

Rośliny energetyczne jako cenny surowiec do produkcji biogazu

17-06-2011

1. Wprowadzenie

Przełom XX i XXI wieku 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 metod skierowanych na zwiększenie udziału odnawialnych źródeł energii w technologiach pozyskiwania energii w skali globalnej. Jednym z wielu takich niekonwencjonalnych źródeł energii, mogącym znaleźć zastosowanie w licznych procesach produkcyjnych i komunalnych, jest energia zgromadzona w biomase zielonej. Pierwotnym źródłem energii jest Słońce, a energia słoneczna w wyniku fotosyntezy zamieniana jest w energię chemiczną, skumulowana w postaci węglowodanów w biomase. Olbrzymie zainteresowanie tym surowcem i jego potencjał zaowocowało wydaniem w dniu 10.01.2007 roku przez Komisję Europejską komunikatu „Strategia 3x20” zakładającego zwiększenie udziału energii odnawialnej o 20%, głównie poprzez rozwój technologii energetycznego wykorzystania biomasy. W tym też celu od kilkunastu lat na całym świecie zakładane są plantacje roślin energetycznych.

2. 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 [21]. 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. Nierozgałęziony biopolimer 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 wymienić należy:

- zgazowanie;
- estryfikację;
- pirolizę;
- fermentację metanową.

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

3. Rośliny energetyczne

Rośliny energetyczne, których plantacje coraz chętniej zakładane są również w Polsce, mogą być wykorzystywane do wytwarzania paliw ciekłych i gazowych (bioetanol, biogaz), a także do produkcji energii cieplnej oraz elektrycznej. Podstawowe grupy, na które dzieli się rośliny energetyczne, przedstawiają się następująco [22]:

- rośliny uprawne roczne (zboża, rzepak, kukurydza, trzcina cukrowa, sorgo);
- rośliny drzewiaste szybkiej rotacji (wierzba, topola, osika, eukaliptus);
- wieloletnie, szybko rosnące, corocznie plonujące trawy (mozga trzcinowata, miskant);
- wolno rosnące gatunki drzewiaste (ślazowiec pensylwański).

W porównaniu do innych grup zaliczanych do biomasy, rośliny energetyczne charakteryzują się większym ciepłem spalania (Tabela 1). Wykorzystane w technologiach fermentacji metanowej prowadzą do zwiększenia wydajności produkcji biogazu i udziału metanu w biogazie (Tabela 2).

Tabela 1: Wartość energetyczna biomasy [23]

Biopaliwo	Ciepło spalania [MJ/kg]
Zrębki	6 – 16
Palety	16.5-17.5
Słoma szara	15.2
Słoma żółta	14.3
Kora	18.5-20
Drewno kawałkowe	11-12
Wierzba wiciowa	16.7
Ślazowiec pensylwański	13
Miskant olbrzymi	17

Niewątpliwą zaletą roślin energetycznych są ich niewielkie wymagania glebowe i znaczna odporność na szkodniki czy choroby. Charakteryzują się także dużym przyrostem rocznym. Uprawa takich roślin umożliwi zagospodarowanie nieużytków rolnych bądź terenów zdegradowanych. Istotną cechą tych surowców jest zdolność akumulacji zanieczyszczeń w ich własnym systemie korzeniowym, a tym samym rekultywacji obszarów porolniczych. Metale ciężkie takie jak: chrom, nikiel, rtęć, ołów i arsen, zgromadzone w korzeniach roślin, nie przenikają do produktów spalania [22].

Tabela 2: Wydajność produkcji biogazu z najważniejszych surowców pochodzenia rolniczego [6]. W nawiasach podano wartości typowe.

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
łęty ziemniaka	(87)	(0.55)	(75)

Uprawy roślin energetycznych mogą być użytkowane przez okres od 15 do 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 wyjałowienia gleby.

Spośród wielu gatunków roślin energetycznych w Polsce dość dużym zainteresowaniem cieszą się miskant oraz ślazier, a od niedawna sorgo. Poniżej przedstawiono ich krótką charakterystykę.

3.1 Miskant olbrzymi (*Miscanthus giganteus*).

Miskant 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. *Miscanthus giganteus* 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 350 cm. Błazki liściowe *Miscanthusa* 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 gleby. Miskant olbrzymi jest rośliną typu C-4 fotosyntezy (zawiera kwas czterowęglowy), przez co charakteryzuje go większa absorpcja CO₂. Wzrasta bardzo szybko, jest wyjątkowo odporny na niskie temperatury i cechuje się wysokim plonem z jednostki powierzchni: do 25t/ha. Wartość opałowa *Miscanthusa* wynosi od 14 do 17 MJ/kg. Ze względu na długowieczność raz założonej plantacji (15-20 lat) jak i dużą produktywność biomasy uznawany jest za bardzo cenne alternatywne źródło energii [17,20,24,25]. W tabeli 3 zestawiono najważniejsze parametry fizyko-chemiczne charakteryzujące rośliny z gatunku *Miscanthus giganteus*. Rysunek 1 przedstawia miskanta olbrzymiego przed i po obróbce mechanicznej.

Tabela 3: Charakterystyka fizyko-chemiczna miskanta olbrzymiego.

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



Rys. 1: *Miscanthus giganteus* a) przed obróbką mechaniczną; b) po obróbce mechanicznej.

Źródło dla: a) <http://www.developmentandtransition.net/Single-Article-Issue.118+M5a0386f8c21.0.html> [26.03.2011]; b) źródło własne.

3.2 Ślazowiec pensylwański (*Sida hermaphrodita*)

Ślazowiec 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. *Sida hermaphrodita* to roślina wieloletnia, o corocznie zamierających i odrastających pędach. Posiada dłoniasto klapowane, skrętoległe, ogonkowe liście, które osadzone są na łodydze. Pędy Sidy mogą osiągać wysokość nawet do 4 m, a ich średnica dochodzi do 35 mm. Ślazowiec pensylwański jest mało wymagający pod względem klimatycznym i glebowym. 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 oscylują w granicach od 20 do 25 t/ha. Wartość opałowa Sidy wynosi około 15 MJ/kg [20,25]. W tabeli 4 zestawiono najważniejsze parametry fizyko-chemiczne charakteryzujące rośliny z gatunku *Sida hermaphrodita*. Rysunek 2 przedstawia ślazowca pensylwańskiego przed i po obróbce mechanicznej.

Tabela 4: Charakterystyka fizyko-chemiczna ślazowca pensylwańskiego.

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]	57 843
----------------------------	--------



Rys. 2: *Sida hermaphrodita* a) przed obróbką mechaniczną; b) po obróbce mechanicznej.
 Źródło dla: a) <http://www.zelazkow.fr.pl/forum/thread.php?postid=122> [26.03.2011]; b) źródło własne.

3.3 Sorgo (*Sorghum Moensch*)

Sorgo należy do rodziny wiechlinowatych. To jeden z najważniejszych gatunków zbożowych. Jest bliskim krewniakiem kukurydzy; obie rośliny należą do rodziny prosowatych, stąd wiele cech mają podobnych, zarówno odnośnie wyglądu, fizjologii rozwoju jak i kierunków użytkowania. *Sorghum* – 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 uśpiania. Podobnie jak *Miscanthus* – sorgo cechuje się wydajną fotosyntezą, przebiegającą szlakiem C-4. Pozwala to na duży przyrost biomasy w warunkach ciepłego lata i przy dostatecznej ilości wody. Jest to roślina mało wymagająca i łatwa w uprawie. Plony biomasy wynoszą około 15 - 18 t/ha, a wartość opałowa około 15 MJ/kg [11,26,27]. W tabeli 5 zestawiono najważniejsze parametry fizyko-chemiczne charakteryzujące rośliny z gatunku *Sorghum Moensch*. Rysunek 3 przedstawia sorgo przed i po obróbce mechanicznej.

Tabela 5: Charakterystyka fizyko-chemiczna sorgo.

Parametr	<i>Sorghum Moensch</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



Rys. 3: Sorghum Moensch a) przed obróbką mechaniczną ; b) po obróbce mechanicznej.
 Źródło dla: a) <http://www.unitedcats.com/et/forum/230/5/murgised-taimed/40> [26.03.2011]; b) źródło własne.

3.4 Topinambur (*Helianthus tuberosus*)

Słonecznik bulwiasty (*Helianthus tuberosus*) - potocznie zwany jest topinamburem. Należy on do rodziny astrowatych (*Asteraceae*). W Ameryce Północnej występuje dziko, ale uprawiany jest w Chinach, Australii, Rosji, Ameryce Północnej, Indiach, Afryce Środkowej. W Polsce rozmnaża się tylko wegetatywnie, ponieważ nasiona nie dojrzewają przed nastaniem przymrozków. Rośliny te wytwarzają podziemne rozłogi, na końcach których wyrastają bulwy, które mają nieregularne kształty. Wysokość roślin waha się od 2 do 4 m. Topinambur najczęściej uprawia się poza płodozmianem przez kilka lat na tym samym polu, dlatego konieczne jest tzw. odnawianie plantacji. Topinambur wykazuje wiele istotnych cech z punktu widzenia wykorzystania energetycznego. Podstawowe cechy tej rośliny to m.in.

- wysoki potencjał plonowania,
- niska wilgotność uzyskiwana w sposób naturalny (bez konieczności energochłonnego suszenia),
- możliwość pozyskania zarówno części nadziemnych, jak i podziemnych organów spichrzowych [28].

Słonecznik bulwiasty jest rośliną, która w przyszłości odegrać może 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, sporządzanych np. z trocin, odpadów drzewnych, biomasy wierzby, ślazuca czy właśnie topinamburu). Potencjał energetyczny topinamburu przedstawiony jest w tabeli 6.

Tabela 6: Potencjał energetyczny topinamburu [28]

Rodzaj plonu	Wielkość plonu (t/ha)	Wykorzystanie plonu	Wielkość produkcji
Zielonka (trzy pokosy)	100	Produkcja biogazu	53°500 m ³
Słoma	50	Spalanie	900·GJ
Bulwa	25	Etanol	2°600·dm ³

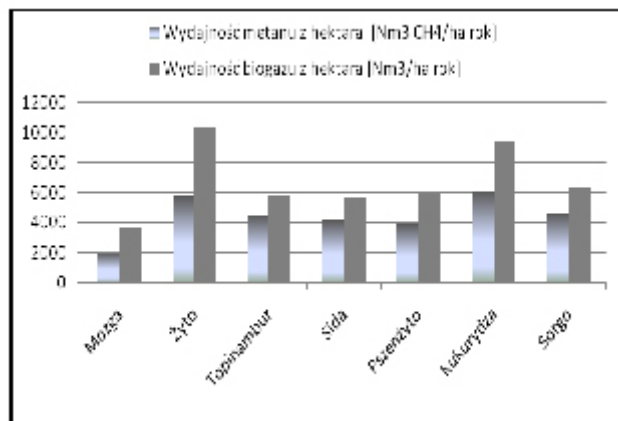
4. Potencjał metanogeny

Potencjał metanogeny (BMP-Biochemical Methane Potential) to analiza strawności danego substratu. Dzięki niej można dokonać oceny potencjalnych substratów i optymalizacji fermentacji beztlenowej.

Celem badania jest zmierzenie ilości i zbadanie jakości biogazu, jaki można otrzymać w wyniku okresowej fermentacji metanowej badanego surowca.

Badanie polega na umieszczeniu w bioreaktorze odpowiednio przygotowanej porcji surowca wraz z 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 [29].

Znając plon danej rośliny energetycznej można obliczyć prawdopodobną ilość wytworzonego biogazu i metanu z hektara. Rysunek 4 przedstawia przykładowe wartości wydajności biogazu wybranych roślin energetycznych.



Rys. 4: Wydajność biogazu i metanu z hektara [7]

5. Fermentacja beztlenowa

Proces fermentacji beztlenowej jest znany od wieków. W 1936 roku 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 stwierdzono, że proces ten może przebiegać z dobrą wydajnością, nawet przy wyższych zawartościach ciał stałych do 40% [18]. Obecnie fermentacja beztlenowa jest atrakcyjna z uwagi na wzrost zainteresowania odzyskiem energii z odpadów. O dużym zainteresowaniu procesem anaerobowym zdecydowały przede wszystkim jego zalety w porównaniu z metodami tlenowymi. Jako główne, wymienia się:

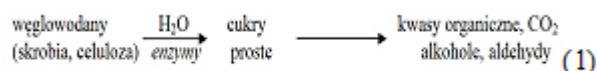
- przekształcanie energii zawartej w płodach rolnych i innych odpadach przemysłu spożywczego w użyteczne paliwo (biogaz);
- recykling odpadów organicznych w stabilne polepszacze gleby, cenny płynny nawóz i energię;
- obniżenie niekorzystnego oddziaływania na środowisko [10];
- oszczędności energetyczne;
- około 6 do 10 razy mniejsza produkcja osadów nadmiernych, które nie tracą swojej biologicznej aktywności nawet po długim okresie przechowywania;
- mniejsze zapotrzebowanie substancji odżywczych;
- możliwość pracy urządzeń przy wysokich obciążeniach hydraulicznych oraz wysokich obciążeniach substancjami organicznymi [12].

Beztlenowy rozkład związków organicznych zachodzi w czterech fazach prowadzonych przy ścisłej współpracy różnych grup bakterii [9,15]. Należą do nich: bakterie hydrolizujące, fermentujące, acetogenne, homoacetogenne, redukujące siarczany i metanogenne. [1,10] 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 prędkościami przemian, warunkami fizyczno-chemicznymi oraz biochemicznymi. Współzależność przemian pokazana jest na rysunku 5 [4,10,16].

5.1 Faza I- Hydroliza

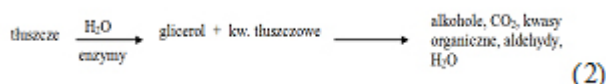
W tej fazie związki organiczne, w większości nierozpuszczalne (białka, węglowodory, tłuszcze) są przetwarzane przy udziale enzymów bakterii hydrolizujących w substancje rozpuszczalne w wodzie. Węglowodory rozkładane są do cukrów prostych, białka do aminokwasów, a tłuszcze do kwasów tłuszczowych [5].

a) Rozkład węglowodanów



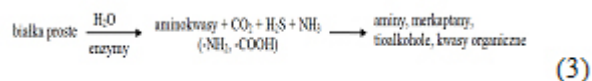
Węglowodany złożone, aby mogły przenikać przez błony komórkowe, rozkładane są do cukrów prostych [2,30].

b) Rozkład tłuszczu



Tłuszcze ulegają rozkładowi do glicerolu i kwasów tłuszczowych [30].

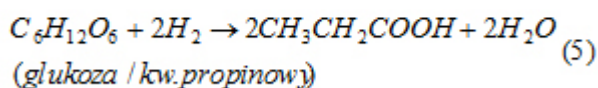
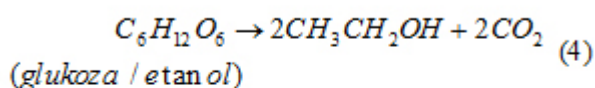
c) Rozkład białek



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 [8,30].

5.2 Faza II acidogenna – kwasogenez

Jest to faza zakwaszania, w której produkty hydrolizy są przetwarzane przez fakultatywne bakterie acidogenne do krótkołańcuchowych kwasów organicznych (mrowkowego, 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 tej fazy zużywają tlen przypadkowo wprowadzony do procesu, stwarzając warunki dogodne dla obligatoryjnych beztlenowców (np. Pseudomonas, Clostridium). Część powstałych podczas kwasogenez produktów staje się źródłem energii i węgla dla bakterii biorących udział w fazie acetogennej. [2,30]



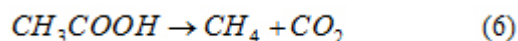
5.3 Faza III acetogenna – octanogenez

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 Desulfotomaculum i Desulfotomaculum, które redukują siarczany. Rozkład kwasów tłuszczowych, alkoholi oraz kwasów organicznych powoduje uwolnienie się wodoru, który działa niekorzystnie na bakterie tej fazy [2,30].

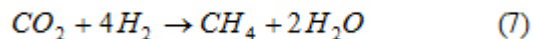
5.4 Faza IV – Metanogenez

W fazie tej z kwasu octowego lub z wodoru i ditlenku 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 ditlenku węgla. Z badań wynika, że w czasie fermentacji metanowej z kwasu octowego powstaje ok. 70% metanu, a ok. 30% z wodoru i ditlenku węgla [4,30].

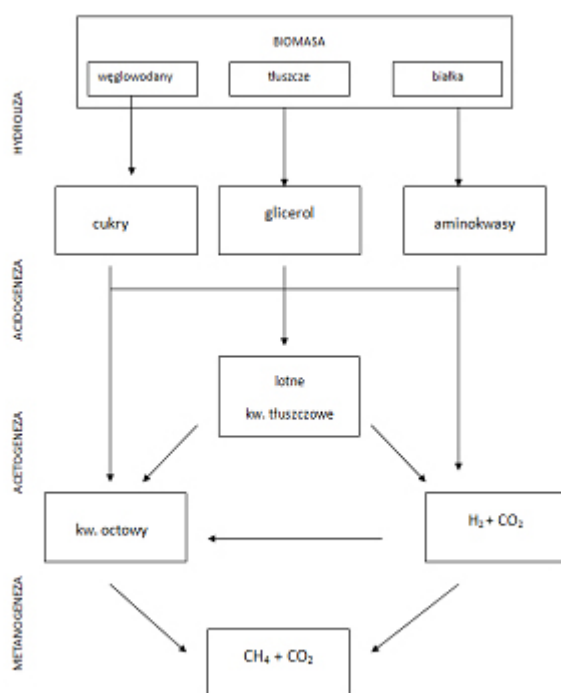
a) powstawanie metanu z kwasu octowego [11]



b) powstawanie metanu z wodoru i ditlenku węgla [11]



W procesie zrównoważonym produkty pierwszych dwóch grup drobnoustrojów są zużywane przez trzecią grupę i wytwarzają metan oraz CO₂. Tylko 20-30% węgla przechodzi do produktów pośrednich zanim zostanie przekształcone w metan i dwutlenek węgla [8]. 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 [2].



Rys. 5: Uproszczony schemat procesu fermentacji metanowej

6. 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 ogromnym wpływie na pozostałe etapy fermentacji i jej wydajność końcową, hydroliza uznawana jest za krok limitujący i podnoszący koszt całej technologii. Stąd też, od kilku lat prowadzone są

liczne badania nad usprawnieniem tego kluczowego etapu. 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 [3,4,8,14,19]. Mimo wzrastającego zainteresowania tym etapem w dalszym ciągu nie jest jednak jasne, które właściwości biomasy roślinnej najsilniej wpływają na jego wydajność [3,19].

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 alkaliami, ale oprócz nich równie obiecująco przedstawiane są następujące metody [3,4, 13]:

- hydroliza za pomocą ultradźwięków;
- hydroliza termiczna (tzw. steam explosion lub liquid hot water);
- oddziaływanie utleniaczami (H₂O₂, kwas nadoctowy),
- 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.

7. 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 [6].

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:

- 1) osadów powstających podczas aerobowego oczyszczania ścieków miejskich,
- 2) odpadów rolnych (gnojowicy),
- 3) ścieków z przemysłu spożywczego, fermentacyjnego, z biomasy,
- 4) przerobu organicznej frakcji stałych odpadów komunalnych [10].

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, przerabiających odpady rolne i z zakładów, zajmujących się produkcją spożywczą, jest na razie ledwie 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 [31].

Najwyższy standard technologiczny prezentują biogazownie w Danii i Niemczech, gdzie istnieje wiele małych, średnich i dużych obiektów. Ponadto pod koniec lat 80-tych 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.

7. 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) [14]. 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. przewiduje wzrost udziału energii pierwotnej ze źródeł energii odnawialnej w bilansie kraju do poziomu 7,5% w 2010r., brak jest programu wykonawczego dla poszczególnych technologii z określeniem celu ilościowego i sposobów jego osiągnięcia [14]. Dla porównania w Danii od roku 1988 wdrożono trzy programy rozwoju sektora biogazowego. Korzyści ekonomiczne promujące budowę biogazowni rolniczych w ramach programów obejmowały: przyznanie dotacji w wysokości 20-40% kosztów inwestycyjnych na budowę wszystkich biogazowni zcentralizowanych oraz 30% na budowę biogazowni indywidualnych, zwolnienie energii elektrycznej i ciepła z podatków energetycznych, dotowanie wyprodukowanej energii oraz udzielenie długoterminowych, nisko oprocentowanych kredytów na budowę instalacji. W efekcie ich realizacji, powstało 20 dużych scentralizowanych biogazowni oraz 45 indywidualnych [14].

Budowa instalacji biogazowych przetwarzających biomasę ważna 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.

Jednym z priorytetów VI Programu Ramowego Unii Europejskiej było obniżenie zużycia energii przez podwojenie udziału surowców odnawialnych z 6 do 12% do roku 2010 na rynku energetycznym. Przewiduje się, że wykorzystanie procesów biotechnologicznych wpłynie korzystnie na poprawę bilansu energetycznego kraju, jak również znacząco zmniejszy zanieczyszczenie środowiska naturalnego [10].

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.

Bibliografia:

- [1] Chynoweth D.P., Owens J.M., Legrand R.. Renewable methane from anaerobic digestion of biomass. *Renewable Energy*, 2001, 22, 1-8.
- [2] Czerska B., Grabińska-Sota E., Kalka J., Surmacz-Górska J. Praca zbiorowa pod redakcją Korneliusza Mikscha, *Biotechnologia Ścieków*, Gliwice, 2000.
- [3] Hendriks A.T.W.M., Zeeman G. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 2009, 100, 10-18.
- [4] Jadvika, Santosh, Sreekrishnan T.R., Kohli S., Rana V. Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques – a review. *Bioresource Technology*, 2004, 95, 1-10.
- [5] Janosz-Rajczyk M. Wybrane procesy jednostkowe w inżynierii środowiska, Wydanie trzecie poprawione, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 2004.
- [6] Jędrzak A., Haziak K. Określenie wymagań dla kompostowania i innych metod biologicznego przetwarzania odpadów. Pracownie Badawczo - Projektowe, Ekosystem. Sp. z o.o., 2005.
- [7] Kacprzak A., Krzystek L., Ledakowicz S. Badania biochemicznego potencjału metanogenego wybranych roślin energetycznych. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 2010, 4, 32-33.
- [8] Kumar P., Barrett D.M., Delwiche M.J., Stroeve P. Methods for Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Efficient Hydrolysis and Biofuel Production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2009, 48, 3713-3729.
- [9] Lastella G., Testa C., Cornacchia G., Notornicola M., Voltasio F., Sharma V. K. Anaerobic digestion of semi-solid organic waste: Biogas production and its purification. *Energy Conservation & Management*, 2002, 43, 63-75.
- [10] Ledakowicz S., Krzystek L. Wykorzystanie fermentacji metanowej w utylizacji odpadów przemysłu rolno-spożywczego. *Biotechnologia*, 2005, 3 (70) 165-183
- [11] McIntosh S., Vancov T. Enhanced enzyme saccharification of Sorghum bicolor straw using dilute alkali pretreatment. *Bioresource Technology*, 2010, 101, 6718-6727.
- [12] Miksch K. *Biotechnologia Ścieków*. WPS, Gliwice, 2000.
- [13] Mosier N., Wyman C., Dale B., Elander R.T., Lee Y.Y., Holtzapple M., Ladisch M. Features of promising Technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 2005, 96, 673-686.
- [14] Oniszk-Popławska A., Owsik M., Wiśniewski G. Produkcja i wykorzystanie biogazu rolniczego. Gdańsk-Warszawa, 2003.
- [15] Rosenwinkel K. H. Anaerobic treatment of slaughterhouse residues in municipal digesters. *Water Science Technology*, 1999, 40, 101-111.
- [16] Schink B. *Water Science Technology*, 2005, 45 (10), 1-8.
- [17] Sørensen A., Teller P.J., Hilstrøm T., Ahring B.K. Hydrolysis of Miscanthus for bioethanol production using dilute acid presoaking combined with wet explosion pre-treatment and enzymatic treatment. *Bioresource Technology*, 2008, 99, 6602-6607.
- [18] Themelis N. J. Anaerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid wastes. Columbia University, 2002.
- [19] Wyman C.E., Dale B.E., Elander R.T., Holtzapple M., Ladisch M., Lee Y.Y. Coordinated development of leading biomass pretreatment technologies. *Bioresource Technology*, 2005, 96, 1959-1966.
- [20] Zawadzka A., Imbierowicz M. i inni. Inwestowanie w Energetykę Odnawialną, PAN, Oddział w Łodzi, Komisja Ochrony Środowiska, 169-184, 2010.
- [21] Dyrektywa 2001/77/WE
- [22] <http://www.biomasa.org/index.php?d=artykul&kat=50&art=46> [25.03.2011]
- [23] <http://www.biomasa.org/index.php?d=artykul&kat=51&art=47> [25.03.2011]
- [24] <http://www.miskant.eu/miskant.html> [25.03.2011]
- [25] <http://www.polskiklubekologiczny.org/biomasa/doc/MAJTKOWSKI.pdf> [25.03.2011]
- [26] <http://www.modr.mazowsze.pl/porady-dla-rolnikow/produkcja-roslinna/203-sorgo-alternatywa-na-susze.html> [25.03.2011]
- [27] <http://www.oodr.pl/pdf/prezentacja-biomasa.pdf> [25.03.2011]

- [28] http://www.sosnowica.pl/download/Bilans_energetyczny.pdf [21.03.2010]
- [29] <http://www.biogaz.com.pl/index.php/laboratorium/badania> [21.03.2011]
- [30] http://www.paiz.gov.pl/prawo/sektorowe_regulacje_prawne/ [23.03.2011]
- [31] <http://instalacje2b.pl/wydarzenia/gospodarka/3855-coraz-wiecej-biogazowni-w-polsce> [23.03.2011].