

Marek Węgrzyn
Zakład Techniki Rolniczej i Leśnej
Politechnika Opolska

ENERGOCHŁONNOŚĆ PROCESU MIESZANIA MATERIAŁÓW SYPKICH MIESZADŁEM ŁOPATKOWYM

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań procesu mieszania układów ziarnistych dwuskładnikowych w mieszalniku z mieszadłem łopatkowym. Proces mieszania prowadzono w zbiorniku o średnicy 500 mm z użyciem mieszadeł łopatkowych prostych i nachylonych pod kątem 15°, 30° i 45° o średnicy 490 mm i wysokości łopatki wynoszącej 60 mm. Mieszanie prowadzono przy zmiennej częstości obrotowej mieszadła, wynoszącej odpowiednio 0,667, 1 i 1,33 s⁻¹. Ocenę jakości mieszaniny prowadzono za pomocą stopnia zmieszania według formuły Rose'a. Czas mieszania niezbędny do osiągnięcia najwyższego stopnia zmieszania oraz wyznaczona moc mieszania posłużyły do określenia jednostkowej energii mieszania.

Słowa kluczowe: mieszanie, mieszalnik, stopień zmieszania, materiał ziarnisty

Wykaz oznaczeń

- M – stopień zmieszania;
- M_e – równowagowy stopień zmieszania;
- M_r – stopień zmieszania w stanie randomowym;
- n – liczba próbek;
- p – prawdopodobieństwo wystąpienia fazy rozpraszanej w mieszaninie;
- S – estymator odchylenia standardowego;
- S_o – odchylenie standardowe przed zmieszaniem;
- x_i – koncentracja fazy rozpraszanej w i -tej próbce.

Wprowadzenie

Mieszanie materiałów ziarnistych ma powszechne zastosowanie w przemyśle rolno-spożywczym. Jego celem może być przygotowanie półproduktów poddawanych dalszej obróbce technologicznej lub wytworzenie gotowych wyrobów. Najczęściej mieszaniny ziarniste zawierają składniki różniące się wymiarami ziaren, gęstością, kształtem lub innymi cechami wpływającymi na ich zachowanie się podczas procesu mieszania. Właściwości materiałów ziarnistych odpowiednio wykorzystane mogą wspomagać proces mieszania lub być przeszkodą do osiągnięcia wymaganej jakości mieszaniny. Do mieszania materiałów ziarnistych bardzo często stosowane są mieszalniki z mieszadłem mechanicznym. Dobór rodzaju mieszadła oraz parametrów jego pracy ma bardzo duży wpływ na jakość uzyskiwanej mieszaniny oraz na energochłonność procesu. Wydatkowanie energii na doprowadzenie układu ziarnistego do wymaganego stopnia zmieszania ma duże znaczenie w kształtowaniu się kosztu gotowego produktu i wpływa na jego konkurencyjność w stosunku do innych wyrobów obecnych na rynku. Dlatego prowadzone są stałe prace mające na celu zmniejszenie energii niezbędnej do doprowadzenia układu ziarnistego do odpowiedniego stopnia zmieszania. Dużym obszarem wykorzystującym proces mieszania materiałów ziarnistych jest wytwarzanie pasz [Grochowicz 1998]. W produkcji paszy dla ptaków wykorzystywane są nasiona całe lub częściowo rozdrobnione. Wytwarzanie mieszanek składających się z dużej liczby składników, różniących się kształtem, wymiarami ziaren oraz gęstością wymaga dokładnej znajomości procesów zachodzących wewnątrz urządzenia mieszającego. Proces mieszania musi prowadzić do jak najlepszego rozproszenia składników mieszaniny, tak aby koncentracja poszczególnych składników mieszaniny była jednakowa, niezależnie z którego miejsca układu ziarnistego pobrana zostanie próbka. Jednak dla niejednorodnych materiałów ziarnistych, występujące zjawisko segregacji przeciwdziała dokładnemu wymieszaniu składników, powodując że skład próbek z różnych miejsc wykazuje nierzadko duże różnice.

Jakość uzyskanej mieszaniny ziarnistej może być określana w różnoraki sposób, za pomocą testów, wskaźników jakości lub stopni zmieszania. W przypadku mieszanin wieloskładnikowych jakość mieszaniny można oceniać jak dla układów dwuskładnikowych, gdy jeden ze składników wyraźnie różni się od pozostałych cechami fizycznymi będąc jednocześnie składnikiem istotnym z punktu widzenia końcowego produktu. Najczęściej do oceny stanu mieszaniny stosowany jest stopień zmieszania zaproponowany przez Rose'a [1959], który dla materiałów ziarnistych może przyjmować wartości z przedziału od 0 do M_r ,

$$M = 1 - \frac{S}{S_o} , \quad (1)$$

gdzie:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - p)^2}{n}} \quad (2)$$

a

$$S_o = \sqrt{p(1-p)} \quad (3)$$

Metodyka badań i wyniki

Badania zostały przeprowadzone w zbiorniku cylindrycznym z pionowym mieszadłem łopatkowym na stanowisku opisanym wcześniej [Węgrzyn 2002]. Zbiornik w którym odbywał się proces mieszania ma średnicę 500 mm, a całkowita objętość materiału ziarnistego wynosiła 26 500 cm³. Badano układy ziarniste dwuskładnikowe niejednorodne, będące jednocześnie surowcem do produkcji pasz sypkich dla ptaków, głównie dla gołębi. Do badań użyto trzy układy ziarniste przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1. Układy ziarniste zastosowane do badań

Table 1. Grain systems used for the study

Układ ziarnisty	Faza rozpraszająca	Faza rozpraszana	Udział masowy fazy rozpraszanej [%]
I	Sorgo	Groch	15
II	Sorgo	Kukurydza	25
III	Sorgo	Słonecznik	5

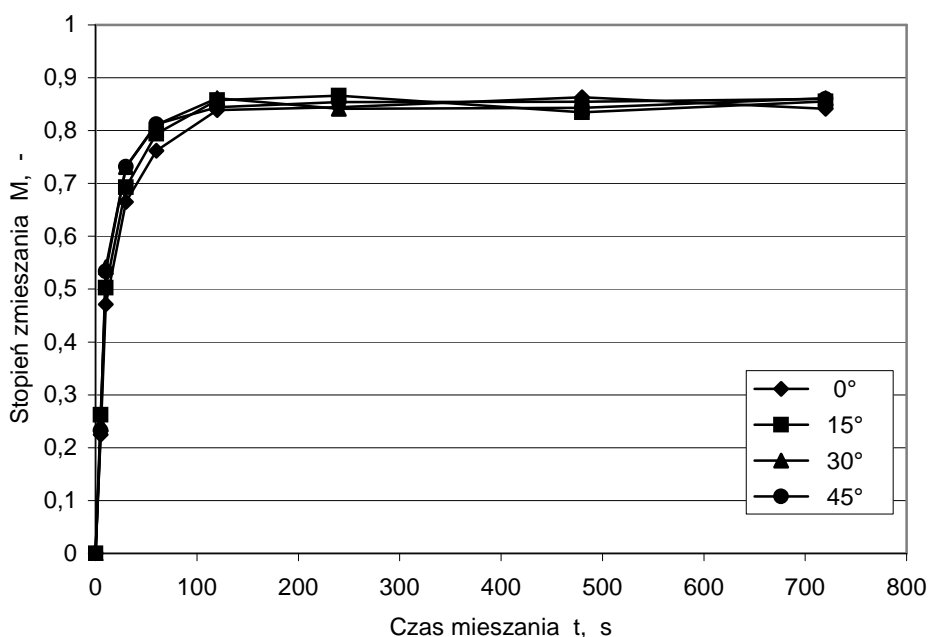
Do mieszania zastosowano mieszadła łopatkowe średnicy 490 mm i wysokości łopatki 60 mm o łopatkach prostych oraz nachylonych pod kątem 15°, 30° i 45°. Mieszadło było umieszczone tuż nad dnem, co pozwalało na wprowadzenie w ruch materiału w całej objętości. Dla rozważanych materiałów ziarnistych gęstość nasykowa wynosiła odpowiednio: sorgo 774 kg·m⁻³, groch 820 kg·m⁻³, kukurydza 712 kg·m⁻³ i słonecznik 454 kg·m⁻³ a średnia średnica ziaren: sorgo 4,05 mm, groch 6,48 mm, kukurydza 6,68 mm i słonecznik 5,37 mm.

Jako fazę rozpraszającą zastosowano ziarna sorgo ponieważ ich kształt, gęstość i wymiary są zbliżone do innych ziaren takich jak dari oraz wyka, stosowanych wraz z sorgo w produkcji paszy dla ptaków. Udziały masowe fazy rozpraszanej przyjęte w badaniach wynikają z proporcji składników w mieszankach stosowanych do karmienia gołębi. Fazą rozpraszaną w badaniach były ziarna zdecydowanie odbiegające wymiarami od ziaren fazy rozpraszającej. Przed przystąpieniem do mieszania w dolnej części zbiornika umieszczano materiał fazy rozpraszającej a na

górze nasypywano materiał fazy rozpraszanej. Tak postępowano ze wszystkimi badanymi układami ziarnistymi.

Aby ocenić jakość mieszaniny po procesie mieszania pobierano z układu ziarnistego 20 próbek (jak opisano wcześniej [Węgrzyn 2002]) reprezentujących całość materiału ziarnistego poddawanego procesowi mieszania. Ze względu na różnicę wymiarów ziaren składniki mieszaniny w poszczególnych próbkach rozdzielano na sitach i określano stopień zmieszania zgodnie z zależnością (1). Analizę składu mieszaniny prowadzono po 5, 10, 30, 60, 120, 240, 480 i 720 s, przy czym po każdym pobraniu próbek proces mieszania rozpoczynano od początku. Otrzymane wyniki pozwoliły na sporządzenie wykresów stopnia zmieszania w funkcji czasu mieszania $M = f(\tau)$.

Na rysunku 1 przedstawiono zależność stopnia zmieszania od czasu mieszania układu ziarnistego I (sorgo – groch) dla częstości obrotowej mieszadła $0,667 \text{ obr}\cdot\text{s}^{-1}$ i kąta nachylenia łopatki wynoszącego odpowiednio 0° , 15° , 30° i 45° .



Rys. 1. Stopień zmieszania układu I (sorgo-groch) przy różnych kątach nachylenia łopatki i częstości obrotowej mieszadła $0,667 \text{ obr}\cdot\text{s}^{-1}$

Fig. 1. Degree of mixing of combination I (sorghum – pea) at various angles of paddle inclination and rotary frequency of the mixer $0.667 \text{ rotations per s}^{-1}$

Podobnie badania przeprowadzono dla dwóch pozostałych częstości obrotowych mieszadła, to jest dla 1 i 1,333 obr·s⁻¹. Tak jak dla układu I wykonano badania dla układów II i III. We wszystkich analizowanych przypadkach stopień zmieszania dąży do maksymalnego stopnia zmieszania, w danych warunkach będącego jednocześnie równowagowym stopniem zmieszania.

W celu określenia czy stan równowagowy został osiągnięty, zastosowano test Bartletta. Do weryfikacji hipotezy o równości równowagowego stopnia zmieszania za pomocą testu Bartletta przyjmowano wartości stopnia zmieszania po 240, 480 i 720 s. We wszystkich rozpatrywanych przypadkach test Bartletta wykazał, że po 240 s mieszania układ ziarnisty znajduje się w stanie równowagowym. Wartość równowagowego stopnia zmieszania wyznaczano jako średnią arytmetyczną wartości stopni zmieszania po 240, 480 i 720 s. W tabeli 2 przedstawiono wartości równowagowego stopnia zmieszania dla wszystkich badanych układów ziarnistych.

Tabela 2. Wartości równowagowego stopnia zmieszania dla badanych układów ziarnistych przy różnych kątach nachylenia łopatki i badanych częstościach obrotowych mieszadła

Table 2. Values of equilibrium degree of mixing for analysed grain combinations at various inclination angles of the mixer and analysed rotary frequency of the mixer

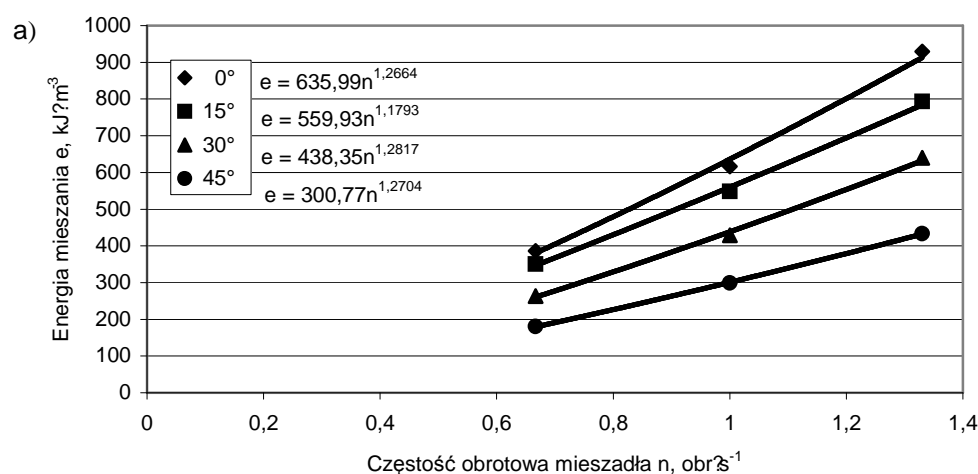
Mieszanina	Częstość obrotowa obr·s ⁻¹	Równowagowy stopień zmieszania [M _{es} -]			
		Kąt nachylenia łopatki, [°]			
		0	15	30	45
Sorgo – groch	0,667	0,845	0,852	0,849	0,856
	1	0,863	0,871	0,874	0,870
	1,33	0,882	0,875	0,899	0,884
Sorgo – kukurydza	0,667	0,839	0,846	0,853	0,850
	1	0,861	0,865	0,879	0,877
	1,33	0,874	0,884	0,882	0,889
Sorgo – słonecznik	0,667	0,882	0,876	0,894	0,887
	1	0,892	0,884	0,893	0,902
	1,33	0,889	0,906	0,897	0,894

Do określenia niezbędnego czasu mieszania zastosowano metodykę zaproponowaną przez Bossa [1992]. Metoda oszacowania niezbędnego czasu mieszania uwzględnia dopuszczalny błąd oceny oraz zakłada, że rozkład ziarnowy fazy rozpraszanej można opisać za pomocą rozkładu beta. Wyznaczone tą metodą wartości czasów mieszania dla wszystkich badanych układów ziarnistych, kątów nachylenia łopatki mieszadła i częstości obrotowych przedstawia tabela 3.

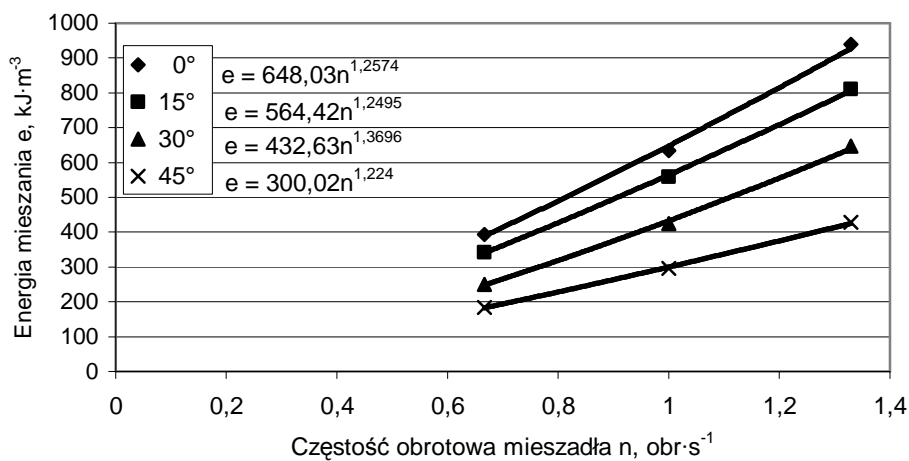
Tabela 3. Czas niezbędny do wymieszania składników badanych układów ziarnistych
 Table 3. Time necessary for mixing of components of analysed grain combinations

Mieszanka	Częstość obrotowa obr·s ⁻¹	Czas mieszania [s]			
		Kąt nachylenia łopatki [°]			
		0	15	30	45
Sorgo – groch	0,667	109	106	101	101
	1	102	98	95	96
	1,33	98	95	91	91
Sorgo – kukurydza	0,667	111	107	104	103
	1	105	100	94	95
	1,33	99	97	92	90
Sorgo – słonecznik	0,667	118	110	107	106
	1	111	104	99	99
	1,33	106	100	97	96

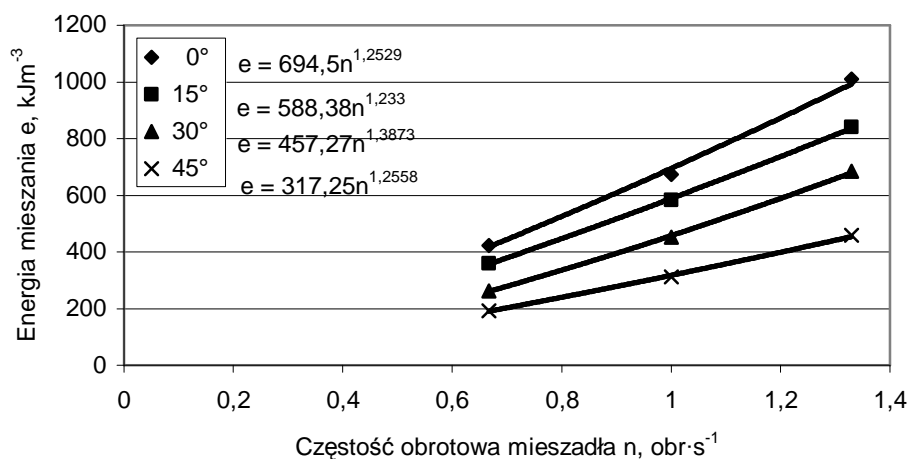
W trakcie procesu mieszania prowadzono pomiar mocy mieszania tak jak opisano wcześniej [Węgrzyn 2002]. Wyznaczone wartości mocy mieszania po uwzględnieniu odpowiadających im wartości czasów mieszania posłużyły do określenia energii mieszania odniesionej do jednostki objętości wytwarzanej mieszanki ziarnistej. Na rysunku 2 przedstawiono zależność jednostkowej energii mieszania od kąta nachylenia łopatki mieszadła przy różnych częstościach obrotowych mieszadła dla badanych układów ziarnistych.



b)



c)



Rys. 2. Energia mieszania w funkcji częstości obrotowej mieszadła przy różnych kątach nachylenia łopatk mieszadła dla układów ziarnistych: a) sorgo – groch, b) sorgo – kukurydza, c) sorgo – słonecznik

Fig. 2. Mixing energy in function of rotary frequency of the mixer at various angles of paddle inclination for grain combinations: a) sorghum- pea, b) sorghum- maize, C) sorghum – sunflower

Znajomość wartości stopnia zmieszania możliwych do osiągnięcia oraz zależności energii mieszania od geometrii mieszadła i jego częstości obrotowej pozwala na właściwy dobór parametrów pracy mieszalnika, tak aby osiągnąć dobre wymieszanie składników możliwie niskim nakładem energii. Jest to niezbędne w warunkach, gdy konkurencja wymusza obniżanie kosztów produkcji.

Wnioski

1. Uzyskane wartości stopnia zmieszania dla badanych układów o dużej niejednorodności wymiarów składników mieszaniny, pozwalają na zakwalifikowanie ich na poziomie mieszaniny „dość dobrej” oraz „dobrej” (według skali zaproponowanej przez Bossa [1987]).
2. W badanym zakresie częstości obrotowych mieszadła dla układów ziarnistych sorgo – groch oraz sorgo – kukurydza, zwiększanie częstości obrotowej mieszadła powoduje wzrost wartości równowagowego stopnia zmieszania. Dla układu sorgo – słonecznik takiej zależności nie stwierdzono.
3. Odpowiedni wybór kąta nachylenia łopatki mieszadła oraz jej częstości obrotowej daje możliwość uzyskania mieszaniny ziarnistej przy mniejszym wydatku energii.

Bibliografia

- Bossa J. 1987. Mieszanie materiałów ziarnistych. PWN Warszawa 1987.
- Bossa J. 1992. Mixing time of grain materials. 2. Experimental part. Chem. Eng. Sc. 47, 4027-4032.
- Grochowicz J. 1998. Zaawansowane techniki wytwarzania przemysłowych mieszanek paszowych. Pagros Lublin.
- Rose H. E. 1959. A suggested equation relating to the mixing of powders and its application to the study of the performance of certain types of machine. Trans. Instn Chem. Engrs 37, 47-64.
- Węgrzyn M. 2002. Czynniki wpływające na efektywność mieszania materiałów ziarnistych za pomocą mieszadła łopowego. Inż. Rol. 4 (37), 351-356.
- Węgrzyn M. 2004. Efektywność mieszania materiałów ziarnistych. Rozpr. Nauk. AR w Lublinie, z. 284, Lublin.

ENERGY CONSUMPTION OF THE PROCESS OF MIXING LOOSE MATERIALS WITH PADDLE AGITATOR

Summary

The study presents the results of an analysis of the mixing process of two-component grain systems in a mixer with a paddle agitator. Mixing was done in a container with 500mm diameter with use of paddle agitators - simple and inclined at an angle 15° , 30° and 45° with diameter 490mm and paddle height 60mm. Mixing was done at changing rotary frequency of the paddle of 0.667, 1 and 1.33 s^{-1} . Mix quality was assessed with mixing degree using Rose's formula. Mixing time necessary to obtain the highest degree of mixing and determined mixing force were used to determine the unit energy of mixing.

Key words: Mixing, mixer, degree of mixing, grain material