

Dr inż. Joanna RUT  
Katedra Inżynierii i Bezpieczeństwa Pracy  
Wydział Inżynierii Produkcji i Logistyki  
Politechnika Opolska

## WPŁYW WILGOTNOŚCI MATERIAŁU ZIARNISTEGO NA PRZEBIEG PROCESU MIESZANIA®

*W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących mieszania materiałów ziarnistych, dla których pod uwagę wzięto wilgotność zawartą w złożu ziarna. Badania wykonywano z wykorzystaniem ziarna pszenicy. Ocenę jednorodności mieszanin przeprowadzono przy pomocy komputerowej analizy obrazu oraz wykorzystując stopień zmieszania według formuły Rose'a, a w celu sprawdzenia zależności stopnia zmieszania od wilgotności przeprowadzono statystyczny test istotności Kruskala-Wallis.*

**Słowa kluczowe:** mieszanie materiałów ziarnistych, komputerowa analiza obrazu, wilgotność, stopień zmieszania.

### WSTĘP

Wiele surowców, półfabrykatów i produktów końcowych z reguły występuje w postaci mieszanin ziarnistych. Używanie jednorodnych mieszanin jest istotną cechą badania materiałów ziarnistych w wielu gałęziach przemysłu. Podstawowym celem mieszania jest równomierne rozproszenie składników, które ma na celu wytworzenie jednorodnej, pod względem składu mieszaniny. Efekt mieszania materiałów ziarnistych decyduje o jakości otrzymywanych produktów. Jedną z często stosowanych metod prowadzenia tego procesu jest mieszanie materiałów w przesypie. Obecnie dzięki zastosowaniu technik komputerowych możliwy jest szybszy rozwój teorii procesu oraz jej lepsze powiązanie z praktyką. Należy zaznaczyć, że prowadzenie badań procesu mieszania materiałów ziarnistych w skali przemysłowej jest niezwykle trudne i kosztowne. Badania laboratoryjne są w stanie przybliżyć charakter procesu w warunkach przemysłowych i wyjaśnić najważniejsze własności badanego zjawiska [2, 3, 12, 17].

Mieszanie materiałów ziarnistych jest procesem złożonym, w którym składniki są rozpraszane w mieszalniku przez chaotyczny, przypadkowy ruch ziaren, w celu wytworzenia jednorodnej pod względem składu mieszaniny. Większość spotykanych w praktyce przemysłowej układów ziarnistych, to układy niejednorodne różniące się takimi cechami jak wymiar ziaren lub gęstość ziaren [3, 5]. Oprócz wymienionych cech charakteryzujących mieszany materiał, na przebieg procesu mieszania mają również wpływ inne parametry, a mianowicie parametry urządzenia mieszającego, warunki w jakich ten proces jest prowadzony jak również wilgotność mieszanego materiału [10, 14]. Wszystkie te cechy i parametry mają decydujący wpływ na zachowanie się ziaren podczas mieszania oraz na cechy jakościowe wytworzonej mieszaniny. Odpowiednio poznane właściwości parametrów materiałów ziarnistych mogą przyczynić się do lepszego i efektywnego ujednorodniania układów ziarnistych [3, 4, 7, 9]. Wilgotność jest parametrem, który istotnie wpływa na własności materiałów pochodzenia roślinnego. Dotyczy to zagadnień jakościowych i smakowych, a także technologicznych, takich jak transport czy przechowywanie [16]. Dlatego

badania uwzględniające wilgotność materiałów roślinnych są częstym celem podejmowanym przez wielu badaczy, jak Zalewski 2000, Ledwoń i in. 2001, Panasiewicz 2006, Kapićca i Ścibisz 2007, Ścibisz 2008, Rut 2011.

### CEL BADAŃ

**Celem prowadzonych badań było sprawdzenie, czy wilgotność zawarta w złożu ziarna pszenicy ma istotny wpływ na przebieg procesu mieszania metodą przesypu.**

W oparciu o uzyskane zapisy cyfrowe przekrojów poprzecznych mieszalnika przesypowego, dokonano oceny jednorodności mieszaniny wykorzystując komputerową analizę obrazu.

### METODYKA BADAŃ

Do prowadzonych badań użyto ziarno pszenicy zwyczajnej *Triticum vulgare*, różniące się wilgotnością i barwą. Składnikiem kluczowym – traserem – było ziarno wilgotne, zabarwione roztworem fuksyny, które umieszczano każdorazowo w górnej części mieszalnika zasilającego, a składnikiem pozostałym było ziarno o barwie naturalnej rys. 1 [11]. Wilgotność względna złoża ziarna mokrego pszenicy wynosiła 16,1% ( $\pm 0,5$ ), a wilgotność złoża ziarna suchego pszenicy wynosiła 11,4% ( $\pm 0,5$ ).



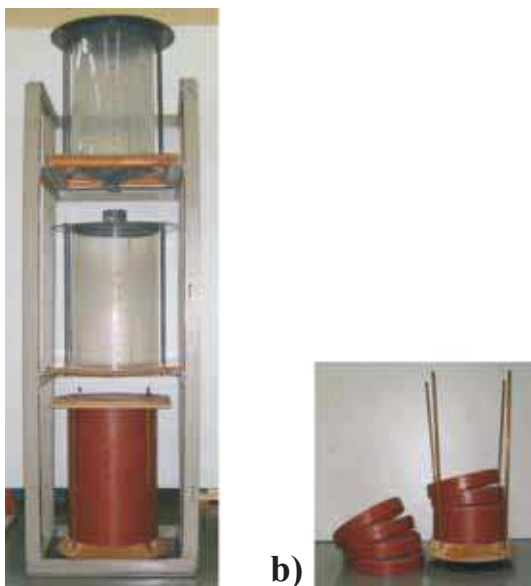
**Rys. 1.** Dwuwymiarowy schemat zasypywania mieszalnika materiałem ziarnistym – pszenica w udziale procentowym 50/50.

**Fig.1.** Two-dimensional diagram of granular backfill material mixer – wheat in the percentage 50/50.

**Źródło:** Rut J. 2011.

W warunkach przemysłowych proces nawilżania ziarna prowadzony jest najczęściej w urządzeniach, w których ziarna są mieszane z odmierzoną dawką wody. W procesie nawilżania najczęściej stosuje się minimalny poziom dowilżenia, tj. wilgotność końcową surowców ustala się maksymalnie do 18% [13]. Nawilżanie w warunkach laboratoryjnych wiązało się z oczekiwaniem na wyrównanie rozkładu wilgotności w całej próbce. W zależności od warunków prowadzonych badań, czas leżakowania wynosił od 3 do 4 dni. Czas leżakowania zapewnił ustabilizowanie średniej wilgotności mierzonej. Wilgotność powietrza pomieszczenia laboratoryjnego podczas prowadzonych badań wynosiła od 37% do 44%.

Układ ziarnisty poddawano mieszaniu w laboratoryjnym mieszalniku przesypowym rys. 2. Mieszalnik laboratoryjny składał się z trzech identycznych zbiorników umieszczonych jeden nad drugim (wysokość części cylindrycznej – 500 mm, średnica wewnętrzna – 300 mm, wysokość części stożkowej – 90 mm, średnica otworu wysypowego – 30 mm). Dodatkowo jeden ze zbiorników składał się z 10 rozbieralnych pierścieni. Przed przystąpieniem do mieszania wybranych materiałów ziarnistych zasypywano górny zbiornik mieszalnika ziarnem w kombinacji ziarno suche – wilgotne, wilgotne – wilgotne, suche – suche w udziale procentowym 50/50.



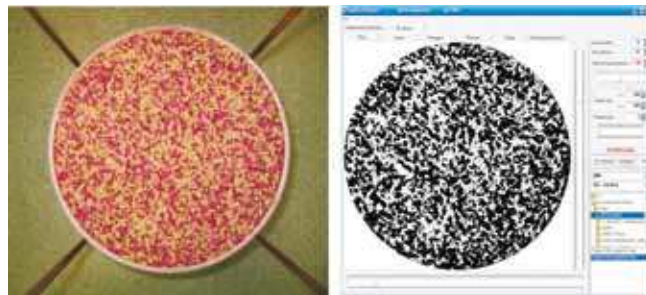
**Rys. 2.** Laboratoryjny mieszalnik przesypowy: a) konstrukcja mieszalnika, b) rozbieralna część mieszalnika (fot. J. Rut).

**Fig. 2.** Laboratory flow agitator: a) construction of the agitator, b) sectional part of the agitator (fot. J. Rut).

Po napełnieniu zasilającego górnego zbiornika mieszalnika, rozpoczynano proces mieszania w drodze kolejnych przesypów tj. kroków mieszania, opróżniając zbiorniki na drodze wysypu grawitacyjnego (zbiorniki zamieniano kolejno miejscami). W prowadzonych badaniach dla pewności uzyskanych wyników wykonano dziesięć kroków mieszania.

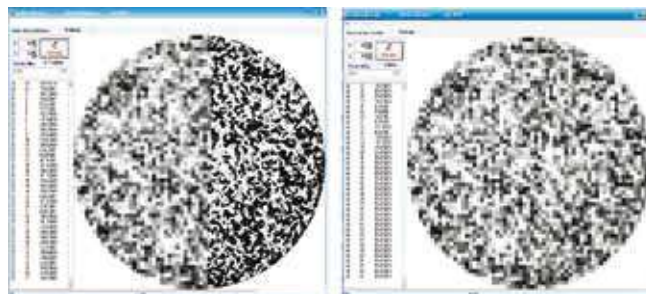
W ostatnim etapie każdego kroku mieszania materiał zasypywano do zbiornika mieszalnika o rozbieralnej konstrukcji, co umożliwiała uzyskanie obrazu z przekroju poprzecznego każdej sekcji mieszalnika rys. 3. Poszczególne przekroje

były fotografowane aparatem cyfrowym a uzyskany obraz poddano komputerowej analizie obrazu. Przy digitalizacji zamieniono kolory ziarna kukurydzy na czern i biel rys. 3, a następnie wykonywano tzw. pikselizację rys. 4 [11].



**Rys. 3.** Przykładowy obraz wybranego pierścienia mieszalnika (fot. J. Rut).

**Fig. 3.** Sample image of the selected ring of agitator (fot. J. Rut).



**Rys. 4.** Przykładowe obrazy przedstawiające proces pikselizacji ziarna pszenicy (fot. J. Rut).

**Fig. 4.** Sample images of pixelation process of wheat grain (fot. J. Rut).

Celem wyznaczenia wielkości komórek przy pikselizacji obliczono średnicę zastępczą ziarna  $d_e$ , która wynosiła  $4,69 \cdot 10^{-3}$  m, zgodnie do:

$$d_e = \sqrt[3]{\frac{6m}{\pi\gamma n}}$$

gdzie:  $m$  – masa ziarna próby [kg],  
 $\gamma$  – gęstość ziarna [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  
 $n$  – liczba ziaren w próbce.

Dla tak obliczonej średnicy zastępczej przeprowadzono proces pikselizacji dla ziaren pszenicy w układzie  $64 \times 64$  komórek.

## ANALIZA STATYSTYCZNA I DYSKUSJA WYNIKÓW

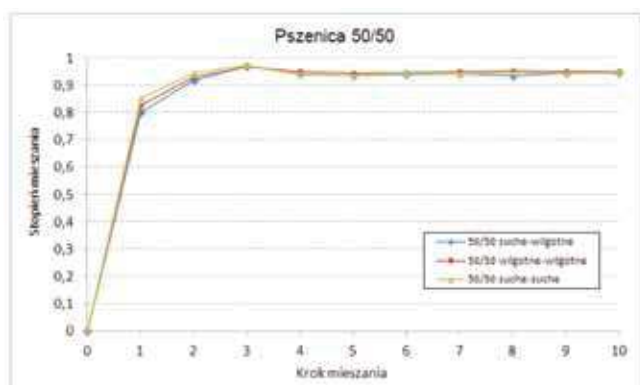
Najczęściej stosowaną statystyczną miarą oceny jakości stopnia zmieszania jest zależność przedstawiona przez Rose'a.

$$M = 1 - \frac{\sigma}{\sigma_0}$$

gdzie:  $\sigma$  – odchylenie standardowe,  
 $\sigma_0$  – początkowe odchylenie standardowe,  
 $M$  – stopień zmieszania.

Wyrażenie to ma cechy jednoznaczności, gdyż określone wartości  $M$  odpowiada jeden – w znaczeniu statystycznym –

stan mieszaniny. Wartość liczbowa  $M$  zmienia się od zera do jedności. Stan określony liczbą zero oznacza całkowitą segregację składników, a stan określony liczbą jeden układ doskonale wymieszany.



Rys. 5. Stopień mieszania ziarna pszenicy.

Fig. 5. Mixing ratio of wheat grain.

Źródło: Obliczenia własne

Na podstawie przeprowadzonych badań (rys. 5) stwierdzono, że do osiągnięcia stanu równowagowego tj. stanu, po którym dalsze mieszanie nie powoduje żadnych zmian jakościowych, wystarcza jedynie kilka przesypów. Zadowalający stopień mieszania uzyskano po 3 kroku (przesypie) mieszania. Z uwagi na okresowość procesu czas mieszania wyrażony został poprzez liczbę kolejnych przesypów, czyli tzw. kroków mieszania. Dla całkowitej wiarygodności przyjęto liczbę dziesięciu kroków jako wystarczającą i gwarantującą osiągnięcie stanu równowagowego. Układ ten uznano za mieszaninę w stanie doskonale losowym zwaną dalej stanem randomowym, w której prawdopodobieństwo znalezienia cząstki określonego składnika jest takie samo we wszystkich punktach tej mieszaniny.

W analizie statystycznej niezwykle ważne jest odpowiednie dobranie poszczególnych zmiennych objaśniających. W celu sprawdzenia zależności stopnia mieszania od wilgotności przeprowadzono statystyczny test istotności w oparciu o sumy rang. Zastosowano test Kruskala-Wallisa, z hipotezą zerową o braku wpływu wilgotności na stopień mieszania, zgodnie do metodyki opisanej w pracach takich jak Aczel 2005, Stanisław 2007, Magiera 2007. Test Kruskala-Wallisa jest nieparametrycznym odpowiednikiem jednoczynnikowej analizy wariancji. Obliczono następujące wartości:

$$H_{obl} = \frac{12}{n(n+1)} \left( \sum_{j=1}^k \frac{R_j^2}{n_j} \right) - 3(n+1)$$

$$H_{krt} = \chi_{\alpha, k-1}^2$$

gdzie:  $R$  – suma rang dla  $j$ -tej populacji,

$n$  – liczba obserwacji,

$k$  – liczba populacji

$\chi_{\alpha, k-1}^2$  – wartość krytyczna w rozkładzie chi-kwadrat o  $k-1$  stopniach swobody i przy poziomie istotności  $\alpha$ .

Statystyka testowa oznacza, że jeżeli  $H_{obl} < H_{krt}$  to brak podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej. Przy poziomie istotności  $\alpha=0,05$  uzyskano następujące wyniki obliczeń:

$$H_{obl} = 4,099$$

$$H_{krt} = 5,991$$

Wynik  $H_{obl} < H_{krt}$  wskazuje na brak podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej, zatem należy uznać ją za prawdziwą. Oznacza to, że wilgotność w badanym zakresie nie wpływa na stopień zmieszania.

Uzyskane dane statystyk opisowych dla ziarna pszenicy w udziale procentowym 50/50 przedstawiono w tabeli 1. Obejmują one średni stopień zmieszania, błąd standardowy i odchylenie standardowe.

Tabela 1. Wyniki statystyk opisowych dla ziarna pszenicy w udziale procentowym 50/50

Table 1. The results of descriptive statistics for the grain of wheat in the percentage of 50/50

Pszenica 50/50			
parametr	suche-wilgotne	wilgotne-wilgotne	suche-suche
średni stopień mieszania	0,8432	0,861	0,8523
błąd standardowy	0,0854	0,0868	0,0857
odchylenie standardowe	0,2832	0,2879	0,2842

Źródło: Opracowanie własne

Podczas prowadzonych badań mieszania metodą przesypu, jednorodnego układu ziarnistego składającego się z ziarna pszenicy, różniącego się wilgotnością (badany zakres) nie stwierdzono statystycznie istotnego wpływu wilgotności na proces mieszania.

## WNIOSKI

1. Na podstawie przeprowadzonych i przedstawionych wyników badań stwierdzono, że wilgotność zawarta w złożu ziarna pszenicy, w badanym zakresie nie wpływa na przebieg procesu mieszania metodą przesypu.
2. Analizowanie danych za pomocą metod statystycznych dostarcza narzędzi, które pozwalają zweryfikować rozpoznawalne powiązania parametrów procesu mieszania.
3. Powiązanie ze sobą metody komputerowej analizy obrazu z warsztatem technik statystycznych pozwala na szybkie i proste określanie stopnia mieszania badanych układów ziarnistych.

## LITERATURA

- [1] ACZEL A. D. 2005. Statystyka w zarządzaniu. PWN Warszawa, 731-737.
- [2] BOSS J. 1987. Mieszanie materiałów ziarnistych. PWN Warszawa, 8.

- [3] **BOSS J., TUKIENDORF M. 1997.** *Mixing of granular materials using the method of funnel-flow.* Powder Handling & Processing 9, No. 4 October/December, 341-343.
- [4] **GROCHOWICZ J. 1998.** Zaawansowane techniki wytwarzania przemysłowych mieszanek paszowych. Pagros Lublin.
- [5] **HADELER K. P., KUTTLER C. 1999.** *Dynamical models for granular matter.* Granular Matter 2, Springer Verlag, 9-18.
- [6] **LEDWOŃ K., SZWEDZIAK K. 2001.** *Możliwości obniżenia wilgotności ziarna pszenicy przy pomocy sorbentu naturalnego o podwyższonej temperaturze.* Inżynieria Rolnicza 13(33), 249-254.
- [7] **LEWICKI P., LENART A., KOWALCZYK R., PAŁACHA Z. 1999.** *Inżynieria procesowa i aparatura przemysłu spożywczego.* WNT, Warszawa, ISBN 83-204-2324-4.
- [8] **MAGIERA R. 2007.** Modele i metody statystyki matematycznej cz. II. Wnioskowanie statystyczne, GiS Wrocław, ISBN 83-89020-61-1.
- [9] **MATUSZEK D., TUKIENDORF M. 2007.** *Rozkład koncentracji składników podczas mieszania funnel-flow z systemem RSI.* Inżynieria Rolnicza, nr 6(94), Kraków, 159-165.
- [10] **MOAKHER M., SHINBROT T., MUZZIO F. J. 2000.** *Experimentally validated computations of flow, mixing and segregation of non-cohesive grains in 3D tumbling blenders.* Powder Technology 109, 58-71.
- [11] **RUT J. 2011.** Efekty suszenia materiałów ziarnistych w mieszalniku przesypowym. Rozprawa doktorska, Politechnika Opolska, Opole.
- [12] **RUT J. 2012.** *Adaptacja funkcji Bessela do opisu stanu zmieszania jednorodnej mieszaniny ziarnistej.* Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego, Nr 1, 47-49.
- [13] **RYDZAK L. 2005.** *Możliwość regulacji wilgotności końcowej ziarna pszenicy po procesie nawilżania próżniowego.* Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa nr 7, Lublin, 155-161.
- [14] **SCHLICK H., GEHBAUER F., AUCHTER A., GALLINAT J. 1996.** *Relationships Between Flow Properties and Process of Loading In Silos With Central Cones and Plough Feeder Discharge.* Bulk Solids Handling, vol. 16, no 2, 83-89.
- [15] **STANISZ A. 2007.** Przystępny kurs statystyki, modele liniowe i nieliniowe, Tom 2, StatSoft Polska Karków, ISBN 978-83-88724-30-5.
- [16] **ŚCIBISZ M. 2008.** *Rozkład wilgotności w mieszaninie materiałów organicznych.* Annales UMCS, Agricultura nr 2, Warszawa, 8-14.
- [17] **TUKIENDORF M. 2003.** *Wpływ zmiany skali urzędzenia mieszającego na wyniki procesu mieszania materiałów ziarnistych podczas wysypu ze zbiornika.* XI Ogólnopolska Konferencja: Postęp w Inżynierii Żywności, Frombork, 9-12.

## THE INFLUENCE OF HUMIDITY ON GRANULAR MATERIAL MIXING PROCESS

### SUMMARY

*In the food industry we often deal from the different kind with grain blends of the organic origin. In the article described examinations the mixing of grain material, in which the humidity was taken into consideration stayed in mass of the grain. Research were made on the wheat grain. The estimation of the quality of mixtures was carried out with the help of computer analysis of the image and using the rank of mixing according to the formula Rose'a.*

**Key words:** *the mixing of grain material, computer analysis of the image, the humidity, the rank of the mixing.*