

## NAKŁADY ENERGETYCZNE W PROCESIE BRYKIETOWANIA WIERZBY *SALIX VIMINALIS* L.

Jarosław Frączek, Krzysztof Mudryk, Marek Wróbel

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

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki analizy nakładów energetycznych ponoszonych w procesie brykietowania wierzby w tłokowej brykietarce hydraulicznej z komorą otwartą. Zapotrzebowanie energii na brykietowanie rejestrowano za pomocą miernika parametrów sieci Lumel N12P. Zarejestrowane dane pozwoliły na określenie zapotrzebowania energii jednostkowej odniesionej do masy uzyskanych brykietów. Stwierdzono, że największą energochłonność brykietowania –  $66 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ , cechuje się materiał rozdrobniony na młynie z sitem o średnicy oczek  $\varnothing 10 \text{ mm}$  i jest ona prawie dwukrotnie większa niż w przypadku pozostałych materiałów. Określono nakłady energetyczne ponoszone na brykietowanie w zależności od ciśnienia i stopnia rozdrobnienia materiału. Zależności te, dla materiału rozdrobnionego na sitach o oczkach 4 i 15 mm opisano wielomianem drugiego stopnia o współczynniku dopasowania  $R^2=0,86$ , natomiast dla materiału rozdrobnionego na sicie 10 mm funkcją liniową ( $R^2=0,97$ ).

**Słowa kluczowe:** nakłady energetyczne, biopaliwa stałe, brykietowanie, brykiet

### Wstęp

Biomasa uzyskana z plantacji energetycznych wierzby wiciowej może być spalana w postaci zrębków. Charakteryzują się one dużym ujednoczeniem mieszanki drzewnej, a zarazem proces jej schnięcia jest efektywny i osiągana jest wyższa wartość opałowa (szybciej osiągany jest stan powietrznie suchy). Parametrami charakteryzującymi zrębki są grubość sięgająca 1 cm i długość nie przekraczająca 5 cm [PN-91/D-95009]. Taka forma paliwa jest łatwa w transporcie i załadunku.

Dalszym etapem wzbogacania paliwa wierzbowego jest produkcja peletów i brykietów. Dzięki niskiej zawartości wilgoci (poziom około 8%), pelety charakteryzują się dużo wyższą wartością opałową niż zrębki. Kolejną zaletą omawianego paliwa jest znaczne zwiększenie gęstości pozwalające na spowolnienie procesu spalania, a co za tym idzie wydłużenie czasu pomiędzy uzupełnianiem paliwa w zbiornikach zasypowych. Produkcja peletów polega na poddaniu wysuszonej i odpowiednio rozdrobnionej biomasy działaniu wysokiej temperatury i wysokiego ciśnienia.

Brykiety powstają w procesie ciśnieniowej aglomeracji (brykietowania), w którym sypki materiał w wyniku działania sił zewnętrznych (naciski zagęszczające) i wewnętrznych (siły i wiązania międzycząsteczkowe) przybiera trwałą postać o określonych wymiarach geometrycznych [Hejft 2002]. Proces brykietowania jest procesem pokrewnym do wytwa-

rzania peletu z kilkoma różnicami, do których zaliczyć można: większą zawartość wilgoci (w gotowym produkcie sięgającą 14%), większe gabaryty (w pewnym stopniu ograniczające zastosowanie tego paliwa w kotłach i piecach na biomase). Wydatki energetyczne ponoszone na wytworzenie gotowej substancji są mniejsze z uwagi na możliwość stosowania trocin o większych gabarytach niż to miało miejsce w przypadku peletów. Nakłady te wynoszą średnio 20–70 kWh·t<sup>-1</sup> [Grover i in. 1994, Saeidy 2004] lub 5–25 MJ·t<sup>-1</sup> [Taha 1981; Wheeler 1984; Husain 2002].

## Cel pracy

W świetle dostępnej literatury proces brykietowania nie jest poznany w sposób zadowalający. Szczególnie w przypadku gdy chodzi o możliwości jego optymalizacji pod kątem energetycznym. W związku z tym, celem pracy była analiza przebiegu procesu brykietowania wierzby pod kątem określenia nakładów energetycznych ponoszonych na ten proces w zależności od stopnia rozdrobnienia materiału i ciśnienia aglomeracji. Materiał badawczy stanowiła wierzba wiciowa *Salix viminalis* L. rozdrobniona na młynie bijakowym firmy POR, gdzie wielkość frakcji uzyskiwanej masy jest ustalana poprzez wymianę sit. Aglomeracji poddano materiał o wilgotności 12% uzyskany po sicie o średnicy oczek 4, 10 oraz 15 mm.

## Metodyka pracy

Badania przeprowadzone zostały wg schematu zamieszczonego na rysunku 1. W pierwszej kolejności określono skład granulometryczny materiału badawczego. Pomiar wykonano na wstrząsarce, wyposażonej w zestaw składający się z sit z otworami okrągłymi o  $\phi$  40; 16; 8; 3,2; 2,8; 2 mm oraz sit drucianych plecionych # 1,6; 1,4; 1; 0,5; 0,25 mm wymaganych przez normę CEN/TS 15149.

Wilgotność materiału określona została metodą suszarkową wg normy CEN/TS 14774-1.

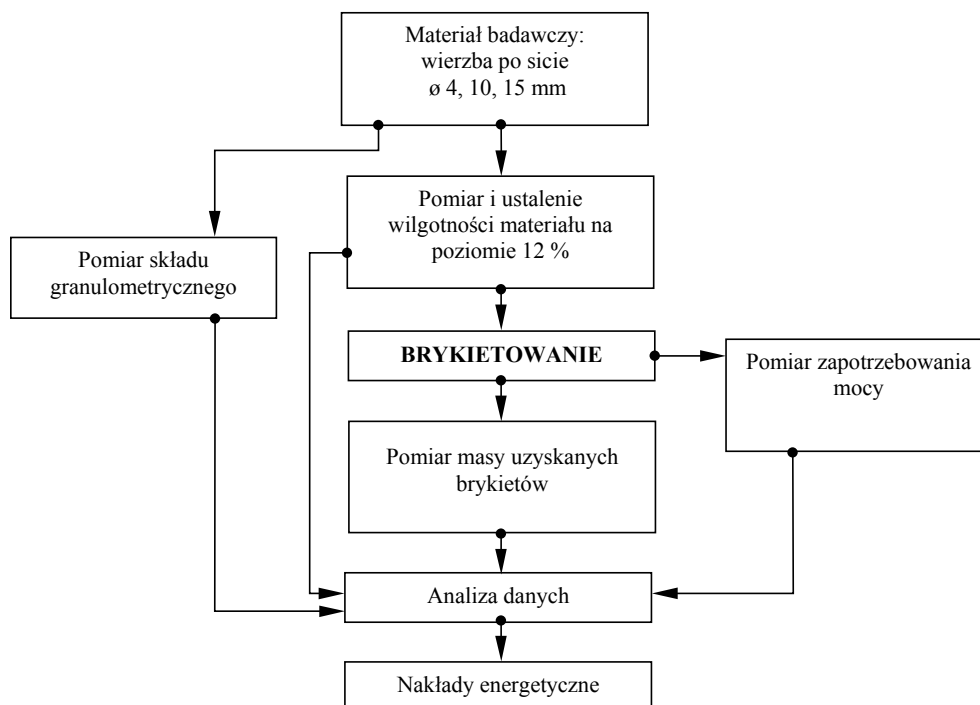
Po określeniu powyższych parametrów, materiał poddano brykietowaniu na brykietarce hydraulicznej Junior firmy POR wyposażonej w tuleję roboczą o średnicy 50 mm (rys. 2). Wydajność teoretyczna maszyny wynosi 100 kg·h<sup>-1</sup>. Brykietowanie przeprowadzono przy ciśnieniu roboczym 47, 37, 27 i 17 MPa.

W celu określenia jednostkowych nakładów energetycznych  $E_j$  [Wh·kg<sup>-1</sup>] ponoszonych w procesie brykietowania, dokonano rejestracji zużycia energii przy pomocy miernika parametrów sieci N12p firmy Lumel i odniesiono je do uzyskanej masy brykietów.

$$E_j = E \cdot m^{-1} \quad (1)$$

gdzie:

- $E$  – zapotrzebowanie energii [Wh],
- $m$  – masa uzyskanych brykietów [kg].



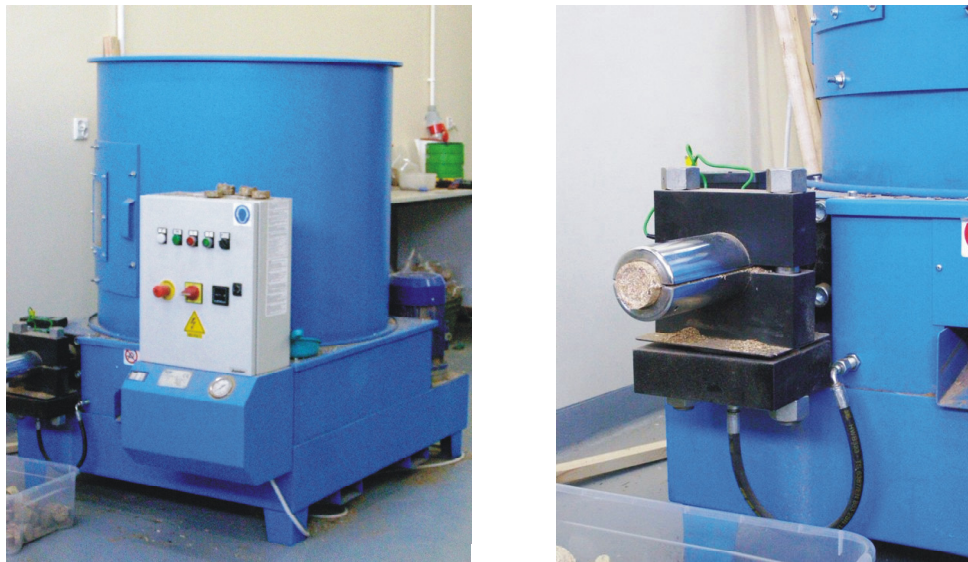
Źródło: opracowanie własne autorów

Rys. 1. Schemat przebiegu pomiaru  
Fig. 1. Measurement progress diagram

## Wyniki badań

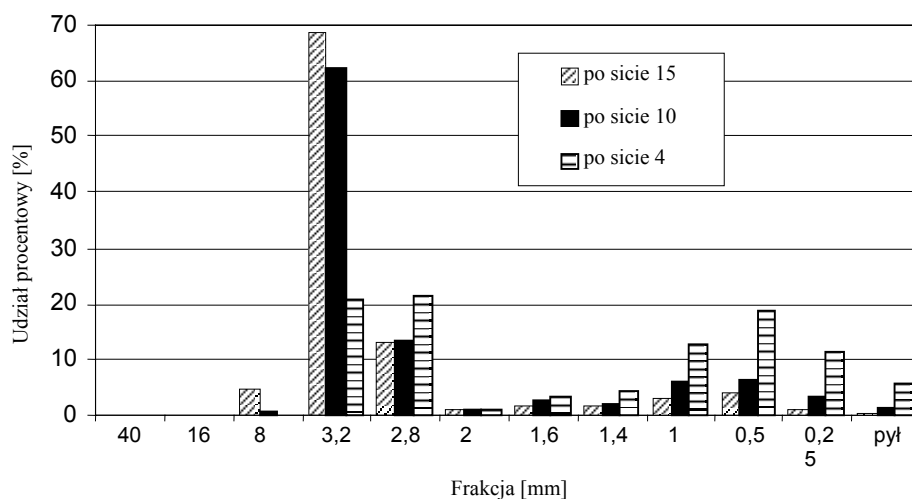
Analiza uzyskanych wyników pozwoliła na określenie nakładów energetycznych ponoszonych w procesie brykietowania masy wierzbowej w zależności od składu granulometrycznego i ciśnienia aglomeracji.

Skład granulometryczny zagęszczanego materiału przedstawiono na wykresie (rys. 2). Jak można zauważyć, dla każdego z badanych materiałów, wykresy charakteryzują się dwoma frakcjami o największej liczebności. Pierwsza to frakcja 3,2 mm (materiał rozdrobniony na sicie  $\varnothing 15$  i 10 mm), oraz 2,8 mm (materiał po sicie  $\varnothing 4$  mm). Druga, natomiast, to frakcja 0,5 mm dla wszystkich przypadków. Wraz ze wzrostem stopnia rozdrobnienia materiału (spadek średnicy sita) zmniejsza się udział procentowy frakcji 3,2 mm przy wzroście udziału procentowego frakcji 0,5 mm oraz frakcji 1,6–0,25 mm i pyłu. Frakcja 3,2 mm, z poziomu 68% (materiał rozdrobniony na sicie  $\varnothing 15$ ) spada do 62% przy materiale rozdrobnionym na sicie  $\varnothing 10$  mm i ostatecznie do 21% dla materiału po sicie  $\varnothing 4$  mm. Jednocześnie zwiększa się udział procentowy frakcji mniejszych (1,6–0,25 mm i pyłu) z 12% poprzez 22,5 aż do 56,5% (odpowiednio dla materiału rozdrobnionego na sitach  $\varnothing 15$ , 10 i 4 mm).

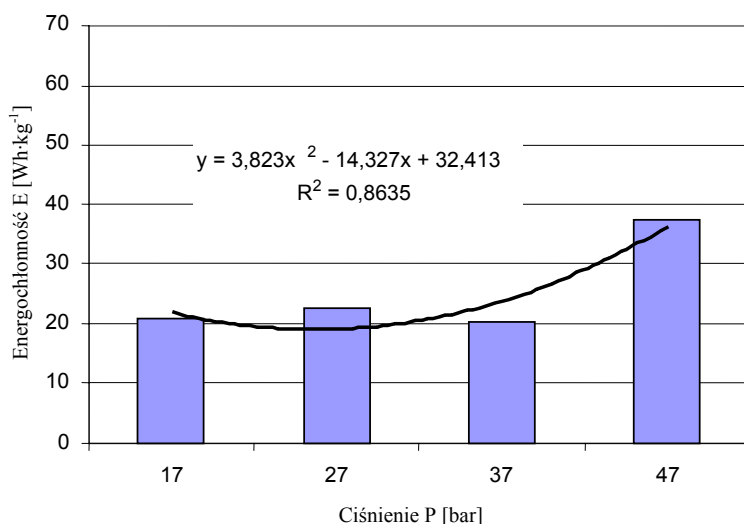


Rys. 2. Brykietciarka firmy POR model Junior  
 Fig. 2. Briquetting machine from POR, model: Junior

Nakłady energetyczne w procesie brykietowania, w zależności od ciśnienia brykietowania dla materiału mielonego na sicie 4, 10 i 15 mm, przedstawiono na rysunkach 3 i 4.



Rys. 3. Skład granulometryczny materiału badawczego  
 Fig. 3. Tested material grain composition



Rys. 4. Wykres zmian energochłonności brykietowania w zależności od ciśnienia aglomeracji dla materiału rozdrobnionego na sicie  $\phi$  4 mm

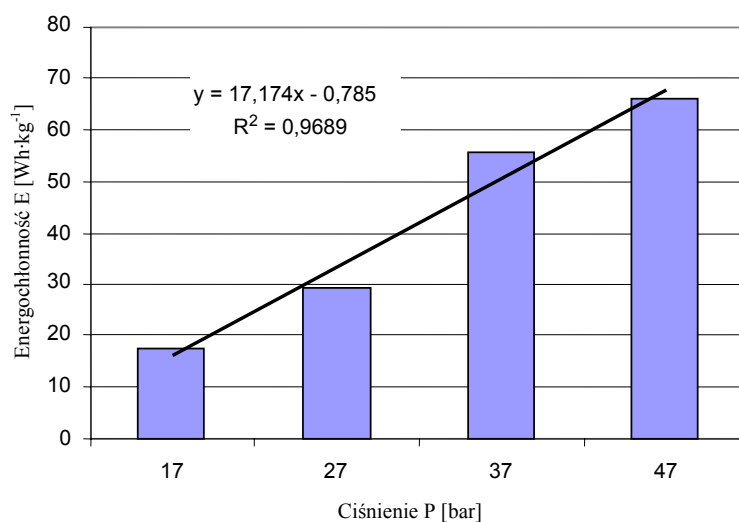
Fig. 4. Diagram displaying changes in briquetting energy consumption depending on agglomeration pressure for material broken up using a  $\phi$  4 mm sieve

Jak można się było spodziewać, przy wzroście ciśnienia aglomeracji energochłonność procesu wzrasta. W przypadku materiału rozdrobnionego na sicie 4 i 15 mm wzrost ten jest wyraźny dopiero przy ciśnieniu 47 MPa i osiąga odpowiednio wartości 37,5 oraz 35,3 Wh·kg<sup>-1</sup> (rys. 4 i 5b). Przy ciśnieniu od 17 do 37 MPa, średnia energochłonność brykietowania dla tego materiału wynosi 20 Wh·kg<sup>-1</sup>. Inny przebieg zmian energochłonności brykietowania zaobserwowano dla materiału rozdrobnionego na sicie 10 mm (rys. 5a). Przy ciśnieniu 17 MPa energochłonność brykietowania tego materiału wynosi 18,3 Wh·kg<sup>-1</sup> i jest porównywalna z pozostałymi materiałami, jednak wraz ze wzrostem ciśnienia energochłonność stopniowo wzrasta osiągając wartość 66 Wh·kg<sup>-1</sup> (prawie dwukrotnie większa niż w przypadku pozostałych materiałów). Powyższe zależności opisano funkcyjnie. Dla materiału rozdrobnionego na sitach 4 i 15 mm najlepsze dopasowanie  $R^2=0,86$ , uzyskał wielomian drugiego stopnia. Natomiast dla materiału rozdrobnionego na sicie 10 mm zależność tą najlepiej opisuje funkcja liniowa dla której współczynnik dopasowania  $R^2=0,97$ .

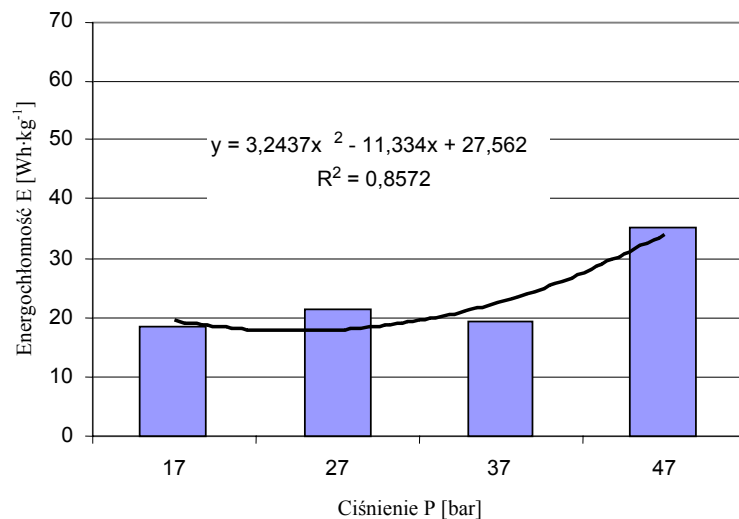
Tak odmienny przebieg zmian energochłonności, w porównaniu z materiałami rozdrobnionymi na sitach 4 i 15 mm, spowodowany może być przez skład granulometryczny a w szczególności przez wzajemny układ cząstek z poszczególnych frakcji. Skład ten (por. rys 3) powodował, że materiał ten charakteryzował się niską gęstością usypową, w wyniku czego do komory prasowania brykieciarki podawana była mniejsza porcja materiału, w porównaniu do pozostałych przypadków. Skutkiem tego wydajność procesu spadała, co

przełożyło się bezpośrednio na wzrost nakładów energetycznych ponoszonych na wyprodukowanie danej masy brykietów.

a)



b)



Rys. 5. Wykres zmian energochłonności brykietowania w zależności od ciśnienia aglomeracji dla materiału rozdrobionego na sicie: a –  $\varnothing$  10 mm, b –  $\varnothing$  15 mm

Fig. 5. Diagram displaying changes in briquetting energy consumption depending on agglomeration pressure for material broken up using sieves: a –  $\varnothing$  10 mm, b –  $\varnothing$  15 mm

## Wnioski

1. Nakłady energetyczne procesu brykietowania zależą od ciśnienia aglomeracji oraz stopnia rozdrobnienia materiału
2. Materiał rozdrobniony na sicie 4 i 15 mm charakteryzuje się zapotrzebowaniem energetycznym na poziomie odpowiednio 37,5 oraz 35,3 Wh·kg<sup>-1</sup> przy ciśnieniu aglomeracji 47 MPa. Przy niższych wartościach ciśnienia (17–37 MPa) nakłady energetyczne wynoszą średnio 20 Wh·kg<sup>-1</sup>.
3. Materiał po sicie 10 mm charakteryzuje się stopniowym przyrostem energochłonności brykietowania z poziomu 18,3 Wh·kg<sup>-1</sup> przy ciśnieniu 17 MPa, do 66 Wh·kg<sup>-1</sup> przy ciśnieniu 47 MPa.
4. Zapotrzebowanie energetyczne w zależności od ciśnienia brykietowania można opisać funkcyjnie. Dla materiału rozdrobnionego na sicie 4 i 15 mm wielomianem drugiego stopnia.

## Bibliografia

- Grover P.D., Mishra S.K., Clancy J.S.** 1994. Development of an appropriate biomass briquetting technology suitable for production and use in developing countries Energy for Sustainable Development. Volume 1 No. 1. s. 45-48.
- Hejft R.** 2002. Ciśnieniowa aglomeracja materiałów roślinnych. Wyd. ITE. Radom ISBN 83-7204-251-9.
- Husain Z., Zainac Z., Abdullah Z.** 2002. Briquetting of palm fibre and shell from the processing of palm nuts to palm oil. Biomass and Bioenergy 22. s. 505-509.
- Saeidy E.** 2004. Renewable energy in agriculture in Egypt, Technological fundamentals of briquetting cotton stalks as a biofuel. Rozprawa doktorska. Uniwersytet Humbolta, Berlin. S 2-26.
- Taha I.S., Abd Elrahim Y.M., Huzayin A.S.** 1981. Dimensional analysis and wafering cotton stalks. Transaction of the American Society of Agricultural Engineers 24. s. 829-832.
- Wheeler J.A., O'Dogherty H.J.** 1984. Compression of straw to high densities in close cylindrical dies. Journal of Agricultural Engineering 29, s. 61-71.
- CEN/TS 15149-1: Solid Biofuels – Methods for the determination of particle size distribution. Part 1: Oscillating screen method using screen apertures of 3,15 mm and above
- CEN/TS 15149-2: Solid Biofuels – Methods for the determination of particle size distribution. Part 2: Vibrating screen method for small particles using screen apertures of 3,15 mm and below
- CEN/TS 14774-1: Solid Biofuels - Methods for the determination of moisture content – Oven dry method – Part 1: Total moisture – Reference method
- PN-91/D-95009: Surowiec drzewny – zrębki leśne.

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008-2010 jako projekt badawczy nr N N313 153935.*

## ENERGY EXPENDITURES IN THE PROCESS INVOLVING *SALIX VIMINALIS* L. WILLOW BRIQUETTING

**Abstract.** The article presents analysis results for energy expenditures incurred during willow briquetting process in an open-chamber, piston type hydraulic briquetting machine. Energy demand for briquetting was registered using Lumel N12P meter for network parameters. Recorded data allowed to determine unit energy demand related to the mass of obtained briquettes. It has been observed that highest energy consumption for briquetting –  $66 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ , is characteristic for material broken up in a mill using a sieve with mesh diameter  $\varnothing 10 \text{ mm}$ , and it is almost two times higher than in case of other material types. The research allowed to determine energy expenditures for briquetting depending on pressure and material breaking up degree. These relations for material broken up using sieves with mesh diameters 4 and 15 mm have been described by a second degree polynomial with adjustment coefficient  $R^2=0.86$ , and for material broken up using a 10mm sieve - by linear function ( $R^2=0.97$ ).

**Key words:** energy expenditures, solid biofuels, briquetting, briquette

**Adres do korespondencji:**

Jarosław Frączek; e-mail: Jaroslaw.Fraczek@ur.krakow.pl  
Katedra Inżynierii Mechanicznej i Agrofizyki  
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie  
ul. Balicka 120  
30-149 Kraków