

ENERGETYCZNA EFEKTYWNOŚĆ PRODUKCJI BIOMASY WIERZBY SYSTEMEM EKO-SALIX*

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

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

Streszczenie. 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 energii na uprawę wierzby i produkcję zrębków zawarte były w przedziale od 8,2 do 11,3 GJ·ha⁻¹·rok⁻¹. Zbiór maszynowy roślin wierzby generował średnio o 37% niższe nakłady materiałowo-energetyczne niż ręczny sposób zbioru roślin. Wskaźnik efektywności energetycznej produkcji zrębków wierzby wahał się od 12,3 do 21,2.

Słowa kluczowe: wierzba, system Eko-Salix, biomasa, nakłady energii, wskaźnik efektywności energetycznej

WSTĘP

Spośród odnawialnych źródeł energii w Polsce największe znaczenie ma biomasa. Aktualnie biomasę wykorzystuje się w postaci drewna pochodzenia leśnego oraz produktów i odpadów z rolnictwa, w tym z plantacji roślin energetycznych prowadzonych na gruntach rolnych. Jednym ze sposobów produkcji biomasy stałej na cele energetyczne może być ekstensywna uprawa wierzby prowadzona na gruntach niewykorzystywanych rolniczo i nieużytkach w systemie Eko-Salix [Tworkowski i in. 2010b, Stolarski i in. 2011a]. Zakłada się, że uprawy te mogą przynieść istotny wkład w pokrycie zapotrzebowania na biomasę drzewiastą, zmniejszając udział lasów w jej produkcji. W prowadzonej ekstensywnej uprawie wierzby w systemie tradycyjnym (Short-rotation woody crops

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

Adres do korespondencji – Corresponding author: Józef Tworkowski, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Wydział Kształtowania Środowiska i Rolnictwa, Katedra Hodowli Roślin i Nasiennictwa, ul. Plac Łódzki 3, 10-724 Olsztyn, e-mail: jozef.tworkowski@uwm.edu.pl

– SRWC) bez stosowania nawożenia, odchwaszczania oraz nawadniania. Walle i inni [2007] wykazali bardzo niskie nakłady energii ($3,5 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$) na produkcję biomasy. Uzyskali oni niską wartość energetyczną plonu biomasy ($67,3 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$), ale wysoki wskaźnik efektywności energetycznej. W związku z tym w pracy postawiono hipotezę, że również uprawa oraz pozyskanie biomasy wierzby w systemie Eko-Salix może charakteryzować się niskimi nakładami materiałowo-energetycznymi, korzystnym wskaźnikiem energochłonności jednostkowej oraz wysokim wskaźnikiem efektywności energetycznej produkcji zrębków.

Dlatego też celem pracy było określenie nakładów materiałowo-energetycznych i efektywności energetycznej produkcji biomasy wierzby z uprawy jednorodnej i mieszanej klonów w systemie Eko-Salix w 5-letniej rotacji, zbieranych ręcznie i maszynowo.

MATERIAŁ I METODY

Podstawą badań było dwuczynnikowe doświadczenie polowe, zlokalizowane w północno-wschodniej Polsce ($54^{\circ}00' \text{ N}$, $21^{\circ}10' \text{ E}$) w Stacji Badawczo-Dydaktycznej w Łężanach należącej do Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie. Doświadczenie założone zostało w roku 2009, a zbiór roślin pierwszej 5-letniej rotacji nastąpił w styczniu 2014 roku. Wielkość poletka, z którego zbierano biomasę w poszczególnej kombinacji, wynosiła 3520 m^2 .

Czynnikiem pierwszym doświadczenia był dobór klonów *Salix viminalis* w aspekcie ich uprawy jednorodnej (wysadzano tylko jeden nowy, przygotowywany do rejestracji klon UWM 043) oraz mieszanki trzech klonów o różnych cechach morfologicznych: (UWM 043, UWM 067, UWM 046 z 33% udziałem każdego). Stosowanie mieszanki różnych odmian/klonów na plantacjach związane jest z możliwością ich wierniejszego plonowania w stosunku do nasadzeń jednorodnych. W przypadku niesprzyjających warunków pogodowych i glebowych dla jednego klonu, drugi znajduje korzystniejsze warunki i zwiększa poziom plonowania, rekompensując niższy plon pierwszego komponenta.

Czynnik drugi stanowił sposób zbioru wierzby w rotacji 5-letniej: ręczny przy użyciu pił spalinowych i rozdrabniania biomasy rębakiem oraz maszynowy przy użyciu ciągnika specjalistycznego (forwardera) wyposażonego w głowicę ścinkową oraz rębak.

Zbiór ręczny roślin wierzby przeprowadzono przy użyciu piły spalinowej Husqvarna 354. Pędy po ich wycięciu rozdrabniano rębakiem Junkkarii HJ 106 napędzanym wałkiem odbioru mocy ciągnika New Holland TM 130 KM. Rozdrobnioną biomasę z każdego poletka w postaci zrębków odbierano na przyczepę ciągnikową i ważono. Do zbioru maszynowego wykorzystano ciągnik specjalistyczny wyposażony w głowicę ścinkową Mecanil EG250A oraz rębak nożowy. Forwarder dokonywał ścinki stojących drzew wierzby i ich rozdrabniania. Biomasa w postaci zrębków wypadała przez wyrzutnik turbinowy do zasobnika o pojemności 21 m^3 . Po wypełnieniu zasobnika rozdrobnioną biomasę wraz z forwarderem ważono. Następnie operator za pomocą układu hydraulicznego dokonywał przesypania zrębków na przymę.

W analizie efektywności energetycznej produkcji wierzby systemem Eko-Salix na etapie założenia plantacji uwzględniono: wykonanie otworów wodnym świdrem hydrau-

licznym, ręczne sadzenie żywokołów i ich dociskanie, koszenie chwastów kosą spalinową. W zakresie nakładów materiałowo-energetycznych produkcji biomasy po piątym roku użytkowania plantacji uwzględniono: nakłady związane z założeniem plantacji, nawożenie, zbiór ręczny i maszynowy roślin 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). 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 (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 2005, 2007, Stolarski i in. 2014].

Analizę efektywności energetycznej uprawy i produkcji zrębków wierzby przedstawiono dla uprawy jednorodnej i mieszanej klonów w dwóch sposobach zbioru roślin: ręcznym i maszynowym, na podstawie plonu świeżej biomasy. Wartość energetyczną plonu stanowił iloczyn wartości opałowej świeżej biomasy oraz jej plonu z powierzchni 1 ha. Wartość opałową obliczono na podstawie ciepła spalania i wilgotności biomasy, ciepło spalania oznaczono natomiast w kalorymetrze IKA-2000, wykorzystując metodę dynamiczną (PN-81/G-04513). W energetycznej ocenie technologii uprawy wierzby w systemie Eko-Salix oraz produkcji zrębków na plantacji wykorzystano następujące wskaźniki: zysk energii skumulowanej, który stanowił różnicę między 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 hektara wierzby w systemie Eko-Salix wysadzonej w obsadzie 4,5 tys. szt.⁻¹·ha⁻¹ w uprawie jednorodnej klonu UWM 043 wynosiły 60141 MJ·ha⁻¹ (60,1 GJ·ha⁻¹), co w przeliczeniu na rok użytkowania plantacji stanowiło 3,0 GJ·ha⁻¹·rok⁻¹ (tab. 1).

W uprawie mieszanej klonów ze względu na nieco mniejszą masę wysadzanych żywokołów były one o 12% niższe. Nakłady materiałowo-energetyczne związane z użyciem do sadzenia żywokołów były najwyższe, stanowiły one 54%, a wykonanie otworów (z użyciem lancy ciśnieniowej opryskiwacza rolniczego), sadzenie ręczne żywokołów i ich dociskanie stanowiło 35% całkowitych nakładów energii. Pielęgnacja roślin wierzby polegająca na jednokrotnym koszeniu chwastów kosą spalinową stanowiła około 10% całkowitych nakładów materiałowo-energetycznych.

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

Table 1. Accumulated material-energetic inputs incurred for establishing and running a plantation of willow in Eco-Salix system as affected by type of planting

Rodzaj nasadzeń Type of planting	Wyszczególnienie Item	Nakłady energii Energy inputs [MJ·ha ⁻¹]					
		praca ludzi labour	ciągniki tractors	maszyny machinery	nośniki energii energy media	materiały materials	razem total
Uprawa jednorodna Homogeneous crop	Wykonanie otworów Making the holes	4 545,0	1 739,9	1 083,2	9 179,4	–	16 547,5
	Sadzenie ręczne Hand planting	4 545,0	–	–	–	–	4 545,0
	Pielęgnacja mechaniczna (kosa spalinowa) Mechanical nurture (sawing machine)	4 800,0	0,0	73,9	1 451,5	–	6 325,4
	Sadzonki Seedlings	–	–	–	–	32 724,0	32 724,0
	Razem – Total	13 890,0	1 739,9	1 157,1	10 630,9	32 724,0	60 141,9
	Na rok użytkowania plantacji 1/20 Σ Per year of plantation activity 1/20 Σ	694,5	87,0	57,9	531,5	1 636,2	3 007,1
	Razem – Total	13 890,0	1 739,9	1 157,1	10 630,9	25 452,0	52 869,9
Mieszanka klonów Mixture of clones	Na rok użytkowania plantacji 1/20 Σ Per year of plantation activity 1/20 Σ	694,5	87,0	57,9	531,5	1 272,6	2 643,5

Skumulowane nakłady materiałowo-energetyczne obliczone w innych badaniach [Tworkowski i in. 2011] dotyczących również systemu Eko-Salix przy gęstości sadzenia żywokołów 5,2 i 7,4 tys. szt.⁻¹·ha⁻¹ wyniosły odpowiednio 48 235 i 65 246 MJ·ha⁻¹. Natomiast w badaniach prowadzonych w tym systemie na glebie aluwialnej w analogicznych zagęszczeniach były one nieznacznie niższe [Stolarski in. 2011b]. Nakłady te ponoszone na założenie i prowadzenie plantacji wierzby w pierwszym roku w systemie tradycyjnym SRWC były nawet trzykrotnie niższe (19 975 MJ·ha⁻¹) niż uzyskane w systemie Eko-Salix [Szczukowski i in. 2007].

Skumulowane nakłady materiałowo-energetyczne poniesione na produkcję zrębków w rotacji 5-letniej w uprawie jednorodnej klonu UWM 043 (średnio $56\,276\text{ MJ}\cdot\text{ha}^{-1} - 11,3\text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$) ze względu na wyższe plony biomasy były wyższe niż w uprawie mieszanej klonów, średnio $41\,100\text{ MJ}\cdot\text{ha}^{-1} - 8,2\text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$ (tab. 2). Zbiór maszynowy roślin wierzby z użyciem forwardera w uprawie jednorodnej i mieszanej generował o około 37% niższe nakłady energii niż zbiór ręczny.

Tabela 2. Skumulowane nakłady materiałowo-energetyczne poniesione na produkcję zrębków wierzby w systemie Eko-Salix w rotacji pięcioletniej w zależności od rodzaju nasadzeń i sposobu zbioru roślin [$\text{MJ}\cdot\text{ha}^{-1}$, %]

Table 2. Accumulated material-energetic inputs incurred for production of willow chips in Eco-Salix system in five-year cycle depending on type of planting and type of harvest [$\text{MJ}\cdot\text{ha}^{-1}$, %]

Wyszczególnienie Item	Rodzaj nasadzeń – Type of planting							
	uprawa jednorodna – homogeneous crop				mieszanka klonów – mixture of clones			
	sposób zbioru – type of harvest							
	ręczny manual		maszynowy machine		ręczny manual		maszynowy machine	
	[$\text{MJ}\cdot\text{ha}^{-1}$]	[%]	[$\text{MJ}\cdot\text{ha}^{-1}$]	[%]	[$\text{MJ}\cdot\text{ha}^{-1}$]	[%]	[$\text{MJ}\cdot\text{ha}^{-1}$]	[%]
Praca ludzi Labour	16 580,9	24,2	4 327,2	9,8	13 130,1	25,8	40 10,0	12,8
Zużycie środków trwałych (ciągniki, maszyny) Utilization of permanent assets (tractors, machinery)	7 998,1	11,7	2 537,5	5,8	5 711,7	11,2	1 835,6	5,9
Bezpośrednie nośniki energii Direct energy media	34 611,2	50,6	28 022,7	63,5	24 718,8	48,5	17 992,9	57,6
Zużycie surowców roślinnych (sadzonki) Utilization of plant material (seedlings)	8 181,0	12,0	8 181,0	18,5	6 363,0	12,5	6 363,0	20,4
Zużycie nawozów Utilization of fertilizers	1 037,7	1,5	1 037,7	2,4	1 037,7	2,0	1 037,7	3,3
Razem nakłady energii Total energy inputs	68 408,9	100,0	44 106,1	100,0	50 961,3	100,0	31 239,2	100,0

W innej pracy [Tworkowski 2011] skumulowane nakłady energetyczne poniesione na produkcję zrębków w systemie Eko-Salix w 5-letniej rotacji przy zbiorze ręcznym roślin były zbliżone do uzyskanych wartości i wyniosły $8,8$ i $11,1\text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$ odpowiednio przy wyjściowym zagęszczeniu roślin $5,2$ i $7,4\text{ tys. szt.}\cdot\text{ha}^{-1}$. Skumulowane nakłady materiałowo-energetyczne ponoszone na tradycyjną uprawę (SRWC) i produkcję zrębków wierzby w rotacji 3-letniej były średnio od 2 do $5\text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$ wyższe [Stolarski 2009].

W strukturze strumieni energii dominowały nakłady związane z użyciem bezpośrednich nośników energii, czyli paliwa (48,5–63,5%), które niższe były przy zbiorze ręcznym roślin niż przy ich zbiorze maszynowym (tab. 2). Udział nakładów energetycznych na pracę ludzi oraz zużycie środków trwałych w obiektach ze zbiorem ręcznym roślin wierzby był wyższy niż przy maszynowym. Natomiast udział nakładów poniesionych na nawożenie mieścił się w granicach 1,5–3,3%. Stosunkowo niski udział nakładów na nawożenie sprawia, że struktura nakładów energetycznych w systemie Eko-Salix różni się w stosunku do tradycyjnego systemu produkcji wierzby, w którym dominują właśnie nakłady energii na nawożenie mineralne oraz paliwa [Szczukowski i in. 2007, Stolarski 2009, Matyka 2013]. Z kolei Heller i inni [2003] podają, że w strukturze nakładów energetycznych ponoszonych na produkcję biomasy wierzby na pierwszym miejscu były paliwa (46%), a na drugim nawożenie (37%).

Wartość energetyczna plonu biomasy wierzby zebranej w rotacji 5-letniej z uprawy jednorodnej klonu UWM 043 (średnio 192,5 GJ·ha⁻¹·rok⁻¹) ze względu na wyższy plon oraz wyższą wartość opałową była wyższa prawie o 40% niż z uprawy mieszanej klonów, średnio 116,9 GJ·ha⁻¹·rok⁻¹ (tab. 3). Wartość tej cechy była nieznacznie wyższa przy wyższym plonie biomasy zebranej z poletek sposobem ręcznym niż maszynowym. W innych badaniach [Tworkowski i in. 2011] wartość energetyczna plonu biomasy wierz-

Tabela 3. Efektywność energetyczna produkcji zrębków wierzby w systemie Eko-Salix w zależności od rodzaju nasadzeń i sposobu zbioru roślin w rotacji pięcioletniej loco plantacja

Table 3. Energetic efficiency of the production of willow chips, in Eco-Salix system depending on type of planting and type of harvest in five-year cycle loco plantation

Wyszczególnienie Item	Rodzaj nasadzeń – Type of planting			
	uprawa jednorodna homogeneous crop		mieszanka klonów mixture of clones	
	sposób zbioru – type of harvest			
	ręczny manual	maszynowy machine	ręczny manual	maszynowy machine
Nakłady energii Energy inputs [GJ·ha ⁻¹]	68,4	44,1	51,0	31,2
Wartość energetyczna plonu Energetic value of crop [GJ·ha ⁻¹]	988,9	935,7	629,2	539,6
Wartość energetyczna plonu [GJ·ha ⁻¹ ·rok ⁻¹] Energetic value of crop [GJ·ha ⁻¹ ·year ⁻¹]	197,8	187,1	125,8	107,9
Zysk energii skumulowanej Energy gain accumulated [GJ·ha ⁻¹]	920,4	891,6	578,2	508,4
Wskaźnik energochłonności jednostkowej Index of energy consumption of wood chips production [MJ·Mg ⁻¹]	644,8	423,3	703,9	499,0
Wskaźnik efektywności energetycznej produkcji zrębków Index of energetic effectiveness of wood chips production	14,5	21,2	12,3	17,3

by pozyskanej w systemie Eko-Salix na glebie mineralnej zawierała się w przedziale 81,0–104,3 GJ·ha⁻¹·rok⁻¹, a na glebie organicznej 128,1 i 162,5 GJ·ha⁻¹·rok⁻¹, odpowiednio przy zagęszczeniu 5,2 i 7,4 tys. szt.·ha⁻¹ roślin. W produkcji biomasy w systemie Eko-Salix na madzie próchnicznej ciężkiej całkowitej w rotacji trzyletniej uzyskano wyższą wartość energetyczną plonu (162–220 GJ·ha⁻¹·rok⁻¹) [Stolarski i in. 2011b]. W badaniach Matyki [2013] wartość energetyczna plonu wierzby pozyskanego w uprawie tradycyjnej (SRWC) w rotacji 3-letniej wyniosła 297 GJ·ha⁻¹·rok⁻¹, a w badaniach Kwaśniewskiego [2010] prowadzonych również w tym systemie i rotacji zbioru wyniosła 226 GJ·ha⁻¹·rok⁻¹. Z kolei w doświadczeniach Tworkowskiego i innych [2010a], przy zbiorze w cyklu jednorocznym, wartość energetyczna plonu wyniosła 250 GJ·ha⁻¹·rok⁻¹. Wartość energetyczna plonu wierzby pozyskanego w systemie Eko-Salix w badaniach własnych była niższa niż w cytowanych pracach w systemie tradycyjnym (SRWC). Podkreślić jednakże należy, że system Eko-Salix jest przewidziany dla siedlisk niewykorzystywanych rolniczo, a więc tych, które nie przynoszą dochodów. W związku z tym uzyskana wartość energetyczna plonu stanowi wartość dodaną, ze względu na podaż surowca energetycznego oraz ogranicza konkurencję o tereny z uprawami roślin konsumpcyjnych.

Zysk energii skumulowanej z uprawy jednorodnej klonu UWM 043 wynosił średnio 906 GJ·ha⁻¹ i był wyższy o 363 GJ·ha⁻¹ od uzyskanego z uprawy mieszanej trzech klonów (tab. 3). Wskaźnik energochłonności jednostkowej produkcji zrębków wierzby wynosił średnio 568 MJ·Mg⁻¹ i był o około 32% wyższy w obiektach zbieranych sposobem ręcznym. Wskaźnik efektywności energetycznej produkcji zrębków wyższy był przy zbiorze maszynowym roślin niż ręcznym oraz przy uprawie jednorodnej klonu UWM 043 niż mieszance trzech klonów.

W badaniach wcześniejszych [Tworkowski i in. 2011] w systemie Eko-Salix w pięcioletniej rotacji zbioru roślin uzyskano niższe wartości wskaźnika efektywności energetycznej produkcji zrębków, który na glebie mineralnej i organicznej wynosił odpowiednio: 9,3 i 11,6. W doświadczeniach innych autorów wskaźnik efektywności energetycznej wierzby w tradycyjnym systemie uprawy (SRWC) w trzyletniej rotacji zbioru był zróżnicowany i zawarty w przedziale od 13,3 do 22,1 w zależności od odmiany i gęstości sadzenia zrzesów [Stolarski 2009]. Matyka [2013] w tym samym systemie uprawy przy zbiorze wierzby w rotacji trzyletniej uzyskał bardzo wysoki (40,0) wskaźnik efektywności energetycznej. W badaniach Kwaśniewskiego [2010] wskaźnik ten w trzyletniej rotacji zbioru w analizowanych obiektach zawierał się w przedziale od 15,4 do 40,7. Również Heller i inni 2003, Kisiel i inni 2003, Szczukowski i inni 2007, Piskier 2008 uzyskali zróżnicowane wartości wskaźnika wartości energetycznej plonu biomasy wierzby krzewiastej. Z przytoczonych wyników badań różnych autorów wynika, że istotny wpływ na wartość tego wskaźnika mają: sposób przygotowania i rodzaj stanowiska glebowego, gęstość nasadzeń na plantacji, wysokość nawożenia mineralnego, zużycie środków ochrony roślin, wykonywane zabiegi agrotechniczne, sposób zbioru oraz wysokość plonu biomasy wierzby.

WNIOSKI

1. W systemie Eko-Salix na glebie torfowo-murszowej przy zastosowaniu eksten-sywnych rozwiązań agrotechnicznych po wysadzeniu żywokołów klonu UWM 043 w obsadzie 4,5 tys. szt.⁻¹·ha⁻¹ i zbiorze roślin w rotacji pięcioletniej można uzyskać śred-nio 192 GJ·ha⁻¹·rok⁻¹ energii zawartej w plonie biomasy. Uprawa mieszanki trzech klon-ów UWM: 043, 067, 046 skutkowała obniżeniem energii w plonie o około 44%.

2. Skumulowane nakłady materiałowo-energetyczne poniesione na uprawę wierzby i produkcję zrębków w rotacji pięcioletniej wynosiły od 8,2 do 11,3 GJ·ha⁻¹·rok⁻¹. W strukturze zużycia energii dominowały nakłady związane z użyciem bezpośrednich nośników energii, natomiast udział nakładów poniesionych na nawożenie był niewielki i wynosił 1,5–3,3%.

3. Zbiór maszynowy roślin wierzby z użyciem ciągnika specjalistycznego (forwardera) wyposażonego w głowicę ścinkową oraz rębak generował niższe o 37% nakłady materia-łowo-energetyczne niż zbiór ręczny roślin przy użyciu piły spalinowej i ich rozdrabnianiu rębakiem.

4. Wskaźnik efektywności energetycznej produkcji wierzby był wyższy przy zastoso-waniu zbioru mechanicznego oraz uprawy jednorodnej klonu UWM 043 niż w przypadku zbioru ręcznego i uprawy mieszanki trzech klonów UWM 043, 067, 046.

LITERATURA

- Heller M.C., Keoleian G.A., Volk T.A., 2003. Life cycle assessment of a willow bioenergy cropping system. *Biomass and Bioenergy* 25, 147–165.
- 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(123), 113–119.
- Matyka M., 2013. Produkcyjne i ekonomiczne aspekty uprawy roślin wieloletnich na cele energe-tyczne. Wydawnictwo IUNG-PIB. Monografia: 35, 1–94.
- Piskier T., 2008. Efektywność energetyczna uprawy wierzby w różnych warunkach glebowych. *Inż. Rol.* 2(100), 215–220.
- Stolarski M., 2009. Agrotechniczne i ekonomiczne aspekty produkcji biomasy wierzby krzewiastej (*Salix* spp.) jako surowca energetycznego. *Rozpr. Monogr., UWM Olsztyn* 148, s. 145.
- Stolarski M., Szczukowski S., Tworkowski J., Klasa A., 2011a. Willow biomass production under conditions of low-input agriculture on marginal soils. *Forest Ecology and Management* 262, 1558–1566.
- Stolarski M., Szczukowski S., Tworkowski J., 2011b. Efektywność energetyczna produkcji bioma-sy wierzby w systemie Eko-Salix. *Frag. Agron.* 28(1), 62–69.
- Stolarski M.J., Krzyżaniak M., Tworkowski J., Szczukowski S., Gołaszewski J., 2014. Energy in-tensity and energy ratio in producing willow chips as feedstock for an integrated biorefin-ery. *Biosystems Engineering* 123, 19–28.
- Szczukowski S., Stolarski M., Tworkowski J., Kopaczek M., 2007. Efektywność energetyczna pro-dukcji 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.

- Tworowski J., Stolarski M., Szczukowski S., 2011. Efektywność energetyczna produkcji biomasy wierzby systemem Eko-Salix. *Fragmenta Agronomica* 28(4), 123–130.
- Tworowski J., Stolarski M., Wróblewska H., Szczukowski S., 2010a. Skład chemiczny i wartość energetyczna biomasy wierzby krzewiastej, ślazuwca pensylwańskiego i miskanta olbrzymiego. *Zesz. Probl. Post. Nauk. Roln.* 547, 401–408.
- Tworowski J., Szczukowski S., Stolarski M., 2010b. Plonowanie oraz cechy morfologiczne wierzby uprawianej w systemie Eko-Salix. *Fragmenta Agronomica* 27(4), 135–146.
- Walle I.V., Van Camp N., Van de Castele L., Verheyen K., Lemeur R., 2007. Short-rotation forestry of birch, maple, poplar and willow in Flanders (Belgium) I – Biomass production after 4 years of tree growth. *Biomass and Bioenergy* 31, 267–275.
- 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.

ENERGY EFFICIENCY OF PRODUCTION WILLOW BIOMASS OBTAINED BY THE EKO-SALIX SYSTEM

Summary. The aim of the paper was to determine the material and energy inputs and the energy efficiency of production for willow biomass obtained from a homogeneous and a mixed clone crop in the Eko-Salix system in 5-year rotation, harvested manually and by machine.

The basis of the conducted study was a two-factor, large-area field experiment, carried out in four replications. The following stages were distinguished in the analysis of the energy efficiency of willow production: plantation establishment (drilling holes with a water injection hydraulic auger and manual planting of live stakes and their pressing down), weed cutting with a petrol scythe. The distinguished material and energy inputs for biomass production after the fifth year of its cultivation were: inputs related to plantation establishment, fertilization, machine and manual plant harvesting and chipping and biomass transport within the plantation. Total incurred inputs were divided into stages. The first covered plantation establishment and the second its use. The following energy streams were isolated in the analysis of the material and energy inputs incurred on willow establishment and production: direct energy carriers (fuels), consumption of fixed assets and materials for their repairs (tractors, machines, tools), use of mineral fertilizers, consumption of agricultural plant raw materials (cuttings) and human labor. The analysis of the energy efficiency of willow cultivation and willow chip production was presented based on the average fresh biomass yield from the homogeneous UWM 043 clone crop and the mixed crop of the UWM clones: 043, 067, 046 harvested manually and by machine.

In the Eko-Salix system on peat-muck soil using extensive agricultural solutions and at a willow plant density of 4.5 thousand·ha⁻¹ and harvesting in five-year rotation, 192 GJ·ha⁻¹·year⁻¹ of energy contained in the yield was obtained on average in the homogeneous UWM 043 clone crop, around 44% more than from the mixed crop of the UWM clones: 043, 067, 046. The cumulative material and energy inputs incurred on willow cultivation and production in five-year rotation amounted to 8.2–11.3 GJ·ha⁻¹·year⁻¹ and the inputs related to the use of direct energy carriers dominated in the energy structure.

Machine willow plant harvesting using a specialist tractor (forwarder) equipped with a felling head and a built-in wood chipper in the homogeneous and the mixed crop gener-

ated material and energy inputs by around 37% lower than manual plant harvesting using a petrol saw and chopping with a wood chipper. The energy efficiency index of willow production ranged from 12.3 to 21.2.

Key words: willow, Eco-Salix system, biomass, energy inputs, index of energetic effectiveness