

PRODUKCYJNOŚĆ I JAKOŚĆ BIOMASY WIERZBY ENERGETYCZNEJ ZBIERANEJ W CYKLACH CZTEROLETNIACH

JÓZEF TWORKOWSKI¹, MARIUSZ J. STOLARSKI, STEFAN SZCZUKOWSKI, MICHAŁ KRZYŻANIAK

*Katedra Hodowli Roślin i Nasiennictwa, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie,
10-724 Olsztyn, pl. Łódzki 3*

Synopsis. Praca oparta jest na wynikach ścisłego doświadczenia, prowadzonego w Stacji Dydaktyczno-Badawczej w Bałdach, założonego w 2009 roku, na glebie mułowo-murszowej wytworzonej z gytii wapiennej na podłożu ilastym, klasy bonitacyjnej IVb, w którym wysadzono cztery gatunki wierzby krzewiastej w obsadzie 10 tys. roślin na 1 ha. W roku 2012 dokonano pierwszego, zaś w 2016 roku drugiego zbioru 4-letnich pędów. W czasie 8-letniego użytkowania doświadczenia tylko u *Salix viminalis* UWM 006 nie stwierdzono żadnych ubytków roślin, natomiast u pozostałych gatunków wypadło od 7,5% u *Salix alba* UWM 075 aż do 77,5% u *Salix pontederana* UP. Pomimo najwyższej obsady roślin u *Salix viminalis* UWM 006 wytworzyła ona najwięcej pędów na roślinie, które były najwyższe i najgrubsze. *Salix viminalis* UWM 006 (zarejestrowana aktualnie jako odmiana Żubr) w obu czteroletnich rotacjach, a zwłaszcza w drugiej, wydała zdecydowanie najwyższy plon biomasy drzewnej, wynoszący średnio 115,6 ton suchej masy z 1 ha, czyli 28,9 t·ha⁻¹·rok⁻¹. *Salix alba* UWM 075 wydała średnio 13,4, a *Salix alba v. chermesina* UP tylko 3,9, zaś *Salix pontederana* UP zaledwie 2,7 t·ha⁻¹·rok⁻¹ s.m. Wartość energetyczna plonu biomasy *Salix viminalis* UWM 006 zebranej z 1 ha w przeliczeniu na 1 rok użytkowania plantacji wynosiła 500 GJ. Biomasa tego gatunku miała najwyższą zawartość wodoru oraz najniższą zawartość popiołu, siarki i azotu. *Salix viminalis* UWM 006 jest zdecydowanie preferowaną do stosowania w uprawie w zagęszczeniu ok. 10 tys. sztuk na 1 ha w czteroletnim cyklu zbioru. Nie wykazały takiej przydatności w warunkach badań *Salix pontederana* UP ani *Salix alba v. chermesina* UP.

Słowa kluczowe: wierzba, cechy morfologiczne, plon, biomasa, wartość opałowa, właściwości biomasy

WSTĘP

Alternatywą do produkcji surowców żywnościowych przez rolnictwo może być produkcja surowców energetycznych lub przemysłowych. W Polsce dominującym gatunkiem spośród roślin energetycznych jest wierzba krzewiasta. Z każdym rokiem przybywa opracowań dotyczących produktywności oraz aspektów agrotechnicznych i ekonomicznych uprawy tych roślin. Najczęściej wyniki pochodzą z początkowego okresu użytkowania doświadczeń lub plantacji [Faber i Kuś 2007, Jeżowski i in. 2011, Kuś i Matyka 2010, Kuś i in. 2008, Stolarski i in. 2008, Szczukowski in. 2002, 2014] co w odniesieniu do dość powszechnego uznania, że plantacje wierzby można prowadzić nawet przez 25 lat [Remlein-Starosta i in. 2013], brakuje danych ze starszych doświadczeń, z kolejnych cykli zbioru. Ważną sprawą jest odpowiedni dobór gatunku wierzby i technologii produkcji do warunków środowiskowych. Wieloletnie badania własne, wskazują na potrzebę prowadzenia prac hodowlanych w celu uzyskania produktywniejszych

¹ Adres do korespondencji – *Corresponding address*: jtwor@uwm.edu.pl

odmian i opracowania wydajnych i ekonomicznie uzasadnionych technologii ich produkcji [Szczukowski i in. 2002, Stolarski i in. 2014, Tworkowski in. 2014].

Celem niniejszej pracy była ocena przydatności czterech gatunków wierzby krzewiastej do uprawy w 4-letnich cyklach zbioru na glebie mułowo murszowej, określenie obsady roślin, cech morfologicznych i plonu biomasy oraz jej wartości energetycznej w pierwszej i drugiej rotacji zbioru.

MATERIAŁ I METODY

Doświadczenia polowe zlokalizowano w Północno-Wschodniej Polsce w Stacji Dydaktyczno-Badawczej Bałdy (53°35' N, 20°36' E) należącej do Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie.

Roczna suma opadów atmosferycznych w latach 1981–2010 wyniosła 581,7 mm, natomiast średnia roczna temperatura powietrza 7,9°C. W czasie pierwszej rotacji eksperymentu (2009–2012) średnia suma rocznych opadów wynosiła 652,3 mm zaś w okresie wegetacji (IV–X) 421,6 mm a średnia temp roczna 7,53°C, natomiast w okresie drugiej rotacji (2013–2016) średnie roczne opady wynosiły 565,6 mm, w okresie wegetacji 324,5 mm przy średniej temperaturze rocznej 8,25°C.

Doświadczenie prowadzono na glebie mułowo-murszowej, wytworzonej z gytii wapiennej na podłożu ilastym, klasy bonitacyjnej IVb, kompleksu przydatności rolniczej – użytki zielone średnie. Odczyn gleby w roku założenia doświadczenia był obojętny (pH 7,27). Zawartość węgla ogólnego w glebie określono na 92 g·kg⁻¹ gleby. Zawartość P₂O₅, K₂O, Mg i Ca wynosiła odpowiednio: 8,0 mg, 13,4 mg, 4,3 mg, 422 mg·100 g⁻¹ gleby. Stosunek C:N, wyniósł 14,2. Lustro wody gruntowej określono na głębokości poniżej 0,8 m.

Doświadczenie prowadzono w latach 2009-2016. Czynnikiem doświadczenia były cztery gatunki wierzby: *S. alba* v. *chermesina* UP, *S. pontederana* UP (pozyskane z kolekcji UP w Poznaniu), *S. alba* UWM 075 i *S. viminalis* UWM 006 (pozyskane z hodowli UWM w Olsztynie) oraz dwie rotacje zbioru w cyklach czteroletnich: I – w roku 2012, II – w roku 2016. Zrzesy o długości 25 cm, wysadzono w drugiej dekadzie kwietnia 2009 roku na poletkach o wielkości 28 m², w 4 powtórzeniach, w zagęszczeniu 10000 szt.·ha⁻¹. Odległość zrzesów między rzędami i rzędzie wynosiła 1,0 m. W roku założenia doświadczenia oraz po zbiorze I rotacji zastosowano nawożenie w dawkach: N – 90 kg·ha⁻¹ w formie saletry amonowej, P₂O₅ – 30 kg·ha⁻¹ w formie superfosfatu potrójnego, K₂O – 60 kg·ha⁻¹ w formie soli potasowej. W roku założenia doświadczenia przeprowadzono motyczenie międzyrzędzi, natomiast w kolejnych latach nie prowadzono pielęgnacji.

W roku zbioru, po zakończeniu okresu wegetacji określano obsadę roślin na jednostce powierzchni i ich ubytki. Ponadto określano liczbę pędów na karpie, średnicę pędów (pomiar wykonano na wysokości 0,5 m od powierzchni gleby) oraz wysokość rośliny. Zbiór roślin przeprowadzono ręcznie w III dekadzie grudnia 2012 i 2016 roku. Plon świeżej i suchej masy podano w t·ha⁻¹.

W trakcie zbioru roślin wierzby pobierano próby biomasy do analiz laboratoryjnych. Pozyskany materiał pakowano w worki foliowe i transportowano do laboratorium w celu wykonania analiz, które wykonywano w trzech powtórzeniach. Wilgotność biomasy oznaczono metodą suszarkowo-wagową. W tym celu suszono biomasę w temperaturze 105°C do uzyskania stałej masy. Następnie biomasę rozdrabniano na młynku analitycznym „IKA KMF 10 basic” przy użyciu sita o średnicy oczek 0,25 mm. W tak przygotowanych próbkach oznaczono zawartość popiołu oraz części lotnych w automatycznym analizatorze termograwimetrycznym ELTRA TGA-THERMOSTEP. Ciepło spalania oznaczano w kalorymtrze IKA C2000 w oparciu o metodę dynamiczną. Następnie obliczono wartość opałową biomasy przy jej wilgotności podczas

zbioru [Kopetz i in. 2007]. Zawartość węgla, wodoru i siarki oznaczono za pomocą automatycznego analizatora ELTRA CHS 500. Zawartość azotu oznaczono metodą Kjeldahla z użyciem mineralizatora K-435 oraz jednostki destylującej B-324 BUCHI.

Wyniki badań opracowano statystycznie w oparciu o pakiet komputerowy STATISTICA 12 PL. W przypadku udowodnienia istotności wpływu czynnika na badane cechy wykorzystano test HSD Tukeya za pomocą, którego wyznaczono najmniejszą istotną różnicę przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$.

WYNIKI BADAŃ

Obsada roślin po czterech latach wegetacji, czyli w okresie zbioru pierwszej rotacji była bardzo zróżnicowana (tab.1). W przypadku *Salix alba* UWM 075 oraz *Salix viminalis* UWM

Tabela 1. Obsada oraz cechy morfologiczne roślin *Salix* spp. w okresie zbioru I i II rotacji
Table 1. Number of plants and morfological features of *Salix* spp. plants at harvest time in I and II rotation

Rotacja Rotation (B)	Gatunek/Species (A)				Średnio Mean
	<i>Salix alba</i> v. <i>chermesina</i> UP	<i>Salix</i> <i>pontederana</i> UP	<i>Salix alba</i> UWM 075	<i>Salix</i> <i>viminalis</i> UWM 006	
Liczba roślin/Number of plants (plants·ha ⁻¹)					
I	4250	3000	10000	10000	6318
II	3250	2250	9250	10000	6187
Średnio/Mean	3750	2625	9625	10000	-
NIR _{0,05} /LSD _{0,05}	A – 963; B – r.n.; AxB – r.n.				
Liczba pędów na roślinie/Number of stems					
I	1,6	2,9	2,0	2,0	2,1
II	6,5	5,7	7,0	8,4	6,9
Średnio/Mean	4,1	4,3	4,5	5,2	-
NIR _{0,05} /LSD _{0,05}	A – r.n.; B – 1,2; AxB – r.n.				
Wysokość roślin/Height of plants (m)					
I	4,8	2,8	6,1	7,9	5,4
II	5,3	4,0	8,2	8,6	6,5
Średnio/Mean	5,1	3,4	7,1	8,3	-
NIR _{0,05} /LSD _{0,05}	A – 1,0; B – 0,7; AxB – r.n.				
Średnica pędów/Diameter of stems (mm)					
I	37,4	25,0	48,0	61,2	42,9
II	34,9	29,5	48,8	63,0	44,0
Średnio/Mean	36,2	27,2	48,4	62,1	-
NIR _{0,05} /LSD _{0,05}	A – 11,0; B – r.n.; AxB – r.n.				

r.n. – różnica nieistotna/non significant differences

006 praktycznie wszystkie wysadzone rośliny przyjęły się i przetrwały do zbioru. Natomiast u *Salix alba v. chermesina* UP pozostało tylko 42,5%, a u *Salix pontederana* UP zaledwie 30% wysadzonych roślin. Po kolejnych 4 latach, w okresie zbioru drugiej rotacji u *Salix viminalis* UWM nadal nie stwierdzono ubytków, tylko 7,5% roślin ubyło u *Salix alba* UWM 075, zaś pomimo znacznie niższej obsady po pierwszej rotacji u *Salix alba v. chermesina* UP oraz *Salix pontederana* UP nastąpiły dalsze ubytki i obsada wynosiła odpowiednio 32,5 oraz 22,5% w stosunku do wysadzonych roślin.

Pomimo znacznego zróżnicowania obsady roślin poszczególnych gatunków nie stwierdzono istotnych różnic w liczbie wytworzonych pędów na roślinie, a w drugiej rotacji uwidoczniły się nawet tendencje do wyższej liczby pędów wytworzonych przy znacznie wyższej obsadzie u *Salix viminalis* UWM 006 oraz *Salix alba* UWM 075. Rośliny *Salix* spp. w pierwszej rotacji wytworzyły średnio 2,1 pędów zaś w drugiej ponad trzykrotnie więcej (tab. 1). Czteroletnie pędy *Salix viminalis* UWM 006 wyrosły na wysokość 8,3 m, istotnie niższe były u *Salix alba* UWM 075, zaś zdecydowanie, bo o 3,2 m niższe u *Salix alba v. chermesina* UP i o aż 4,9 m niższe u *Salix pontederana* UP. W pierwszej rotacji rośliny wyrosły średnio na 5,4 m, w drugiej zaś były o 1,1 m wyższe. Średnia grubość pędów była zbliżona w obu rotacjach. Najgrubsze pędy (62,1 mm) wytworzyła *Salix viminalis* UWM 006, a pędy rzadko rosnących *Salix alba v. chermesina* UP i *Salix pontederana* miały średnicę zaledwie 36,2 i 27,2 mm (tab. 1).

Tabela 2. Plon świeżej i suchej biomasy roślin wierzby
Table 2. Yield of fresh and dry willow biomass

Rotacja Rotation (B)	Gatunek/Species (A)				Średnio Mean
	<i>Salix alba v. chermesina</i> UP	<i>Salix pontederana</i> UP	<i>Salix alba</i> UWM 075	<i>Salix viminalis</i> UWM 006	
Plon świeżej masy/Yield of fresh biomass (t·ha ⁻¹)					
I	15,8	11,4	73,3	195,5	74,0
II	50,8	28,9	151,3	262,7	123,4
Średnio/Mean	33,3	20,2	112,3	229,1	-
NIR _{0,05} /LSD _{0,05}	A – 25,3; B – 17,9; AxB – r.n.				
Plon suchej masy/Yield of dry biomass (t·ha ⁻¹)					
I	7,4	6,1	35,3	101,2	37,5
II	24,0	15,6	71,6	130,0	60,3
Średnio/Mean	15,7	10,9	53,4	115,6	-
NIR _{0,05} /LSD _{0,05}	A – 12,4; B – 8,8; AxB – r.n.				
Plon suchej masy/Yield of dry biomass (t·ha ⁻¹ ·year ⁻¹)					
I	1,8	1,5	8,8	25,3	9,4
II	6,0	3,9	17,9	32,5	15,1
Średnio/Mean	3,9	2,7	13,4	28,9	-
NIR _{0,05} /LSD _{0,05}	A – 3,1; B – 2,2; AxB – r.n.				

r.n. – różnica nieistotna/non significant differences

Tabela 3. Cechy jakościowe biomasy *Salix* spp.Table 3. Biomass quality of *Salix* spp.

Rotacja Rotation (B)	Gatunek/Species (A)				Średnio Mean
	<i>Salix alba</i> v. <i>chermesina</i> UP	<i>Salix</i> <i>pontederana</i> UP	<i>Salix alba</i> UWM 075	<i>Salix</i> <i>viminalis</i> UWM 006	
Wilgotność/Moisture content (%)					
I	53,1	46,5	51,9	48,2	49,9
II	52,8	45,9	52,5	50,5	50,4
Średnio/Mean	52,9	46,2	52,2	49,4	-
NIR _{0,05} /LSD _{0,05}	A – 0,7; B – 0,5; AxB – 0,9				
Zawartość popiołu/Ash content (% s.m./DM)					
I	1,5	1,6	1,3	1,2	1,4
II	1,5	1,2	1,2	1,1	1,2
Średnio/Mean	1,5	1,4	1,2	1,1	-
NIR _{0,05} /LSD _{0,05}	A – 0,05; B – 0,04; AxB – 0,07				
Ciepło spalania/Higher heating value (MJ·kg ⁻¹ s.m./DM)					
I	19,4	19,5	19,3	19,6	19,5
II	19,5	19,9	19,8	19,7	19,7
Średnio/Mean	19,4	19,7	19,6	19,7	-
NIR _{0,05} /LSD _{0,05}	A – 0,03; B – 0,02; AxB – 0,04				
Wartość opałowa/Lower heating value (MJ·kg ⁻¹)					
I	7,8	9,3	8,0	9,0	8,5
II	7,9	9,6	8,1	8,5	8,6
Średnio/Mean	7,9	9,5	8,1	8,8	-
NIR _{0,05} /LSD _{0,05}	A – 0,2; B – r.n.; AxB – 0,2				
Części stałe/Fixed carbon (% s.m./DM)					
I	19,6	20,7	20,2	19,8	20,0
II	19,9	21,5	19,2	19,4	20,0
Średnio/Mean	19,7	21,1	19,7	19,6	-
NIR _{0,05} /LSD _{0,05}	A – 0,4; B – r.n.; AxB – 0,5				
Części lotne/Volatile matter (% s.m./DM)					
I	78,8	77,6	78,4	79,0	78,4
II	78,7	77,3	79,6	79,6	78,8
Średnio/Mean	78,7	77,5	79,0	79,3	-
NIR _{0,05} /LSD _{0,05}	A – 0,4; B – 0,3; AxB – 0,5				

r.n. – różnica nieistotna/non significant differences

Plon biomasy czteroletnich pędów *Salix viminalis* UWM 006 był średnio ponad 2-krotnie wyższy od plonu *Salix alba* UWM 075, ponad 7-krotnie wyższy od *Salix alba v. chermesina* UP i prawie 11-krotnie wyższy od plonu *Salix pontederana* UP. W przeliczeniu na 1 rok użytkowania plon suchej masy w obrębie gatunków był istotnie zróżnicowany i wahał się od 2,7 do 28,9 t·ha⁻¹·rok⁻¹. Plony świeżej oraz suchej masy były średnio o ponad 1,6 razy wyższe w drugiej niż w pierwszej rotacji zbioru. W pierwszej rotacji zebrano 9,4 t·ha⁻¹·rok⁻¹ s.m., a w drugiej istotnie więcej, bo 15,1 t·ha⁻¹·rok⁻¹ s.m. (tab. 2). Plon świeżej masy czteroletnich roślin wierzby wahał się w pierwszej rotacji od 11,4 u *Salix pontederana* UP do 195,5 t·ha⁻¹ u *Salix viminalis* UWM 006, zaś w drugiej rotacji u tych samych gatunków od 28,9 do 262,7 t·ha⁻¹. W przeliczeniu na suchą masę było to odpowiednio w pierwszej rotacji od 6,1 do 101,2 t·ha⁻¹, a w drugiej rotacji od 15,6 do 130 t·ha⁻¹.

Średnia wilgotność zbieranej biomasy wynosiła 50,2% (tab. 3). Najniższą wilgotnością (46,2%) charakteryzowała się biomasa *Salix pontederana* UP, o ponad 3 punkty procentowe (p.p.) wyższą *Salix viminalis* UWM 006 i o około 6 p.p. wyższą biomasa pozostałych gatunków. Nieco ale istotnie niższą zawartość popiołu stwierdzono w biomacie zebranej w drugiej rotacji niż w pierwszej. W obu rotacjach najmniej popiołu zawierała *Salix viminalis* UWM 006.

Biomasa zbierana w drugiej rotacji miała nieznacznie wyższe ciepło spalania, a biomasa poszczególnych gatunków tylko nieznacznie, aczkolwiek istotnie różniła się pod względem tej cechy. Wartość opałowa (zależna od wilgotności biomasy) najwyższa była u *Salix pontederana* UP. Biomasa zawierała około 20% części lotnych i ponad 78% części stałych (tab. 3).

Najwyżej plonująca *Salix viminalis* UWM 006 ustępowała niższą zawartością węgla jedynie najniżej plonującej *Salix pontederana* UP, natomiast przewyższała wszystkie gatunki pod względem zawartości wodoru, a jednocześnie miała najniższą zawartość siarki i azotu. Biomasa zebrana w drugiej rotacji miała istotnie wyższą zawartość węgla i wodoru, a niższą siarki i azotu (tab. 4).

Tabela 4. Skład elementarny biomasy wierzby
Table 4. Elemental analysis of willow biomass

Rotacja Rotation (B)	Gatunek/Species (A)				Średnio Mean
	<i>Salix alba v. chermesina</i> UP	<i>Salix pontederana</i> UP	<i>Salix alba</i> UWM 075	<i>Salix viminalis</i> UWM 006	
Węgiel/Carbon (% s.m./DM)					
I	49,6	52,0	50,6	52,1	51,1
II	52,4	54,4	52,4	53,2	53,1
Średnio/Mean	51,0	53,2	51,5	52,7	-
NIR _{0,05} /LSD _{0,05}	A – 0,2; B – 0,2; AxB – 0,3				
Wodór/Hydrogen (% s.m./DM)					
I	5,47	5,48	5,81	5,87	5,66
II	6,10	6,12	6,10	6,31	6,16
Średnio/Mean	5,79	5,80	5,96	6,09	-
NIR _{0,05} /LSD _{0,05}	A – 0,08; B – 0,04; AxB – 0,07				

Tabela 4. cd.
Table 4. cont.

Siarka/Sulphur (% s.m./DM)					
I	0,036	0,027	0,032	0,025	0,030
II	0,031	0,026	0,025	0,027	0,027
Średnio/Mean	0,034	0,027	0,029	0,026	-
NIR _{0,05} /LSD _{0,05}	A – 0,001; B – 0,001; AxB – 0,002				
Azot/Nitrogen (% s.m./DM)					
I	0,53	0,73	0,58	0,50	0,58
II	0,47	0,38	0,38	0,40	0,41
Średnio/Mean	0,50	0,56	0,48	0,45	-
NIR _{0,05} /LSD _{0,05}	A – 0,01 B – 0,01; AxB – 0,01				

Tabela 5. Wartość energetyczna plonu świeżej masy *Salix* spp.
Table 5. Yield energy value of *Salix* spp. fresh biomass

Rotacja Rotation (B)	Gatunek/Species (A)				Średnio Mean
	<i>Salix alba</i> v. <i>chermesina</i> UP	<i>Salix</i> <i>pontederana</i> UP	<i>Salix alba</i> UWM 075	<i>Salix</i> <i>viminalis</i> UWM 006	
Wartość energetyczna plonu świeżej masy/Yield energy value of fresh biomass (GJ·ha ⁻¹)					
I	122	106	589	1756	644
II	403	277	1220	2241	1035
Średnio/Mean	263	192	905	1998	-
NIR _{0,05} /LSD _{0,05}	A – 212; B – 150; AxB – r.n.				
Wartość energetyczna plonu świeżej masy/Yield energy value of fresh biomass (GJ·ha ⁻¹ ·rok/year ⁻¹)					
I	31	27	147	439	161
II	101	69	305	560	256
Średnio/Mean	66	48	226	500	-
NIR _{0,05} /LSD _{0,05}	A – 53; B – 38; AxB – r.n.				
Wartość energetyczna plonu wyrażona w równoważniku węglowym (C t·rok ⁻¹ ·ha ⁻¹) Yield energy value expressed in coal equivalent (C t·year ⁻¹ ·ha ⁻¹)					
I	1,2	1,1	5,9	17,6	6,4
II	4,0	2,8	12,2	22,4	10,4
Średnio/Mean	2,6	2,0	9,0	20,0	-
NIR _{0,05} /LSD _{0,05}	A – 2,1; B – 1,5; AxB – r.n.				

r.n. – różnica nieistotna/non significant differences

Wartość energetyczna plonu zebranego z czteroletnich pędów wynosiła średnio $839 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$, co w przeliczeniu na jeden rok użytkowania wyniosło $210 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$. Plon *Salix viminalis* UWM 006 przewyższał ponad 2-krotnie wartość energetyczną *Salix alba* UWM 075, ponad 7-krotnie *Salix alba* v. *chermesina* UP i aż ponad 10-krotnie *Salix pontederana* UP. Wyższy plon biomasy uzyskany w drugiej rotacji przełożył się na wyższą jego wartość energetyczną. Wartość energetyczna zebranego plonu biomasy odpowiadała średnio równoważnikowi energetycznemu $8,4$ ton węgla kamiennego z 1 ha rocznie, a w przypadku *Salix viminalis* UWM 006 była to równo-wartość aż 20 ton węgla z 1 ha rocznie (tab. 5).

DYSKUSJA

Rośliny *Salix viminalis* UWM 006 od posadzenia do zbioru w drugiej rotacji, czyli przez osiem lat użytkowania, zachowały pełną obsadę. Bardzo duże ubytki roślin *Salix pontederana* UP oraz *Salix alba* v. *chermesina* UP nastąpiły w pierwszym roku z powodu słabego ukorzenia się zrzców i nie przyjęcia się znacznej części roślin, jednakże przy niskiej ich obsadzie w kolejnych latach następowały dalsze ubytki, których nie stwierdzono u *Salix viminalis* UWM 006. Ubytki roślin w czasie użytkowania plantacji wierzby zależą głównie od gęstości sadzenia. Stolarski [2009] wysadzając 5 odmian *Salix viminalis* w obsadzie 12, 24, 48 i 96 tys. szt. $\cdot\text{ha}^{-1}$, po 3 latach stwierdził ubytki wynoszące średnio od 5,5 do 41,7%, wzrastające wraz ze zwiększaniem się początkowej obsady roślin.

Pomimo największego zagęszczenia *Salix viminalis* UWM 006 wytworzyła najwięcej, najgrubszych i najwyższych pędów na roślinie. Przeliczając to na liczbę pędów na 1 hektarze w drugiej rotacji było ich 84 tys. a u najslabiej plonującego gatunku *Salix pontederana* UP zaledwie 12,8 tys. Cechy te przełożyły się na wysokość plonu biomasy, który w obu rotacjach był zdecydowanie najwyższy u *Salix viminalis* UWM 006. Bardzo duży plon suchej masy *Salix viminalis* UWM 006, uzyskany w drugiej rotacji (ponad $32 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$) był najwyższym jaki dotychczas uzyskano w trzydziestoletnim okresie prowadzenia doświadczeń z *Salix* spp. w UWM w Olsztynie, co wskazuje na wysoki potencjał plonowania tego gatunku.

W innym doświadczeniu [Tworkowski i in. 2014], w którym porównano produkcyjność 15 odmian i klonów *Salix* spp. uprawianych w technologii z wysadzeniem 25 tys. roślin na ha i zbiorze co 3 lata, zastosowany tam *Salix viminalis* UWM 006 również wyraźnie wyróżniał się wysokością i średnicą pędów oraz plonem biomasy. Natomiast po wysadzeniu w obsadzie 48 tys. roślin na ha i zbiorze w cyklu 1 rocznym ustępował on w plonie innym odmianom. Doświadczenia powyższe wskazują na ważność odpowiedniego doboru technologii produkcji dla poszczególnych gatunków a nawet odmian. Wyższy potencjał plonowania *Salix viminalis* UWM 006 uwidaczniał się przy zastosowaniu niższej obsady i zbiorze w 4 letnich rotacjach. Badania własne eliminują z uprawy z racji niskich plonów *Salix alba* v. *chermesina* UP i *Salix pontederana*.

Przeciętne plony *Salix* spp. w doświadczeniach polowych w kraju mieszczą się zwykle w przedziale od 10 do $15 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$ s.m. [Faber i Kuś 2007, Jeżowski i in. 2011, Kuś i in. 2008, Stolarski i in. 2008, Szczukowski in. 2002, Tworkowski in. 2006]. Zbliżone plony wierzby krzewiastej na plantacjach produkcyjnych zbierano w Szwecji i Wielkiej Brytanii [Bullard i in. 2002, Melin i Larsson 2005, Wilkinson i in. 2007].

Badania prowadzone w Szwecji [Christersson 1997] wykazały, że istnieje górna granica biologicznej produkcji biomasy drzewnej z hektara. W naturalnych warunkach wzrostu drzew wynosi ona od 10 do $12 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$ s.m. Uzyskuje się ją po 2,5 roku dla wierzby, topoli po 6 latach, olchy i brzozy po 10 latach, świerku po 25 latach, buku po około 70 latach. W krótkorotacyjnej

przyśpieszonej uprawie, obejmującej wczesne odchwaszczanie, nawożenie i nawadnianie, osiąga się ją maksymalnie w ilości od 30 do 35 t·ha⁻¹ rok⁻¹ s.m. po 5 latach dla wierzby, natomiast dla topoli w ilości 25 t·ha⁻¹ rok⁻¹ po 10 latach. Przedstawione wyniki, stanowiące rezultaty doświadczeń prowadzonych przez Szwedzki Uniwersytet Rolniczy dowodzą, dlaczego wierzba, charakteryzująca się największą wydajnością masy drzewnej uzyskiwanej najszybciej spośród innych drzew, została wybrana do uprawy do celów energetycznych.

W USA [Kopp i in. 1993] uważa się, że w wyniku prowadzonych prac hodowlanych wierzby (*Salix* spp.) wydajność jej będzie wzrastała. W 3-letniej rotacji zbioru plon wynosił od 12,4 do 19,8 t·ha⁻¹·rok⁻¹ s.m.. Oczekuje się, że średnia roczna wydajność suchej masy drzewnej w optymalnych warunkach agrotechnicznych może wynosić nawet 37 t·ha⁻¹·rok⁻¹ w rotacji 3-letniej.

Uzyskane wyniki badań własnych w przeprowadzonym doświadczeniu, potwierdzają prognozy cytowanych wyżej autorów [Christersson 1997, Kopp i in. 1993]. Wierzba *Salix viminalis* UWM 006 uprawiana w zagęszczeniu 10000 roślin·ha⁻¹ na żyznej glebie mułowo-murszowej z poziomem wody gruntowej poniżej 0,8 m i zbierana w drugiej 4-letniej rotacji wydała bardzo duży plon 32,5 t·ha⁻¹·rok s.m., o wartości energetycznej 560 GJ·ha⁻¹·rok⁻¹. W drewnie oznaczono 53% węgla pierwiastkowego w suchej masie, wysoką zawartość wodoru i małą zawartość popiołu, siarki i azotu co rekomenduje ją do uprawy na plantacjach produkcyjnych. *Salix viminalis* UWM 006 zgłoszona do badań rejestrowych, decyzją dyrektora COBORU z dnia 11 lutego 2015 roku została zarejestrowana jako odmiana Żubr.

WNIOSKI

1. *Salix viminalis* UWM 006 spośród badanych gatunków okazała się najbardziej przydatną do uprawy w 4-letnim cyklu zbioru. W okresie dwóch rotacji w 4-letnim cyklu zbioru nie stwierdzono u niej ubytków roślin. Wytworzyła ona największą liczbę pędów na jednostce powierzchni, które były najwyższe i najgrubsze.
2. Plon biomasy *Salix viminalis* UWM 006 wynosił w pierwszej rotacji ponad 25 zaś w drugiej rotacji ponad 32 tony suchej masy z 1 ha w przeliczeniu na 1 rok użytkowania o wartości energetycznej ponad 500 GJ·ha⁻¹·rok⁻¹. Wszystkie badane gatunki wierzby wykazały wyższą produktywność w drugiej rotacji zbioru.
3. W biomacie *Salix viminalis* UWM 006 oznaczono istotnie najwyższą zawartość wodoru, a jednocześnie niższą zawartość popiołu, siarki i azotu.
4. *Salix alba* v. *chermesina* UP i *Salix pontederana* z powodu słabego ukorzeniania się zrzedów, dużych ubytków roślin w czasie wegetacji oraz uzyskanych niskich plonów biomasy nie potwierdziły przydatności do uprawy na glebie mułowo-murszowej w zagęszczeniu 10000 szt. roślin·ha⁻¹ w czteroletniej rotacji zbioru.

PIŚMIENNICTWO

- Bullard M.J., Mustill S.J., McMillan S.D., Nixon P.M.I., Carver P., Britt C.P. 2002. Yield improvements through modification of planting density and harvest frequency in short rotation coppice *Salix* spp. 1. Yield response in two morphologically diverse varieties. *Biomass Bioenergy* 22: 15–25.
- Christersson L. 1997. Deciduous Tree Species for Energy, Fibre and Purification of Waste wares. Materiały konferencji "Polish-Swedish workshop", Starbieniino, 25-28.05.
- Faber A., Kuś J. 2007. Rośliny energetyczne dla różnych siedlisk. *Wiś Jutra* 8-9: 11–12.
- Jeżowski S., Głowacka K., Kaczmarek Z., Szczukowski S. 2011. Field traits of eight common osier clones in the first three years following planting in Poland. *Biomass Bioenergy* 35: 1205–1210.

- Kopetz H., Jossart J. M., Ragossing H. Metschina Ch. 2007. European biomass statistics. European Biomass Association (AEBIOM). Brussels, ss. 73.
- Kopp R.F., White E.H., Abrahamson L.P., Nowak C.A., Zsuffa L., Burns K.F. 1993. Willow biomass trias in central New York State. *Biomass Bioenergy* 5: 179–187.
- Kuś J., Matyka M. 2010. Plonowanie i cechy biometryczne wierzby w zależności od warunków siedliskowych. *Probl. Inż. Rol.* 3: 59–65.
- Melin G., Larsson S. 2005. Agrobränsle AB – world leading company on short rotation coppice willow. 14th European Biomass Conference, 17–21 October 2005, Paris, France, 36–37.
- Remlein-Starosta D., Matyka M., Kuś J., Nijak K., Miziniak W., Krzywińska J., Węgorek P., Zamojska J., Dworzyńska D., Wojciechowski R. 2013. *Metodyka integrowanej ochrony wierzb krzewiastych dla producentów biomasy*. Wyd. IOR-PIB Poznań, ss. 46.
- 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., Klasa A. 2008. Productivity of seven clones of willow coppice in annual and quadrennial cutting cycles. *Biomass Bioenergy* 32: 1227–1234.
- Stolarski M.J., Krzyżaniak M., Szczukowski S., Tworkowski J. 2014. Efektywność energetyczna produkcji biomasy wierzby w jednorocznym i trzyletnim cyklu zbioru. *Fragm. Agron.* 31(2): 88–95.
- Szczukowski S., Stolarski M.J., Tworkowski J., Rutkowski P., Goliński P., Mleczek M., Szentner K. 2014. Plon i jakość biomasy wybranych gatunków wierzby w czteroletniej rotacji zbioru. *Fragm. Agron.* 31(2): 107–114;
- Szczukowski S., Tworkowski J., Klasa A., Stolarski M. 2002. Productivity and chemical composition of wood tissues of short rotation willow coppice cultivated on arable land. *Rost. Vyroba* 48: 413–417.
- Tworkowski J., Szczukowski S., Stolarski M. 2006. Productivity and calorific value of willow (*Salix* spp.) biomass in relation to selected agronomical factors. In: *Alternative plants for sustainable agriculture*. Institute of Plant Genetics, PAN, Poznań, 5: 45–50.
- Tworkowski J., Szczukowski S., Stolarski M., Krzyżaniak M., Graban Ł. 2014. Produkcyjność wierzby krzewiastej i ślazuwa pensylwańskiego oraz przydatność ich biomasy do konwersji w termogeneratorze. W: *Technologie pozyskiwania i kondycjonowania biomasy rolniczej i wodnej dla biogazowni i zgazowarki*. Wyd. UWM Olsztyn, 283–340.
- Wilkinson J.M., Evans E.J., Bilsborrow P.E., Wright C., Hewison W.O., Pilbeam D.J. 2007. Yield of willow cultivars at different planting densities in a commercial short rotation coppice in the north of England. *Biomass Bioenergy* 31: 469–474.

J. TWORKOWSKI, M.J. STOLARSKI, S. SZCZUKOWSKI, M. KRZYŻANIAK

PRODUCTIVITY AND QUALITY OF BIOMASS OF WILLOW AS ENERGY FEEDSTOCK HARVESTED IN FOUR-YEAR CYCLES

Summary

This study is based on the results of an experiment set up in 2009 at the Teaching and Research Station in Bałdy, on silty-muck soil formed from lime gytja on loamy substrate, soil quality class IVb, on which four species of willow coppice were planted at the density of 10 thousand plants per 1 ha. Four-year-old shoots were harvested in 2012 for the first time and then in 2016. No plant loss was observed only in *Salix viminalis* UWM 006 during the 8-year experiment, whereas in the other species from 7.5% plants were lost in *Salix alba* UWM 075 to as much as 77.5% in *Salix pontederana* UP. Despite the highest planting density in *Salix viminalis* UWM 006, this species produced the largest number of shoots per plant, which were the highest and the thickest. *Salix viminalis* UWM 006 (currently registered as the Żubr cultivar) gave definitely the largest mean yield of wood biomass in both four-year rotations, especially in the second rotation: 115.61 tonnes of dry biomass per 1 ha, i.e. 28.90 t·ha⁻¹·year⁻¹. *Salix alba* UWM 075 yielded 13.36, *Salix alba v. chermesina* UP only 3.93, and *Salix pontederana* UP merely 2.72 t·ha⁻¹·year⁻¹ DM. The energy value

of biomass yield of *Salix viminalis* UWM 006 harvested from 1 ha converted for 1 year of plantation use was 500 GJ. The biomass of this species contained the highest concentration of hydrogen and the lowest was of ash, sulphur and nitrogen. *Salix viminalis* UWM 006 is definitely recommended for use at densities ca. 10 thousand plants per 1 ha in the four-year harvest cycle. The cultivation of *Salix pontederana* UP or *Salix alba* v. *chermesina* UP did not prove so beneficial.

Key words: willow, morphological features, yield, biomass, lower heating value, features of biomass

Zaakceptowano do druku – *Accepted for print*: 28.04.2018

Do cytowania – *For citation*

Tworkowski J., Stolarski M.J., Szczukowski S., Krzyżaniak M. 2018. Produkcyjność i jakość biomasy wierzby energetycznej zbieranej w cyklach czteroletnich. *Fragm. Agron.* 35(3): 118–128.