

NAKŁADY ENERGETYCZNE W PROCESIE MIELENIA ZRĘBKÓW WIERZBY *SALIX VIMINALIS* L.

Jarosław Frączek, Krzysztof Mudryk, Marek Wróbel

Katedra Inżynierii Mechanicznej i Agrofizyki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań energochłonności procesu mielenia zrębków wierzby na młynie bijakowym firmy POR ECOMEC model C120. Określono nakłady ponoszone na mielenie w zależności wielkości mielonych zrębków oraz od wielkości oczek w stosowanych sitach. Energochłonność procesu zobrazowano tzw. energią jednostkową E_{jm} [$\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$] określaną jako stosunek zużytej energii odniesionej do jednostki masy rozdrobnionego materiału. W pracy wykazano wpływ wielkości mielonych zrębków jak również wielkości oczek sit stosowanych w młynie na wartość energii jednostkowej w procesie mielenia. Największą energochłonnością ($82,56 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$) charakteryzował się proces mielenia dłuższych zrębków o długości teoretycznej 35 mm przy zastosowaniu sita $\varnothing 4$ mm. Wykazano również, iż mielenie w systemie tzw. kaskadowym pozwala zmniejszyć całkowite nakłady energetyczne (o około 10%) przy zachowaniu optymalnej wydajności procesu.

Słowa kluczowe: nakłady energetyczne, mielenie, biopaliwa stałe, wierzba *Salix viminalis* L.

Wstęp

Względy ekonomiczne, jakościowe i technologiczne wskazują na konieczność systemowego podejścia do procesu produkcji biopaliw stałych. Proces ten, wbrew pozorom, jest złożony i obejmuje ciąg wielu operacji technologicznych (transport i procesy przeładunkowe, rozdrabnianie, podsuszanie, zagęszczanie oraz chłodzenie).

Rozdrabnianie materiału jest jednym z najważniejszych etapów decydujących o energochłonności produkcji biopaliw stałych. W procesie technologicznym można wyróżnić dwa rodzaje rozdrabniania, tj. wstępne oraz końcowe. Rozdrabnianie wstępne prowadzone jest najczęściej na rębarkach lub sieczkarniach, a uzyskiwana masa to zrębki lub sieczka o długości od 0,5 do 5 cm. Rozdrabnianie końcowe to mielenie prowadzone na urządzeniach wyposażonych w sita robocze pozwalające na uzyskanie materiału o ujednoczonej geometrii. Najczęściej w tym celu wykorzystywane są młyny bijakowe oraz nożowe.

Parametry jakościowe, w szczególności geometria uzyskiwanego materiału, powinny być zróżnicowane w zależności od dalszego przeznaczenia (produkcja peletów, brykietów itp.). Przykładowo w procesie brykietowania możliwe jest stosowanie materiału o długości do 2 cm, natomiast w procesie peletowania do około 5-8 mm.

Ważne zatem jest podjęcie prób optymalizacji procesu mielenia z uwzględnieniem dwóch kryteriów:

- minimalizacji nakładów energetycznych,
- uzyskania najwyższej jakości otrzymywanego materiału w aspekcie dalszego przetwarzania.

Dotychczas prowadzone badania związane z materiałami roślinnymi w większości przypadków obejmowały określenie relacji pomiędzy stopniem rozdrobnienia materiału, parametrami roboczymi i nakładami energii określając między innymi nakłady jednostkowe pracy ($J \cdot kg^{-1}$) [Hejft 2002]. Nakłady te stały się jednym z podstawowych kryteriów oceny maszyn do rozdrabniania materiałów roślinnych [Frączek i in. 2007]. Badania dotyczące energochłonności procesów mielenia najczęściej obejmowały materiały słomiastyczne oraz zrębki drzew leśnych (tab. 1). Brak jest jednak danych dotyczących energochłonności mielenia wierzby energetycznej w produkcji paliw kompaktowanych.

Tabela 1. Energia mielenia materiałów roślinnych
Table 1. Energy of grinding of vegetable materials

Materiał	Energia jednostkowa [kWh·t ⁻¹]	Źródło
Słoma zbożowa	24,7 37-45	Mani i in. 2004 Miles, Miles 1980
Słoma jęczmienna	27,9	Mani 2005
Słoma z kukurydzy	11,0	Mani i in. 2004
Switchgrass – Proso różgowe	27,6 44,9-55,9	Mani i in. 2004 Samson i in. 2000
Zrębki drzewne	49-150	NOVEM 1996

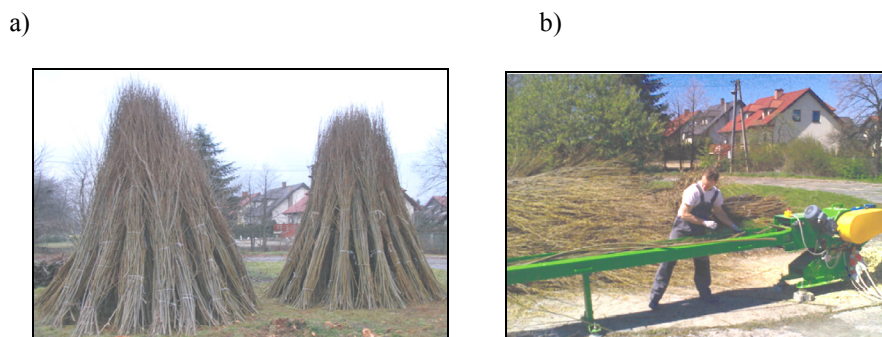
Źródło: opracowanie własne

Cel pracy

Przeprowadzone rozeznanie literaturowe wykazało brak informacji dotyczących nakładów energetycznych procesu mielenia wierzby. W związku z tym celem prezentowanych badań było określenie energochłonności procesu mielenia zrębków wierzby wiciowej *Salix viminalis* L. z przeznaczeniem do produkcji brykietów oraz peletów. W pracy uwzględniono uzyskanie trzech wielkości mielonych frakcji przy różnych wariantach mielenia.

Materiał i metodyka

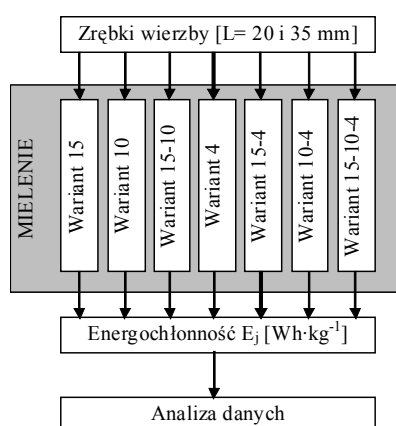
W badaniach wykorzystano trzyletnie pędy wierzby wiciowej *Salix viminalis* L. uprawianej na polstkach doświadczalnych Wydziału Inżynierii Produkcji i Energetyki (rys. 1a). W celu uzyskania materiału wejściowego do procesu mielenia pędy wierzby zostały podane procesowi rozdrabniania wstępnego (zrębkowania) na rębarkę bębnową będącej na wyposażeniu Laboratoriów Katedry Inżynierii Mechanicznej i Agrofizyki (rys. 1b). Materiałem wejściowym w badaniach były zrębki o dwóch teoretycznych długościach tj. 20 i 35 mm. Długość teoretyczna zrębków jest związana z teoretyczną długością cięcia przy ustalonych parametrach maszyny z pominięciem czynników zakłócających takich jak np. poślizg w układzie podawania materiału.



Rys. 1. Badany materiał: a- pędy wierzby w okresie sezonowania [fot. M. Wróbel], b – zrzębko-
wanie na rębarkę bębnowej [fot. K. Mudryk]

Fig. 1. Material covered by the analysis: a) willow sprouts in the seasoning period [photo by
M. Wróbel], b) chipping on the drum chipper [photo by K. Mudryk]

Zrzębki wierzby posiadały wilgotność 14%, co pozwala na wykorzystanie uzyskanej
masy z procesu mielenia bezpośrednio do pelętowania lub brykietowania (bez dosuszania).
Badania przeprowadzone zostały zgodnie ze schematem zamieszczonym na rysunku 2.



Źródło: opracowanie własne autorów

Rys. 2. Schemat przebiegu badań

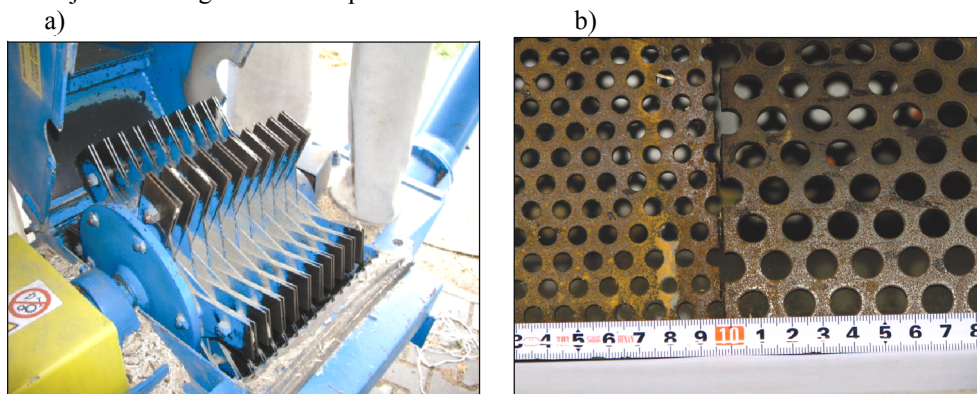
Fig. 2. Analysis process diagram

Proces mielenia prowadzony był na młynie bijakowym firmy POR ECOMEC model C120, w którym wielkość uzyskiwanej frakcji ustalana jest poprzez wymianę sit. W badaniach zastosowano trzy sита robocze o wielkości oczek $\varnothing 4$, 10 oraz 15 mm (rys. 3), które pozwalają na uzyskanie masy o granulacji dostosowanej do produkcji pelętów ($\varnothing 4$ i 10 mm) oraz brykietowania ($\varnothing 10$ i 15 mm). Zgodnie z planem badań (rys. 2), poszczególne wielkości frakcji otrzymywano przy mieleniu w następujących wariantach:

- 15 – frakcja uzyskana przy zastosowaniu tylko sита $\varnothing 15$ mm,
- 10 – frakcja uzyskana przy zastosowaniu tylko sита $\varnothing 10$ mm,

- **15-10** – frakcja uzyskana przy zastosowaniu kolejno sita $\varnothing 15$ i $\varnothing 10$ mm,
- **4** – frakcja uzyskana przy zastosowaniu tylko sita $\varnothing 4$ mm,
- **15-4** – frakcja uzyskana przy zastosowaniu kolejno sita $\varnothing 15$ i $\varnothing 4$ mm,
- **10-4** – frakcja uzyskana przy zastosowaniu kolejno sita $\varnothing 10$ i $\varnothing 4$ mm,
- **15-10-4** – frakcja uzyskana przy zastosowaniu kolejno sita $\varnothing 15$, $\varnothing 10$ i $\varnothing 4$ mm.

Powyższe warianty mielenia pozwolą dodatkowo określić czy tzw. mielenie kaskadowe (mielenie materiału przy zastosowaniu kolejno sit o mniejszych otworach) pozwala na zmniejszenie energochłonności procesu.



Rys. 3. Młyn bijakowy; a - elementy robocze [fot. M. Wróbel], b – sita robocze [fot. K. Mudryk]
Fig. 3. Beater mill; a) working elements [photo by M. Wróbel], b) working sieves [photo by K. Mudryk]

W celu określenia energochłonności procesu mielenia w układ zasilania młyna podłączono miernik parametrów sieci N12P firmy LUMEL, który umożliwił rejestrację zużycia energii oraz wizualizację i zapis danych w pamięci komputera (rys. 4).



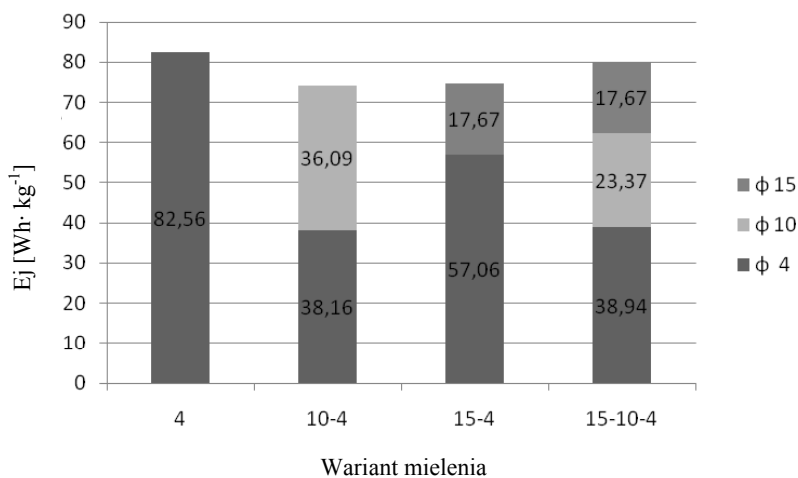
Rys. 4. Stanowisko do badań energochłonności mielenia materiałów roślinnych [fot. K. Mudryk]
Fig. 4. Workstation for the analysis of energy consumption in the process of grinding of vegetable materials [photo by K. Mudryk]

Energochłonność procesu została określona poprzez nakłady jednostkowe, tj. zużycie energii odniesione do jednostki masy rozdrobnionej E_j [$\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$].

Wyniki badań

Analiza uzyskanych wyników pozwoliła na określenie nakładów energetycznych ponoszonych w procesie mielenia zrębków wierzby w zależności od ich teoretycznej długości, wielkości oczek sit roboczych w młynie oraz od wariantów mielenia.

Wyniki pomiarów energochłonności przy mieleniu zrębków o długości 35 mm przedstawiono na rysunku 5. Analizując proces mielenia zrębków, w sytuacji największego rozdrobnienia (mielenie przez sito $\phi 4$ mm), największą energochłonnością charakteryzuje się mielenie w wariantie 4 przy zastosowaniu tylko sita $\phi 4$ mm ($82,56 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$). W przypadku prowadzenia procesu mielenia w układzie kaskadowym nakłady energii ulegają zmniejszeniu. Najniższe zapotrzebowanie odnotowano w wariantie 10-4, gdzie sumaryczne nakłady wynoszą $74,25 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$. Największą energochłonność z wariantów kaskadowych zarejestrowano dla 15-10-4 gdzie całkowite nakłady wynosiły $79,98 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$. Oceniając pod względem nakładów energetycznych badane warianty mielenia można stwierdzić, iż najmniejszą energochłonnością charakteryzuje się wariant kaskadowy, w którym zrębki są mielone kolejno przez sito $\phi 10$ oraz $\phi 4$ mm.



Źródło: opracowanie własne autorów

Rys. 6. Wykres zmian energochłonności mielenia zrębków o długości 20 mm

Fig. 6. Chart of changes of energy consumption in the process of grinding of chips with a 20 mm length

W tabeli 2 przedstawiono wyniki nakładów energetycznych podczas mielenia badanych zrębków dla różnych wariantów rozdrobnienia.

Tabela 2. Zestawienie energochłonności mielenia zrębków przy różnych wariantach
 Table 2. List of energy consumption values for various variants of the process of grinding of chips

Wariant mielenia	Energochłonność [Wh·kg ⁻¹]	
	zrębki L=20mm	zrębki L=35 mm
15	14,31	17,67
10	35,46	36,09
15-10	38,73	41,04
4	65,37	82,56
10-4	59,79	74,25
15-4	62,55	74,73
15-10-4	65,79	79,98

W zależności od technologii produkcji paliw kompaktowanych (brykietowanie, peletowanie) wielkość frakcji przetwarzanego materiału powinna być możliwie największa, dostosowana do danego procesu. W procesach brykietowania stopień rozdrobnienia materiału może być mniejszy np. prowadzony na sicie $\phi 15$ mm, natomiast w przypadku peletowania materiał rozdrabniany jest nawet na sicie $\phi 4$ mm. Zmieszenie wielkości oczek sita w procesie mielenia z $\phi 15$ na $\phi 4$ mm skutkuje zwiększeniem nakładów energetycznych średnio czterokrotnie. Tak duże różnice w nakładach energetycznych przy mieleniu materiału powinno wymusić opracowanie wytycznych dotyczące parametrów roboczych maszyn rozdrabniających, tak aby nakłady energetyczne były minimalne przy zachowaniu jakości produktu (biopaliwa).

Wnioski

1. Wykazano, iż przy mieleniu zrębków wierzby na frakcje o dużym stopniu rozdrobnienia (np. na sicie $\phi 4$ mm) należy rozważyć mielenie tzw. kaskadowe, które umożliwia zmniejszenie nakładów energetycznych prawie o 10%.
2. Przeprowadzone badania wykazały, iż najmniejszą energochłonnością mielenia zrębków wierzby (zarówno dłuższych jak i krótszych) charakteryzuje się wariant kaskadowy, gdzie mielenie odbywa się na sicie $\phi 10$ mm następnie $\phi 4$ mm.
3. Ze względu na duże nakłady energetyczne procesu mielenia, stopień rozdrobnienia materiału powinien być ściśle powiązane z procesem produkcji biopaliw stałych. Możliwość zwiększenia wielkości cząstek rozdrobnionego materiału w (przy utrzymaniu reżimu technologicznego) pozwoli na zmniejszenie energochłonności procesu produkcji. Przykładowo zwiększenie wielkości oczek sita w młynie z 4 na 15 mm pozwala zmniejszyć energochłonności mielenia nawet czterokrotnie.

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

Bibliografia

- Fraćczek J., Mudryk K.** 2007. Metoda pomiaru energochłonności procesu zrębkowania pędów wierzby. Inżynieria Rolnicza. Nr 7 (95). Kraków. s. 47-53.
- Hejft R.** 2002. Cisnieniowa aglomeracja materiałów roślinnych. Wyd. i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji. Radom. ISBN 83-7204-251-9.
- Mani S.** 2005. A systems analysis of biomass densification process. Ph.D. Thesis. Department of Chemical and Biological Engineering. University of British Columbia. Vancouver. Canada.
- Mani S., Tabil L. G., Sokhansanj S.** 2004. Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws, corn stover and switchgrass. Biomass and Bioenergy 27(4). s. 339-352.
- Miles T. R., Miles T. R. Jr.** 1980. Densification systems for agricultural residues. Thermal conversion of solid wasters and biomass. American chemical Society. Washington DC. pp. 179-191.
- Samson R., Duxbury P.** 2000. Assessment of palletized biofuels. (http://www.reap-canada.com/online_library/feedstock_biomass/15%20Assessment%20of.PDF – dostęp: kwiecień 2010).
- Netherlands Agency for Energy and Environment (NOVEM). 1996. Pretreatment technologies for *energy* crops. Report No. 9525. BTG Biomass Technology Group BV. Enschede The Netherlands.

ENERGY EXPENDITURES IN THE PROCESS OF GRINDING OF CHIPS OF THE WILLOW *SALIX VIMINALIS* L.

Abstract. The work presents results of the analysis of energy consumption in the process of grinding of chips on the beater mill of POR ECOMEC, C120 model. Expenditures used for grinding were determined subject to the size of ground chips and the size of meshes in sieves being used. Energy consumption in the process was illustrated by unit energy E_{jm} [$\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$], which is defined as the ratio of consumed energy referred to the mass unit of crumbled material. The work presents the impact of the size of ground chips and the size of meshes of sieves being used in the mill on the value of unit energy in the grinding process. The biggest energy consumption ($82.56 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$) was characterised by the process of grinding of longer chips with the theoretical length of 35 mm with the use of a sieve with 4 mm meshes. It was also proved that grinding in the „cascade” system helps to decrease total energy expenditures (by approx. 10%) with the optimum process efficiency being maintained.

Key words: energy expenditures, grinding, solid biofuels, willow *Salix viminalis* L.

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