

KONTINUITÁSI ELMÉLET DISZPERZ ANYAGRENDSZEREK KÜLÖNFÉLE BERENDEZÉSEKBEN VALÓ ELTÉRŐ VISELKEDÉSÉNEK A JELLEMZÉSÉRE

FAITLI JÓZSEF¹

ABSZTRAKT: A mechanikai eljárás technika tudományterületének igen kiterjedt az ipari alkalmazása. Két nevezetes alkalmazás a szemcsés anyagok folyadékáramban megvalósított csőszállítása és az őrlőtestek segítségével elvégzett őrlés. Mindkét alkalmazás műszaki jellemzőinek a megértését elősegíti a cikkben bemutatott kontinuitási elmélet, amely segítségével eldönthető, hogy a különféle szemcsékből, részecskékből és egyfázisú közegekből álló bonyolult diszperz anyagrendszer és annak mely része mikor viselkedik kontinuumszerűen, vagy diszkrételemszerűen.

Kulcsszavak: Kontinuum, diszkrételem, hidraulikus szállítás, golyós malom, szuszpenziók reológiája

BEVEZETÉS

Világszerte, – az előkészítéstechnikában – diszperz állapotú anyagrendszerek milliárd tonnát dolgozzák fel minden évben. A frissen kibányászott anyagokat és a már legalább egyszer felhasznált és hulladékká vált anyagokat különféle eljárásokból és berendezésekből felépített technológiák segítségével készítik elő alapanyaggá, amelyből később termékeket gyártanak. Ezekben a berendezésekben a többfázisú diszperz anyagok komplex rendszereket alkotnak, amelyben különféle tulajdonságú cseppek, szemcsék és buborékok lehetnek folyadék, gáz vagy szilárd diszperziós közegben diszpergálva. Az ilyen összetett közegek bonyolult módon viselkedhetnek és a jellemzésük is nehéz. Gondoljunk csak az áramlástanra, ahol az egyfázisú közegek mozgásának a leírása is csak akkor lehetséges, ha feltételezzük, hogy a közeg kontinuum. Nyilvánvaló, hogy a többfázisú rendszereknek a különféle berendezésekben való eltérő viselkedésének a leírása még nehezebb feladat. A következőkben főleg két alkalmazással foglalkozom. Az egyik az őrlés, amikor őrlő testeket, – golyókat, rudakat – alkalmaznak a szemcsés anyagok aprítására. Például, a golyósmalmokban folyadék és gáz-halmazállapotú egyfázisú közegek és diszpergált szilárd anyagok, az őrlőtestek és az őrlött szemcsék találhatók. Ez egy többszörösen összetett rendszer, amelynek a jellemzését elősegítheti, ha megértjük, hogy mely komponensei viselkednek kontinuum-, vagy diszkrételemszerűen egymáshoz, illetve a berendezéshez

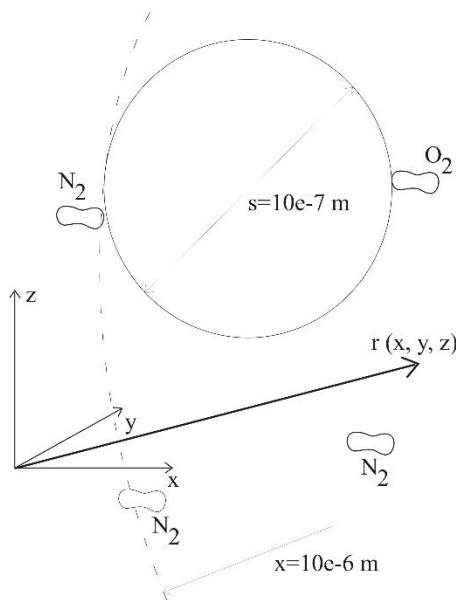
¹ Dr. Faitli József
egyetemi docens
Miskolci Egyetem, Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárás technikai Intézet
ejtfaitj@uni-miskolc.hu

képest. A másik alkalmazás a hidraulikus szállítás, amikor diszpergált szilárd anyagokat szállítanak – csővezetékben – folyadékáramban. Az ipari hidraulikus szállítási alkalmazásokat az jellemzi, hogy különféle méretű és eltérő tulajdonságú szemcsék találhatók benne.

Nagyszámú kutatás foglalkozik az aprító berendezésekben az aprított szemcsék törési és az őrlőtestek mozgási jellemzőinek vizsgálatával. Általában az őrlőtesteket diszkrét elemeknek modellezik (CLEARY 2001, PEREZ et al. 2015), míg az őrlő szemcséket és a folyadékot együtt kontinuumként kezelik (MAYANK et al. 2015). Az ún. csatolt számítógépes modellezés esetén (MAYANK et al. 2015) az őrlő szemcséket és a vizet együtt önálló kontinuumnak kezelik és zagynak nevezik, és a modellezéséhez CFD (computational fluid dynamics) szoftvert alkalmaznak. A CFD modellezés során véges térfogatelemekre bontják a vizsgált malmot és numerikus iteráció segítségével megkeresik azt a sebességállapotot, amely esetén a véges térfogatelemek között kielégülnek a jellemző egyenletek, azaz a mozgásegyenlet, a kontinuitási egyenlet és a – vélhetően csak newtoni folyadékokra érvényes – anyagegyenlet. A hivatkozott cikkből nem állapítható meg, hogy milyen anyagegyenletet használtak a számításokhoz. Az őrlőtestek mozgását DEM (discrete elements method) számítógépes szimuláció segítségével modellezték, amelyben minden egyes őrlőtest jellemzőit külön meg kell adni és a numerikus iterálást, minden egyes őrlőtestre vonatkozóan kell elvégezni. Az nyilvánvaló, hogy nagyszámú őrlőtest modellezése, nagy számítási kapacitást igényel. Amennyiben az őrlő szemcséket is diszkrét elemként kezelnénk, még nagyobb számítási kapacitásra lenne szükség, mert az őrlő szemcsék darabszáma lényegesen több mint az őrlőtesteké, ezért ezt jellemzően nem teszik. Azonban felvetődik a kérdés, hogy az őrlő szemcsék és a víz együtt mindig kontinuumként viselkedik-e az őrlőtestekhez, ill. a malom falához képest? Ezt a kérdést biztosan vizsgálni kell!

Vizsgáljuk meg a normál állapotú levegő (20 °C, 1 bar) mikroszerkezetét. A levegőt alkotó elemi részecskék, a gázmolekulák véletlenszerű hőmozgást végeznek. A molekulák szabad úthossza ebben a rendszerben kb. $s = 0,1 \mu\text{m}$ és valójában nincsen semmi a molekulák között (1. ábra). Azonban, amikor meglegyezzük az arcunkat érezzük, hogy valamilyen közegben vagyunk. Az 1. ábrán ábrázolt r helyvektor éppen a semmibe mutat, akkor hogyan tudjuk értelmezni a sebességvektort ebben a pontban? Ezért szükséges az áramlástan számára, hogy az egyfázisú közegeket kontinuumként modellezze. Az 1. ábrán folytonos vonallal be van rajzolva egy $0,1 \mu\text{m}$ -es gömb alakú szemcse, ill. szaggatott vonallal egy $1 \mu\text{m}$ -es szemcse. Az ábrán jelölt gázmolekulák mérete nem arányos a valós méretükkel, mivel a valóságban a méretük több nagyságrenddel kisebb.

Az 1. ábra megmagyarázza azt is, miért kell a kolloid és a durva diszperz rendszereket egymástól megkülönböztetni. Jellemzően a $0,1 \mu\text{m}$ -nél nagyobb szemcsék mozgását nem befolyásolja egy gázmolekulával való ütközés, viszont $0,1 \mu\text{m}$ alatt már összemérhetőek az impulzusok (tömegek) és itt Brown-mozgás alakul ki. Ezen a ponton felmerül a kérdés, hogy a diszperz rendszerekben az elemi- és véges kiterjedésű diszperz részecskék mikor viselkednek diszkrételem-, vagy kontinuumszerűen?



1. ábra: A levegő mikroszerkezete.

Jól ismert jelenség a szakirodalomban, hogy a szuszpenzió reológia erősen befolyásolja a szilárd anyagok nedves őrlését (HE et al. 2006, SHI et al. 2002, KNIECKE et al. 2010, FAITLI et al. 2016). KNIECKE et al. (2010) laboratóriumi méretű keverő gölyösmalmi kísérleteket végzett, miközben az őrlött szemcséket tartalmazó szuszpenzió folyási viselkedését off-line rotációs reométeres mérések segítségével határozta meg. A kísérleti eredményei alapján KNIECKE et al. azt a következtetést vonta le, hogy az őrlési hatékonyság csökkenésének az volt az oka, hogy az őrlőtestek mozgási energiája lecsökkent az őrlött szuszpenzió megnövekedett látszólagos viszkozitásának a következtében megnőtt viszkózus csillapítás miatt. Az őrlött szuszpenzió látszólagos viszkozitása vagy a nagyobb szilárdanyag koncentráció, vagy pedig a kisebb szemcseméretetek miatt következett be. Megállapították, hogy a reológiai viselkedés lehatárolhatja az őrlési folyamatot, azaz a viszkozitás miatti őrlőgolyómozgás-csillapítás következtében az őrlési határ hamarabb következett be, mint a valódi őrlési határ.

A DEM-szimuláció mellett különféle CFD szimulációs modellek is léteznek, amelyek képesek a többfázisú diszperz rendszer áramlásának a modellezésére. Az ún. Euler többfázisú Dense Discrete Phase modell elérhető a jól ismert Ansys Fluent kereskedelmi szoftvercsomagban. Az alkalmazott Euler-Euler megközelítés a különböző fázisokat együttműködő kontinuumként modellezi és a numerikus számítás során a nyomaték és kontinuitási egyenleteket oldja meg minden fázisra vonatkozóan. Anélkül, hogy megkérdőjelezném a numerikus módszerek ipari alkalmazásának az előnyeit, azonban ne feledkezzünk meg a jelenségek elméleti okainak a feltárásáról sem. Amikor KNIECKE et al. (2010) megmérte az őrlött szuszpenzió eredő reológiai

viselkedését valójában kontinuumként kezelte azt a keveréket és nem vizsgálta a fázisok belső szerkezetét.

HIPOTÉZIS ÉS ELMÉLET

Mindezek alapján a következő elméletet állítottam fel. Durva diszperz rendszerek kontinuum- vagy diszkrételemszerű viselkedése attól függ, hogy a diszperz rész, illetve az eljárás (berendezés, jelenség) jellemző mérete milyen egymáshoz képest. A diszperz rész jellemző méretének a definiálása tűnik az egyszerűbb feladatnak. A mérnöki gyakorlatban elterjedt a 80%-os szemcseméret használata szemcsés anyaghalmazok jellemzésére, mivel adott méretezés során, a biztonság érdekében, egy jól mérhető nagyobb szemcse fizikai jellemzőivel modellezik a halmazt. Az igazi kérdés az az, hogy az eljárás, jelenség vagy berendezésnek mi a jellemző mérete, mert ha attól lényegesen kisebb a diszperz rész jellemző mérete, akkor abban a berendezésben kontinuumként viselkedik a diszperz rendszer. Nézzünk meg egy már korábban is említett „evidens” példát. Amikor valaki sétál a levegőn, akkor a diszperz rész egy „szemcséből” áll. Az ember mérete sok-sok nagyságrenddel nagyobb, mint a levegő elemi diszkrét részecskéi, azaz a gázmolekulák. Ezért a mérnöki gyakorlatban, amikor ez a nagyságrend érvényes jól alkalmazható az áramlástan megközelítés, azaz a levegő kontinuumként viselkedik. Azonban pl. levegőfizikai vizsgálatok esetén, amikor a vizsgált rendszer kicsi, a gázmolekulákat diszkrét elemeknek kell tekinteni, a rendezetlen hőmozgás eredménye az anyagállapot, amelyet az állapothatározók (nyomás, hőmérséklet, térfogat) határoznak meg.

A kontinuitási elmélet legfontosabb hipotézise az, hogy az eljárás (berendezés, jelenség) jellemző mérete a lamináris alaprteg vastagsága egy szemcse, örlőtest, csőfal vagy berendezés fala mentén. Amennyiben a diszperz rész szemcséi beleférnek a lamináris alaprtegbe, akkor a diszperz rendszer kontinuumként viselkedik abban az eljárásban, ha nem akkor pedig diszkrételemszerűen. A következőkben két nevezetes geometriára, a gömb és a henger esetre mutatok be mérési eredményeket, amelyek kísérleti úton bizonyítják a hipotézist.

KÍSÉRLETI BIZONYÍTÁS

1. Szilárd-folyadék keverékek csőáramlása, a henger esete

Szilárd-folyadék keverékek csőáramlása, nevezetesen a hidraulikus szállítás igen széles körben vizsgált a szakirodalomban (WILSON et al. 2010, MATOUSEK 2003, BÖHM et al. 2007). A finom szuszpenzió- durva keverékáramlás modellét Tarján és Faitli 1998-ban publikálta, amely modell képezi a jelenlegi kontinuitási elmélet alapját. Az elmúlt évtizedekben számos szilárd-folyadék csőáramlási kísérletet végezünk el különféle laboratóriumi és ipari méretű csővezetékben és csőreométerben különféle anyagokkal (TARJÁN–FAITLI 1998, BÖHM et al. 2007, FAITLI et al. 2016). A cikkben nem kerülnek csőszállítási mérési eredmények bemutatásra, helyette egy modellszámítás kerül bemutatásra három célszerűen választott monodiszperz homok frakcióval. Az alkalmazott számítási eljárások hitelesítve lettek a hivatkozott

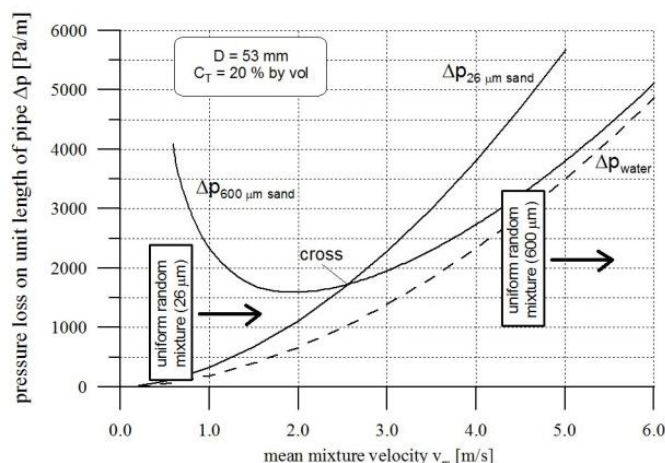
mérések által és jól ismertek a szakirodalomban. A modell monodiszperz homokfrakciók nem tartalmaznak semmilyen felületi tulajdonságokat módosító adalékanyagokat. A három szemcseméret legyen a következő, elsőként 50 nm, mert ez a homok-víz keverék kolloid szuszpenzió, másodikként 26 μm , mert ez a keverék finom szuszpenzióként viselkedett a mérések során, míg a harmadik esetben 600 μm , mert ez a keverék durva keverékként (zagy) viselkedett a kísérletek során. Amennyiben ezt a három keveréket külön-külön egy-egy ülepítő edényben magára hagyjuk a 26 és 600 μm -es keverékek leülepednek, míg a kolloid szuszpenzió csak nagyon hosszú idő után ülepedik le, ha leülepedik. Az ülepítőhengerben, mint berendezésben a 26 és 600 μm -es keverékek diszkrételemszerűen viselkednek, míg a kolloid szuszpenzió kontinuumszerűen. Amennyiben csővezetékben nagy sebességgel áramoltatjuk ezeket a keverékeket, a turbulens impulzus csere következtében az anyag felkeveredik és – elegendően nagy sebesség esetén – mind a három esetben a szilárd koncentráció a függőleges mentén állandó lesz, kialakul, az ún. véletlenszerűen homogén keverékállapot. Látszólag mindhárom keverék hasonlóképp viselkedik, azonban később belátjuk, hogy az 50 nm-es és 26 μm -es keverék kontinuumként, míg a 600 μm -es keverék diszkrételemszerűen viselkedik. Ami egyértelmű, hogy a mért nyomásvesztés görbék alakja tipikusan eltérő (TARJÁN–FAITLI 1998).

A továbbiakban csak a 26 és 600 μm -es keverékeket vizsgáljuk. Számítsuk ki a nyomásvesztés görbéket egy azonos csővezetékre ($D = 53$ mm csőátmérő, $C_T = 20$ % szállítási térfogati koncentráció, $\rho_s = 2644$ kg/m³ szemcsesűrűség, $\rho_m = 1243$ kg/m³ keveréksűrűség), amikor csak a szemcseméret eltérő. Elsőként számítsuk ki egy 26 μm -es homokszemcse vízben való süllyedési végsebességét a szakirodalomban jól ismert összefüggésekkel, a süllyedési végsebesség $v_o = 0,6$ mm/s, a szemcse Reynolds-szám $Re_x = 0,0157$ és a közegellenállási tényező $C_D = 1524$. A szemcse Reynolds-szám lamináris szemcse körüli áramlást jelez, a szemcsemozgás az ún. Stokes ülepedési tartományon valósul meg. A nyomásvesztés számítása előtt el kell döntenünk milyen módszer szerint számítunk. Tételezzük fel, hogy a 26 μm -es homok-víz keverék kontinuumként (finom szuszpenzióáramlás) viselkedik, ezért a nyomásvesztést a keverék reológiai tulajdonságai alapján számíthatjuk. A reológiai viselkedés típusát és a reológiai paramétereket jelen pillanatban az anyagjellemzők alapján még nem tudjuk meghatározni, ezt meg kell mérni. TARJÁN és FAITLI (1998) csőreométerben elvégzett mérései szerint a 20 térfogat %-os 26 μm -es homok-víz szuszpenzió Newtoni folyadék, a mért abszolút viszkozitása $\mu_m = 4,6$ mPas. Egyfázisú Newtoni folyadékok csőáramlási nyomásvesztésének számítása jól ismert a szakirodalomban, a számított nyomásvesztés-görbe ($\Delta p_{26 \mu\text{m sand}}$) a 2. ábrán látható. Összehasonlításként a tiszta víz nyomásvesztés-görbéje (Δp_{water}) is látható a 2. ábrán, amelynek az alakja teljesen hasonló. Az eltérő meredekség oka az eltérő viszkozitás és sűrűség.

Egy 600 μm -es homokszemcse, tiszta vízben való számított süllyedési végsebessége $v_o = 98$ mm/s (szemcse Reynolds-szám $Re_x = 59,2$; közegellenállási tényező $C_D = 1,325$). A szemcse Reynolds-szám azt jelzi, hogy kialakul lamináris alaprteg a szemcse körül, attól távolabb viszont átmeneti lamináris-turbulens az áramlás, azaz

a szemcsemozgás az ún. átmeneti szemcsemozgási tartományba esik. 600 μm -es homok-víz keverék nyomásvesztés-görbéje – TARJÁN és FAITLI (1998) mérései szerint – jól leírható a közismert Durand és Condolios egyenlettel. A nyomásvesztés (Δp) a keverék átlagsebességének (v_m) a függvényében az 1. egyenlettel számítható. Az így kiszámított nyomásvesztés görbe ($\Delta p_{600 \mu\text{m sand}}$) szintén a 2. ábrán látható. A 2. ábrán a $v_m/v_o = 45$ (keverék átlagsebesség/szemcse süllyedési-végsebesség) sebességhez tartozó hely szintén fel van tüntetve mindkét keverékhez. Feltételezhetjük, hogy amennyiben a csőáramlási sebesség legalább 45-ször nagyobb, mint a szemcse süllyedési-végsebessége, akkor a szilárd anyag felkeveredik, és kialakul a véletlenszerűen homogén keverékállapot. A szakirodalomban az ún. homogén-heterogén keverékáramlás osztályozási módszer még mindig megtalálható (BÖHM et al. 2007, WILSON et al. 2010). E szerint mindkét keverék áramlását homogénnek kell minősíteni a határ $v_m/v_o = 45$ sebességérték feletti sebességeknél. Azonban a mért és számított nyomásvesztés-görbék alakja teljesen eltérő a két keverék esetében.

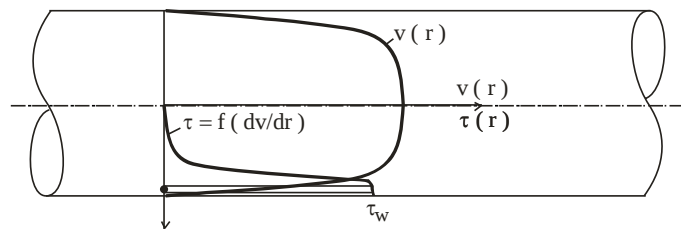
$$\Delta p = \Delta p_w \left[1 + 85 \cdot C_T \cdot \frac{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right)^{1.5}}{C_D^{0.75}} \cdot \left(\frac{\sqrt{g \cdot D}}{v_m} \right)^3 \right] \quad (1)$$



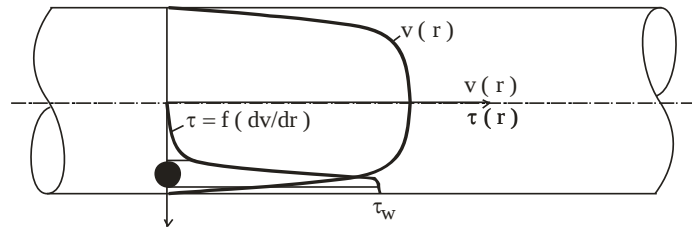
2. ábra: 26 és 600 μm -es homok-víz keverékek nyomásvesztés-görbéje.

További kérdéseket vet fel a következő jelenség. A 2. ábrán a két nyomásvesztés-görbe keresztezési pontja (cross) fel van tüntetve. Ettől a ponttól nagyobb sebességek esetén a nagyobb szemcseméretű homok szállítása kisebb energia befektetését igényli. Továbbá egészen nagy sebességek esetén a nagyobb szemcsésű homok szállítása szinte nem igényel a víz szállításához szükségesnél nagyobb energiát. Ezzel

szemben a finom szemcsészetű homok szállítása, pedig többszörös energiát igényel. Kis sebességeknél pedig pont fordított a helyzet. Hogyan lehetséges mindez? Elméleti megfontolások alapján az eltérő viselkedések magyarázata lehet az, hogy a csővezetéki áramlás jellemző mérete a csőfal menti lamináris alapréteg vastagsága. Amennyiben a szállított szemcse befér a lamináris alaprétegbe a keverék finom szuszpenzióáramlásban szállítható, azaz kontinuumként viselkedik, ha pedig nem, akkor durva keverékáramlásban szállítható, azaz diszkrételemszerűen viselkedik.



3. ábra: Egy finom szemcse befér a lamináris alaprétegbe.



4. ábra: Egy durva szemcse nem fér bele a lamináris alaprétegbe.

A 3. és 4. ábrákon a turbulens csőáramlás tipikus sebesség és nyírófeszültség görbéje látható. Amennyiben a szemcse olyan kicsi, hogy befér a lamináris alaprétegbe (3. ábra), akkor a szemcse felületén a nyírófeszültség integrálja, – ami nem más, mint a hidrodinamikai felhajtóerő (F_B) – elhanyagolható mértékű, mivel a lamináris alaprétegben a nyírófeszültség közel állandó. A lamináris alaprétegben a sebesség közel lineárisan változik, amelynek a deriváltja konstans.

$$F_B = \int_A \tau \cdot dA \quad (2)$$

Mivel a hidrodinamikai felhajtóerő a finom szemcsékre még nagy sebességek esetén is kicsi, ezért ezek a szemcsék bent maradnak a lamináris alaprétegben és a keverék eredő reológiai jellemzői megváltoznak, megnő a keverékben a belső súrlódás mértéke, azaz a viszkozitás. A finom szemcsés keverék akár nem-Newtoni viselkedésűvé is válhat. Mivel a keverék eredő reológiai viselkedése határozza meg a csőáramlás jellegét ezért ez kontinuumszerű viselkedés. A keverék reológiai jellemzőit más

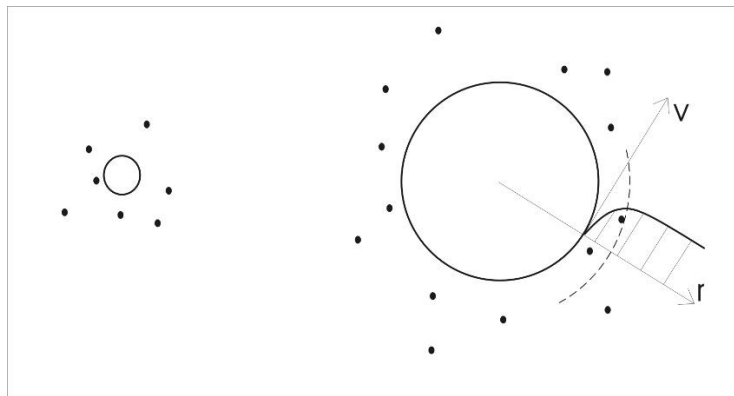
eszközben, pl. rotációs reométerben is megmérhetjük és a mért reológiai paraméterek alapján tetszőleges sebességhez ki tudjuk számítani a csőszállítás nyomásvesztését, azaz a hidraulikus szállítást méretezni tudjuk.

A durva szemcsék nem férnek bele a lamináris alaprétegbe (4. ábra) és ezért a 2. egyenlet szerinti felületi integrál jelentős hidrodinamikai felhajtóerőt eredményez. Minél nagyobb a sebesség, annál nagyobb a faltól eltaszító felhajtó erő, azaz annál kevésbé képes a durva szemcse a fallal érintkezni, súrlódni. Ez a hipotézis megmagyarázza azt a sokszor megmért tény, hogy nagy sebességű durvaszemcsés hidraulikus szállítás nyomásvesztése szinte csak a víz nyomásvesztésével egyenlő, mintha a nagy tömegű durvaszemcsés anyag szállításához nem is kellene energia! A felállított hipotézis másik következménye, hogy a durva szemcsék okozta veszteség elsősorban a szemcse és csőfal közti mechanikai súrlódás következménye. A mechanikai súrlódás a normálerőtől és a súrlódási tényezőtől függ, és nem függ a sebességtől. Ezzel szemben az áramlási súrlódási veszteség a turbulens tartományon közel a sebesség négyzetével arányos. Ebből az következik, hogy a durva szemcsék diszkrételemszerűen viselkednek a csőben, az eredő veszteség a sztohasztikus szemcse-súrlódási események összegével arányos, azaz DEM szimulációs megközelítésre van szükség. Ez a sztohasztikus viselkedés magyarázza azt a tény is, hogy durva szemcsék csőáramlási nyomásvesztésének a számítására igen sok összefüggés található a szakirodalomban (GOVIER és AZIZ 1972). MATOUSEK (2003) és WILSON et al. (2010) tanulmányozta különféle szilárd-folyadék keverékáramlások esetén a csőfal mentén sugár irányban befelé a koncentráció változását és hasonló következtetésre jutott. Kísérletileg bizonyították, hogy létezik „az ő megfogalmazásukban” faltól eltaszító erő és ez a fal menti koncentráció csökkenését eredményezi a durva szemcsék esetén nagy sebességeknél. WILSON et al. (2010) „near wall model”-nek (falközei modellnek) nevezte ezt el. A fal mellett a hidrodinamikai felhajtóerő függ a szemcse-csőátmérő aránytól (x_{80}/D). Konkrét tervezési feladatnál ismert a szállítandó (előkészítendő) anyag és valójában a csőátmérő is (adott kapacitás), ezért a jellemző szemcseméret az, ami meghatározza a keverékáramlás jellegét. Adott csőnagysághoz meghatározható egy határszemcseméret, amely alatt kontinuum-szerű, míg felette diszkrételemszerű lesz az áramlás. TARJÁN és FAITLI (1998) szisztematikus méréseket végzett, – amikor szűken osztályozott szemcseméretű anyagokat vizsgáltak különféle csővekben – és megállapították, hogy kb. 150 mm csőátmérőnél kisebb csővezetékben homokokra a határszemcseméret kb. 50 μm , míg pernye-salak anyagokra kb. 160 μm .

2. Egy őrlógolyó finom szuszpenzióban süllyed, a gömb esete

A bevezetésben már bemutatásra került az őrlőtesteket alkalmazó malmokban lévő diszperz rendszer komplexitása. Az angol nyelvű szakirodalomban általános a következő szóhasználat: „mill, particle, slurry”, azaz malom, szemcse, zagy (MAYANK et al. 2015). Ebből következik, hogy az őrlött szemcséket és a folyadékot – többnyire vizet – együtt már eleve külön fázisként (zagy) kezelik, és az őrlőtestekre használják a „particle” szót. A korábbiakban bemutatott henger nevezetes esetre vonatkozó

kontinuitási elmélet szerint ez két szempontból is problematikus. Egyrészt az kérdéses, hogy adott rendszerben az adott őrlőtesthez képest az őrlt szemcsék és a víz kontinuumként viselkedik-e? Ezt minimum meg kell vizsgálni. Általában – még az őrlés kezdetén is – az őrlőtestek mérete legalább tízszerese az őrlt szemcsék méretének, vagyis a gyakorlati esetek többségében valószínűleg tényleg kontinuumként viselkedik az őrlt szuszpenzió. A henger esetre bemutatott kontinuitási modellből következik az is, hogy célszerű a szilárd-folyadék keverékeket attól függően szuszpenzióknak (kontinuumszerű), vagy zagynak (diszkrételemszerű) nevezni, hogy miként viselkednek a berendezésben. Az 5. ábrán két őrlőgolyó és néhány őrlt szemcse látható. Az ábra bal oldalán az őrlőgolyó lényegesen kisebb, mint a jobb oldalon lévő.



5. ábra: Őrlőgolyók mozognak az őrlt szemcséket tartalmazó közegben.

A szakirodalomban jól ismert a hátráltatott ülepedés jelensége. Amikor egy – a közegnél nagyobb sűrűségű – szemcse süllyed a gravitációs térben, a szemcse mozgása elől, a közegnek ki kell térnie. Az így elmozduló áramló fluidum befolyásolja egy következő, másik szemcse mozgását, szakkifejezéssel: hátráltatja a süllyedését. Mindaddig hátráltatott ülepedésről beszélünk, amíg a nagyobb süllyedési sebességű szemcsék ki tudják előzni a lassabban süllyedőket. Amikor a koncentráció már olyan nagy, hogy a gyorsabb szemcsék már nem tudják kielőzni a lassabbakat – hasonlóképp, ahogy a zsúfolt autópályán sem tudnak a gyorsabb autók előzni –, zónás ülepedésről beszélünk. Ilyen rendszerben, – azaz a hátráltatott ülepedés esetén – az egyedi szemcsék diszkrételemszerűen viselkednek. Az 5. ábra bal oldalán a kisméretű őrlőgolyó mozgását hátráltatják az őrlt szemcsék. A bemutatott kontinuitási elmélet szerint, amennyiben az őrlőgolyó körül kialakuló lamináris alaprétegbe beleférnek az őrlt szemcsék (5. ábra jobb oldala), akkor a hidrodinamikai felhajtóerő kicsi, így ezek a szemcsék ott maradhatnak. Ilyenkor az őrlt szemcsék és a víz együtt kontinuumként viselkedik az őrlőgolyóhoz képest. Az elmélet értelmében az egy másik kérdés, hogy a malom falához képest hogyan viselkednek.

A kontinuumszerű viselkedés kísérleti bizonyítására kísérleti berendezést építettem, amellyel szisztematikus méréseket végeztem el. Az eredményeket magyar és angol nyelven publikáltam (FAITLI 2015, FAITLI 2017), ezért itt részletesen nem ismertetem őket. A megépített kísérleti berendezés fő része egy 5 m magas és 120 mm belső átmérőjű ejtőcső volt, amelyben vizet, ill. különféle finom szuszpenziókat áramoltattam felfelé. A finom szuszpenziók reológiai jellemzőit előzőleg csőreométerben mértem meg. Az ejtőcsőben különböző méretű acélgolyók süllyedtek, amelyek átmérője legalább 175-ször nagyobb volt, mint a szuszpenziót alkotó szemcsék mérete. A süllyedési végsebességet a mozgást egyáltalán nem befolyásoló induktív érzékelők és a számítógépes mérésadatgyűjtő rendszer segítségével lehetett megmérni. Az acélgolyók – finom szuszpenziókban való – mért süllyedési végsebesség értékeit a számított értékekkel hasonlítottam össze. A számítást a kontinuitási elmélet szerint végeztem el, azaz a külön berendezésekben megmért szuszpenziós reológiai paramétereket és a piknométerben mért szemcsesűrűség alapján számított szuszpenziós sűrűséget helyettesítettem az egyfázisú közegekre vonatkozó ismert összefüggésekbe. A mért és számított értékek un. relatív szórása mindössze 1,7% volt, amely alacsony érték egyaránt hitelesíti a kísérleti berendezéseket és az alkalmazott kontinuitási elméletet.

ÖSSZEFOGLALÁS, KONKLÚZIÓ

A mechanikai eljárás technika két eltérő ipari alkalmazása a hidraulikus szállítás és az őrlőtestekkel megvalósított őrlés (golyós, rudas, keverő golyós stb), azonban mindkettő esetén alapvető fontosságú, hogy a többfázisú diszperz rendszer hogyan viselkedik a berendezésben. A golyósmalmok számítógépes szimulációja esetén az őrlött szemcsékből és a vízből álló keveréket kontinuumként kezelik, azért mert hatalmas számítási kapacitást igényelne az őrlött szemcséket is diszkrét elemként egyével számítani. Azonban, az aprítás speciális jellemzője az, hogy a kezdetben nagyobb szemcseméret a folyamat során kisebbé válik, azaz bekövetkezhet a diszkrételemszerű viselkedés átváltása kontinuumszerű viselkedéssé. A csővezetéki példa megmutatta, hogy a kétféle viselkedés a nyírás sebességének a függvényében éppen ellentétes irányultságú veszteséget okoz. A diszkrételemszerű viselkedés esetén – nagy mozgási sebességeknél – szinte elhanyagolható az energianövekedés, kis sebességeknél pedig fajlagosan többszörös is lehet. A kontinuumszerű viselkedés esetén pedig éppen ellentétes a tendencia. Számos malomtípus, különösen a száraz gyűrűsmalmok esetén megfigyelhető a sok finom szemcse keletkezésekor fellépő malomrázkódás, amely lehet a diszkrételemszerű viselkedés kontinuumszerű viselkedéssé való megváltozásának a következménye.

A diszperz rendszerek különféle berendezésekben való eltérő viselkedését – a bemutatott kontinuitási elmélet szerint – a diszperz rész és az eljárás jellemző méreteinek az egymáshoz való viszonya határozza meg. A mechanikai eljárás technika ipari alkalmazásaiban előforduló tipikus cső- és gépméretek esetén a szilárd-folyadék diszperz rendszereket a következő nevezetes szemcseméret nagyságrendek mentén célszerű megkülönböztetni. A kolloid diszperz rendszerek jellemző felső határa kb.

0,1 μm . A mechanikai eljárástechnika területén még a nyugalomban lévő kolloid szuszpenziók is jellemzően kontinuumként viselkednek. A főleg kolloid rendszerekre kidolgozott bimodális modell (SENGUN–PROBSTEIN 1989) szerint, szubmikronos méretű szemcsék képesek nagyobb méretű szemcséket (kisebb, mint kb. 10 μm) stabilizálni, amelyek így nehezebben ülepednek le. A szubmikronos szemcsék – jellemzően akár – nem-newtoni reológiai viselkedést eredményezhetnek, míg a „durva” 1–10 μm -es szemcsék nagyobb viszkozitást eredményeznek. A SENGUN és PROBSTEIN (1989) féle bimodális modell igen jó összhangban van a cikkben bemutatott kontinuitási elmélettel. Kb. a 0,1 ... 50–160 μm tartományon célszerű a mozgásban lévő szilárd-folyadék keverékeket szuszpenzióknak nevezni, mert a mérnöki gyakorlatban ezek jellemzően kontinuumszerűen viselkednek. Az ettől nagyobb szemcséket tartalmazó keverékeket pedig zagynak, mert azok pedig jellemzően diszkrételemszerűen viselkednek.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A tanulmány/kutatómunka a *Fenntartható Nyersanyag-gazdálkodási Tematikus Hálózata* – 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 valósult meg.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] BÖHM, J.–DEBRECZENI, Á.–FAITLI, J.–GOMBKÖTŐ, I.–MEGGYES, T.: High-concentration hydraulic transport of tailings. *Land Contamination and Reclamation*, (2007) Vol. 15, Num. 2, 195–217.
- [2] CLEARY, P. W.: Recent Advances in DEM modelling of Tumbling Mills. *Minerals Engineering*, (2001) 14(10), 1295–1319.
- [3] FAITLI, J.–BOHÁCS, K.–MUCSI, G.: Online rheological monitoring of stirred media milling. *Powder Technology*, 308, (2016), 20–29.
- [4] FAITLI, J.–BÖHM, J.–MUCSI, G.–GOMBKÖTŐ, I.–WEISZ, R.: Development of Fly-ash Based Hydraulic Backfilling Technology for the Final Closure of Underground Mines. *Solid State Phenomena*, 244: (2016), 130–139.
- [5] FAITLI J.: Szemcsemozgás mérése és számítása nem-newtoni egy- és többfázisú közegekben. (The Measurement and Calculation of Particle Motion in non-Newtonian one- and multi-phase media) *Bányászati és Kohászati Lapok – Bányászat*, (2015/3), 2–9.
- [6] FAITLI, J.: Continuity theory and settling model for spheres falling in non-Newtonian one- and two-phase media. *International Journal of Mineral Processing*, 169 (2017), 16–26.

-
- [7] GHOSH, T.: Modelling of an air-based density separator (2013). *Theses and Dissertations-Mining Engineering*,. Paper 7.
http://uknowledge.uky.edu/mng_etds/7
- [8] GOVIER, G. W.–AZIZ, K.: The flow of complex mixtures in pipes. *Van Nostrand Reinhold*, 1972.
- [9] HE, M.–WANG, Y.–FORSSBERG, E.: Parameter effects on wet ultrafine grinding of limestone through slurry rheology in a stirred media mill. *Powder Technology*, 161 (2006), 10–21.
- [10] KNIEKE, C.–STEINBORN, C.–ROMEIS, S.–PEUKERT, W.–BREITUNG-FAES, S.–KWADE, A.: Nanoparticle production with stirred-media mills: Opportunities and limits. *Chem. Eng. Technol.*, 33 (2010), 1401–1411.
- [11] MATOUSEK, V.: Effect of solids distribution near a pipe wall on flow friction in a slurry pipeline. The 4th *International Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids*. Budapest, Hungary, Proceeding: (2003), 13.19–13.24.
- [12] MAYANK, K.–MALAHE, M.–GOVENDER, N.–MANGADODDY, N.: Coupled DEM-CFD model to predict the tumbling mill dynamics. *Procedia IUTAM*, Vol. 15 (2015), 139–149.
- [13] PEREZ, J.–BARRIOS, G.–TAVARES, L. M.: DEM Simulation of Bed Particle Compression Using the Particle Replacement Method. *Proceedings of the European Symposium of Comminution and Separation* (2015), Gothenburg.
- [14] SENGUN, M. Z.–PROBSTEN, R. F.: Bimodal model of slurry viscosity with application to coal slurries. Part I. *Rheologica Acta*, Vol. 28 (1989), 382; Part II. *Rheologica Acta*, Vol. 28 (1989), 394.
- [15] SHI, F.–NAPIER-MUNN, T.: Effects of slurry rheology on industrial grinding performance. *Int. J. Miner. Process.* 65 (2002), 125–140.
- [16] TARJÁN, I.–FAITLI, J.: The Distinction of the Fine Suspension Flow from the Coarse Mixture Flow by Measuring of the Pressure Loss on a Horizontal Pipe. *Mineral Economy Journal*, (Gospodarka Surowcani Mineralnymi) (1998) Volume 14, Number 3, 61–71.
- [17] WILSON, K. C.–SANDERS, R. S.–GILLIES, R. G.–SHOOK, C. A.: Verification of the near – wall model for slurry flow. *Powder Technology*, 197 (2010), 247–253.