

ANNA KACPRZAK¹, KARINA MICHALSKA^{1,2}, ZDZISŁAWA ROMANOWSKA-DUDA³,
MIECZYSLAW GRZESIK⁴

¹*Politechnika Łódzka*

Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska

Katedra Inżynierii Bioprocessowej

Wólczańska 213, 90-924 Łódź

²*Instytut Włókiennictwa*

Brzezińska 5/15, 92-103 Łódź

³*Uniwersytet Łódzki*

Wydział Biologii i Ochrony Środowiska

Katedra Ekofizjologii i Rozwoju Roślin

Banacha 12/16, 90-237 Łódź

⁴*Instytut Ogrodnictwa w Skierniewicach*

Konstytucji 3 Maja 1/3, 96-100 Skierniewice

E-mail: annakacprzak81@tlen.pl

kar.michalska@gmail.com

romano@biol.uni.lodz.pl

mgrzesik@insad.pl

ROŚLINY ENERGETYCZNE JAKO CENNY SUROWIEC DO PRODUKCJI BIOGAZU

WPROWADZENIE

Przełom XX i XXI w. to okres znacznego wzrostu zainteresowania surowcami roślinnymi i ich wykorzystaniem w technologiach produkcji paliw odnawialnych. Kurczące się zasoby konwencjonalnych surowców energetycznych, przy wzrastającym wciąż popycie i konsumpcji paliw w wielu gałęziach gospodarki, przemysłu i transporcie, koncentrują działania ośrodków badawczych na udoskonalaniu technologii pozyskiwania energii z odnawialnych źródeł i zwiększeniu jej udziału w skali globalnej. Jednym z niekonwencjonalnych źródeł energii, mogącym znaleźć zastosowanie w licznych procesach produkcyjnych i komunalnych, jest energia zgroma-

dzona w roślinach. W wyniku procesu fotosyntezy, energia słoneczna zamieniana jest w energię chemiczną, skumulowaną w postaci węglowodanów w biomase roślinnej. Olbrzymie zainteresowanie tym surowcem i jego potencjałem zaowocowało wydaniem w dniu 10.01.2007 r., przez Komisję Europejską, komunikatu „Strategia 3x20”, zakładającego zwiększenie udziału energii odnawialnej do 20%, głównie poprzez rozwój technologii energetycznego wykorzystania biomasy pochodzącej z roślin. W tym też celu od kilkunastu lat na całym świecie zakładane są plantacje roślin energetycznych i wykorzystywane odpady produkcji rolniczej.

BIOMASA

Zgodnie z definicją podawaną przez Unię Europejską, biomasa to podatne na rozkład biologiczny frakcje produktów, odpady i pozostałości przemysłu rolniczego (łącznie

z substancjami roślinnymi i zwierzęcymi), leśnictwa i związanych z nim gałęzi gospodarki, jak również podatne na rozkład biologiczny frakcje odpadów przemysłowych i

miejskich (Dyrektywa 2001/77/WE). Zasadniczo, w technologiach wytwarzania energii wykorzystywana jest głównie biomasa pochodzenia roślinnego, powstająca w procesie fotosyntezy. Sposób jej konwersji w energię odnawialną determinuje budowa i skład chemiczny, na który składają się trzy podstawowe struktury:

- hemiceluloza, tworzona przez niejednorodną grupę polimerów cukrów prostych lub ich pochodnych, połączonych wiązaniami β -glikozydowymi, tworzących rozgałęzione łańcuchy;

- celuloza — podstawowy składnik ścian komórkowych roślin. Jest ona nierozgałęzionym biopolimerem, o cząsteczkach złożonych z kilkunastu do kilkuset tysięcy jednostek glukozy, połączonych wiązaniami β -1,4-glikozydowymi.

- lignina — substancja lepiszczowa, polimer tworzony przez monomery związków

organicznych będącymi pochodnymi aromatycznych alkoholi fenolowych.

Wśród najczęściej stosowanych metod przetwarzania biomasy w energię jest: spalanie, zgazowanie, estryfikacja, piroliza oraz fermentacja metanowa.

Produktami końcowymi tych przemian jest energia cieplna oraz paliwa ciekłe i gazowe, a ponadto wartościowy nawóz. Choć nadal w przeważającej części procesów konwersji biomasy w energię stosowane są głównie odpady z produkcji rolnej (pozostałości po żniwach i zbiorach owoców oraz warzyw, odpady z ubojni), coraz szerzej propagowane są technologie wykorzystujące obróbkę roślin wysokoenergetycznych, które ze względu na duży przyrost roczny i wysoką wartość opałową stanowią alternatywę dla klasycznych surowców lignocelulozowych.

ROŚLINY ENERGETYCZNE

Rośliny energetyczne, których plantacje coraz częściej zakładane są w Polsce, mogą być wykorzystywane do wytwarzania paliw ciekłych i gazowych (bioetanol, biogaz), a także do produkcji energii cieplnej i elektrycznej. Podstawowe grupy roślin energetycznych to:

- rośliny jednoroczne (zboża, rzepak, kukurydza, trzcina cukrowa, sorgo);

- rośliny drzewiaste szybkiej rotacji (wierzbą, topola, osika, eukaliptus);

- wieloletnie, szybko rosnące, corocznie plonujące trawy (mozga trzcinowata, miśkant);

- wieloletnie, szybko rosnące, corocznie plonujące byliny (ślazowiec pensylwański, topinambur).

Biomasa roślin energetycznych charakteryzują się zbliżoną wartością ciepła spalania (Tabela 1). Wykorzystane w technologiach fermentacji metanowej wytwarzają znaczne

ilości biogazu i metanu w nim zawartego (Tabela 2).

Rośliny energetyczne charakteryzują się dużym przyrostem rocznym. Większość z nich najlepiej rośnie na glebach żyznych, ale przy zastosowaniu odpowiednich technologii możliwa jest także ich uprawa na glebach niskiej jakości, nieużytkach i terenach zdegradowanych (ROMANOWSKA-DUDA i współaut. 2007, 2009). Istotną cechą niektórych roślin energetycznych jest zdolność kumulacji zanieczyszczeń w systemie korzeniowym, a tym samym fitoremediacji obszarów poprzemysłowych. Metale ciężkie takie jak: chrom, nikiel, rtęć, ołów i arsen, zgromadzone w korzeniach roślin, nie przenikają do produktów spalania (ROMANOWSKA-DUDA i GRZESIK 2008).

Uprawy wieloletnich roślin energetycznych mogą być użytkowane przez okres do 15–20 lat. Zdecydowaną i niemal jedyną wadą takich plantacji jest zapotrzebowanie terytorialne. Zajmując potencjalny areal możliwy dla produkcji żywności, ograniczają jej dostępność i ilość. Ponadto, monokultury takie, z zasady wielkoobszarowe, ograniczają lub nawet eliminują bioróżnorodność środowiska lokalnego. Często też prowadzą do wyjąłowania gleby. Aby nie kolidować z produkcją żywności zaleca się uprawę roślin energetycznych na glebach niskiej jakości, nawożonych uzdatnionymi osadami z oczyszczalni miejskich (GRZESIK i ROMANOWSKA-DUDA 2008; RO-

Tabela 1. Wartość energetyczna biomasy (AUGUSTYNIAK 2011).

Biopaliwo	Ciepło spalania [MJ kg ⁻¹]
Zrębki	6–16
Pelety	16,5–17,5
Słoma szara	15,2
Słoma żółta	14,3
Kora	18,5–20
Drewno kawałkowe	11–12

Tabela 2. Wydajność produkcji biogazu z najważniejszych surowców pochodzenia rolniczego. W nawiasach podano wartości typowe (JĘDRZAK i HAZIAK 2005).

Surowiec	Zawartość subst. org. [% s.m.]	Produkcja biogazu [kg m ⁻³ s.m.o.]	Zawartość CH ₄ w biogazie [%]
słoma	90–95	0,15–0,35	78
odpady roślinne	90	0,20–0,50	brak danych
odpady z owoców i warzyw	75–95	0,35–0,50	60–75
trawa	60–70	(0,55)	ok. 80
łodygi kukurydzy	90–95	(0,45)	ok. 80
łodygi ziemniaka	(87)	(0,55)	(75)

MANOWSKA-DUDA i współaut. 2009; ROMANOWSKA-DUDA i GRZESIK 2010a, b).

Spśród wielu gatunków roślin energetycznych możliwych do uprawy w Polsce, najczęściej polecane są między innymi: miskant, ślazowiec, sorgo, topinambur, wierzba, kukurydza, i nowo wprowadzane do uprawy proso różgowe (ROMANOWSKA-DUDA i GRZESIK 2008; GRZESIK i ROMANOWSKA-DUDA 2009a, b, c, d). Poniżej przedstawiono ich krótką charakterystykę.

MISKANT OLBRYZYMI (*Miscanthus giganteus*).

Miskant olbrzymi należy do rodziny wiechlinowatych. Jest okazałą trawą kępową, wywodzącą się z Azji Południowo-Wschodniej. W Europie początkowo uprawiana była jako roślina ozdobna; dopiero od kilkunastu lat wykorzystywana jest do celów energetyki odnawialnej.

Miskant olbrzymi jest krzyżówką dwóch podstawowych gatunków: miskanta cukrowego (*Miscanthus sacchariflorus*) i miskanta chińskiego (*Miscanthus sinensis*). Roślina ta wytwarza sztywne, grube, wypełnione gąbczastym rdzeniem źdźbła, o długości nawet do 350 cm. Blaszki liściowe miskanta olbrzymiego są spłaszczone, ciemnozielone i lancetowate, z grubym nerwem głównym. System korzeniowy tej rośliny, sięgający do 2,5 m, jest silny i przystosowany do pobierania wody i składników pokarmowych z głębszych warstw gleby.

Miskant olbrzymi jest rośliną typu fotosyntetycznego C-4, przez co charakteryzuje go większa absorpcja CO₂. Wzrasta bardzo szybko. Starsze okazy są odporne na niskie temperatury i cechują się wysokim plonem do 25 t ha⁻¹. Wartość opałowa miskanta wynosi 14–17 MJ kg⁻¹. Ze względu na długowieczność plantacji (15–20 lat), jak i dużą produktywność biomasy, uznawany jest za bardzo cenne, alternatywne źródło ener-

gii (SØRENSEN i współaut. 2008, ZAWADZKA i współaut. 2010).

W Tabeli 3 zestawiono najważniejsze parametry fizyczne i chemiczne, charakteryzujące rośliny z gatunku *Miscanthus giganteus*.

Tabela 3. Charakterystyka miskanta olbrzymiego (*Miscanthus giganteus*). Dane fizyczne i chemiczne (MICHALSKA 2011).

Parametr	<i>Miscanthus giganteus</i>
Zawartość hemicelulozy [%]	24,4
Zawartość celulozy [%]	26,5
Zawartość ligniny [%]	28,8
Sucha masa [%]	94,1
Sucha masa organiczna [%]	89,8
Popiół [%]	4,3
ChZT [mgO ₂ /g]	52 632

ŚLAZOWIEC PENSYLWAŃSKI (*Sida hermaphrodita*)

Ślazowiec pensylwański należy do rodziny ślazowatych i wywodzi się z południowych rejonów Ameryki Północnej. Początkowo wykorzystywany był jako roślina paszowa, włóknodajna i miododajna; jego uprawa w charakterze rośliny energetycznej propagowana jest dopiero od kilku lat.

Ślazowiec pensylwański to roślina wieloletnia, posiadająca skrętoległe, ogonkowe liście, które osadzone są na łodydze. Pędy ślazowca pensylwańskiego mogą osiągać wysokość nawet do 4 m, a ich średnica dochodzi do 35 mm.

Ślazowiec pensylwański charakteryzuje się silnie rozwiniętym systemem korzeniowym, dochodzącym do głębokości nawet 3 m. Na plantacjach może być użytkowany przez 15–20 lat. Do celów energetycznych wykorzystuje się nadziemne części roślin, tj. zdrewniałe i uschnięte łodygi. Plony biomasy sięgają 20–25 t ha⁻¹. Wartość opałowa tej rośliny wynosi około 15 MJ kg⁻¹ (ZAWADZKA i współaut. 2010).

Tabela 4. Charakterystyka ślazuwca pensylwańskiego (*Sida hermaphrodita*). Dane fizyczne i chemiczne (MICHALSKA 2011).

Parametr	<i>Sida hermaphrodita</i>
Zawartość hemicelulozy [%]	21,5
Zawartość celulozy [%]	25,1
Zawartość ligniny [%]	19,1
Sucha masa [%]	95,6
Sucha masa organiczna [%]	92,0
Popiół [%]	3,6
ChZT [mgO ₂ g ⁻¹]	57843

W Tabeli 4 zestawiono najważniejsze parametry fizyczne i chemiczne, charakteryzujące rośliny z gatunku ślazuwca pensylwańskiego (*Sida hermaphrodita*).

SORGO (*Sorghum bicolor* Moench)

Sorgo należy do rodziny wiechlinowatych i jest jednym z najważniejszych gatunków zbożowych. Jest blisko spokrewniony z kukurydzą; obie rośliny należą do rodziny prosoowatych, stąd wiele cech mają podobnych (morfologia, fizjologia, rozwój wegetacyjny, kierunki użytkowania).

Sorgo, w zależności od odmiany, osiąga do 4 m wysokości. Jest rośliną odporną na suszę, gdyż jego liście pokrywa gruba warstwa wosku. Roślina ta rozwija bardzo mocny system korzeniowy, a w przypadku długiego braku nawodnienia wchodzi w stan uśpienia.

Podobnie jak miskant olbrzymi, sorgo cechuje się wydajną fotosyntezą, typu C-4. Pozwala to na duży przyrost biomasy w warunkach ciepłego lata i przy dostatecznej ilości wody. Plony biomasy mogą wynosić 15–18 t ha⁻¹, a wartość opałowa około 15 MJ kg⁻¹ (MCINTOSH i VANCOV 2010).

W Tabeli 5 zestawiono najważniejsze parametry fizyczne i chemiczne charakteryzujące rośliny z gatunku sorgo (*Sorghum bicolor* Moench).

TOPINAMBUR (*Helianthus tuberosus*)

Słonecznik bulwiasty (*Helianthus tuberosus*), potocznie zwany topinamburem, należy do rodziny astrowatych. W Ameryce Północnej występuje dziko, natomiast uprawiany jest w Chinach, Australii, Rosji, Ameryce Północnej, Indiach i Afryce Środkowej. W Polsce rozmnaża się tylko wegetatywnie, ponieważ nasiona nie dojrzewają przed nastaniem przymrozków. Rośliny te wytwarzają podziemne rozłogi, na końcach których

Tabela 5. Charakterystyka sorgo (*Sorghum Moench*). Dane fizyczne i chemiczne (MICHALSKA 2011).

Parametr	<i>Sorghum Moench</i>
Zawartość hemicelulozy [%]	25,9
Zawartość celulozy [%]	23,0
Zawartość ligniny [%]	27,9
Sucha masa [%]	95,7
Sucha masa organiczna [%]	86,3
Popiół [%]	9,4
ChZT [mgO ₂ /g]	50 971

wyrastają bulwy o nieregularnych kształtach. Wysokość roślin waha się od 2 do 4 m.

Topinambur najczęściej uprawia się przez kilka lat na tym samym polu i dlatego konieczne jest tzw. odnawianie plantacji.

Topinambur wykazuje wiele istotnych cech z punktu widzenia wykorzystania energetycznego. Podstawowe to: wysoki potencjał plonowania, niska wilgotność biomasy uzyskiwana w sposób naturalny (bez konieczności energochłonnego suszenia) oraz możliwość pozyskania zarówno części nadziemnych, jak i podziemnych organów spichrzowych.

Słonecznik bulwiasty jest rośliną, która w przyszłości może odegrać ważną rolę w produkcji rolniczej i ochronie środowiska, przede wszystkim ze względu na jej duży potencjał plonowania i wartość użytkową biomasy. Bulwy mogą być przeznaczone do produkcji etanolu lub biogazu, a części nadziemne mogą być wykorzystane do bezpośredniego spalania lub współspalania z węglem. Mogą też służyć do produkcji brykietów i peletów. Wartość opałowa słonecznika bulwiastego wynosi 15,93 MJ kg⁻¹ (PISKIER 2006). Parametry charakteryzujące topinambur zawarto w Tabeli 6.

WIERZBA WICIOWA (*Salix viminalis*)

Wierzba wiciowa jest powszechnie uprawianą rośliną energetyczną. Jest ona określana mianem „drzewa szybkiej rotacji”. Dzięki szybkiemu wzrostowi w początkowej fazie rozwoju oraz możliwości rozmnażania się przez sadzonki i pędy, możliwy jest zbiór biomasy w kilku cyklach. Jej plon suchej masy to 8–15 ton ha⁻¹ rok⁻¹, przy czym w chwili zbioru zawartość wody może wynosić do 50–60%, Wymusza to suszenie jej przed spalaniem, co podraża koszty. Wartość opałowa wynosi 16–17 MJ kg⁻¹ suchej masy. Rozmnażanie przez sadzonki podraża koszty

Tabela 6. Charakterystyka fizyczna i chemiczna topinambur (*syn.* słonecznik bulwiasty; *Helianthus tuberosus*) (KOMOROWICZ i współaut. 2009).

Parametr	<i>Helianthus tuberosus</i>
Zawartość hemicelulozy [%]	25,66
Zawartość celulozy Seiferta [%]	40,95
Zawartość ligniny Klasona [%]	20,48
Pentozany [%]	22,65

założenia plantacji i wymaga intensywnego nawożenia, mogącego prowadzić do skażenia gleby i eutrofizacji wód.

Wierzby są roślinami wodolubnymi i najefektywniej rozwijają się na obrzeżach cieków wodnych oraz na terenach podmokłych. Jest to gatunek zalecany w procesie fitoremediacji i przydatny do usuwania metali ciężkich oraz innych toksycznych związków z obszarów chemicznie zdegradowanych. Dzięki ponadprzeciętnym zdolnościom do akumulacji substancji szkodliwych oraz ich degradacji, wierzba może być uprawiana w formie pasów ochronnych wokół zakładów przemysłowych, składowisk odpadów oraz wzdłuż autostrad. Ważną własnością wierzby jest również to, że we wczesnym okresie wegetacji akumuluje dużą część węgla w łodygach, a później, po ok. 35 latach wegetacji, akumuluje go w korzeniach. Najkorzystniejsze jest wycinanie roślin w odstępach 3–5 letnich. Duża akumulacja węgla i innych pierwiastków, tj. azotu czy fosforu, również metali ciężkich i węglowodorów aromatycznych, wynika z szybkiego wzrostu roślin (rośnie do 10 razy szybciej niż sosna czy świerk). Według badań Stefana Szczukowskiego i Janusza Budnego z Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie najbardziej przydatnymi i znanymi klonami wierzby są m.in.: *Salix viminalis* 082 (plon świeżej biomasy: rośliny dwuletnie – 74,13 ton ha⁻¹; rośliny trzyletnie – 144,48 ton ha⁻¹), *Salix viminalis* var. Gigantea (plon świeżej biomasy: rośliny dwuletnie – 60,30 ton ha⁻¹; rośliny trzyletnie – 114,28 ton ha⁻¹), *Salix viminalis* 052 (plon świeżej biomasy: rośliny dwuletnie – 70,30 ton ha⁻¹; rośliny trzyletnie – 126,21 ton ha⁻¹), *Salix viminalis* 051 (plon świeżej biomasy: rośliny dwuletnie – 59,98 ton ha⁻¹; rośliny trzyletnie – 107,44 ton ha⁻¹ oraz *Salix viminalis* 'Piaskówka' (plon świeżej biomasy:

Tabela 7. Charakterystyka fizyczna i chemiczna wierzby wiciowej (*Salix viminalis*) (SZCZUKOWSKI i współaut. 1998).

Parametr	<i>Salix viminalis</i>
Zawartość hemicelulozy [%]	13,63
Zawartość celulozy [%]	49,84
Zawartość ligniny [%]	13,24
Sucha masa [%]	50,24
Popiół [%]	1,51

rośliny dwuletnie – 52,34 ton ha⁻¹; rośliny trzyletnie – 102,03 ton ha⁻¹). Metody uprawy wierzby wiciowej są powszechnie znane, a autorzy niniejszej pracy i inni wykazali możliwość jej produkcji oraz innych roślin nawet na glebach słabych wzbogaconych przerozonymi osadami z oczyszczalni miejskich (GARDINER i współaut. 1995; BIEŃ i współaut. 1998; OLESZKIEWICZ 1998; PLANQUART i współaut. 1999; COGLIASTRO i współaut. 2001; MAC-KOWIAK 2001; CZYŻYK i KOZDRAŚ 2003; KRZYWY i IŻEWSKA 2004; BENITO i współaut. 2005; GRZESIK i współaut. 2007; ROMANOWSKA-DUDA i współaut. 2007, 2009; GRZESIK i ROMANOWSKA-DUDA 2008;).

W Tabeli 7 zestawiono najważniejsze parametry fizyczne i chemiczne charakteryzujące rośliny z gatunku wierzba wiciowa (*Salix viminalis*).

KUKURYDZA (*Zea mays*)

Kukurydza jest rośliną powszechnie uprawianą w Polsce na ziarno i kiszonki. Plon suchej masy może wynosić do 45 ton ha⁻¹, w tym plon łodyg do około 30 ton, ziarna 11 ton, osadek 3–5 ton, co przy dużej masie roślinnej i niskiej wilgotności, powinno stawiać tę roślinę wśród najbardziej przydatnych w energetyce. Plon zielonej masy może wynosić 50–60 ton ha⁻¹. Wartość energetyczna jest zbliżona do wartości zbóż (ok. 17–18 MJ kg⁻¹ suchej masy). Korzystny dla energetyki jest fakt, że rośliny są typu fotosyntetycznego C4. W Tabeli 8 wykazano parametry fizyczne i chemiczne dla kukurydzy.

PROSO RÓZGOWE (*Panicum virgatum*)

Proso różgowe posiada rozbudowany, wiązkowy system korzeniowy, pozwalający na rozwój bogatej mikroflory. Przy współpracy z mikroorganizmami zamieszkującymi

Tabela 8. Charakterystyka fizyczna i chemiczna kukurydzy (*Zea mays*) (PURWIN 2008).

Parametr	<i>Zea mays</i>
Zawartość hemicelulozy [%]	23,00
Zawartość celulozy [%]	20,00
Zawartość ligniny [%]	2,00
Popiół [%]	6,0

ryzosphę, wykazuje zdolność do degradacji herbicydu Isoxaben (Darkeford CE). Dlatego podejmuje się próby stosowania *P. virgatum* do oczyszczania gleby i wód spływu powierzchniowego (ang. surface runoff water) z substancji odżywczych (P, N), pochodzących z nawozów naturalnych. Sadzenie w postaci pasów odgradzających (ang. filter strip), efektywnie zmniejszyło zawartość reaktywnego fosforu i obniżyło ChZT w wodach spływu powierzchniowego, co wspomaga ochronę wód powierzchniowych przed eutrofizacją (SANDERSON i ADLER 2008). Trawa wyka-

Tabela 9. Charakterystyka fizyczna i chemiczna proso różgowe (*Panicum virgatum*) (CHOJNACKA 2011).

Parametr	<i>Salix viminalis</i>
Zawartość hemicelulozy [%]	24,4
Zawartość celulozy [%]	31,00
Zawartość ligniny [%]	17,60

zuje również pewną tolerancję w stosunku do TNT i niektórych WWA (PAH). Wykazano również przyspieszony rozkład WWA w strefie korzeniowej. W przypadku piranu zanotowano 30% mineralizacji, w porównaniu do 4,3% w próbie kontrolnej (NEWMAN i REYNOLDS 2004). Proso różgowe może rosnąć na glebach średnio skażonych ołowiem (do 36100 ppm) i aktywnie transportować ołów do części rośliny nadających się do zbioru (GLEESON 2007). Wartość opałowa wynosi 14–17 MJ kg⁻¹ (MAJTKOWSKA i MAJTKOWSKI 2005). Parametry fizyczne i chemiczne proso przedstawiono w Tabeli 9.

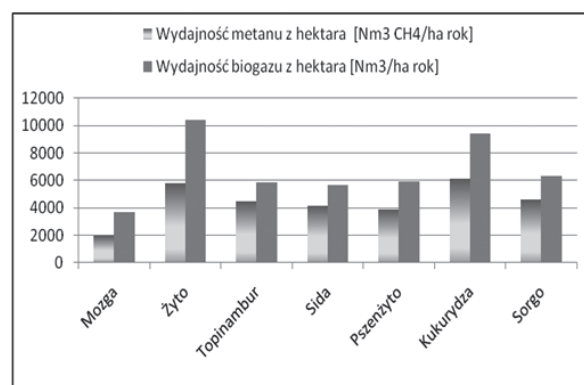
POTENCJAŁ METANOGENNY

Potencjał metanogeny (ang. biochemical methane potential, BMP), to analiza rozkładalności danego substratu. Dzięki niej można dokonać oceny potencjalnych substratów i optymalizacji fermentacji beztlenowej.

Jednym z głównych kryteriów jest określenie ilości i jakości biogazu, jaki można otrzymać w wyniku okresowej fermentacji metanowej dla konkretnego surowca. Badanie polega na umieszczeniu w bioreaktorze odpowiednio przygotowanej porcji surowca wraz ze standardowym inokulum zawierającym bakterie uczestniczące w fermentacji metanowej. Pomiarom podlegają dobowe przyrosty objętości powstającego biogazu oraz jego skład. Wykreślana jest kinetyka powstawania biogazu, czyli tzw. krzywa biogazodochodowości (BIOGAZ ZERNERIS Sp. z o.o.; procedury badawcze).

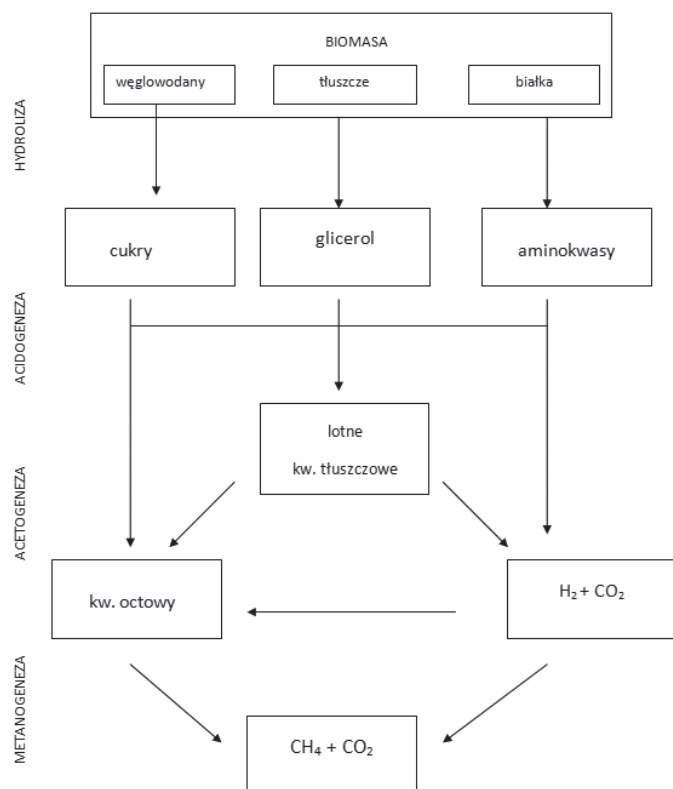
Znając plon danej rośliny energetycznej można obliczyć prawdopodobną ilość wytworzonego biogazu i metanu, przypadającą na hektar uprawy. Rycina 1 przedstawia przykładowe wartości wydajności biogazu wybranych roślin energetycznych.

Proces fermentacji beztlenowej jest znany od wieków. W 1936 r. Buswell udowodnił, że fermentacja może być stosowana do rozkładu odpadów stałych (łodyg kukurydzy), w postaci zawiesiny o stężeniu większym niż 10% s.m. W 1970 r. stwierdzono, że proces ten może przebiegać z dobrą wydajnością, nawet przy wyższych zawartościach ciał stałych do 40% (THEMELIS 2002).



Ryc. 1. Wydajność biogazu i metanu z upraw roślin energetycznych o powierzchni 1ha (KACPRZAK i współaut. 2010).

FERMENTACJA BEZTLENOWA



Ryc. 2. Uproszczony schemat procesu fermentacji metanowej.

Obecnie fermentacja beztlenowa jest atrakcyjna z uwagi na możliwość pozyskiwania energii z odpadów. O dużym zainteresowaniu procesem anaerobowym zdecydowały przede wszystkim jego zalety, w porównaniu z metodami tlenowymi. Jako główne, wymienia się:

- przekształcanie energii zawartej w płodach rolnych i innych odpadach przemysłu spożywczego w użyteczne paliwo (biogaz);
- recykling odpadów organicznych w stabilne polepszacze gleby, cenny płynny nawóz i energię;
- obniżenie niekorzystnego oddziaływania na środowisko (LEDAKOWICZ i KRZYSZEK 2005);
- oszczędności energetyczne;
- około 6 do 10 razy mniejsza produkcja osadów nadmiernych, które nie tracą swojej biologicznej aktywności nawet po długim okresie przechowywania;
- mniejsze zapotrzebowanie na substancje odżywcze w procesie fermentacyjnym;

— możliwość pracy urządzeń przy wysokich obciążeniach hydraulicznych oraz wysokich obciążeniach substancjami organicznymi (MIKSCH 2000).

Beztlenowy rozkład związków organicznych zachodzi w czterech fazach prowadzonych przy ścisłej współpracy różnych grup bakterii (ROSENWILKEN 1999, LASTELLA i współaut. 2002). Należą do nich: bakterie hydrolizujące, fermentujące, acetogenne, homoacetogenne, redukujące siarczan i metanogenne (CHYNOWETH i współaut. 2001, LEDAKOWICZ i KRZYSZEK 2005).

Cechą charakterystyczną przemian substancji organicznych w komorach fermentacyjnych jest to, że są to przemiany beztlenowe. Tylko one dostarczają surowców organicznych do przemian metanogennych. Dlatego wygodne jest analizowanie procesów w komorach fermentacyjnych w dwóch etapach. W pierwszym etapie, z dowolnej naturalnej substancji organicznej, dzięki przemianom biochemicznym mikroorganizmów, powstają pośrednie i końcowe produkty tych przemian, właściwe tym substancjom i procesom. Etap drugi, to właściwa fermentacja metanowa. Każdy etap charakteryzuje się określonymi szybkościami przemian, warunkami fizyczno-chemicznymi oraz biochemicznymi. Współzależność przemian pokazana jest na Ryc. 2 (SCHINK 2002, JADVIKA i współaut. 2004, LEDAKOWICZ i KRZYSZEK 2005).

FAZA I – HYDROLIZA

W tej fazie związki organiczne, w większości nierozpuszczalne (białka, węglowodory, tłuszcze), są przetwarzane przy udziale enzymów bakterii hydrolizujących w substancje rozpuszczalne w wodzie. Węglowodory rozkładane są do cukrów prostych, białka do aminokwasów, a tłuszcze do kwasów tłuszczowych (JANOSZ-RAJCZYK 2004).

Rozkład węglowodanów

Węglowodany złożone, aby mogły przenikać przez błony komórkowe, rozkładane

są do cukrów prostych (CZERSKA i współaut. 2000).

H_2O
węglowodany $\rightarrow$ cukry proste $\rightarrow$
(skrobia) amylazy
kwasy organiczne, CO_2 , alkohole, aldehydy (1)

Rozkład tłuszczu

Tłuszcze ulegają rozkładowi do glicerolu i kwasów tłuszczowych.

H_2O
Tłuszcze $\rightarrow$ glicerol + kwasy tłuszczowe $\rightarrow$
lipazy
alkohole, CO_2 , kwasy organiczne, H_2O (2)

Rozkład białek

Białka rozkładane się do prostszych związków, aby móc przenikać przez błony komórkowe. Hydroliza do aminokwasów może przebiegać różnymi drogami, które zależą od warunków środowiskowych i rodzaju organizmów, które uczestniczą w procesie (KUMAR i współaut. 2009).

H_2O
białka proste $\rightarrow$ aminokwasy + CO_2 + H_2S +
proteazy
 $\text{NH}_3 \rightarrow$ aminy, tioalkohole (3)

FAZA II ACIDOGENNA – KWASOGENEZA

Jest to faza zakwaszania, w której produkty hydrolizy są przetwarzane przez fakultatywne bakterie acidogenne do krótkołańcuchowych kwasów organicznych (mrówkowego, octowego, propionowego, masłowego, walerianowego, kapronowego), alkoholi (m.in. metanolu, etanolu), aldehydów, a także dwutlenku węgla i wodoru. Wydziela się intensywny zapach. Obniża się odczyn pH (do ok. 5,5), co związane jest z powstawaniem lotnych kwasów tłuszczowych. Bakterie biorące udział w tej fazie zużywają tlen pozostały po procesie acidogennym, stwarzając warunki dogodne dla obligacyjnych beztlenowców (np. *Pseudomonas*, *Clostridium*). Część powstałych podczas kwasogenezy produktów staje się źródłem energii i węgla dla bakterii biorących udział w fazie acetogennej (CZERSKA i współaut. 2000).

$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \rightarrow 2 \text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} + 2 \text{CO}_2$ (4)
(glukoza/etanol)

$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 2 \text{H}_2 \rightarrow 2 \text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH} + 2 \text{H}_2\text{O}$ (5)
(glukoza/kw.propionowy)

FAZA III ACETOGENNA – OCTANOGENEZA

Jest to etap, w którym przy udziale bakterii octanogennych, z kwasów organicznych powstaje kwas octowy oraz ditlenek węgla i wodór. W fazie tej pojawiają się bakterie z rodzaju *Desulfovibrio* i *Desulfotomaculum*, które redukują siarczany. Rozkład kwasów tłuszczowych, alkoholi oraz kwasów organicznych powoduje uwolnienie się wodoru, który działa niekorzystnie na bakterie tej fazy (CZERSKA i współaut. 2000).

FAZA IV – METANOGENEZA

W fazie tej z kwasu octowego lub z wodoru i dwutlenku węgla powstaje metan. Przemiana ta zachodzi przy udziale bakterii metanogennych z rodzaju *Methanobacterium*, *Methanococcus*, *Methanogenium*. W wyniku tego procesu powstaje palny gaz, składający się przede wszystkim z metanu i dwutlenku węgla. Z badań wynika, że w czasie fermentacji metanowej z kwasu octowego powstaje ok. 70% metanu, a z wodoru i dwutlenku węgla ok. 30% (JADVIKA i współaut. 2004; MCINTOSH i współaut. 2010)

powstawanie metanu z kwasu octowego

$\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$ (6)

powstawanie metanu z wodoru i dwutlenku węgla

$\text{CO}_2 + 4 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$ (7)

W procesie zrównoważonym produkty pierwszych dwóch grup drobnoustrojów są zużywane przez trzecią grupę i wytwarzają metan oraz CO_2 . Tylko 20–30% węgla przechodzi do produktów pośrednich zanim zostanie przekształcony w metan i dwutlenek węgla (KUMAR i współaut. 2009). W trakcie rozkładu kwasów tłuszczowych, alkoholi oraz kwasów organicznych bakterie octanowe uwalniają wodór. W związku z tym, że bakterie te mogą egzystować tylko przy niewielkim stężeniu cząsteczkowym wodoru, wymagają one symbiozy z bakteriami metanowymi zużywającymi wodór. Inną przyczyną konieczności istnienia symbiozy między tymi dwiema grupami bakterii jest energetyka reakcji. Reakcje przemiany materii są endoergiczne (ujemny bilans energii). Odpowiednia ilość energii potrzebna do ich przebiegu musi być więc dostarczana z reakcji egzoergicznych (dodatni bilans energii), tj. reakcji tworzenia metanu (CZERSKA i współaut. 2000).

CHEMICZNA HYDROLIZA – NOWY TREND W TECHNOLOGIACH FERMENTACJI METANOWEJ ROŚLIN WYSOKOENERGETYCZNYCH

Technologia fermentacji metanowej, jak wspomniano wcześniej, wymaga przetworzenia materiału roślinnego. W procesie wytwarzania biogazu etap ten nazwany jest biologiczną hydrolizą, a w praktyce – kiszeniem surowca. Z uwagi na czas trwania tego procesu, przy jednoczesnym dużym wpływie na pozostałe etapy fermentacji i jej wydajność końcową, hydroliza uznawana jest za fazę limitującą i podnoszącą koszt całej technologii. Stąd też, od kilku lat prowadzone są liczne badania nad usprawnieniem tego kluczowego procesu. Ostatnie lata, to czas wprowadzania do technologii anaerobowej degradacji roślin, etapu wstępnego przetwarzania biosurowca: chemicznej hydrolizy.

Obróbka wstępna, w dużym uproszczeniu, prowadzi do rozkładu organicznej struktury związków polimerowych do prostych cząsteczek, które są bardziej podatne na biologiczną degradację. Prowadzi tym samym do zmniejszenia zapotrzebowania na kosztowne enzymy i znacząco obniża koszty kolejnych operacji jednostkowych. Hydroliza chemiczna wpływa na obniżenie toksyczności produktów pośrednich, szybkość rozkładu enzymatycznego, stężenie produktów końcowych i inne parametry procesowe (ONISZK-POPŁAWSKA i współaut. 2003, JADVIKA i współaut. 2004, WYMAN i współaut. 2005, HENDRIKS i ZEEMAN 2009, KUMAR i współaut. 2009). Mimo wzrastającego zainteresowania tym etapem w dalszym ciągu nie jest jednak jasne, które właściwości biomasy roślinnej mają największy wpływ na jego wydajność (WYMAN i współaut. 2005, HENDRIKS i ZEEMAN 2009).

Chemiczną i enzymatyczną hydrolizę biomasy lignocelulozowej ograniczają różne czynniki: krystaliczność celulozy, stopień polimeryzacji, zawartość wilgoci, zawartość hemicelulozy i ligniny oraz porowatość surowca. Degradacja hemicelulozy zwiększa prawdopodobieństwo hydrolizy celulozy, z drugiej strony, znaczna zawartość ligniny zmniejsza szybkość i wydłuża proces enzymatycznej hydrolizy. Stąd też badania obejmują szerokie spektrum metod chemicznego przetwarzania materiału roślinnego. Za najpopularniejsze uważa się termochemiczną obróbkę kwasami i alkali, ale oprócz nich równie obiecująco przedstawiane są następujące metody (JADVIKA i współaut. 2004, MOSIER i współaut. 2005, HENDRIKS i ZEEMAN 2009): hydroliza za pomocą ultradźwięków, hydroliza termiczna (tzw. *steam explosion* lub *liquid hot water*), oddziaływanie utleniaczami (H_2O_2 , kwas nadoctowy) oraz techniki zaawansowanego utleniania (np. reakcja Fentona, mokre utlenianie, ozonowanie).

Poszczególne metody chemicznej hydrolizy są bardzo obiecujące, ale porównywanie ich jest trudne z powodu różnic w metodyce badań, jak również zastosowanych surowców roślinnych. W skali kraju badania nad hydrolizą roślin energetycznych mogą przyczynić się do szerszego zainteresowania problemem oraz skłonić mniejsze bądź większe przedsiębiorstwa i gminy do wielkoskalowych inwestycji prowadzących do spełnienia założeń rządowych i unijnych w kwestiach wykorzystania odnawialnych źródeł energii.

TECHNOLOGIE PROCESU FERMENTACJI

Pięć podstawowych parametrów, wynikających głównie z mechanizmu produkcji metanu oraz wymogów dotyczących prowadzenia procesów biologicznych, wpływa na wybór rozwiązania technologicznego fermentacji metanowej. Są to:

- wilgotność substratu : fermentacja sucha (>20% s.m.), mokra (<20% s.m.),
- temperatura fermentacji: fermentacja mezofilowa (34–37°C) i termofilowa (55–60°C),
- przepływ substancji: okresowa lub ciągła,

- liczba stopni fermentacji: technologie jedno-, dwu- lub wielostopniowe,

- sposób mieszania: mechaniczne, wtrysk gazu, perkolacja (JĘDRZAK i HAZIAK 2005).

Technologie prowadzenia procesu fermentacji metanowej są nadal intensywnie rozwijane. Wiele firm wprowadza własne, innowacyjne modyfikacje sposobu i warunków prowadzenia procesu, by uczynić go bardziej efektywnym i opłacalnym.

Obecnie fermentacja metanowa jest stosowana w czterech sektorach przerobu odpadów:

- osadów powstających podczas aerobowego oczyszczania ścieków miejskich,
- odpadów rolnych (gnojowicy),
- ścieków z przemysłu spożywczego, fermentacyjnego, z biomasy,
- przerobu organicznej frakcji stałych odpadów komunalnych (LEDAKOWICZ i KRZYSTEK 2005).

Biogazownie są jednym z najbardziej dynamicznie rozwijających się sektorów energetyki odnawialnej w Polsce. Według Urzędu Regulacji Energetyki w naszym kraju jest już ponad 130 elektrowni biogazowych o łącznej mocy wynoszącej blisko 77 MW. Typowych biogazowni, przetwarzających odpady rolne i z zakładów, zajmujących się produkcją spożywczą jest kilka. Nie mamy ani jednej instalacji biogazowej wykorzystującej rośliny energetyczne, a dopiero rozwój takich obiektów mógłby ulokować Polskę w europejskiej czołówce tej branży. Są to jednak głównie

obiekty wytwarzające energię z biogazu wysypiskowego lub też z osadów ściekowych, a zaledwie kilka instalacji wykorzystuje odpady rolne lub też z zakładów produkujących żywność.

Najwyższy standard technologiczny prezentują biogazownie w Danii i Niemczech, gdzie istnieje wiele małych, średnich i dużych obiektów. Ponadto pod koniec lat 80. uruchomiona została w Danii instalacja do produkcji biogazu z gnojowicy w kombinacji z innymi odpadami organicznymi takimi jak odpady przemysłu spożywczego i sortowane u źródła odpady organiczne. Jest to tzw. kofermentacja, która charakteryzuje się szeregiem zalet: zwiększoną produkcją biogazu, wyższym stopniem rozkładu substancji organicznej, niższym stężeniem substancji szkodliwych oraz wyższym stężeniem substancji nawozowych w osadzie przefermentowanym.

PODSUMOWANIE

Wykorzystanie biomasy do produkcji biogazu stanowi atrakcyjny sposób na uzyskanie energii odnawialnej. W Polsce istnieje znaczny potencjał techniczny produkcji biogazu i wynosi ok. 34 PJ, w tym największy jest udział biogazu rolniczego (15,2 PJ) (ONISZK-POPLAWSKA i współaut. 2003). Niestety, na skutek licznych barier nie jest on wykorzystywany.

Podstawowym problemem w Polsce jest brak uregulowań prawnych, które stanowiłyby podstawę dla rozwoju sektora biogazu rolniczego. Pomimo, że sejmowa *Strategia rozwoju energetyki odnawialnej* z 2000r. przewidywała wzrost udziału energii pierwotnej ze źródeł odnawialnych w bilansie kraju do poziomu 7,5% w 2010 r., brak jest programu wykonawczego dla poszczególnych technologii z określeniem celu ilościowego i sposobów jego osiągnięcia (ONISZK-POPLAWSKA i współaut. 2003).

Dla porównania, w Danii od 1988 r. wdrożono trzy programy rozwoju sektora biogazowego, które miały za zadanie promowanie budowli biogazowi rolniczych. W ramach programów przyznawano dotacje w wysokości 20–40% kosztów inwestycyjnych na budowę wszystkich biogazowi zcentralizowanych oraz 30% dla inwestorów indywidualnych. Wprowadzono zwolnienie z podatków energetycznych za energię elektryczną i ciepło oraz udzielono długoterminowych, ni-

sko oprocentowanych kredytów na budowę instalacji. W efekcie ich realizacji, powstało 20 dużych scentralizowanych biogazowi oraz 45 indywidualnych (ONISZK-POPLAWSKA i współaut. 2003).

Budowa instalacji biogazowych przetwarzających biomase ważną jest również ze względu na możliwość redukcji odpadów oraz emisji gazów cieplarnianych na terenach wiejskich. W Polsce rolnictwo odpowiada za emisję 22% całkowitej produkcji metanu oraz za emisję 74% całkowitej ilości podtlenku azotu. Gazy te charakteryzują się wielokrotnie większym od dwutlenku węgla potencjałem ocieplania klimatu.

Należy wspomnieć, że wybrane i opisane w artykule rośliny pochodzą z innych obszarów geograficznych i nie należą do naturalnej flory naszego kraju i naszej strefy klimatycznej. Na przykład rodzaj *Sida* wywodzi się z subtropikalnych stref klimatycznych, gdzie występuje w warunkach naturalnych. Można ją również spotkać w rejonach półpustynnych i pustynnych Afryki i Australii. Z kolei proso różgowate *Panicum virgatum* jest rośliną zielną klimatu ciepłego. Pochodzi z Ameryki Północnej i naturalnie występuje od Meksyku po Kanadę. Natomiast dziko rosnący w Ameryce Północnej topinambur jest dziś uprawiany na wszystkich kontynentach. Poza ojczyznę rozpowszechnił się we Francji, Włoszech, Niemczech, Chinach, Indiach i w

Środkowej Afryce. W Polsce zarejestrowane są dwie odmiany: Albik i Rubik.

Jednym z priorytetów VI Programu Ramowego Unii Europejskiej było obniżenie zużycia energii przez podwojenie udziału surowców odnawialnych z 6 do 12% do 2010 r. na rynku energetycznym. Przewiduje się, że wykorzystanie procesów biotechnologicznych wpłynie korzystnie na poprawę bilansu energetycznego kraju, jak również znacząco

zmniejszy zanieczyszczenie środowiska naturalnego (LEDAKOWICZ i KRZYTEK 2005).

Publikacja powstała w ramach projektu „Bioenergia dla Regionu – Zintegrowany Program Rozwoju Doktorantów”, współfinansowanego przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego, przy wsparciu eksperckim prof. dr hab. inż. Stanisława Ledakowicza.

ROŚLINY ENERGETYCZNE JAKO CENNY SUROWIEC DO PRODUKCJI BIOGAZU

Streszczenie

Biomasa roślinna od kilku lat jest przedmiotem szczególnego zainteresowania energetyki, polityki i sektora gospodarki. Potencjał energetyczny oraz możliwość ogólnej jej dostępności, a także perspektywa zagospodarowania odpadów, czyni biomasę podstawowym i powszechnie stosowanym w praktyce, odnawialnym źródłem energii. Dyrektywa UE kładzie nacisk na wzrost zużycia energii odnawialnej i

redukcję niekontrolowanej emisji metanu w krajach członkowskich oraz do inwestowania w innowacyjne technologie, w tym beztlenową fermentację i produkcję biogazu. W artykule przedstawiono charakterystykę wybranych roślin energetycznych i sposób ich przetwarzania na biopaliwa gazowe, jako wiodące trendy w tej dziedzinie.

ENERGY CROPS AS A VALUABLE MATERIAL FOR BIOGAS PRODUCTION

Summary

Plant biomass for several years has been of particular interest for the energy, politics and economy sectors. Energy potential, general accessibility, and – undoubtedly – the possibility of green waste management, makes biomass one of the fundamental and commonly used in practice renewable energy sources. The European Union directive lays emphasis on the growth of renew-

able energy consumption and reduction of uncontrolled methane emissions, forces the member countries to invest in innovative technologies, including anaerobic digestion technology and biogas production. The article presents characteristics of selected energy crops and the ways of their conversion into gas biofuel, representing leading trends in this field.

LITERATURA

- AUGUSTYNIAK K., 2011. *Hydroliza roślin energetycznych odczynnikiem Fentona*. Praca magisterska. Politechnika Łódzka, Łódź.
- BENITO M., MASAUGER A., DE ANTONIO R., MOLINER A., 2005. *Use of peruning waste compost as component in soils growing media*. Bioresource Technol. 96, 597–603.
- BIEŃ J. B., BIEŃ J. D., WYSTALSKA K., 1998. *Problemy gospodarki osadowej w ochronie środowiska*. Skrypty Politechniki Częstochowskiej 31.
- CHOJNACKA A. 2011. *Proso różgowe – roślina energetyczna drugiej generacji*. Klaster Bioenergia dla Regionu.
- CHYNOWETH D. P., OWENS J. M., LEGRAND R., 2001. *Renewable methane from anaerobic digestion of biomass*. Renewable Energy 22, 1–8.
- COGLIASTRO A., DOMON G., DAIGLE S., 2001. *Effects of wastewater sludge and woodchip combinations on soil properties and growth of planted hardwood trees and willows on a restored site*. Ecol. Engine. 16, 471–485.
- CZERSKA B., GRABIŃSKA-SOTA E., KALKA J., SURMACZ-GÓRSKA J., 2000. *Biotechnologia ścieków*. MIKSCH K. (red.). Skrypt Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- CZYŻYK F., KOZDRAŚ M., 2003. *Wpływ nawożenia traw kompostem z osadów ściekowych na skład chemiczny odcieków z gleby*. Zeszyty Problemo-we Postępów Nauk Rolniczych. 494, 85–92.
- GARDINER D. T., MILLER R. W., BADAMCHIAN B., AZZARI A. S., SISSOND R., 1995. *Effects of repeated sewage sludge applications on plant accumulation of heavy metals*. Agric. Ecosyst. Environ. 55, 1–6.
- GLEESON A. M. 2007. *Phytoextraction of lead from contaminated soil by Panicum virgatum L. (switchgrass) and associated growth responses*. Praca magisterska: Queen's University Kingston, Ontario, Kanada.
- GRZESIK M., ROMANOWSKA-DUDA Z., ANDRZEJCZAK M. E., WOŹNICKI P., WARZECHA D., 2007. *Application of sewage sludge to improve of soil quality by make use of model plant energy*. Acta Physiolog. Plantarum 102 (Suppl.), 65–66.
- GRZESIK M., ROMANOWSKA-DUDA Z., 2008. *Ekologiczna utylizacja osadów ściekowych w produkcji roślin energetycznych*. XIII Konferencja Naukowa Nowe Techniki i Technologie w Rolnictwie Zrównoważonym. 13–14.03.2008 Kielce, 33.

- GRZESIK M., ROMANOWSKA-DUDA Z. B., PIOTROWSKI K., 2009a. *The effect of potential change in climatic conditions on the development of the energy willow (Salix viminalis) plants*. Proceedings of the 2nd International Conference on Environmental Management, Engineering, Planning and Economics (CEMEPE) and SECOTOX Conference, Mykonos. KUNGOLOS A., ARAVOSSIS K., KARAGIANNIDIS A., SAMARAS P. (red.), 4, 1877–1882.
- GRZESIK M., ROMANOWSKA-DUDA Z. B., 2009b. *New Technologies of the energy plant production in the predicted climate changed conditions*. Bulet. Djerżawnowo Nikitskowo Bot. Sada. Ukrainka Akademia Agrarnych Nauk, 99, 65–68.
- GRZESIK M., ROMANOWSKA-DUDA Z. B., 2009c. *Adaptacja upraw roślin energetycznych do przewidywanych zmian klimatycznych*. I Kongres Nauk Rolniczych „Nauka Praktyce” Przyszłość sektora rolno-spożywczego i obszarów wiejskich. 14–15.05.2009. Puławy. Materiały Konferencyjne, 69–70.
- GRZESIK M., ROMANOWSKA-DUDA Z. B., 2009d. *The effect of potential climatic changes, Cyanobacteria, Biojodis and Asahi SL on development of the Virginia fanpetals (Sida hermaphrodita) plants*. Pamiętniki Puławskie 151, 483–491.
- HENDRIKS A. T. W. M., ZEEMAN G., 2009. *Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass*. Bioresource Technol. 100, 10–18.
- JADVIKA, SANTOSH, SREEKRISHNAN T. R., KOHLI S., RANA V., 2004. *Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques – a review*. Bioresource Technol. 95, 1–10.
- JANOSZ-RAJCZYK M., 2004. *Wybrane procesy jednostkowe w inżynierii środowiska*. Wydanie 3. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa.
- JĘDRZAK A., HAZIAK K., 2005. *Określenie wymagań dla kompostowania i innych metod biologicznego przetwarzania odpadów*. Pracownice Badawcze - Projektowe, Ekosystem. Sp. z o.o.
- KACPRZAK A., KRZYSZEK L., LEDAKOWICZ S., 2010. *Badania biochemicznego potencjału metanogenego wybranych roślin energetycznych*. Inżynieria i Aparatura Chemiczna 4, 32–33.
- KOMOROWICZ M., WRÓBLEWSKA H., PAWŁOWSKI J. 2009. *Skład chemiczny i właściwości energetyczne biomasy z wybranych surowców odnawialnych*. Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych 40, 402–410.
- KRZYWY E., IŻEWSKA A., 2004. *Gospodarka ściekami i osadami ściekowymi*. Wydawnictwo Akademii Rolniczej w Szczecinie, Szczecin, 186.
- KUMAR P., BARRETT D. M., DELWICHE M. J., STROEVE P., 2009. *Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and bio-fuel production*. Industr. Engine. Chem. Res. 48, 3713–3729.
- LASTELLA G., TESTA C., CORNACCHIA G., NOTORNICOLA M., VOLTASIO F., SHARMA V. K., 2002. *Anaerobic digestion of semi-solid organic waste: Biogas production and its purification*. Energy Conserv. Manag. 43, 63–75.
- LEDAKOWICZ S., KRZYSZEK L., 2005. *Wykorzystanie fermentacji metanowej w utylizacji odpadów przemysłu rolno-spożywczego*. Biotechnologia 3, 165–183.
- MAĆKOWIAK Cz., 2001. *Wartość nawozowa osadów ściekowych Inżynieria Ekologiczna Przyrodnicze użytkowanie osadów ściekowych*. Ochrona i rekultywacja gruntów, Bydgoszcz 3, 135–145.
- MAJTKOWSKA G., MAJTKOWSKI W. 2005. *Trawy źródłem energii*. [W:] *Trawy i rośliny motylkowate*. IHAR-Agroserwis, 94–97.
- MCINTOSH S., VANCOT T., 2010. *Enhanced enzyme saccharification of Sorghum bicolor straw using dilute alkali pretreatment*. Bioresource Technol. 101, 6718–6727.
- MICHALSKA K., 2011. *Budowa chemiczna roślin energetycznych*. W opracowaniu.
- MIKSCH K., 2000. *Biotechnologia ścieków*. Skrypt Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- MOSIER N., WYMAN C., DALE B., ELANDER R. T., LEE Y. Y., HOLTZAPPLE M., LADISCH M., 2005. *Features of promising Technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass*. Bioresource Technol. 96, 673–686.
- NEWMAN L. A., REYNOLDS C. M. 2004. *Phytodegradation of organic compounds*. Curr. Opin. Biotechnol. 15, 225–230.
- OLESKIEWICZ J., 1998. *Gospodarka osadami ściekowymi – poradnik decydenta*. Wyd. LEM s.c., Kraków.
- ONISZK-POPLAWSKA A., OWSIK M., WIŚNIEWSKI G., 2003. *Produkcja i wykorzystanie biogazu rolniczego*. Gdańsk-Warszawa.
- PISKIER T. J. 2006. *Topinambur – roślina o wielokierunkowym wykorzystaniu*. Czysta Energia 8, 15.
- PLANQUART P., BONINB G., PRONE A., MASSIANI C., 1999. *Distribution, movement and plant availability of trace metals in soils amended with sewage sludge composts: application to low metal loadings*. Sci. Total Environ. 241, 161–179.
- PURWIN C., 2008. *Kukurydza uniwersalne źródło energii*. UWM Olsztyn, <http://www.portalhodowcy.pl>.
- ROMANOWSKA-DUDA Z., GRZESIK M., WOŹNICKI P., ANDRZEJCZAK M., WARZECHA D., 2007. *Influence of various algal species on sunflower (Helianthus L.) seed germination and development*. Acta Physiol. Plantarum Suppl., 103.
- ROMANOWSKA-DUDA Z. B., GRZESIK M., 2008. *Zastosowanie pomiarów biometrycznych roślin w monitorowaniu środowiska i produkcji biomasy do celów energetycznych*. [W:] *Ekotoksykologia w Ochronie Środowiska*. KOŁWZAN B., GRABASA K. (red.) Wyd. PZITS, 327–334.
- ROMANOWSKA-DUDA Z. B., GRZESIK M., PIOTROWSKI K., 2009. *Ecological utilization of sewage sludge in production of Virginia fanpetals (Sida hermaphrodita Rusby) biomass as the source of renewable energy*. Proceedings of the 2nd International Conference on Environmental Management, Engineering, Planning and Economics (CEMEPE) and SECOTOX Conference, Mykonos. KUNGOLOS A., ARAVOSSIS K., KARAGIANNIDIS A., SAMARAS P. (red.), GRAFIMA Publ. D. Gounari, 3, 1261–1266.
- ROMANOWSKA-DUDA Z. B., GRZESIK M. 2010a. *Dynamics of the metabolism in energy willow plants using sewage sludge*. 20 th International Conference on Plant Growth Substances, Tarragona, Hiszpania. PS 14–07, 136.
- ROMANOWSKA-DUDA Z. B., GRZESIK M., 2010b. *Stimulation effect of sewage sludge and Cyanobacteria on development and metabolic activity of energy plants*. Am. Soc. Plant Biol. & Canadian Soc. Plant Physiol. Plant Biol., Montreal, Kanada, 530.
- ROSENWILKEN K. H., 1999. *Anaerobic treatment of slaughterhouse residues in municipal digesters*. Water Sci. Technol. 40, 101–111.
- SANDERSON M. A., ADLER P. R., 2008. *Perennial Forages as Second Generation Bioenergy Crops*. Int. J. Mol. Sci. 9, 768–788.
- SCHINK B., 2002. *Anaerobic Digestion: Concepts, Limits and Perspectives*. Water Sci. Technol. 45, 1–8.
- SØRENSEN A., TELLER P. J., HILSTRØM T., AHRING B. K., 2008. *Hydrolysis of Miscanthus for bioethanol production using dilute acid presoaking combined with wet explosion pre-treatment and en-*

- zymatic treatment. *Biores. Technol.* 99, 6602–6607.
- SZCZUKOWSKI S., TWORKOWSKI J., KWIATKOWSKI J., 1998. *Możliwości wykorzystania biomasy Salix sp. pozyskiwanej z gruntów ornych jako ekologicznego paliwa oraz surowca do produkcji celulozy i płyt wiórowych.* *Postępy Nauk Rolniczych* 2, 53–63.
- THEMELIS N. J., 2002. *Anaerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid wastes.* Columbia University.
- WYMAN C. E., DALE B. E., ELANDER R. T., HOLTZAPPLE M., LADISCH M., LEE Y. Y., 2005. *Coordinated development of leading biomass pretreatment technologies.* *Biores. Technol.* 96, 1959–1966.
- ZAWADZKA A., IMBIEROWICZ M. i współaut., 2010. *Inwestowanie w energetykę odnawialną.* PAN, Oddział w Łodzi, Komisja Ochrony Środowiska, Łódź, 169–184.

