

Stanisław SKONECKI, Ryszard KULIG

## WPŁYW WILGOTNOŚCI BIOMASY ROŚLINNEJ I NACISKU TŁOKA NA PARAMETRY BRYKIETOWANIA I WYTRZYMAŁOŚĆ AGLOMERATU

### Streszczenie

*W artykule przedstawiono wyniki badań nad określeniem wpływu wilgotności biomasy roślinnej (słoma pszenna, wierzba wiciowa) oraz nacisku jednostkowego tłoka na parametry brykietowania (zagęszczania), podatność surowca na zagęszczanie oraz jakość uzyskanych aglomeratów. Wilgotność materiału wynosiła od 10 do 18%. Zagęszczanie surowca przeprowadzono przy wykorzystaniu maszyny wytrzymałościowej Zwick typ ZO20/TN2S i zespołu prasującego z matrycą zamkniętą. Stwierdzono, że wraz ze wzrostem wilgotności rośnie gęstość biomasy roślinnej w komorze, maleje gęstość aglomeratu (po okresie 48 h) przechowywania oraz praca zagęszczania, rośnie także rozprężenie aglomeratu. Wzrost wilgotności polepsza podatność surowca na zagęszczanie oraz powoduje pogorszenie jakości aglomeratów pod względem ich wytrzymałości. Ze zwiększeniem nacisku tłoka rośnie gęstość aglomeratu, praca zagęszczania i wytrzymałość aglomeratu.*

### WSTĘP

Biomasa roślinna, jako odnawialne źródło energii, stanowi znaczny potencjał energetyczny. Jej udział w strukturze wytworzonej energii pierwotnej z odnawialnych źródeł energii wynosi w Polsce ponad 92%. Energetyczne wykorzystanie biomasy jest możliwe poprzez spalanie, gazyfikację i pirolizę. Rozwój tego sektora następował będzie głównie w oparciu o biopaliwa stałe z biomasy roślinnej [4, 6]. Biomasa wykorzystywana jako nośnik energetyczny to m.in. odpady rolnicze (słoma, siano) i leśne, w tym z przemysłu drzewnego (zrębki, wióry, trociny), z uprawy drzew i traw (np. wierzba, topola, topinambur, miskant olbrzymi). Materiały te ze względu na małą gęstość (co utrudnia transport, magazynowanie i dozowanie do kotłów) oraz niską wartość opałową (odniesioną do jednostki objętości), są trudne w dystrybucji w naturalnej postaci [1, 2, 16]. Dlatego w celu polepszenia przydatności biomasy do celów energetycznych należy zwiększyć jej gęstość. Uzyskuje się to przez ciśnieniowe zagęszczanie luźnego surowca do paliwa w postaci brykietu lub peletu [1, 6, 7, 16]. Badania tego procesu w skali laboratoryjnej polegają na brykietowaniu materiału w urządzeniach z układami roboczymi „komora zamknięta – tłok zagęszczający”. Umożliwiają one określenie parametrów zagęszczania w tym energochłonności oraz podatności materiału na zagęszczanie. Ważnym zagadnieniem jest określenie zmian zachodzących w materiale podczas jego zagęszczania i jakości produktu. Przebieg procesu, jego parametry i jakość (wytrzymałość) uzyskanego aglomeratu zależą od właściwości fizycznych i chemicznych przetwarzanego

surowca, a szczególnie od jego wilgotności oraz od czynników technicznych i technologicznych, w tym od ciśnienia zagęszczania (jednostkowego nacisku tłoka) [3, 8, 9, 10, 11, 13, 15]. We wcześniejszych pracach przedstawiono wyniki badań wpływu wilgotności surowców paszowych [11], łusek kolb kukurydzy, słomy owsianej, trawy i miskanta olbrzymiego [18, 19, 20, 21] na parametry aglomerowania, podatność materiału na zagęszczanie i jakość aglomeratu.

Celem niniejszego opracowania jest określenie wpływu wilgotności słomy pszennej i wierzby wiciowej oraz jednostkowego nacisku tłoka na parametry zagęszczania i jakość uzyskanego aglomeratu.

## 1. MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

### 1.1. Charakterystyka materiału przeznaczonego do badań

Do badań przyjęto słomę pszenną i wierzbę wiciową. Surowce te rozdrobniono na rozdrabniaczu ML 500 z sitem o średnicy otworów 4 mm. Dla próbek materiału o wilgotności 10% ( $\pm 0,2\%$ ) określone zostały podstawowe właściwości fizyczne: gęstość w stanie zsypanym, skład granulometryczny i średni wymiar cząstek. Jako wynik powyższych oznaczeń właściwości fizycznych przyjęto średnią arytmetyczną z trzech pomiarów. Wilgotność wyznaczono metodą suszarkową zgodnie z PN-ISO 712:2002.

Oznaczenie gęstości w stanie zsypanym (masy usypowej) wykonano zgodnie z PN-ISO 7971-2:1998 przy pomocy gęstościomierza RP T 01 77 o objętości 1 dm<sup>3</sup>. Wartości gęstości w stanie zsypanym dla poszczególnych surowców wyniosły dla: słomy pszennej 0,095 g·cm<sup>-3</sup>, wierzby wiciowej 0,154 g·cm<sup>-3</sup>.

Pomiary składu granulometrycznego surowców wykonano zgodnie z PN-89/R-64798 przy wykorzystaniu laboratoryjnego przesiewacza SASKIA Thyr 2 i zestawu sit o wymiarach oczek: 0,2; 0,315; 0,4; 0,5; 0,63; 0,8; 1,0; 1,2 mm. Masa próbki poddanej przesiewaniu wynosiła 100 g. Czas trwania odsiewu wynosił pięć minut. Po przesianiu każdą klasę wymiarową ważono na wadze WPE 300 z dokładnością do  $\pm 10^{-2}$  g. Na podstawie wyników składu granulometrycznego obliczono średni wymiar cząstek (moduł rozdrobnienia) ze wzoru:

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

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.

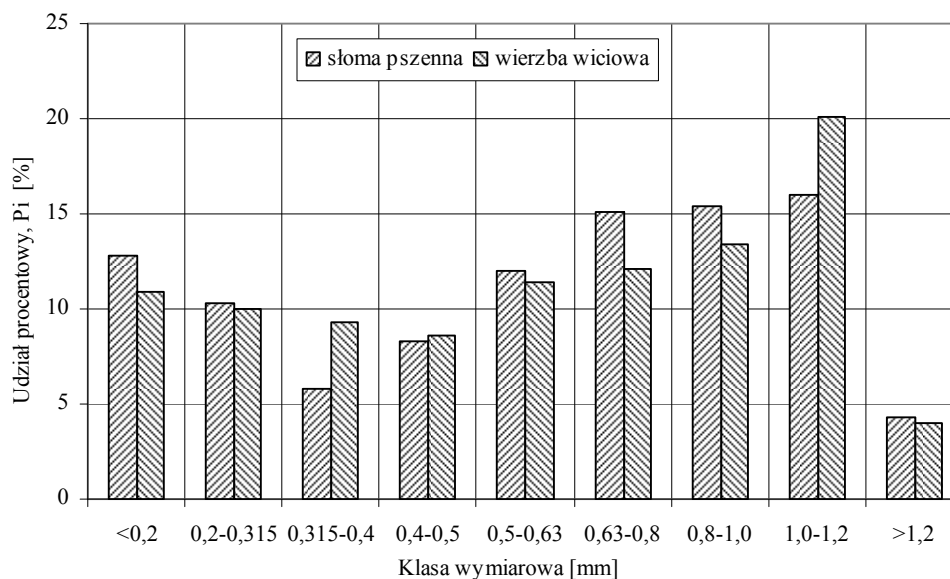
Skład granulometryczny badanych surowców przedstawiono na rys. 1. Z rysunku tego wynika, że surowce charakteryzowały się podobnym składem granulometrycznym. Największą frakcją stanowiły cząstki należące do klasy wymiarowej 1,0-1,2 mm, a procentowy udział wynosił 16% dla słomy pszennej i 20% dla wierzby wiciowej. Najmniej w badanych surowcach jest cząstek o wielkości powyżej 1,2 mm (udział procentowy dla tej klasy wymiarowej wynosił 4,3% dla słomy pszennej, 4,0% dla wierzby wiciowej).

Obliczony średni wymiar cząstek badanych surowców przedstawia się następująco: słoma pszenna  $d_s = 0,65$  mm, wierzba wiciowa  $d_s = 0,66$  mm.

Badania procesu zagęszczania przeprowadzono dla surowców o wilgotności w zakresie 10-18% (co  $2\% \pm 0,2\%$ ). Założoną wilgotność surowca uzyskiwano poprzez suszenie lub nawilżanie. Tak przygotowane próbki przechowywano przez 48 h w szczelnie zamkniętych pojemnikach.

## 1.2. Badania zagęszczania i wytrzymałości aglomeratu

Metodyka badań ciśnieniowego zagęszczania została opisana w publikacjach [12, 18, 19, 20, 21]. W badaniach zagęszczania wykorzystano maszynę wytrzymałościową ZWICK typ ZO20/TN25 z komputerową rejestracją parametrów procesu ściskania oraz zespół prasujący z matrycą zamkniętą (schemat zespołu przedstawiono w pracach [18, 21]). Średnica komory zagęszczania wynosiła 15 mm, temperatura cylindra (materiału zagęszczanego) 20°C, prędkość przemieszczania tłoka 10 mm·min<sup>-1</sup>. Zagęszczanie prowadzono dla trzech wartości maksymalnej siły zagęszczania 10 kN, 15 kN i 20 kN, czyli dla nacisków jednostkowych tłoka na materiał P1 = 57 MPa, P2 = 85 MPa, P3 = 113 MPa. Zagęszczanie wykonano każdorazowo w trzech powtórzeniach.



**Rys. 1.** Udział procentowy poszczególnych frakcji badanych surowców

Źródło: Opracowanie własne.

W trakcie badania rejestrowano krzywą, tzw. charakterystykę zagęszczania (zależność siły zagęszczania od przemieszczenia tłoka) [12, 21], z której określono parametry procesu. Wyznaczono maksymalną gęstość materiału w komorze  $\rho_c$ , jednostkową pracę zagęszczania  $L_c'$  ( $L_c' = L_c \cdot m^{-1}$ , gdzie:  $L_c$  – praca zagęszczania,  $m$  – masa próbki materiału). Dla otrzymanego brykietu określono gęstość aglomeratu po 48 h. przechowywania  $\rho_a$ . Obliczono stopień zagęszczenia aglomeratu (krotność zmniejszenia objętości)  $S_{za}$  ( $S_{za} = \rho_a \cdot \rho_n^{-1}$ ) oraz współczynnik podatności materiału na zagęszczanie  $k_c$  ( $k_c = L_c' \cdot (\rho_c - \rho_n)^{-1}$ , gdzie:  $\rho_n$  – gęstość początkowa materiału w stanie zsypanym).

Następnie określono jakość aglomeratu ze względu na wytrzymałość mechaniczną. W tym celu otrzymane aglomeraty poddawano testowi ściskania na maszynie wytrzymałościowej ZWICK ZO20/TN2S (prędkość przemieszczania głowicy wynosiła 10 mm·min<sup>-1</sup>). Aglomerat o średnicy  $d$  i długości  $l$  ściskano poprzecznie do osi, do momentu jego zniszczenia (pęknięcia) i wyznaczono maksymalną siłę niszczącą  $F_n$ . Obliczono tzw. odporność mechaniczną aglomeratu  $\sigma_n$  [MPa] z wzoru [5, 14, 17]:

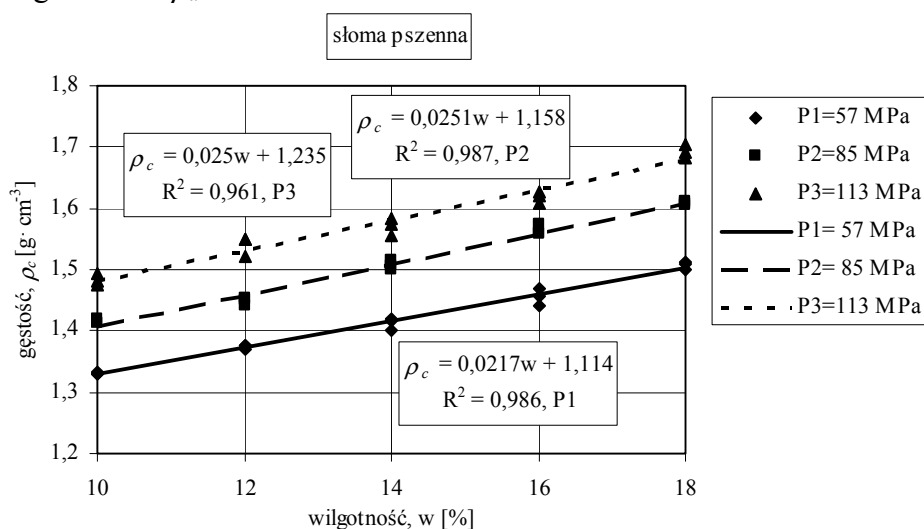
$$\sigma_n = \frac{2 \cdot F_n}{\pi \cdot d \cdot l} \quad (2)$$

## 2. WYNIKI BADAŃ

Wyznaczono zależności pomiędzy parametrami procesu zagęszczania i cechami aglomeratu a wilgotnością ( $w$ ) materiału dla każdego nacisku jednostkowego łożka. Wykresy obrazujące te zależności oraz równania regresji i wartości współczynnika determinacji  $R^2$  przedstawiono na rys. 2-13.

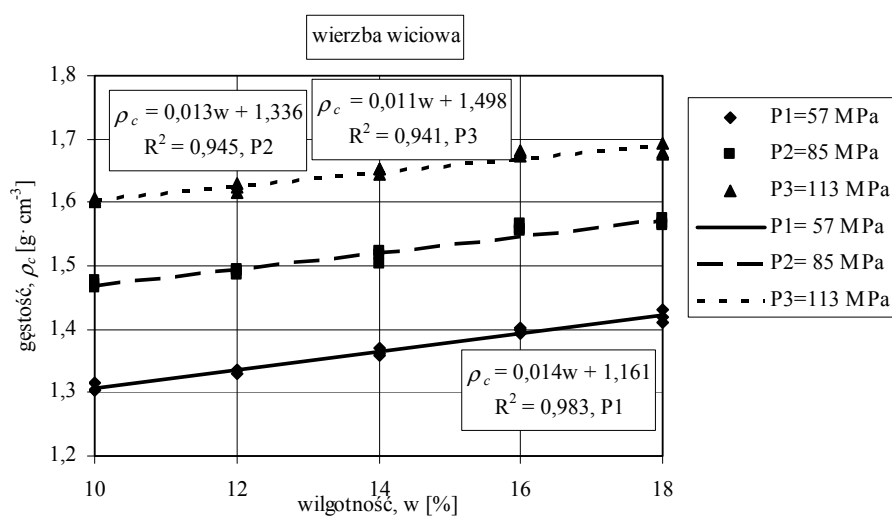
### 2.1. Gęstość surowca w komorze i aglomeratu oraz stopień zagęszczenia aglomeratu

Jak wynika z rys. 2-5 uzyskane liniowe równania regresji dobrze opisują zależność maksymalnej gęstości materiału w komorze ( $\rho_c$ ) i gęstości aglomeratu ( $\rho_a$ ) od wilgotności ( $w$ ) słomy pszennej (rys. 2, 4) i wierzby wiciowej (rys. 3, 5) dla każdego jednostkowego nacisku P1, P2 i P3. Wraz ze zwiększeniem wilgotności rośnie gęstość materiału w komorze  $\rho_c$ , a maleje gęstość aglomeratu  $\rho_a$ .



**Rys. 2.** Zależność gęstości surowca w komorze ( $\rho_c$ ) od wilgotności materiału ( $w$ ) dla nacisków jednostkowych P1, P2 i P3 (słoma pszenna)

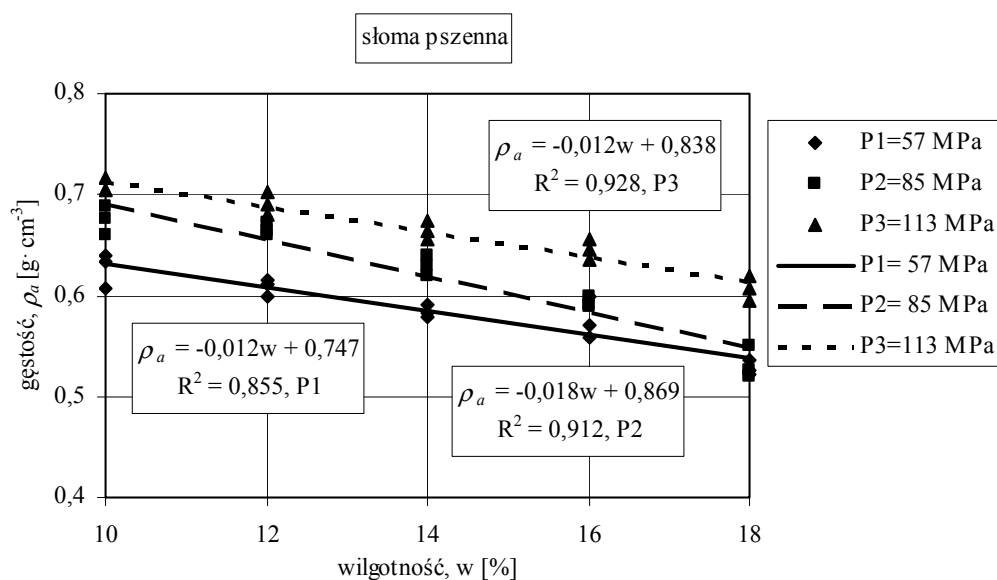
Źródło: Opracowanie własne.



**Rys. 3.** Zależność gęstości surowca w komorze ( $\rho_c$ ) od wilgotności materiału ( $w$ ) dla nacisków jednostkowych P1, P2 i P3 (wierzba wiciowa)

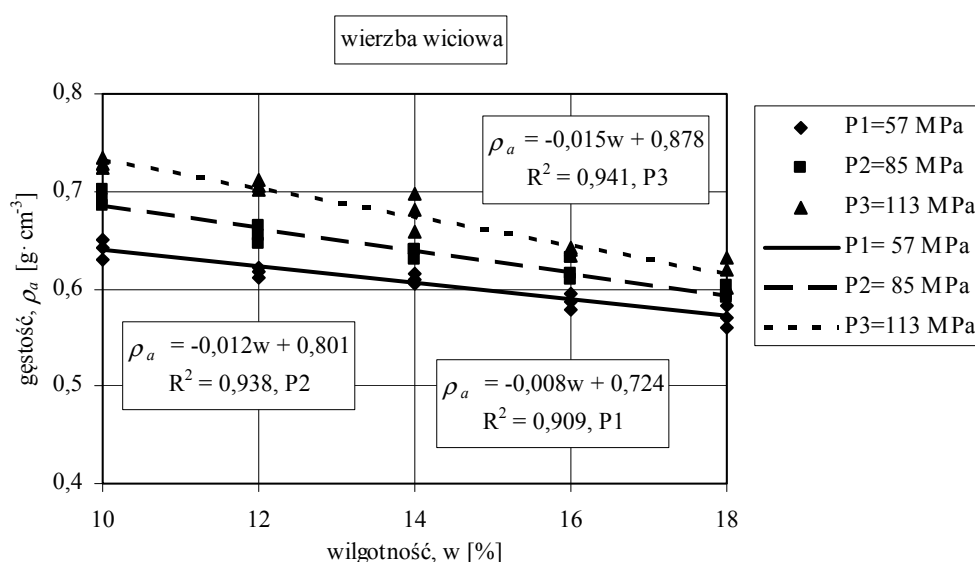
Źródło: Opracowanie własne.

Dla obu surowców gęstości  $\rho_c$  i  $\rho_a$  mają w całym zakresie wilgotności największe wartości dla największego stosowanego nacisku P3. Większe wartości gęstości uzyskano dla wierzby wiciowej. Dla tego materiału i nacisku P3 zakres zmienności gęstości w przedziale wilgotności 10-18% wynosi dla  $\rho_c$  od 1,6 g·cm<sup>-3</sup> do 1,69 g·cm<sup>-3</sup>, a dla  $\rho_a$  od 0,73 g·cm<sup>-3</sup> do 0,63 g·cm<sup>-3</sup>. Natomiast najmniejsze wartości tych gęstości uzyskano w przypadku zagęszczania surowców przy stosowanym najmniejszym nacisku tłoka P1. Gęstości dla wierzby wiciowej wynoszą:  $\rho_c$  od 1,31 g·cm<sup>-3</sup> do 1,42 g·cm<sup>-3</sup>,  $\rho_a$  od 0,64 g·cm<sup>-3</sup> do 0,56 g·cm<sup>-3</sup>. Uzyskiwane gęstości surowca w komorze  $\rho_c$  przy zagęszczaniu przy nacisku tłoka P3 są około 15-21% większe od tej gęstości w przypadku zagęszczania przy nacisku P1.



**Rys. 4.** Zależność gęstości aglomeratu ( $\rho_a$ ) od wilgotności materiału ( $w$ ) dla nacisków jednostkowych P1, P2 i P3 (słoma pszenna)

Źródło: Opracowanie własne.

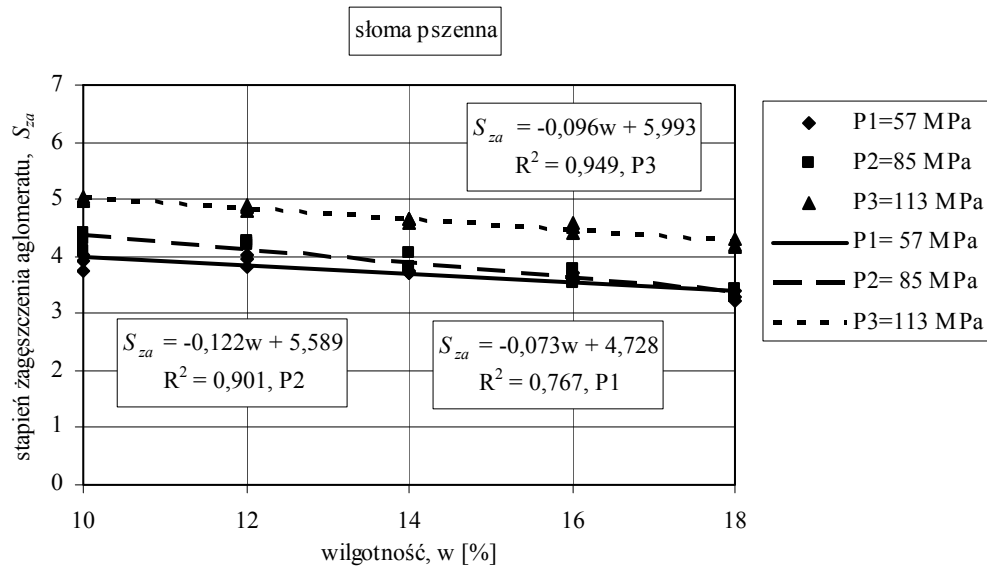


**Rys. 5.** Zależność gęstości aglomeratu ( $\rho_a$ ) od wilgotności materiału ( $w$ ) dla nacisków jednostkowych P1, P2 i P3 (wierzba wiciowa)

Źródło: Opracowanie własne.

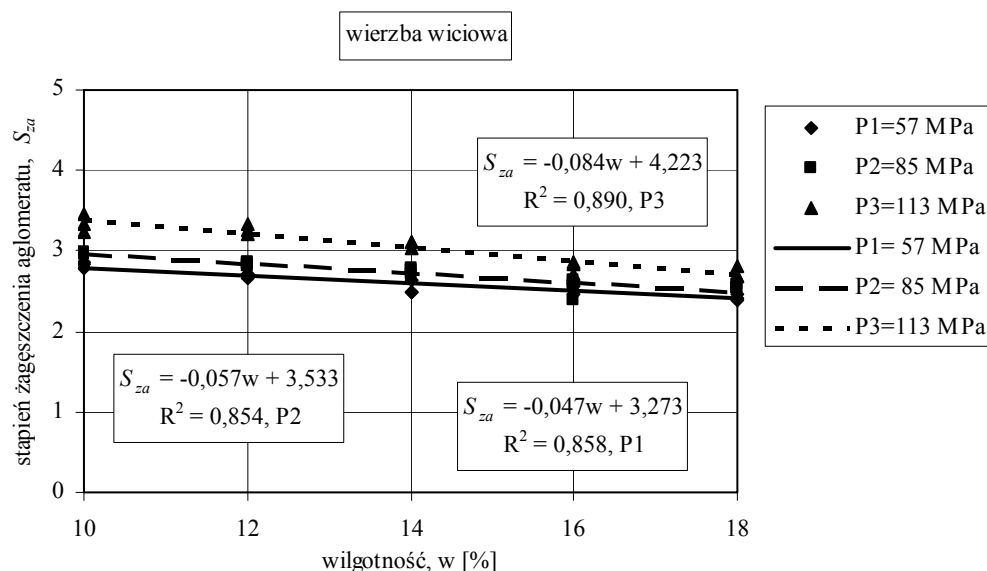
Natomiast dla gęstości aglomeratu  $\rho_a$  w przypadku zagęszczania dla nacisku P3 gęstość była większa o około 8-15% od gęstości uzyskanej przy nacisku P1.

Analiza gęstości  $\rho_c$  i  $\rho_a$  wskazuje, że po wyjęciu z matrycy brykiety uległy swobodnemu rozprężeniu i gęstość aglomeratu maleje. Zmiany gęstości aglomeratu potwierdzają wyniki dla stopnia zagęszczenia aglomeratu  $S_{za}$  (rys. 6, 7), charakteryzującego wielkość zmiany gęstości aglomeratu po przechowywaniu w stosunku do gęstości początkowej materiału.



**Rys. 6.** Zależność stopnia zagęszczenia aglomeratu ( $S_{za}$ ) od wilgotności materiału ( $w$ ) dla nacisków jednostkowych P1, P2 i P3 (słoma pszenna)

Źródło: Opracowanie własne.



**Rys. 7.** Zależność stopnia zagęszczenia aglomeratu ( $S_{za}$ ) od wilgotności materiału ( $w$ ) dla nacisków jednostkowych P1, P2 i P3 (wierzba wiciowa)

Źródło: Opracowanie własne.

Największym stopniem zagęszczenia  $S_{za}$  charakteryzuje się słoma pszenna o wilgotności 10% zagęszczana przy stosowanym największym nacisku P3 (gęstość aglomeratu jest ok.

5 razy większa od gęstości początkowej materiału). Dla wierzby wiciowej zagęszczanej w tych samych warunkach gęstość aglomeratu jest około 3-4 razy większa od gęstości początkowej materiału. Zwiększenie wilgotności surowca powoduje zmniejszenie stopnia zagęszczenia aglomeratu, czyli występuje większe rozprężenie aglomeratu po wyjęciu z matrycy, a tym samym zmniejszenie jego gęstości. Natomiast stosując wyższy nacisk tłoka, uzyskuje się większy stopień zagęszczenia aglomeratu i rozprężenie jest mniejsze. Wraz ze wzrostem wilgotności stopień zagęszczenia aglomeratu  $S_{za}$  badanych surowców maleje w całym zakresie wilgotności.

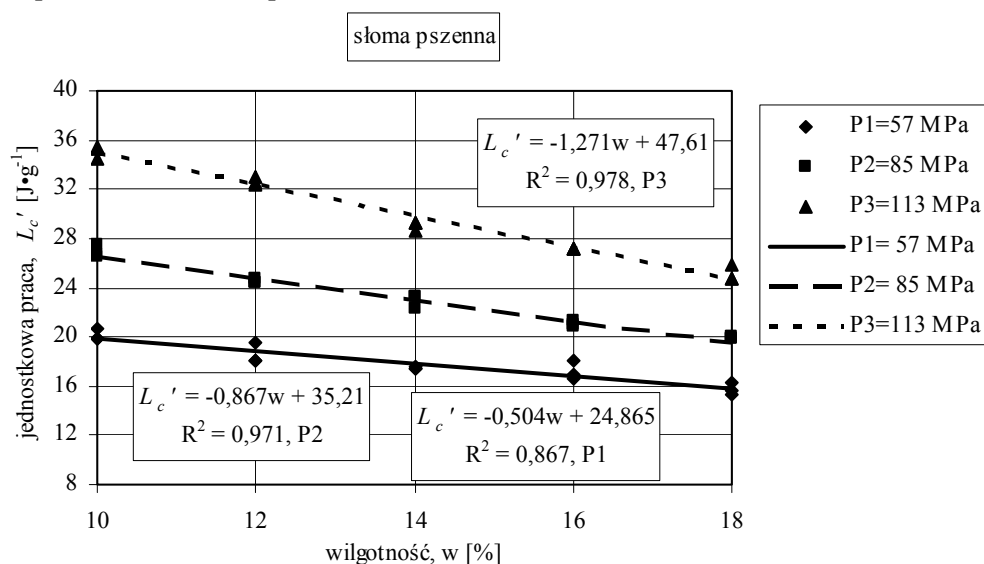
## 2.2. Jednostkowa praca zagęszczania i podatność materiału na zagęszczanie

Zależności pomiędzy jednostkową pracą zagęszczania  $L_c'$  a wilgotnością ( $w$ ) surowca dla trzech nacisków P1, P2 i P3 przedstawiono na rys. 8 i 9. Praca ta maleje wraz ze zwiększeniem wilgotności słomy pszennej i wierzby wiciowej dla każdego nacisku tłoka.

Największe wartości tej pracy uzyskano w przypadku zagęszczania surowców przy stosowaniu największego nacisku P3. Wartość jednostkowej pracy zagęszczania  $L_c'$  dla badanych surowców zawiera się w przedziale od  $35,5 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$  (słoma pszenna, nacisk P3, wilgotność  $w = 10\%$ ) do  $14,2 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$  (wierzba wiciowa, nacisk P1, wilgotność  $w = 18\%$ ). Największe wartości jednostkowej pracy  $L_c'$  uzyskano dla zagęszczania słomy pszennej.

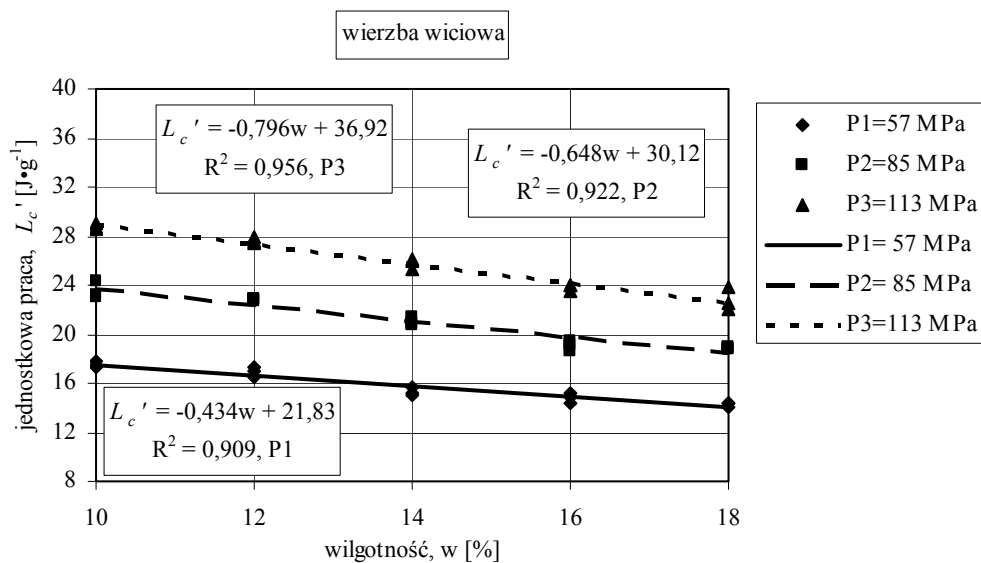
Zwiększenie wilgotności ( $w$ ) powoduje, że zagęszczany materiał jest bardziej plastyczny i następuje polepszenie podatności materiału na zagęszczanie, o czym świadczy spadek pracy  $L_c'$  (rys. 8, 9) i współczynnika podatności na zagęszczanie  $k_c$  (rys. 10, 11).

Dla badanych surowców wartość współczynnika podatności na zagęszczanie  $k_c$  (rys. 10, 11) zawiera się w przedziale od  $26 (\text{J}\cdot\text{g}^{-1})\cdot((\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}))^{-1}$  (słoma pszenna, nacisk P3, wilgotność  $w = 10\%$ ) do  $11,5 (\text{J}\cdot\text{g}^{-1})\cdot((\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}))^{-1}$  (wierzba wiciowa, nacisk P1, wilgotność  $w = 18\%$ ). Podobnie jak dla jednostkowej pracy zagęszczania wyższe wartości współczynnika  $k_c$  uzyskano dla słomy pszennej. Lepszą podatnością na zagęszczanie spośród badanych surowców cechuje się wierzba wiciowa. Otrzymane wyniki współczynnika podatności na zagęszczanie  $k_c$  potwierdzają tendencje zmiany  $k_c$  ze wzrostem wilgotności jak dla zagęszczania innych surowców [11, 18, 19, 20, 21].



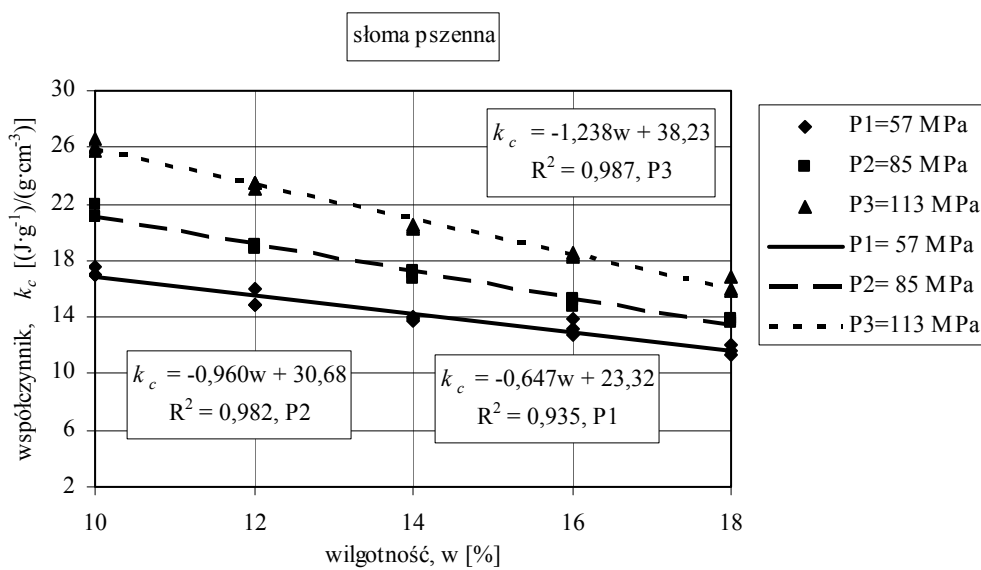
**Rys. 8.** Zależność jednostkowej pracy zagęszczania ( $L_c'$ ) od wilgotności materiału ( $w$ ) dla nacisków jednostkowych P1, P2 i P3 (słoma pszenna)

Źródło: Opracowanie własne.



**Rys. 9.** Zależność jednostkowej pracy zagęszczania ( $L_c'$ ) od wilgotności materiału ( $w$ ) dla nacisków jednostkowych P1, P2 i P3 (wierzba wiciowa)

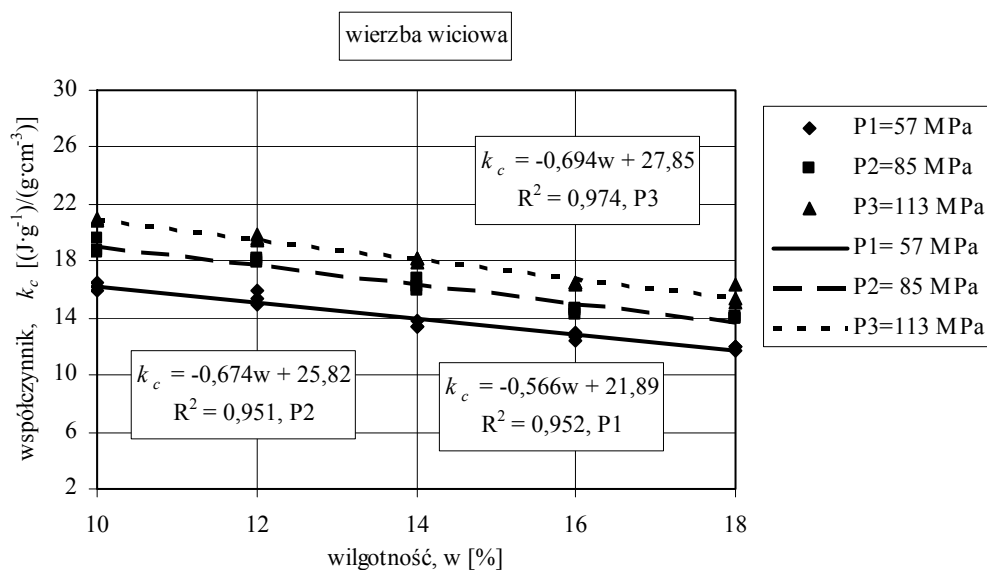
Źródło: Opracowanie własne.



**Rys. 10.** Zależność współczynnika podatności na zagęszczanie ( $k_c$ ) od wilgotności materiału ( $w$ ) dla nacisków jednostkowych P1, P2 i P3 (słoma pszenna)

Źródło: Opracowanie własne.



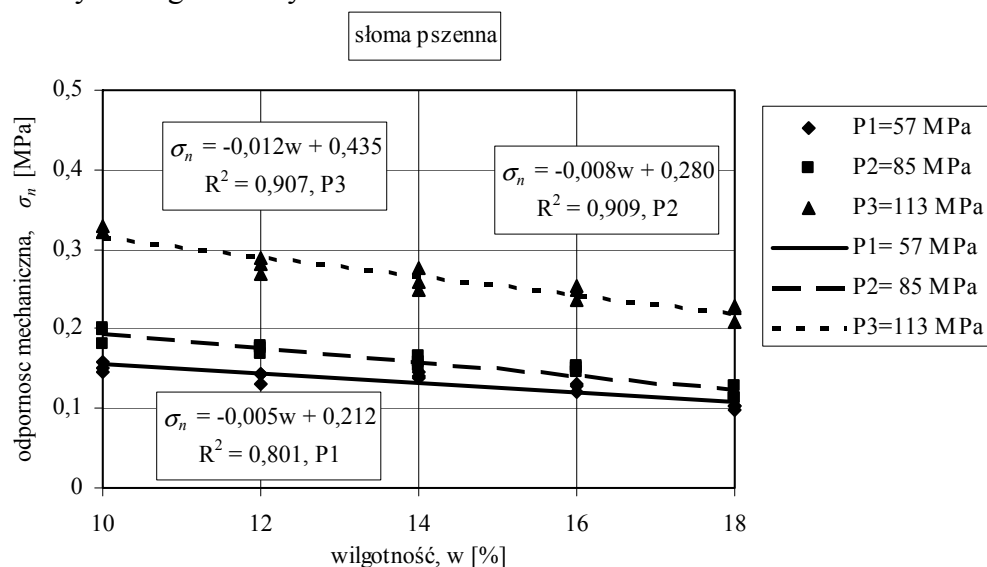


**Rys. 11.** Zależność współczynnika podatności na zagęszczanie ( $k_c$ ) od wilgotności materiału ( $w$ ) dla nacisków jednostkowych P1, P2 i P3 (wierzba wiciowa)

Źródło: Opracowanie własne.

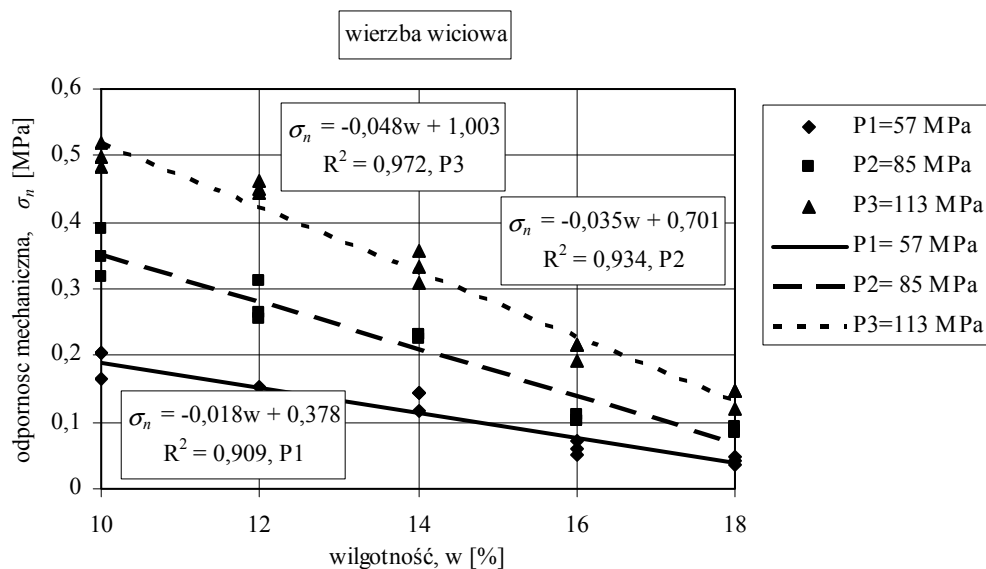
### 2.3. Wytrzymałość aglomeratu

Wyniki badań odporności mechanicznej  $\sigma_n$  wykazały, że wytrzymałość aglomeratu maleje ze zwiększeniem wilgotności surowców dla każdego nacisku tłoka (rys. 12, 13). Odporność mechaniczna  $\sigma_n$  dla badanych materiałów zawiera się w przedziale od 0,51 MPa do 0,04 MPa. Największą odporność mechaniczną uzyskują aglomeraty wierzby wiciowej otrzymane podczas zagęszczania przy stosowaniu nacisku P3 (wartość  $\sigma_n$  dla tego surowca zawiera się w przedziale od 0,51 do 0,12 MPa w przedziale wilgotności 10-18%). Podobna zmienność jak odporność mechaniczna (w zależności od wilgotności i wielkości nacisku tłoka) występuje dla gęstości aglomeratu (rys. 4, 5). Zagęszczając materiał do największego nacisku jednostkowego P3, uzyskuje się więc aglomeraty o największej gęstości (rys. 4, 5) i odporności mechanicznej (rys. 12, 13), jednak ze względu na największe nakłady jednostkowej pracy (rys. 8, 9) proces może być energochłonny.



**Rys. 12.** Zależność odporności mechanicznej ( $\sigma_n$ ) od wilgotności materiału ( $w$ ) dla nacisków jednostkowych P1, P2 i P3 (słoma pszenna)

Źródło: Opracowanie własne.



**Rys. 13.** Zależność odporności mechanicznej ( $\sigma_n$ ) od wilgotności materiału ( $w$ ) dla nacisków jednostkowych P1, P2 i P3 (wierzba wiciowa)

Źródło: Opracowanie własne.

## PODSUMOWANIE

Wyniki eksperymentu wykazały, że wilgotność przyjętej do badań biomasy roślinnej (słomy pszennej, wierzby wiciowej) oraz wielkość jednostkowego nacisku tłoka istotnie wpływają na parametry procesu ciśnieniowego zagęszczania materiału w komorze zamkniętej (brykietowania) oraz mają znaczny wpływ na wytrzymałość mechaniczną uzyskanego aglomeratu.

Zwiększenie wilgotności materiału od 10 do 18% wywołuje:

- zwiększenie maksymalnej gęstości surowca w komorze ( $\rho_c$ ),
- zmniejszenie gęstości aglomeratu ( $\rho_a$ ), jednostkowej pracy zagęszczania ( $L_c'$ ) oraz stopnia zagęszczenia aglomeratu ( $S_{za}$ ),
- zmniejszenie współczynnika  $k_c$ , czyli polepszenie podatności materiału na zagęszczanie,
- zwiększenie rozprężenia aglomeratu, co powoduje spadek wytrzymałości mechanicznej aglomeratu.

Natomiast przy zwiększaniu nacisku tłoka w zakresie od 57 do 113 MPa uzyskuje się aglomeraty o większej gęstości i wyższej wytrzymałości mechanicznej. Jednak należy zaznaczyć, że przy wyższych naciskach, ze względu na większe nakłady jednostkowej pracy, proces zagęszczania może być energochłonny.

# INFLUENCE OF MOISTURE CONTENT OF PLANT BIOMASS AND PRESSURE PISTON ON BRIQUETTING PARAMETERS AND STRENGTH OF THE AGGLOMERATE

## Abstract

Paper presents results of a study on the influence of moisture content of plant biomass (wheat straw, osier) and the pressure piston unit on the parameters of briquetting (compaction), the compaction ability of raw material and the quality of obtained agglomerates. Material moisture was established from 8% to 18%. Compaction of the raw material was carried out using a Zwick testing machine type ZO20/TN2S and a closed compression assembly (die). It was found that the higher the moisture content increases the density of plant biomass in the chamber, decreases the density of the agglomerate after a period of 48 hours of storage and work of compaction, increases the expansion of the agglomerate. The increase in raw material moisture content improves the ability to compaction and worsens the quality of the agglomerates in terms of their strength. With increasing pressure the piston increases the density of the agglomerate, compaction work and the agglomerate strength.

## BIBLIOGRAFIA

1. Adamczyk F., Frąckowiak P., Mielec K., Kośmicki Z., Zielnica M.: *Badania eksperymentalne procesu zagęszczania słomy metodą zwiłania*. Journal of Research and Application in Agricultural Engineering, 2006, No. 51(3).
2. Adamczyk F., Frąckowiak P., Mielec K., Kośmicki Z.: *Problematyka badawcza w procesie zagęszczania słomy przeznaczonej na opał*. Journal of Research and Application in Agricultural Engineering, 2005, No. 50(4).
3. Adapa P., Tabil L., Schoenau G.: *Compaction characteristics of barley, canola, oat and wheat straw*. Biosystems Engineering, 2009, No. 104.
4. Dreszer K., Michałek R., Roszkowski A.: *Energia odnawialna-możliwości jej pozyskiwania i wykorzystania w rolnictwie*. Wyd. PTIR, Kraków-Lublin-Warszawa, 2003.
5. Fell J. T., Newton J. M.: *Determination of tablet strength by the diametral compression test*. J. Pharm. Sci, 1970, No. 59(5).
6. Gradziuk P., Kościuk K.: *Analiza możliwości i kosztów pozyskania biomasy na cele energetyczne na potrzeby energetycznego wykorzystania w gminie Clomas*. Opracowanie na zlecenie Urzędu Gminy Clomas, 2007.
7. Grzybek A.: *Kierunki zagospodarowania biomasy na cele energetyczne*. Wieś Jutra, 2003, nr 9.
8. Hejft R.: *Ciśnieniowa aglomeracja materiałów roślinnych*. Wyd. Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu, Radom, 2002.
9. Jha S.K., Singh A., Kumar A.: *Physical characteristics of compressed cotton stalks*. Biosystems Engineering, 2008, No. 99(2).
10. Kaliyan N., Morey R.V.: *Densification characteristics of corn stover and switchgrass*. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2009, No. 52(3).
11. Laskowski J., Łysiak G., Skonecki S.: *Mechanical properties of granular agro-materials and food powders for industrial practice. Part II. Material properties in grinding and agglomeration*. Centre of Excellence for Applied Physics in Sustainable Agriculture AGROPHYSICS, Institute of Agrophysics PAS, Lublin, 2005.

12. Laskowski J., Skonecki S.: *Badania procesów aglomerowania surowców paszowych – aspekt metodyczny*. Inżynieria Rolnicza, 2001, nr 2(22).
13. Li Y., Liu H.: *High pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel*. Biomass and Bioenergy, 2000, No. 19(3).
14. Li Y., Wu D., Zhang J., Chang L., Wu D., Fang Z., Shi Y.: *Measurement and statistics of single pellet mechanical strength of differently shaped catalysts*. Powder Technology, 2000, No. 113.
15. Mani S., Tabil L.G., Sokhansanj S.: *Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses*. Biomass and Bioenergy, 2006, No. 30(7).
16. Piotrowski K., Wiltowski T., Mondal K.: *Biomasa-kłopotliwe pozostałości czy strategiczne rezerwy czystej energii?* Czysta Energia, 2004, nr 10.
17. Ruiz G., Ortiz M., Pandolfi A.: *Three-dimensional finite-element simulation of the dynamic Brazilian tests on concrete cylinders*. Int. J. Numer. Meth. Engng., 2000, No. 48.
18. Skonecki S., Potręć M.: *Wpływ wilgotności łusek kolb kukurydzy na parametry zagęszczania*. Acta Agrophysica, 2008, nr 11(3).
19. Skonecki S., Potręć M.: *Wpływ wilgotności na ciśnieniowe zagęszczanie biomasy roślinnej*. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, 2010, z. 546.
20. Skonecki S., Potręć M.: *Wpływ wilgotności słomy owsianej na podatność na zagęszczanie*, [w:] Dobrzański B., Rutkowski A., Rybczyński R. (red.), *Właściwości fizyczne i biochemiczne materiałów roślinnych*. Wyd. Naukowe FRNA, Lublin, 2008.
21. Skonecki S.: *Brykietowanie wybranej biomasy roślinnej na cele energetyczne – parametry procesu i wytrzymałość aglomeratu*. Autobusy, Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe, 2010, nr 11.

**Recenzent:** prof. dr hab. **Tomasz Dobek** – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

**Autorzy:**

dr hab. inż. **Stanisław Skonecki** – Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

dr inż. **Ryszard Kulig** – Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie