

## Karolina SKOCZKOWSKA, Krystian MALEK, Roman ULBRICH

e-mail: k.skoczowska@doktorant.po.edu.pl

Katedra Inżynierii Środowiska, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

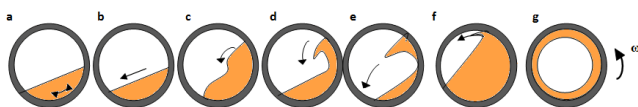
## Wpływ stosunku średnicy ziaren na ruch wypełnienia w aparacie bębnowym

## Wstęp

Aparaty bębnowe znajdują szerokie zastosowanie w przemysłowych procesach mieszania, przesiewania, mielenia, granulacji oraz suszenia materiałów ziarnistych.

Ze względu na dużą energochłonność procesów prowadzonych w aparatach bębnowych ważne jest, aby prowadzone procesy zachodziły z najwyższą intensywnością. Odpowiedni ruch złoża skutkuje otrzymaniem produktu o wyższej jakości (czyli np. o lepszym stopniu zmieszania ziaren w mieszalnikach lub większym stopniu rozdrobnienia materiału w młynach kulowych) w krótszym czasie pracy, przy minimalizacji nakładów energetycznych.

W literaturze prezentowane są opisy (Rys. 1) siedmiu podstawowych stanów zachowania się złoża – od falowania do wirowania [Oyama, 1940; Henein i in., 1983; Boss, 1987; Boateng, 1993; Karunatilake, 2000; Hema, 2003; Hsien-Ter i Lee, 2009].



Rys. 1 Charakterystyczne stany zachowania się złoża: a) falowanie, b) toczenie, c) kaskadowanie, d) kataraktowanie, e) stan równowagi, f) wirowanie pierwszych cząstek, g) wirowanie całego złoża [Henein i in., 1983]

Oyama [1940] określił na drodze badań eksperymentalnych prędkości charakterystyczne dla procesu mieszania:

- prędkość minimalną dla momentu rozpoczęcia kataraktowania, kiedy cząstki wynoszone są na pewną wysokość, po czym rozpoczynają swobodny ruch opadania na złożo, po którym toczą się w dół;
- prędkość maksymalną w stanie równowagi, w którym cząstki opadają na ściankę bębna poza złożem;
- prędkość wirowania całego złoża.

Wzór uwzględniający wpływ stopnia wypełnienia bębna  $\varphi$  oraz jego średnicy  $D$  na zachowanie się złoża ma postać:

$$n_{ch} = \frac{C}{D^{0.47} \varphi^{0.14}} \frac{2\pi}{60} \text{ [rad/s]} \quad (1)$$

gdzie:

$C$  – stała zależna od założonej prędkości obrotowej, która przyjmuje następujące wartości:

- prędkość minimalna:  $C = 54$ ,
- prędkość maksymalna:  $C = 72$ ,
- wirowanie całego złoża:  $C \geq 86$ ,

$D$  – średnica wewnętrzna bębna, [m]

$\varphi$  – stopień wypełnienia bębna, [%]

Prędkość krytyczną dla momentu zrównania się siły ciężkości i siły odśrodkowej pojedynczej cząstki można obliczyć ze wzoru [Nityanand i in., 1986]:

$$n_{kr} = \sqrt{\frac{g}{R}} = \frac{2\pi}{60} \frac{42,3}{\sqrt{D}} \text{ [rad/s]} \quad (2)$$

gdzie:

$g$  – przyspieszenie ziemskie, [ $m/s^2$ ]

$R$  – promień bębna, [m].

Ruch złoża niejednorodnego pod względem średnicy cząstek stwarza możliwość przenikania cząstek drobnych pomiędzy cząstkami dużymi. Szybkość pionowej perkolacji w zależności od stosunku średnic ziaren jest opisana wzorem [Boss, 1987]

$$\frac{h_t}{h_s} = 0,8 \frac{\rho_t}{\rho_s} + 1,2 \left( \frac{d_s}{d_t} \right)^n - 1 \quad (3)$$

gdzie:

$d_t$  i  $d_s$  – średnica ziaren traseru i złoża, [m]

$h_t$  i  $h_s$  – liniowe przemieszczenie ziaren traseru i złoża, [m]

$n$  – stała zależna od wielkości ziaren:

gdzie traser ma mniejsze ziarna od ziaren złoża  $n = 1$ ,

gdzie traser ma ziarna większe od ziaren złoża  $n = 2$ ,

$\rho_t$  i  $\rho_s$  – gęstość ziaren traseru i złoża, [ $kg/m^3$ ]

W sposób teoretyczny [Boss, 1987] można określić graniczną wartość stosunku średnic ziaren ( $\geq 6,46$ ), powyżej której materiał drobny przesypuje się bez przeszkód przez przestrzeń między większymi cząstkami.

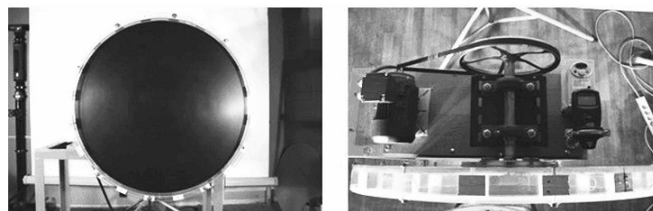
Celem niniejszych badań było wyznaczenie prędkości obrotowych odpowiadających charakterystycznym stanom zachowania się złoża dla mieszaniny dwuskładnikowej oraz określenie wpływu udziału frakcji cząstek na dany parametr.

## Badania doświadczalne

**Stanowisko badawcze.** Badania przeprowadzono na stanowisku badawczym (Rys. 2) zaopatrzone w obrotowy bęben o średnicy 700 mm. Bęben był wykonany z przezroczystego plexiglasu, co umożliwiło rejestrację zachowania się złoża w trakcie jego pracy. Tylne ścianki bębna została pokryta czarną emalią w celu uwidocznienia materiału wsadowego. Ruch obrotowy bębna zachodził dzięki silnikowi indukcyjnemu o mocy 250 W, którego obroty zmieniano przy pomocy falownika.

**Technika pomiarowa.** Prędkość, z jaką bęben się obracał określono przy użyciu tachometru optycznego *Beta 1760/TC2*. Do rejestracji ruchu wypełnienia użyta została szybko-klatkowa, monochromatyczna kamera *HCC-1000* firmy *VDS Vosskuhler*. W badaniach przyjęto częstość próbkowania 462 Hz oraz macierz rejestracji 1024x1024 piksele. W celu dalszej obróbki uzyskanych map bitowych zastosowano program do cyfrowej anemometrii obrazowej - DPIV. Program umożliwił uzyskanie trajektorii ruchu oraz lokalnych pól prędkości poruszających się cząstek, dzięki czemu określono zachowanie się złoża dla zadanych parametrów.

**Materiał.** Wypełnienie stanowił wzorcowy materiał szklany (kule) o średnicach odpowiednio 4 mm oraz 8 mm i udziałach objętościowych podanych w tab. 1. Badania przeprowadzono dla 25% stopnia wypełnienia bębna. Gęstość nasykowa obu materiałów była zbliżona – 1480  $kg/m^3$  dla cząstek o średnicy 8 mm oraz 1500  $kg/m^3$  dla cząstek 4 mm.



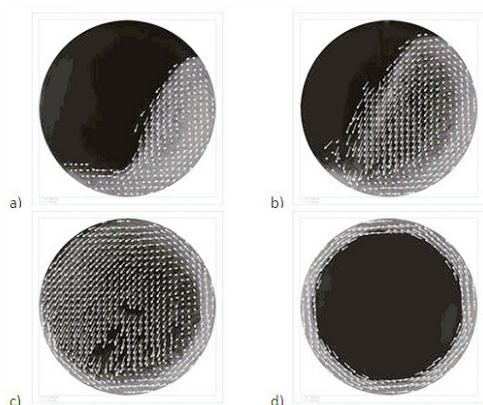
Rys. 2. Zdjęcie stanowiska badawczego – widok z przodu i z góry

Tab. 1. Udziały frakcji cząstek poddanych badaniu

Średnica cząstek, [mm]	Udziały objętościowe frakcji cząstek, [%]								
	0	10	25	33	50	67	75	90	100
8	0	10	25	33	50	67	75	90	100
4	100	90	75	67	50	33	25	10	0

### Wyniki i analiza

Uzyskane z programu DPIV rozkłady pola prędkości umożliwiły wyznaczenie stanów charakterystycznych zachowania się złoża dla znanych parametrów bębna oraz jego wypełnienia. Przykładowe rozkłady pól prędkości dla prędkości charakterystycznych przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Rozkład pól prędkości dla wypełnienia – 90 % cząstek 8 mm i 10 % cząstek 4 mm, przy prędkościach charakterystycznych: a) minimalnej, b) maksymalnej, c) krytycznej, d) wirowania

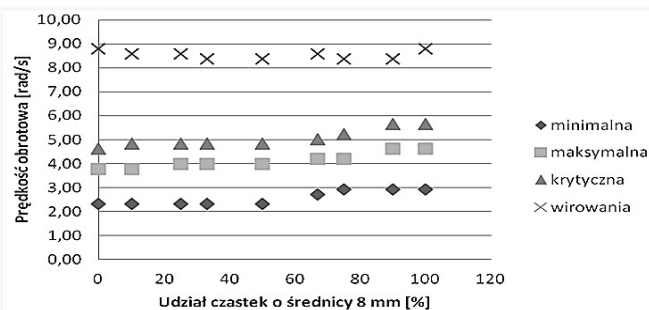
W tab. 2 porównano prędkości charakterystyczne uzyskane z badań eksperymentalnych oraz obliczone ze wzorów (1) i (2). Wraz ze wzrostem zawartości cząstek frakcji 8 mm rozbieżności między wartościami eksperymentalnymi a obliczonymi spadały. Analizując prędkości odpowiadające kataraktowaniu złoża największą różnicę między wartościami eksperymentalnymi a obliczonymi (ok. 46%) odnotowano dla prędkości minimalnej przy zawartości cząstek 4 mm od 0 do 50%. Najmniejsze różnice (19%) – zaobserwowano dla prędkości maksymalnej przy zawartości cząstek 4 mm od 0 do 10 %.

Średni zakres prędkości odpowiadający kataraktowaniu złoża tj. od prędkości minimalnej do prędkości maksymalnej dla wszystkich badanych przypadków wynosi ok. 1,57 rad/s. Wskazuje to na potrzebę dokładnego rozpoznania i opisanie procesów zachodzących w aparatach bębnowych z uwzględnieniem jak największej ilości zmiennych wpływających na prędkości charakterystyczne w celu doboru optymalnych parametrów pracy aparatów bębnowych.

Tab. 2. Porównanie prędkości charakterystycznych pochodzących z badań eksperymentalnych oraz obliczonych

Udziały frakcji cząstek, [%]		Prędkości charakterystyczne, [rad/s]			
Średnica 8 mm	Średnica 4 mm	minimalna	maksymalna	krytyczna	wirowania
0	100	2,30	3,77	4,61	8,80
10	90	2,30	3,77	4,82	8,59
25	75	2,30	3,98	4,82	8,59
33	67	2,30	3,98	4,82	8,38
50	50	2,30	3,98	4,82	8,38
67	33	2,72	4,19	5,03	8,59
75	25	2,93	4,19	5,24	8,38
90	10	2,93	4,61	5,65	8,38
100	0	2,93	4,61	5,65	8,8
Prędkości obl. wg wzoru (1) lub (2)		4,26	5,69	5,30	6,79

Na rys. 4 przedstawiono charakterystyczne prędkości pracy aparatów bębnowych w odniesieniu do udziałów objętościowych frakcji 8 mm w całkowitym wypełnieniu bębna. Wzrost udziałów cząstek 8 mm od 0 do 50% powodował nieznaczne różnice w prędkościach charakterystycznych. Dalsze zwiększanie tego udziału powodowało systematyczny wzrost omawianych prędkości.



Rys. 4. Prędkości charakterystyczne w zależności od udziałów objętościowych frakcji 8 mm

### Wnioski

Odnotowano nieznaczne różnice w prędkościach charakterystycznych między mieszaniną dwuskładnikową cząstek o średnicy 4 mm oraz cząstek o średnicy 8 mm w udziale do 50% objętości wypełnienia, a złożem monodispersyjnym składającym się z cząstek o średnicy 4 mm. Zatem zwiększenie frakcji drobnej w mieszaninach polidispersyjnych do 50% spowoduje maksymalne obniżenie prędkości charakterystycznych.

Obecnie stosowane wzory do obliczania prędkości charakterystycznych dają wartości wyższe (niekiedy znacznie) charakterystycznych prędkości pracy aparatów bębnowych (od 19 do nawet 46%). Skutkuje to nieodpowiednim ruchem wypełnienia dla zadanego procesu, co wiąże się ze zwiększeniem energochłonności procesu. Obniżenie prędkości pracy aparatów bębnowych zwiększy ich wydajność oraz obniży energochłonność procesu.

Dokładniejsze rozpoznanie oraz opisanie zachowania się wypełnienia w aparatach bębnowych (przy uwzględnieniu większej liczby zmiennych wpływających na prędkości charakterystyczne) pozwoli zoptymalizować zachodzące procesy, co wpłynie na zwiększenie jakości otrzymywanych produktów i skrócenie czasu procesu.

### LITERATURA

Boateng A. A., (1993). *Rotary kiln transport phenomena: study of the bed motion and heat transfer*. PhD Thesis. University of British Columbia, Canada

Boss J., (1987). *Mieszanie materiałów ziarnistych*. PWN, Warszawa

Hema V. (2003). *Mathematical modeling of the dynamics of granular materials in a rotating drum*. PhD thesis, The Cochin University of Science and Technology, Thiruvananthapuram, India

Henein H., Brimacombe J. K., Watkinson A. P., (1983), Experimental study of transverse bed motion in rotary kilns. *Metallurg. Trans.*, I4B, 191-205, DOI:10.1007/BF02661016

Hsien-Ter C. Lee C. F., (2009). Cross-sectional and axial flow characteristics of dry granular material in rotating drums. *Granular Matter*, 11(1), 13-32, DOI: 10.1007/s10035-008-0118-y

Karunatilake N. G. A., Kuhn P., Matei I., Munasinghe J., Seibold B., Surajiyono, Thang P. Supervisor: Dörfller W., (2000). *Dynamics of balls and liquid in a ball mill*. Modeling Seminar, Summer Term 2000, University of Kaiserslautern, Dep. of Mathematics, Kaiserslautern, Germany

Nityanand N., Manley B., Henein H., (1986) An analysis of radial segregation for different sized spherical solids in rotary cylinders. *Metallurg. Trans.*, 17B, 247-257, DOI: 10.1007/BF02655071

Oyama Y., (1940). Studies on mixing of binary system of two size by ball mill motion. *Sci. Pap. Inst. Phys. Chem. Research*, 951, 17-29 wg [Boss, 1987]