

WPLYW NAWOŻENIA KUKURYDZY POZOSTAŁOŚCIĄ PO FERMENTACJI WYSŁODKÓW BURACZANYCH NA PRZYROST BIOMASY I WARTOŚĆ ENERGETYCZNĄ

Andrzej Baryga, Bożenna Poleć, Tomasz Szymański, Wanda Wołyńska

Instytut Biotechnologii Przemysłu Rolno-Spożywczego im. prof. Waclawa Dąbrowskiego

Zakład Cukrownictwa

ul. Inżynierska 4, 05-080 Leszno

andrzej.baryga@ibprs.pl

Streszczenie

Celem pracy było określenie przydatności pozostałości z procesu fermentacji metanowej odpadów organicznych, powstających przy produkcji cukru, do rolniczego wykorzystania na plantacji kukurydzy. Materiał do badań stanowiły pozostałości po fermentacji wysłodków buraczanych i kukurydza energetyczna (odmiana *Zea mays Cannavaro*). W przeprowadzonych doświadczeniach polowych stosowano jako kontrolę nawożenie mineralne odpowiadające potrzebom pokarmowym kukurydzy oraz nawożenie z wykorzystaniem pozostałości po fermentacji w dawkach zawierających ilość azotu taką, jak przy nawożeniu mineralnym. Badania wykazały, że pozostałość po fermentacji wysłodków buraczanych (odciek po oddzieleniu osadu pofermentacyjnego, odciek z osadem i osad) może być wykorzystywana w rolnictwie. Zawartość metali ciężkich i drobnoustrojów w tych materiałach nie przekraczała obowiązujących norm. Świeża masa pędów kukurydzy po zbiorze z poletek nawożonych mineralnie i odpływem z komory fermentacyjnej (odciek i osad) była porównywalna, a z poletek nawożonych odciekiem i osadem pofermentacyjnym niższa o ok. 7%. W biomacie przekazywanej do spalarni w stanie roboczym (z uwzględnieniem wilgoci i popiołu) najwyższą wartość energetyczną wykazywały rośliny zebrane z poletek nawożonych mineralnie i odpływem z komory fermentacyjnej (odciek i osad): ciepło spalania było rzędu 13 MJ/kg i wartość opałowia rzędu 11 MJ/kg. W biomacie dla stanu suchego i bezpopiołowego najwyższą wartość energetyczną wykazywały rośliny zebrane z poletek nawożonych odciekiem: ciepło spalania było rzędu 20 MJ/kg i wartość opałowia rzędu 19 MJ/kg. Ciepło spalania i wartość opałowia samych łodyg były wyższe przy nawożeniu mineralnym niż przy nawożeniu pozostałościami z procesu fermentacji,

a wskaźniki te w kolbach były korzystniejsze przy plonie zebrany z poletek nawożonych pozostałościami z procesu fermentacji niż nawozami mineralnymi.

Słowa kluczowe: wysłodki buraczane, kukurydza, biogaz, rolnicze wykorzystanie pozostałości po fermentacji

THE INFLUENCE OF CORN FERTILIZATION WITH BEET PULP RESIDUE AFTER FERMENTATION ON THE BIOMASS GROWTH AND ENERGY VALUE

Summary

The objective of this research was to determine the utility of the residue arising from the process of methane fermentation of organic waste created during the production of sugar for agricultural use on corn plantations. The materials used in the study were the beet pulp residue after fermentation and energy corn (*Zea mays* Cannavaro variety). In the conducted field experiments the mineral fertilization corresponding to the corn nutrient needs and the fertilization with the residue after fermentation the nitrogen content of which was the same as in the case of mineral fertilization were used as verification methods. The studies showed that the sugar beet pulp residue after fermentation (leachate after separating post-fermentation sludge, leachate with sludge and sediment) can be used without reservation in agriculture, taking into account the content of heavy metals and microorganisms. The fresh mass of corn shoots harvested from plots fertilized with minerals and the digester effluent (leachate and sludge) was comparable whereas the fresh mass of corn shoots harvested from plots fertilized with the effluent and sludge was lower by approximately 7%. In the biomass provided as received to the combustion (including moisture and ash) crops harvested from plots fertilized with mineral and the digester effluent (leachate and sludge) showed the highest energy content: Gross Calorific Value of 13 MJ / kg and Net Calorific Value of 11 MJ / kg. In ash free dry biomass the highest energy content was observed in plants harvested from plots fertilized with leachate: Gross Calorific Value of 20 MJ / kg and Net Calorific Value of 19 MJ / kg. The heat of combustion and calorific value of stems only were higher in case of mineral fertilization than in case of fertilization with residues after fermentation and these indicators in cobs were better in case of the yield harvested from plots fertilized with residues after fermentation than in cobs fertilized with mineral fertilizers.

Key words: sugar beet pulp, maize, biogas, agricultural use of post-fermentation residues

WSTĘP

Kukurydza jest rośliną coraz bardziej popularną w Europie, również w Polsce, o czym świadczy zwiększający się areal uprawy tej rośliny. Ogólna powierzchnia uprawy kukurydzy w Polsce wynosi aktualnie około 700 tys. ha, natomiast potencjalna powierzchnia może stanowić od 1,5 do 2 mln ha [Michalski i in. 2011].

Kukurydza jest wszechstronnie użytkowaną rośliną. Stanowi cenne źródło surowca dla przemysłu spożywczego, spirytusowego i chemicznego oraz doskonałą paszę dla zwierząt.

Przyszłościowym kierunkiem wykorzystania kukurydzy, ze względu na wzrost zainteresowania energią ze źródeł odnawialnych, może stać się jej produkcja na cele energetyczne (do produkcji biogazu, bioetanolu czy spalania). W takich krajach jak Niemcy, Austria czy kraje skandynawskie – gdzie produkcja biogazu jest wysoka – bazuje się pod tym względem właśnie na kukurydzy, a zwłaszcza na kiszonce z całych roślin, ziarnie kiszonym i suszonym oraz słomie.

Możliwa do uzyskania ilość biogazu z fermentacji całych roślin wynosi 600–700 m³ biogazu (350–450 m³ metanu), a z pędów bez kolb 250–300 m³ biogazu (ok. 150 m³ metanu). Przy spalaniu zysk energetyczny z 1 tony ziarna wynosi ok. 19 GJ/t, a z pędów bez kolb ok. 15 GJ/t [Matyszczak 2010].

Plon kukurydzy, zależnie od gatunku i sposobu uprawy, wynosi: ziarno 5–10 t/ha, biomasa 8–20 t s.m./ha. W produkcji kukurydzy największy udział w strukturze kosztów całkowitych stanowią wykorzystane materiały w postaci nasion, środków ochrony roślin i nawozów. Stanowią one odpowiednio 51% w uprawie na kiszonkę i 60% w uprawie na ziarno [Gorzelański i in. 2011].

Zastosowanie pozostałości fermentacyjnej z procesu fermentacji metanowej odpadów organicznych w uprawie kukurydzy dałoby możliwość obniżenia kosztów całkowitych produkcji.

W niniejszym artykule przedstawiono możliwości zastąpienia nawozów mineralnych w uprawie kukurydzy nawożeniem pozostałością po fermentacji odpadów cukrowniczych.

W latach 2009–2011 zrealizowano w Zakładzie Cukrownictwa IBPRS pracę na temat: *Badania i opracowanie technologii fermentacji metanowej wysłodków buraczanych i innych odpadów organicznych (ogonków i liści buraczanych) z odzyskiem wysokoenergetycznego biogazu*. Rezultatem końcowym tej pracy jest technologia fermentacji metanowej wysłodków buraczanych wraz z wytycznymi do zaprojektowania biogazowni. Podjęcie takiej pracy było celowe, ponieważ wysłodki, będące odpadem z produkcji cukru, były wykorzystywane przede wszystkim jako pełnowartościowy produkt paszowy. Ich duże uwodnienie,

zwiększające koszty transportu oraz przechowywania, skłoniły jednak producentów cukru do poszukiwania nowych możliwości wykorzystania tego surowca. Drugim i ważniejszym powodem podjęcia innego niż paszowe zagospodarowania wysłodków jest poważny spadek pogłowia bydła, ale też zerwanie więzów między produkcją roślinną a zwierzęcą w gospodarce rolnej. Coraz częściej zdarza się bowiem, że rolnik produkujący buraki cukrowe nie potrzebuje wysłodków, ponieważ nie prowadzi chowu bydła. Uzyskane wyniki pracy potwierdziły, że produkcja biogazu jest bardzo dobrym i opłacalnym sposobem przetwarzania wysłodków i innych odpadów organicznych przemysłu cukrowniczego [Połec i in. 2009, 2010, 2011, 2013, 2014; Połec, Baryga 2011; Baryga 2014]. Znane są liczne publikacje dotyczące fermentacji buraka cukrowego, wysłodków buraczanych, liści buraczanych, ale najczęściej w mieszaninie z odpadami spoza przemysłu cukrowniczego [Hutnan i in. 2001; Brooks i in. 2008; Montañés 2014; Ziemiński 2015; Karwowska i in. 2012].

W Zakładzie Cukrownictwa IBPRS realizowana jest wieloletnia praca na temat: *Opracowanie sposobu utylizacji pozostałości po fermentacji metanowej wysłodków buraczanych i innych odpadów organicznych*. Zakres tej pracy obejmuje badania przydatności pozostałości z procesu fermentacji wysłodków buraczanych i innych odpadów z produkcji cukru do wykorzystania na plantacjach wierzby i kukurydzy energetycznej oraz buraka cukrowego.

Część wyników ww. pracy dotyczących badań możliwości wykorzystania pozostałości z procesu fermentacji wysłodków buraczanych i innych odpadów jako nawozu na plantacjach buraka cukrowego została opublikowana [Baryga, Połec 2015].

Z przeglądu piśmiennictwa wynika, że pozostałość po fermentacji metanowej materiału roślinnego może być bez przeszkód wykorzystywana rolniczo na plantacjach różnych roślin [Cirne i in. 2007; Gunnarsson i in. 2011; Bachmann i in. 2014; Chen i in. 2012; Berruto i in. 2013, Paprota 2012; Kołodziej 2012].

Niniejszy artykuł dotyczy badań wpływu nawożenia kukurydzy energetycznej pozostałością z procesu fermentacji wysłodków buraczanych na jej wzrost i wartość energetyczną.

MATERIAŁ I METODY BADAŃ

Materiał do badań stanowiły pozostałości po fermentacji wysłodków buraczanych (odciek po oddzieleniu osadu pofermentacyjnego, odciek z osadem i osad) i kukurydza energetyczna (odmiana *Zea mays Cannavaro*).

Badania prowadzono w sezonie wegetacyjnym 2014 r. na plantacji kukurydzy energetycznej założonej na gruntach stanowiących własność Zakładu Cukrownictwa IBPRS w Lesznie.

Do celów badawczych założono 12 poletek doświadczalnych o powierzchni 6,25 m² każde. Glebę przewidzianą pod uprawę kukurydzy energetycznej nawożono w dawce 200 kgN/ha, z tym że:

- 3 poletka – nawozem mineralnym,
- 3 poletka – odciekem z procesu fermentacji wysłodków, po oddzieleniu osadu,
- 3 poletka – odpływem z fermentora (mieszaniną odcieku i osadu),
- 3 poletka – stałą pozostałością z procesu fermentacji wysłodków (wysuszonym osadem).

Po zakończeniu wegetacji kukurydzę zebrano i poddano badaniom określającym masę i wartość energetyczną kolb i pędów bez kolb. W celu określenia wartości energetycznej kukurydzy oznaczano parametry chemiczno-technologiczne stosowane przy analizie paliw stałych, wyrażanych w normach w jednym z kilku stanów:

- stan roboczy – stan z taką zawartością wilgoci i popiołu, jaką miała biomasa kukurydzy energetycznej w momencie zbioru z plantacji doświadczalnych,
- stan analityczny – stan biomasy kukurydzy energetycznej z taką zawartością wilgoci i popiołu, jaką ma próbka analityczna (o wielkości ziaren poniżej 0,2 mm) doprowadzona do stanu równowagi z otaczającą atmosferą,
- stan suchy – stan biomasy kukurydzy energetycznej niezawierającej wilgoci całkowitej, ale mogącej zawierać wodę krystalizacyjną,
- stan suchy i bezpopiołowy – umowny stan biomasy kukurydzy energetycznej niezawierającej wilgoci całkowitej i popiołu.

Oznaczono także:

- ciepło spalania – GCV (ang. *Gross Calorific Value*) – ilość ciepła, jaką otrzymuje się przy spalaniu całkowitym i zupełnym jednostki ilości biomasy kukurydzy energetycznej w stałej objętości w atmosferze tlenu w odniesieniu do temperatury

250°C, przy czym produkty spalania oziębione są do temperatury początkowej, a para wodna zawarta w spalinach skrapla się zupełnie,

- wartość opałową – NCV (ang. *Net Calorific Value*) – ilość ciepła, jaką otrzymuje się przy spalaniu całkowitym i zupełnym jednostki ilości biomasy kukurydzy energetycznej w stałej objętości, przy czym produkty spalania oziębiają się do temperatury początkowej, a para wodna nie zostaje skroplona. Wartość opałowa jest mniejsza od ciepła spalania o wielkość ciepła skraplania pary wodnej zawartej w spalinach.

Stosowano następujące metody badań: wilgoć całkowita i analityczna – wagowa, azot Kjeldahla – destylacyjna, azot azotanowy – spektrofotometryczna, azot azotynowy – spektrofotometryczna, azot amonowy – destylacyjna, azot całkowity – obliczeniowa, fosfor ogólny – molibdenowadaniowa, kadm – FAAS, ołów – FAAS, nikiel – FAAS, chrom – FAAS, rtęć – AAS z amalgamacją, miedź – FAAS, cynk – FAAS, popiół i części lotne – wagowa, węgiel, wodór, azot i siarka całkowita – wysokotemperaturowego spalania, ciepło spalania – kalorymetryczna, wartość opałowa z obliczeń, obecność bakterii chorobotwórczych z rodzaju *Salmonella* - PN-Z-19000-1:2001, liczba żywych jaj pasożytów jelitowych *Ascaris* sp., *Trichuris* sp., *Toxocara* sp. - PN-Z-19000-4:2001.

WYNIKI I DYSKUSJA

Przy wykorzystaniu rolniczym odpadów, jakim są również pozostałości z procesu fermentacji wysłodków buraczanych, niezbędne jest spełnienie szeregu wymagań określonych w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 13 lipca 2010 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych (Dz. U. 2010 Nr 137 poz. 924). Wymagania te dotyczą m.in. jakości odpadów.

Tabela 1. Zawartości metali ciężkich i drobnoustrojów w badanej pozostałości pofermentacyjnej oraz wartości dopuszczalne w odpadach ściekowych wykorzystywanych rolniczo
Heavy metals and microbe in the examined post-fermentation residue and the limit values of waste sludge used in agriculture

Oznaczenie	Zawartość metali i drobnoustrojów			
	stwierdzona w:			Dopuszczalna przy stosowaniu w rolnictwie:
	odcieku pofermentacyjnym	odpływie z fermentora (odciek+osad)	osadzie pofermentacyjnym	
Kadm, mg/ kg s.m.	2,19	2,73	2,76	≤ 20
Ołów, mg/ kg s.m.	42,4	17,1	15,4	≤ 750
Nikiel, mg/ kg s.m.	12,8	5,51	5,03	≤ 300
Chrom, mg/ kg s.m.	< 25,0	29,6	29,9	≤ 500
Rtęć, mg/ kg s.m.	0,357	0,543	0,555	≤ 16
Miedź, mg/ kg s.m.	88,0	108,0	110,0	≤ 1000
Cynk, mg/ kg s.m.	295	846	882	≤ 2500
Bakterie chorobotwórcze z rodzaju <i>Salmonella</i> w 100 g osadu	nie wyizolowano	nie wyizolowano	nie wyizolowano	0
Liczba żywych jaj pasożytów jelitowych: <i>Atrichuris</i> sp., <i>Trichuris</i> sp. <i>Toxocara</i> sp. [szt./kg s.m. osadu]	nie wykryto	nie wykryto	nie wykryto	0

Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań, przeprowadzonej zgodnie z aktualnie obowiązującymi przepisami prawnymi, stwierdzono, że badane pozostałości po fermentacji wosłdków mogą być wykorzystywane w rolnictwie (rozumianym jako uprawa wszystkich płodów rolnych wprowadzanych do obrotu handlowego, włączając w to uprawy przeznaczone do produkcji pasz).

W tabeli 2. zestawiono wyniki badań dotyczące masy kukurydzy zebranej z poletek doświadczalnych po zakończeniu okresu wegetacji.

Tabela 2. Wyniki badań wpływu nawożenia pozostałością z procesu fermentacji wysłodków buraczanych na ilość biomasy kukurydzy energetycznej i analiza statystyczna

The results of the research on the influence of fertilization with sugar beet pulp residue after fermentation on the amount of biomass of energy maize and statistical analysis

Sposób nawożenia	Rodzaj danych	Masa 1 kolby [g]	Masa 1 pędu bez kolb [g]	Masa 1 pędu z kolbami [g]
Nawóz mineralny	wyniki 3 powtórzeń	208	102	310
		186	91	277
		197	97	294
	średnia z 3 powtórzeń	197,0	96,7	293,7
Odciek pofermentacyjny	wyniki 3 powtórzeń	199	88	287
		178	78	256
		188	91	279
	średnia z 3 powtórzeń	188,3	85,7	274,0
Odpływ z fermentora (odciek + osad)	wyniki 3 powtórzeń	197	96	293
		199	88	287
		202	93	295
	średnia z 3 powtórzeń	199,3	92,3	291,7
Odwodniony osad pofermentacyjny	wyniki 3 powtórzeń	193	84	277
		170	97	267
		186	80	266
	średnia z 3 powtórzeń	183,0	87,0	270,0
NIR (test t-Studenta $p = 0,05$)		n.i.	n.i.	n.i.

Z danych zamieszczonych w tabeli 2. wynika, że świeże masy pędów kukurydzy i samych kolb z poletek nawożonych mineralnie i odpływem z fermentora (odciekiem z osadem) były porównywalne, a z poletek nawożonych odciekiem i osadem pofermentacyjnym niższe o ok. 7%. Analiza statystyczna wykazała jednak, że różnice w wartości masy w zebranych plonie, stwierdzone przy poszczególnych wersjach nawożenia, były nieistotne $p < 0,5$, zarówno w przypadku kolb, jak i pędów kukurydzy.

Uzyskane wyniki badań i obliczeń dotyczące wartości energetycznej kukurydzy zamieszczono w tabelach 3–6.

Tabela 3. Średnie wyniki badań wpływu nawożenia pozostałością z procesu fermentacji wysłodków buraczanych na wskaźniki wartości energetycznej pędów kukurydzy energetycznej określone w stanie roboczym

The average results of the influence of fertilization with sugar beet pulp residue after fermentation on the energy value indicators of maize shoots obtained on as received basis

Parametr	Pędy kukurydzy bez kolb z poletek nawożonych:				Kolby kukurydzy z poletek nawożonych:				Pędy kukurydzy z kolbami z poletek nawożonych:			
	nawo- zem mineral- nym	odcie- kiem pofer- men- tacyj- nym	odpły- wem z fermen- tora (odcie- kiem + osadem)	odwod- nionym osadem pofer- men- tacyj- nym	nawo- zem mineral- nym	odcie- kiem pofer- men- tacyj- nym	odpły- wem z fermen- tora (odcie- kiem + osadem)	odwod- nionym osadem pofer- men- tacyj- nym	nawo- zem mineral- nym	odcie- kiem pofer- men- tacyj- nym	odpły- wem z fermen- tora (odcie- kiem + osadem)	odwod- nionym osadem pofer- men- tacyj- nym
Wilgoć całkowita [%]	27,5	51,0	39,6	52,0	31,9	31,2	29,8	31,5	30,5	37,4	32,9	38,1
Popiół [%]	6,6	13,9	5,0	9,1	1,8	1,3	1,3	1,2	3,4	5,2	2,5	3,7
Części lotne [%]	51,53	27,91	43,38	32,71	55,93	57,10	57,83	56,89	54,48	47,96	53,23	48,93
Ciepło spalania [kJ/kg]	12 718	7 555	10 736	7 772	12 781	13 198	13 398	13 061	12 760	11 146	12 551	11 357
Wartość opałowa [kJ/kg]	11 140	5 822	9 033	5 974	11 055	11 463	11 682	11 323	11 083	9 699	10 840	9 599
Węgiel [%]	32,7	18,0	27,4	20,0	31,7	32,4	33,1	32,4	32,0	27,9	31,3	28,4
Wodór [%]	4,16	2,24	3,36	2,42	4,33	4,45	4,52	4,43	4,27	3,75	4,15	3,78
Azot [%]	0,43	0,23	0,35	0,28	0,68	0,72	0,78	0,73	0,60	0,57	0,64	0,59
Siarka [%]	0,06	0,04	0,05	0,04	0,06	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06

Tabela 4. Średnie wyniki badań wpływu nawożenia pozostałością z procesu fermentacji wysłodków buraczanych na wskaźniki wartości energetycznej pędów kukurydzy energetycznej określone w stanie analitycznym

The average results of the influence of fertilization with sugar beet pulp residue after fermentation on the energy value indicators of maize shoots obtained on an analytical basis

Parametr	Pędy bez kolb z poletek nawożonych:				Kolby z poletek nawożonych:				Pędy z kolbami z poletek nawożonych:			
	nawo- zem mineral- nym	odcie- kiem pofer- men- tacyj- nym	odpły- wem z fermen- tora (odcie- kiem + osadem)	odwod- nionym osadem pofer- men- tacyj- nym	nawo- zem mineral- nym	odcie- kiem pofer- men- tacyjnym	odpły- wem z fermen- tora (odcie- kiem + osadem)	odwod- nionym osadem pofermen- tacyjnym	nawo- zem mineral- nym	odcie- kiem pofer- men- tacyjnym	odpły- wem z fermen- tora (odcie- kiem + osadem)	odwod- nionym osadem pofermen- tacyjnym
Wilgoć analitycz- na [%]	5,6	10,6	9,6	11,4	13,4	9,0	7,8	8,4	10,8	9,5	8,4	9,4
Popiół [%]	8,6	25,4	7,4	16,8	2,3	1,7	1,7	1,6	4,4	9,1	3,5	6,5
Części lotne [%]	67,07	50,88	64,98	60,40	71,12	75,50	75,93	76,10	69,78	67,70	72,44	71,04
Ciepło spalania [kJ/kg]	16 553	13 776	16 080	14 351	16 251	17 452	17 590	17 471	16 350	16 283	17 124	16 466
Wartość opałowa [kJ/kg]	15 236	12 626	14 745	13 097	14 720	15 945	16 102	15 971	14 890	14 889	15 667	15 045
Węgiel [%]	42,5	32,8	41,1	37,0	40,3	42,8	43,4	43,3	41,0	39,6	42,6	41,3
Wodór [%]	5,41	4,08	5,04	4,47	5,51	5,89	5,94	5,93	5,48	5,31	5,65	5,46
Azot [%]	0,56	0,42	0,52	0,53	0,87	0,96	1,02	0,98	0,77	0,79	0,86	0,84
Siarka [%]	0,08	0,07	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08	0,09	0,09

Tabela 5. Średnie wyniki badań wpływu nawożenia pozostałością z procesu fermentacji wysłodków buraczanych na wskaźniki wartości energetycznej pędów kukurydzy energetycznej określone w stanie suchym

The average results of the influence of fertilization with sugar beet pulp residue after fermentation on the energy value indicators of maize shoots obtained on as dry basis

Parametr	Pędy bez kolb z poletek nawożonych:				Kolby z poletek nawożonych:				Pędy z kolbami z poletek nawożonych:			
	nawo- zem mine- ralnym	odcie- kiem pofer- men- tacyj- nym	odpły- wem z fermen- tora (odcie- kiem + osadem)	odwod- nionym osadem pofer- men- tacyj- nym	nawo- zem mine- ralnym	odcie- kiem pofer- men- tacyj- nym	odpły- wem z fermen- tora (odcie- kiem + osadem)	odwod- nionym osadem pofer- men- tacyj- nym	nawo- zem mine- ralnym	odcie- kiem pofer- men- tacyj- nym	odpły- wem z fermen- tora (odcie- kiem + osadem)	odwod- nionym osadem pofer- men- tacyj- nym
Popiół [%]	9,1	28,4	8,2	18,9	2,9	1,8	1,9	1,8	4,9	10,1	3,9	7,3
Części lotne [%]	71,04	56,94	71,87	68,17	82,17	83,01	82,38	83,09	78,51	74,86	79,03	78,28
Ciepło spalania [kJ/kg]	17 532	15 415	17 787	16 197	18 776	19 188	19 086	19 076	18 366	18 008	18 668	18 148
Wartość opałowa [kJ/kg]	16 281	14 419	16 570	15 095	17 386	17 774	17 679	17 662	17 022	16 725	17 322	16 835
Węgiel [%]	45,0	36,7	45,5	41,8	46,6	47,1	47,1	47,3	46,1	43,8	46,6	45,5
Wodór [%]	5,73	4,57	5,57	5,04	6,37	6,48	6,45	6,47	6,16	5,88	6,17	6,01
Azot [%]	0,59	0,47	0,58	0,59	1,01	1,05	1,11	1,07	0,87	0,87	0,95	0,92
Siarka [%]	0,09	0,08	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09	0,10	0,09

Tabela 6. Średnie wyniki badań wpływu nawożenia pozostałością z procesu fermentacji wysłodków buraczanych na wskaźniki wartości energetycznej pędów kukurydzy energetycznej określone w stanie suchym i bezpopiołowym

The average results of the influence of fertilization with sugar beet pulp residue after fermentation on the energy value indicators of maize shoots obtained on as dry, ash free basis

Parametr	Pędy bez kolb z poletek nawożonych:				Kolby z poletek nawożonych:				Pędy z kolbami z poletek nawożonych:			
	nawo- zem mine- ralnym	odcie- kiem pofer- men- tacyj- nym	odpły- wem z fermen- tora (odcie- kiem + osadem)	odwod- nionym osadem pofer- menta- cyjnym	nawo- zem mine- ralnym	odcie- kiem pofer- men- tacyj- nym	odpły- wem z fermen- tora (odcie- kiem + osadem)	odwod- nionym osadem pofer- menta- cyjnym	nawo- zem mine- ralnym	odcie- kiem pofer- men- tacyj- nym	odpły- wem z fermen- tora (odcie- kiem + osadem)	odwod- nionym osadem pofer- menta- cyjnym
Części lotne [%]	78,13	79,56	78,31	84,09	84,38	84,56	83,94	84,60	82,32	83,00	82,13	84,44
Ciepło spalania [kJ/kg]	19 283	21 542	19 378	19 979	19 280	19 546	19 447	19 421	19 281	20 170	19 419	19 601
Wartość opałowa [kJ/kg]	17 907	20 149	18 052	18 621	17 853	18 106	18 014	17 982	17 871	18 745	18 020	18 188
Węgiel [%]	49,5	51,3	49,5	51,5	47,8	47,9	48,0	48,1	48,4	49,0	48,5	49,2
Wodór [%]	6,30	6,38	6,07	6,22	6,54	6,60	6,57	6,59	6,46	6,53	6,41	6,47
Azot [%]	0,65	0,66	0,63	0,73	1,03	1,07	1,13	1,09	0,90	0,94	0,97	0,97
Siarka [%]	0,10	0,11	0,10	0,11	0,09	0,10	0,10	0,10	0,09	0,10	0,10	0,10

Jak wynika z danych zamieszczonych w tabeli 3., w stanie roboczym zebranej biomasy kukurydzy energetycznej (pędów z kolbami) ciepło spalania wahało się w granicach od 11 146 do 12 760 kJ/kg, a wartość opałowa od 9 599 do 11 083 kJ/kg. Rośliny zebrane z poletek nawożonych mineralnie i odpływem z komory fermentacyjnej (odciek i osad) wykazywały wyższe o ok. 1 000 kJ/kg wartości energetyczne niż zebrane z poletek nawożonych odciekiem i suchym osadem.

Porównanie ciepła spalania i wartości opałowej łądyg i kolb w stanie roboczym wskazuje, że wskaźniki te dla samych łądyg były wyższe przy nawożeniu mineralnym niż przy nawożeniu pozostałościami z procesu fermentacji, a w przypadku kolb kukurydzy odwrotnie – wskaźniki te były korzystniejsze przy plonie zebranych z poletek nawożonych pozostałościami z procesu fermentacji niż nawozami mineralnymi.

Dane zestawione w tabeli 4. wskazują, że w stanie analitycznym biomasy kukurydzy energetycznej (pędów z kolbami) wartości energetyczne były mniej zróżnicowane, ale najwyższe wykazywały rośliny zebrane z poletek nawożonych odpływem z komory fermentacyjnej (ciepło spalania 17 124 kJ/kg i wartość opałowa 15 667 kJ/kg). Ciepło spalania roślin nawożonych pozostałymi sposobami wahało się w granicach 16 283–16 466 kJ/kg, a wartość opałowa mieściła się w zakresie 14 889–15 045 kJ/kg.

Porównanie ciepła spalania i wartości opałowej łądyg i kolb w stanie analitycznym wskazuje, że wskaźniki te dla samych łądyg były niższe niż dla kolb kukurydzy. Najniższe ciepło spalania i wartość opałową wykazały łądygi z poletek nawożonych odciekiem, a w przypadku kolb – pochodzące z roślin nawożonych mineralnie.

Analiza wykonana w stanie suchym biomasy pędów kukurydzy energetycznej z kolbami (tabela 5) wykazała niewielkie wahania w wartości ciepła spalania roślin nawożonych w różny sposób (od 18 008 do 18 668 kJ/kg), przy czym najniższa wartość dotyczyła roślin nawożonych odciekiem, a najwyższa odpływem z fermentora. Wartości opałowe badanych roślin wahały się w granicach 16 725–17 322 kJ/kg, przy czym najniższą wartość opałową miały rośliny nawożone odciekiem, a najwyższą odpływem z fermentora.

W stanie suchym biomasy ciepła spalania i wartości opałowe samych łądyg były niższe niż w przypadku kolb kukurydzy. Najniższe ciepło spalania i wartość opałową wykazały łądygi z poletek nawożonych odciekiem, a w przypadku kolb – pochodzące z roślin nawożonych mineralnie.

Jak wynika z danych zamieszczonych w tabeli 6., w stanie suchym i bezpopiołowym zebranej biomasy kukurydzy energetycznej (pędów z kolbami) najwyższą wartość ciepła spalania wykazywały rośliny zebrane z poletek nawożonych odciekiem – 20 170 kJ/kg,

a najniższą rośliny nawożone mineralnie – 19 281 kJ/kg. Analogicznie, najwyższą wartość opałową wykazywały rośliny zebrane z poletek nawożonych odciekami – 18 745 kJ/kg, a najniższą rośliny nawożone mineralnie – 17 871 kJ/kg.

Porównanie ciepła spalania i wartości opałowej w łądych i kolbach w stanie suchym i bezpopiołowym wskazuje, że najwyższym ciepłem spalania (21 542 kJ/kg) i wartością opałową (20 149 kJ/kg) charakteryzowały się łądy z poletek nawożonych odciekami, a w przypadku kolb najwyższe ciepło spalania i wartość opałową miały rośliny z poletek nawożonych odciekami i odpływem z komory fermentacyjnej. Ciepło spalania kolb wynosiło odpowiednio 19 546 i 19 447 kJ/kg, a wartości opałowe odpowiednio 18 106 i 18 014 kJ/kg (tabela 6).

Podsumowując, można stwierdzić, że wyniki uzyskane dla stanu roboczego, uwzględniającego zbędny balast, jaki w biomase przekazywanej do spalarni stanowią wilgoć i popiół, wskazują, że najwyższą wartość energetyczną miały rośliny zebrane z poletek nawożonych mineralnie i odpływem z komory fermentacyjnej (odciek i osad): ciepło spalania rzędu 13 MJ/kg i wartość opałową rzędu 11 MJ/kg.

Dla porównania wartości opałowe w stanie roboczym (surowym) węgla brunatnego wynoszą 9–12 MJ/kg, węgla kamiennego 23–25 MJ/kg, a drewna 7–12 MJ/kg [Nowak 2009].

Porównanie wyników badań uzyskanych w pracy z wyżej zacytowanymi danymi z piśmiennictwa wskazuje, że wartości opałowe w stanie roboczym roślin kukurydzy zebranych z poletek nawożonych zarówno mineralnie, jak i pozostałościami z procesu fermentacji wysłodków mieszczą się w zakresie typowym dla węgla brunatnego i drewna.

Natomiast wyniki uzyskane dla stanu suchego i bezpopiołowego, nieuwzględniającego zbędnego balastu wilgoci i popiołu, wskazują, że najwyższą wartość energetyczną wykazywały rośliny zebrane z poletek nawożonych odciekami: ciepło spalania rzędu 20 MJ/kg i wartość opałowa rzędu 19 MJ/kg.

WNIOSKI

1. Pozostałość po fermentacji wysłodków buraczanych (odciek po oddzieleniu osadu pofermentacyjnego, odciek z osadem i osad) może być wykorzystywana w rolnictwie. Zawartość metali ciężkich i drobnoustrojów w tych materiałach nie przekraczała obowiązujących norm.

2. Świeża masa pędów kukurydzy zebrana z poletek nawożonych mineralnie i odciekami z osadem była porównywalna, a masa pędów z poletek nawożonych odciekami i osadem pofermentacyjnym niższa o ok. 7%.
3. W biomacie przekazywanej do spalarni w stanie roboczym, uwzględniającym zbędny balast, jaki stanowią wilgoć i popiół, najwyższą wartość energetyczną wykazywały rośliny zebrane z poletek nawożonych mineralnie i odpływem z komory fermentacyjnej (odciek i osad): ciepło spalania tego materiału było rzędu 13 MJ/kg, a wartość opałowa rzędu 11 MJ/kg.
4. W biomacie dla stanu suchego i bezpopiołowego, scharakteryzowanej bez uwzględnienia balastu wilgoci i popiołu, najwyższą wartość energetyczną wykazywały rośliny zebrane z poletek nawożonych odciekami: ciepło spalania omawianej biomasy wynosiło ok. 20 MJ/kg, a wartość opałowa ok. 19 MJ/kg.
5. Ciepło spalania i wartość opałowa samych łodyg były wyższe przy nawożeniu mineralnym niż przy nawożeniu pozostałościami z procesu fermentacji, a wskaźniki te w kolbach były korzystniejsze przy plonie zebranym z poletek nawożonych pozostałościami z procesu fermentacji niż nawozami mineralnymi.

PIŚMIENNICTWO

1. Bachmann S., Gropp M., Eichler-Löbermann B. (2014). Phosphorus availability and soil microbial activity in a 3 year field experiment amended with digested dairy slurry. *Biomass and Bioenergy*, 70, 429-439
2. Baryga A. (2014). Cukrownie wytwarzające gaz? Харчовик (Przemysł Spożywczy), 11-12, 1-5
3. Baryga A., Połec B. (2015). Wpływ nawożenia plantacji buraka cukrowego pozostałościami po fermentacji wysłodków na jakość gleby i wód gruntowych. Materiały konferencyjne z Międzynarodowej konferencji naukowo-technicznej „Innowacyjne rozwiązania naukowo-techniczne w przemyśle spożywczym”. Lwów: Wydawnictwo „СПОЛІОМ”, 226-233
4. Berruto R., Busato P., Bochtis D. D., Sørensen C. G. (2013). Comparison of distribution systems for biogas plant residual. *Biomass and Bioenergy*, 52, 139-150
5. Brooks L., Parravicini V., Svardal K., Kroiss H., Prendl L. (2008). Biogas from sugar beet press pulp as substitute of fossil fuel in sugar beet factories. *Water Science & Technology WST*, 58, 7, 1498-1504

6. Chen R., Blagodatskaya E., Senbayram M., Blagodatsky S., Myachina O., Dittert K., Kuzyakov Y. (2012). Decomposition of biogas residues in soil and their effects on microbial growth kinetics and enzyme activities. *Biomass and Bioenergy*, 45, 221-229
7. Cirne D. G., Lehtomäki A., Björnsson L., Blackall L. L. (2007). Hydrolysis and microbial community analyses in two-stage anaerobic digestion of energy crops. *J. Appl. Microbiol.*, 103, 516-527
8. Gorzelany J., Puchalski C., Malach M. (2011). Ocena kosztów i nakładów energetycznych w produkcji kukurydzy na ziarno i kiszonkę. *Inżynieria Rolnicza*, 8, 135-141
9. Gunnarsson A., Lindén B., Gertsson U. (2011). Biodigestion of Plant Material Can Improve Nitrogen Use Efficiency in a Red Beet Crop Sequence. *Hort Sci.*, 46, 5, 765-775
10. Hutnan M., Drtil M., Derco J., Mrafkova L., Hornak M., Mico S. (2001). Two-Step Pilot-Scale Anaerobic Treatment of Sugar Beet Pulp. *Pol. J. Environ. Studies*, 10, 4, 237-243
11. Karwowska A., Gołaszewski J., Żelazna K. (2012). Przydatność *Beta vulgaris* jako substratu biogazowni rolniczej. *Bałtyckie forum biogazu „Ekoenergetyka – Biogaz”*, 17-18 września 2012 r., 222-228
12. Kołodziej A. U. (2012). Przetwarzanie i nawozowe wykorzystanie masy pofermentacyjnej z biogazowni rolniczej. *Bałtyckie forum biogazu „Ekoenergetyka – Biogaz”*, 17-18 września 2012 r., 235-253
13. Matyszczak A. (2010). Uprawa kukurydzy na cele energetyczne
<http://www.modr.mazowsze.pl/site/porady-dla-rolnikow/produkcja-roslinna/461-uprawa-kukurydzy-na-cele-energetyczne>
14. Michalski T., Warzecha R., Milewski G. (2011). *Kukurydza – nowe perspektywy*. Warszawa: Biznes Press
15. Montañés R., Pérez M., Solera R. (2014). Anaerobic mesophilic co-digestion of sewage sludge and sugar beet pulp lixiviation in batch reactors: Effect of pH control. *Chem. Eng. J.*, 255, 492-499
16. Nowak W. (2009). Energetyczne wykorzystanie biomasy. Rozdział III, str. 44
http://www.plan-rozwoju.pcz.pl/wyklady/ener_srod/rozdzial3.pdf
17. Paprota E. (2012). Proces fermentacji metanowej sposobem otrzymywania pełnowartościowego nawozu organicznego. Materiały z Seminarium Naukowego „Popularyzacja prac badawczo-rozwojowych z zakresu odnawialnych źródeł energii”, Lublin, 1.02.2012 r.
18. PN-Z-19000-1:2001 Jakość gleby – Ocena stanu sanitarnego gleby – Wykrywanie bakterii z rodzaju *Salmonella*

19. PN-Z-19000- 4:2001 Jakość gleby – Ocena stanu sanitarnego gleby – Wykrywanie jaj pasożytów jelitowych
20. Połec B., Baryga A. (2011). Warunki i efekty procesu biogazowania wysłodków buraczanych. Materiały z Międzynarodowej Konferencji „Rozwój przemysłu cukrowniczego w aspekcie wdrażania systemów jakości oraz doskonalenia jakości żywności, pasz i ochrony środowiska”, Leszno, 2011 r.
21. Połec B., Gozdek K., Baryga A., Szymański T. (2009). Możliwość wytwarzania biogazu w procesie fermentacji metanowej wysłodków buraczanych. Część I: Fermentacja statyczna wysłodków buraczanych. *Gazeta Cukrownicza*, 11-12, 278- 283, 289, 293, 305
22. Połec B., Baryga A., Szymański T., Wołyńska W., Tobała A. (2010). Możliwość wytwarzania biogazu w procesie fermentacji metanowej wysłodków buraczanych. Część II. Fermentacja półciąгла wysłodków buraczanych. *Gazeta Cukrownicza*, 5, 120-125
23. Połec B., Baryga A., Szymański T., Wołyńska W., Tobała A. (2011). Możliwość wytwarzania biogazu w procesie fermentacji metanowej wysłodków buraczanych. Część III. Fermentacja ciągła wysłodków buraczanych. *Gazeta Cukrownicza*, 4, 107-112
24. Połec B., Baryga A., Szymański T. (2014). Możliwości zwiększenia wydajności biogazowni wysłodków buraczanych. *Cukier Ukrainy*, 2014, 3, 55-62
25. Połec B., Baryga A., Szymański T. Kowalska M. (2013). Wpływ preparatu bakteryjno-enzymatycznego Lactacel-W na procesy zakiszania i fermentacji metanowej wysłodków buraczanych. *Post. Nauki Technol. Przem. Rol.-Spoż.*, 2, 46-69
26. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 13 lipca 2010 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych (Dz. U. 2010, Nr 137, poz. 924)
27. Ziemiński K., Kowalska-Wentel M. (2015). Effect of enzymatic pretreatment on anaerobic co-digestion of sugar beet pulp silage and vinasse. *Bioresource Technol.*, 180, 274-280