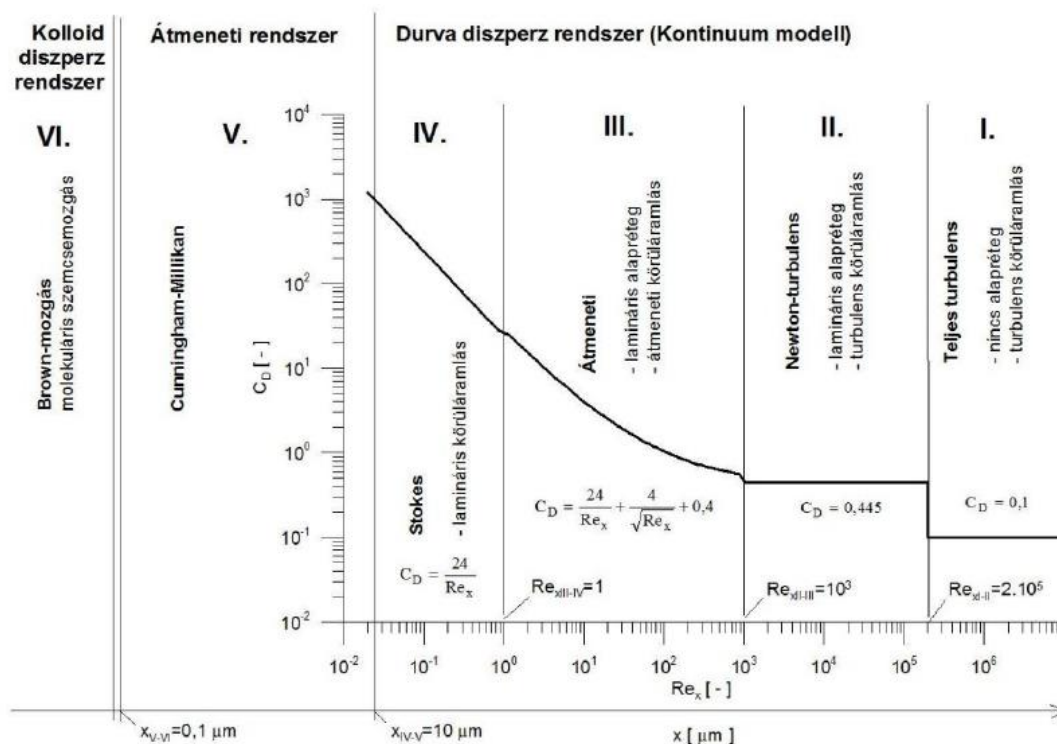
ahol x a szemcseátmérő, μ a folyadék abszolút viszkozitása és w_0 a szemcse relatív sebessége.

Állandósult relatív áramlásban lévő newtoni folyadékba helyezett test F_E ellenállását általában az alábbi módon fejezik ki:

$$F_E = C_E * A_s * \frac{\rho_k}{2} * w_0 w_0$$

ahol A_s a testnek az áramlás irányára merőlegesen vett legnagyobb keresztmetszete, C_E az ellenállás-tényező és $w_0 w_0$ a szemcsesebesség. Az ellenállás-tényező fenti egyenletből, a w_0 mérésével, a szemcse és a közeg fizikai paramétereinek (szemcseméret, sűrűségek) és a folyási tulajdonságok ismeretében kísérletileg lehet meghatározni.

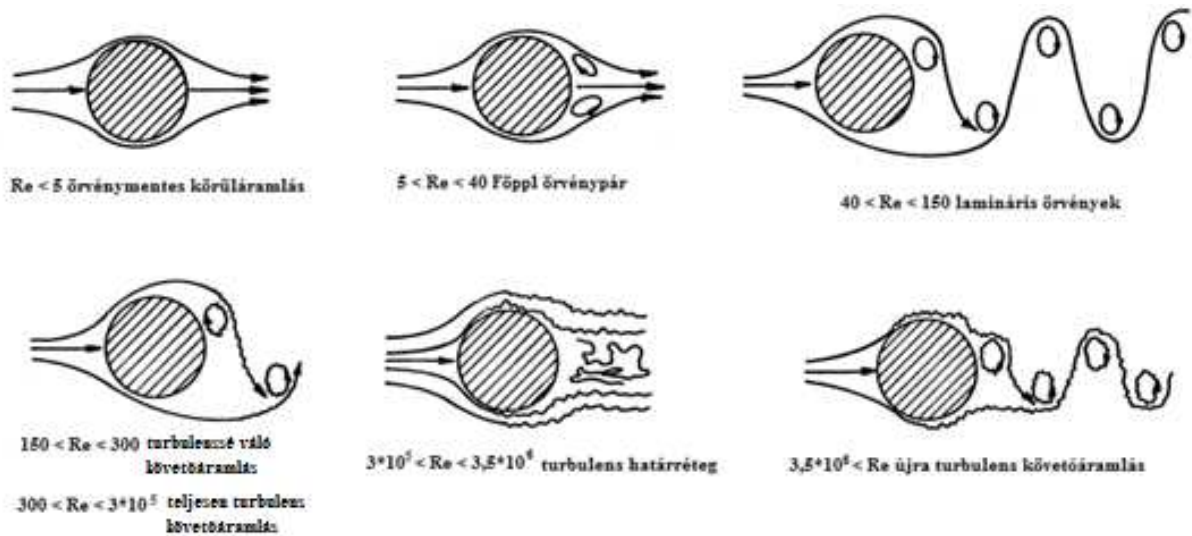
Newtoni viselkedésű közeget, egyenes vonalú áramlást, geometriailag hasonló szemcséket, rögzített relatív áramlasképet, newtoni viselkedésű és inkompresszibilis folyadékot feltételezve a C_E ellenállás-tényező már csak a Reynolds-szám függvénye, így 6 darab áramlási tartományt különböztetünk meg a Reynolds-szám függvényében. A különböző szakirodalmak más-más Reynolds-számoknál állapítják meg a tartományhatárokat, ezért a különböző ábrákon szereplő értékek eltérőek lehetnek. A Turbulens áramlás esetén a turbulencia-mértéke is befolyásolja az ellenállást (2. ábra). (Tarján, 1997)



2. ábra: Newtoni közegben süllyedő, gömb alakú szemcse ellenállás tényező diagramja, a szemcseméret és Reynolds-szám függvényében (Faitli, 2015)

Körülbelül $0,1 \mu\text{m}$ az a szemcseméret határ, amelynél kisebb szemcsék esetén a szemcsék egymással ütköznek és létrejön a Brown-mozgás. Ezért tekintjük a $0,1 \mu\text{m}$ szemcseméretet a durva diszperz- és a kolloid diszperz rendszer közötti határnak. Durva diszperz rendszerekkel a mechanikai eljárás technika, kolloid diszperz rendszerekkel a kolloidkémia foglalkozik. A $0,1\text{-}10 \mu\text{m}$ -es átmeneti szemcseméret tartományon a szemcsemozgásra mindkét rendszer hatásai érvényesülnek. (Faitli, 2015)

A Stokes-tartományban ($Re < 0,1$) használt ellenállási törvény a tehetetlenségi erők elhanyagolásával kapott eredmény, amelyet Stokes kis Reynolds-számú lamináris áramlásba helyezett gömb alakú szemcse vizsgálatával kapott, a tömegerők elhanyagolásával. Ebben a tartományban nem jön létre határréteg-leválás és az ebből adódó alakellenállás. A $5 < Re < 40$ szakaszon, Föppl féle stacionárius örvénypár keletkezik, $40 < Re < 90$ tartományban ezek az örvények megnyúlnak, instabilak lesznek. Tritton megfigyelései alapján $90 < Re < 150$ értéknél kezdődik meg az örvény leválás. Körülbelül $Re = 150$ értékig a leváló örvények laminárisak, periodicitásuk van és messze a szemcse mögé nyúlnak. $150 < Re < 300$ szakaszon leváló örvények laminárisból turbulenssé alakulnak, $300 < Re < 3 \cdot 10^5$ értéknél pedig az áramlás teljesen turbulens, ez az úgynevezett Kármán-Bénárd-féle örvénycső, más néven turbulens követőáramlás. A következő fontos váltás $10^5 < Re < 5 \cdot 10^5$ értékeknél következik be, ahol a lamináris határréteg a gömb felületéről való leválás előtt hirtelen turbulenssé válik, ezt a határt nevezzük Re_{kr} , azaz kritikus Reynolds-számnak is. Mivel a turbulens határréteg jobban tapad a felülethez, a leválási pont a felületen hátrébb tolódik, ezért az alakellenállás jelentősen lecsökken. A követő áramlás szűkebb, illetve rendezetlenebb. $3,5 \cdot 10^6 < Re$ tartományban újra létrejön a $300 < Re < 3 \cdot 10^5$ szakaszban ismertett turbulens követőáramlás, azonban a határréteg is turbulensé válik. (Lienhard, 1966). A körüláramlások jellegei a 3. ábrán láthatóak.



3. ábra: Gömbszemcse körüláramlása a Reynolds-szám függvényében (Lienhard, 1966)

Az ellenállás-tényező jó közelítéssel az ún. Kaskas-egyenlettel írható fel:

$$C_E = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt{Re}} + 0,4$$

Stokes tartományban használható a Stokes-egyenlet, mely közelíti a Kaskas-egyenletet:

$$C_E = \frac{24}{Re}$$

Az átmeneti tartományon a számítás iteratív, mivel az ellenállási tényező közvetlenül nem számítható ki a Kaskas-egyenletből.

Wilson és szerzőtársai egy olyan számítási módszert dolgoztak ki, mellyel az iterálás megkerülhető és a többi tartományon is leegyszerűsíthetőek a számítások. Először is az áramlás három új jellemzőit kell kiszámítani, melyeket a csőáramlás leírására használt modellek alapján vezettek be. A közepes nyírófeszültséget:

$$\bar{\tau} = \frac{(\rho_s - \rho_f) * g * X}{6}$$

A közepes felületi nyírófeszültséget a gömb alakú szemcse teljes felületére kell vonatkoztatni. A nyírási sebesség:

$$v^* = \sqrt{\frac{\bar{\tau}}{\rho_f}}$$

A feszültség és a sebesség ismeretében definiálható egy új Reynolds-szám, a nyírási Reynolds-szám:

$$Re^* = \frac{\rho_f * V^* * X}{\mu_f}$$

A fenti összefüggések alapján kiszámítható az ellenállási tényező:

$$C_D = 8 * \left(\frac{v^*}{v_0}\right)^2$$

ahol v_0 a szemcse süllyedési végsebessége. A számítási módszerrel a nyírási Reynolds-szám egyből kiszámítható, így a körüláramlás jellege is megállapítható. Az I. teljes turbulens szakaszban az $Re^* > 22361$, II. Newton turbulens tartományban $259,4 < Re^* < 22361$, a III. átmeneti tartományon $10 < Re^* < 259,4$, míg a III. B szakaszban $\sqrt{3} < Re^* < 10$ tartományra esik. A IV. Stokes tartományon $\sqrt{3} > Re^*$, ez alatt az érték alatt már nem beszélhetünk alsó nyírási Reynolds-szám határról, 10 μm szemcseméret alatt a Cunningham - Millikan korrekciót kell alkalmazni. (Faitli, 2015)

Ha a fluidumban a gömb alakú szemcse forog az áramlásra merőleges valamilyen tengely körül, akkor a forgástengelyre és a rááramlási irányra merőlegesen F_D dinamikus felhajtóerő hat, ezáltal az F_E ellenállás megnövekedik. A gyakorlatban általában szabálytalan alakú szemcsék körüláramlása történik. Ebből adódik egy F_D dinamikus felhajtóerő, mely a rááramlás irányához képest aszimmetrikus nyomáseloszlásból keletkezik. Ez a következő egyenlettel fejezhető ki:

$$F_E = C_E * A_s * \rho_f * \frac{w^2}{2}$$

A C_E ellenállás-tényező a Reynolds-számon kívül függ a szemcse alakjától, illetve a rááramlás irányától is függ, ezért általában ismeretlen. Ha a szemcse és a rááramlás iránya szimmetrikus, akkor nem ébred F_D erő. Szabálytalan alakú szemcsékre az $F = F_E + F_D$ eredő erőn kívül forgatónyomaték is hat, melyet forgás esetén szintén le kell győzni. További fontos szemcsére ható erő a felhajtóerő, mely felírható:

$$F_A = -V_s * \rho_f * a$$

Stacionárius áramlásba helyezett, instacionárius mozgású szemcsékre hat egy F_t tehetetlenségi erő:

$$F_t = -V_s * \rho_s * \dot{v}_s$$

Instacionárius mozgás esetén egy járulékos F_j inerciaerőt is figyelembe kell venni. F_j abból ered, hogy nemcsak a szemcse tömegét kell gyorsítani az áramlásnak, hanem a szemcsével együtt mozgó fluidum tömegét is, mely a szemcsetömeg j -ed részével veszik számításba:

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

Az F_j erőt csak valódi folyadék mozgásokor kell figyelembe venni, értéke gömb esetén $j = 0,5$, hengernél pedig $j = 1$ (Tarján, 1997)

2.2. Süllyedési végsebesség

Szemcsék egyenes vonalú stacionárius mozgása a tömegerő, a felhajtóerő és az ellenállás hatására történik. Stacionárius mozgás esetén a szemcse gyorsulása zérus $\dot{v}_s = 0$ és a folyadékgyorsulás $v_f = 0$, ezért dinamikus felhajtóerő, tehetetlenségi erő és járulékos erő nem lép fel. Gravitációs erőterben egy gömb szemcsére a 4. ábrán látható erők hatnak.

- súlyerő:

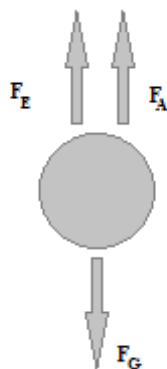
$$F_g = \rho_s * \frac{x^3 * \pi}{6} * g$$

- felhajtóerő:

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

- ellenállás:

$$F_E = C_E * \frac{\rho_f}{2} * \frac{x^2 * \pi}{4} * w_0 w_0$$



4. ábra: A szemcsére ható erők gravitációs erőterben. (szerző saját szerkesztése)

Stacionárius mozgásnál az erők egyensúlya:

$$F_G + F_A + F_E = 0$$

A fenti négy egyenletből kifejezhető a szemcsesebességre vonatkozó általános egyenlet:

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

$w_0 w_0$ – ról elmondható, hogy $\rho_s < \rho_f$ esetén a nehézségi gyorsulással azonos irányú, $\rho_s > \rho_f$ sűrűségeknel pedig ellentétes irányú. A relatív sebesség vektor nagysága pedig:

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

A gömb alakú szemcse süllyedésénél a gravitációs erőter egyre gyorsítja a szemcsét, ezáltal nagyobb közegellenállási erő is hat rá. Egy ponton a mozgató erő és a közegellenállási erő kiegyenlítődik, és a szemcse eléri a végsebességét. Ezt a végsebességet nevezzük süllyedési végsebességnek. Ha a szemcse sűrűsége nagyobb a közeg sűrűségénél, akkor a süllyedési végsebesség:

$$v_0 = \sqrt{\frac{4 * g * x}{3 * C_E} * \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f}}$$

A süllyedési végsebesség számítása különböző körüláramlási tartományokban eltérő. A számítás Stokes tartományban: ($C_E = \frac{24}{Re}$)

$$v_0 = \frac{g * x^2 * \rho_f}{18 * \mu} * \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f}$$

Newton-tartományban ($C_E = 0,44$) pedig:

$$v_0 = \sqrt{3 * g * x * \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f}}$$

Dolgozatom 2. pontjában ismertettem Wilson és szerzőtársai által bevezetett új V^* , Re^* , paraméterek alapján a számítások leegyszerűsíthetők. Az Re^* ismeretében a körüláramlás jellege rögtön megállapítható és a süllyedési végsebesség rögtön számítható. Az új számítási módszert az 5. ábra mutatja. A relatív süllyedési végsebesség az I. teljesen turbulens tartományon:

$$\left(\frac{v_0}{V^*}\right) = \sqrt{\frac{8}{C_D}} = 8,944$$

II. Newton turbulens tartományon:

$$\left(\frac{v_0}{V^*}\right) = 4,24$$

A III. átmeneti tartomány számítás szempontjából a legbonyolultabb tartomány, a számítást két részre kell bontani. A relatív süllyedési végsebességét a következőképpen kapjuk:

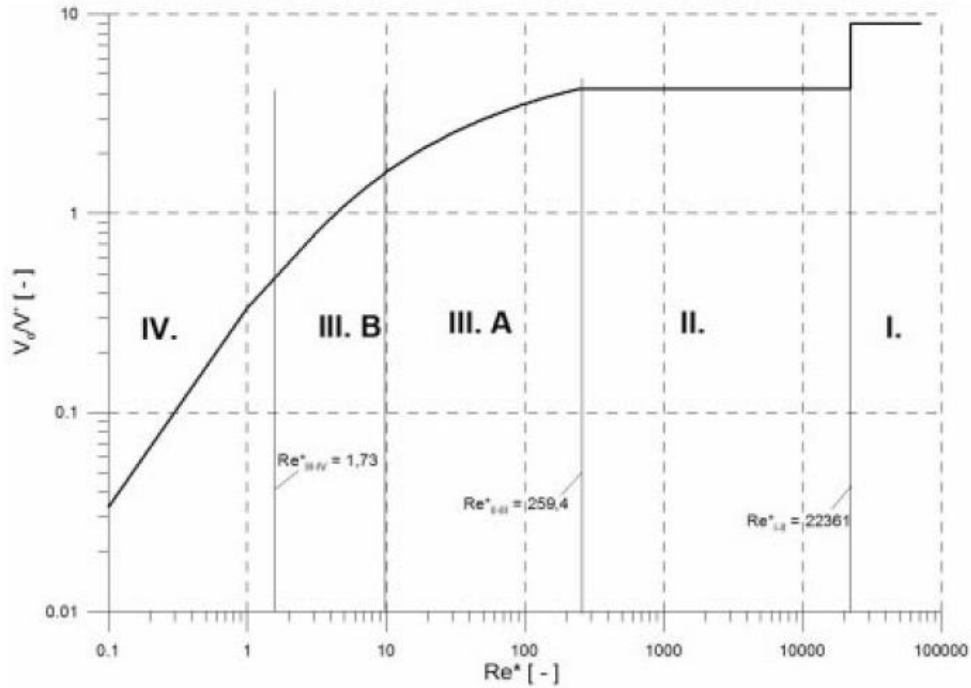
$$\log\left(\frac{v_0}{V^*}\right) = 0,2069 + 0,5 * \log\left(\frac{Re^*}{10}\right) - 0,158 * \left[\log\left(\frac{Re^*}{10}\right)\right]^{1,72}$$

III. B tartományon:

$$\left(\frac{v_0}{V^*}\right) = \frac{Re^*}{3 * [1 + 0,08 * (Re^*)^{1,2}]} + \frac{2,8}{1 + 3 * 10^4 * (Re^*)^{-3,2}}$$

IV. Stokes tartományon pedig:

$$\left(\frac{v_0}{V^*}\right) = \frac{Re^*}{3}$$



5. ábra: A süllyedési végsebesség számítása a Wilson et al. módszerrel (Faitli, 2015)

A süllyedési végsebesség általános meghatározására két dimenzió nélküli mennyiség került bevezetésre:

- Archimedes-szám:

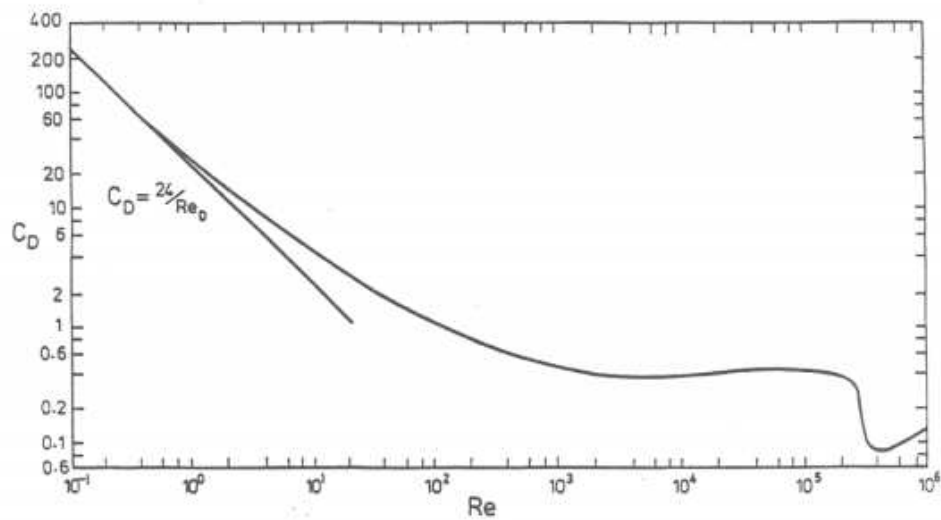
$$Ar = \frac{g * x^3 * \rho_f^2}{\mu^2} * \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f}$$

- Ljaszenko-szám:

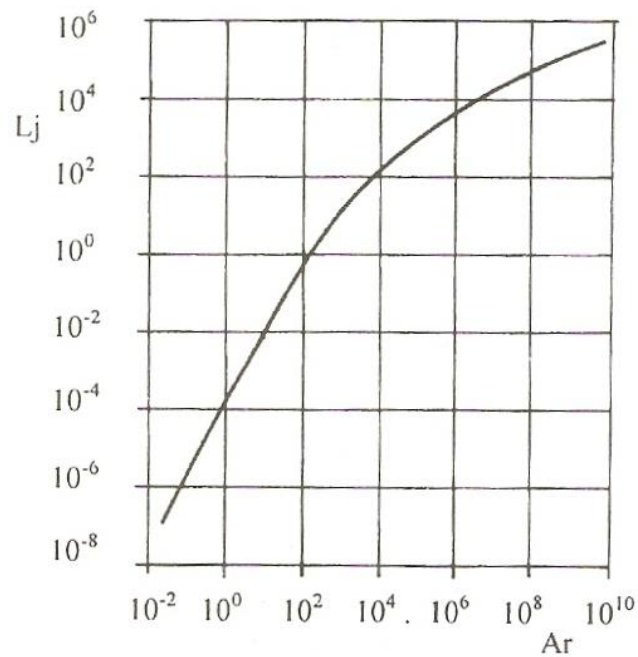
$$Lj = \frac{v_0^3 * \rho_f}{\mu * g} * \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f}$$

Gömb alakú szemcse esetén a C_E ellenállástényező csak a Reynolds-szám függvénye, ezért az Ar és a Lj is csak a Reynolds-szám függvénye, ezáltal kifejezhető a $Lj = f(Ar)$ összefüggés. Ha kísérlet, vagy számítás alapján ismerjük a $C_E = C_E(Re_x)$ összefüggést (6. ábra), akkor a $Lj = f(Ar)$ diagram (7. ábra) megszerkeszthető az előző két egyenlet felhasználásával. a $Lj = f(Ar)$ függvény ismeretében, illetve az anyag és a közeg fizikai

tulajdonságainak ismeretében (x , ρ_s , ρ_f , μ) a v_0 süllyedési sebesség meghatározható. (Tarján, 1997)



6. ábra: Gömbszemcse ellenállástényezője a Reynolds-szám függvényében (Juniper, 2015)



7. ábra: Gömbszemcse $L_j = f(Ar)$ függvény diagramja (Tarján, 1997)

2.3. Hátráltatott szemcsemozgás

Korábbiakban az egyetlen szemcséből álló rendszer mozgását vizsgáltuk, azonban egy szemcsehalmaz tulajdonságai ettől jóval eltérnek. Az egy szemcséből álló rendszerre

úgy tekintünk, mintha a szemcse v_0 sebességgel mozogna nyugvó közegben. Ezzel ellentétben a szemcsehalmaz mozgása esetén a süllyedő szemcsék által kiszorított és felfelé áramló közegben valósul meg a szemcsemozgás, v'_0 sebességgel. Az ellenáram hatása kifejezhető a két sebesség hányadosával:

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

A szemcsehalmazban mozgása során az egyes szemcsékre egy második jelenség is hatással van, a megnövekedett impulzustranszport, az úgynevezett csoport-turbulencia, amely az alábbi összefüggéssel írható le:

$$\varphi_H = \frac{V_{0H}}{v'_0}$$

A csoport-turbulencia attól jön létre, hogy a szemcsék közti csatornákban a sebességeloszlás térben és időben jelentősen eltér. Az impulzuscseré nagysága függ a szemcsemérettől és a szemcsék közötti távolságtól is. A szemcsék mozgását hátráltató csoport-hátráltatási tényezőt a két hatás összevonásával kapjuk (8. ábra):

$$\varphi_H = \varphi_E * \varphi_T = \frac{V_{0H}}{v'_0}$$

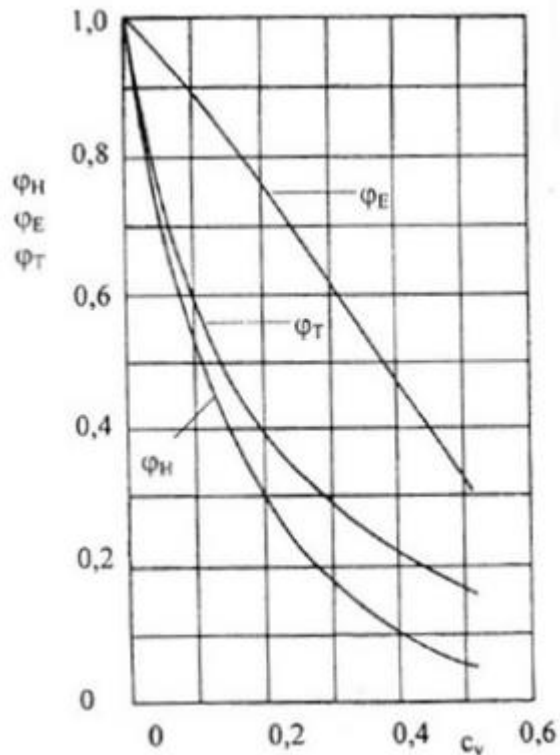
Monodiszperz rendszerek esetén a φ_E és a φ_T tényezők csak a koncentrációtól függenek:

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

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

A két egyenlet összevonásával megkapjuk a csoport ellenállási tényezőt:

$$\varphi_H = \frac{V_{0H}}{v'_0} = \frac{1 - c_v}{\left[1 + \frac{c_v}{(1 - c_v)^2}\right] * \left[1 + \frac{1,2}{\sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{12 * c_v}\right)^2} - \frac{1}{2}}\right]}$$

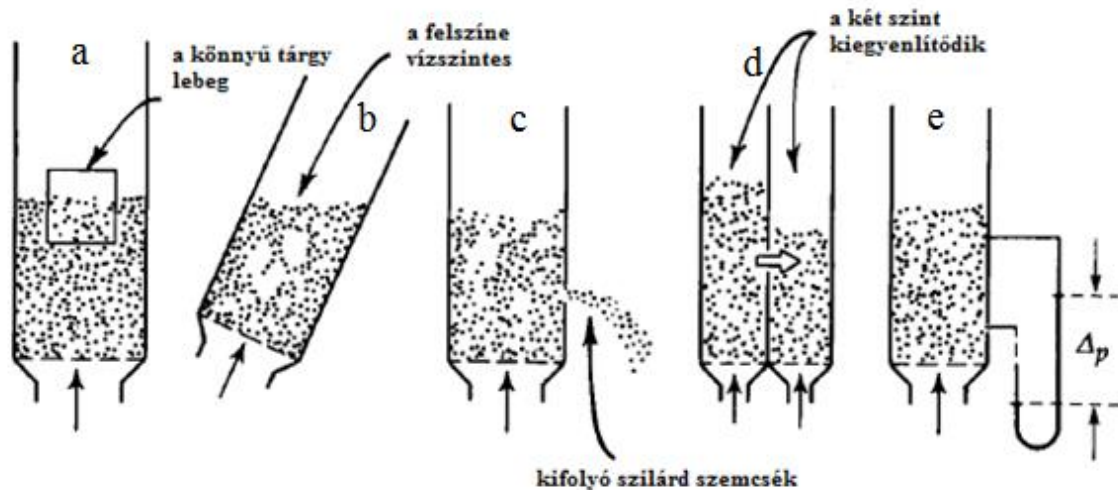


8. ábra: A hátrátatási tényezők a koncentráció függvényében (Tarján, 1997)

2.4. Fluidizáció

Fluidizációról akkor beszélünk, ha egy finomszemcsés közegbe, alulról fluidom, azaz gázt, vagy folyadékot – befúvatunk egy álfenéken keresztül. A beáramló fluidom a szemcsehalmaz ε pórusain keresztül átszivárog. Ha megfelelő mennyiségű fluidomot áramoltatunk a szemcsés közegbe, akkor ez az áramlás ellensúlyozza a szemcsékre ható gravitációs erőt. A halmaz pórusai kitágulnak ε_f értékre. Ebben az állapotban a szemcseoszlop nagy viszkozitású forrásban lévő folyadék tulajdonságait mutatja. Ilyenkor a rendszer tulajdonságai: (9. ábra)

- egy könnyű tárgyat az ágyba nyomva, majd felengedve azt az ágy felszínén fog lebegni (a)
- ha az edényt megdöntjük, az ágy felszíne vízszintes marad (b)
- az edény falán lévő lyukon a szemcsék kifolynak (c)
- ha két ágyat csatlakoztatunk egymáshoz, akkor a szintjük kiegyenlítődik (d)
- a nyomáskülönbség az ágy bármely két pontja között közelítőleg állandó (e)



9. ábra: A fluidágy tulajdonságai (Kunii és Levenspeil, 1969)

Legelterjedtebb alkalmazásai:

- szintézisgáz előállítása biomasszából
- víztisztításnál alkalmazott fluidágyas bioreaktor
- petrolkémiai használt fluid katalitikus krakkolás (FCC)
- élelmiszeripari fluidizációs szárító
- energiaipari fluidizációs kazánok (Kállai és szerzőtársai, 2013)

Eljárástechnikai alkalmazásai:

- alumínium-oxid kalcinálása
- ércek pörkölése
- vasércek redukciója
- Cementiparban klinker kalcinálás
- szárítás
- szemcsék bevonása
- hőcserélés és füstgáztisztítás
- hőkezelés (Basu, 2006)
- keverés, homogenizálás (Tarján, 2003)

Ha a szemcseágyba alulról alacsony sebességű fluidumot – gázt, vagy folyadékot – befúvatunk, vagy befecskendezünk, akkor a fluidum éppen, hogy átszivárog a szemcsék között. Ezt az állapotot nevezzük nyugó ágy (a).

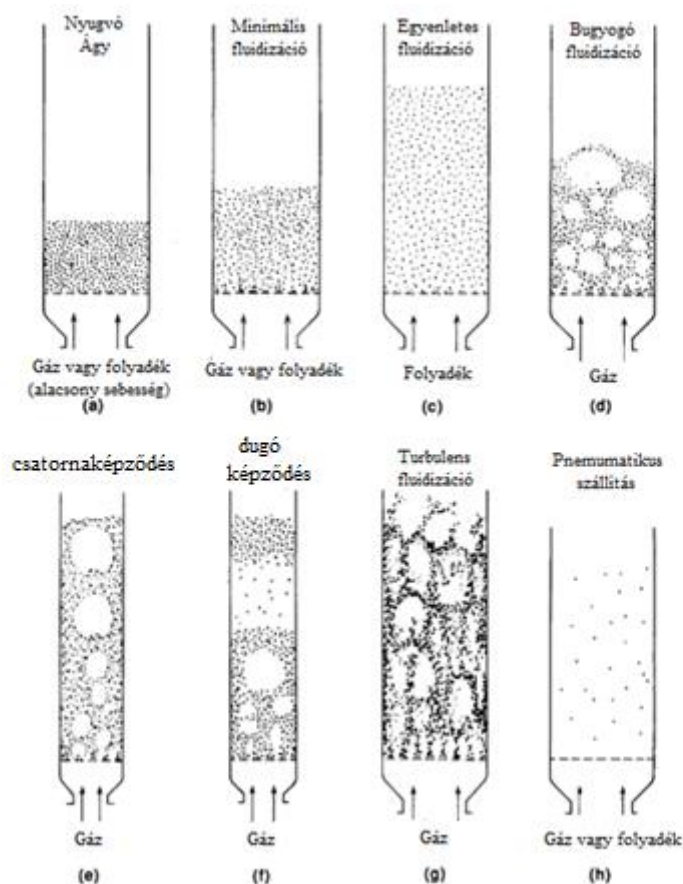
Magasabb áramlási sebességnél, egy bizonyos pontban elérhető, hogy minden szemcsét szuszpendáljon a feláramló gáz, vagy folyadék. A beáramló fluidum a szemcsék kapillárisait kitágítja, felduzzasztja levegővel és rajtuk keresztül laminárisan áramlik ki. Ebben a pontban a szemcsék és a fluidum közt lévő súrlódási erő kiegyenlíti a szemcsék tömegét, a vertikális nyomóerő a szomszédos szemcsék közt megszűnik, és a nyomásveszteség az ágy bármely pontjában egyenlő az ebben a pontban lévő fluidum és szilárd részecskék tömegével. Ezt az állapotot nevezzük minimális fluidizációnak (b).

Folyadék-szilárd rendszerek esetén, ha az áramlási sebességet a minimális fluidizációs szint fölé növeljük, akkor az ágy egyenletesen megemelkedik. Az ágy többnyire stabilan, homogéne viselkedik. Ezt az állapotot egyenletes fluidizációnak (c). Hasonló eredmények gáz-szilárd rendszerben, csak nagy sűrűségű gáz, illetve kis sűrűségű szemcsék kombinációjával érhető el. a jelenséget homogén örvényrétegnek is nevezzük.

Elmondhatjuk, hogy a gáz-szilárd rendszerek másként viselkednek a folyadék-szilárd rendszerektől. A gáz sebességét, a minimális fluidizációs szint fölé növelve, a rendszer inhomogénné válik. Légbuborékok képződnek, melyek a szemcséket a levegőbe emelik. Az ágy magasság nem emelkedik jelentősen a nyugvó ágy magasságához képest. Ezt a jelenséget bugyogó fluidizációnak nevezzük (d).

A buborékok az ágy alján keletkeznek. A buborékok egyesülhetnek egymással csatornákat képezve (e). Ilyenkor a szemcsék a gázbuborék mellett ülepednek. Kellően keskeny, illetve magas gáz-szilárd ágyak esetén, a csatornák kitölthetik az egész tartályt. Durvább szemcsék esetén, a fluidágy egy részét a levegő a buborékok felé emeli, mint egy dugattyút. A durva szemcsék egy része leülepedik. A leülepedés pillanatában újabb dugattyú képződik, és ez a folyamat ismétlődik (f). A dugókat, csatornákat, buborékokat összességében inhomogén örvényrétegnek nevezzük.

Amikor finom szemcsés anyagot kellően magas áramlási sebességgel fluidizálunk, akkor a szemcsék sebessége meghaladja a saját süllyedési végsebességüket. Ebben az esetben az ágy felszíne megszűnik, és buborékok helyett turbulens mozgású szemcsecsoportok és gázüregek figyelhetők meg, különböző alakban és méretben. Ezt turbulens fluidizációnak nevezzük (g). Az áramlási sebesség további növelésével a szemcséket elsodorja, szállítja a közeg. Ezt az állapotot nevezzük pneumatikus szállításnak (h). (Kunii és Levenspeil 1969)



10. ábra: A fluidizáció lépcsői (Kunii és Levenspeil 1969)

2.4.1. Történelmi áttekintés

A fluidizációt legkorábban Brötz alkalmazta, az 1900-as évek elején. A szennyvíz tisztítására használta, a vizet homokszűrőn keresztül vezette át. A szilárd anyag a homokrétegen kicsapódott és egy idő után az ágy elveszítette az áteresztő képességét. A homokágyat regenerálni kellett, ezt ellentétes irányú öblítéssel valósította meg. A homokágy bizonyos mértékben fellazult és a lerakódott szilárd anyag így kimosható. Brötz víztisztító rendszere jó példa a folyadékkal történő fluidizációra.

Az első iparban használt berendezés a Winkler-féle gázgenerátor volt. A készüléket vízgőz és generátorgáz előállítására használták. Egy tartályba finoman elosztott barnaszénen tápláltak, folyamatos üzemben. A kívánt gázminőségtől függően levegőt, vagy vízgőz és levegő elegyét fűvatták a tartályba, így a reakció végbement. A hamu a kilépő csonkon keresztül lefelé halad.

A fluidizációs technológiát használó berendezés nagy ipari mértékben először az Egyesült Államokban létesült, 1943-ban. Az eljárást először Murphree és munkatársai

ismertették. A megelőző kutatásokat már korábban megkezdték a Massachusetts Institute of Technology-ban, és azok alapján építettek nagyméretű kísérleti üzemet. A katalitikus hőbontó készülék két tartályból állt, a reaktorból és katalizátorgenerálóból. Az edényeket katalizátorszállító cső kötötte össze. A katalizátort szénnel borították be, majd levegővel a regenerátorba szállították és a szenet elégették. Egy túlfolyócsövön keresztül a reaktivált katalizátor távozott a regenerátorból és onnan olajgőz szállította a reaktorba. A teljes folyamatosság eléréséhez két fluidizált ágyat is alkalmaztak, az egyik a regenerátorban található sűrű fázisú ágy, a másik pedig a szállító vezetékben lévő híg fluidizált fázis. A fluid katalitikus hőbontó sikere megalapozta a fluidizációs technológia jövőjét. Jelentős kutatómunka indult el a témával kapcsolatban és hamarosan nagymennyiségű ismeretanyag vált publikussá. (Leva, 1964)

2.4.2. A Fluidizációt befolyásoló tényezők

A fluidizáció minőségének mérésére Morse és Ballou tett közelítést. Egy mérőeszköz, úgynevezett kapacitóméter segítségével megkísérelték megadni a fluidizált ágy sűrűségét. Az eszköz feszültségeket mér a rendszer dielektromos sajátosságai alapján. A mérés kis kondenzátorlemezekkel történik, ezek behelyezhetőek a fluidizáló edénybe és ott, a fluidizáció jelentős befolyásolása nélkül helyi méréseket tudnak végezni. A halmazsűrűség változását meghatározott időközönként rögzítették. Az adatokból meghatározták az egyenetlenségi mutatót, majd ezt egyenlővé tették az átlagos eltérési százalék és a frekvencia hányadosával. A fluidizáció minősége és az egyenetlenségi index közötti összefüggést a következőképpen állapították meg: 0-1,0 tartományon az egyenetlenség mértéke nagy, 1,0 – 5,0 között közepes, 5,0-6,0 között pedig gyenge, dugókkal és csatornákkal. (Leva, 1964)

2.4.2.1 Szemcseméret-eloszlás

Két eltérő szemcseméret-eloszlású fém-oxid mintát, azonos körülmények között (ágymagasság, edényátmérő és gázsebesség) fluidizáltak. Az egyik széles, míg a másik szűk szemcseméret-eloszlású volt. A szűk frakciót a szélesből állították elő, szitálással. A szitálás miatt az x_{50} közepes szemcseátmérő 0,185mm-ről 0,245mm-re nőtt. Ez azonban nem magyarázza a Morse és Ballou által tapasztalt, nagymértékű egyenetlenségi index növekedést, mely 3,8-ról 32-re nőtt. (Leva, 1964)

2.4.2.2 Áramlási sebesség

Morse és Ballou a széles frakciót különböző sebességgel fluidizálta, az eredményeket az 1. táblázat tartalmazza:

1. táblázat: Az áramlási sebesség és az egyenletességi index kapcsolata (Morse és Ballou 1951, Leva 1964)

Áramlási sebesség [m/s]	Egyenletességi index
0,08	2,5
0,15	7,6
0,27	8,9

A 0,08 m/s-os áramlási sebesség csak kevéssel nagyobb, mint a minimális fluidizációs sebesség (v_{mf}). A sebességet a kétszeresére növelve kis sebességtartományban lényegesen gyorsabban romlott a fluidizáció, mintha nagyobb sebességtartományban emeltük volna kétszeresére az áramlást. Az a következtetés vonható le, hogyha a fluidizáció viszonylag durva szemcséjű anyaggal megy végbe, akkor a minimális fluidizációhoz szükséges gázmennyiséget (Q_{mf}), tovább növelve a többletgáz az ágyon nem homogén fázisként, hanem inkább dugó és buborékként halad keresztül. Finom szemcsék esetén, a többletgáz egyenletesebben és nagyobb gázsebesség-tartományon keresztül lazul fel. (Leva, 1964)

2.4.2.3 Ágymagasság hatása

A tervezési folyamatban az egyik legfontosabb paraméter az ágymagasság hatása. A kapacitásmérés vizsgálatok itt is nagy segítséget jelenthetnek. A korábban ismertetett fém-oxid frakciók viselkedését, különböző ágymagasságokkal, 15,24 cm magasságban mérte Morse és Ballou. A méréseik adatait a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat: Az egyenletességi index 15,24 cm magasságban (Morse és Ballou 1951, Leva 1964)

Anyag	Ágymagasság [cm]			
	20,32	40,64	71,12	101,6
Széles frakció	Egyenletességi index			
	2,3	2,2	1,7	1,2
Szűk frakció	3,7	3,7	2,5	3,2

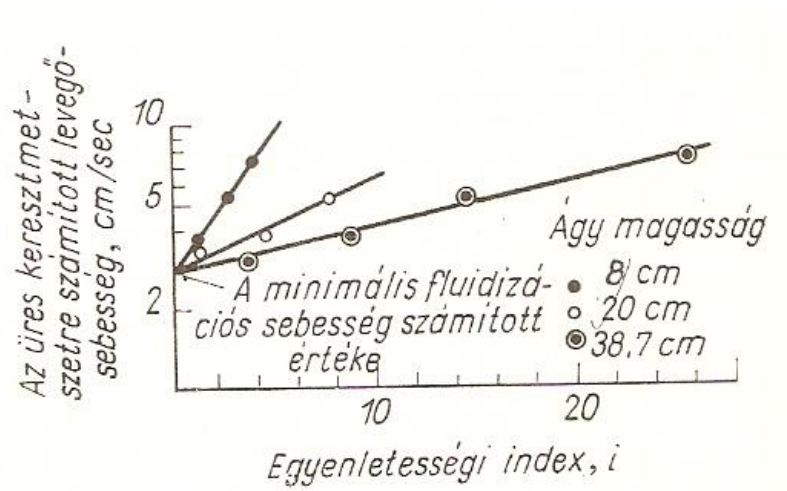
15,24 cm magasságban a szűk frakció egyenletességi indexét az ágymagasság jelentősen nem befolyásolta. A széles frakció esetében azonban jelentős az ágymagasság növelése jelentős javulást okozott.

Az ágymagasságot 101,6 cm-re növelve is megmérték az egész töltetre vonatkozó átlagos adatokat és egy általános működési jelzőszámmal jellemezték a rendszert. Méréseik a 3. táblázatban találhatóak.

3. táblázat: Az általános működési jelzőszám és az ágymagasság kapcsolata (Morse és Ballou 1951, Leva 1964)

Anyag	Ágymagasság [cm]			
	20,32	40,64	71,12	101,6
Széles frakció	Általános működési jelzőszám			
	2,3	2,2	1,7	1,2
Szűk frakció	3,7	3,7	2,5	3,2

A kísérletekből levonható, hogy mindkét frakció esetén rosszabbodott a fluidizációs állapot. Az eredetileg jobban fluidizált durva szemcséket is tartalmazó frakcióban azonban a rosszabbodás mértéke kisebb volt, mint a szűk frakció esetén. Morse és Ballou kondenzátorát alkalmazta Martin és Andrieus is. Egy 100 mm belső átmérőjű fluidizációs edénybe porózus bronztárcsán keresztül levegőt vezettek be. Vizsgálták az egyenletességi index és a levegősebesség közötti összefüggést, mindezt különböző ágy magasságokkal (Leva, 1964). Eredményeiket a 11. ábra tartalmazza.



11. ábra: Az egyenletességi index és a légsebesség kapcsolata 8, 20 és 38,7 cm ágy magasságoknál (Martin és Andrieus, 1956, Leva, 1964)

Kísérleteiből a következő következtetéseket vonták le:

- Az egyenletességi mutató és az ágymagasság egyenesen arányos egymással.
- Az ágy bármely pontjában az egyenletességi mutató megegyezik.
- Az egyenletességi mutató és a teljes keresztmetszetre vonatkozó áramlási sebesség logaritmusai arányos egymással.

Reboux az ágy nyomásingadozását vizsgálta. Mérését úgy kivitelezte, hogy a fluidágyba helyezett egy sárgaréz csövet, mely nyomásrezgéseket továbbított egy nagyon vékony fém diafragmához. A diafragmával szemben egy másik, álló diafragmát helyezett és kondenzátorként kapcsolta. A nyomásváltozások okozta pulzálások szerint így változott a kondenzátor kapacitása. Megfigyelése alapján a nyomásingadozás az ágy felső felében sokkal jelentősebb volt, mint az alsó felében. A fal mentén kevésbé jelentős ingadozások jelentkeztek, mint középen. (Leva, 1964)

2.4.2.4 Magasság-átmérő arány hatása

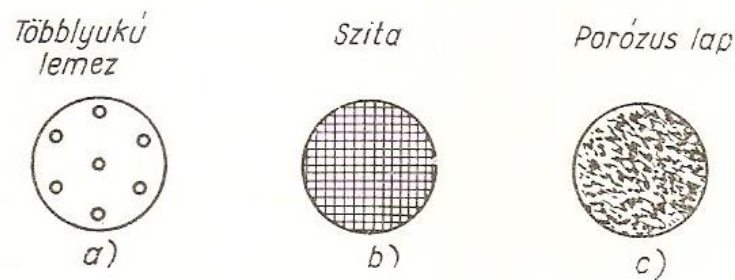
A fluidizáció minőségét nem csak az ágymagasság, hanem az ágymagasság és az átmérő aránya is befolyásolja. Shuster és Kisliak kísérleteztek a fluidizációs index és az L/D közötti összefüggésekkel. Kísérleteikhez 4,45 cm és 9,5 cm átmérőjű edényeket használtak. A következőket állapították meg:

- A fluidizáció minősége romlik az L/D növekedésével.
- A minőségi romlás mértéke a fellazulás mértékével nő.

- Ha $L / D < 1,0$, akkor az 50 és 100 %-os ágyfellazulási viszonyok közelednek egymáshoz.
- Azonos fellazulási százalékok mellett a keskeny ágyak jobban működnek, mint a nagyobb átmérőjűek. (Leva, 1964)

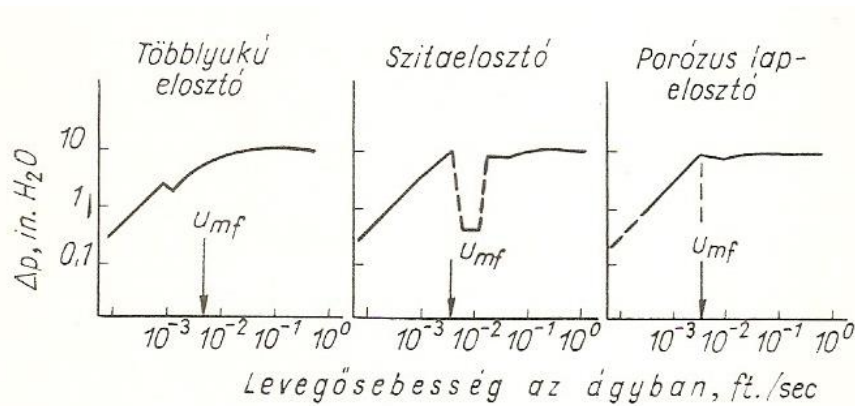
2.4.2.5 Fluidumelosztó kialakításának hatása

Gázzal fluidizált rendszerek esetén a fluidumelosztó hatását Groshe vizsgálta. Mérési módszerként röntgensugár-abszorpciót használt. Ennek a módszernek az előnye az, hogy nem kell idegen tárgyat az ágyba helyezni, ami zavarná a normális áramlási viszonyokat. Az eddigiekben ismertetett mérési módszerek közül ez a legjobb, mivel a mérés eredményeiből a sűrűség közvetlenül kiszámítható. Vizsgálatait három különböző elosztóval is elvégezte (12. ábra): többlyukú lemezzel, szitával, illetve porózus lappal.



12. ábra: A Grohse által használt áteresztő betétek (Grohse, 1955, Leva, 1964)

Belső átmérője mindnek 8,5 cm volt. A méréshez használt anyag 0 – 74 μm frakciójú szilíciumpor volt. A nyomáscsökkenés és levegősebesség diagramokat a 13. ábra tartalmazza.



13. ábra: A levegő áteresztő betét hatása a fluidizáció megindulására (Grohse, 1955, Leva, 1964)

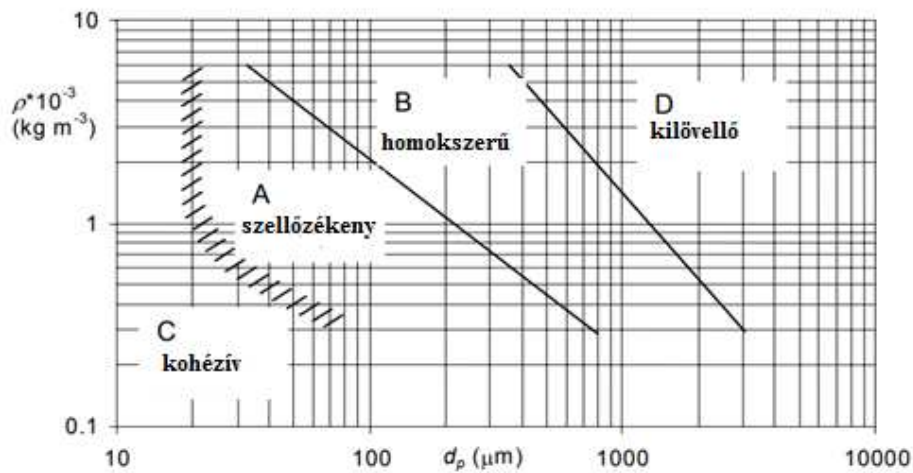
A többlyukú elosztó betét esetén a kezdeti fluidizáció pontja nem határozható meg pontosan. Ha a nyomáscsökkenés növekedése eléri az elméletileg szükséges értéket, akkor az a jelenség figyelhető meg, hogy az ágy alsó része nincs olyan mértékben fluidizálva, mint a felső része. Szitabetét használatakor valószínű a csatornaképződést. A csatornaképződést fokozhatja az, hogy a lyukak eltömődhetnek. Porózus lapot használva a kezdeti fluidizációs pont jól meghatározható, valamint a csatornaképződésre sem hajlamos az ágy. (Leva, 1964)

2.4.2.6 Szemcseméret

A szemcsék viselkedése a fluidizált ágyak esetén döntő többségében a szemcsemérettől és a sűrűségtől függ. Geldart megfigyelései alapján (1973, 1978), az anyagokat négy különböző kategóriába sorolta.

- A csoport: Kis szemcseméretű ($x < 30 \mu\text{m}$) és kis sűrűségű ($1,4\text{g/cm}^3$) anyagok tartoznak. Ezek az anyagok könnyen fluidizálhatók, egyenletes fluidizációval, kis áramlási sebességekkel, buborékok keletkezése nélkül. Magasabb áramlási sebességeknél, egy bizonyos pont fölött a minimum buborékképződési sebesség fölött buborékok keletkeznek.
- B csoport: Homokszerű anyagoknak is nevezik. Ebbe a csoportba tartozó szemcsék nagy része $150 \mu\text{m}$ és $500 \mu\text{m}$ között van és sűrűségük pedig $1,4$ től 4g/cm^3 sűrűségű. Az ilyen szemcsék esetén, amint a rendszer eléri a minimális fluidizációs sebességet, a többlet gáz buborékok formájában jelenik meg, ezek a buborékok a sebesség további növelésével jelentősen megnőhetnek. A tipikusan B csoporthoz tartozó anyagok az üveggolyók és a durva homok.
- C csoport: Kohéziós, vagy nagyon finom szemcsék. $30 \mu\text{m}$ -nél kisebb szemcseméretűek. Fluidizációjuk nagyon nehéz, mivel a szemcsék közötti erő relatíve nagy. Kis átmérőjű ágyakban csatornák alakulnak ki. A C csoportba olyan anyagok tartoznak, mint a talk, liszt, keményítő.
- D csoport: Inhomogén örvényréteg képződésre hajlamos anyagok, a szemcseméretük, vagy a sűrűségük nagy. Nehéz őket mély ágyakban fluidizálni. A B csoporttal ellentétben, ahogyan az áramlási sebesség nő, egy sugárban örvény képződik, ezzel az örvénnyel együtt az anyag kilövellhet. Ha a gázelosztás egyenetlen, akkor csatornák és dugók keletkezhetnek. A pörkölt ércek, pörkölt kávébab és ólomgolyók ilyen viselkedésű anyagok.

Geldart szemcsékre való csoportosítását könnyű alkalmazni. A 14. ábráról a szemcsesűrűség és a szemcseméret függvényében megállapítható, hogy milyen típusú fluidizáció várható. A diagram segítséget nyújt az ágy inhomogén örvényrétegeinek becslésére, akár olyan paraméterek is becsülhetők, mint a buborékok mérete, azok sebessége. (Geldart, 1973)



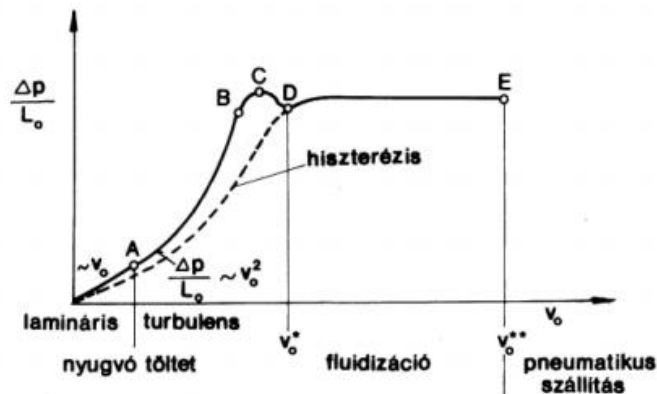
14. ábra: Geldart szemcsecsoportjai a szemcseméret és a sűrűség függvényében (Geldart, 1973)

2.4.2.7 Nyomásveszteség

A szemcseágyon a gáz ellenállással áramlik át, ez nyomásveszteséget okoz. A gáz áramlási útvonalai az anyagágy eltérő szemcsemérete, szemeloszlása és az ágyban való elrendezkedése miatt rendkívül bonyolult, ezért a nyomásesés vizsgálata csak jelentősen leegyszerűsített modellekkel lehetséges. A fluidum sebességétől függően négy jellegzetes állapotot tudunk megkülönböztetni (15. ábra). A fluidum sebességén a berendezés teljes keresztmetszetére vett sebességet értjük.

Az ágy nyomásesése először arányos a sebességgel, ez a lamináris szakasz, (A) pontig. A sebesség további növekedésével a nyomásesés már négyzetesen arányos (B) pontig. B pontban a nyomásesés eléri a töltet felhajtóerejét. Ekkor a szemcsék a legkisebb ellenállás irányába mozdulnak el. A sebesség növelésével tovább nő az ellenállás, azonban a (C) pontban az elrendeződés már erősebben hat az ellenállás mértékére, mint a sebesség növekedése. A (D) pontban a szemcsék még jobban elválnak egymástól és egymástól függetlenül lebegnek. Ahol kialakul ez az állapot, ezt nevezzük minimális fluidizációs

sebességnek. A sebesség további növekedésével a gázáram magával ragadja a szemcséket és a fluidizáció pneumatikus szállításba megy át. (Kállai és szerzőtársai, 2013)



15. ábra: A nyomásesés és a fluidizáció jellegének kapcsolata (Kállai és szerzőtársai, 2013)

Az első modellt a nyomásvesztésre Darcy alkotta meg, melyet később Kozeny és Carman tovább fejlesztett. A modellhez a szemcseágy pórustérfogatát nagyszámú, azonos átmérőjű, párhuzamos csatornákra osztották, hosszuk a hidraulika sugár. A modell a csőköteges vagy kapilláris modell nevet kapta. Az ágy fajlagos nyomásvesztése a következő tényezők függvénye:

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

ahol h az ágy magassága, v_{fe} a közepes áramlási sebesség a pórusokban, d_h a pórusrendszer közepes hidraulikai átmérője és μ a közeg abszolút viszkozitása. Az áramlási teret nem jellemezi teljesen az ε porozitás. Általában a nagyobb szemcsés anyagok esetén kevés, de nagyobb pórusok keletkeznek. Kisebb szemcsék esetén pedig több kis pórus alakul ki. Ez a fenti összefüggésben szereplő d_h közepes hidraulikai átmérő. Ez a csőáramlásból vett jellemző és az ε porozitás együttesen is csak nagyon közelítő módon írja le a valóságos áramlástanai viszonyokat.

A d_h közepes hidraulikai átmérő meghatározásával először Blake foglalkozott, majd modelljét Kozeny fejlesztette tovább. Kiindulási alapjuk az volt, hogy a szemcsék közti pórustérfogat $V_p = V - V_s$ meghatározott számú áramlási csatornára osztható. Az így alkotott pórusmodell áramlástanilag jellemezhető. Ahol a csatorna hossza az anyagréteg magasságával egyenlő, a csatorna átmérője pedig a hidraulikai átmérő:

$$d_h = 4 * \frac{V - V_s}{A_s}$$

ahol $V - V_s$ a pórus- vagy áramlási térfogat, A_s pedig a nedvesített felület, azaz a szemcsék felületének az összege. A V_s szemcsétérfogat kifejezhető az ϵ porozitással is, az egyenleteket összevonva:

$$d_h = 4 * \frac{\epsilon}{1 - \epsilon} * \frac{V_s}{A_s}$$

A V_s/A_s hányados gyakorlatilag a szemcsék fajlagos felületének a reciproka. Ez a reciproka arányos az anyagalmazra jellemző egyenértékű átmérővel, más néven Sauter-átmérővel:

$$d_s = 6 * \frac{V_s}{A_s}$$

A pórusokban a $v_f \epsilon$ közepes áramlási sebesség kifejezhető a v_f teljes keresztmetszetre vonatkoztatott sebesség és a porozitás hányadosával:

$$v_{fk} = \frac{v_f}{\epsilon}$$

A v_f kifejezhető a Hagen-Poiseuille egyenlettel, mivel a kapillárisokban az áramlás általában stacionárius és lamináris:

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

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

A d_s és v_f ismeretében a fajlagos nyomásvesztés most már az alábbi tényezők függvénye:

$$\frac{\Delta p}{h} = (v_f, d_s, \epsilon, \mu, \rho_k)$$

Ennek meghatározásához szükségünk van még a Fanning ellenállástényezőre (λ_F):

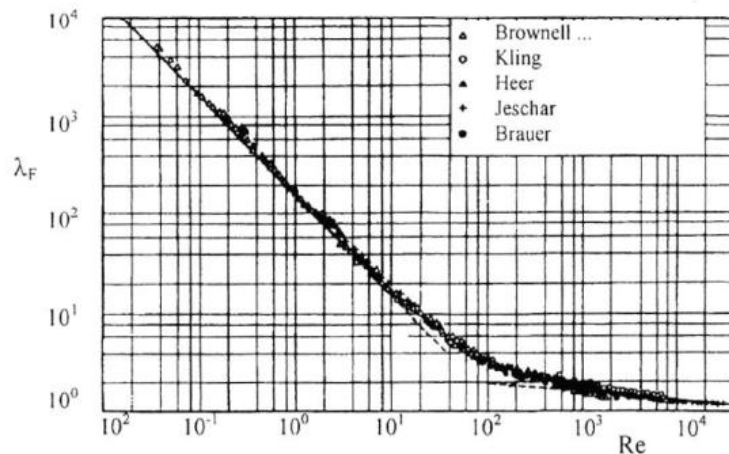
$$\lambda_F = \frac{\epsilon^3}{1 - \epsilon} * \frac{\Delta p}{\rho_k * v_f^2} * \frac{d_s}{h}$$

A Reynolds-szám képletébe a porozitást, illetve a hidraulikus átmérő behelyettesítésével az alábbi egyenletet kapjuk:

$$Re = \frac{1}{1 - \varepsilon} * \frac{v_f * d_s * \rho_k}{\mu}$$

Ha kísérletekkel meghatároztuk a Fanning ellenállási tényező és a Reynolds-szám kapcsolatát ($\lambda_F = f(Re)$), akkor a fenti összefüggésekkel a nyomásvesztés kiszámítható, álló ágyra. Gömbszemcséből álló ágy esetén az ágy ellenállás tényezőjét a 16. ábra tartalmazza. Brauer az alábbi közelítő összefüggést írta fel:

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



16. ábra: Gömbökből álló szemcséágyon történő áramlás ellenállástényezője a Reynolds-szám függvényében (Tarján, 1997)

Azonos alakú és méretű szemcséágynál az alábbi egyenlettel közelíthető:

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

Az előzőek ismeretében azonos gömbszemcsékre, vagy azonos alakú és méretű szemcsés anyagokra felírható a fajlagos nyomásvesztés-egyenlet:

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

Ez az egyenlet a lamináris, az átmeneti és a turbulens tartományon is érvényes. (Tarján, 1997)

3. Anyagok és módszerek

3.1. Anyagok

A cél a mérések során egy olyan kísérleti fluidizációs berendezés kialakítása volt, amellyel az üzemi berendezés működése szimulálható legyen. A berendezésnek egy olyan stabil fluidágyat kell létrehoznia, mely képes az alumínium és réz eredményes szétválasztására. Először a fluidizációhoz és a szeparáláshoz homokot választottam. A fluid állapotot előállítottam a homokkal, azonban a szeparálás nem volt eredményes. Tekintve, hogy mindkét fém nagy szemcsesűrűségű, egy olyan szemcsés közeget kellett választani, mely nagyon magas szemcsesűrűséggel rendelkezik. A választás az optimális szemcsesűrűsége, illetve alacsony költsége miatt a vas őrleményre jutott (17. ábra).

A kísérleteket először a vas őrlemény fizikai tulajdonságainak meghatározásával kezdtem. Vizsgáltam a szemcsealakat, sűrűséget, az anyag porozitását, valamint a szemcseméret-eloszlását.

Korlátozott mennyiségben a rendelkezésemre állt egy harmadik anyag is, mellyel a fluidizáció véghezvihető lehet. Ez az anyag a cirkónium-oxid volt (18. ábra). A rendelkezésre álló mennyiséggel por reológiai vizsgálatot végeztem.

A szétválasztandó anyagok hulladékból származó alumínium és réz szemcsék voltak.



17. ábra: A kísérlethez használt vaspor minta (szerző saját szerkesztése)



18. ábra: A por reológiai mérésekhez használt zirkon-oxid minta (szerző saját szerkesztése)

3.1.1. Piknométeres sűrűség meghatározás

A szemcsesűrűség meghatározását piknométeres méréssel végeztem. A piknométerek kis edények, melyek csiszolt üvegdugóval rendelkeznek (19. ábra). A mérés elve az, hogy a piknométert két anyaggal töltjük ki, szemcsékkel és egy mérőközeggel. A mérőközeg általában folyadék, de egyes esetekben lehet gáz is. A mérés során le kell mérni négy különböző tömeget:

- m_1 : az üres és száraz piknométer tömege
- m_2 : a piknométer plusz a szemcsék tömege
- m_3 : a piknométer plusz a szilárd anyag plusz a mérőközeg tömege
- m_4 : a mérőközeggel teljesen feltöltött piknométer tömege

A fenti tömegekből és a közeg ρ_k sűrűségének ismeretében kiszámolható a szemcsesűrűség:

$$\rho_s = \frac{m_2 - m_1}{m_4 - m_3 + m_2 - m_1} * \rho_k$$

A piknométereket legalább 2/3-ad részig kell tölteni a szemcsés anyaggal. Mérőközeggént desztillált vizet használtam. A mérést kétszer végeztem el, majd az eredményeket

átlagoltam. A minta 250 - 400 μm szemcseméretű volt. A mért értékeket a 4. táblázat tartalmazza:

4. táblázat Piknométeres mérések eredményei, és a kapott sűrűségek (szerző saját szerkesztése)

	A	B
m_1 [g]	30,68	31,28
m_2 [g]	79,01	82,42
m_3 [g]	113,93	117,03
m_4 [g]	70,65	71,74
ρ_s [kg/m ³]	6730	6910

Átlagos szemcsesűrűség: $6820 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$



19. ábra: A mérésekhez használt üveg piknométerek (szerző saját szerkesztése)

3.1.2. Halmazsűrűség és porozitás

1000 cm^3 anyagot egy ismert tömegű és térfogatú műanyag hengerbe töltöttem (20. ábra). Ezután megmértem a henger anyaggal teli tömegét. Az anyaggal teli henger és a henger

tömegének különbségéből kiszámolható az anyag tömege. A halmazsűrűség a hengert kitöltő anyag térfogata és az anyag tömegének a hányadosa:

$$\rho_h = \frac{V}{m}$$

Az általam mért értékek és számított halmazsűrűségek az 5. táblázatban láthatóak:

5. táblázat: Az anyag halmazsűrűsége (szerző saját szerkesztése)

	A	B
Szemcse térfogat [cm ³]	1000	1000
Szemcse tömeg [g]	3052,8	3117,8
Sűrűség [kg/m ³]	3052,8	3117,8

A porozitás meghatározásához először szükség van az anyag koncentrációjára. A koncentráció azt fejezi ki, hogy a halmaz térfogata mekkora mennyiségben áll szemcsés alkotókból. A koncentráció a halmaz és szemcsesűrűség ismeretében illetve a szemcsék közti közeg sűrűségének ismeretében könnyen meghatározható:

$$c = \frac{\rho_h - \rho_k}{\rho_{sz} - \rho_k}$$

Méréseim során a szemcsék közti közeg levegő volt. Az egyenletbe behelyettesítve az adatokat $c = 0,4523$.

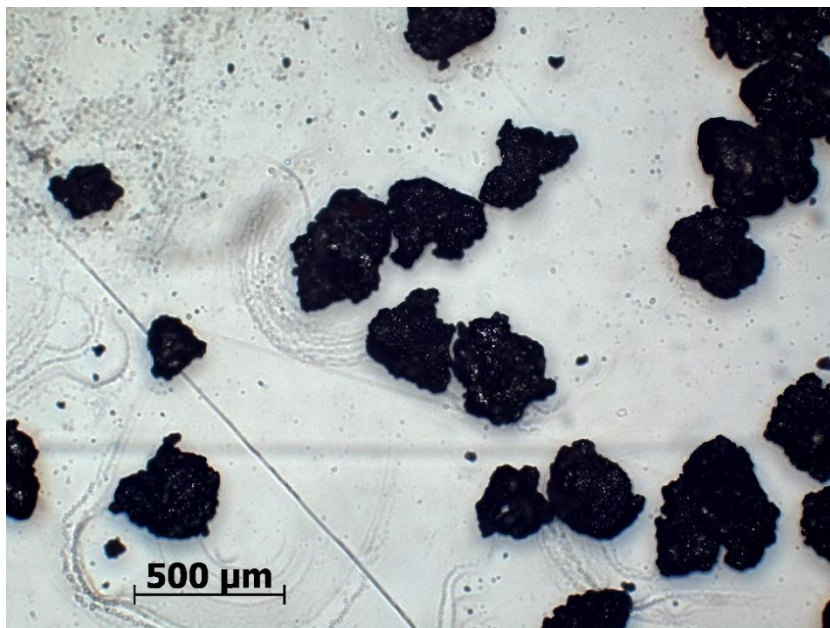
A porozitás kiszámítható az összes térfogat és a szilárd anyag térfogatának a különbségéből. Ekkor: $\varepsilon = 1 - c$, behelyettesítve $\varepsilon = 0,5477$.



20. ábra: A halmazsűrűség meghatározásához használt mérőhenger (szerző saját szerkesztése)

3.1.3. Szemcsealak

A szemalak vizsgálatához a Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet laboratóriumának optikai mikroszkópját használtam. A mikroszkóp által készített képet a 21. ábra mutatja. Az elemzett frakció 250-400 μm szemcseméretű volt.



21. ábra: Az optikai mikroszkóp képe (szerző saját szerkesztése)

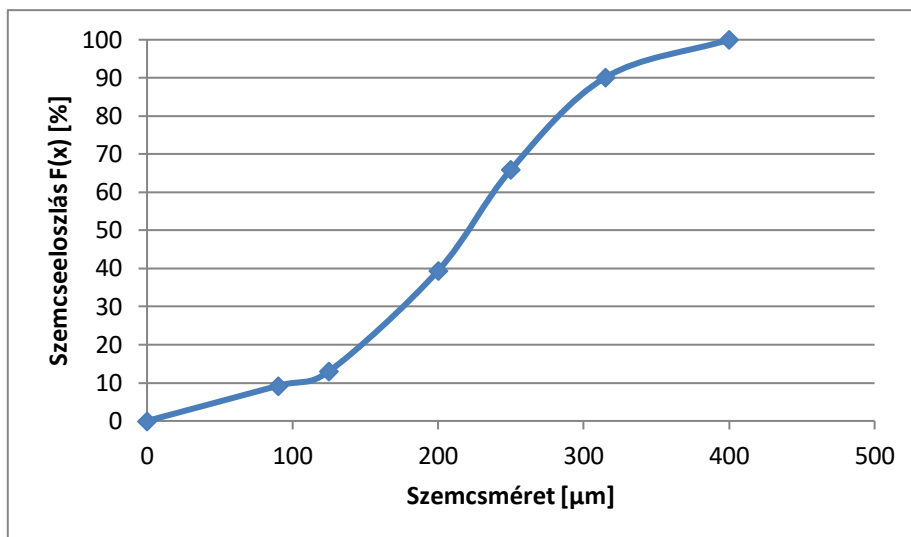
A képen szabálytalan alakú szemcséket láthatunk. A szakirodalom és a későbbi por reológiai vizsgálatok azt támasztják alá, hogy ezek a szemcsék nehezebben fluidizálódnak, mint a gömb alakú szemcsék, a kedvezőtlenebb áramlási viszonyok miatt.

3.1.4. Szemcseméret-eloszlás

A kísérletek kezdetén megállapítottam, hogy bár a legkisebb szemcseméret fluidizálásához szükséges a legkisebb energia, tehát ennek a fluidizálása a leggazdaságosabb, azonban ezek a szemcsék erősen hajlamosak a kiporzásra, illetve rontják a fluidizáció minőségét, mivel az ágy felszínére osztályozódnak. Ezen problémák kiküszöbölésére szitaelemzéssel megállapítottam az anyag szemcseméret-eloszlását. A használt szitator az alábbi lyukméretű szitákból állt: 90 μm , 125 μm , 200 μm , 250 μm , 315 μm . (22. ábra). A kapott szemcseméret eloszlást a 23. ábra tartalmazza.



22. ábra: A szitaelemzéshez használt szitator (szerző saját szerkesztése)



23. ábra: A kísérlet során használt vaspor szemcseméret-eloszlása (a szerző saját szerkesztése)

A kísérletek azt mutatták, hogy a 160 µm alatti port érdemes leválasztani a legoptimálisabb működés érdekében. A kereskedelemben lévő vasporok nagyon sokféle frakcióban kaphatóak, ezért a nagyüzemi működés esetén a pontos rendelés leadása után, további osztályozást nem igényelnek.

3.2. Módszerek

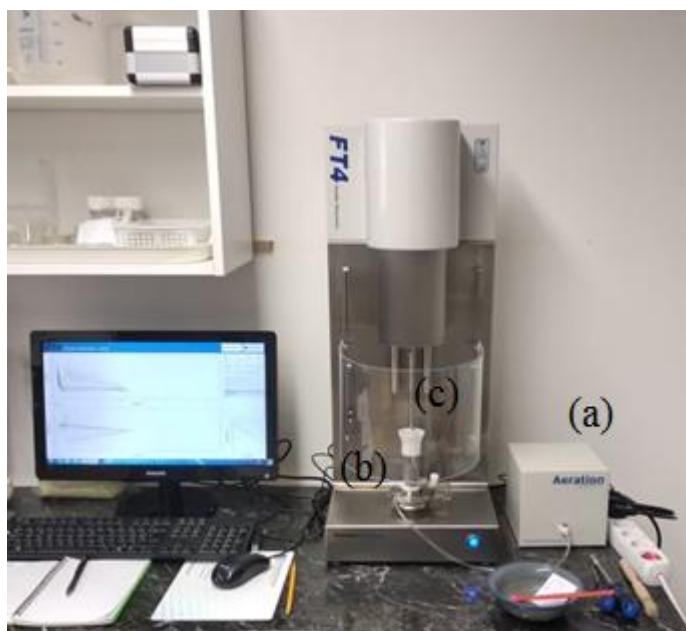
A vas őrlemény viselkedésének leírására szűk szemcseméret frakciókat állítottam elő, majd por reológiai vizsgálatokat végeztem rajtuk.

Az őrlemény reológiai tulajdonságainak megismerése után, a kísérleti fluidizációs berendezéssel végeztem méréseket. Előállítottam egy olyan szemcseméret frakciót, melynél a fluidizáció egyenletesen megy végbe, nincs szükség nagy áramlási sebességre és jelentős kiporzás sem jelentkezik. Vizsgáltam a fluidágyba helyezett testre ható erőteret, a szétválasztandó anyag süllyedését a közegben, mindeközben mérve a nyomáskülönbséget, melyből az áramlási sebesség meghatározható.

Mivel a szétválasztandó testek gyakran gyűrt alakúak voltak ezért a következő lépés során azt vizsgáltam, hogy a vas őrlemény megragadhat-e a szemcsékben, illetve kísérletet tettem a bennragadt szemcsék eltávolítására.

3.2.1. Por reológiai vizsgálatok

A por reológiai vizsgálatokhoz a Egyetem Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet Nanoeljárástechnikai Laboratóriumában található, Freeman Technology által gyártott, FT4 Powder Rheometer típusú berendezést használtam, mely a 24. ábrán látható.



24. ábra: Laboratóriumi FT4 típusú por reométer (szerző saját szerkesztése)

A reométer áll egy levegőszabályzóból (a), mellyel a kívánt légmennyiség pontosan beállítható. A gépben található egy szitabetét, mely a beáramló levegőt egy mérőedényben oszlatja el (b). A mérőedénybe egy forgó késsel rendelkező tengely merül bele (c), mely méri a kés forgatásához szükséges energiát. A berendezésbe egy számítógép is van építve, mely a hozzá tartozó software segítségével rögzíti a mért adatokat. A mért adatok a monitoron valós időben jelennek meg. A méréseket különböző szemcsefrakciókkal, kés sebességekkel, illetve levegőmennyiségekkel végeztem el.

Első lépésben a vas őrleményből szitálással szűk szemcse frakciókat állítottam elő. A frakciók rendre 0-100, 100-160, 160-200, 200-250, 250-315, 315-400 μm -es szemcseméretűek voltak, a frakciók a 25. ábrán láthatóak.



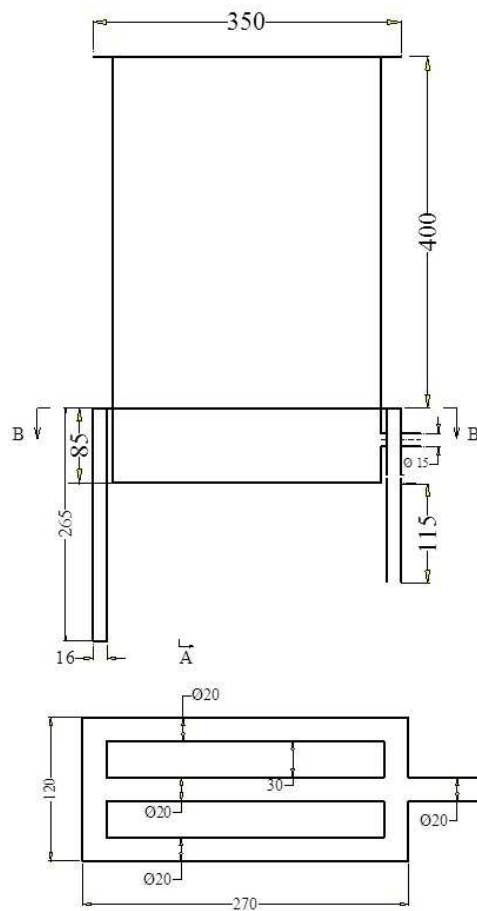
25. ábra: A különböző vas őrlemény frakciók (szerző saját szerkesztése)

A méréseket egy második, hasonlóan nagy sűrűségű anyagra, cirkónium-oxidra is elvégeztem. A cirkónium-oxidot Intézetünkben lévő keverőmalmokhoz használjuk, őrlőgolyóként. Pontos jelölése ZY prémium és 200-300 µm-es szemnagyságú. Szemcse sűrűsége 6,06 g/cm³, halmazsűrűsége 3,6 g/cm³. Alakja közel teljesen tökéletes gömb alakú és felületi érdessége nagyon kicsi.

A mérés mindkét anyagra 25mm átmérőjű mérőcellában történt, pontosan 50g anyaggal. A kísérleteket három lépcsőben végeztem el, a levegő maximális sebességét először 40, a másodikban 110, a harmadikban pedig a maximális 160 mm/s-ra növelve. A méréseket három különböző kés forgási sebesség mellett is elvégeztem, melyek rendre 10, 40 és 80 mm/s voltak.

3.2.2. Kísérleti berendezés és mérőkör

A kísérleti berendezés 3 darab, 20mm átmérőjű csőből áll, melyek egymástól 30mm távolságra találhatók. (26. ábra) A csövek össze vannak kapcsolva, csőrendszert alkotva. A csőrendszeren 2 darab 1,5mm furat található, melyek egymással 120°-os szöget zárnak be, egymástól 20 mm távolságban. A levegő ezeken a furatokon áramlik be az anyagágyhoz, fellazítva azt.



26. ábra: A csőrendszer és a fluidizációs edény méretei

A csőrendszer a Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet laboratóriumának levegő hálózatához lett csatlakoztatva, a levegő termelését kompresszor végzi. A rendszer maximum 6 bar nyomást tud biztosítani.

A berendezéshez szükséges volt egy nyomásszabályzóra (1.) a levegő áramlásának a szabályozására. A nyomásszabályzót ezután egy flexibilis csővel összekötöttem egy acél venturi csővel (2.), melyhez egy digitális nyomásmérő (3.) lett szerelve, a nyomáskülönbség mérése céljából. A csővezeték ezután magához a fluidizációs berendezéshez (4.) kapcsolódik (27. ábra).



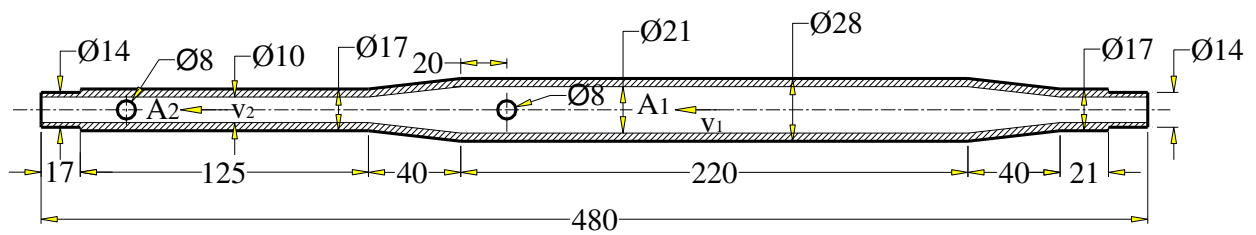
27. ábra: A mérőkör és fluidizációs kamra (szerző saját szerkesztése)

3.2.3. Venturi cső

A beáramló levegő sebességének méréséhez nyomásmérő lett a Venturi-csőhöz kötve. A sebesség kiszámításához szükséges képlet:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_1 \left(1 - \frac{A_2}{A_1}\right)^2}}$$

ahol v_2 a levegő sebessége, Δp a nyomáskülönbség, ρ_1 a levegő sűrűsége, A_2 a szűkítő keresztmetszet, A_1 a nagyobb keresztmetszet. A Venturi-cső műszaki rajza a 28. ábrán látható.

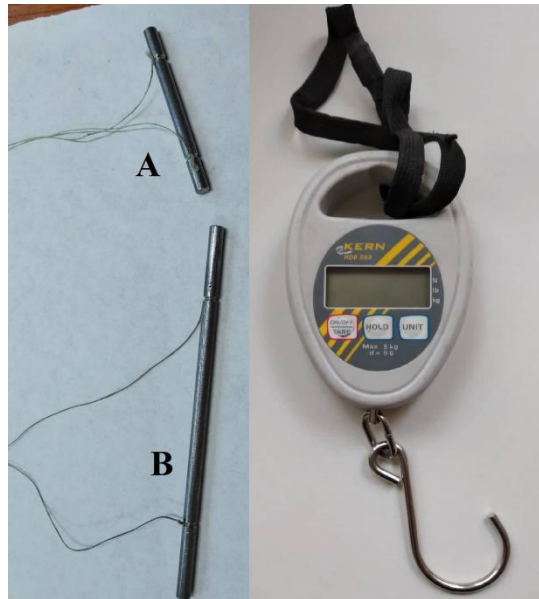


28. ábra: Az alkalmazott Venturi-cső méretei (szerző saját szerkesztése)

A kísérletekhez 160 – 400 μm szemcseméretű vasport használtam, különböző tömegű töltetekkel. A sebességek olyan nagyságúak voltak, amelyeknél a réz és alumínium szétválasztása éppen eredményes volt.

3.2.4. Gravitációs erő a fluidágyban

A fluidágyba helyezett testre ható erőt egy kihúzóerő-mérő cellával mértem. Az erőmérő cellára helyeztem két ismert geometriájú és tömegű testet (A), (B), majd egyenletes sebességgel húztam felfelé őket. A mérőcella és a testek a 29. ábrán láthatóak. Rögzítettem különböző magasságokban az erőmérő cella által mutatott valós idejű értékeket. A kísérletet elvégeztem levegő befúvás nélkül, illetve 3 bar légnyomás mellett is. Az „A” test, 50 mm hosszú, 4 mm átmérőjű henger, tömege pedig 4,7g. A „B” test szintén henger, de 100 mm hosszú, 4 mm átmérőjű, tömege 9,51g. A kísérleteket 50 és 60 mm ágymagasságokban is elvégeztem. Minden mérést két sorozatban végeztem el, annak érdekében, hogy a mérések megfelelő pontosságúak legyenek.



29. ábra: Az erőmérő cella és a használt próbatestek (szerző saját szerkesztése)

3.2.5. A szétválasztandó szemcsék süllyedési sebessége:

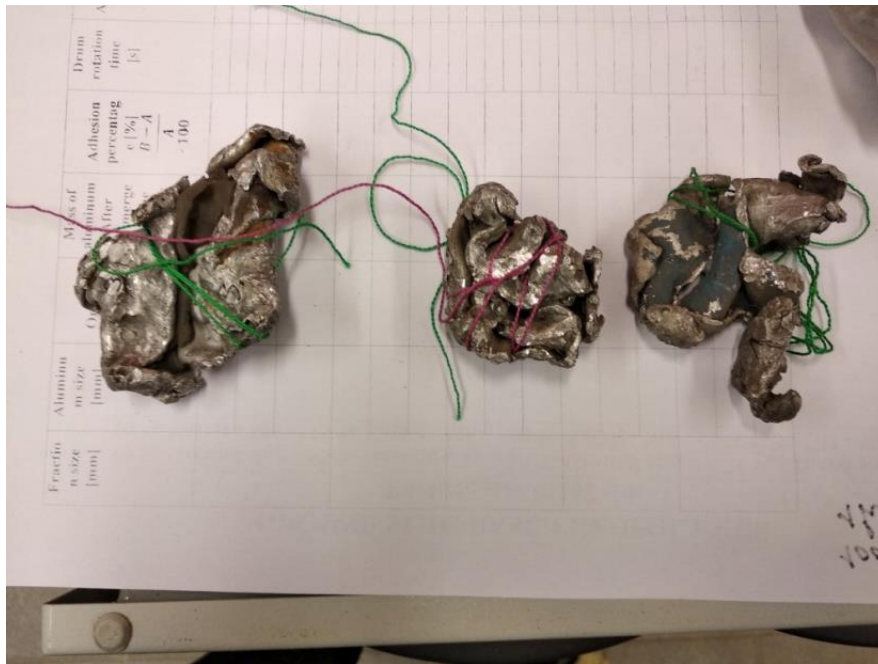
A süllyedési sebesség számításához a rezet és az alumíniumot (30. ábra) egy fonálra kötöttem, majd a kísérleti berendezésbe helyeztem. A réz szemcse mérete 25x26 mm volt, tömege pedig 22,46g. Az alumínium szemcse mérete pedig 25x31 és 10,5 g. Megfeszítetlen fonál mellett az anyagágyra helyeztem a szemcséket, majd a berendezést elindítottam. A szemcséket rendre 5, 10, 15, 20, 30 és 60 másodpercig tartottam a mérőedénybe, a levegőellátást megállítottam és a fonalat megfeszítettem. Ehhez a kísérlethez 200 - 400 μm frakciójú vasport választottam, 28,5 cm ágymagassággal. A kísérleteket különböző légnyomások mellett végeztem el.



30. ábra: A süllyedési kísérletekhez használt réz és alumínium szemcsék (szerző saját szerkesztése)

3.2.6. A szétválasztandó anyagba szorult vas őrlemény:

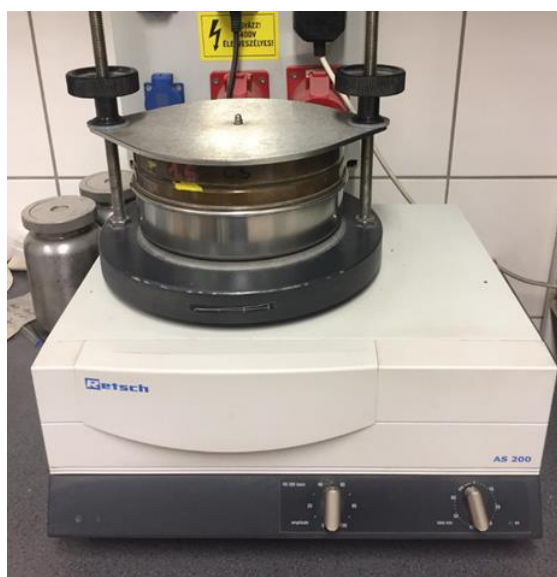
A gyűrt alakú szétválasztandó szemcsékben (31. ábra) a vaspor könnyen bent tud ragadni. Ez jelentős problémákat okoz a hulladék további értékesítésénél. Ezen okból lemértem a különböző szemcseméretű gyűrt alakú alumínium szemcsék tömegét, tolómérővel megmértem a méreteit, majd egy percen át a fluidágyban tartottam azokat és ismét lemértem a tömegüket. A két mért értékből megállapítható az alumínium szemcsék adhéziója. Ezután kísérletet tettem a vaspor eltávolítására. Egy őrlőgolyók nélküli micro-Deval malmot használtam, így az egy egyszerű dobként üzemelt 60 1/min fordulatszámon. (32. ábra). A kísérleteket laboratóriumi rezgőszítával is elvégeztem. (33. ábra) A mérés során 200 – 400 µm frakciójú vasport használtam, 13kg töltettel, 4 bar légnyomással. A méréseket 8 különböző alumínium frakcióra is elvégeztem, frakciónként 3 darab mintával.



31. ábra: A gyűrt alumínium szemcsék és a felületükön, illetve gyűrődéseikben található vaspor (szerző saját szerkesztése)



32. ábra: Forgó dobként működő micro-Deval malom (szerző saját szerkesztése)



33. ábra: Laboratóriumi rezgőszita (szerző saját szerkesztése)

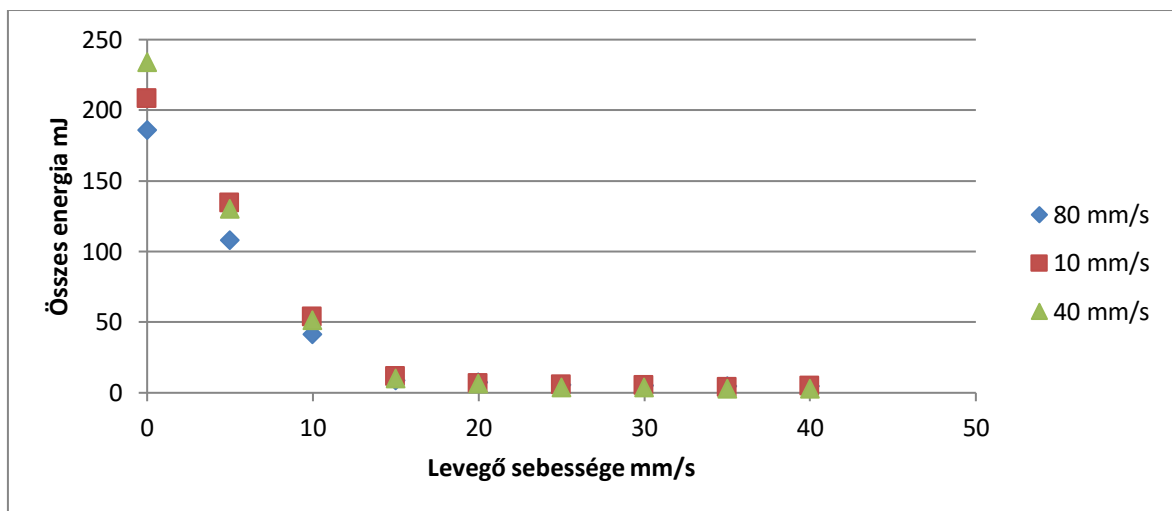
4. Kísérletek, eredmények

4.1. FT4 por reológiai mérések

Az előző fejezetben ismertetett por reológia mérések eredményei és értékelései a következő alfejezetek tartalmazzák.

4.1.1. Kísérletek 0-100 μm -es vas őrlémmel

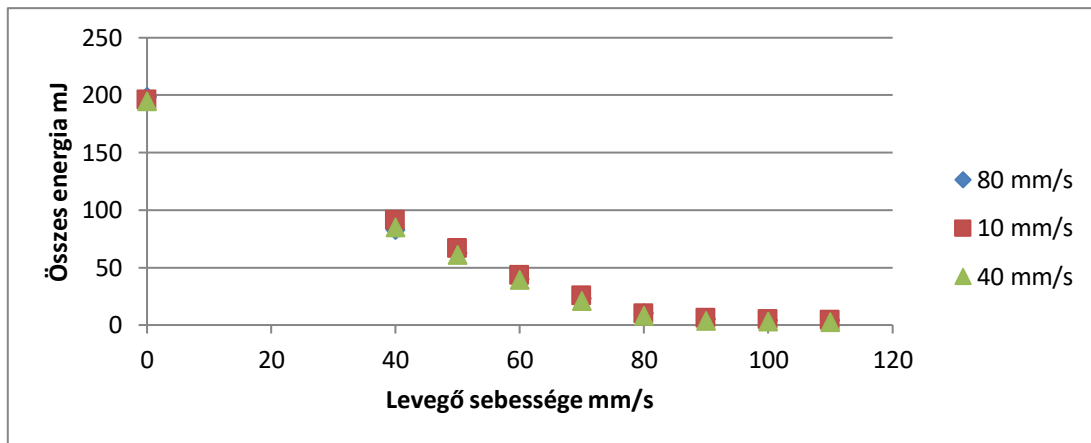
A legkisebb szemcseméretű frakció esetén már a 40 mm/s-os légáramnál elértem a folyadékszerű állapotot, mivel az energia állandósult a légsebesség függvényében. A mérés eredményei a 34. ábrán láthatóak.



34. ábra: A kés forgatásához szükséges energia, különböző kés sebességek mellett, a légsebesség függvényben, a 0-100 vas őrlémény esetén (szerző saját szerkesztése)

4.1.2. Kísérletek 100-160 μm -es vas őrlémmel

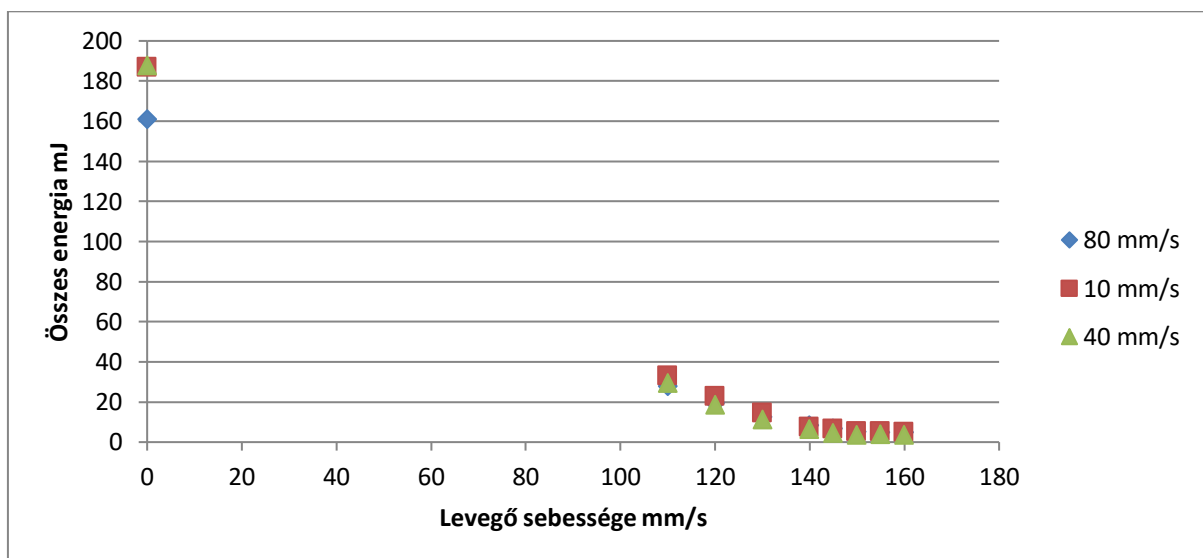
A 0-100 μm -es frakció esetén a fluid állapot 110 mm/s légsebességnél állt be. A mért értékeket a 35. ábra tartalmazza.



35. ábra: A kés forgatásához szükséges energia, különböző kés sebességek mellett, a légsebesség függvényben, a 0-100 μm -es vas őrlemény esetén (szerző saját szerkesztése)

4.1.3. Kísérletek 160-200 μm -es vas őrleményel

A fluid állapotot itt is sikerült elérni, a berendezés maximális méréshatárával. A mért adatok a 36. ábrán láthatóak.

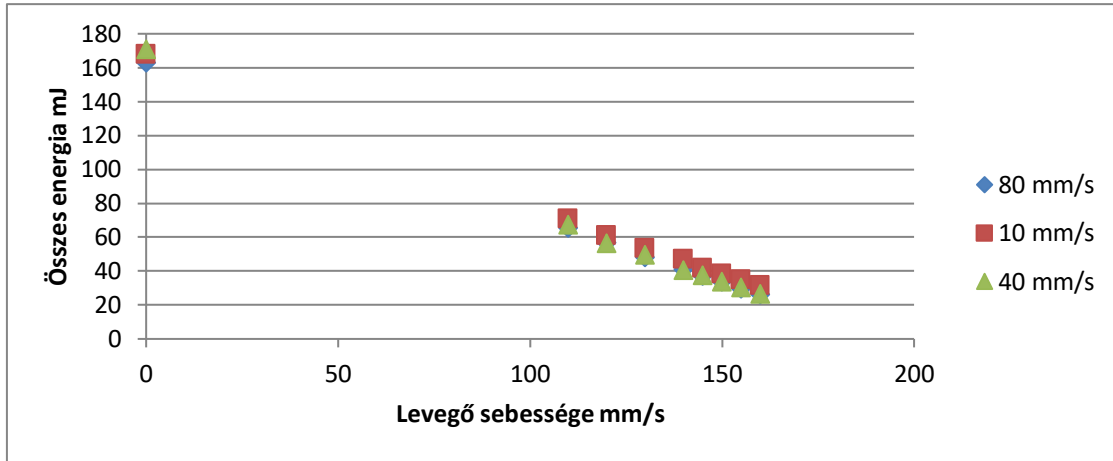


36. ábra: A kés forgatásához szükséges energia, különböző kés sebességek mellett, a légsebesség függvényben, a 0-100 μm -es vas őrlemény esetén (szerző saját szerkesztése)

4.1.4. Kísérletek 200-250 μm -es vas őrleményel

Bár ennél a frakciónál már nem sikerült elérni a teljesen fluid állapot, azonban érdemes megjegyezni, hogy a maximális légsebességnél a kés forgatásához szükséges

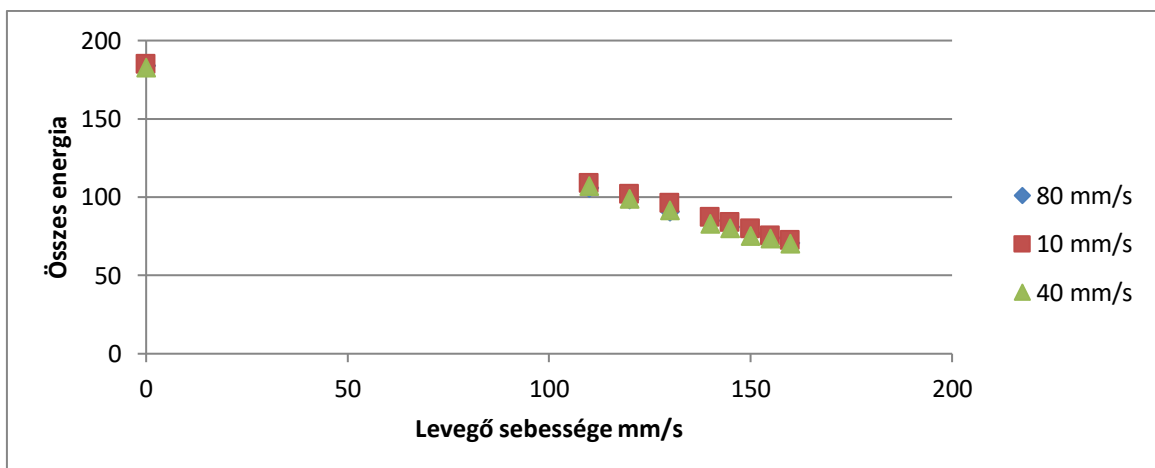
energia a hatodára csökkent, a kezdeti légáram nélküli állapothoz képest. Ennek a frakciónak az értékei a 37. ábrán vannak feltüntetve.



37. ábra: A kés forgatásához szükséges energia, különböző kés sebességek mellett, a légsebesség függvényben, a 200-250 vas őrlemény esetén (szerző saját szerkesztése)

4.1.5. Kísérletek 250-315 μm-es vas őrleményel

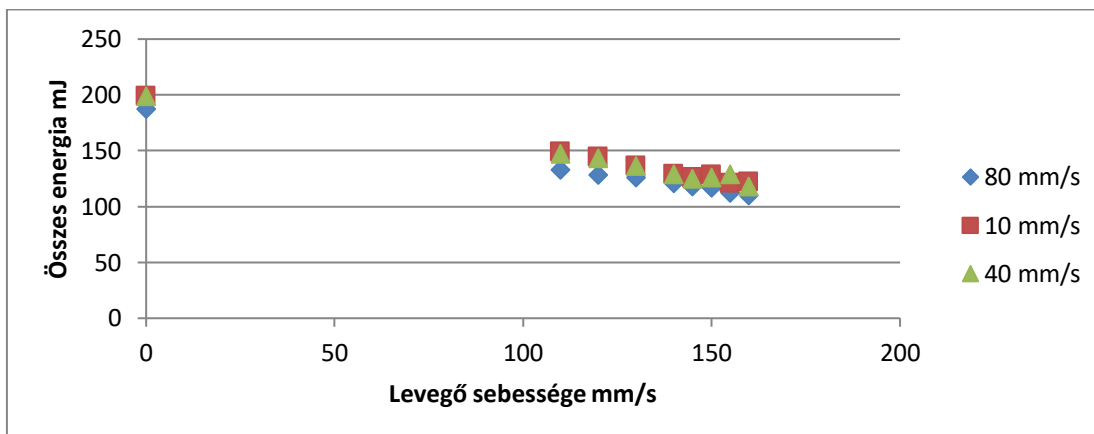
A 200-250 μm-es frakcióhoz hasonlóan itt sem állandósult a levegő a légáram függvényében, de a szükséges összes energia körülbelül a harmadára csökkent. A mérési adatok a 38. ábrán láthatóak.



38. ábra: A kés forgatásához szükséges energia, különböző kés sebességek mellett, a légsebesség függvényben, a 250-315 μm-es vas őrlemény esetén (szerző saját szerkesztése)

4.1.6. Kísérletek 315-400 μm -es vas őrlémmel

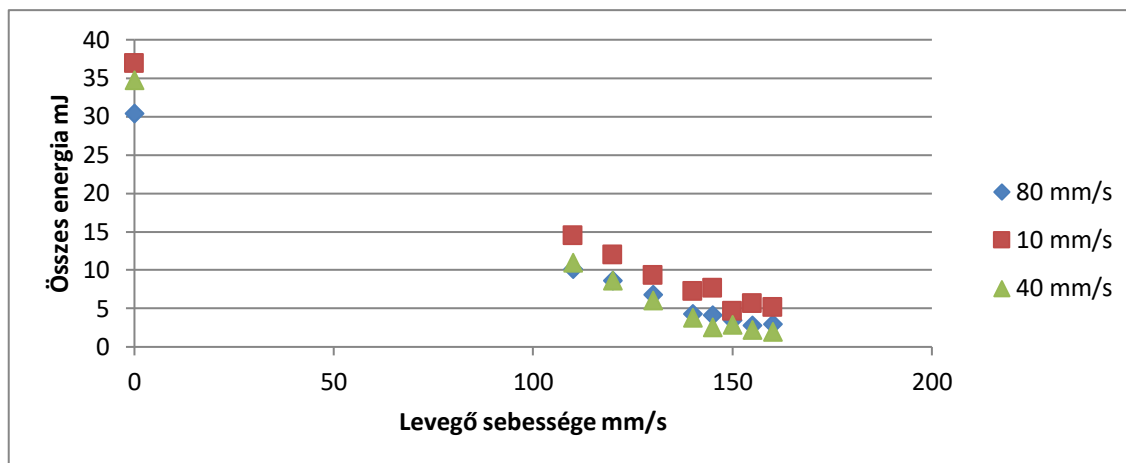
A 39. ábrán látszik, hogy a legnagyobb frakció esetén a fluidizációs szint eléréséhez még jóval nagyobb légmennyiségre lenne szükség.



39. ábra: A kés forgatásához szükséges energia, különböző kés sebességek mellett, a légsebesség függvényben, a 315-400 μm -es vas őrlémény esetén (szerző saját szerkesztése)

4.1.7. Kísérletek 200-300 μm -es cirkon-oxiddal

Bár a cirkon-oxid szemcse sűrűsége közel azonos a vas őrléményével, mégis kevesebb energia szükséges a kés forgatásához, mint a hasonló szemcseméretű vasporéhoz. A kezdeti $v=0$ mm/s levegő sebességnél is jelentősen kisebb az összes energia. Ez azzal magyarázható, hogy a kés könnyebben forog az anyagban, mivel a kerek szemcsék átgördülnek rajta. A 160 mm/s-os áramlási sebességnél ebben az anyagban már beáll a fluid állapot. A fluid állapotot azért éri el hamarabb a cirkon-oxid, mivel gömb körüláramlásakor jóval kedvezőbb áramlási viszonyok alakulnak ki, mint a szabálytalan vas szemcsék esetében. A cirkon oxid mérési adatai a 40. ábrán láthatók:



40. ábra: A kés forgatásához szükséges energia, különböző kés sebességek mellett, a légsebesség függvényben, a 200-300 μm -es zirkon-oxid frakció esetén (szerző saját szerkesztése)

4.2. Áramlási sebességek

A Venturi-cső nyomáseséséből számolt áramlási sebességeket az alábbi táblázatok tartalmazzák:

6. táblázat: A szétválasztáshoz szükséges áramlási sebesség, 8 kg vaspapor, illetve 11 cm nyugalmi ágymagasságnál (szerző saját szerkesztése)

Beáramló légnyomás [bar]	1	1.5	2	2.5	3
Légnyomáscsökkenés ΔP [hPa] [100 Pa]	28.2	37.9	44.6	52.6	59.7
Levegő sebessége [m/s]	87.6	101.6	110.2	119.7	127.5

7. táblázat: A szétválasztáshoz szükséges áramlási sebesség, 12 kg vaspapor, illetve 15 cm nyugalmi ágymagasságnál (szerző saját szerkesztése)

Beáramló légnyomás [bar]	1	1.5	2	2.5	3
Légnyomáscsökkenés ΔP [hPa] [100 Pa]	31.4	40.8	48.5	56.4	61.6
Levegő sebessége [m/s]	92.4	105.4	114.9	123.9	129.5

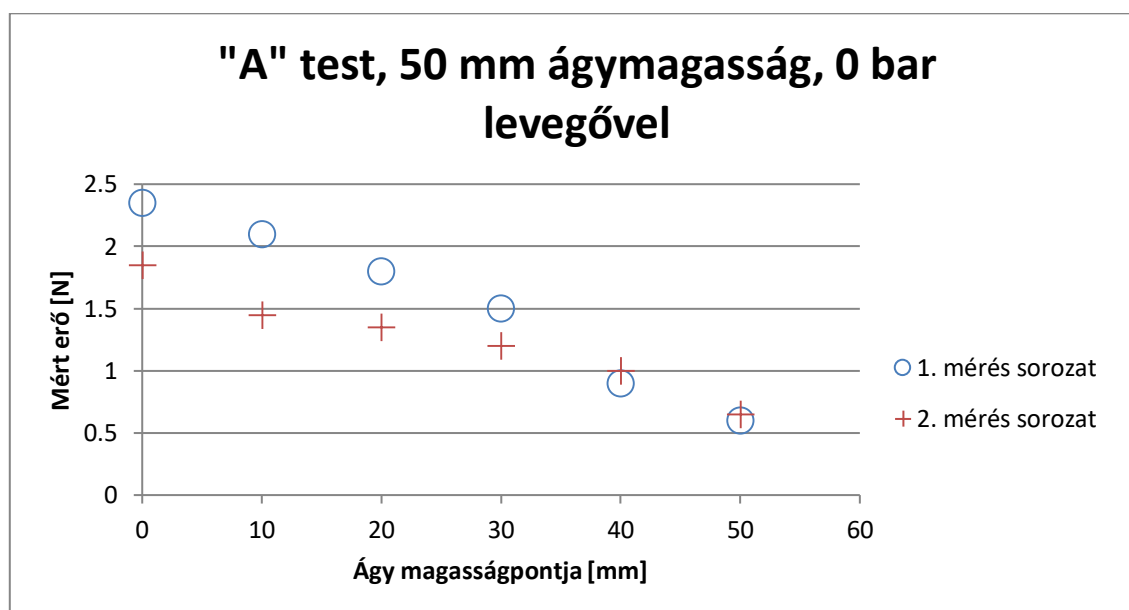
8. táblázat: A szétválasztáshoz szükséges áramlási sebesség, 15 kg vaspor, illetve 16,5 cm nyugalmi ágymagasságnál (szerző saját szerkesztése)

Beáramló légnyomás [bar]	1	1.5	2	2.5	3
Légnyomáscsökkenés ΔP [hPa] [100 Pa]	28.2	37.8	45.5	53.3	66.6
Levegő sebessége [m/s]	87.6	101.4	111.3	120.5	134.7

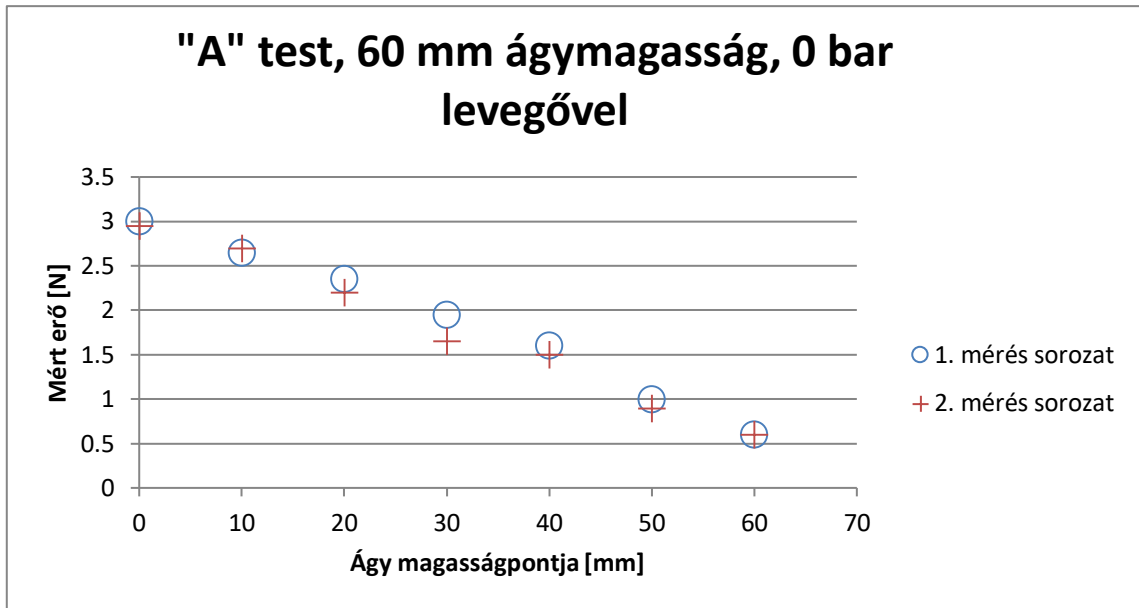
A kísérletekből az a következtetés vonható le, hogy a töltet, vagyis az ágymagasság növelésével nem növekedik meg jelentősen a szükséges légsebesség.

4.3. Gravitációs erő a fluidágyban

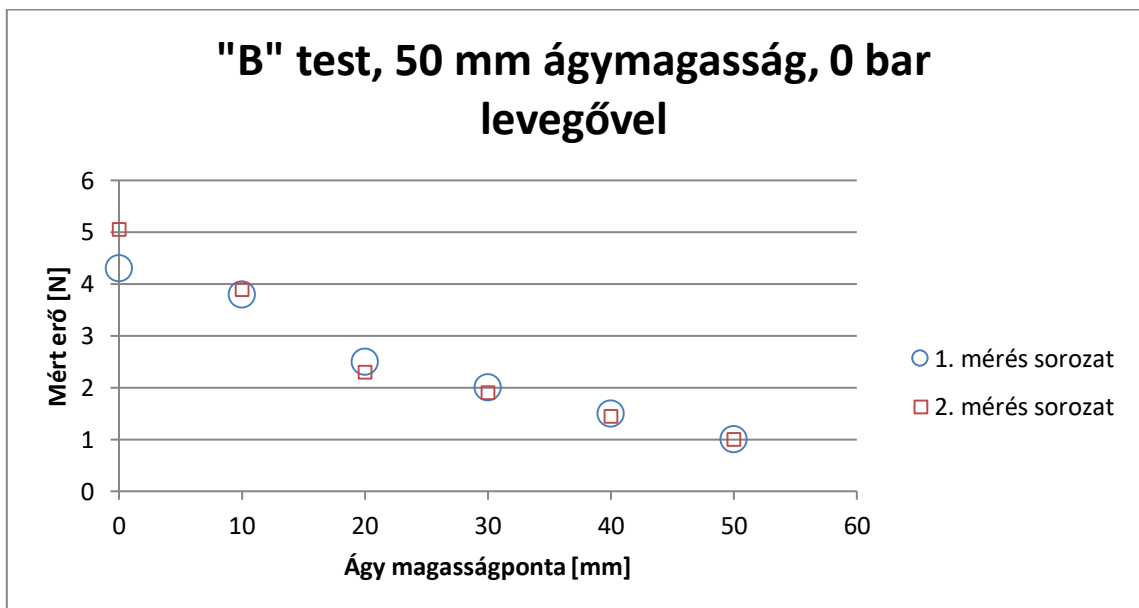
Az előző fejezetben leírtak alapján meghatároztam a gravitációs erőt a fluidágyban, húzóerő-mérő cella segítségével. A mérési eredményeimett 41-48. ábrák tartalmazzák.



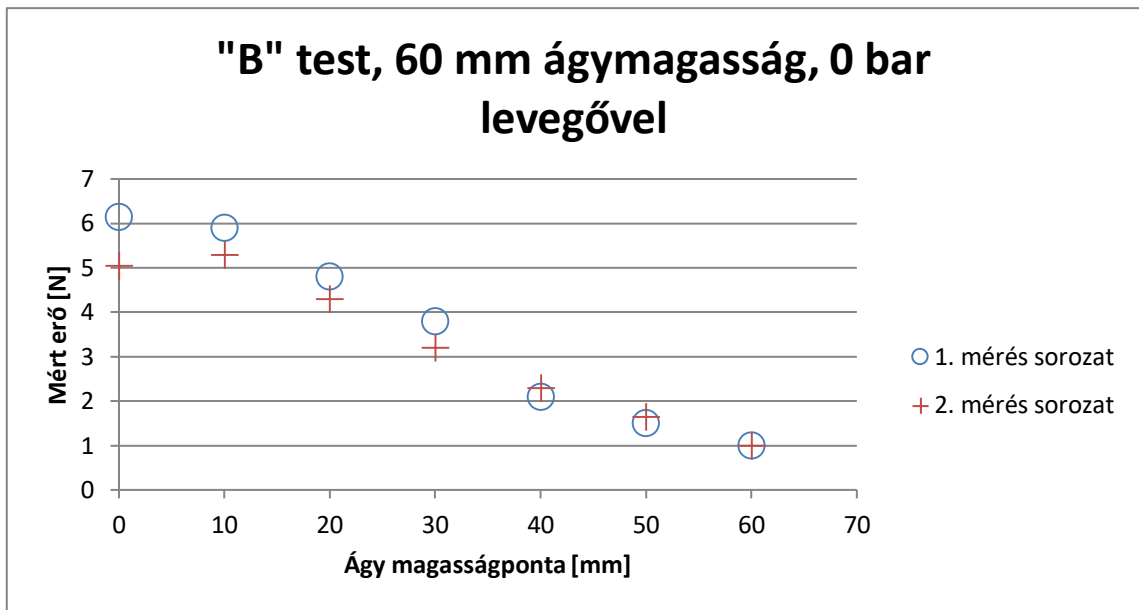
41. ábra: Az „A” rúd mozgatásához szükséges húzóerő 50 mm-es ágymagasság esetén, levegő betáplálása nélkül (szerző saját szerkesztése)



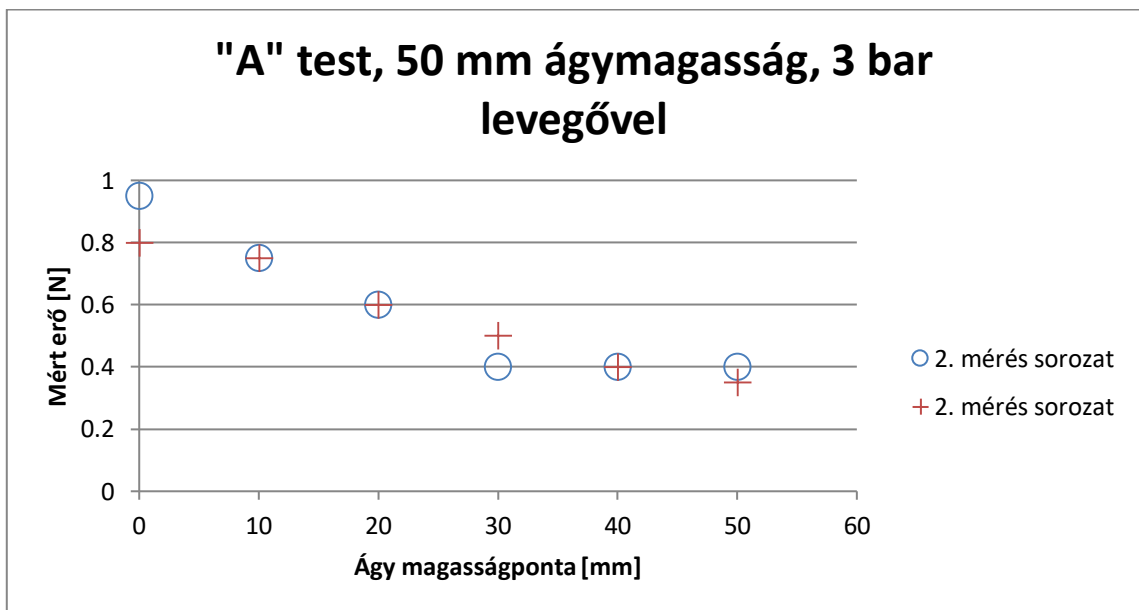
42. ábra: Az „A” rúd mozgatásához szükséges húzóerő 60 mm-es ágymagasság esetén, levegő betáplálása nélkül (szerző saját szerkesztése)



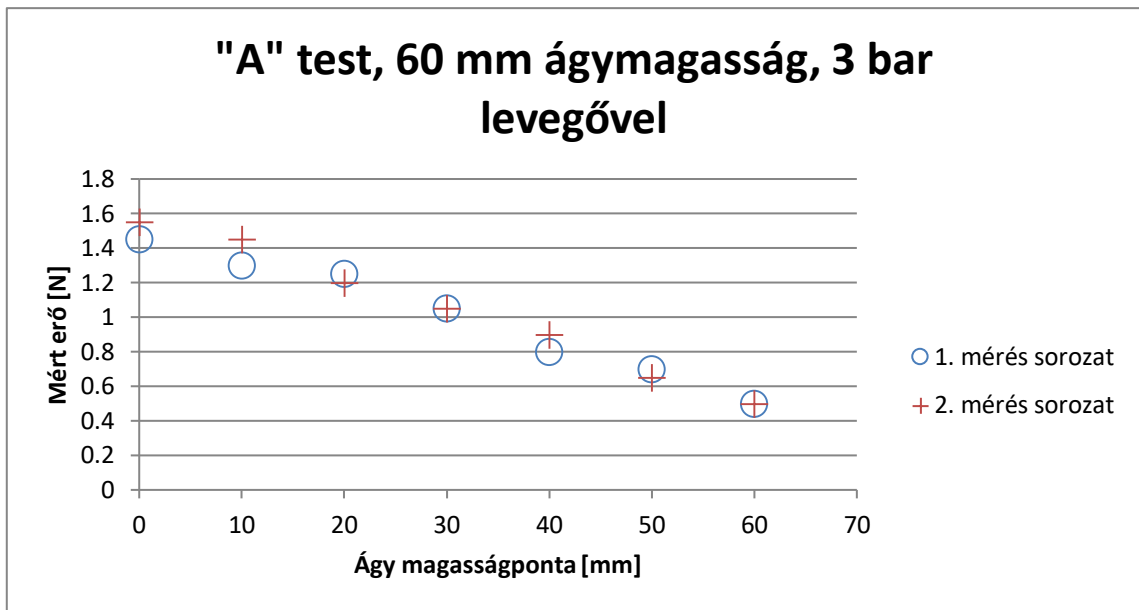
43. ábra: A „B” rúd mozgatásához szükséges húzóerő 50 mm-es ágymagasság esetén, levegő betáplálása nélkül (szerző saját szerkesztése)



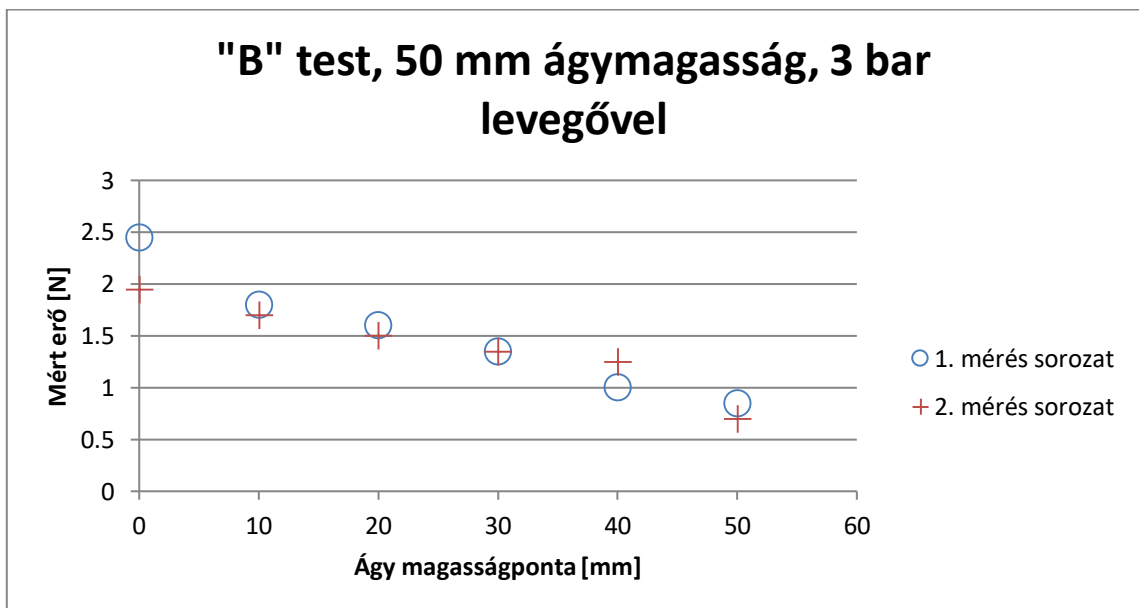
44. ábra: A „B” rúd mozgatásához szükséges húzóerő 60 mm-es ágymagasság esetén, levegő betáplálása nélkül (szerző saját szerkesztése)



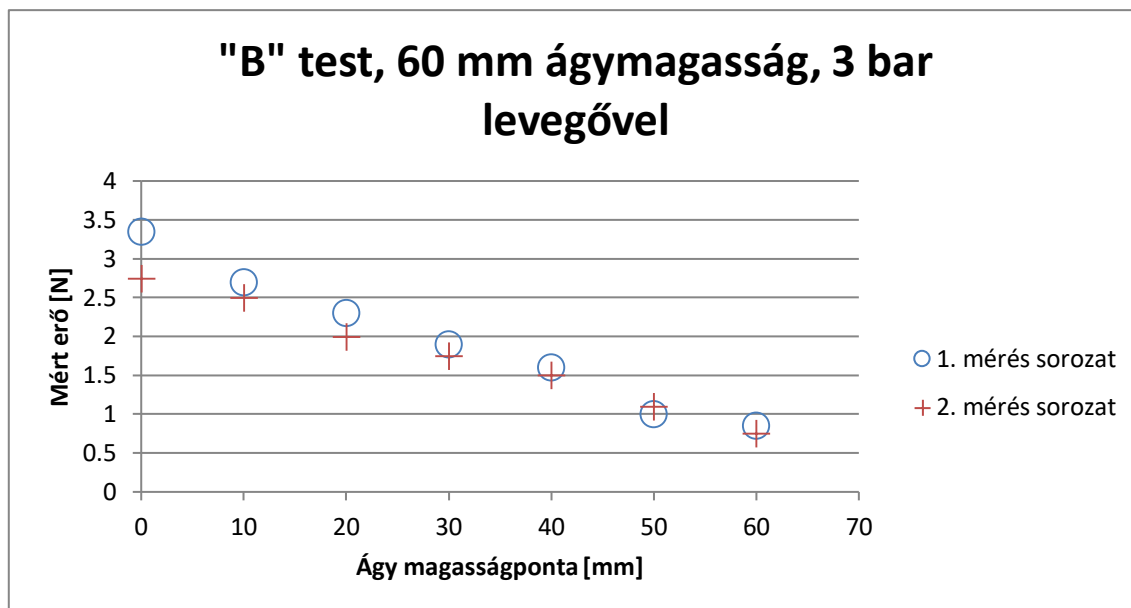
45. ábra: Az „A” rúd mozgatásához szükséges húzóerő 50 mm-es ágymagasság esetén, 3 bar levegő betáplálásával (szerző saját szerkesztése)



46. ábra: Az „A” rúd mozgásához szükséges húzóerő 60 mm-es ágymagasság esetén, 3 bar levegő betáplálásával (szerző saját szerkesztése)



47. ábra: A „B” rúd mozgásához szükséges húzóerő 50 mm-es ágymagasság esetén, 3 bar levegő betáplálásával (szerző saját szerkesztése)

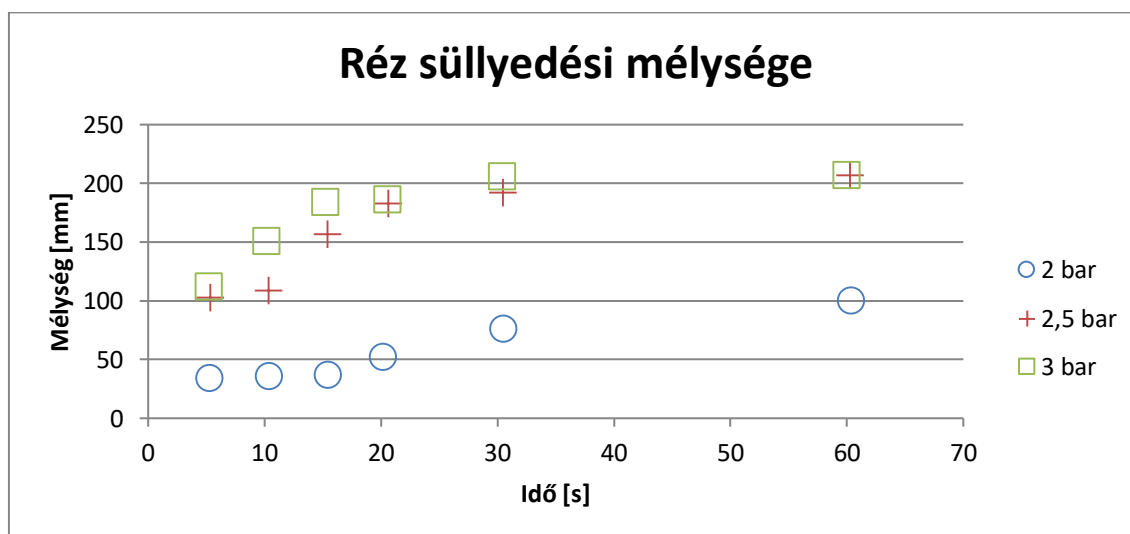


48. ábra: A „B” rúd mozgatásához szükséges húzóerő 60 mm-es ágymagasság esetén, 3 bar levegő betáplálásával (szerző saját szerkesztése)

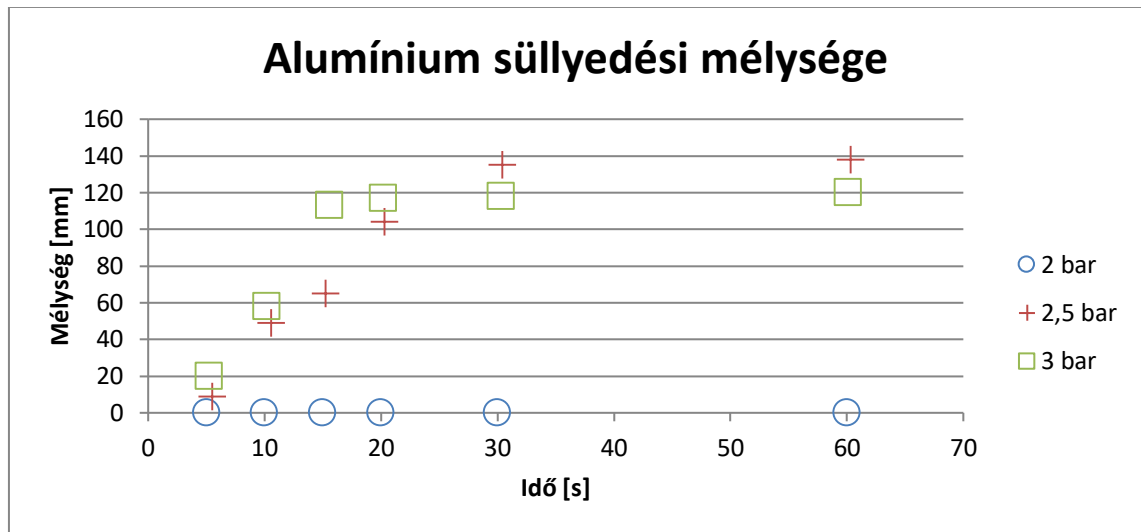
A mérésekből megállapítható, hogy a levegő hozzáadásával csökkent a testek mozgatásához szükséges húzóerő. A közeg alján a szükséges húzóerő nagyobb, mivel a testek fölött található közeg tömegét is le kell küzdeni. Az ágymagasság növelésével növekszik a szükséges húzóerő mértéke is.

4.4. Süllyedési mélység mérése:

A 3.2.5. fejezetben ismertetettek alapján megmértem a két anyag süllyedési mélységét. Mérési eredményeimet 49. és 50. ábra tartalmazza.



49. ábra: A réz süllyedési mélysége az idő függvényében (szerző saját szerkesztése)



50. ábra: Az alumínium süllyedési mélysége az idő függvényében (szerző saját szerkesztése)

A kísérletekből látható, hogy a 2 és a 2,5 bar nyomáson működik legjobban a berendezés. 2 bar nyomással az alumínium szemcse hosszú tartózkodási idő ellenére is az ágy felszínén maradt, a réz pedig már az első mérési ponton is süllyedni kezdett, majd tovább süllyedt. 2,5 bar nyomáson 5 és 10 s tartózkodási időnél a réz jelentősebb süllyedést mutatott, mint 2 bar nyomáson és az alumínium sem került túlzottan az ágy felszíne alá. 3 bar nyomáson a szétválasztás nem lenne eredményes, mivel az alumínium is lesüllyed. A süllyedési mélységekből és az időből számítottam süllyedési sebességeket, melyeket az 5. és 6. melléklet tartalmaz.

4.5. Vaspor eltávolítása a szemcsékből:

A mérési eredményeket a 7 és 8. melléklet tartalmazza. A kísérletekből levonható az a következtetés, hogy az erősen gyűrt, nagyméretű szemcsékből a vasport nagyon nehéz, vagy nem lehet eltávolítani. A nehezen eltávolítható vaspor tömege az alumínium szemcseméretével arányosan nőtt. A forgó dobnál, kellően nagy, illetve lapos szemcsék esetén megfigyelhető az a jelenség, hogy nem teljesül a malmoknál ismertetett eldobódás feltétele, így a szemcsék a malom falán csúsznak. Szintén nagy szemcsék esetén a szitaberendezés amplitúdója nem állítható túl nagy értékre, mivel a feladott szemcse pattogni kezd rajta, így megrongálhatja a szitabetétet.

5. Konklúzió

Ahhoz, hogy a fluidizációt vizsgálni tudjam, először az elméleti alapokkal kellett megismerkednem. Az elméleti alapok elsajátítása után, egy olyan fluidizációs berendezés megépítése volt a cél, mely képes stabil, jól működő fluidágyat létrehozni. A fluidizáló berendezéshez szükség volt egy mérőkörre, mellyel a beáramló levegő mennyisége mérhetővé vált.

A kísérleteket először kvarchomokkal kezdtem, azonban a sűrűsége nem bizonyult elég nagy ahhoz, hogy az eredményes szeparálás véghezvihető legyen. A következő anyag mellyel a vizsgálatokat végeztem a vas őrlemény volt. Az őrlemény fizikai tulajdonságainak meghatározására méréseket tettem, így sikerült megállapítani annak szemeloszlását, sűrűségét, halmazsűrűségét, porozitását és szemalakját.

Az őrlemény viselkedésének modellezéséhez FT4 típusú por reométert használtam. A mérésekhez szűk szemcseméret frakciókat állítottam elő, és különböző gépi paraméterek mellett méréseket végeztem. Fontos megjegyezni, hogy a vas őrleményhez hasonló szemcsesűrűségű anyaggal, a cirkon-oxiddal is el tudtam végezni ezeket a méréseket. A cirkon-oxid kedvezőbb tulajdonságokat mutatott a vas őrleménynél, mivel majdnem tökéletes gömb alakú szemcsékből áll.

A kísérleteket során ki kellett választani egy olyan szemcseméret frakciót, mellyel homogén örvényréteg hozható létre. Ezt a finom szemcsék $x < 150 \mu\text{m}$ szemcsék leválasztásával értem el. A megfelelő szemcseméret kiválasztása után már megállapítható volt egy olyan áramlási légsebesség, mellyel stabil fluidágyat lehetett előállítani.

Azt a tényt, hogy a fluidizáció végbement kihúzóerő-mérő cellával bizonyítottam. Levegő betáplálásával az anyagágyba jelentősen kisebb erő kellett a két próbatest kiemeléséhez, mint a levegő nélküli mozgatáshoz.

A kísérletek végső célja egy olyan anyagágy létrehozása volt mely képes alumínium és réz eredményes szétválasztására. Ezt két különböző nyomásértéknél, 2 és 2,5 bar-nál is sikeresen kiviteleztem, a nehezebb réz a közeg aljára süllyedt, a közeg felszínén, vagy annak közelében tartózkodik.

Mivel az ipari berendezésbe gyakran gyűrt szemcsék kerülhetnek feladásra, ezért vizsgálnom kellett, hogy a közeg finom szemcséi megragadhatnak-e bennük. A mérések

során arra jutottam, hogy a megragadás valóban bekövetkezik, ezen szemcsék eltávolítása pedig rendkívül nehéz feladat.

Kísérleteim során az alábbi megfigyeléseket állapítottam meg, az ipari berendezés kialakítására a következő javaslatokat teszem:

- Bár a finomabb szemcsefrakciók fluidizálásához kevesebb energia szükséges, a fluidizáció már kis többlet levegő hozzáadásával pneumatikus szállításba megy át
- A vaspör esetén nem figyelhető meg egyértelmű ágymagasság növekedés, a vas nagy sűrűsége miatt. A levegő nagyon kis mértékben duzzasztja meg a pórusokat és úgy távozik az anyagágyon keresztül
- Túlzott buborékképződés esetén előfordulhat, hogy a szétválasztandó szemcséket a közeg dobálni kezdi, ezzel rontva a szeparálást, vagy ellehetetleníteni azt.
- A fal mentén a fluidizáció egyenletesebb, mint a közepén, ezért érdemes lehet hengeres, vagy szabályos kocka alakú edényt kialakítani
- Mindenképpen érdemes a fenti kísérleteket a cirkon-oxidra is elvégezni. A cirkon-oxid a por reológia mérések során nagyon kedvező tulajdonságokat mutatott. A kés forgatásához jóval kisebb energia volt szükséges a szemcsék gömb alakja miatt, illetve a fluidállapot is könnyebben beállt. Ebből az a következtetés vonható le, hogy az ipari gép kaparószerkezetének működtetéséhez jóval kisebb energiára lesz szükség, illetve a láncok és kaparó pálcákat is sokkal kisebb teherbírásra kell méretezni.
- A gyúrt szemcsékben a vaspör könnyen megragad. A vaspör eltávolítása ezekből a szemcsékből elég nehéz feladat. Túl lapos szemcsék esetén a forgó dobban nem teljesül az eldobódás feltétele, így azok csak a dob falán csúsznak, ezért ha dobbal szeretnénk eltávolítani a megragadt szemcséket nagy kerületi sebességre lehet szükség. A laboratóriumi rezgőszítával végzett kísérletek során, azt állapítottam meg, hogy a túl nagy gyúrt szemcsék pattognak a szitán, ezzel hosszútávon rongálva azt. A megragadt szemcsék problémájának megoldására is szintén megoldást jelenthet a zirkon-oxid, mivel a gömb alakú szemcsék jóval könnyebben kijutnak a gyúrt anyagokból
- Összességében a fluidizációs technológia szeparálási célra jól alkalmazható. Ha a szétválasztandó anyagban nem lennének gyúrt szemcsék a vaspör is ideális lenne az alumínium és a réz szétválasztására. A cirkon-oxid viselkedésének vizsgálata új

lehetőségeket nyithat meg ennél a technológiánál. A berendezés tervezésénél ajánlatos a szakirodalom és a korábbi kutatási eredmények figyelembe vétele. A fluidágyas szeparátor a vizes nehézközeges technológiák alternatíváját jelentheti. A tervezési nehézségeket kárpótolja a környezetkímélő, olcsó működtetése.

6. Summary

To be able to investigate the process of fluidization, first I had to study the existing literature. After finishing studying the literature, my goal was to build a fluidization equipment which is able to maintain a stable, working fluidized bed in order to separate aluminum and copper particles. Furthermore, I developed a measuring system, which is capable of measuring the velocity of the supplied air.

I started my research using sand, but it seemed that sand doesn't have that high value of particle density, which is required for successful separation. I continued my experiments using iron powder. With different measurements I defined the physical properties of the powder. The properties include particle-distribution, particle density, bulk density, porosity and particle shape.

To model the behaviour of the iron powder, I used an FT4 type powder rheometer. For the measurements I prepared narrow particle fractions and worked with different machine settings each time. It is important to mention, that I was able to make measurements with zirconium oxide. This is a material which roughly has the same particle density as iron powder, but the shape of the particles are almost perfect spheres.

Before starting the separation process, first I had to choose the best particle fraction for homogeneous fluidization. Based on my experiences, I removed the fine particles under $x < 150 \mu\text{m}$. After choosing the right particle fraction, I was able to measure and calculate the required air velocity.

To check the quality of the fluidization I used a pull-force gauge. The required pulling force to pull the objects upward the bed was much smaller in the fluidized state, compared to the fixed bed.

The final goal of the experiments was to separate the aluminum and the copper with the fluidized bed. The separations I made with 2 and 2,5 bar air were both successful. The heavier copper sank to the bottom of the bed, while the aluminum floated on the top.

The industrial machine's feed likely contains wrinkled aluminium or copper particles. The iron powder could get stucked in those wrinkles, so I had to investigate this problem as well. With experiments I assured that it is an existing phenomenon. I tried to remove the stuck iron particles, with inconsistent results.

After finishing the experiments and measurements my observations are the following:

- Although the needed air velocity is smaller in case of fine particles, I still experienced dusting and pneumatic transport using these particles
- With the application of iron powder, I did not observe significant growth in the height of the bed.
- In case of intensive bubbling, the feed can be thrown around the bed, worsening the separation or making it completely impossible.
- The fluidization is smoother next to the wall of the vessel.
- It is recommended to continue the experiments using zirconium oxide because it has shown much better results with the FT4 powder rheometer. The energy required to rotate the tip was much smaller, because of the sphere shape of the particles. In addition, the fluidizing began with less air velocity. In the industrial machine it would take less energy for the scraper mechanism to operate. The chains and scraper wands would most probably take less load and force.
- In wrinkled aluminum or copper the iron powder gets stucked fairly easily. Removing the powder is a pretty difficult task. In case of too flat wrinkled particles, the drum can't throw it around, so they rather slide on the wall of the drum. This phenomenon is the reason why the method can only be operated on high peripheral speed. In case of using a laboratory sieve machine to remove the stuck particles the bigger wrinkled particles started to jump on the surface of the sieve, probably causing damage in the long run. The results should be better using zirconium oxide as bed material, because sphere particles shouldn't get stuck that easily and also they should be easier to remove.
- In total the fluidization technology is well suited for separation process. If the feed particles weren't wrinkled, the iron powder could be used for separating aluminum and copper. Investigation of zirconium oxide in this aspect could result in discovering great opportunities in this technology. While designing the industrial machine, thorough studies should be done on the existing literature. In the future fluidized bed separators can mean a better alternative of the current heavy medium separators, which use excessive amount of water. Designing a separator is a demanding task itself, but its low operating costs make it a lot more environmentally friendly method.

1.ábra: Gömb alakú szemcse ideális és valóságos körüláramlása Letöltve:
http://www.roymech.co.uk/Related/Fluids/Fluids_Drag.html 2019.05.01

Basu P.: Combustion and Gasification in Fluidized Beds. (CRC Press, Boca Raton, 2006)

D. Geldart: Types of gas fluidization (Powder Technology 7(5):285-292 · May 1973)

Daizo Kunii, Octave Levenspiel: Fluidization engineering

Fáitli József: Szemcsemozgás mérése és számítása nem-newtoni egy- és többfázisú

John H Lienhard; Synopsis of lift, drag, and vortex frequency data for rigid circular cylinders (Washington State University, 1966.)

Kállai Viktória, Mikáczó Viktória, Petrik Máté: Fluidizáció (Mérési segédlet, Miskolci Egyetem Vegyipari Gépészeti Intézeti Tanszék, 2013)

közegekben. (Bányászati és Kohászati Lapok. Bányászat, 2015. 3. szám, 2–9.)

Martin J. – Andrieu R.: Journée de fluidisation. 59-67 (Paris, Association Francaise de Fluidisation, 1956)

Max Leva: Fluidizáció (Műszaki Könyvkiadó, 1964)

Grohse, E. W.: AlchE Journal 1, 3, 358-365 (1955)

Morse, R. D., and Ballou, C. O., Chem. Eng. Progr. 47, 199 (1951)

Tarján Iván: A mechanikai eljárás technika alapjai : Részecskék és folyadék relatív mozgás (Miskolci Egyetem Eljárás technikai Tanszék, 1997)

Tarján Iván: Keverés : Szemcsés anyagok és folyadékok keverése (MEK, 2003)

Melléklet

Húzóerő mérése

1. Melléklet: 50 mm hosszú rúd, 4 mm átmérővel, 4,7g tömeggel. A beáramló levegő 0 bar

Ágymagasság [mm]	Töltet tömege [kg]	Rúd helyzete az edény aljától [mm]	Erő [N]	
50	7.2	0	2.35	1.85
		10	2.1	1.45
		20	1.8	1.35
		30	1.5	1.2
		40	0.9	1.0
		50	0.6	0.65
60	8.7	0	3.0	2.95
		10	2.65	2.7
		20	2.35	2.2
		30	1.95	1.65
		40	1.6	1.5
		50	1	0.9
		60	0.6	0.6

2. melléklet 50 mm hosszú rúd, 100 mm átmérővel, 9,51g tömeggel. A beáramló levegő 0 bar

Ágymagasság [mm]	Töltet tömege [kg]	Rúd helyzete az edény aljától [mm]	Erő [N]	
50	7.2	0	4.3	5.05
		10	3.8	3.9
		20	2.5	2.3
		30	2.0	1.9
		40	1.5	1.45
		50	1.0	1.0
60	8.7	0	6.15	5.05
		10	5.9	5.3
		20	4.8	4.3
		30	3.8	3.2
		40	2.1	2.3
		50	1.5	1.65
		60	1.0	1.0

3. melléklet 50 mm hosszú rúd, 4 mm átmérővel, 4,7g tömeggel. A beáramló levegő 3 bar

Ágymagasság [mm]	Töltet tömege [kg]	Rúd helyzete az edény aljától [mm]	Erő [N]	Ágymagasság [mm]	
50	7.2	0	3	0.95	0.8
		10		0.75	0.75
		20		0.6	0.6
		30		0.4	0.5
		40		0.4	0.4
		50		0.4	0.35
60	8.7	0	3	1.45	1.55
		10		1.3	1.45
		20		1.25	1.2
		30		1.05	1.05
		40		0.8	0.9
		50		0.7	0.65
		60		0.5	0.5

4. melléklet 50 mm hosszú rúd, 100 mm átmérővel, 9,51g tömeggel. A beáramló levegő 0 bar

Ágymagasság [mm]	Töltet tömege [kg]	Rúd helyzete az edény aljától [mm]	Erő [N]	Ágymagasság [mm]	
50	7.2	0	3	2.45	1.95
		10		1.8	1.7
		20		1.6	1.5
		30		1.35	1.35
		40		1.0	1.25
		50		0.85	0.7
60	8.7	0	3	3.35	2.75
		10		2.7	2.5
		20		2.3	2.0
		30		1.9	1.75
		40		1.6	1.5
		50		1.0	1.1
		60		0.85	0.75

Süllyedési sebességek:

5. melléklet: A réz süllyedési sebessége

Légnyomás [bar]	Szemcseméret [mm]	Tömeg [g]	Süllyedési mélység	Süllyedési idő [s]	Süllyedési sebesség [mm/s]	Átlagos süllyedési sebesség [mm/s]
2	25 x 26	22.46	34	5.31	6.40	3.16
2			36	10.44	3.44	
2			37	15.47	2.39	
2			52	20.18	2.57	
2			76	30.56	2.48	
2			100	60.38	1.65	
2.5			103	5.35	19.25	9.76
2.5			109	10.35	10.53	
2.5			157	15.41	10.19	
2.5			183	20.62	8.875	
2.5			192	30.47	6.301	
2.5			207	60.31	3.432	
3			112	5.22	21.46	11.26
3			151	10.18	14.83	
3			184	15.25	12.07	
3			186	20.57	9.042	
3			206	30.44	6.767	
3			207	60.00	3.45	

6. melléklet: Az alumínium süllyedési sebessége

Légnnyomás [bar]	Szemcseméret [mm]	Tömeg [g]	Süllyedési mélység	Süllyedési idő [s]	Süllyedési sebesség [mm/s]	Átlagos süllyedési sebesség [mm/s]
2	25 x 31	10.5	0	5	0	0
2			0	10	0	
2			0	15	0	
2			0	20	0	
2			0	30.45	0	
2			0	60.18	0	
2.5	25 X 31	10.5	9	5.50	1.64	3.72
2.5			49	10.56	4.64	
2.5			65	15.28	4.25	
2.5			104	20.31	5.12	
2.5			135	30.41	4.44	
2.5			138	60.34	2.29	
3			20	5.25	3.81	4.73
3			58	10.22	5.68	
3			113	15.60	7.24	
3			117	20.19	5.79	
3	118	30.34	3.89			
3			120	60.12	2	

Megszorult vaspár mennyisége és eltávolítása:

7. melléklet: Megszorult szemcsék eltávolítása laboratóriumi szitáló géppel

Szemcse frakció [mm]	Alumínium mérete [mm]	Alumínium eredeti tömege[g] A	Alumínium tömege 60s fluidágy után [g]	Adhézió [%] $\frac{B - A}{A} \cdot 100$	Szitálási idő [s]	Szitálás utáni tömeg [g]
5 – 12.5	20 x 15	1.32	1.5	14	5.13	1.34
	28 x 10	0.89	1.09	22	5.13	0.89
	26 x 11	1.72	1.84	7	5.13	1.72
12.5- 16	18 x 34	4.13	5.59	35	5.01	4.13
	32 x 16	2.14	3.12	46	5.21	2.14
	30 x 14	4.39	4.76	8	5.21	4.39
16 - 20	24 x 23	3.67	4.55	24	5.18	3.67
	26 x 17	5.08	5.43	7	5.18	5.08
	20 x 40	5.16	6.35	23	5.18	5.16
20 - 25	22 x 44	7.63	10.30	35	5.23	7.67
	37 x 31	8.93	11.01	23	5.04	8.93
	27 x 32	13.90	14.92	7	5.04	13.90
25 -31.5	30 x 46	17.73	29.08	64	5	17.75
	27 x 30	8.89	12.23	38	5	8.89
	39 x 29	10.34	16.69	61	5	10.34
	29 x 41	8.21	11.69	42	5	8.21
31.5- 40	53 x 70	23.34	40.80	75	4.82	23.34
	36 x 42	16.53	24.98	51	5.32	16.53
	45 x 62	8.93	11.52	29	5.26	8.93
40 - 56	55 x 69	27.67	30.58	11	5.25	27.67
	43 x 48	34.13	45.75	34	5.19	36.14
	77 x 50	39.93	43.37	8.6	5.13	39.93
56 - 75	78 x 81	203.18	218.07	7.3	4.93	203.18

8. melléklet: Megszorult szemcsék eltávolítása dobbal

Szemcse frakció [mm]	Alumínium mérete [mm]	Alumínium eredeti tömege[A	Alumínium tömeg]	Adhézió [%] $\frac{B - A}{A} \cdot 100$	Dob futási idő [s]	Dob utáni tömeg [g]
5- 12.5	20 x 15	1.32	1.71	29	5.19	1.35
					10.32	1.32
	28 x 10	0.89	1.17	31	5.26	1.07
					10.42	0.93
	26 x 11	1.72	2.11	22	5.30	1.75
					10.13	1.72
12.5-16	34 x 16	4.13	5.12	24	5.23	4.18
					10.34	4.16
	32 x 16	2.14	3.65	71	5.08	2.16
					9.78	2.16
	30.14	4.39	4.82	9.8	5.13	4.39
					10.24	4.39
16 - 20	14 x 23	3.67	4.46	22	5.05	3.81
					10.12	3.77
	26 x 17	5.08	5.84	15	5.0	5.27
					10.24	5.17
	20 x 40	5.16	5.38	4.3	5.33	5.33
					10.11	5.33
20 - 25	22 x 44	7.63	10.15	33	5.27	9.26
					10.51	8.03
	37 x 31	8.93	12.17	36	5.16	9.27
					10.43	8.96
	27 x 32	13.90	14.70	5.8	5.10	13.91
					10.18	13.90
25-31.5	27 x 30	8.89	13.60	52	5	10.02
					10	8.89
	30 x 46	17.73	23.27	31	5	18.02
					10	17.73
	39 x 29	10.34	14.96	44	5	10.81
					10	10.34
29 x 41	8.21	12.18	48	5	8.86	
				10	8.21	
31.5-40	70 x 53	23.34	35.15	50	5.33	25.25
					15.37	24.28
	36 x 42	16.53	27.67	67	5.31	19.73
					14.65	16.55
	45.62	8.93	11.33	26	5.27	10.41
					15.57	8.95
40 - 56	55 x 69	27.67	31.04	12	5.69	28.16
					15.89	27.90
	43 x 48	34.83	44.95	29	5.19	37.04
					15.09	35.73
	77 x 50	39.93	47.45	18	5.33	43.2
					10.12	39.93
56-75	78 x 81	203.18	217.15	6.8	5.30	212.88
					15.19	204.61

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném köszönetemet kifejezni azon személyeknek, akik a szakdolgozatom elkészítése során segítségükkel támogattak.

Elsősorban köszönetet mondanék konzulenseimnek Dr. Nagy Sándor és Dr. habil. Fajtli József Tanár Úrknak a folyamatos útmutatásért, lektorálásért. Mindig készségesen segítettek akár konzultációs időn kívül is.

Köszönöm Dr. Rácz Ádám Úrnak a segítséget a por reológiai mérésekben, illetve kiértékelésükben.

A mérések során rengeteg segítséget kaptam Trinh Quyên tanszéki PhD-hallgatótól, hálás köszönet érte.

Ha a mérések során műszaki problémák adódtak az intézeti műhelycsarnok dolgozói bármikor szívesen segítettek. Köszönöm a segítséget

Köszönetet szeretnék még mondani mindenkinek, aki tanulmányaim során segített rajtam, Szabó Roland PhD-hallgatónak, barátaimnak, csoporttársaimnak.

Végül, de nem utolsó sorban hálás köszönet családomnak, mert mindig mindenben támogattak. és mellettem álltak. Nélkülük ez a dolgozat nem jöhetett volna létre.