

## ENERGETYCZNA I EKOLOGICZNA OCENA PROCESU POZYSKIWANIA CIEPŁA PODCZAS SPALANIA LIŚCI ZBIERANYCH NA TERENACH MIEJSKICH

Małgorzata Dziewanowska

*Katedra Technicznego Zabezpieczenia Okrętów,  
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie*

Tomasz Dobek

*Zakład Budowy i Użytkowania Urządzeń Technicznych,  
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie*

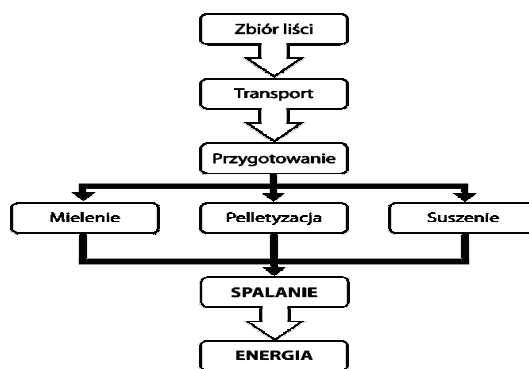
**Streszczenie.** Obok wykorzystywanych rodzajów biomasy, istnieje wiele innych materiałów mogących służyć do celów energetycznych. Jednym z nich mogą być liście opadające z drzew. Niestosowaną dotąd metodą zagospodarowania liści jest ich spalanie. Celem głównym publikacji było opracowanie i ocena technologii zbioru i przetwarzania liści drzew zbieranych na terenach miejskich. Ocena przeprowadzona była w aspekcie ekonomicznym, energetycznym i ekologicznym. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że metoda zagospodarowania liści zbieranych na terenach miejskich poprzez spalanie, może być uzupełnieniem do stosowanych aktualnie metod tzn. składowania i kompostowania. Liście drzew liściastych ze względu na wartość opałową mogą być źródłem energii cieplnej pozyskiwanej z biomasy.

**Słowa kluczowe:** biomasa, liście drzew, efektywność ekonomiczna, spalanie liści, wartość opałowa

### Wstęp

Działalność badaczy w ostatnim czasie, dotycząca poszukiwania coraz to nowych źródeł energii, skupiła się na dwóch podstawowych cechach materiałów energetycznych: odnawialności i bezpieczeństwie ekologicznym. Światowy potencjał energetyczny biomasy określany jest na  $3 \cdot 10^{15}$  MJ-rok<sup>-1</sup>. W Polsce istnieją możliwości wykorzystania biomasy pochodzącej ze: słomy zbożowej w ilości 25 mln ton (równowartość 12,5 mln ton węgla), drewna w ilości 4 mln ton (głównie odpadowego), suchej masy osadów ściekowych w ilości 2,5 mln ton. W sumie możemy wykorzystać około 30 mln ton biomasy rocznie, co jest energetycznie równoważne 15-20 mln ton węgla. Obok wymienionych wyżej rodzajów biomasy, istnieje wiele innych materiałów mogących służyć do celów energetycznych. Jednym z nich mogą być liście opadające z drzew, które stanowią poważny problem w warunkach aglomeracji miejskich. W większości materiał ten po zebraniu jest wywożony na wysypiska odpadów i składowany lub kompostowany. Na terenie Szczecina występują duże skupiska zieleni. Ogólna powierzchnia terenów zieleni miejskiej wynosi 1510,57 ha.

Z terenów tych corocznie w okresie jesiennym wywozi się ogromne ilości biomasy w postaci liści ( $6,8 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$ ,  $10271,88 \text{ t}\cdot\text{rok}^{-1}$  z całego miasta). Trafiają one na składowiska odpadów. Niestosowaną dotąd metodą zagospodarowania liści jest ich spalanie [Dziewanowska, Dobek 2006b]. Celem badań było opracowanie i ocena technologii zbioru i przetwarzania liści drzew zbieranych na terenach miejskich. Ocena przeprowadzona była w aspekcie ekonomicznym, energetycznym oraz ekologicznym. Zakres badań obejmował analizę kosztów procesu zbioru i przetwarzania liści na pellety, określenie ich wartości opałowej i ustalenie ilości pozyskanej energii w wyniku spalania liści różnych gatunków drzew oraz oznaczenie ilości wydzielanych produktów toksycznych dla środowiska podczas tego procesu [Dziewanowska, Dobek 2006ab]. Na rysunku 1 przedstawiono proponowaną nową metodę zagospodarowania liści poprzez ich spalanie.



Rys. 1. Proponowana metoda zagospodarowania liści

Fig. 1. Proposed method for processing of leaves

## Materiał i metody

Przeprowadzona analiza obejmowała zbilansowanie masy liści z terenów miejskich, określenie technologii ich zagospodarowania, oraz analizę energetyczną [Wójcicki 2000] i analizę ekonomiczną [Muzalewski 2005] tego procesu. Badania i obliczenia opracowanych technologii dotyczących zbierania, transportu, przetwarzania i spalania liści zrealizowano zgodnie z obowiązującymi normami. Ocenie poddano cztery technologie różniące się stopniem mechanizacji.

### Technologia I – zmechanizowana

Założeniem pierwszej technologii było zmechanizowanie całego procesu zbioru i transportu liści, a ograniczenie zbioru ręcznego. Maszyny wykorzystane w tej technologii to:

- zamiatarka chodnikowa samobieźna firmy Schmidt,
- zamiatarka uliczna samobieźna - nadwozie Faun, typ nadwozia City-Jet, podwozie Mercedes Benz 1623,
- śmieciarka - nadwozie Faun, typ nadwozia Variopress, podwozie Mercedes Benz 2528.

### **Technologia II – częściowo zmechanizowana**

Założeniem drugiej technologii było częściowe zmechanizowanie procesu zbioru i transportu liści, zakładające większe zaangażowanie pojedynczych, małych urządzeń obsługiwanych przez ludzi. Maszyny wykorzystane w tej technologii to:

- dmuchawa mechaniczna do liści – moc 2,5 KM – model Husqvarna 356BTx,
- odkurzacz spalinowy do liści – moc 5 KM, pojemność pojemnika 200 l - model Hurricane Concord 750B,
- zamiatarka do ciągnika Star – typ Broddson,
- ciągnik zamiatarki – typ Star 20 wywrotka,
- śmieciarka – odbiór odpadów w kontenerach- nadwozie Atlas, Mercedes Benz 1823.

### **Technologia III – zbioru ręcznego**

Założeniem trzeciej technologii było jak najmniejsze zaangażowanie urządzeń mechanicznych do zbioru i transportu liści, na rzecz ręcznej pracy ludzi. Maszyny i narzędzia wykorzystane w tej technologii to:

- grabie, łopaty, widły i taczki,
- śmieciarka – odbiór odpadów w kontenerach- nadwozie Atlas, Mercedes Benz 1823.

### **Technologia IV - kombinowana**

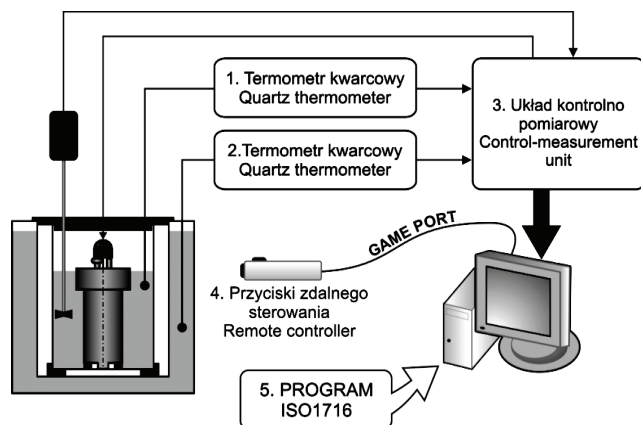
Założeniem czwartej technologii jest przystosowanie jej do realnych warunków miejsc, w których często ze względu na specyfikę terenu trzeba stosować łącznie wszystkie powyżej opisane technologie zbioru, transportu i przetwarzania liści. W pracy przyjęto traktować ją jako technologię kombinowaną. Maszyny i narzędzia wykorzystane w tej technologii to:

- grabie, łopaty, widły i taczki,
- dmuchawa mechaniczna do liści – moc 2,5 KM – model Husqvarna 356BTx,
- odkurzacz spalinowy do liści – moc 5 KM, pojemność pojemnika 200 l - model Hurricane Concord 750B,
- zamiatarka chodnikowa samobieźna firmy Schmidt,
- zamiatarka do ciągnika Star – typ Broddson,
- zamiatarka uliczna samobieźna - nadwozie Faun, typ nadwozia City-Jet, podwozie Mercedes Benz 1623,
- ciągnik zamiatarki - typ Star 20 wywrotka,
- śmieciarka - nadwozie Faun, typ nadwozia Variopress, podwozie Mercedes Benz 2528,
- śmieciarka – odbiór odpadów w kontenerach- nadwozie Atlas, Mercedes Benz 1823.

### **Technologia przetwarzania liści na cele energetyczne**

Przetwarzanie liści obejmowało tworzenie pellet na linii produkcyjnej firmy California Pellet Manufacture w zakładach na terenie województwa zachodniopomorskiego.

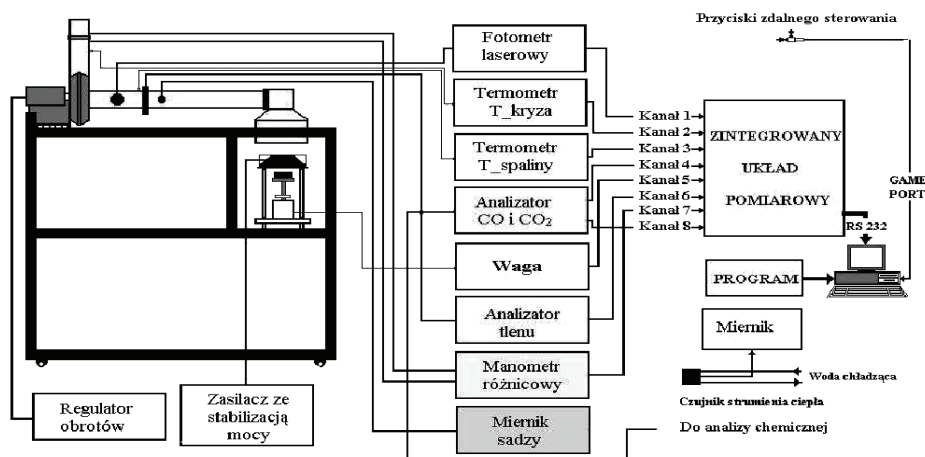
Przy określaniu wartości energetycznej liści zastosowano metodę pomiarową polegającą na wyznaczaniu wartości opałowej materiałów wg PN-EN ISO 1716:2004. Stanowisko to zostało zbudowane (rys.2) w Katedrze Technicznego Zabezpieczenia Okrętów na Politechnice Szczecińskiej [Sychta, Sychta 2007b].



Rys. 2. Schemat stanowiska do wyznaczenia wartości opałowej wg PN-EN ISO 1716:2004 [Sychta, Sychta 2007b]

Fig. 2. Diagram showing setup for calorific value determination, according to PN-EN ISO

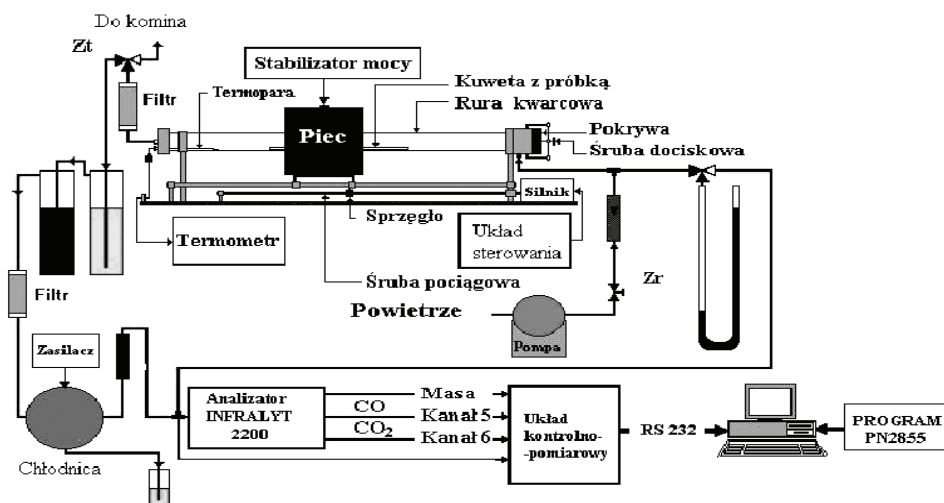
Natomiast przy określeniu ilości produktów toksycznych spalanej biomasy, zastosowano metody pomiarowe polegające na określeniu poziomu CO i CO<sub>2</sub> za pomocą kalorymetru stożkowego wg ISO 5660-1 oraz badaniu wydzielania toksycznych produktów rozkładu i spalania materiałów (CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>) wg PN-B-02855:1988. Na rys. 3 przedstawiono stanowisko do badań za pomocą kalorymetru stożkowego wg ISO 5660-1, które zostało zbudowane w Katedrze Technicznego Zabezpieczenia Okrętów na Politechnice Szczecińskiej [Hagel, Zakrzewski 1984].



Rys. 3. Schemat stanowiska do badań za pomocą kalorymetru stożkowego wg ISO 5660-1 [Hagel, Zakrzewski 1984]

Fig. 3. Diagram showing setup for tests with conical calorimeter, according to ISO

Rys. 4 przedstawia budowę stanowiska do badania wydzielania toksycznych produktów rozkładu i spalania materiałów wg PN-B-02855:1988 zbudowanego w Katedrze Technicznego Zabezpieczenia Okrętów na Politechnice Szczecińskiej [Sychta Z., Sychta K. 2007a].



Rys. 4. Schemat stanowiska do badania wydzielania toksycznych produktów rozkładu i spalania materiałów wg PN-B-02855:1988 [Sychta Z., Sychta K. 2007a]

Fig. 4. Diagram showing setup for testing emission of toxic decomposition and combustion products from materials, according to PN

## Wyniki i dyskusja

Analiza energetyczna procesu spalania liści polegała na określeniu wartości opałowej. Uzyskane wartości opałowe wyznaczone wg PN EN ISO 1716:2004 liści w formie pellet, mieszczą się w przedziale od  $10,7 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$  (klon srebrzysty) do  $17,5 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$  (dęby), a liści rozdrobnionych w przedziale od  $12 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$  (lipa krymska) do  $18,4 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$  (kasztanowce). W tabeli 1 przedstawione jest porównanie wartości opałowej wybranych liści różnych gatunków drzew.

Analizując koszty technologii zbioru i przetwarzania liści oraz efektywność ekonomiczną technologii można stwierdzić, że najwyższe całkowite koszty produkcji pellet wystąpiły w przypadku technologii IV (kombinowanej) i wyniosły  $1041791 \text{ zł}\cdot\text{rok}^{-1}$ , a najniższe w technologii III (zbioru ręcznego) –  $284818 \text{ zł}\cdot\text{rok}^{-1}$ . Największym procentowym udziałem charakteryzowały się koszty energii potrzebnej do przetwarzania liści na pellety i wyniosły one 69,23 %, a najniższy procentowy udział kosztów związany był z nakładami pracy ludzkiej i wyniósł on 6,59 %. Koszt produkcji pellet na linii produkcyjnej w odniesieniu do jednej tony pellet wyniósł w skali roku 815353 zł. Efektywność ekonomiczna badanych wariantów technologii produkcji pellet z liści wahała się od 1,17 (technologia IV kombinowana) do 1,97 (technologia III zbioru ręcznego). Z przeprowadzonej analizy

kosztów badanych technologii oraz uzyskanych wartości produkcji wynika, że wszystkie technologie w produkcji pellet z liści są dochodowe [Dziewanowska 2007]. Tabela 2 przedstawia średnie koszty zbioru i przetworzenia liści oraz efektywność ekonomiczną wg badanych technologii.

Tabela 1. Porównanie wartości opałowej wybranych liści różnych gatunków drzew (wartości graniczne) w formie rozdrobnionej i pellet

Table 1. Comparison of calorific value for selected leaves of various tree species (boundary values), in shredded and pelletized form

Lp	Rodzaj materiału	Wartość opałowa [MJ·t <sup>-1</sup> ]	
		Forma rozdrobniona	Forma pellet
1	Liście dębu czerwonego	17600	17500
2	Liście kasztanowca białego	18400	15700
3	Liście grabu pospolitego	12800	11800
4	Liście klonu srebrzystego	13000	10700

*Źródło: opracowanie własne autorów*

Tabela 2. Średnie koszty zbioru i przetworzenia liści oraz efektywność ekonomiczna badanych technologii

Table 2. Average costs of leaf picking and processing and economic efficiency of the examined technologies

Wyszczególnienie	Jednostka	Technologia I	Technologia II	Technologia III	Technologia IV
Koszt zbioru	zł·rok <sup>-1</sup>	645269	319723	284818	1041791
Koszt przetworzenia	zł·rok <sup>-1</sup>	815353	815353	815353	815353
Przychód	zł·rok <sup>-1</sup>	2167668	2167668	2167668	2167668
Efektywność ekonomiczna	–	1,48	1,91	1,97	1,17
Koszt produkcji pellet	zł·t <sup>-1</sup>	276	215	208	351

*Źródło: opracowanie własne autorów*

Natomiast analiza ekologiczna procesu spalania liści polegała na określeniu poziomu stężenia tlenku węgla podczas spalania liści różnych gatunków drzew w funkcji czasu. Uzyskane wartości zawierały się w przedziale od 35 ppm – topola biała do 160 ppm w przypadku klonu pospolitego. Poziom stężenia dwutlenku węgla podczas spalania liści różnych gatunków drzew w funkcji czasu, utrzymuje się na podobnym poziomie około 0,8%. Poziom emisji właściwej CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> i SO<sub>2</sub> wyznaczonej podczas spalania selektywnie wybranych rodzajów liści: dębu czerwonego, kasztanowca białego, wierzby płaczącej, połączonych 12 rodzajów liści, w temperaturach: 450°C, 550°C i 750°C był najniższy dla temperatury 750°C [Dziewanowska, Dobek 2006a].

## Wnioski

1. Efektywność ekonomiczna badanych technologii wahała się od 1,17 do 1,97. Najwyższą efektywność ekonomiczną uzyskano w przypadku technologii III (zbiór ręczny) 1,97, a najniższą w technologii IV (kombinowanej) – 1,17.
2. Liście, jako biomasa roślinna, których wartość opałowa mieści się w przedziale od  $12 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$  do  $18 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ , po spaleniu pozostawiają po sobie niewielkie ilości popiołu i zawierają niewielkie ilości toksycznych związków. Mogą być zatem zastosowane do nowych i istniejących już technologii spalania biomasy, jako źródło energii cieplnej, oraz być doskonałym materiałem w obecnie stosowanych technologiach wykorzystujących materiały energetyczne np. współspalania węgla i biomasy.
3. Wartość opałowa różnych źródeł energii pochodzenia konwencjonalnego i niekonwencjonalnego wskazuje na to, że liście jako materiał energetyczny mogą z tymi źródłami konkurować. Wartość opałowa liści w formie pellet mieści się w przedziale od  $10,7 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$  do  $17,5 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ .
4. Przeprowadzone różnymi metodami badania składu spalin powstałych podczas spalania liści różnych gatunków drzew udowodniły, że w większości wartość wydzielonych toksycznych związków nie przekraczała poziomu stężeń granicznych. Najmniejsza ilość toksycznych związków wydzielona została podczas spalania liści w wysokich temperaturach ( $750^\circ\text{C}$ ). Głównym składnikiem powstałych spalin były tlenki węgla, jednak ich szkodliwość dla środowiska jest zerowa, ponieważ są związkami powtórnie włączanymi w obieg materii i energii w przyrodzie w kolejnym cyklu wegetacyjnym.
5. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że metoda zagospodarowania liści zbieranych na terenach miejskich poprzez spalanie może być uzupełnieniem do stosowanych aktualnie metod (składowania, kompostowania). Biorąc pod uwagę uzyskane wartości energetyczne od  $24610 \text{ MJ}\cdot\text{ha}^{-1}$  do  $63360 \text{ MJ}\cdot\text{ha}^{-1}$  oraz efektywność ekonomiczną od 1,17 do 1,97, spalanie liści jako metoda ich zagospodarowania jest ekonomicznie i energetycznie uzasadniona.

## Bibliografia

- Dziewanowska. M., Dobek. T.** 2006a. Tlenki węgla ze spalania biomasy w postaci liści różnych gatunków drzew. *Acta Agrophysica* 139 8(1). s. 53-58.
- Dziewanowska. M., Dobek. T.** 2006b. Wartości cieplne liści wybranych gatunków drzew zbieranych na terenach zabudowanych. *Acta Agrophysica* 141 8(3). s. 551-558.
- Dziewanowska. M.** 2007. Analiza i ocena technologii wykorzystania liści zebranych na terenach miejskich jako alternatywnego źródła energii. Praca doktorska. IBMER, Warszawa.
- Hagel R., Zakrzewski J.** 1984. Miernictwo dynamiczne. WNT, Warszawa.
- Muzalewski A.** 2005. Koszty eksploatacji maszyn. Wydaw. IBMER, Warszawa.
- Sychta Z., Sychta K.** 2007a. Badanie wydzielania toksycznych produktów rozkładu i spalania materiałów metodą wg PN-B-02855:1988. Procedura badawcza nr PB/ZTZO/2. Wydanie B-KTZ/19/2007, Edycja 6. Szczecin.
- Sychta Z., Sychta K.** 2007b. Wyznaczanie potencjału cieplnego materiałów metodą wg ISO 1716:2004. Procedura badawcza nr PB/ZTZO/12. Wydanie B-KTZ/17/2007, Edycja 6. Szczecin.
- Wójcicki Z.** 2000. Wyposażenie techniczne i nakłady materiałowo-energetyczne w rozwojowych gospodarstwach rolniczych. Wydaw. IBMER, Warszawa.

## **ENERGY-RELATED AND ECOLOGICAL EVALUATION OF HEAT ACQUISITION PROCESS DURING COMBUSTION OF LEAVES PICKED IN URBAN AREAS**

**Abstract.** Besides individual biomass types being used, there are many other materials which may be used for energy production purposes. Leaves falling from trees could be one of them. Combustion of these leaves is one of processing methods which haven't been used yet. The main purpose of this publication was to develop and evaluate picking and processing technology for tree leaves picked in urban areas. The evaluation was carried out in economic, energy-related and ecological aspect. Completed research allows to state that the method of processing leaves picked in urban areas by combustion could complement currently used methods, that is storage and composting. Due to their calorific value, leaves of deciduous trees may be the source of thermal energy acquired from biomass.

**Key words:** biomass, tree leaves, economic efficiency, combustion of leaves, calorific value

**Adres do korespondencji:**

Małgorzata Dziewanowska: e-mail: [malgorzata.dziewanowska@gmail.com](mailto:malgorzata.dziewanowska@gmail.com)

Katedra Technicznego Zabezpieczenia Okrętów

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Al. Piastów 41

71-065 Szczecin