

HENRYK BURCZYK, JOLANTA BATOG,
JAKUB FRANKOWSKI, ALEKSANDRA WAWRO¹
Instytut Włókien Naturalnych i Roślin Zielarskich

PLONOWANIE WYBRANYCH ODMIAN SORGA UPRAWIANYCH W PLONIE GŁÓWNYM I WTÓRYM DO PRODUKCJI BIOETANOLU

Nadesłany: 13.04.2017 Zaakceptowany do druku: 16.10.2017

1. Wstęp

Sorgo uprawiane jest głównie w rejonach świata o wysokich temperaturach powietrza, małej ilości opadów i niskim poziomie wody gruntowej np. w Afryce, Azji i Ameryce Południowej. W ostatnich latach w miarę ocieplenia klimatu i obniżania poziomu wody w glebie, uprawa sorgo w Polsce znajduje coraz więcej zwolenników. Biomasa sorgo może być wykorzystywana na paszę objętościową oraz w energetyce zawodowej do produkcji energii odnawialnej, w tym do produkcji bioetanolu [Burczyk 2013, Chmielewska i in. 2015, Batog i in. 2016a]. Należy podkreślić, że wykorzystanie biomasy roślinnej jako alternatywnego źródła energii może prowadzić do wzmocnienia bezpieczeństwa energetycznego i pozytywnie wpływać na redukcję emisji gazów cieplarnianych.

Istnieje potrzeba poznania wydajności bioetanolu z biomasy wybranych odmian sorgo uprawianych zarówno w plonie głównym, jak i wtórym. Sorgo siane w plonie wtórym, tzn. po zbiorze żyta uprawianego w poplonie ozimym, daje łącznie wyższe plony biomasy z jednostki powierzchni pola, niż sorgo siane w plonie głównym [Burczyk 2013]. Biomasa z żyta poplonowego można wykorzystać na paszę objętościową lub biogaz, a biomasa sorgo do wytwarzania etanolu celulozowego. W rejonach o małej ilości opadów atmosferycznych (poniżej 550 mm)

¹ Wkład pracy: Henryk Burczyk – 25%, Jolanta Batog – 25%, Jakub Frankowski – 25%, Aleksandra Wawro – 25%.

i niskim poziomie wody gruntowej można zmniejszyć ryzyko niepowodzenia produkcji biomasy sorgo poprzez jego uprawę w plonie wtórnym, a nie jako plon główny. Wówczas ewentualne obniżenie plonu sorgo na skutek niedoboru wilgoci w glebie można zrekomensować biomasą żyta poplonowego.

Biomasa sorgo jest odnawialnym surowcem wzbudzającym duże zainteresowanie w kontekście zrównoważonej produkcji paliw, materiałów i substancji chemicznych. Charakteryzuje się ona złożonym składem chemicznym, ponieważ w jej strukturze znajduje się kompleks polimerowy (lignoceluloza), który stosunkowo opornie podlega biodegradacji. Występuje on w ścianach komórkowych roślin i składa się z celulozy, hemiceluloz i ligniny. Wymusza to konieczność stosowania wstępnej obróbki biomasy, której celem jest rozdrobnienie fazy stałej oraz rozluźnienie zwartej struktury lignocelulozy, co w sposób istotny wpływa na przebieg dalszych etapów procesu otrzymywania bioetanolu tj. hydrolizę enzymatyczną i fermentację etanolową, a także na wydajność procesu [Hendriks i Zeeman 2009, Sims i in. 2010].

Celem niniejszych badań było określenie wysokości plonów wybranych odmian sorgo uprawianych w plonie głównym i wtórnym, a także ilości pozyskanego z nich bioetanolu.

2. Metody i materiały do badań

Doświadczenia polowe przeprowadzono w latach 2013-2015 w Zakładzie Doświadczalnym IWNiRZ Sielec Stary, położonym w rejonie o małej ilości opadów rocznych (poniżej 550 mm) i niskim poziomie wody gruntowej, metodą losowych bloków w czterech powtórzeniach (poletko 40 m²). Doświadczenia założono na glebie bielkowej, zalegającej na glinie o pH od 5,5 do 6,5 i średniej zasobności w składniki pokarmowe, na stanowisku po zbożach ozimych.

Uprawę roli pod żyto w poplonie ozimym oraz przed siewem sorgo w plonie głównym i wtórnym wykonano zgodnie z zasadą dobrej praktyki rolniczej. W poplonie ozimym wysiano w terminie 5-10 września odmianę żyta 'Pastar' w ilości 180 kg·ha⁻¹ zaprawionego ziarna.

Jednocześnie przed siewem dokonano nawożenia w kg·ha⁻¹: N – 20, P₂O₅ – 40 i K₂O – 80. Poza tym, wczesną wiosną (początek marca) zastosowano pogłównie każdego roku po 120 kg·ha⁻¹ azotu w formie saletry amonowej. Zbioru biomasy żyta poplonowego dokonywano w fazie mleczno-woskowej dojrzałości ziarna (ok. połowy czerwca) z całej powierzchni przewidzianej pod uprawę sorgo w plonie wtórnym.

Bezpośrednio po zbiorze biomasy z żyta, uprawiano rolę i nawożono w kg·ha⁻¹: N – 120, P₂O₅ – 60, K₂O – 100 i MgO – 30. Podobne nawożenie zastosowano pod

uprawę sorgo w plonie głównym. Do wysiewu sorgo, zarówno w plonie wtórym, jak i w plonie głównym, używano zaprawiane nasiona następujących odmian: 'Sucrosorgo 506', 'Santos', 'Rona 1', w ilości 10 kg·ha⁻¹. W plonie głównym sorgo wysiewano w terminie 10–12 maja, a w plonie wtórym 19–20 czerwca. Bezpośrednio po siewie nasion stosowano oprysk środkiem chwastobójczym Afalon w ilości 1,2 dm³·ha⁻¹.

Rośliny zbierano w początkowej fazie mleczno-woskowej dojrzałości nasion tzn. w plonie głównym w okresie 25–28 września, a w plonie wtórym 20–25 października. Podczas zbioru biomasy pobierano 1 kg próby z każdego poletka, a następnie ze zmieszanych prób pobierano referencyjną ilość do oznaczenia zawartości suchej masy, a także składu chemicznego i ilości etanolu (rok 2015).

W celu poznania wpływu przebiegu pogody na plonowanie roślin ustalono w ZD Sielec Stary sumy rocznych i miesięcznych opadów atmosferycznych w latach 2013–2015 (tabela 1), które wykorzystano do interpretacji wyników doświadczeń.

Tabela 1

Roczne i okresowe sumy opadów atmosferycznych w Zakładzie Doświadczalnym Sielec Stary

Okresy (miesiące) wegetacji	Opady w latach [mm]			
	2013	2014	2015	Średnia wieloletnia ¹⁾
Miesiące I – XII	636,0	573,2	310,5	542,0
Miesiące III – X	494,4	491,8	169,4	411,0
III	35,6	41,0	38,3	32,0
IV	42,1	39,9	31,3	37,0
V	107,2	145,8	23,0	61,0
VI	94,8	27,4	25,9	53,0
VII	35,6	67,0	31,5	78,0
VIII	55,1	43,0	–	60,0
IX	86,8	77,0	18,2	49,0
X	37,2	50,7	1,2	41,0

¹⁾ Lata 1960 – 2000 dla miasta Rawicz.

Źródło: Opracowano na podstawie badań własnych.

Zebrano również informacje dotyczące średniej temperatury dziennej powietrza w okresie wegetacji roślin, która wahała się w granicach od 14,6°C do 16,1°C i nie różniła się w istotny sposób w 2013 i 2014 roku, a tylko w 2015 roku sięgała górnej granicy tego przedziału. Średnia z trzech lat była jednak wyższa od średniej wieloletniej wynoszącej 13,6°C (lata 1960–2000 dla miasta Rawicz).

W procesie otrzymywania bioetanolu równie istotne znaczenie jak surowiec roślinny ma technologia bioprosesowa.

W pierwszej kolejności pobrane próby poddano wstępnemu rozdrobieniu, suszono w temp. 50°C przez 24 h i oznaczono skład chemiczny tj. celuloza (PN-P-50092:1992), hemicelulozy (różnica holocelulozy wg PN-P-50092:1992 i celulozy) i lignina (BN-7501-11:1986). Następnie w celu oznaczenia ilości etanolu możliwego do pozyskania z poszczególnych odmian sorgo w plonie głównym i wtórnym (rok 2015) przeprowadzono kolejne etapy procesu otrzymywania bioetanolu: obróbkę wstępną, hydrolizę enzymatyczną i fermentację etanolową.

Rozkładu biomasy sorgo dokonano poprzez rozdrobnienie surowca na młynie nożowym przy użyciu sita o wielkości oczek 4 mm i zasadową obróbkę biomasy w 1,5% wodorotlenku sodu o temp. 90°C przez 5 h. Następnie przeprowadzono hydrolizę enzymatyczną biomasy w warunkach: stężenie substratu 10%, dawka preparatu Flashzyme Plus 200 (firma AB Enzymes) - 30 FPU/g, temp. 50°C, odczyn 4,2 i czas 72 h.

W ostatnim etapie wykonano test fermentacyjny w temp. 37°C przez 120 h przy użyciu drożdży *S. cerevisiae* i metodą HPLC oznaczono wartość etanolu.

3. Wyniki badań i dyskusja

Wyniki doświadczeń polowych wyrażone w plonach zielonej i suchej masy uzyskane średnio w latach 2013-2015 przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2

Plony biomasy odmian sorgo uprawianych w plonie głównym i wtórnym do produkcji bioetanolu w latach 2013-2015 [dt·ha⁻¹]

Odmiana sorgo	Plon główny		Plon wtóry			
	zielona masa	sucha masa	żyto poplonowe (GPS)		sorgo	
			zielona masa	sucha masa	zielona masa	sucha masa
Sucrosorgo 506	953	332	437	161	484	228
Santos	778	269	437	161	430	177
Rona 1	768	254	437	161	405	173
Średnia	833	285	437	161	440	193

Źródło: Opracowano na podstawie badań własnych.

Z porównywanych odmian sorgo, najwyższe plony zielonej i suchej masy dała odmiana 'Sucrosorgo 506' uprawiana zarówno w plonie głównym, jak i wtórnym, a także w każdym roku prowadzonych doświadczeń. Pozostałe dwie odmiany 'Santos' i 'Rona 1' plonowały gorzej (tabela 3, 4 i 5).

Tabela 3

Plony biomasy odmian sorgo uprawianych w plonie głównym i wtórym do produkcji bioetanolu w 2013 roku [dt·ha⁻¹]

Odmiana sorgo	Plon główny		Plon wtóry			
	zielona masa	sucha masa	żyto poplonowe (GPS)		sorgo	
			zielona masa	sucha masa	zielona masa	sucha masa
Sucrosorgo 506	969	320	410	128	926	368
Santos	903	298	410	128	818	248
Rona 1	831	274	410	128	753	242
Średnia	901	297	410	128	832	286

Źródło: Opracowano na podstawie badań własnych.

Tabela 4

Plony biomasy odmian sorgo uprawianych w plonie głównym i wtórym do produkcji bioetanolu w 2014 roku [dt·ha⁻¹]

Odmiana sorgo	Plon główny		Plon wtóry			
	zielona masa	sucha masa	żyto poplonowe (GPS)		sorgo	
			zielona masa	sucha masa	zielona masa	sucha masa
Sucrosorgo 506	1072	472	487	190	326	228
Santos	730	320	487	190	299	209
Rona 1	765	276	487	190	311	217
Średnia	856	356	487	190	312	218

Źródło: Opracowano na podstawie badań własnych.

Tabela 5

Plony biomasy odmian sorgo uprawianych w plonie głównym i wtórym do produkcji bioetanolu w 2015 roku [dt·ha⁻¹]

Odmiana sorgo	Plon główny		Plon wtóry			
	zielona masa	sucha masa	żyto poplonowe (GPS)		sorgo	
			zielona masa	sucha masa	zielona masa	sucha masa
Sucrosorgo 506	818	204	416	165	201	88,7
Santos	702	189	416	165	173	75,5
Rona 1	707	212	416	165	150	60,5
Średnia	742	202	416	165	175	74,9

Źródło: Opracowano na podstawie badań własnych.

Plony zielonej masy żyta poplonowego były wysokie i przekraczały 400 dt·ha⁻¹ (tabela 2), a plony suchej masy wahały się od 128 do 190 dt·ha⁻¹ (tabela 3, 4 i 5). W uprawach na cele energetyczne uzyskane plony biomasy żyta mogą uzupełniać niższe plony sorgo uzyskane w latach o niekorzystnym dla jego wzrostu przebiegu pogody. Oczywiście plony żyta poplonowego zależą również od przebiegu pogody późną jesienią, w końcu zimy i na początku wiosny, która warunkuje wczesne rozpoczęcie wegetacji. W doświadczeniach uzyskano zwiększenie plonów żyta i sorgo z jednostki powierzchni pola średnio o 24% (tabela 2), a w poszczególnych latach od 15 do 40% (tabela 3, 4 i 5) w porównaniu do plonów sorgo uprawianego w plonie głównym. Biomasa z żyta poplonowego można także wykorzystać w gospodarstwie rolnym jako paszę objętościową w formie kiszonki (zbierana w fazie początku kłoszenia), a w gospodarstwach bezinwentarzowych przeznaczyć na biogaz również w formie kiszonki (żyto zbierane w fazie mleczno-woskowej dojrzałości ziarna). Przedstawione dane wskazują, że uprawa sorgo w plonie wtórnym jest bardziej opłacalna niż w plonie głównym [Burczyk 2015].

W miarę wzrostu ocieplenia klimatu i obniżania poziomu wody w glebie, można oczekiwać, że uprawa sorgo w naszym kraju znajdzie coraz więcej zwolenników. Ponadto należy zauważyć, że biomasa sorgo jest co prawda gorszą paszą objętościową od kukurydzy z uwagi na twarde i zdrewniałe łodygi, szczególnie gdy jest zbierana pod koniec wegetacji, stanowi jednak dobry substrat dla energetyki zawodowej [Burczyk 2012]. Doniesienia literaturowe wskazują na możliwość wykorzystania biomasy sorgo zarówno do produkcji biogazu [Sałagan i in. 2013], jak i bioetanolu [Chmielewska i in. 2015, Anioł i in. 2015, Batog i in. 2016b].

W tabeli 6 podano składy chemiczne biomasy sorgo uprawianego w plonie głównym i wtórnym dla poszczególnych odmian (rok 2015).

Tabela 6

Skład chemiczny biomasy odmian sorgo uprawianych w plonie głównym i wtórnym do produkcji bioetanolu [%]

Odmiana sorgo	Plon główny			
	Celuloza	Hemicelulozy	Holoceluloza	Lignina
Sucrosorgo 506	32,8	32,9	65,7	19,4
Santos	34,7	32,8	67,5	20,2
Rona 1	34,6	29,4	64,0	19,2
	Plon wtóry			
Sucrosorgo 506	27,0	38,5	65,5	17,9
Santos	32,1	31,2	63,3	20,8
Rona 1	25,8	35,6	61,4	18,3

Źródło: Opracowano na podstawie badań własnych.

Stwierdzono, że biomasa ‘Sucrosorgo 506’ w plonie głównym i wtórym posiada zawartości holocelulozy na podobnym poziomie tj. celulozy i hemicelulozy łącznie, składników stanowiących potencjalne substraty do hydrolizy enzymatycznej i procesu fermentacji oraz niższą zawartość ligniny w plonie wtórym niż w plonie głównym, składnika stanowiącego przeszkodę w wytwarzaniu bioetanolu z biomasy roślinnej. Dla pozostałych dwóch odmian ‘Santos’ i ‘Rona 1’ w plonie wtórym uzyskano niższe wartości holocelulozy niż w plonie głównym, a wartości ligniny na zbliżonym poziomie.

Wyniki testu fermentacyjnego dla poszczególnych odmian sorgo uprawianego w plonie głównym i wtórym przedstawiono w tabeli 7.

Tabela 7

Wartości etanolu z biomasy sorgo w plonie głównym i wtórym (rok 2015)

Odmiana sorgo	Stężenie etanolu [g/l]	
	Plon główny	Plon wtóry
Sucrosorgo 506	17,8	15,7
Santos	10,2	9,3
Rona 1	20,0	18,7

Źródło: Opracowano na podstawie badań własnych.

Wyższe wartości etanolu w plonie głównym i wtórym pozyskano dla odmian sorgo ‘Rona 1’ i ‘Sucrosorgo 506’, średnio o 51% z jednostki powierzchni pola, w porównaniu do odmiany ‘Santos’. Ponadto w przypadku wszystkich odmian sorgo w plonie wtórym odnotowano spadek średnio o 39% wartości uzyskanego etanolu z jednostki powierzchni pola, w stosunku do plonu głównego.

W praktyce rolniczej podstawowymi kryteriami przydatności surowca do produkcji biopaliw jest ekonomicznie uzasadniony wynik finansowy z jednostki powierzchni pola uzyskany przy niskich kosztach produkcji substratu, a także dobra cena zbytu na wolnym rynku produktów końcowych. Wykonane w IWNiRZ badania nt. uprawy sorgo w plonie wtórym, wskazują na możliwość uzyskania średnio (lata 2013–2015) o 24% wyższych łącznych plonów biomasy żyto i sorgo z jednostki powierzchni pola od plonów sorgo uprawianego w plonie głównym. W ten sposób istnieje możliwość obniżenia kosztów pozyskiwania biomasy sorgo do produkcji bioetanolu [Burczyk 2013].

4. Wnioski

1. Na podstawie uzyskanych wyników doświadczeń i badań można rekomendować do uprawy na biomasę odmianę 'Sucrosorgo 506' w plonie głównym i wtórnym, a także wykorzystanie biomasy sorgo do procesu pozyskania etanolu celulozowego.
2. Odmiany 'Rona 1' i 'Sucrosorgo 506' wykazują w plonie głównym i wtórnym wyższe wartości etanolu od odmiany 'Santos', przy czym dla plonu głównego uzyskano więcej etanolu niż w plonie wtórnym.
3. Uprawa sorgo w plonie wtórnym spowodowała zwiększenie plonów biomasy średnio o 24% z jednostki powierzchni pola, łącznie z plonami żyta w poplonie ozimym, w stosunku do plonów sorgo uprawianego w plonie głównym.
4. Reasumując, biomasa sorgo stanowi wartościowy substrat dla celów energetycznych, w tym do procesu otrzymywania biopaliw II generacji, co wzbogaca pozaprodukcyjną funkcję rolnictwa.

LITERATURA

1. Anioł M., Sowiński J., Aniołowska M. (2015): Zawartość cukrów rozpuszczalnych i związków ligninocelulozowych w odmianach sorga. *Przemysł Chemiczny*, nr 10, 1832-1834.
2. Batog J., Pieprzyk-Kokocha D., Wawro A., Skibniewski Z. (2016a): Chemical processes (acidic and alkaline) in saccharification of sorghum biomass for biofuel production. *Cellulose Chemistry and Technology*, 50 (3-4), 397-400.
3. Batog J., Wawro A., Pieprzyk-Kokocha D. (2016b): Wydajność fizyko-chemicznej obróbki biomasy sorgo i miskanta w produkcji bioetanolu II generacji. *Przemysł chemiczny*, nr 9, 1679-1682.
4. BN-7501-11:1986 Metody badań surowców włókienniczych - Włókno lniane i konopne - Wyznaczanie zawartości lignin.
5. Burczyk H. (2012): Przydatność jednorocznych roślin uprawianych do produkcji biomasy na potrzeby energetyki zawodowej. *Problemy Inżynierii Rolniczej*, nr 1, 59-68.
6. Burczyk H. (2013): Przydatność poplonu ozimego oraz kukurydzy i sorgo w plonie wtórnym do produkcji biomasy dla biogazowni. *Problemy Inżynierii Rolniczej*, nr 2, 87-97.
7. Burczyk H. (2015): Przydatność wybranych odmian żyta uprawianego w poplonach ozimych do produkcji biogazu. *Zagadnienia Doradztwa Rolniczego*, nr 4, 85-91.
8. Chmielewska J., Dziuba E., Foszczyńska B., Kawa-Rygielska J., Pietrzak W., Sowiński J. (2015): Dobór metody przygotowania biomasy sorga cukrowego do produkcji etanolu. *Acta Sci. Pol., Biotechnologia*, 14 (4), 5-12.
9. Hendriks A.T.W.M., Zeeman G. (2009): Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 100, 10-18.

10. Kruczek A., Skrzypczak W., Waligóra H. (2014): Reakcja sorga na zróżnicowaną obsadę roślin i rozstawę rzędów w zależności od terminu siewu. *Nauka, Przyroda, Technologie*, z. 1, tom 8, 1-11.
11. PN-P-50092:1992 Surowce dla przemysłu papierniczego - Drewno - Analiza chemiczna.
12. Sařagan P., Dobek T.K., Kořosowski P. (2013): Potencjał uzysku biogazu z sorga cukrowego (*Sorghum bicolor*) odmiany ród J1052. *Inżynieria rolnicza*, nr 4, 291-299.
13. Sims R.E.H., Mabee W., Saddler J.N., Taylor M. (2010): An overview of second generation biofuel technologies. *Bioresource Technology*, 101, 1570-1580.

HENRYK BURCZYK, JOLANTA BATOG, JAKUB FRANKOWSKI, ALEKSANDRA WAWRO

PLONOWANIE WYBRANYCH ODMIAN SORGA UPRAWIANYCH W PLONIE GŁÓWNYM I WTÓRYM DO PRODUKCJI BIOETANOLU

Słowa kluczowe: odmiany sorgo, plon główny i wtóry, biomasa, bioetanol

STRESZCZENIE

Celem badań było określenie przydatności biomasy trzech odmian sorgo (Sucrosorgo 506, Santos, Rona 1) uprawianych w plonie głównym i wtórym do produkcji bioetanolu. Doświadczenia polowe przeprowadzono w latach 2013-2015 w Zakładzie Doświadczalnym Sielec Stary, w rejonie o małej ilości opadów rocznych (poniżej 550 mm) i niskim poziomie wody gruntowej. Porównano wysokości plonów odmian sorgo uprawianych w plonie głównym i wtórym, a także ilości pozyskanego z nich bioetanolu.

Na podstawie uzyskanych wyników prac można rekomendować do uprawy na biomasę odmianę 'Sucrosorgo 506' w plonie głównym i wtórym, a także wykorzystanie biomasy sorgo do procesu pozyskania etanolu celulozowego. Stwierdzono, że odmiany 'Rona 1' i 'Sucrosorgo 506' wykazują wyższe wartości etanolu w plonie głównym i wtórym niż odmiana 'Santos'. Ponadto uprawa sorgo w plonie wtórym spowodowała zwiększenie ilości biomasy łącznie z plonami żyta w poplonie ozimym, w stosunku do plonów sorgo uprawianego w plonie głównym, co umożliwia obniżenie kosztów pozyskiwania biomasy sorgo do produkcji bioetanolu.

HENRYK BURCZYK, JOLANTA BATOG, JAKUB FRANKOWSKI, ALEKSANDRA WAWRO

YIELDING OF SELECTED SORGHUM VARIETIES CULTIVATED AS PRIMARY AND SECONDARY CROPS FOR BIOETHANOL PRODUCTION

Keywords: *sorghum varieties, primary and second yield, biomass, bioethanol*

SUMMARY

The objective of the study was determination of usefulness of three sorghum varieties (Sucrosorgo 506, Santos, Rona 1) cultivated as primary and secondary crops for the production of bioethanol. Field experiments were carried out in 2013-2015 at the Experimental Farm in Sielec Stary, located in a region with low annual precipitation (below 550 mm) and with low levels of ground water. The yields of the sorghum varieties obtained after cultivation as a primary and secondary crop were compared. Also, the amounts of bioethanol produced from those varieties were evaluated.

The results allowed for recommendation of 'Sucrosorgo 506' variety for cultivation for biomass as primary and secondary crops, and for production of cellulosic ethanol from its biomass. It was found that 'Rona 1' and 'Sucrosorgo 506' varieties showed higher ethanol values as the primary and secondary crops than 'Santos'. Moreover, cultivation of sorghum as a secondary crop with rye as a winter catch crop resulted in higher biomass yields than those obtained from sorghum cultivated as a primary crop. This allows for reducing the costs of obtaining sorghum biomass for bioethanol production.

e-mail: henryk.burczyk@iwnirz.pl