

## **BADANIE PRZEBIEGU PROCESU MIESZANIA DWUSKŁADNIKOWEGO UKŁADU ZIARNISTEGO METODĄ WYSYPU KOMINOWEGO**

Jolanta Królczyk, Dominika Matuszek, Marek Tukiendorf

*Katedra Techniki Rolniczej i Leśnej, Politechnika Opolska*

**Streszczenie:** Autorzy pracy badali przebieg procesu mieszania niejednorodnych komponentów ziarnistych systemem funnel flow w czasie kolejnych dziesięciu przesypów. Mieszalnik wyposażono we wkładkę daszkową systemu Roof Shaped Insert. Jakość mieszaniny ziarnistej oceniano w oparciu o komputerową analizę obrazu. Do określenia zmian przebiegu procesu mieszania w czasie kolejnych 10 kroków wykorzystano metodę taksonomicznego opisywania obiektów. Zaobserwowano, iż postęp procesu w czasie można podzielić na dwie fazy: gwałtowną i stabilną. Wyniki badań przedstawiono w sposób graficzny. Dokonano analizy możliwości zastosowania analizy skupień do określenia zmian procesu mieszania w czasie.

**Słowa kluczowe:** mieszanie materiałów ziarnistych, system funnel flow, komputerowa analiza obrazu, analiza skupień

### **Wstęp**

Zagadnienie mieszania materiałów ziarnistych analizowane jest od wielu lat co znalazło swoje odzwierciedlenie w wielu pozycjach [Lacey 1943; Roseman 1963; Tanaka 1971; Boss 1987; Stręk 1981; Grochowicz i in. 1998]. W dobie dzisiejszego postępu rola mieszania materiałów ziarnistych nie maleje. Przeciwnie wymagania jakościowe mieszanek są coraz ostrzejsze i nakłaniają inżynierów i naukowców do poszukiwania i stosowania nowych rozwiązań konstrukcyjnych opartych o badania analityczne.

Mieszanie materiałów ziarnistych ma na celu wytworzenie jednorodnej, pod względem składu, mieszaniny. Ważnym i nadal aktualnym zagadnieniem w tym procesie jest czas potrzebny do uzyskania odpowiedniej jakości mieszaniny. Ze względu na brak pełnego i jednoznacznego opisu praw rządzących ruchem ciał stałych w złożu nie istnieje wyczerpująca teoria kinetyki procesu mieszania [Boss 1987; Boss 1992]. W pojedynczych przypadkach (rzadko spotykanych w praktyce przemysłowej) gdy składniki mieszaniny nie różnią się w znaczący sposób własnościami takimi jak: gęstość czy średnica ziaren (układ jednorodny) proces przebiega od stanu pierwotnej segregacji do całkowitego zmieszania. Natomiast składniki niejednorodne poddane mieszaniu nie zawsze doprowadzają do uzyskania zadowalających efektów.

Problem kinetyki procesu mieszania można w zasadzie sprowadzić do wyznaczenia funkcji zmiany składu mieszaniny w czasie [Boss 1987]:

$$\sigma = f(t) \quad (1)$$

gdzie:

$\sigma$  – wariancja,  
 $t$  – czas [s].

Mimo wieloletnich prac badaczy kwestia ta nie została w pełni rozwiązana i jest nadal aktualna. Waga tego zagadnienia wynika przede wszystkim z ekonomiki procesu mieszania. Ważne jest, aby określić czas mieszania, który pozwoli na uzyskanie mieszanki o odpowiedniej jakości. Zbyt krótkie mieszanie lub też zbyt długie może powodować negatywne skutki jakościowe. Określenie właściwego czasu w odniesieniu do jakości i ekonomiki wynika wprost z kinetyki procesu. Mieszaniny niejednorodne na ogół nie osiągają stanu randomowego  $M_r$ . Maksymalny stopień zmieszania tych składników jest określany na podstawie badań prowadzących do uzyskania uzasadnionego technologicznie stanu równowagowego, po którym dalsze mieszanie nie powoduje zmian jakościowych układu [Boss 1991]. Dla rozmaitych układów ziarnistych i urządzeń mieszających może to nastąpić w różnych momentach mieszania [Boss, Węgrzyn 1996]. W niektórych sytuacjach szczegółowe poznanie przebiegu procesu w określonych urządzeniach i warunkach pozwala na skrócenie tego czasu [Królczyk, Tukiendorf 2005; Królczyk, Tukiendorf 2006]. Analiza wyników eksperymentu zaprezentowana w niniejszym artykule przedstawia charakter zmian jakości niejednorodnej mieszaniny ziarnistej w czasie mieszania metodą przesypu.

## Cel badań

Celem badań była analiza przebiegu procesu mieszania dwuskładnikowego układu ziarnistego metodą przesypu w oparciu o analizę skupień.

## Metodyka badań

Poszczególne etapy i elementy metodyki badań opisano szczegółowo we wcześniejszych pracach autorów i można je zapisać w następujących punktach:

### 1. Mieszalnik laboratoryjny.

Do badań wykorzystano stanowisko laboratoryjne wyposażone w mieszalnik przesypowy. Mieszanie prowadzono poprzez przesypywanie (1 do 10 przesypów) materiału ziarnistego z jednego zbiornika do drugiego. Zbiorniki urządzenia posiadały odpowiednią konstrukcję zapewniającą formowanie wysypu kominowego. Stanowisko wyposażone było w zbiornik analityczny złożony z dziesięciu rozbieralnych pierścieni, który służył do analizy rozmieszczenia składników w złożu. Opisu poszczególnych parametrów mieszalnika dokonano w poprzednich publikacjach autorów [Matuszek, Tukiendorf 2007a].

2. Materiał ziarnisty.

Mieszaniu poddano dwuskładnikowy niejednorodny układ ziarnisty łubin-wyka o stosunku gęstości  $\rho_1/\rho_2=1,00$  i średnic ziaren  $d_1/d_2=1,6$ . Składniki mieszano w stosunku 1:9. Więcej szczegółów w publikacji [Matuszek, Tukiendorf 2007a].

3. Element systemu Roof Shaped Insert.

Mieszalnik wyposażono we wkładkę daszkową systemu Roof Shaped Insert, która montowana była w górnej części każdego ze zbiorników. Element stożkowy posiadał następujące wymiary: średnica 150 mm, kąt rozwarcia stożka  $\alpha=110^\circ$ . Zastosowanie tego dodatkowego elementu wynikało z jego wpływu na poprawę jakości mieszanki ziarnistej podczas mieszania przesypowego, co udowodniono we wcześniejszych publikacjach autorów [Matuszek, Tukiendorf 2007a].

4. Komputerowa analiza obrazu.

Analiza rozmieszczenia traseru na powierzchni badanych przekrojów poprzecznych mieszalnika (pierścienie 1, 5 i 10) prowadzono w oparciu o komputerową analizę obrazu. W wyniku przeprowadzonej procedury komputerowej akwizycji obrazu opisanej w innej publikacji autorów [Matuszek, Tukiendorf 2007b] uzyskiwano wartości 0 – ziarna jasne i 1 – ziarna ciemne. Na tej podstawie obliczano wariację rozkładu traseru.

5. Wariancja rozkładu traseru.

Parametrem stanowiącym wyznacznik jakości mieszanki ziarnistej była wariancja rozkładu traseru, której wzrost od wartości 0 (stan idealny) świadczył o pogorszeniu stanu mieszaniny

6. Analiza skupień.

Analiza skupień jest zbiorem metod służących do wyodrębnienia homogenicznych podpopulacji wśród obiektów pochodzących z populacji heterogenicznej [Tryon 1939]. Podstawową ideą jest znajdowanie grup (skupień) obiektów, które są bardziej podobne (w sensie zastosowanej miary) do obiektów współtworzących dane skupienie (wewnątrz grupy) aniżeli do obiektów innych skupień [Tryon 1939]. Zatem w badaniach z populacji kroków mieszania od 1 do 10 wyodrębniono kroki podobne do siebie. Poszczególne etapy analizy skupień opisano w kolejnym rozdziale „wyniki i ich analiza”.

## Wyniki i ich analiza

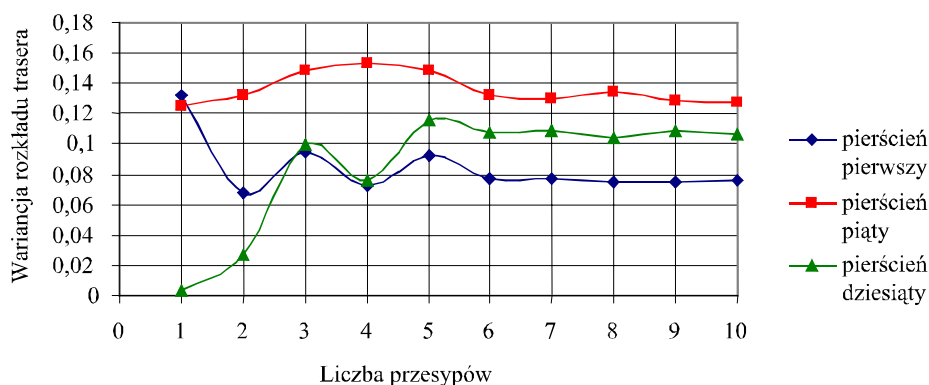
Zmianę wariancji rozkładu traseru, dla poszczególnych poziomów mieszalnika, w czasie kolejnych dziesięciu kroków mieszania zestawiono w tabeli 1 oraz przedstawiono w sposób graficzny (rys. 1).

Obserwacja zmian jakości mieszanki ziarnistej w czasie pozwala na stwierdzenie, iż proces ten charakteryzuje się gwałtownym przebiegiem w początkowym etapie (kroki 1 do 5) a następnie ulega znacznej stabilizacji (kroki 6 do 10). Analogiczną kolejność zmian zaobserwowano w wynikach wcześniejszych badań autorów w mieszalniku pionowym z mieszadłem ślimakowym [Królczyk 2007; Królczyk, Tukiendorf 2005; Królczyk, Tukiendorf 2006].

Tabela 1. Wariancja rozkładu traseru w kolejnych krokach mieszania dla analizowanych przekrojów mieszalnika  
 Table 1. Variance of the tracer distribution in consecutive steps of mixing for analysed sections of the agitator

Liczba przesypów	Wariancja rozkładu traseru		
	Pierścień 1	Pierścień 5	Pierścień 10
1	0,13265	0,12484	0,00355
2	0,06798	0,13160	0,02675
3	0,09474	0,14848	0,09991
4	0,07273	0,15361	0,07572
5	0,09192	0,14881	0,11604
6	0,07742	0,13160	0,10809
7	0,07657	0,12948	0,10847
8	0,07444	0,13439	0,10384
9	0,07444	0,12913	0,10886
10	0,07572	0,12735	0,10578

Źródło: opracowanie własne

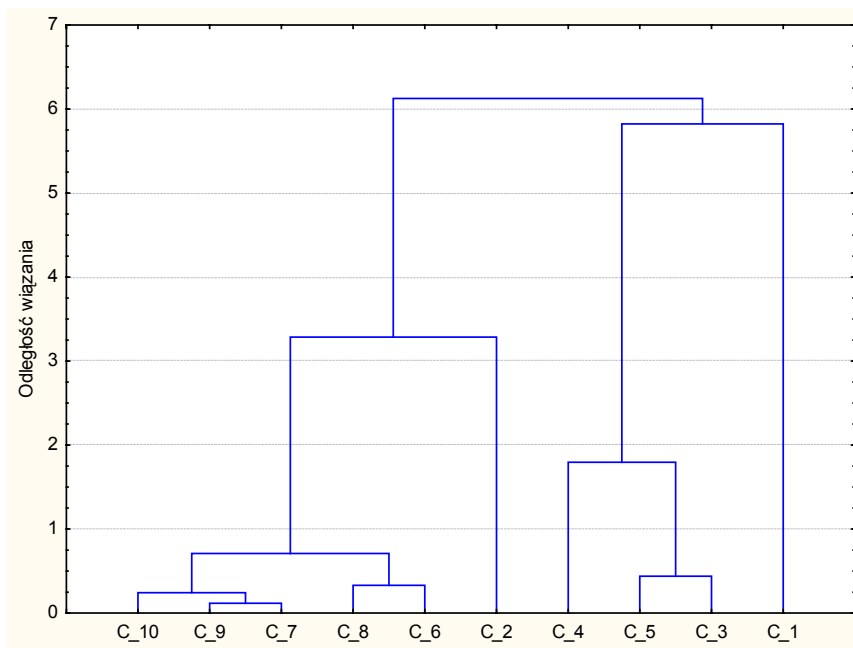


Źródło: opracowanie własne autorów

Rys. 1. Zmiana wariancji rozkładu traseru w czasie mieszania układu ziarnistego łubin-wyka w analizowanych przekrojach poprzecznych zbiornika  
 Fig. 1. The change of variance tracer distribution during the time of mixing the grain system lupine-vetch in chosen cross-section of agitator

Na dalszym etapie badań autorzy postanowili wykorzystać narzędzie statystyczne do określenia charakteru i czasu trwania poszczególnych faz mieszania przesypowego.

W pierwszym kroku analizy skupień zdefiniowano dane wyjściowe. W macierzy danych wyjściowych przypadki stanowiły kolejne kroki przesypu (od 1 do 10), natomiast w kolumnach macierzy określono wartości wariancji dla 1, 5 i 10 pierścienia. Następnie przeprowadzono standaryzację zmiennych. Do przeprowadzenia aglomeracji skupień metodą Warda wykorzystano euklidesową metrykę odległości. Uzyskane wyniki przedstawiono graficznie (rys. 2). Dokonano arbitralnego podziału procesu na dwa etapy. Taki podział tego procesu sugerują poczynione wcześniej obserwacje dotyczące określenia charakteru procesu i wyznaczenia granicy przejścia pomiędzy dwoma etapami [Królczyk 2007; Królczyk, Tukiendorf 2005]. Zatem w skład pierwszego skupienia weszły kroki mieszania 1, 3, 4, 5, natomiast w skład drugiego skupienia weszły kroki 2, 6-10. Pierwszy okres mieszania nazwano etapem zmian gwałtownych [Królczyk 2007], natomiast drugi etap nazwano etapem stabilizacji. W pierwszych czterech krokach mieszania wartości wariancji rozkładu trasera różnią się znacznie od siebie. Różnice w zmianach jakości w pierwszych krokach mieszania znalazły bezpośrednie odzwierciedlenie w wynikach analizy skupień. Dalsze mieszanie metodą przesypu po 5 kroku cechuje się stabilizacją wariancji, a więc utrzymaniem jakości na podobnym poziomie.



Źródło: opracowanie własne autorów

Rys. 2. Dendrogram przedstawiający otrzymane skupienia  
 Fig. 2. Dendrogram illustrating obtained clusters

W wyniku zastosowanej analizy skupień wyodrębniono dwie fazy mieszania przesypowego: etap gwałtownych zmian i etap stabilizacji. Moment przejścia układu z jednej fazy do drugiej zachodzi po 5 przesypie.

## Wnioski

1. Zmiana jakości mieszaniny ziarnistej w czasie mieszania metodą przesypu postępuje w dwóch fazach: fazie znacznych wahań – okres burzliwy (od 1 do 5 kroku mieszania) i fazie stabilizacji (od 6 do 10 kroku mieszania).
2. Analiza skupień stanowi odpowiednie narzędzie do wyznaczania momentu przejścia jednej fazy w drugą a przez to określenia efektywnego czasu mieszania.
3. Stabilizacja procesu dokonuje się w końcowych krokach mieszania (od kroku 6) co widać na wykresach rozkładu wariancji trasera i na dendrogramie ilustrującym otrzymane skupienia.

## Bibliografia

- Boss J.** 1987. Mieszanie materiałów ziarnistych. Państwowe Wydawnictwo Naukowe. Warszawa. ISBN 83-01-07958-7.
- Boss J.** 1992. Kinetyka mieszania materiałów ziarnistych wskazujących tendencje do segregacji – model reakcji następczych. XIV Ogólnopolska Konferencja Inżynierii Chemicznej i Procesowej „Procesy Transportu Pędu”. Kraków. s. 34-41.
- Boss J.** 1991. Czas mieszania materiałów ziarnistych. Studia i Monografie WSI. Opole. ISSN 0239-5991.
- Boss J., Węgrzyn M.** 1996. Czas mieszania materiałów sypkich w wybranych mieszalnikach. VII Ogólnopolskie Seminarium „Mieszanie”. Koszalin. s. 37-42.
- Grochowicz J.** 1996. Technologia produkcji mieszanek paszowych. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne. Warszawa. ISBN 83-09-01656-5.
- Królczyk J., Tukiendorf M.** 2005. Analiza stanów składu niejednorodnej mieszaniny ziarnistej w procesie przygotowania paszy dla gołębi w warunkach przemysłowych z wykorzystaniem metody taksonomicznej. Inżynieria Rolnicza. Nr 14(74). Kraków. s. 193-202.
- Królczyk J., Tukiendorf M.** 2006. Optymalizacja procesu sporządzania wieloskładnikowej paszy dla gołębi w pionowym mieszalniku z mieszadłem ślimakowym. Inżynieria Rolnicza. Nr 12(87). Kraków. s. 267-276.
- Królczyk J.** 2007. Proces mieszania wieloskładnikowych materiałów ziarnistych w urządzeniu z mieszadłem ślimakowym. Rozprawa doktorska. Politechnika Opolska.
- Lacey P.M.C.** 1943. The mixing of solid particles. Trans. Inst. Chem. Eng. Number 21. s. 53-59.
- Matuszek D., Tukiendorf M.** 2007a. Rozkład koncentracji składników podczas mieszania funnel-flow z systemem RSI. Inżynieria Rolnicza. Nr 6(94). s. 159-165.
- Matuszek D., Tukiendorf M.** 2007b. Komputerowa analiza obrazu w ocenie mieszania układów ziarnistych (system funnel-flow). Inżynieria Rolnicza. Numer 2(90). s. 183-188.
- Roseman B.** 1963. Mixing of solids. Ind. Chem. Number 39. s. 84-89.
- Stręk F.** 1981. Mieszanie i mieszalniki. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa. ISBN 83-204-0289-1.
- Tanaka T.** 1971. Segregation model of solid mixtures composed of different densities and particle size. Ing. Eng. Chem. Process Des. Develop. Number 3. s. 332-340.
- Tryon R. C.** 1939. Cluster Analysis. Ann Arbor, MI: Edwards Brothers.

## **EXAMINATION OF PROGRESS IN THE PROCESS OF MIXING BINARY GRANULAR PATTERN USING THE CHIMNEY POUR OUT METHOD**

**Abstract.** Authors of this paper investigated progress of the process involving mixing of heterogeneous granular components using the funnel flow system during ten successive pourings. The mixer was equipped with roof insert of the Roof Shaped Insert system. Granular mix quality was determined on the grounds of computer image analysis. The method of taxonomical object description has been used to determine changes in progress of mixing process during 10 successive steps. The examination allowed to observe that the process progress in time may be divided into two phases: rapid and stable. The research results are shown graphically. The researchers analysed possibilities as regards using concentration analysis to determine mixing process changes in time.

**Key words:** mixing of granular materials, the funnel flow system, computer image analysis, cluster analysis

**Adres do korespondencji:**

Jolanta Królczyk; e-mail: j.krolczyk@po.opole.pl  
Katedra Techniki Rolniczej i Leśnej  
Politechnika Opolska  
ul. Mikołajczyka 5  
45-271 Opole