

## WPŁYW STOPNIA ROZDROBNIENIA SŁOMY NA TRWAŁOŚĆ KINETYCZNA BRYKIETÓW

*Tomasz Hebda, Andrzej Złobecki*

*Katedra Inżynierii Mechanicznej i Agrofizyki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie*

**Streszczenie.** Mała gęstość objętościowa słomy wymaga posiadania dużej przestrzeni magazynowej, ponieważ słoma do spalania musi być przechowywana w pomieszczeniach zadaszonych i osłoniętych. Przetwarzanie biomasy w brykiety powoduje zmniejszenie objętości takiego paliwa oraz uzyskanie znacznej poprawy jego wartości energetycznej jak również właściwości transportowych i magazynowych. W pracy przedstawiono analizę wpływu stopnia rozdrobnienia na cechy mechaniczne brykietów wykonanych ze słomy pszennej, żytniej oraz rzepakowej. Stwierdzono istotne statystycznie oddziaływanie wielkości frakcji słomy na trwałość wykonanych z niej brykietów. Natomiast wpływ materiału, z jakiego wykonane były brykiety (gatunek słomy) okazał się nieistotny.

**Słowa kluczowe:** brykiety, rozdrobnienie słomy, trwałość brykietów

### Wstęp

Istnieje wiele metod termochemicznego wykorzystania biomasy. Najważniejsze z nich to: spalanie, współspalanie z węglem, gazem ziemnym oraz piroliza i zgazowywanie, które jest jedną z efektywniejszych metod produkcji paliw gazowych [Pickel 2002; Piechocki 2003]. Pomimo to najbardziej rozpowszechnioną formą wykorzystania biomasy jest jej spalanie lub współspalanie.

Największym dostarczycielem biomasy w Polsce, głównie w postaci słomy i siana jest rolnictwo. W Polsce produkcja słomy szacowana jest na 25-28 mln ton, z czego na cele energetyczne można przeznaczyć od około 4 do 10 mln ton słomy zbóż i rzepaku [Dreszer i in. 2003; Grzybek 2001; Rodrigues i in. 2003; Hebda, Złobecki 2011].

Mała gęstość objętościowa słomy wymaga posiadania dużej przestrzeni magazynowej, ponieważ słoma do spalania musi być przechowywana w pomieszczeniach zadaszonych i osłoniętych. Przetwarzanie biomasy w brykiety powoduje zmniejszenie objętości takiego paliwa oraz uzyskanie znacznej poprawy jego wartości energetycznej jak również właściwości transportowych i magazynowych. Proces wytwarzania brykietów składa się z różnych zabiegów, począwszy od zbioru materiału połączonego bardzo często ze wstępnym

rozdrabnianiem, poprzez suszenie, rozdrabnianie go na mniejsze frakcje, mieszanie, brykietowanie i schładzanie, aż po pakowanie [Adamczyk i in. 2005]. Na przebieg technologicznego procesu brykietowania materiałów roślinnych ma wpływ szereg różnych czynników, konsekwencją jest zmiana jakości otrzymanych brykietów [Kronbergs 2000; Fiszer 2008]. Najważniejsze z nich to:

- wilgotność materiału – wzrost wilgotności materiału powoduje spadek gęstości (przy dużych ciśnieniach aglomeracji) i trwałości kinetycznej brykietów, skrócenie czasu relaksacji naprężeń w aglomerowanym produkcie, spadek wartości współczynnika tarcia pomiędzy ściankami a aglomerowanym materiałem, spadek energochłonności procesu, wzrost wydajności procesu, spadek granicy plastyczności [Michalak 1995; Hejft 2001],
- temperatura procesu – wzrost temperatury wpływa na zwiększenie gęstości i trwałości kinetycznej brykietów, skrócenie czasu relaksacji naprężeń w aglomerowanym produkcie, spadek wartości współczynnika tarcia pomiędzy ściankami a aglomerowanym materiałem, spadek energochłonności procesu, zwiększenie wydajności procesu, spadek granicy plastyczności [Ekielski 1994; Hejft 2001; Kronbergs 2000],
- skład granulometryczny – zmniejszenie wymiarów cząstki powoduje wzrost gęstości i trwałości kinetycznej brykietu, wzrost wydajności, spadek energochłonności,
- właściwości materiału skład chemiczny (kleikowanie lub żelatynizacja skrobi),
- parametry konstrukcyjne układów roboczych kształt komory prasowania prędkość procesu aglomeracji, wydajność procesu (zwiększenie energochłonności, zmniejszenie trwałości kinetycznej aglomeratu) [Michalak 1995].

Tak, więc jednym z głównych czynników decydujących o trwałości i gęstości brykietów wytworzonych ze słomy jest stopień jej rozdrobnienia.

## Cel i zakres pracy

Celem pracy było określenie wpływu stopnia rozdrobnienia na cechy mechaniczne brykietów wykonanych ze słomy pszennej, żytniej oraz rzepakowej. Zakres pracy obejmował:

1. Rozdrobnienie słomy, podzielenie jej na grupy wymiarowe, a następnie przeprowadzenie procesu brykietowania.
2. Określenie współczynnika trwałości brykietów wykonanych z różnych frakcji słomy.

## Metodyka badań

Pierwszym etapem badań było rozdrobnienie słomy, którego celem było uzyskanie frakcji o długości mniejszej od 60 mm. Zabieg ten przeprowadzono na rozdrabniaczu nożowym firmy Testchem LMNo-100u (rys. 1), do którego wkładano porcjami po około 1,5 kg słomy.

Ze względu na to, że materiał, który uzyskano na rozdrabniaczu nożowym nie posiadał jednakowej długości, konieczne było wydzielenie poprzez odsianie poszczególnych frakcji słomy. Podział ten wykonano zgodnie z normą PN-EN 15149-1:2011, przy wykorzystaniu sit o następujących średnicach oczek: 63; 45; 32; 16; 8; 3,15 mm.

Uzyskane frakcje zostały zważone z dokładnością 0,01 g na wadze laboratoryjnej firmy RADWAG WPS 510/C/1. Pozwoliło to na uzyskanie 6 frakcji słomy. Określenie wilgotności słomy przeprowadzono metodą suszarkowo-wagową zgodnie z normą PN-ISO 6540, za pomocą suszarki laboratoryjnej firmy Elkon typ KC 100N. Następnie słomę podzieloną na frakcje zagęszczono w brykietarce firmy POR-ECOMEK model Junior (rys. 2). Ciśnienie robocze w procesie brykietowania wynosiło 48 MPa. Uzyskany brykiet miał średnicę 50 mm. Doświadczenie przeprowadzono w pięciu powtórzeniach.



Rys. 1. Rozdrabniacz nożowy  
Fig. 1. Knife grinder



Rys. 2. Brykietarka  
Fig. 2. Briquetting machine

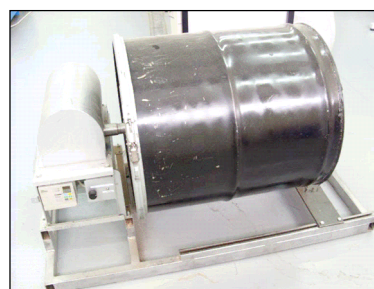
Po procesie brykietowania przystąpiono do określenia trwałości aglomeratów. Testy trwałości brykietów przeprowadzono po 24 godzinach od ich wytworzenia (czas stabilizacji brykietów), zgodnie z normą PN-EN 15210-2:2011. Procedura oceny trwałości brykietów według w/w norm polegała na przygotowaniu próbki brykietów o masie 2 kg (wykorzystano w tym celu wagę laboratoryjną WPT 12/C, której dokładność wynosi 0,2 g) i umieszczeniu ich w bębnie testera (rys. 3). Następnie bęben obracano 105 razy z dokładnością do pół obrotu, z prędkością obrotową 21 obr $\cdot$ min $^{-1}$ . Następnie próbkę przesiano przez sito o średnicy oczka 35,5 mm, aż do usunięcia wszystkich drobnych cząstek.

Wsad pozostały na sicie zważono za pomocą wagi, po czym wyliczono trwałość mechaniczną brykietów ze wzoru 1 [Hebda i Złobacki 2011]:

$$T = \frac{M_2}{M_1} \cdot 100 [\%] \quad (1)$$

gdzie:

- T – trwałość mechaniczna [%],
- $M_1$  – masa wsadu w bębnie [kg],
- $M_2$  – masa wsadu po przesianiu [kg].



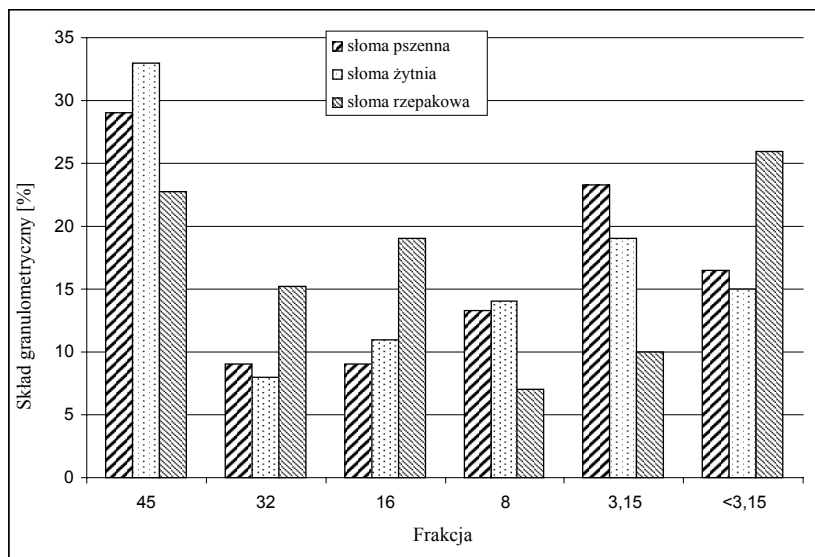
Rys. 3. Stanowisko do badania trwałości brykietów  
Fig. 3. A stand for testing endurance of briquettes

## Wyniki badań

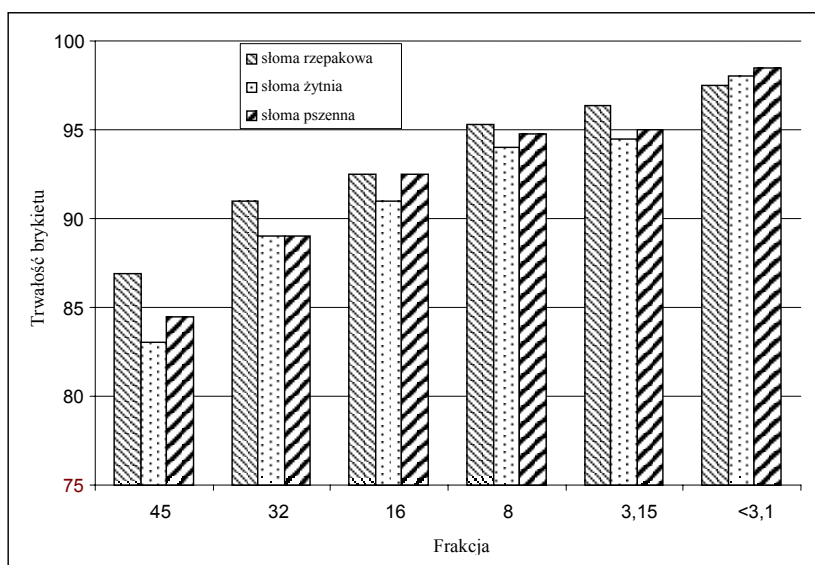
Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono wyniki badań dotyczących określenia składu granulometrycznego oraz testów trwałości brykietów.

Z rysunku 4 wynika, że dla słomy pszennej, na sitach o średnicy oczek wynoszących 45 i 3,15 mm zatrzymuje się największa ilość rozdrobnionego materiału. Podobna procentowo ilość siewki pozostała na sicie o średnicy oczek 8 mm, jak również przesiała się przez najmniejsze sito o oczku 3,15 mm. Natomiast na zastosowanych w badaniach sitach o średnicy oczek 32 i 16 mm pozostało zaledwie 9% cząstek rozdrobnionej słomy. Dla słomy żytniej aż 33% udział stanowiła słoma o długości większej niż 45 mm. Kolejną najliczniejszą frakcją to siewka, która zatrzymała się na sicie o oczkach 3,15 mm, stanowiła ona 19% całości próbki. Najmniej liczną grupą okazała się frakcja, która zatrzymała się na sicie o średnicy oczka 32 mm. Stanowiła ona tylko 8%. Uzyskane frakcje podczas rozdrobnienia słomy rzepakowej różniły się w znacznym stopniu od uzyskanych frakcji z rozdrabniania słomy pszennej i żytniej. Największą grupę, bo aż 26% stanowiła słoma o długości siewki mniejszej od 3,15 mm. W porównaniu do słomy pszennej oraz żytniej frakcja ta była prawie dwukrotnie liczniejsza. Również liczną frakcję stanowiła słoma o najdłuższych cząstkach (prawie 25%). W przypadku słomy rzepakowej najmniejszą grupą okazała się frakcja, która zatrzymała się na sicie o oczku 8 mm (tylko 7%).

Wyniki testów trwałości brykietów przedstawiono na rys. 5. W zależności od frakcji użytego materiału do wytwarzania brykietów, współczynnik ich trwałości wzrastał. W przypadku słomy pszennej trwałość brykietów wynosiła od 84,5% (dla największej frakcji) do 97,5% (dla siewki, która przesiała się przez oczka 3,15 mm). Wynika z tego, że im mniejsza frakcja słomy pszennej, tym wyższa trwałość brykietów.



Rys. 4. Skład frakcyjny rozdrobnionego materiału  
 Fig. 4. Fraction composition of the particulate material



Rys. 5. Trwałości brykietów w zależności od rodzaju frakcji słomy  
 Fig. 5. Endurance of briquettes in relation to the kind of straw fraction

Podobnie jak w przypadku poprzednim stwierdzono, że stopień rozdrobnienia słomy żytniej istotnie wpływa na wartość współczynnika trwałości. Trwałość brykietów wytworzonych ze słomy żytniej jest porównywalna do trwałości brykietów wykonanych ze słomy pszennej. Najwyższe uzyskane trwałości brykietów różnią się od siebie zaledwie o 0,5%, natomiast najniższe – tylko o 2%. Największą trwałością cechowały się brykiety wykonane z najmniejszych cząstek słomy, gdyż procentowa wartość ich trwałości wynosiła od 84 do 98% (rys. 5). Praktycznie zatem tylko brykiety wytworzone z biomasy o frakcji cząstek poniżej 3,15 mm spełniają wymagania normy europejskiej EN 14961-6 ( $T \geq 97,5\%$ ).

Brykiety wytworzone ze słomy o długości większej niż 45 mm miały najmniejszą trwałość (około 87%) spośród wszystkich innych brykietów rzepakowych. Niemniej jednak miały one i tak większą o około 5% wytrzymałość, niż brykiety wykonane ze słomy pszennej i żytniej (przy tej samej frakcji).

Dla określenia wpływu rodzaju materiału z jakiego wykonano brykiety oraz wymiaru frakcji cząstek na trwałość brykietów przeprowadzono test analizy wariancji w klasyfikacji dwuczynnikowej, gdzie za czynniki główne przyjęto gatunek roślin i frakcję cząstek. Wyniki tej analizy zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1. Wynik testu analizy wariancji w klasyfikacji podwójnej na trwałość brykietów  
Table 1. Results of the variation analysis test in double classification on briquettes endurance

Efekt	Liczba stopni swobody	Test F	Krytyczny poziom istotności
Wyraz wolny	1	58448,53	0,00001*
Gatunek rośliny	2	0,00	0,99999
Frakcja cząstek	5	1,54	0,02518*
Błąd	82	-	-

*Źródło: obliczenia własne autorów*

Wynika z niej, że przy przyjętym poziomie istotności  $\alpha=0,05$  czynnik gatunek rośliny okazał się statystycznie nieistotny ( $p=0,99999$ ). Stwierdzono natomiast istotność wpływu czynnika frakcja cząstek, dla którego przeprowadzono szczegółową analizę testem Duncana, którego wyniki przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Test Duncana dla czynnika frakcja cząstek na trwałość brykietów  
Table 2. Duncan test for a factor particles fraction on briquettes endurance

Czynnik	Grupy homogeniczne					
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$
Frakcja cząstek						
			←—————→ ←—————→			
	$X_1 = 84,67$	$X_2 = 89,67$	$X_3 = 92,00$	$X_4 = 94,23$	$X_5 = 95,17$	$X_6 = 98,00$
Średnie wartości trwałości brykietów utworzonych z następujących frakcji: $X_1 = 45$ mm, $X_2 = 32$ mm, $X_3 = 16$ mm, $X_4 = 8$ mm, $X_5 = 3,15$ mm, $X_6 < 3,15$ mm						

\*różnice nieistotne podkreślono

W przypadku czynnika frakcja cząstek zaobserwowano dwie grupy homogeniczne. Występują one pomiędzy frakcją cząstek o wymiarach 16 i 8 mm oraz 8 i 3,15 mm. Należy tutaj zauważyć, że powstawanie niejednorodności pomiędzy grupami  $X_3$  i  $X_4$  oraz  $X_4$  i  $X_5$  może świadczyć o pewnej niejednorodności dla całego tego zakresu. Występowanie grup jednorodnych świadczy o nieistotnych statystycznie różnicach w trwałości brykietów wykonanych z danych frakcji słomy.

## Wnioski

Na podstawie uzyskanych wyników sformułowano następujące wnioski:

1. Odpowiednie przygotowanie słomy, a zwłaszcza jej końcowe rozdrobnienie przed przystąpieniem do aglomeracji ciśnieniowej jest jednym z ważnych procesów w produkcji brykietów i ich trwałości, gdyż czynnik frakcja cząstek wpływał statystycznie istotnie na występowanie różnic w trwałości brykietów, zwłaszcza dla skrajnych zakresów wymiarów cząstek.
2. Na podstawie wyników badań można stwierdzić, że udział frakcji drobnych cząstek poniżej 3,15 mm pozwala na uzyskanie produktu o największej trwałości, ponieważ dla wszystkich gatunków badanej słomy ich wartość znacząco zwiększa się wraz ze zmniejszaniem się wymiarów frakcji cząstek.
3. Mimo pewnych różnic w rozkładach wymiarów cząstek między badanymi gatunkami słomy pszennej, żytniej i rzepakowej nie stwierdzono statystycznie istotnego zróżnicowania między wartościami współczynników trwałości mechanicznej wytworzonych brykietów.

## Bibliografia

- Adamczyk F., Frąckowiak P., Mielec K., Kośmicki Z.** (2005): Trwałość brykietów ze słomy przeznaczonej na opał, uzyskanych metodą zwijania. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 51(1), 33-36.
- Adamczyk F., Frąckowiak P., Mielec K., Kośmicki Z.** (2005): Problematyka badawcza w procesie zagęszczania słomy przeznaczonej na opał. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 51(1), 5-8.
- Dreszer K., Michalek R., Roszkowski A.** (2003): Energia odnawialna - możliwości jej pozyskiwania i wykorzystania w rolnictwie. PTIR, Kraków, ISBN 83-9170-530-7.
- Grzybek A., Gradziuk P., Kowalczyk K.** (2001): Słoma-energetyczne paliwo. *Więś Jutra*, Warszawa, ISBN 83-88368-19-2.
- Hebda T., Złobecki A.** (2011): Wpływ wilgotności słomy na trwałość kinetyczną brykietów. *Inżyniera Rolnicza*, 6(131), 45-52.
- Hejft R.** (2001): Wpływ wilgotności materiału roślinnego i temperatury procesu na gęstość i wytrzymałość brykietów. *Recyklace odpadu V*, VSB-TU, Ostrawa, 281-290.
- Kronbergs E.** (2000): Mechanical strenght testing of stalk materials and compacting energy evaluation. *Industrial Corps and Products*, 11, 211-216.
- Fiszer A.** (2008): Badania porównawcze współczynnika trwałości brykietów ze słomy. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 53(3), 69-71.

- Michalak D.** (1995): Badania naprężeń wewnętrznych w materiałach żdźbłowych zagęszczanych ciśnieniowo. *Prace Przemysłowego Instytutu Maszyn Rolniczych*, 2, 46-50.
- Pickiel P.** (2002): Vergasung von Biomasse. *Landtechnik Jg.*, 57/5, 258-259.
- Piechocki J.** (2003): Zgazowywanie mokrej biomasy ligninocelulozowej w gazyfikatorze o mocy 500 kW. *Ogniwa paliwowe i biomasa lignocelulozowa szansa rozwoju wsi i miast*, Seria monografie, Warszawa, 241-244.
- Rodrigues M., Walter A., Faaij A.** (2003): Co – firing of natural gas and Biomass gas in biomass integrated gasification/combined cycle systems. *Energy*, 28(11), 1115-1131.
- PN-ISO 6540. Kukurydza – Oznaczanie wilgotności (rozdrobionego i całego ziarna).
- PN-EN 15210-2:2011. Biopaliwa stałe. Oznaczanie wytrzymałości mechanicznej brykietów i peletów. Część 2: Brykiety.
- PN-EN 15149-1:2011. Biopaliwa stałe - Oznaczanie rozkładu wielkości ziaren - Część 1: Metoda przesiewania oscylacyjnego przy użyciu sit o szczelinie 1 mm lub większej.

## **INFLUENCE OF STRAW FRAGMENTATION ON KINETIC ENDURANCE OF BRIQUETTE**

**Abstract.** Low bulk density of straw requires considerable storing space since straw for firing must be stored in roofed and covered rooms. Processing biomass into briquettes causes decrease of volume of such fuel and a considerable improvement of its energy value as well as transport and storing properties. The work presents analysis of the fragmentation degree on mechanical properties of briquettes made of grain, rye and rape straw. Statistically significant influence of straw fractions seize on endurance of briquettes made of it, was reported. Whereas, influence of the material of which briquettes were made (straw kind) appeared to be insignificant.

**Key words:** briquettes, straw fragmentation, briquettes endurance

### **Adres do korespondencji:**

Tomasz Hebda; e-mail [Tomasz.Hebda@ur.krakow.pl](mailto:Tomasz.Hebda@ur.krakow.pl)  
Katedra Inżynierii Mechanicznej i Agrofizyki  
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie  
ul. Balicka 120  
30-149 Kraków