



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

Épületgépészeti és Gépészeti Eljárástechnika Tanszék
Pattantyús Ábrahám Géza Gépészeti Tudományok Doktori Iskola

Szemcsés anyag keverési teljesítményigényének
meghatározása forgólapátos keverőben

PhD értekezés téziszfüzete

Horváth Dániel

Témavezető:
Dr. Poós Tibor
egyetemi docens

Budapest, 2024. június 2.

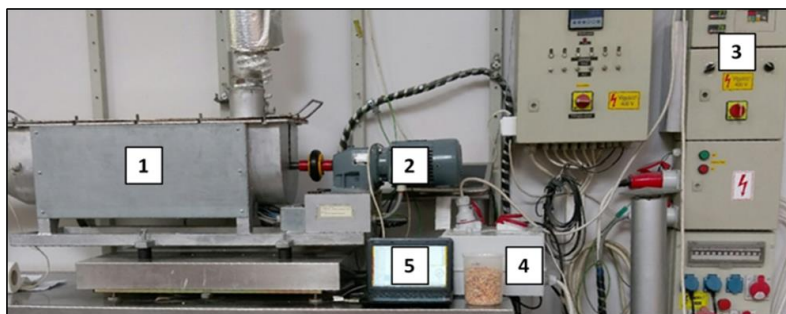
BEVEZETÉS

A keverés művelete számos iparágban előfordul, mivel a mezőgazdasági, a gyógyszer-, az élelmiszer-, a bányá-, az olaj- és a vegyipar is végez valamilyen keverési feladatot. Továbbá számos háztartási berendezés fő, vagy mellékfeladata a keverés. A keverés csoportosítható a kevert anyagok halmazállapota alapján. Beszélhetünk folyadék-folyadék, gáz-gáz, szilárd-szilárd, vagy eltérő fázisok keveréséről is. Az egyes fázisok keverésének elmélete, keverés közbeni mozgása, keveredési hajlama és a keveréshez szükséges energiaigénye eltérő.

A folyadékokkal ellentétben, a szilárd szemcsés anyagok keverésére a mai napig nincs olyan általános összefüggés, amellyel meghatározható a keverés teljesítményigénye. Ennek következtében, a doktori munka során vizsgált vízszintes elrendezésű forgólapátos keverőre sem létezik ilyen összefüggés. A jelenség leírását nehezíti, hogy eltérő elrendezésű és keverőelem kialakítású berendezések léteznek, a kevert anyag anyagjellemzőitől és a keverés céljától függően. A keverés műveletének energetikai optimalizálása érdekében is szükséges ismerni a keverési teljesítményigényt, mivel azzal és a műveleti idővel meghatározható az üzemeltetéshez szükséges energiaigény.

A szakaszos üzemű, vízszintes elrendezésű forgólapátos keverőben történő szárítás már rendelkezik előzményekkel az Épületgépészeti és Gépészeti Eljárás technika Tanszéken, amely során számítási algoritmus lett létrehozva a szárítási művelet méretezésére. Azonban a keverést végző motor keverési teljesítményigényének méretezésével korábban még nem foglalkoztak.

A doktori munkám során, vízszintes elrendezésű forgólapátos keverő diszkrét elemes módszerrel (DEM) alapuló szimulációjára javasoltam különböző szemcsekapcsolati modelleket, amelyekkel megfelelően szimulálható a keverési teljesítményigény. Ezen felül, a keverési teljesítményigény számítására egy dimenzió nélküli összefüggést is létrehoztam dimenzióanalízis alkalmazásával. Bevezettem egy új dimenzió nélküli számot – a kohéziós teljesítményszámot –, amely kiváltja a folyadékok keverése során is alkalmazott klasszikus teljesítményszámot. A szimulációs eredmények validálására és a dimenzió nélküli összefüggés ismeretlen paramétereinek meghatározására laboratóriumi méréseket végeztem. A mérésekhez a Stokes Laboratóriumban található, gépészetileg és mérés technikailag korszerűen felszerelt szakaszos üzemű, forgólapátos keverőt használtam fel, amelyet az 1. ábra szemléltet.



1. ábra. A keverési teljesítményigény vizsgálatára alkalmas mérőállomás
(1. dob; 2. hajtóműves motor; 3. frekvenciaváltó; 4. teljesítménytávadó, 5. laptop)

SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A keverés műveletének energiaigénye visszavezethető az adott üzemeltetési paraméterek mellett fellépő keverési teljesítményigényre. Szemcsés anyagok keverése esetén fő üzemeltetési paraméter a keverési fordulatszám, szakaszos üzemű berendezések esetén a dob töltési fok, és folyamatos üzemű berendezések esetén a hold-up. Ezek az üzemi paraméterek számottevően képesek befolyásolni a keverési teljesítményigényt. Mind a keverési fordulatszám ([1–12], [S1, S2]), mind pedig a töltési fok ([2,3,7,10,12–14], [S1, S2]), valamint a tömeg- és/vagy térfogatáram [4,11] növelésével, nő a keverési teljesítményigény. Ezek mellett nem elhanyagolható a berendezések üresjárásai keverési teljesítményigénye sem [S1], amely a keverést végző keverőelemek geometriai kialakításából [1,2,6,14] és annak tömegéből származó nyomatókból, az alkatrészek súrlódásából, és a légellenállás következtében jöhet létre. A keverési teljesítményigény függ a kevert anyag fizikai és anyagjellemzőitől is. A szemcsék alakja is hatással van a keverési teljesítményigényre. Gömbszerű alakkal rendelkező szemcsék alacsonyabb, a torzabb, szabálytalan alakkal rendelkező szemcsék nagyobb keverési teljesítményt igényelnek [15]. Kisebb méretű szemcsék keverése esetén alacsonyabb, nagyobb méretű szemcsék esetén pedig nagyobb keverési teljesítményigény lép fel ugyanazon anyagjellemzők mellett [7,16]. Nem elhanyagolható a kevert anyagok nedvességtartalma sem. A nedvszívó anyagok belső szerkezete megváltozhat a nedvesség következtében, amely hatására megváltozhat a szemcsék mérete és azok egyes anyagjellemzői. A felületi nedvességgel rendelkező szemcsék között kohéziós erő jöhet létre, amely tovább növeli a keverési teljesítményigényt a felületi nedvességtartalommal nem rendelkező anyagokéhoz képest [17].

A mérésekkel foglalkozó szakirodalmat összefoglalva, a keverést végző berendezésekben a dob töltési fok, és/vagy a fordulatszám növelésével a keverési teljesítményigény is nő. Továbbá nem elhanyagolható a kevert anyag mérete, valamint annak fizikai- és anyagjellemzői, ugyanis azok különböző mértékben befolyásolják a keverési teljesítményigényt.

A szimulációkkal foglalkozó szakirodalmakat összefoglalva, a DEM alkalmas a szemcsés anyagok keverési teljesítményigényének modellezésre, viszont fontos a megfelelő szemcsekapcsolati modell megválasztása.

Az elméleti levezetésekkel és empirikus egyenletek létrehozásával foglalkozó szakirodalmakat összefoglalva, jelenleg nem létezik olyan összefüggés, amely alkalmazható lenne vízszintes elrendezésű forgólapátos keverő keverési teljesítményigényének meghatározására.

A KUTATÓMUNKA MENETE

Doktori munkám során, vízszintes elrendezésű forgólapátos keverő keverési teljesítményigényének meghatározására alkalmas módszereket dolgoztam ki.

A kutatómunkám az alábbi főbb lépésekből állt:

1. Irodalomkutatás segítségével összegyűjtöttem azokat a forrásokat, amelyek a keverési teljesítmény mérésével, szimulációjával, vagy elméleti leírásával foglalkoztak.
2. Laboratóriumi mérésekkel meghatároztam különböző nedvességtartalmú szemcsés anyagok keverési teljesítményigényét, eltérő üzemeltetési beállítások mellett. A mérési eredmények a diszkrét elemes módszeren (DEM) alapuló szimulációs modellek validálására és a dimenzióanalízissel létrehozott összefüggés ismeretlen paramétereinek meghatározására szolgáltak.
3. A DEM szimulációk beállítási paramétereinek meghatározásához, légpiknométerrel, továbbá statikus rézsűszög és direkt nyíródobozos berendezéssel laboratóriumi méréseket végeztem. Az utóbbi két berendezéssel szimulációs kalibrálásokat is végrehajtottam, amellyel további beállítási paramétereket határoztam meg.
4. A DEM szimulációk során, két eltérő szemcsekapcsolati modell alkalmazhatóságát vizsgáltam, amelyek a szemcsék ütközése során fellépő erők és nyomatékok egyenleteit tartalmazzák. Az egyik modell figyelembe vette a szemcsék felületi nedveségének következtében létrejövő kohéziós erőket. A másik modell csak felületi nedvességgel nem rendelkező szemcsés anyagok keverésére volt alkalmas.
5. A direkt nyíródobozos berendezés és a lapátos keverő DEM szimulációja időigényes feladat, ezért azok szimulációs időigényének csökkentési lehetőségei is vizsgálatra kerültek. A direkt nyíródobozos berendezés esetén nyírósebesség érzékenységi vizsgálatot végeztem. A lapátos keverő esetén 3D modell háló elemszám, időlépés és paraméterérzékenységi vizsgálatokat végeztem.
6. Dimenzióanalízis alkalmazásával létrehoztam a lapátos keverők esetén alkalmazható dimenzió nélküli egyenlet általános alakját. Az általános dimenzió nélküli egyenletből pedig egy anyag és berendezés specifikus egyenletet hoztam létre, mivel egyes paraméterekre nem állt rendelkezésemre egnél több érték. A dimenzió nélküli egyenlet segítségével becsülhető a vizsgált lapátos keverő keverési teljesítményigénye.

MÉRÉSEK ÉS MÓDSZEREK

A munkám célja olyan módszer kidolgozása volt, amellyel becsülhető a keverési teljesítményigény vízszintes elrendezésű forgólapátos keverőben. A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Épületgépészeti és Gépészeti Eljárástechnika Tanszék, Stokes Laboratóriumában méréseket végeztem az 1. ábra által bemutatott keverőberendezésen. A vizsgált anyagokat a 2. ábra szemlélteti: hántolt köles (*Panicum miliaceum* L.), takarmánykukorica (*Zea mays* L.) és hántolt árpa (*Hordeum vulgare*).



2. ábra. A vizsgált szemcsés anyagok:
a. hántolt köles, b. takarmánykukorica, c. hántolt árpa

Keverési teljesítményigény mérések

A mérések előtt előkészítettem a vizsgált anyagokat. Légosztályozó berendezés segítségével a törött szemcséket és az egyéb szennyeződésekeltávolítottam, és így közel azonos szemcseméretű szemcsehalmazt kaptam. Ezt követően, víz hozzáadásával eltérő nedvességtartalmú szemcsehalmazokat hoztam létre egy forgódobos berendezés alkalmazásával. Végül, szárítókamra és tömegmérés alkalmazásával meghatároztam a vizsgált anyagok nedvességtartalmát.

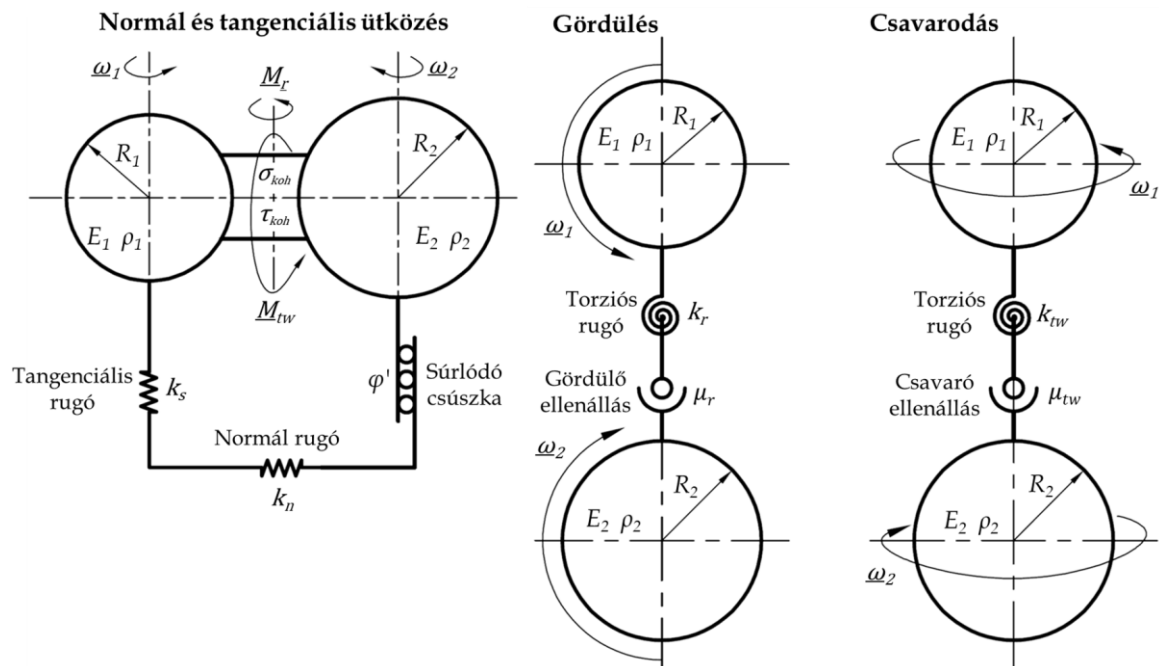
A lapátos keverő dobjába töltött anyag mennyiségét a dob töltési fokkal jellemeztem, amely az üres dob térfogatára fajlagosított szemcsehalmaz térfogatot adja meg. A keverési teljesítményigény mérések során, a keverő fordulatszámát frekvenciaváltó segítségével az $n_k = 0,48 - 1,58$ 1/s tartományon változtattam, és a dob töltési fokot $l = 10 - 25\%$ tartományon vizsgáltam. A motor által felvett pillanatnyi teljesítményigényt egy háromfázisú teljesítménytávadóval rögzítettem.

A szemcsés anyag betöltése előtt üresjárás méréseket végeztem, így meghatározva a tengely és a keverőelemek forgatása, csapágysúrlódások, valamint a légellenállás okozta átlagos üresjárás teljesítményigényt. Az idő függvényében mért teljesítmény értékeket átlagoltam a beállított dob töltési fok és fordulatszám esetén. Az anyaggal mért átlagos teljesítményigényből kivonva az átlagos üresjárás teljesítményigényt, meghatároztam a vizsgált anyag átlagos keverési teljesítményigényét.

Diszkrétételes szimulációk

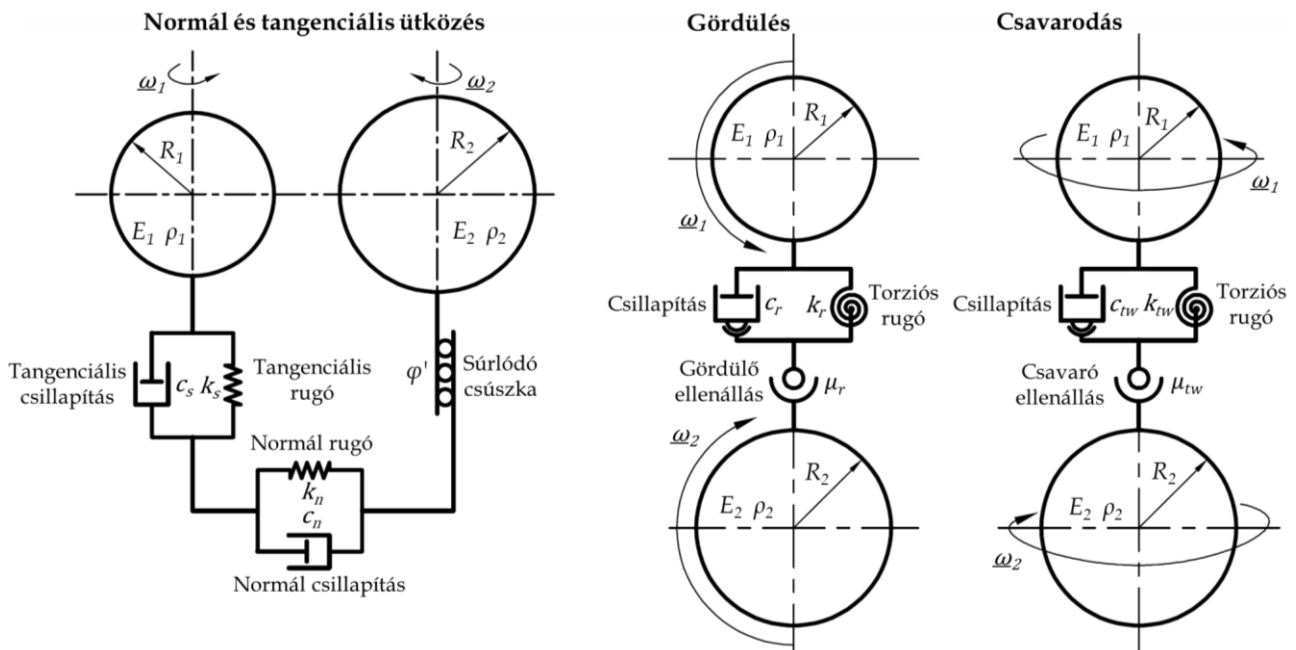
A Yade-DEM szoftvert alkalmaztam a diszkrétételes szimulációk elvégzésére, amely egy nyílt forráskódú szoftver. Ennek következtében, szabadon végezhettem módosításokat, vagy építhettem be új szemcsekapcsolati modellt a szoftverbe. A doktori munkám során két szemcsekapcsolati modellt vizsgáltam.

Az első szemcsekapcsolati modell a szoftverben megtalálható „CohFrictPhys” modell volt, amelynek a sematikus felépítését a 3. ábra szemlélteti. Ez a modell figyelembe veszi a szemcsék felületén található nedvesség hatására létrejövő kohéziós erőket is. A modellben található egyenletek visszavezethetők a klasszikus elasztikus és a Bond szemcsekapcsolati modellben található egyenletekre. A szimulációk során szükség volt valamilyen sebességfüggő paraméter alkalmazására a keverési teljesítményigény megfelelő nagyságrendű szimulációjához. Ennek következtében megállapítottam, hogy a továbbiakban szükség van valamilyen csillapítás alkalmazására, hogy az energiadisszipáció ne csak a súrlódások következtében menjen végbe.



3. ábra. A „CohFrictPhys” szemcsekapcsolati modell sematikus felépítése

A második szemcsekapcsolati modell egy saját fejlesztésű viszkoelasztikus modell (neve: „ViElTo”) volt, amelynek egyenleteit beépítettem a Yade-DEM szoftverbe, C++ programozási nyelven. A ViElTo szemcsekapcsolati modell sematikus felépítését az 4. ábra mutatja be. A modellbe viszkózus csillapítások kerültek beépítésre normál és tangenciális ütközési irányban, valamint a szemcsék gördülésének és csavarodásának modellezésénél esetén is. A modell nem veszi figyelembe a kohéziós erőket, ezért a szimulációk eredményeit csak a légszáraz állapotú szemcsés anyagokkal végzett mérésekkel validáltam. Ennek következtében, nem volt szükség a kohéziós kapcsolatokat modellező mikromechanikai paraméterek kalibrálására, mint a CohFrictPhys szemcsekapcsolati modellnél a kohéziós normál és nyírószilárdságra.



4. ábra. A „ViElTo” szemcsekapcsolati modell sematikus felépítése

A DEM szimulációk beállítási paramétereinek meghatározására légpiknométeres, statikus rézsűszög és direkt nyíródobozos méréseket végeztem. Az utóbbi két berendezéssel, szimulációs kalibrálások is végrehajtottam, amelyekkel további beállítási paramétereket határoztam meg.

A direkt nyíródobozos és a keverés szimulációk időigényes feladatok voltak. A szimulációs időigény csökkentése érdekében, a direkt nyíródobozos berendezésnél a nyírósebesség növelését javasoltam. A kezdeti $0,02 \text{ mm/s}$ -os nyírósebesség, 50 mm/s -ig volt növelhető a szimulált nyíróerő számottevő változása nélkül. Az 50 mm/s nyírósebességnél nagyobb sebesség alkalmazása esetén már a terhelőlapra ható erő is változott a kezdeti nyírósebességhez tartozó, közel állandó erőhöz képest. A keverés szimulációk esetén, a berendezés 3D modell háló elemszámának (a felületeket reprezentáló háromszögek száma) csökkentését javasoltam. Az eredmények alapján, a szimulációk során elegendő volt az ütközések szempontjából szükséges minimális háló elemszám alkalmazása, amely következtében a szimulációs időigény csökkent.

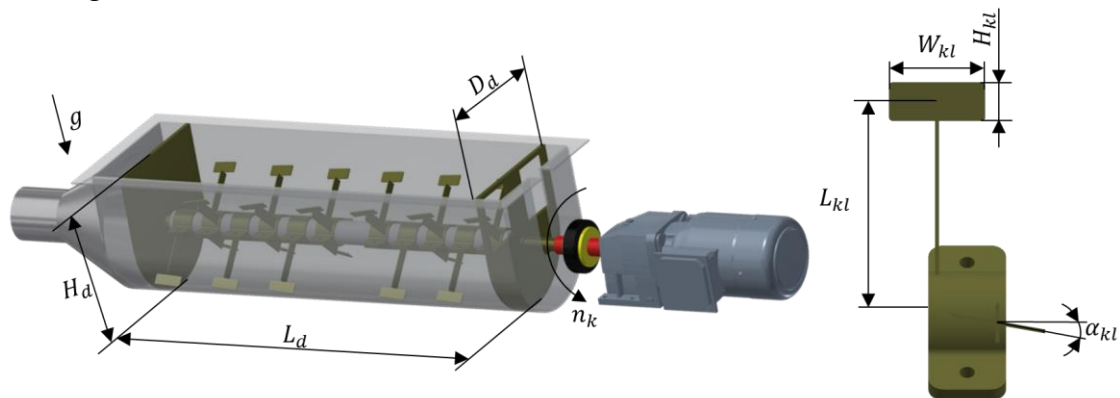
Dimenzióanalízis

A dimenzióanalízis alkalmazásához, a szakirodalomból, valamint a mérési és a szimulációs tapasztalatok alapján összegyűjtöttem a keverési teljesítményigényt befolyásoló mennyiségeket. A célom egy olyan dimenzió nélküli egyenlet létrehozása volt, amellyel becsülhető a keverési teljesítményigény szakaszos üzemű lapátos keverőben:

$$N_p = \left(\frac{l}{N_{kl}} \right)^{B_{k,1}} N_C^{B_{k,2}} Fr_M^{B_{k,3}} \left(\frac{L_d}{W_{kl}} \right)^{B_{k,4}} \left(\frac{D_d}{d_{sz}} \right)^{B_{k,5}} \left(\frac{H_d}{H_{kl}} \right)^{B_{k,6}} \left(\frac{\alpha_{kl}}{\alpha_{AoR}} \right)^{B_{k,7}} \left(\frac{\mu_d}{\mu_{sz}} \right)^{B_{k,8}}. \quad (1)$$

Az (1) egyenletben N_p jelöli a teljesítmény számot, l a dob töltési fokot, N_{kl} a keverőlapátok számát, N_C a kohéziós számot, Fr_M a keverési Froude-számot, d_{sz} a szemcsék jellemző átmérőjét, α_{AoR} a szemcsehalmaz statikus rézsűszögét, μ_{sz} a

szemcsehalmaz és μ_d a berendezés súrlódási tényezőjét. A további, berendezést jellemző geometriai méreteket az 5. ábra szemlélteti.



5. ábra. A lapátos keverő és a keverőlapát 3D modellje

(L_d : dob hosszúsága; D_d : dob szélessége; H_d : dob magassága; W_{kl} : keverőlapát szélessége; H_{kl} : keverőlapát magassága; α_{kl} : keverőlapát dőlési szöge; L_{kl} : keverőlapát erőkarja; n_k : fordulatszám; g : gravitációs gyorsulás)

A mérések során nem változtatott paramétereket összevontam egy paraméterbe ($B_{k,0}$), mivel azok értéke konstans volt minden egyes mért keverési teljesítményigény esetén. Továbbá bevezettem egy új dimenzió nélküli számot, a kohéziós teljesítményszámot:

$$N_{PC} = \frac{\bar{P}_k}{C_h L_{kl}^3 n_k}, \quad (2)$$

ahol \bar{P}_k jelöli az átlagos keverési teljesítményigényt, C_h a halmazkohéziót, L_{kl} a keverőlapátok erőkarját és n_k a fordulatszámot. Végül, a légszáraz hántolt köles mérési eredményeinek felhasználásával, valamint regresszióanalízis és egy nemlineáris megoldó alkalmazásával, meghatároztam az alábbi anyag és berendezés specifikus egyenlet ismeretlen B_k paramétereit:

$$N_{PC} = B_{k,0} l^{B_{k,1}} N_C^{B_{k,2}} F_{rM}^{B_{k,3}}, \quad (3)$$

A szakirodalomhoz képest, a dimenzió nélküli egyenlet két szempontból is újdonságnak tekinthető. A kohéziós erő helyett a direkt nyíródoboz független halmazkohézió került figyelembevételre, továbbá tartalmazta a keverési Froude-számot. Folyadék keverése esetén a vízszintes elrendezésű keverőberendezéseknél, a keverési Froude-szám elhanyagolható, mivel kicsi a folyadék tartózkodási ideje a folyadéktérből kiemelkedett keverőelem felületén és így a gravitáció hatása is elhanyagolható. Ezzel ellentétben, a szilárd szemcsés anyagok keverésénél a szemcsék hosszabb ideig tartózkodhatnak a szemcsehalmazból kiemelkedett keverőelem felületén, amely által további nyomatókat fejtenek ki a keverőtengelyre a keverés során. A kohéziós teljesítményszám bevezetésével, a szemcsés anyagok keverési teljesítményigényének anyagnedvességtartalom függését a halmazkohézió jellemzi. A folyadék keverése esetén is alkalmazott klasszikus teljesítményszámban, viszont a halmazsűrűség tölti be ezt a szerepet. A szemcsehalmaz nedvességtartalmának változása nagyobb hatással van a halmazkohézióra, mint a halmazsűrűségre, ezért ilyen esetben a kohéziós teljesítményszám alkalmazása javasolt.

EREDMÉNYEK

A tanszéki laboratóriumban található szakaszos üzemű, vízszintes elrendezésű forgólapátos keverőben keverési teljesítményigény méréseket végeztem, amelyek a szimulációs eredmények validálását és a dimenzió nélküli egyenlet ismeretlen paramétereinek meghatározására szolgáltak.

A DEM szimulációk során megállapítottam, hogy a fejlesztett „ViElTo” szemcsekapcsolati modell képes szimulálni a keverési teljesítményigényt megfelelő pontossággal. A direkt nyíródobozos szimulációk időigényének csökkentése a nyírósebesség növelésével megoldható, viszont figyelni kell az előterhelő lapra ható erő ingadozását. Amennyiben az érzékelhető mértékben változik (esetemben $\pm 14,5\%$) a lap tömegéből származó súlyerőhöz képest, akkor a nyíróerő is változik és nyírósebesség függő értéké válik. Ennek következtében a nyírósebesség csökkentésére van szükség, különben a valós berendezésen mért nyíróerőtől eltérő szimulációs eredmény kapható. A keverési teljesítményigény szimulációk időigényének számottevő csökkentése a berendezés 3D modell háló elemszámának csökkentésével érhető el. Elegendő az ütközés szempontjából szükséges minimum háló elemszám alkalmazása a DEM szimulációk során.

A dimenzióanalízissel létrehozott új dimenzió nélküli egyenlet ismeretlen paramétereit regresszióanalízis alkalmazásával határoztam meg egy nemlineáris megoldó segítségével. Az egyes paraméter értékek rögzítése után, azok torzító hatását statisztikai jelzőszámok alkalmazásával vettem figyelembe.

Új tudományos eredmények

1. tézis

A direkt nyíródobozos berendezés DEM szimulációs nyírósebessége 50 mm/s -ig növelhető a fellépő nyíróerő $3,3\%$ -os relatív hibája és az terhelő lapra ható erő $14,5\%$ -os maximális relatív ingadozása mellett, az alábbi feltételek esetén:

- szabványos $60\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ direkt nyíródoboz szimulációja;
- $1,8 \pm 0,1\text{ mm}$ jellemző átmérőjű és normál eloszlású gömb szemalakk;
- ViElTo viszkoelasztikus szemcsekapcsolati modell;
- $19,61\text{ kPa}$ előterhelés alkalmazása.

A tézis eredményeit a disszertáció 7.2.2.1 fejezete tárgyalja.

Kapcsolódó publikációk: [S2], [S12], [S13], [S14]

2. tézis

A vízszintes elrendezésű forgólapátos keverő keverési teljesítményigénye maximum 14,5%-os relatív hibával meghatározható a viszkoelasztikus szemcsekapcsolati modell DEM szimulációban történő alkalmazásával.

A modellben a mozgásegyenlet:

$$\begin{aligned}
 m \frac{\partial \underline{v}}{\partial t} &= \underline{F}_n + \underline{F}_s + \underline{F}_g = \\
 &= 4k_n u_n \underline{n} + \left(\begin{array}{l} 2 \sqrt{k_n \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}} \quad \text{gömb - gömb ütközés esetén} \\ 2\sqrt{k_n m_1} \quad \text{gömb - szerkezeti falelem ütközés esetén} \end{array} \right) \beta_n \underline{v}_n \\
 &+ \left(\begin{array}{l} \underline{F}_{s|t-\Delta t} + k_s \Delta t \underline{v}_s, \text{ ha } |\underline{F}_s| < |\underline{F}_n| \tan(\varphi') \\ |\underline{F}_n| \tan(\varphi') \frac{\underline{F}_s}{|\underline{F}_s|}, \text{ ha } |\underline{F}_s| \geq |\underline{F}_n| \tan(\varphi') \end{array} \right) \\
 &+ \left(\begin{array}{l} 2 \sqrt{k_s \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}} \quad \text{gömb - gömb ütközés esetén} \\ 2\sqrt{k_s m_1} \quad \text{gömb - szerkezeti falelem ütközés esetén} \end{array} \right) \frac{\beta_{s1} + \beta_{s2}}{2} \underline{v}_s + m_i \underline{g};
 \end{aligned}$$

a modellben a perdületegyenlet:

$$\begin{aligned}
 I \frac{\partial \omega}{\partial t} &= \underline{M}_r + \underline{M}_{tw} + \underline{M}_{kon,i} = \\
 &= \left(\begin{array}{l} \underline{M}_r|t-\Delta t - k_r \omega_r \Delta t, \text{ ha } |\underline{M}_r| < \mu_r |\underline{F}_n| \frac{2R_1 R_2}{R_1 + R_2} \\ \mu_r |\underline{F}_n| \frac{2R_1 R_2}{R_1 + R_2} \frac{\underline{M}_r}{|\underline{M}_r|}, \text{ ha } |\underline{M}_r| \geq \mu_r |\underline{F}_n| \frac{2R_1 R_2}{R_1 + R_2} \end{array} \right) \\
 &+ \left(\begin{array}{l} \underline{M}_{tw}|t-\Delta t - k_{tw} \omega_{tw} \Delta t, \text{ ha } |\underline{M}_{tw}| < \mu_{tw} \tan(\varphi') |\underline{F}_n| \frac{2R_1 R_2}{R_1 + R_2} \\ \mu_{tw} \tan(\varphi') |\underline{F}_n| \frac{2R_1 R_2}{R_1 + R_2} \frac{\underline{M}_{tw}}{|\underline{M}_{tw}|}, \text{ ha } |\underline{M}_{tw}| \geq \mu_{tw} \tan(\varphi') |\underline{F}_n| \frac{2R_1 R_2}{R_1 + R_2} \end{array} \right) \\
 &- R_i \underline{n} \times (\underline{F}_n + \underline{F}_s).
 \end{aligned}$$

A tézis eredményeit a disszertáció 7.2.2.3 fejezete tárgyalja.

Kapcsolódó publikációk: [S1], [S2]

Jelölés	Név	Mértékegység
E	ütköző elemek rugalmassági modulusa	Pa
F_g	súlyerő	N
F_s	tangenciális irányú eredő erő	N
$F_{s t-\Delta t}$	egy időlépéssel korábbi tangenciális irányú eredő erő	N
F_n	normál irányú eredő erő	N
g	gravitációs gyorsulás	m/s ²
i	futóindex, $i = 1, 2$	1
I	tehetetlenségi nyomaték mátrix	kgm ²

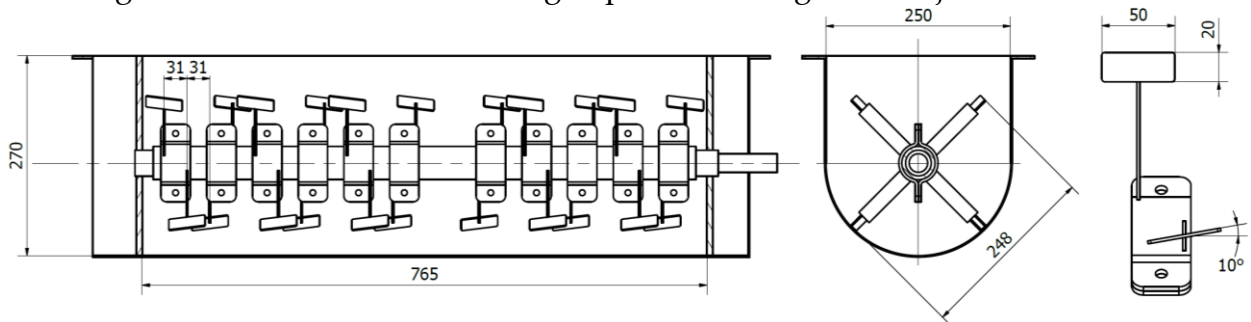
k_n	normál irányú eredő rugómerevség, $k_n = 4 \frac{E_1 R_1 E_2 R_2}{E_1 R_1 + E_2 R_2}$,	$\frac{N}{m}$
k_r	eredő gördülő rugómerevség, $k_r = \beta_{kr} k_n R_1 R_2$	Nm
k_s	tangenciális irányú eredő rugómerevség, $k_s = 2 \frac{k_{n1} v_1 k_{n2} v_2}{k_{n1} v_1 + k_{n2} v_2}$	$\frac{N}{m}$
k_{tw}	eredő csavaró rugómerevség, $k_{tw} = \beta_{ktw} k_s R_1 R_2$	Nm
m	ütköző elemek tömege	kg
M_{kon}	kontakt nyomaték	Nm
M_r	gördülő nyomaték	Nm
$M_{r t-\Delta t}$	egy időlépéssel korábbi gördülő nyomaték	Nm
M_{tw}	csavaró nyomaték	Nm
$M_{tw t-\Delta t}$	egy időlépéssel korábbi csavaró nyomaték	Nm
\underline{n}	ütközési normálvektor	1
R	ütköző elemek sugara	1
t	idő	s
u_n	ütköző elemek normál irányú átfedése	m
v	elemek sebessége	m/s
v_n	normál irányú sebesség, $\underline{v}_n = (\underline{v}_1 - \underline{v}_2) \cdot \underline{n}$	m/s
v_s	tangenciális irányú sebesség, $\underline{v}_s = \underline{v}_1 - \underline{v}_2 - ((\underline{v}_1 - \underline{v}_2) \cdot \underline{n}) \underline{n}$	m/s
β_{kr}	gördülő rugómerevség arányossági tényezője $\beta_{kr} = \begin{cases} \frac{2\beta_{kr1}\beta_{kr2}}{\beta_{kr1} + \beta_{kr2}} & , ha \beta_{kr1} > 0 \text{ és } \beta_{kr2} > 0 \\ 0 & , ha \beta_{kr1} \leq 0 \text{ vagy } \beta_{kr2} \leq 0 \end{cases}$	1
β_{ktw}	csavaró rugómerevség arányossági tényezője $\beta_{kr} = \begin{cases} \frac{2\beta_{ktw1}\beta_{ktw2}}{\beta_{ktw1} + \beta_{ktw2}} & , ha \beta_{ktw1} > 0 \text{ és } \beta_{ktw2} > 0 \\ 0 & , ha \beta_{ktw1} \leq 0 \text{ vagy } \beta_{ktw2} \leq 0 \end{cases}$	1
β_n	normál csillapítás arányossági tényezője, $\beta_n = \frac{\beta_{n1} + \beta_{n2}}{2}$	1
β_s	tangenciális csillapítás arányossági tényezője, $\beta_s = \frac{\beta_{s1} + \beta_{s2}}{2}$	1
Δt	időlépés	s
μ_r	eredő gördülő ellenállás tényező, $\mu_r = \min(\mu_{r1}, \mu_{r2})$	1
μ_{tw}	eredő csavaró ellenállás tényező, $\mu_{tw} = \min(\mu_{tw1}, \mu_{tw2})$	1
ν	a tangenciális és a normál irányú rugómerevség arányossági tényezője (Poisson-tényező)	1
φ'	eredő súrlódási szög, $\varphi' = \frac{\varphi'_1 + \varphi'_2}{2}$	°
ω	ütköző elemek szögsebessége	1/s
ω_r	gördülő szögsebesség, $\underline{\omega}_r = \underline{\omega}_1 - \underline{\omega}_2 - ((\underline{\omega}_1 - \underline{\omega}_2) \cdot \underline{n}) \underline{n}$	1/s
ω_{tw}	csavaró szögsebesség, $\underline{\omega}_{tw} = ((\underline{\omega}_1 - \underline{\omega}_2) \cdot \underline{n}) \underline{n}$	1/s

3. tézis

A szakaszos üzemű, vízszintes elrendezésű forgólapátos keverőben fellépő keverési teljesítményigény légszár, felületi nedvességtartalommal nem rendelkező hántolt köles keverése esetén, az alábbi dimenzió nélküli összefüggésből számítható:

$$N_{PC} = 15,68l^{1,04}N_C^{0,1}Fr_M^{-1/4}.$$

A vizsgált vízszintes elrendezésű forgólapátos keverő geometriája és méretei:



Az U-alakú statikus dob 765 mm hosszú, 250 mm széles és 270 mm magas, így az üres térfogata 47,4 dm³. A keverőlapátok mérete 50 mm × 20 mm × 2 mm és dőlésszögük 10°. A 22 db keverőlapátot velük azonos keresztmetszetű, de élükre fordított laposacél száruk, oldható kötéssel rögzítik a Ø45 mm tengelyhez. A keverőlapátok szárai 31 mm-es osztásban helyezkednek el egymástól.

Az egyenlet maximális relatív hibája 13,7% az alábbi érvényességi tartományokra és mérési körülményekre:

$$\begin{aligned} 0,1 &\leq l \leq 0,25 \\ 0,0004 &\leq N_C \leq 0,0043 \\ 0,0026 &\leq Fr_M \leq 0,0291 \\ 0,48 \frac{1}{s} &\leq n_k \leq 1,58 \frac{1}{s} \\ x &= 8,9\% \\ g &= 9,81 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

A tézis eredményeit a disszertáció 7.3.1 fejezete tárgyalja.

Kapcsolódó publikációk: [S1], [S3], [S4], [S5], [S10], [S11], [S15], [S16], [S17]

Jelölés	Név	Mértékegység
C_h	halmazkohézió	Pa
Fr_M	keverési Froude-szám, $Fr_M = \frac{L_{mp}n_k^2}{g}$	1
g	gravitációs gyorsulás	m/s ²
l	dob töltési fok, a dobba töltött anyag és a dob térfogatának az aránya;	$\frac{m_{anyag}^3}{m_{dob}^3}$
L_{kl}	keverőlapátok erőkarja ($L_{mp} = 0,114 \text{ m}$)	m
N_C	kohéziós szám, $N_C = \frac{L_{kl}^2 n_k^2 \rho_h}{C_h}$	1
n_k	fordulatszám	1/s

N_{PC}	kohéziós teljesítményszám, $N_{PC} = \frac{\bar{P}_k}{C_h L_{kl}^3 n_k}$	1
\bar{P}_k	átlagos keverési teljesítményigény	W
x	nedves anyagra vonatkoztatott nedvességtartalom	$\frac{kg_{H_2O}}{kg_P} \%$
ρ_h	halmazsűrűség	kg/m^3

4. tézis

A kohéziós teljesítményszám a szemcsés anyagok keverési teljesítményigényének jellemzésére használható dimenzió nélküli szám, ami figyelembe veszi a halmazkohéziót, a keverő jellemző méretét és az alkalmazott fordulatszámot az alábbi összefüggéssel:

$$N_{PC} = \frac{\bar{P}_k}{C_h L_{kl}^3 n_k}$$

A kohéziós teljesítményszám a kohéziós szám és a folyadékok keverése esetén is alkalmazott teljesítményszám szorzataként is definiálható:

$$N_{PC} = N_C N_P$$

A tézis eredményeit a disszertáció 7.3.1 és 7.3.2 fejezetei tárgyalják.

Kapcsolódó publikációk: [S3], [S15]

Jelölés	Név	Mértékegység
C_h	halmazkohézió	Pa
L_{kl}	keverőlapátok erőkarja ($L_{mp} = 0,114 \text{ m}$)	m
N_C	kohéziós szám, $N_C = \frac{L_{kl}^2 n_k^2 \rho_h}{C_h}$	1
n_k	fordulatszám	1/s
N_P	teljesítményszám, $N_P = \frac{\bar{P}_k}{L_{kl}^5 n_k^3 \rho_h}$	1
N_{PC}	kohéziós teljesítményszám, $N_{PC} = \frac{\bar{P}_k}{C_h L_{kl}^3 n_k}$	1
\bar{P}_k	átlagos keverési teljesítményigény	W
ρ_h	halmazsűrűség	kg/m^3

ELÉRT EREDMÉNYEK HASZNOSÍTHATÓSÁGA

A keverőberendezések tervezésénél a fellépő teljesítményigény ismeretében olyan keverőmotort kell választani, amely képes elvégezni a szemcsés anyagalmaz mozgását. Alulméretezés esetén a motor akadozó forgást végezhet, vagy akár el sem indul. Ennek következtében csak részben, vagy egyáltalán nem valósul meg a keverés. A teljesítményigény felülbecslése esetén, a motor beruházási költsége és a beépítési helyigénye is nő. A motor által felvett teljesítményigény a szemcsés anyag nélküli üzemeltetés esetén fellépő üresjárású és a szemcsés anyagok keveréséhez szükséges keverési teljesítményigényre vezethető vissza. A keverési teljesítményigény és a keverés műveleti idejének ismeretében, meghatározható a szemcsés anyag keveréséhez szükséges energiaigény. A keverős berendezések energetikai optimalizálása érdekében pedig elengedhetetlen ennek a mennyiségnek vizsgálata.

A szakirodalom alapján, eddig nem létezett olyan szimulációs modell vagy elméleti összefüggés, amely alkalmazásával becsülhető a keverési teljesítményigény szakaszos üzemű, vízszintes elrendezésű forgólapátos keverőben.

Létrehoztam a vizsgált lapátos keverő DEM modelljét és kifejlesztettem egy szemcsekapcsolati modellt, amelyek együttes alkalmazásával megfelelő pontossággal szimulálható a keverési teljesítményigény. A fejlesztett szemcsekapcsolati modell alkalmazhatóságát, statikus rézsűszög és direkt nyíródobozos szimulációkkal támasztottam alá. A direkt nyíródobozos berendezés és a vízszintes elrendezésű forgólapátos keverő DEM szimulációs időigénye számottevő volt. Az előbbi berendezés szimulációs időigényét a nyírósebesség növelésével csökkentettem, míg az utóbbit a 3D modell háló elemszámának csökkentésével és időlépés érzékenységi vizsgálat alapján történő időlépés beállítással. A kidolgozott módszerek felhasználhatók más berendezések DEM szimulációs időigényének csökkentésére is. A keverő szimulációs modellje pedig a vizsgált berendezés energetikai optimalizálására is alkalmazható, figyelembe véve a keverési művelet további célját (szárítás).

A dimenzióanalízissel létrehozott új dimenzió nélküli egyenlet általános alakja felhasználható a szemcsés anyagok keverését végző vízszintes elrendezésű forgólapátos berendezések keverési teljesítményigényének leírására. Az egyenlet ismeretlen paraméterei, a vizsgált anyag fizikai és anyagjellemzőinek, valamint a berendezés fő jellemző méretének ismeretében meghatározhatók. Ennek következtében, a dimenzió nélküli egyenletben található dimenzió nélküli számok segítségével a keverést végző berendezések össze is hasonlíthatók egymással. Ez a módszer már bevett szokás a folyadék keverés esetén, viszont szemcsés anyagok keverése esetén eddig még nem terjedt el.

A doktori munkám során létrehozott diszkrét elemes szimulációs környezet és dimenzió nélküli egyenlet segítségével becsülhető a vízszintes elrendezésű forgólapátos keverő keverési teljesítményigénye, ezzel támogatva a hasonló keverőberendezéseket tervező, üzemeltető és fejlesztő mérnökök, valamint szakemberek munkáját.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Bao, Y., Lu, Y., Cai, Z., and Gao, Z., 2018, "Effects of Rotational Speed and Fill Level on Particle Mixing in a Stirred Tank with Different Impellers," *Chin. J. Chem. Eng.*, **26**(6), pp. 1383–1391.
- [2] Bao, Y., Li, T., Wang, D., Cai, Z., and Gao, Z., 2020, "Discrete Element Method Study of Effects of the Impeller Configuration and Operating Conditions on Particle Mixing in a Cylindrical Mixer," *Particuology*, **49**, pp. 146–158.
- [3] Cleary, P. W., 1998, "Predicting Charge Motion, Power Draw, Segregation and Wear in Ball Mills Using Discrete Element Methods," *Miner. Eng.*, **11**(11), pp. 1061–1080.
- [4] Wu, W.-N., Liu, X.-Y., Zhang, R., and Hu, Z., 2019, "DEM Investigation of the Power Draw for Material Movement in Rotary Drums with Axis Offset," *Chem. Eng. Res. Des.*, **144**, pp. 310–317.
- [5] Herman, A. P., Gan, J., Zhou, Z., and Yu, A., 2022, "Discrete Particle Simulation for Mixing of Granular Materials in Ribbon Mixers: A Scale-up Study," *Powder Technol.*, **400**, p. 117222.
- [6] Hu, L., Zhu, H., and Hua, J., 2021, "DEM Simulation of Energy Transitions in a Hammer Mill: Effect of Impeller Configurations, Agitation Speed, and Fill Level," *Powder Technol.*, **394**, pp. 1077–1093.
- [7] Jayasundara, C. T., Yang, R. Y., Yu, A. B., and Curry, D., 2008, "Discrete Particle Simulation of Particle Flow in IsaMill—Effect of Grinding Medium Properties," *Chem. Eng. J.*, **135**(1), pp. 103–112.
- [8] Larsson, S., Rodríguez Prieto, J. M., Heiskari, H., and Jonsén, P., 2021, "A Novel Particle-Based Approach for Modeling a Wet Vertical Stirred Media Mill," *Minerals*, **11**(1), p. 55.
- [9] Liu, X., Xu, X., Wu, W., Herz, F., and Specht, E., 2016, "A Simplified Model to Calculate the Power Draw for Material Movement in Industrial Rotary Kilns," *Powder Technol.*, **301**, pp. 1294–1298.
- [10] Li, A., Jia, F., Zhang, J., Han, Y., Meng, X., Chen, P., Wang, Y., and Zhao, H., 2022, "The Effects of Filling Level on the Milling Accuracy of Rice in the Friction Rice Mill," *Powder Technol.*, **398**, p. 117052.
- [11] Sun, H., Ma, H., and Zhao, Y., 2022, "DEM Investigation on Conveying of Non-Spherical Particles in a Screw Conveyor," *Particuology*, **65**, pp. 17–31.
- [12] Gijón-Arreortúa, I., and Tecante, A., 2015, "Mixing Time and Power Consumption during Blending of Cohesive Food Powders with a Horizontal Helical Double-Ribbon Impeller," *J. Food Eng.*, **149**, pp. 144–152.

- [13] Larsson, S., Pålsson, B. I., Parian, M., and Jonsén, P., 2020, "A Novel Approach for Modelling of Physical Interactions between Slurry, Grinding Media and Mill Structure in Wet Stirred Media Mills," *Miner. Eng.*, **148**, p. 106180.
- [14] Zuo, Z., Gong, S., and Xie, G., 2021, "Numerical Investigation of Granular Mixing in an Intensive Mixer: Effect of Process and Structural Parameters on Mixing Performance and Power Consumption," *Chin. J. Chem. Eng.*, **32**, pp. 241–252.
- [15] Zheng, C., Govender, N., Zhang, L., and Wu, C.-Y., 2022, "GPU-Enhanced DEM Analysis of Flow Behaviour of Irregularly Shaped Particles in a Full-Scale Twin Screw Granulator," *Particuology*, **61**, pp. 30–40.
- [16] Tamrakar, A., Chen, S.-W., and Ramachandran, R., 2019, "A DEM Model-Based Study to Quantitatively Compare the Effect of Wet and Dry Binder Addition in High-Shear Wet Granulation Processes," *Chem. Eng. Res. Des.*, **142**, pp. 307–326.
- [17] Jin, X., Wang, S., and Shen, Y., 2022, "DEM Study of Mixing Behaviours of Cohesive Particles in a U-Shaped Ribbon Mixer," *Powder Technol.*, **399**, p. 117097.
- [18] Cundall, P. A., and Strack, O. D. L., 1979, "DISCRETE NUMERICAL MODEL FOR GRANULAR ASSEMBLIES," *Geotechnique*, **29**(1), pp. 47–65.

Saját közlemények

- [S1] Horváth, D., Poós, T., and Tamás, K., 2019, "Modeling the Movement of Hulled Millet in Agitated Drum Dryer with Discrete Element Method," *Computers and Electronics in Agriculture*, **162**, pp. 254–268.
- [S2] Horváth, D., Tamás, K., and Poós, T., 2022, "Viscoelastic Contact Model Development for the Discrete Element Simulations of Mixing Process in Agitated Drum," *Powder Technology*, **397**, p. 117038.
- [S3] Horváth, D., and Poós, T., 2023, "Mixing Power Requirement Determination in Agitated Drum Using Dimensional Analysis," *International Journal of Engineering and Management Sciences*, **8**(2), pp. 76–88.
- [S4] Horváth, D., and Poós, T., 2022, "Dimensional Analysis of Mixing Power Requirement in Agitated Drum," Debrecen, Hungary, pp. 44–45.
- [S5] Horváth, D., Poós, T., and Tamás, K., 2019, "Examination of the Hulled Millet's Mixing Process in an Agitated Drum Dryer," Subotica, Serbia, pp. 27-30.
- [S6] Horváth, D., Poós, T., and Tamás, K., 2018, "Comparison of the Direct Shear Box Test of Two Agricultural Granular Materials," *Proceedings of the 6th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2018)*, Debrecen, Hungary, pp. 67–68.
- [S7] Poós, T., Horváth, D., and Tamás, K., 2017, "Modeling the Movement of the Granular Material in a Static Equipment with Discrete Element Method," *Proceedings of the 5th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2017)*, Debrecen, Hungary, pp. 418–421.

-
- [S8] Poós, T., Horváth, D., and Tamás, K., 2017, "The Compare of Angles of Repose with Discrete Element Method and Measurement," *8th International Scientific Conference*, Trebinje, Bosnia-Herzegovina, pp. 65–70.
- [S9] Poós, T., Horváth, D., and Tamás, K., 2017, "Diszkrét Elemes Módszerrel És Méréssel Meghatározott Rézsűszögek Összehasonlítása," *Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága, Nyíregyháza, Hungary*, pp. 411–418.
- [S10] Poós, T., Horváth, D., and Tamás, K., 2018, "Modeling the Movement of Hulled Millet in Agitated Drum Dryer with Discrete Element Method," *Antalya, Turkey*.
- [S11] Poós, T., Horváth, D., and Tamás, K., 2018, "Measuring and Modeling the Mixing Power of the Hulled Millet in an Agitated Drum Dryer," *Subotica, Serbia*, pp. 52–55.
- [S12] Horváth, D., Poós, T., and Tamás, K., 2019, "Laboratory and Numerical Investigation of Direct Shear Box Test," *Proceedings of the VI International Conference on Particle-Based Methods. (PARTICLES 2019)*, International Centre for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), Barcelona, Spain, pp. 272–282.
- [S13] Horváth, D., Poós, T., and Tamás, K., 2019, "Numerical Investigation of Shear Velocity on Shear Force in Direct Shear Box Test Using Discrete Spherical Elements," *Proceedings of the 7th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME2019)*, Debrecen, Hungary.
- [S14] Horváth, D., Tamás, K., and Poós, T., 2020, "DEM Simulation Time of Direct Shear Box Test in Case of Spherical Elements with Liquid Bridges," *Subotica, Serbia*, pp. 69–72.
- [S15] Horváth, D., and Poós, T., 2024, "New Dimensionless Power Number Equation for Horizontal Agitated Drum," *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. <https://doi.org/10.3311/PPme.37286>
- [S16] Poós, T., Horváth, D., and Tamás, K., 2018, "Keverős Dobszárító Modellezése Diszkrét elemes Módszerrel" XXVII. Nemzetközi Gépészeti Konferencia – OGÉT 2019, Târgu Mureș, Romania, pp. 361–364.
- [S17] Poós, T., Horváth, D., and Tamás, K., 2019, "Keverős Dobszárító Keverőelemének Diszkrét elemes Vizsgálta", XXVII. Nemzetközi Gépészeti Konferencia – OGÉT 2018, Nagyvárad, Romania, pp. 205–208.