

WPLYW PARAMETRÓW TECHNOLOGICZNYCH  
PROCESU GRANULOWANIA BEZCIŚNIENIOWEGO  
NA KSZTAŁT GRANULATU Z ODPADÓW POKRZYWY\*

*Sławomir Obidziński<sup>1</sup>, Krzysztof Miastkowski<sup>2</sup>, Paulina Berestiuk<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Zakład Inżynierii Rolno-Spożywczej i Leśnej, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

<sup>2</sup>Zamiejscowy Wydział Leśny; Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok  
e-mail: s.obidzinski@pb.edu.pl

**Streszczenie.** Jednym z roślinnych odpadów poprodukcyjnych, generowanych przez zakłady Herbapol w Białymstoku, są drobnopokrzywiste odpady pokrzywy powstające podczas ich segregowania i pakowania. W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu parametrów technologicznych procesu granulowania bezciśnieniowego na kształt granulatu z odpadów pokrzywy. Proces granulowania przeprowadzono z wykorzystaniem nowatorskiego układu mieszająco-granulująco-dozującego stosowanego jako układ podający materiał roślinny do układu zagęszczającego urządzenia granulująco-brykietującego z matrycą płaską. Budowa układu pozwala na jednoczesną realizację zarówno operacji mieszania, jak i bezciśnieniowego granulowania pylistych frakcji przetwarzanego materiału. W badaniach określono wpływ prędkości obrotowej cylindra wewnętrznego układu mieszająco-granulująco-dozującego (25, 40, 55 obr·min<sup>-1</sup>), wpływ ilości lepiszcza dodawanego do odpadów pokrzywy (10, 20, 30%) oraz wpływu zawartości skrobi w wodnym roztworze lepiszcza (0, 10, 20%) na kształt uzyskanego granulatu (wartość współczynników kształtu cząstek). Badania przeprowadzono przy masowym natężeniu przepływu zagęszczanego surowca 8 kg·h<sup>-1</sup>. Uzyskane wyniki badań pozwoliły stwierdzić, że zwiększenie prędkości obrotowej cylindra granulacyjnego wpływa na zwiększenie jednorodności granulatu określonego za pomocą współczynnika kształtu. Wraz ze wzrostem ilości lepiszcza dodawanego w procesie granulacji zmniejsza się zróżnicowanie współczynnika kształtu cząstek. Natomiast zwiększenie zawartości skrobi w lepiszczu nie wpływa znacząco na rozkład granulometryczny pod względem współczynnika kształtu. Różnice w udziałach ilościowych wynoszą jedynie 2 do 5%.

**Słowa kluczowe:** bezciśnieniowe granulowanie, odpady pokrzywy, kształt granulatu

---

\*Badania zostały zrealizowane w ramach pracy nr S/WBiŚ/2/2015 i sfinansowane ze środków na naukę MNiSW.

## WPROWADZENIE

Jak podaje Kobus i współpracownicy (Kobus i in. 2014), podczas zbioru, w procesach suszenia, transportu i magazynowania część ziół ulega rozdrobieniu na frakcje małych cząstek o niewielkich wymiarach. Wszystkie te frakcje traktowane są przez przemysł jako odpady. Tymczasem mogą one zawierać jeszcze znaczne ilości olejków eterycznych, być cennym źródłem wielu substancji biologicznie czynnych i zapachowych (Kowalski i Wawrzykowski 2009a, Raal i in. 2012).

Jednym z odpadów poprodukcyjnych powstających w zakładach zielarskich są odpady pokrzywy. W przypadku zakładów Herbapol Białystok S.A. ilość odpadów wszystkich przetwarzanych ziół wynosi ok. 30 ton w skali roku. Odpady zielarskie, w tym odpady pokrzywy, są zazwyczaj przez zakład sprzedawane za niewielkie kwoty lub oddawane za cenę transportu (Obidziński 2010).

Najczęstszym sposobem zagospodarowania odpadów ziołowych jest ich zastosowanie jako dodatku do pasz (Hanczakowska 2004, 2007).

Ze względu na bardzo małe wielkości cząstek tych odpadów i niewielką gęstość usypową, nie przekraczającą  $300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , ich utylizacja jest utrudniona. Trudności te są szczególnie widoczne przy zastosowaniu takich odpadów jako surowca do aglomeracji ciśnieniowej (ze względu na wysoką energochłonności procesu zagęszczania tak małych cząstek, a także ze względu na problemy związane z obklejaniem przez frakcję pylistą elementów układu roboczego w trakcie procesu zagęszczania). Dlatego też takie materiały z reguły są poddawane aglomeracji bezciśnieniowej (Sobczak 2004, Obraniak i Gluba 2011), na przebieg której i na jakość otrzymanego granulatu w istotnym stopniu wpływa wielkość cząstek granulowanego materiału (Korpala 2005, Heim in. 2005, Leszczuk 2015).

Do określania składu granulometrycznego materiałów polidispersyjnych stosuje się głównie metody analiz sitowych (Aider i in. 2007, Chlebowski i Nowakowski 2008, Malczewski 1990). Metoda ta jest żmudna, pracochłonna oraz uzależniona od parametrów przesiewacza: właściwości kinematycznych, wielkości powierzchni i otworu sit, współczynnika przesiewu sit oraz od właściwości materiału przesiewanego: sypkości, kohezji, gęstości nasypowej, wilgotności, lepkości. Bardziej wydajnymi metodami analiz granulometrycznych są metody oparte na zjawisku dyfrakcji Fraunhofera, pomiaru w równoległej wiązce promieniowania i w ognisku układu optycznego (Knollenberg i Veal 2007, Larre-Larrouy i Feller 2001, Kamiński 2007). Wszystkie powyższe metody mają zastosowanie jedynie do pomiarów wymiaru charakterystycznego cząstek. Pomiar morfologii cząstki jest możliwy przy wykorzystaniu metod stereologicznych i komputerowej analizy obrazu (Ryś 1995). Metody te pozwalają na pomiar różnych wymiarów geometrycznych cząstki na podstawie płaskich obrazów zarejestrowanych próbek materiały polidispersyjnych (Bakier i Miastkowski 2010,

Hann i Strazisar 2007). Skład granulometryczny zwykle jest przedstawiany w postaci histogramu rozkładu wielkości cząstek względem wymiaru charakterystycznej cząstki. Na jego podstawie określa się parametry statystyczne rozkładu oraz dopasowuje funkcję gęstości (Kukielka 2000).

Celem badań było określenie wpływu parametrów technologicznych procesu granulowania beciśnieniowego na parametry morfometryczne granulatu uzyskanego z odpadów pokrzywy. Proces granulacji przeprowadzono z zastosowaniem jako lepiszcza roztworu wodnego skrobi. Zmiennymi niezależnymi w badaniach były: prędkość obrotowa granulatora, ilość lepiszcza, udział masowy skrobi w lepiszczu. Zmienną zależną w badaniach stanowiła wartość współczynników kształtu uzyskanego granulatu.

#### MATERIAŁ I METODYKA BADAWCZA

Jako materiał badawczy wykorzystany w trakcie badań przyjęto drobnoziarniste odpady z pokrzywy pochodzące z zakładów Herbapol w Białymstoku, będące pozostałościami przy obróbce tych roślin przy uszlachetnianiu i ostatecznym sortowaniu przed poddaniem ich procesowi suszenia oraz podczas sortowania i pakowania wysuszonych ziół.

Badania procesu granulowania beciśnieniowego wykonano z wykorzystaniem układu mieszająco-granulująco-dozującego będącego elementem urządzenia granulująco-brykietującego (rys. 1) opisanego w pracach (Hejft i Obidziński 2012, Hejft i Obidziński 2013, Hejft i Obidziński 2015).

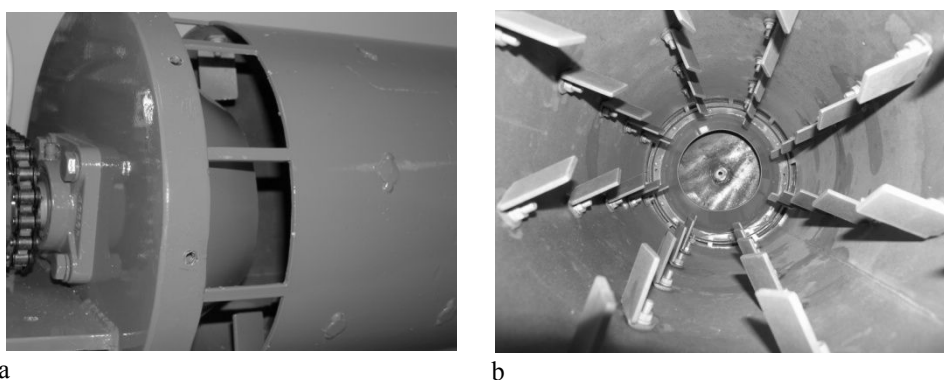
Budowa układu pozwala na jednoczesną realizację zarówno operacji mieszania, jak i beciśnieniowego granulowania pylistych frakcji przetwarzanego materiału (Hejft i Obidziński 2012).

Układ mieszająco-granulująco-dozujący przedstawiony na rysunku 1 ma obrotowy cylinder, posiadający w przedniej części otwory doprowadzające materiał do jego wnętrza (rys. 1a). Po wewnętrznej stronie ruchomego cylindra wewnętrznego znajdują się wymienne płytki (rys. 1b), mocowane śrubami do cylindra, (ustawione w linii śrubowej na jego długości) z możliwością regulacji kąta ich ustawienia. Napęd cylindra wewnętrznego stanowi silnik elektryczny napędzający drążony wał połączony z tarczą, do której zamocowany jest cylinder.

Wykonanie wału napędzającego, jako wału drążonego, pozwala na doprowadzenie do cylindra wewnętrznego, poprzez otwór w wale, cieczy mogącej służyć jako lepiszcze lub innego dodatku ciekłego lub też pary wodnej (w zależności od zapotrzebowania).

Obrotowy cylinder wewnętrzny osłonięty jest nieruchomym cylindrem zewnętrznym (rys. 1b). Cząstki materiału wprowadzane do obrotowego wewnętrznego cylindra (poprzez otwory wsypowe i stożkowe kierownice (rys. 1a) zamocowane do tarczy

napędzającej cylinder) przesypują się po powierzchni obrotowego cylindra wewnętrznego między zamocowanymi łopatkami (rys. 1b) i przesuwają ku wysypowi, dzięki śrubowemu ustawieniu łopatek wewnątrz cylindra. Doprowadzenie do cylindra wewnętrznego, poprzez otwór w wale, lepiszcza powoduje częściowe zgranulowanie (bezcisnieniowo) cząstek frakcji pylistej zawartej w materiale w trakcie przesypywania między łopatkami. Konstrukcja układu pozwala na regulację kąta pochylenia urządzenia w stosunku do układu roboczego granulatora poprzez zmianę położenia ramienia mocującego układ mieszająco-granulująco-dozujący.



**Rys. 1.** Widok zespołów układu mieszająco-granulująco-dozującego (fotografie własne): a) od strony zasypu, b) od wewnątrz

**Fig. 1.** View of the assemblies of the mixing-granulation-dosing system (own photos): a) from the feed side, b) internal

W trakcie badań określono wpływ prędkości obrotowej cylindra wewnętrznego układu mieszająco-granulująco-dozującego, wpływ ilości lepiszcza dodawanego do odpadów pokrzywy oraz wpływ zawartości skrobi w wodnym roztworze lepiszcza.

Określenie wpływu prędkości obrotowej cylindra wewnętrznego układu mieszająco-granulująco-dozującego (25, 40, 55 obr·min<sup>-1</sup>) wykonano przy 20% udziale lepiszcza w odniesieniu do ilości aglomerowanego materiału oraz przy zawartość skrobi w wodnym roztworze lepiszcza 10%.

Określenie wpływu ilości lepiszcza (10, 20, 30%) dodawanego do odpadów pokrzywy wykonano przy prędkości obrotowej cylindra wewnętrznego układu mieszająco-granulująco-dozującego 40 obr·min<sup>-1</sup> oraz przy zawartość skrobi w wodnym roztworze lepiszcza 10%.

Określenie wpływu zawartość skrobi w wodnym roztworze lepiszcza (0, 10, 20%) wykonano przy prędkości obrotowej cylindra wewnętrznego układu mieszająco-granulująco-dozującego 40 obr·min<sup>-1</sup> oraz przy 20% ilości lepiszcza dodawanego do odpadów pokrzywy. Wszystkie badania wykonano przy masowym natężeniu przepływu zagęszczanego surowca przez układ roboczy wynoszącym 8 kg·h<sup>-1</sup>.

Podczas procesu aglomeracji lepiszcze doprowadzano do wnętrza cylindra za pomocą dyszy opryskiwacza. Po procesie aglomeracji otrzymany produkt został umieszczony w oddzielnym naczyniu i poddany suszeniu w temperaturze ok. 23°C, przez 48 godzin, po czym dokonano analizy sitowej każdej z próbek w celu określenia udziału masowego i rozkładu granulometrycznego frakcji zgranulowanej. Za frakcję zgranulowaną przyjęto cząstki o wielkości powyżej 0,5 mm.

Oznaczanie składu granulometrycznego drobnoziarnistych odpadów pokrzywy oraz rozdziału frakcji zgranulowanej od niezgranulowanej wykonano za pomocą wytrząsarki LPz-2e firmy Multiserw Morek, zgodnie z normą PN-EN 932-1. W trakcie oznaczenia odważoną wcześniej 50 g próbkę odpadów pokrzywy wysypano na górne sito zestawu do analizy sitowej. Zastosowano zestaw 5 sit o następujących wymiarach boku oczka kwadratowego: 0,5; 0,25; 0,125; 0,063; 0,040 mm. Czas pracy wytrząsarki trwał 5 minut, przy założonej amplitudzie drgań wynoszącej 80% zakresu roboczego amplitudy urządzenia. Po zakończeniu procesu przesiewania każdą z frakcji zważono, a otrzymany wynik ważenia stanowił procentową zawartość danej frakcji.

Do rozdziału zgranulowanych i wysuszonej frakcji zastosowano zestaw 6 sit o następujących wymiarach boku oczka kwadratowego: 0,5, 1,0, 2,0, 4,0, 6,0 i 8,0 mm. Rozdział poszczególnych frakcji zgranulowanej dokonano poprzez jej przesianie w czasie 30 sekund. Wyniki otrzymanych pomiarów opracowano w programie Microsoft Excel.

Skład granulometryczny badanego materiału określono przy wykorzystaniu komputerowej analizy obrazu. Polega ona na rejestracji obrazu analizowanych cząstek przy znanym powiększeniu lub skali, a następnie dalszej obróbce przy wykorzystaniu oprogramowania do analizy obrazu pozwalającego na pomiary morfometryczne. Do rejestracji obrazu zastosowano aparat fotograficzny Samsung S360. Obrazy rejestrowano przy stałym powiększeniu na kontrastowym tle wraz ze skalą pomiarową, na podstawie której można było następnie dokonać skalowania obrazu w programie AnalySIS 5.0. Oprogramowanie to pozwoliło na automatyczny pomiar parametrów geometrycznych zarejestrowanych cząstek, do których należały: pole powierzchni i obwód (SIS 2013). Na podstawie zmierzonych parametrów geometrycznych cząstek obliczono wartość bezwymiarowego współczynnika kształtu zdefiniowanego jako (Tadeusiewicz i Korohoda 1992):

$$R_s = \frac{L^2}{4\pi \cdot S} \quad (1)$$

gdzie:  $L$  – obwód obiektu – wyznaczony jako długość linii brzegowej cząstki w rzucie płaskim (mm),  $S$  – pole powierzchni obiektu wyznaczone poprzez pomiar bezpośredni pola powierzchni rzutu płaskiego cząstki (mm<sup>2</sup>).

Pomiary przeprowadzono przy wykorzystaniu pięciu losowo wybranych obrazów. W celu oceny statystycznej wpływu parametrów wejściowych procesu granulowania na właściwości morfometryczne uzyskiwanych cząstek przeprowadzono analizy statystyczne przy wykorzystaniu oprogramowania Statistica 10. Do oceny istotności różnic pomiędzy analizowanymi próbkami zastosowano test nieparametryczny Kruskala-Wallisa przy przyjętym poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ . Zastosowanie testów nieparametrycznych wynikało z tego, iż dane ilościowe uzyskane za pomocą komputerowej analizy obrazu nie były zgodne z rozkładem normalnym oraz zarejestrowano obserwacje odstające. Charakterystykę granulometryczną analizowanych próbek przedstawiono w postaci histogramu udziału ilościowego cząstek granulatu względem bezwymiarowego współczynnika kształtu.

### WYNIKI BADAŃ

W tabeli 1 przedstawiono wyniki analiz statystycznych uzyskanego granulatu względem bezwymiarowego współczynnika kształtu.

**Tabela 1.** Wyniki analizy statystycznej uzyskanych wyników badań dla bezwymiarowego współczynnika kształtu otrzymanego granulatu z odpadów pokrzywy

**Table 1.** The results of the statistical analysis of the results obtained for the dimensionless shape coefficients of the granules obtained from nettle waste

Zmienna Variable	Wartość Value	N Obserwacji Observation	Bezwymiarowy współczynnik kształtu Dimensionless shape factor				Współczynnik zmienności Coefficient of variation	Wariancja Variance	Odch. std Standard deviation
			Średnia Average	Mediana Median	Min. Min.	Maksim. Max.			
Prędkość obrotowa (obr·min <sup>-1</sup> ) Rotational speed (rpm)	25	271	1,946	1,866	1,265	4,090	0,225	0,192	0,438
	40	271	1,823	1,727	1,184	4,146	0,230	0,177	0,420
Udział lepiszcza of the binder (%)	10	266	1,587	1,544	1,207	2,471	0,140	0,049	0,222
Udział skrobi w lepiszczu Starch content in the binder (%)	20	268	1,533	1,507	1,17	2,225	0,130	0,04	0,2
	30	268	1,39	1,367	1,134	1,903	0,106	0,022	0,147
	0%	312	1,544	1,508	1,165	2,147	0,137	0,044	0,211
	10%	311	1,602	1,545	1,215	3,281	0,174	0,078	0,279
	20%	312	1,604	1,547	1,157	3,314	0,195	0,098	0,313

Próbki granulatów uzyskanych przy prędkościach obrotowych cylindra granulatora 25 i 40 obr·min<sup>-1</sup> wykazują różnice w wartości średniej na poziomie ok. 6%, zaś różnica pomiędzy próbkami uzyskanymi przy prędkości obrotowej cylindra 25

i  $55 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$  wynosi ponad 24%. Również zakres zmienności jest wyższy w przypadku granulatu otrzymanego przy prędkości obrotowej cylindra 25 i  $40 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$ , wynosi odpowiednio 2,83 i 2,96, zaś przypadku granulatu otrzymanego przy prędkości obrotowej  $55 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$  wynosi 1,38. Prędkość obrotowa granulatora  $55 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$  sprawia, iż otrzymany granulak charakteryzuje się niższą wartością bezwymiarowego współczynnika kształtu oraz mniejszym zróżnicowaniem pod względem kształtu.

Na podstawie przeprowadzonej analizy statystycznej stwierdzono, że zwiększenie ilości lepiszcza od 10 do 30% w trakcie procesu granulacji bezciśnieniowej powoduje spadek średniej wartości współczynnika kształtu oraz uzyskanie granulatu charakteryzującego się niższym zróżnicowaniem pod względem kształtu.

Do podobnych wniosków doszli autorzy badań nad granulacją bezciśnieniową błonnika spożywczego (Bakoniku i in. 2013). Uzyskali poprzez zastosowanie lepiszcza przy granulacji trzech gatunków błonnika wyrównanie składu granulometrycznego.

Granulat otrzymany przy najmniejszej ilości lepiszcza (10%) charakteryzował się najwyższą średnią wartością współczynnika kształtu, przy czym różnice wynosiły ok. 3,5% w porównaniu z granulem otrzymanym przy dodatku 20% lepiszcza i 12,5% w porównaniu z granulem otrzymanym przy udziale 30% lepiszcza. Granulat otrzymany przy ilości lepiszcza 30% charakteryzował się zarówno najmniejszą średnią wartością współczynnika kształtu, ale również najmniejszym zakresem jego zmienności wynoszącym ok. 0,77. Przy granulacie otrzymanym z 20 i 10% dodatkiem lepiszcza zakres ten wynosił odpowiednio: 1,08 i 1,26.

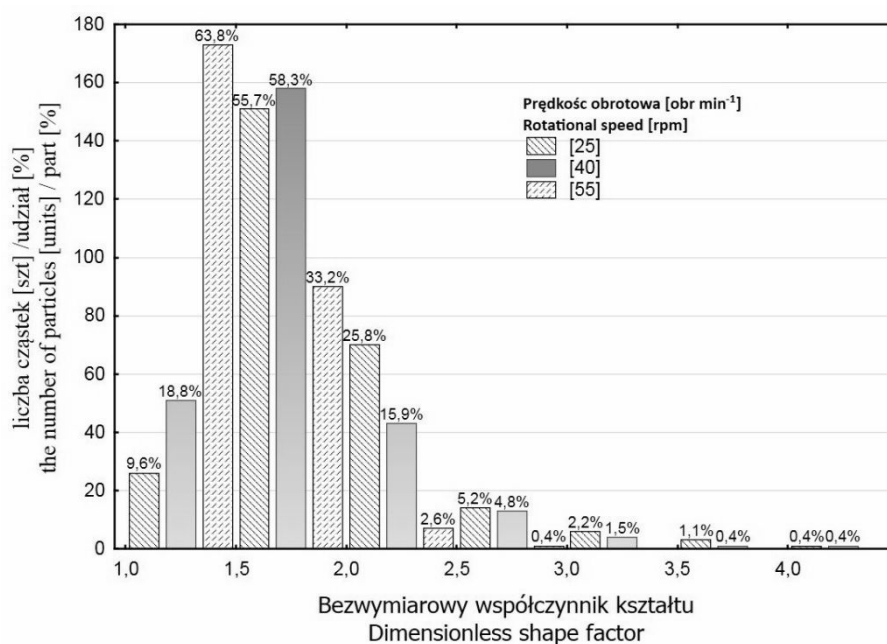
Analizując wpływ zawartości skrobi w lepiszczu, można stwierdzić, iż zarówno wzrost dodatku skrobi w wodnym roztworze lepiszcza w ilości 10 jak i 20% powoduje wzrost średniej wartości współczynnika kształtu w stosunku do granulacji przy zastosowaniu czystej wody jako lepiszcza (0% lepiszcza). Wzrost ten jest nieznaczny i wynosi ok. 3,6%. Również zakres zmienności wartości współczynnika kształtu dla próbek uzyskanych przy granulacji roztworem skrobi jest wyższy o ok. 56% w porównaniu do próbki granulowanej czystą wodą.

Według Miastkowskiego i współautorów (Miastkowski i in. 2013), którzy określali wpływ zawartości lepiszcza na granulację nawozów pylistych, zwiększenie stężenia lepiszcza może powodować pogorszenie warunków granulacji i otrzymanie produktu o gorszych właściwościach.

Na rysunku 2 przedstawiono histogram rozkładu zmienności kształtu cząstek granulatu uzyskanego przy zmiennej prędkości obrotowej granulatora. Na podstawie analizy histogramu (rys. 2) można stwierdzić, iż występują istotne różnice w kształcie próbek granulatu otrzymanych przy zmiennej prędkości obrotowej granulatora. Przeprowadzona analiza statystyczna (rys. 4) pozwala na stwierdzenie, że zwiększenie

prędkości obrotowej cylindra granulatora od 25 do 55 obr·min<sup>-1</sup> wpływa na uzyskanie granulatu o większej jednorodności pod względem współczynnika kształtu.

Przy prędkości obrotowej 55 obr·min<sup>-1</sup> największy udział cząstek stanowią cząstki o współczynniku kształtu z zakresu 1-1,5, udział ten jest sześciokrotnie wyższy w porównaniu do granulatu otrzymanego przy prędkości obrotowej 25 obr·min<sup>-1</sup> próbki i prawie 3,5- krotnie wyższy w stosunku do granulatu otrzymanego przy prędkości obrotowej 40 obr·min<sup>-1</sup>. Granulat uzyskany przy prędkości obrotowej 25 i 40 obr·min<sup>-1</sup>, zawiera większość cząstek w zakresie współczynnika kształtu od 1,5 do 2,5. Udział ten stanowi ponad 84% (przy granulacie otrzymanym przy prędkości obrotowej 25 obr·min<sup>-1</sup>), zaś przy granulacie otrzymanym przy prędkości obrotowej 40 obr·min<sup>-1</sup> wynosi ok. 74%. Przy granulacie otrzymanym przy prędkości obrotowej 55 obr·min<sup>-1</sup> największy udział cząstek zawiera się w zakresie wartości współczynnika kształtu od 1,0 do 2,0, a udział ten stanowi 97% całej analizowanej populacji.



**Rys. 2.** Histogram rozkładu zmienności kształtu cząstek (granul) uzyskanych przy zmiennej prędkości obrotowej granulatora

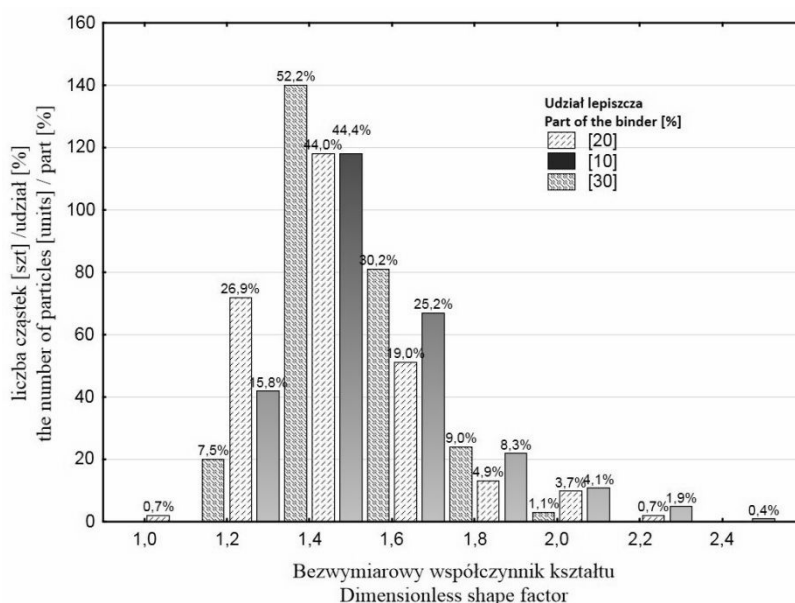
**Fig. 2.** Histogram of variability distribution of the shape of particles (granules) obtained at variable rotational speed of granulator



Na rysunku 3 przedstawiono histogram rozkładu zmienności kształtu cząstek granulatu uzyskanych przy zmiennej ilości dodawanego lepiszcza podczas procesu granulacji bezciśnieniowej.

Na podstawie analizy histogramu (rys. 3) można stwierdzić, iż występują istotne różnice w kształcie próbek granulatu uzyskanych przy zmiennej ilości lepiszcza podczas procesu bezciśnieniowej granulacji. Przeprowadzona analiza statystyczna (rys. 3) pozwala na stwierdzenie, że zwiększenie ilości lepiszcza od 10 do 30% podczas bezciśnieniowej granulacji wpływa na zmniejszenie zróżnicowania cząstek pod względem współczynnika kształtu.

Granulat uzyskany przy 30% zawartości lepiszcza charakteryzuje się najwyższym udziałem ilościowym cząstek o niskiej wartości współczynnika kształtu poniżej 1,6 znajduje się ponad 89% wszystkich cząstek, podczas gdy w granulacie uzyskanym przy 20% zawartości lepiszcza udział ten stanowi tylko ok. 70%, a dla granulatu o zawartości 10% lepiszcza – ok. 60%. Granulat uzyskany przy 20 i 10% zawartości lepiszcza odznaczał się zbliżonym udziałem ilościowym w zakresie współczynnika kształtu od 1,4 do 1,6 (udział ok. 44%), przy czym granulat uzyskany przy 20% zawartości lepiszcza charakteryzuje się wyższym udziałem ilościowym w zakresie 1,2 do 1,4.



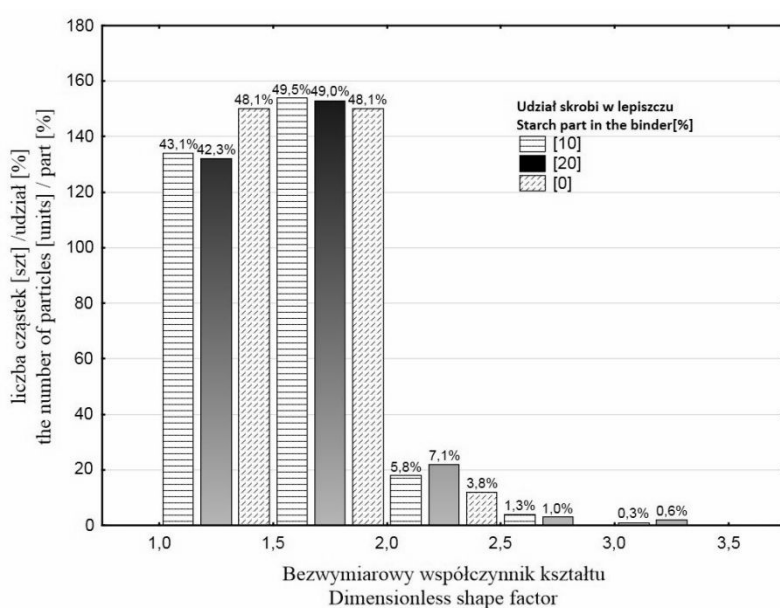
**Rys. 3.** Histogram rozkładu zmienności kształtu cząstek (granul) uzyskanych przy zmiennej ilości lepiszcza

**Fig. 3.** Histogram of variability distribution of the shape of particles (granules) obtained with variable amounts of binder

Na rysunku 4 przedstawiono histogram rozkładu zmienności kształtu cząstek granulatu uzyskanego przy zmiennej ilości skrobi stosowanej w wodnym roztworze lepiszcza podczas procesu granulacji bezciśnieniowej.

Analizując dane zawarte na rys. 4, można stwierdzić, iż granulaty uzyskane przy granulacji z różną zawartością skrobi w lepiszczu charakteryzują się zbliżonym kształtem pod względem współczynnika kształtu. Różnice w udziałach ilościowych wynoszą jedynie 2 do 5%.

Istotność różnic w składzie granulometrycznym pomiędzy uzyskanymi granulami określono przy użyciu testu Kruskala-Wallisa przy poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ . Tylko w przypadku porównania granulatu uzyskanego przy zmiennej ilości skrobi stosowanej w wodnym roztworze lepiszcza od 0 do 20% nie udało się jednoznacznie stwierdzić istotności różnic pomiędzy nimi, wartość  $p = 0,0534 > \alpha = 0,05$ . W pozostałych przypadkach występują istotne różnice  $p < \alpha = 0,05$ .



**Rys. 4.** Histogram rozkładu zmienności kształtu cząstek (granul) uzyskanego przy zmiennej zawartości skrobi w lepiszczu

**Fig. 4.** Histogram of variability distribution of the shape of particles (granules) obtained at variable starch content in the binder

Uzyskane w trakcie badań ilości frakcji zgranulowanej (powyżej 0,5 mm) przy zmianie badanych parametrów mieściły się w przedziale od 13,03 do 35,66%. Zwiększenie ilości lepiszcza od 10 do 30% w trakcie procesu granulacji bezciśnieniowej spowodowało największy wzrost ilości frakcji zgranulowanej od

13,03 do 35,66%. Zwiększenie prędkości obrotowej cylindra granulatora od 25 do 55 obr·min<sup>-1</sup> przyczyniło się do nieznacznego spadku ilości frakcji zgranulowanej od 19,29 do 17,48%. Natomiast zwiększenie dodatku skrobi w wodnym roztworze lepszczu od 10 do 20% spowodowało wzrost ilości frakcji zgranulowanej od 15,57 do 24,37%.

#### WNIOSKI

1. Zwiększenie ilości lepszczu od 10 do 30% w trakcie procesu granulacji bezciśnieniowej powoduje spadek średniej wartości współczynnika kształtu oraz uzyskanie granulatu charakteryzującego się niższym zróżnicowaniem pod względem kształtu.

2. Zwiększenie prędkości obrotowej cylindra granulatora od 25 do 55 obr·min<sup>-1</sup> wpływa na uzyskanie granulatu o większej jednorodności pod względem współczynnika kształtu.

3. Granulat otrzymany przy prędkości obrotowej bębna granulatora 55 obr·min<sup>-1</sup> charakteryzuje się najniższą wartością bezwymiarowego współczynnika kształtu oraz najmniejszym zróżnicowaniem pod względem kształtu.

4. Wzrost dodatku skrobi w wodnym roztworze lepszczu od 10 do 20% powoduje wzrost średniej wartości współczynnika kształtu w stosunku do granulacji przy zastosowaniu czystej wody jako lepszczu (0% lepszczu).

5. Granulaty uzyskane przy granulacji z różną zawartością skrobi w lepszczu charakteryzują się zbliżonym kształtem określonym wyznaczonym współczynnikiem kształtu. Różnice w udziałach ilościowych wynoszą jedynie 2 do 5%.

6. Ilość frakcji zgranulowanej (powyżej 0,5 mm) uzyskanej przy zmianie badanych parametrów mieściła się w przedziale od 13,03 do 35,66%.

#### PIŚMIENNICTWO

- Aider M., de Halleux D., Belkacemi K., 2007. Production of granulated sugar from maple syrup with high content of inverted sugar. *Journal of Food Engineering*, 80, 791-797.
- Bakier S., Miastkowski K., 2010. Analiza składu granulometrycznego glukozy krystalicznej. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 1, 36-40.
- Bakoniuk J.R., Miastkowski K., Leszczuk T., 2013. Wpływ lepszczu na charakterystykę granulometryczną błonnika spożywczego granulowanego bezciśnieniowo. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 1, 12-18.
- Chlebowski J., Nowakowski T., 2008. Analiza stopnia rozdrobnienia ziarna pszenicy. *Inżynieria Rolnicza*, 1(99), 65-70.
- Hanczakowska E., 2004. Wpływ naturalnych przeciwutleniaczy w dawkach pokarmowych na wyniki tuczu i jakość mięsa tuczników. *Rocz. Nauk. Zoot., Rozpr. Hab.*, 17-75.
- Hanczakowska E., 2007. Zioła i preparaty ziołowe w żywieniu świń. *Wiadomości Zootechniczne*, R. XLV, 3, 19-23.

- Hann D., Strazisar J., 2007. Influence of Particle Size Distribution, Moisture Content, and Particle Shape on the Flow Properties of Bulk Solids. *Instrumentation Science and Technology* 35, 571-584.
- Heim A., Obraniak A., Gluba T., 2005. Wpływ parametrów procesowo-aparaturowych na właściwości złoża podczas granulacji bębnowej. VII Ogólnopolskie Sympozjum „Granulacja 2005”. Puławy-Kazimierz Dolny.
- Hejft R., Obidziński S., 2013. Ciśnieniowa aglomeracja materiałów roślinnych- innowacje techniczno-technologiczne. Część II. Układ dozujący, mieszająco-granulujący. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 58(1), 60-63.
- Hejft R., Obidziński S., 2015. Innovations in the structure of plant material pelletizers. *Agricultural Engineering*, 19(1), 57-66.
- Hejft R., Obidziński S., 2012. Urządzenie mieszająco-granulująco-dozujące do układu roboczego granulatora. Zgłoszenie patentowe P.397754 z dnia 09.01.2012r. Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej.
- Kamiński S., 2007. Porównanie optyczno-elektronicznych metod pomiaru granulacji. *Aparatura Badawcza i Dydaktyczna*, 12(2-3), 85-93.
- Knollenberg L.G., Veal D.L., 2007. Optical particle monitors, counters and spectrometers: performance characterization, comparison and use. *Proceedings, Institute of Environmental Sciences*, 751-771.
- Kobus Z., Panasiewicz M., Zawiaślak K., Sobczak P., Mazur J., Guz T., Nadulski R., 2014. Analiza możliwości uzyskania olejków eterycznych z odpadów roślin zielarskich. *Inżynieria Rolnicza*, 1(149), 59-64.
- Korpala W., 2005. Granulowanie materiałów rolno-spożywczych metodą bezciśnieniową. *Rozprawy Naukowe Akademii Rolniczej w Lublinie, Zeszyt 289*, Lublin.
- Kowalski R., Wawrzykowski J., 2009a. Effect of ultrasound-assisted maceration on the quality of oil from the leaves of thyme *Thymus vulgaris* L. *Flavour and Fragrance Journal*, 24, 69-74.
- Kukielka L., 2000. Podstawy badań inżynierskich. Wydawnictwo Uczelniane Politechnik Koszalińskiej, Koszalin, 411.
- Larre-Larrouy M.H., Feller H., 2001. Carbon and monosaccharide distribution in particle-size fractions from a clayey ferrallitic soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 32(17&18), 2925-2942.
- Leszczuk T., 2015. Wpływ parametrów konstrukcyjno-technologicznych na proces aglomeracji w granulatorze talerzowym. Praca doktorska. Politechnika Białostocka. Białystok.
- Malczewski J., 1990. *Mechanika materiałów sypkich – operacje jednostkowe*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 157.
- Miastkowski K., Leszczuk T., Bakier S., 2013. Zastosowanie zawiesin wodnych bentonitu i gliny do granulacji bezciśnieniowej nawozów rolniczych. *Inż. Ap. Chem.*, 52(1), 14-16
- Obidziński S., 2010. Ocena właściwości energetycznych odpadów melisy. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 546, 253-262.
- Obraniak A., Gluba T., 2011. A model of granule porosity changes during drum granulation, *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 46, 219-228.
- Raal A., Orav A., Püssa T., Valner C., Malmiste B., Arak E., 2012. Content of essential oil, terpenoids and polyphenols in commercial chamomile (*Chamomilla recutita* L. Rauschert) teas from different countries. *Food Chemistry*, 131, 632-638.
- Ryś J., 1995. *Stereologia materiałów*. Fotobit-Design, Kraków, 394.
- SIS, 2003. *User's Guide analySIS*. Version 3.2. Soft Imaging System GmbH. Germany Münster.
- Sobczak P., 2004. *Agglomeracja wybranych spożywczych materiałów proszkowych*. Praca doktorska. Akademia Rolnicza w Lublinie, Lublin.
- Tadeusiewicz R., Korohoda P., 1992. *Komputerowa analiza obrazu*. Wydawnictwo Fundacji Postępu Telekomunikacji. Kraków, 280.

## INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF NON-PRESSURE GRANULATION ON THE SHAPE OF NETTLE WASTE GRANULES

*Sławomir Obidziński<sup>1</sup>, Krzysztof Miastkowski<sup>2</sup>, Paulina Berestiuk<sup>1</sup>*<sup>1</sup>Faculty of Civil and Environmental Engineering  
Department of Agricultural Food and Forestry Engineering<sup>2</sup>Branch Faculty of Forestry in Hajnówka  
Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok  
e-mail: s.obidzinski@pb.edu.pl

**Abstract.** One of the vegetable waste products generated by the Herbapol company in Białystok is fine-grain nettle waste generated during sorting and packaging. The article presents the results of research on the impact of technological parameters of the non-pressure granulation process on the shape coefficient of nettle waste granules. The granulation process was conducted using a new mixing-granulation-dosing system which is used as a delivery system of plant material to the pelleting-briqueting densification device with flat matrix. The design of the system allows simultaneous implementation of both the blending operation and non-pressure granulation of the powdery fraction of the processed material. The effect of the rotational speed of the inner cylinder of the mixing-granulation-dosing system (25, 40, 55 min rev<sup>-1</sup>), the influence of binder amount added to nettle waste (10, 20, 30%) and the effect of starch content in the aqueous solution of the binding agent (0, 10, 20%) on the morphology of obtained granules (particle shape coefficient) were determined during the studies. Test was conducted with mass flow rate of the compacted raw material of 8 kg h<sup>-1</sup>. The obtained results led to the conclusion that an increase in the rotational speed of the granulation cylinder increases the homogeneity of the granulate as determined by the shape coefficients. Increasing the amount of binder added during the granulation process reduces the differentiation of particle shape coefficients. Whereas, an increase of starch content in the binder does not significantly affect the particle size distribution in terms of particle shape coefficients. Differences in the quantitative proportions are only 2 to 5%.

**Keywords:** non-pressure granulation, nettle waste, shape of granules