

## EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNA PRODUKCJI BIOMASY WIERZBY SYSTEMEM EKO-SALIX\*

JÓZEF TWORKOWSKI, MARIUSZ STOLARSKI, STEFAN SZCZUKOWSKI

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

jozef.tworkowski@uwm.edu.pl

**Synopsis.** W pracy określono skumulowane nakłady materiałowo-energetyczne oraz wskaźnik efektywności energetycznej uprawy i produkcji zrębków wierzby w systemie Eko-Salix w 5-letniej rotacji zbioru na gruntach rolniczych nieprzydatnych pod rośliny konsumpcyjne. Skumulowane nakłady materiałowo-energetyczne na uprawę wierzby i produkcję zrębków zawarte były w przedziale od 8,8 do 13,9 GJ·ha<sup>-1</sup>·rok<sup>-1</sup>. Wskaźnik efektywności energetycznej produkcji zrębków wierzby wahał się od 9,2 do 11,7.

**Słowa kluczowe** – *key words*: wierzba – *willow*, system Eko-Salix – *Eco-Salix system*, biomasa – *biomass*, nakłady energii – *energy inputs*, wskaźnik efektywności energetycznej – *index of energetic effectiveness*

### WSTĘP

W produkcji oraz pozyskiwaniu biomasy wierzby w systemie Eko-Salix poza wysokością plonowania roślin należy zwrócić uwagę na nakłady materiałowo-energetyczne oraz wartość wskaźnika efektywności energetycznej uzyskanego w tej technologii. W literaturze podkreśla się bowiem, że plon danej rośliny to tylko jedno z kryteriów oceny przydatności danego gatunku do produkcji biomasy na cele energetyczne. Ważną kwestią jest również ocena nakładów materiałowo-energetycznych na pozyskanie biomasy danego gatunku, ilości energii w niej zawartej i w konsekwencji wartość wskaźnika efektywności energetycznej. Tylko spełnienie tych warunków uczyni dalsze etapy konwersji biomasy do wtórnych nośników energii uzasadnione energetycznie i ekonomicznie [Stolarski i in. 2011, Tworkowski i in. 2010].

Na podstawie wcześniejszych badań własnych oraz danych literaturowych w pracy postawiono hipotezę, że uprawa wierzby w systemie Eko-Salix w rotacji 5-letniej oraz pozyskanie biomasy może charakteryzować się korzystnym wskaźnikiem energochłonności jednostkowej oraz wysokim wskaźnikiem efektywności energetycznej produkcji zrębków.

Celem pracy było określenie skumulowanych nakładów materiałowo-energetycznych oraz efektywności energetycznej produkcji biomasy wierzby sposobem Eko-Salix w 5-letniej rotacji.

### 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). W obiekcie Leginy rośliny wierzby uprawiano w systemie Eko-Salix na

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

czarnej ziemi zbrunatniałej (8Di), a w Kocibórzku na glebie torfowo-murszowej (Ł-MtII cb). W każdym obiekcie testowano sześć odmian i klonów wierzby w dwóch gęstościach sadzenia: 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.

W analizie efektywności energetycznej produkcji wierzby systemem Eko-Salix na etapie założenia plantacji wyróżniono: wykonanie otworów wodnym świdrem hydraulicznym, ręczne sadzenie żywokołów i ich dociskanie, koszenie chwastów kosą spalinową. W zakresie nakładów materiałowo-energetycznych produkcji biomasy po piątym roku użytkowania plantacji wyróżniono: nakłady związane z założeniem plantacji, nawożenie, zbiór roślin przy użyciu mechanicznej piły łańcuchowej, zrębkowanie roślin rębakiem napędzanym wałkiem odbioru mocy ciągnika i transport biomasy loco plantacja.

Całość poniesionych nakładów podzielono na etapy. Pierwszy z nich obejmował założenie plantacji, a drugi jej użytkowanie. Nakłady materiałowo-energetyczne założenia plantacji przedstawiono w całości oraz podzielono na 20-letni okres jej użytkowania (cztery 5-letnie rotacje).

Skumulowane nakłady materiałowo-energetyczne uprawy wierzby w systemie Eko-Salix i produkcji zrębków określono według metodyki [Anuszewski 1987, Szeptycki i Wójcicki 2003, Wójcicki 2005, 2007]. W analizie nakładów materiałowo-energetycznych ponoszonych na założenie plantacji i produkcję wierzby wyodrębniono następujące strumienie energii: bezpośrednie nośniki energii (paliwa), zużycie środków trwałych i materiałów do ich napraw (ciągniki, maszyny, narzędzia), stosowanie nawozów mineralnych, zużycie roślinnych surowców rolniczych (żywokoły) i praca ludzi. Nakłady energetyczne związane z bezpośrednimi nośnikami energii, nawozami mineralnymi, zastosowaniem ciągników, maszyn i pracą ludzi obliczono na podstawie wskaźników energochłonności skumulowanej [Szeptycki i Wójcicki 2003, Wójcicki 2007].

Analizę efektywności energetycznej uprawy i produkcji zrębków wierzby przedstawiono dla dwóch siedlisk (obiektów) na podstawie średniego plonu świeżej masy badanych w doświadczeniu odmian i klonów w dwóch gęstościach sadzenia (5,2 i 7,4 tys. szt.·ha<sup>-1</sup> żywokołów). Wartość energetyczną plonu stanowił iloczyn wartości opałowej świeżej biomasy oraz jej plon z powierzchni 1 ha.

W energetycznej ocenie technologii uprawy wierzby w systemie Eko-Salix oraz produkcji zrębków na plantacji wykorzystano następujące wskaźniki: *zysk energii skumulowanej*, który stanowił różnicę pomiędzy wartością energetyczną uzyskanego plonu a sumą nakładów na jego uzyskanie, *wskaźnik energochłonności jednostkowej*, który stanowił iloraz sumy nakładów energii do masy uzyskanego plonu oraz *wskaźnik efektywności energetycznej produkcji zrębków*, który stanowił iloraz wartości energetycznej uzyskanego plonu biomasy do wartości skumulowanych nakładów materiałowo-energetycznych poniesionych na jego pozyskanie.

## WYNIKI I DYSKUSJA

Skumulowane nakłady materiałowo-energetyczne poniesione na założenie i prowadzenie 1 ha plantacji wierzby przy obsadzie roślin 5,2 tys. szt.·ha<sup>-1</sup>, dla obu obiektów wynosiły 48234,6 MJ·ha<sup>-1</sup>, co w przeliczeniu na rok użytkowania plantacji stanowiło 2411,7 MJ·ha<sup>-1</sup> (tab. 1).

Tabela 1. Skumulowane nakłady materiałowo-energetyczne poniesione na założenie oraz prowadzenie plantacji wierzby w systemie Eko-Salix w zależności od obsady roślin

Table 1. Accumulated material-energetic inputs incurred for establishing and running a plantation of willow in Eco-Salix system in the first year of vegetation as affected by plant density

Gęstość sadzenia (tys. sztuk·ha <sup>-1</sup> ) <i>Plant density (1000 plant·ha<sup>-1</sup>)</i>	Wyszczególnienie <i>Specification</i>	Nakłady energii (MJ·ha <sup>-1</sup> ) – <i>Energy inputs (MJ·ha<sup>-1</sup>)</i>					
		Praca ludzi <i>Labour</i>	Ciągniki <i>Tractors</i>	Maszyny <i>Machinery</i>	Nośniki energii <i>Energy media</i>	Materiały <i>Materials</i>	Razem <i>Total</i>
5,2	Wykonanie otworów <i>Making the holes</i>	3546,7	1218,2	1267,9	8393,7	–	14426,5
	Sadzenie ręczne <i>Hand planting</i>	3546,7	–	–	–	–	3546,7
	Pielęgnacja mechaniczna (kosa spalinowa) <i>Mechanical nurture (sawing machine)</i>	3200,0	–	73,9	1451,5	–	4725,4
	Sadzonki <i>Seedlings</i>	–	–	–	–	25536,0	25536,0
	Razem – <i>Total</i>	10293,3	1218,2	1341,9	9845,2	25536,0	48234,6
	Na rok użytkowania plantacji 1/20 Σ <i>Per year of plantation activity 1/20 Σ</i>	514,7	60,9	67,1	492,3	1276,8	2411,7
7,4	Razem – <i>Total</i>	13066,7	1694,5	1837,6	13126,9	35520,0	65245,7
	1/20 Σ	653,3	84,7	91,9	656,3	1776,0	3262,3

Zwiększenie gęstości sadzenia żywokołów na jednostce powierzchni do 7,4 tys. szt.·ha<sup>-1</sup> powodowało wzrost nakładów materiałowo-energetycznych o 35% w porównaniu do niższej gęstości sadzenia. Uzyskane wartości skumulowanych nakładów materiałowo-energetycznych były nieznacznie niższe niż we wcześniejszych badaniach własnych prowadzonych na glebie aluwialnej w systemie Eko-Salix w 3-letniej rotacji zbioru [Stolarski i in. 2011]. W cytowanej pracy wykazano, że najwyższe nakłady materiałowo-energetyczne (53–55%) związane były z użyciem sadzonek długich w postaci żywokołów. Potwierdzają to również aktualnie prezentowane badania. Natomiast nakłady na założenie i prowadzenie plantacji wierzby w pierwszym roku w systemie tradycyjnym są nawet trzykrotnie niższe niż uzyskane w systemie Eko-Salix [Stolarski 2009].

W obiekcie Leginy skumulowane nakłady materiałowo-energetyczne poniesione na produkcję zrębków wierzby po pięciu latach uprawy plantacji zawierały się w przedziale od 43849,7 do 55713,0 MJ·ha<sup>-1</sup> (8,8–11,1 GJ·ha<sup>-1</sup>·rok<sup>-1</sup>), odpowiednio przy wyjściowym zagęszczeniu 5,2 i 7,4 tys. szt. ha<sup>-1</sup> (tab. 2). Natomiast w obiekcie Kocibórz były one wyższe w obu gęstościach sadzenia o około 25%, ze względu na wyższe plony. We wcześniejszych badaniach [Stolarski i in. 2011] całkowite skumulowane nakłady materiałowo-energetyczne w systemie Eko-Salix w rotacji trzyletniej były niższe, jednakże w przeliczeniu na rok użytkowania plantacji były one zbliżone. Natomiast skumulowane nakłady materiałowo-energetyczne ponoszone na tradycyjną

Tabela 2. Skumulowane nakłady materiałowo-energetyczne poniesione na produkcję zrębków wierzby w systemie Eko-Salix w rotacji pięcioletniej ( $\text{MJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ )

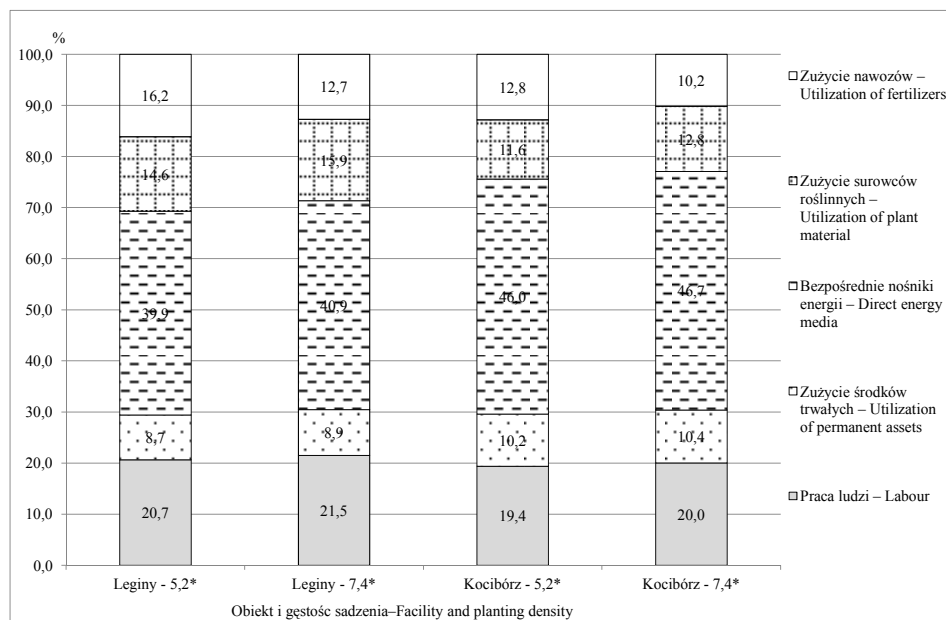
Table 2. Accumulated material-energetic inputs incurred for production of willow chips in Eco-Salix system in five-year cycle ( $\text{MJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ )

Wyszczególnienie <i>Specification</i>	Obiekt – Facility			
	Leginy		Kocibórz	
	Gęstość sadzenia (tys. szt. $\cdot\text{ha}^{-1}$ ) <i>Plant density (1000 plants<math>\cdot\text{ha}^{-1}</math>)</i>			
	5,2	7,4	5,2	7,4
Praca ludzi <i>Labour</i>	9060,3	11983,2	10701,0	13926,9
Zużycie środków trwałych (ciągniki, maszyny) <i>Utilization of permanent assets (tractors, machinery)</i>	3825,9	4984,2	5630,8	7215,4
Bezpośrednie nośniki energii <i>Direct energy media</i>	17489,6	22775,6	25381,6	32503,5
Zużycie surowców roślinnych (sadzunki) <i>Utilization of plant material (seedlings)</i>	6384,0	8880,0	6384,0	8880,0
Zużycie nawozów <i>Utilization of fertilizers</i>	7090,0	7090,0	7090,0	7090,0
Razem nakłady energii <i>Total energy inputs</i>	43849,7	55713,0	55187,5	69615,9

uprawę i produkcję zrębków w rotacji 3-letniej były średnio od 2 do 5  $\text{GJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$  wyższe [Stolarski 2009]. Z kolei nakłady te w intensywnych technologiach produkcji rzepaku są jeszcze wyższe [Budzyński i in. 2004, Jankowski 2007].

W strukturze strumieni energii dominowały nakłady związane z użyciem bezpośrednich nośników energii (39,9–46,7%) (rys. 1). W obiekcie Kocibórz były one wyższe niż w Leginach. Na obu siedliskach ich udział wzrastał wraz ze wzrostem gęstości sadzenia. Na drugim miejscu znajdowały się nakłady związane z pracą ludzi. W Leginach (20,7–21,5%) były one nieznacznie wyższe niż w Kociborzu. W dalszej kolejności plasowały się nakłady związane z zużyciem surowców roślinnych, nawozów mineralnych i środków trwałych. Struktura nakładów energetycznych w systemie Eko-Salix różni się w stosunku do tradycyjnego systemu produkcji wierzby, w którym dominują nakłady energii na nawożenie mineralne oraz paliwa [Heller i in. 2003, Kisiel i in. 2003, Szczukowski i in. 2007].

Wartość energetyczna plonu biomasy wierzby pozyskanego w rotacji 5-letniej z obiektu Leginy była znacznie niższa niż z Kociborza (tab. 3). Dla pierwszego obiektu zawierała się ona w przedziale od 404,8  $\text{GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$  (81,0  $\text{GJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$ ) do 521,6  $\text{GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$  (104,3  $\text{GJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$ ), odpowiednio przy zagęszczeniu 5,2 i 7,4 tys. szt. $\cdot\text{ha}^{-1}$ . Natomiast w Kociborzu wartość tej cechy była odpowiednio o 47,1 i 58,2  $\text{GJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$  wyższa. W produkcji biomasy w systemie Eko-Salix na madzie próchnicznej ciężkiej całkowitej, w rotacji trzyletniej uzyskano wyższą wartość energetyczną plonu (162–220  $\text{GJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$ ) [Stolarski i in. 2011]. Z kolei wartość energetyczna plonu wierzby pozyskanego w rotacji 3-letniej uprawianej w systemie tradycyjnym zawierała się



\* – gęstość sadzenia tys. szt. żywokółów·ha<sup>-1</sup> – plant density 1000 plants·ha<sup>-1</sup>

Rys. 1. Struktura skumulowanych nakładów materiałowo-energetycznych poniesionych na produkcję zrębków wierzby w systemie Eko-Salix w rotacji pięcioletniej (%)  
 Fig. 1. The structure of accumulated material-energetic inputs incurred for production of willow chips in Eco-Salix system in five-year cycle (%)

w przedziale od 188 do 349 GJ·ha<sup>-1</sup>·rok<sup>-1</sup> [Stolarski 2009]. Natomiast w badaniach Kwaśniewskiego [2010] prowadzonych w systemie tradycyjnym wartość ta wynosiła 226 GJ·ha<sup>-1</sup>·rok<sup>-1</sup>. W Szwecji na plantacjach polowych wartość energetyczna plonu wierzby może wynosić powyżej 200 GJ·ha<sup>-1</sup>·rok<sup>-1</sup> [Börjesson i Brendes 2006].

Zysk energii wahał się od 361,0 GJ·ha<sup>-1</sup> do 465,9 GJ·ha<sup>-1</sup> w obiekcie Leginy, odpowiednio przy niższym i wyższym zagęszczeniu roślin (tab. 3). Wartości te dla obiektu Kocibórz były wyższe i wynosiły odpowiednio: 585,1 i 743,2 GJ·ha<sup>-1</sup>. Najniższy wskaźnik energochłonności jednostkowej produkcji zrębków (685,2 MJ·Mg<sup>-1</sup>) w systemie Eko-Salix odnotowano w obiekcie Kocibórz przy zagęszczeniu 7,4 tys. szt.·ha<sup>-1</sup>. Nieznacznie wyższy był on w tym samym obiekcie przy niższym zagęszczeniu. Natomiast w Leginach energochłonność produkcji zrębków była o 25–26% wyższa niż w Kociborzu. W związku z tym wartości wskaźnika efektywności energetycznej produkcji zrębków systemie Eko-Salix w rotacji pięcioletniej były wyższe w Kociborzu (11,6) niż w Leginach (9,3). Wartość wskaźnika efektywności energetycznej pomiędzy gęstościami sadzenia w obu obiektach nie była istotna. Niższą energochłonność produkcji zrębków oraz wyższe wartości wskaźnika efektywności energetycznej w systemie Eko-Salix wykazano w uprawie wierzby na glebie aluwialnej w trzyletniej rotacji zbioru [Stolarski i in. 2011]. Również w tradycyjnym systemie uprawy uzyskuje się zróżnicowane wartości wskaźnika efektywności energetycznej produkcji wierzby [Heller i in. 2003, Kisiel i in. 2003, Matthews 2001, Szczukowski i in. 2007, Piskier 2008]. Istotny wpływ na wartość wskaźnika efektywności

Tabela 3. Efektywność energetyczna produkcji zrębków wierzby, w systemie Eko-Salix w rotacji pięcioletniej loco plantacja

Table 3. Energetic efficiency of the production of willow chips, in Eco-Salix system in five-year cycle loco plantation

Wyszczególnienie <i>Specification</i>	Obiekt – Facility			
	Leginy		Kocibórz	
	Gęstość sadzenia (tys. szt.·ha <sup>-1</sup> ) <i>Plant density (1000 plants·ha<sup>-1</sup>)</i>			
	5,2	7,4	5,2	7,4
Nakłady energii (GJ·ha <sup>-1</sup> ) <i>Energy inputs (GJ·ha<sup>-1</sup>)</i>	43,8	55,7	55,2	69,6
Wartość energetyczna plonu (GJ·ha <sup>-1</sup> ) <i>Energetic value of crop (GJ·ha<sup>-1</sup>)</i>	404,8	521,6	640,2	812,8
Zysk energii skumulowanej (GJ·ha <sup>-1</sup> ) <i>Energy gain accumulated (GJ·ha<sup>-1</sup>)</i>	361,0	465,9	585,1	743,2
Wskaźnik energochłonność jednostkowej (MJ·Mg <sup>-1</sup> ) <i>Index of energy consumption of wood chips production (MJ·Mg<sup>-1</sup>)</i>	866,6	854,5	689,6	685,2
Wskaźnik efektywności energetycznej produkcji zrębków <i>Index of energetic effectiveness of wood chips production</i>	9,2	9,4	11,6	11,7

energetycznej mają: sposób przygotowania i rodzaj stanowiska glebowego, gęstość nasadzeń na plantacji, wysokość nawożenia mineralnego, zużycie środków ochrony roślin, zabiegi agrotechniczne, a w szczególności sposób zbioru wierzby. Wskaźnik ten w trzyletniej rotacji zbioru był zróżnicowany i zawarty w przedziale od 13,6 do 22,1 w zależności od gęstości sadzenia zręzków [Stolarski 2009]. Z kolei Kwaśniewski [2010] podaje, że wskaźnik efektywności energetycznej produkcji biomasy z trzyletnich plantacji wierzby był bardzo zróżnicowany dla analizowanych obiektów i zawierał się w przedziale 15,4–40,7. Uzyskane w doświadczeniu własnym wartości wskaźnika efektywności energetycznej produkcji zrębków w systemie Eko-Salix na glebach nieprzydatnych pod uprawy konsumpcyjne były wyższe w porównaniu z wartościami tego wskaźnika uzyskiwanymi przy produkcji jednorocznych roślin rolniczych [Budzyński i in. 2004, Dobek 2007, Gawęda i in. 2006, Nasalski i in. 2004].

## WNIOSKI

1. W systemie Eko-Salix w pięcioletniej rotacji zbioru przy zastosowaniu ekstensywnych rozwiązań agrotechnicznych na glebie czarnej ziemi zbrunatniałej można uzyskać od 81 do 104 GJ·ha<sup>-1</sup>·rok<sup>-1</sup>, natomiast na glebie torfowo-murszowej od 128 do 163 GJ·ha<sup>-1</sup>·rok<sup>-1</sup>, odpowiednio przy niższym (5,2 tys. szt.·ha<sup>-1</sup>) i wyższym (7,4 tys. szt.·ha<sup>-1</sup>) zagęszczeniu roślin.

2. Skumulowane nakłady materiałowo-energetyczne na uprawę wierzby i produkcję zrębków wynoszą od 8,8 do 13,9 GJ·ha<sup>-1</sup>·rok<sup>-1</sup>, a w strukturze strumieni energii dominują nakłady związane z użyciem bezpośrednich nośników energii.
3. Wskaźnik efektywności energetycznej produkcji wierzby wyrażony ilorazem wartości energetycznej uzyskanego plonu oraz wartości skumulowanych nakładów materiałowo-energetycznych poniesionych na jego wytworzenie wynosi od 9,2 do 11,7.

### PIŚMIENNICTWO

- Anuszewski R. 1987. Metoda oceny energochłonności produktów rolniczych. *Zagad. Ekon. Rol.* 4: 16–26.
- Börjesson P., Berndes G. 2006. The prospects for willow plantations for wastewater treatment in Sweden. *Biomass Bioenerg.* 30: 428–438.
- Budzyński W.S., Jankowski K.J., Szczepirot M. 2004. Wydajność energetyczna różnych technologii uprawy rzepaku ozimego. *Rośl. Oleiste – Oilseed Crops.* 25: 327–344.
- Dobek T.K. 2007. Ocena efektywności ekonomicznej i energetycznej produkcji pszenicy ozimej i rzepaku ozimego wykorzystanych do produkcji biopaliw. *Inż. Rol.* 6: 41–48.
- Gawęda D., Szymankiewicz K., Harasim E. 2006. Efektywność energetyczna różnych systemów uprawy roli w 3-półowym zmianowaniu. *Pam. Puł.* 142: 105–116.
- Heller M.C., Keoleian G.A., Volk T.A. 2003. Life cycle assessment of a willow bioenergy cropping system. *Biomass Bioenerg.* 25: 147–165.
- Jankowski K. 2007. Siedliskowe i agrotechniczno-ekonomiczne uwarunkowania produkcji nasion rzepaku ozimego na cele spożywcze i energetyczne. *Wyd. UW-M Olsztyn, Rozpr. Monogr.* 131: ss. 174.
- Kisiel R., Stolarski M., Szczukowski S., Tworkowski J. 2003. Energochłonność i efektywność energetyczna uprawy wierzby krzewiastej. *Fragm. Agron.* 20(3): 87–97.
- Kwaśniewski D. 2010. Efektywność energetyczna produkcji biomasy z trzyletniej wierzby. *Inż. Rol.* 5: 113–119.
- Matthews R.W. 2001. Modelling of energy and carbon budgets of wood fuel coppice systems. *Biomass Bioenerg.* 21: 1–19.
- Nasalski Z., Sadowski T., Stępień A. 2004. Produkcyjna, ekonomiczna i energetyczna efektywność produkcji jęczmienia ozimego przy różnych poziomach nawożenia azotem. *Acta Sci. Pol., Agricultura* 3: 83–90.
- Piskier T. 2008. Efektywność energetyczna uprawy wierzby w różnych warunkach glebowych. *Inż. Rol.* 2: 215–220.
- Stolarski M. 2009. Agrotechniczne i ekonomiczne aspekty produkcji biomasy wierzby krzewiastej (*Salix* spp.) jako surowca energetycznego. *Rozpr. Monogr., UWM Olsztyn* 148, ss. 145.
- Stolarski M., Szczukowski S., Tworkowski J. 2011. Efektywność energetyczna produkcji biomasy wierzby w systemie Eko-Salix. *Fragm. Agron.* 28(1): 62–69.
- Szczukowski S., Stolarski M., Tworkowski J., Kopaczal M. 2007. Efektywność energetyczna produkcji wierzby krzewiastej w Dolinie Dolnej Wisły. *Fragm. Agron.* 24(4): 192–197.
- Szeptycki A., Wójcicki Z. 2003. Postęp technologiczny i nakłady energetyczne w rolnictwie do 2020 r. *IBMER Warszawa*: ss. 242.
- Tworkowski J., Kuś J., Szczukowski S., Stolarski M. 2010. Produkcyjność roślin uprawianych na cele energetyczne. W: *Nowoczesne technologie pozyskiwania i energetycznego wykorzystania biomasy*. Bocian P., Golec T., Rakowski J. (red.). *Wyd. Inst. Energ. Warszawa*: 34–49.
- Wójcicki Z. 2005. Metodyczne problemy badania energochłonności produkcji rolniczej. *Probl. Inż. Rol.* 1: 5–12.
- Wójcicki Z. 2007. Poszanowanie energii i środowiska w rolnictwie i na obszarach wiejskich. *IBMER Warszawa*: ss. 124.

J. TWORKOWSKI, M. STOLARSKI, S. SZCZUKOWSKI

**ENERGY EFFICIENCY OF WILLOW BIOMASS PRODUCTION IN THE EKO-SALIX SYSTEM****Summary**

The aim of the study was to determine the accumulated material and energy expenditure and the energy efficiency of small-size wood production in the Eko-Salix system in a 5-year rotation at two sites on agricultural land, unusable for cultivation of consumer plants. The study was based on a three-factorial field experiment, conducted in triplicate in the years 2006–2010. The following stages were identified for the analysis of the energy effectiveness of willow production: setting up a plantation (making holes with a hydraulic drill, manual planting of willow cuttings and pressing them in), cutting weeds with a combustion scythe. The following were identified with respect to material and energy expenditure on biomass production after the fifth year of cultivation: outlay for setting up the plantation, fertilisation, manual harvest, cutting up wood and biomass transport within the plantation. All outlays were divided into stages. The first stage included setting up the plantation and the second stage covered operating it. The following energy streams were identified in an analysis of material and energy spending on setting up the plantation and willow production: direct energy carriers (fuels), wear of fixed assets and consumption of materials for their repair (tractors, machines, tools), consumption of fertilisers, consumption of plant materials (seedlings) and human labour. An analysis of the energy effectiveness of willow chips production is presented based on average yield of fresh biomass of cultivars and clones examined in the experiment at two sites and at two planting densities. The yield of willow biomass with the calorific value of 81 do 104 GJ·ha<sup>-1</sup>·year<sup>-1</sup> was achieved in the Eko-Salix system in 5-year rotation, using extensive cultivation procedures on black brownish soil [8Di], whereas the yield on peat-muck soil [L-MtII cb] was equal to 128 and 163 GJ·ha<sup>-1</sup>·year<sup>-1</sup>, for the lower (5.2 thousand plants·ha<sup>-1</sup>) and higher (7.4 thousand plants·ha<sup>-1</sup>) plant density, respectively. The accumulated material and energy spending on willow cultivation and willow chips production ranged from 8.8 to 13.9 GJ·ha<sup>-1</sup>·year<sup>-1</sup>. The energy efficiency index for willow chips production ranged from 9.2 to 11.7.