

Dr inż. Alicja KOLASA-WIĘCEK  
Instytut Inżynierii Produkcji, Politechnika Opolska,

## SEGREGACJA PODCZAS MIESZANIA NIEJEDNORODNYCH MATERIAŁÓW ZIARNISTYCH W MIESZALNIKU BĘBNOWYM<sup>®</sup>

*W pracy przedstawiono proces mieszania sypkich układów niejednorodnych pod względem gęstości. Badania prowadzono w mieszalniku bębnowym. Obserwowano zjawisko segregacji i stwierdzono, iż zjawisko to ma miejsce i przebiega tym intensywniej, im bardziej stosunek gęstości fazy rozpraszanej do fazy rozpraszającej oddala się od jedności.*

**Słowa kluczowe:** materiały sypkie, materiały ziarniste, materiały niejednorodne, segregacja, mieszanie, stopień zmieszania, mieszalnik bębnowy.

### Wykaz ważniejszych oznaczeń

D	– średnica bębna,
L	– długość bębna,
$m_{Ai}$	– masa fazy rozpraszanej w $i$ -tym segmencie,
$m_{Bi}$	– masa fazy rozpraszającej w $i$ -tym segmencie,
M	– stopień zmieszania,
p	– prawdopodobieństwo znalezienia trasera w dowolnym segmencie,
s	– odchylenie standardowe składu mieszaniny w $w$ próbach,
x	– udział składnika kluczowego,
$\rho_A$	– gęstość fazy rozpraszanej,
$\rho_B$	– gęstość fazy rozpraszającej,
$V_{Ai}$	– objętość fazy rozpraszanej w $i$ -tym segmencie,
$V_{Bi}$	– objętość fazy rozpraszającej w $i$ -tym segmencie,
$\sigma_0$	– odchylenie standardowe na początku procesu mieszania.

## WPROWADZENIE

Proces mieszania jest powszechnie spotykany w licznych dziedzinach przemysłowych. Jest jednym z ważniejszych problemów teoretycznych i praktycznych w technologii uzyskiwania mieszanin jednorodnych w różnych branżach przemysłu spożywczego a także w przemyśle paszowym. Niezmiernie istotne w technologii otrzymywania mieszanek jest uzyskanie komponentu dobrej jakości. O jakości tej świadczyć będzie otrzymanie mieszaniny o wysokim stopniu ujednoczenia. Większość spotykanych w praktyce przemysłowej materiałów ziarnistych, to zazwyczaj materiały niejednorodne, w przypadku których uzyskanie wysokiego stopnia wymieszania komponentów nie jest łatwe do osiągnięcia. Przy mieszanin takich układów występuje powszechnie zjawisko segregacji. Na podstawie licznych eksperymentów [2, 3, 6] poświęconych temu zagadnieniu, można wymienić kilka grup czynników, które w sposób istotny wpływają na zjawisko segregowania się składników poddanych mieszaniu. Należą do nich m.in.: zróżnicowane wymiary i gęstości stosowanych materiałów, ich kształt i wilgotność. Wiadomo, iż segregację wywołują przede wszystkim dwa parametry: różnice wymiarów i różnice gęstości ziaren. Mniejszy wpływ na powstanie tego zjawiska mają różnice kształtu czy wilgotności ziaren. Mieszanina dwu niejednorodnych komponentów po odpowiednio długim czasie mieszania osiąga stan dynamicznie stabilny, nazywany również stanem równowagowym. Badania wykazały [5, 8, 10], że dla takiego układu trudno jest osiągnąć randomowy stan zmieszania (rys. 1).

Williams [12] zauważył, że w przeciwieństwie do homogenizacji segregacja nie jest zjawiskiem losowym. Występuje

zazwyczaj, gdy ziarna mają szczególną właściwość zajmowania określonych położeń w mieszaninie. Autor ten podał trzy podstawowe mechanizmy segregacji:

1. perkolacja, czyli przenikanie drobnych ziaren przez warstwę grubszych,
2. segregacja w locie, charakterystyczna dla ziaren mających możliwość swobodnego przesypania się, przy czym ziarna cięższe docierają dalej od osi obrotu niż ziarna lżejsze,
3. segregacja wibracyjna występująca w złożu poddanym drganiom, gdzie ziarna większe gromadzą się w górnej warstwie złoża nawet wtedy, gdy mają większy ciężar właściwy niż ziarna mniejsze.

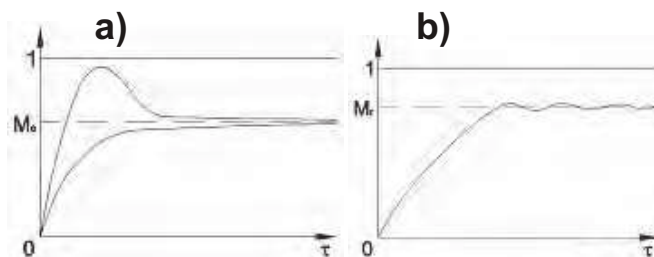
W latach 50-tych Coulson i Maitra [4] przeprowadzili eksperymenty dla materiałów podatnych na segregację i jako pierwsi zwrócili uwagę na to zjawisko. Rose [9] zauważył wpływ wzajemnych stosunków średnic materiałów na efekty końcowe mieszania. Na podstawie serii badań zaproponował on zależności, które istotnie wpływają na uzyskanie przez mieszaninę stanu dynamicznej stabilności i na maksymalny stopień zmieszania. Według Rose'a mechanizm segregacji występuje wyraźnie, gdy  $d_A/d_B > 4$ .

Donald i Roseman [5, 10] prowadzili eksperymenty na mieszalniku bębnowym i zasugerowali kolejne zależności, które pozwalają sklasyfikować układ badanych materiałów jako jedno- lub niejednorodny. Według tych autorów układ można traktować jako jednorodny, gdy  $d_A/d_B < 1,2$  oraz gdy  $d_A/d_B < 1,2$ .

Używając materiałów różnych pod względem gęstości, przy tych samych wymiarach, Ristow [8] dla komponentów niejednorodnych pod względem gęstości wykazał, że segregacja rośnie proporcjonalnie z logarytmem proporcji masowej cząstek oraz że materiał o większej gęstości szybciej ulegał segregacji.

W dzisiejszej dobie prowadzi się eksperymenty nad mieszaninami z uwzględnieniem segregacji przez symulacje komputerowe. Takie badania prowadzili m.in. Schäfer [11] i in. oraz Van Puyvelde i in. [7].

Proces segregacji jest zjawiskiem złożonym i przez cały czas trwają próby opisania go i znalezienia mechanizmów nim rządzących.

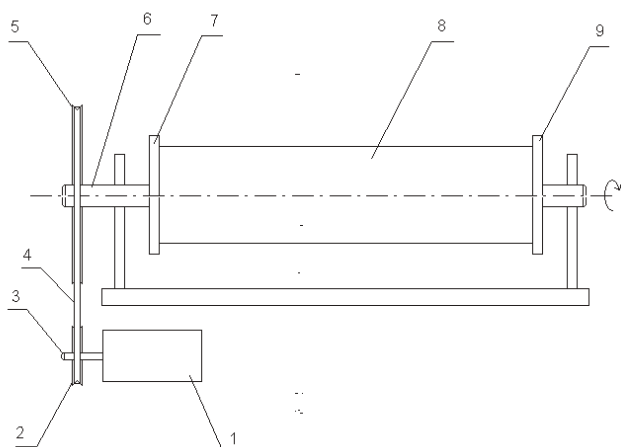


**Rys. 1.** Krzywe mieszania dla stanów: a) równowagowego; b) randomowego.

## METODYKA BADAŃ

Celem badań było uzyskanie możliwie najwyższego stopnia zmieszania dla układów o zróżnicowanej gęstości oraz ustalenie czynników powodujących w tym przypadku równowagowy stopień zmieszania. Obserwowano proces segregowania się par materiałów.

Badania prowadzono w poziomym mieszalniku bębnowym o pracy okresowej – o stosunku długości do średnicy równej  $L/D = 10,6$ . Uproszczony schemat tego urządzenia zamieszczono na rysunku 2. Mieszalnik pracował ze stałą prędkością równą połowie obrotów krytycznych bębna. Stopień zmieszania par układów wyznaczany był na podstawie analizy koncentracji składnika kluczowego w poszczególnych segmentach bębna.



**Rys. 2.** Schemat stanowiska badawczego. 1 – silnik, 2 – koło pasowe napędowe, 3 – wałek napędowy, 4 – pas klinowy, 5 – koło pasowe napędowe, 6 – wałek napędzany, 7 – pokrywa bębna stała, 8 – wymienny beben, 9 – pokrywa bębna wymienna.

Mieszalnik podzielono na 30 równych objętościowo segmentów, ułatwiających analizę koncentracji składników.

Dobór materiałów do badań nie był przypadkowy. Ze względu na długi czas prowadzenia procesu mieszania zastosowano układy modelowe – składniki odporne na ścieranie, trwałe i mogące ponownie być wykorzystane w kolejnych etapach badań.

Przebadano 3 układy materiałów:

składnik kluczowy – kulki ołowiane ( $\rho_{sk} = 11700 \text{ kg/m}^3$ ) – faza rozpraszająca – kulki agalitu ( $\rho_{fr} = 2400 \text{ kg/m}^3$ ),

składnik kluczowy – kulki stalowe ( $\rho_{sk} = 7800 \text{ kg/m}^3$ ) – faza rozpraszająca – kulki agalitu ( $\rho_{fr} = 2400 \text{ kg/m}^3$ ),

składnik kluczowy – gorczyca ( $\rho_{sk} = 970 \text{ kg/m}^3$ ) – faza rozpraszająca – kulki agalitu ( $\rho_{fr} = 2400 \text{ kg/m}^3$ ).

Przed rozpoczęciem procesu mieszania składnik rozpraszany umieszczano w pierwszym segmencie bębna mieszalnika. Komponenty znajdowały się w stanie całkowitego ich rozdzielania.

Analiza koncentracji składnika kluczowego polegała na badaniu jego rozprzestrzenienia się wzdłuż osi bębna. Jego udział w próbach wyznaczano korzystając ze wzoru:

$$x_i = \frac{v_{Ai}}{v_{Ai} + v_{Bi}} \quad (1)$$

gdzie:

$$v_{Ai} - \text{objętość fazy rozpraszanej w } i\text{-tym segmencie; } v_{Ai} = \frac{m_{Ai}}{A},$$

$$v_{Bi} - \text{objętość fazy rozpraszającej w } i\text{-tym segmencie; } v_{Bi} = \frac{m_{Bi}}{B},$$

Stopień zmieszania obliczano z definicji podanej przez Rose'a:

$$M = 1 - \frac{s}{\sigma_0} \quad (2)$$

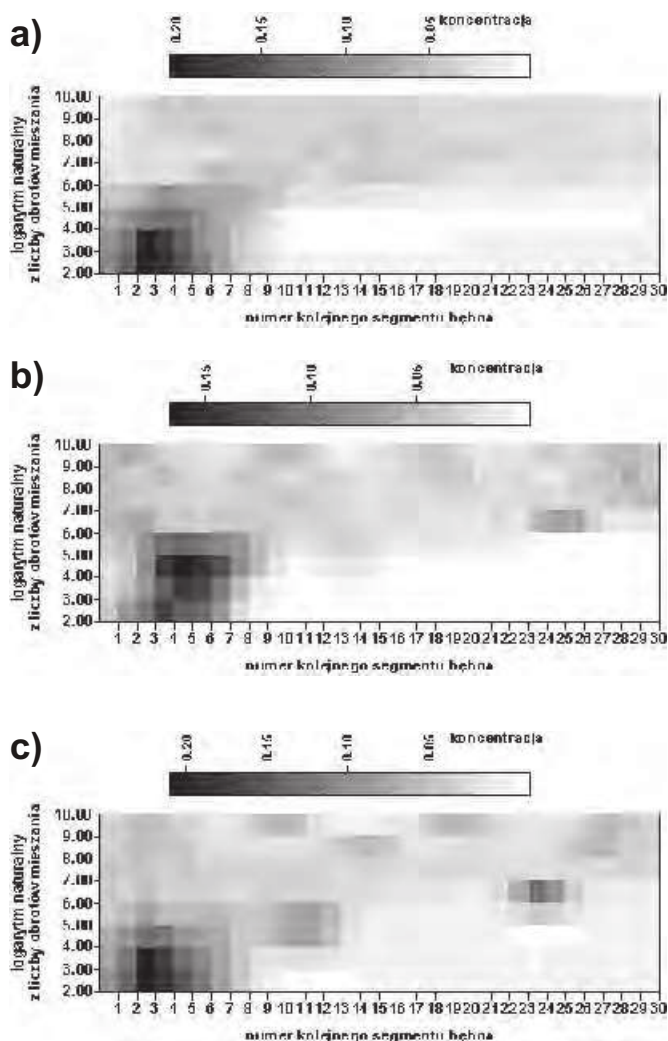
gdzie:  $s$  – odchylenie standardowe składu mieszaniny w  $n$  próbach,

$\sigma_0$  – odchylenie standardowe na początku procesu mieszania.

Celem prześledzenia wędrówki tego składnika w bębnie przez cały czas trwania procesu, wyniki przedstawiono w postaci map rozkładów koncentracji składnika (rys. 3). Przy opracowywaniu wyników posłużono się rozkładem w zależności od liczby obrotów bębna i kolejnych numerów segmentów bębna.

## WYNIKI BADAŃ

Otrzymane rozkłady koncentracji badanego składnika rozpraszanego dla układów par materiałów przedstawiają się następująco:



**Rys. 3.** Dwuwymiarowy rozkład koncentracji składnika kluczowego dla układów: a) gorczyca – agalitu; b) stal – agalitu; c) ołów – agalitu.

Poddając analizie obraz powyższych map rozkładu koncentracji fazy rozpraszanej zauważa się, że dla pary materiałów gorczyca – agalit (rys. 3 a), najwyższa koncentracja składnika rozpraszanego przypada dla 2, 3, 4 segmentu bębna przy wartości odpowiadającej 75-150 obrotom mieszalnika (z wykresu 2-5 logarytm naturalny z liczby obrotów). Obraz rozprzestrzeniania się mieszanych składników na pewnym etapie osiąga stan świadczący o uzyskaniu jednorodności układu, a tym samym o ustaleniu się równowagi dynamicznej (koncentracja fazy rozpraszanej waha się tu na poziomie ok. 0,5%).

Rozkład koncentracji składnika rozpraszanego dla dwóch pozostałych układów kształtuje się nieco odmiennie (rys. 3 b, c). Mozaikowość widoczna już przy pierwszej analizie obrazu wynika z losowego przemieszczania i grupowania się tej fazy. Zauważa się tu pewne podobieństwa. Przy mniejszej liczbie obrotów bębna składnik rozpraszany kumuluje się głównie w pierwszych segmentach mieszalnika. Widoczna jest silna jego koncentracja przy końcu mieszalnika (24 ÷ 26 segment) oraz pewna tendencja do grupowania się i jej powtarzalność przy największych z liczb obrotów mieszalnika. Kumulowanie się składnika rozpraszanego widoczne w kilku pasmach oraz zmienna ich liczba zależne są od liczby obrotów.

### WNIOSKI

1. Dla par materiałów niejednorodnych stal – agalit, ołów – agalit zaobserwowano segregowanie się materiałów. W celu osiągnięcia satysfakcjonującego stopnia zmieszania ( $>0,9$ ) proces wymaga długiego czasu.
2. Zauważono, iż zjawisko segregacji ma miejsce i przebiega tym intensywniej, im bardziej stosunek gęstości  $\rho_{sk}/\rho_{fr}$  oddala się od jedności.
3. Mimo towarzyszącego procesowi zjawisku segregacji, układy osiągnęły stan równowagowy. Dla par materiałów ołów – agalit oraz stal – agalit ustalił się on na poziomie  $M = 0,88 \div 0,90$ . Uzyskane wartości zmieszania kwalifikują te mieszaniny jako dobrej jakości [1].
4. Przeprowadzone badania dały podstawę do dalszych prac badawczych na surowcach stosowanych w przetwórstwie spożywczym, które to badania podjęto na Politechnice Opolskiej.

### LITERATURA

- [1] Boss J., Mieszanie materiałów ziarnistych, Warszawa - Wrocław PWN, 1987.
- [2] Cantelaube F., Bideau D.: Radial Segregation in a 2D Drum: an Experimental Analysis, Europhys. Lett., 1995, 30, 133.
- [3] Choo K., Molteno T. C. A., Morris S. W.: Traveling Granular Segregation Patterns in a Long Drum Mixer, Phys. Rev. Lett., 1997, 79, 2975.
- [4] Coulson J. M., Maitra N. K.: The mixing of Solid Particles. Ind. Chem., 1950, 26, Febr., 55-60.
- [5] Donald M. B., Roseman B.: Mechanisms in a Horizontal Drum Mixer. Part I., Brit. Chem. Eng., 1962, 7, 10, 749-753.
- [6] Pollard B. L., Henein H.: Kinetics of Radial Segregation of different sized irregular particles in Rotary Cylinder, Can Metall Quart, 1989, 28, 29 - 40.
- [7] van Puyvelde D. R., Young B. R., Wilson M. A., Schmidt S. J.: Modeling transverse Segregation of Particulate Solids in a Rolling Drum, Trans IChemE, 2000, Vol 78, Part A.
- [8] Ristow G. H., Nagawa M.: Shape Dynamics of Interfacial Front in Rotating Cylinders, Phys. Rev. 1998, E 59.
- [9] Rose H. E.: A suggested Equation Relating to the mixing of Powders and Its Application to the Study of the Performance of Certain Types of Machine, Trans. In. Chem. Eng. 1959, 37, 47-64.
- [10] Roseman B., Donald M. B.: Effects of Varying the Operating Conditions of a Horizontal Drum Mixer. Part II. Brit. Chem. Eng. 1962, 7, No 11, 823-827.
- [11] Schäfer J., Dippel S., Wolf D. E.: Force Schemes in Simulations of Granular Materials, J. Phys. 1996, I France 6, 5.
- [12] Williams J. C.: The Segregation of Particulate Materials. A Review, Powder Technol. 1976, 15, 245-251.

### SEGREGATION DURING HETEROGENEOUS MATERIAL MIXING

#### SUMMARY

*The authors present the test results for mixing of pairs of heterogeneous granular materials. Influence of density difference on effects of component intermixing was tested. Segregation accompanying the mixed systems was observed.*

**Key words:** *loose materials, granular materials, heterogeneous materials, mixing degree, segregation, drum mixer.*