



Ciepło spalania biomasy wierzbowej

Diana Fijałkowska, Leszek Styszko
Politechnika Koszalińska

1. Wstęp

Biomasa jest obecnie w Polsce głównym źródłem energii odnawialnej. Udział biomasy w bilansie paliwowym w 2008 roku w Polsce wyniósł 87,7%, a w UE-25 – 46,0% [3]. Podstawowym paliwem stałym z biomasy jest biomasa leśna, ale znaczenia nabierają także paliwa z biomasy rolniczej. Do nich zalicza się biomasę drzew i krzewów szybko rosnących, a głównie wierzby krzewiastej, trawy wieloletnie, słoma oraz pozostałości organiczne.

W procesie spalania biomasy wytwarza się ciepło. Ilość tego ciepła zależy od rodzaju biomasy, jej wilgotności i gatunku roślin. Kryteriami określającymi jakość paliwa są: ciepło spalania, wilgotność paliwa, zawartość części lotnych, zawartość popiołu, wartość opałowa paliwa i ziarnistość paliwa [2, 5]. Ciepło spalania określa się doświadczalnie w kalorymetrze do paliw stałych. W literaturze mało jest opracowań dotyczących związku pomiędzy technologią pozyskania biomasy, a ciepłem spalania biomasy wierzbowej.

Celem pracy była ocena ciepła spalania biomasy wierzbowej kilku klonów wierzby krzewiastej (*Salix viminalis*), pozyskanej w drugim,

trzecim i czwartym roku uprawy w rejonie Koszalina, na glebie lekkiej, przy zróżnicowanym nawożeniu organicznym i mineralnym.

2. Materiał i metoda

Do analiz ciepła spalania analitycznego posłużyły próbki biomasy pozyskane z doświadczenia ścisłego założonego w 2006 roku metodą losowanych podbloków w układzie zależnym w trzech powtórzeniach, gdzie podblokami I rzędu były cztery kombinacje nawozowe, a II rzędu – dziewięć klonów wierzby przy obsadzie 32 100 krzaków na hektarze. Doświadczenie składało się z okresu przygotowawczego (2005 rok), w którym wysadzono zrzesy, a po zakończonej wegetacji – skoszono jednoroczne pędy, oraz z okresu odrastania pędów (lata 2006÷2009).

W ramach kombinacji nawozowych zastosowano: obiekty bez nawożenia (a), nawożone kompostem w ilości $10 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ suchej masy (b), nawożone kompostem jak w kombinacji „b” i Hydrofoską 16 w dawce $562,5 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ($\text{N} - 90 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, $\text{P}_2\text{O}_5 - 90 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ i $\text{K}_2\text{O} - 90 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) (c) oraz nawożone kompostem jak w kombinacji „b” i Hydrofoską 16 w dawce $1125 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ N ($180 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, $\text{P}_2\text{O}_5 - 180 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ i $\text{K}_2\text{O} - 180 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) (d).

W kwietniu 2006 roku zastosowano pogłównie, zgodnie ze schematem doświadczenia, nawożenie kompostem oraz Hydrofoską 16. Nawozy te wymieszano z glebą. W latach 2007, 2008 i 2009, przed ruszeniem wegetacji wierzby, wysiano pogłównie jedynie nawóz Hydrofoska 16.

Pomiary poziomu lustra wody w piezometrach o głębokości 600 cm wykonane w latach 2007, 2008 i 2009, nie wykazały występowania w nich wody gruntowej. Świadczyło to, że wzrost pędów wierzby odbywał się wyłącznie przy dostępie wody opadowej.

Do badań włączono dziewięć klonów wierzby: 1047, 1054, 1023, 1013, 1052, 1047D, 1056, 1018 i 1033.

Po wegetacji drugiej (luty 2008), trzeciej (luty 2009) i czwartej (listopad 2009) skoszono wierzbę i pobrano próby pędów do analiz wartości energetycznej. Próbki biomasy pobrano w dniu koszenia (I termin) oraz na przełomie maja i czerwca (II termin). Pędy wierzby wysuszono, rozdrobiono i zmielono.

Zmielone próbki pędów przekazano do analiz ciepła spalania do laboratorium analiz biomasy Wydziału Analiz Chemicznych Południowego

Koncernu Energetycznego S.A. przy Elektrowni Siersza w Trzebini. Analizy powyższe wykonano zgodnie procedurą Q/ZK/P/15/12/ A:2005, która jest zbieżna z procedurą opisaną w normie PN-81/G-04513.

Dla ciepła spalania w stanie analitycznym wykonano analizę wariancji oraz oceniono strukturę procentową komponentów wariacyjnych dla modelu mieszanego. Istotność efektów oceniono testem F.

3. Wyniki i dyskusja

W analizach wykazano, że na ciepło spalania w stanie analitycznym biomasy z lat 2007÷2009 największy wpływ miały lata uprawy wierzby, mniejsze – klony wierzby, a względnie małe, termin poboru prób biomasy, a najmniejszy, chociaż istotny – kombinacje nawozowe (tab. 1). Wykazano również, że suma zmienności interakcji wynosiła 38,1%, z czego istotne interakcje **powodowały 17,2% zmienności**.

Analizy ciepła spalania biomasy wierzbowej potwierdziły uszeregowanie znaczenia pięciu czynników wykazane w analizie komponentów wariacyjnych (tab. 2). Różnice pomiędzy skrajnymi poziomami badanych czynników w kolejności malejących efektów zostały uszeregowane:

- lata uprawy – 411 KJ·kg⁻¹ s. m.
- klony wierzby – 321 KJ·kg⁻¹ s. m.
- termin poboru prób biomasy – 60 KJ·kg⁻¹ s. m.
- kombinacje nawozowe – 52 KJ·kg⁻¹ s. m.

Najwyższe wartości ciepła spalania uzyskano z biomasy po trzecim roku uprawy, z klonu 1033, z drugiego terminu poboru prób i z obiektów nawożonych samym kompostem („b”), a najniższe po drugim roku uprawy, z klonu 1047, z pierwszego terminu poboru prób i z obiektów intensywnie nawożonych („d”).

Na ciepło spalania w stanie analitycznym wywarła także interakcja klonów wierzby z nawożeniem (tab. 3). Różnice pomiędzy klonami wierzby były najmniejsze na obiektach bez nawożenia („a”), a największe na obiektach z nawożeniem kompostem („b”) i one wyniosły odpowiednio 149 KJ·kg⁻¹ s. m., tj. 0,8% i 408 KJ·kg⁻¹ s. m., tj. 2,2% wartości największych.

Tabela 1. Wpływ badanych czynników na ciepło spalania w stanie analitycznym biomasy wyprodukowanej w latach 2007÷2009 roku

Table 1. Effect of studied factors on the calorific value in the analytical state of biomass produced in 2007÷2009

Komponent wariancyjny	Poziomy czynnika	Struktura procentowa komponentów wariancyjnych ^{x/}
Klony wierzby [D]	9	9,1***
Kombinacje nawozowe [C]	4	0,7**
Termin poboru prób biomasy [B]	2	2,0***
Lata uprawy wierzby [A]	3	50,1***
Suma współdziałań		38,1
W tym współdziałania:		
DC		3,1***
DA		1,2*
CA		1,9***
BA		0,8*
DCA		2,1*
DCB		4,3**
CBA		3,8***
Pozostałe		20,9

^{x/} Istotność przy poziomie ufności: * $\alpha = 0,05$; ** $\alpha = 0,01$; *** $\alpha = 0,001$;

Różnice pomiędzy kombinacjami nawozowymi były najmniejsze w klonie 1047, a największe w klonie 1033 i one wyniosły odpowiednio $85 \text{ KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$, tj. 0,5% i $279 \text{ KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$, tj. 1,5% wartości największych.

Wpływ współdziałania kombinacji nawozowych z latami uprawy wierzby na ciepło spalania biomasy współdziałania klonów wierzby z liczbą lat uprawy wierzby na ciepło spalania biomasy zestawiono w tabeli 4. Różnice w ciepłe spalania biomasy pomiędzy klonami wierzby były najmniejsze po drugim roku uprawy, a największe – po trzecim roku, i one wyniosły odpowiednio $237 \text{ KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$, tj. 1,3% i $422 \text{ KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$, tj. 2,2% wartości największych.

Różnice w ciepłe spalania biomasy pomiędzy latami uprawy klonami były najmniejsze w klonie 1023, a największe – w klonie 1033, i one wyniosły odpowiednio $307 \text{ KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$, tj. 1,6% i $508 \text{ KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$, tj. 2,7% wartości największych.

Tabela 2. Wpływ badanych czynników na ciepło spalania biomasy w stanie analitycznym [$\text{KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$]

Table 2. Effect of studied factors on the calorific value in analytical state of biomass [$\text{KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ d.m.}$]

Badany czynnik	Poziomy czynnika	Ciepło spalania biomasy	
		[$\text{KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$]	różnice ^{x/} [$\text{KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$]
Lata uprawy wierzby[A]	2	18351	411
	3	18762	
	4	18550	
	NIR _{0,05}	28***	
Termin poboru prób biomasy [B]	I	18524	60
	II	18584	
	NIR _{0,05}	23***	
Kombinacje nawozowe [C]	a	18577	52
	b	18578	
	c	18537	
	d	18526	
	NIR _{0,05}	33**	
Klony wierzby [D]	1047	18453	321
	1054	18490	
	1023	18530	
	1013	18582	
	1052	18530	
	1047D	18529	
	1056	18558	
	1018	18541	
	1033	18774	
NIR _{0,05}	49***		
Średnia z doświadczenia		18554	

^{x/} Różnice – różnice między wartościami skrajnymi

Istotność przy poziomie ufności: ** $\alpha = 0,01$; *** $\alpha = 0,001$;

Dla NIR podano wartość liczbowa dla poziomu ufności $\alpha = 0,05$.

Dane o wpływie współdziałania kombinacji nawozowych z latami uprawy wierzby na ciepło spalania biomasy w stanie analitycznym zestawiono w tabeli 5. Różnice w ciepłe spalania biomasy między kombinacjami nawozowymi były najmniejsze po trzecim roku uprawy, a największe – po czwartym roku. Wyniosły one odpowiednio $24 \text{ KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$, tj. 0,1% i $152 \text{ KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$, tj. 0,8% wartości największych.

Tabela 3. Wpływ współdziałania klonów wierzby z nawożeniem na ciepło spalania w stanie analitycznym [$\text{KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$]

Table 3. Effect of interaction between willow clones and fertilization on the calorific value in analytical state of biomass 1 [$\text{KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ d. m.}$]

Klony wierzby	Kombinacje nawozowe				różnice ^{x/}
	a	b	c	d	
1047	18471	18403	18450	18488	85
1054	18538	18507	18469	18449	89
1023	18450	18641	18515	18515	191
1013	18533	18678	18614	18504	174
1052	18512	18598	18544	18465	133
1047D	18643	18477	18523	18474	169
1056	18599	18624	18478	18531	146
1018	18615	18463	18533	18554	152
1033	18532	18811	18703	18750	279
Różnice ^{x/}	149	408	253	301	
NIR _{0,05}	99***				

^{x/} Różnice – różnice między wartościami skrajnymi;

Istotność przy poziomie ufności: *** $\alpha = 0,001$;

Dla NIR podano wartość liczbową dla poziomu ufności $\alpha = 0,05$.

Tabela 4. Wpływ współdziałania klonów wierzby z liczbą lat uprawy wierzby na ciepło spalania biomasy w stanie analitycznym [$\text{KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$]

Table 4. Effect of interaction between willow clones and number of years of cultivation of willow on the calorific value in analytical state of biomass [$\text{KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ d. m.}$]

Klony wierzby	Lata uprawy			różnice ^{x/}
	2	3	4	
1047	18280	18603	18476	323
1054	18280	18756	18435	476
1023	18385	18692	18513	307
1013	18388	18822	18537	434
1052	18323	18746	18521	423
1047D	18309	18718	18561	409
1056	18347	18786	18542	439
1018	18330	18711	18583	381
1033	18517	19025	18781	508
Różnice ^{x/}	237	422	346	-
NIR _{0,05}	85*			

^{x/} Różnice – różnice między wartościami skrajnymi;

Istotność przy poziomie ufności: * $\alpha = 0,05$;

Dla NIR podano wartość liczbową dla poziomu ufności $\alpha = 0,05$.

Tabela 5. Wpływ współdziałania kombinacji nawozowych z latami uprawy wierzby na ciepło spalania biomasy w stanie analitycznym [$\text{KJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ s. m.]

Table 5. Effect of interaction between willow clones and number of years of cultivation of willow on the calorific value in analytical state of biomass [$\text{KJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ d. m.]

Kombinacje nawozowe	Lata uprawy			
	2	3	4	różnice ^{x/}
a	18329	18773	18629	444
b	18415	18749	18571	334
c	18321	18766	18523	445
d	18340	18760	18477	420
Różnice ^{x/}	94	24	152	-
NIR _{0,05}	57***			

^{x/} Różnice – różnice między wartościami skrajnymi;

Istotność przy poziomie ufności: *** $\alpha = 0,001$;

Dla NIR podano wartość liczbową dla poziomu ufności $\alpha = 0,05$.

Tabela 6. Wpływ współdziałania terminu poboru prób biomasy z latami uprawy wierzby na ciepło spalania biomasy w stanie analitycznym [$\text{KJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ s. m.]

Table 6. Effect of interaction between time of biomass sampling and years of cultivation of willow on the calorific value in analytical state of biomass [$\text{KJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ d. m.]

Termin poboru prób biomasy	Lata uprawy			
	2	3	4	różnice ^{x/}
I	18336	18708	18530	372
II	18366	18816	18570	450
Różnice ^{x/}	0	108	40	-
NIR _{0,05}	40*			

^{x/} Różnice – różnice między wartościami skrajnymi;

Istotność przy poziomie ufności: *** $\alpha = 0,001$;

Dla NIR podano wartość liczbową dla poziomu ufności $\alpha = 0,05$.

Różnice w ciepłe spalania biomasy między latami uprawy wierzby były najmniejsze na obiektach nawożonych kompostem z osadów komunalnych („b”), a największe – na obiektach nawożonych kompostem i Hydrofoską 16 w dawce $562,5 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Różnice te wyniosły odpowiednio $334 \text{ KJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ s. m., tj. 1,8% i $445 \text{ KJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ s. m., tj. 2,4% wartości największych.

Różnice w ciepłe spalania biomasy w latach uprawy wierzby między terminami poboru prób były najmniejsze w drugim roku, a największe – w trzecim (tab. 6). Różnice te wyniosły odpowiednio $0 \text{ KJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ s. m.,

i $108 \text{ KJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ s. m., tj. 0,6% wartości największych. Różnice w ciepłe spalania biomasy między latami uprawy wierzby były mniejsze w pierwszym terminie poboru prób, a większe – w drugim. Wyniosły one odpowiednio $372 \text{ KJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ s. m., tj. 2,0% i $450 \text{ KJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ s. m., tj. 2,4% wartości największych.

W tabelach 7, 8 i 9 zestawiono dane dla ciepła spalania przy istotnych interakcjach potrójnych. Na obiektach bez nawożenia („a”), z nawożeniem samym kompostem („b”) i z nawożeniem kompostem oraz Hydrofoską16 w dawce $562,5 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ („c”), różnice w ciepłe spalania pomiędzy klonami były większe w drugim terminie poboru prób (odpowiednio: $573 \text{ KJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ s. m., tj. 3,0%, $552 \text{ KJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ s. m., tj. 2,9% i $328 \text{ KJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ s. m., tj. 1,7% wartości największych) niż w pierwszym terminie poboru prób (odpowiednio $323 \text{ KJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ s. m., tj. 1,7%, $263 \text{ KJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ s. m., tj. 1,4% i $314 \text{ KJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ s. m., tj. 1,7% wartości największych) (tab. 7).

Na obiektach nawożonych kompostem oraz Hydrofoską16 w dawce $1125 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ („d”), różnice w ciepłe spalania pomiędzy klonami były większe w pierwszym terminie poboru prób ($369 \text{ KJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ s. m., tj. 2,0%) niż w drugim ($302 \text{ KJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ s. m., tj. 1,6%). Bardzo małe różnice w ciepłe spalania pomiędzy kombinacjami nawozowymi były w klonach 1033 ($90 \text{ KJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ s. m., tj. 0,5%) i 1013 ($91 \text{ KJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ s. m., tj. 0,5%), a największe w klonie 1023 ($211 \text{ KJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ s. m., tj. 1,1%) (tab. 7). W drugim terminie poboru prób małe różnice w ciepłe spalania pomiędzy kombinacjami nawozowymi były w klonie 1054 ($142 \text{ KJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ s. m., tj. 0,8%), a największe w klonie 1013 ($264 \text{ KJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ s. m., tj. 1,4%).

W tabeli 8 zestawiono dane obrazujące wpływ współdziałania klonów z latami uprawy i terminem poboru prób wierzby na ciepło spalania biomasy. Na obiektach bez nawożenia („a”) oraz z nawożeniem kompostem oraz Hydrofoską16 w dawce $1125 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ („d”), różnice w ciepłe spalania pomiędzy klonami były największe w trzecim roku uprawy (odpowiednio $613 \text{ KJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ s. m., tj. 3,2% i $415 \text{ KJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ s. m., tj. 2,2% wartości największych) a najmniejsze – w pierwszym roku uprawy (odpowiednio $201 \text{ KJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ s. m., tj. 1,1% i $280 \text{ KJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ s. m., tj. 1,5% wartości największych). W kombinacji z nawożeniem samym kompostem („b”) różnice te między klonami były największe w pierwszym roku uprawy ($555 \text{ KJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ s. m., tj. 3,0%), a najmniejsze – w drugim roku ($367 \text{ KJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ s. m., tj. 1,9%). Na obiektach „c”) różnice te między klonami były największe w czwartym roku uprawy ($382 \text{ KJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ s. m. tj. 2,0%), a najmniejsze – w pierwszym ($189 \text{ KJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ s. m. tj. 1,0%).

Tabela 7. Wpływ współdziałania klonów z nawożeniem i terminem poboru prób na ciepło spalania biomasy w stanie analitycznym [$\text{KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$]

Table 7. Effect of interaction of clones and fertilization and sampling date on the calorific value in analytical state of biomass [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ d. m.}$]

Klon wierzby	Termin poboru prób	Kombinacje nawozowe				różnice ^{x/}
		a	b	c	d	
1047	I	18378	18409	18487	18388	109
	II	18564	18398	18412	18587	189
1054	I	18505	18492	18353	18455	152
	II	18570	18522	18584	18442	142
1023	I	18509	18642	18546	18431	211
	II	18391	18639	18483	18598	248
1013	I	18531	18590	18595	18504	91
	II	18534	18767	18633	18503	264
1052	I	18537	18529	18583	18400	183
	II	18487	18666	18504	18532	179
1047D	I	18583	18454	18571	18393	190
	II	18703	18500	18476	18555	227
1056	I	18605	18549	18429	18499	176
	II	18592	18700	18528	18565	172
1018	I	18614	18485	18522	18515	129
	II	18616	18440	18545	18593	176
1033	I	18701	18672	18667	18757	90
	II	18964	18950	18740	18744	220
Różnice ^{x/}	I	323	263	314	369	121
	II	573	552	328	302	122
NIR _{0,05}		139**				

^{x/} Różnice – różnice między wartościami skrajnymi;

Istotność przy poziomie ufności: *** $\alpha = 0,001$;

Dla NIR podano wartość liczbową dla poziomu ufności $\alpha = 0,05$.

W drugim roku uprawy różnice w ciepłe spalania pomiędzy kombinacjami nawożenia były największe w klonie 1047 – $275 \text{ KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$, tj. 1,5% wartości największych, a najmniejsze – w klonie 1047D – $83 \text{ KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$, tj. 0,5% wartości największych na tych obiektach. W trzecim roku uprawy różnice w ciepłe spalania pomiędzy kombinacjami nawożenia były największe w klonie 1047 D – $320 \text{ KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$, tj. 1,7%, a najmniejsze – w klonie 1054 – $107 \text{ KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$, tj. 0,6% wartości największych. W czwartym roku uprawy różnice w ciepłe spalania pomiędzy kombinacjami nawożenia były największe w klonie 1033 D –

279 KJ·kg⁻¹ s. m., tj. 1,5%, a najmniejsze – w klonie 1047 – 107 KJ·kg⁻¹ s. m., tj. 0,6% wartości największych na tych obiektach.

Tabela 8. Wpływ współdziałania klonów z latami uprawy i terminem poboru prób wierzby na ciepło spalania biomasy w stanie analitycznym [KJ·kg⁻¹ s. m.]

Table 8. Effect of interaction of clones and years of cultivation and sampling date on the calorific value in analytical state of biomass [KJ·kg⁻¹ dm]

Klon wierzby	Rok uprawy wierzby	Kombinacje nawozowe				różnice ^{x/}
		a	b	c	d	
1047	2	18400	18125	18269	18327	275
	3	18502	18604	18568	18737	235
	4	18512	18481	18512	18400	112
1054	2	18282	18370	18256	18212	258
	3	18750	18701	18808	18767	107
	4	18582	18450	18342	18367	240
1023	2	18315	18526	18296	18404	230
	3	18533	18747	18757	18731	224
	4	18504	18649	18492	18410	239
1013	2	18342	18503	18358	18350	161
	3	18828	18864	18880	18715	165
	4	18428	18668	18605	18446	240
1052	2	18253	18406	18321	18312	153
	3	18649	18873	18765	18697	224
	4	18634	18515	18545	18388	246
1047D	2	18334	18343	18260	18301	83
	3	18882	18562	18771	18657	320
	4	18713	18526	18540	18464	249
1056	2	18302	18471	18298	18317	173
	3	18838	18884	18719	18703	181
	4	18655	18519	18418	18576	237
1018	2	18277	18308	18390	18347	113
	3	18863	18574	18682	18725	289
	4	18706	18506	18528	18591	200
1033	2	18454	18680	18445	18492	235
	3	19115	18929	18942	19112	186
	4	18927	18825	18724	18648	279
Różnice ^{x/}	2	201	555	189	280	192
	3	613	367	374	415	213
	4	499	375	382	281	167
NIR _{0,05}		171*				

^{x/} Różnice – różnice między wartościami skrajnymi;

Istotność przy poziomie ufności: * $\alpha = 0,05$;

Dla NIR podano wartość liczbową dla poziomu ufności $\alpha = 0,05$.

Tabela 9. Wpływ współdziałania nawożenia z terminem poboru prób i rokiem uprawy na ciepło spalania biomasy w stanie analitycznym [$\text{KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$]

Table 9. Effect of interaction of fertilization and sampling of date and year of cultivation on the calorific value in analytical state of biomass [$\text{KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dm}$]

Rok uprawy wierzby	Termin poboru prób	Kombinacje nawozowe				
		a	b	c	d	różnice ^{x/}
2	I	18356	18376	18293	18320	83
	II	18301	18454	18349	18360	153
3	I	18653	18691	18781	18706	128
	II	18893	18807	18750	18815	143
4	I	18645	18541	18510	18422	223
	II	18612	18600	18536	18532	80
Różnice ^{x/}	I	297	315	488	386	140-
	II	592	353	401	455	73-
NIR _{0,05}		81***				

^{x/} Różnice – różnice między wartościami skrajnymi;

Istotność przy poziomie ufności: *** $\alpha = 0,001$;

Dla NIR podano wartość liczbową dla poziomu ufności $\alpha = 0,05$.

Na obiektach bez nawożenia („a”), z nawożeniem kompostem („b) oraz z nawożeniem kompostem i Hydrofoską16 w dawce $562,5 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ („c”), różnice w ciepłe spalania pomiędzy klonami były największe w drugim terminie poboru prób (odpowiednio $592 \text{ KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$, tj. 3,1%, $353 \text{ KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$, tj. 1,9% oraz $455 \text{ KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$, tj. 2,4% wartości największych), a najmniejsze – w pierwszym terminie poboru prób (odpowiednio $297 \text{ KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$, tj. 1,6%, $315 \text{ KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$, tj. 1,7% oraz $3865 \text{ KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$, tj. 2,1% wartości największych). Na obiektach „c”) różnice w ciepłe spalania pomiędzy klonami były największe w pierwszym terminie poboru prób (odpowiednio $488 \text{ KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$, tj. 2,6%), a najmniejsze – w drugim terminie poboru prób ($401 \text{ KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$, tj. 2,1%).

Biomasa z wieloletnich roślin energetycznych pozyskana z plantacji połowych może być wykorzystana jako paliwo stałe: zrębki [10, 12, 13] i pelet [7]. W badaniach wartość kaloryczna drewna zbieranego co roku wynosiła $18,55 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$, co dwa lata – $19,25 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$, co trzy lata – $19,56 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$ [9], a co cztery lata – $19,39 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$ [13]. W innych badaniach z lat 1996÷1999 wykazano, że biomasa sześciu klonów wierzby uprawianej na glebie mineralnej, klasy IIIb w Oborach k. Kwidzyna, przy zróżnicowanym zagęszczeniu (od 20 tys. do 60 tys. ha^{-1} zręzków), była o wartości kalorycznej $18,63 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$

przy zbiorze corocznym, $19,25 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ s. m. przy zbiorze co dwa lata i $19,27 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ s. m. przy zbiorze co trzy lata [11]. Natomiast na glebie torfowej w latach 1995÷1998 w Okrągłej Łące koło Kwidzyna, przy zagęszczeniu $100 \text{ tys.}\cdot\text{ha}^{-1}$ zrzesów klonu 1047 na obiektach bez nawożenia uzyskano następującą kaloryczność biomasy: $19,38 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ s. m. przy zbiorze corocznie, $19,16 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ s. m. przy zbiorze co dwa lata i $19,33 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ s. m. przy zbiorze co trzy lata [11]. W tej miejscowości na obiektach nawożonych w czystym składniku $\text{N}_{40}\text{P}_{60}\text{K}_{80}$, uzyskano nieco niższą kaloryczność biomasy wierzby, a mianowicie: $19,11 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ s. m. przy zbiorze corocznie, $19,33 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ s. m. przy zbiorze co dwa lata i $19,34 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ s. m. przy zbiorze co trzy lata. W doświadczeniu na glebie mineralnej przeciętna z trzech częstotliwości zbiorów, kaloryczność wyniosła $19,04 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ s. m., a w doświadczeniu na glebie organicznej przeciętna kaloryczność biomasy była wyższa i wyniosła na obiektach bez nawożenia $19,33 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ s. m., a na obiektach nawożonych w czystym składniku $\text{N}_{40}\text{P}_{60}\text{K}_{80}$ – $19,26 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ s. m. [11]. Również w doświadczeniach Agera i in. [1] kaloryczność licznych rodów wierzby krzewiastej była zróżnicowana i wahała się od 19,0 do $20,0 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ s. m.

W badaniach własnych również występowały różnice w kaloryczności biomasy wierzbowej, gdzie największy wpływ miały lata uprawy i klony wierzby, natomiast pozostałych czynników (termin poboru prób i kombinacji nawozowych), wpływ był mniejszy. Suma zmienności interakcji przy cieple spalania biomasy wierzbowej dochodziła do 38,1%, co znacznie modyfikowało efekty czynników głównych. Jednak w literaturze brak jest wzmianki o efektach interakcji.

Wydaje się, na podstawie danych literaturowych, że powodem różnej kaloryczności biomasy wierzbowej jest jej skład chemiczny, a głównie różnice w zawartości celulozy, hemicelulozy (w tym pentozanów i heksozanów) oraz ligniny. W badaniach Szczukowskiego i in. [14] wykazano, że zawartość celulozy rosła wraz z opóźnianiem terminu zbioru wierzby. Przy zbiorze co roku wynosiła 45,58%, co dwa lata – 48,02% i co trzy lata – 55,94%. W badaniach Stolarskiego i in. [7] zawartość celulozy, lignin i pentozanów przy zbiorze 1-rocznym wyniosła odpowiednio 41,54%, 23,88% i 18,44, a przy zbiorze co 4 lata odpowiednio: 44,76%, 21,75% i 18,94%. W badaniach Prosińskiego i Surmińskiego [6] wykazano, że drewno starszych roślin wierzby zawiera więcej substancji ekstrakcyjnych, celulozy i ligniny, a mniej pentozanów. Rozbieżność

pomiędzy badaniami Stolarskiego i in. [7], Szczukowskiego i in. [14], a badaniami Prosińskiego i Surmińskiego [6] wynika z innego materiału genetycznego wierzby. Z opracowania Domańskiego i in. [2] i Surmińskiego [8] wynika, że ciepło spalania celuloz i lignin się bardzo różni. W oparciu na badania własne można sądzić, że ciepło spalania biomasy wierzby nie jest jednakowe dla wszystkich warunków, a o wartości cieplnej konkretnej biomasy decydują nie tylko gatunek wierzby i liczba lat jej uprawy, ale także odmiana wierzby i warunki jej uprawy.

4. Wnioski

1. Na ciepło spalania biomasy wierzbowej z lat 2007÷2009, największy wpływ miały lata uprawy wierzby, mniejsze – klony wierzby, a względnie małe – termin poboru prób biomasy, a najmniejszy, chociaż istotny – kombinacje nawozowe. Suma zmienności interakcji wynosiła 38,1%, z czego istotne interakcje powodowały 17,2% zmienności. Różnice pomiędzy skrajnymi poziomami badanych czynników w kolejności malejących efektów zostały uszeregowane następująco: lata uprawy – $411 \text{ KJ}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$, klony wierzby – $321 \text{ KJ}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$, termin poboru prób biomasy – $60 \text{ KJ}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$ i kombinacje nawozowe – $52 \text{ KJ}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$
2. Na ciepło spalania w stanie analitycznym miały także wpływ interakcje podwójne: klonów wierzby z nawożeniem, klonów wierzby z latami uprawy, nawożenia z latami uprawy, terminu poboru prób z latami uprawy oraz interakcje potrójne: klonów wierzby z nawożeniem i latami uprawy, klonów wierzby z nawożeniem i terminem poboru prób oraz nawożenia z terminem poboru prób i rokiem uprawy.
3. Najwyższe wartości ciepła spalania uzyskano z biomasy po trzecim roku uprawy, z klonu 1033, z drugiego terminu poboru prób i z obiektów nawożonych samym kompostem („b”), a najniższe – po drugim roku uprawy, z klonu 1047, z pierwszego terminu poboru prób i z obiektów intensywnie nawożonych kompostem w dawce 15 ton świeżej masy i $1125 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ nawozu Hydrofoska 16 („d”).

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008÷2011
jako projekt badawczy*

Literatura

1. **Ager A., Rönnbeg-Westljung A.C., Thorsén J., Sirén G.:** *Genetic improvement of willow for energy forestry in Sweden*. Sveriges Lantbruks-Universitet, Avd. För eneriskog., raport.43: ss.50. 1986.
2. **Domański M., Dzurenda L., Jabłoński M., Osipiuk J.:** *Drewno jako materiał energetyczny*. Wydawnictwo SGGW. Warszawa: ss. 130. 2007.
3. GUS: *Energia ze źródeł odnawialnych w 2009 roku*. Warszawa 2009.
4. **Kisiel R., Stolarski M., Szczukowski S., Tworkowski J.:** *Energochłonność i efektywność energetyczna uprawy wierzby krzewiastej*. Fragmenta agronomica 3(7): 87÷97. 2003.
5. **Kordylewski W. (red):** *Spalanie i paliwa*. Wyd. V poprawione i uzupełnione. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław: ss.478. 2008.
6. **Prosiński S., Surmiński J.:** *Właściwości chemiczne drewna prętów 1, 2 i 3-letnich wierzby ostrolistnej (Salix acutifolia Will.)*. Roczn. WSR Poznań XI:3-8. 1961.
7. **Stolarski M., Kisiel R., Szczukowski S., Tworkowski J.:** Koszty produkcji peletów z biomasy wierzby krzewiastej. Roczniki Nauk Rol. Seria G., T. 90(2): 211÷216. 2003.
8. **Surmiński J.:** *Budowa i morfologia surowca i mas włóknistych*. AR w Poznaniu. 1997.
9. **Szczukowski S.:** *Zwiększenie produkcji biomasy z wieloletnich upraw wierzby krzewiastej*. [W:] Paliwa i energia XXI wieku szansą rozwoju wsi i miast. Oficyna Wydawnicza WIT. 171÷181. Warszawa 2006.
10. **Szczukowski S., Tworkowski J., Kwiatkowski J.** *Możliwości wykorzystania biomasy Salix spp. pozyskiwanej z gruntów orných jako ekologicznego paliwa oraz surowca do produkcji celulozy i płyt wiórowych*. Postępy nauk Rol., 2: 53÷63, 1998.
11. **Szczukowski S., Tworkowski J.** *Produktywność oraz wartość energetyczna biomasy wierzby krzewiastej Salix spp. Na różnych typach gleb w pradolinie Wisły*. Postępy Nauk Rol. 2: 29÷36a. 2001.
12. **Szczukowski S., Stolarski M., Tworkowski J., Przybyłowski J., Kisiel R.:** *Wykorzystanie biomasy wierzby krzewiastej do produkcji energii cieplnej*. Problemy Inżynierii Rolniczej 2: 31÷40. 2004.
13. **Szczukowski S., Tworkowski S., Stolarski M., Grzelczyk M.:** *Produktywność roślin wierzby (Salix spp.) i charakterystyka pozyskanej biomasy jako paliwa*. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. Z. 507: 495÷503, 2005.
14. **Szczukowski S., Tworkowski J., Stolarski M., Sobotka W.:** *Biomasa wierzby krzewiastej z plantacji połowych źródłem ekologicznego paliwa i surowców*. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. 478: 278÷286. 2001.

Calorific Value of Willow Biomass

Abstract

The aim of this study was to assess the calorific value in analytic state of willow biomass of several clones of willow (*Salix viminalis*), acquired in the second, third and fourth year of cultivation in the region of Koszalin, on light soil, under different organic and mineral fertilization.

Biomass of nine willow clones grown for four years on light soil with application of compost from sewage sludge and different doses of Hydrofoska 16 fertilizer were included in the studies. Biomass samples were taken twice (immediately after mowing in winter and at the turn of May and June).

Calorific value of willow biomass from years 2007÷2009 was mainly affected by years of willow cultivation, less influenced by willow clones, and relatively less influenced by date of sampling of biomass and lowest influenced although significantly by combination of fertilizer. The sum of interaction variation was 38.1%, with significant interactions resulted from 17.2% of variability. The differences between extreme levels of studied factors in order of decreasing effects were ranked as follows: growing years – 411 kJ·kg⁻¹ dm, willows clones – 321 kJ·kg⁻¹ dm, date of biomass sampling – 60 kJ·kg⁻¹ dm and combinations of fertilizer – 52 kJ·kg⁻¹ dm.

Also double interactions: willow clones with fertilization, willow clones with years of cultivation, fertilization with years of cultivation, date of samples taking with years of cultivation and the triple interactions: willow clones with fertilization and years of cultivation, willow clones with fertilization and sampling date and fertilization with date of sampling and year of cultivation had impact on calorific value in analytic state.

The highest calorific value of biomass was obtained after the third year of cultivation with clone 1033, from the second sampling period and from objects fertilized only with compost (“b”) and the lowest – after the second year of cultivation with clone 1047, from the first date of sampling and objects intensively fertilized with compost (dose of 15 tonnes of fresh mass and 1125 kg·ha⁻¹ of Hydrofoska 16 fertilizer (“d”).

