MOTROL. COMMISSION OF MOTORIZATION AND ENERGETICS IN AGRICULTURE – 2014, Vol. 16, No. 1, 55–58

Określenie zależności między ciśnieniem a parametrami zagęszczania wybranych roślin energetycznych

Ryszard Kulig[1], Grzegorz Łysiak[1], Stanisław Skonecki[1]
Zbigniew Kobus[2], Leszek Rydzak[2], Tomasz Guz[2]

[1]Katedra Eksploatacji Maszyn Przemysłu Spożywczego, [2]Katedra Inżynierii i Maszyn Spożywczych
Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie
ul. Doświadczalna 44, 20-280 Lublin; e-mail:ryszard.kulig@up.lublin.pl

Streszczenie. Przedstawiono wyniki badań efektywności zagęszczania topinamburu i mozgi trzcinowatej. Oceniono podatność badanych materiałów na proces aglomerowania ciśnieniowego w zależności od stosowanego ciśnienia zagęszczania (od 45 do 113 MPa).

Zagęszczanie przeprowadzano przy wykorzystaniu maszyny wytrzymałościowej Zwick typ Z020/TN2S i zespołu prasującego z matrycą zamkniętą. Stwierdzono, że wraz ze wzrostem ciśnienia rosła gęstość materiału w komorze i gęstość aglomeratu (przeciętnie o 26%) oraz zwiększała się odporność mechaniczna produktu (średnio o 83%). Zwiększanie ciśnienia zagęszczania w analizowanym przedziale powodowało wzrost wartości jednostkowej pracy zagęszczania średnio o 72%.

Słowa kluczowe: topinambur, mozga trzcinowata, zagęszczanie, energochłonność aglomerowania ciśnieniowego, jakość aglomeratów.

WSTĘP

Biomasa jako surowiec do produkcji biopaliw stałych może pochodzić zarówno z drewna, jak też ze źródeł rolniczych. Niemniej jednak istniejące ograniczenia możliwości wykorzystania drewna opałowego z lasów oraz drewna odpadowego z przemysłu, wymuszają konieczność szerszego stosowania do produkcji biopaliw stałych biomasy pochodzącej z rolnictwa [4, 5, 7]. Dobrym rozwiązaniem dla pozyskiwania biomasy nieleśnej mogą być celowe uprawy roślin energetycznych. Wśród nich szczególnym uznaniem cieszą się rośliny należące do wieloletnich traw i bylin takie jak mozga trzcinowata i topinambur [1, 3, 6]. Są to gatunki o znacznej trwałości i wysokim plonowaniu. Rośliny te zarówno w energetyce, jak i w krajowym ustawodawstwie [16] traktowane są jako gatunki wykorzystywane na cele energetyczne [4].

Efektywne wykorzystanie biomasy roślinnej w energetyce wiąże się z koniecznością zmiany jej postaci w aglomeraty, co zapewnia odpowiednie „zagęszczenie energii" [2]. W literaturze przedmiotu brak jest jednoznacznej oceny podatności wyżej wymienionych gatunków roślin energetycznych na proces aglomerowania ciśnieniowego.

W procesie wytwarzania kompaktowanych biopaliw stałych szczególnego znaczenia nabiera wartość stosowanego ciśnienia zagęszczania (jednostkowego nacisku tłoka) [10, 11, 12]. We wcześniejszych pracach przedstawiono wyniki badań wpływu tego parametru na efektywność zagęszczania ciśnieniowego biomasy różnego pochodzenia [8, 14, 15]. Niniejsza praca stanowi kontynuację badań prowadzonych w tym zakresie. Stąd też za cel pracy przyjęto określenie wpływu jednostkowego nacisku tłoka na parametry procesu zagęszczania rozdrobnionej biomasy topinamburu i mozgi trzcinowatej.

MATERIAŁY I METODY

Surowce będące materiałem badawczym (topinambur i mozga trzcinowata) cięto na sieczkę o długości 20 mm. Następnie tak przygotowany materiał rozdrabniano przy wykorzystaniu rozdrabniacza bijakowego (typ ML-500), zaopatrzonego w sito o średnicy otworów f 4 mm. Zagęszczanie wykonano dla surowca o wilgotności 12%.

W badaniach zagęszczania wykorzystano maszynę wytrzymałościową ZWICK typ Z020/TN25 oraz zespół prasujący z matrycą zamkniętą. Badania te wykonano zgodnie z metodyką przedstawioną przez Laskowskiego i Skoneckiego [9]. Zastosowano matrycę o średnicy komory *d* wynoszącej 15 mm, w której zagęszczano materiał o masie 2 g. Temperatura cylindra (materiału zagęszczanego) wynosiła 20°C, a prędkość przemieszczania tłoka 10 $mm \cdot min^{-1}$. Zagęszczanie prowadzono dla pięciu wartości maksymalnej siły zagęszczania tj. 8, 11, 14, 17 i 20 kN, co odpowiadało następującym wartościom ciśnienia zagęszczania: 45, 62, 79, 96 i 113 MPa. Zagęszczanie prowadzono każdorazowo w trzech powtórzeniach.

Efektem pomiaru była krzywa tzw. charakterystyka zagęszczania – zależność siły zagęszczania od przemieszczenia tłoka. Z krzywej wyznaczono maksymalną gęstość materiału w komorze ρ_c, całkowitą pracę zagęszczania L_c. Obliczono współczynnik podatności materiału na zagęszczanie k_c ($k_c = L_c' \cdot (\rho_c - \rho_n)^{-1}$, gdzie: $L_c' = L_c \cdot m^{-1}$ – jednostkowa praca zagęszczania, m – masa próbki materiału, ρ_n – gęstość początkowa materiału w stanie zsypnym. Dla otrzymanego brykietu określono gęstość aglomeratu po 48 h. przechowywania ρ_a.

Ponadto, dla oceny spadku gęstości aglomeratu w wyniku ekspansji zwrotnej obliczono wskaźnik rozprężania aglomeratu S_{ra} jako iloraz gęstości ρ_a i ρ_c ($S_{ra} = \rho_a . \rho_c^{-1}$).

Następnie określano jakość aglomeratu ze względu na wytrzymałość mechaniczną. Wyznaczono tzw. odporność mechaniczną aglomeratu w teście ściskania „brazylijskim". W badaniach wykorzystano maszynę wytrzymałościową ZWICK Z020/TN2S. Odporność mechaniczną σ_n [MPa] obliczono ze wzoru [13]:

$$\sigma_n = \frac{2F_n}{\pi\, dl} \quad \text{(MPa)}, \qquad (1)$$

gdzie:
d – średnica aglomeratu [mm],
l – długość aglomeratu [mm],
F_n – siła niszcząca aglomerat [N].

WYNIKI BADAŃ

Równania regresji, opisujące zależności badanych parametrów procesu od ciśnienia zagęszczania zestawiono w tab. 1.

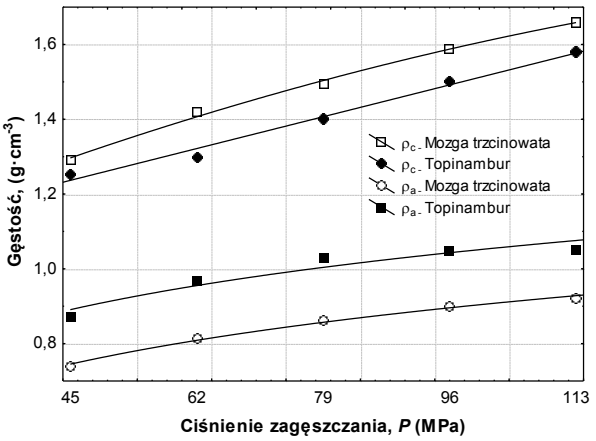
Tabela 1. Równania regresji opisujące zależność gęstości ρ_c, ρ_a, pracy L_c', współczynnika k_c, wskaźnika rozprężenia aglomeratu S_{ra}, i odporności mechanicznej δ_m od ciśnienia zagęszczania P oraz wartości współczynnika determinacji R^2

Table 1. Regression equations describing the correlations between density ρ_c, ρ_a, compactive effort L_c', coefficient k_c, degree of expansion of agglomerate S_{ra} and mechanical strength δ_m and compaction pressure P and the values of determination coefficient R^2

Cecha	Surowiec	Równanie regresji	R^2
Gęstość materiału w komorze, ρ_c	Mozga t. Topinambur	$\rho_c = 0{,}006P + 1{,}07$ $\rho_c = 0{,}005P + 1{,}01$	0,989 0,987
Gęstość aglomeratu po 48 godz., ρ_a	Mozga t. Topinambur	$\rho_a = 0{,}199 \ln P - 0{,}013$ $\rho_a = 0{,}201 \ln P + 0{,}126$	0,992 0.915
Wskaźnik rozprężenia aglomeratu, S_{ra}	Mozga t. Topinambur	$S_{zm} = 0{,}28 \ln P - 0{,}759$ $S_{zm}' = 0{,}188 \ln P - 0{,}304$	0,988 0,969
Odporność mechaniczna aglomeratu, δ_m	Mozga t. Topinambur	$\delta_m = 0{,}223 \ln P - 0{,}623$ $\delta_m' = 0{,}295 \ln P - 0{,}704$	0,996 0,964
Praca zagęszczania, L_c'	Mozga t. Topinambur	$L_c' = 0{,}161P + 8{,}914$ $L_c' = 0{,}2P + 9$	0,992 0,989
Współczynnik podatności materiału na zagęszczanie, k_c	Mozga t. Topinambur	$k_c = 0{,}103P + 7{,}46$ $k_c = 0{,}115P + 8{,}692$	0,956 0,998

Analiza regresji (α_i=0,01) wykazała, że otrzymane zależności mogą być opisane równaniami liniowymi lub równaniami logarytmicznymi. Zależności te przedstawiono na rysunkach 1-4.

Wyniki badań zobrazowane na rys. 1 wskazują, że zwiększenie ciśnienia zagęszczania od 45 do 113 MPa powodowało wzrost gęstości materiału w komorze ρ_c. Zakres zmienności analizowanego parametru wynosił od 1,255 do 1,661 g·cm^{-3}.



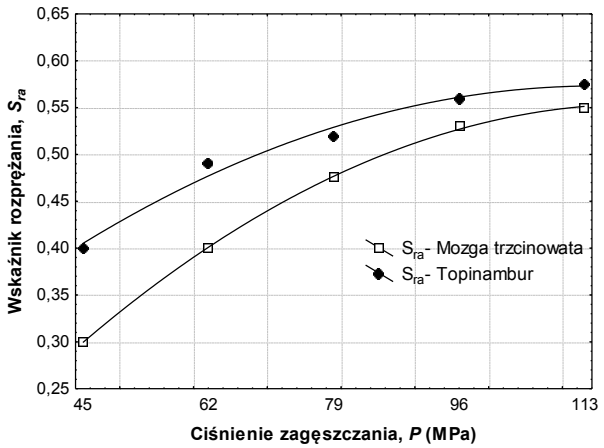
Rys. 1. Zależność między gęstością materiału w komorze zagęszczania (ρ_c) i gęstością aglomeratu (ρ_a) a ciśnieniem zagęszczania (P)

Fig. 1. Correlation between material density in the chamber (ρ_c), agglomerate density (ρ_a) and compaction pressure (P)

Za każdym razem wyższą wartość gęstości otrzymywano dla mozgi trzcinowatej. Fakt ten przypuszczalnie wynikał z tego, iż topinambur w stanie naturalnym występuje w postaci zdrewniałych łodyg. Stąd też twarde włókna, zawarte w tym surowcu, powodowały uzyskiwanie mniejszych gęstości materiału w komorze w porównaniu z mozgą trzcinowatą. Niemniej jednak gęstość aglomeratu po wyjęciu z komory zagęszczania i przechowywaniu była wyższa w przypadku topinamburu (zakres zmienności od 0,871 do 1,051 g·cm^{-3}. Natomiast gęstość aglomeratu z mozgi trzcinowatej zawierała się w przedziale od 0,739 do 0,922 g·cm^{-3}. Największy wzrost gęstości ρ_a następował w przedziale ciśnienia 45 – 96 MPa. Z kolei dalsze zwiększanie ciśnienia praktycznie nie przyczyniało się do wzrostu gęstości otrzymywanego aglomeratu. W odniesieniu do ciśnień 96 i 113 MPa, otrzymane różnice w wartościach parametru r_a, były statystycznie nieistotne (p>0,01).

Zmiany wskaźnika rozprężenia aglomeratu w zależności od ciśnienia zagęszczania zobrazowano na rys. 2. Uzyskane wartości parametru S_{ra} mieściły się w przedziale od 0,311 do 0,575 g·cm^{-3}. Przedstawione wyniki zdają się potwierdzać prawidłowość wykazaną dla zmian gęstości aglomeratu po przechowywaniu (rys.1). Wyższe wartości S_{ra} otrzymane dla topinamburu, świadczą o tym, iż aglomerat wytworzony z tego surowca ulegał w mniejszym stopniu swobodnemu rozprężaniu niż produkt otrzymany z mozgi trzcinowatej. W konsekwencji dzięki temu osiągał wyższe wartości gęstości. Dla obydwu badanych materiałów, tak jak w przypadku zmian gęstości r_a, największy wzrost

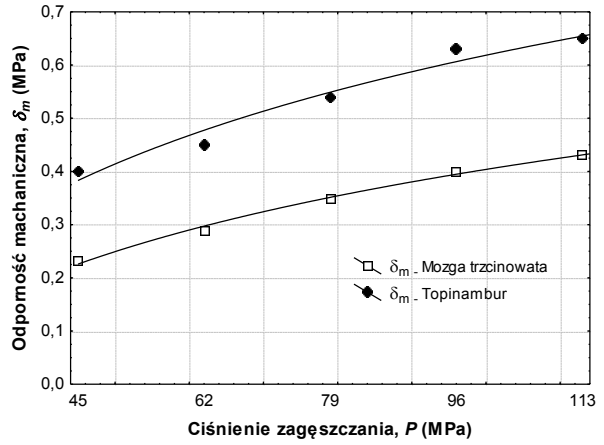
wartości parametru S_{ra} następował w przedziale ciśnienia 45–96 MPa.



Rys. 2. Zależność między wskaźnikiem rozprężenia aglomeratu *(S_{ra})* a ciśnieniem zagęszczania (*P*)

Fig.2. Correlation between degree of expansion of agglomerate *(S_{ra})* and compaction pressure (*P*)

Mniejsze rozprężenie aglomeratu, uzyskiwane w wyniku zwiększania ciśnienia zagęszczania, wpływało dodatnio na wytrzymałość mechaniczną uzyskanych produktów. Wyniki badań odporności mechanicznej wykazały, że wraz ze wzrostem ciśnienia rosła wytrzymałość mechaniczna aglomeratu niezależnie od surowca (rys. 3).

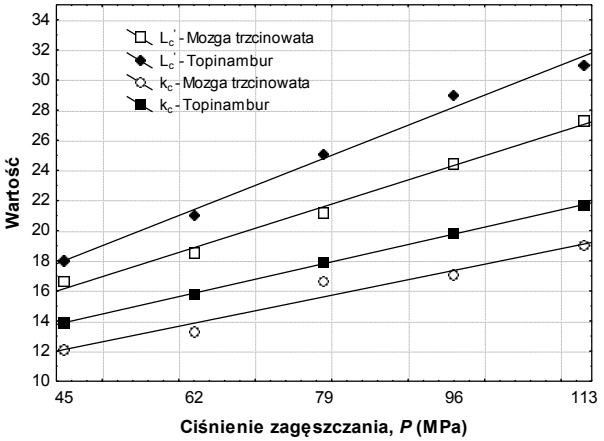


Rys. 3. Zależność między odpornością mechaniczną aglomeratu *(δ_m)* a ciśnieniem zagęszczania (*P*)

Fig. 3. Correlation between mechanical strength of agglomerate *(δ_m)* and compaction pressure (*P*)

Najwyższą odpornością mechaniczną (0,65 MPa) cechował się aglomerat z topinamburu otrzymany podczas stosowania ciśnienia 113 MPa. Natomiast najniższą wartość analizowanego parametru (0,23 MPa) przyjmował produkt wytworzony z mozgi, zagęszczanej przy ciśnieniu 45 MPa.

Z kolei wyniki badań przedstawione na rys. 4. wskazują, że otrzymywanie aglomeratów o największej gęstości i odporności mechanicznej wiązało się za każdym razem z ponoszeniem wyższych nakładów energetycznych. Zwiększenie jednostkowego nacisku tłoka powodowało zwiększenie jednostkowej pracy zagęszczania dla każdego badanego surowca. Wartość pracy L_c' zawierała się w przedziale od 16,66 J·g^{-1} dla ciśnienia 45 MPa (mozga trzcinowata) do 31,23 J·g^{-1} dla ciśnienia 113 MPa (topinambur). Należy również zauważyć, że wyższą energochłonnością (średnio o 16%) charakteryzowało się przetwarzanie topinamburu. Prawidłowość taka występowała w całym badanym przedziale ciśnienia zagęszczania. Tak więc i w tym przypadku dało się zaobserwować, że obecność twardych włókien w topinamburze wpływała prawdopodobnie na wzrost współczynnika tarcia materiału w komorze zagęszczania. Stąd też podatność topinamburu na zagęszczanie była mniejsza od podatności mozgi trzcinowatej o czym świadczą otrzymane wartości współczynnika k_c (rys. 4).



Rys. 4. Zależność między jednostkową pracą zagęszczania (L_c) i współczynnikiem podatności materiału na zagęszczanie (k_c) a ciśnieniem zagęszczania (*P*)

Fig. 4. Correlation between compaction effort (L_c), coefficient of susceptibility to compaction (k_c) and compaction pressure (*P*)

WNIOSKI

Na podstawie wyników badań można sformułować następujące wnioski:

1. Wykazano, iż gęstość materiału w komorze zagęszczania rośnie w całym badanym przedziale zmienności ciśnienia przeciętnie o 25 %.
2. Wzrost ciśnienia zagęszczania w przedziale 45-96 MPa powoduje zwiększenie gęstości aglomeratu (przeciętnie o 26%) oraz wartości wskaźnika rozprężenia aglomeratu (średnio o 51%). Natomiast dalsze zwiększanie ciśnienia nie przynosi istotnych statystycznie zmian wartości analizowanych parametrów.
3. Stwierdzono, że zwiększanie ciśnienia zagęszczania w badanym przedziale, przyczynia się do wzrostu wytrzymałości mechanicznej otrzymywanych aglomeratów – średnio o 83%. Wyższe wartości parametru (przeciętnie o 54%) stwierdzono w odniesieniu do produktu otrzymanego z topinamburu.
4. Jednostkowa praca zagęszczania oraz współczynnik materiału na zagęszczanie zwiększają się wraz ze wzrostem ciśnienia zagęszczania. Średnie zmiany w pierwszym przypadku wynoszą 72%, a w drugim 56%.

LITERATURA

1. **Czeczko R., 2011:** Porównanie stopnia uwodnienia różnych części *helianthus tuberosus* aspekcie ich przydatności jako biopaliwa. Ochrona środowiska i zasobów naturalnych, nr 49:521-524.
2. **Hejft R., 2002:** Ciśnieniowa aglomeracja materiałów roślinnych. Politechnika Białostocka. Wyd. i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu.
3. **Komorowicz M., Wróblewska H., Pawłowski J., 2009:** Skład chemiczny i właściwości energetyczne biomasy z wybranych surowców odnawialnych. Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych, nr 40:402-410.
4. **Kościk B., 2003:** Rośliny energetyczne. Wydawnictwo AR w Lublinie.
5. **Kowalczyk-Juśko A., Kulig R., Laskowski J., 2011.** The influence of moisture content of selected energy crops on the briqueting process parameters. Teka Commission of Motorization and Energetics in Agriculture, vol 11:189-196.
6. **Księżak J., Faber A., 2007:** Ocena możliwości pozyskiwania biomasy z mozgi trzcinowatej na cele energetyczne. Łąkarstwo w Polsce, 10:141-148.
7. **Kulig R., Laskowski J., 2011:** The effect of preliminary processing on compaction parameters of oilseed rape straw. Teka Commission of Motorization and Energetics in Agriculture, vol. 11:209-217.
8. **Kulig R., Skonecki S., Łysiak G., Laskowski J., Rudy S., Krzykowski A., Nadulski R., 2013:** The effect of pressure on the compaction parameters of oakwood sawdust enhanced with a binder. Teka Commission of Motorization and Energetics in Agriculture, vol. 13:83-88.
9. **Laskowski J., Skonecki S., 2001.** Badania procesów aglomerowania surowców paszowych – aspekt metodyczny. Inżynieria Rolnicza, nr. 2(22), 187-193.
10. **Li Y., Liu H., 2000:** High pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel. Biomass and Bioenergy, vol. 19(3), 177-186.
11. **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, vol. 30(7), 648-654.
12. **Relova I., Vignote S., León M. A., Ambrosio Y., 2009:** Optimisation of the manufacturing variables of sawdust pellets from the bark of Pinus caribaea Morelet: Particle size, moisture and pressure. Biomass and Bioenergy, vol. 33:1351-1357.
13. **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.
14. **Skonecki S., Kulig R., 2011.** Wpływ wilgotności biomasy roślinnej i nacisku tłoka na parametry brykietowania i wytrzymałość aglomeratu. Autobusy, Technika, Eksploatacja, Systemy transportowe, 10:375-386.
15. **Skonecki S., Kulig R. Łysiak G., Laskowski J., Różyło R., 2013:** The effect of material moisture content and chamber diameter on compaction parameters of meadow grass Journal of research and applications in agricultural engineering, vol. 58 (2), 149-153.
16. Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 14 marca 2008 r. w sprawie plonów reprezentatywnych roślin energetycznych w 2008 r.

DEPENDENCIES BETWEEN THE PRESSURE AND THE BRIQUETTING PROCESS PARAMETERS SELECTED ENERGY CROPS

Summary. The following paper examines the outcomes of pressure agglomeration process of some energy crops (woodland sunflower and reed canary grass). The materials susceptibility to compaction was assessed depending on the compaction pressure (from 45 to 113 MPa). The experiments were performed with the use of the ZWICK Z020/TN2S universal strength tester and a closed compression die assembly. It has been found that increase in pressure led to an increase in material density in the compression chamber and agglomerate density (by 26% on average) and increases the mechanical strength of the product (by 83% on average). Higher compaction pressure increased the demand for compaction energy by 72% on average.

Key words: woodland sunflower, reed canary grass, compaction, pressure agglomeration energy consumption, briquette quality.