

ZASTOSOWANIE MODELU RRSB DO PREDYKCJI WYDZIELENIA MIESZANINY PRZEZNACZONEJ DO PRODUKCJI PELETÓW I BRYKIETÓW

Aleksander Lisowski, Jacek Klonowski, Michał Sypuła

Katedra Maszyn Rolniczych i Leśnych, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Streszczenie. Celem pracy było porównanie rozkładów wymiarów cząstek rozdrobnionych siedmiu gatunków roślin energetycznych w toporowym zespole tnącym siewkarni polowej i rozdrabniaczu bijakowym oraz przedstawienie możliwości wykorzystania modelu Rosina-Rammlera-Sperlinga-Bennetta do predykcji oddzielenia ilości materiału po cięciu i zmieleniu spełniającego wymagania wymiarów cząstek do produkcji peletów lub brykietów. Zachowanie się rankingów wartości średnich wymiarów cząstek pociętego i zmielonego materiału potwierdziło dotychczasowe wnioski cząstkowe iż różnice w rozkładach dla roślin wynikają z właściwości ich biomasy. Wykazano praktyczną możliwość wykorzystania modelu RRSB do wyznaczenia ilości oddzielonego materiału spełniającego wymagania wymiarowe przy produkcji paliw formowanych.

Słowa kluczowe: rośliny energetyczne, separator sitowy, rozdrabnianie, mielenie, wymiar cząstek

Wstęp

Wykorzystanie biomasy na bioenergię lub inne produkty wytwarzane z biomasy, np. brykiety i pelety, wymaga zmniejszenia wymiarów cząstek materiału roślinnego lub drzewnego do określonego zakresu, który zależy od odmiany surowca, sposobu przetwarzania i dalszych procesów konwersji biomasy, np. przez procesy chemiczne lub termiczne, do innych postaci produktów. Redukcja wymiarów biomasy jest procesem mechanicznym i najczęściej polega na cięciu lub rozcieraniu, podczas którego znacząco zmieniają się wymiary cząstek, kształt lub gęstość objętościowa materiału organicznego. Procesy te mogą być zrealizowane w maszynach z obrotowymi zespołami roboczymi, do których można zaliczyć nożowe rozdrabniacze bębnowe lub tarczowe oraz rozdrabniacze bijakowe.

Dla rozdrobnionego materiału roślinnego przeznaczonego do dalszego przetwarzania, rozmiar cząstek jest jedną z najważniejszych cech fizycznych, ponieważ stanowi klucz do doboru parametrów pracy zespołów roboczych podczas rozdrabniania, mielenia, mieszania, uwadniania, ekstruzji, peletowania, brykietowania i transportu pneumatycznego.

Najpełniejszym opisem rozdrobnionego materiału roślinnego jest rozkład wymiarów cząstek w postaci tabelarycznej lub graficznej.

Wyrażenie rozkładu wymiarów cząstek za pomocą funkcji matematycznych jest kolejnym, innym sposobem scharakteryzowania procesu rozdrabniania lub podatności materiału na rozdrabnianie.

Jest wiele różnych typów funkcji rozkładu wymiarów cząstek, zarówno w postaci skumulowanej, jak i względnej częstości. Należą do nich: rozkład normalny, rozkład logarytmiczno-normalny, funkcje Rosina-Rammlera, Gatesa-Gaudina-Schuhmanna, Bennetta, Gaudina-Meloya, zmodyfikowana Gaudina-Meloya, Rollera, Svensona, błędu, zmodyfikowana Beta, Griffitha i Johnsona [Ahmed i Drzymała 2005; Bitra i in. 2008]. Spośród tych funkcji, najbardziej przydatne do analizy rozdrobnionego materiału roślinnego mogą być: Gatesa-Gaudina-Schuhmanna, zmodyfikowana Gaudina-Meloya, Rosina-Rammlera-Sperlinga-Bennetta, logarytmiczno-normalna i zmodyfikowana Beta.

Funkcja Rosina-Rammlera-Sperlinga-Bennetta jest użyteczna dla monitorowania pracy urządzeń rozcierających i rozdrabniających, z których otrzymuje się mieszaniny cząstek o rozkładach charakteryzujących się dużą skośnością. Funkcja Gatesa-Gaudina-Schuhmanna jest prosta do zastosowania, a Gaudina-Meloya może być dopasowana do różnych rozkładów spotykanych w praktyce. Rozkład logarytmiczno-normalny może być korzystny dla transformacji rozkładów, które są proste oraz dla rozkładów odnoszących się do liczebności, powierzchni lub objętości o tym samym nachyleniu.

Z analizy przedmiotowego zagadnienia wynika, że jest wystarczająco dużo wyników badań o rozkładach wymiarów cząstek rozdrobnionego materiału roślinnego kukurydzy, lucerny, trawy [Schwab i in. 2002; Zhang 2002], a także zrębków drzewnych [Bitra i in. 2008]. W dostępnej literaturze jest znacznie mniej informacji o rozdrobnionej biomase pochodzącej z roślin energetycznych, która dopiero w ostatnich latach jest obiektem szerszego zainteresowania naukowców i praktyków. Wyniki dotychczasowych badań nad rozdrabnianiem roślin energetycznych przez cięcie w toporowym zespole tnącym sieczkarni polowej [Lisowski i in. 2009] i mielenie w rozdrabniaczu bijakowym [Lisowski i in. 2008] wskazują na różnice w rozkładach wymiarów cząstek między gatunkami roślin. We wnioskach z tych badań stwierdzono, że spośród mieszanin roślin energetycznych rozdrobnionych zarówno w sieczkarni, jak i rozdrabniaczu bijakowym rozkład wymiarów cząstek wierzby był najbardziej wyrównany i średnia geometryczna wymiarów cząstek była największa, natomiast mieszaniny z roślin topinambura były najkrótsze, ale najbardziej nierównomierne. Podobnie mieszanina spartiny otrzymana z rozdrabniacza bijakowego miała zbliżony rozkład do topinambura. Różnice między średnimi wartościami wymiarów cząstek, obliczonymi metodą średniej geometrycznej i według modelu Rosina-Rammlera-Sperlinga-Bennetta były mniejsze od wartości odchylenia standardowego, co uznano za pozytywne uzasadnienie iż model teoretyczny dobrze aproksymuje rozkłady wymiarów cząstek materiału roślin pociętych i zmielonych i może być wykorzystany do ich predykcji. Zaprezentowane w pracach Lisowskiego i in. [2008, 2009] wyniki badań dotyczące efektów rozdrabniania z wykorzystaniem dwóch niezależnych maszyn stały się podstawą do dalszej analizy uzyskanych charakterystyk. Celem pracy było porównanie rozkładów wymiarów cząstek rozdrobnionych siedmiu gatunków roślin energetycznych w toporowym zespole tnącym sieczkarni polowej i rozdrabniaczu bijakowym oraz przedstawienie możliwości wykorzystania modelu Rosina-Rammlera-Sperlinga-Bennetta do predykcji oddzielenia ilości materiału po cięciu i zmieleniu spełniającego wymagania wymiarów cząstek do produkcji peletów lub brykietów.

Materiał i metody

Materiał badawczy i metody badań opisano w pracach Lisowskiego i in. (2008, 2009).

Dla rozkładu logarytmiczno-normalnego wyznaczono jego parametry: średnią geometryczną x_g i standardowe odchylenie geometryczne s_g , które obliczono z zależności

$$x_g = \log^{-1} \frac{\sum(m_i \log x_{si})}{\sum m_i}$$

$$s_g = \log^{-1} \sqrt{\frac{\sum m_i (\log x_{si} - \log x_g)^2}{\sum m_i}}$$

gdzie:

- m_i – masa siewczki na i -tym sicie [g],
- x_{si} – średni wymiar cząstek na i -tym sicie [mm], który wyznaczono ze wzoru

$$x_{si} = \sqrt{x_i x_{i-1}}$$

gdzie:

- x_i – przekątna otworu i -tego sita [mm],
- x_{i-1} – przekątna otworu sita znajdującego się powyżej i -tego sita [mm].

Ponieważ x_g reprezentuje wartość mediany, to ogólny model Rosina-Rammlera-Sperlinga-Bennetta (RRSB)

$$Y = 1 - e^{-\left(\frac{x}{x_R}\right)^n} \text{ przekształcono do postaci } Y = 1 - 2^{-\left(\frac{x}{x_{50}}\right)^n}$$

gdzie Y jest udziałem masowym materiału drobniejszego niż wymiar x , a x_R i x_{50} są stałymi określającymi rozmiar cząstek, n jest stałą charakteryzującą materiał, która jest miarą stromości krzywej rozkładu.

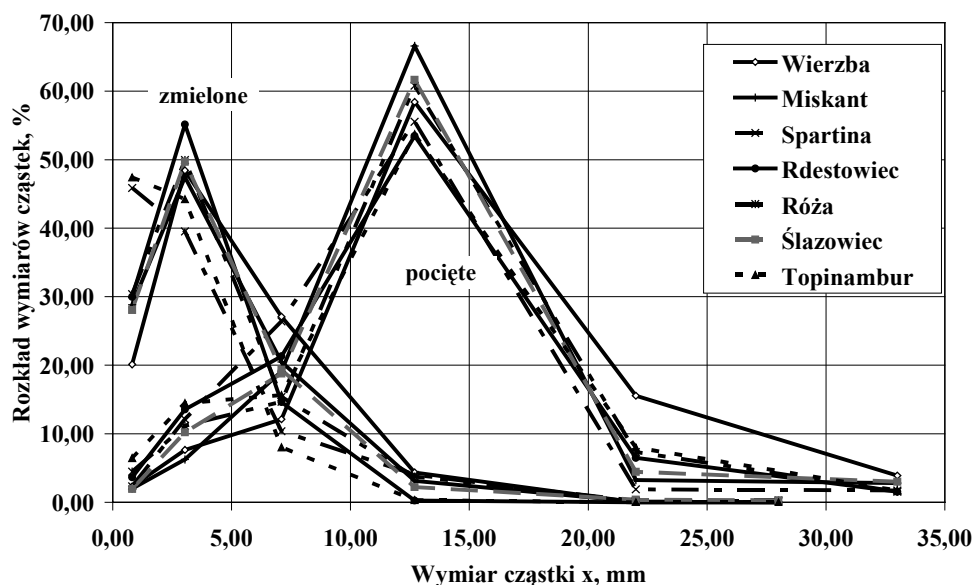
Po podwójnym logarytmowaniu funkcji Y otrzymano jej liniową postać. Do wyznaczenia nieznanymi wartości współczynników n i x_{50} zastosowano pakiet statystyczny SPSS v.14.

Wyniki i dyskusja

Wilgotność roślin w czasie zbioru siewczkarnią połową była zróżnicowana i zawierała się w szerokim przedziale 22,6-52,2% [Lisowski 2009]. Uzyskane zrębki wierzby i siewczkę z pozostałych roślin suszono w warunkach naturalnych do wilgotności zawierającej się w wąskim zakresie 5,6-7,3% [Lisowski 2008] i przy tak wyrównanej wilgotności dodatkowo rozdrabniano w rozdrabniaczu bijakowym. Parametry pracy ważniejszych zespołów roboczych siewczkarni polowej, decydujące o teoretycznej długości cięcia oraz rozdrabniacza bijakowego podano w pracach Lisowskiego i in. [2008, 2009].

Z porównawczego przedstawienia rozkładów wymiarów cząstek (rys. 1) oraz wskaźników tych rozkładów, w postaci skośności i kurtozy [Lisowski i in. 2008, 2009], wynika, że

rozkłady wymiarów cząstek uzyskane po cięciu roślin energetycznych charakteryzowały się silniejszą skośnością prawostronną i były bardziej smukłe niż rozkłady cząstek po zmieleniu w rozdrabniaczu bijakowym.



Rys. 1. Rozkład wymiarów cząstek rozdrobnionego i zmielonego materiału roślinnego (opracowane na podstawie Lisowskiego i in. 2008, 2009)

Fig. 1. Dimensions distribution of shredded and ground plant material particles (prepared on the basis of Lisowski et al 2008, 2009)

Analiza dla średnich wartości wymiarów cząstek wykazała statystycznie istotne różnice między tymi parametrami dla gatunków roślin, zarówno dla mieszanin uzyskanych po cięciu, jak i zmieleniu. Szczegółowa analiza wykonana testem Duncana (tab. 1) wykazała, że niemal w całości zachowały się rankingi wartości średnich wymiarów cząstek materiału pociętego i zmielonego. Nieznaczne odstępstwa wystąpiły dla wymiarów cząstek spartiny i rdestowca, przy czym wartości te dla materiału pociętego tworzyły grupę jednorodną.

Parametry modelu RRSB n i x_{50} dla każdego rozkładu wymiarów cząstek zestawiono w tab. 2. Charakteryzują się one wysoce statystycznymi ocenami istotności. Wartości testów Fischera-Snedecora oraz współczynników determinacji świadczą o dobrym dopasowaniu modelu RRSB do rozkładów rzeczywistych wymiarów cząstek. Oceny te odnoszą się do dopasowania rozkładów, z których wynika, że model RRSB może być wykorzystany do dalszej analizy, a zwłaszcza do predykcji wydzielenia ilości materiału po cięciu i zmieleniu spełniającego wymagania wymiarów cząstek do produkcji peletów i brykietów. Błędy bezwzględne i względne między wartościami średniej geometrycznej wymiarów cząstek po cięciu i zmieleniu a wartościami x_{50} zawierają się jednak w dużym zakresie wartości i wy-

noszą odpowiednio 1,27-2,74 mm (14-29%) i 0,99-1,13 mm (36-57%). Duże wartości błędów względnych, średnich wymiarów cząstek zwłaszcza dla materiału po zmieleniu x_{50} , wynikają z ich małych wartości bezwzględnych oraz dużej koncentracji ilości cząstek w zakresie mniejszych wymiarów (rys. 1).

Tabela 1. Grupy jednorodne dla wymiarów cząstek pociętego i zmielonego materiału roślinnego
Table 1. Homogeneous groups for dimensions of shredded and ground plant material particles

Pocięty materiał roślinny						Zmielony materiał roślinny					
Roślina	Średnia [mm]	Grupa jednorodna				Roślina	Średnia [mm]	Grupa jednorodna			
Wierzba	11,31	x				Wierzba	3,13	x			
Miskant olbrzymi	10,47		x			Miskant olbrzymi	2,60		x		
Ślázowiec	9,87			x		Ślázowiec	2,57		x		
Róża	9,30			x		Róża	2,46	x	x		
Spartina	8,96			x	x	Rdestowiec	2,33			x	
Rdestowiec	8,79				x	Spartina	1,93				x
Topinambur	8,40				x	Topinambur	1,76				x

Tabela 2. Współczynniki modelu Rosina-Rammlera-Sperlinga-Bennetta
Table 2. The Rosin-Rammler-Sperling-Bennett model coefficients

Pocięty materiał roślinny					Zmielony materiał roślinny				
	n	x_{50} [mm]	F	R^2		n	x_{50} [mm]	F	R^2
Wierzba	1,61	8,57	595,3	96,4	Wierzba	1,20	2,00	478	97,4
Miskant olbrzymi	1,54	8,88	1426	95,3	Miskant olbrzymi	1,03	1,55	1892	99,3
Spartina	1,42	7,69	716,3	94,7	Spartina	0,74	0,88	577	97,8
Rdestowiec	1,52	6,52	2624	97,8	Rdestowiec	1,05	1,27	259	95,2
Róża	1,46	6,74	498	95,8	Róża	0,96	1,47	1826	99,3
Ślázowiec	1,67	7,73	1851	97,9	Ślázowiec	1,00	1,57	1078	98,8
Topinambur	1,35	5,95	1018	95,7	Topinambur	0,86	0,76	335	96,3

Z tych powodów stwierdzono brak pełnej spójności w rankingach wartości średnich geometrycznych wymiarów cząstek mieszanin uzyskanych po cięciu i zmieleniu (tab. 1) oraz różnice między rankingami wartości x_{50} (tab. 2). Mogły być one spowodowane również odmiennymi zakresami wymiarów cząstek uzyskanych po tych procesach i zastosowaniem tej samej metodyki badań. Bardziej zasadne byłoby zastosowanie innego zestawu sit do separacji mieszaniny uzyskanej po zmieleniu, ale dla celów porównawczych wykorzystano zestaw sit o tych samych wymiarach oczek. Warunki badań były celowo tak dobrane, aby porównać rozkłady różnych mieszanin. Norma ASAE S424.1 zaleca zastosowanie separatora mechanicznego do rozdziału mieszanin z roślin zbieranych sieczkarniami połowymi na kiszonkę. Ponieważ norma była opracowana w latach 70. XX wieku, a nie ma innej (prócz do zrębków drzewnych), przeto wydawało się logiczne, aby do rozdziału materiału z różnych roślin energetycznych zbieranych sieczkarniami połowymi posłużyć się wymaganiami jednej normy ASAE S424.1.

Mimo tych zastrzeżeń otrzymane rozkłady wymiarów cząstek materiału pociętego i zmielonego mogą być przydatne do sformułowania praktycznych zaleceń i zaproponowania możliwości wykorzystania modelu RRSB do wyznaczenia ilości materiału rozdrobnionego, spełniającego wymagania procesowe do produkcji peletów lub brykietów.

Mani i in. [2003] zalecają, aby mieszanina przeznaczona do produkcji peletów miała wymiary cząstek nie większe niż 3,2 mm, a Samson i in. (2005) podają, że do produkcji brykietów najlepsze są cząstki o wymiarach poniżej 6-8 mm. Z wykresów (rys. 1) wynika, że część materiału roślinnego już po cięciu może być wykorzystana zarówno do produkcji peletów, jak i brykietów. Do wyznaczenia tych udziałów wagowych dla każdej mieszanki wykorzystano parametry modelu RRSB (tab. 3).

Tabela 3. Procentowy udział wagowy mieszaniny spełniającej wymagania wymiarów cząstek materiału roślinnego po cięciu i zmielonego stosowanego do produkcji peletów (3,2 mm) i brykietów (8 mm)

Table 3. Percent weight in weight concentration of mixture meeting requirements set for dimensions of cut and ground plant material particles used for production of pellets (3.2 mm) and briquettes (8 mm)

Wymiar cząstek [mm]	Wierzba	Miskant olbrzymi	Spartina	Rdestowiec	Róża	Ślazier	Topinambur
Pocięty materiał roślinny							
3,2	13,2	13,3	18,0	20,9	20,8	14,7	25,9
8,0	46,2	44,6	52,0	61,1	59,0	52,0	64,5
Zmielony materiał roślinny							
3,2	82,8	87,9	92,8	92,9	88,0	87,0	96,8
8,0	99,5	99,6	99,5	99,9	99,4	99,4	99,9

Stosując sito o wymiarze oczek 3,2 mm można oddzielić od 13,2% mieszaniny drobnych cząstek pociętego materiału wierzby lub miskanta do 25,9% topinambura. Zmielony materiał w rozdrabniaczu bijakowym zawiera również pewną ilość mieszaniny o większych wymiarach niż 3,2 mm (3,2-17,2%), które powinny się oddzielić, aby nie powodowały nieciągłości procesu peletowania, gdyż nawet pojedyncze, duże cząstki mogą spowodować zapchanie transportowaną mieszaniną. Z rozkładów wymiarów wartości skumulowanych wynika, że dużych cząstek było niewiele (np. 0,1-0,6% powyżej 8 mm, tab. 3), ale ich wymiary dochodziły do 20-30 mm. Dlatego w linii technologicznej wskazane jest zastosowanie rusztu do oddzielenia dużych cząstek i skierowanie ich do ponownego rozdrobnienia.

Podobnie zastosowanie sita o wymiarze oczek 8 mm pozwoli na wydzielenie pociętego materiału w ilości 44,6-64,5%, który spełnia wymagania wymiarowe surowca przeznaczonego do produkcji brykietów (tab. 3).

Koncepcja oddzielenia części mieszaniny spełniającej wymagania zalecanych wymiarów cząstek może pozwolić na zmniejszenie obciążeń energetycznych kolejnych zespołów roboczych, zwłaszcza, że drobniejsze frakcje zawierają zanieczyszczenia w postaci piasku i pyłu, które niepotrzebnie uszkadzają elementy robocze rozdrabniacza bijakowego lub innego urządzenia do mielenia biomasy.

Wnioski

1. Model Rosina-Rammlera-Sperlinga-Bennetta skumulowanych rozkładów może być przydatny do predykcji oddzielenia ilości materiału po cięciu i zmieleniu spełniającego wymagania wymiarów cząstek do produkcji peletów lub brykietów.
2. Na podstawie modelu RRSB można stwierdzić, że zastosowanie sit o granicznym wymiarze oczek 3,2 mm do separacji mieszaniny po zmieleniu i 8 mm – po cięciu pozwala na wydzielenie materiału rozdrobnionego z roślin energetycznych nie spełniającego wymiarów cząstek w ilości odpowiednio 3,2-17,2% i 35,5-55,4%.
3. Zastosowanie separacji mieszaniny przeznaczonej do produkcji peletów bezpośrednio po cięciu roślin pozwala na wydzielenie cząstek spełniających wymagania wymiarowe w ilości 13,2-25,9%, zmniejszając obciążenia energetyczne rozdrabniacza bijakowego.

Bibliografia

- Ahmed A M., Drzymala J.** 2005. Two-dimensional fractal linearization of distribution curves. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 39. s. 129-139.
- Bitra V S., Womac A R., Chevanan N., Sokhansanj S.** 2008. Comminution properties of biomass in hammer mill and its particle size characterization. Published by the American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, Michigan. <http://www.asabe.org>. s. 22.
- Lisowski A., Dąbrowska M., Strużyk A., Klonowski J., Podlaski S.** 2008. Ocena rozkładu długości cząstek roślin energetycznych rozdrobnionych w rozdrabniaczu bijakowym. *Problemy Inżynierii Rolniczej* 4. s. 77-84.
- Lisowski A., Nowakowski T., Sypuła M., Choluż D., Wiśniewski G., Urbanovičová O.** 2009. Suppleness of energetic plants to chopping. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Agriculture (Agricultural and Forest Engineering)* 53. s. 33-40.
- Mani S., Tabil L.G., Sokhansanj S.** 2003. An overview of compaction of biomass grand. *Powder Handling and Processing* 15(2). s. 160-168.
- Samson R., Mani S., Boddey R., Sokhansanj S., Quesada D., Urquiaga S., Reis V., Lem C.H., Carpio C.** 2005. The potential of C4 perennial grasses for developing a global bio-heat industry. *Critical Reviews in Plant Sciences* 24(5-6). s. 461-495.
- Schwab E.C., Shaver R.D., Shinnars K.J., Lauer J.G., Coors J.G.** 2002. Processing and chop length effects in brown-midrib corn silage on intake, digestion, and milk production by dairy cows. *Journal of Dairy Science* 85. s. 613-623.
- Zhang M.** 2002. Design and evaluation of corn silage-making system with shredding. Praca doktorska. The Pennsylvania State University College of Engineering. Pennsylvania. s. 198.
- ASAE S424.1. Method of determining and expressing participle size of chopped forage materials by screening 3 s. 35.

Praca naukowa finansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2007-2010 jako projekt badawczy zamawiany PBZ-MNiSW-1/3/2006

USING THE RRSB MODEL TO PREDICT SEPARATION OF MIXTURE USED FOR PRODUCTION OF PELLETS AND BRIQUETTES

Abstract. The purpose of the work was to compare size distributions for shredded particles of seven energy plant species in flywheel cutting unit of field cutter and beater shredder, and to present possibilities for using the Rosin-Rammler-Sperling-Bennett model to predict separation of the amount of cut and ground material meeting requirements set for sizes of particles used in production of pellets or briquettes. Behaviour of mean value rankings for dimensions of cut and ground material particles has confirmed partial conclusions reached to date that the differences in distributions for plants result from their biomass properties. The research allows to prove the practical possibility to use the RRSB model to determine the amount of separated material meeting dimension requirements for production of formed fuels.

Key words: energy plants, screen separator, shredding, grinding, size of particles

Adres do korespondencji:

Aleksander Lisowski; e-mail: aleksander_lisowski@sggw.pl
Katedra Maszyn Rolniczych i Leśnych
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie
ul. Nowoursynowska 164
02-787 Warszawa