

WPLYW WILGOTNOŚCI NA PARAMETRY PROCESU ZAGĘSZCZANIA WYBRANYCH ROŚLIN ENERGETYCZNYCH

Ryszard Kulig, Stanisław Skonecki

Katedra Eksploatacji Maszyn Przemysłu Spożywczego, Uniwersytet Przyrodniczy
ul. Doświadczalna 44, 20-236 Lublin
e-mail: ryszard.kulig@up.lublin.pl

Streszczenie. Przedstawiono wyniki badań nad określeniem wpływu wilgotności biomasy roślinnej (miskant cukrowy, spartina preriowa i ślázowiec pensylwański) na parametry zagęszczania. W szczególności wyznaczono podatność surowca na zagęszczanie oraz jakość uzyskiwanych aglomeratów. Stwierdzono, że wraz ze wzrostem wilgotności, rośnie gęstość surowca w stanie zsypanym oraz gęstość materiału w komorze zagęszczania. Wykazano istnienie bardzo silnej liniowej zależności pomiędzy wilgotnością surowca a podatnością na zagęszczanie ($R = 0,98$). Stwierdzono, iż najniższe zapotrzebowanie energii występuje podczas zagęszczania mączki z miskanta (średnio $22,38 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$), najwyższe zaś odnosi się do aglomerowania ślázowca i wynosi średnio $29,21 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$. Natomiast odporność mechaniczna aglomeratu przyjmuje najwyższą wartość ($0,67 \text{ MPa}$) w odniesieniu do produktu otrzymanego ze ślázowca o wilgotności 10%.

Słowa kluczowe: zagęszczanie, brykietowanie, wilgotność, rośliny energetyczne

WSTĘP

Sprostanie założeniom strategii rozwoju energetyki odnawialnej wiąże się z koniecznością celowej uprawy specjalnych gatunków roślin z przeznaczeniem wyłącznie na cele energetyczne. Szczególnym uznaniem w tym kontekście cieszą się wieloletnie trawy, takie jak: spartina preriowa (*Spartina pectinata* Link.) i miskant cukrowy (*Miscanthus sacchariflorus* Maxim.) oraz wieloletnia bylina – ślázowiec pensylwański (*Sida hermaphrodita* Rusby) (Borkowska i Styk 2006, Kowalczyk-Juśko 2007, Lewandowski i in. 2000). Rośliny te zarówno w energetyce zawodowej, jak i ustawodawstwie traktowane są jako gatunki wykorzystywane na cele energetyczne. Odznaczają się one znaczną trwałością oraz dość wysokim przyrostem biomasy w ciągu okresu wegetacyjnego (Kościk 2003).

Niska wartość gęstości roślin energetycznych skutkuje koniecznością zmiany ich pierwotnej postaci w aglomeraty, uzyskiwane w procesie ciśnieniowego zagęszczania. Postępowanie takie pozwala znacznie zredukować koszty związane z obrotem i użytkowaniem biomasy roślinnej w energetyce zawodowej.

Z badań własnych wynika, iż w procesie wytwarzania formowanych biopaliw stałych szczególnego znaczenia nabiera wilgotność materiału (Skonecki 2010, Skonecki i Potręć 2008a, 2008b, 2010). Parametr ten wpływa zarówno na przebieg procesu (Kulig 2007), jak też jakość gotowego produktu (Kulig i Laskowski 2005, Mani i in. 2006). Przedstawione powyżej gatunki roślin – zależnie od terminu zbioru - charakteryzują się różnym stopniem wilgotności. W tzw. fazie mokrej wilgotność wynosi średnio 25% w grudniu i 20% w styczniu. Natomiast surowiec zebrany w tzw. fazie suchej przybiera wilgotność na poziomie 15% w marcu i 12% w kwietniu. Tak więc istnieje realna możliwość dostosowania terminu zbioru do wymagań technologicznych procesu wytwarzania aglomeratów (bez ewentualnej potrzeby dosuszania, czy też nawilżania surowca).

Mając na uwadze powyższe, za cel pracy przyjęto wyznaczenie wartości parametrów charakteryzujących proces zagęszczania ciśnieniowego biomasy roślinnej, charakteryzującej się różnym stopniem wilgotności.

MATERIAŁ I METODY

Materiał badawczy stanowiły mączki z miskanta cukrowego, spartiny preriewej i ślazuwca pensylwańskiego. Zbioru roślin dokonano w okresie gdy ślazuwiec znajdował się w stanie bezlistnym, zaś trawy były zaschnięte. Surowce rozdrabniano na rozdrabniaczu ML 500 wyposażonym w sito o wymiarach otworów ϕ 4mm. Po rozdrobnieniu materiał badawczy doprowadzano do wilgotności od 10% do 22% (co 3% $\pm 0,2\%$). Wilgotność surowca wyznaczono metodą suszarkową zgodnie z PN-ISO 712:2002. Dla surowców o wilgotności 10% określono gęstość w stanie zsypanym, skład granulometryczny oraz średni wymiar cząstek po rozdrobnieniu.

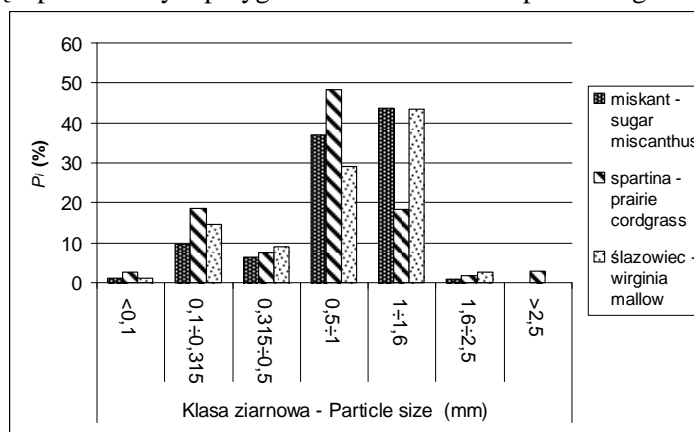
Oznaczenie gęstości w stanie zsypanym (masy usypowej) wykonano zgodnie z PN-ISO 7971-2:1998 przy pomocy gęstościomierza zbożowego RP T 01 77 o objętości 1 dm³.

Skład granulometryczny surowców wyznaczono zgodnie z PN-89/R-64798 przy wykorzystaniu laboratoryjnego przesiewacza SASKIA Thyr 2 i zestawu sit o wymiarach oczek: 2,5; 1,6; 1,0; 0,5; 0,315; 0,1 mm. Czas trwania odsiewu wynosił pięć minut. Po przesianiu każdą klasę wymiarową ważono na wadze WPE 300 z dokładnością do $\pm 10^{-2}$ g. Średni wymiar cząstek (moduł rozdrobnienia) obliczono ze wzoru:

$$d_s = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} h_i \cdot P_i}{100} \quad (1)$$

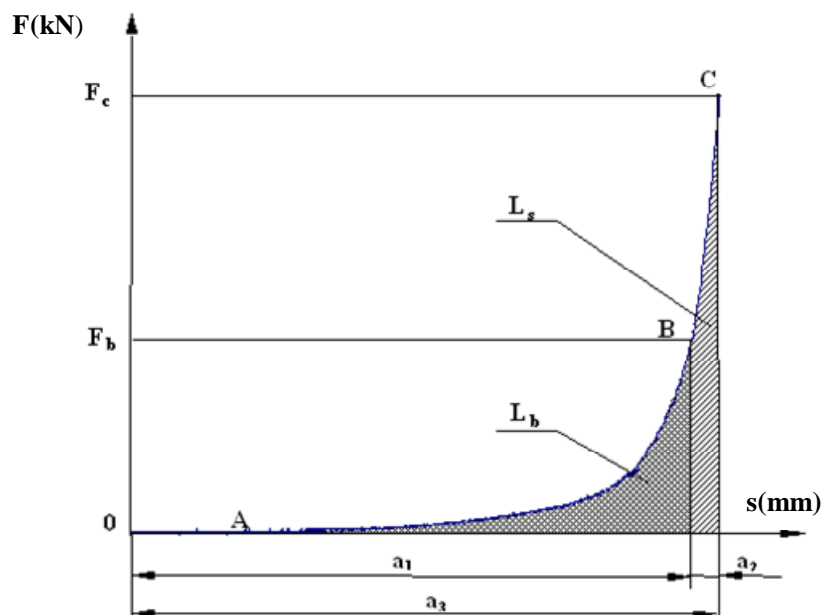
gdzie: d_s – średni wymiar cząstek, mm; h_i – średni wymiar otworów dwóch sąsiednich sit, mm; P_i – pozostałości cząstek zatrzymanych na danym sicie, %; n – liczba stosowanych sit.

Wyniki oznaczeń składu granulometrycznego surowców po rozdrobnieniu przedstawiono na rysunku 1. We wszystkich przypadkach najliczniejszą frakcję stanowiły cząstki należące do przedziału wymiarowego od 0,5 do 1,6 mm. Natomiast średni wymiar cząstek badanych surowców przedstawiał się następująco: miskant 0,91 mm, spartina 0,76 mm, ślázowiec 0,90 mm. Tak więc otrzymane wyniki świadczą o prawidłowym przygotowaniu surowca do procesu aglomerowania.



Rys. 1. Udział procentowy (P_i) poszczególnych frakcji badanych surowców
Fig. 1. Particle size distribution (P_i) of studied raw materials

Badania ciśnieniowego zagęszczania wykonano zgodnie z metodyką przedstawioną przez Laskowskiego i Skoneckiego (2001). Zagęszczanie surowca prowadzono przy użyciu maszyny wytrzymałościowej Zwick Z020/TN2S. W badaniach wykorzystano zespół prasujący z matrycą zamkniętą. Średnica komory zagęszczania wynosiła 15 mm, temperatura cylindra (materiału zagęszczanego) 20°C, prędkość przemieszczania tłoka 10 mm·min⁻¹. Efektem pomiaru była krzywa opisująca zależność siły zagęszczania F od przemieszczenia tłoka s (rys. 2). Materiał zagęszczano do momentu osiągnięcia wartości siły równej 20 kN. Dla tak ustalonych warunków otrzymywano ciśnienie zagęszczania na poziomie 114 MPa. Zagęszczanie prowadzono każdorazowo w trzech powtórzeniach.



Rys. 2. Charakterystyka zagęszczania: a_1 – zagęszczanie właściwe, a_2 – ściskanie, a_3 – prasowanie (Laskowski i Skonecki 2001)

Fig. 2. Characteristic of compaction process: a_1 – proper compaction, a_2 – compressing, a_3 – pressing (Laskowski and Skonecki 2001)

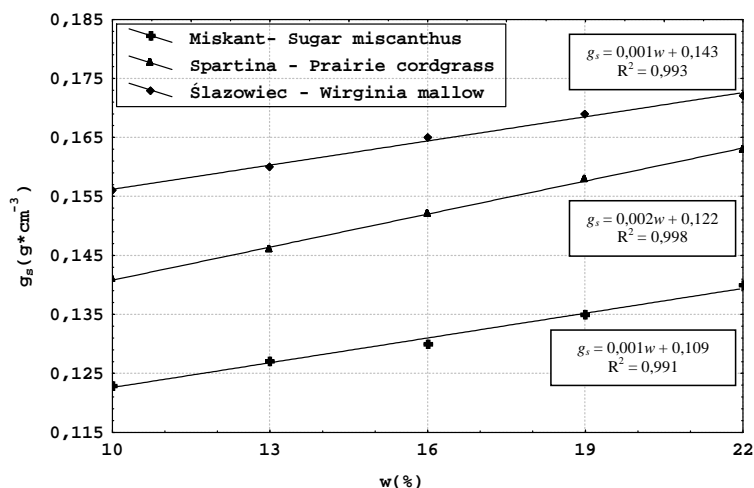
Z krzywej zagęszczania wyznaczono: maksymalną gęstość materiału w komorze g_z , całkowitą pracę zagęszczania L_c . Na tej podstawie obliczono współczynnik podatności materiału na zagęszczanie k_c ($k_c = L_p \cdot (g_z - g_s)^{-1}$, gdzie: $L_p = L_c \cdot m^{-1}$ – jednostkowa praca zagęszczania, m – masa próbki materiału, g_s – gęstość początkowa materiału w stanie zsypanym). Dla otrzymanego brykietu określono gęstość aglomeratu bezpośrednio po wyjęciu z komory g_a .

Następnie określano jakość aglomeratu ze względu na wytrzymałość mechaniczną. Wyznaczono tzw. odporność mechaniczną aglomeratu w teście ściskania „brazylijskim” (Li i In. 2000, Ruiz i In. 2000). W badaniach wykorzystano maszynę wytrzymałościową ZWICK Z020/TN2S (prędkość przemieszczania głowicy wynosiła $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$). Aglomerat o średnicy d i długości l ścisniano poprzecznie do osi do momentu zniszczenia (pęknięcia) po czym wyznaczono maksymalną siłę niszczącą F_n . Odporność mechaniczną o_m (MPa) obliczono ze wzoru:

$$o_m = \frac{2 \cdot F_n}{\pi \cdot d \cdot l} \quad (2)$$

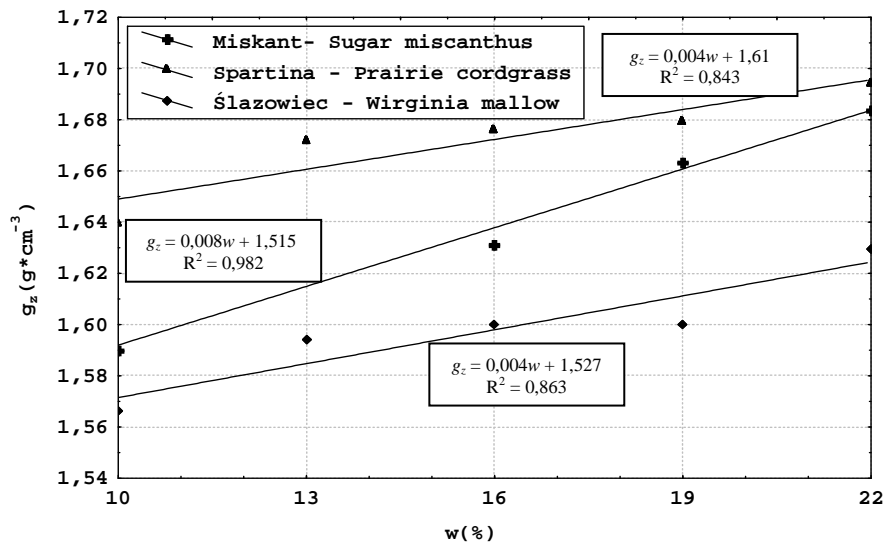
WYNIKI BADAŃ

Oddziaływanie wilgotności surowca na jego gęstości w stanie zsylnym zobrazowano na rysunku 3. W odniesieniu do wszystkich badanych surowców stwierdzono istnienie istotnych zależności (wysokie współczynniki korelacji). Zakres zmienności rozpatrywanego parametru wynosi od $0,123 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (miskant o wilgotności 10%) do $0,173 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (ślazowiec o wilgotności 22%). Najwyższe wartości gęstości odnotowano dla ślazuowca. Jest to zapewne wynikiem tego, iż w odróżnieniu od dwóch pozostałych, surowiec ten występuje w postaci zdrewniałych łodyg. Stąd też w postaci pierwotnej (przed rozdrobnieniem) ma większą gęstość właściwą niż trawy. Również w przypadku gęstości materiału w komorze zagęszczania (rys. 4), wraz ze wzrostem wilgotności surowca, wartość parametru ulega zwiększeniu. Średnie wielkości wahają się w przedziale od 1,57 do 1,69 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Jednak w tym przypadku największe wartości dotyczą spartiny, najniższe zaś ślazuowca.



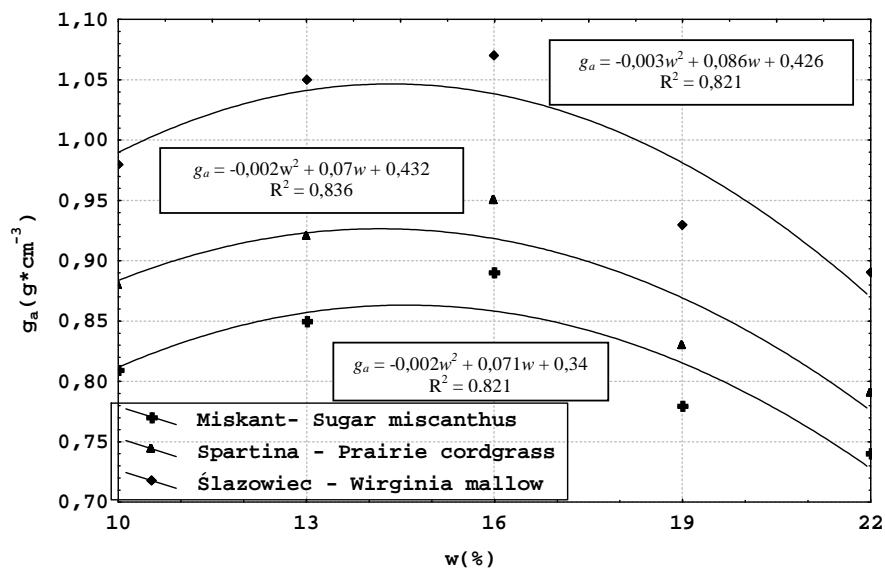
Rys. 3. Zależność gęstości w stanie zsylnym (g_s) od wilgotności surowca (w)
Fig. 3. Relation of bulk density (g_s) to material moisture (w)

Zmiany gęstości aglomeratu po wyjęciu z komory zagęszczania przedstawiono na rysunku 5. W przypadku wszystkich badanych surowców największe wartości parametru stwierdzono dla wilgotności 16%, najmniejsze zaś dla wilgotności 22%. Najmniejszemu rozprężeniu ulega aglomerat ze ślazuowca. W tym przypadku, w przedziale wilgotności 13-16%, otrzymuje się produkt o gęstości przekraczającej $1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Natomiast najmniejszą gęstość wykazuje aglomerat z miskanta, a otrzymane wartości nie przekraczają $0,9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.



Rys. 4. Zależność gęstości materiału w komorze (g_z) od wilgotności surowca (w)

Fig. 4. Relation of material density in the chamber (g_z) to material moisture (w)

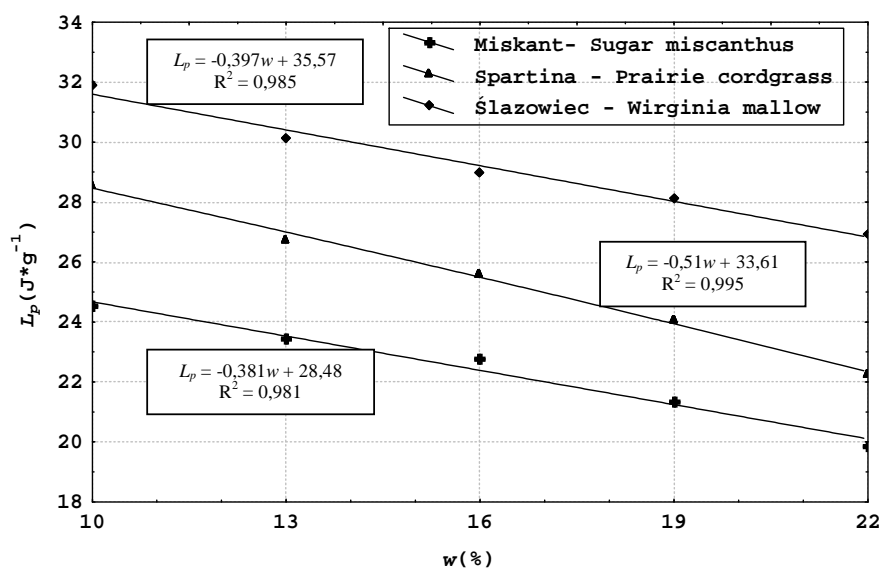


Rys. 5. Zależność gęstości aglomeratu (g_a) od wilgotności surowca (w)

Fig. 5. Relation of agglomerate density (g_a) to material moisture (w)

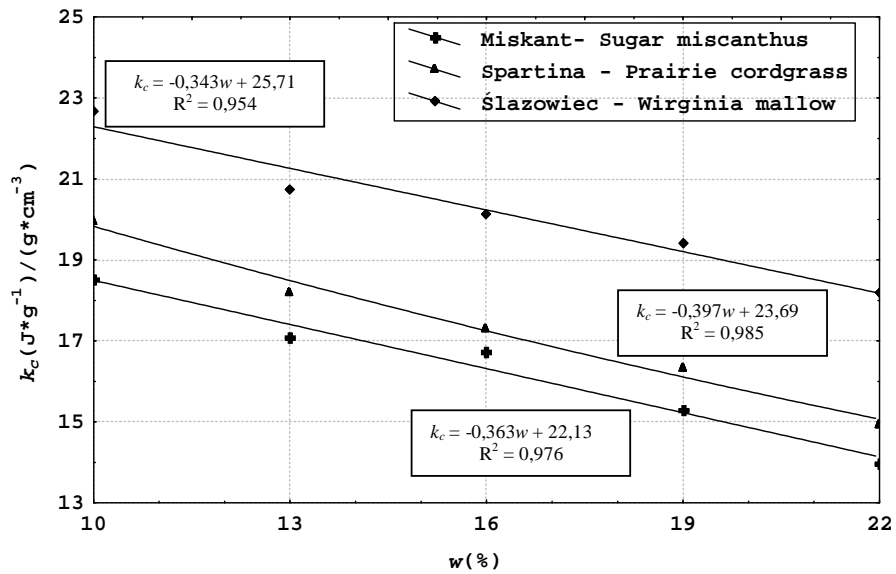
Z kolei na rysunkach 6 i 7 pokazano, iż zwiększanie wilgotności surowca powoduje wzrost jego podatności na zagęszczanie. Przypuszczalnie materiał na skutek wzrostu wilgotności staje się bardziej plastyczny dzięki czemu nakłady energii niezbędne do jego zagęszczenia maleją. Wartość jednostkowej pracy zagęszczania (rys. 6) zawiera się dla badanych surowców w przedziale od 19,86 do 31,87 J·g⁻¹. Największe wartości parametru L_p uzyskano dla ślazu (od 31,87 J·g⁻¹ dla $w = 10\%$ do 26,94 J·g⁻¹ dla $w = 22\%$), a najmniejsze dla miskanta (od 24,53 J·g⁻¹ dla $w = 10\%$ do 19,86 J·g⁻¹ dla $w = 22\%$). Podobny charakter zależności zaobserwowano również w odniesieniu do współczynnika podatności materiału na zagęszczanie. Jego wartości zawierają się w przedziale od 22,68 (J·g⁻¹)·((g·cm⁻³)⁻¹) do 13,97 (J·g⁻¹)·((g·cm⁻³)⁻¹) (rys. 7). Największą wartość k_c uzyskano dla ślazu o wilgotności 10%, natomiast najmniejszą dla miskanta o wilgotności 22%.

Wyniki badań odporności mechanicznej aglomeratu (rys. 8) wykazują, że ze wzrostem wilgotności badanych materiałów maleje wytrzymałość mechaniczna brykietów. Najwyższą odpornością mechaniczną cechują się aglomeraty wytworzone ze ślazu (wartość parametru dla tego surowca zawiera się w przedziale od 0,55 MPa do 0,67 MPa). Natomiast aglomeraty uzyskane z traw charakteryzują się o wiele niższymi wartościami analizowanego parametru, nie przekraczającymi wartości 0,44 MPa (spartina o wilgotności 10%).



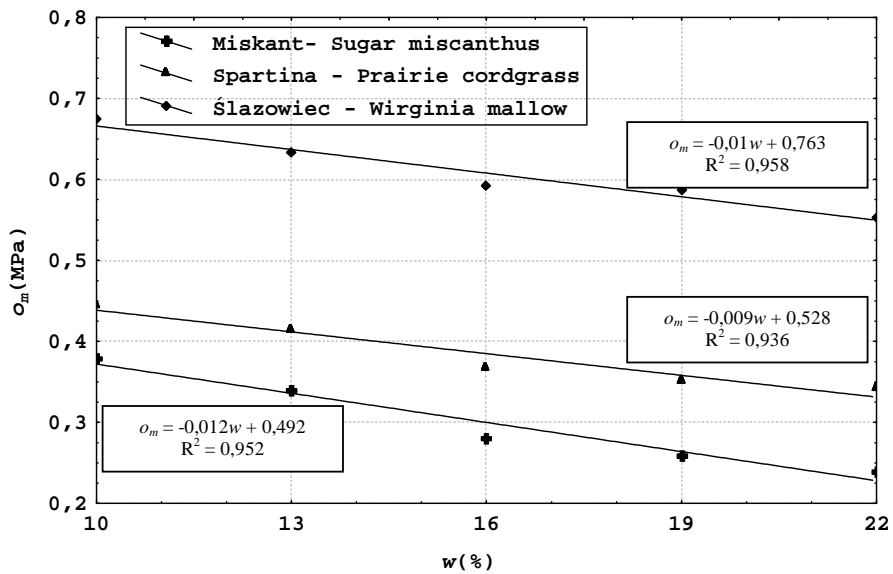
Rys. 6. Zależność jednostkowej pracy zagęszczania (L_p) od wilgotności materiału (w)

Fig. 6. Specific compression work (L_p) in relation to material moisture (w)



Rys. 7. Zależność współczynnika (k_c) od wilgotności materiału (w)

Fig. 7. Coefficient (k_c) in relation to material moisture (w)



Rys. 8. Zależność odporności mechanicznej aglomeratu (o_m) od wilgotności materiału (w)

Fig. 8. Agglomerate mechanical strength (o_m) in relation to material moisture (w)

WNIOSKI

1. Stwierdzono istnienie silnej dodatniej korelacji pomiędzy wilgotnością surowca a wartością jego gęstości w stanie zsypanym oraz gęstością materiału w komorze zagęszczania. W przyjętym zakresie badawczym, średni przyrost gęstości nasypowej surowca wynosi 12,4%, a gęstości w komorze zagęszczania 4,5%.

2. Gęstość aglomeratu po wyjęciu z komory zagęszczania (niezależnie od gatunku rośliny) przyjmuje najwyższe wartości dla surowca o wilgotności 16%, najniższe zaś dla wilgotności 22%. Jednocześnie zaobserwowano, że w najmniejszym stopniu rozpręża się aglomerat ze ślazuwca.

3. Wykazano, iż wzrost wilgotności surowca wpływa korzystnie na zwiększenie jego podatności na zagęszczanie. Przeciętny spadek jednostkowego zapotrzebowania na energię aglomerowania (w przedziale wilgotności 10-22%) wynosi 14,7%, a współczynnika k_c 22,7%. Spośród badanych surowców, największą podatność na zagęszczanie wykazuje miskant. W odniesieniu do wartości współczynnika k_c jest ona średnio o 24% wyższa od podatności ślazuwca.

4. Zwiększanie wilgotności materiału w badanym przedziale powoduje spadek odporności mechanicznej otrzymywanych aglomeratów średnio o 25%. Najwyższe wartości parametru odnoszą się do produktu otrzymanego ze ślazuwca i są przeciętnie o 100% wyższe od produktu z miskanta, dla którego odnotowano wartości najniższe.

PIŚMIENNICTWO

- Borkowska H., Styk B., 2006. Ślazuwec pensylwański (*Sida hermaphrodita* Rusby) uprawa i wykorzystanie. Wyd. AR w Lublinie.
- Kościk B., 2003. Rośliny energetyczne. Wyd. AR w Lublinie.
- Kowalczyk-Juško A., 2007. Źródła biomasy na cele energetyczne. Bioenergetyka podkarpacka. Wydawnictwo PWSZ, Jarosław.
- Kulig R., Laskowski J., 2005. Wpływ procesu kondycjonowania surowców zbożowych na wybrane właściwości fizyczne granulatu. *Acta Agrophysica*, 5(2), 325-334.
- Kulig R., Laskowski J., 2006. Wpływ wybranych właściwości surowców na cechy wytrzymałościowe granulatu. *Inżynieria Rolnicza*, 13(88), 251-260.
- Kulig R., 2007. Effects of Conditioning Methods on Energy Consumption During Pelleting. *Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa*, tom 7A, 52-58.
- Laskowski J., Skonecki S., 2001. Badania procesów aglomerowania surowców paszowych – aspekt metodyczny. *Inżynieria Rolnicza*, 2(22), 187-193.
- Lewandowski I., Clinton-Brown J.C., Scurlock J.M.O., Huisman W., 2000. Miscanthus: European experience with a novel energy crop. *Biomass and Bioenergy*, vol. 19, 209-227.
- Li Y., Wu D., Zhang J., Chang L., Wu D., Fang Z., Shi Y., 2000. Measurement and statistics of single pellet mechanical strength of differently shaped catalysts. *Powder Technology*, 113, 176-184.

- Mani S., Tabil L.G., Sokhansanj S., 2006. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. *Biomass and Bioenergy*, 30(7), 648-654.
- Ruiz G., Ortiz M., Pandolfi A., 2000. Three-dimensional finite-element simulation of the dynamic Brazilian tests on concrete cylinders. *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, 48, 963-994.
- Skonecki S., 2010. Brykietowanie wybranej biomasy roślinnej na cele energetyczne – parametry procesu i wytrzymałość aglomeratu. *Autobusy, Technika, Eksploatacja, Systemy transportowe*, 11, 335-345.
- Skonecki S., Potręć M., 2008a. Wpływ wilgotności łusek kolb kukurydzy na parametry zagęszczania. *Acta Agrophysica*, 11 (3), 725-732.
- Skonecki S., Potręć M., 2008b. Wpływ wilgotności słomy owsianej na podatność na zagęszczanie. Rozdział nr 9 w Monografii pod redakcją B. Dobrzańskiego, A. Rutkowskiego i R. Rybczyńskiego „Właściwości fizyczne i biochemiczne materiałów roślinnych”. Wyd. Nauk. FRNA, Komitet Agrofizyki PAN, Lublin, 147-156. ISBN-13: 978-83-60489-09-3.
- Skonecki S., Potręć M., 2010. Wpływ wilgotności na ciśnieniowe zagęszczanie biomasy roślinnej. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 546, 341-346.

INFLUENCE OF MOISTURE CONTENT OF SELECTED ENERGY CROPS ON THE PARAMETERS OF COMPACTION

Ryszard Kulig, Stanisław Skonecki

Department of Machine Operation in Food Industry, University of Life Sciences
ul. Doświadczalna 44, 20-236 Lublin
e-mail: ryszard.kulig@up.lublin.pl

Abstract. The paper presents the results of a study on the influence of moisture content of plant biomass (sugar miscanthus, prairie cordgrass, Virginia mallow) on the parameters of compaction. In particular, the compaction ability of raw material and the quality of obtained agglomerates were determined. It was found that the higher the moisture content the greater the bulk density of raw material and the density of plant biomass in the chamber. A strong linear relationship between moisture of raw material and compaction ability was noted ($R = 0.98$). The lowest energy outcomes were noted during compaction of sugar miscanthus (average 22.38 J g^{-1}) and the highest during compaction of Virginia mallow – at about 29.21 J g^{-1} . The agglomerated Virginia mallow, with moisture of 10%, was shown to have the highest value of mechanical strength of about 0.67 MPa.

Key words: compaction, briquetting, moisture, energy crops