

## Nakłady energetyczne podczas mielenia biomasy przygotowywanej do procesu peletowania

**Streszczenie.** Przygotowanie surowca lignocelulozowego do procesu peletowania lub brykietowania jest ważnym etapem w produkcji powszechnie dziś stosowanych paliw ekologicznych. W cenie peletu lub brykietów, oprócz kosztów materiałowych, istotnym czynnikiem jest koszt całkowity procesu produkcji, składowania i transportu. W tej pracy zajęto się tylko nakładami energetycznymi podczas przygotowania lignocelulozy do dalszej obróbki, dla wybranych rodzajów materiału. Nakłady energetyczne związane są tu przede wszystkim z pracą urządzeń elektrycznych i elektromechanicznych. Przy uwzględnieniu aktualnej ceny energii elektrycznej oraz rozłożonych kosztów ich remontów i wielkości amortyzacji pozwalają na szacowanie w prosty sposób rzeczywistych kosztów tej części produkcji peletów i brykietów.

**Abstract.** Preparation of lignocellulose raw material for pellet or briquette production is one of the key operations in production of widely used nowadays green fuels. Market price of agglomerated fuels (pellet or briquettes) is influenced not only by material cost, but also by costs related to production, transportation and storage. The paper concerns only costs related to preparation of lignocellulose for further operation, for selected types of materials. Energy consumption is related mainly to work of electrical and electromechanical devices. After taking into account energy and maintenance cost as well as amortisation of the apparatus, it is possible to define share of pellet or briquettes. **(Energy consumption during grinding of biomass for pelletisation).**

**Słowa kluczowe:** energia elektryczna, energochłonność mielenia, biomasa, rośliny energetyczne  
**Keywords:** electrical energy, energy consumption of the grinding, biomass, energy crops

### Wstęp

Pelet i brykiet jako biopaliwa stałe wytworzone najczęściej z surowców lignocelulozowych uważane są obecnie za jedno z najpopularniejszych paliw odnawialnych stosowanych w układach energetycznych w skali przemysłowej jak i indywidualnej. Obecnie, ze względu na dobre właściwości energetyczne oraz łatwość w użytkowaniu zalicza się go do bardzo efektywnych źródeł energii cieplnej [3,6,5]. Surowcami w produkcji tych granulatów są materiały najczęściej już wstępnie rozdrobnione, w formie zrębków lub sieczki. Taki materiał przed peletowaniem lub brykietowaniem musi być poddany mieleniu celem redukcji wielkości cząstek na frakcje ściśle określone w danej technologii produkcji. W zależności od przeznaczenia (brykiet lub pelet) materiał rozdrabniany jest najczęściej na frakcje o wielkości cząstek z przedziału od 4 [mm] do 15 [mm]. W przypadku produkcji brykietów wielkość cząstek (w zależności od konstrukcji brykietarki) nie powinna przekraczać 10 [mm], natomiast przy produkcji peletów od 2 [mm] do 4 [mm] (zależnie od konstrukcji peletarki). Właściwościami najczęściej uwzględnianymi w badaniach dotyczących procesów mielenia jest zapotrzebowanie energetyczne, zmiana gęstości usypowej oraz stopień rozdrobnienia. Problemem tym zajmowało się już wielu autorów [1,2,4,10,11].

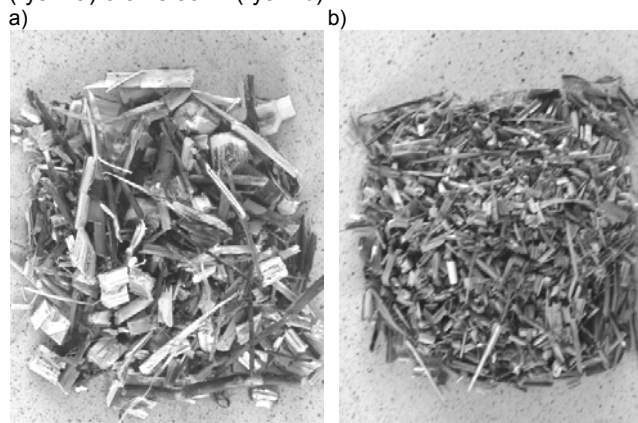
Celem pracy było określenie energochłonności procesu mielenia wstępnie rozdrobnionej biomasy z plantacji roślin energetycznych na potrzeby procesów aglomeracji. Oprócz energochłonności samego procesu mielenia dokonano oceny jakościowej uzyskanego surowca poprzez określenie składu granulometrycznego oraz gęstości usypowej.

### Metodyka prowadzonych badań

W prowadzonych badaniach wykorzystywano materiał w formie zrębków topoli *Populus L.*, które według obowiązującej klasyfikacji odpowiadają klasie P45 oraz sieczki miskanta chińskiego *Miscanthus sinensis* oraz topinamburu *Helianthus tuberosus L.* które zaliczone zostały do klasy P16. Surowce te w technologii produkcji biopaliw stałych są pozyskiwane najczęściej z celowych upraw energetycznych. Niezbędne zatem jest jego odpowiednie rozdrobnienie tak aby procesu aglomeracji

(peletowania czy też brykietowania) pozwalały na uzyskanie granulatów o odpowiednich parametrach jakościowych.

Na rysunku 1 przedstawiono próbki materiałów badawczych wstępnie rozdrobnionych do postaci zrębków (rys. 1a) oraz sieczki (rys. 1b).



Rys. 1 Materiał badawczy, a) zrębki topoli, b) sieczka miskanta.

Badanie nakładu energetycznego przeprowadzono zgodnie ze schematem zamieszczonym na rysunku 2.

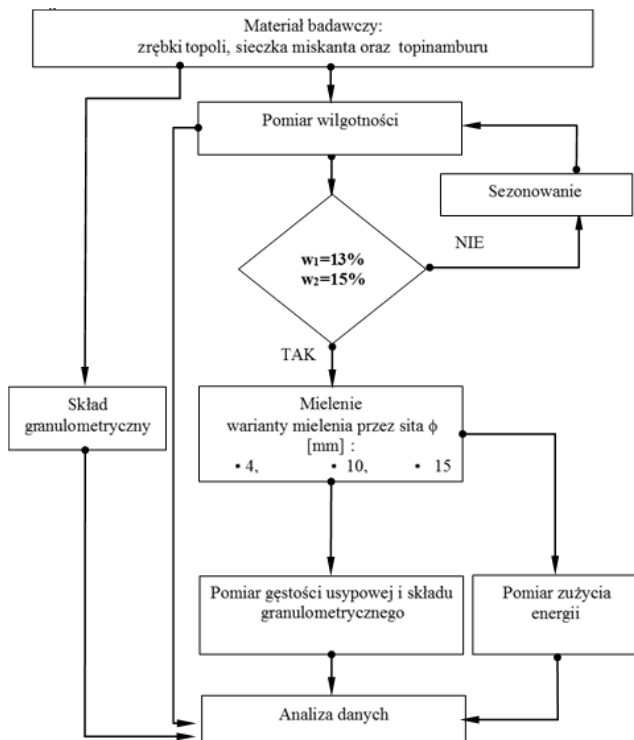
Tuż po ścięciu topoli lub miskanta uzyskany surowiec lignocelulozowy ma wilgotność czasem przekraczającą  $w=35\%$  procent. Przy czym przez wilgotność surowca lignocelulozowego rozumiemy tu stosunek masy wody w nim zawartej do masy surowca absolutnie suchego a jej poziom podaje się zwykle w procentach. Po wyschnięciu na świeżym powietrzu jego wilgotność w zmniejsza się do około 15-20% a po zmagazynowaniu i przetrzymaniu w suchych pomieszczeniach jego poziom wilgotności  $w$  wynosi przeciętnie od 13% do 8% procent. Po osuszeniu materiału do wilgotności  $w_1=13\%$  i  $w_2=15\%$  surowiec poddano procesowi mielenia w specjalnym młynie bijakowym firmy POR ECOMEC model C120-E/A wyposażony w bęben roboczy a bijakami zamontowanymi na sztywno, współpracującym z wymiennym otworowym sitem roboczym, pozwalającym na zmianę stopnia rozdrobnienia materiału. W prezentowanych badaniach

zastosowano trzy rodzaje sit o perforacji w postaci otworów  $\varnothing 4$  [mm],  $\varnothing 10$  [mm] i  $\varnothing 15$  [mm]. Stanowisko badawcze posiada grawitacyjny układ zadawania surowca oraz system odbierania zmielonego materiału. Do napędu układu rozdrabniającego wykorzystano silnik elektryczny o zasilaniu 3x400/230 [V] i mocy  $P = 11$  [kW] bezpośrednio sprzęgnięty z wałem bębna. Badania procesu mielenia prowadzono w pięciu powtórzeniach dla każdego wariantu, a przy jednakowej masie próbki materiału w każdym powtórzeniu, wynoszącym 30 [kg].

Aby proces mielenia prowadzony był w powtarzalnych warunkach, obciążenie robocze młyna powinno być podobne. Realizowane to było poprzez utrzymanie stałej wartości natężenia prądu elektrycznego zasilania silnika głównego na poziomie  $17 \pm 0,5$  [A]. Ta wartość prądu została ustalona na podstawie przeprowadzonych badań wstępnych. W celu oznaczenia nakładów energetycznych procesu mielenia w układ zasilania włączony został specjalnie dostosowany miernik parametrów sieci LUMEL ND1. Aby możliwe było określenie nakładów energetycznych bezpośrednio ponoszonych na proces mielenia, w pierwszej kolejności dokonano pomiarów mających na celu określenie energii biegu jałowego, urządzenia bez obciążenia właściwego elementów roboczych. Na podstawie informacji o nakładach energetycznych tj. różnicy między  $E_c$  czyli energią całkowitą i  $E_o$  czyli energią biegu jałowego oraz masie zmielonego materiału  $m$  możliwe było określenie energochłonności jednostkowej procesu:

$$(1) \quad E_j = \frac{(E_c - E_o)}{m}$$

gdzie:  $E_j$  jest energochłonnością jednostkową procesu mielenia w [Wh/kg],  $E_c$  oznacza całkowite nakłady energetyczne [Wh],  $E_o$  jest energią na pokonanie oporów pracy maszyny [Wh],  $m$  to masa zmielonego materiału [kg].



Rys. 2 Schemat prowadzonych badań,  $w_1$ ,  $w_2$  oznacza wilgotność względną

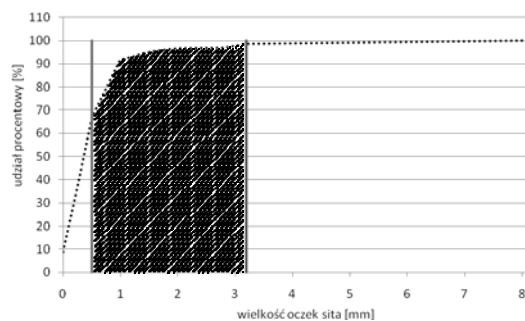
Otrzymany materiał poddano następnie analizie jakościowej. Zgodnie z normami PN-EN 15149-1:2011

(Biopaliwa stałe - Oznaczenie rozkładu wielkości ziaren - Część 1: Metoda przesiewania oscylacyjnego przy użyciu sit o szczelinie 1 mm lub większej) i PN-EN 15103:2010 (Biopaliwa stałe - Oznaczenie gęstości nasypowej), dla oceny rozdrobnionej biomasy zastosowano dwa parametry tj. skład granulometryczny oraz gęstość usypową (nasypową).

Pomiar składu przeprowadzono na wstrząsarce laboratoryjnej metodą sitową. Stanowisko wyposażone było w zestaw laboratoryjnych sit otworowych o średnicy  $\varnothing 40$  [mm];  $\varnothing 16$  [mm];  $\varnothing 8$  [mm];  $\varnothing 3,2$  [mm]; dodatkowo do szczegółowej analizy drobnych frakcji zastosowano zestaw sit plecionych o wymiarach # 2,8 [mm]; # 2 [mm]; # 1,6 [mm]; # 1,4 [mm]; # 1 [mm]; # 0,5 [mm]; # 0,25 [mm]. Wykorzystanie uzyskanych wyników do dalszej analizy jest bardzo trudne ze względu na fakt, iż wspomniany skład granulometryczny jest opisany 11 wartościami. Przeprowadzono więc analizę krzywych kumulacyjnych składu granulometrycznego badanych surowców celem wyznaczenia wskaźnika rozdrobnienia  $S_g$  definiowanego jako [11]:

$$(2) \quad S_g = \int_a^b f(x) dx$$

gdzie:  $S_g$  jest wskaźnikiem rozdrobnienia,  $f(x)$  to krzywa kumulacyjna składu granulometrycznego,  $a$  to dolna granica rozmiarowa cząstek,  $b$  jest górną granicą rozmiarową cząstek.



Rys. 3 Przykładowa krzywa kumulacji granulometrycznego składu dla topoli, frakcja główna w przedziale 0-1,4 [mm] z zaznaczonymi granicami do obliczenia wskaźnika  $S_g$

Przeprowadzona analiza składu granulometrycznego pozwoliła również na określenie granic przedziałów  $a$  i  $b$  wykorzystywanych do obliczenia wskaźnika rozdrobnienia. Dolna wartość przedziału  $a = 0,5$  [mm] odnosi się do najliczniejszej frakcji cząstek małych występujących w przedziale pył - 1,6 [mm]; natomiast górna wartość  $b = 3,14$  [mm], odpowiada najliczniejszej frakcji cząstek dużych w przedziale 2 - 8 [mm].

Ostatnim parametrem jakościowym charakteryzującym uzyskane materiały była gęstość usypowa (nasypowa), będąca masą materiału podzieloną przez jego objętość (samego ciała stałego oraz przestrzenie między jego cząstkami). Pomiar gęstości rozdrobnionej biomasy określono zgodnie z metodyką opisaną w normie PN-EN 15103:2010 (Biopaliwa stałe - Oznaczenie gęstości nasypowej). Gęstość materiałów oznaczana była w pojemniku cylindrycznym o objętości 5 [dm<sup>3</sup>] i wadze laboratoryjnej o dokładności 0,1 [g].

### Wyniki badań

Przeprowadzone badania zgodnie z wcześniej przedstawioną metodyką pozwoliły na określenie między innymi energochłonności procesu mielenia z wykorzystaniem różnych sit roboczych decydujących o

stopniu rozdrobnienia a tym samym o ponoszonych nakładach energetycznych.

Analizując wyniki badań przedstawione na rysunku 4 a dotyczące energochłonności procesu **mielenia zrębków topoli** można stwierdzić:

- wzrost długości zręбка jak również wilgotności w badanych przedziałach powoduje wzrost energochłonności procesu mielenia. Najmniejsze nakłady mielenia wynoszące 14,42 [Wh/kg], odnotowano dla zrębki o długości 20 [mm] i wilgotności 13% - rozdrabnianej na sicie  $\varnothing 15$  [mm]. Największą energochłonnością wynoszącą 97,85 [Wh/kg] charakteryzował się proces mielenia zrębków o długości 35 [mm] i wilgotności 15% na sicie  $\varnothing 4$  [mm].
- zastosowanie sita roboczego o większych otworach spowodowało spadek energochłonności procesu średnio o 45% dla sita  $\varnothing 10$  [mm] i prawie 80% dla sita  $\varnothing 15$  [mm]. Zarejestrowane różnice są bardzo duże co potwierdza jak istotny jest odpowiedni dobór sita roboczego przy produkcji biopaliw stałych.

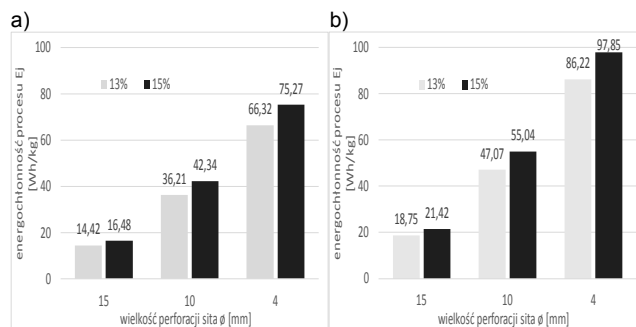
Uzyskane tutaj wyniki są zbliżone do danych podanych w literaturze. W badaniach prowadzonych w pracy [3] wykazano, iż proces mielenia zrębków topoli charakteryzuje się energochłonnością na poziomie 82,6 [Wh/kg] natomiast sosny 119,1 [Wh/kg] przy zastosowaniu sita  $\varnothing 6$  [mm]. Badania prowadzone w skali laboratoryjnej, których wyniki podano w pracy [7] wykazały, iż proces mielenia zrębków topoli o wilgotności  $w=9\%$  charakteryzował się energochłonnością na poziomie 76,6 [Wh/kg] przy zastosowaniu sita  $\varnothing 2$  [mm].

W przypadku **mielenia siewki miskanta oraz topinamburu** można stwierdzić, iż wzrost długości siewki oraz wilgotności powoduje wzrost nakładów energetycznych (rys.5 i rys. 6). Przy mieleniu przez sito o oczkach  $\varnothing 15$  [mm], najmniejszymi nakładami energetycznymi charakteryzuje się proces rozdrabniania topinamburu, wynoszący: przy wilgotności 13% - 4,02 [Wh/kg], przy wilgotności 15% - 4,78 [Wh/kg] (rys.5).

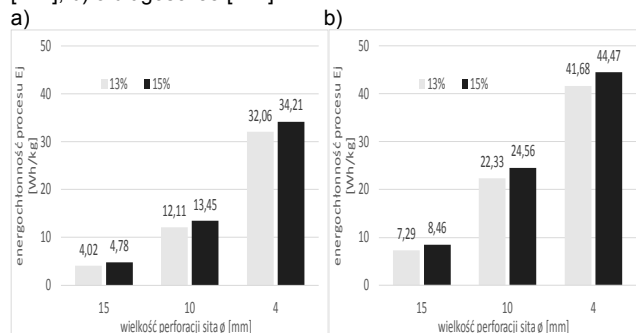
Energochłonność procesu mielenia badanych traw (miskant) (rys. 6) oraz bylin (topinambur) (rys. 5) jest istotnie mniejsza w porównaniu do mielenia topoli. Jest to spowodowane tym, iż materiał te posiadają stosunkowo małą średnicę pędów. Dodatkowo cechuje je większa - niż zdrewniałe zrębki wierzbowe - podatność na rozdrabnianie, co skutkuje łatwiejszym rozdrobnieniem przy mieleniu udarowym.

Odnosząc uzyskane tutaj wyniki pomiarów energochłonności mielenia, dla sita  $\varnothing 4$  [mm], do danych literaturowych, można stwierdzić, że otrzymane wartości są podobne. W pracy [12] zostało stwierdzone, że mielenie prosa na młynie bijakowym z sitem o średnicy otworów 5,6 [mm] wymaga nakładów energetycznych na poziomie 44,9 [kWh/t]=44,9 [Wh/kg]. Badając ten sam materiał w pracy [8] odnotowano większe zużycie energii, na poziomie 55,9 [kWh/t]=55,9 [Wh/kg] podczas mielenia w młynie bijakowym (zarówno dla sita 5,6 [mm] jak i 2,8 [mm]).

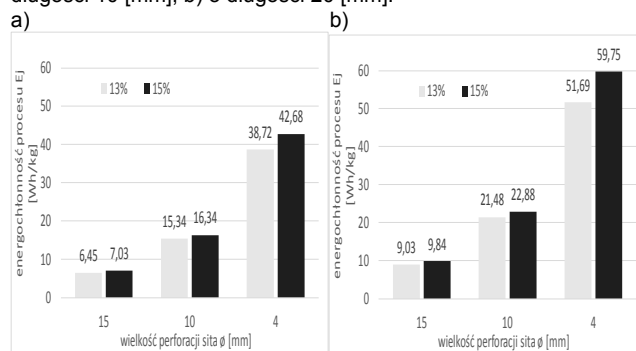
Podsumowując, ze względu na duże nakłady energetyczne procesu mielenia, stopień rozdrobnienia materiału powinien być ściśle powiązany z wymaganiami stawianymi w dalszym procesie produkcji biopaliw stałych. Możliwość zwiększenia wielkości cząstek rozdrobnionego materiału w (przy utrzymaniu reżimu technologicznego) pozwoli na zmniejszenie energochłonności procesu produkcji. Przykładowo, zwiększenie średnicy oczek sita w młynie z  $\varnothing 4$  [mm] na  $\varnothing 15$  [mm] pozwala na prawie czterokrotne zmniejszenie energochłonności mielenia.



Rys. 4 Energochłonność mielenia zrębki topoli: a) o długości 20 [mm], b) o długości 35 [mm].



Rys. 5 Energochłonność mielenia siewki topinamburu: a) o długości 10 [mm], b) o długości 20 [mm].



Rys. 6 Energochłonność mielenia siewki miskanta: a) o długości 10 [mm], b) o długości 20 [mm].

Obliczony wskaźnik rozdrobnienia  $S_g$  (Tabela 1) wykazał, iż wzrost rozdrobnienia jest ściśle związany ze wzrostem nakładów energetycznych. W przypadku topoli wzrost perforacji sita z  $\varnothing 4$  [mm] do  $\varnothing 10$  [mm] powoduje spadek wskaźnika rozdrobnienia  $S_g$  prawie o 50% (303,22) natomiast w przypadku sita o otworach  $\varnothing 15$  [mm] spadek ten wynosi prawie 70% (179,27).

Tabela 1. Wskaźnik rozdrobnienia badanych materiałów

Materiał	Wielkość sita	Wskaźnik rozdrobnienia
	[mm]	
Topola	4	641,73
	10	303,22
	15	179,27
Topinambur	4	744,68
	10	499,41
	15	313,33
Miskant	4	642,49
	10	441,50
	15	283,00

Podobne relacje zaobserwowano w przypadku topinamburu oraz miskanta. Spadek wskaźnika  $S_g$  był mniejszy i odpowiednio wynosił dla sita  $\varnothing 10$  [mm] – około 30% a dla sita  $\varnothing 15$  [mm] – niecałe 60%. W przypadku

topinamburu oraz miskanta większy stopień rozdrobnienia  $S_g$  w stosunku do topoli związany jest z ich właściwościami fizycznymi tj. stopniem zdrewnienia tkanki, co bezpośrednio przekłada się na podatność na rozdrabnianie. W przypadku tych materiałów mamy do czynienia ze mniejszą energochłonnością oraz większym stopniem rozdrobnienia.

W tabeli 2 przedstawiono wyniki badań dotyczące gęstości usypowej (nasykowej) uzyskanych materiałów. Gęstość usypowa surowców do produkcji paliw kompaktowanych zaliczana jest do parametrów jakościowych charakteryzujących dany materiał. Uzyskane wyniki wskazują, iż wraz ze wzrostem stopnia rozdrobnienia oraz wilgotności materiału gęstość usypowa wzrasta. Największą gęstością charakteryzuje się rozdrobniona topola (166,49 [kg/m<sup>3</sup>], sito  $\phi 4$  [mm], wilgotność 15%), natomiast najmniejszą miskant (92,29 [kg/m<sup>3</sup>], sito  $\phi 15$  [mm], wilgotność 13%). Uzyskane wyniki się zbliżone do wartości podawanych w literaturze. Jak wykazano w pracy [9] gęstość usypowa typowych materiałów słomiastych rozdrobnionych do procesów peletowania wynosi od 80 [kg/m<sup>3</sup>] do 112 [kg/m<sup>3</sup>].

Tabela 2. Gęstość usypowa rozdrobnionych surowców

Materiał	Wielkość sita	Wilgotność materiału	Gęstość usypowa materiału
	[mm]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]
Topola	4	13	163,24
		15	166,49
	10	13	156,26
		15	157,37
	15	13	140,76
		15	143,88
Topinambur	4	13	115,73
		15	118,31
	10	13	106,41
		15	109,42
	15	13	102,09
		15	105,67
Miskant	4	13	110,70
		15	113,54
	10	13	98,36
		15	100,60
	15	13	92,29
		15	94,53

Stosunkowo niewielkie wartości gęstości usypowej sprawiają między innymi, że procesy mielenia powinny być zlokalizowane bezpośrednio przy kolejnych etapach technologii produkcji biopaliw stałych. Wartość gęstości materiału na poziomie 100 [kg/m<sup>3</sup>] sprawia, że magazynowanie oraz jego transport jest utrudniony oraz nieoptymalny.

### Podsumowanie

Z przeprowadzonego rozeznania wynika, iż do mielenia biomasy najczęściej stosowane są młyny o napędzie elektrycznym wyposażone w bijakowy system roboczy. Przedstawione wyniki Energochłonność procesu mielenia ściśle uzależniona jest od wilgotności surowca jak i od zastosowanej perforacji sita roboczego. Wzrost wilgotności powoduje wzrost nakładów energetycznych na jednostkę masy przetwarzanego surowca w szczególności w młynach bijakowych, gdzie proces redukcji wielkości cząstki odbywa się poprzez rozbijanie udarowe cząstek. Podobnie wzrost wielkości perforacji sita powoduje spadek energochłonności procesu jednak że zmniejsza się tym samym stopień rozdrobnienia.

Odnosząc uzyskane wyniki pomiarów energochłonności mielenia do danych literaturowych, można stwierdzić, że uzyskane wartości energochłonności procesu są podobne do tych podanych w literaturze [2, 3,4,5,7]. Przy przyjęciu ceny energii elektrycznej wynoszącej 0,55 [zł/kWh] uzyskana energochłonność procesu rozdrobnienia tu badanych materiałów wynosi od 2,4 [gr/kg] do 5,3 [gr/kg].

W związku ze stale rosnącym zapotrzebowaniem na peletowaną lub brykietowaną lignocelulozę, w celu obniżenia jej kosztów produkcji, wskazane jest prowadzenie prac związanych z optymalnym wykorzystaniem energii elektrycznej w maszynach i urządzeniach mielących biomasę.

**Autorzy:** dr inż. Marek Wróbel, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, E-mail: Marek.Wrobel@ur.krakow.pl, dr inż. Krzysztof MUDRYK, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, E-mail: Krzysztof.Mudryk@ur.krakow.pl, dr inż. Aleksander GAŚIORSKI, Instytut Elektrotechniki Przemysłowej, Politechnika Częstochowska E-mail: alegg@el.pcz.czyst.pl, dr inż. Zdzisław POSYŁEK, Instytut Telekomunikacji i Kompatybilności Elektromagnetycznej, Politechnika Częstochowska E-mail: zdzichu@el.pcz.czyst.pl, dr inż. Tomasz DRÓZDŹ, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, E-mail: Tomasz.Drozdz@ur.krakow.pl.

### LITERATURA

- [1] Arthur, J.F., Kepner, R.A., Dobie, J.B., Miller, G.E., Parsons, P.S., Tub grinder performance with crop and forest residues, *Transactions of the ASAE*, 25, (1982), n.6, 1488–1494
- [2] Datta, R., Energy requirement for lignocellulose pretreatment processes, *Process Biochemistry*, 16 (1981), n. 42, 16–19
- [3] Esteban, L.S., Carrasco, J.E., Evaluation of different strategies for pulverization of forest biomass, *Powder Technology*, 166, (2006), n.3, 139-151
- [4] Frączek, J., Mudryk K., Wróbel, M., Nakłady energetyczne w procesie rozdrabniania zrębków wierzby *Salix viminalis L*, *Inżynieria Rolnicza*, 4 (122), (2010), 43-49
- [5] Frączek, J., Mudryk, K., Wróbel, M., Zapotrzebowanie mocy jednostkowej do rozdrabniania pędów wierzby na rębarkę toporowej. *Inżynieria Rolnicza*, 6 (115), (2009). 69-77
- [6] Gaśiorski A., Posytek Z., Drózdź T., Mikrofalowa metoda określania wilgotności lignocelulozowych paliw stałych, *Przeгляд Elektrotechniczny*, 91, (2015), nr 12, 99-101
- [7] Jafari Naimi, L., A study of cellulosic biomass size reduction, University of British Columbia, Retrieved from <https://open.library.ubc.ca/cIRcle/collections/24/items/1.0224813> (2016)
- [8] Jannasch, R., Quan Y., R. Samson R., A process and energy analysis of pelletizing switchgrass, Final Report, Prepared by REAP-Canada ([www.reap-canada.com](http://www.reap-canada.com)) for Natural Resources Canada (2001)
- [9] Mani S., A systems analysis of biomass densification process, publikacja: [collections/831/items/1.0058759](https://open.library.ubc.ca/cIRcle/collections/831/items/1.0058759), (2005)
- [10] Miles T. R., Miles T. R. Jr., Densification systems for agricultural residues, Presented at the Symposium on Thermal Conversion of Solid Wastes and Biomass, editet by J. L. Jones and S. B. Radding, 178th American Chemical Society Annual Meeting, Washington DC. (Sept. 1979), 179-191
- [11] Mudryk K., Mielenie - rozdrabnianie końcówce, rozdział w pracy: Optymalizacja procesu produkcji paliw kompaktowanych z roślin energetycznych (J. Frączek redakcja), Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej, Kraków, (2010)
- [12] Samson, R., Duxbury, P., Drisdelle, M., Lapointe, C., Assessment of pelletized biofuels, publikacja na stronie: <http://www.reap-canada.com/Reports/pelletaug2000.html>. (2000)