

EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNA PRODUKCJI BIOMASY WIERZBY W SYSTEMIE EKO-SALIX*

MARIUSZ STOLARSKI, STEFAN SZCZUKOWSKI, JÓZEF TWORKOWSKI

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

mariusz.stolarski@uwm.edu.pl

Synopsis. W pracy określono skumulowane nakłady materiałowo-energetyczne oraz wskaźnik efektywności energetycznej uprawy i produkcji zrębków wierzby w systemie Eko-Salix przy zastosowaniu żywokołów oraz ekstensywnych rozwiązań agrotechnicznych (niskie nawożenie, ograniczona pielęgnacja) w 3-letniej rotacji zbioru na gruncie rolniczym nieprzydatnym pod rośliny konsumpcyjne. Skumulowane nakłady materiałowo-energetyczne na uprawę i zbiór wierzby wyniosły od 11,3 GJ·ha⁻¹·rok⁻¹ przy obsadzie roślin 5,2 tys. szt.·ha⁻¹ do 14,9 GJ·ha⁻¹·rok⁻¹ przy obsadzie 7,4 tys. szt.·ha⁻¹. Natomiast wartość wskaźnika efektywności energetycznej (14,3–14,8) była zbliżona przy obu gęstościach sadzenia.

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

Produkcja biomasy na cele energetyczne powinna charakteryzować się niskimi nakładami materiałowo-energetycznymi na jej pozyskanie, tak aby uzyskać możliwie jak najwyższą wartość wskaźnika efektywności energetycznej. Tylko w takim przypadku dalsze etapy konwersji biomasy do wtórnych nośników energii będą uzasadnione z ekologicznego i odnawialnego punktu widzenia. Jest to o tyle istotne, że biomasa jako surowiec energetyczny to dominujące źródło energii odnawialnej w Polsce oraz UE [EurObserv'ER 2008, Grzybek 2008, GUS 2009]. Oczywiście obecnie najczęściej jest ona pozyskiwana z lasów i przemysłu przetwarzającego drewno. Jednakże zgodnie z regulacjami krajowymi struktura źródeł pochodzenia biomasy musi się zmienić na rzecz zdecydowanego zwiększenia udziału biomasy rolniczej [Rozporządzenie... 2008], co jest niewątpliwie dużym wyzwaniem dla rolnictwa. Musi być jednakże zachowana priorytetowa produkcja surowców żywnościowych na gruntach rolniczych i nie może być ona zagrożona wytwarzaniem paliw [Budzyński i in. 2009, Kuś i Faber 2009].

W Polsce dominuje system uprawy wierzby energetycznej na gruntach ornych w zagęszczeniu od 20 do 40 tys. szt. roślin·ha⁻¹ o 3-letniej rotacji zbioru, który obejmuje typowe zabiegi rolnicze. Jedną z nowych koncepcji jest pozyskiwanie biomasy drzewnej w systemie Eko-Salix [Tworkowski i in. 2010] na gruntach rolniczych nieprzydatnych pod uprawy konsumpcyjne, odłogowane, okresowo podmokłe lub stanowiące ekstensywne użytki zielone, głównie kompleksu 2z (klasa III i IV). System ten zakłada uproszczony sposób przygotowania stanowiska – bez orki z nasadzeniem odmian wierzby w postaci tzw. żywokołów – sadzonek długich, z okresowym koszeniem chwastów i ich mulczowaniem.

* Praca wykonana w ramach projektu – PBZ-MNiSW–1/3/2006

W pracy postawiono hipotezę, że uprawa wierzby w systemie Eko-Salix na gruntach nie użytkowanych rolniczo oraz pozyskanie biomasy może charakteryzować się niskim 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 3-letniej rotacji na gruntach rolniczych nieprzydatnych pod rośliny konsumpcyjne.

MATERIAŁ I METODY

Podstawą prowadzonych badań było ściśle doświadczenie polowe dwuczynnikowe, prowadzone w trzech powtórzeniach w latach 2006–2008 na madzie próchnicznej ciężkiej, całkowitej (okresowo nadmiernie wilgotnej) w pradolinie Wisły na Nizinie Kwidzyńskiej, w miejscowości Obory (53°43' N, 18°53' E).

Czynnikami I w doświadczeniu było sześć odmian i klonów wierzby. Czynnikiem II stanowiła gęstość sadzenia sadzonek długich (żywokołów): 5,2 tys. szt.·ha⁻¹ i 7,4 tys. szt.·ha⁻¹. Żywokoły, sadzonki długie, nieukorzenione o długości 2,4 m pozyskano z dwuletnich pędów wierzb.

W analizie efektywności energetycznej produkcji wierzby przeprowadzonej w systemie Eko-Salix wyróżniono następujące etapy: założenie plantacji (wykonanie oprysku Roundupem, wykonanie otworów wodnym świdrem hydraulicznym oraz ręczne sadzenie żywokołów i ich dociskanie), mulczowanie chwastów kosą spalinową (2x).

W zakresie nakładów materiałowo-energetycznych produkcji biomasy wierzby po trzecim roku jej uprawy wyróżniono: nakłady związane z założeniem plantacji, nawożenie, ręczny zbiór roślin przy użyciu mechanicznych pił łańcuchowych, zrębkowanie roślin przy użyciu rębaka i transport biomasy w obrębie plantacji.

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.

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 i innych agrochemikaliów, zużycie roślinnych surowców rolniczych (sadzonki) i praca ludzi.

Nakłady energetyczne związane z bezpośrednimi nośnikami energii, nawozami mineralnymi, agrochemikaliami, 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 na podstawie średniego plonu świeżej masy badanych w doświadczeniu odmian i klonów w dwóch gęstościach sadzenia. Plon świeżej biomasy wierzby po trzech latach vegetacji dla każdej odmiany w obu zagęszczeniach podano w pracy [Tworkowski i in. 2010]. Iloczyn wartości opalowej świeżej biomasy oraz jej plon z powierzchni 1 ha stanowił wartość energetyczną plonu.

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 nakła-

dów 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 uprawianej w systemie Eko-Salix, przy obsadzie roślin 5,2 tys. szt. \cdot ha⁻¹ wynosiły 49500,9 MJ \cdot ha⁻¹ (tab. 1). W przeliczeniu na rok użytkowania plantacji (przy założonym 20-letnim okresie jej użytkowania) wyniosły one 2475,0 MJ \cdot ha⁻¹. Zwiększanie gęstości sadzenia żywokółów na jednostce powierzchni do 7,4 tys. szt. \cdot ha⁻¹ powodowało wzrost nakładów materiałowo-energetycznych do 66782,5 MJ \cdot ha⁻¹. W badaniach Stolarskiego [2009] skumulowane nakłady materiałowo-energetyczne poniesione na założenie i prowadzenie w pierwszym

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 \cdot ha ⁻¹) <i>Plant density (1000 plant\cdotha⁻¹)</i>	Wyszczególnienie <i>Specification</i>	Nakłady energii – <i>Energy inputs</i> (MJ \cdot ha ⁻¹)					
		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	Oprysk (Roundup) <i>Spraying (Roundup)</i>	20,0	13,7	14,3	94,7	–	142,7
	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>	–	–	–	–	26227,6	26227,6
	Pestycydy <i>Pesticides</i>	–	–	–	–	432,0	432,0
	Razem – <i>Total</i>	10313,4	1232,0	1356,2	9939,9	26659,6	49500,9
	Na rok użytkowania plantacji 1/20 Σ <i>Per year of plantation activity 1/20 Σ</i>	515,7	61,6	67,8	497,0	1333,0	2475,0
7,4	Razem – <i>Total</i>	13086,7	1708,3	1851,9	13221,6	36914,0	66782,5
	1/20 Σ	654,3	85,4	92,6	661,1	1845,7	3339,1

roku 1 ha plantacji w systemie tradycyjnym na glebie ornej wyniosły średnio 20075 MJ·ha⁻¹, a więc były one średnio prawie 3-krotnie niższe niż w badanym systemie Eko-Salix. Bardzo wysokie w tym systemie nakłady materiałowo-energetyczne (53–55%) w obu badanych gęstościach sadzenia związane były z użyciem sadzonek długich w postaci żywokołów. Na drugim miejscu znajdowały się nakłady związane z wykonaniem otworów wodnym świdrem hydraulicznym oraz ręczne sadzenie żywokołów.

Skumulowane nakłady materiałowo-energetyczne poniesione na produkcję zrębków wierzby w systemie Eko-Salix po trzech latach uprawy plantacji przy wyjściowym zagęszczeniu 5,2 tys. szt·ha⁻¹ wyniosły 33968,0 MJ·ha⁻¹ (11,3 GJ·ha⁻¹·rok⁻¹) (tab. 2). Zwiększenie gęstości sadzenia powodowało wzrost wartości skumulowanych nakładów materiałowo-energetycznych do 44612,7 MJ·ha⁻¹ (14,9 GJ·ha⁻¹·rok⁻¹). W innym doświadczeniu [Stolarski 2009] skumulowane nakłady materiałowo-energetyczne na tradycyjną uprawę i produkcję zrębków loco plantacja na glebie ornej, aluwialnej w rotacji 3-letniej wyniosły od 13,8 do 15,8 GJ·ha⁻¹·rok⁻¹. A więc nakłady energii na produkcję wierzby w obu systemach były zbliżone. Należałoby poszukiwać możliwości ich obniżenia w systemie Eko-Salix poprzez zmechanizowanie sadzenia oraz zbioru roślin wierzby, co ograniczyłoby ręczną pracę ludzi. Nakłady energii skumulowanej w uprawie rzepaku ozimego [Budzyński i in. 2004] wyniosły średnio 22 GJ·ha⁻¹, natomiast w badaniach Jankowskiego [2007] w technologii wysokonakładowej wyniosły one 31,7 GJ·ha⁻¹.

W strukturze strumieni energii w badaniach własnych dominowały nakłady związane z użyciem bezpośrednich nośników energii (38–39%) (tab. 2). Na drugim miejscu znajdowały się nakłady związane z pracą ludzi, około 28%. W strukturze strumieni energii najmniejszy udział stanowiły nakłady związane z wykorzystaniem w tym systemie niewielkiej ilości nawozów

Tabela 2. Skumulowane nakłady materiałowo-energetyczne poniesione na technologię produkcji zrębków wierzby w systemie Eko-Salix w rotacji trzyletniej, (MJ·ha⁻¹, %)

Table 2. Accumulated material-energetic inputs incurred for production technology of willow chips in Eco-Salix system in three-year cycle, (MJ·ha⁻¹, %)

Wyszczególnienie <i>Specification</i>	Gęstość sadzenia (tys. szt·ha ⁻¹) <i>Plant density (1000 plants·ha⁻¹)</i>			
	5,2		7,4	
	MJ·ha ⁻¹	%	MJ·ha ⁻¹	%
Praca ludzi <i>Labour</i>	9366,8	27,6	12547,7	28,1
Zużycie środków trwałych (ciągniki, maszyny) <i>Utilization of permanent assets (tractors, machinery)</i>	3811,1	11,2	5163,7	11,6
Bezpośrednie nośniki energii <i>Direct energy media</i>	13011,2	38,3	17584,1	39,4
Zużycie surowców roślinnych (sadzonki) <i>Utilization of plant material (seedlings)</i>	3998,9	11,8	5537,1	12,4
Zużycie nawozów <i>Utilization of fertilizers</i>	3780,0	11,1	3780,0	8,5
Razem nakłady energii <i>Total energy inputs</i>	33968,0	100,0	44612,7	100,0

mineralnych. W innych badaniach w tradycyjnej uprawie wierzby na gruntach ornym dominowały nakłady na nawożenie mineralne oraz paliwa [Kisiel i in. 2003, Szczukowski i in. 2007]. Heller i in. [2003] podają, że w strukturze strumieni energii ponoszonych na uprawę i produkcję zrębków wierzby w systemie tradycyjnym dominowały paliwa i nawożenie, odpowiednio 46 i 37%. Ograniczenie nawożenia mineralnego roślin w systemie Eko-Salix wpływa na redukcję nakładów energetycznych w porównaniu do systemu powszechnie stosowanego, a tym samym na wzrost efektywności energetycznej produkcji paliwa stałego z wierzby.

Wartość energetyczna plonu biomasy wierzby pozyskanego w rotacji 3-letniej w systemie Eko-Salix zawierała się w przedziale od 485,8 GJ·ha⁻¹ (161,9 GJ·ha⁻¹·rok⁻¹) do 658,7 GJ·ha⁻¹ (219,6 GJ·ha⁻¹·rok⁻¹), odpowiednio przy zagęszczeniu 5,2 i 7,4 tys. szt·ha⁻¹ (tab. 3). Börjesson [1996] podaje, że wartość energetyczna plonu wierzby na plantacjach polowych w Szwecji, prowadzonych tradycyjnie i zbieranych w rotacji 3-letniej wynosiła średnio 170 GJ·ha⁻¹·rok⁻¹. Po usprawnieniu technologii jej uprawy należy się spodziewać, że wartość ta wzrośnie do ponad 200 GJ·ha⁻¹·rok⁻¹ [Börjesson i Brendes 2006]. W innych badaniach wartość energetyczna plonu wierzby pozyskanej w rotacji 2-letniej wynosiła od 73 do 290 GJ·ha⁻¹·rok⁻¹ [Labrecque i in. 1997]. Wartość energetyczna plonu wierzby pozyskanego w rotacji 3-letniej uprawianej w systemie tradycyjnym we wcześniejszym doświadczeniu [Stolarski 2009] zawierała się w przedziale od 188 do 349 GJ·ha⁻¹·rok⁻¹.

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

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

Wyszczególnienie <i>Specification</i>	Gęstość sadzenia (tys. szt·ha ⁻¹) <i>Plant density (1000 plants·ha⁻¹)</i>	
	5,2	7,4
Nakłady energii (GJ·ha ⁻¹) <i>Energy inputs (GJ·ha⁻¹)</i>	34,0	44,6
Wartość energetyczna plonu (GJ·ha ⁻¹) <i>Energetic value of crop (GJ·ha⁻¹)</i>	485,8	658,7
Zysk energii (GJ·ha ⁻¹) <i>Energy gain (GJ·ha⁻¹)</i>	451,8	614,1
Energochłonność produkcji zrębków (MJ·Mg ⁻¹) <i>Energy consumption of wood chips production (MJ·Mg⁻¹)</i>	613,9	594,7
Wskaźnik efektywności energetycznej produkcji zrębków <i>Index of energetic effectiveness of wood chips production</i>	14,3	14,8

Zysk energii w doświadczeniu własnym wahał się od 451,8 do 614,1 GJ·ha⁻¹ (151-205 GJ·ha⁻¹·rok⁻¹) odpowiednio przy niższym i wyższym zagęszczeniu roślin wierzby na powierzchni 1 hektara (tab. 3). Energochłonność produkcji zrębków wynosiła od 594,7 MJ·Mg⁻¹ przy zagęszczeniu 7,4 tys. szt·ha⁻¹ do 613,9 MJ·Mg⁻¹ przy niższym zagęszczeniu. Natomiast wskaźnik efektywności energetycznej produkcji zrębków wierzby w systemie Eko-Salix był na

zadawalającym poziomie, zbliżony przy obu zagęszczeniach roślin i zawarty w przedziale od 14,3 do 14,8.

Należy uznać, że uzyskane wartości wskaźnika efektywności energetycznej produkcji zrębków w systemie Eko-Salix kształtowały się na zadawalającym poziomie. W innym eksperymencie [Stolarski 2009] wskaźnik efektywności energetycznej produkcji zrębków wierzby w obrębie plantacji na glebie aluwialnej w powszechnie stosowanym systemie uprawy polowej w rotacji 3-letniej był zróżnicowany i zawarty w przedziale od 13,6 do 22,1 w zależności od gęstości sadzenia rzęzów. Wartość wskaźnika efektywności energetycznej produkcji wierzby na gruntach ornych w innych opracowaniach [Heller i in. 2003, Kisiel i in. 2003, MacPherson 1995, Matthews 2001, Szczukowski i in. 2007] zawierała się w szerokim przedziale od 17 do 65. Zróżnicowanie wielkości tego wskaźnika wynikało ze sposobu przygotowania stanowiska i gęstości nasadzeń rzęzów na plantacji, wysokości nawożenia mineralnego, zużycia środków ochrony roślin i innych zabiegów agrotechnicznych, a szczególnie sposobu zbioru wierzby.

Uzyskane w doświadczeniu własnym wartości wskaźnika efektywności energetycznej produkcji zrębków w systemie Eko-Salix na glebie aluwialnej, marginalnej nieprzydatnej pod uprawy konsumpcyjne były wysokie w porównaniu z wartościami uzyskiwanymi przy produkcji jednorocznych roślin rolniczych [Dobek 2007, Nasalski i in. 2004]. Budzyński i in. [2004] podają, że wskaźnik efektywności energetycznej produkcji nasion rzepaku wynosił od 2,3 do 3,6 w zależności od zastosowanej technologii. Po uwzględnieniu wartości energetycznej słomy jego wartość wzrosła do zakresu 5,3–6,9. Efektywność energetyczna produkcji ziemniaka, pszenicy ozimej oraz soi, zawarta była w przedziale od 2,2 do 4,3 w zależności od systemów uprawy roli oraz głębokości wykonywania zabiegów uprawowych [Gawęda i in. 2006]. Wielokrotnie wyższe wartości wskaźnika efektywności energetycznej w uprawie wierzby niż roślin spożywczych wskazują, że do celów bioenergetycznych można zalecać uprawę wierzby w systemie Eko-Salix.

WNIOSKI

1. W systemie Eko-Salix na glebie aluwialnej nieprzydatnej pod rośliny konsumpcyjne w rotacji 3-letniej można uzyskać duże ilości mało wymiarowego drewna wierzby o wartości energetycznej od 162 do 220 GJ·ha⁻¹·rok⁻¹, odpowiednio przy niższym (5,2 tys. szt.·ha⁻¹) i wyższym (7,4 tys. szt.·ha⁻¹) zagęszczeniu roślin na powierzchni 1 hektara.
2. Skumulowane nakłady materiałowo-energetyczne na uprawę wierzby i produkcję zrębków w systemie Eko-Salix w rotacji 3-letniej przy zastosowaniu ekstensywnych rozwiązań agrotechnicznych (niskie nawożenie, ograniczona pielęgnacja) zawarte były w przedziale od 11,3–14,9 GJ·ha⁻¹·rok⁻¹.
3. Wskaźnik efektywności energetycznej produkcji zrębków wierzby (14,3–14,8) wyrażony ilorazem wartości energetycznej uzyskanego plonu do nakładów na jego wytworzenie w systemie Eko-Salix w rotacji 3-letniej był niższy od jego wartości cytowanych w literaturze dla systemu tradycyjnego.
4. Nakłady materiałowo-energetyczne na założenie plantacji wierzby w systemie Eko-Salix były wysokie w doświadczeniu i wynosiły średnio 52 GJ·ha⁻¹. Wynikały one z użycia sadzonek długich w postaci żywokołów i ich sadzenia. Jednakże rozkładają się one na założony 20-letni okres jej użytkowania (2,6 GJ·ha⁻¹·rok⁻¹).

PIŚMIENNICTWO

- Anuszewski R. 1987. Metoda oceny energochłonności produktów rolniczych. Zagad. Ekon. Rol. 4: 16–26.
- Börjesson P. 1996. Energy analysis of biomass production and transportation. Biomass Bioenerg. 11: 305–318.
- 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., Szczebiot M. 2004. Wydajność energetyczna różnych technologii uprawy rzepaku ozimego. Rośl. Oleiste/Oilseed Crops 25: 327–344.
- Budzyński W., Szczukowski S., Tworkowski J. 2009. Wybrane problemy z zakresu produkcji roślinnej na cele energetyczne. W: „Przyszłość sektora rolno-spożywczego i obszarów wiejskich”. A. Harasim (red). I Kongres Nauk Rolniczych, Nauka-Praktyce. IUNG-PIB Puławy: 77–89.
- Dobek T.K. 2007. Ocena efektywności ekonomicznej i energetycznej produkcji pszenicy ozimej i rzepaku ozimego wykorzystanych do produkcji biopaliw. Inż. Rol. 6: 41–48.
- EurObserv'ER. 2008. The state of renewable energies in Europe. 8th EurObserv'ER Report: ss. 82.
- Gawęda D., Szymankiewicz K., Harasim E. 2006. Efektywność energetyczna różnych systemów uprawy roli w 3-półowym zmianowaniu. Pam. Puł. 142: 105–116.
- Grzybek A. 2008. Ziemia jako czynnik warunkujący produkcję biopaliw. Prob. Inż. Rol. 1: 63–70.
- GUS. 2009. Energia ze źródeł odnawialnych w 2008 roku. Informacje i opracowania statystyczne. Warszawa.
- 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.
- Kuś J., Faber A. 2009. Produkcja roślinna na cele energetyczne a racjonalne wykorzystanie rolniczej przestrzeni produkcyjnej Polski. W: „Przyszłość sektora rolno-spożywczego i obszarów wiejskich”. A. Harasim (red). I Kongres Nauk Rolniczych, Nauka-Praktyce. IUNG-PIB Puławy: 63–76.
- Labrecque M., Teodorescu T.I., Daigle S. 1997. Biomass productivity and wood energy of *Salix* species after 2 years growth in SRIC fertilized with wastewater sludge. Biomass Bioenerg. 12: 409–417.
- MacPherson G. 1995. Home - grown energy from short-rotation coppice. Farming Press North America: ss. 214.
- 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(1): 83–90.
- 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.
- Stolarski M. 2009. Agrotechniczne i ekonomiczne aspekty produkcji biomasy wierzby krzewiastej (*Salix* spp.) jako surowca energetycznego. Wyd. UW-M Olsztyn, Rozpr. Monogr. 148: ss. 145.
- 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., Szczukowski S., Stolarski M. 2010. Płonowanie oraz cechy morfologiczne wierzby uprawianej w systemie Eko-Salix. Fragm. Agron. 27(4): 135–146.

- 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.

M. STOLARSKI, S. SZCZUKOWSKI, J. TWORKOWSKI

THE ENERGY EFFICIENCY OF WILLOW PRODUCTION IN THE ECO-SALIX SYSTEM

Summary

Those studies determined the cumulative materials and energy outlays, yield calorific value, cumulated energy gain, unit energy consumption index and energy efficiency of willow chip production in the Eco-Salix system using long stem pieces and extensive agritechnical solutions (low-level fertilisation, limited cultivation measures) in a three-year harvest rotation cycle on agricultural land unusable for consumption plants. The study was based on a two-factorial field experiment, carried out in three replications in 2006–2008 on heavy humic alluvial soil, complete (periodically excessively humid) in the Vistula Proglacial Valley in the Kwidzyn Lowlands. Cumulative material and energy outlays for setting up and running a 1 ha willow plantation in the Eco-Salix system with a plant density of 5.2 thousand plants·ha⁻¹ amounted to 49.5 GJ·ha⁻¹. Increasing the planting density of long stem pieces to 7.4 thousand·ha⁻¹ brought about an increase in the material and energy outlays to 66.8 GJ·ha⁻¹. Cumulative material and energy outlays for willow cultivation and harvest ranged from 11.3 GJ·ha⁻¹·year⁻¹ at a planting density of 5.2 thousand·ha⁻¹ to 14.9 GJ·ha⁻¹·year⁻¹ at a density of 7.4 thousand·ha⁻¹. The calorific value of the willow yield obtained in the Eco-Salix cultivation ranged from 485.8 to 658.7 GJ·ha⁻¹, at a plant density of 5.2 and 7.4 thousand·ha⁻¹, respectively. In the per-year use of plantation the yield calorific value ranged from 162 to 220 GJ·ha⁻¹·year⁻¹ at the lower (5.2 thousand·ha⁻¹) and higher (7.4 thousand·ha⁻¹) planting density, respectively. The energy gain ranged from nearly 452 to 614 GJ·ha⁻¹, for the lower and higher plant density, respectively. The energy efficiency index was similar (14.3–14.8) at both planting densities.