

MODELOWANIE PROCESU ROZDZIAŁU CZĄSTECZEK W STRUMIENIU
POWIETRZA NA PRZYKŁADZIE ROZDROBNIONYCH MIESZANIN
ZIARNISTYCH*

*Marian Panasiewicz, Jacek Mazur, Paweł Sobczak, Kazimierz Zawiaślak,
Ewa Sosińska*

Katedra Inżynierii i Maszyn Spożywczych, Wydział Inżynierii Produkcji,
Uniwersytet Przyrodniczy
ul. Doświadczalna 44, 20-236 Lublin
e-mail: marian.panasiewicz@up.lublin.pl

Streszczenie. W pracy przedstawiono analizę najważniejszych parametrów mających wpływ na przebieg i skuteczność rozdziału rozdrobnionych mieszanin łubinu żółtego odmiany Amulet. Określono teoretyczne zależności i korelacje pomiędzy poszczególnymi czynnikami procesu. Skuteczność prowadzenia procesu wydzielania frakcji bielma od łuski i pozostałych zanieczyszczeń oceniano poprzez wyznaczenie współczynnika efektywności rozdziału η . Wykazano, że wzrost wilgotności mieszaniny powoduje znaczny spadek współczynnika η . Przy wzroście wilgotności o 2% stwierdzono spadek efektywności rozdziału średnio o 8,1%. Wraz ze wzrostem prędkości strumienia powietrza zwiększa się wartość współczynnika η , ale jednocześnie powiększa się ilość frakcji wartościowej, którą porywa strumień. Stwierdzono, iż przy wzroście prędkości strumienia powietrza z $V_1 = 7,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do $V_2 = 10,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (w obrębie wilgotności $W_1 = 10,1\%$ i $W_2 = 15,7\%$), najwyższy przyrost tego parametru wynosił 16,1-38,2%. W oparciu o uzyskane wyniki badań opracowano i zweryfikowano matematyczny model procesu rozdziału rozdrobnionych mieszanin biologicznych. Może on być wykorzystywany przy planowaniu i prowadzeniu zabiegów rozdziału na frakcje wymiarowe i czyszczenia różnych mieszanin ziarnistych oraz obliczaniu parametrów ruchu cząsteczek poszczególnych komponentów mieszanin w kanałach pneumatycznych.

Słowa kluczowe: rozdział cząsteczek w strumieniu powietrza, rozdrobniony łubin, model matematyczny

*Praca naukowa finansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych przez MNiSZW jako projekt badawczy nr NN 313757140 realizowany w latach 2011-2014.

WYKAZ OZNACZEŃ

- η – efektywności rozdziału (%),
 b – ilość zanieczyszczeń (frakcji łuski) zawartych we frakcji wydzielonej w strumieniu powietrza (kg),
 b_o – ilość zanieczyszczeń w materiale wejściowym (kg),
 v – prędkość przepływu strumienia powietrza ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),
 W_i – ilość i-tej frakcji (kg),
 $w_r, (W_1, W_2, W_3, W_4)$ – wilgotność próbek (%),
 ϕ_{ii} – czystość wydzielonej i-tej frakcji (zawartość i-tego komponentu mieszaniny w i-tej frakcji (kg),
 a_i – zawartość i-tego komponentu mieszaniny w mieszaninie wyjściowej przeznaczonej do czyszczenia (kg),
 a_{ii} – czystość i-tej frakcji możliwa do wydzielenia przy pełnej stuprocentowej separacji (%),
 Q – wydajność procesu separacji ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$),
 Z_r – mieszanina kierowana do rozdziału (kg),
 Z_f – faktyczna ilość zanieczyszczeń wydzielonych przez maszynę czyszczącą (kg),
 n_k – ilość komponentów mieszaniny,
 m – ciężar frakcji mieszaniny (kg),
 q_w – obciążenie elementów roboczych maszyny czyszczącej odniesione do jednostki ich szerokości ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$),
 q_f – obciążenie elementów roboczych maszyny czyszczącej odniesione do ogólnej powierzchni ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$),
 s_i – wymiary i kształt otworów sit (m),
 V_c – początkowa prędkość cząsteczek ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),
 A – amplituda drgań elementu roboczego (m),
 n – częstotliwość drgań ramy wraz z zestawem sit (s^{-1}),
 α i β – kąt nachylenia płaszczyzny roboczej w stosunku do płaszczyzn poziomej i pionowej,
 a, b, c i h – geometryczne wymiary kanałów pneumatycznych (m),
 p_i – ilość przesianego komponentu (kg),
 c_i – ilość przesianego zlotu (kg),
 z_{pi} – ilość zlotów zanieczyszczeń w dowolnej frakcji wymiarowej (kg),
 z_{ci} – ilość przesiewów zanieczyszczeń w dowolnej frakcji wymiarowej (kg),
 E_{pi} – technologiczna efektywność wydzielenia frakcji przesiewu (%),
 E_{ci} – technologiczna efektywność wydzielenia frakcji zlotu (%),
 E_{ek} – wskaźnik oceny ekonomicznej (%),
 E_{en} – wskaźnik oceny energetycznej (%),
 E_{eks} – wskaźnik eksploatacyjny (%),
 E_{ob} – wskaźnik efektywności obsługi maszyn (%),
 E – kompleksowy wyróżnik oceny efektywności procesu separacji (%).

WSTĘP

Wzrost produkcji zbóż i dynamiczny rozwój produktów rolniczych stwarza konieczność budowy nowoczesnych i bardziej wydajnych urządzeń sortująco-czyszczących. Przeznaczenie tych maszyn do określonych operacji przygotowujących surowiec do przerobu uzależnione jest od wielu czynników obejmujących właściwości fizyczne materiału ziarnistego, stopień dokładności czyszczenia oraz wydajność linii technologicznej. Jednocześnie samym urządzeniom stawia się wymagania związane z dużą dokładnością sortowania i czyszczenia, optymalną wydajnością, możliwością regulacji w dużym zakresie parametrów pracy oraz niskim poziomem hałasu (Grochowicz 1994, Li i in. 2003, Kęska i in. 2006).

W procesie rozdziału dowolnego produktu rolniczego wykorzystuje się następczo kilka cech rozdzielczych. W przypadku niewielkich różnic w cechach rozdzielczych między materiałem podstawowym a zanieczyszczeniami nie jest obojętne, od której cechy rozpoczęty zostanie podział. Jednym ze sposobów rozdziału i czyszczenia różnych mieszanin ziarnistych jest pneumoseparacja. W przypadku rozdrobnionych nasion roślin strączkowych procesy rozdzielania są stosunkowo trudne do wykonania, gdyż mamy tutaj do czynienia z nietypowym materiałem o zróżnicowanym charakterze biologicznym (Allen i Watss 1997, Gupta i Das 1997). Materiały te cechuje znaczna różnorodność i zmienność właściwości fizyko-mechanicznych, nawet w obrębie tej samej odmiany. Stąd istotną kwestią staje się poznanie i wyodrębnienie najważniejszych czynników mających wpływ na przebieg i skuteczność procesu pneumatycznego wydzielania okrywy owocowo-nasiennej (huski) z rozdrobnionych mieszanin łubinów.

Jednym z często stosowanych sposobów sortowania, czyszczenia, jak też rozdziału różnych mieszanin ziarnistych oraz materiałów rolniczych i zielarskich jest wspomniana już separacja pneumatyczna (Grochowicz 1994, Sztaba 1993, Panasiewicz i in. 2008). Czynnikiem rozdzielającym jest w tym przypadku strumień powietrza, który poprzez zmienne wartości natężenia przepływu wykorzystywany może być do wstępnego rozdziału poszczególnych komponentów mieszaniny, czyszczenia właściwego i przesiewania lub transportu pneumatycznego.

CEL I ZAKRES BADAŃ

Zasadniczym celem badań było wyodrębnienie i określenie najważniejszych parametrów mających wpływ na przebieg i skuteczność rozdziału rozdrobnionych mieszanin łubinu żółtego odmiany Amulet oraz określenie teoretycznych zależności i korelacji pomiędzy poszczególnymi czynnikami procesu. Skuteczność prowadzenia procesu oceniano poprzez wyznaczanie współczynnika efektywności rozdzia-

łu η . W oparciu o uzyskane wyniki badań opracowano matematyczny model procesu separacji i czyszczenia rozdrobnionych mieszanin biologicznych.

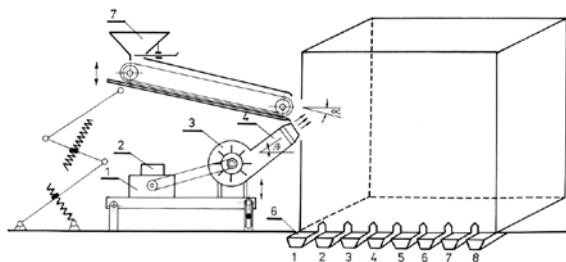
METODYKA I WARUNKI BADAŃ

Badania realizowano pod kątem możliwości oceny skuteczności prowadzenia procesu separacji rozdrobnionych mieszanin łubinu żółtego odmiany Amulet. Nasiona łubinu przed procesem separacji rozdrabniano na rozdrabniaczu stożkowym, przy trzech szczelinach roboczych $a_1 = 2,5$ mm, $a_2 = 3,0$ mm, $a_3 = 4,1$ mm. Z poszczególnych grup mieszaniny odważano $n = 20$ próbek po 100 g każda. Wilgotność próbek wynosiła $W_1 = 10,1\%$, $W_2 = 12,3\%$, $W_3 = 13,8\%$ i $W_4 = 15,7\%$. Zarówno dla całych nasion, jak i rozdrobnionej mieszaniny, określano skład granulometryczny. Z wydzielonych w strumieniu powietrza frakcji wyodrębniano ręcznie frakcje liścieni (bielma) i okrywy nasiennej (łuski) wraz z fragmentami nie oderwanych liścieni. Poszczególne frakcje ważono na wadze elektronicznej z dokładnością 0,01 g.

Na bazie uzyskanych wyników obliczano współczynnik efektywności rozdziału η równy:

$$\eta = \frac{b}{b_0} \quad (1)$$

Rozdział na poszczególne frakcje prowadzono na laboratoryjnym separatorze pneumatycznym (rys. 1), którego konstrukcja umożliwiała szeroki zakres regulacji parametrów procesu.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego: 1 – silnik, 2 – falownik, 3 – wentylator, 4 – dysza wentylatora, 5 – przenośnik podający, 6 – rynienki zbiorcze, 7 – kosz zasypowy

Fig. 1. Scheme of test stand: 1 – engine, 2 – wave-maker, 3 – ventilator, 4 – ventilator nozzle, 5 – conveyor loader, 6 – collective chutes, 7 – loading basket

Badania prowadzono przy trzech prędkościach przepływu strumienia powietrza $V_1 = 7,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $V_2 = 10,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, i $V_3 = 12,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

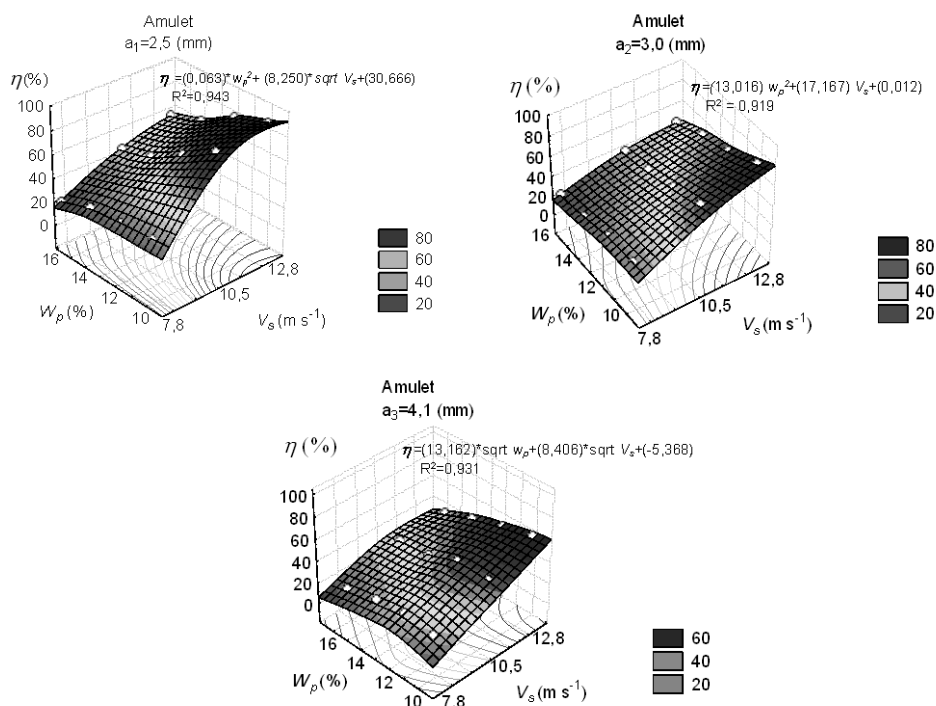
Na podstawie przeprowadzonych badań obliczone zostały wartości współczynnika η , które pozwoliły ocenić skuteczność procesu rozdziału mieszanin łubinów w zależności od ich wilgotności, stopnia rozdrobnienia nasion i prędkości strumienia powietrza w strefie roboczej separatora. Na rysunku 2 przedstawiono wartości współczynnika η dla rozdrobnionych mieszanin łubinu Amulet.

Analiza uzyskanych wartości współczynnika efektywności rozdziału η wskazuje na stosunkowo zróżnicowaną korelację, określającą zależności pomiędzy wpływem poszczególnych parametrów na skuteczność procesu rozdziału poszczególnych frakcji. Zmiana jednego z parametrów (nawet w niewielkim zakresie) prowadzi do znacznego zaburzenia i pogorszenia procesu wydzielania okrywy, utrudniając tym samym uzyskanie stabilnych warunków czyszczenia.

W wyniku separacji pneumatycznej rozdrobnionych mieszanin łubinu żółtego odmiany Amulet uzyskiwano najwyższe wartości współczynnika η . Jego wartości były zróżnicowane w zależności od wilgotności próbek, stopnia rozdrobnienia i natężenia strumienia powietrza w kanale separatora. Jego najwyższą wartość wynoszącą $\eta = 87,2\%$ uzyskano dla mieszaniny ziarnistej o wilgotności $W_1 = 10,1\%$ i szczeliny roboczej $a_1 = 2,5$ mm oraz wielkości strumienia powietrza $V_1 = 12,8$ m·s⁻¹. Wraz ze wzrostem wilgotności mieszaniny następowało zdecydowane pogorszenie skuteczności wydzielania frakcji okrywy. Przy wilgotności $W_4 = 16\%$ i szczeliny roboczej $a_3 = 4,1$ mm oraz $V_1 = 12,8$ m·s⁻¹, współczynnik η osiągnął wartość zaledwie 33,1%. Należy odnotować, iż zmiana dowolnego parametru separacji prowadziła do spadku wartości współczynnika η . Dotyczy to również wzrostu natężenia strumienia powietrza ponad granicę 12-13 m·s⁻¹. Większa jego wartość powoduje co prawda wzrost skuteczności oddzielania frakcji okrywy nasiennej od frakcji liścieni, lecz odbywało się to kosztem zwiększenia ilości frakcji wartościowej w odpadzie. Wynika stąd, iż górny zakres prędkości strumienia powietrza wynoszący $V_3 = 12,8$ m·s⁻¹ jest dla tych obiektów badawczych wartością optymalną. Analiza uzyskanych wartości współczynnika η jednoznacznie potwierdziła, iż duży wpływ na skuteczność i przebieg procesu rozdziału na frakcje ma wilgotność rozdrobnionej mieszaniny. Najwyższe wartości tego współczynnika uzyskano przy wilgotności $W_1 = 10,1\%$ i szczeliny roboczej $a_1 = 2,5$ mm. W przypadku mieszaniny łubinu Amulet najwyższa wartość współczynnika η wyniosła 87,2%. Wraz ze spadkiem wilgotności następował zauważalny spadek skuteczności procesu rozdziału niezależnie od stopnia rozdrobnienia mieszaniny i natężenia strumienia powietrza.

Analizując wyniki badań dotyczących procesu wydzielania liścieni (bielma) od pozostałych zanieczyszczeń, należy stwierdzić, że w przypadku rozdrobnionych mieszanin łubinu Amulet wzrost współczynnika efektywności rozdziału odbywał się kosztem zwiększonego udziału frakcji wartościowej (bielma) w odpadzie, co jest

zjawiskiem niekorzystnym, przynoszącym straty w procesie rozdziału mieszanin ziarnistych.



Rys. 2. Współczynniki efektywności rozdziału η dla rozdrobnionych mieszanin lubinu żółtego odmiany Amulet: frakcja $a_1 = 2,5$ mm, $a_2 = 3,0$ mm, i $a_3 = 4,1$ mm

Fig. 2. Values of segregation effectiveness coefficient η for ground lupine mixtures of Amulet variety: fraction $a_1 = 2.5$ mm, $a_2 = 3.0$ mm, and $a_3 = 4.1$ mm

Model procesu separacji i czyszczenia mieszanin ziarnistych pochodzenia biologicznego

Przed przystąpieniem do opracowywania modelu separacji i czyszczenia różnych mieszanin ziarnistych należy w pierwszej kolejności określić jak najwięcej danych wejściowych o mieszaninie ziarnistej (obiekcie obróbki), a następnie ustalić wymagane (oczekiwane) parametry uzyskane po procesie (dane wyjściowe). Ważnym elementem na tym etapie jest również podjęcie próby wyznaczenia wzajemnych powiązań i korelacji zachodzących pomiędzy danymi wejściowymi i wyjściowymi, co należy traktować jako podstawę dalszego modelowania. Za-

sadniczy technologiczny cel procesu separacji może być określany w bardzo różny sposób, stąd też jego końcowa ocena może być analizowana pod kątem zróżnicowanych wskaźników efektywności i jakości. Stanowią one najczęściej wyjściowe dane w postaci wartości liczbowych, przyjętych w teorii separacji najczęściej jako wydajność procesu oraz ilość maksymalnie wydzielonych zanieczyszczeń. Często w procesach czyszczenia i separacji mieszanin sypkich wymagane jest jednoczesne wyznaczenie kilku technologicznych parametrów, charakteryzujących końcowy efekt prowadzonego zabiegu. Przykładem może być tutaj ocena procesu przemiału ziarna pod kątem wydajności, precyzji rozdziału mieszaniny przemiału na poszczególne frakcje przemiałowe, przy jednoczesnym pomiarze i analizie energochłonności procesów zarówno przemiału jak i separacji (przesiewu). Technologiczne efekty procesu separacji i czyszczenia mogą stanowić bazę danych do oceny pracy samych urządzeń czyszcząco-separujących. Stąd też w celu oceny technologicznego efektu procesu rozdziału mieszanin ziarnistych pochodzenia biologicznego przyjmowane są różne kryteria, związane z jednej strony z przebiegiem i skutecznością samego procesu rozdziału, z drugiej zaś charakterystyką techniczną maszyny (lub maszyn) realizujących ten proces. I tak wydajność procesu separacji Q określana jest jako rzeczywista suma zanieczyszczeń znajdujących się w mieszaninie kierowanej do rozdziału Z_r , do faktycznej ilości Z_f tych zanieczyszczeń wydzielonych przez elementy robocze maszyny czyszczącej. Ogólny technologiczny efekt separacji mieszaniny ziarnistej o liczbie n – komponentów w celu wydzielenia m różnych frakcji może być określona następującym wzorem:

$$E_t = \sum_{i=1}^n W_i \frac{\varphi_{i i} - a_i}{a_{i i} - a_i} \quad (2)$$

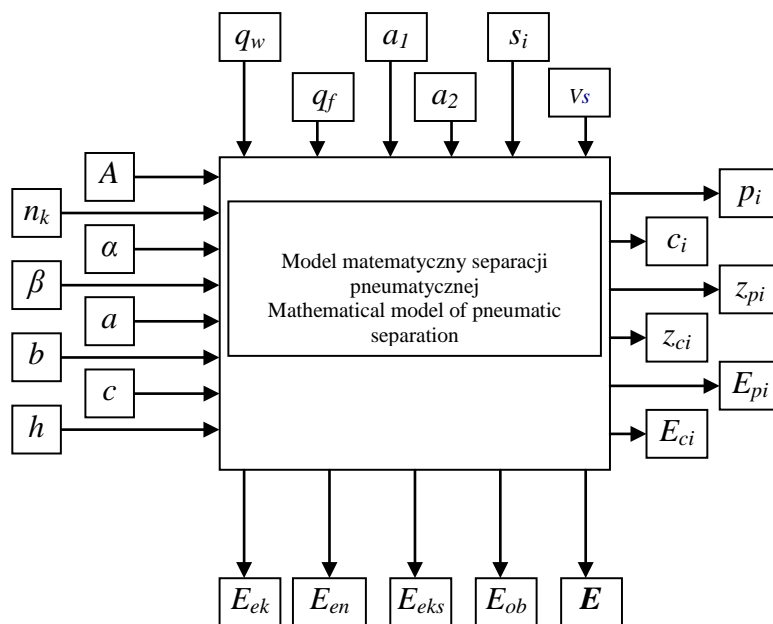
Wyrażenie (2) obrazuje stosunek faktycznego przyrostu koncentracji i -tego komponentu mieszaniny do końcowego, najbardziej efektywnego rozdziału.

Jak już wspomniano, procesy separacji różnych mieszanin ziarnistych pochodzenia biologicznego określane są dużą liczbą różnych parametrów, charakteryzujących między innymi:

- zastosowane schematy technologiczne procesu czyszczenia,
- zasady i warunki działania elementów roboczych maszyn czyszczących,
- wymiary geometryczne i pozostałe cechy fizyczne poszczególnych komponentów rozdzielanej mieszaniny,
- zawartość różnych zanieczyszczeń w mieszaninie kierowanej do rozdziału.

Parametryczny schemat procesu separacji obejmujący w sposób szczegółowy najważniejsze parametry wejściowe i wyjściowe procesu oraz wybrane czynniki ułatwiające bądź zakłócające przebieg i skuteczność jego prowadzenia przedstawia rysunek 3.

Wyjściowe parametry procesu należy traktować jako końcowy efekt jego skuteczności.



Rys. 3. Model parametryczny procesu separacji i czyszczenia mieszanin ziarnistych – biologicznych
Fig. 3. General parametric schematic of the process of separation and cleaning of grain mixtures

Ponadto na przebieg i skuteczność procesu separacji wpływają również parametry określające otoczenie i warunki jego prowadzenia, które ze względu na specyfikę prowadzenia procesów separacji różnych materiałów nie zostały w powyższym modelu uwzględnione. Matematyczny model procesu separacji powinien w jak największym zakresie spełniać założone cele, stąd też bardzo ważnym jest już we wstępnym etapie jego tworzenia sformułowanie i ustalenie wszystkich parametrów i czynników, które będą w mniejszym lub większym stopniu wpływać na końcowy efekt procesu. Takim przykładowym zadaniem może być ustalenie procedur i przewidywanych korelacji oraz zmian wybranych parametrów procesu separacji w odniesieniu do czasu jego trwania (aspekt statyczny), bądź też zależności zachodzących podczas przejścia z jednego ustalonego wcześniej reżimu w drugi stan (aspekt charakterystyk dynamicznych). Stąd też wszystkie założenia wstępne i zaplanowane zadania główne modelu, obejmujące również aspekty optymalizacyjne, powinny być formułowane w odniesieniu do obowiązujących praw kinetyki, statystyki i dynamiki.

WNIOSKI

1. Wzrost wilgotności mieszaniny rozdrobnionych łubinów powoduje znaczny spadek współczynnika η . Przy wzroście wilgotności o 2% obserwowano spadek efektywności rozdziału średnio dla łubinu żółtego Amulet o 8,1%.

2. Zmniejszenie szczeliny roboczej rozdrabniacza z $a_3 = 4,1$ mm na $a_1 = 2,5$ mm pozwala zwiększyć skuteczność wydzielania frakcji liścieni od frakcji okrywy nasiennej od 2,1%-7,7% przy wilgotności $W_1 = 10,1\%$, i od 5,5%-11,6% przy wilgotności $W_4 = 15,7\%$.

3. W miarę wzrostu prędkości strumienia powietrza wzrasta współczynnik η , ale wraz z tym powiększa się ilość frakcji wartościowej, którą porywa strumień. Przy wzroście prędkości strumienia powietrza z $V_1 = 7,8$ m·s⁻¹ do $V_2 = 10,5$ m·s⁻¹ (w obrębie wilgotności $W_1 = 10,1\%$ i $W_4 = 15,7\%$), jego najwyższy przyrost wyniósł 16,1-38,2%.

4. Na bazie wyników badań i spostrzeżeń opracowano i zweryfikowano parametryczny model procesu separacji i czyszczenia rozdrobnionych cząstek łubinu. Może on być wykorzystywany przy planowaniu i prowadzeniu separacji pneumatycznej oraz obliczaniu parametrów ruchu cząsteczek poszczególnych komponentów mieszanin ziarnistych w kanałach pneumatycznych.

PIŚMIENNICTWO

- Allen C.A.W., Watss K.C., 1997. Properties of cowpeas (var. Minica Seans). *Journal of Agricultural Engineering Research*, (68), 159-167.
- Grochowicz J., 1994. *Maszyny do czyszczenia i sortowania nasion*. Wydawnictwo Akademii Rolniczej, Lublin.
- Gupta R.K., Das S.K., 1997. Physical properties of sunflower seeds. *Journal of Agricultural Engineering Research*, (66), 1-8.
- Kęska W., Feder S., Włodarczyk K., 2006. Modelowanie procesu przesiewania ziarna przez sito ze wspomaganiami pneumatycznym. *Materiały X Międzynarodowego Sympozjum im. Prof. Cz. Kanafojskiego nt: Problemy budowy oraz eksploatacji maszyn i urządzeń rolniczych*, 101-102.
- Li J., Webb C., Pandiella S.S., Campbell G.M., 2003. Discrete particle motion on sieves – a numerical study using the DEM simulation. *Powder Technology* (133), 190-203.
- Panasiewicz M., Zawiślak K., Kusińska E., Sobczak P., 2008. Purification and separation of loose materials in pneumatic system with vertical air stream. *TEKA Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa – OL PAN*, 2008 (8), 171-176.
- Sztaba K., 1993. *Przesiewanie*. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice.

MODELING OF PARTICLES SEPARATION PROCESS
IN THE AIR STREAM ON EXAMPLE
OF PARTICULATE MIXTURES OF GRAIN

*Marian Panasiewicz, Jacek Mazur, Paweł Sobczak, Kazimierz Zawiślak,
Ewa Sosińska*

Faculty of Engineering and Food Processing Machinery, Department of Production Engineering,
University of Life Sciences
ul. Doświadczalna 44, 20-236 Lublin
e-mail: marian.panasiewicz@up.lublin.pl

Abstract. The paper presents an analysis of the most important parameters affecting the progress and effectiveness of separation of ground yellow lupine mixtures, variety Amulet. The theoretical relationships and correlations between various factors of the process were determined. The effectiveness of pneumatic separation process was evaluated by determining the coefficient of separation η . It was shown that an increase of moisture content of the mixture causes a significant decrease in the coefficient η . Increase of moisture content by 2% caused a decrease of the separation efficiency by an average of 8.1%. An increase of the air flow velocity increases the value of η , but also increases the amount of valuable fractions which escape with the air flow. It was found that with increasing air velocity of $V_1 = 7.8 \text{ m s}^{-1}$ to $V_2 = 10.5 \text{ m s}^{-1}$ (within the moisture content of $W_1 = 10.1\%$, and $W_4 = 15.7\%$), the highest increase in this parameter was 16.1-38.2%. Based on the obtained results, a mathematical model of the separation of mixtures of biological ground materials was developed and verified. It can be used in planning and carrying out pneumatic separation and calculating the parameters of the particles of individual components of granular mixtures in air ducts.

Keywords: separation of particles in the air stream, crumbled lupine seeds, mathematical model