

**KRYSTIAN MALEK^{*}, KAROLINA SKOCZKOWSKA^{*},
ROMAN ULBRICH^{*}**

PROCES SEGREGACJI W APARATACH BĘBNOWYCH

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań, których celem było określenie wpływu stopnia wypełnienia materiałem polidispersyjnym oraz prędkości obrotowej aparatu bębnowego na proces segregacji. Badania wykazały wyraźną segregację cząstek polidispersyjnych przy niskich prędkościach obrotowych. Zastosowanie metody PIV pozwoliło wyznaczyć strefę stagnacji, cyrkulacji oraz mieszania. Badania wykazały, że wraz ze wzrostem stopnia wypełnienia bębna prędkości kataraktowania spadają.

Słowa kluczowe: segregacja, aparat bębnowy, metoda PIV, złożo polidispersyjne

WSTĘP

Aparaty bębnowe ze względu na swoją prostą konstrukcję oraz stosunkowo niewielkie koszty wykonania i eksploatacji są często wykorzystywane do segregacji materiałów. Przesiewacze bębnowe wykorzystywane są na wielu etapach procesu przetwarzania odpadów, począwszy od wydzielenia ze strumienia odpadów frakcji mineralnej po segregację granulatów tworzyw sztucznych. Ich zaletą jest brak obciążeń dynamicznych oraz możliwość otrzymania kilku klas materiału stosując sita posobne w bębnie [Battaglia, Banaszewski 1972].

Nowoczesne przesiewacze bębnowe powinny być urządzeniami szybkoobrotowymi, gdzie prędkość robocza mieści się w przedziale 0,8÷0,9 prędkości krytycznej (wzór 1):

$$n_{kr} = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g}{R}} = \frac{42,3}{\sqrt{D}} \quad (1)$$

gdzie:

n_{kr} – prędkość krytyczna, obr·min⁻¹,

g – przyspieszenie ziemskie, m·s⁻²,

* Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Środowiska

R – promień bębna, m,
D – średnica bębna, m.

Prędkość krytyczna odpowiada prędkości przy której działające na cząstkę siły – odśrodkowa i grawitacji równoważą się, a po jej przekroczeniu odbywa się ruch ziarna po obwodzie bębna [Wodziński 2007].

Podczas pracy aparatów bębnowych można wyznaczyć zachodzące w złożu charakterystyczne stany: kaskadowanie, kataraktowanie, prędkość krytyczna oraz wirowanie omówione w pozycji [Skoczowska i in. 2014].

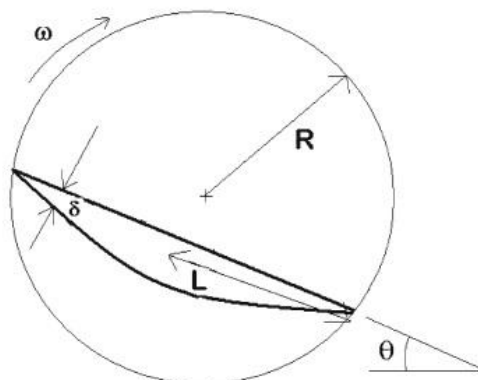
Optymalną prędkością z punktu widzenia większości prowadzonych procesów jest prędkość odpowiadająca kataraktowaniu złoża.

W literaturze znajduje się wiele badań dotyczących segregacji w aparatach bębnowych, jednakże przeważająca większość z nich są badaniami symulacyjnymi [Pereira i in. 2011; Pereira i Cleary 2012; Chand i in. 2012; Xu i in. 2010].

Wypełnienie bębna składające się z cząstek o różnej średnicy i/lub gęstości przy niskich prędkościach obrotowych ulega segregacji. Cząstki małe i/lub o większej gęstości tworzą tzw. rdzeń w środku złoża. Z kolei cząstki większe i/lub lżejsze segregują ku zewnętrznej ścianie bębna [Pereira i in. 2011; Pereira i Cleary 2012; Chand i in. 2012].

Wraz ze wzrostem stopnia wypełnienia bębna segregacja cząstek rośnie, jest to spowodowane zwiększeniem się powierzchni warstwy aktywnej w której cząstki mogą być zatapiające (rys. 1.). Przy niskim stopniu wypełnienia wysokość warstwy aktywnej jest ograniczona dnem bębna, przez co segregacja cząstek maleje [Pereira i in. 2011].

Badania miały na celu określenie wpływu stopnia wypełnienia materiałem poldispersyjnym oraz prędkości obrotowej aparatu bębnowego na proces segregacji.

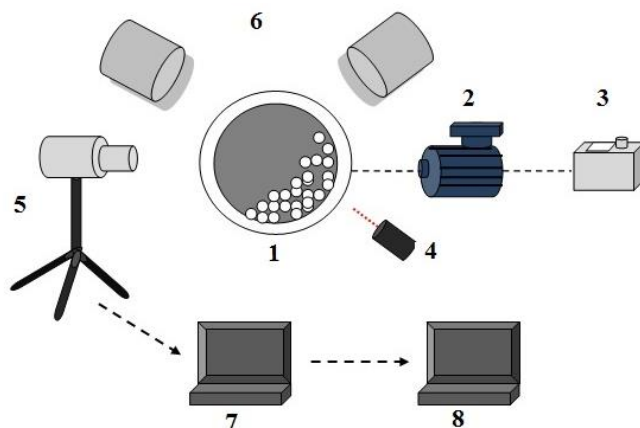


Rys. 1. Warstwa aktywna wypełnienia [Pereira i in. 2011]

Fig. 1. The active layer of filling [Pereira et al 2011]

METODOLOGIA BADAŃ

Stanowisko badawcze przedstawiono na rys. 2. Jego podstawowym elementem jest obrotowy bęben o średnicy 700 mm i szerokości 30 mm. Bęben wykonano z przezroczystego pleksiglasu w celu umożliwienia rejestracji procesów zachodzących wewnątrz. Prędkość obrotowa aparatu wywołana jest za pomocą silnika elektrycznego i płynnie regulowana falownikiem. Rzeczywista prędkość mierzona jest przy użyciu tachometru optycznego. Procesy zachodzące w bębnie rejestrowane są przy użyciu szybkiej monochromatycznej kamery CMOS oraz aparatu fotograficznego z szybką migawką 1/4000 s. W celu zwiększenia jakości rejestrowanych obrazów bęben doświetlono reflektorami. Zapisane obrazy przetwarzano na stanowisku komputerowym przy użyciu programów: PhotoScape (kadrowanie obrazów), Struktura (binaryzacja obrazów – filtrowanie cząstek na podstawie odcieni szarości) oraz DPIV (z ang. Digital Particle Image Velocimetry – wyznaczanie lokalnych pól prędkości i trajektorii ruchu cząstek).



Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego: 1- obrotowy bęben, 2- silnik elektryczny, 3 – falownik, 4 – tachometr, 5 – szybka kamera, 6 – reflektory, 7 - stanowisko komputerowe, 8 – oprogramowanie: Struktura, DPIV, PhotoScape

Fig. 2. The scheme of test stand: 1 – rotating drum, 2 – electric motor, 3 - inverter, 4 – tachometer, 5 – fast-speed camera, 6 - reflectors, 7 – computer workstation, 8 – software: Struktura, DPIV, PhotoScape

Badania przeprowadzono w zakresie prędkości od 0 do 100 obr·min⁻¹, rejestrując serię zdjęć co 2 obr·min⁻¹. Wypełnienie bębna stanowiły cząstki kuliste tworzywa sztucznego o średnicy 6 mm oraz 1100÷1200 μm, różniące się między sobą kolorem. Parametry użytych materiałów przedstawiono w tabeli 1. W trakcie realizacji badań przeprowadzono sześć serii pomiarowych różniących

się między sobą stopniem wypełnienia bębna oraz udziałami objętościowymi cząstek małych i dużych:

- 1) 15 % (objętości bębna) cząstek A + 5 % (objętości bębna) cząstek B
- 2) 15 % cząstek A + 10 % cząstek B
- 3) 15 % cząstek A + 15 % cząstek B
- 4) 20 % cząstek A + 5 % cząstek B
- 5) 20 % cząstek A + 10 % cząstek B
- 6) 20 % cząstek A + 15 % cząstek B

Tab. 1. Zestawienie użytych materiałów

Tab. 1. Statement of the materials used

| Lp. | Rodzaj materiału Type of material | Średnica cząstek Particles diameter | Gęstość nasypowa Bulk density | Kąt zsypania Angle of repose |
|-----|--|--|----------------------------------|---------------------------------|
| A | Tworzywo sztuczne Artificial material | 6 mm | 1000 kg·m ⁻³ | 29° |
| B | Tworzywo sztuczne Artificial material | 1100 ÷ 1200 μm | 580 kg·m ⁻³ | 27° |

Na podstawie zarejestrowanych obrazów z szybkiej kamery dokonano wizualnej oceny stanów zachowania się złoża, oraz wyznaczono trajektorię ruchu wypełnienia osobno dla cząstek o różnych średnicach. Zastosowana metodyka badawcza pozwala pogłębić wiedzę dotyczącą zachowania się cząstek złoża polidispersyjnego w aparacie bębnowym, a tym samym przyczynić się do optymalizacji warunków prowadzonych w nim procesów.

WYNIKI I ANALIZA BADAŃ

Wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono w tabelach 2 i 3. Zauważono spadek prędkości początku i końca kataraktowania wraz ze wzrostem stopnia wypełnienia materiałem drobnym. Prędkości początku kaskadowania, krytyczna oraz wirowania utrzymywały się na stałym poziomie, co było spowodowane wypełnianiem przestrzeni pomiędzy cząstkami o większej średnicy przez cząstki drobne.

Zwiększenie wypełnienia podstawowego z 15 do 20% spowodowało spadek prędkości charakterystycznych, podobnie jak w przypadku zwiększania zawartości cząstek o mniejszej średnicy.

Prędkość początku kataraktowania odpowiednio dla wypełnienia 15 i 20% cząstkami podstawowymi zmniejszyła się o 14,28% oraz 6,67%, dla końca kataraktowania zmiany te wyniosły odpowiednio 8,7% oraz 4,76%.

Tab. 2. Wpływ stopnia wypełnienia bębna na charakterystyczne prędkości obrotowe (przy 15% wypełnieniu cząstkami większymi)

Tab. 2. The influence of fill-in-degree of the drum on the characteristic rotational velocity (for 15% filling of larger particle)

| Stany charakterystyczne Characteristic states | Stopień wypełnienia bębna Filling ratio of drum | | |
|--|--|--------------------------|--------------------------|
| | 15 % A + 5 % B | 15 % A + 10 % B | 15 % A + 15 % B |
| Początek kaskadowania Start cascading | 8 obr·min ⁻¹ | 8 obr·min ⁻¹ | 10 obr·min ⁻¹ |
| Początek kataraktowania Start cataracting | 35 obr·min ⁻¹ | 32 obr·min ⁻¹ | 30 obr·min ⁻¹ |
| Koniec kataraktowania Finally cataracting | 46 obr·min ⁻¹ | 44 obr·min ⁻¹ | 42 obr·min ⁻¹ |
| Prędkość krytyczna Critical | 52 obr·min ⁻¹ | 50 obr·min ⁻¹ | 50 obr·min ⁻¹ |
| Wirowanie Centrifuging | 80 obr·min ⁻¹ | 80 obr·min ⁻¹ | 80 obr·min ⁻¹ |

Tab. 3. Wpływ stopnia wypełnienia bębna na charakterystyczne prędkości obrotowe (przy 20% wypełnieniu cząstkami większymi)

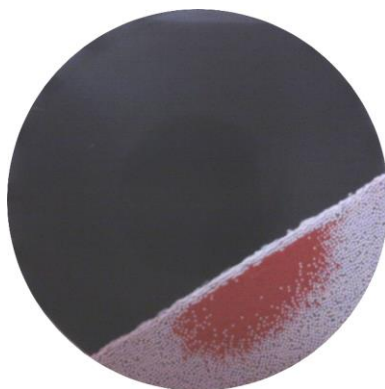
Tab. 3. The influence of fill-in-degree of the drum on the characteristic rotational velocity (for 20% filling of larger particle)

| Stany charakterystyczne Characteristic states | Stopień wypełnienia bębna Filling ratio of drum | | |
|--|--|--------------------------|--------------------------|
| | 20 % A + 5 % B | 20 % A + 10 % B | 20 % A + 15 % B |
| Początek kaskadowania Start cascading | 8 obr·min ⁻¹ | 8 obr·min ⁻¹ | 8 obr·min ⁻¹ |
| Początek kataraktowania Start cataracting | 30 obr·min ⁻¹ | 28 obr·min ⁻¹ | 28 obr·min ⁻¹ |
| Koniec kataraktowania Finally cataracting | 42 obr·min ⁻¹ | 42 obr·min ⁻¹ | 40 obr·min ⁻¹ |
| Prędkość krytyczna Critical | 48 obr·min ⁻¹ | 48 obr·min ⁻¹ | 46 obr·min ⁻¹ |
| Wirowanie Centrifuging | 80 obr·min ⁻¹ | 80 obr·min ⁻¹ | 82 obr·min ⁻¹ |

Odpowiednio dobrane wypełnienie składające się z cząstek lżejszych o mniejszej średnicy oraz cząstek gęstszych o większej średnicy osłabia proces segregacji jednak w badaniach nie stwierdzono zakłóceń w segregacji wypełnienia [Xu i in. 2010].

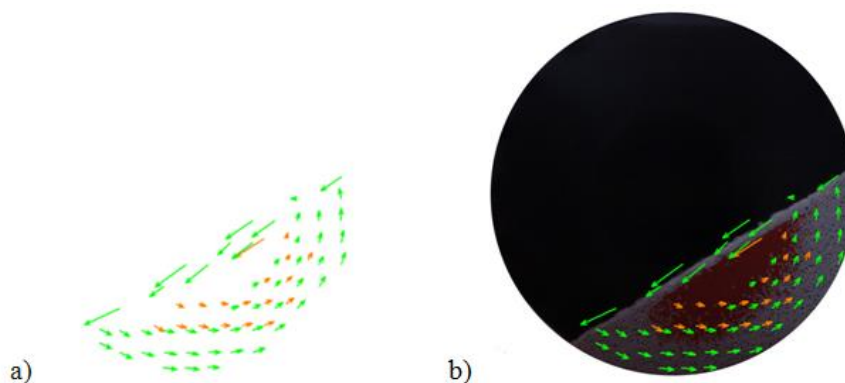
Przy niskich prędkościach obrotowych tj. na początku kaskadowania złoża, następuje wyraźna segregacja. Cząstki o mniejszej średnicy przemieszczają się

w kierunku środka wypełnienia zaś cząstki duże na zewnątrz (rys. 3). Przy wysokich prędkościach obrotowych bębna tj. pod koniec kataraktowania następuje odwrócenie kierunku segregacji, cząstki małe przemieszczają się w kierunku ścianki zaś cząstki duże w kierunku środka.



Rys. 3. Segregacja cząstek, przy prędkości równej $2 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$
Fig. 3. Segregation of particles for velocity of 2 rpm

W celu analizy zachowania się wypełnienia, oddzielnie dla grupy małych i dużych cząstek, wykorzystano program Struktura. W programie tym na podstawie odcieni szarości cząstek wydzielono cząstki o różnych średnicach. Następnie oddzielnie dla tych grup wyznaczono w programie DPIV trajektorie ruchu cząstek, oraz naniesiono je na zdjęcia rzeczywiste (rys. 4).



Rys. 4. Ruch cząstek w złożu: a) trajektorie ruchu cząstek,
b) trajektoria ruchu cząstek na tle aparatu
Fig. 4. The particles movement in the bed: a) the trajectory of the particles,
b) the trajectory of particles with image from the camera

Sekwencyjna analiza obrazu pozwoliła na wyznaczenie obszaru nieruchomego rdzenia składającego się z cząstek o mniejszej średnicy oraz obszaru cyrkulacji cząstek dużych po zewnętrznej stronie złoża. Przy niskich prędkościach obrotowych bębna jedynie niewielka warstwa na granicy cząstek o różnych średnicach ulegała wzajemnemu mieszanii.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Analizę badań eksperymentalnych dokonano wykorzystując sekwencyjną analizę obrazu, która w przeciwieństwie do analiz statycznych obrazów daje pełną informację na temat zachowania się złoża w ruchu w aparatach bębnowych.

- Zwiększenie stopnia wypełnienia materiałem polidispersyjnym przy niskich oraz wysokich prędkościach nie wpływa na charakterystyczne stany zachowania się złoża. Jedynie przy stanie kataraktowania złoża po jego rozluźnieniu powoduje obniżenie prędkości wraz ze wzrostem stopnia wypełnienia. Największą różnicę 14,28% odnotowano dla prędkości początku kataraktowania przy wypełnieniu 15% materiałem podstawowym.
- Oddzielna analiza obrazu zachowania się cząstek o różnych średnicach pozwoliła na wyznaczenie strefy: „martwej” składającej się z cząstek małych, cyrkulacji cząstek dużych po zewnętrznej stronie złoża oraz niewielkiej strefy mieszania.
- Przy niskich prędkościach obrotowych zaobserwowano wyraźną segregację cząstek złoża polidispersyjnego. Nie zaobserwowano segregacji cząstek podczas kataraktowania.



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



*Projekt współfinansowany ze środków Unii Europejskiej
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.*

Literatura

1. BATTAGLIA A., BANASZEWSKI T.; 1972. Maszyny do przeróbki węgla, rud i surowców mineralnych, część I Maszyny do przesiewania i rozdrabniania. PWN, Warszawa – Kraków.

2. WODZIŃSKI P.; 2007. Przesiewanie kruszyw w przesiewaczach bębnowych. Surowce i maszyny budowlane, nr 1, 54-57.
3. SKOCZKOWSKA K., MALEK K., ULBRICH R.; 2014. Badanie modelowe ruchu wypełnienia podczas pracy młynów kulowych. Materiały ceramiczne tom. 66, nr 3, 336-340.
4. PEREIRA G.G., SINNOTT M.D., CLEARY P.W., LIFFMAN K., METCALFE G., SUTALO I.D.; 2011. Insights from simulations into mechanisms for density segregation of granular mixtures in rotating cylinders. Granular Matter 13, 53-74.
5. PEREIRA G.G., CLEARY P.W., 10-12 December 2012. Multi – component granular segregation in rotary classifier. Ninth International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia.
6. CHAND R., KHASKHELI M.A., QADIR A., GE B. SHI Q.; 2012. Discrete particle simulation of radial segregation in horizontally rotating drum: Effects of drum – length and non – rotating end – plates. Physica A 391, 4590-4596.
7. XU Y., XU C., ZHOU Z., DU J., HU D.; 2010. 2D DEM simulation of particle mixing in rotating drum. Particuology 8, 141-149.

SEGREGATION IN THE ROTATING DRUM

S u m m a r y

The aim of this study was to determine the effect of fill-indegree of polydisperse material and drum velocity on the segregation process. Studies have shown a clear segregation of polydispersed particles at low velocitys. The PIV is able to determine: the stagnation, circulation and mixing zone. With fill-in-degree increase cataracting velocity decreases.

Key words: Segregation, rotating drum, PIV method, polydisperse bed