



Processing of carpentry residue into solid biofuels: energetic and economic analysis

Wojciech CZEKAŁA¹, Sylwia BARTNIKOWSKA¹, Andrzej FISZER¹, Anna OLSZEWSKA², Jakub KANIEWSKI¹

¹ Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Wydział Rolnictwa i Bioinżynierii, Instytut Inżynierii Biosystemów, ul. Wojska Polskiego 50, e-mail: wojciech@up.poznan.pl

² Politechnika Poznańska, Wydział Elektryczny, ul. Piotrowo 3a, e-mail: annaolszewska1211@o2.pl

Abstract

Forest biomass is one of the basic alternative energy, whose share increases considerably year by year. In Poland, one of the highly developed sectors of the economy is the timber industry, which generates significant amounts of waste. This type of waste can be successfully re-used for energy purposes. In this article, economic and energetic analysis for processing sawdust pellet was done. Pellet can be use in carpentry or be sold.

Keywords: pellet, solid biofuels, biomass, carpentry residue

Streszczenie

Przetwarzanie odpadów z zakładu stolarskiego na biopaliwa stałe: analiza energetyczna i ekonomiczna dla wybranego zakładu

Biomasa leśna jest jednym z podstawowych alternatywnych nośników energii, których udział z roku na rok znacząco się zwiększa. W Polsce jednym z silnie rozwiniętych działów gospodarki jest przemysł drzewny, który generuje znaczące ilości odpadów. Z powodzeniem można je wtórnie wykorzystać na cele energetyczne. W niniejszym artykule dokonano analizy energetycznej oraz ekonomicznej przetwarzania trocin na pelet, będący nośnikiem energii do wykorzystania zarówno w zakładzie, jak i z przeznaczeniem na sprzedaż.

Słowa kluczowe: pelet, biopaliwa stałe, biomasa, odpady z zakładu stolarskiego

1. Wstęp

Biomasa, według wprowadzonej w życie Ustawy z dnia 20 lutego 2015r. o odnawialnych źródłach energii, definiowana jest jako „stałe lub ciekłe substancje pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, które ulegają biodegradacji, pochodzące z produktów, odpadów i pozostałości z produkcji rolnej i leśnej oraz przemysłu przetwarzającego ich produkty” [1]. Aktualnie energia, która jest pozyskiwana z biomasy, posiada największy procentowy udział wśród energii wytwarzanej z alternatywnych źródeł [2,3]. Jednym z najczęściej wykorzystywanych rodzajów biomasy jest biomasa drzewna, a więc materia organiczna składająca się przede wszystkim z ligniny, celulozy oraz hemicelulozy [4]. W wymienionych biopolimerach występują węgiel, tlen, wodór oraz związki mineralne. Drewno, dzięki wysokiej zawartości węgla (ok.50%), uznawane jest za bardzo atrakcyjny materiał opałowy [5]. Jego wartość opałowa kształtuje się na poziomie 10÷12 MJ·kg⁻¹, przy wilgotności na poziomie około 50% (bezpośrednio po ścięciu drzewa), i nawet do 18 MJ·kg⁻¹ po wysuszeniu i wilgotności do poziomu 15 - 20% [6].

Wartość opałowa determinowana jest w dużym stopniu gatunkiem drewna oraz innymi składowymi. Spośród nich największy wpływ ma gęstość oraz wilgotność drewna.

Pod względem wilgotności drewno dzieli się na:

- suche (do 20% wilgotności),

- powietrznosuche (do 25% wilgotności),
- półsuche (do 35% wilgotności),
- świeże (powyżej 35% wilgotności) [7].

Znajomość wilgotności drewna jest ważna, m.in. ze względu na jego wartość opałową. Z zasady im większa jest wilgotność, tym drewno wykazuje mniejszą wartość opałową. Najbardziej popularnym gatunkiem drewna opałowego jest buk o wartości opałowej 7913,67 MJ/mp. Z kolei dąb i jesion o wartości energetycznej rzędu 7553,96 MJ/mp nie są kwalifikowane jako gatunki opałowe, ze względu na problemy występujące przy rozszczepianiu, jak i wysoką zawartość taniny. Natomiast klon wykazujący nieco mniejszą wartość energetyczną (6834,53 MJ/mp) wykorzystywany jest na ogół w zakładach stolarskich. Z drzew liściastych najniższą wartość energetyczną wykazuje olcha (5395,68 MJ/mp). Natomiast gatunki drzew iglastych, tzw. miękkie, jak jodła, modrzew i sosna posiadają niższe wartości opałowe w granicach: od 5395,68 do 6115,11 MJ/mp. [8]. Jednocześnie drzewa iglaste ze względu na iskrzenie podczas palenia rzadziej są wykorzystywane do celów opałowych.

Właściwości takie jak: wilgotność, wartość energetyczna, gęstość czy zawartość popiołu są zależne w dużej mierze od rodzaju biomasy. Wysoką wilgotność (55-65%), wykazuje np. kora drzew, a jej wartość opałowa waha się w przedziale 18,5-20 MJ•kg⁻¹, jest więc podobna, jak u słomy żółtej i szarej. Jednak mała wilgotność wynosząca od 10 do 20% i niewielka gęstość rzędu od 90 do 165 kg•m⁻³ czynią słomę stosunkowo dobrym surowcem wykorzystanym do celów grzewczych. Pelety charakteryzujące się najmniejszą wilgotnością w zakresie od 7 do 12 % charakteryzują się wysoką wartością energetyczną, kształtującą się na poziomie od 16,5 do 17,5 MJ•kg⁻¹ (tab. 1.1.). Poza tym bardzo niska zawartość popiołu (od 0,4-1% s. m) przy spalaniu peletu jest dodatkowym atutem tego paliwa.

Tabela 1.1. Parametry wybranych rodzajów biomasy [9].

WŁAŚCIWOŚCI BIOMASY				
Rodzaj biomasy	Wilgotność [%]	Wartość energetyczna [MJ•kg⁻¹]	Gęstość [kg•m⁻³]	Zawartość popiołu [% s. m.]
Pelety	7-12	16,5-17,5	650-700	0,4-1
Zrębki	20-60	6-16	150-400	0,6-1,5
Słomażółta	10-20	14,3	90-165	4
Słomaszara	10-20	15,2	90-165	3
Drewnokawałkowe	20-30	11-22	380-640	0,6-1,5
Kora	55-65	18,5-20	250-350	1-3

Przy każdym procesie produkcyjnym i przetwórczym powstają odpady i produkty uboczne, które trzeba zgodnie z prawem zagospodarować [10]. Ponadto gospodarka nimi powinna być uzasadniona z ekonomicznego oraz ekologicznego punktu widzenia. Dlatego odpowiednim rozwiązaniem dla gospodarki pozostałościami z procesu przetwórstwa drewna wydaje się być produkcja biopaliw stałych. Ocenia się, że podczas obróbki drewna w zakładach stolarskich, aż 6% odpadu drzewnego stanowią trociny. W tartakach ilość tego materiału sięga nawet 10%. Przy zastosowaniu wysokiego ciśnienia oraz temperatury z trocin można uzyskać formowalne paliwo jakim jest pelet - granulaty powstały z odpadów drzewnych [11]. Pelet jest paliwem stabilnym, łatwym w transporcie, a jego magazynowanie nie stwarza większych problemów. Jednocześnie spalanie peletu nie wiąże się z emisją związków szkodliwych dla środowiska dzięki czemu może on zostać z powodzeniem wykorzystywany jako surowiec opałowy [12]. Inwestycja w modernizację systemu grzewczego w domu staje się nie tylko modna ale i opłacalna. Wynika to z faktu, że ceny kotłów na biomasę wraz z rosnącą popularnością materiałów przyjaznych środowisku maleją, a sama inwestycja zwraca się nawet po kilku latach. Wyprodukowane biopaliwo stałe można sprzedać bądź wykorzystać w procesie spalania na terenie zakładu produkcyjnego [13]. Wykorzystując odpady z własnego zakładu, zyskać można wydajne paliwo, a same koszty

ogrzewania w przeliczeniu na rok mogą zmaleć nawet o 60%. Drewno w wyniku spalania zachowuje neutralny bilans CO₂. Wynika to z faktu że roślina podczas wzrostu asymiluje daną ilość CO₂ i taką samą jego ilość uwalnia podczas procesu spalania. Dzięki temu pelet jest paliwem nie tylko korzystnym z ekonomicznego punktu widzenia, lecz także zapewnia pozytywny aspekt ekologiczny [14].

2. Cel i zakres prowadzonych badań

Celem badań było przeprowadzenie analizy energetycznej trocin pozyskanych jako odpad z wybranego zakładu stolarskiego oraz zbadanie opłacalności procesu produkcyjnego peletu.

Zakres pracy obejmował:

- pozyskanie surowca i zapoznanie się z funkcjonowaniem wybranego zakładu,
- wykonanie paliwa stałego oraz zbadanie jego właściwości,
- przeprowadzenie analizy ekonomicznej produkcji peletu dla wybranego zakładu.

3. Materiał i metodyka badań

Materiałem badawczym wykorzystanym do badań był surowiec w postaci trocin pochodzący z drzew liściastych, uzyskany jako pozostałość obróbki drewna z wytypowanego zakładu stolarskiego. W Laboratorium Ekotechnologii Instytutu Inżynierii Biosystemów oznaczono podstawowe parametry badanego materiału, czyli suchą masę metodą wagową zgodnie z normą PN-75/C-04616.01 [15] oraz zawartość suchej masy organicznej według normy PN-Z-15011-3 [16]. Zmierzono również ciepło spalania metodą kalorymetryczną zgodnie z normą PN-81/G-04513 [17] oraz obliczono wartość opałową, uwzględniając zawartość wodoru zgodnie z ogólnie podawanymi danymi literaturowymi dla danego gatunku drewna. Pomiar wykonano za pomocą kalorymetru KL- 12Mn na Uniwersytecie Przyrodniczym w Poznaniu. Polegał on na całkowitym spalaniu próbki paliwa w atmosferze tlenu pod ciśnieniem 3 barów w tzw. bombie kalorymetrycznej, zanurzonej w wodzie o pojemności 2,7 dm³ w naczyniu kalorymetrycznym oraz na wyznaczeniu przyrostu temperatury tej wody (pojemność cieplna kalorymetru wynosiła 13 122 J/g). Badania ciepła spalania przeprowadzono w trzech powtórzeniach zgodnie z normą N-81/G-04513 [17].

4. Omówienie wyników i dyskusja

4.1 Parametry badanego materiału

Masa substratu, po usunięciu z niego wody i substancji lotnych, wyniosła 99,71% świeżej masy trocin, a masa organiczna w suchej masie kształtowała się na poziomie 90,80% suchej masy próbki.

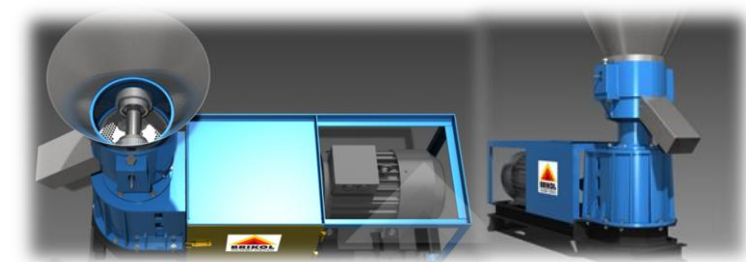
Z energetycznego punktu widzenia bardzo ważnym parametrem jest ciepło spalania, a więc ilość ciepła, która wydzieli się podczas całkowitego spalania jednostki masy paliwa w atmosferze tlenu, przy założeniu, że końcowymi produktami są tlen, azot, dwutlenek węgla, dwutlenek siarki, woda w stanie ciekłym oraz popiół (substraty wyjściowe oraz produkty spalania znajdują się w warunkach standardowych). Po uwzględnieniu ciepła spalania oraz zawartości wodoru ok. 6 % przyjętej zgodnie z danymi literaturowymi [18, 19] dokonano obliczenia wartości opałowej (tabela 4.1.).

Tabela 4.1. Ciepło spalania oraz wartość opałowa trocin [opracowanie własne]

Substrat	Ciepło spalania [MJ•kg ⁻¹]	Wartość opałowa [MJ•kg ⁻¹]
trociny	20,25	18,80

4.2 Analiza ekonomiczna

Na jednostkową cenę produkcji peletu składa się szereg cen jednostkowych. W analizie ekonomicznej produkcji biopaliwa znaczącą pozycję kosztów stanowi zazwyczaj zakup surowca. W przeprowadzonej analizie, surowiec pozyskuje się za darmo, jako pozostałość po procesie. Kolejne koszty takie jak: transport, składowanie, zbieranie czy dodatki do surowca – w analizowanym przypadku również są zerowe. Główne opłaty związane są z kosztami energii elektrycznej, amortyzacją maszyny, remontami i konserwacją maszyn oraz wynagrodzeniem dla pracowników. W celu obiektywnego przedstawienia kalkulacji koszty podano w przeliczeniu na jeden Mg wyprodukowanego substratu. Analizując bilans i właściwości surowca powstającego w zakładzie do celów formowania biopaliwa wybrano pececiarkę SJ25 dostępną w katalogu firmy BRIKOL (rys. 4.1.). Maszyna ta charakteryzuje się mocą 15 kW oraz wydajnością na poziomie 180 kg/h, a jej cena wynosi 25 830zł.



Rys. 4.1. Pełeciarka SJ25 [20]

Koszty energii elektrycznej

Na koszty energii elektrycznej ma wpływ kilka składowych. W badaniach została przyjęta wydajność maszyny na poziomie 180 kg/h. Kolejne składowe to ilość godzin potrzebnych do wyprodukowania 1 Mg peletu, jak również ilość poboru energii przez maszynę [kWh]. Cenę energii przyjęto na podstawie ogólnodostępnego cennika sieci ENEA SA - w tym wypadku wynosiła ona 0,54 zł za 1 kWh. Po dokonaniu odpowiednich obliczeń otrzymano całkowity ponoszony koszt energii elektrycznej w przeliczeniu na 1 Mg, a uzyskane wyniki zamieszczono w tabeli 4.2.

Tabela 4.2. Koszty energii elektrycznej [opracowanie własne]

średnia wydajność maszyny kg/h	Ilość godzin potrzebna do wyprodukowania 1 Mg	pobór energii przez maszynę / kWh	Cena zł/kWh	koszty energii elektrycznej [zł/Mg]
180	5,56	16,67	0,54	50,04

Wynagrodzenie dla pracowników

Największą pozycję wśród kosztów stanowi na ogół wynagrodzenie pracowników. Do obliczeń przyjęto założenie, że do wyprodukowania 1 Mg peletu, potrzeba 6 h a stawka godzinowa wynosi 10 zł brutto. Tym samym koszty związane z wynagrodzeniem pracownika kształtują się na poziomie 60 zł/Mg peletów.

Koszty amortyzacji maszyny

Obliczając koszty amortyzacyjne przyjęto okres pracy maszyny jako 10 lat. Uwzględniając z kolei całkowity koszt zakupu nowej maszyny oraz ilość trocin wyprodukowanych w ciągu roku, obliczono koszt amortyzacji, co przedstawiono w tab. 4.3.

Tabela 4.3. Koszty amortyzacji maszyny

Cena całkowita maszyny [zł]	25 830
Czas pracy maszyny [lata]	10
Cena maszyny na rok [zł]	2583
Ilość trocin wyprodukowanych na rok [Mg]	76,92
Koszt amortyzacji [zł/Mg]	33,58

Koszty remontowe i konserwacji maszyn

Zgodnie z przyjętymi założeniami, koszty remontowe oraz konserwacji maszyny stanowią 30% kosztów związanych z amortyzacją peletarki:

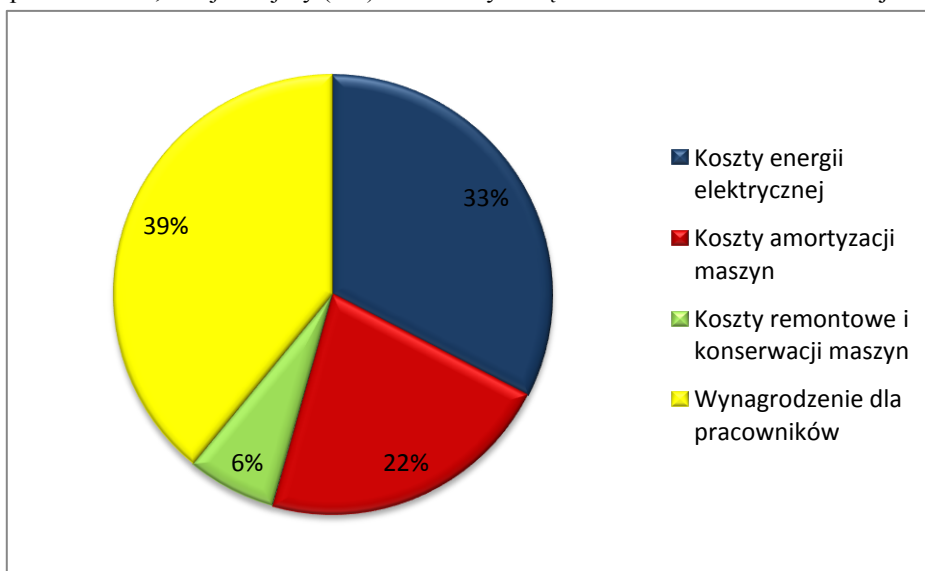
$$33,58zł \times 0,3 = 10,07zł$$

Z przeprowadzonej analizy wynika, że całkowity koszt produkcji 1 Mg peletu wynosił 153,68zł. (tabela 4.4.). Z danych wynika, że największe koszty związane są z wynagrodzeniem pracowników i wynoszą one 60zł na Mg peletu (tabela 4.4.). Kolejną dużą pozycję kosztów 50,04 zł stanowi energia elektryczna.

Tabela 4.4. Koszty jednostkowe produkcji peletu z trocin

	Koszty jednostkowe produkcji peletu	zł•Mg ⁻¹
1.	Koszty zakupu surowca	0
2.	Koszty zebrania surowca	0
3.	Koszty rozdrabniania	0
4.	Koszty transportu	0
5.	Koszty składowania	0
6.	Koszty energii elektrycznej	50,04
7.	Koszty amortyzacji maszyn	33,58
8.	Koszty remontowe i konserwacji maszyn	10,07
9.	Koszt zebrania surowca	0
10.	Koszty dodatków do surowca	0
11.	Wynagrodzenie dla pracowników	60,00
	Razem koszty produkcji 1 Mg	153,68

Strukturę kosztów w ujęciu procentowym przedstawiono graficznie na rysunku 4.2. Wynika z niego, że największy udział w kosztach produkcji peletów z trocin, wynoszący 33% kosztów stanowiło wynagrodzenie dla pracowników, a najmniejszy (6%) – to koszty związane z remontami i konserwacjami maszyn.



Rys.4.2. Procentowy udział kosztów produkcji peletów z trocin

W przeprowadzonym doświadczeniu proces peletowania trocin przebiegł bez jakichkolwiek problemów technicznych, a istotny wpływ na zachowanie ciągłości peletowania miały takie czynniki, jak jednorodność badanego surowca oraz jego wstępne, dokładne rozdrobnienie i struktura.

Pelet w porównaniu z innymi rodzajami paliwa jest atrakcyjnym surowcem. Charakteryzuje się wyższą energetycznością niż drewno opałowe czy słoma, a kaloryczność samych trocin jest zbliżona do słabej jakości węgla kamiennego czy dobrej jakości węgla brunatnego [21]. Rozpatrując wartość opałową w ogóle nadmienić należy jej ścisłą korelację z zawartością popiołu. Drewno suche, zawierające stosunkowo małą ilość popiołu, odznaczając się kalorycznością ok. $18 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, jednak przy zwiększeniu zawartości popiołu wartość opałowa spada o $0,2 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ z każdym 1% zawartości popiołu [22]. Niska zawartość popiołu w badanych trocinach przyczynia się jednocześnie do mniejszych emisji szkodliwych pyłów oraz metali ciężkich, głównie kadmu, ołowiu, rtęci i arsenu. Ponadto wskazuje to na całkowite spalanie surowca, co ma przełożenie na obniżenie kosztów produkcji energii (tab. 4.5.). Oznacza to, że trociny stanowią zdecydowanie tańszy materiał opałowy aniżeli tradycyjne nośniki energii. Wynika to z samego zakupu surowca, który w przypadku trocin stanowi odpad z sektora meblarskiego czy leśnego i jest można go pozyskać za niższą cenę niż ma to miejsce w przypadku węgla.

Tabela 4.5. Wartość energetyczna wybranych paliw [23]

Paliwo	Wartość opałowa $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	Wilgotność [%]	Ilość popiołu [%]	Zawartość siarki [%]
Brykiet, pellet	16-20	4,3-10	0,5-3	0,03-0,08
Drewno opałowe	13,4-13,8	20-25	3,2-4,5	0,03-0,08
Węgiel kamienny	17-32	3-7	10-25	0,7-1,2
Koks	27-29,5	1-5	10-11	0,65-0,8
Słoma	12-14,9	18-22	6	0,16
Olej opałowy	40-42	0,01	0,005	0,2-1,0

Uzyskana wartość opałowa peletu jest zbliżona do wartości pozyskiwanej z węgla kamiennego gorszej jakości ($19-22 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$). Cena węgla jest zależna od jego kaloryczności, jak również województwa, w którym jest sprzedawane. Przyjmując w analizie ekonomicznej dwie składowe, tzn. cenę tego typu węgla na poziomie 600 zł/Mg oraz koszt 1 Mg peletu rzędu 150 zł , uzyskano różnicę na poziomie 450 zł/t na korzyść biopaliwa. Zakładając, że sezon grzewczy trwa 6 miesięcy, wymagane zapotrzebowanie na paliwo dla potrzeb własnych zakładu można uzyskać w przeciągu tego samego czasu. W pozostałe miesiące można sprzedawać wytworzony pelet. Korzyści finansowe z tego tytułu mogą być również zadowalające ponieważ 1 Mg peletu z trocin można sprzedać nawet za 800 zł .

5. Podsumowanie i wnioski

Wybrany zakład stolarski, przetwarzający $106,88 \text{ Mg}$ drewna miesięcznie, produkuje około $6,41 \text{ Mg}$ pozostałości drzewnych w postaci trocin. Przy założeniu, że zakład pracuje 22 dni w miesiącu, dzienna produkcja trocin wynosi 291 kg . Z tego względu dla zakładu opłacalny jest zakup peletu, nawet przy tak stosunkowo niewielkiej ilości surowca do przetworzenia. Tym bardziej, że przy produkcji biopaliwa stałego w zakładzie własnym pominąć można koszty zakupu surowca, koszty transportu czy koszty składowania, co w znaczący sposób wpływa pozytywnie na bilans ekonomiczny przedsięwzięcia. Składowe, które biorą udział w analizie, to w zasadzie tylko koszty energii elektrycznej, amortyzacji maszyn, remontowe i konserwacyjne oraz wynagrodzenie dla pracowników.

Dla przedstawionej analizy dotyczącej konwencjonalnego paliwa, korzyści ekonomiczne mogą sięgnąć nawet $450 \text{ zł}\cdot\text{Mg}^{-1}$. Wyprodukowany pelet, charakteryzował się kalorycznością na porównywalnym poziomie z węglem, a przeprowadzony bilans potwierdził korzystną z ekonomicznego punktu widzenia inwestycję w produkcję peletu z odpadu drzewnego, mając regularny dostęp do darmowego surowca.

Literatura

1. Ustawa o odnawialnych źródłach energii z dn. 20 lutego 2015r.
2. http://ematura.edu.pl/raporty/EM_II_G_12/co_mwi_wykresy_o_wykorzystaniu_odnawialnych_rde_energii.html dostęp: 23.06.2015r.
3. Król D. J., Borsukiewicz Gozdur A. Energia z odpadowej biomasy tartacznej i rolniczej. Archives of Waste Management and Environmental Protection 2014, vol. 16 issue 3, 87-94.

4. Kajda-Szcześniak M. D. Ocena podstawowych właściwości odpadów drzewnych i drewnopochodnych Archives of Waste Management and Environmental Protection 2013, vol. 15 issue 1, 1-10.
5. Wasielewski R., Hrabak J. Wpływ zawartości chloru, siarki i alkaliów na energetyczne wykorzystanie biomasy odpadowej. Archives of Waste Management and Environmental Protection 2015, vol. 17 issue 1, 1-8.
6. Lewandowski W, 2006: Proekologiczne odnawialne źródła energii, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa , 332-333.
7. <http://solidnydom.pl/rodzaje-wilgotnosci-drewna.html> dostęp: 23.06.2015r.
8. <http://www.stihl.pl/gatunki-drewna.aspx> dostęp:23.06.2015r.
9. <http://www.instalacjebudowlane.pl/5173-33-68-biomasa--cena-wartosc-opalowarodzaje.html>dostęp:23.06.2015r.
10. Czekala W. Stan aktualny i tendencje rozwoju w gospodarce nawozami naturalnymi w Polsce. Archives of Waste Management and Environmental Protection 2015, vol. 17 issue 1.
11. Holubčík M., Jachniak E., Jandačka J. Utilization of materials from agriculture to produce pellets. Archives of Waste Management and Environmental Protection 2015, vol. 17 issue 2, 1-10.
12. Kołodziej B, Matyka M., 2012: Odnawialne źródła energii Rolnicze surowce energetyczne, Wydawnictwo PWRiL, Poznań, 176
13. Sulovcová K., Jandačka J. 2015. Reduction of particulate matter concentration in stove with biomass combustion. Archives of Waste Management and Environmental Protection 2015, vol. 17 issue 2, 105-112.
14. Winiarska D., 2012: Wykorzystanie OZE biomasa w gminie Krośniewice, Globenergia, 40.
15. PN-75/C-04616.01 PN-75/C – 04616.01. Woda i ścieki. Badania specjalne osadów. Oznaczanie zawartości wody, suchej masy substancji organicznych i mineralnych w osadach ściekowych. Warszawa. PKNMiJ.
16. PN-Z-15011-3 Kompost z odpadów komunalnych -- Oznaczanie: pH, zawartości substancji organicznej, węgla organicznego, azotu, fosforu i potasu
17. PN-81/G-04513 Paliwa stałe. Oznaczanie ciepła spalania i obliczanie wartości opałowej.
18. www.oze.opole.pl/zalacznik.php?id=364&element=470 dostęp:23.06.2015r.
19. Walendziewski J., Surma A., Kułazyński M., Wierzbicki Z., Określenie potencjałów odpadów i ich rodzajów do produkcji stałych paliw alternatywnych, prezentacja multimedialna w ramach Seminarium promocyjnego sieci naukowo- gospodarczej „Energia”, Wrocław, 2006.
20. <http://www.brikol.pl/produkt/1/peleciarki-peleciarka-sj25-180kg-h-15kw> dostęp:23.06.2015r.
21. Jenkins B. M., Baxter L. L., Miles Jr. T. R, Miles T. R.: Combustion Properties of Biomass; Fuel Processing Technology, 54 (1998) 17-46.
22. McIlveen-Wright D. R., Huang Y., Rezvani S., Wang Y.: A technical and environmental analysis of co-combustion of coal and biomass in fluidized bed technologies; Fuel, vol.86(2007), 2032-2042.
23. <http://brykietkominkowy.pl/wartosc-energetyczna-brykietu-i-peletu.php> dostęp:23.06.2015r.

