

Porównanie ciepła spalania i wartości opalowej szyszek wybranych gatunków drzew leśnych

Comparison of heat of combustion and calorific value of the cones and wood
of selected forest tree species

Monika Aniszewska*, Arkadiusz Gendek

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Wydział Inżynierii Produkcji, Katedra Maszyn Rolniczych i Leśnych, ul.
Nowoursynowska 164, 02–787 Warszawa

* Tel. +48 22 59 345 20; e-mail: monika_aniszewska@sggw.pl

Abstract. Every year, scaling plants buy (up to tens of tons) cones which needs to be peeled. After the process of scaling, the cones themselves are waste, which is partly sold. The problem of waste disposal is especially severe in plants where the processing is performed by electrically-powered scaling cabinets, but the problem does not apply to facilities where pellets are burned to produce heat.

We examined the heat of combustion and calorific value of the residues from scaling plants that can be used in the production of refined wood fuels. The residues consist of the empty cones of pine, spruce, larch as well as husks and stems of silver fir. Additionally, we conducted measurements of the heat of combustion for wood and cones of each species and compared them to their respective calorific values

The results revealed that the average calorific value of the cones is in the range 17.81–19.86 MJ/kg. Our work showed that empty cones have a significantly higher calorific value and heat of combustion than the wood of spruce, larch and fir. In the case of pine, cones and wood did not differ significantly.

These results led us to the conclusions that empty de-scaled cones can be utilized as a valuable primary solid fuel or fuel additive for the production of refined products for the local market.

Due to the low annual production of cones in comparison to other materials such as sawdust and wood chips, pine cones should be used as a supplement, to enrich fuels of inferior quality by enhancing their energetic properties.

Key words: cone, wood, biomass, heat of combustion, calorific value

1. Wstęp

Do 2020 roku 20% energii zużywanej we wszystkich krajach wchodzących w skład Unii Europejskiej ma pochodzić ze źródeł odnawialnych, zgodnie z dyrektywą przyjętą w marcu 2007 roku przez Radę Europejską. W dokumencie zaznaczono, że emisja gazów cieplarnianych ma ulec zmniejszeniu o 20%, a wydajność energetyczna wzrosnąć do 20%. Warunki te spowodowały intensywny rozwój badań nad odnawialnymi źródłami energii.

W Polsce, która po wejściu do Unii Europejskiej w 2004 roku zobowiązała się dostosować do systemu funkcjonującego w krajach członkowskich, do podstawowych źródeł odnawialnej energii pierwotnej zalicza się energię pozyskiwaną z wiatru, wody i biomasy. Biomasa drzewna pozyskiwana jest między innymi z drewna małowymiarowego lub odpadów drzewnych poddanych zrębkowaniu (Zychowicz, Gendek 2009), które pozyskano z lasu lub plantacji, np. wierzby, topoli, olchy czy robinii. Wytworzone zrębki mogą być spalane lub przetwarzane na paliwa uszlachetnione (pelety i bry-

kiet), powszechnie wykorzystywane do spalania w kotłach. W zależności od technologii i zastosowanego materiału pelety i brykiet mogą być wytwarzane z jednego gatunku drewna lub z mieszanki wielu gatunków. Które paliwo jest lepsze i jaki powinno mieć skład? Badania takie prowadzone są przez różne jednostki naukowe.

Autorzy artykułu przeprowadzili badania ciepła spalania i wartości opałowej odpadów z wyłuszcarni, które można zastosować do produkcji uszlachetnionych paliw drzewnych. Każdego roku wyłuszcarnie nasion skupują po kilkadziesiąt ton szyszek i po wyłuszczeniu mają problem ze zbytem odpadów. Szyszki, które zaliczono do odpadów łuszczarskich są wprawdzie wystawiane na sprzedaż jako pełnowartościowy produkt uboczny (otwarte szyszki są używane jako element ozdobny w wieńcach, stroikach i bukietach), lecz ze względu na ich wysoką cenę nie znajdują wielu nabywców. Innym sposobem wykorzystania pustych szyszek jest ich rozdrobnienie i dodanie do podłoża wykorzystywanego przy produkcji sadzonek w namiotach foliowych. Zabiegi te wymagają jednak znacznych nakładów energetycznych i finansowych, przez co nie są zbyt często stosowane.

Omawiany problem zbytu odpadów dotyczy tych wyłuszcarni, w których do procesu łuszczenia szyszek korzysta się z szaf łuszczarskich zasilanych energią elektryczną (Suszka 2000). Nie dotyczy on obiektów, w których szyszki łuszczy się w szafach opalanych drewnem, w nich bowiem do wytworzenia energii cieplnej często zamiast drewna używa się właśnie pustych szyszek. Takich wyłuszcarni jest jednak niewiele (Aniszewska 2012).

Obecnie na terenie Polski funkcjonuje 16 wyłuszcarni, w których co roku łuszczone są szyszki dla pozyskania nasion, a wielkość skupu zależy od wielkości urodzaju. W latach urodzaju nasion drzew iglastych wyłuszcarnie skupują kilkadziesiąt ton szyszek różnych gatunków – przykładowo wyłuszcarnia w Jarocinie łuszczy blisko 200 ton rocznie. Po procesie wyłuszczenia nasion, masa szyszek ulega zmniejszeniu, ale zwiększa się ich objętość (Aniszewska 2013). Ilość pozostałych pustych szyszek może stanowić doskonałą bazę do produkcji paliw uszlachetnionych i zaspokoić zapotrzebowanie rynku lokalnego na energię cieplną.

Podstawową zaletą odpadów z wyłuszcarni, którymi są szyszki, trzpienie, puste nasiona i skrzydełka jest ich niska wilgotność, która nie przekracza 10% (np. drewno w stanie świeżym zawiera 30–70% wody). W takim przypadku zakłady produkujące pelety i brykiet nie będą musiały ponosić dodatkowych kosztów związanych z jej zmniejszaniem do poziomu umożliwiającego aglomerację ciśnieniową do postaci peletu (Gendek, Głowacki 2010; Głowacki, Gendek 2011), ale może być wymagane nawilżanie do ok. 15% przy brykietowaniu.

Wadą szyszek jest ich mała gęstość usypowa, co wpływa istotnie na koszty transportu, szczególnie na większe odległości. Te zagadnienia autorzy artykułu planują opisać w kolejnej publikacji.

Celem badań jest określenie ciepła spalania i wartości opałowej szyszek czterech podstawowych gatunków iglastych i określenie ich przydatności jako materiału do produkcji energii. Ciepło spalania lub określona na jego podstawie wartość opałowa są to dwa najważniejsze parametry potrzebne do oceny wykorzystania energetycznego odpadów z wyłuszcarni, w celu ich przyszłego stosowania jako składnika paliwa uszlachetnionego w postaci peletów i brykietów. Uzyskane wyniki zostaną porównane z wartościami opałowymi dla drewna odpowiednich gatunków.

2. Materiał i metody

Do badań wykorzystano odpady z wyłuszcarni z Nadleśnictwa Grotniki (RDLP Łódź) w postaci wyłuszczonej szyszek sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.), świerka pospolitego (*Picea abies* L.) i modrzewia europejskiego (*Larix decidua* Mill.) oraz łusek i trzpieni jodły pospolitej (*Abies alba* Mill.).

Pomiar ciepła spalania i obliczenie wartości opałowej wykonano metodą kalorymetryczną zgodnie z normą PN-ISO 1928:2002. Pozyskane szyszki i drewno zostały zmielone za pomocą młynka do cząstek poniżej 1 mm, a rozdrobniony materiał został poddany suszeniu w suszarce laboratoryjnej SLW 115 TOP przez 24 h w temperaturze $104 \pm 1^\circ\text{C}$ aż do uzyskania suchej masy.

Badanie polegało na całkowitym spalaniu próbek o masie 1 g w atmosferze tlenu pod ciśnieniem 2,8 MPa i wyznaczeniu przyrostu temperatury wody w naczyniu kalorymetrycznym. Spalanie odbywało się w bombie kalorymetrycznej umieszczonej w tym naczyniu i zanurzonej w wodzie o objętości 2,7 dm³ (kalorymetr KL-10). Do zapłonu próbki stosowano drut oporowy z kantalu.

Kalorymetr działa na zasadzie pomiaru charakterystycznych temperatur bilansu cieplnego układu: bomba kalorymetryczna ze spalonym paliwem i naczynie kalorymetryczne z wodą.

Praca kalorymetru odbywa się w 5 etapach:

0 – włączenie kalorymetru i ustabilizowanie temperatury wewnątrz kalorymetru;

1 – rejestracja temperatury T1 i odczytywanie 5 okresów pomiarowych;

2 – rejestracja temperatury T2 i zapalenie się próbki paliwa w bombie kalorymetrycznej (czas trwania – w minutach – do osiągnięcia temperatury maksymalnej);

3 – rejestracja temperatury maksymalnej T3 i odczytywanie kolejnych okresów pomiarowych;

4 – rejestracja temperatury T4, wykonanie obliczeń przez program wewnętrzny i zakończenie pracy.

Próbki analityczne o masie 1 g odmierzano z dokładnością do 0,001 g za pomocą wagi WSP 210S. Tak przygotowane próbki spalono w kalorymetrze KL-10. Dla każdego rodzaju materiału pomiar był wykonywany 5–6 razy. Podczas pomiarów za pomocą wilgotnościomierza Rotronik Hygro-Palm rejestrowano w pomieszczeniu temperaturę z dokładnością $\pm 0,1^\circ\text{C}$ i wilgotność z dokładnością $\pm 0,1\%$.

Użyty do badań kalorymetr wyznaczał wartość ciepła spalania Q_s badanej substancji w sposób automatyczny za pomocą programu wewnętrznego według zależności:

$$Q_s = K \cdot (T_3 - T_2 - k) \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (1)$$

gdzie:

K – stała kalorymetru, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,

T_2, T_3 – charakterystyczne temperatury bilansu cieplnego, K,

k – poprawka na wymianę ciepła kalorymetru z otoczeniem,

$$k = 0,5 \cdot [0,2 \cdot (T_2 - T_1) + 0,2 \cdot (T_4 - T_3)] + 0,2(n-1) \cdot (T_4 - T_3) \quad (2)$$

gdzie:

n – liczba minut w etapie nr 2 (do osiągnięcia temperatury maksymalnej),

T_1, T_4 – charakterystyczne temperatury bilansu cieplnego, K,

Wartość opałową Q_{op} obliczono na podstawie wzoru (PN-ISO 1928:2002):

$$Q_{op} = (Q_s - 206H) \cdot (1 - 0,01 \cdot W_w) - 23,0 \cdot W_w \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (3)$$

gdzie

W_w – wilgotność względna, %,

H – zawartość wodoru, %.

Zgodnie z informacjami zawartymi w literaturze przedmiotowej, dla różnych rodzajów biomasy zawartość wodoru (H) zawiera się w granicach od 5,5 do 7,0% (Skrifvars et al. 1988; Werther et al. 2000; Świeca 2007; Głodek 2010). Do obliczeń wartości opałowej drewna i szyszek procentowa zawartość wodoru przyjęta została na stałym poziomie podawanym dla drewna iglastego – 6,3%.

Obliczono wartości średnie, odchylenie standardowe, wykonano test t Studenta dla małej liczebności prób, porównano nim ciepło spalania i wartość opałową poszczególnych gatunków szyszek oraz drewna. Wykonane zostały również testy dopasowania do rozkładu normalnego. Analizy statystyczne wyników zostały przeprowadzone przy użyciu programu Statistica 10 (Stat-Soft 2011).

3. Wyniki

Ciepło spalania. Wyniki pomiarów, wartości średnie i odchylenie standardowe wartości ciepła spalania podano w tabeli 1. Najwyższe średnie ciepło spalania 21,16 MJ/kg zarejestrowano dla szyszek jodły, a najniższe 19,11 MJ/kg dla drewna modrzewiowego. Z kolei najniższe wartości ciepła spalania wśród szyszek miały szyszki sosnowe – 19,4 MJ/kg.

Ciepło spalania wszystkich gatunków charakteryzuje się rozkładem normalnym. Porównanie za pomocą testu t Studenta wyników uzyskanych dla szyszek i drewna w ramach tego samego gatunku wykazało, że w przypadku świerka, modrzewia i jodły ciepło spalania szyszek różni się istotnie od ciepła spalania drewna (tab. 2). W tych przypadkach średnia wartość ciepła spalania szyszek była większa. Największa różnica była w przypadku modrzewia – ciepło spalania szyszek przewyższało ciepło spalania drewna o 7,96% (tab. 2).

W przypadku sosny nie stwierdzono istotnej różnicy ciepła spalania szyszek i drewna. Ciepło spalania szyszek było mniejsze o 1,01% od ciepła spalania drewna.

Ciepło spalania szyszek poszczególnych gatunków (So, Św, Md i Jd) poddano ocenie stosując test F (analizy wariancji). Według niego występują istotne różnice pomiędzy ciepłem spalania szyszek sosny i jodły, a nie wykazano różnic między ciepłem spalania pozostałych gatunków.

Wartość opałowa. Na podstawie wyznaczonej wartości ciepła spalania, z zależności (3) obliczono wartość opałową szyszek i dla porównania – wartość opałową drewna – poszczególnych gatunków. Szczegółowe zestawienie wyników pomiarów, wartość średnią i odchylenie standardowe wartości opałowej suchej masy szyszek i drewna rozpatrywanych gatunków drzew podano w tabeli 1. Wartość opałowa zmienia się wraz ze zmianą wilgotności materiału (ryc. 1).

Przy wilgotności 0% (sucha masa) największą wartość opałową miały szyszki jodłowe. Przy wilgotności 20% wartość ta zmniejszyła się o 4,43 MJ/kg, tj. o 22,3%, a przy wilgotności 70% – o 15,51 MJ/kg w stosunku do poziomu wyjściowego (o 78,1%).

Najmniejszą wartość opałową przy wilgotności 0% miały szyszki sosnowe. Przy wilgotności 20% wartość ta zmniejszyła się o 4,08 MJ/kg, tj. o 22,5%, a przy wilgotności 70% nastąpił spadek w stosunku do poziomu początkowego o 14,29 MJ/kg (o 78,9%).

Wartość opałowa szyszek i drewna wszystkich gatunków charakteryzuje się rozkładem normalnym. Porównanie uzyskanych wyników z prób dla danego gatunku testem t Studenta wykazało, że w przypadku świerka, modrzewia i jodły wartość opałowa szyszek różni się istotnie od wartości opałowej drewna, natomiast w przypadku sosny różnic nie stwierdzono.

Tabela 1. Ciepło spalania i wartość opałowa suchej masy badanych próbek szyszek i drewna
 Table 1. The heat of combustion and calorific value of the dry weight of the cones and wood tested samples

Material Material		Nr próby Trial number	Ciepło spalania Heat of combustion			Wartość opałowa Calorific value		
			pomiary measurement	średnia average	odch. stand. std dev.	pomiary measurement	średnia average	odch. stand std dev.
MJ/kg								
Sosna zwyczajna Scots pine	szyszka cone	1	19,18	19,40	0,36	17,89	18,11	0,36
		2	19,00			17,70		
		3	19,29			17,99		
		4	19,69			18,39		
		5	19,86			18,56		
	drewno wood	1	19,37	19,61	0,45	18,07	18,32	0,45
		2	20,16			18,86		
		3	19,23			17,94		
		4	20,16			18,86		
		5	19,62			18,32		
		6	19,14			17,85		
Świerk pospolity Norway spruce	szyszka cone	1	20,303	20,55	0,47	19,01	19,25	0,47
		2	19,99			18,69		
		3	21,05			19,75		
		4	20,39			19,09		
		5	21,02			19,73		
	drewno wood	1	20,24	19,96	0,19	18,94	18,66	0,19
		2	19,92			18,62		
		3	19,99			18,69		
		4	19,69			18,40		
		5	19,95			18,65		
Modrzew europejski European larch	szyszka cone	1	20,59	20,58	0,28	19,29	19,28	0,28
		2	20,96			19,66		
		3	20,59			19,29		
		4	20,17			18,87		
		5	20,57			19,28		
	drewno wood	1	19,96	19,11	0,55	18,66	17,81	0,55
		2	19,06			17,76		
		3	18,97			17,68		
		4	19,10			17,80		
		5	18,44			17,14		
Jodla pospolita Silver fir	szyszka cone	1	21,42	21,16	0,34	20,12	19,86	0,34
		2	20,70			19,41		
		3	21,25			19,95		
		4	21,52			20,22		
		5	20,91			19,61		
	drewno wood	1	20,99	20,59	0,30	19,70	19,29	0,30
		2	20,73			19,43		
		3	20,43			19,13		
		4	20,68			19,38		
		5	20,11			18,81		
		6	20,59			19,29		

Wartość opałową suchej masy szyszek poszczególnych gatunków (So, Św, Md i Jd) porównano stosując test F (analizy wariancji). Wyniki testu potwierdziły, że różnice między wartością opałową szyszek badanych gatunków są istotne. Test porównań wielokrotnych po-

twierdził, że wartość opałowa szyszek sosny istotnie różni się od wartości opałowej szyszek jodły, ale nie wykazał różnic w przypadku pozostałych gatunków. Podobnie było w przypadku ciepła spalania szyszek.

Tabela 2. Test t porównania ciepła spalania szyszek i drewna dla prób niezależnych (różnice istotne dla $p < 0,05$) oraz test F ilorazu wariancjiTable 2. T -test comparison of the heat of combustion of cones and wood for independent samples (differences significant at $p < 0.05$) and the variance ratio F -test

Gatunek Species	Różnica ciepła spalania szyszek i drewna The difference of heat of combustion of cones and wood	Test t t -test		Test F F -test	
		t	p	F	p
Sosna zwyczajna Scots pine	-0,21	-0,83	0,43	1,61	0,67
Świerk pospolity Norway spruce	+0,59	2,61	0,03	5,94	0,11
Modrzew europejski European larch	+1,47	5,36	0,00	3,81	0,22
Jodła pospolita Silver fir	+0,57	2,97	0,02	1,32	0,75

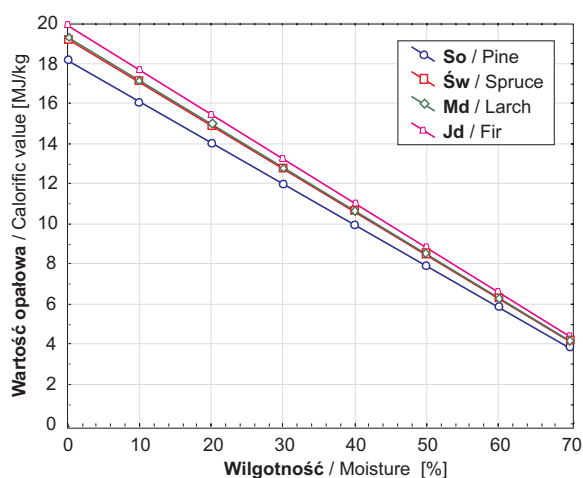
**Rycina 1. Zmiana wartości opałowej szyszek w zależności od wilgotności**

Figure 1. Variation of the cones calorific value depending on moisture

Porównując wartość opałową suchej masy szyszek i drewna w ramach tego samego gatunku, stwierdzono, że w przypadku świerka, modrzewia i jodły szyszki miały większą wartość opałową, natomiast w przypadku sosny o 1,59% mniejszą. Największa wartość opałowa szyszek w stosunku do wartości opałowej drewna była w przypadku modrzewia (większa o 5,36%).

4. Dyskusja

W literaturze podawane są wyniki badań ciepła spalania i wartości opałowej drewna, natomiast publikacji dotyczących szyszek poszczególnych gatunków autorzy nie znaleźli. Wyniki odnoszące się do szyszek porównano zatem z danymi literaturowymi dotyczącymi drewna. Wyjątek stanowi publikacja Fonta et al. (2009), w której podano wartość ciepła spalania dla szyszek sosny

(18,7 MJ/kg), niższą od otrzymanej w niniejszych badaniach.

Otrzymane średnie wartości ciepła spalania szyszek i drewna zawierają się w przedziale od 19,11 do 21,16 MJ/kg (tab. 1) i są w większości wyższe od wartości podawanych w literaturze dla ciepła spalania drewna tego samego gatunku. Ciepło spalania szyszek i drewna sosnowego ustalone w niniejszej pracy jest niższe – odpowiednio o 1,79 i 1,59 MJ/kg – od wartości ciepła spalania podawanej w literaturze m.in. przez Głodek (2010) oraz Font et al. (2009), wynoszącej 21,2 MJ/kg (dotyczy drewna sosny zwyczajnej). W przypadku świerka pospolitego ciepło spalania szyszek było wyższe od podawanego w literaturze o 0,05 MJ/kg, a ciepło spalania drewna niższe o 0,39 MJ/kg. W przypadku szyszek i drewna modrzewiowego różnice względem wartości zaczerpniętych z literatury (19,5 MJ/kg – dla drewna) wynoszą 1,08 i 0,39 MJ/kg. Z kolei wartość ciepła spalania szyszek i drewna jodły pospolitej uzyskane w niniejszej pracy są wyższe od cytowanej w literaturze dla drewna (Krzysik 1974; Björn i in. 2012; Wąsik, Michalec 2012), wynoszącej 20,15–20,4 MJ/kg, odpowiednio o 1,20 i 0,19 MJ/kg.

Średnia wartość opałowa suchej masy szyszek i drewna badanych gatunków zawiera się w przedziale 17,81–19,86 MJ/kg (tab. 3). Porównując otrzymane wyniki z literaturowymi można zauważyć, że wartość opałowa szyszek sosny i modrzewia znajduje się w granicach określonych dla drewna sosnowego (16–19 MJ/kg) i modrzewiowego (17,6–19,9 MJ/kg) (Monkielewicz, Pflaum 1967; Głodek 2010). Według danych literaturowych (Monkielewicz, Pflaum 1967; Rembowski 2007; Głodek 2010; Björn i in. 2012;) wartość opałowa drewna świerkowego wynosi 17,2–18,6 MJ/kg, a jodłowego 18,0 MJ/kg. Ustalona w niniejszej pracy wartość opałowa szyszek świerka jest zatem wyższa o 3,5–11,9%, a szyszek jodły – o 10,3%.

5. Wnioski

Najwyższą wartość ciepła spalania miały szyszki jodłowe – 21,16 MJ/kg, a najniższą szyszki sosnowe – 19,41 MJ/kg (mniejszą o 8,27%).

Najwyższą wartość opałową suchej masy miały szyszki jodłowe – 19,86 MJ/kg, a najniższą szyszki sosnowe – 18,11 MJ/kg (niższą o 8,81%).

Materiał odpadowy z wyluszcarni (puste szyszki) ma średnią wartość opałową wyższą niż drewno tego samego gatunku w przypadku świerka, modrzewia i jodły, natomiast niższą w przypadku sosny.

Porównanie wartości opałowej i ciepła spalania szyszek z drewnem pozwala stwierdzić, że szyszki są cennym materiałem energetycznym i mogą być wykorzystywane do bezpośredniego spalania lub do produkcji paliw uszlachetnionych stosowanych w energetyce lokalnej.

Ze względu na stosunkowo niewielką roczną produkcję szyszek w stosunku do innych materiałów (trociny, wióry itp.), z których produkowane są brykiety lub pelety, szyszki powinny stanowić dodatek do produktu wejściowego niższej jakości podwyższając wartość opałową produktu końcowego, jednak ich ilość procentową należy jeszcze dokładnie zbadać. W dalszych badaniach autorzy podejmą próby oceny wartości energetycznej i przydatności szyszek jako dodatku do trocin, wiórów czy biomasy w postaci igliwia, słomy lub roślin energetycznych przy produkcji brykiety i peletu.

Podziękowania

Badania zostały wykonane w ramach badań własnych Katedry Maszyn Rolniczych i Leśnych SGGW w Warszawie

Literatura

- Aniszewska M. 2012. Dynamika procesu pozyskania nasion w jedno- i dwuetapowych procesach łuszczenia szyszek sosny zwyczajnej *Pinus sylvestris* L. Warszawa, Wydawnictwo SGGW. ISBN 9788375833935.
- Aniszewska M. 2013. Zmiany wilgotności i temperatury wewnątrz szyszek sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) łuszczonych dwuetapowo. *Leśne Prace Badawcze*, 74 (3): 205–214.
- Björn G., Gebauer K., Barkowski R., Rosenthal M., Bues C.T. 2012. Calorific value of selected wood species and wood products. *European Journal of Wood and Wood Products*, 70: 755–757.
- Font R., Conesa J.A., Moltó J., Muñoz M. 2009. Kinetics of pyrolysis and combustion of pine needles and cones.

Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 85, 1–2, 276–286

- Gendek A., Głowacki Sz. 2010. Suszenie biomasy drzewnej jako etap w jej przygotowaniu do energetycznego wykorzystania. Ogólnopolska Konferencja Naukowa „Badania eksploatacyjne Maszyn Leśnych”, 28 września 2010, Warszawa: 77–84.
- Głodek E. 2010. Spalanie i współspalanie biomasy. Przewodnik. Opole, Instytut Ceramiki i Materiałów budowlanych. <http://www.oze.opole.pl/zalacznik.php?id=364&element=470> [7.12.2013].
- Głowacki Sz., Gendek A. 2011. Application of forced drying methods in preparation of forest chips for energy purposes. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – Agriculture*, 58: 29–34.
- Komorowicz M., Wróblewska H., Pawłowski J. 2009. Skład chemiczny i właściwości energetyczne biomasy z wybranych surowców odnawialnych. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, 40: 402–410
- Krzysik F. 1974. Nauka o drewnie. Warszawa, PWN.
- Monkielewicz L., Pflaum H. 1967. Użytkowanie Lasu. Warszawa, PWRiL.
- Norma PN-ISO1928:2002. Paliwa stałe. Oznaczanie ciepła spalania metodą spalania w bombie kalorymetrycznej i obliczanie wartości opałowej.
- Rembowski Ł. 2007. Wartość opałowa drewna. *Agroenergetyka.pl* <http://agroenergetyka.pl/?a=article&id=146> [6.12.2013].
- Skrifvars B., Backman R., Hupa M., Sfiris G., Abyhammar T., Lyngfelt A. 1998. Ash behavior in a CFB boiler during combustion of coal, peat or wood. *Fuel* 77, 1/2: 65–70.
- StatSoft, Inc. 2011. STATISTICA (data analysis software system), version 10. www.statsoft.com.
- Suszka B. 2000. Nowe technologie i techniki w nasiennictwie leśnym. Warszawa, Wyd. Bogucki.
- Świeca G. 2007. Zawartość wodoru w różnych rodzajach biomasy. Zabrze, Instytut Chemiczny Przeróbki Węgla. www.ichpw.zabrze.pl/cms.php?getFile=607 [10.12.2013].
- Wąsik R., Michalec K. 2012. Comparative analysis of the calorific value of giant fir timber (*Abies grandis* Lindl.) from various stands in southern Poland. *Acta Scientiarum Polonorum. Silvarum Colendarum Ratio et Industria Lignaria*, 11(3): 65–76.
- Werther J., Saenger M., Hartge E., Ogada T., Siagi Z. 2000. Combustion of agricultural residues. *Progress in Energy and Combustion Science* 26: 1–27.
- Zychowicz W., Gendek A. 2009. Efektywność stosowania samobieżnej rębarki z zasobnikiem do pozyskiwania zrębków na cele energetyczne. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 543: 417–425.

Wkład autorów

M.A. oraz A.G. – pomysł i zaprojektowanie badań, przeprowadzenie badań, analiza danych, przegląd literatury, przygotowanie tekstu publikacji.