

## WŁAŚCIWOŚCI ENERGETYCZNE I SKŁAD CHEMICZNY BIOMASY WIERZBY POZYSKANEJ Z SYSTEMU EKO-SALIX\*

Michał Krzyżaniak, Stefan Szczukowski, Józef Tworkowski,  
Mariusz J. Stolarski

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

**Streszczenie.** Nowym podejściem do produkcji biomasy drzewnej jest uprawa wierzby w systemie Eko-Salix przy zastosowaniu żywokołów i ekstensywnych rozwiązań agrotechnicznych. Podstawą prowadzonych badań było doświadczenie polowe, prowadzone w czterech powtórzeniach na glebie torfowo-murszowej w latach 2009–2014. Celem przeprowadzonych badań było określenie cech termofizycznych oraz składu elementarnego biomasy wierzby pozyskanej w 5-letniej rotacji z uprawy jednorodnej i mieszanej. Ciepło spalania oznaczone w suchej biomacie wierzby w doświadczeniu wyniosło średnio  $19,54 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$ , a wartość opałowa  $8,9 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Zawartość węgla i wodoru była wysoka, a zawartość popiołu, siarki, azotu i chloru niska, co czyni ten surowiec atrakcyjnym do dalszej termochemicznej konwersji na potrzeby energetyki i przemysłu biorafineryjnego.

**Słowa kluczowe:** wierzba, system Eko-Salix, biomasa, wartość energetyczna, właściwości termofizyczne, skład elementarny

### WSTĘP

Wykorzystanie biomasy do celów energetycznych jest jednym z najszybciej rozwijających się sektorów energetyki odnawialnej. W 2011 roku stanowiła ona 68% całkowitej konsumpcji OZE w Unii Europejskiej [AEBIOM 2013]. W miarę wyczerpywania się ogólnie dostępnych zasobów biomasy do celów energetycznych oraz po wprowadzeniu przepisów wymuszających wykorzystanie biomasy rolniczej nastąpi intensywny rozwój polowych wieloletnich plantacji energetycznych (trawy, byliny oraz zagajniki uprawiane w krótkich rotacjach), wykorzystanie odpadów komunalnych, odpadów przetwórstwa

---

\* Praca wykonana w ramach projektu badawczego własnego finansowanego przez NCN – Nr N N310 778840.

Adres do korespondencji – Corresponding author: Michał Krzyżaniak, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Wydział Kształtowania Środowiska i Rolnictwa, Katedra Hodowli Roslin i Nasiennictwa, ul. Plac Łódzki 3, 10-724 Olsztyn, e-mail: [michal.krzyzaniak@uwm.edu.pl](mailto:michal.krzyzaniak@uwm.edu.pl)

rolno-spożywczego i osadów ściekowych [Stolarski i in. 2010a, Ministerstwo Gospodarki 2012, Nowak i Wesołowska 2013].

Biomasa dostarczana na cele energetyczne i przemysłowe charakteryzuje się zróżnicowanym składem chemicznym oraz okresową zmianą parametrów paliwa (np. wilgotność, zawartość popiołu, skład chemiczny, wartość opałowa), co może powodować problemy z jej spalaniem [Wilk i in. 2013]. W celu uniknięcia problemów eksploatacyjnych kotła na biomasę niezbędny jest staranny dobór i monitorowanie jakości biomasy przede wszystkim pod kątem kluczowych składników: wartości opałowej, gęstości nasypowej, wilgotności oraz zawartości chloru i pierwiastków alkalicznych (Na, K) [Komorowicz i in. 2009].

W pracy założono hipotezę, że biomasa wierzby pozyskana w rotacji 5-letniej sposobem Eko-Salix z gleby marginalnej torfowo-murszowej nieprzydatnej pod uprawy konsumpcyjne mogłaby mieć zastosowanie doraźne jako paliwo w elektrowniach [Szymanowicz 2011], w perspektywie natomiast do wytwarzania syntetycznych paliw węglowodorowych oraz produktów przemysłu biorafineryjnego [Dyrektwa... 2009, Ciechanowicz i Szczukowski 2014, Krzyżaniak i in. 2014].

Celem badań było określenie cech termofizycznych oraz składu elementarnego biomasy wierzby pozyskanej z uprawy jednorodnej i mieszanej klonów w systemie Eko-Salix w 5-letniej rotacji.

## MATERIAŁ I METODY

Podstawą badań było doświadczenie polowe prowadzone w Stacji Badawczo-Dydaktycznej w Łęczanach Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie. Doświadczenie założono w I dekadzie kwietnia 2009 roku. Czynnikiem doświadczenia była uprawa wierzby *Salix viminalis* jednorodna (klon UWM 043) i mieszanka klonów *Salix viminalis*: UWM 043, UWM 067, UWM 046 (33% ich udziału w obsadzie).

Poziom wody gruntowej w okresach wegetacji znajdował się na głębokości 0,1–0,4 m. Przedplonem dla roślin wierzby krzewiastej był użytek zielony ekstensywnie użytkowany. Późną jesienią w roku poprzedzającym nasadzenia wierzby skoszono rośliny na użytku zielonym i pozostawiono je na polu. Gęstość sadzenia żywokołów w doświadczeniu wynosiła 4545 sztuk·ha<sup>-1</sup> (rozstawa rzędów 2,2 m, w rzędzie sadzono żywokoły co 1,0 m). Żywokoły – sadzonki długie na 2,4 m pozyskano z trzyletnich pędów wierzby krzewiastej – nie były ukorzenione. Wysadzano je w II dekadzie kwietnia 2009 roku na głębokość 0,4 m przy użyciu świdra wodnego. Po włożeniu żywokołu do otworu, dokładnie dociśnięto glebę do jego powierzchni. Po sadzeniu żywokoły wystawały 2,0 m nad powierzchnią gleby. Nawożenia mineralnego w pierwszym roku nie stosowano, a w drugim roku wegetacji (wiosną) wysiewano ręcznie: N 0 kg·ha<sup>-1</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 30 kg·ha<sup>-1</sup> w formie superfosfatu potrójnego, K<sub>2</sub>O 60 kg·ha<sup>-1</sup> w formie soli potasowej. W pierwszym i drugim okresie wegetacji prowadzono w międzyrzędziach tylko 1-krotne koszenie chwastów, aby nie dopuścić do ich nadmiernego rozwoju i owocowania.

Biomasa wierzby pozyskano po pięciu okresach wegetacji (III dekada stycznia 2014 r.) sposobem ręcznym i maszynowym. W publikacji podano wartości średnie cech energetycznych i składu chemicznego biomasy wierzby dla obu sposobów zbioru. W trakcie zbioru roślin wierzby pobierano próby zrębków do analiz laboratoryjnych. Pozyskany

materiał pakowano w worki foliowe i transportowano do laboratorium Katedry Hodowli Roślin i Nasiennictwa UWM w celu wykonania analiz w trzech powtórzeniach.

Wilgotność biomasy oznaczono metodą suszarkowo-wagową zgodnie z PN-80/G-04511. Zawartość popiołu, części lotne i stałe oznaczono w automatycznym analizatorze termogravimetrycznym ELTRA TGA-THERMOSTEP zgodnie z PN-G-04560:1998 i PN-ISO 562. Ciepło spalania oznaczono w kalorymetrze IKA C 2000 na podstawie metody dynamicznej (PN-81/G-04513). Następnie obliczono wartość opałową biomasy przy jej wilgotności roboczej [Kopetz i in. 2007]. Ponadto w biomacie oznaczono gęstość właściwą i nasypową (PN-80/C-04532) oraz procentową zawartość drewna i kory [Stolarski 2009]. Zawartość węgla, wodoru i siarki oznaczono za pomocą automatycznego analizatora ELTRA CHS 500 zgodnie z PN-G-04584 i PN-G-04517. Zawartość azotu oznaczono metodą Kjeldahla, a zawartość chloru z zastosowaniem mieszaniny Eschki. Oznaczenia w biomacie zawartości P, K, Mg, Ca i Na wykonano usługowo w Stacji Chemiczno-Rolniczej w Olsztynie.

Dla badanych cech obliczono średnie arytmetyczne. W przypadku udowodnienia istotności wpływu czynnika na badane cechy wykorzystano test wielokrotny SNK (Studenta-Newmana-Keuls), za pomocą którego wyznaczono najmniejszą istotną różnicę przy poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ . Wszystkie wyniki badań opracowano statystycznie, wykorzystując pakiet komputerowy STATISTICA 9.0 PL.

## WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

Wilgotność biomasy oznaczona przy zbiorze 5-letnich roślin wierzby pozyskanych w systemie Eko-Salix wyniosła średnio 48,4% (tab. 1). Wartość tej cechy oznaczona w biomacie z jednorodnej uprawy wierzby *S. viminalis* UWM 043 była istotnie niższa niż w biomacie mieszanki klonów UWM 043, UWM 067 i UWM 046. W innych badaniach

Tabela 1. Wilgotność, zawartość popiołu, ciepło spalania i wartość opałowa biomasy wierzby

Table 1. Moisture content, ash content, higher heating value and lower heating value of willow biomass

Rodzaj nasadzeń Type of planting	Wilgotność Moisture [%]	Popiół [% s.m.] Ash [% d.m.]	Ciepło spalania [MJ·kg <sup>-1</sup> s.m.] HHV* [MJ·kg <sup>-1</sup> d.m.]	Wartość opałowa LHV** [MJ·kg <sup>-1</sup> ]
Uprawa jednorodna Homogeneous crop <i>Salix viminalis</i> UWM 043	46,99	0,99	19,43	9,15
Mieszanka klonów Mixture of clones <i>Salix viminalis</i>	49,75	1,23	19,64	8,65
Średnio Average	48,37	1,11	19,54	8,90
NIR <sub>0,05</sub> LSD <sub>0,05</sub>	0,28	0,05	0,02	0,07

\*HHV – higher heating value, \*\*LHV – lower heating value.

[Stolarski i in. 2010b, Stolarski i Krzyżaniak 2011] stwierdzono, że wilgotność wierzby pozyskanej w systemie Eko-Salix była zbliżona i wynosiła średnio 49,3% w rotacji 3-letniej oraz 49,7% w rotacji 5-letniej. Z kolei przy pozyskiwaniu wierzby uprawianej w krótkich rotacjach (SRWC – ang. *short rotation woody crops*), wilgotność biomasy kształtowała się w zakresie 47–53%. Wartości te w dużej mierze były zależne od odmiany i długości rotacji [Szczukowski in. 2005, Stolarski 2009, Szczukowski i in. 2010, Tworkowski i in. 2010]. Zawartość popiołu oznaczona w biomacie pozyskanej z uprawy jednorodnej klonu UWM 043 (0,99% s.m.) była istotnie niższa niż oznaczona w mieszance trzech klonów (1,23% s.m.) – tabela 1. Zawartość popiołu w biomacie wierzby pozyskanej z systemu Eko-Salix w rotacji 5-letniej w innej pracy była niższa i wynosiła średnio 0,89% s.m. [Stolarski i Krzyżaniak 2011]. W biomacie pozyskanej w 3-letniej rotacji z uprawy wierzby w tym samym systemie, średnia zawartość popiołu była zbliżona (1,14% s.m.) do uzyskanej wartości tej cechy w badaniach własnych. Zawartość popiołu oznaczona w pędach wierzby pozyskanych w 3-letniej rotacji z uprawy tradycyjnej SRWC dla różnych klonów była wyższa i wynosiła średnio 1,30–1,90% s.m. [Tharakan i in. 2003, Krzyżaniak i in. 2014].

Ciepło spalania oznaczone w suchej biomacie wierzby w doświadczeniu wyniosło średnio 19,54 MJ·kg<sup>-1</sup> s.m. (tab. 1). Wartość tej cechy była nieznacznie, ale istotnie niższa w biomacie wierzby z uprawy jednorodnej klonu UWM 043 niż mieszanej klonów. We wcześniejszych badaniach [Stolarski i Krzyżaniak 2011] wartość tej cechy oznaczona u klonu UWM 043 również w 5-letniej rotacji zbioru była zbliżona (19,36 MJ·kg<sup>-1</sup> s.m.) do wartości uzyskanej w opisywanym doświadczeniu. W innych badaniach zauważono, że w krótszych rotacjach zbioru, ciepło spalania biomasy jest z reguły nieznacznie wyższe niż w biomacie pędów grubszych i starszych [Klasnja i in. 2002, Stolarski i in. 2013].

Wartość opałowa świeżej biomasy wierzby była istotnie wyższa, gdy pozyskano ją z uprawy jednorodnej (średnio 9,15 MJ·kg<sup>-1</sup>) niż mieszanej (średnio 8,65 MJ·kg<sup>-1</sup>) – tabela 1. Biomasa wierzby pozyskana z systemu Eko-Salix w innej 5-letniej rotacji miała średnio o 0,5 MJ·kg<sup>-1</sup> niższą wartość opałową niż w prezentowanych badaniach, co było ściśle związane z jej wyższą wilgotnością [Stolarski i Krzyżaniak 2011]. Biomasa wierzby pozyskiwana z doświadczeń prowadzonych sposobem tradycyjnym w rotacji 1- i 4-letniej miała wartość opałową w przedziale 7,92–9,13 MJ·kg<sup>-1</sup> [Stolarski 2009, Szczukowski i in. 2010].

Zawartość części stałych w pozyskanej biomacie wynosiła średnio 19,3% s.m., a części lotnych średnio 79,7% s.m. (tab. 2). Wskazuje to na odwrotne zależności tych cech w węglu kamiennym niż w biomacie, co powoduje inny sposób spalania tego paliwa w palenisku [Borycka 2009].

Zawartość kory w pędach wierzby pozyskanej w rotacji 5-letniej wynosiła średnio 10,3% s.m. (tab. 2). Wartość tej cechy u klonu wierzby UWM 043 w uprawie jednorodnej była istotnie niższa niż w uprawie mieszanej klonów. W innych badaniach stwierdzono, że zawartość kory w pędach wierzby maleje wraz z wydłużaniem cyklu zbioru i zwiększeniem ich średnicy [Klasnja i in. 2002, Stolarski 2009].

Tabela 2. Części stałe i lotne oraz zawartość kory i drewna w biomacie wierzby  
 Table 2. Fixed carbon, volatile matter, bark and wood content in willow biomass

Rodzaj nasadzeń Type of planting	Części stałe [% s.m.] Fixed carbon [% d.m.]	Części lotne [% s.m.] Volatile matter [% d.m.]	Kora [% s.m.] Bark [% d.m.]	Drewno [% s.m.] Wood [% d.m.]
Uprawa jednorodna Homogeneous crop <i>Salix viminalis</i> UWM 043	19,36	79,68	9,0	91,0
Mieszanka klonów Mixture of clones <i>Salix viminalis</i>	19,16	79,73	11,5	88,5
Średnio Average	19,26	79,71	10,3	89,7
NIR <sub>0,05</sub> LSD <sub>0,05</sub>	0,14	ni*	0,7	0,7

\* ni – nieistotne.

Skład elementarny (węgiel, wodór – pożądana ich wysoka zawartość, siarka, azot, chlor – pożądana ich niska zawartość) biomasy wierzby pozyskanej w rotacji 5-letniej z systemu Eko-Salix przedstawiono w tabeli 3. W pozyskanej biomacie wierzby oznaczono średnio 51,2% s.m. węgla pierwiastkowego. Nieznacznie wyższą zawartość węgla (różnica udowodniona statystycznie) oznaczono w biomacie z uprawy mieszanej klonów niż z uprawy jednorodnej. Zawartość wodoru w biomacie wierzby wyniosła średnio 5,91% s.m. (tab. 3) i była ona słabo zróżnicowana w poszczególnych obiektach doświadczenia. Zawartość węgla i wodoru oznaczona przez Szymanowicza [2012] w 27 rodzajach biomasy i wytworzonych z niej paliwach wynosiła odpowiednio 20,9–51,4 i 1,97–6,06% s.m.

Zawartość siarki, azotu i chloru oznaczona w biomacie wierzby pozyskanej w rotacji 5-letniej była niska, odpowiednio średnio 0,02, 0,39 i 0,02% s.m. (tab. 3). Zawartość siarki, azotu i chloru w 27 rodzajach biomasy i wytworzonych z niej paliw oznaczona przez Szymanowicza [2012] wynosiła odpowiednio: 0,01–0,73% s.m., 0,02–5,82% s.m. i 0,0–1,35% s.m. Sadowski [2013] podaje, że zawartość tych niepożądanych pierwiast-

Tabela 3. Skład elementarny biomasy wierzby [% s.m.]  
 Table 3. Elemental composition of willow biomass [% d.m.]

Rodzaj nasadzeń Type of planting	C	H	S	N	Cl
Uprawa jednorodna Homogeneous crop <i>Salix viminalis</i> UWM 043	51,04	5,87	0,02	0,38	0,02
Mieszanka klonów Mixture of clones <i>Salix viminalis</i>	51,36	5,94	0,02	0,40	0,02
Średnio Average	51,20	5,91	0,02	0,39	0,02
NIR <sub>0,05</sub> LSD <sub>0,05</sub>	0,25	0,04	ni*	0,01	ni*

\* ni – nieistotne.

ków w biomase drzewnej jest znacznie niższa niż w biomase słomistej pochodzącej z upraw rolniczych. Nowak i Wesołowska [2013] podają, że im wyższa jest koncentracja chloru w paliwie, tym większa jest korozja wysokotemperaturowa powierzchni wymienników kotła. Przyjmuje się, że kinetyka korozji chlorkowej jest pomijana przy zawartości tego pierwiastka w paliwie poniżej 0,1%.

Zawartość pierwiastków alkalicznych (K, Na, Mg i Ca) w analizowanej biomase wierzby z systemu uprawy Eko-Salix była niska – wynosiła odpowiednio: 0,15, 0,009, 0,03, 0,40% s.m. oraz słabo zróżnicowana (tab. 4). Zawartość ta była zbliżona do wartości oznaczanych w drewnie leśnym przeznaczonym na cele energetyczne, ale znacznie niższa od ich zawartości oznaczonych w innych agropaliwach, głównie pochodzenia słomistego [Sadowski 2013].

Tabela 4. Zawartość fosforu, potasu, magnezu, wapnia i sodu w biomase wierzby [% s.m.]

Table 4. Phosphorus, potassium, magnesium, calcium and sodium content in willow biomass [% d.m.]

Rodzaj nasadzeń	Zawartość pierwiastków w biomase The content of elements in the biomass				
	P	K	Mg	Ca	Na
Uprawa jednorodna Homogeneous crop <i>Salix viminalis</i> UWM 043	0,09	0,17	0,03	0,41	0,009
Mieszanka klonów Mixture of clones <i>Salix viminalis</i>	0,09	0,13	0,03	0,38	0,009
Srednio Average	0,09	0,15	0,03	0,40	0,009
NIR <sub>0,05</sub> LSD <sub>0,05</sub>	ni*	ni*	ni*	ni*	ni*

ni – nieistotne.

Wysoka zawartość metali alkalicznych zmniejsza temperaturę topnienia popiołu i zwiększa jego lepkość, co powoduje tworzenie się osadów na powierzchni ogrzewalnej kotła oraz powstanie aglomeratów w złożu [Nowak i Wesołowska 2013]. Należy zaznaczyć, że problemy te występują przy spalaniu biomasy słomistej, a nie występują przy spalaniu biomasy drzewnej [Sadowski 2013].

Podsumowując należy podkreślić, że wyższą jakością biomasy pozyskiwanej z systemu Eko-Salix w rotacji 5-letniej jako paliwa energetycznego uzyskano u klonu wierzby UWM 043 (*Salix viminalis*) z uprawy jednorodnej niż z mieszanki klonów: UWM 043, UWM 067, UWM 046 (*Salix viminalis*). Ponadto biomasa ta charakteryzowała się niską zawartością siarki, chloru i pierwiastków alkalicznych, a wysoką zawartością węgla i wodoru, co czyni ten surowiec atrakcyjnym do termochemicznej konwersji na potrzeby energetyki i przemysłu.

## WNIOSKI

1. Ocena jakościowa biomasy lignocelulozowej wierzby pozyskanej z systemu uprawy Eko-Salix w 5-letniej rotacji zbioru wskazuje na jej przydatność jako paliwa do celów energetycznych. Uprawa jednorodna klonu *Salix viminalis* UWM 043 dała biomasę o wyższej jakości niż mieszanina klonów *Salix viminalis* UWM 043, 46, 67.

2. Biomasa wierzby pozyskana w 5-letniej rotacji charakteryzuje się korzystnym składem elementarnym: wysoką zawartością węgla i wodoru i niską zawartością azotu i siarki oraz pierwiastków alkalicznych (K, Na, Cl), a ponadto wysoką wartością opałową, którą determinuje niska zawartość wilgoci i popiołu.

## LITERATURA

- AEBIOM 2013. European bioenergy outlook 2013. AEBIOM, Brussels.
- Borycka B., 2009. Ekologiczne aspekty współspalania biomasy z odpadów owocowo-warzywnych z węglem. *Energetyka. Problemy Energetyki i Gospodarki Paliwowo-Energetycznej* 6, 386–390.
- Ciechanowicz W., Szczukowski S., 2014. Biomasa i węgiel kopalny uczestniczące w produkcji metanolu szansą rozwoju Polski. *Energetyka. Problemy Energetyki i Gospodarki Paliwowo-Energetycznej* 4, 245–250.
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 roku w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych.
- Klasanja B., Kopitovic S., Orlovic S., 2002. Wood and bark of some poplar and willow clones as fuelwood. *Biomass Bioenergy* 23(6), 427–432.
- Komorowicz M., Wróblewska H., Pawłowski J., 2009. Skład chemiczny i właściwości energetyczne biomasy z wybranych surowców odnawialnych. *Ochr. Śr. Zasobów Nat.* 40, 402–410.
- Kopetz H., Jossart J., Ragossnig H., Metschina Ch., 2007. European biomass statistics 2007. European Biomass Association, Brussels.
- Krzyżaniak M., Stolarski M.J., Waliszewska B., Szczukowski S., Tworkowski J., Załuski D., Śnieg M., 2014. Willow biomass as feedstock for an integrated multi-product biorefinery. *Ind. Crop. Prod.* 58, 230–237.
- Nowak W., Wesołowska M., 2013. Uwarunkowania techniczne spalania biomasy w kotłach energetycznych. Gołos P., Kaliszewski A. (red.), IBL, Monografia.
- Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 18 października 2012 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. z 2012 r. nr 0, poz. 1229).
- Sadowski K., 2013. Problematyka użytkowania biomasy leśnej na przykładzie rozwiązań w Elektrociepłowni Białystok S.A. Gołos P., Kaliszewski A. (red.), IBL., Monografia.
- Stolarski M., 2009. Agrotechniczne i ekonomiczne aspekty produkcji biomasy wierzby krzewiastej (*Salix* spp.) jako surowca energetycznego. *Rozpr. Monogr.* 148, UWM Olsztyn, 145.
- Stolarski M., Szczukowski S., Tworkowski J., 2010b. Charakterystyka biomasy wierzby uprawianej w systemie Eko-Salix w aspekcie energetycznym. *Probl. Inż. Rol.* 1, 125–133.
- Stolarski M.J., Krzyżaniak M., Waliszewska B., Szczukowski S., Tworkowski J., Zborowska M., 2013. Lignocellulosic biomass derived from agricultural land as industrial and energy feedstock. *Drewno* 189, 5–23.
- Stolarski M., Krzyżaniak M., 2011. Wartość opałowa i skład elementarny biomasy wierzby produkowanej systemem Eko-Salix. *Fragm. Agron.* 28(4), 86–95.
- Stolarski M., Szczukowski S., Tworkowski J., Nosarzewska A., 2010a. Ocena przydatności do celów energetycznych biomasy wybranych gatunków roślin wieloletnich. *Zesz. Probl. Postęp. Nauk Rol.* 547, 327–338.

- 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 pozyskanej w krótkich rotacjach zbioru. *Zesz. Probl. Postęp. Nauk Rol.* 547, 377–384.
- Szymanowicz R., 2011. Wytwarzanie energii ze źródeł odnawialnych w procesie spalania mieszanego paliwa wtórnego zawierającego biomasę. *Energetyka. Problemy Energetyki i Gospodarki Paliwowo-Energetycznej* 5, 298–305.
- Szymanowicz R., 2012. Właściwości fizykochemiczne paliw pochodzących ze źródeł odnawialnych. *Energetyka. Problemy Energetyki i Gospodarki Paliwowo-Energetycznej* 5, 230–235.
- 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 and Bioenergy* 25(6), 571–580.
- Tworkowski J., Szczukowski S., Stolarski M., 2010. Plonowanie oraz cechy morfologiczne wierzby uprawianej w systemie Eko-Salix. *Fragm. Agron.* 27(4), 135–146.
- Wilk M., Magdziarz A., Gara P., 2013. Analiza termicznej przemiany biomasy drzewnej, zwłaszcza procesu torfikacji. *Energetyka. Problemy Energetyki i Gospodarki Paliwowo-Energetycznej* 11, 840–843.

## ENERGY FEATURES AND CHEMICAL COMPOSITION OF WILLOW BIOMASS CULTIVATED IN EKO-SALIX SYSTEM

**Summary.** The authors propose an innovative willow cultivation method, the so-called Eko-Salix system, on agricultural land not used for consumption crops using three-year-old live stakes at a density of 4.5 thousand ha<sup>-1</sup> and biomass harvesting in a 5-year rotation. The basis of the conducted study was a large-area experiment, carried out in four replications in the years 2009–2013 on peat-muck soil (Ł-MtII cb). The experimental factor was a homogeneous crop of *Salix viminalis* – the UWM 043 clone and a mixture of *Salix viminalis* clones – UWM: 043, 067, 046. Higher heating value and lower heating value in average amounted to 19.54 MJ·kg<sup>-1</sup> d.m. and 8.9 MJ·kg<sup>-1</sup> respectively. Amount of carbon and hydrogen was high. Moisture, ash, sulphur, nitrogen and chlorine content was low. Thus, willow biomass may be regarded as attractive feedstock for further thermochemical conversion for energy and biorefinery purposes.

**Key words:** willow, Eko-Salix system, biomass, energy value, thermophysical features, elemental composition