

## **ODDZIAŁYWANIE CIŚNIENIA NA EFEKTYWNOŚĆ ZAGĘSZCZANIA TROCIN WYBRANEGO DREWNA MIĘKKIEGO**

Ryszard Kulig, Stanisław Skonecki, Sławomir Gawłowski,  
Adam Zdybel, Grzegorz Łysiak  
Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

**Streszczenie.** Przedstawiono wyniki badań nad określeniem wpływu ciśnienia zagęszczania (od 45 do 113 MPa) na parametry zagęszczanych trocin brzożowych. Badaniom poddano trociny surowe oraz zawierające dodatek lepiszcza w postaci lignosulfonianu wapnia. Zagęszczanie przeprowadzono przy wykorzystaniu maszyny wytrzymałościowej Zwick typ Z020/TN2S i zespołu prasującego z matrycą zamkniętą. Stwierdzono, że wraz ze wzrostem ciśnienia rośnie gęstość materiału w komorze i gęstość aglomeratu (przeciętnie o 18,5%) oraz blisko trzykrotnie zwiększa się odporność mechaniczna produktu. Zwiększanie ciśnienia zagęszczania powoduje wzrost zapotrzebowania na energię zagęszczania średnio o 108%. Wykazano, że dodatek lepiszcza zwiększa gęstość aglomeratu oraz powoduje wzrost wytrzymałości mechanicznej przeciętnie o 250%.

**Słowa kluczowe:** zagęszczanie, ciśnienie, lepiszcza, lignosulfonian wapnia, trociny, biomasa

### **WSTĘP**

Nieśląbujące zapotrzebowanie na biopaliwa stałe sprzyja zagospodarowaniu różnego rodzaju produktów ubocznych i pozostałości z przemysłu drzewnego. Szczególnym uznaniem w kontekście produkcji biopaliw kompaktowanych cieszą się trociny. Materiał ten zwykle charakteryzuje się składem granulometrycznym odpowiednim dla procesu aglomerowania ciśnieniowego i nie wymaga dodatkowego rozdrabniania. Jednak trociny ze względu na małą gęstość, utrudniającą transport, magazynowanie i dozowanie do kotłów oraz niską wartość opałową (odniesioną do jednostki objętości) są trudne w dystrybucji w naturalnej postaci. Dlatego w celu polepszenia przydatności do celów energetycznych należy przede wszystkim zwiększyć ich gęstość. Uzyskuje się to poprzez aglomerowanie ciśnieniowe luźnego surowca do postaci brykietu lub granulatu

---

Adres do korespondencji – Corresponding author: Ryszard Kulig, Katedra Eksploatacji Maszyn Przemysłu Spożywczego, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, ul. Doświadczalna 44, 20-280 Lublin, e-mail: ryszard.kulig@up.lublin.pl

(pelletu) [Hejft i Obidziński 2012, Mani i in. 2003, Skonecki i in. 2011, Sobczyk i Kowalska 2012].

Do produkcji wykorzystuje się trociny pochodzące zarówno z drewna liściastego jak i iglastego. Jednak odpady pochodzące z różnych gatunków drzew charakteryzują się odmiennym składem kompleksu lignocelulozowego. W przypadku procesu aglomerowania najistotniejsza jest zawartość ligniny, której udział w drzewach liściastych jest przeciętnie o 5% niższy niż w drzewach iglastych. Jest to bardzo istotne, gdyż lignina jest naturalnym lepiszczem, które spaja aglomeraty w całość [Wood 1987, Hejft 2002, Van Dam i in. 2004]. Stąd też w praktyce produkcyjnej często miesza się ze sobą trociny pochodzące z różnych gatunków drzew, aby zapewnić jednorodną zawartość tego składnika.

Z badań własnych [Kulig i in. 2012] wynika, że częściowym rozwiązaniem powyższego problemu może być stosowanie lepiszczy ligninowych w postaci lignosulfonianu wapnia. Związki te wiążą pojedyncze składniki mieszanki, zwiększając stabilność i jakość aglomeratów [MacMahon i Payne 1991, Restolho i in. 2009, Sahoo i in. 2011]. W konsekwencji uzyskany aglomerat cechuje się większą gęstością i wytrzymałością mechaniczną. To z kolei obniża całkowite koszty produkcji oraz ma korzystny wpływ na zmniejszenie kubatur przeznaczonych na magazynowanie, a także transport gotowego produktu.

W kontekście przebiegu procesu i jakości uzyskiwanego produktu, wyjątkowego znaczenia nabiera wartość stosowanego ciśnienia zagęszczania (jednostkowego nacisku tłoka) [Li i Liu 2000, Mani i in. 2006, Relova i in. 2009]. Stosowanie nieodpowiedniej wartości tego parametru może z jednej strony prowadzić do bezużytecznej konsumpcji energii, z drugiej zaś powodować otrzymywanie aglomeratu o nieodpowiednich właściwościach wytrzymałościowych.

Mając na uwadze powyższe, za cel niniejszej pracy przyjęto określenie wpływu jednostkowego nacisku tłoka na parametry procesu zagęszczania trocin brzoźowych z różnym dodatkiem lignosulfonianu wapnia.

## MATERIAŁ I METODY

Do badań przyjęto trociny brzoźowe pochodzące z tartaku usytuowanego w okolicach Lublina. Surowiec uzyskano w wyniku przecierania drewna piłą o podziałce 22,22 mm. Materiał badawczy poddawano suszeniu konwekcyjnemu w celu uzyskania założonego stopnia wilgotności, tj. 12%. Wymaganą wilgotność surowca wyznaczano na podstawie wzoru na zmienność masy w czasie, według następującej zależności:

$$m_1 = m_0 \left( \frac{100 - w_0}{100 - w_1} \right) \quad (\text{g}) \quad (1)$$

gdzie:

$m_0$  – początkowa masa surowca, g;

$m_1$  – masa surowca po dosuszeniu, g;

$w_0$  – początkowa wilgotność próbki surowca, %;

$w_1$  – wilgotność surowca po dosuszeniu, %.

Następnie do tak przygotowanego surowca dosypywano odważoną porcję lepiszcza (lignosulfonian wapnia) w ilości odpowiadającej dodatkowi na poziomie 1 i 2% (maksymalną wielkość dodatku przyjęto zgodnie z obowiązującą w tym zakresie normą PN-EN 14961-1:2010). Próbę kontrolną stanowił surowiec bez dodatku lepiszcza.

Badania ciśnieniowego zagęszczania wykonano zgodnie z metodyką przedstawioną przez Laskowskiego i Skoneckiego [2001]. W badaniach zagęszczania wykorzystano maszynę wytrzymałościową ZWICK typ Z020/TN25 z komputerową rejestracją parametrów procesu ściskania oraz zespół prasujący z matrycą zamkniętą. Średnica komory zagęszczania wynosiła 15 mm, temperatura cylindra (materiału zagęszczanego) 20°C, prędkość przemieszczania tłoka 10 mm·min<sup>-1</sup>. Zagęszczanie prowadzono dla pięciu wartości maksymalnej siły zagęszczania, tj. 8, 11, 14, 17 i 20 kN, co odpowiadało następującym wartościom ciśnienia zagęszczania: 45, 62, 80, 96 i 113 MPa. Zagęszczanie wykonano każdorazowo w trzech powtórzeniach.

W trakcie badania rejestrowano krzywą, tzw. charakterystykę zagęszczania (zależność siły zagęszczania od przemieszczenia tłoka), z której określono parametry procesu. Wyznaczono maksymalną gęstość materiału w komorze  $\rho_c$ , jednostkową pracę zagęszczania  $L_c$  ( $L_c = L \cdot m^{-1}$ , gdzie:  $L$  – praca zagęszczania,  $m$  – masa próbki materiału). 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 brykietu określono gęstość  $\rho_a$  aglomeratu po 48 godzinach przechowywania. Obliczono stopień zagęszczenia materiału w komorze  $S_{zm}$  i uzyskanego aglomeratu  $S_{za}$  (krotność zmniejszenia objętości), obliczane jako iloraz gęstości  $\rho_c$  i  $\rho_a$  do gęstości początkowej w komorze  $\rho_n$  ( $S_{zm} = \rho_c \cdot \rho_n^{-1}$ ,  $S_{za} = \rho_a \cdot \rho_n^{-1}$ ).

Następnie określono jakość aglomeratu ze względu na wytrzymałość mechaniczną. W tym celu otrzymane aglomeraty poddawano testowi ściskania na maszynie wytrzymałościowej ZWICK Z020/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 wyznaczano maksymalną siłę niszczącą  $F_n$ . Na tej podstawie obliczono tzw. odporność mechaniczną aglomeratu  $\sigma_n$  [MPa] ze wzoru [Li i in. 2000, Ruiz i in. 2000]:

$$\sigma_n = \frac{2 \cdot F_n}{\pi \cdot d \cdot l} \quad (3)$$

Analizę zależności pomiędzy ciśnieniem zagęszczania a parametrami procesu aglomerowania (dla różnych zawartości lepiszcza w surowcu) wykonano przy wykorzystaniu procedur statystycznych zawartych w programie STATISTICA, przyjmując za każdym razem poziom istotności  $\alpha_i = 0,01$ . Przy wyborze postaci równań stosowano metodę regresji krokowej wstecznej. Istotność współczynników równania regresji badano testem t-Studenta. Natomiast adekwatność modelu sprawdzano, stosując test Fishera.

## WYNIKI BADAŃ

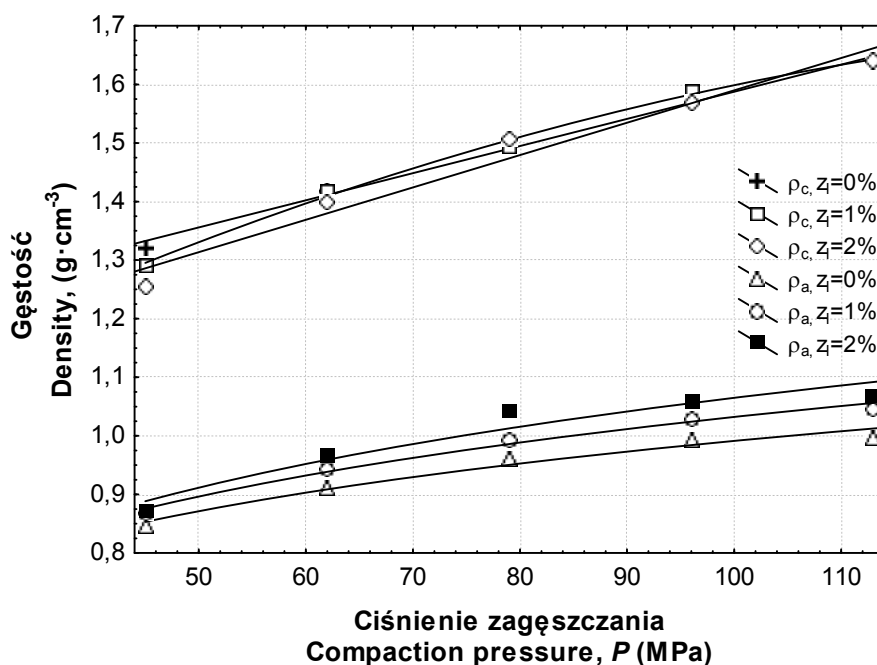
Równania regresji opisujące zależności badanych cech procesu aglomerowania od ciśnienia zagęszczania i zawartości lepiszcza w surowcu zestawiono w tabeli 1. Analiza regresji wykazała, że otrzymane zależności mogą być opisane równaniami liniowymi lub równaniami logarytmicznymi. Zależności te przedstawiono na rysunkach 1–4.

Tab. 1. Równania regresji opisujące zależność gęstości  $\rho_c$ ,  $\rho_a$ , pracy  $L_c$ , współczynnika  $k_c$ , stopni zagęszczenia  $S_{zm}$ ,  $S_{za}$ , i odporności mechanicznej  $\sigma_n$  od ciśnienia zagęszczania  $P$  dla różnych zawartości lepiszcza w trocinach  $Z_i$  oraz wartości współczynnika determinacji  $R^2$

Table 1. Regression equations describing the dependence of density  $\rho_c$ ,  $\rho_a$ , compactive effort  $L_c$ , coefficient  $k_c$ , degrees of compaction  $S_{zm}$ ,  $S_{za}$  and mechanical strength  $\sigma_n$  on compaction pressure  $P$  and binder content  $Z_i$ , with the values of determination coefficient  $R^2$

| Cecha<br>Feature  | Zawartość<br>lepiszcza<br>Binder content | Równanie regresji<br>Regression equation | $R^2$ |
|---|--|--|-------|
| Gęstość materiału w komorze<br>Density of material in the chamber, $\rho_c$                             | $Z_i=0\%$                                | $\rho_c = 0,0046P + 1,125$               | 0,993 |
|   | $Z_i=1\%$                                | $\rho_c = 0,0051P + 1,083$               | 0,981 |
|   | $Z_i=2\%$                                | $\rho_c = 0,005P + 1,125$                | 0,933 |
| Gęstość aglomeratu po 48 godz.<br>Density of agglomerate after 48 h., $\rho_a$                          | $Z_i=0\%$                                | $\rho_a = 0,172 \ln P + 0,199$           | 0,965 |
|   | $Z_i=1\%$                                | $\rho_a = 0,197 \ln P + 0,125$           | 0,953 |
|   | $Z_i=2\%$                                | $\rho_a = 0,172 \ln P + 0,199$           | 0,939 |
| Praca zagęszczania<br>Compression work, $L_c$   | $Z_i=0\%$                                | $L_c = 0,369P + 5,603$                   | 0,954 |
|   | $Z_i=1\%$                                | $L_c = 0,352P + 7,078$                   | 0,984 |
|   | $Z_i=2\%$                                | $L_c = 0,374P + 8,262$                   | 0,997 |
| Współczynnik podatności materiału na zagęszczenie<br>Coefficient of susceptibility to compaction, $k_c$ | $Z_i=0\%$                                | $k_c = 0,124P + 4,649$                   | 0,989 |
|   | $Z_i=1\%$                                | $k_c = 0,122P + 5,607$                   | 0,949 |
|   | $Z_i=2\%$                                | $k_c = 0,123P + 7,226$                   | 0,996 |
| Stopień zagęszczenia materiału<br>Degree of material compaction, $S_{zm}$                               | $Z_i=0\%$                                | $S_{zm} = 0,016P + 10,11$                | 0,994 |
|   | $Z_i=1\%$                                | $S_{zm} = 0,017P + 9,985$                | 0,981 |
|   | $Z_i=2\%$                                | $S_{zm} = 0,021P + 9,553$                | 0,984 |
| Stopień zagęszczenia aglomeratu<br>Degree of agglomerate compaction, $S_{za}$                           | $Z_i=0\%$                                | $S_{za} = 0,586 \ln P + 4,448$           | 0,981 |
|   | $Z_i=1\%$                                | $S_{za} = 0,713 \ln P + 4,14$            | 0,961 |
|   | $Z_i=2\%$                                | $S_{za} = 0,727 \ln P + 4,408$           | 0,911 |
| Odporność mechaniczna aglomeratu<br>Agglomerate mechanical strength, $\delta_m$                         | $Z_i=0\%$                                | $\delta_m = 0,4 \ln P - 1,408$           | 0,983 |
|   | $Z_i=1\%$                                | $\delta_m = 0,727 \ln P - 2,608$         | 0,923 |
|   | $Z_i=2\%$                                | $\delta_m = 0,827 \ln P - 2,548$         | 0,965 |

**Gęstość surowca w komorze i aglomeratu.** Z analizy wyników badań przedstawionych na rys. 1 wynika, że dla każdej zawartości lepiszcza w surowcu  $z_i$ , wraz ze zwiększeniem ciśnienia rośnie gęstość materiału w komorze  $\rho_c$ . Natomiast w przypadku gęstości aglomeratu  $\rho_a$  największy wzrost następuje w przedziale ciśnienia 45–80 MPa. Z kolei dalsze zwiększanie ciśnienia praktycznie nie przyczynia się do wzrostu gęstości otrzymywanego aglomeratu. W odniesieniu do ciśnień 96 i 113 MPa otrzymane różnice w wartościach parametru  $\rho_a$  są statystycznie nieistotne ( $p > 0,01$ ). Za każdym razem najwyższe wartości analizowanych parametrów otrzymano dla materiału o maksymalnej zawartości lepiszcza, a najniższe dla materiału bez dodatku lepiszcza.

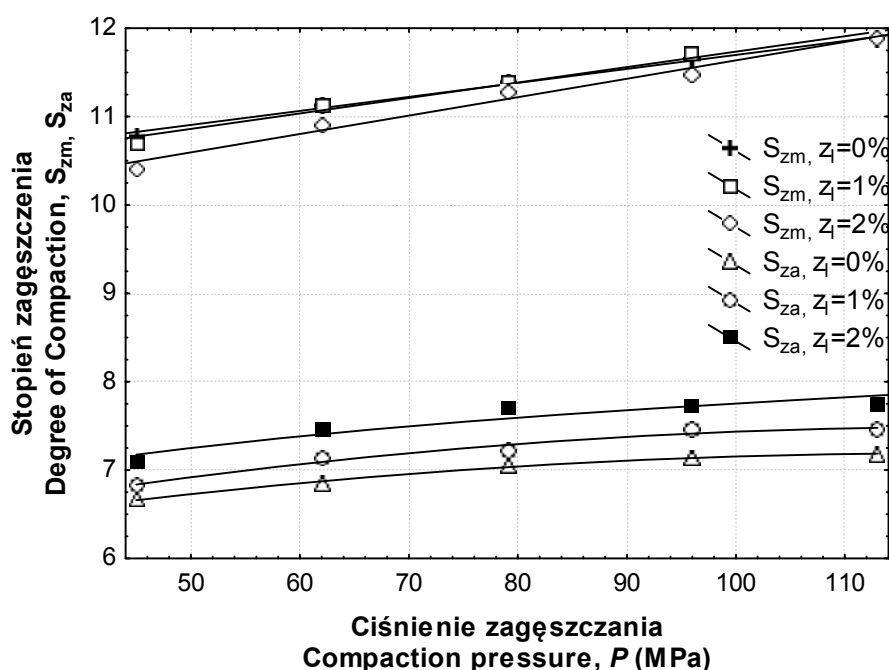


Rys. 1. Zależność gęstości materiału w komorze zagęszczania ( $\rho_c$ ) i gęstości aglomeratu ( $\rho_a$ ) od ciśnienia zagęszczania ( $P$ ) dla różnych zawartości lepiszcza w materiale ( $z_i$ )

Fig. 1. Dependence of material density in the chamber ( $\rho_c$ ) and agglomerate density ( $\rho_a$ ) on compaction pressure ( $P$ ) at various binder content levels ( $z_i$ )

W odniesieniu do materiału o zawartości lepiszcza na poziomie 2%, zakres zmienności gęstości w przedziale ciśnienia 45–113 MPa wynosi dla  $\rho_c$  od  $1,25 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  do  $1,6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , a dla  $\rho_a$  od  $0,87 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  do  $1,07 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Warto podkreślić, że w przypadku gęstości materiału w komorze zagęszczania, oddziaływanie lepiszcza na wartość tego parametru ma niewielki wpływ. Przy czym najbardziej jest on dostrzegalny w przedziale ciśnienia od 45 do 96 MPa.

**Stopień zagęszczenia aglomeratu.** Wyniki badań stopnia zagęszczania materiału w komorze i aglomeratu po przechowywaniu wykazują, że wartość parametrów zwiększa się wraz ze wzrostem ciśnienia zagęszczania (rys. 2). Maksymalna gęstość materiału w komorze  $\rho_c$  uzyskana w wyniku stosowania ciśnienia 113 MPa jest przeciętnie 11,8 razy większa od gęstości początkowej materiału  $\rho_n$ , niezależnie od zawartości lepiszcza w materiale. Przy czym daje się zauważyć, że oddziaływanie lepiszcza w odniesieniu do wzrostu wartości analizowanego parametru dotyczy przede wszystkim ciśnienia zagęszczania w przedziale od 45 do 96 MPa.

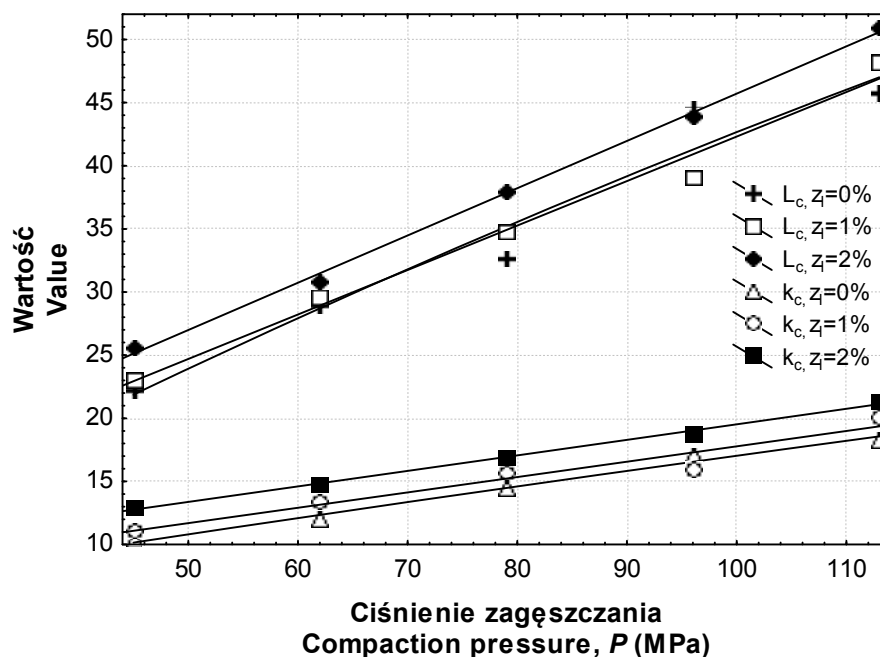


Rys. 2. Zależność stopnia zagęszczenia materiału w komorze ( $S_{zm}$ ) i stopnia zagęszczenia aglomeratu ( $S_{za}$ ) od ciśnienia zagęszczania ( $P$ ) dla różnych zawartości lepiszcza w materiale ( $z_l$ )

Fig. 2. Dependence of material compaction degree ( $S_{zm}$ ) and agglomerate compaction degree ( $S_{za}$ ) on compaction pressure ( $P$ ) at various binder content levels ( $z_l$ )

Największym stopniem zagęszczenia aglomeratu  $S_{za}$  charakteryzuje się materiał o zawartości 2% lepiszcza, zagęszczany zarówno przy ciśnieniu 80, 96, jak i 113 MPa. W tym przypadku gęstość aglomeratu jest około 7,6 razy większa od gęstości początkowej materiału. Dla wszystkich badanych materiałów, tak jak w przypadku zmian gęstości  $\rho_a$ , największy wzrost stopnia zagęszczenia następuje w przedziale ciśnienia 45–80 MPa.

**Praca zagęszczania i podatność materiału na zagęszczanie.** Zależności pomiędzy jednostkową pracą zagęszczania  $L_c$  i współczynnikiem podatności materiału na zagęszczanie  $k_c$  a ciśnieniem zagęszczania  $P$  przedstawiono na rys. 3. W całym zakresie badawczym wartość analizowanych parametrów rośnie wraz ze zwiększaniem ciśnienia zagęszczania. Prawidłowość taka występuje w odniesieniu do wszystkich badanych materiałów. Wartość parametru  $L_c$  zawiera się w przedziale od 22,61 do 50,94  $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$ , a parametru  $k_c$  od 10,34 do 21,34  $(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})\cdot(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})^{-1}$ . Najwyższe wartości analizowanych parametrów odnotowano za każdym razem dla maksymalnego ciśnienia zagęszczania (113 MPa) i najwyższej zawartości lepiszcza (2%). Można 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, a także zmniejszenia podatności materiału na zagęszczanie (rys. 3).

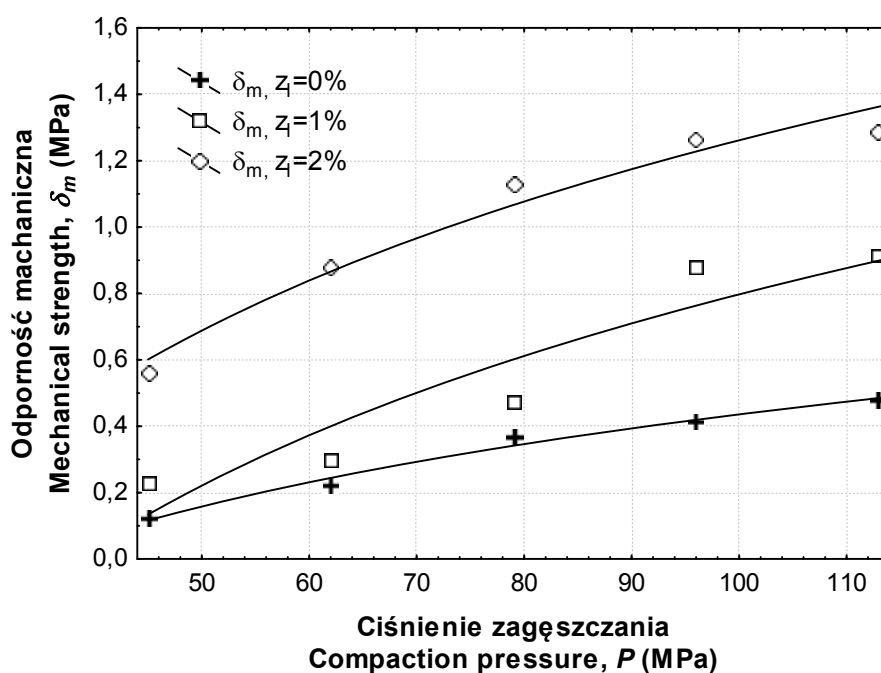


Rys. 3. Zależność jednostkowej pracy zagęszczania ( $L_c$ ) i współczynnika podatności materiału na zagęszczanie ( $k_c$ ) od ciśnienia zagęszczania ( $P$ ) dla różnych zawartości lepiszcza w materiale ( $z_i$ )

Fig. 3. Dependence of compaction effort ( $L_c$ ) and coefficient of susceptibility to compaction ( $k_c$ ) on compaction pressure ( $P$ ) at various binder content levels ( $z_i$ )

**Odporność mechaniczna aglomeratu.** Wyniki badań odporności mechanicznej  $\sigma_n$  wykazały, że dla każdego rodzaju materiału wytrzymałość aglomeratu rośnie wraz ze zwiększeniem ciśnienia zagęszczania w przedziale 45–96 MPa (rys. 4). Natomiast

zwiększenie ciśnienia do 113 MPa w odniesieniu do surowca zawierającego 1 i 2% lepiszcza nie daje zauważalnych efektów w postaci wzrostu odporności mechanicznej. Jedynie w przypadku materiału kontrolnego następuje nieznaczny wzrost parametru  $\sigma_n$ . Wartość odporności mechanicznej zawiera się w przedziale od 0,12 do 1,28 MPa. Największe wartości wykazują aglomeraty otrzymane podczas zagęszczania materiału z 2% dodatkiem lepiszcza, przy stosowaniu nacisku 96 i 113 MPa.



Rys. 4. Zależność odporności mechanicznej aglomeratu ( $\sigma_n$ ) od ciśnienia zagęszczania ( $P$ ) dla różnych zawartości lepiszcza w materiale ( $z_i$ )

Fig. 4. Dependence of mechanical strength of agglomerate ( $\sigma_n$ ) on compaction pressure ( $P$ ) at various binder content levels ( $z_i$ )

Należy także zaznaczyć, że wraz ze wzrostem ciśnienia w przedziale 45–96 MPa, różnice w wartościach  $\sigma_n$  (wynikające z różnej zawartości lepiszcza w surowcach) pogłębiają się. Przy wartościach ciśnienia zagęszczania 96 i 113 MPa (dla materiału zawierającego 2% lepiszcza) odporność mechaniczna jest ponad 3 razy wyższa od wartości uzyskanej dla materiału kontrolnego.



## WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań można przedstawić następujące wnioski:

1. Stwierdzono, iż gęstość materiału w komorze zagęszczania – zarówno dla materiału bez dodatku lepiszcza, jak i z jego udziałem – rośnie wraz ze zwiększaniem ciśnienia zagęszczania średnio o 27%. Wzrost ciśnienia zagęszczania w badanym przedziale powoduje również zwiększenie gęstości aglomeratu przeciętnie o 18,5%. W przypadku parametru  $\rho_a$  istotne staje się także oddziaływanie dodatku lepiszcza, średni wzrost wartości gęstości aglomeratu (wynikający z tego tytułu) wynosi 10%.

2. Stopień zagęszczenia materiału w komorze rośnie w całym badanym przedziale zmienności ciśnienia przeciętnie o 11%. Z kolei stopień zagęszczenia aglomeratu wzrasta jedynie w przedziale ciśnienia 45–96 MPa średnio o 9,5%.

3. Jednostkowa praca zagęszczania oraz współczynnik podatności materiału na zagęszczanie zwiększają się wraz ze wzrostem ciśnienia zagęszczania. Średnie zmiany w pierwszym przypadku wynoszą 108%, a w drugim 81%. Jednocześnie wykazano, iż wzrost dodatku lepiszcza wpływa na zmniejszenie podatności materiału na zagęszczanie.

4. Zwiększanie ciśnienia zagęszczania w badanym przedziale przyczynia się do wzrostu wytrzymałości mechanicznej otrzymywanych aglomeratów średnio o 290%. Natomiast 2% dodatek lepiszcza do surowca zwiększa wartość  $\sigma_n$  przeciętnie o 250%.

## PIŚMIENNICTWO

- Hejft R., 2002. Ciśnieniowa aglomeracja materiałów roślinnych. Polit. Białostocka. Wyd. i Zakł. Poligrafii Inst. Technol. Eksploatacji w Radomiu.
- Hejft R., Obidziński S., 2012. The pressure agglomeration of the plant materials – the technological and technical innovations. part 1. J. Res. Appl. Agric. Eng. 57(1), 63–65.
- Kulig R., Skonecki S., Łysiak G., 2012. The effect of binder addition on the parameters of compacted POPLAR wood sawdust. Teka. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture 12, 87–91.
- Laskowski J., Skonecki S., 2001. Badania procesów aglomerowania surowców paszowych – aspekt metodyczny. Inżynieria Roln. 2(22), 187–193.
- Li Y., Liu H., 2000. High pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel. Biom. Bioen. 19(3), 177–186.
- 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 Technol. 113, 176–184.
- MacMahon M.J., Payne J.D., 1991. The pelleting handbook. Borregaard Lignotech, Sarpsborg Norway.
- Mani S., Tabil L.G., Sokhansanj S., 2003. An overview of compaction of biomass grinds. Powder Handling Process. 15, 160–168.
- 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. Biom. Bioen. 30(7), 648–654.

- Restolho J.A., Prates A., de Pinho M.N., Afonso M.D., 2009. Sugars and lignosulphonates recovery from eucalyptus spent sulphite liquor by membrane processes. *Biom. Bioen.* 33, 1558–1566.
- 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. *Biom. Bioen.* 33, 1351–1357.
- 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.
- Sahoo S., Seydibeyo M.O., Mohanty A.K., M. Misra M., 2011. Characterization of industrial lignins for their utilization in future value added applications. *Biom. Bioen.* 35, 4230–4237.
- Skonecki S., Kulig R., Potręć M., 2011. Ciśnieniowe zagęszczanie trocin sosnowych i topologicznych-parametry procesu i jakość aglomeratu. *Acta Agroph.* 18(1), 123–128.
- Sobczyk W., Kowalska A., 2012. The techniques of producing energy from biomass. *Teka. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture* 12(1), 257–261.
- Wood J.F., 1987: The functional properties of feed raw materials and their effect on the production and quality of feed pellets. *Anim. Feed Sci. Tech.* 18, 1–17.
- 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. *Industr. Crops Prod.* 19, 207–216.

## THE EFFECT OF PRESSURE ON EFFICIENCY OF CHOSEN SOFT WOOD SAWDUST

**Abstract.** This paper presents the investigation results of specific piston pressure (45 to 113 MPa) and the addition of a calcium lignosulphonate binder effect on the compaction parameters of white birch sawdust. The experiments were performed with the use of the ZWICK Z020/TN2S universal strength tester and a closed compression assembly. An increase in pressure led to an increase in material density in the compression chamber and agglomerate density (by 18.5% on average), and it more than doubled the mechanical strength of the agglomerate. Higher compaction pressure increased the demand for compaction energy by 108% on average. The addition of binder increased the agglomerate density and the mechanical strength of agglomerate by 250% on average.

**Key words:** compaction, pressure, binders, calcium lignosulphonate, sawdust, biomass