

Marcin CHUTKOWSKI, Wojciech ZAPALA

e-mail: ichmch@prz.edu.pl

Katedra Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów

Zastosowanie metody DEM do badania wpływu kształtu ziaren na charakter wysypu materiału rozdrobnionego podczas opróżniania silosu

Wstęp

Załadunek i rozładunek silosu wypełnionego materiałem sypkim jest od wielu lat przedmiotem licznych badań eksperymentalnych i analiz teoretycznych [Nedderman, 1992; Drescher, 1998; Schulze, 2008]. Ich celem jest uzyskanie informacji o dominującym przepływie ziaren oraz o wielkości i rozkładzie naporu wywieranego na ściany silosu przez materiał rozdrobniony [Sielamowicz, 2013]. Wiedza ta już na etapie projektowania pozwala zapobiec wielu niepożądanym i niebezpiecznym zjawiskom związanym z gwałtowną konsolidacją i/lub rozluźnianiem materiału podczas niestacjonarnego procesu, jakim jest przepływ ziaren. Rezultatem zmian zagęszczenia podczas płynięcia materiału rozdrobnionego są skoki ciśnienia, które mogą prowadzić do poważnych uszkodzeń ścian silosu i katastrof budowlanych [Dogangun, 2009; Sielamowicz, 2013].

Stan wielkości fizykochemicznych opisujących materiał rozdrobniony zgromadzony w silosie jest od wielu lat przedmiotem prac badawczych wykorzystujących teoretyczną koncepcję ośrodka ciągłego (m.in. [Tejchman, 1993; Elascar, 2000; Więckowski, 2012]), a także koncepcję ośrodka dyskretnego (m.in. [Langston, 1994; Mason 2000; Sielamowicz, 2013]). Pomimo wielu zalet obu rozwiązań, w każdym z nich można wskazać pewne niedoskonałości (m.in. konieczność uproszczeń w modelach konstytutywnych - w pierwszym oraz czasochłonność obliczeń i konieczność kalibracji parametrów modelu - w drugim przypadku).

Metoda elementów dyskretnych DEM, oparta na koncepcji dyskretnego opisu materiału rozdrobnionego, pozwala na modelowanie sił powstających podczas kontaktu pojedynczych ziaren i obserwację wpływu tych oddziaływań na makroskopowe właściwości zgromadzonego materiału rozdrobnionego. Pomimo faktu, że moc obliczeniowa komputerów ciągle ogranicza maksymalną liczebność zbioru cząstek, a także wpływa na czas trwania symulacji [Clearly, 2002], to niewątpliwym atutem metody DEM jest możliwość obserwacji wielkości trudnych, bądź niemożliwych do zmierzenia metodami laboratoryjnymi [Hassanpour, 2014], tj. rozkłady w czasie i przestrzeni parametrów opisujących cząstki: prędkość liniowa i kątowa, przyspieszenie liniowe i kątowe, siła i moment siły, a także rozkłady lokalnych właściwości zbioru cząstek: porowatość, naprężenia ścisające i rozciągające, itd. Jedną z zalet tej metody jest także możliwość przewidywania wpływu kształtu ziaren na parametry makroskopowe materiału rozdrobnionego, co było przedmiotem badań i symulacji obejmujących m.in. niekuliste klastry sfer [Dziugys, 2001], sfero-cylindry [Langston, 2015], wielościenne kostki [Höhner, 2013], bądź wypukłe hiperwielościiany [Cleary, 2002] w miejsce cząstek idealnie kulistych. We wszystkich wymienionych pracach stwierdzono różnice w zachowaniu cząstek kulistych i niesferoidalnych podczas przepływu ziaren wewnątrz silosu.

Praktycznym aspektem badań zjawisk zachodzących w silosach jest zapewnienie wysypu jak najbardziej zbliżonego do idealnego ruchu masowego, w którym ziarna poruszają się z równomierną prędkością w kierunku otworu wylotowego oraz uniknięcie wysypu rdzeniowego, polegającego na gwałtownym ruchu cząstek zlokalizowanych w centralnej części silosu, bezpośrednio nad otworem wylotowym i zatrzymaniu ruchu ziaren zlokalizowanych w sąsiedztwie ścian. Literaturowe metody pozwalające przewidzieć charakter ruchu cząstek stanowią na ogół skomplikowane procedury wymagające dostarczenia wielu informacji o właściwościach materiału oraz o geometrii silosu [Schulze, 2008]. Brak jest w literaturze prostego, ilościowego kryterium oceny charakteru ruchu ziaren opartego na

porowatości lokalnej. Porowatość jest istotnym parametrem, będącym miarą liczby punktów kontaktu między ziarnami, i w konsekwencji oceną jednorodności struktury materiału rozdrobnionego. Wyraźne zmiany lokalnej porowatości materiału są związane z powstawaniem znacznych gradientów odkształceń stycznych i tworzeniem stref ścinania, co zostało potwierdzone w pracach wykorzystujących nieinwazyjne badania eksperymentalne struktury wewnętrznej podczas ich przepływu w silosach [Grudzień 2011; Niedostatkiwiec i Tejchman, 2007; Sielamowicz 2013].

Połączenie możliwości symulacji ziaren niekulistych i monitorowania porowatości lokalnej materiału sypkiego metodą DEM skłoniło autorów do przeprowadzenia badań i opracowania ilościowego kryterium pozwalającego na wskazanie dominującego wpływu materiału rozdrobnionego. Chcąc jednak uniknąć charakterystycznych dla metody DEM czasochłonnych procedur gromadzenia i przetwarzania danych podczas symulacji komputerowej zawężono obszar monitorowania porowatości lokalnej do trzech kluczowych punktów modelu silosu.

Symulacje metodą DEM

Symulacje metodą DEM przeprowadzono wykorzystując pracującą w układzie dwuwymiarowym komercyjną aplikację PFC2D firmy Itasca Inc. Obiektem badań były materiały roślinne, których właściwości fizykochemiczne wg Horabika [2001] zestawiono w tab. 1. Kształt rzeczywistych ziaren roślin przybliżono poprzez utworzenie obiektów geometrycznych stanowiących nierozzerwalne połączenie (klastry) od 2 do 5 elementów składowych w kształcie koła (Tab. 2), a następnie obiektom tym przypisano właściwości charakterystyczne dla odpowiedniego materiału (Tab. 1). W symulacjach wykorzystano nieliniowy model sił kontaktu cząstek Hertza-Mindlina (HM). Został on pozytywnie zweryfikowany w badaniach eksperymentalnych [Cundall, 1979; Zhu, 2007], ponadto jest prosty w budowie, co znacząco wpływa na czas trwania symulacji, a także pozwala uwzględnić właściwości materiałowe cząstek podczas ich zderzeń.

Tab. 1. Właściwości fizykochemiczne materiałów.

Nazwa właściwości	Pszenvica <i>Begra</i>	Kukurydza <i>Mieszko</i>	Rzepak <i>Licosmos</i>
Zakres wymiaru cząstek a [mm]	2÷2,5	5÷5,5	1,7÷1,8
Zakres wymiaru cząstek b [mm]	6,5÷7,0	8÷8,5	1,7÷1,8
Gęstość materiału ρ_s [kg/m ³]	1550	1490	1270
Liczebność zbioru cząstek N [-]	4 000	4 000	4 000
Moduł Kirchhoffa G [MPa]	9	10,59	3,75
Współczynnik Poissona ν [-]	0,2	0,2	0,175
Współczynnik tarcia cząstek μ [-]	0,25	0,15	0,15
Współczynnik tłumienia δ_N [kg/s]	0,7	0,7	0,7
Współczynnik tłumienia δ_S [kg/s]	0,5	0,5	0,5

Zgodnie z modelem HM składowe: normalna (N) i styczna (S) siły kontaktu działającej na zderzające się cząstki, opisane są równaniami (1) i (2):

$$F_N = \frac{2G\sqrt{2r}}{3(1-\nu)} \Delta n^{3/2} - \delta_N V_N \quad (1)$$

$$F_S = \frac{2\sqrt{3G^2(1-\nu)r}}{2-\nu} \sqrt{|F_N|} V_S \Delta t - \delta_S V_S \quad \text{jeśli } F_S \leq \mu |F_N| \quad (2)$$

gdzie: F_N , F_S – składowe siły kontaktu w kierunku normalnym (N)

i stycznym (S) [N], G – uśredniony dla obu cząstek moduł odkształcalności postaciowej *Kirchhoffa* [Pa], ν – uśredniony dla obu cząstek współczynnik *Poissona* [-], r – uśredniony promień obu cząstek [m], δ_N, δ_S – współczynnik tłumienia w kierunku normalnym (N) i stycznym (S) [kg/s], V_N, V_S – prędkość względna cząstek w kierunku normalnym (N) i stycznym (S) [m/s], Δn – długość obszaru wspólnej cząstek w kierunku normalnym [m], Δt – krok czasowy [s], μ – współczynnik tarcia [-].

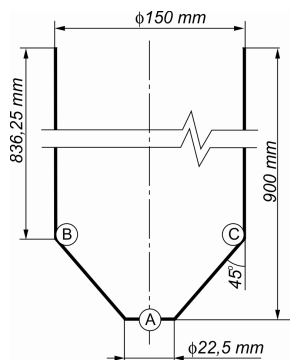
Tab. 2. Modele niekulistych ziaren materiałów roślinnych.

Parametry geometryczne elementów składowych ziaren				
<i>Pszenvica Begra</i>				
	Lp.	Średnica [mm]	Względne położenie środka masy elementu [mm]	
	1	3,0	X = 0,0	Y = 0,0
	2	2,0	X = 1,0	Y = 0,0
	3	2,0	X = -1,0	Y = 0,0
	4	1,2	X = 1,6	Y = 0,0
	5	1,2	X = -1,6	Y = 0,0
<i>Kukurydza Mieszko</i>				
	Lp.	Średnica [mm]	Względne położenie środka masy elementu [mm]	
	1	7,0	X = 0,0	Y = 1,0
	2	3,6	X = -1,8	Y = -1,2
	3	3,6	X = 1,8	Y = -1,2
<i>Rzepak Licosmos</i>				
	Lp.	Średnica [mm]	Względne położenie środka masy elementu [mm]	
	1	1,8	X = -0,05	Y = 0,0
	2	1,7	X = 0,05	Y = 0,0

Krok czasowy całkowania i obliczania prędkości i drogi przebytej przez cząstki był zmienny i regulowany przez program w taki sposób, aby był możliwie największy, ale jednocześnie nie przekroczył krytycznego czasu opisanego równaniem wg [PFC2D Manual]:

$$\Delta t = \min\left(\sqrt{m_i/k_{Ni}}\right) \quad (3)$$

gdzie: m_i – masa i -tej cząstki [kg], k_{Ni} – współczynnik sztywności i -tej cząstki w kierunku normalnym (N) [N/m].



Rys. 1. Schemat i wymiary modelu silosu wykorzystanego w symulacji.

Symulacje komputerowe procesu polegały na sformułowaniu i wdrożeniu algorytmów pozwalających na sekwencyjną realizację następujących zadań:

- zbudowanie modelu geometrycznego silosu o wymiarach przedstawionych na rys. 1 i wypełnienie go ziarnami o losowo wygenerowanych rozmiarach (rozkład losowy w zadanym przedziale wymiarów wg tab. 2), losowo zlokalizowanych i losowo zorientowanych w przestrzeni modelu silosu;
- utworzenie luźno usypanego zbioru cząstek spoczywającego na dnie, na skutek przyłożenia siły ciężkości i wykonania odpowied-

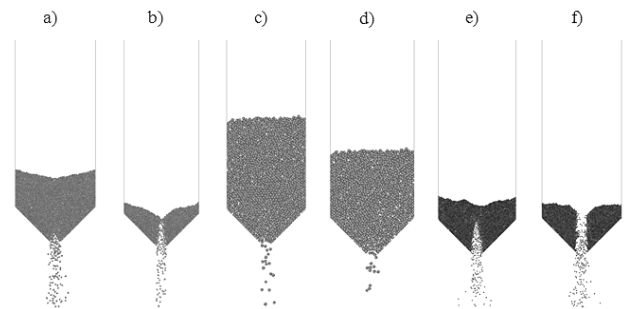
niej liczby kroków obliczeniowych do osiągnięcia stanu stacjonarnego (minimalizacja sił w układzie);

- usunięcie ściany blokującej wysyp materiału i rejestracja zmian porowatości lokalnej materiału w zdefiniowanych punktach modelu silosu (A, B i C) w czasie wysypu.

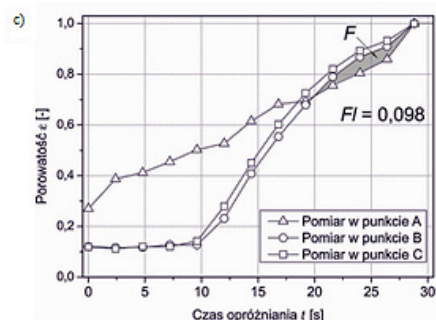
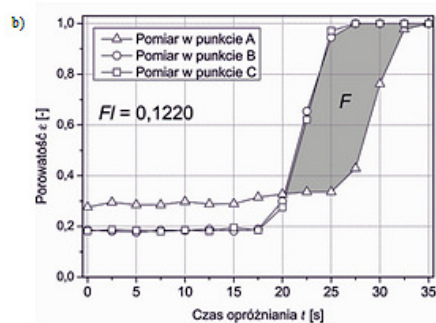
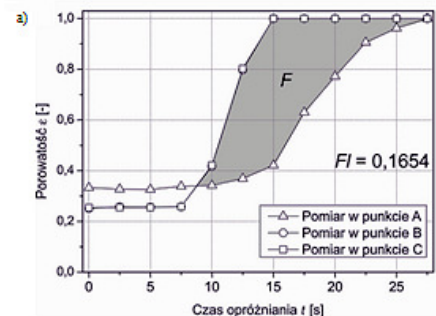
Wyniki i dyskusja

W celu zidentyfikowania zmian zachodzących w strukturze materiału rozdrobnionego podczas wysypu, dokonano obliczeń porowatości lokalnej w wybranych, charakterystycznych obszarach (Rys. 1):

u wylotu (A) oraz w sąsiedztwie punktu łączenia powłoki cylindrycznej z dnem stożkowym modelu silosu (B i C). Przyjęto, że obszar pomiarowy, na podstawie którego stwierdza się wartość porowatości lokalnej stanowi koło o promieniu równym 20-krotnej wartości średniego wymiaru a dla każdego z materiałów rozdrobnionych.



Rys. 2. Wizualizacja przepływu podczas opróżniania modelu silosu wypełnionego: ziarnami pszenicy *Begra* po czasie a) 10s i b) 15s; ziarnami kukurydzy *Mieszko* po czasie c) 10s i d) 15s; ziarnami rzepaku *Licosmos* po czasie e) 10s i f) 15s



Rys. 3. Profile porowatości lokalnych $\varepsilon(t)$ podczas wysypu a) pszenicy *Begra*, b) kukurydzy *Mieszko*, c) rzepaku *Licosmos*.

Wyraźne różnice w przebiegach zmian porowatości lokalnej ε w czasie t (Rys. 3) odzwierciedlają odmienny wpływ materiału. W przypadku dominacji wypływu masowego porowatości lokalne zmierzone u wylotu z modelowego silosu (punkt A) utrzymują się na stałym poziomie, do osiągnięcia charakterystycznego czasu opróżniania ($t = 10$ s dla pszenicy i $t = 20$ s dla kukurydzy), po którym następuje gwałtowny wzrost wartości ε do osiągnięcia porowatości granicznej $\varepsilon = 1$. Rdzeniowy wypływ ziaren rzepaku charakteryzuje się niemal jednostajnym wzrostem porowatości w centrum leja wypływowego (punkt A) w czasie opróżniania.

Przebiegi zmian porowatości lokalnych obserwowanych w symetrycznych względem siebie punktach B i C są zbliżone w każdym z trzech przypadków. Niezależnie od dominującego wypływu materiału, porowatość lokalna w pobliżu ścian (B i C) utrzymuje się na stałym poziomie, a następnie rośnie gwałtownie, gdy górny poziom materiału zrównuje się z położeniem punktów pomiarowych.

W celu ilościowej oceny zaobserwowanych zjawisk zaproponowano bezwymiarowe kryterium Fl , które zdefiniowano jako stosunek pola powierzchni F ograniczonej przez profile porowatości lokalnej zmierzone w punktach charakterystycznych silosu ($\varepsilon_A(t)$ i $\varepsilon_B(t)$) do całkowitego czasu opróżniania modelowego silosu t_{calc} :

$$Fl = \frac{F}{t_{calc}} = \frac{\int_0^{t_{calc}} (\varepsilon_B(t) - \varepsilon_A(t)) dt}{t_{calc}}, \text{ gdy } \varepsilon_A(t) \geq \varepsilon_B(t) \quad (4)$$

Wartości kryterium Fl zbliżone do zera świadczą o znikomej wartości pola zakreślonego przez profile porowatości w punktach A i B oraz wskazują na dominację wypływu rdzeniowego, który można zaobserwować dla rzepaku *Licosmos* (Rys. 3c, $Fl = 0,098$). Zdecydowanie większe wartości kryterium Fl dla pszenicy *Begra* (Rys. 3a, $Fl = 0,1654$) i kukurydzy *Mieszko* (Rys. 3b, $Fl = 0,122$) mogą natomiast świadczyć o dominacji masowego przepływu materiału.

Zaproponowane kryterium umożliwia ocenę charakteru ruchu ziaren podczas wysypu materiału rozdrobnionego, jednak weryfikacja jego stosowalności wymaga dalszych prac obejmujących szerszy zakres materiałów i przypadków geometrii modelu silosu.

Wnioski

Stosując metodę elementów dyskretnych DEM wykonano w niniejszej pracy serię symulacji procesu opróżniania modelowego silosu napełnionego materiałem rozdrobnionym pochodzenia roślinnego o zróżnicowanym kształcie ziaren i materiałowych parametrach fizykochemicznych. Zaobserwowano różnice w wysypie ziaren powiązane ze zmianami lokalnej porowatości materiału, monitorowanej w trzech kluczowych punktach pomiarowych, w czasie przepływu materiału w kierunku otworu wylotowego.

Do oceny płynięcia materiału rozdrobnionego zaproponowano proste kryterium Fl , oparte na pomiarze pola powierzchni zakreślonej przez profile porowatości lokalnej $\varepsilon(t)$ w dwóch charakterystycznych punktach modelu silosu. Przedstawione wstępne wyniki wskazują, że kryterium umożliwia ilościowe ujęcie tego zjawiska. Spadek wartości Fl w kierunku zera może wskazywać na przewagę rdzeniowego wysypu ziaren, natomiast wzrost wartości Fl może świadczyć o dominacji przepływu masowego. Jak już wspomniano wcześniej, stosowalność tego kryterium wymaga dalszej weryfikacji.

Przedstawione wyniki badań symulacyjnych mogą ponadto potwierdzać wyniki prac eksperymentalnych dowodzących, że kształt ziaren jest istotnym czynnikiem determinującym charakter wysypu. Profile zmian porowatości lokalnej (Rys. 3) pozwalają stwierdzić, że proces wysypu ziaren kukurydzy *Mieszko* jest przepływem masowym, wysyp rzepaku *Licosmos* ma charakter zbliżony do rdzeniowego, natomiast w przypadku pszenicy *Begra* można zaobserwować wysyp pośredni, tj. w początkowym etapie masowy, w końcowym przechodzący w rdzeniowy. Zaobserwowane w symulacji komputerowej zjawisko zróżnicowania charakteru transportu ziaren należy poddać weryfikacji eksperymentalnej, aby wykluczyć wpływ właściwości materiałowych badanych materiałów (moduł *Kirchhoffa* G,

współczynnik *Poissona* ν) na dominację jednego z rodzajów wysypu. Stanowi to przedmiot prowadzonych obecnie kolejnych badań.

LITERATURA

- Cleary P.W., Sawley M.L., 2002. DEM modelling of industrial granular flows: 3D case studies and the effect of particle shape on hopper discharge. *App. Math. Model.*, **26**, 89-111. DOI: 10.1016/S0307-904X(01)00050-6
- Cundall, P.A., Strack, O.D., 1979. A discrete element model for granular assemblies. *Géotechnique*, **29**, 47-65. DOI:10.1680/geot.1979.29.1.47
- Dogangun, A., Karaca, Z., Durmus, A., Sezen, H., 2009. Cause of damage and failures in silo structures. *J. Perform. Constr. Facil.*, **23**, 65-71. DOI: 10.1061/(ASCE)0887-3828(2009)23:2(65)
- Drescher A., 1998. Some aspects of flow of granular material in hoppers. *Phil. Trans. R. Soc. London A*, **356**, 2649-2666. DOI: 10.1098/rsta.1998.0291
- Dźwiugys, A., Peters, B., 2001. An approach to simulate the motion of spherical and non-spherical fuel particles in combustion chambers. *Granular Matter*, **3**, 231-265. DOI: 10.1007/pl00010918
- Elaskar S., Godoy L., Gray D., Stiles J., 2000. A viscoplastic approach to model the flow of granular solids. *Int. J. Solids and Structures*, **37**, 2185-2214. DOI: 10.1016/S0020-7683(98)00300-x
- Grudzień K., Niedostatkiewicz M., Adrien J., Tejchman J., Maire E., 2011. Quantitative estimation of volume changes of granular materials during silo flow using X-ray tomography. *Chem. Eng. Proc.*, **50**, 59-67. DOI: 10.1016/j.ccep.2010.11.008
- Hassanpour A., Pasha M., 2014. Discrete Element Method Applications in Process Engineering in Introduction to Software for Chemical Engineers. CRC Press. DOI: 10.1201/b17150-8
- Horabik J., 2001. Charakterystyka właściwości fizycznych roślinnych materiałów sypkich istotnych w procesach składowania. *Acta Agrophysica*, **54**, 1-121
- Höhner D., Wirtz S., Scherer V., 2013. Experimental and numerical investigation on the influence of particle shape and shape approximation on hopper discharge using the discrete element method. *Powder Tech.*, **235**, 614-627. DOI: 10.1016/j.powtec.2012.11.004
- Langston P., Tüzün U., Heyes D., 1994. Continuous potential discrete particle simulations of stress and velocity fields in hoppers: Transition from fluid to granular flow. *Chem. Eng. Sci.*, **50**, 1259-1275, DOI: 10.1016/0009-2509(94)85095-x
- Langston P., Kennedy A., Constantin H., 2015. Discrete element modelling of flexible fibre packing. *Comp. Mat. Sci.*, **96**, Part A, 109-116. DOI: 10.1016/j.commatsci.2014.09.007
- Masson S., Martinez J., 2000. Effect of particle mechanical properties on silo flow and stresses from distinct element simulations. *Powder Tech.*, **109**, 164-178, DOI: 10.1016/S0032-5910(99)00234-x
- Nedderman R., 1992. *Statics and kinematics of granular materials*. Cambridge University Press, New York. DOI: 10.1017/cbo9780511600043
- Niedostatkiewicz M., Tejchman J., 2007. Investigations of porosity changes during granular silo flow using electrical capacitance tomography (ETC) and particle image velocimetry (PIV). *Part. Part. Syst. Charact.*, **24**, 304-312. DOI: 10.1002/ppsc.200601133
- PFC2D (*Particle Flow Code in 2 Dimensions*) Manual, 2008
- Schulze D., 2008. *Powders and bulk solids*. Springer, Berlin. DOI: 10.1007/978-3-540-73768-1
- Sielamowicz I., Balevicius R., 2013. Experimental and computational analysis of granular material flow in model silos. *IPPT Reports on Fundamental Technological Research*. IPPT PAN, **1**, 1-317
- Tejchman J., Gudehus G., 1993. Silo-music and silo-quake experiments and a numerical Cosserat approach. *Powder Tech.*, **76**, 201-212. DOI: 10.1016/S0032-5910(05)80028-2
- Więckowski Z., 2012. *Modelowanie przepływu materiału sypkiego metodą punktów materialnych*. Wyd. Pol. Łódzkiej, Łódź
- Zhu H.P., Zhou Z.Y., Yang R.Y., Yu A.B., 2007. Discrete particle simulation of particulate systems: Theoretical developments. *Chem. Eng. Sci.*, **62**, 3378 - 3396. DOI: 10.1016/j.ces.2006.12.089