

## WPLYW ŚREDNICY KOMORY I WILGOTNOŚCI SŁOMY PSZENNEJ NA PARAMETRY ZAGĘSZCZANIA

*Stanisław Skonecki, Janusz Laskowski*

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

**Streszczenie.** Opracowanie jest kontynuacją badań nad określeniem wpływu parametrów komory i wilgotności materiału na zagęszczanie surowców biologicznych. Przedstawiono wyniki badań nad określeniem wpływu warunków zagęszczania słomy pszennej na parametry procesu i wytrzymałość aglomeratu. Do badań wykorzystano maszynę wytrzymałościową ZWICK typ ZO2O/TN25 oraz zespół prasujący z matrycą zamkniętą o trzech średnicach komory 12 mm, 15 mm i 18 mm. Określono zależności pomiędzy gęstością materiału w komorze i aglomeratu, stopniem zagęszczenia aglomeratu, nakładami pracy na zagęszczanie, współczynnikiem podatności materiału na zagęszczanie oraz odpornością mechaniczną aglomeratu a wilgotnością słomy dla trzech średnic komory. Stwierdzono, że parametry zagęszczania w różnym stopniu zależą od wilgotności słomy pszennej i średnicy komory matrycy. Wzrost wilgotności polepsza podatność materiału na zagęszczanie oraz pogarsza jakość aglomeratów pod względem ich wytrzymałości.

Słowa kluczowe: aglomerowanie, słoma pszenna, parametry zagęszczania

### WYKAZ OZNACZEŃ

$d$  – średnica aglomeratu (mm),

$F_n$  – siła niszcząca aglomerat (N),

$k_c$  – współczynnik podatności materiału na zagęszczanie  $\{k_c=(L_c')\cdot(\rho_c-\rho_n)^{-1}\}$ ; (J·cm<sup>3</sup>·g<sup>-2</sup>),

$l$  – długość aglomeratu (mm),

$L_c$  – praca zagęszczania (J),

$L_c'$  – jednostkowa praca zagęszczania  $\{L_c'=L_c\cdot m^{-1}\}$ ; (J·g<sup>-1</sup>),

$m$  – masa zagęszczanego materiału (g),

$R^2$  – współczynnik determinacji,

$S_{za}$  – stopień zagęszczenia aglomeratu  $\{S_{za}=\rho_{a1}\cdot\rho_n^{-1}\}$ ,

$\rho_c$  – maksymalna gęstość materiału w komorze zagęszczania (g·cm<sup>-3</sup>),

$\rho_{a1}$  – gęstość aglomeratu po 48 h. przechowywania (g·cm<sup>-3</sup>),

$\rho_n$  – początkowa gęstość materiału w komorze zagęszczania (w stanie zsypanym) ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ),  
 $\sigma_n$  – odporność mechaniczna aglomeratu (MPa).

## WSTĘP

Biomasa roślinna, wykorzystywana jako nośnik energetyczny, ze względu na małą gęstość oraz niską wartość opałową (odniesioną do jednostki objętości) jest trudna w dystrybucji w postaci nieprzetworzonej (Adamczyk i in. 2005). Dla polepszenia przydatności biomasy do celów energetycznych należy zwiększyć jej gęstość, co uzyskuje się między innymi przez ciśnieniowe zagęszczenie luźnego surowca w procesie brykietowania w urządzeniach z układami roboczymi „komora zamknięta – tłok zagęszczający”. Badania tego procesu, prowadzone w skali laboratoryjnej przy wykorzystaniu matrycy z komorą zamkniętą, umożliwiają określenie parametrów zagęszczania w tym energochłonności, podatności materiału na zagęszczanie i jakości aglomeratu, co ma duże znaczenie poznawcze dla procesów aglomerowania różnych surowców (brykietowania i granulowania - peletowania). Parametry ciśnieniowego aglomerowania biologicznych surowców i jakość uzyskanego aglomeratu zależą od właściwości fizycznych i chemicznych przetwarzanego surowca, a szczególnie od jego wilgotności (Adapa i in. 2009, Hejft 2002, Laskowski i in. 2005, Mani i in. 2006). We wcześniejszych pracach przedstawiono wyniki badań wpływu wilgotności surowców paszowych (Laskowski i in. 2005), łusek kolb kukurydzy, słomy owsianej i trawy turzycowej (Skonecki i Potręć 2008 a,b; 2010) na parametry aglomerowania, podatność materiału na zagęszczanie i jakość aglomeratu. Uzyskiwane wartości parametrów ciśnieniowego aglomerowania zależne są również od warunków zagęszczania, w tym od wielkości komory i masy próbki materiału. W opracowaniach (Laskowski i Skonecki 2004, 2005, 2006) zaprezentowano badania przeprowadzone dla ziarna pszenicy, nasion łubinu i poekstrakcyjnej śruty rzepakowej. Niniejsza praca stanowi kontynuację badań nad określeniem wpływu warunków pomiaru na parametry zagęszczania surowców roślinnych.

Celem prezentowanych badań jest określenie wpływu wilgotności słomy pszennej i średnicy komory na parametry zagęszczania i jakość uzyskanego aglomeratu.

## MATERIAŁ I METODY

Do badań przyjęto słomę pszenną. Surowiec rozdrobniono na rozdrabniaczu ML 500 z sitem o średnicy otworów 4 mm. Średni wymiar cząstek rozdrobnione-

go materiału, określony zgodnie z PN-89/R-64798 przy wykorzystaniu laboratoryjnego przesiewacza SASKIA Thyr 2 i zestawu sit o wymiarach oczek: 1,0; 0,8; 0,63; 0,4; 0,2 mm, wynosił 0,9 mm. Zagęszczanie wykonano dla materiału o wilgotności od 10% do 18% (co  $2\pm 0,2\%$ ).

W badaniach zagęszczania wykorzystano maszynę wytrzymałościową ZWICK typ ZO2O/TN25 z komputerową rejestracją parametrów procesu ściskania oraz zespół prasujący z matrycą zamkniętą. Szczegółowa metodyka badań zagęszczania została opisana w publikacjach (Laskowski i Skonecki 2001, 2004, 2005). Zastosowano trzy matryce o średnicach komory 12, 15 i 18 mm, w których zagęszczano surowiec o masie odpowiednio 1, 2 i 3 g. W ten sposób uzyskiwano w przybliżeniu jednakowy stosunek wysokości do średnicy próbki materiału w komorze przed procesem zagęszczania (około 8) oraz przy maksymalnym zagęszczeniu surowca w komorze (około 0,4). Prędkość przemieszczania tłoka wynosiła  $10 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ , temperatura cylindra (materiału zagęszczanego)  $20^\circ\text{C}$ , maksymalna siła zagęszczania  $F_{max} = 20 \text{ kN}$ . Przy tej sile zagęszczania uzyskiwano różny maksymalny jednostkowy nacisk tłoka na materiał dla poszczególnych średnic komory, wynoszący  $177 \text{ MPa}$  ( $d = 12 \text{ mm}$ ),  $114 \text{ MPa}$  ( $d = 15 \text{ mm}$ ) i  $77 \text{ MPa}$  ( $d = 18 \text{ mm}$ ). Zagęszczanie prowadzono każdorazowo w trzech powtórzeniach. Analizie poddano następujące parametry: maksymalną gęstość materiału w komorze  $\rho_c$ , pracę zagęszczania  $L_c$ , jednostkową pracę zagęszczania  $L'_c$ , stopień zagęszczenia aglomeratu  $S_{za}$  oraz współczynnik  $k_c$  charakteryzujący podatność materiału na zagęszczanie. Dla uzyskanego aglomeratu obliczono po 48 h przechowywania gęstość  $\rho_{a1}$ . Następnie określano jakość aglomeratu ze względu na wytrzymałość mechaniczną. Wyznaczono tzw. odporność mechaniczną aglomeratu. W badaniach wykorzystano maszynę wytrzymałościową ZWICK ZO20/TN2S (prędkość przemieszczania głowicy wynosiła  $10 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ). Aglomerat o średnicy  $d$  i długości  $l$  ściskano poprzecznie do osi do momentu zniszczenia (pęknięcia) i wyznaczono maksymalną siłę niszczącą  $F_n$ . Odporność mechaniczną  $\sigma_n$  (MPa) obliczono ze wzoru (Fell i Newton 1970, Li i in. 2000):

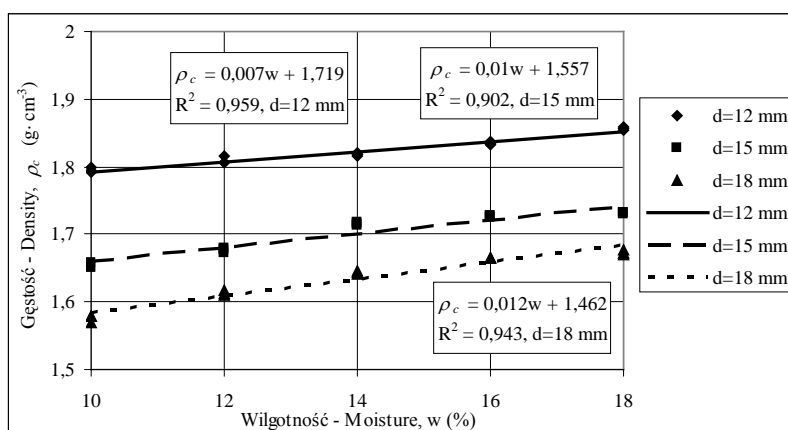
$$\sigma_n = \frac{2 \cdot F_n}{\pi \cdot d \cdot l} \quad (1)$$

## WYNIKI

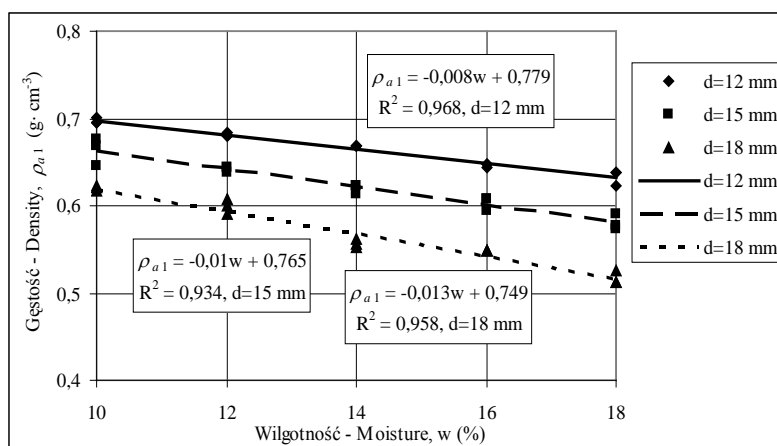
Wyznaczono zależności pomiędzy parametrami procesu zagęszczania i cechami aglomeratu a wilgotnością ( $w$ ) materiału dla każdej średnicy komory. Wykresy obrazujące te zależności oraz równania regresji i wartości współczynnika determinacji  $R^2$  przedstawiono na rysunkach 1-7.

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

Jak wynika z rysunków 1-2, uzyskane liniowe równania regresji dobrze opisują zależność maksymalnej gęstości materiału w komorze ( $\rho_c$ ) i gęstości aglomeratu ( $\rho_{a1}$ ) od wilgotności słomy pszennej dla każdej średnicy komory zagęszczania.



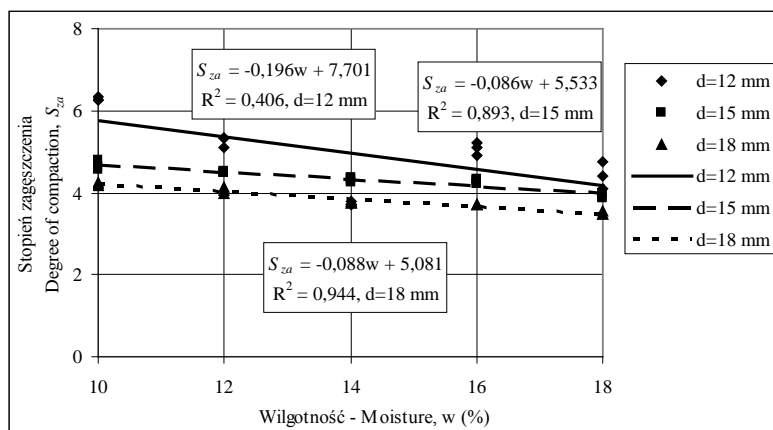
**Rys. 1.** Zależności gęstości materiału w komorze  $\rho_c$  od wilgotności materiału  $w$  dla trzech średnic  $d$  komory  
**Fig. 1.** Relation of density of the material in the chamber  $\rho_c$  to material moisture  $w$  for three chamber diameters  $d$



**Rys. 2.** Zależności gęstości aglomeratu  $\rho_{a1}$  od wilgotności materiału  $w$  dla trzech średnic  $d$  komory  
**Fig. 2.** Relation of density of agglomerate  $\rho_{a1}$  to material moisture  $w$  for three chamber diameters  $d$

Wraz ze zwiększeniem wilgotności gęstość materiału w komorze  $\rho_c$  rośnie, a aglomeratu  $\rho_{a1}$  maleje. Zarówno gęstości  $\rho_c$  i  $\rho_{a1}$  mają największe wartości dla najmniejszej średnicy komory zagęszczania  $d = 12$  mm. Zakres zmienności gęstości w przedziale wilgotności 10-18% dla tej komory wynosi dla  $\rho_c$  od  $1,79 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  do  $1,86 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , a dla  $\rho_{a1}$  od  $0,7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  do  $0,63 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Natomiast najmniejsze wartości tych gęstości uzyskano w przypadku zagęszczania surowca w komorze o największej średnicy  $d = 18$  mm. Gęstości wynoszą:  $\rho_c$  od  $1,58 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  do  $1,67 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,  $\rho_{a1}$  od  $0,62 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  do  $0,51 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Uzyskiwane gęstości materiału  $\rho_c$  i aglomeratu  $\rho_{a1}$  przy zagęszczaniu w matrycy o średnicy komory  $d = 18$  mm są około 11-15% mniejsze od gęstości w przypadku zagęszczania w komorze o średnicy  $d = 12$  mm. Wyniki wykazały także, że taką samą gęstość można uzyskać przy stosowaniu matrycy o różnych średnicach komory i odpowiedniej wilgotności materiału.

Zmiany gęstości aglomeratu potwierdzają wyniki dla stopnia zagęszczenia aglomeratu  $S_{za}$  (rys. 3), charakteryzującego wielkość zmiany gęstości aglomeratu po przechowywaniu w stosunku do gęstości początkowej materiału (krotność zmniejszenia objętości). Największym stopniem zagęszczenia  $S_{za}$  charakteryzuje się słoma pszenna o wilgotności 10% zagęszczana w komorze o średnicy  $d = 12$  mm (gęstość aglomeratu jest około 6 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.



**Rys. 3.** Zależność stopnia zagęszczenia aglomeratu  $S_{za}$  od wilgotności materiału  $w$  dla trzech średnic  $d$  komory

**Fig. 3.** Degree of compaction of agglomerate  $S_{za}$  in relation to material moisture  $w$  for three chamber diameters  $d$

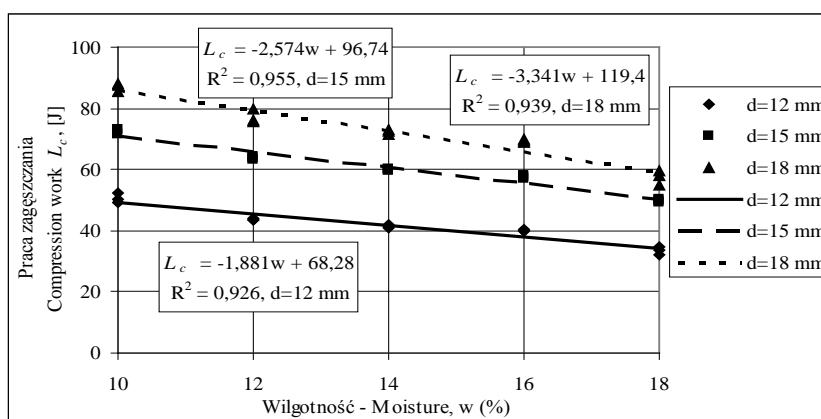
### Praca zagęszczania i podatność materiału na zagęszczanie

Zależności pomiędzy pracą zagęszczania  $L_c$  i jednostkową pracą zagęszczania  $L_c'$  a wilgotnością surowca dla trzech średnic komory przedstawiono na rysunkach 4-5. Całkowita praca zagęszczania  $L_c$  (rys. 4) zawiera się w przedziale od 85,7 J dla średnicy 18 mm ( $w = 10\%$ ) do 33,8 J dla średnicy 12 mm ( $w = 18\%$ ). Praca ta maleje wraz ze zwiększeniem wilgotności słomy dla każdej matrycy. Największe wartości tej pracy uzyskano w przypadku zagęszczania surowca w matrycy o największej średnicy  $d = 18$  mm. Natomiast wartość jednostkowej pracy zagęszczania  $L_c'$  (rys. 5) dla badanego surowca zawiera się w przedziale od 50,1  $J \cdot g^{-1}$  dla średnicy  $d = 12$  mm ( $w = 10\%$ ) do 18,2  $J \cdot g^{-1}$  dla  $d = 18$  mm ( $w = 18\%$ ). Ze wzrostem wilgotności materiału, podobnie jak dla pracy zagęszczania  $L_c$  (rys. 4), maleją nakłady jednostkowej pracy  $L_c'$  (rys. 5). Największe wartości jednostkowej pracy  $L_c'$  uzyskano dla zagęszczania badanej słomy w matrycy o najmniejszej średnicy  $d = 12$  mm.

Z równań regresji opisujących zależność współczynnika  $k_c$  od wilgotności słomy pszennej (rys. 6) wynika, że współczynnik  $k_c$  maleje wraz ze zwiększeniem wilgotności dla każdej średnicy komory. Największe wartości  $k_c$ , dla każdej wilgotności, uzyskano w przypadku zagęszczania słomy w matrycy o średnicy  $d = 12$  mm, a najmniejsze dla  $d = 18$  mm.

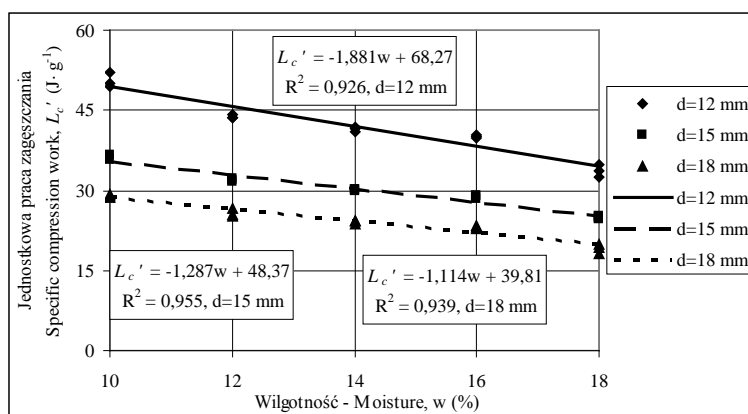
Minimalna wartość  $k_c$  dla  $d = 12$  mm ( $w = 18\%$ ) wynosi 19,7  $J \cdot cm^3 \cdot g^{-2}$ , a maksymalna 29,8  $J \cdot cm^3 \cdot g^{-2}$ . Natomiast dla średnicy  $d = 18$  mm, ze zwiększeniem wilgotności słomy od 10% do 18%, współczynnik  $k_c$  maleje od 19,3  $J \cdot cm^3 \cdot g^{-2}$  do 12,7  $J \cdot cm^3 \cdot g^{-2}$ .

Otrzymane wyniki współczynnika  $k_c$  (rys. 6) potwierdzają tendencje zmiany  $k_c$  ze wzrostem wilgotności jak dla zagęszczania innych surowców (Laskowski i in. 2005, Skonecki i Potręć 2008 a, b; 2010).



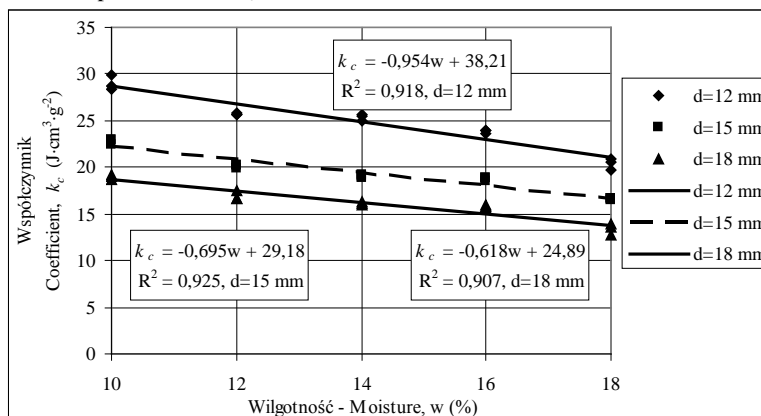
**Rys. 4.** Zależność pracy zagęszczania  $L_c$  od wilgotności materiału  $w$  dla trzech średnic  $d$  komory

**Fig. 4.** Compression work  $L_c$  in relation to material moisture  $w$  for three chamber diameters  $d$



**Rys. 5.** Zależność jednostkowej pracy zagęszczania  $L_c'$  od wilgotności materiału  $w$  dla trzech średnic  $d$  komory

**Fig. 5.** Specific compression work  $L_c'$  in relation to material moisture  $w$  for three chamber diameters  $d$



**Rys. 6.** Zależność współczynnika podatności na zagęszczanie  $k_c$  od wilgotności materiału  $w$  dla trzech średnic  $d$  komory

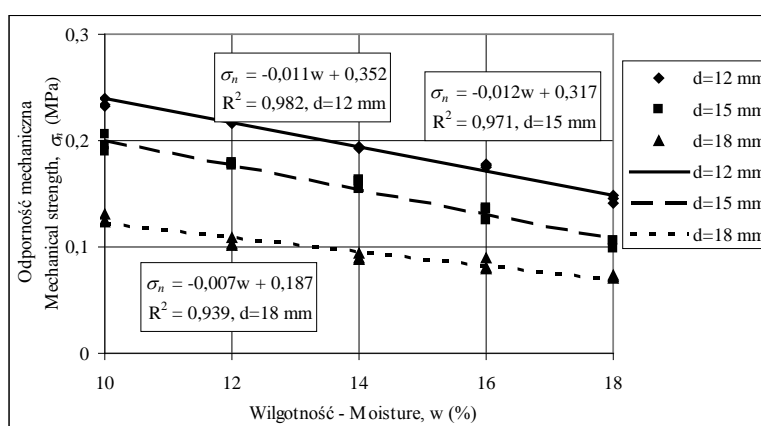
**Fig. 6.** Coefficient of susceptibility to compaction  $k_c$  in relation to material moisture  $w$  for three chamber diameters  $d$

### Wytrzymałość aglomeratu

Wyniki badań odporności mechanicznej  $\sigma_n$  wykazały, że wytrzymałość aglomeratu maleje ze zwiększeniem wilgotności słomy dla każdej matrycy (rys. 7).

Największą odporność mechaniczną dla każdej wilgotności uzyskują aglomeraty słomy pszennej otrzymane podczas zagęszczania w komorze o średnicy  $d = 12$  mm, najmniejszą zaś w komorze o średnicy 18 mm. Odporność mechaniczna  $\sigma_n$  zawiera się w przedziale od 0,24 MPa dla średnicy 12 mm (wilgotność  $w = 10\%$ ) do

0,07 MPa dla średnicy 18 mm (wilgotność  $w = 18\%$ ). Podobna zmienność jak odporność mechaniczna (w zależności od wilgotności i wielkości komory) występuje dla gęstości aglomeratu (rys. 2). Zagęszczając materiał w komorze o najmniejszej średnicy, przy największym maksymalnym nacisku jednostkowym, uzyskuje się więc aglomeraty o największej gęstości (rys. 2) i odporności mechanicznej (rys. 7), jednak ze względu na największe nakłady jednostkowej pracy (rys. 5) proces może być energochłonny.



**Rys. 7.** Zależność odporności mechanicznej aglomeratu  $\sigma_n$  od wilgotności materiału  $w$  dla trzech średnic  $d$  komory

**Fig. 7.** Agglomerate mechanical strength  $\sigma_n$  in relation to material moisture  $w$  for three chamber diameters  $d$

## WNIOSKI

1. Wyniki eksperymentu wykazały, że wilgotność przyjętej do badań biomasy roślinnej oraz wielkość średnicy komory matrycy odgrywają istotną rolę podczas brykietowania (ciśnieniowego zagęszczania materiału w komorze zamkniętej) oraz mają znaczny wpływ na wytrzymałość mechaniczną uzyskanego aglomeratu.

2. Zwiększenie wilgotności słomy pszennej od 10% do 18% wywołuje zwiększenie maksymalnej gęstości surowca w komorze ( $\rho_c$ ) oraz zmniejszenie: gęstości aglomeratu ( $\rho_{a1}$ ), pracy zagęszczania ( $L_c$ ), jednostkowej pracy zagęszczania ( $L_c'$ ) oraz stopnia zagęszczenia aglomeratu ( $S_{za}$ ).

3. Wzrost wilgotności polepsza podatność materiału na zagęszczanie (świadczy o tym mniejsza wartość współczynnika  $k_c$ ), ale zwiększa rozprężenie



aglomeratu, co powoduje spadek wytrzymałości (odporności mechanicznej ( $\sigma_n$ )) aglomeratu.

4. Zwiększenie średnicy komory zagęszczania wywołuje zmniejszenie maksymalnej gęstości surowca w komorze ( $\rho_c$ ), gęstości aglomeratu ( $\rho_{a1}$ ), jednostkowej pracy zagęszczania ( $L_c'$ ) oraz stopnia zagęszczenia aglomeratu ( $S_{za}$ ). Uzyskane aglomeraty słomy pszennej w matrycach o większej średnicy komory odznaczają się mniejszą wytrzymałością mechaniczną.

#### PIŚMIENNICTWO

- Adamczyk F., Frąckowiak P., Mielec K., Kośmicki Z., 2005. Problematyka badawcza w procesie zagęszczania słomy przeznaczonej na opał. *Journal of Research and Application in Agricultural Engineering*, 50(4), 5-8.
- Adapa P., Tabil L., Schoenau G., 2009. Compaction characteristics of barley, canola, oat and wheat straw. *Biosystems Engineering*, 104, 335-344.
- Fell J. T., Newton J. M., 1970. Determination of tablet strength by the diametral compression test. *J. Pharm. Sci.*, 59(5), 688-691.
- Hejft R., 2002. Ciśnieniowa aglomeracja materiałów roślinnych. Politechnika Białostocka, Wyd. i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu.
- Laskowski J., Łysiak G., Skonecki S., 2005. 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, 159 ss.
- Laskowski J., Skonecki S., 2001. Badania procesów aglomerowania surowców paszowych-aspekt metodyczny. *Inżynieria Rolnicza*, 2(22), 187-193.
- Laskowski J., Skonecki S., 2004. Wpływ masy materiału i średnicy komory na parametry zagęszczania ziarna pszenicy. *Inżynieria Rolnicza*, 5 (60), 195-204.
- Laskowski J., Skonecki S., 2005. Wpływ parametrów komory i masy materiału na zagęszczanie nasion łubinu. *Inżynieria Rolnicza*, 7 (67), 101-108.
- Laskowski J., Skonecki S., 2006. Wpływ średnicy komory i masy materiału na zagęszczanie poekstrakcyjnej śruty rzepakowej. *Inżynieria Rolnicza*, 6 (81), 15-23.
- 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.
- 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.
- Skonecki S., Potręć M., 2010. Wpływ wilgotności na ciśnieniowe zagęszczanie biomasy roślinnej. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 546, 341-346.

## INFLUENCE OF CHAMBER DIAMETER AND MOISTURE CONTENT OF WHEAT STRAW ON COMPACTION PARAMETERS

*Stanisław Skonecki, Janusz Laskowski*

Department of Machine Operation in Food Industry, University of Life Sciences  
ul. Doświadczalna 44, 20-280 Lublin  
e-mail: stanislaw.skonecki @up.lublin.pl

**Abstract.** The study is a continuation of studies aimed at the determination of the impact of chamber parameters and moisture content on densification of biological raw materials. The results of investigations on the impact of wheat straw compaction conditions on the parameters of the process and on the strength of the agglomerate are presented. The experiments were performed with the help of a universal strength tester, Zwick Z020/TN25, and a closed compression assembly (die) with three chamber diameters of 12 mm, 15 mm and 18 mm. The relationships between the density of the material in the chamber and agglomerate, the degree of compaction of the agglomerate, work effort on the compaction, coefficient of susceptibility of the material to compaction and the agglomerate mechanical strength and moisture content of straw for the three diameters of the chamber were determined. It was found that the densification parameters depend in varying degrees on moisture content of wheat straw and on the matrix chamber diameter. Increase in moisture content improves the susceptibility of material to agglomeration and worsens the quality of the agglomerates in terms of their strength.

**Keywords:** agglomeration, wheat straw, compaction parameters