

# GĘSTOŚĆ I POROWATOŚĆ POCIĘTEGO I ZMIELONEGO MATERIAŁU Z ROŚLIN ENERGETYCZNYCH

A. Lisowski, A. Świętochowski

Katedra Maszyn Rolniczych i Leśnych, Wydział Inżynierii Produkcji, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Warszawa, Polska

## STRESZCZENIE

Do badań użyto materiał ślazuwca pensylwańskiego, miskanta olbrzymiego i róży wielokwiatowej po cięciu sieczkarnią polową przy prędkości zasilania  $0,82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  i częstotliwości cięcia 83 Hz. Pocięty materiał zmielono w rozdrabniaczu bijakowym, wyposażonym w ekran perforowany o średnicy otworów 15 mm. Do wyznaczenia gęstości usypowej zastosowano pojemnik o objętości  $10 \text{ dm}^3$ , a do gęstości właściwej – piknometr helowy. Stwierdzono, że różnice w gęstości usypowej i właściwej oraz porowatości są cechą gatunkową roślin energetycznych i wynikają ze sposobu rozdrobnienia materiału. Gęstość usypowa materiału pociętego była o 17% większa niż zmielonego oraz dla róży wielokwiatowej ( $240 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) była ponad 3,5-krotnie większa niż miskanta olbrzymiego i ślazuwca pensylwańskiego, którego wartości utworzyły grupę homogeniczną ( $68 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Gęstość właściwa materiału z roślin ślazuwca pensylwańskiego, róży wielokwiatowej i miskanta olbrzymiego przeznaczonego do produkcji brykietów wynosiła odpowiednio 1207, 1162 i  $640 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Porowatość rozdrobnionego materiału z roślin energetycznych zależała od gatunku rośliny i sposobu jego rozdrobnienia oraz wymiarów i kształtu cząstek.

## WPROWADZENIE

W Polsce systematycznie wzrasta zapotrzebowanie na biomasę. Biomasę stałą obecnie pozyskuje się z odpadów leśnych, rolniczych, przemysłu drzewnego, zieleni miejskich oraz niewielkie ilości z segregowanych organicznych odpadów komunalnych. Uzupełnieniem podaży biomasy na rynku energetycznym jest biomasę pozyskiwana z plantacji wieloletnich roślin energetycznych (Stolarski i in. 2005).

Biomasa pod względem ekologicznym jest paliwem bardziej atrakcyjnym od kopalnych, lecz stwarza wiele problemów technicznych. Jednym z nich jest zbyt mała gęstość utrudniająca transport, magazynowanie, dozowanie do kotłów oraz negatywnie wpływa na sam proces i stabilność spalania. Problem ten może być rozwiązany przez odpowiednie przetworzenie surowców roślinnych. Najczęściej biomasę jest przetwarzana w brykiety lub pelety opałowe, które powinny charakteryzować się dużą gęstością  $650\text{--}900 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Brykiety i pelety uzyskuje się w wyniku procesu ciśnieniowej aglomeracji materiałów roślinnych, na przebieg której ma wpływ szereg czynników, które

można podzielić na następujące grupy (Hejft, Obidziński, 2007):

- czynniki chemiczno-biologiczne (skład chemiczny zagęszczanego materiału, budowa biologiczna cząstek),
- czynniki materiałowe, związane z przygotowaniem materiału do procesu zagęszczania (wilgotność, temperatura, skład granulometryczny mieszaniny, gęstość),
- czynniki konstrukcyjne (średnica matrycy, średnica i liczba rolek zagęszczających, średnica oraz długość i stan powierzchni otworów w matrycy, wielkość szczeliny między matrycą a rolką, itp.),
- czynniki procesowe, związane z przebiegiem procesu zagęszczania (naciski zagęszczające, natężenie przepływu zagęszczanego materiału, prędkość zagęszczania, temperatura procesu, kondycjonowanie).

Według Sokhansanj i zespołu (Sokhansanj i in. , 2005) jednym z głównych celów badania procesu zagęszczania jest oddziaływanie cech materiału na jakość zwięźzonego produktu. Dlatego znajomość własności materiału jest niezbędna, by zapewnić minimalne zużycie energii podczas procesu zagęszczania.

Celem badania było wyznaczenie gęstości właściwej i usypowej oraz porowatości materiału rozdrobnionego wybranych roślin energetycznych.

## MATERIAŁ I METODY

Do badań użyto roślin energetycznych uprawianych na poletkach Stacji Doświadczalnej w Skierniewicach należącej do Wydziału Rolnictwa i Biologii SGGW w Warszawie, które zebrano w kwietniu 2009 roku. Wybrano trzy gatunki roślin: róży wielokwiatową, miskantus olbrzymi, ślazuwca pensylwański. Rośliny rozdrobniono sieczkarnią polową Z374 wyposażoną w toporowy zespół rozdrabniający. Podczas pracy sieczkarni polowej zespół tnący był wyposażony w 5 noży, a prędkość obrotowa tarczy nożowej wynosiła  $1000 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$ . Przy prędkości obwodowej walców wciągająco-zagęszczających  $0,82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  i częstotliwości cięcia 83 Hz teoretyczna długość cząstek wynosiła 9,9 mm.

Pocięty materiał roślinny wysuszono w warunkach naturalnych i zmielono w rozdrabniaczu bijakowym, wyposażonym w ekran perforowany o średnicy otworów 15 mm.

Wilgotność materiału roślinnego, pociętego i zmielonego wyznaczono metodą suszarkowo-wagową według wymagań normy PN-EN 13183-1 z dokładnością 1% (tab. 1). Próbkę zważono na wadze elektronicznej RADWAG WPS 600/C z dokładnością 0,01 g.

Tab. 1. Charakterystyka materiału roślinnego

Parametr	Ślázowiec pensylwański	Róża wielokwiatowa	Miskant olbrzymi
Wilgotność materiału podczas zbioru roślin, %	10,8	30,6	20,9
Wilgotność materiału pociętego, %	9,7	29,5	20,0
Wilgotność materiału zmielonego, %	12,1	9,5	12,7
Średni wymiar geometryczny cząstek materiału pociętego, mm	9,69	9,35	10,40
Odchylenie standardowe geometryczne dla materiału pociętego	1,92	2,13	1,83
Średni wymiar geometryczny cząstek materiału zmielonego, mm	4,32	2,79	5,19
Odchylenie standardowe geometryczna dla materiału zmielonego	2,36	2,51	2,42

Stopień rozdrobnienia określono za pomocą separatora sitowego wykonanego wg normy ANSI/ASAE S424.1 (ASABE Standard 2011). Analizę rozkładów wymiarów cząstek po cięciu i rozdrobnieniu podano w pracy Lisowskiego i in. (2009), a wartości średniej geometrycznej wymiarów cząstek oraz odchylenia standardowe geometryczne zestawiono w tab. 1.

Metodyka przedmiotowych badań obejmowała wyznaczenie gęstości usypowej i właściwej oraz porowatości materiału pociętego i zmielonego.

Gęstość usypową rozdrobnionego materiału roślinnego wyznaczono przez dwukrotne zważenie na wadze elektronicznej z dokładnością 0,1 g naczynia i próbki z naczyniem o znanej objętości 10 cm<sup>3</sup>.

$$\rho_L = \frac{m - m_h}{V} \quad (1)$$

Do oznaczania gęstości właściwej materiału roślinnego zastosowano piknometr helowy Stereopycnometer firmy Quantachrome Instruments. Pomiar w tym urządzeniu odbywa się automatycznie i jest oparty na prawie Archimedesza (objętość zanurzonego w cieczy lub gazie ciała jest proporcjonalna do objętości wypartej przez to ciało cieczy lub gazu). Gaz wypełnia wszystkie szczeliny i przestrzenie międzycząsteczkowe materiału. Dla małych wymiarów cząstek, zwłaszcza po zmieleniu materiału oraz potrzebę zachowania dużej dokładności, jako gaz zastosowano hel. Pomiar gęstości właściwej polegał na sprężeniu gazu w komorze pomiarowej o pojemności 100 cm<sup>3</sup>, w której umieszczono materiał o znanej masie. Dla tego stanu rejestrowano ciśnienie w komorze pomiarowej, a następnie otwierano zawór, przez który gaz był kierowany do komory odniesienia, w której mierzono jego ciśnienie.

Objętość materiału obliczono z wyrażenia:

$$V_P = V_C + \frac{V_A}{1 - \left(\frac{P_1}{P_2}\right)} \quad (2)$$

Gęstość właściwą materiału roślinnego wyznaczono z zależności:

$$\rho = \frac{m - m_h}{V_P} \quad (3)$$

Porowatość badanego materiału obliczono na podstawie gęstości usypowej i właściwej:

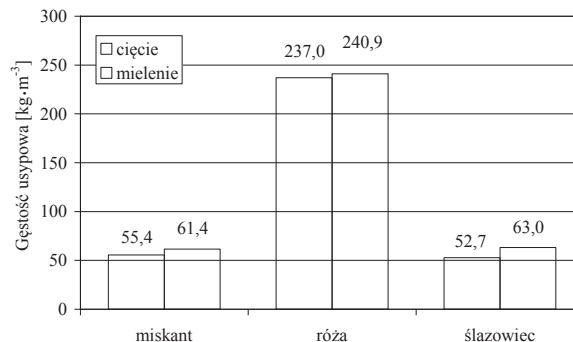
$$\varepsilon_L = 100 \left( 1 - \frac{\rho_L}{\rho} \right) \quad (4)$$

Maksymalne błędy względne przy wyznaczaniu gęstości usypowej i właściwej oraz porowatości materiału obliczono na podstawie metody różniczki zupełnej, które dla materiału pociętego wynosiły odpowiednio 5, 1,7 i 1,5%, a dla zmielonego, odpowiednio 4,3, 2,3 i 1,8%. Analizę danych przeprowadzono za pomocą programu komputerowego Statgraphics v.4.1, z wykorzystaniem procedury analizy wariancji i testu Duncana.

Badania gęstości usypowej roślin przeprowadzono w Katedrze Maszyn Rolniczych i Leśnych SGGW w Warszawie, a gęstości właściwej materiału w Katedrze Inżynierii Żywności i Organizacji Produkcji SGGW w Warszawie.

WYNIKI i DYSKUSJA

Analiza wariancji wykazała, że na gęstość właściwą i usypową oraz porowatość materiałów miały statystycznie istotny wpływ zarówno gatunek roślin energetycznych, jak i sposób rozdrobnienia materiału (wartość statystyk Fishera-Snedecora wynosiła odpowiednio dla gęstości usypowej 4204,7 i 120,8, gęstości właściwej 2449,3 i 509,8 oraz porowatości 1899,9 oraz 13,7 przy poziomie istotności nie większym niż 0,05). Średnie wartości parametrów dla materiału pociętego i rozdrobnionego oraz gatunków roślin zestawiono w tab. 2-4, a interpretację graficzną przedstawiono na rys. 1-3. Największe różnice w wartościach parametrów między sposobem rozdrobnienia wystąpiły dla gęstości usypowej (17%), a najmniejsze dla porowatości (1%).



Rys. 1. Gęstość usypowa materiału z pociętych i zmielonych roślin energetycznych

Tab. 2. Grupy jednorodne dla gęstości usypowej

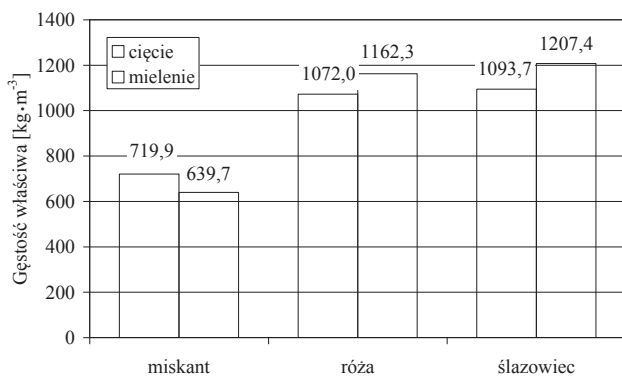
Sposób rozdrobnienia			Gatunek rośliny			
Materiał	Średnia, kg·m <sup>-3</sup>	Grupa jednorodna	Roślina	Średnia, kg·m <sup>-3</sup>	Grupa jednorodna	
Pocięty	115,7	X	Ślaziovec pensylwański	67,9	X	
Zmielony	135,1	X	Róża wielokwiatowa	239,9		X
			Miskant olbrzymi	68,4	X	

Tabela 3. Grupy jednorodne dla gęstości właściwej

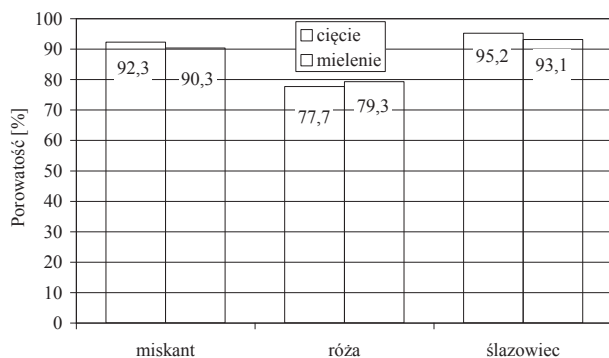
Sposób rozdrobnienia			Gatunek rośliny			
Materiał	Średnia, kg·m <sup>-3</sup>	Grupa jednorodna	Roślina	Średnia, kg·m <sup>-3</sup>	Grupa jednorodna	
Pocięty	961,8	X	Ślaziovec pensylwański	1150,5	X	
Zmielony	1069,9	X	Róża wielokwiatowa	1117,1		X
			Miskant olbrzymi	779,9		

Tabela 4. Grupy jednorodne dla porowatości

Sposób rozdrobnienia			Gatunek rośliny			
Materiał	Średnia, kg·m <sup>-3</sup>	Grupa jednorodna	Roślina	Średnia, kg·m <sup>-3</sup>	Grupa jednorodna	
Pocięty	88,4	X	Ślaziovec pensylwański	94,1	X	
Zmielony	87,6	X	Róża wielokwiatowa	78,5		X
			Miskant olbrzymi	91,3		



Rys. 2. Gęstość właściwa materiału z pociętych i zmielonych roślin energetycznych



Rys. 3. Porowatość materiału z pociętych i zmielonych roślin energetycznych

Dla każdego gatunku rośliny energetycznej gęstość materiału zmielonego była większa niż pociętego (rys. 1). Największą gęstością usypową charakteryzował się materiał róży wielokwiatowej, zarówno po cięciu, jak i po zmieleniu, a średnie wartości wynosiły, odpowiednio 237 i 241 kg·m<sup>-3</sup>. Wartości gęstości usypowej materiału miskanta olbrzymiego i ślázowca pensylwańskiego były podobne, tworząc grupę homogeniczną (tab. 2) i dla materiału po cięciu oraz rozdrobnieniu wynosiły odpowiednio 55 i 61 kg·m<sup>-3</sup> oraz 53 i 63 kg·m<sup>-3</sup>. z tego wynika, że gęstość usypowa materiału róży wielokwiatowej była ponad 3,5-krotnie większa niż miskanta olbrzymiego i ślázowca pensylwańskiego.

Frączek i zespół (Frączek i in. , 2003) stwierdzili, że gęstość usypowa zależy od wilgotności, ciśnienia, stopnia zanieczyszczeń, szybkości i sposobu formowania złoża oraz wysokości spadania nasion. Parametr ten zmienia się w dość znacznych granicach zależnie od gatunku i odmiany, wilgotności, sposobu napełniania, wysokości złoża, stopnia zanieczyszczenia i innych czynników.

Z badań wynika, że wartości gęstości usypowej dobrze korespondowały z wymiarami cząstek materiału po cięciu i zmieleniu (tab. 1). o podatności materiału roślinnego na rozdrobnienie zdecydowała struktura szkieletowa tkanek i twardość. Materiał róży wielokwiatowej jest zdrewniały i podczas rozdrabniania, zwłaszcza przez rozcieranie, rozbijanie i miażdżenie w rozdrabniaczu bijakowym otrzymano mieszaninę o najmniejszej średniej geometrycznej wymiarów cząstek (2,79 mm). Pozwoliło to na lepsze

upakowanie rozdrobnionego materiału, czego dowodem była najmniejsza jego porowatość, która wynosiła dla pociętego i zmielonego materiału odpowiednio 78 i 79% (rys. 3). Im większe uziarnienie złoża tym większa porowatość. Porowatość zależy również od kształtu cząstek, tworzących szkielet ośrodka i dlatego materiał bardziej włóknisty miskanta olbrzymiego miał nieco mniejszą porowatość niż ślázowca pensylwańskiego i wynosił odpowiednio 91 i 94% (tab. 4).

Gęstość właściwa materiału zmielonego ślázowca pensylwańskiego i róży wielokwiatowej była większa niż materiału pociętego i wynosiła odpowiednio 1207 i 1094 kg·m<sup>-3</sup> oraz 1162 i 1072 kg·m<sup>-3</sup>, a dla miskanta olbrzymiego wartości te układały się odwrotnie i wynosiły odpowiednio 640 i 720 kg·m<sup>-3</sup> (rys. 2).

Mimo że dla miskanta olbrzymiego i ślázowca pensylwańskiego uzyskano porównywalne wartości gęstości usypowej, to między wartościami gęstości właściwej otrzymano dużą różnicę, sięgającą 47%. Różnica ta wynikała częściowo z różnic wymiarów cząstek materiału rozdrobnionego obu roślin. Andrejko (Andrejko, 2005) zwrócił uwagę, że wymiary cząstek i jej zmienność mogą, w zależności od rodzaju materiału, wpływać na zwiększenie lub zmniejszenie gęstości właściwej. Wilgotność materiału pociętego miskanta olbrzymiego była niemal 2-krotnie większa niż ślázowca pensylwańskiego, ale materiału zmielonego była porównywalna. Nie można zatem upatrywać znaczących różnic w gęstości właściwej wynikających z wilgotności materiału, na co zwracali uwagę inni badacze. Stwierdzono bowiem, że zwiększenie wilgotności w zakresie 10,0-30,0% powodowało zmniejszenie gęstości właściwej, usypowej i utrząsionej sypkich surowców roślinnych (Deshpande i in. , 1993, Mieszkalski, 1999, Sokhansanj, Lang, 1996, Szot, Stępniewski, 2001).

Wartości gęstości właściwej materiału róży wielokwiatowej i ślázowca pensylwańskiego były większe niż dębu (600-900 kg·m<sup>-3</sup>), z czego wynika, że utworzone z tych roślin paliwo formowane w postaci peletów lub brykietów powinno spełnić wymagania gęstości dla tego typu produktów (650-900 kg·m<sup>-3</sup>). w przypadku materiału miskanta olbrzymiego, którego gęstość właściwa wynosiła 640 kg·m<sup>-3</sup>, nie otrzyma się peletów lub brykietów spełniających wymagania normy.

## WNIOSKI

1. Różnice w gęstości usypowej, właściwej oraz porowatości są cechą gatunkową roślin energetycznych i wynikają ze sposobu rozdrobnienia materiału.
2. Gęstość usypowa materiału pociętego była o 17% większa niż zmielonego oraz dla róży wielokwiatowej (240 kg·m<sup>-3</sup>) była ponad 3,5-krotnie większa niż miskanta olbrzymiego i ślázowca pensylwańskiego, którego wartości utworzyły grupę homogeniczną (68 kg·m<sup>-3</sup>).
3. Gęstość właściwa materiału z roślin ślázowca pensylwańskiego, róży wielokwiatowej i miskanta

olbrzymiego przeznaczonego do produkcji brykietów wynosiła odpowiednio 1207, 1162 i 640 kg·m<sup>-3</sup>.

4. Porowatość rozdrobnionego materiału z roślin energetycznych zależała od gatunku rośliny i sposobu jego rozdrobnienia oraz wymiarów i kształtu cząstek.

#### SPIS SYMBOLI

m	masa naczynia z materiałem, kg
m <sub>n</sub>	masa naczynia, kg
p <sub>1</sub>	ciśnienie w komorze pomiarowej, MPa
p <sub>2</sub>	ciśnienie w komorze odniesienia, MPa
V	objętość naczynia, m <sup>3</sup>
V <sub>A</sub>	objętość komory odniesienia, m <sup>3</sup>
V <sub>C</sub>	objętość komory pomiarowej, m <sup>3</sup>
V <sub>P</sub>	objętość badanego materiału, m <sup>3</sup>
ε <sub>L</sub>	porowatość materiału, %
ρ	gęstość właściwa, kg·m <sup>-3</sup>
ρ <sub>L</sub>	gęstość usypowa materiału rozdrobnionego, kg·m <sup>-3</sup>

#### LITERATURA CYTOWANA

- Andrejko D., 2005, *Wpływ wilgotności i wymiarów cząstek na gęstość sypkich surowców roślinnych*, Inżynieria Rolnicza, 11(71), 9-17.
- ANSI/ASAE S424.1 MAR1992 (R2007), 2011, *Method of determining and expressing participle size of chopped forage materials by screening*, ASABE STANDARDS, 791-794.
- Deshpande S. D., Bal S., Ojha T. P., 1993, *Physical properties of soybean*, J. Agric. Engng Res, 56(2), 89-98.
- Frączek J., Kaczorowski J., Ślipek Z., Horabik J., Molenda M., 2003, *Standaryzacja metod pomiaru właściwości fizyczno-mechanicznych roślinnych materiałów ziarnistych*, Rozprawy i Monografie 92, Lublin, 160 ss.
- Hejft R., Obidziński S., 2007, *Wpływ parametrów aparaturowo-procesowych na wartości nacisków zagęszczających w procesie granulowania pasz*, Inżynieria Rolnicza, 5(93), 313-319.
- Lisowski A., Nowakowski T., Sypuła M., Chołuj 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, 33-40.
- Mieszkalski L., 1999, *Badania podstawowych właściwości fizycznych nasion łubinów*, Problemy Inżynierii Rolniczej, 1, 51-58.
- PN-EN 13183-1:2004, 2004, *Wilgotność sztuki tarcicy*, Część 1: Oznaczenie wilgotności metodą suszarkowo-wagową, 7 ss.
- Sokhansanj S., Lang W., 1996, *Prediction of kernel and bulk volume of wheat and canola during adsorption and desorption*, J. Agric. Engng. Res., 63(2), 129-136.
- Sokhansanj S., Mani S., Bi X., Zaini P., Tabil L., 2005, *Binderless pelletization of biomass*, ASAE Paper No. 056061, ASAE, 2950 Niles Road, St. Joseph, MI 49085-9659 USA.
- Stolarski M., Szczukowski S., Tworowski J., Kwiatkowski J., Grzelczyk M., 2005, *Charakterystyka zrębków oraz peletów (granulatów) z biomasy wierzby i słazowca jako paliwa*, Problemy Inżynierii Rolniczej, 1(47), 13-22.
- Szot B., Stępniewski A., 2001, *Niektóre właściwości fizyczne nasion polskich odmian soczewicy*, Acta Agrophysica, 46, 187-196.
- Badania były finansowane przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwo Wyższego jako projekt zamawiany PBZ-MNiSW-1/3/2006*

#### Adres autorów:

Aleksander Lisowski, Adam Świętochowski  
Wydział Inżynierii Produkcji SGGW w Warszawie  
Katedra Maszyn Rolniczych i Leśnych  
02-787 Warszawa, ul. Nowoursynowska 164  
Polska  
e-mail: aleksander\_lisowski@sggw.pl