SZÜCS BOTOND

TDK DOLGOZAT

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

ENERGETIKAI GÉPEK ÉS RENDSZEREK TANSZÉK

TDK DOLGOZAT

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
ENERGETIKAI GÉPEK ÉS RENSZEREK TANSZÉK

SZÜCS BOTOND

TDK DOLGOZAT

SRF szemcsék vertikális elhelyezkedése fluid ágyban

Témavezető:

Dr. Szentannai Pál

tanszékvezető-helyettes, egyetemi docens
Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék

Budapest, 2016

Szerzői jog © Szücs Botond, 2016

NYILATKOZATOK

Nyilatkozat az önálló munkáról

Alulírott, *Szücs Botond*, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírásommal igazolom, hogy ezt a TDK dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2016. december 15.

TDK hallgató

Tartalom

1. Előszó ... 1

2. Aktív szemcsék vertikális elhelyezkedésének jelentősége különböző fluidágyas konverziós eljárások során ... 2

2.1 Gyors pirolízis fluidágyas reaktorokban ... 2

2.2 Fluidizációs tüzelés ... 3

3. A vertikális elhelyezkedés mérésére alkalmas kísérleti módszerek ... 4

3.1 Mágneses elven történő vizsgálat ... 4

3.2 UV reagens alkalmazása ... 4

3.3 Mintavételező dobozok alkalmazása ... 5

3.4 Az általam alkalmazott vizsgálati módszer ... 5

4. A mérési és kiértékelési rendszer megtervezése ... 11

4.1 A vizsgálandó tüzelőanyag minta ... 11

4.2 Az alkalmazott SRF minta részleges illótlanítása ... 13

4.3 A kvarchomok ágyanyag vizsgálata szemcseméret eloszlás szerint ... 14

4.4 A kvarchomok ágyanyag minimális fluidizációs gázsebességének meghatározása ... 16

4.5 Az eloszlási mérések tervezett menete ... 19

5. Az elvégzett mérések eredményei és kiértékelésük ... 21

5.1 Normalizált tömegek megjelenítése ... 21

5.2 Különböző keveredési számok meghatározása ... 23

5.2.1 A Kramer-féle keveredési szám ... 23

5.2.2 A Nienow-féle keveredési szám ... 25

5.3 A tüzelőanyag szemcsék felület szerinti kiértékelése ... 26

6. Összefoglalás ... 28

7. Zárás ... 29

8. Summary ... 30

Hivatkozások ... 31

1. Előszó

A fluidizációs technológia fejlődésével számos új lehetőség nyílik meg a mérnökök számára, a lehetőségek viszont természetesen új problémákat indukálnak, újabb kérdéseket vetnek fel. Ezeket kell megoldani, ezekre kell választ adnia a szakmának, annak érdekében, hogy az elvárt fejlődés fenntartható és folytonos legyen.

Ez a folytonos megújulás, a megújítás igénye fokozottan megfigyelhető az én leendő szakmám, az energetika területén is. Az ipari forradalom hajtóerejét a fosszilis energiahordozók képezték, s bár bányászatuk terén is jelentős fejlődés figyelhető meg, ma már egyértelműen korlátos forrásnak tekintendőek. A fokozatosan kimerülő fosszilis készleteink, valamint a növekvő környezetszennyezés új technológiák kifejlesztésére sarkallják a szakembereket. Szükségessé válik egyrészt rossz minőségűnek ítélt, régen tüzelhetetlennek hitt tüzelőanyagok alkalmazása is. Természetesen ez a hagyományos tüzelőeljárásokkal elképzelhetetlen lenne. Továbbá a mára központi kérdéssé váló környezetszennyezést is minimalizáló eljárások kerülnek előtérbe.

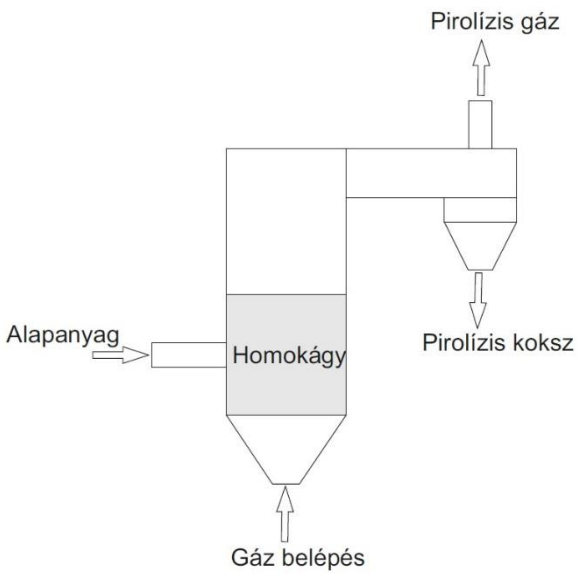
Ennek szellemében a **fluidizációhoz** kötődően is útkereső kísérletek, problémamegoldások jelentenek kihívást.

2. Aktív szemcsék vertikális elhelyezkedésének jelentősége különböző fluidágyas konverziós eljárások során

A fluidizációs eljárásokat az ipar számos területén alkalmazzák kiváltképpen a vegyiparban és az energetikában. A jelenség felfedezését Fritz Winklernek tulajdonítja a tudománytörténelem, aki kokszszemcséket tartalmazó halmazt alulról füstgázzal járatott át, és annak lebegését tapasztalta. A felfedezése megteremtette az első fluidágyas szén elgázosítót, amelyet később szabadalmaztatott is. Azóta kiterjedten alkalmazzák ezt az elgázosító eljárást különféle mezőgazdasági és egyéb hulladékok hasznosítására.

2.1 Gyors pirolízis fluidágyas reaktorokban

A pirolízis (hőbontás) alatt szerves anyagoknak szabályozott körülmények közötti kémiai lebontását értjük. A gyors pirolízist megvalósító eljárás során buborékos fluidágyat alkalmaznak, melynél a fluidizáló gáz részben vagy teljesen oxigénmentes (pl.: nitrogéngáz). A fluidágyat kvarchomok alkotja. Az így kialakított fluidágyas reaktort először 500-600 ^{o}C-ra hevítik, majd a pirolizálni kívánt szerves hulladékot közvetlen az ágyba adagolják. A hulladékból kilépő gázok, gőzök alkotják a később hasznosítható pirolízis gázt. A szerves hulladékokból hátramaradt szilárd végtermék, a pirolízis koksz pedig az ágyban marad. A folyamat fenntarthatósága miatt el kell választani az ágyanyagul szolgáló kvarchomokot a keletkezett pirolízis koksztól. Ennek érdekében olyan gázsebességet kell alkalmazni, hogy a két anyag keveredése minimális legyen. Gyu et al (1) Amikor a pirolízis koksz az ágy felett



1. ábra Gyorspirolízist megvalósító fluidágyas reaktor

helyezkedik el a reaktorból való eltávolítása egyszerű. Az *1. ábra*-n látható összeállítás szerint a koksz a pirolízis gázzal távozik a fluidágyas reaktorból, majd egy ciklonon keresztül kerül leválasztásra.

2.2 Fluidizációs tüzelés

A fluidizációs tüzelés során a tüzelőanyag beadagolása az ágy felett történik. Az elgázosítóval ellentétben itt a lehető legjobb keveredés biztosítására kell törekedni. Ennek ismerete ipari szempontból hasznos lehet, hiszen számos üzemzavar elkerülhető, ha az üzemi paramétereket gondos laboratóriumi vizsgálatok során határozzuk meg.

Alapvetően két kedvezőtlen jelenség jöhet létre a tüzelőanyag eloszlását illetően. A tüzelőanyag az ágy alsó részébe „süllyed". A hő jelentős része egy kicsi térfogatban kerül felszabadításra, ezzel lehetőséget teremtve a NO_x képződésére. Továbbá nagyobb hőterhelést jelent a kazán alsó részére, amely szélsőséges esetben a fúvókák megolvadásával vagy az ágyanyag összeégésével járhat. A másik esetben a tüzelőanyag úgymond „felúszik" az ágyanyag tetejére. Ekkor a hőfelszabadítás az ágy felső részében történik, ezzel a kazán felsőbb részei a tervezési értéknél nagyobb hőterhelést kaphatnak, továbbá nem érvényesülnek a fluidizációs tüzelés nyújtotta előnyök: ismét megjelennek a termikus nitrogén-oxidok, az ágyanyag hőmérséklete lecsökken. Szélsőséges esetben stabilitási problémák is felléphetnek. A tüzelőberendezés megóvása és a folyamatos üzemvitel biztosítása végett fontos, hogy elkerüljük ezeket a kellemetlen jelenségeket.

Amennyiben egyfajta és összetételét tekintve homogénnek tekinthető tüzelőanyagot kell hasznosítanunk, (tisztán faapríték vagy széntüzelés stb.) az elkeveredés vizsgálata egyszerűbbnek mondható, mint azokban az esetekben, amikor egyfajta, de inhomogén összetételű tüzelőanyagunk van (pl.: SRF). A legbonyolultabbá akkor válik a helyzet, amikor többfajta tüzelőanyagot égetünk együtt, és ezek aránya az egyes üzemállapotokban változhat.

A fluidizációs tüzelést számos esetben alkalmazzák együtt-tüzelésre, ilyenkor ipari, mezőgazdasági vagy háztartási hulladékokat tüzelnek szén és faapríték kiegészítéssel. Így szükségesnek mondható egy olyan vizsgálati módszer, amellyel változatos összetételű tüzelőanyagok eloszlását lehet vizsgálni.

3. A vertikális elhelyezkedés mérésére alkalmas kísérleti módszerek

Ismereteim szerint eddig három, alapvetően különböző módszert dolgoztak ki a tüzelőanyag eloszlásának vizsgálatára. Ezeket foglalnám össze az alábbiakban.

3.1 Mágneses elven történő vizsgálat

Egy mágneses elven történő szemcselekövetést használt Anna Kohler a svédországi Chalmers Műszaki Egyetemen, mely során a tüzelőanyag-szemcséket egy jól mágnesezhető vas-nikkel ötvözettel tették „láthatóvá" a kísérleti berendezés körül elhelyezett szenzorok számára. Így 3D-s képet lehetett alkotni az ágyban történő eloszlásról. Emellett valós időben is lekövethető volt a szemcsék ágyban történő mozgása. Anna Köhler, et al. (2)

3.2 UV reagens alkalmazása

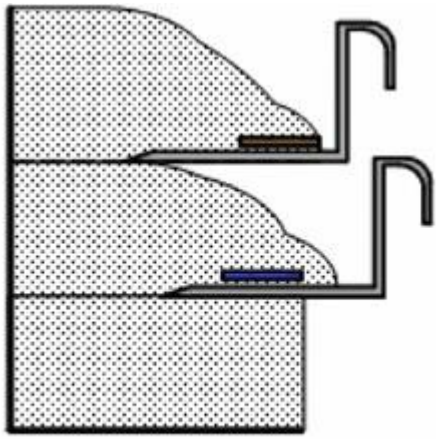
A másik módszert Filip Johnsson alkalmazott. A tüzelőanyag (szén-) darabokat UV reagens anyaggal helyettesítette, amely darabok geometriai tulajdonságaikat tekintve összeegyeztethetők voltak a széndarabokéval, Az ágyba juttatva, és egy erős UV lámpával megvilágítva láthatóvá váltak a szemcsék. Az ágyban történő elhelyezkedésüket egy speciális kamerával rögzítették (*2. ábra*). Filip Johnsson, et al. (3)

2. ábra UV fénnyel végzett vizsgálat (3)

Ezek az eljárások jól alkalmazhatóak homogén és ismert tulajdonságú, ezért szimulálható tüzelőanyagok esetén. Viszont a tüzelőanyag-darabok láthatóvá tétele érdekében be kell avatkozni, speciális darabokat kell használni.

3.3 Mintavételező dobozok alkalmazása

A függőleges eloszlás vizsgálatához Zhang et al. (4) úgynevezett mintavételező dobozokat használt (3. ábra3. ábra A Zhan- féle mintavételező dobozok). A homokágyat három egyenlő részre osztotta fel. Az általa vizsgált biomassza a gyapotnövény szára volt. A mérések menete a következő volt: a tüzelőanyag ágyanyag keveréket a mérési pontnak megfelelő fluidizált állapotba juttatta, ezután 20 perc várakozás következett, amíg a fluidizált állapot állandósulttá vált. Ezt követően a fluidizációt megszüntette, majd a 3 egyenlő részre osztott ágyba bekerültek a mintavételező dobozok, amellyel kiemelte az egyes részekben lévő gyapotszár ágyanyag keveréket. A biomassza és a homok elválasztása szitálás segítségével történt. Az eloszlás és a fluidizációs gázsebesség közötti összefüggések meghatározásán túl az eloszlás bekeverési aránytól való függésével is foglalkozott. Az utóbbi esetben, nem volt észrevehető különbség az eloszlási képben, tehát az eloszlás alakulása nem függ az alkalmazott bekeverési aránytól.



3. ábra A Zhan- féle mintavételező dobozok (4)

3.4 Az általam alkalmazott vizsgálati módszer

Én egy SRF (Solid Recovered Fuel) nevű tüzelőanyag vizsgálatát tűztem ki célul, amelyhez leginkább a 3.3 fejezetben bemutatott eljárás alkalmas, hiszen a tüzelőanyag annyira változatos összetételű, mind méretben, mind anyagát tekintve, hogy nem lehet minden egyes összetevőnek megfelelő helyettesítő darabot találni, valamint mágnesessé tételük sem tűnt megvalósíthatónak úgy, hogy ne változtassuk meg a minta viselkedését.

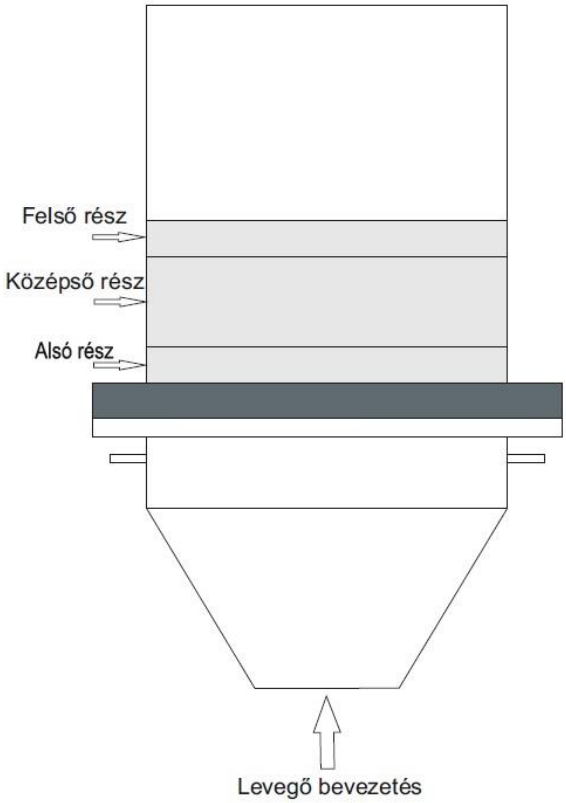
Több lehetőséget vizsgálva a legmegfelelőbbnek az tűnt, ha az ágyat részekre osztom, és az egyes részekbe jutó tüzelőanyag-darabokat külön-külön vizsgálhatóvá teszem.

Három részre osztottam a 10cm magas ágyat az alábbiak szerint (*4. ábra*):

1. alulról 2cm-es magasságig: alsó rész
2. 2-8cm-es magasságig: középső rész
3. 8-10cm-es magasságig: felső rész

Ez a felosztás azon az alapfeltevésen nyugszik, hogy az ágyon belül jó keveredés és megfelelő hőátadás biztosított, tehát az, hogy pontosan az ágyon belül hogyan oszlik el ipari alkalmazás szempontjából, nem releváns. Fontos elvárás volt továbbá, hogy az egyes részekben megjelenő tüzelőanyag-mintákat több vizsgálatnak is alá lehessen vetni a későbbiekben (pl.: szemcseméret-eloszlás, fűtőérték stb.)

Az eljárás során a fluidizált homokágyba tüzelőanyag-mintát juttattam, majd miután elhelyezkedtek a darabok a nekik megfelelő térrészben, a fluidizációt biztosító levegőt hirtelen elvettem, ennek hatására az ágy összeesett. Miközben a tüzelőanyag-darabok az ágy azon részeibe ragadnak, ahol fluidizáció során elhelyezkedtek, alumíniumlemezekből



4. ábra A mérési elrendezés elvi ábrája

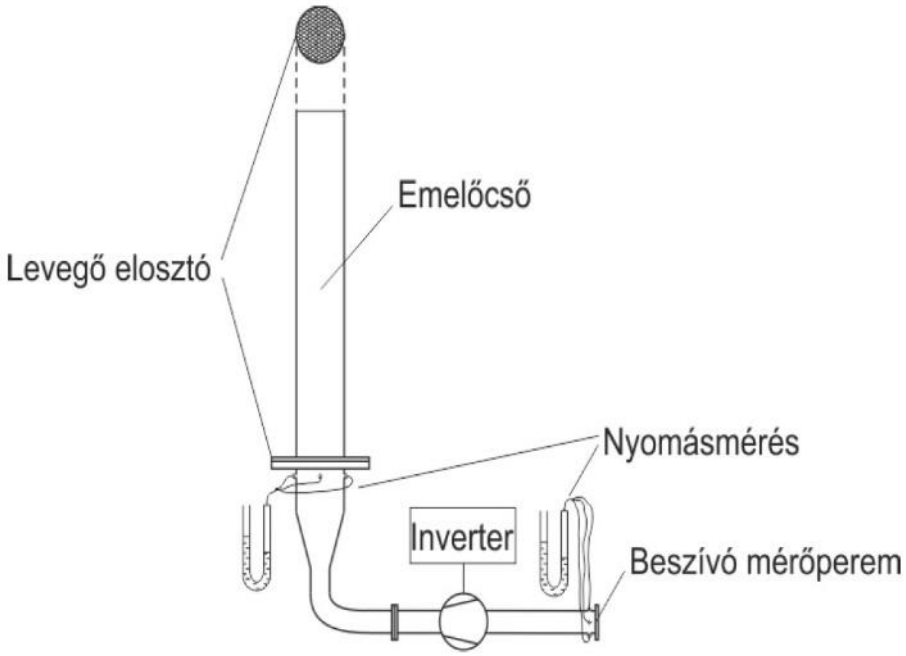
kivágott elválasztó elemekkel az ágyat a fent említett három részre osztottam. Ezután a három részben lévő tüzelőanyag és homok keveréket külön-külön kiemeltem. Egy szita segítségével a homokot elválasztottam a tüzelőanyag-daraboktól. Így az egyes részekben

felhalmozódott tüzelőanyag-darabok láthatóvá és (megőrizve) számos vizsgálatnak alávethetővé váltak.

Ezen eljárás nem igényel beavatkozást a tüzelőanyag-mintába, és több különféle vizsgálatot tesz lehetővé az egyes részekben felhalmozódott darabokkal. Ugyanakkor a vizsgálatot csak diszkrét pontokban lehet végezni, nem kapunk egy folytonos képet a tüzelőanyag-eloszlás változásáról. Viszont alkalmas arra, hogy ha lenne egy folytonos eloszlást leíró modellünk, azt ellenőrizni tudjuk. Távolabbi céljaink között ilyen modell kifejlesztése is szerepel, mert az irodalom ilyet nem ismer, ipari jelentősége viszont nagyon nagy lenne. Ezt a hátrányt tompítja, hogy az iparban is főképpen állandósult üzemállapotok vannak, amelyek diszkrét pontokkal is jól jellemezhetők. Valamint előnyt jelent, hogy a mintákat a későbbiekben egyéb sokrétű vizsgálatnak lehet alávetni. Az általam alkalmazott vizsgálati módszer a Zhang-féle mintavételező dobozokhoz sorolható be.

Ezt követően nem állt más előttem, mint a meglévő tanszéki hideg fluidizációs berendezést úgy átalakítani, hogy a kigondolt vizsgálati módszer megvalósítható legyen rajta.

A tanszéki hideg fluidizációs berendezéssel (*5. ábra*) már volt szerencsém dolgozni. Ugyanakkor ahhoz, hogy az általam elgondolt vizsgálati módszert alkalmazni tudjam,



5. ábra A mérőberendezés összeállítása

jelentős átalakításokat kellett eszközölnöm. Továbbá célom volt, hogy az ideiglenes megoldásokat, amelyek sokszor megnehezítették a mérés lefolytatását, véglegesekre cseréljem. Egy időtálló berendezést szerettem volna készíteni, amelyet adott esetben mások

is hasznosítani tudnak, akik a tanszék munkájában részt vesznek. Fontos szempont volt továbbá, hogy ne veszítsen a funkcióiból az eszköz, tehát azokat a méréseket, amiket eddig is, a későbbiekben is el tudjuk végezni.

Maga a fluidizáció egy 200mm átmérőjű plexicsőben zajlik (*6. ábra*). Annak érdekében, hogy az elválasztó elemek behelyezhetők legyenek, az átmérőnek nagyjából feléig fémfűrésszel bevágtam a megfelelő magasságokon. Ezeket a bevágásokat fluidizálás közben könnyedén lehetett tömíteni, akár egy vékony celluxcsíkkal is, így a vizuális hatást nem rontotta. A fluidizációt követően pedig a celluxot átszakítva behelyezhetők lettek az elválasztó elemek.

6. ábra Az emelő cső a fúvókákkal

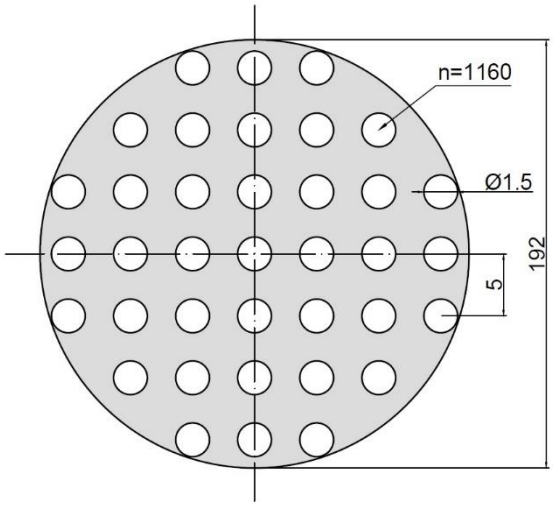
Az elválasztó elemeket alumíniumlemezből vágtam ki, úgy, hogy 200mm-es kör lapokat alkossanak, amelyek megfelelően elzárják az ágy egyes részeit. Egy kis „fogót” is kialakítottam rajtuk, hogy a kezelésüket megkönnyítsem.

A fúvókákat (*7. ábra*) egy vékony plexilemezbe fúrt lyukak sokasága képezte. Ezt az elemet mindenképpen szerettem volna megőrizni. Az ilyen kialakítású fúvókák hátránya, hogy a homok vissza tud folyni a diffúzor elembe. Ezt a hatást kiküszöbölendő kiálló oldalról megfúrt fúvókákat alkalmaznak. Ugyanakkor a rövid kísérleti idő miatt ez a jelenség itt nem volt számottevő, viszont a plexicső vízszintes elmozdíthatóságát gátolták volna a kiálló fúvókák.

A diffúzor, ami a 100mm-es levegővezeték és a 200mm-es plexicső között biztosítja a kapcsolatot, számos tömörtelenséget mutatott, különösen a fúvókáknál lévő illesztésnél. A tömörtelenségek megszüntetésére és a megfelelő stabilitás érdekében a konfúzort két bútorlap közé fogattam. Így könnyedén ki lehetett tömíteni szilikon alapú ragasztóval. A

felső bútorlap másik oldalára ragasztottam a fúvókákat. Így a tömítés biztosítva volt, és megfelelő stabilitásúvá vált az összeállítás.

A plexicsövet, hogy vízszintesen elmozdíthatóvá tegyem, nem közvetlenül az állványra rögzítettem, hanem két sínre szerelt deszkához fogattam hozzá. Így a plexicső vízszintes irányba a deszkával együtt elmozdítható volt a sínek mentén. Erre azért volt szükség, hogy az elválasztó elemek behelyezése után a minták kivétele egyszerűen lebonyolítható legyen. A sínek mentén a fúvókák fölül elcsúsztatva egy 200mm-es furat fölé lehet emelni a csövet.



7. ábra A fúvókák kialakítása

A furat alá a mintagyűjtő edényt helyezve az egyes részek tartalma a mintagyűjtőkbe esett. Először a legalsó, majd az edényt kicserélve és az elválasztó elemet kihúzva a középső következett. Végezetül a harmadiknak odahelyezett edénybe a felső elválasztó elemet kihúzva az utolsó minta is levehető volt.

A fúvókák és a plexicső közötti tömítés kialakítása nehézségeket okozott. Ugyanis erre a helyre oldható tömítést kellett, hogy tegyek, nem lehetett összeragasztani. Ennek érdekében segítséget kértem. Egy bútorlapból kiesztergált karima jellegű eszközt készítettek nekem, amely 2 darabból állt, és összeillesztve egy olyan belső átmérőjű furat lett, ami pont a plexicső külső átmérője volt. Ezt a két darabot, amely közrefogta a tömítendő plexicsövet, könnyen oldható szárnyas anyákkal rögzítettem a fúvókákhoz. A fúvókák és a karima közé gumilapból tömítő gyűrűt vágtam ki. Valamint a plexicső karimákba „süllyedő” részét szigetelő szalaggal körbetekertem a megfelelő tömítés érdekében. A szárnyas anyákat megszorítva vízszintes irányba a gumitömítő-gyűrű, függőleges irányba pedig a plexicsövön lévő szigetelő szalag tömített. Ezáltal sikerült olyan tömítést alkalmaznom, amely

megbízható volt a fluidizálás során. Ugyanakkor könnyen oldható volt, amikor a mintákat le kellett venni, és a plexicsövet el kellett mozdítani a fúvókák fölül.

A mérést nem befolyásolta ugyan, de kellemetlen volt, hogy a megfelelő fluidizációs sebesség elérésével a homok könnyű frakcióját „kifújtuk” a plexicsőből, és a csarnokban szétszórtuk. Ennek érdekében a plexicső tetejére egy T idomot helyeztem függőleges helyzetben. A T idom tetejére egy elzáró elem került (*8. ábra*). Az oldalsó ágába pedig egy

8. ábra A kész berendezés

gumicső, amely egy zsákban ért véget. Így sikerült a kifújt homokot egy zsákba terelni úgy, hogy ne okozzon kellemetlenségeket. A tapasztalatok azt mutatják, hogy BFBC esetén ez az elrendezés jár a legkevesebb kihordással, és azt a keveset is megfelelő helyre tudtam juttatni. A T idom felső elzáró elemét levéve pedig könnyen behelyezhető volt az ágy- és a tüzelőanyag. Majd a behelyezést követően az elzáró elem visszakerült a helyére.

Az alkalmazott ventilátort egy frekvenciaváltó segítségével szabályoztam, hogy mindig a megfelelő gázsebességet lehessen beállítani. A gázsebesség meghatározásához a ventilátor szívó oldalára egy beszívó mérőperemet helyeztem. A mérőperem nyomáseséséből meghatározható a beszívott levegő térfogatárama. Ennek ismeretében könnyedén kiszámolható a plexicső belső átmérője segítségével, hogy mekkora az átlagos légsebesség.

Ez a sebességmérési módszer tekinthető a legpontosabbnak és legegyszerűbbnek, hiszen nem kell felvenni a csőben a sebességprofilt több pontban egy anemométer segítségével. Csak egy nyomásértéket kell leolvasni, és ügyelni, hogy ne szökjön el a rendszerből a levegő, ugyanis ebben az esetben kevesebb térfogatáram jutna a plexicsőbe, tehát a valós sebesség is kisebb lenne, mint amit a mért térfogatáramból számítunk.

A berendezésen két nyomásmérő található. Az egyik a gázsebesség meghatározásához a beszívó mérőperemen lévő nyomásesést méri. A másik pedig a fúvókák alatti nyomásmegcsapolásra van kötve, ami az ágyon lévő nyomásesést méri.

Ezt követően az összeállítással (*8. ábra*) több tömörségi tesztet hajtottam végre. Maximális légsebességen, homok nélkül és homokkal is. Miután nem tapasztaltam szivárgó levegőt, minden készen állt, hogy a méréseket megkezdjem.

4. A mérési és kiértékelési rendszer megtervezése

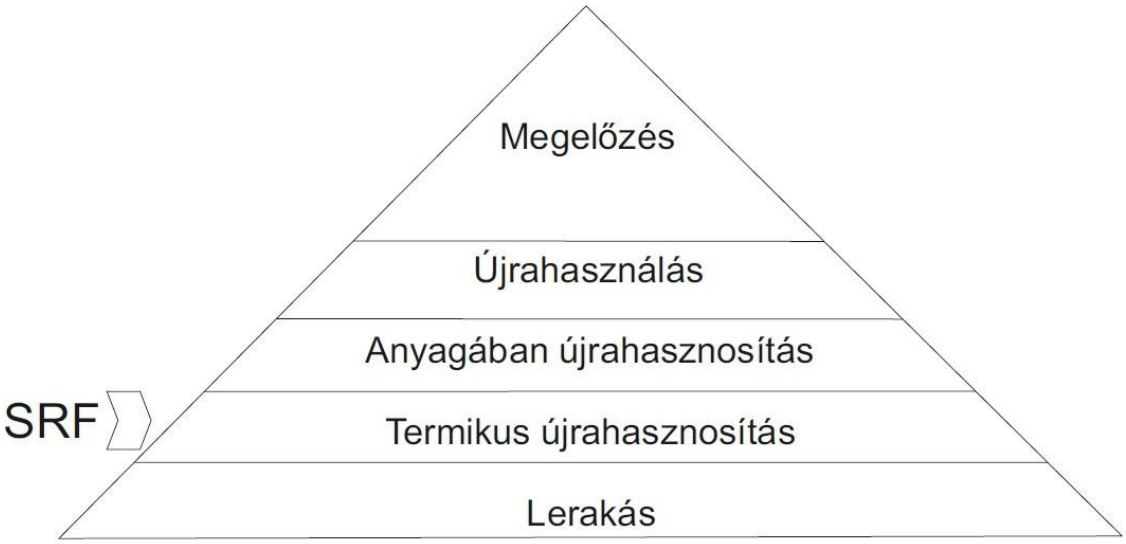
Az alábbi fejezetben bemutatásra kerülnek az SRF eloszlási mérések megkezdéséhez nélkülözhetetlen előkészítő vizsgálatok. Kiindulási pontként a tüzelőanyagról, annak előállításáról és felhasználásáról gyűjtöttem információkat. Az eloszlási méréseket két fő mérési változó szerint végeztem, az ágyanyagul szolgáló kvarchomok közepes szemcseméret átmérője, illetve az alkalmazott fluidizációs gázsebesség szerint. Az ehhez szükséges előkészítő méréseket mutatja be a 4.2 és a 4.3 alfejezet.

4.1 A vizsgálandó tüzelőanyag minta

A mérések középpontjában egy kommunális hulladék alapú tüzelőanyag, az SRF (Solid Recovered Fuel, (*9. ábra*) állt. Már a mérőberendezés kialakításánál is figyelembe kellett venni ennek a tüzelőanyag fajtának a sajátosságait. A tüzelőanyag létjogosultsága abban keresendő, hogy számos hulladék nem hasznosítható anyagában újra, ezért eggyel lejjebb lépve a „hulladék piramison” (*10. ábra*) a termikus hasznosítás válik szükségessé, annak érdekében, hogy a környezetre igen káros hulladéklerakás elkerülhető legyen.

9. ábra Az SRF minta

Ugyanakkor alacsony népsűrűségű területeken a begyűjtési terület olyan nagy lenne, hogy nem lenne gazdaságos egy égetőmű építése, hiszen a hulladék szállításának energiaigénye összemérhető lenne az abból kinyerhető energiával. A szállítás gazdaságossá tételéhez növelni kell az a tüzelőanyag energiasűrűségét. Ennek szellemében a háztartási hulladékból az inert anyagokat (üveg, fém stb.) leválasztva és az éghető darabokat megfelelő méretűre aprítva készül el az SRF, melynek az energiasűrűsége kedvező, és így a szállítása nagy távokon is gazdaságos.



10. ábra A hulladék piramis

Változatos összetétel jellemezi, megtalálható benne a háztartásban előforduló éghető hulladékok szinte minden fajtája. Különböző szövetdarabok, papír- és gumimaradékok, illetve sokféle műanyag az egészen vékony nejlon maradványoktól a vastagabb műanyag törmelékig széles skálán mozog az összetétel. A változatos összetételből adódóan számos kérdés merülhet fel az SRF fluidágyas hasznosításakor. A legfontosabb kérdés, hogy biztosítható-e ezen változatos daraboknak az együttes fluidizációja, és a megfelelő ágyanyaggal való elkeveredése Hazánkban például a Gödöllői hulladékfeldolgozó

foglalkozik SRF előállításával. A termelésük éves szinten nagyjából 10 000 t-át tesz ki. A felvásárlók között magyarországi cementgyárak szerepelnek. Kereskedelmi forgalomban lévő SRF-et fluidizációs technológiával Magyarországon jelenleg nem hasznosítanak. Ennek oka a hulladékfeldolgozás fejletlenségében keresendő. Az égetés mellett az elgázosító és különböző pirolízist megvalósító eljárásokra is számos nemzetközi példa van. Ugyanakkor egy SRF-hez hasonló anyagot hasznosít a dunaújvárosi papírgyár nemrégiben átadott CFBC erőműve (*11. ábra)*. A rejektnek nevezett anyag a papírgyártás melléktermékeként keletkezik, így az kereskedelmi forgalomban nem jelenik meg. Az SRF -et sokszor együtt-tüzeléssel hasznosítják. Számos fluidizációs erőműben a tüzelőanyag keverék egyik összetevője egyéb ipari hulladékok mellett (pl.: szennyvíziszap). Jellemzően

11. ábra Rejektet is hasznosító CFBC erőmű

5-50 MW_e teljesítménytartományú erőművekben szerepel a tüzelőanyag keverék részeként a következő országokban: Spanyolország, Svédország, Ausztria és Olaszország.

Összességében kijelenthető, hogy az SRF fluidizációs tüzelési technológiával történő hasznosításra található példa, ugyanakkor a különböző elgázosító eljárásokat is számos esetben alkalmazzák.

4.2 Az alkalmazott SRF minta részleges illótlanítása

Az SRF tüzelőanyag a műanyag tartalmának köszönhetően magas illótartalommal rendelkezik. Ugyanakkor az illó tartalom jelentős része tüzelési körülmények között nem az ágyban ég ki, hanem afelett. Mivel az esetek döntő többségében a tüzelőanyag-adagolás az ágy felett történik, a tüzelőanyag darabok az ágyba hullás során veszítenek illó tartalmukból. Ennek pontos mértéke a kazán típusától és az aktuális üzemállapottól függően változhat. Annak érdekében, hogy az üzemi körülményeket minél jobban figyelembe vegyük a vizsgált

SRF mintákat részleges illótlanításnak vetettük alá, mely során 250 ^{o}C-on hevítettük 10 percen át.

4.3 A kvarchomok ágyanyag vizsgálata szemcseméret eloszlás szerint

Ahogyan az előző alfejezetben láthattuk a vizsgálandó tüzelőanyag minta összetétele inhomogenitást mutat. Ebből kifolyólag célszerűnek látszott minden más tekintetben szűkíteni a kiértékelést megnehezítő inhomogenitásokat, tehát az alkalmazott ágyanyag minél szűkebb szemcseméret tartományba essen, és azt a tartományt a mérések megkezdése előtt pontosan megismerhessük. Ennek a precizitásnak elsősorban az eloszlás ágyanyagtól való függésének vizsgálatakor lesznek fontosak. De minden esetben célszerű az ágyanyag pontos ismerete. A kereskedelemben kapható kvarchomokok sajnos igen tág, általában 5-600µm-t meghaladó szemcseméret tartományba esnek (pl.: KH 100-600). Hogy ezeket a tartományokat megfelelően leszűkítsük, egy külsős labor segítségével a homokot leszitáltattuk. A szitasornak köszönhetően jelentősen leszűkült az alkalmazott homokok szemcseméret tartománya. A rendelkezésre álló sziták szerint 3 féle ágyanyag állt elő:

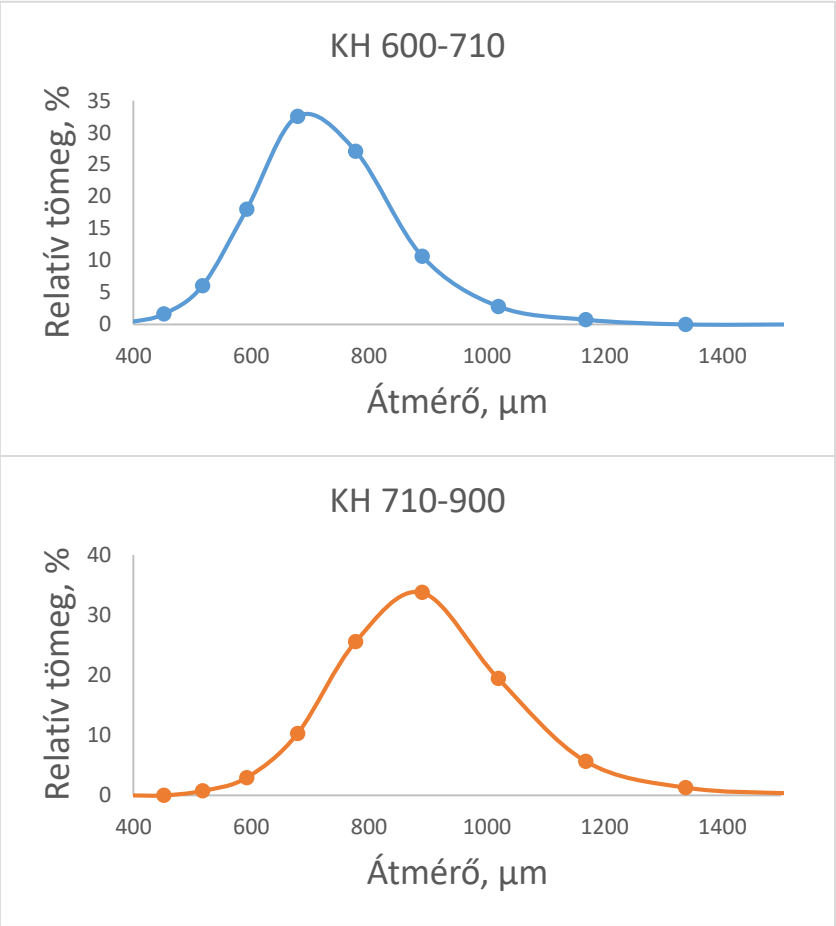
1. KH 600-710, finom
2. KH 710-900, közepesen finom
3. KH 1000-1400, durva

A KH rövidítés a kvarchomokra utal, míg a szám a szemcseméret tartomány szélső határait jelöli mikrométerben. A tartomány szélső határa tulajdonképpen a sziták rés átmérőiből adódik ki. Tehát a 600 µm-es szitán fellelt, de a fölötte lévő 710 µm-esen még átesett homok alkotja az 1. mintát. Ezt követően, hogy a szitálás sikerességéről és a homokok tartományon belüli megoszlásáról megbizonyosodjunk, részletes szemcseméret elemzésnek vetettük alá a három mintát. Ehhez Dr. Renner Károly segítségét kértük a Fizikai, Kémiai és Anyagtudományi tanszékről. A mérésekhez egy HORIBA Particle készülék került alkalmazásra. A mérés statisztikai eredményeit az 1. táblázat foglalja össze. Látható, hogy a közepes szemcseátmérők minden esetben a szitálási szemcseméret tartományba esnek. A mért értékek szórása 110 µm és 180 µm között változik, tehát kellően szűk tartományba esik az ágyanyagul szolgáló homok.

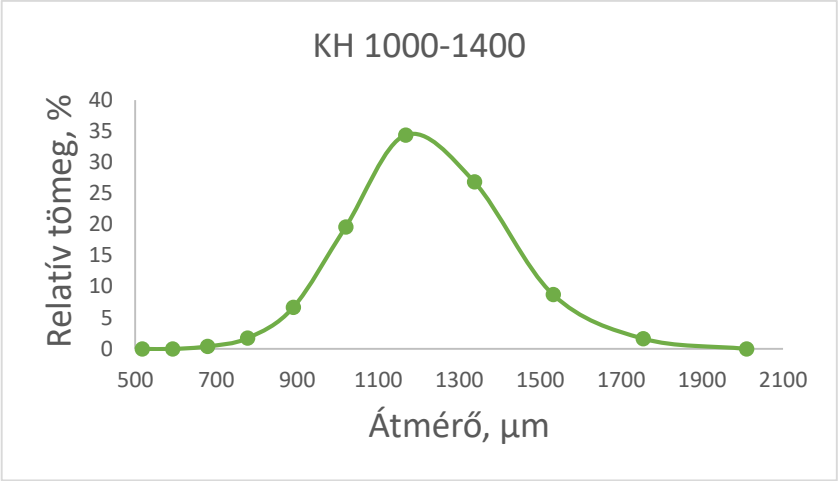
1. táblázat A homokszemcsék fontosabb statisztikai adatai

Sorszám:	1.	2.	3.
Szemcseméret tartomány, µm	600-710	710-900	1000-1400
Közepes átmérő, µm	654,45	810,49	1110,25
Átlagos átmérő, µm	664,30	819,06	1119,83
Variancia, μm^2	13534	19953	32391
Szórás, µm	116,37	141,25	179,97

A pontos eloszlások ábrázolásra kerültek (*12. ábra*). Az ordináta tengelyen szerepel az egyes szemcse frakciók százalékos aránya a teljes homokmintához képest, míg az abszcisszán a frakciók szemcseméret átmérője látható.



12/a. ábra A vizsgált homokok szemcseméret eloszlása



12. ábra A vizsgált homokok szemcseméret eloszlása

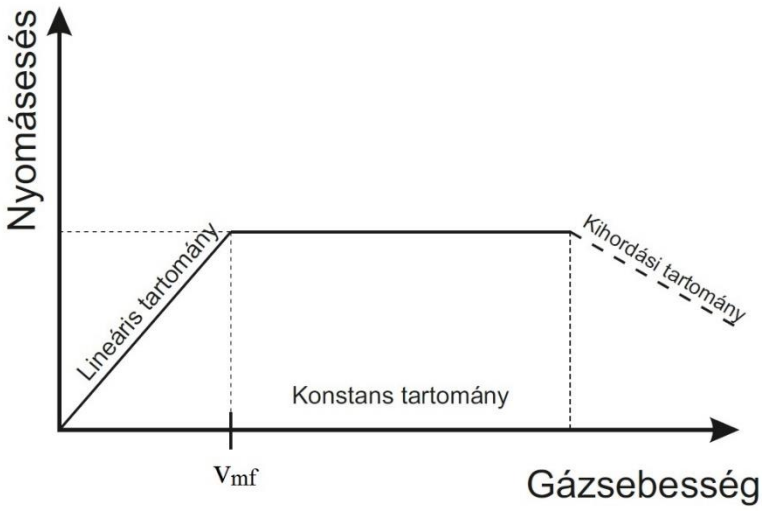
A diagrammon látható, hogy a homokszemcsék eloszlása normális jelleget mutat, és a szitálási tartományon kívül eső rész 5-10%-os tartományba esik, tehát a szitálás jól sikerült. A homokminták megfelelnek a kívánt precizitásnak.

4.4 A kvarchomok ágyanyag minimális fluidizációs gázsebességének meghatározása

Az eloszlási mérések második mérési változója az alkalmazott fluidizációs gázsebesség. Az eloszlási mérések során alkalmazott gázsebességeket nem abszolút értelemben kell figyelembe venni, ugyanis az abszolút értelemben vett gázsebesség azonossága nem garantálja, hogy különböző homokok hasonló szintű fluidizációba kerültek. Minél nagyobbak a homok szemcséi, annál nagyobb gázsebességgel érhető el a fluidizált állapot, ezért szélsőséges esetben az is előfordulhat, hogy a választott gázsebesség az egyik homokot fluidizálja, de a másikat nem képes. Ezt a problémát kiküszöbölendő relatív gázsebességek alapján kerültek a mérési pontok beállításra, ahol viszonyítási pontként a minimális fluidizációs gázsebességet vettük, tehát az a gázsebesség számít 1-nek a relatív skálán, ahol az adott homok éppen a fluidizáció állapotába kerül. A minimális fluidizációs gázsebesség meghatározásához a fluidizáció létrejöttének körülményeit kell áttekinteni.

Ha a fluidizáció létrejöttét vizsgáljuk, és az átáramlott gázsebességet nulláról fokozatosan növeljük, megfigyelhető, hogy amíg a fluidizált állapot nem jön létre, a gázsebesség és az ágy nyomásesése lineárisan nő (*13. ábra*). Ez azzal magyarázható, hogy a szemcsék között a levegő egy darabig át tud jutni anélkül, hogy az ágy fluidizált állapotba kerülne (közelítőleg lineáris szakasz**)**. Egy adott gázsebesség felett (amikor a fluidizáció létrejön) az ágy nyomásesése állandósul, hiába növeljük tovább a gázsebességet (konstans szakasz). A két szakasz határán helyezkedik el a minimális fluidizációs gázsebesség. Az állandósult szakasz

után megfigyelhető a nyomásesés csökkenése, erre az ad magyarázatot, hogy az ágyanyagot az áramló gáz magával ragadja, és kihordja a berendezésből. Ez a kihordási szakasz a buborékos fluidizációs körülmények között ilyen nagy gázsebességek nem kerülnek alkalmazásra, így ezen tartomány meghatározása nem szükséges. A valóságban a konstans és a lineáris szakasz között fellép egy rövid átmeneti szakasz is, a részben fluidizált ágy. Ilyenkor az ágy egy része már fluidizálva van, viszont van még fix része is, így az ágy nyomásesése a fix és a fluidizált rész együtt határozza meg.



13. ábra A homokágy nyomásváltozása

A mérési összeállításnak tehát tartalmaznia kell a gázsebesség mérésére alkalmas eszközt, ami kellőképpen érzékeny a lineáris szakasznál fellépő igen alacsony gázsebességek mérésére is. Erre a célra alkalmas volt egy beszívó mérőperem, de a mérni kívánt igen alacsony gázsebességekhez az U-csöves manométer érzékenysége nem elegendő, ezért egy ferdecsöves mikromanométer került alkalmazásra. A mikromanométer döntési szögét csökkentve növelhető a mérés érzékenysége, így elérhető a kívánt érzékenység. Továbbá az alkalmazott mérőfolyadék alkohol volt, aminek a sűrűsége kisebb a víznél, ezért ugyanakkora nyomáskülönbség nagyobb kitérést eredményez. A másik fontos mérendő érték az ágy nyomásesése. Annak érdekében, hogy az ágy nyomásesése mérhető legyen, a fúvóka sor alatt kialakításra került 4 db nyomásmegcsapolást alkalmaztuk. Ezzel a megoldással elkerülhető volt a nyomásmegcsapoló furatok homokkal való eltömődése, viszont a nyomásérték, amit a megcsapolásokon közvetlenül mértünk, nem tisztán a homokágy nyomását tartalmazta, mivel a fúvókasoron fellépő nyomásesés is megjelent az alattuk elhelyezett nyomásmegcsapolásokon. Ezt a hatást kiküszöbölendő kellett egy homok nélküli mérést végezni, ahol csak a fúvókákon eső nyomás értéket kaptuk különböző

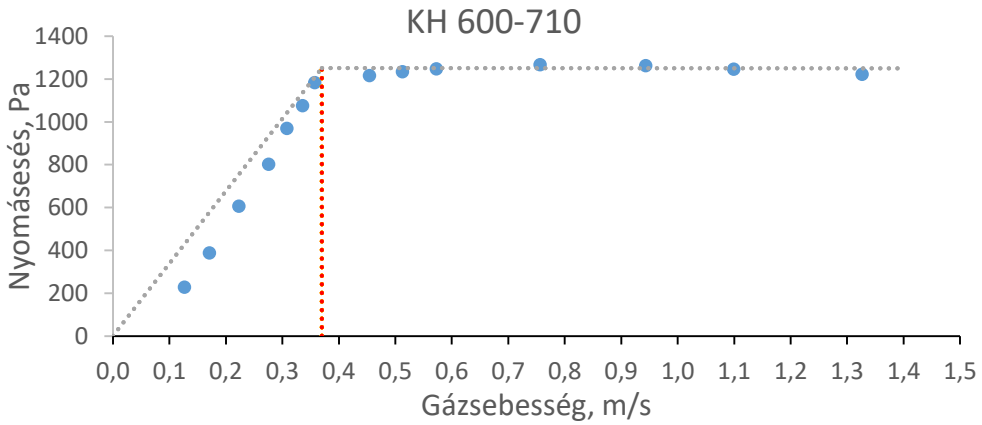
gázsebességek mellett. A homok nélküli mérés eredményeire egy másodfokú parabolát illesztve előállt a fúvókasor nyomásesés-gázsebesség függvénye. Ezt a függvényt a későbbi homokkal végzett mérések eredményeiből kivonva előállt tisztán a homokágynak a nyomásesése. A lineáris és konstans szakasz metszéspontját meghatározva pedig kiszámítható az adott homok minimális fluidizációs gázsebessége is (*2. táblázat*).

2. táblázat Minimális fluidizációs gázsebességek

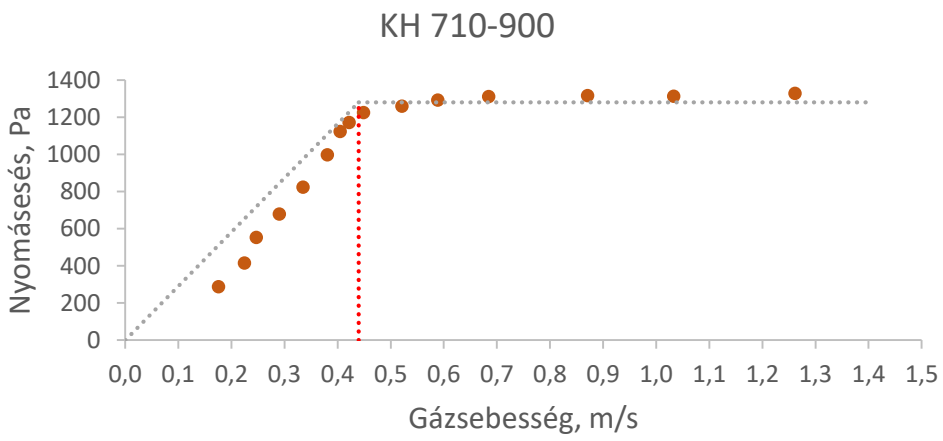
Kvarc homok, µm	600-710	710-900	1000-1400
Közepes átmérő, µm	654,5	810,5	1110,3
Minimális fluidizációs gázsebesség, m/s	0,37	0,44	0,64

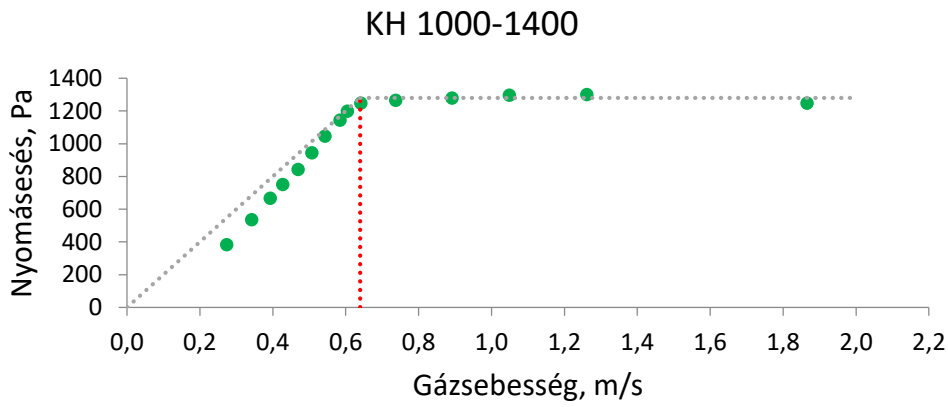
A mérési eredményekből látható, hogy nagyobb közepes szemcseátmérőjű homok esetén, nagyobb gázsebesség kellett, hogy fluidizálttá váljon a kvarchomok.

A mérési pontokat igyekeztem a minimális fluidizáció körül (*14. ábra*), ahol az egyenes megtörik, sűríteni a töréspont és az átmeneti szakasz pontosabb kimérése érdekében. A kezdeti, nem fluidizált szakaszon megfigyelhető egy enyhe parabolikus jelleg. Ugyanis a kezdeti szakasz alatt a homok egy egyszerű áramlási ellenállást képez, jó közelítéssel vehető lineárisnak. Ugyanakkor a minimális fluidizációs gázsebesség meghatározásához ez a közelítés kielégítő pontosságot eredményez.



14/a. ábra A minimális fluidizációs gázsebességek ábrázolása





14. ábra A minimális fluidizációs gázsebességek ábrázolása

4.5 Az eloszlási mérések tervezett menete

Az előkészítő mérések elvégzése után az eloszlási mérések megtervezése következett. A tervezés során igyekeztem figyelembe venni más kutatók hasonló témában végzett munkáit. Így a mérések körülményeit nemcsak saját korábbi, de nemzetközi tapasztalatok alapján alakítottam ki, úgy, hogy a kapott eredmények minél szélesebb körben kiértékelhetők legyenek.

Az eloszlási méréseket a 4.3 alfejezetben bemutatott három különböző ágyanyaggal végeztem el, annak érdekében, hogy a tüzelőanyag eloszlás ágyanyagtól való függését kimutassam. Mind a három ágyanyaggal öt különböző relatív gázsebességgel végeztem méréseket (1,2 ; 1,4 ; 1,6 ; 1,8 ; 2,0). A relatív gázsebességeknél minden esetben az 1 jelentette az adott homokra vonatkozó minimális fluidizációs gázsebességet. Így a különböző ágyanyagoknál alkalmazott összetartozó relatív gázsebességek hasonló fluidizáltságot értek el. Így összesen tizenöt mérés került elvégzésre.

A mérésekhez használt SRF mennyisége minden esetben 30g értékre vettem, annak érdekében, hogy a jelentős mennyiségű tüzelőanyag ne tudjon fluidizációs problémákat okozni. Így a tüzelőanyag – ágyanyag tömegaránya minden esetben közelítőleg 1% volt, ez a mai ipari alkalmazások tipikus tartománya. A tüzelőanyag eloszlást a bekeverési arány kimutathatóan nem befolyásolja Zhang et al. (4) mérései szerint. Ezért nem vettem figyelembe a bekeverési arányt, mint lehetséges mérési változót a későbbiekben.

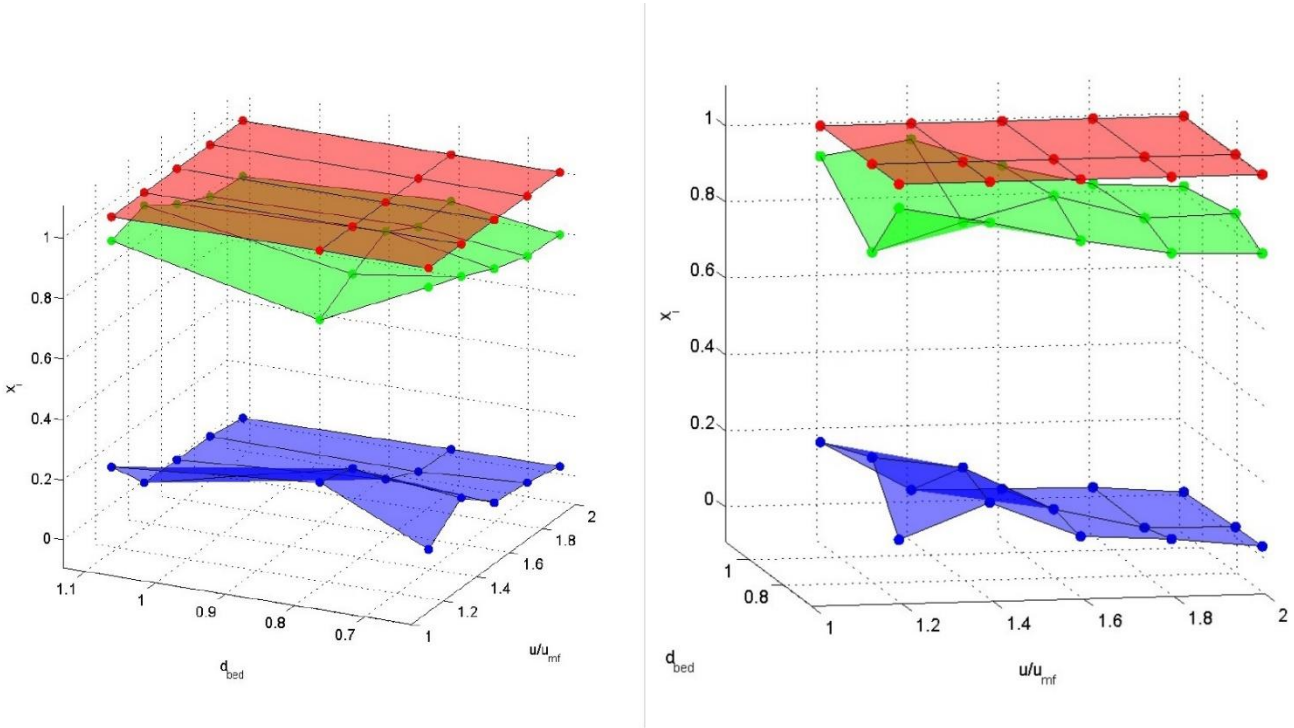
A méréseket teljesen szegregált állapotból kiindulva hajtottam végre minden alkalommal. Az adott gázsebesség beállítását követően fölülről az ágyanyagra szórtam, ahogyan az a legtöbb erőművi alkalmazásnál is történik az adagolók segítségével. Az állandósult állapot fennállásához az irodalmi források és a mi megfigyeléseink néhány perces keveredési időre utalnak. Hogy a stacioner állapot beálltában biztosak lehessünk, húsz perc keveredési időt határoztunk meg. Minden esetben a húsz perc letelte után a fluid levegőt hirtelen elvéve kezdődött meg a minták levétele. A levegőáramlás megszűnése után a fluidágy összezuhant, és az egyes cellákba behelyeztem az elválasztó elemeket. Annak érdekében, hogy a behelyezés közben ne tudjon homok kifolyni a fúvókákon át, ezzel befolyásolva a kialakult eloszlási képet, egy plusz elválasztó elem behelyezésével kezdtem alulra, közvetlen a fúvókák közé, és így haladtam az alsó, illetve a középső cella elválasztásával fölfelé. Ezzel a megoldással minimálissá vált a cellák szeparációja során fellépő esetleges átrendeződés valószínűsége. Miután meggyőződtem az elválasztó elemek helyes zárásáról, az emelőcsövet a mintavételező nyílás fölé emeltem, és alulról felfele haladva kivettem az egyes cellákban felhalmozódott tüzelőanyag-homok keveréket. Ezt követően szitálás segítségével elválasztottam a homokot a tüzelőanyag daraboktól. A cellák tüzelőanyag tartalmának tömegét megmértem. Ezt követően a tüzelőanyag mintákat egy egyenesen erre a célra kialakított állvány alatt, fehér háttéren szétterítettem, és az állványról fényképeket készítettem róla egy későbbi alak és felület szerinti kiértékeléshez segítségül.

Három különböző tüzelőanyag mintával végeztem méréseket, úgy, hogy adott homokkal mindig ugyanazt a mintát használtam a különböző gázsebességekkel való mérésekhez. Tehát minden mérés végén újra összekevertem a tüzelőanyag mintát, és a következő gázsebességgel végzett mérésnél felhasználtam újra. A gázsebességektől való függést növekvő sorrendbe mértem, így az utolsó minták minden esetben a 2,0 relatív gázsebességnél születtek, és ezeket félretettem későbbi vizsgálatokra (fűtőérték, elemi analízis).

5. Az elvégzett mérések eredményei és kiértékelésük

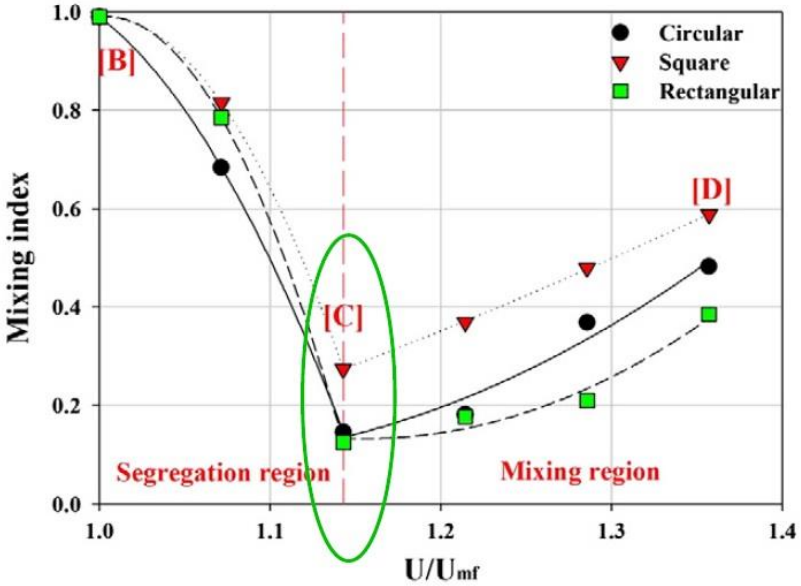
5.1 Normalizált tömegek megjelenítése

A mérések eredményei egy háromdimenziós jobb sodrású Descartes-koordináta rendszerben kerültek ábrázolásra, ahol az x-tengelyen a relatív gázsebességek, az y-tengelyen az ágyanyag közepes szemcseátmérője, a z-tengelyen pedig az egyes cellákban fellelt normalizált tüzelőanyag tömeg (a teljes bevitt tüzelőanyag tömegre vetítve) értékei lettek feltüntetve (*15. ábra*).



15. ábra A mérési eredmények 3D-ben ábrázolva

Megfigyelhető, hogy a középső cellában elhelyezkedő tömeg nagyobb viszonylagos gázsebesség mellett laposan beáll. Ugyanakkor kisebb gázsebességeknél egyfajta szegregáció valósul meg, amit egy dimenzióban Park et al. (5) talált, és a Kramer-féle keveredési számmal ábrázolva jelenített meg (*16. ábra*).



16. ábra Park által megfigyelt szegregáció (5)

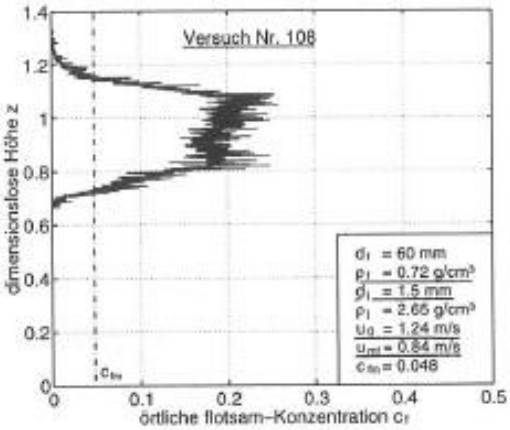
Az y-tengelyen látható a Kramer-féle keveredési szám, míg a vízszintesen a relatív gázsebesség. Jól látható, hogy 1,14-es relatív gázsebességnél a keveredési szám minimális értékre csökken. Ilyenkor az Őáltaluk vizsgált kokszpor szinte teljes egészében az ágy felszínére úszott. Ez a jelleg független a fluidizáció keresztmetszetétől, kör, négyzet és téglalap keresztmetszetek között szinte pontosan lekövetik egymást. Megjegyzendő, hogy az Ő esetükben 1-es relatív gázsebességnél ábrázolt pont nem mérvadó, a kiindulási (teljesen összekevert) állapotot mutatja.

Az SRF a Park által vizsgált kokszporral szemben nemcsak felúszó (flotsam), hanem lesüllyedő (jetsam) részecskéket is tartalmaz. Ennek eredményéül az SRF esetén kétirányú szegregáció valósul meg. A középső cella kiürül, és ezzel egy időben az alsó és a felső cellákban feldúsul a tüzelőanyag. A jelenség a legintenzívebben a középső, 811 µm-es homok esetén figyelhető meg. Ennek tükrében kijelenthető, hogy a szegregáció mértékének szélső értéke van, ahogyan a Park et al. (5) a relatív gázsebesség tekintetében is keveredési szélső értéket mutatott ki.

Gyakorlati következtetésként levonhatjuk, hogy ennek a jelenségnek a figyelembevételével kell kialakítani a homokágyat. Tüzelés és elgázosítás esetén a cél az, hogy minél több tüzelőanyag legyen az ágyon belül, a mi esetünkben a középső cellában. Ennek érdekében a legegyszerűbb a lapos tartományban, tehát magas relatív gázsebességek mellett üzemelni. Ugyanakkor a korábban már említett gyors pirolízis esetében éppen ellentétes a cél: az erős

szegregációs tartomány minél jobb beállítása, annak érdekében, hogy a pirolízis koksz könnyen eltávolítható legyen a berendezésből.

További érdekes momentum, hogy az alsó és felső cellákban a térfogatra vetített fajlagos SRF tömeg kisebb, mint az ágy belsejében. Ez arra utal, hogy az elhelyezkedés az ágyon belül nem egyenletes, ahogyan azt Wirsum et al. (6) nagyméretű, teljesen egységes részecskékre részletesen lemérte (*17. ábra*).



17. ábra Wirsum eloszlási méréseinek eredményei (6)

A fenti ábrán az y tengelyen a relatív magasság, míg az x-tengelyen a tüzelőanyag koncentráció látható. Szembetűnő, hogy a tüzelőanyag koncentráció nagy gradienssel is változhat az ágy egyes részein belül. Ennek pontos oka még felderítésre vár, de egyértelmű, hogy nem pusztán hidrosztatikai erők határozzák meg az ágyon belüli elhelyezkedést.

5.2 Különböző keveredési számok meghatározása

Több keveredési index is megalkotásra került a fluidizáció kutatása során. Én ezek közül kettőt szeretnék kiemelni.

5.2.1 A Kramer-féle keveredési szám

A Kramer-féle keveredési szám (1. egyenlet) , melyet Park et al. (5) és J. Gyenis (7) is alkalmaz a következő összefüggés szerint határozható meg:

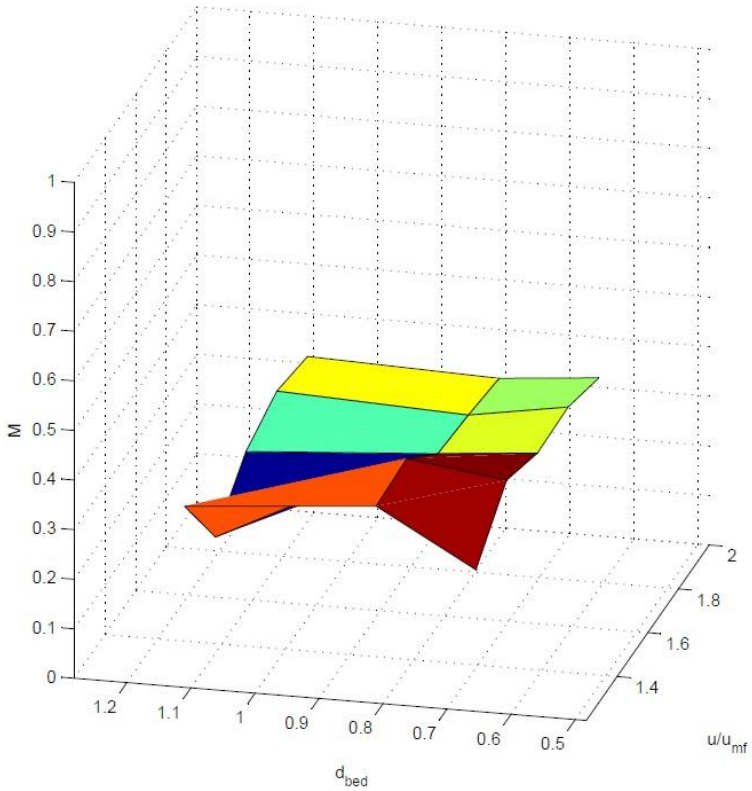
$$M = \frac{\sigma_0^2 - \sigma^2}{\sigma_0^2 - \sigma_r^2} \qquad (1.)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(X_i - \bar{X})^2} \qquad (2.)$$

ahol:

- M: a keveredési szám
- σ_0 : a normál eloszlás teljes szegregáció esetén
- σ_r :a normál eloszlás teljes elkeveredés esetén
- X_i: az i-edik cellában lévő tüzelőanyag fajlagos tömege
- $\bar{X}$: az átlagos tüzelőanyag tömeg a céllákban

Ez a keveredési szám egyenlő cellaméretekre alkalmazható. Annak érdekében, hogy az esetünkben alkalmazott különböző cellaméreteket is figyelembe tudjunk venni, nem



18. ábra A Kramer féle keveredési számok

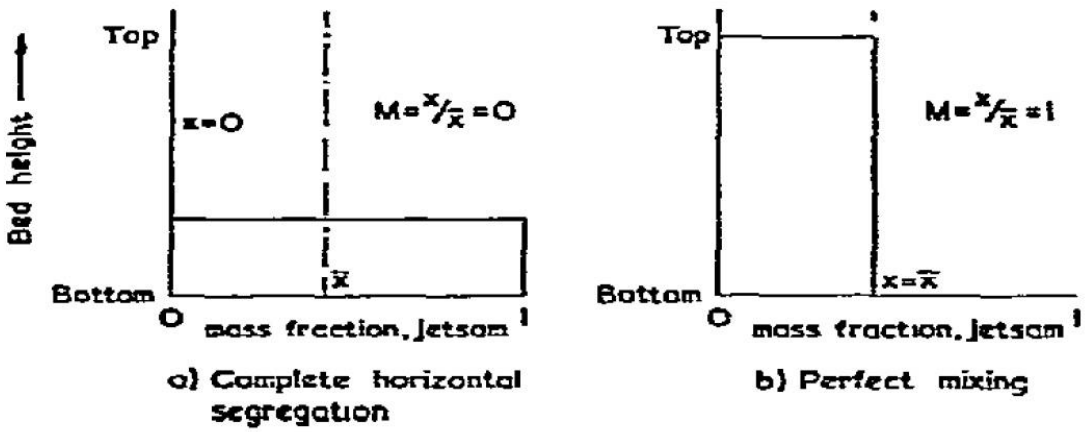
egyszerűen a tömegekkel, hanem azok térfogatra fajlagosított értékeivel számoltunk. Az így kapott eredményeket a *18. ábra* mutatja.

Az ábrán látható eredmények nem felelnek meg a várakozásoknak, hiszen ha összehasonlítjuk a *15. ábra-n* látottakkal, szembetűnő, hogy a keveredési szám azokban a

tartományokban lesz magas, ahol kedvezőtlen keveredési viszonyok lépnek fel, tehát akkor, amikor az ágy alsó és felső tartományaiban jelentős mennyiségű tüzelőanyag halmozódik fel. A Kramer-féle keveredési szám maximalizálása nem jelent pozitív eredményt, hiszen azt mutatja, hogy a mért keveredési viszonyok mennyire állnak közel a teljes keveredés állapotához. Ugyanakkor esetünkben nem az a cél, hogy minél egyenletesebb eloszlás jöjjön létre a cellák között, hanem pont ellentétesen, a kedvező állapot az, amikor minden tüzelőanyag egy kitüntetett cellában, a középső cellában tartózkodik. Ezzel szemben, ha a keveredési szám minimalizálására törekednénk, akkor sem érnénk el informatív eredményt. Hiszen ez a fajta leírás a cellákat egyenértékűen kezeli, az én vizsgálati módszeremnél azonban a középső cella kitüntetett. Látható, hogy a Kramer-féle keveredési szám nem alkalmas az általam vizsgált probléma jellemzésére. Ennek a dilemmának a feloldására az alábbiakban bemutatok egy másik fajta keveredési számot.

5.2.2 A Nienow-féle keveredési szám

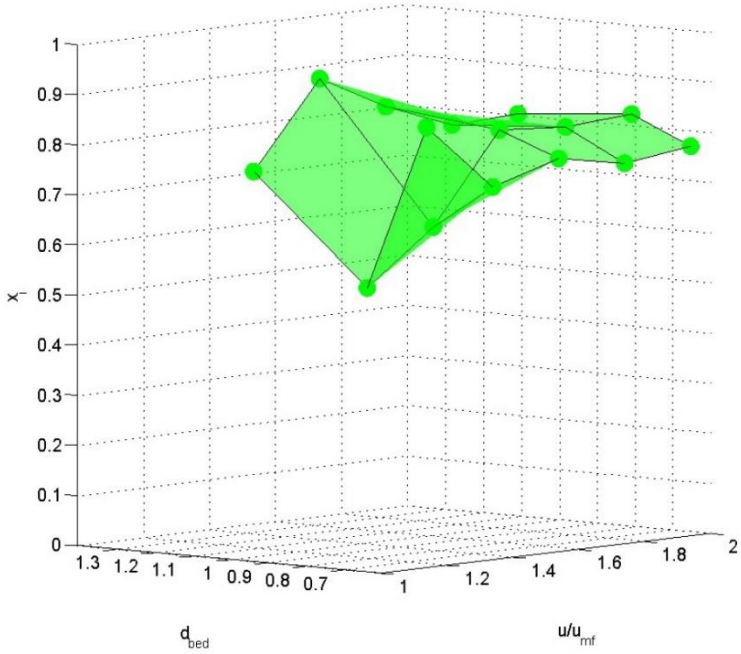
A most bemutatott keveredési számot Nieow et al. (8) alkalmazta hasonló keveredési vizsgálatokra. A számítása a következőképpen történik: a legfelső cellában lévő tüzelőanyag mennyiségnek és az átlagos cellákban megjelenő tüzelőanyag mennyiség hányadosát képezi. Így a keveredési szám nullát ad, ha a felső cella üres, és egyet, ha a felső cellában lévő tüzelőanyag mennyiség megegyezik az átlagosan fellelhető tüzelőanyag tömegével (*19. ábra*).



19. ábra A Nienow-féle keveredési szám (8)

A Nienow-féle keveredési szám minimális, a célnak megfelelő módosításával képzett keveredési számot használunk. Nem a felső cellára, hanem a középső cellában található tüzelőanyag mennyiségre történik a keveredési szám képzése (*20. ábra*).

Látható, hogy az így képzett keveredési szám az elvárásoknak megfelelően a számunkra



20. ábra A módosított Nienow-féle keveredési szám

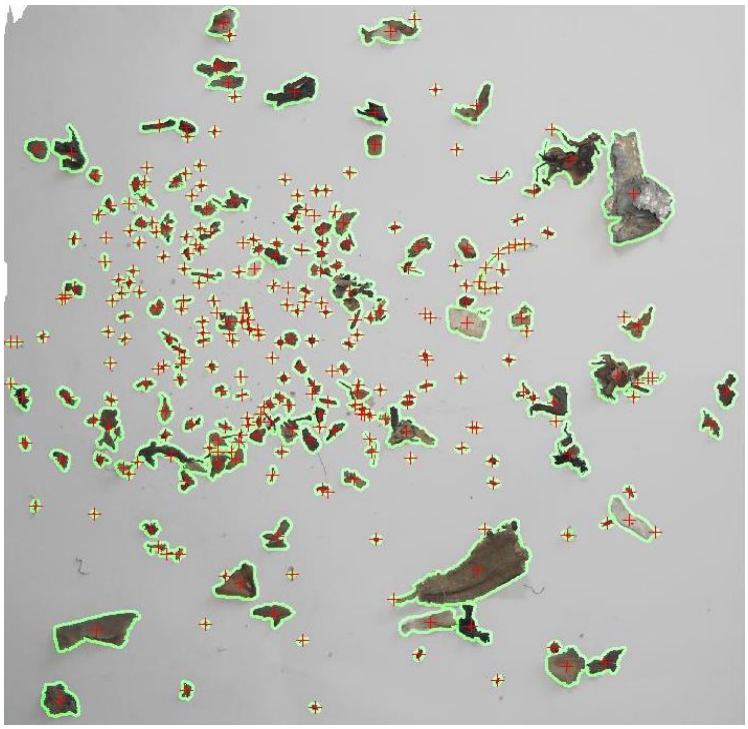
kedvezőtlen keveredési állapotokban esik le egészen 0,5-0,6 környékére, majd magasabb gázsebességeknél stabilizálódik 0,8-es értéknél. Így megtaláltuk a gyakorlati, ipari elvárásokhoz leginkább megfelelő keveredési számot.

5.3 A tüzelőanyag szemcsék felület szerinti kiértékelése

A fentiekben kiértékelt eredmények minden esetben az egyes cellákban fellelt tüzelőanyag tömegére vonatkoztak. Ezen túlmutatóan, az egyes tüzelőanyag szemcsék felület szerinti kiértékelése is megtörtént. Ebben az alfejezetben ennek a bemutatása olvasható.

Annak érdekében, hogy meghatározható legyen az egyes tüzelőanyag szemcsék felülete, kép-kiértékelési eljárásokat alkalmaztunk. Egy digitális fényképezőgépet a tüzelőanyag minták fölé helyezett állványra rögzítettünk. Alatta egy fehér háttérrel kijelölt területen szétteríthető volt a tüzelőanyag minta. Ily módon minden mintáról egy fénykép készült. Az állvány biztosította, hogy minden esetben ugyanolyan szögből készüljön a fénykép, a fehér háttér pedig, hogy a minták jól körül határolhatók legyenek a későbbi kiértékelés során.

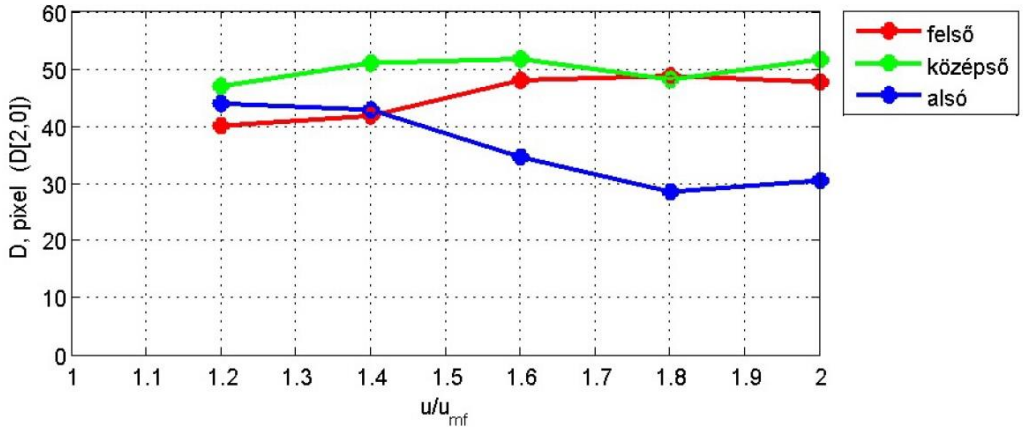
Megállapítottuk, hogy az SRF szemcsék jó közelítéssel kétdimenziósnak tekinthetőek, mivel a szemcsék mélysége elhanyagolható a szélességükhöz és hosszúságukhoz képest.



21. ábra Szemcsék beazonosítása

Az elkészült képek feldolgozása egy MATLABban írt program segítségével történt. A felületek meghatározása több lépésben zajlott. Első lépésként a színes képből egy szürkeárnyalatos készült, úgy, hogy elhagytuk a kép piros és zöld összetevőjét, tehát csak a kék maradt. Vizuális megfigyelések alapján a kék összetevőnél volt a legnagyobb különbség a szemcsék és a háttér között, így lehetővé téve az egyes szemcsék szegmentálását. Ezt követően a háttér árnyékainak a kisimítása következett, úgy, hogy minden háttér pixelt kicserélt a program a környezetében lévő legnagyobb intenzitású pixelre (a tartomány nagyobb volt mind a legnagyobb SRF szemcse). Erre azért volt szükség, hogy az árnyékot és a megvilágítás egyenetlenségéből adódó foltokat nehogy a szemcse felületéhez számítsa. Ezt követően egy bináris kép kirajzolása következett, ahol egy előre beállított intenzitás fölötti pixelek értékét 0-ra, a küszöb intenzitás alatti pixeleket pedig 1-re módosította. Így a nagy intenzitású fehér háttér összefüggő fekete lett és az SRF szemcsék fehérek. Ezután két parancs következett még, egy az élek elsimítására, és egy az SRF szemcsék felületén maradt „lyukak” eltüntetésére. A bináris kép alapján a program meghatározta a szemcsék számát és azok felületét. Végül az eredeti képen körberajzolja az általa meghatározott felületeket, és a felületek geometriai középpontját piros „+” jellel megjelöli (*21. ábra*).

A program futásának ellenőrzésére is jók az így kapott ábrák, látható, hogy nagy



22. ábra Az SRF szemcsék összes felületének alakulás

pontossággal sikerült körülhatárolni az SRF szemcséket. A különböző háttérelválasztási és élsimítási lépésekből eredeztethető a számítás hibája, amelynek értéke ± 3 pixelre tehető. Az így keletkezett felület adatok összegezett eredményét mutatja a *22. ábra.* Mivel nem volt kimutatható eltérés a különböző ágyanyagok között az SRF szemcsék összes felületét illetően, ezeket átlagolva a gázsebesség függvényében ábrázoltuk. Megfigyelhető, hogy a gázsebesség növelésével az alsó cella kiürül, csak az apró felületű szemcsék maradnak. Ezzel párhuzamosan a felső cella feltelik a nagyobb felületű SRF szemcsékkel, amit részben magyarázhat a nagyobb gázsebesség okozta elragadás. A trend alakulásának érdekessége, hogy 1,4-es gázsebességnél nagyjából azonos volt az alsó és a felső cellákban lévő SRF felület. Míg a középső részben csak enyhe növekedés tapasztalható. Külön érdekesség, hogy a legnagyobb szemcsék mindig az ágy közepében helyezkednek el. Valamint legalul, széles gázsebességi tartományokon belül éppen a legkisebbek helyezkednek el, ez üzemviteli szempontból kedvező.

6. Összefoglalás

A vizsgált problémának véleményem szerint nem csak tudományos, de ipari jelentősége is van. Egy jelenleg is aktívan kutatott világban sikerült eredményeket felmutatni a fluidizációs hasznosítás (tüzelés, elgázosítás és pirolízis) területén. A mérések megtervezése során igyekeztem, a későbbi kiértékelést megkönnyítendő, mindent gondosan előkészíteni. Ennek érdekében több segédmérést végeztem, illetve az olyan feladatokra, amelyek elvégzésére hallgatóként nem volt módom (homok gépi szitálás, szemcseméret meghatározás), külsős segítséget kértem. Az eloszlási mérések során törekedtem arra, hogy új, eddig nem vizsgált szempontokat is figyelembe vegyek.

Az általam épített kísérleti berendezés megépítése az elmúlt év kihívását jelentette, azóta eredeti rendeltetésén felül nemcsak kutatási, de oktatási és demonstrációs célokat is szolgál. Bízom benne, hogy jövőbeni kutatások elvégzését is segíteni fogja.

Az idei évben sikerült a tavaly megálmodott mérési sorozatokat elvégezni. A kapott eredmények összecsengenek más kutatók megállapításaival (Park-féle (5) szegregációs maximum). Ez az örömteli tény bizonyítja, hogy a tervezett mérési eljárás jól működik, és az eredmények reprodukálhatók. Úgy gondolom ez az, ami igazán az értelmét adja a kutatásnak.

Nemzetközi tapasztalatok alapján sikerült olyan keveredési állapotot mutató számot találni, amely az általam vizsgált problémát írja le. Ez a keveredési szám a későbbiekben is alkalmazható hasonló vizsgálatok során.

A szemcsék felület szerinti vizsgálatának eredményei igazán érdekesek. Az alkalmazott képkiértékelési eljárás segítségével kimutatott eredmények jelzik, hogy az ágyon belül történő eloszlásra a szemcseméretek felületének nagy jelentősége van, és nem csupán a hidrosztatika törvényei határozzák meg. A felület szerinti eloszlásban is rendszer fedezhető fel.

7. Zárás

Záró gondolatként szeretném kijelenteni, hogy nagy öröm volt számomra az Energetikai Gépek és Rendszerek tanszéken végzett kutatói munka. Úgy gondolom, nagyban hozzájárult a szakmai fejlődésemhez, egyúttal bízom benne, hogy e munka befejezése nem valaminek a végét, hanem valaminek a kezdetét jelenti.

8. Summary

The examination of the vertical settling of active particles in fluidized bed is an important question. In this study a municipal waste-based fuel, the SRF was tested. SRF contains lots of plastic, fabric and a few rubbers. It has nonspherical geometry, so the conventional examinations cannot be used. An experimental equipment was built. This equipment used sampling box method Zang et al. (4). Three cells were designed, bottom and up cells were 2cms high and the middle cell was 6 cm high. The middle cell is higher because the mixing and heat transfer are excellent in the middle of bed. It isn't necessary to measure the vertical settling there. If the fuel particles are sinking to the bottom of bed, it can cause intensive burning because of the O_2 rich atmosphere. And hot spots are developed, which can cause boiler damage. When the fuel particles are floating to the up of the bed, the advantages of FB technique not utilized. The measurements were made with three different bed material and five different gas velocity. A two-way segregation region at low gas velocities was found. Because SRF contains flotsam and also jetsam particles. The conventional mixing indexes cannot be used in case of two-way segregation. Therefore, the Nienow mixing index was modified (*Fig. 1*).

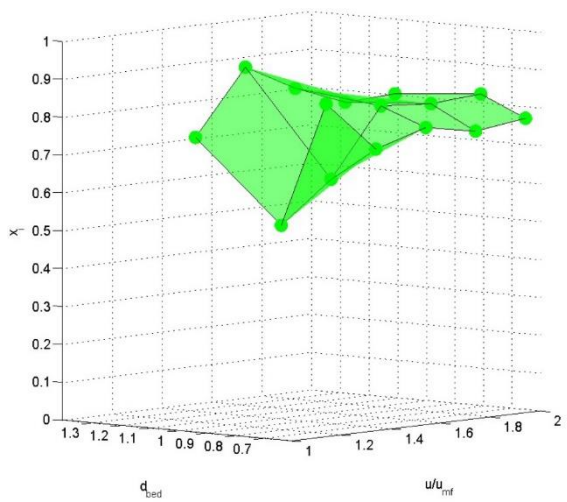


Fig. 1 The modified Nienow index

With the help of an image processing algorithm, the area of the fuel particles were also measured. In case of higher gas velocities, the average fuel particle area is higher in the top of the bed.

Hivatkozások

1. **Jae Gyu Hwang, Hoon Chae Park, Joon Weon Choi, Shin Young Oh, Youn Ho Moon, Hang Seok Choi.***Fast pyrolysis of the energy crop "Geodae-Uksae 1" in a bubbling fluidized bed reactor.* 2016., Energy, old.: 1-11.

2. **Anna Köhler, Erike Sette, Filip Johnson.** *3D particle tracking in a cold fluidized bed.* The 70th IEA-FBC meeting , Turki, Finland : ismeretlen szerző, 2015.

3. **Filip Johnson, David Palleres, Erik Sette.** *Mixing phenomena in fluidized beds diagnostics and observations.* The 68th IEA-FBC meeting , Bejing, China : ismeretlen szerző, 2014.

4. **Yong Zhang, Baosheng Jin, Whenqi Zhong.** *Experimental investigation on mixing and segregation behavior of biomass particle in fluidized bed.* 2009., Chemical Engineering and Processing: Process Intensification , old.: 745-754.

5. **Hoon Chae Park, Hang Seok Choi.***The segregation characteristic of char in fluidized bed with varying column shapes.* 2013., Powder Technology, old.: 561-571.

6. **M. Wirsum, F.N. Fett, Th. Bausch, Chr Lütge.** *Über die Eignung von Feuerungsanlagen mit Wirbelsicht zur Verbennung von kommunalen Klärschlamm.* Dortmund, 1996., Verein Deutsche Ingenieure , old.: 209-224.

7. **Gyenis, J.** *Assessment of mixing mechanism on the basis of concentration.* 1999., Chemical Engineering and Processing, old.: 665-674.

8. **A. W. Nienow, P. N. Rowe and L. Y. L. Cheung.** *A Quantitative Analysis of the Mixing of Two Segregating Powders of Different Density in Gas-Fluidised Bed.* Hollandia, 1977., Powder Technology, old.: 89-97.