### Romenda R. - Szalai P. - Faitli J.

Miskolci Egyetem, Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet Kapcsolat: ejtrom@uni-miskolc.hu

# SZABÁLYOS ALAKÚ SZEMCSÉK KÖZEGELLENÁLLÁSÁNAK VIZSGÁLATA EGYEDI FEJLESZTÉSŰ LÉGCSATORNÁBAN

#### ABSZTRAKT

A hulladékgazdálkodásban alkalmazott légáramkészülékek fejlesztése érdekében szemcsemozgási alapvizsgálatokat végeztünk, mely során szabályos alakú szemcséket vizsgáltunk egy egyedi fejlesztésű légcsatornában. A légcsatornában létrehozott rendezett áramlásba helyezett szemcsékre ható közegellenálló erőt mértük egy erőmérő cellával. A vizsgálatoknak kettős célja volt. Az egyik, hogy a már ismert szemcseformák tulajdonságaival a légcsatornát hitelesítsük, és ellenőrizzük a berendezés használhatóságát. A másik, hogy az egyszerűbb szemcseformák vizsgálata során olyan összefüggéseket állapítsunk meg, amelyek később a légáramkészülékek fejlesztésében, tervezésében felhasználhatók.

Kulcsszavak: légáramkészülék, szeparálás, szemcsemozgás, hulladékhasznosítás.

### BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉS

Az EU körforgásos gazdaság stratégiája korszerű hulladékgazdálkodást kíván. A termelésből és a fogyasztásból kikerülő hulladék és maradvány anyagokat a hulladékelőkészítéstechnika segítségével lehet újra a gazdasági körforgásba vezetni. A légáramkészülékeket gyakran alkalmazzák kommunális hulladékok és más hulladékáramok feldolgozása során az anyag nemesítésére, a nagy fűtőértékű könnyű anyagok leválasztására. Ezen kívül a szemcsemozgás jelensége más berendezések működésére is hatással van, mint például az alak szerinti szétválasztó berendezésekre, ballisztikus vagy más 2D-3D szeparátorokra, illetve a szenzorokra alapozott válogató berendezések esetében a szemcsék kifújására. Számos tanulmány foglalkozik szemcsemozgási kísérletekkel, azonban a szemcsealak hatását még nem tudjuk elméleti úton számítani. A szakirodalomban (Romenda és Burinda, 2019) az un. egyentérfogatú gömb számított süllyedési végsebességére vonatkoztatott alaktényező használata terjedt el, amelyet kísérletekkel kell meghatározni (1. egyenlet).

$$SF = \frac{V_0}{V_{0V}} = \sqrt{\frac{C_{dV}}{C_d}}$$
  $0 < SF < 1$  (1.)

Méréssel kell meghatározni a valódi szemcse süllyedési végsebességét ( $v_o$ ), majd kiszámítani az egyentérfogatú gömb átmérőjét és annak a süllyedési végsebességét ( $v_{oV}$ ). Az alaktényező a közegellenállási tényezők hányadosának a négyzetgyökeként is kiszámítható. Az alak vizsgálata a hulladékgazdálkodásban alapvető fontosságú, mert a valódi hulladékszemcsék jellemzően nem gömb alakúak. A korábbiakban számos szemcsemozgási vizsgálatot végeztünk el, amelyek mindegyike esetében a szemcsék mozogtak az álló vagy mozgó közegben. Ezt most megfordítottuk és a szemcsét egy erőmérő cellához rögzítettük és légáramba helyeztük, így közvetlenül a közegellenálló erőt mérhetjük meg.

<sup>©</sup> Romenda R. – Szalai P. – Faitli J.

A szemcsemozgás alapjelensége az, amikor egy darab gömb alakú szemcse falhatással nem zavart közegben, gravitációs erőtérben, Newtoni közegben süllyed. Ez jól ismert a szakirodalomban. Ekkor a szemcse körüláramlása lehet lamináris illetve turbulens ezért körüláramlási tartományokat kell megkülönböztetni, amelyet az 1. ábra szemléltet (Faitli, 2015).



1. ábra: Newtoni közegben süllyedő, gömb alakú szemcse ellenállás tényező diagramja (Faitli, 2015)

A folyadékban vagy gázban elmozduló testekre a közeg erőt fejt ki. Az un. közegellenálló erő egyrészt a test körül áramló közeg viszkozitása miatt fellépő fal menti súrlódásból, másrészt a nyomáseloszlásból, - mivel a test előtt torló pont, nagy nyomás, mögötte leválások, kis nyomás alakul ki – származik. Stokes megoldotta a mozgásegyenletet, a kontinuitási egyenletet és a Newtoni közegek anyagegyenletét egy gömb alakú szemcsére és bevezette az un. közegellenállási tényezőt és a 2. egyenletre jutott (Pokorádi, 2002; Tarján, 1997).

$$F = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot A \cdot \rho_f \cdot v^2 \tag{2.}$$

A 2. egyenletben  $C_d$  a közegellenállási tényező, A a test és közeg relatív mozgásakor az áramlásra merőleges keresztmetszet,  $\rho_f$  a közeg sűrűsége és v a test és a közeg relatív sebessége. Gravitációs erőtérben történő stacionárius szemcsemozgás esetén a szemcse időben állandó süllyedési sebessége az úgynevezett süllyedési végsebesség a 3. egyenlettel számítható.

$$\nu_0 = \sqrt{\frac{4 \cdot g \cdot x}{3 \cdot C_d} \cdot \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f}}$$
(3.)

A 3. egyenletben g a gravitációs gyorsulás, x a szemcseméret és  $\rho_s$  a test sűrűsége. A 3. egyenlet segítségével számítható az egyentérfogatú gömb süllyedési végsebessége az 1. ábrán közölt módszertan szerint.

<sup>©</sup> Romenda R. – Szalai P. – Faitli J.

Tarján (1997) szerint a kocka alakú testeknek az 1. egyenlet szerint definiált alaktényezője a IV. Stokes körüláramlási tartományon 0,92; míg a II. Newton turbulens tartományon pedig 0,56.

## ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

A Miskolci Egyetem, Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézetében egy egyedileg tervezett légcsatornát építettünk, amelynek a vázlati rajza az 1. ábrán látható.



2. ábra: A kísérleti légcsatorna sematikus rajza

A kísérletekhez a légáramot egy forgólapátos radiális kiömlésű ventilátor (1) biztosítja, amelynek a kivezetésére egy 300 mm belső átmérőjű PVC cső (2) van helyezve. A nem átlátszó falú PVC cső egy 1 méteres és egy 2 méteres csőszakaszból áll. A 3 méteres csőszakasz két 90 fokos könyökkel visszafordul, amit újabb 1 méter PVC cső, és végül a 2 méter hosszú átlátszó falú, plexiből készült mérőcső (3) követ, melynek belső átmérője 295 mm. A ventilátort hajtó kalickás aszinkronmotorhoz egy frekvenciaváltó csatlakozott, amivel a ventilátor tengely-fordulatszámát tudtuk beállítani, ezzel változtatva az áramló levegő sebességét. A visszafordító PVC könyök után található egy áramlásrendező lemez (4). Ez nem más, mint a csőkeresztmetszet közepébe helyezett fél csőátmérőjű acéllemez, amelyet négy darab csavarral lehet központosítani. Ez egy jól ismert méréstechnikai megoldás olyan esetekre, amikor nem biztosítható az ún. 10D szabály, azaz a mérési pont előtt nem alakítható ki a csőátmérő nagyságához mért 10-szeres hosszúságú egyenes csőszakasz. A légtechnika kalibrálását három kijelölt keresztmetszetben végeztük el. A három kijelölt keresztmetszetet az 1. ábrán szaggatott vonalak jelölik a B-B mérési keresztmetszet felett. Ezeket a mérési keresztmetszet feletti magasságukkal jelöljük (35, 65 és 95 cm). A légsebességet egy-egy kiragadott pontban a megadott három keresztmetszetben Prandtl csővel (5) mértük meg. Az B-B mérési kereszt-

<sup>©</sup> Romenda R. – Szalai P. – Faitli J.

metszetben egy tengelyre (6) erőkart rögzítettünk. Az erőkar belső végén egy kampó található (9), amelyre a vizsgált szemcséket akasztottuk. Az erőkar és a kampó "üres-járási", szemcsék nélküli közegálló erejét előre megmértük minden vizsgált légáram esetében, amelyet a kiértékelés során korrigáltunk. Az erőkar másik vége egy nyúlásmérő bélyeggel felszerelt Stauer CK 500-0P4 precíziós erőmérő cellához (7) volt rögzítve. Az erőkar állítható volt, így az 500 g névleges méréstartományú cellát 0-800 g méréstartományon tudtuk alkalmazni. Az erőmérő cellát egy National Instruments egyenfeszültségű mérőerősítőhöz (Wheatstone híd) és AD kártyához csatlakoztattuk. A mérésadatgyűjtő programot LabWindows CVI C++ nyel-ven írtuk meg. A 3. ábrán az elkészült kísérleti berendezés látható.



3. ábra: A kísérleti légcsatorna fényképe

A kísérleteket három különböző méretű kockával végeztük el, három különböző orientációban. A kockák paramétereit az 1. táblázat foglalja össze.

| tuotusut. 21 Filoguti tosien tuttut |                      |                |                                 |                                  |  |                      |
|-------------------------------------|----------------------|----------------|---------------------------------|----------------------------------|--|----------------------|
|                                     | oldalhossz<br>a [cm] | tömeg<br>m [g] | felszín<br>A [cm <sup>2</sup> ] | térfogat<br>V [cm <sup>3</sup> ] | egyentérfogatú<br>gömb átmérő<br>x <sub>v</sub> [mm] | sűrűség<br>ρ [g/cm³] |
| Kiskocka                            | 4,14                 | 14,45          | 102,84                          | 70,96                            | 5,14   | 0,2036               |
| Közepes kocka                       | 7,25                 | 88,75          | 315,38                          | 381,08                           | 9,00   | 0,2329               |
| Nagykocka                           | 11,06                | 211,83         | 733,94                          | 1352,90                          | 13,72  | 0,1566               |

1. táblázat: A vizsgált testek adatai



4. ábra: Légsebességgel szemben lapjával, élével és csúcsával mért kockák

A közegellenállási tényező kiszámolásához szükség van a testek légárammal szembeni vetületére. Amikor az orientációt úgy választjuk meg, hogy a test a lapjának közepén van felfüggesztve, akkor ez a felület egyenlő a lapnak a felületével. Ha a felfüggesztési pont az élének a közepén van, akkor egy téglalap ez a felület, melynek egyik oldala a kocka oldala, a másik oldala pedig alapátló. A csúcsban való felfüggesztés esetén a vetület már bonyolultabb. Egy csúcsára állított kockát megfigyelve az áramlás irányából látszik, hogy a lapátlók egy merőleges síkot határoznak meg, s ezek egy egyenlő oldalú háromszöget zárnak be. Ennek a háromszög területének a kétszerese a légárammal szembeni felület. A vetületi keresztmetszetek nagyságát a 2. táblázat foglalja össze.

|               | 8.                        |                          | <b>j j</b> <del>00</del> -  |
|---------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------------|
|               | Lapban [cm <sup>2</sup> ] | Élben [cm <sup>2</sup> ] | Csúcsban [cm <sup>2</sup> ] |
| Kiskocka      | 17,14                     | 52,56                    | 122,32                      |
| Közepes kocka | 24,24                     | 74,33                    | 172,99                      |
| Nagykocka     | 29,69                     | 91,04                    | 211,87                      |

2. táblázat: A különböző méretű kockák vetületi nagysága [cm<sup>2</sup>] adott orientációban felfüggesztve

### EREDMÉNYEK

A részletes mérési eredményeket terjedelmi okokból nem közöljük. A kísérleteket a légtechnikai rendszer kalibrálásával kezdtük el. Elsőként számos ventilátor fordulatszám esetén a mérőcső három kiragadott keresztmetszetének 8-8 pontjában megmértük a légsebességet egy Prandtl cső segítségével. Megállapítottuk, hogy a 2. ábrán 4-essel jelölt áramlásrendező jól működött, mert a sebességeloszlás minden keresztmetszetben és vizsgált sebességnél 0,04 %nál kisebb eltérést mutatott. Ezt követően minden kocka esetében a súlyerő – mínusz felhajtó erő nagyságát megmértük álló levegőben. Ezt követően a különféle légsebességek esetében az erőmérő által mért erőből levontuk az adott kocka "üresjárási – súly mínusz felhajtó" erejét, így megkaptuk a mért közegellenálló erőt. A közegellenálló erő nagyságából és az áramlásra merőleges legnagyobb felületekből a 2. egyenlet segítségével kiszámítható a közegellenállási tényező. A mérési eredményeket a 3-5. táblázatok foglalják össze. A 3-5. táblázatokban Rev az egyentérfogatú gömbátmérőkre számított Reynolds szám.

| Frekvencia | Légsebesség | Reynolds szám       | Közegellenállási tényező [-] |        |          |
|------------|-------------|---------------------|------------------------------|--------|----------|
| [Hz]       | [m/s]       | Re <sub>V</sub> [-] | lapban                       | élben  | csúcsban |
| 5          | 2,43        | 8 361,5             | 2,4131                       | 1,7063 | 1,5788   |
| 7,5        | 3,63        | 12 490,6            | 1,5860                       | 1,3254 | 1,3734   |
| 10         | 4,82        | 16 585,4            | 0,9813                       | 0,8095 | 0,8734   |
| 12,5       | 6,01        | 20 680,1            | 0,9279                       | 0,8659 | 1,0081   |
| 15         | 7,19        | 24 740,4            | 0,9294                       | 0,8725 | 0,8569   |
| 17,5       | 8,36        | 28 766,3            | 0,9289                       | 0,8726 | 0,8379   |
| 20         | 9,52        | 32 757,8            | 0,9170                       | 0,8643 | 0,8359   |
| 25         | 11,83       | 40 706,4            | 0,8934                       | 0,8799 | 0,8203   |
| 30         | 14,1        | 48 517,3            | 0,8664                       | 0,8897 | 0,7993   |
| 40         | 18,56       | 63 863,9            | 0,8386                       | 0,8366 | 0,7817   |
| 50         | 22,91       | 78 832,0            | 0,8460                       | 0,8382 | 0,7828   |

#### 3. táblázat: Kiskocka közegellenállás tényezői a három orientációban

4. táblázat: Közepes kocka közegellenállás tényezői a három orientációban

| Frekvencia | Légsebesség | Reynolds szám       | Közegellenállási tényező [-] |        |          |
|------------|-------------|---------------------|------------------------------|--------|----------|
| [Hz]       | [m/s]       | Re <sub>V</sub> [-] | lapban                       | élben  | csúcsban |
| 5          | 2,43        | 14 640,8            | 1,6788                       | 0,8903 | 0,6663   |
| 7,5        | 3,63        | 21 870,8            | 1,2930                       | 0,9143 | 0,8958   |
| 10         | 4,82        | 29 040,5            | 1,0401                       | 0,8392 | 0,8237   |
| 12,5       | 6,01        | 36 210,3            | 0,9609                       | 0,8779 | 0,8659   |
| 15         | 7,19        | 43 319,8            | 0,9398                       | 0,9078 | 0,8922   |
| 17,5       | 8,36        | 50 369,0            | 0,9887                       | 0,9347 | 0,9117   |
| 20         | 9,52        | 57 358,0            | 0,9411                       | 0,9485 | 0,9269   |
| 25         | 11,83       | 71 275,8            | 0,9033                       | 0,9518 | 0,9309   |
| 30         | 14,10       | 84 952,5            | 0,9221                       | 0,9548 | 0,9330   |
| 40         | 18,56       | 111 824,0           | 0,9314                       | 0,9596 | 0,9467   |
| 50         | 22,91       | 138 032,8           | 0,9466                       | 0,9711 | 0,9553   |

#### 5. táblázat: Nagykocka közegellenállás tényezői a három orientációban

| Frekvencia | Légsebesség | Reynolds szám       | Közegellenállási tényező [-] |        | ző [-]   |
|------------|-------------|---------------------|------------------------------|--------|----------|
| [Hz]       | [m/s]       | Re <sub>V</sub> [-] | lapban                       | élben  | csúcsban |
| 5          | 2,43        | 22319,0             | 1,0370                       | 1,1477 | 1,5097   |
| 7,5        | 3,63        | 33340,7             | 1,1112                       | 1,2429 | 1,5689   |
| 10         | 4,82        | 44270,6             | 1,1287                       | 1,3369 | 1,5646   |
| 12,5       | 6,01        | 55200,5             | 1,1874                       | 1,3884 | 1,6105   |
| 15         | 7,19        | 66038,6             | 1,2650                       | 1,4166 | 1,6263   |
| 17,5       | 8,36        | 76784,7             | 1,2590                       | 1,4182 | 1,6434   |
| 20         | 9,52        | 87439,1             | 1,2448                       | 1,4267 | 1,6695   |
| 25         | 11,83       | 108655,9            | 1,2690                       | 1,4436 | 1,6929   |
| 30         | 14,10       | 129505,4            | 1,2642                       | 1,4384 | 1,7067   |
| 40         | 18,56       | 170469,5            | 1,2981                       | 1,4553 | 1,7276   |
| 50         | 22,91       | 210423,3            | 1,3181                       | 1,4432 | 1,7065   |

A korábbiakban megadott összefüggés (1.) segítségével a vizsgált kockák különböző orientációban mért, - az egyentérfogatú gömb számított süllyedési végsebességére vonatkoztatott – alaktényezőit a 6. táblázat tartalmazza.

| Kocka         | Orientáció | Alaktényező |  |
|---------------|------------|-------------|--|
|               | Lapban     | 0,7         |  |
| Kis kocka     | Élben      | 0,71        |  |
|               | Csúcsban   | 0,72        |  |
|               | Lapban     | 0,71        |  |
| Közepes kocka | Élben      | 0,71        |  |
|               | Csúcsban   | 0,71        |  |
|               | Lapban     | 0,51        |  |
| Nagy kocka    | Élben      | 0,55        |  |
|               | Csúcsban   | 0,59        |  |

6. táblázat. A vizsgált próbatestek alaktényezői

A kísérleti berendezésben a légsebességet 2,4 és 23 m/s érték között lehetett változtatni. Ezzel szemben a vizsgált kockák egyentérfogatú gömbjeinek a számított süllyedési végsebesség értékei: kis kocka – 15,93 m/s, közepes kocka – 22,55 m/s és a nagy kocka 48,11 m/s. Látható, hogy a kis és közepes kockák esetében a berendezésben előállhat az az eset, amikor a nyugalomban lévő szemcse körül a légáram pont akkora közegellenálló erőt fejt ki, mint a súlyerő mínusz a felhajtó erő, azaz előáll az egyensúlyi (süllyedési végsebesség) állapot. Ezzel szemben a nagy kocka esetében az egyensúlyi állapotnál csak kisebb közegellenállásokat lehetett beállítani. A nagy kocka esetében az áramlás típusa is váltott, mert kisebb sebességeknél még volt lamináris alapréteg a szemcse körül (II. Newton turbulens tartomány), de az a nagyobb sebességeknél felbomlott, és tisztán turbulenssé vált az áramlás (I. Teljes turbulens tartomány).

### KONKLÚZIÓ

A kommunális hulladékok felhasználására szolgáló áramkészülékeket leggyakrabban a kb. 60 – 200 mm szemcsetartományon alkalmazzák. Az általunk megépített kísérleti légcsatorna mérőcsövének belső átmérője 295 mm, amiből az következik, hogy kb. 100 mm-nél kisebb szemcsék vizsgálhatók benne. A méréseim kimutatták, hogy az áramkészülékek fontos szemcseméret tartományán az I. Teljes turbulens és a II. Newton turbulens szemcse körüláramlási tartománnyal kell számolni. Ez a berendezések tervezését tovább nehezíti.

A kiértékelt eredményekből levonhatjuk azt a következtetést, hogy a kis-és közepes kockánál közel azonos értékre áll be a közegellenállás tényező, nincs kitüntetett különbség az egyes orientációkban. A nagykocka esetében viszont jól látszik a 17. ábrán, hogy az egyes orientációk különböző közegellenállás tényezőket mutatnak. A nagy kocka lapban előre orientációja esetén mértem 0,51 alaktényezőt, ami jól egyezik az 1. táblázatban bemutatott Tarján féle értékekkel. Azonban más méretnél és orientációban ettől nagyobb értékeket kaptam.

A mért eredményeket még nem tudtuk általánosítani, mert ahhoz még további vizsgálatokat kell végezni, továbbá még elméleti megfontolások szükségesek ahhoz, hogy ezzel a berendezéssel, hogyan lehet az egyensúlyi állapotot, - amikor a mérlegkar tartó ereje éppen megegyezik a közegellenálló erővel - meghatározni.

### KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A tanulmány/kutatómunka a "Fenntartható Nyersanyag-gazdálkodási Tematikus Hálózat – RING 2017" című, EFOP-3.6.2-16-2017-00010 jelű projekt részeként a Szechenyi2020 program keretében az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

### IRODALOMJEGYZÉK

- Faitli, J.: Szemcsemozgás mérése és számítása nem-newtoni egy- és többfázisú közegekben. BÁNYÁSZATI ÉS KOHÁSZATI LAPOK-BÁNYÁSZAT 2015/3. pp. 2-9. (2015)
- 2. **Faitli, J.**: Continuity theory and settling model for spheres falling in non-Newtonian oneand two-phase media. INTERNATIONAL JOURNAL OF MINERAL PROCESSING 169:(1) pp. 16-26. (2017a)
- Faitli, J.: Kontinuitási elmélet diszperz anyagrendszerek különféle berendezésekben való eltérő viselkedésének a jellemzésére. MŰSZAKI FÖLDTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK 86:(1) pp. 11-22. (2017b)
- Faitli, J.; Romenda, R.; Szűcs, M.: Egyedi TSZH szemcsék mozgásának vizsgálata modell légáramkészülékben In: Szigyártó, IL; Szikszai, A (szerk.) XIII. Kárpát-medencei Környezettudományi Konferencia Kolozsvár, Románia: Ábel Kiadó, pp. 228-237. (2017)
- 5. Pokorádi, L.: Áramlástan. Elektronikus jegyzet, Debrecen, pp. 45-48. (2002)
- 6. **Romenda, R.; Burinda, Zs.**: Behaviour of regular-shape single particles while falling in normal air conditions GEOSCIENCES AND ENGINEERING: A PUBLICATION OF THE UNIVERSITY OF MISKOLC Volume 7 : Number 10 pp. 158-168. , 11 p. (2019)
- 7. Tarján, I.: A mechanikai eljárástechnika alapjai. Miskolci Egyetemi Kiadó. (1997)