

Dr inż. Mariusz KOSMOWSKI  
Katedra Ekoinżynierii i Aparatury Procesowej  
Wydział Mechaniczny Politechniki Gdańskiej

## MOŻLIWOŚCI ZMNIEJSZANIA SEGREGACJI®

*Przemysł spożywczy obok przemysłu chemicznego i farmaceutycznego, jest największym producentem i przetwórcą materiałów sypkich. Procesowi przetwarzania tych materiałów stale towarzyszy segregacja. Poznanie czynników wpływających na segregację umożliwia podjęcie działań minimalizujących jej skutki. W każdym rodzaju segregacji najefektywniejszą metodą minimalizowania segregacji jest ujednorodnienie materiału. Istnieją też metody właściwe tylko dla określonych procesów obróbki i typów stosowanych urządzeń. W większości są one jakościowe lub empiryczne.*

### WPROWADZENIE

W przypadku manipulowania materiałami sypkimi nie można rozdzielić mechanizmów mieszania i segregacji. Jakość końcowa mieszanin określa względny udział tych mechanizmów. Złagodzenie segregacji jest warunkiem koniecznym osiągnięcia produktu o wysokiej jakości. Wyróżniamy dwa rodzaje metod minimalizowania segregacji – metody uniwersalne (modyfikowanie własności materiałów, urządzeń, procesów i warunków środowiskowych) oraz metody specjalne (specyficzne dla określonych operacji i urządzeń).

**Celem artykułu jest próba prezentacji możliwości zmniejszenia segregacji towarzyszącej procesowi przetwarzania w przemyśle spożywczym.**

### METODY UNIWERSALNE

#### Modyfikowanie właściwości materiału

Poprawa własności materiału może zminimalizować lub całkowicie wyeliminować wszystkie rodzaje segregacji. Do najważniejszych zabiegów należy:

##### *Ujednorodnienie wielkości*

Segregacja wynika przede wszystkim z różnic wielkości, dlatego najważniejszym sposobem minimalizowania segregacji jest stosowanie komponentów wielkościowo tak podobnych, jak to jest możliwe. Zawężenie zakresu wielkości ziaren można osiągnąć przez zmniejszanie wielkości ziaren (rozdrabnianie), podzielenie na grupy wielkościowe (sortowanie) lub zwiększenie wielkości (aglomerowanie). Zmniejszanie wielkości ziaren skutecznie ogranicza segregację (zwłaszcza stosowanie ziaren o wielkości mniejszej niż 100  $\mu\text{m}$  [2]). Trzeba jednak brać pod uwagę fakt, że nadmierne rozdrobnienie może zmniejszyć mobilność ziaren (zwiększyć spójność materiału). Sortując materiał warto pamiętać, że do stosunku wielkości ziaren 1,3:1 materiał można traktować jako jednorodny [2]. Aglomerowanie jest przydatne w przypadku łączenia różniących się jakościowo i ilościowo komponentów. Przykładowo, kiedy dodajemy małą ilość składników uszlachetniających do mieszaniny produktów spożywczych, dodatkowi powinno się nadać im postać i wielkość podobną do pozostałych składników.

Ujednorodnianie wielkości jest najefektywniejszą metodą minimalizowania segregacji wielkościowej, lecz metoda ta może być procesem skomplikowanym, drogim lub niekorzystnie

wpływać na kolejne operacje (przykładowo materiał jednorodny w przypadku wyrobów prasowanych daje gorszą strukturę opakowania, [9]).

##### *Ujednorodnienie kształtu*

Należy wystrzegać się ziaren o różnych kształtach a także nieregularnie ukształtowanych. Szczególnie należy unikać (eliminować) ziaren o kształcie iglastym. Należy tak prowadzić poprzedzające procesy, by takie cząstki nie powstawały lub eliminować je przez mielenie. Pomocne może również okazać się granulowanie. Stwierdzono [1], że czynnik kształtu odgrywa istotną rolę w prawach rządzących strumieniem materiałów ziarnistych. W przypadku materiałów zróżnicowanych istotne są proporcje składników.

##### *Zrównoważenie odmiennych mechanizmów segregacji*

Możliwe jest znalezienie równowagi między segregacją wielkościową i gęstościową przez manipulowanie stosunkiem wielkości i gęstości ziaren [11, 12]. Jeśli występuje konieczność mieszania ziaren o różnych gęstościach, wtedy korzystne jest stosowanie układów złożonych z dużych ziaren o większej gęstości i małych ziaren (z lżejszego materiału). Równowagę między segregacją wielkościową i gęstościową uzyskamy jeśli stosunek wielkości cząstek jest większy niż stosunek ich gęstości, [5]. Stosunki dla których segregacja zanika, nie są dokładnie sprecyzowane i dlatego w konkretnych przypadkach konieczne są badania.

##### *Ograniczanie mobilności ziaren*

Swoboda ruchu względnie małego ziarna względem dużego, jest jednym z warunków wstępnych wystąpienia segregacji. Oczywistym zabiegiem zmniejszającym tendencje do segregacji jest zwiększenie spójności materiału przed operacją mieszania. Spójność można zwiększyć przez zwiększenie wilgotności (dodawanie małej ilości płynu np. oleju), wprowadzanie drobnego spójnego komponentu lub wywołanie w składnikach o bardzo małych ziarnach ładunków elektrostatycznych [6].

Zwiększenie wilgotności wywołuje siły spójności przez tworzenie ciekłych mostków. Dodanie małej ilości cieczy znacząco zmniejsza segregację, [8]. Segregacja spada wraz ze wzrostem ilości cieczy oraz ze zwiększaniem lepkości cieczy. Stwierdzono również silną zależność skuteczności mieszania od zawartości płynu [4].

Wprowadzanie dodatkowego drobnego, spójnego składnika może zmienić mobilność całego materiału ziarnistego.

Jeśli jeden ze składników jest bardzo drobny, a drugi jest stosunkowo duży, to teoretycznie istnieje możliwość pokrycia drobnymi ziarnami powierzchni dużych ziaren i przez to zminimalizowanie segregacji i umożliwienie osiągnięcia mieszaniny jednorodnej [7].

Trzeba pamiętać, że ograniczanie mobilności ziaren ogranicza jednocześnie skuteczność mieszania, które również zależy od względnego ruchu między cząstkami. Nadmierne zwiększanie spoistości może być przyczyną problemów (wysklepianie się ładunku, powstawanie pustek) [2].

#### *Manipulowanie stanem asymptotycznym*

W przeciwieństwie do mieszania płynów, dłuższe mieszanie materiałów ziarnistych nie zawsze gwarantuje lepszą mieszaninę. Istnieje pośredni stan, w którym efekt mieszania jest najlepszy. Dalsze mieszanie jedynie zmniejsza stan zmieszania do czasu osiągnięcia stanu równowagi (stanu asymptotycznego). Celem badań powinno być wskazywanie sposobów osiągnięcia podobnego efektu mieszania nie przez zatrzymywanie procesu w określonym pośrednim stanie, lecz przez manipulowanie asymptotycznym stanem [7].

Modyfikacja innych własności ziaren, takich jak gęstość lub chropowatość powierzchni nie jest opcją. Jeśli modyfikowanie wielkości, kształtu i spójności nie jest możliwe, należy rozważyć inną metodę redukcji segregacji.

#### **Modyfikowanie urządzeń i procesu**

Istotny jest projekt urządzenia oraz parametry eksploatacji linii.

##### *Urządzenie*

W projektowanych układach należy [2]:

- stosować przepływ materiału w układzie strumienia: „pierwsze - wchodzi, pierwsze - wychodzi”,
- zapewnić ruch materiału uniemożliwiający koncentrację drobnych ziaren w określonych (martwych) sekcjach urządzenia,
- minimalizować gradienty prędkości strumienia i tym samym eliminować segregację.

##### *Proces*

Należy tak prowadzić proces, aby [9]:

- ograniczać wysokości swobodnego spadania surowca,
- stosować stały i jednolity strumień,
- unikać gwałtownych zmian kierunku ruchu materiału,
- dla mieszanin składających się z wielu jednolitych komponentów wyraźnie różniących się między sobą należy przetwarzać każdy składnik oddzielnie i operację mieszania prowadzić dopiero w ostatnim kroku.

#### **Modyfikowanie warunków środowiskowych**

Istotna jest kontrola i ewentualna zmiana warunków otoczenia, w którym prowadzimy procesy. Przykładowo, musimy dążyć do minimalizacji wibracji (przez jej eliminowanie lub izolowanie się od niej), do utrzymywania stabilnej wilgotności oraz pilnowania optymalnego czasu czy temperatury operacji.

## METODY SPECJALNE

Z określonymi operacjami związanymi z materiałami ziarnistymi (napełnianie/opróznianie, zsypanywanie rynną zsypową, formowanie hałdy, transportowanie i mieszanie) związane są odmienne mechanizmy segregacji. Dlatego do każdej operacji, oprócz opisanych wyżej ogólnych metod, należy stosować metody właściwe tylko dla wybranych procesów [9]. Poniżej podano kilka przykładów.

#### **Zbiorniki**

W przypadku zbiorników najczęściej mamy do czynienia z segregacją wynikającą z przesiewania, różnych kątów usypu, fluidyzacji i prądu powietrza.

*Przesiewanie* - segregacja występuje w przypadku, gdy podstawowym składnikiem (dominującym ilościowo) są łatwo płynące duże ziarna, a dodatkowym łatwo płynące małe ziarna (średnia wielkość ziaren małych mniejsza od 1/3 średniej wielkości ziaren dużych) [6]. Przesiewanie powoduje względny ruch ziaren. Zapobieganie – a) wytwarzanie podstawowych i dodatkowych komponentów tej samej wielkości, b) dodawanie cieczy do dużych ziaren, c) wprowadzanie spójnych małych ziaren, d) umieszczanie elektrostatycznych ładunków na drobnym komponencie.

*Kąt usypu* - segregacja występuje w przypadku względnego ślizgania się dwóch komponentów. Materiał ziarnisty charakteryzujący się dużym kątem usypu tworzy zbocze, po którym ślizga się swobodnie materiał z mniejszym kątem usypu. Ziarna nie muszą różnić się wielkością. Zapobieganie - a) stosowanie dużych ziaren zmieszanych z cieczą (skutek - przywieranie drobnych ziaren do dużych), b) odpowiedni dobór kształtu i chropowatości powierzchni ziaren (zaokrąglone albo gładkie ziarna tworzą mniejsze kąty usypu od płaskich, chropowatych nierównych i kanciastych), c) stosowanie głównego składnika o mniejszym kącie usypu.

*Fluidyzacja* - występuje, gdy mieszaninę tworzą dwa łatwo płynące składniki: główny fluidyzujący o bardzo małych wymiarach i drugi stosunkowo duży i ciężki. Zapobieganie – a) dodawanie cieczy (nawet w małych ilościach), b) wstępna aglomeracja małych ziaren.

*Segregacja w prądzie powietrza* - występuje w procesie podawania materiału ziarnistego. Ziarna bardzo małe stają się „lotne” i są porywane w kierunku ścian zbiornika albo do systemu odpylania. Zapobieganie: a) rozpylanie cieczy podczas operacji (efekt - skupiania się „lotnego” składnika i jego opadanie), b) dodawanie płynu do dużych ziaren przed połączeniem z bardzo małymi (efekt - przywierania małych ziaren do dużych).

Celowe jest stosowanie różnych wkładek zmniejszające segregację podczas procesów napełniania lub rozładowania zbiorników.

#### **Bębny obrotowe**

W przypadku operacji prowadzonych w obracających się bębnach, jako specyficzne sposoby zmniejszania segregacji można wykorzystać spostrzeżenia:

- wysokie udziały dużych ziaren przeciwdziałają segregacji [10].
- w układach złożonych z ziaren o dwóch wielkościach i tej samej gęstości można oczekiwać mniejszej segregacji dla dużej wartości stosunku średnic bębna / ziarno [3].

## PODSUMOWANIE

Uniwersalne metody minimalizowania segregacji polegają na poprawianiu własności materiału, właściwym doborze urządzeń i ich parametrów oraz kontroli warunków, w których operuje się materiałem ziarnistym. W każdym przypadku ujednorodnienie właściwości materiału prowadzi do zmniejszenia grupowania się ziaren. Zawężanie zakresu wielkości (w przypadku jednakowej gęstości) jest najefektywniejszą metodą minimalizowania segregacji.

Stosowane sposoby ograniczania segregacji są w większości jakościowe lub empiryczne. Ich mechanizmy nie w pełni są jasne i w konsekwencji nie wiadomo, jakie rozwiązania są optymalne i w jaki sposób skutecznie łączyć różne metody.

Drugim mankamentem są trudności w praktycznym stosowaniu tych metod. Na przykład zalecany jest wąski zakres wielkości ziaren, ale nie istnieje efektywny sposób określania optymalnego zakresu wielkości dla określonego materiału.

W większości przypadków produkty i procesy są projektowane metodą prób i błędów z powodu niepełnego zrozumienia zjawiska.

- [12] **TUKIENDORF M. 2003.** *Optymalizacja procesu mieszania metodą ze zbiornika do zbiornika ziarnistych układów niejednorodnych. Matematyczny model dwuwymiarowy - cz. II.* Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego, tom 13/23, 2, 24-26.

## THE POSSIBILITY OF REDUCING THE SEGREGATION

### SUMMARY

*The methods of the reduction of segregation consist of improving the features of the material, the specific selection of apparatuses and their parameters and the control of the conditions in which one operates the grainy material. The well-known ways of limiting segregation are in qualitative or empirical majorities. Their mechanisms are not quite comprehensible. It is not known what solutions is optimum and how to join various methods effectively. The majority of machines and processes are projected by the method of tests and mistakes.*

## LITERATURA

- [1] **BENEZET J.C., ADAMIEC P., NEMOZ-GAILLARD M. 2007.** *Study of real granular assemblies.* Powder Technology 173, 118-125.
- [2] **CARSON J., ROYAL T., GOODWILL D. 1986.** *Understanding and Eliminating Particle Segregation Problems.* Bulk Solids Handling, 6, 139-144.
- [3] **FÉLIX G., FALK V., D'ORTONA U. 2002.** *Segregation of dry granular material in rotating drum: experimental study of the flowing zone thickness.* Powder Technology, 128 (2-3), 314-319.
- [4] **GEROMICHALOS D., KOHONEN M. M., HERMINGHAUS S. 1997.** *Mixing and condensation in a wet and dry granular media.* Physical Review E. 56, 6271-6276.
- [5] **JAIN N., OTTINO J., LUEPTOW R. 2005.** *Regimes of segregation and mixing in combined size and density granular systems: an experimental study.* Granular Matter 7, 69-81.
- [6] **JOHANSON, J. R. 1996.** *Predicting segregation of bimodal particle mixtures using the flow properties of bulk solids.* Pharm. Technol. Eur., 8 (1), 38-44.
- [7] **LI H. 2005.** *Impact of cohesion forces on particle mixing and segregation.* University of Pittsburgh,.
- [8] **SAMADANI A., KUDROLLI A. 2000.** *Segregation transitions in wet granular matter.* Phys. Rev. Lett. 85, 5102-5105.
- [9] **TANG P., PURI V. 2004.** *Methods for Minimizing Segregation: A Review.* Particulate Science and Technology, 22 (4), 321-337.
- [10] **THOMAS N. 2000.** *Reverse and intermediate segregation of large beads in dry granular media.* Physical Review E 62 (1), 961-974.
- [11] **TUKIENDORF M. 2003.** *Optymalizacja procesu mieszania metodą ze zbiornika do zbiornika ziarnistych układów niejednorodnych. Matematyczny model dwuwymiarowy - cz. I.* Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego, tom 13/22, 1, 21-23.