

## PORÓWNANIE UŻYTECZNOŚCI ENERGETYCZNEJ WYBRANYCH BRYKIETÓW Z BIOMASY

*Bogdan Saletnik, Czesław Puchalski, Grzegorz Zaguła, Marcin Bajcar*  
*Zakład Technologii Bioenergetycznych, Uniwersytet Rzeszowski*

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczące kaloryczności, zawartości wody, popiołu oraz węgla, azotu i wodoru w czterech rodzajach brykietu. Materiał badawczy stanowiły brykiety ze słomy zbożowej z dodatkami, takimi jak: trociny olchy, siano łąkowe oraz ziarno owsa. Uzyskane wyniki posłużyły do celów porównawczych podstawowych parametrów fizyko-chemicznych brykietów. Określono, że brykiety uzyskane z połączenia słomy i trocin olchy wykazują najwyższą wartość opałową. Dodatkowo odnotowano zwiększoną zawartość pozostałego po spaleniu popiołu w próbkach, które miały wyższą zawartością węgla, co może wskazywać na straty związane z niecałkowitym spalaniem.

**Słowa kluczowe:** słoma, brykiety, wartość energetyczna, wilgotność, popiół, pierwiastki budulcowe

### Wprowadzenie

Dostęp do energii jest niezbędny do życia, jak również jest niezbędnym elementem rozwoju i postępu cywilizacyjnego (Gostomczyk, 2011). Konwencjonalne źródła energii znacznie obciążają środowisko naturalne, a pokłady paliw kopalnych bardzo szybko maleją, dlatego też w Polsce, podobnie jak i na świecie, znacząco zwiększa się zainteresowanie biomasą, która jako odnawialne źródło energii ma wysoki potencjał rozwojowy (Cocker-Maciejewska, 2007; Gostomczyk, 2011).

Istnieje wiele rodzajów biomasy, spośród których największe znaczenie przypisuje się biomase pochodzenia roślinnego. Proces bezpośredniego spalania surowców stałych jest jedną z form jej wykorzystania na cele energetyczne. Do najbardziej rozpowszechnionych biopaliw stałych możemy zaliczyć słomę, drewno oraz biomasę z takich roślin, jak wierzba wiciowa, ślaziołek pensylwański czy słonecznik bulwiasty. Coraz częściej jako źródło energii wykorzystuje się również ziarno zbóż, głównie owsa i kukurydzy (Niedziółka i Zuchniarz, 2006).

W Polsce największą ilość biomasy uzyskuje się w rolnictwie. Głównymi surowcami bioenergetycznymi są słoma i siano. Szacuje się, że rocznie produkowane jest od 25 do 28 mln ton słomy, z czego na pozyskanie energii można przeznaczyć około 35% słomy

zbóż i rzepaku (Hebda i Złobecki, 2012). Z 1,5 tony słomy uzyskuje się ilość energii odpowiadającą jednej tonie węgla kamiennego (Hebda i Złobecki, 2011). Słoma, którą można wykorzystać w energetyce, oddaje wartość opałową równą ok. 14 mln ton węgla, co odpowiada 10% rocznego wydobycia węgla kamiennego w Polsce (Skonecki i in., 2011).

Wykorzystanie słomy w energetyce wiąże się z wieloma ograniczeniami, takimi jak jej rozproszenie, zróżnicowanie właściwości zależne od gatunku rośliny, nawożenia, a także warunki środowiska i pogoda. W celu minimalizacji kosztów transportu i przechowywania słomy stosuje się jej zagęszczanie przez brykietowanie lub peletowanie do postaci brykietu lub peletu (Skonecki i in., 2011). Przetwarzanie biomasy na brykiety bądź pelety prowadzi do zmniejszenia objętości biopaliwa, poprawia jego wartość energetyczną oraz usprawnia transport i magazynowanie (Hebda i Złobecki, 2012). Uzyskanie brykietu o odpowiedniej jakości uzależnione jest jednak od wielu czynników, m.in. właściwości fizycznych i chemicznych zastosowanego surowca (Adapa i in., 2009; Fiszer, 2008; Skonecki i in., 2011).

Celem prezentowanych badań było porównanie wartości energetycznych wybranych brykietów z biomasy, których wspólnym a zarazem podstawowym składnikiem była słoma zbożowa. W badaniach dokonano również analizy zawartości wody, węgla, azotu, wodoru oraz popiołu dla poszczególnych brykietów.

## Material i metody badań

Material przeznaczony do badań stanowiły cztery rodzaje brykietu. Podstawowym elementem każdej z próbek była słoma żytnia o wilgotności 7%. Pozostałymi komponentami wchodzącymi w skład badanych brykietów były trociny olchy o wilgotności 5%, siano łąkowe o wilgotności 8% oraz ziarno owsa o wilgotności 18%. Wszystkie zastosowane komponenty stanowiły 10% domieszkę (udział wagowy). Komponenty były dobierane w ten sposób, aby ich procent domieszki nie wpłynął negatywnie na proces brykietowania. Brykiety wykonano przy użyciu brykietciarki ślimakowej – Biomasser Duo typ BS 207. W celu przygotowania próbek do analiz dokonano zhomogenizowania materialu badawczego, który następnie podzielono na dwie równe części wg normy PN-EN 14780:2011(U) oraz PN-EN 14778:2011(U). Material z pierwszej części został przeznaczony do badań termogravimetrycznych w celu oznaczenia wilgotności oraz zawartości popiołu. Analizy dokonano przy użyciu aparatu LECO – TGA701 wg normy PN-EN 14775:2010(U) oraz PN-EN 14774-3:2010(U). Oznaczanie zawartości wilgoci w próbce analitycznej polegało na dostarczeniu około 1 gramowej naważki do kuwety (tygiel), a następnie wybraniu parametrów pracy urządzenia. Podgrzanie próbki do temp. 60°C pozwoliło na wstępne podsuszenie materialów o podwyższonej zawartości wody. Suszenie właściwe następowało w temp. 105°C, gdzie próbki były na bieżąco przeważane do momentu osiągnięcia parametru utraty masy między dwoma kolejnymi przeważeniami mniejszego niż 0,01% (komparator). W celu wyznaczenia zawartości popiołu wysuszony material został podgrzany do temp. 600°C i spalony w atmosferze azotu.

Drugą część zhomogenizowanego materialu poddano suszeniu (temp. 70°C) w suszarce laboratoryjnej z wymuszonym obiegiem powietrza przez około 4 godziny. Po całkowitym obsuszeniu próbki material został zmielony przy użyciu młyna kulowego. Część przygotowanego w ten sposób materialu posłużyła do wykonania 1-gramowych tabletek wykorzy-

stanych do badań kalorymetrycznych. Badanie kaloryczności przeprowadzono z wykorzystaniem kalorymetru LECO AC500 wg normy PN-EN 14918:2010(U).

Pozostała część sproszkowanego materiału została poddana analizie w aparacie True Spec w celu określenia zawartości węgla, azotu i wodoru (moduł CHN) wg normy PN-EN 15104:2011(U). Analiza przy użyciu aparatu True Spec do równoczesnego oznaczania węgla, wodoru i azotu opierała się na zasadach metody Dumas, określanej również jako metoda wysokotemperaturowego spalania w tlenie. Zastosowanie tej metody pozwoliło na oznaczanie pierwiastków w czasie nieprzekraczającym 4 min.

Otrzymane wyniki poddano analizie statystycznej w programie Statgraphics 4.1 Plus. Porównywano wartości średnie za pomocą testu t-Studenta i testu Duncana na poziomie istotności  $p = 0,05$ , dla  $n = 3$ .

## Wyniki i dyskusja

Z przeprowadzonych badań wynika, iż najwyższą wartością opałową (tab. 1) charakteryzowały się brykiety ze słomy z dodatkiem trocin olchy oraz wykonane z samej słomy. Najmniejsze wartości uzyskano dla brykietów słoma-ziarno owsa oraz słoma-siano. Niedziółka i Zuchniarz (2006) wykazali, że brykiety wykonane ze słomy są bardzo dobrym materiałem grzewczym. Stwierdzili, iż wartość energetyczna słomy nie różni się znacząco od wartości opałowej zrębków drewna czy wierzby energetycznej.

Tabela 1  
Kaloryczność badanych brykietów opałowych  
Table 1  
The calorific value of tested fuel briquettes

Rodzaj brykietu	Kaloryczność ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
	$\bar{X} \pm \text{SD}$
Słoma	17263,4a $\pm$ 50,8
Słoma-siano	16932,7b $\pm$ 50,8
Słoma-olcha	17292,7a $\pm$ 63,1
Słoma-owies	16862,1b $\pm$ 33,0

Objaśnienia:

$\bar{X}$  – wynik średni, SD – odchylenie standardowe

Te same litery przy wynikach nominalnych poszczególnych parametrów oznaczają brak statystycznie istotnych różnic na poziomie istotności  $p = 0,05$

Na podstawie wykonanych badań stwierdzono, iż najwyższą zawartością wody cechował się brykiet wykonany ze słomy z dodatkiem ziaren owsa (tab. 2). Najmniejsze wartości odnotowano dla brykietu słoma-trociny olchy. Porównując wyniki zawartości wody w badanych próbkach z kalorycznością poszczególnych brykietów (tab. 1), można stwierdzić, że parametr ten miał decydujący wpływ na wartość opałową analizowanych mieszanek. W przypadku brykietów ze słomy i owsa przy wilgotności 9,57% kaloryczność tego

materiału wynosiła  $16862,1 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Znacznie lepsze efekty osiągnięto dla brykietów słoma-trocin olchy. Dodatek trocin olchy do słomy nie wpłynął negatywnie na wartość opałową otrzymanego brykietu. Jak podaje Niedziółka i Zuchniarz (2006), kaloryczność wszystkich rodzajów biomasy jest ściśle uzależniona od cechującej ją zawartości wody. Wzrost wilgotności powoduje zmniejszanie się parametru, jakim jest wartość opałowa biomasy. Autorzy Ci donoszą również, że słoma o zbyt dużej zawartości wody wpływa na większą emisję zanieczyszczeń w procesie spalania.

*Tabela 2*

*Zawartość wody i popiołu w badanych brykietach opałowych w przeliczeniu na świeżą masę*

Table 2

*The water and ash content in the tested fuel briquettes per fresh mass*

Rodzaj brykietu	Zawartość (%)	
	Woda	Popiół
	$\bar{X} \pm \text{SD}$	
Słoma	6,68c $\pm$ 0,01	4,37b $\pm$ 0,02
Słoma-siano	7,93b $\pm$ 0,01	7,38a $\pm$ 0,11
Słoma-olcha	5,96d $\pm$ 0,23	4,46b $\pm$ 0,21
Słoma-owies	9,57a $\pm$ 0,08	2,05c $\pm$ 0,04

Objaśnienia jak w Tabeli 1

Przeprowadzone badania wykazały, iż najwyższą zawartością popiołu cechowały się brykiety ze słomy z dodatkiem siana (7,38%). Brykiety ze słomy oraz słomy z dodatkiem trocin olchy charakteryzowały się podobną ilością pozostałego po spaleniu popiołu. Odmiennie wyniki otrzymano dla brykietów ze słomy z dodatkiem ziaren owsa, które odznaczały się najmniejszą ilością popiołu (2,05%). Mółka i Łapczyńska-Kordon (2011) podczas analizy właściwości energetycznych wybranych rodzajów biomasy, m.in. słomy, owsa, pszenicy, jęczmienia, otrąb, wykazali, że ziarno zbóż cechuje się niską zawartością popiołu – dla ziarna owsa jest to 2,37%. W badaniach wykazali także, iż poziom popiołu w biomacie jest mniejszy od zawartości popiołu w większości węgla. Zgodnie z tym, co podaje Wilk (2006), zawartość popiołu w biomacie drzewnej waha się w zakresie 0,3-7,4%, natomiast w słomie zbóż 4,3-10,4%. Niedziółka i Zuchniarz (2006) twierdzą, iż w wyniku procesu spalania czystej biomasy ilość powstałego popiołu mieści się w granicach 0,5-12,5%. Natomiast wyższe zawartości popiołu mogą wynikać z zanieczyszczenia surowca lub jego właściwości. Analizując otrzymane wyniki, możemy zauważyć, iż badane brykiety cechowały się niską zawartością popiołu.

Największą ilość węgla (tab. 3) odnotowano w przypadku brykietów słoma-siano, natomiast najmniejsze ilości oznaczono w próbce słoma-owies, co przekłada się bezpośrednio na wartość opałową analizowanych kompozycji. Próbki brykietów ze słomy oraz słomy z dodatkiem trocin olchy zawierały podobną ilość węgla. Najwyższą ilość wodoru oraz azotu odnotowano w brykietach słoma-ziarno owsa. Pozostałe badane próbki nie różniły się istotnie od siebie zarówno pod względem zawartości wodoru, jak i azotu. Borkowska

i Lipiński (2007) w swojej pracy podają, że ilość pierwiastków w biomase zależy jest od uwarunkowań genetycznych, środowiskowych, a także zabiegów agrotechnicznych, np. nawożenia.

Tabela 3

Zawartość węgla (C), wodoru (H) i azotu (N) w badanych brykietach opałowych w przeliczeniu na suchą masę

Table 3

The carbon (C), hydrogen (H) and nitrogen (N) content in the tested fuel briquettes per dry mass

Rodzaj brykieta	Zawartość pierwiastków (%)		
	C	H	N
	$\bar{X} \pm SD$		
Słoma	44,91ab $\pm$ 1,03	5,36d $\pm$ 0,1	0,67c $\pm$ 0,13
Słoma-siano	45,73a $\pm$ 0,68	5,95b $\pm$ 0,01	0,58c $\pm$ 0,07
Słoma-olcha	44,75b $\pm$ 0,86	5,69c $\pm$ 0,13	1,21b $\pm$ 0,03
Słoma-owies	42,89c $\pm$ 0,03	6,47a $\pm$ 0,01	1,62a $\pm$ 0,15

Objaśnienia jak w Tabeli 1 / Explanation notes as in Table 1

Tabela 4

Współczynniki korelacji między podstawowymi parametrami fizykochemicznymi charakteryzującymi badane brykiety

Table 4

Correlation between basic physicochemical parameters characterizing the studied briquettes

	Zawartość wody	Zawartość węgla	Zawartość wodoru	Wartość opałowa
Zawartość wody	1	-0,58	0,82	-0,92
Zawartość węgla	-0,58	1	0,7	0,36
Zawartość wodoru	0,82	0,7	1	0,87
Wartość opałowa	-0,92	0,36	0,87	1

Odnotowano dodatnią korelację pomiędzy zawartością węgla i wodoru a wartością opałową. Odwrotną zależność uzyskano dla zawartości wody w brykiecie a otrzymaną odpowiedź w formie ciepła spalania (współczynnik korelacji równy -0,92).

## Wnioski

1. Odnotowano, że brykiety uzyskane z połączenia słomy i trocin olchy wykazują najwyższą wartość opałową, nie obniżając bazowej wartości opałowej czystej słomy. Natomiast ziarna owsa oraz siano obniżają tę wartość o 3%.

2. Poziom zawartości popiołu w badanych brykietach mieści się w przedziale 2-7%, przy czym najniższą wartością odznaczają się brykiety wykonane ze słomy z dodatkiem ziaren owsa.
3. Stwierdzono, że brykiety wykonane ze słomy wykazują wysoki poziom zawartości takich pierwiastków, jak węgiel i wodór, które mają istotny wpływ na wartość opałową brykietów.

## Literatura

- Adapa, P.; Tabil, L.; Schoenau, G. (2009). Compaction characteristics of barley, canola, oat and wheat straw. *Biosystems Engineering*, 104, 335-344.
- Borkowska, H.; Lipiński, W. (2007). Zawartość wybranych pierwiastków w biomase kilku gatunków roślin energetycznych. *Acta Agrophysica*, 10(2), 287-292.
- Cocker-Maciejewska, A. (2007). Obróbka wstępna biomasy na potrzeby systemów energetycznych. *Ochrona środowiska i zasobów naturalnych*, 30, 133-141.
- Fiszer, A. (2008). Badania porównawcze współczynnika trwałości brykietów ze słomy. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 53(3), 69-71.
- Gostomczyk, W. (2011). Rola i znaczenie biomasy energetycznej w rozwoju zrównoważonym Wykorzystanie biomasy w energetyce, pod red. M. Jasiulewicza. PTE i PK Koszalin.
- Hebda, T.; Złobecki, A. (2011). Wpływ wilgotności słomy na trwałość kinetyczną brykietów. *Inżynieria Rolnicza*, 6(131), 45-52.
- Hebda, T.; Złobecki, A. (2012). Wpływ stopnia rozdrobnienia słomy na trwałość kinetyczną brykietów. *Inżynieria Rolnicza*, 2(137), 57-64.
- Mółka, J.; Łapczyńska-Kordon, B. (2011). Właściwości energetyczne wybranych gatunków biomasy. *Inżynieria Rolnicza*, 6 (131), 141-147.
- Niedziółka, I.; Zuchniarz, A. (2006). Analiza energetyczna wybranych rodzajów biomasy pochodzenia roślinnego. *Motorol*, 8A, 232-237.
- Skonecki, S.; Potręć, M.; Laskowski, J. (2011). Właściwości fizyczne i chemiczne odpadów rolniczych. *Acta Agrophysica*, 18(2), 443-455.
- Wilk, B. (2006). Określenie zależności wartości opałowej od wybranych właściwości fizykochemicznych biomasy. Mat. Seminar. „Techniki analityczne i procedury badawcze w zastosowaniu do nowych uwarunkowań prawnych w energetyce”. IChPW. Zabrze.
- PN-EN 14780:2011(U). *Biopaliwa stałe – przygotowanie próbek*.
- PN-EN 14778:2011(U). *Biopaliwa stałe – pobieranie próbek*.
- PN-EN 14775:2010(U). *Biopaliwa stałe – oznaczanie zawartości popiołu*.
- PN-EN 14774-3:2010(U). *Biopaliwa stałe – oznaczanie zawartości wilgoci – metoda suszarkowa – Część 3: wilgoć w ogólnej próbce analitycznej*.
- PN-EN 14918:2010(U). *Biopaliwa stałe – oznaczanie wartości opałowej*.
- PN-EN 15104:2011(U). *Biopaliwa stałe – oznaczanie zawartości węgla całkowitego, wodoru i azotu – metody instrumentalne*.

## COMPARISON OF ENERGY USEFULNESS OF THE SELECTED BIOMASS BRIQUETTES

**Abstract.** This paper presents the results of the calorific value, content of water, ash and carbon, nitrogen and hydrogen in the four types of briquettes. Material consisted of wheat straw briquettes with additives such as alder sawdust, meadow hay and oats. The results were used for comparison purposes of the basic physicochemical parameters of briquettes. It was determined that the briquettes obtained from a combination of straw and alders sawdust have the highest calorific value. In addition, the increased level of ash remaining after burning in the samples, which had higher carbon content, was reported which may indicate losses related to incomplete burning.

**Key words:** straw, briquettes, energy, moisture, ash, elements of building blocks

**Adres do korespondencji:**

Grzegorz Zaguła; e-mail: [g\\_zagula@univ.rzeszow.pl](mailto:g_zagula@univ.rzeszow.pl)  
Wydział Biologiczno-Rolniczy  
Uniwersytet Rzeszowski  
ul. Zelwerowicza 4, budynek D9, pokój 46  
35-601 Rzeszów