

## WARTOŚĆ OPAŁOWA I SKŁAD ELEMENTARNY BIOMASY WIERZBY PRODUKOWANEJ SYSTEMEM EKO-SALIX\*

MARIUSZ STOLARSKI, MICHAŁ KRZYŻANIAK

*Katedra Hodowli Roślin i Nasiennictwa, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie*

mariusz.stolarski@uwm.edu.pl

**Synopsis.** W pracy określono parametry jakościowe oraz skład elementarny biomasy wierzby pozyskanej w systemie Eko-Salix w 5-letniej rotacji. Biomasa wierzby pozyskiwana w tym systemie jest paliwem o wysokiej wartości opałowej  $8,5 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  i zawartości węgla, wodoru oraz o niskiej wilgotności, zawartości popiołu, siarki, azotu i chloru. Odmiana wierzby Tur dała biomasę o najkorzystniejszych parametrach, potencjalnie najbardziej przydatną jako paliwo energetyczne i surowiec do termochemicznej konwersji. Z wyższej gęstości sadzenia roślin ( $7,4 \text{ tys. sztuk}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) pozyskano biomasę o gorszej jakości: niższej zawartości węgla i wodoru oraz wyższej zawartości popiołu, siarki i azotu niż z biomasy pozyskanej z niższej gęstości ( $5,2 \text{ tys. sztuk}\cdot\text{ha}^{-1}$ ). Natomiast w przypadku ciepła spalania i wartości opałowej stwierdzono odwrotną zależność

**Słowa kluczowe** – *key words*: wierzba – *willow*, system Eko-Salix – *Eko-Salix system*, biomasa – *biomass*, zawartość popiołu – *ash content*, ciepło spalania – *combustion heat*, skład elementarny – *elemental composition*

### WSTĘP

W Polsce energię elektryczną z odnawialnych źródeł (OZE) wytwarza się głównie w procesach wspólnego spalania biomasy z paliwami kopalnymi. Zgodnie z zapisami Dyrektywy 2009/28/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z 28 kwietnia 2009 roku, kraj nasz zobowiązany jest wytworzyć 10,4 i 15,0% energii elektrycznej „zielonej” odpowiednio w 2011 i 2020 roku. Ponadto ilość biomasy pochodzenia rolniczego (innego niż zasoby leśne) spalanej w jednostkach produkujących energię odnawialną w procesie wspólnego spalania biomasy i węgla ma wynosić 40% w roku 2011 i systematycznie wzrastać osiągając poziom 100% w 2014 roku [Rozporządzenie Ministra Gospodarki Dz. U. nr 156, poz. 969, z 2008 r., Dz. U. Nr 34, poz. 182, z 2010 r.].

Prognozy wskazują, że wzrosną korzyści producentów biopaliw stałych pochodzenia rolnego. Zišci się prawdopodobnie scenariusz, według którego cała ta produkcja znajdzie gwałtownie popyt, a mała podaż spowoduje gwałtowne wywindowanie cen. Popczyk [2010] jednakże twierdzi, że wykorzystanie biomasy do wspólnego jej spalania z węglem w elektrowniach kondensacyjnych jest ukierunkowane na podtrzymanie strukturalnej nieefektywności rolnictwa i energetyki, zatem musi być sposobem przejściowym. Niehumanitarne jest również wykorzystywanie ziarna zbóż w procesach współspalania z węglem [Biernat 2010b].

Z tych powodów w krajach UE zaczęto rozwijać technologie wytwarzania biopaliw drugiej generacji (ciekłych, gazowych) z biomasy surowców nieżywnościowych między innymi

\* Praca wykonana w ramach projektu badawczego rozwojowego finansowanego przez MNiSzW – R12 071 03

z upraw wieloletnich roślin energetycznych [Dyrektywa 2009/28/WE, Biernat 2010a, 2010b, Ciechanowicz i Szczukowski 2010].

W pracy założono hipotezę, że biomasa wierzby pozyskana w rotacji 5-letniej sposobem Eko-Salix z gleb marginalnych nieprzydatnych pod uprawy konsumpcyjne mogłaby mieć zastosowanie doraźne jako paliwo w elektrowniach, natomiast w perspektywie do wytwarzania syntetycznych paliw węglowodorowych. Niezbędne jest więc opracowanie „Karty paliwa” zawierającej szczegółowe informacje o parametrach jakościowych biomasy dostarczanej do końcowego odbiorcy [Szymanowicz 2011].

Dlatego też celem przeprowadzonych badań było określenie wilgotności, zawartości popiołu, części lotnych, ciepła spalania, wartości opałowej oraz składu elementarnego biomasy wierzby pozyskanej w systemie Eko-Salix w 5-letniej rotacji w zależności od siedliska, odmiany i gęstości sadzenia.

## MATERIAŁ I METODY

Podstawą prowadzonych badań były dwa ściśle doświadczenia polowe zlokalizowane w Północno-Wschodniej Polsce w miejscowościach Leginy (53°59' N, 21°08' E) i Kocibórz (54°00' N, 21°10' E). Obiekty te są oddalone od siebie o 3 km i należą do Stacji Badawczo-Dydaktycznej w Łężanach Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie. Doświadczenie założono w I dekadzie kwietnia 2006 r. Czynnikiem I w doświadczeniu były dwa siedliska gleb marginalnych: Leginy (czarna ziemia zbrunatniała) i Kocibórz (gleba torfowo-murszowa). Czynnikiem II było sześć odmian i klonów wierzby: Turbo (*Salix viminalis* L.), Tur (*Salix viminalis* L.), Duotur (*Salix alba* L.), Corda (*Salix alba* L.), UWM-043 (*Salix viminalis* L.), UWM-046 (*Salix viminalis* L.). Natomiast czynnik III stanowiła gęstość sadzenia sadzonek długich (żywokołów): 5,2 (A) i 7,4 (B) tys. szt.·ha<sup>-1</sup>. Uprawa wierzby w systemie Eko-Salix polega na wysadzeniu sadzonek długich (ok. 2,5 m – tzw. żywokołów) na gruntach marginalnych bez wcześniejszego przygotowania stanowiska. Żywokoły są nieukorzenione, wysadza się je na głębokość 0,4–0,5 m, natomiast nad powierzchnią gleby wystaje pęd o wysokości ok. 2,0 m. Ten system sadzenia wierzby ogranicza konieczność prowadzenia zabiegów agrotechnicznych.

Biomasa była pozyskana po pięciu okresach wegetacji (III dekada stycznia 2011 r.). W trakcie zbioru roślin wierzby pobierano próby biomasy do analiz laboratoryjnych. Pozyskany materiał pakowano w worki foliowe i transportowano do laboratorium w celu wykonania analiz, które wykonywano w trzech powtórzeniach w laboratorium Katedry Hodowli Roślin i Nasiennictwa Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie.

Wilgotność biomasy oznaczono metodą suszarkowo-wagową. W tym celu suszono biomasę w temperaturze 105°C do uzyskania stałej masy. Następnie biomasę rozdrabniano na młynku analitycznym „IKA KMF 10 basic” przy użyciu sita o średnicy oczek 0,25 mm. W tak przygotowanych próbkach oznaczono zawartość popiołu oraz części lotnych w automatycznym analizatorze termogravimetrycznym ELTRA TGA-THERMOSTEP. Ciepło spalania oznaczano w kalorymetrze IKA C 2000 w oparciu o metodę dynamiczną. Następnie obliczono wartość opałową paliw przy ich wilgotności podczas zbioru [Kopetz i in. 2007]. Zawartość węgla, wodoru i siarki oznaczono za pomocą automatycznego analizatora ELTRA CHS 500. Zawartość azotu oznaczono metodą Kjeldahla z użyciem mineralizatora K-435 oraz jednostki destylującej B-324 BUCHI, natomiast zawartość chloru z zastosowaniem mieszaniny Eschki.

Dla badanych cech obliczono średnie arytmetyczne i podano odchylenie standardowe. W przypadku udowodnienia istotności wpływu czynnika na badane cechy wykorzystano test wielokrotny SNK (Studenta Newman-Keulsa) za pomocą, którego wyznaczono grupy

jednorodnie przy poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ . Wszystkie wyniki badań opracowano statystycznie w oparciu o pakiet komputerowy STATISTICA 9,0 PL.

## WYNIKI I DYSKUSJA

Wilgotność biomasy przy zbiorze 5-letnich roślin wynosiła średnio 49,74% (tab. 1). Nie stwierdzono różnic w wilgotności biomasy pozyskiwanej z różnych siedlisk. Natomiast wartość tej cechy u badanych odmian była istotnie zróżnicowana. Istotnie najniższa (47,2%) była ona u odmiany Tur i klonu UWM 046, a u odmiany Corda była ona najwyższa (53,1%). Biomasa pozyskana z większego zagęszczenia roślin wierzby (7,4 tys. sztuk·ha<sup>-1</sup>) miała nieco niższą wilgotność (choć statystycznie istotną) niż z zagęszczenia 5,2 tys. sztuk·ha<sup>-1</sup>. W innych badaniach własnych [Stolarski i in. 2010] stwierdzono, że wilgotność biomasy wierzby pozyskiwanej w 3-letniej rotacji z systemu Eko-Salix z gleby aluwialnej wynosiła średnio 49,3%. Również w cytowanej pracy najniższą wilgotność biomasy oznaczono u odmiany Tur (47,8%). Natomiast przy pozyskiwaniu wierzby z technologii tradycyjnej, w rotacjach trzy-, czteroletnich wilgotność biomasy kształtowała się w zakresie 47–52%, a najniższe wartości tej cechy notowano również u odmiany Tur [Stolarski 2009, Szczukowski i in. 2005, Tharakan i in. 2003, Tworowski i in. 2007, 2010]. Porównując powyższe dane można stwierdzić, że sposób uprawy wierzby (w systemach Eko-Salix lub tradycyjnym) nie różnicuje znacząco wilgotności biomasy. Istotny wpływ na tę cechę ma odmiana.

Ciepło spalania biomasy wierzby wyniosło w doświadczeniu średnio 19,37 MJ·kg<sup>-1</sup> s.m. (tab. 1). Biomasa pozyskana z obiektu Leginy, charakteryzowała się istotnie wyższą wartością tej cechy w porównaniu do biomasy pozyskanej z Kociborza. Istotnie najwyższe ciepło

Tabela 1. Wilgotność, ciepło spalania i wartość opałowa biomasy wierzby  
Table 1. Moisture content, heat of combustion and calorific value of willow biomass

Wyszczególnienie <i>Item</i>		Wilgotność <i>Moisture</i> (%)	Ciepło spalania <i>Heat of combustion</i> (MJ·kg <sup>-1</sup> s.m.–DM)	Wartość opałowa <i>Calorific value</i> (MJ·kg <sup>-1</sup> )
Siedlisko <i>Site</i>	Leginy	49,73±2,32	19,48±0,13 a	8,58±0,52 a
	Kocibórz	49,75±2,65	19,25±0,11 b	8,46±0,61 b
Odmiana <i>Cultivar</i>	Turbo	48,13±0,49 d	19,39±0,07 c	8,88±0,11 b
	Tur	47,25±0,60 e	19,46±0,20 a	9,11±0,19 a
	Duotur	52,69±0,58 b	19,41±0,17 b	7,90±0,18 d
	Corda	53,07±0,40 a	19,23±0,14 e	7,73±0,12 e
	UWM 043	50,07±0,42 c	19,36±0,15 d	8,44±0,12 c
	UWM 046	47,24±0,25 e	19,35±0,17 d	9,05±0,05 a
Gęstość sadzenia <i>Planting density</i>	A – 5,2 tys.– <i>thous.</i>	49,93±2,40 a	19,34±0,14 b	8,46±0,53 b
	B – 7,4 tys.– <i>thous.</i>	49,56±2,57 b	19,40±0,19 a	8,58±0,60 a
Średnio – <i>Average</i>		49,74±2,47	19,37±0,17	8,52±0,57

± – odchylenie standardowe – *standard deviation*  
a, b, c... – grupy jednorodnie – *homogenous groups*

(19,46 MJ·kg<sup>-1</sup> s.m.) oznaczono w biomase odmiany Tur. U pozostałych odmian wartość tej cechy była niższa w zakresie 0,2–1,2%. Biomasa pozyskana z wyższego zagęszczenia roślin na jednostce powierzchni, charakteryzowała się nieznacznie wyższą (choć statystycznie istotną) wartością tej cechy w porównaniu do biomasy pozyskanej z niższego zagęszczenia roślin. We wcześniejszych badaniach [Stolarski in. 2008, Stolarski i in. 2010, Szczukowski i in. 2010] wykazano, że najwyższą wartością ciepła spalania charakteryzowała się biomasa odmiany Tur.

Wartość opałowa biomasy pozyskanej z Legin (8,58 MJ·kg<sup>-1</sup>) była istotnie wyższa, o 1,4% niż z Kociborza (tab. 1). Podobnie jak w przypadku ciepła spalania, istotnie najwyższą wartością opałową charakteryzowała się biomasa odmiany Tur (9,11 MJ·kg<sup>-1</sup>). W tej samej grupie jednorodnej znalazła się biomasa roślin UWM 046. Natomiast u odmian Turbo i Corda wartość tej cechy była niższa odpowiednio o 2,6 i 15,2%. Biomasa pozyskana z wyższego zagęszczenia roślin miała o 1,4% wyższą wartość opałową w porównaniu do biomasy pozyskanej z niższego zagęszczenia. Wartość opałowa była istotnie ujemnie skorelowana z zawartością wody, popiołu i siarki, a dodatnio skorelowana z zawartością części stałych i wodoru (tab. 4). Dendromasa wierzby pozyskiwana z systemu Eko-Salix w 3-letniej rotacji [Stolarski i in. 2010] miała średnio o 0,2 MJ·kg<sup>-1</sup> wyższą wartość opałową niż w prezentowanych badaniach. Istotnie największą wartość tego parametru miała również biomasa odmiany Tur (9,16 MJ·kg<sup>-1</sup>). Biomasa wierzby pozyskiwana z plantacji prowadzonej sposobem tradycyjnym w rotacji 3 i 4-letniej letniej miała wartość opałową, odpowiednio: 8,43 i 8,98 MJ·kg<sup>-1</sup> [Stolarski 2009, Tworowski i in. 2007].

Zawartość popiołu po spopieleniu biomasy w doświadczeniu wynosiła średnio 0,89% s.m. (tab. 2). Dendromasa pozyskana z Legin zawierała około 13% więcej popiołu niż z Kociborza. Spośród badanych odmian istotnie najniższą zawartością popiołu charakteryzowała się biomasa odmiany Tur, średnio 0,66% s.m. U roślin UWM 046 i Corda wartość tej cechy była wyższa od 14 do 95%. Biomasa pozyskiwana z zagęszczenia 7,4 tys. roślin·ha<sup>-1</sup> zawierała o 11% więcej popiołu niż z zagęszczenia 5,2 tys. roślin·ha<sup>-1</sup>. W biomase pozyskanej w trzyletnim cyklu

Tabela 2. Zawartość popiołu, części stałych oraz lotnych w biomase wierzby (% s.m.)  
Table 2. Content of ash, particulate matter and volatile matter in willow biomass (% D.M.)

Wyszczególnienie <i>Item</i>		Popiół <i>Ash</i>	Części stałe <i>Particulate matter</i>	Części lotne <i>Volatile matter</i>
Siedlisko <i>Site</i>	Leginy	0,95±0,33 a	18,50±0,35 a	79,30±0,33 b
	Kocibórz	0,84±0,29 b	18,05±0,44 b	79,79±0,57 a
Odmiana <i>Cultivar</i>	Turbo	0,80±0,19 c	18,41±0,40 b	79,49±0,56 ab
	Tur	0,66±0,20 d	18,68±0,30 a	79,37±0,34 b
	Duotur	1,10±0,13 b	18,28±0,34 b	79,44±0,39 ab
	Corda	1,29±0,35 a	17,86±0,30 d	79,62±0,58 ab
	UWM 043	0,76±0,21 c	18,06±0,57 c	79,87±0,69 a
	UWM 046	0,75±0,22 c	18,38±0,32 b	79,48±0,45 ab
Gęstość sadzenia <i>Planting density</i>	A – 5,2 tys.– <i>thous.</i>	0,85±0,25 b	18,18±0,51 b	79,73±0,58 a
	B – 7,4 tys.– <i>thous.</i>	0,94±0,37 a	18,37±0,38 a	79,37±0,39 b
Średnio – <i>Average</i>		0,89±0,32	18,28±0,46	79,55±0,52

± – odchylenie standardowe – *standard deviation*  
a, b, c... – grupy jednorodne – *homogenous groups*

z uprawy wierzby w systemie Eko-Salix średnia zawartość popiołu była wyższa (1,14% s.m.), a najniższą wartość tej cechy oznaczono w biomase odmiany Tur [Stolarski i in. 2010]. Tharakan i in. [2003] podają, że zawartość popiołu w trzyletnich pędach wierzby dla różnych klonów wynosiła 1,99% s.m. Z kolei w 14-letnim drewnie wierzbowym z gatunku *Salix alba* oznaczono tylko 0,52% s.m. popiołu, a w korze wartość ta była ponad 10-krotnie wyższa Klasnja i in. [2002]. Zawartość części stałych w pozyskanej biomase wynosiła średnio 18,28% s.m. Zawierała się ona w przedziale od 17,86 do 18,68% s.m, odpowiednio u odmian Corda i Tur. Natomiast zawartość części lotnych w biomase wynosiła średnio 79,55% s.m. W innych badaniach [Tworkowski i in. 2007, Stolarski i in. 2010] zawartość części lotnych w biomase wierzby zawierała się w przedziale 76,1–81,5% s.m.

Skład elementarny (węgiel, wodór - pożądana ich wysoka zawartość), (siarka, azot, chlor - pożądana ich niska zawartość) biomasy wierzby pozyskanej w pięcioletnim cyklu z systemu Eko-Salix przedstawiono w tabeli 3. W pozyskanej biomase wierzby oznaczono średnio 50,84% s.m. węgla. W biomase pozyskanej z Kociborza z gleby organicznej oznaczono istotnie wyższą zawartość węgla niż biomase pozyskanej z Legin z gleby mineralnej. Istotnie wyższe wartości tej cechy miała biomasa odmian Turbo i Tur (grupa jednorodna a), a najniższą odmiana Duotur. W biomase wierzby rosnącej w mniejszym zagęszczeniu (5,2 tys. sztuk·ha<sup>-1</sup>) oznaczono istotnie wyższą zawartość C pierwiastkowego niż w pozyskanej z zagęszczenia większego (7,4 tys. sztuk·ha<sup>-1</sup>). Przeprowadzona analiza korelacji wykazała, że zawartość węgla była istotnie dodatnio skorelowana z zawartością wodoru, azotu, chloru i części lotnych, a ujemnie głównie z zawartością popiołu (tab. 4). Podobne zależności stwierdzono we wcześniejszych badaniach własnych [Stolarski i in. 2010].

Zawartość wodoru oznaczona w biomase wierzby w doświadczeniu wyniosła średnio 5,86% s.m. (tab. 3). W biomase roślin Turbo, UWM 043 i Tur oznaczono wysoką zawartość wodoru (grupy jednorodne a i ab). W biomase wierzby rosnącej w mniejszym zagęszczeniu oznaczono istotnie wyższą zawartość wodoru niż w pozyskanej z zagęszczenia większego.

Zawartość siarki oznaczona w biomase wierzby w doświadczeniu była niska, średnio 0,023% s.m. (tab. 3). W biomase wierzby pozyskanej z Kociborza oznaczono nieznacznie wyższą (różnica statystycznie udowodniona) zawartość siarki niż w biomase z Legin. Istotnie najniższą zawartość siarki oznaczono w biomase odmiany UWM 043. Zawartość siarki oznaczona w biomase pozyskanej z niższego zagęszczenia była istotnie niższa niż w zagęszczeniu wyższego. Wykazano, że zawartość siarki była istotnie dodatnio skorelowana z zawartością azotu (tab. 4).

Zawartość azotu oznaczona w biomase wierzby w doświadczeniu wyniosła średnio 0,24% s.m. (tab. 3). W biomase roślin Tur i UWM 043 oznaczono niską zawartość tego pierwiastka (grupa jednorodna d). Zawartość azotu w młodszych 3-letnich pędach wierzby pozyskiwanej w systemie Eko-Salix była wyższa [Stolarski i in. 2010]. Również biomasa pozyskiwana z tradycyjnej technologii uprawy zawierała więcej azotu [Tharakan i in. 2003], a jego zawartość zwiększała się wraz ze skracaniem cyklu zbioru roślin z 3-letniego do 1-letniego [Stolarski 2009].

Zawartość chloru oznaczona w biomase wierzby w doświadczeniu była bardzo niska, wyniosła średnio 0,010% s.m. (tab. 3). Zawartość tego pierwiastka w biomase badanych odmian była zawarta w przedziale od 0,007 do 0,017% s.m.

„Karta paliw” (tab. 5) zawiera syntetyczne dane właściwości termicznych i chemicznych biomasy wierzby pozyskanej z systemu Eko-Salix w 5-letniej rotacji zbioru. Dla porównania zamieszczono również analogiczne parametry węgla kamiennego. Przedsiębiorstwa energetyczne są zainteresowane aby do dostarczanej biomasy były również załączane „Karty paliw” zawierające szczegółowe informacje o jej pochodzeniu i parametrach jakościowych

Tabela 3. Skład elementarny biomasy wierzby (% s.m.)  
 Table 3. Elemental composition of willow biomass (% D.M.)

Wyszczególnienie – Item		C	H	S	N	Cl
Siedlisko Site	Leginy	49,99±0,69 b	5,85±0,09	0,021±0,003 b	0,21±0,02 b	0,008±0,002 b
	Kocibórz	51,69±0,81 a	5,87±0,11	0,025±0,004 a	0,27±0,03 a	0,012±0,013 a
Odmiana Cultivar	Turbo	51,49±0,59 a	5,93±0,10 a	0,023±0,004 b	0,24±0,04 c	0,008±0,001 b
	Tur	51,34±1,27 a	5,88±0,04 ab	0,022±0,003 b	0,23±0,03 d	0,010±0,001 ab
	Duotur	50,01±0,86 c	5,74±0,06 c	0,024±0,005 a	0,25±0,05 b	0,009±0,002 ab
	Corda	50,76±0,97 b	5,84±0,09 b	0,025±0,004 a	0,24±0,03 c	0,007±0,001 b
	UWM 043	50,63±1,43 b	5,91±0,09 a	0,021±0,004 c	0,23±0,04 d	0,017±0,002 a
	UWM 046	50,81±1,04 b	5,85±0,07 b	0,022±0,004 b	0,26±0,05 a	0,007±0,001 b
Gęstość sadzenia Planting density	A – 5,2 tys. – thous.	51,05±1,14 a	5,91±0,08 a	0,021±0,003 b	0,23±0,03 b	0,011±0,013
	B – 7,4 tys. – thous.	50,63±1,10 b	5,81±0,08 b	0,025±0,005 a	0,25±0,05 a	0,009±0,002
Średnio – Average		50,84±1,13	5,86±0,10	0,023±0,004	0,24±0,04	0,010±0,010

± – odchylenie standardowe – standard deviation  
 a, b, c... – grupy jednorodnie – homogenous groups

Tabela 4. Współczynniki korelacji  $r$  – Pearsona dla wybranych cech  
 Table 4. Coefficient of  $r$  – Pearson correlation for the selected features

Wyszczególnienie Item	Wilgotność Moisture	Części stałe Particulate matter	Części lotne Volatile matter	Zawartość popiołu Ash content	C	H	S	N	Cl	Ciepło spalania Heat of combustion	Wartość opalowa Calorific value
Wilgotność Moisture	1,00										
Części stałe Particulate matter	-0,46*	1,00									
Części lotne Volatile matter	0,11	-0,80*	1,00								
Zawartość popiołu Ash content	0,63*	-0,08	-0,45*	1,00							
C	-0,30*	-0,33*	0,50*	-0,37*	1,00						
H	-0,37*	-0,14	0,40*	-0,46*	0,50*	1,00					
S	0,23	-0,16	-0,14	0,32*	0,18	-0,35*	1,00				
N	-0,02	-0,32*	0,18	0,00	0,49*	-0,10	0,66*	1,00			
Cl	-0,00	-0,27*	0,30*	-0,09	0,29*	0,19	-0,15	0,13	1,00		
Ciepło spalania Heat of combustion	-0,24*	0,59*	-0,36*	-0,19	-0,47	-0,10	-0,34*	-0,64*	-0,15	1,00	
Wartość opalowa Calorific value	-0,99*	0,53*	-0,16	-0,63*	0,22	0,34*	-0,27*	-0,08	-0,02	0,38*	1,00

\* współczynniki korelacji istotne na poziomie  $p \leq 0,05$ ;  $n = 72$  – correlation coefficients are significant at  $p \leq 0,05$ ;  $n = 72$

Tabela 5. „Karta paliw” – biomasa wierzby pozyskana z systemu Eko-Salix i węgiel kamienny  
 Table 5. “Fuel card” – willow biomass produced in the Eko-Salix system and hard coal

Parametry paliwa <i>Fuel parameter</i>	Jednostka <i>Unit</i>	Rodzaj paliwa – <i>Fuel</i>		
		Biomasa wierzby – <i>Willow biomass</i>		Węgiel* <i>Coal</i>
		Wartości – <i>Values</i>		
		średnio – <i>average</i>	min. – maks. <i>min. – max.</i>	
Wartość opałowa <i>Calorific value</i>	MJ·kg <sup>-1</sup>	8,52	7,73–9,11	23,72
Wilgotność <i>Moisture content</i>	%	49,7	47,2–53,1	11,8
Zawartość popiołu <i>Ash content</i>	% s.m. <i>D.M.</i>	0,89	0,66–1,29	13,9
Zawartość węgla <i>Carbon content</i>		50,8	50,0–51,5	61,1
Zawartość wodoru <i>Hydrogen content</i>		5,86	5,74–5,93	3,76
Zawartość azotu <i>Nitrogen content</i>		0,24	0,23–0,26	1,45
Zawartość siarki <i>Sulphur content</i>		0,023	0,021–0,025	0,53
Zawartość chloru <i>Chlorine content</i>		0,010	0,007–0,017	0,38

\* źródło – *source*: Szymanowicz [2011]

[Szymanowicz 2011]. Bowiem w firmach tych zachodzi potrzeba bilansowania odpowiednich procedur z podziałem biomasy na dwie grupy: „leśna” i „rolna”, co warunkuje odpowiednią kwalifikację i uzyskanie „zielonego certyfikatu” [Rozporządzenie Ministra Gospodarki 2008, 2010].

## WNIOSKI

1. Biomasa wierzby pozyskana w 5-letniej rotacji zbioru z czarnej ziemi zbrunatniałej charakteryzowała się wyższym ciepłem spalania, wartością opałową oraz zawartością popiołu. Natomiast biomasa pozyskana z gleby torfowo-murszowej posiadała wyższą zawartość węgla, wodoru, siarki, azotu i chloru.
2. Odmiana wierzby Tur dała biomasę o najwyższej jakości, potencjalnie najbardziej przydatną jako paliwo energetyczne i surowiec do termochemicznej konwersji.
3. Z wyższej gęstości sadzenia roślin (7,4 tys. sztuk·ha<sup>-1</sup>) pozyskano biomasę o gorszej jakości: niższej zawartości węgla i wodoru oraz wyższej zawartości popiołu, siarki i azotu niż z biomasy pozyskanej z niższej gęstości (5,2 tys. sztuk·ha<sup>-1</sup>). Natomiast w przypadku ciepła spalania i wartości opałowej stwierdzono odwrotną zależność.



4. „Karta paliw” umożliwia praktyczne i szczegółowe przedstawienie informacji o parametrach jakościowych biomasy pozyskanej z systemu Eko-Salix w omawianym doświadczeniu w 5-letniej rotacji zbioru.

## PIŚMIENNICTWO

- Biernat K. 2010a. Biopaliwa - definicje i wymagania obowiązujące w Unii Europejskiej. *Czysta Energia* 10: 25–28.
- Biernat K. 2010b. Rozwój technologii wytwarzania biopaliw. *Czysta Energia* 11: 33–36.
- Ciechanowicz W., Szczukowski S. 2010. Transformacja cywilizacji z ery ognia do ekonomii wodoru i metanolu. Wyd. WIT. Warszawa: ss. 609.
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych.
- Klasnja B., Kopitovic S., Orlovic S. 2002. Wood and bark of some poplar and willow clones as fuelwood. *Biomass Bioenerg.* 23(6): 427–432.
- Kopetz H., Jossart J., Ragossnig H., Metschina Ch., European biomass statistics 2007. European Biomass Association (AEBIOM), Brussels.
- Popczyk J. 2010. Rolnictwo energetyczne. Szansa dla Polski na dziś i na unijną perspektywę budżetową. *Wiś Jutra* 8/9: 1–6.
- Rozporządzenie Ministra Gospodarki z 14 sierpnia 2008 roku w sprawie szczegółowego zakresu obowiązków uzyskania i przedstawienia do umorzenia świadectw pochodzenia, uiszczenia opłaty zastępczej, zakupu energii elektrycznej i ciepła wytworzonych w odnawialnych źródłach energii oraz obowiązku potwierdzania danych dotyczących ilości energii elektrycznej wytworzonej w odnawialnym źródle energii, Dz. U. nr 156, poz. 969., Dz. U. nr 34, poz. 182 z 2010 r.
- Stolarski M. 2009. Agrotechniczne i ekonomiczne aspekty produkcji biomasy wierzby krzewiastej (*Salix* spp.) jako surowca energetycznego. Wyd. UWM Olsztyn. Rozpr. Monogr. 148: ss. 145.
- Stolarski M., Szczukowski S., Tworkowski J. 2010. Charakterystyka biomasy wierzby uprawianej w systemie Eko-Salix w aspekcie energetycznym. *Probl. Inż. Rol.* 1: 125–133.
- Stolarski M., Szczukowski S., Tworkowski J., Klasa A. 2008. Productivity of seven clones of willow coppice in annual and quadrennial cutting cycles. *Biomass Bioenerg.* 32: 1227–1234.
- Szczukowski S., Stolarski M., Tworkowski J., Przyborowski J., Klasa A. 2005. Productivity of willow coppice plants grown in short rotations. *Plant Soil Environ.* 51: 423–430.
- Szczukowski S., Tworkowski J., Stolarski M., Fortuna W. 2010. Wartość użytkowa biomasy wierzby pozyskanej w krótkich rotacjach zbioru. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 547: 377–384.
- Szymanowicz R. 2011. Wytwarzanie energii ze źródeł odnawialnych w procesie spalania mieszanego paliwa wtórnego zawierającego biomasę. *Energetyka* 5: 298–305.
- Tharakan P.J., Volk T.A., Abrahamson L.P., White E.H. 2003. Energy feedstock characteristics of willow and hybrid poplar clones at harvest age. *Biomass Bioenerg.* 25(6): 571–580.
- Tworkowski J., Szczukowski S., Stolarski M. 2007. Charakterystyka biomasy wierzby jako paliwa. W: *Biomasa dla energetyki i ciepłownictwa – szanse i problemy*. Wyd. Wiś Jutra, Warszawa: 82–84.
- Tworkowski J., Szczukowski S., Stolarski M. 2010. Plonowanie oraz cechy morfologiczne wierzby uprawianej w systemie Eko-Salix. *Fragm. Agron.* 27(4): 135–146.

M. STOLARSKI, M. KRZYŻANIAK

**CALORIFIC VALUE AND ELEMENTAL COMPOSITION OF WILLOW BIOMASS  
PRODUCED IN THE EKO-SALIX SYSTEM**

**Summary**

A new approach to production of wood biomass on agricultural land involves willow cultivation in the Eko-Salix system, with the use of long cuttings for planting, extensive cultivation solutions (no ploughing, limited fertilisation and cultivation procedures) and harvesting it in a five-year rotation. The study was based on an exact three-factorial field experiment, conducted in triplicate in the years 2006–2010. The aim of the study was to determine the moisture content, ash content, volatile matter content, heat of combustion, calorific value and elemental composition of willow biomass produced in the Eko-Salix system in a five-year rotation. Willow biomass produced in the system is a fuel with high calorific value of  $8.5 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  and high content of carbon, hydrogen and low content of moisture, ash, sulphur, nitrogen and chlorine. The Tur cultivar yielded biomass with the best properties, potentially usable as fuel and feedstock for thermochemical conversion. Worse biomass was obtained when the planting density was higher (7.4 thousand plants $\cdot\text{ha}^{-1}$ ): it had a lower carbon and hydrogen content and higher ash, sulphur and nitrogen content, as compared to the biomass obtained from low-density plants (5.2 thousand plants $\cdot\text{ha}^{-1}$ ). However, in the case of heat of combustion and calorific value of the inverse relationship was found. A “Fuel Card” was drawn up for willow biomass produced in a five-year rotation in the Eko-Salix system.