

## Wpływ stopnia rozdrobnienia na efektywność zagęszczania słomy rzepakowej z dodatkiem lepiszcza

Ryszard Kulig, Grzegorz Łysiak, Stanisław Skonecki, Janusz Laskowski

Katedra Eksploatacji Maszyn Przemysłu Spożywczego, Uniwersytet Przyrodniczy,  
ul. Doświadczalna 44, 20-280 Lublin e-mail:ryszard.kulig@up.lublin.pl

**Streszczenie.** Przedstawiono wyniki badań nad określeniem wpływu stopnia rozdrobnienia słomy rzepakowej ( $d_{sr}$  od 0,82 do 1,96 mm) i dodatku lepiszcza (od 0 do 2%) na parametry procesu aglomerowania w warunkach modelowych. W szczególności wyznaczono podatność surowca na zagęszczanie oraz jakość uzyskiwanych aglomeratów. Stwierdzono, że w badanym przedziale wraz ze wzrostem średniej wielkości cząstek surowca, zwiększa się zapotrzebowanie energii zagęszczania od wartości 35,8 do 41,45 J•g<sup>-1</sup>. Jednocześnie zmniejsza się podatność materiału na zagęszczanie (średnio o – 11%). Wykazano, iż stopień zagęszczenia materiału w komorze, jak też aglomeratu, przyjmuje najwyższe wartości (odpowiednio 24,8 i 12,4) dla materiału o najmniejszym stopniu rozdrobnienia. Zaobserwowano, że 2% dodatek lepiszcza pozwala zredukować stopień rozprężenia aglomeratu średnio o 7% oraz zwiększyć odporność mechaniczną przeciętnie o 23%.

**Słowa kluczowe:** zagęszczanie, brykietowanie, stopień rozdrobnienia, lepiszcza, lignosulfonian wapnia, słoma rzepakowa.

### WSTĘP

Sprostanie założeniom strategii rozwoju energetyki odnawialnej, wiąże się z koniecznością wykorzystania do produkcji biopaliw odpadów z produkcji rolniczej. W tym kontekście szczególnie ważne jest wykorzystanie słomy rzepakowej. Związane jest to przede wszystkim z tym, że nie znajduje ona zagospodarowania w produkcji zwierzęcej, tak więc głównym kierunkiem jej utylizacji powinna być produkcja kompaktowanych biopaliw stałych [4].

Z wielu badań wynika, iż w procesie aglomerowania ciśnieniowego materiałów biologicznych, obok wilgotności materiału [5, 7, 15, 16], wyjątkowego znaczenia nabiera stopień jego rozdrobnienia [10, 11]. Wartość tego parametru wpływa zarówno na przebieg procesu, jak też jakość gotowego produktu [1, 2, 3]. Stosowanie nieodpowiedniego stopnia rozdrobnienia może z jednej strony prowadzić do bezużytecznej konsumpcji energii, z drugiej zaś powodować

otrzymywanie aglomeratu o nieodpowiednich właściwościach wytrzymałościowych.

Rozwiązaniem powyższego problemu może być również stosowanie lepiszczy organicznych lub syntetycznych [12, 14, 17]. Związki te wiążą rozdrobnione składniki mieszanki (działając podobnie do kleju), co poprawia stabilność i jakość aglomeratów. W konsekwencji zwiększa się wytrzymałość mechaniczna aglomeratów oraz następuje zmniejszenie całkowitych nakładów energetycznych ponoszonych przy ich produkcji. W przypadku aglomerowania materiałów biologicznych, doskonale sprawdzają się lepiszcza ligninowe [6, 9]. Bazują one na lignosulfonianach wapnia i sodu. Spotyka się także preparaty zawierające w swoim składzie odpowiednio spreparowaną skrobię oraz kwasy tłuszczowe. Lepiszczka stosowane są w różnych dawkach, zwykle jednak nie przekraczających 3% w skali wagowej stosowanego surowca. W odniesieniu do produkcji biopaliw stałych – zgodnie z obowiązującą w tym zakresie normą PN-EN 14961-1:2010 – dodatek ten nie powinien przekraczać 2%. Stosowanie lepiszczy ligninowych nie wpływa negatywnie na proces spalania biopaliwa, gdyż jest to substancja całkowicie spalająca się i nie zwiększająca ilości popiołu oraz zawartości obojętnej dla środowiska naturalnego.

Mając na uwadze powyższe, za cel pracy przyjęto wyznaczenie wartości parametrów charakteryzujących proces zagęszczania ciśnieniowego słomy rzepakowej, charakteryzującej się zmiennym stopniem rozdrobnienia i różną zawartością lignosulfonianu wapnia.

### MATERIAŁY I METODY

Materiał badawczy stanowiła słoma rzepakowa, zebrana w kampanii żniwnej 2012 roku. Surowiec rozdrabniano na rozdrabniaczu bijakowym H-950 wyposażonym w sita o wymiarach otworów f 4, 5, 7, 10 i 12 mm. Dla tak przygotowanego materiału określono skład granulometryczny

(zgodnie PN-EN 15149-2:2011), który posłużył do wyznaczenia średniego wymiaru cząstek po rozdrobnieniu wg wzoru:

$$d_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} h_i \cdot P_i}{100} \quad (\text{mm}), \quad (1)$$

gdzie:

$d_{sr}$  – 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.

Średni wymiar cząstek dla materiału rozdrabnianego przy zastosowaniu sit o wymiarach otworów f4, 5, 7, 10 i 12 mm wynosił odpowiednio: 0,82; 0,95; 1,32; 1,57 i 1,96 mm.

Zagęszczanie wykonano dla surowca o wilgotności 12%, do którego dosypywano odważoną porcją lepiszcza (lignosulfonian wapnia) w ilości odpowiadającej dodatkowi na poziomie 1 i 2%. Próbę kontrolną stanowił surowiec bez dodatku lepiszcza.

Badania ciśnieniowego zagęszczania wykonano zgodnie z metodyką przedstawioną przez Laskowskiego i Skoneckiego [8]. Zagęszczanie surowca prowadzono przy użyciu maszyny wytrzymałościowej Zwick Z020/TN2S, wyposażonej w zespół prasujący z matrycą zamkniętą o średnicy cylindra (komory zagęszczania) 15 mm. Warunki badań były następujące: masa próbki materiału 2g, temperatura cylindra (materiału zagęszczanego) 20°C, prędkość przemieszczania tłoka 10 mm·min<sup>-1</sup>, maksymalny nacisk jednostkowy tłoka 114 MPa. Zagęszczanie prowadzono każdorazowo w trzech powtórzeniach.

Efektom pomiaru była krzywa (charakterystyka) zagęszczania – zależność siły zagęszczania od przemieszczenia tłoka. Na podstawie danych z charakterystycznych punktów krzywej wyznaczono: maksymalną gęstość materiału w komorze  $\rho_c$ , całkowitą pracę zagęszczania  $L_c$ . Obliczono współczynnik podatności materiału na zagęszczanie  $k_c$ :

$$k_c = \frac{L_c'}{(\rho_c - \rho_n)} \quad ((\text{J} \cdot \text{g}^{-1})/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})), \quad (2)$$

gdzie:

$\rho_n$  – gęstość początkowa materiału w komorze zagęszczania, g·cm<sup>-3</sup>,

$L_c'$  – jednostkowa praca zagęszczania, J·g<sup>-1</sup>.

Dla otrzymanego aglomeratu określono gęstość po 48 godzinach przechowywania  $\rho_a$ . Ponadto określono stopień zagęszczenia materiału w komorze  $S_{zm}$  i uzyskanego aglomeratu  $S_{za}$ , obliczane jako iloraz gęstości  $\rho_c$  i  $\rho_a$  do gęstości początkowej w komorze  $\rho_n$  ( $S_{zm} = \rho_c \cdot \rho_n^{-1}$ ,  $S_{za} = \rho_a \cdot \rho_n^{-1}$ ). Dla oceny spadku gęstości aglomeratu w wyniku ekspansji zwrotnej obliczono stopień rozprężania aglomeratu  $S_{ra}$  jako iloraz gęstości  $\rho_a$  i  $\rho_c$  ( $S_{ra} = \rho_a \cdot \rho_c^{-1}$ ).

Wyznaczono także wytrzymałość (odporność) mechaniczną aglomeratu  $\delta_m$ , określoną w teście ściskania „brazylijskim” [13]. Badania wykonano na maszynie wytrzymałościowej Zwick Z020/TN2S (prędkość głowicy ruchomej wynosiła 10 mm·min<sup>-1</sup>). Aglomerat o średnicy  $d$  i długości  $l$  ścisano między płaskimi płytami poprzecznie

do osi do momentu zniszczenia (pęknięcia) i wyznaczano maksymalną siłę niszczącą  $F_n$ . Odporność mechaniczną  $\delta_m$  obliczano ze wzoru:

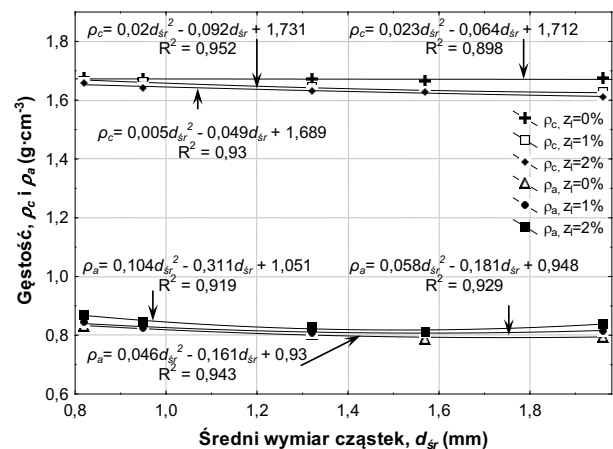
$$\sigma_n = \frac{2F_n}{\pi dl} \quad (\text{MPa}). \quad (3)$$

Analizę zależności pomiędzy zawartością lepiszcza w materiale badawczym i jego wilgotnością a parametrami procesu zagęszczania, wykonano przy wykorzystaniu procedur statystycznych zawartych w programie STATISTICA, przyjmując za każdym razem poziom istotności  $\alpha_i = 0,05$ .

## WYNIKI BADAŃ

Wyznaczono zależności pomiędzy parametrami procesu zagęszczania i cechami aglomeratu a średnim wymiarem cząstek surowca ( $d_{sr}$ ) dla każdego poziomu dodatku lepiszcza. Wykresy obrazujące te zależności oraz równania regresji i wartości współczynników determinacji  $R^2$  przedstawiono na rys. 1-5.

Z analizy wyników badań przedstawionych na rys. 1 wynika, że wraz ze wzrostem średniego wymiaru cząstek następuje niewielkie zmniejszenie maksymalnej gęstości materiału w komorze. Zjawisko to dotyczy wszystkich badanych materiałów. Zakres zmienności analizowanego parametru wynosi od 1,59 do 1,68 g·cm<sup>-3</sup>. Najwyższe gęstości otrzymano dla surowca bez dodatku lepiszcza.



**Rys. 1.** Zależność gęstości materiału w komorze ( $\rho_c$ ) i aglomeratu ( $\rho_a$ ) od średniego wymiaru cząstek surowca ( $d_{sr}$ ) dla różnych dodatków lepiszcza ( $z_i$ )

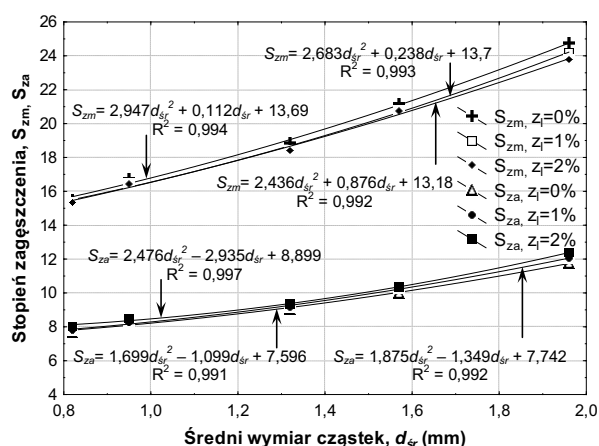
**Fig. 1.** Correlation between material density in the chamber ( $\rho_c$ ), agglomerate density ( $\rho_a$ ) and average particle size ( $d_{sr}$ ) at various binder content levels ( $z_i$ )

Natomiast w przypadku gęstości aglomeratu (rys. 1) wraz ze zmniejszaniem stopnia rozdrobnienia, wartość parametru również nieznacznie spada (najintensywniej w przedziale  $d_{sr}$  od 0,82 do 1,32). W tym przypadku najwyższą wartość parametru odnotowano dla surowca o  $d_{sr}=0,82$  mm z 2% dodatkiem lepiszcza (0,871 g·cm<sup>-3</sup>), najniższą zaś dla surowca o  $d_{sr}=1,96$  mm bez dodatku lepiszcza (0,78 g·cm<sup>-3</sup>).

Badania stopnia zagęszczenia materiału w komorze i aglomeratu wykazują, że wartości parametrów rośnie wraz

ze zwiększaniem się średniego wymiaru cząstek, niezależnie od wartości dodatku lepiszcza do surowca (rys.2). Maksymalna gęstość materiału w komorze  $\rho_c$ , odniesiona do  $d_{sr}=0,82$  mm, jest przeciętnie 15,5 razy większa od gęstości początkowej materiału  $\rho_n$ . Natomiast dla  $d_{sr}=1,96$  mm, wartość gęstości wzrasta średnio o 24 razy.

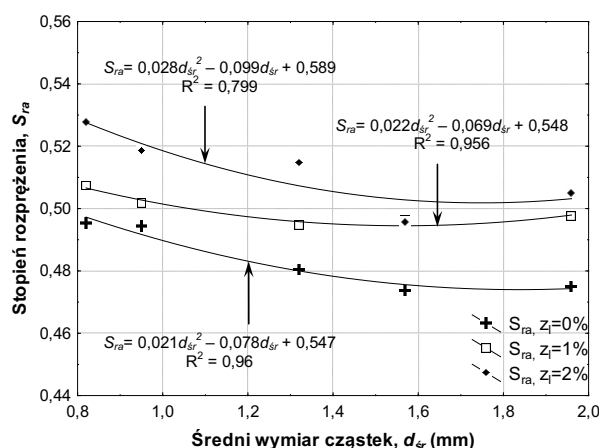
Z kolei z danych odnośnie wartości stopnia zagęszczenia aglomeratu (rys. 2) wynika, że gęstość gotowego produktu po przechowywaniu jest średnio 8 razy większa od gęstości początkowej materiału dla surowca o  $d_{sr}=0,82$ , i o 12 razy większa dla surowca o  $d_{sr}=1,96$  mm. Najwyższe wartości parametru dotyczą za każdym razem surowca z 2% dodatkiem lepiszcza.



Rys. 2. Zależność stopnia zagęszczenia materiału w komorze ( $S_{zm}$ ) i aglomeratu ( $S_{zd}$ ) od średniego wymiaru cząstek surowca ( $d_{sr}$ ) dla różnych dodatków lepiszcza ( $z$ )

Fig. 2. Correlation between the degree of material compaction ( $S_{zm}$ ), agglomerate compaction ( $S_{zd}$ ) and average particle size ( $d_{sr}$ ) at various binder content levels ( $z$ )

Potwierdzeniem powyższego są również wyniki otrzymane dla stopnia rozprężenia aglomeratu (rys. 3).

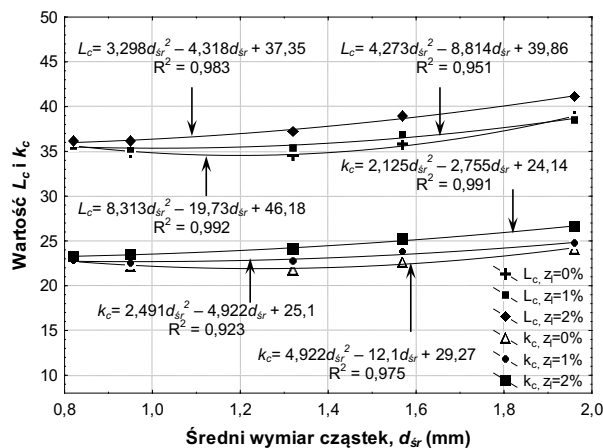


Rys. 3. Zależność stopnia rozprężenia aglomeratu ( $S_{ra}$ ) od średniego wymiaru cząstek surowca ( $d_{sr}$ ) dla różnych dodatków lepiszcza ( $z$ )

Fig. 3. Correlations between the degree of briquette expansion ( $S_{ra}$ ) and average particle size ( $d_{sr}$ ) at various binder content levels ( $z$ )

W przypadku produktu otrzymanego z materiału z 2% dodatkiem lepiszcza, niezależnie od zmiany wielkości rozdrobnienia surowca, wartość parametru  $S_{ra}$  jest średnio o 8% wyższa od wartości uzyskiwanej dla materiału kontrolnego.

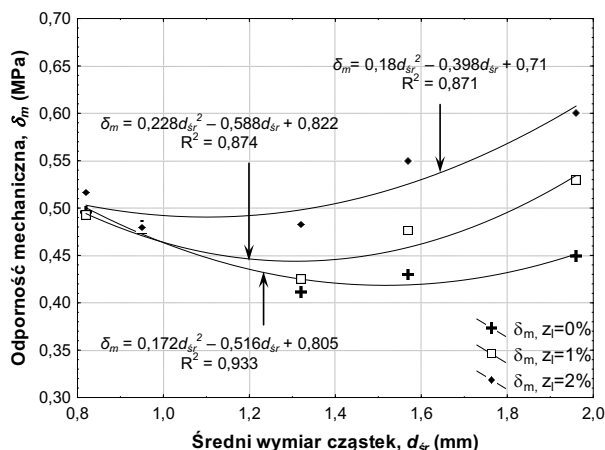
Zależności pomiędzy jednostkową pracą zagęszczania  $L_c$  i współczynnikiem materiału na zagęszczanie  $k_c$  a stopniem rozdrobnienia surowca  $d_{sr}$  przedstawiono na rys. 4. W całym zakresie badawczym wartość analizowanych parametrów rośnie wraz ze zwiększaniem średniego wymiaru cząstek surowca. Prawdopodobnie taka występuje w odniesieniu do wszystkich badanych materiałów. Wartość parametru  $L_c$  zawiera się w przedziale od 35,61 do 41,55  $J \cdot g^{-1}$ , a parametru  $k_c$  od 23,15 do 26,71  $(J \cdot g^{-1}) \cdot ((g \cdot cm^{-3})^{-1})$ . Najwyższe wartości analizowanych parametrów odnotowano za każdym razem dla największego średniego wymiaru cząstek (1,96 mm) i najwyższej zawartości lepiszcza (2%). Należy przypuszczać, że zwiększanie dodatku lepiszcza do surowca wpływa na wzrost współczynnika tarcia cząstek materiału o siebie i ścianki komory zagęszczania. W konsekwencji prowadzi to do wzrostu wartości pracy zagęszczania jak też zmniejszenia podatności materiału na zagęszczanie.



Rys. 4. Zależność jednostkowej pracy zagęszczania ( $L_p$ ) i współczynnika ( $k_c$ ) od średniego wymiaru cząstek surowca ( $d_{sr}$ ) dla różnych dodatków lepiszcza ( $z$ )

Fig. 4. Correlation between compaction effort ( $L_c$ ), coefficient of susceptibility to compaction ( $k_c$ ) and average particle size ( $d_{sr}$ ) at various binder content levels ( $z$ )

Wyniki badań odporności mechanicznej aglomeratu (rys. 5) wykazują, że dla wszystkich badanych materiałów, najniższe wartości parametrów odnotowano dla  $d_{sr}=1,32$  mm. Minimalna wartość  $\delta_m$  (0,41 MPa) odnosi się do próby kontrolnej. Dla tego samego materiału, najwyższą wartość odporności (0,5 MPa), stwierdzono w przypadku surowca o największym stopniu rozdrobnienia. Natomiast dla materiałów zawierających lepiszcze, maksymalna odporność mechaniczna występuje w odniesieniu do najmniejszego stopnia rozdrobnienia, i dla  $z=2\%$  i wynosi 0,61 MPa. Różnice w wartościach analizowanego parametru – wynikające z oddziaływania lepiszcza – uwytłaniają się wraz ze wzrostem wartości  $d_{sr}$ . Dla minimalnego rozdrobnienia, 2% dodatek lepiszcza, pozwala na średni wzrost wartości  $\delta_m$  o 33%.



Rys. 5. Zależność odporności mechanicznej aglomeratu ( $\delta_m$ ) od średniego wymiaru cząstek surowca ( $d_{sr}$ ) dla różnych dodatków lepiszcza ( $z$ )

Fig. 5. Correlation between mechanical strength of agglomerate ( $\delta_m$ ) and average particle size ( $d_{sr}$ ) at various binder content levels ( $z$ )

## WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań można przedstawić następujące wnioski:

1. Stwierdzono, iż gęstość materiału w komorze zagęszczania – zarówno dla materiału bez dodatku lepiszcza, jak też z jego udziałem – zmniejsza się nieznacznie wraz ze zwiększaniem średniego wymiaru cząstek surowca średnio o -2,5%. Zmniejszanie stopnia rozdrobnienia surowca w badanym przedziale powoduje również zmniejszenie gęstości aglomeratu przeciętnie o 2%.
2. Stopień zagęszczenia materiału w komorze rośnie w całym badanym przedziale zmienności stopnia rozdrobnienia średnio o 55%. Z kolei stopień zagęszczenia aglomeratu wzrasta przeciętnie o 50%.
3. Zaobserwowano, że w najmniejszym stopniu rozpręża się aglomerat otrzymany z materiału o 2% zawartości lepiszcza. Średnie różnice między wspomnianym surowcem a próbą kontrolną wynoszą 8%.
4. Jednostkowa praca zagęszczania oraz współczynnik materiału na zagęszczanie zwiększają się wraz ze zwiększaniem średniego wymiaru cząstek surowca. Średnie zmiany w pierwszym przypadku wynoszą 11%, a w drugim 9%. Jednocześnie wykazano, iż wzrost dodatku lepiszcza wpływa na zmniejszenie podatności materiału na zagęszczanie.
5. Odporność mechaniczna aglomeratu (niezależnie od poziomu dodatku lepiszcza do materiału) przyjmuje najniższe wartości dla  $d_{sr} = 1,32$  mm. Natomiast najwyższe wartości parametru odnoszą się do  $d_{sr} = 0,82$  mm w przypadku próby kontrolnej i  $d_{sr} = 1,96$  mm w przypadku materiałów zawierających lepiszcze. Oddziaływanie lepiszcza na wartość niniejszego parametru uwidacznia się najistotniej dla materiału najmniej rozdrobnionego ( $d_{sr} = 1,96$  mm), gdzie wzrost odporności mechanicznej w stosunku do próby kontrolnej wynosi średnio 33%.

## LITERATURA

1. Kaliyan N., Morey V.R., 2009: Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*, 33:337-359.
2. Kulig R., Laskowski J., 2002. Określenie zależności między stopniem rozdrobnienia nasion roślin strączkowych a parametrami procesu granulowania. *Inżynieria Rolnicza*, 7a, 155-163.
3. Kulig R., Laskowski J., 2006. Nakłady energii w procesie granulowania śrut pszenicy o różnym stopniu rozdrobnienia. *Motrol*, tom 8A, 187-192.
4. 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.
5. Kulig R., Skonecki S., 2011. Wpływ wilgotności na parametry procesu zagęszczania wybranych roślin energetycznych. *Acta Agrophysica*, 17(2): 335-344.
6. Kulig R., Skonecki S. Łysiak G., 2012: The effect of binder addition on the parameters of compacted POP-LAR wood sawdust. *Teka Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*, vol. 12: 87-91.
7. Kowalczyk-Juśko A., Kulig R., Laskowski J., 2011. The influence of moisture content of selected energy crops on the briquetting process parameters. *Teka Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*, vol 11, 189-196.
8. Laskowski J., Skonecki S., 2001. Badania procesów aglomerowania surowców paszowych – aspekt metodyczny. *Inżynieria Rolnicza*, nr. 2(22), 187-193.
9. MacMahon M.J., Payne J.D., 1991: *The Pelleting Handbook*. Borregaard Lignotech, Sarpsborg Norway.
10. 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.
11. 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*, 33:1351-1357.
12. Restolho J.A., Prates A., de Pinho M.N., M.D., 2009: Sugars and lignosulphonates recovery from eucalyptus spent sulphite liquor by membrane processes. *Biomass and Bioenergy*, vol. 133, 1558-1566.
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. Sahoo S., Seydibeyo M.O., Mohanty A.K., Mishra M., 2011: Characterization of industrial lignins for their utilization in future value added applications. *Biomass and Bioenergy*, vol. 135, 4230-4237.
15. 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.
16. Skonecki S., Laskowski J., Kulig R., Łysiak G., 2012: Wpływ wilgotności materiału i średnicy komory na

parametry zagęszczania miskanta olbrzymiego. Acta Agrophysica vol. 20, nr. 1: 185-194

17. **Van Dam J. E. G., Van den Oever M. J. A., Teunissen W., Keijsers E. R. P., Peralta A. G., 2004:** Process for production of high density/high performance binderless boards from whole coconut husk. Part 1: lignin as intrinsic thermosetting binder resin. Industrial Crops and Products, vol. 19, 207–216.

THE EFFECT OF FRACTIONATION DEGREE  
ON THE COMPACTION PARAMETERS OF OILSEED  
RAPE STRAW ENHANCED WITH A BINDER

**Summary.** This study determines the effect of fractionation degree of oilseed rape straw (d<sub>sr</sub> from 0,82 to 1,96 mm) and the

addition of a calcium lignosulphonate binder (from 0 to 20%) on compaction parameters under model conditions. The straw's susceptibility to compaction and the quality of the resulting briquettes were analyzed. An increase in average particle size led to an increase in energy demand from 35,8 to 41,45 J•g<sup>-1</sup>. The coefficient of susceptibility to compaction decreased by -18% on average. The degree of compaction of material and the degree of compaction of agglomerate it accepts the highest values (suitably 24,8 and 12,4) for material about the smallest fractionation degree. Observe, that 2% addition of binder permits to reduce the degree of briquette expansion average about 7% as well as to enlarge the mechanical strength of agglomerate about 23% on the average.

**Key words:** compaction, briquetting, particle size distribution, binder, calcium lignosulphonate, oilseed rape straw.