

Wykorzystanie substratów pochodzenia rolniczego w biogazowniach w Polsce*

Janusz Gołaszewski

*Centrum Badań Energii Odnawialnej,
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie
ul. M. Oczapowskiego 8, 10-719 Olsztyn
janusz.golaszewski@uwm.edu.pl*

Słowa kluczowe: biomasa, biogazownia, biogaz rolniczy, substrat do produkcji biogazu, uprawy energetyczne, proces technologiczny produkcji biogazu, parametry fermentacji metanowej

Wprowadzenie

Sektor rolniczy jest znaczącym emitentem gazów cieplarnianych (GHG – greenhouse gas). Stopień emisji GHG przez rolnictwo jest wypadkową produkcji rolniczej i przetwórstwa rolniczego, wytwarzania środków produkcji oraz zmiany ekosystemów wynikających przede wszystkim z przekształcania terenów leśnych i użytków zielonych na grunty orne, głównie pod uprawę roślin energetycznych. Szacuje się, że w skali świata rolnictwo odpowiada za 14% emisji gazów cieplarnianych, przy czym ich struktura różni się znacznie od struktury gazów cieplarnianych emitowanych przez inne sektory gospodarki [16]. Przede wszystkim emisja ditlenku węgla (CO_2) jest na niskim poziomie, dominują zaś gazy powodujące relatywnie poważniejsze konsekwencje środowiskowe, takie jak metan (CH_4) i tlenki azotu (NO_x). Przykładowo, obornik składowany na przyzmie emituje metan, który degraduje się w atmosferze przez 8–12 lat i jako gaz cieplarniany jest 21-krotnie bardziej destrukcyjny niż tlenek węgla; z kolei obornik przetworzony na biogaz i wykorzystany jako biopaliwo może mieć ujemny udział CO_2 w emisji GHG [6, 35].

Wśród głównych rolniczych źródeł emisji GHG wymienić należy:

- stosowanie nawozów mineralnych, które zwiększają efekt naturalnych procesów nityfikacji i denityfikacji w glebie i uwalniania tlenków azotu (NO_x);
- inwentarz żywy (CH_4);
- rozkład anaerobowy masy organicznej w glebach o dużym uwilgotnieniu (CH_4);
- przechowywanie (składowanie) odpadów zwierzęcych (CH_4);

- spalanie biomasy rolniczej (GHG);
- produkcja środków produkcji i działania rolnicze w zakresie zwiększenia powierzchni upraw energetycznych, np. deforestacja (GHG).

Ograniczenie emisji gazów cieplarnianych i przeciwdziałanie zmianom klimatycznym poprzez produkcję i wykorzystanie biopaliw jest nadrzędnym celem programów zrównoważonego rozwoju rolnictwa w Polsce, UE i na świecie. W tym kontekście, polityczne wsparcie dla rozwoju technologii produkcji biogazu w biogazowniach rolniczych wydaje się być naturalnym posunięciem, albowiem produkcja biogazu jest korzystniejsza dla środowiska aniżeli jej zaniechanie (swoisty przymus środowiskowy). Biogazownia rolnicza rozwiązuje nie tylko problem emisji metanu uwalnianego z biomasy ale umożliwiała zagospodarowanie (utyлизację) wszelkiej biomasy odpadowej i jej konwersję do użytecznej i przyjaznej środowisku energii oraz nawozu rolniczego. Ponadto, lokalne biogazownie rolnicze o różnej mocy, w tym produkujące nadwyżki energii do sieci energetycznej lub metanu do sieci gazowej, mogą stać się istotnymi ogniwami zdecentralizowanego systemu produkcji energii.

Historia wykorzystania procesów gnilnych materii organicznej do wytwarzania biogazu i jego energetycznego lub paliwowego wykorzystania nie jest nowa i sięga czasów starożytnej Persji. Przyjmuje się, że pierwszą biogazownię utylizującą odpady leprozorium wybudowano w Indiach (Bombaj) w 1859 r.; kolejna zbudowana w Anglii (Exeter) w 1895 r. produkowała biogaz na potrzeby oświetlenia ulic, pierwsze zaś wykorzystanie biogazu jako paliwa transportowego miało miejsce podczas II wojny światowej [9]. Współczesna biogazownia jest niczym innym jak innowacyjną adaptacją naturalnego mechanizmu degradacji materii organicznej przez mikroorganizmy w przyspieszonym procesie anaerobowej fermentacji do biogazu w zamkniętym cyklu pobierania i emisji CO₂. O ile tradycyjnie biogaz pozyskiwano i pozyskuje się nadal z odchodów zwierzęcych, wysypisk śmieci i osadów ściekowych, o tyle dzisiaj teoretycznie każdy rodzaj biomasy zielonej oraz zdrewniałej, a także organiczne pozostałości i odpady przetwórstwa rolno-spożywczego i biopaliwowego, rośliny energetyczne z produkcji dedykowanej, organizmy wodne i pozostałości leśne, mogą stanowić substrat biogazowni.

W krajach Unii Europejskiej przeciętna produkcja biogazu wynosi 12 ton na 1000 mieszkańców (Eurobserv'ER 2008). Najwięcej biogazu produkuje się w Niemczech (29), Wielkiej Brytanii (27), Luksemburgu (21), Danii (18) i Austrii (17), przy czym struktura substratów biogazowni i ukierunkowanie produkcji biogazu w poszczególnych krajach UE może znacznie się różnić. Niemcy i Austria postawiły na produkcję biogazu głównie na bazie substratu pozyskiwanego z produkcji rolniczej. W Wielkiej Brytanii, Włoszech i Hiszpanii dominuje biogaz z wysypisk, a we Francji i Czechach znaczący jest udział biogazu pozyskiwanego z osadów ściekowych. W komercyjnym zużyciu biogazu dominuje produkcja energii elektrycznej, wytwarzanej głównie w kogeneracji (ok. 60% produkcji energii elektrycznej z biogazu), ale warto także odnotować programy systematycznego rozwoju technologii włącza-

nia biogazu do sieci gazowej (Niemcy – zakłada się 10% udziału biometanu w sieci gazowej do 2030 r.) oraz wykorzystanie biogazu w transporcie (Szwecja – obecnie ok. 20%). Na tle wymienionych krajów produkcja biogazu w Polsce jest marginalna i kształtuje się na poziomie około 2 toe na 1000 mieszkańców, przy czym dominuje produkcja biogazu wysypiskowego i z osadów ściekowych. Jednakże, polska „rzeczywistość biogazowa” w ciągu najbliższych kilku lat powinna zmienić się diametralnie za sprawą implementowanego programu rozwoju biogazowni na substraty pochodzenia rolniczego, który zakłada, że obok już istniejących kilku biogazowni rolniczych powstanie około 2 tys. nowych instalacji. W maju 2009 roku Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi proklamowało program rozwoju biogazowni rolniczych, opracowany na podstawie wielu materiałów źródłowych, w tym głównie założeń programu „Innowacyjna Energetyka – Innowacyjne Rolnictwo” [26]. W ślad za tym dokonują się istotne zmiany legislacyjne w polskim prawodawstwie, w tym w prawie energetycznym i rozporządzeniach, w zakresie:

- prawnych przesłanek umożliwiających dostarczenie biogazu do sieci dystrybucyjnych oraz nałożenia na operatorów sieci obowiązku zakupu biogazu lub wytwarzanej z niego energii elektrycznej lub ciepłej;
- wprowadzenia świadectwa pochodzenia dla biogazu rolniczego;
- ustawy o odpadach;
- ustawy o nawozach i nawożeniu;
- Rozporządzenia Ministra Środowiska – objęcie podmiotów posiadających małe instalacje biogazowe możliwością uczestnictwa w handlu emisjami;
- Polskiej Klasyfikacji Działalności – objęcie działalności produkcji biogazu;
- ustawy o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym określającym, że biogazownie i siłownie biogazowe są inwestycjami celu publicznego.

Zgodnie z założeniami programu rozwoju biogazowni rolniczych [39] przez biogazownię rozumie się zespół obiektów, urządzeń i instalacji służących do wytwarzania biogazu, a przez siłownię biogazową – biogazownię wyposażoną w urządzenia do produkcji energii elektrycznej i ciepłej z wytworzonego biogazu. W kontekście regulacji prawnych [27a, 27b] pojęcia biomasy oraz biogazu rolniczego przyjmują następujące brzmienie.

Biomasa – stałe lub ciekłe substancje pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, które ulegają biodegradacji, pochodzące z produktów, odpadów i pozostałości z produkcji rolnej oraz leśnej, a także przemysłu przetwarzającego ich produkty, a także części pozostałych odpadów, które ulegają biodegradacji, oraz ziarna zbóż niespełniające wymagań jakościowych dla zbóż w zakupie interwencyjnym określonych w art. 4 rozporządzenia Komisji (WE nr 687/2008 z dnia 18 lipca 2008 r.) ustanawiającego procedury przejęcia zbóż przez agencje płatnicze lub agencje interwencyjne oraz metody analizy do oznaczania jakości zbóż (Dz. Urz. UW L 192 z 19.07.2008, str. 20) i ziarna zbóż, które nie podlegają zakupowi interwencyjnemu.

Biogaz rolniczy – paliwo gazowe otrzymywane z surowców rolniczych, produktów ubocznych rolnictwa, płynnych lub stałych odchodów zwierzęcych, produktów ubocznych lub pozostałości przemysłu rolno-spożywczego lub biomasy leśnej w procesie fermentacji metanowej (Nowelizacja Ustawy Prawo Energetyczne, art. 3 pt. 20a.).

W niniejszej pracy podjęto dyskusję nad uwarunkowaniami technologicznymi produkcji biogazu rolniczego, w aspekcie środowiskowym, ekonomicznym, społecznym i prawnym instalacji biogazowych w Polsce; oraz perspektywami rozwoju biogazowni rolniczych.

Obieg biogazu

Podstawowym budulcem organizmów roślinnych i zwierzęcych jest węgiel organiczny. W strukturze pierwiastków biomasy dominują atomy azotu, węgla, wodoru, tlenu, fosforu i siarki stanowiąc łączenie 96% materii organicznej. Masa organiczna roślin jest budowana w złożonym procesie fotosyntezy, który w istocie przetwarza energię słoneczną w energię chemiczną zakumulowaną w związkach węgla. Proces ten dokonuje się w mitochondriach – swoistych siłowniach komórek roślinnych. Substratami procesu fotosyntezy są woda, CO₂ asymilowany z powietrza oraz składniki mineralne pobierane z gleby, produktem zaś – organiczne związki węgla i tlen. Część wytworzonej energii rośliny wykorzystują na własne potrzeby w procesie respiracji (zachodzi w ciemności i polega na pobieraniu tlenu i wydzielaniu dwutlenku węgla) i transpiracji roślin. Proces fotosyntezy roślin może wykorzystać 25% energii słonecznej, z czego 20% zużywa na procesy metaboliczne, 5% zaś zostaje zamienione na energię zakumulowaną w związkach chemicznych [40].

Po zakończeniu rozwoju wegetatywnego i generatywnego rośliny obumierają a bakterie anaerobowe (beztlenowe) w swoim naturalnym procesie metabolicznym odżywiając się masą resztek roślinnych (głównie celulozy) wytwarzają biogaz, w tym m.in. molekuły metanu (CH₄). Zatem biogaz, zwany także gazem błotnym lub gnilnym, powstaje naturalnie w procesie biodegradacji materii organicznej, wytworzonej w procesie fotosyntezy, przebiegającej w warunkach beztlenowych. Obieg metanu jest istotnym elementem biogeochemicznego obiegu węgla w środowisku, którego ostatnim ogniwem jest metanogeneza prowadzona przez bakterie metanowe.

W skali świata, każdego roku do atmosfery uwalnia się około 800 mln ton metanu, w tym 90% pochodzi z dekompozycji biomasy, a pozostałe ilości metanu powstają w procesach przeróbki paliw kopalnych. Naturalnym źródłem metanu jest gaz naturalny znajdujący się w złożach podziemnych (podwodnych) zawierający 85% metanu lub gaz błotny (gnilny) wydzielany na bagnach i grzęzawiskach, który oprócz metanu może także zawierać znaczne ilości etanu (5–16%) i wodoru (8%). Część metanu uwięziona jest w wiecznej zmarzlinie stref polarnych i stopniowo uwalniana wraz z ocieplaniem klimatu [17].

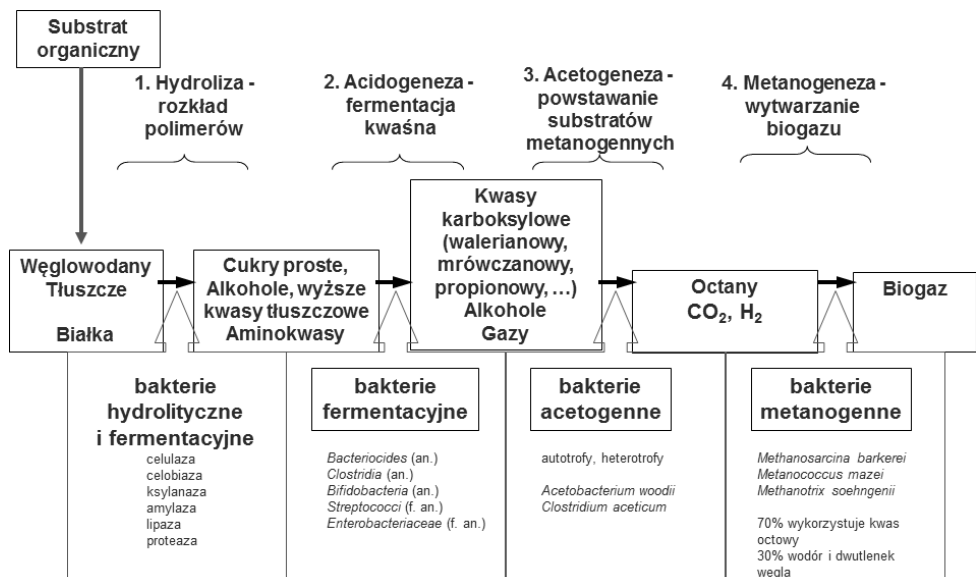
Biogaz jest mieszaniną gazów, w tym metanu 50–75%, ditlenku węgla 25–50%, wodoru 0–1%, azotu 0–10%, tlenu 0–2%, oraz związków siarki (0–3%) [37]. W zależności od materii organicznej i przebiegu procesu fermentacji biogaz może zawierać znaczne ilości wodoru i tlenu węgla. O wartości opałowej biogazu stanowi zawartość metanu (i/lub wodoru). Wartość kaloryczna¹ biogazu wynosi 18–26 MJ · m⁻³ (średnio ok. 6 kWh · m⁻³), co odpowiada kaloryczności ok. 0,6 litra oleju napędowego lub 1,3 kg drewna. Z technicznego punktu widzenia w biogazowni problem może stanowić znajdujący się w biogazie ditlenek węgla, siarkowodor (korozja części metalowych) i para wodna (skraplanie w rurociągach), które w produkcji biometanu muszą być wyeliminowane. W niektórych przypadkach biogaz może zawierać siloksyany, które powstają w warunkach degradacji anaerobowej związków chemicznych występujących powszechnie w mydłach i detergentach. Związki te charakteryzują się wysoką reaktywnością chemiczną, co może prowadzić do reakcji powodujących wytworzenie palnych i wybuchowych gazów.

Proces fermentacji

Wytwarzanie biogazu z biomasy przebiega w czterech etapach: hydroliza, acidogeneza, acetogeneza i metanogeneza (rys. 1). Proces prowadzą różne grupy mikroorganizmów, częściowo wzajemnie powiązane, wykazujące odrębność wymagań odnośnie do warunków środowiska bytowania [3].

Pierwszy etap jest to hydroliza złożonych polimerów do związków prostszych: polisacharydy są rozkładane do cukrów prostych, lipidy do alkoholi i wyższych kwasów tłuszczowych, a białka do aminokwasów. Etap hydrolizy prowadzą bakterie hydrolityczne uwalniające enzymy: celulazę, celobiozę, ksylanazę, amylazę, lipazę i protezę. Suárez-Quiñones i in. [31] na podstawie aktualnie stosowanych technologii procesów hydrolizy w biogazowniach wymieniają 17 specyficznych enzymów wykorzystywanych do rozkładu celulozy, ksylanu, ścian komórkowych, kutykuli, pektynu i glikoprotein. Jednak wciąż nie rozpoznane procesy mikrobiologiczne tej fazy fermentacji są aktualnie przedmiotem intensywnych prac badawczych. W drugim etapie – acidogenezie, powstają głównie octany, wodór i lotne kwasy tłuszczowe. Potrzebny tlen bakterie uzyskują z rozszczepiania innych związków oraz wody, wskutek czego uwalniany zostaje wodór. Produktami rozkładu są także gazy: ditlenek węgla i niewielkie ilości metanu i siarkowodoru. W procesie fermentacji kwaśnej rozkładane są głównie węglowodany, a nie związki azotowe. Przy rozwijającej się

¹ Wartość energetyczna jest jednym z podstawowych parametrów termofizycznych biopaliw stałych. Waha się od 6–8 MJ · kg⁻¹ dla biomasy o wilgotności 50–60% do 15–17 MJ · kg⁻¹ dla biomasy podsuszonej, której wilgotność wynosi 10–20%, aż do 19 MJ · kg⁻¹ dla biomasy całkowicie wysuszonej.



Rysunek 1. Etapy procesu fermentacji metanowej.

później fermentacji metanowej rozkładane są również związki azotowe, a przejściowym produktem tego rozkładu jest amoniak. Większość bakterii zaangażowanych na tym etapie to anaeroby: *Bacteriocides*, *Clostridia*, *Bifidobacteria* oraz anaeroby fakultatywne *Streptococci* i *Enterobacteriaceae*. W acetogenezie powstaje octan produkowany przez bakterie heterotroficzne z glukozy oraz przez bakterie autotroficzne z ditlenku węgla i wodoru. Nie do końca poznana jest aktywność acetobakterii (bakterii octowych) *Acetobacterium woodii* i *Clostridium aceticum* produkujących wodór, jak i swoista sztafeta mikrobiologiczna całego procesu fermentacji. Według sugestii Bagi i in. [4] duże ilości wodoru mogą być czynnikiem limitującym rozwój metanogenów. W końcowym etapie procesu fermentacyjnego – metanogenezie, dwie grupy anaerobowych metanogenów (*Methanosarcina barkerei*, *Metanococcus mazei*, *Methanotrix soehngeni*) produkują metan z octanu lub ditlenek węgla i wodór [21]. Oprócz wymienionych gatunków bakterii metanowych jest wiele innych, które mimo podobnych właściwości fizjologicznych różnią się morfologicznie: pałeczki, kuliste (ziarenkowce), spiralne (śrubowce). Rodzina *Methanobacteriaceae* na podstawie różnic cytologicznych dzieli się na 4 rodzaje [1]: bakterie pałeczkowate *Methanobacterium* nie wytwarzające spor i *Methanobacillus* wytwarzające spory, bakterie sferyczne *Methanosarcina* tworzące klastry i *Methanococcus* nie tworzące klastrów. Na potrzeby własnych procesów metabolicznych 70% poznanych metanogenów wykorzystuje kwas octowy, 30% zaś wodór i ditlenek węgla. Metanogeny preferują ściśle określone środowisko rozwoju, w związku z czym są wrażliwe na zmiany warunków bytowania. Wszystkie etapy degradacji substancji organicznej są wzajemnie powiązane, tzn. metabolity działalności jednej grupy reducentów stano-

wią żywkę dla następnej grupy. Jednocześnie, podobnie jak w klasycznym łańcuchu pokarmowych jedna grupa bakterii może oddziaływać hamująco na inną. Generalnie, procesy metaboliczne poszczególnych faz fermentacji są znane, jednak jest wiele niewiadomych związanych ze specyficzną rolą poszczególnych mikroorganizmów. Wiele badań wykorzystuje w tym celu techniki molekularne, w tym do detekcji i kwantyfikacji metanogenów wraz z jednoczesną oceną w próbach różnych substratów [18, 30].

Mikroorganizmy prowadzące proces fermentacji w warunkach acidofilnych i obojętnych względem pH mogą mieć podobne wymagania odnośnie do środowiska ich działalności, zatem naturalny może być także podział procesu fermentacji na dwie fazy fermentację kwaśną i metanową, które mogą być rozdzielone w procesie technologicznym produkcji biogazu. Zrównoważenie tych faz jest nadrzędne, bowiem zbyt szybka hydroliza może prowadzić do koncentracji kwasów i obniżenia pH poniżej 7,0, co z kolei ogranicza działalność metanogenów, i analogicznie jeśli faza fermentacji metanowej przebiega zbyt szybko, to może być limitowana wolnym przebiegiem hydrolizy. W tym kontekście istotny jest także czas generacji mikroorganizmów, który w pierwszych trzech etapach może wynosić kilkanaście minut przy degradacji związków łatwo rozpuszczalnych (węglowodany) i kilku dni przy degradacji celulozy, białka i tłuszczów, podczas gdy czas generacji bakterii metanogennych może wynosić kilkadziesiąt do kilkuset godzin.

Fizyczne i biochemiczne uwarunkowania produkcji biogazu

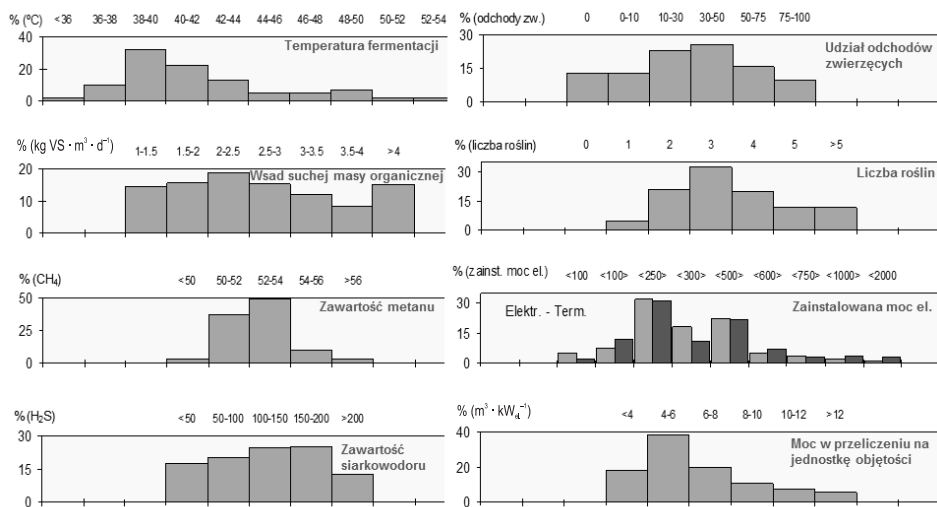
Zaprojektowanie procesu fermentacji w biogazowni wymaga zrównoważenia fazy kwaśnej i metanowej z punktu widzenia aktywności biologicznej mikroflory i jest ściśle uzależnione od właściwości substratów i kosubstratów (dodatków innej biomasy). Wśród wyjściowych założeń projektowych biogazowni wymienić należy: liczbę etapów procesu technologicznego powiązanych z etapami fermentacji (jeden, dwa, wiele etapów), temperaturę procesu technologicznego: fermentacja psychrofilowa 10–25°C, mezofilowa 32–38°C, termofilowa 52–55°C; zawartość suchej masy substratu: fermentacja mokra < 15% (dopóki istnieje możliwość przepompowania) i sucha > 15% suchej masy substratu oraz sposób napełniania substratem: wsadowy, quasi-ciągły, ciągły.

W przypadku fermentacji jednoetapowej cały proces przebiega w jednym zbiorniku. Technologię fermentacji dwuetapowej, polegającej na rozdzieleniu fazy kwaśnej od metanowej, stosuje się wówczas gdy substrat charakteryzuje duża dysproporcja przebiegu fazy kwaśnej i metanowej (substrat łatwo fermentujący lub wysokoenergetyczny). Przykładowo, proces fermentacji wywaru gorzelniczego lub ścieków z przemysłu skrobiowego charakteryzuje się dużą szybkością fazy kwaśnej i powinien być rozdzielony od fazy metanowej. Technologia dwuetapowa, generalnie bardziej zaawansowana w kontrolowaniu i monitorowaniu parametrów procesu, jest

najczęściej stosowana w fermentacji odpadów komunalnych i przemysłowych oraz obornika, a sporadycznie w fermentacji biomasy roślin [35]. W tym przypadku oddzielenie etapu hydrolizy od fermentacji metanowej uzasadnia różnica optymalnego pH 5,5–6,5 dla hydrolizy i 6,8–7,2 dla metanogenezy.

Utrzymanie stałej temperatury podczas procesu fermentacji jest warunkiem stabilnego rozwoju mikroorganizmów i produkcji biogazu. Zdecydowana większość biogazowni pracuje w technologii mezofilowej, co wynika m.in. z możliwości większego zróżnicowania metanogenów, szybszej adaptacji mikroflory przy niewielkich wahaniami temperatury $\pm 3^{\circ}\text{C}$ i mniejszej ilości uwalnianego amoniaku aniżeli w technologii termofilowej [21]. W określonych sytuacjach jest uzasadnione różnicowanie temperatur w poszczególnych fazach. Sucha masa substratu determinuje technologie fermentacji suchą i moką, a jednocześnie sposób napełniania reaktora, przy czym w praktyce najczęściej stosuje się fermentację moką i napełnianie ciągle. Analiza danych technicznych dotyczących 63 niemieckich biogazowni rolniczych powstałych w latach 2006–2009 wskazuje na szerokie spektrum stosowanych rozwiązań w zakresie wielu parametrów technologicznych, a jednocześnie największa liczba zastosowań określa pewien ustalający się standard poziomu parametrów (rys.2) [22].

Istotnym elementem właściwego przebiegu fazy metanowej jest restrykcyjne utrzymanie odczynu pH w dość wąskim przedziale 7–8 oraz dostępność makro- i mikroelementów. Proces może być destabilizowany lub zahamowany w warunkach zwiększonej ilości amoniaku z rozkładu białek (pH rośnie) lub nagromadzenia lotnych kwasów tłuszczowych (pH maleje). Weilant [35] analizując znaczenie składników odżywczych w procesie anaerobowej konwersji biomasy podaje, że dla zabez-



Rysunek 2. Wybrane parametry technologiczne 63 biogazowni niemieckich. Źródło: opracowanie własne na podstawie: Bundesmessprogramm, 2009 (FNR) [za Linke 22]

pieczenia stabilnego przebiegu procesu wskaźnik składników odżywczych C:N:P:S powinien pozostawać w relacji 600:15:5:1, a wskaźnik materiału organicznego ChZT:N:P:S w stosunku 800:5:1:0,5² [13]

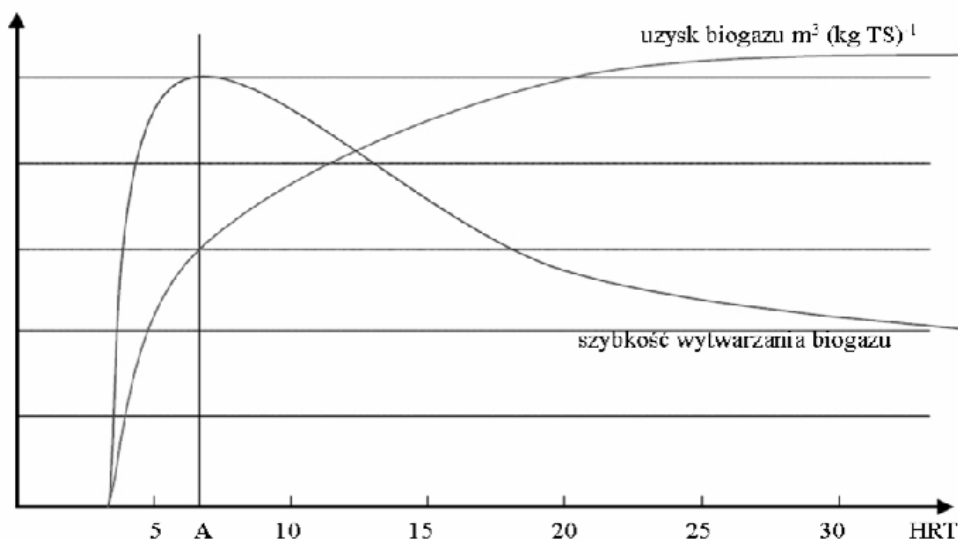
Jednakże, kluczowy dla optymalnego przebiegu fermentacji anaerobowej jest stosunek C:N utrzymywany w przedziale 15:1–30:1, będący jednocześnie praktycznym kryterium decyzyjnym w bilansie doboru substratów [41]. Generalnie, odchody zwierzęce (obornik, gnojowica) są bogate w azot, który stymuluje namnażanie i rozwój bakterii, biomasa roślin zaś (trawa, kukurydza) jest bogata w węglowodany, które z kolei determinują ilość biogazu. Jeśli w substracie udział azotu jest zbyt wysoki (niski stosunek C:N), to wytwarza się amoniak do stężenia hamującego rozwój metanogenów, jednakże toksyczne działanie amoniaku można kontrolować dodając biomasę bogatą w węgiel lub poprzez zastosowanie większego rozcieńczenia substratu. Z kolei, jeśli w nadmiarze jest węgiel, to potencjał metanogeny mikroorganizmów nie zostanie wykorzystany – bakterie zużyją dostępny azot na swoje potrzeby bytowe, ale nie wykorzystają dostępnego węgla. Niektóre pierwiastki w ilościach śladowych, takie jak żelazo, nikiel, kobalt, selen, molibden i wolfram są niezbędne w rozwoju mikroorganizmów i powinny być dostarczone w substracie. Część z nich jest wykorzystywana przez większość mikroorganizmów w syntezie związków chemicznych (kofaktorów) uczestniczących w procesie metanogenezy (nikiel, kobalt), z kolei inne są specyficzne dla określonych mikroorganizmów. Pierwiastki te w większych stężeniach stają się inhibitorami procesu. Toksyczne dla mikroflory bakteryjnej są także antybiotyki, pestycydy, syntetyczne detergenty oraz rozpuszczalne sole miedzi, cynku, niklu, rtęci i chromu. Z kolei, sole sodu, potasu, wapnia i magnezu w zależności od warunków środowiska rozwoju bakterii mogą wytwarzanie biogazu stymulować lub hamować. Uniwersalnym substratem mającym komplet niezbędnych składników odżywczych, w tym mikroelementów, jest obornik bydłowy, dlatego też w przypadku fermentacji innej biomasy lub kosubstratów obornika szczególnie uzasadnione jest bilansowanie składu chemicznego substratu i uzupełnianie mikroelementów.

Efektywna produkcja biogazu wymaga stężenia substratu w relacji do wody w stosunku 1:1, co odpowiada 8–12% suchej masy i gwarantuje przepompowalność. Sucha masa organiczna (VS – **v**olatile solids), hydrauliczny czas retencji (HRT – **h**draulic **r**etention **t**ime) określający czas pozostawania substratu w bioreaktorze, oraz temperatura procesu są wzajemnie powiązаныmi wyjściowymi technicznymi parametrami projektowania optymalnej wielkości komory reaktora. HRT wyznacza się z ilorazu objętości komory fermentacyjnej (m³) i objętości ładunku obciążenia komory w ciągu doby (m³/doby). Czas retencji zależy od substratu i może wynosić od

² ChZT – Chemiczne Zapotrzebowanie Tlenu – umowne pojęcie oznaczające ilość tlenu [mg · dm⁻³], pobranego z utleniaczy na utlenienie związków organicznych i niektórych nieorganicznych do najwyższego stopnia utlenienia.

kilkunastu dni (gnojowica, burak) do 60 dni (szereg roślin energetycznych). Zawarte w substratach związki chemiczne trudno rozkładalne, takie jak celuloza lub hemiceluloza (ściółka w oborniku, słoma, pozostałości zdrewniałe roślin), wymagają wcześniejszego roztworzenia, a niektóre ze związków, jak lignina, praktycznie nie poddają się procesowi fermentacji. El Shinnawi i in. [14] analizując celulozowe odpady roślinne (łodygi kukurydzy i bawełny, słomę ryżu i hiacyntu wodnego) stwierdzili, że maksymalna efektywność reducentów celulozy przypadła między 10–20 dniem fermentacji, mikroorganizmów fazy acidogenezy zaś około 20 dnia. Największe liczebności reducentów celulozy odnotowano przy fermentowaniu łodyg kukurydzy i bawełny, kwasotwórczych zaś – kukurydzy i hiacyntu wodnego. W fermentorze biomasa powinna być stale mieszana, aby zachować jednorodną konsystencję co gwarantuje utrzymanie jednakowej temperatury, bakterie mają nie utrudniony dostęp do substancji organicznej, a proces fermentacji może przebiegać bez zakłóceń, odgazowywanie jest naturalne i nie tworzy się kożuch. W fazie rozruchu fermentora istotne jest umożliwienie bakteriom szybkiego i stabilnego rozwoju. Do zaszczeplania standardowo stosuje się obornik lub gnojowicę (ale także i osady ściekowe), które mają odpowiednie stężenie wymaganych bakterii.

Fermentor powinien być obciążany stopniowo. Na rysunku 3 przedstawiono relację między szybkością wytwarzania biogazu a uzyskiem biogazu w relacji do średniego hydraulicznego czasu retencji w miarę obciążania fermentora ładunkiem biomasy. Przy mniejszym obciążeniu fermentora otrzymuje się większy uzysk biogazu na jednostkę podanego substratu. Wraz ze wzrostem obciążenia do pewnego progu (punkt A) rośnie aktywność mikrobiologiczna i szybkość wytwarzania biogazu, ale



Rysunek 3. Szybkość wytwarzania biogazu i uzysk biogazu w relacji do średniego hydraulicznego czasu retencji (HRT) [28]

uzysk biogazu przypadający na kolejną jednostkę biomasy jest relatywnie coraz mniejszy. W konsekwencji z powodu wzrastającego obciążenia fermentora bakterie nie rozkładają coraz większej ilości substancji organicznej i w rezultacie maleje szybkość wytwarzania biogazu. W skrajnych przypadkach szybkie obciążenie fermentora lub częsta wymiana biomasy mogą doprowadzić do przerwania wytwarzania biogazu, bowiem w takich przypadkach redukując mikroflorę redukuje się szybkość namnażania bakterii.

Substrat biogazowni rolniczej

Organiczne źródło wytwarzania biogazu jest wyjściowym kryterium umownego podziału biogazowni na komunalne i rolnicze. W biogazowniach komunalnych, gdzie pozyskuje się biogaz wysypiskowy lub ze ścieków i osadów ściekowych, źródłem biomasy są odpady³ [27c] komunalne⁴ [27d]. W biogazowni rolniczej biogaz pozyskuje się z substratu pochodzenia rolniczego. Istotne rozróżnienie między wymienionymi biogazowniami może wynikać z liczby śladowych substancji organicznych, w tym toksycznych, które w produktach biogazowni rolniczej praktycznie nie występują. Jakkolwiek w katalogu odpadów [27e] wymienia się potencjalne rolnicze substraty biogazowni to jednoznaczne stwierdzenie, jaka biomasa i kiedy staje się odpadem jest trudne. Przykładową dualność kwalifikacji mają odchody zwierzęce (obornik, gnojówka, gnojowica), które prawnie klasyfikowane jako odpady są dobrymi i zazwyczaj niezbędnymi substratami każdej biogazowni rolniczej, ale są jednocześnie wartościowymi nawozami organicznymi i w takim rozumieniu podlegają wyłączeniu z ustawy o odpadach (substratem jest nawóz organiczny).

W biogazowni rolniczej każdą substancję organiczną, włączając biomasę celulozową, osady ściekowe i biomasę wysypiskową, można poddać procesowi biodegradacji. Jeśli dodatek biomasy z odpadów komunalnych nie stanowi jedynie kosubstratu zaszczipiającego substrat rolniczy mikroflorą to biogazownia rolnicza poprzez funkcję utylizacyjną zmienia swój status na biogazownię rolniczo-utylizacyjną. Jednakże w biogazowni rolniczej, niektóre cechy biomasy sprawiają, że jest ona szczególnie predysponowana dla określonego typu instalacji. Pomijając naturalną funkcję zagospodarowania odchodów zwierzęcych na fermach, o celowości i skali inwestycji decyduje

³ Odpady oznaczają każdą substancję lub przedmiot należący do jednej z kategorii, określonych w załączniku nr 1 do ustawy o odpadach, których posiadacz pozbywa się, zamierza pozbyć się lub do ich pozbycia się jest obowiązany.

⁴ Odpady komunalne – odpady powstające w gospodarstwach domowych, z wyłączeniem pojazdów wycofanych z eksploatacji, a także odpady nie zawierające odpadów niebezpiecznych pochodzące od innych wytwórców odpadów, które ze względu na swój charakter lub skład są podobne do odpadów powstających w gospodarstwach domowych.

przede wszystkim lokalna dostępność biomasy, jej wartość energetyczna, łatwość fermentowania, a także możliwości wykorzystania pozostałości pofermentacyjnej.

Uwzględniając źródło pochodzenia substratów biogazowni rolniczej można przyjąć cztery rodzaje biomasy, które mogą być fermentowane w różnych konfiguracjach i według zasady, że nadrzędnym celem jest racjonalne zagospodarowanie pozostałości i odpadów rolniczych:

1. Odpady z pierwotnej produkcji rolniczej: odchody zwierząt gospodarskich (obornik, gnojowica, gnojówka), słoma, liście buraków, trawa, itd.
2. Odpady z przetwórstwa rolno-spożywczego: otręby, melasa, wysłodziny browarniane, wywar pogorzelniany, serwatka, itd.
3. Odpady organiczne pochodzenia rolniczego: bioodpady z gospodarstw domowych, resztki żywności, zużyte tłuszcze i oleje roślinne, itd.
4. Surowce roślinne z upraw dedykowanych, w tym rośliny jednoroczne: kukurydza, sorgo, burak, itd. oraz rośliny wieloletnie: miskant cukrowy, ślázowiec, rośliny motylkowate i ich mieszanki z trawami, itd.

Tabela 1. Wydajność biogazu wybranych substratów biogazowni rolniczej (źródło: opracowanie własne na podstawie Linke [22])

Biomasa	Sucha masa (SM ²) [% SM ¹]	Suchą masą organiczną (SMO ³) [% SM]	Wydajność biogazu [m ³ (Mg SMO) ⁻¹]
Odchody zwierzęce – obornik			
Bydło	8	80	410
Trzoda chlewna	8	70	420
Drób	70	77	560
Odchody zwierzęce – gnojowica			
Bydło	10	93	225
Trzoda chlewna	6	95	300
Drób	15	89	320
Surowce i pozostałości przemysłu rolno-spożywczego			
Melasa	73	78	510
Burak cukrowy (korzeń)	22	90	840
Pulpa ziemniaczana	14	93	720
Uprawy dedykowane			
Kukurydza (kiszonka)	35	97	730
Trawa (kiszonka)	35	91	540
Żyto (kiszonka)	33	93	730

¹ ŚM – świeża masa substratu podawana do fermentora – określa tzw. uzysk biogazu [m³ (Mg ŚM)⁻¹].

² SM – sucha masa jest równa różnicy świeżej masy i wody odparowanej w 105°C, wyrażana w procentach świeżej masy (ang. TS – total solids).

³ SMO – sucha masa organiczna (uzyskiwana w temperaturze 550°C) jest najważniejszym parametrem opisującym substrat wyrażany w procentach suchej masy (ang. VS – volatile solids) – określa tzw. wydajność biogazu [m³ Mg VS]

Wymienione źródła biomasy charakteryzują się różną wydajnością i jakością biogazu w zależności od składu chemicznego fermentowanych związków organicznych, a także wielu czynników fizycznych i chemicznych charakteryzujących środowisko fermentacji. Wszystkie substraty biogazowni powinny być wolne od patogenów i w zależności od występujących typów patogenów poddawane przed fermentacją procesom pasteryzacji w temperaturze 70°C lub sterylizacji w temperaturze 130°C. Jest to o tyle istotne, że teoretycznie nawet mezofilowy proces fermentacji powinien efektywnie zniszczyć większość patogenów, w tym jelitowe patogeny bakteryjne i wirusy (99,9%) w odchodach zwierząt, ale w odniesieniu do czynników chorobotwórczych z grupy endopasożytów odsetek zneutralizowanych patogenów wynosi tylko 90% [5].

W składzie chemicznym biomasy występują w różnych proporcjach trzy grupy związków organicznych – łatwo fermentujące węglowodany (wydajność ok. 0,4 m³ CH₄ kg⁻¹), oraz wymagające dłuższego okresu rozkładu bardziej skoncentrowane energetycznie białko i tłuszcz (odpowiednio ok. 0,5 i 0,7 m³ CH₄ kg⁻¹). Przeciętne wartości składu chemicznego oraz wydajności metanu wybranych substratów biogazowni rolniczej przedstawiono w tabeli 1.

W przypadku substancji organicznej zawierającej polisacharydy, takie jak celuloza i hemiceluloza, szybkość fermentacji metanowej limituje wolno przebiegająca hydroliza, zatem dla synchronizacji faz i przyspieszenia fermentacji istotne jest wcześniejsze zhydrolizowanie substratu.

Uprawy dedykowane

Dedykowane uprawy energetyczne obejmują gatunki roślin celowo wprowadzane do struktury zasiewów, na ugory i grunty marginalne, których plon użytkowy zabezpiecza określony poziom produkcji bioenergii lub biopaliw. Historia wykorzystania roślin z upraw dedykowanych jako substratu lub kosubstratu w produkcji biogazu jest właśnie pisana. Subwencje państwowe do prac badawczo-rozwojowych w zakresie alternatywnych technologii wytwarzania energii spowodowały w ostatnim dziesięcioleciu swoisty boom biogazowy w krajach północnoeuropejskich, takich jak Niemcy, Dania, Austria i Holandia. Właśnie w tych krajach zaczęto przeorientowywanie produkcji biogazu z odchodów zwierzęcych na systematycznie wzrastający udział roślin energetycznych, aż do technologii, w których biomasa roślin jest wyłącznym substratem zaszczepianym mikroflorą odchodów zwierzęcych lub osadów ściekowych. Przeprowadzone badania potwierdzają, że substrat z roślin energetycznych może wielokrotnie zwiększać uzysk metanu [10, 38].

Niezależnie od systemu produkcji roślinnej tradycyjnej, zintegrowanej czy ekologicznej wyznacznikiem opłacalności produkcji, a w rezultacie uzysku biogazu jest plon biomasy z jednostki powierzchni, będący wypadkową potencjału genetycznego rośliny, układu warunków glebowo-klimatycznych, poziomu agrotechniki oraz inter-

akcji tych czynników. Analizując potencjał energetyczny upraw dedykowanych należy uwzględnić dwa pojęcia produktywność i produkcyjność roślin (wolumen biomasy), odnoszące się w pewnym sensie do produkcji biomasy w procesie fotosyntezy i ostatecznie do plonu biomasy.

Produktywność roślin określa tempo wytwarzania i akumulacji suchej masy (tkanek, organów lub całej rośliny po odwodnieniu) w jednostce czasu (doby, sezonu wegetacyjnego, roku) jako rezultat procesów asymilacji węgla (czyli fotosyntezy) i dysymilacji węgla (czyli oddychania mitochondrialnego – ciemniowego lub fotooddychania – fotorespiracji). Jest to pojęcie dynamiczne, odnoszące się do ilości masy wytworzonej przez rośliny występującej na określonej powierzchni w jednostce czasu (np. w $\text{g cm}^{-2} \text{h}^{-1}$). Z kolei termin produkcyjność roślin oznacza ilość biomasy wytworzonej przez rośliny niezależnie od przydatności użytkowej (plon biologiczny i rolniczy). Jest to pojęcie statyczne wyrażone w jednostkach masy (g, kg, Mg). Produktywność roślin silnie różnicuje typ fotosyntezy C3 lub C4. Rośliny typu C4 mają dodatkowy mechanizm wiązania CO_2 poprzez mechanizmy anatomiczne i fizjologiczne, co pozwala na zwiększenie stężenia CO_2 w komórkach. U tych roślin brak jest fazy fotorespiracji i tym samym zredukowane są straty zasymilowanej energii. W efekcie rośliny typu C4 mają szybszą fotosyntezę i większą wydajność biomasy, przy relatywnie małym zapotrzebowaniu na wodę. Większość roślin typu C4 są to rośliny typowe dla regionów świata o klimacie tropikalnym lub subtropikalnym, co nie oznacza, że nie są uprawiane lub introdukowane w innych strefach klimatycznych, jak w Polsce (relatywnie niższe plony). Mimo że ta grupa roślin stanowi niespełna 5% flory świata, to z energetycznego punktu widzenia są roślinami najbardziej pożądanymi, w tym jako substraty biogazowni. Należą do nich kukurydza zwyczajna (*Zea mays* L.), trzcina cukrowa (*Saccharum officinarum* L.), proso zwyczajne (*Panicum miliaceum* L.), sorgo (*Sorghum* MOENCH), szarłat (*Amaranthus caudatus* L.) spartina periwona (*Spartina pectinata* BOSC ex LINK), miskant (cukrowy, chiński, olbrzymi) (*Miscanthus* spp.), proso różgowate (*Panicum virgatum* L.), palczatka Gerarda (*Andropogon gerardi* VITMAN), agawa (*Agave* L.), aloes (*Aloë* L.).

Natężenie procesu fotosyntezy pozostaje w ścisłej relacji ze stężeniem ditlenku węgla w powietrzu, przy czym w optymalnych warunkach świetlnych i temperaturowych natężenie fotosyntezy może wzrastać aż do około 0,1% stężenia CO_2 w powietrzu zarówno u roślin typu C4 jak i C3. W skrajnej sytuacji wyjątkowo niskich stężeń CO_2 w powietrzu procesy respiracji i fotorespiracji mogą wytwarzać więcej CO_2 niż asymilować w fotosyntezie. Fakt ten może uzasadniać jeden z nowych trendów badawczych związanych z intensywną produkcją alg (także jako substrat biogazowni) z odzyskiem CO_2 np. z gazów cieplowniczych.

Pierwszym, naturalnym substratem roślinnym do produkcji biogazu rolniczego była biomasa roślin paszowych (głównie kukurydzy), z tego względu, iż wysoka jest produkcyjność tych roślin oraz znane technologie produkcji i procesy konserwacji przekładają się na wysoki potencjał energetyczny taniego substratu i zapewnienie

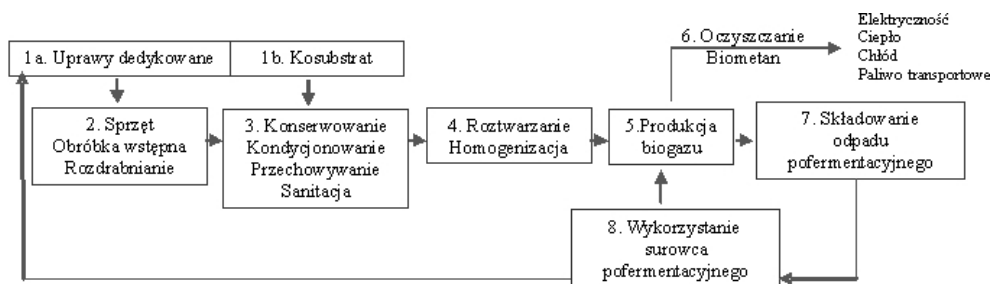
ciągłej podaży substratu do biogazowni. Jakie rośliny, oprócz kukurydzy, są potencjalnymi substratami biogazowni? Po pierwsze trawy, w tym zboża (zielonka, kiszonka), a ponadto te o wysokim potencjale produkcji w naszej strefie klimatycznej: mozga trzcinowata i tymotka. Po drugie, rośliny motylkowate, takie jak koniczyna czy lucerna, także w mieszankach z trawami – są to rośliny, które można zbierać wielokrotnie i przez wiele lat, a także dzięki zdolności do asymilowania azotu z powietrza, redukują konieczność stosowania nawozów obniżając nakłady na produkcję. Po trzecie, rośliny mniej znane i introdukowane, ale o wysokiej produktywności i względnie łatwe w uprawie takie jak kapusta pastewna, słonecznik bulwiasty, rdestowiec sachaliński, miskant, a także pewne formy rzewienia czy pokrzywy. Potencjalny wysokowydajny substrat biogazowni stanowi także ziarno zbóż takich jak pszenica, jęczmień, owies, żyto i sorgo oraz korzenie lub bulwy roślin okopowych – buraka, ziemniaka i topinamburu. Jednakże w większości wymienione rośliny stanowią grupę tzw. surowców strategicznych i powszechniejsze ich wykorzystanie w celach energetycznych może naruszyć bilans produkcji żywności. Dla wybranych substratów z upraw dedykowanych przedstawiono w tabeli 2 uzysk metanu i wydajność energetyczną.

Tabela 2. Przeciętny uzysk metanu i potencjał energetyczny wybranych substratów roślinnych

Roślina	Uzysk metanu [m ³ CH ₄ · ha ⁻¹ · rok ⁻¹]	Wydajność energetyczna [MWh · ha ⁻¹ · rok ⁻¹]
Burak pastewny	5800	56
Kukurydza	5780	56
Trawa (duże wahania)	4060	39
Lucerna	3965	38
Pszenica	2960	28
Koniczyna	2530	25
Kapusta pastewna	2304	24
Ziemniak	2280	22
Jęczmień	2030	20

Proces technologiczny

Technologia produkcji biogazu rolniczego ma charakter modułowy, przy czym każdy moduł biogazowni, począwszy od organizacji produkcji biomasy i logistyki dostaw, roztwarzania biomasy, sanitacji i konserwacji, poprzez proces fermentacyjny, aż po oczyszczanie biogazu i jego wykorzystanie oraz zagospodarowanie masy pofermentacyjnej, może mieć wieloraki wymiar technologiczny. Dlatego też, standaryzacja poszczególnych modułów dokonuje się relatywnie wolno. Z pewnością na obecnym etapie rozwoju biogazowni rynek oferowanych technologii biogazowych, często przestarzałych, determinuje wzorce inwestycyjne i w konsekwencji wysokie



Rysunek 4. Moduły organizacyjne biogazowni na biomasę rolniczą

koszty budowy biogazowni. Dziś na zmonopolizowanym rynku biogazowni o opłacalności produkcji biogazu decyduje przede wszystkim minimalna zainstalowana moc, która w 65% najnowszych zastosowań wynosi 0,25–0,60 MW_{el.} (rys. 2), a w polskim Programie Rozwoju Biogazowni Rolniczych do 2020 r. [39] przyjęto średni poziom mocy 1 MW. Na podstawie doświadczeń niemieckich można wykluczyć rozwój biogazowni w kierunku instalacji wielomegawatowych. Jednocześnie znaczący udział na rynku mogą mieć biogazownie z mikrogeneracją małych mocy, rzędu kilku do kilkudziesięciu kW_{el.}

Przykładowa biogazownia na substrat roślinny z kosubstratami obejmuje kilka modułów organizacyjno-technologicznych (rys.4).

W organizacji produkcji biomasy z upraw dedykowanych istotne są rozważania dotyczące dostępnego arealu gruntów pod uprawę roślin energetycznych z uwzględnieniem żyzności gleb i ochrony środowiska, opracowanie zintegrowanego systemu zmianowania roślin godzącego cele produkcji surowca roślinnego na cele żywnościowe, przemysłowe i energetyczne, wykorzystanie międzyplonów i poplonów, stosowanie wysoko-produktywnych odmian roślin uprawnych, optymalizowanie nawożenia roślin pod kątem wysokiej produkcji metanu, zagospodarowanie pozostałości rolniczych. W przypadku kofermentacji odchodów zwierzęcych lub odpadów przemysłu rolno-spożywczego niezbędne jest zastosowanie higienizacji/sanitacji odpadów zgodnie z procedurą zależną od kategorii (I, II, III) stwarzanego zagrożenia sanitarnego i epizootycznego [27f].

Najczęściej stosowanym sposobem zabezpieczenia ciągłości podaży substratu roślinnego i jednocześnie produkcji biogazu w okresie zimowym jest jego zakiszenie. Kiszenie jest procesem biochemicznym polegającym na rozkładzie cukrów prostych do kwasu mlekowego w procesie kontrolowanej fermentacji mlekowej. Dzięki obniżeniu pH następuje zahamowanie wzrostu organizmów powodujących procesy gnilne. Fermentacja kwasu mlekowego poprzez zainicjowanie degradacji polisacharydów jest także wstępnym etapem kondycjonowania substratu. Czynnikiem decydującym o potencjale fermentacyjnym przechowywanego substratu roślinnego jest faza fenologiczna rozwoju roślin podczas zbioru (tab. 3). Zazwyczaj bardzo szybko fermentują rośliny zbierane we wczesnych fazach, opóźnianie zaś zbioru roślin

sprzyja koncentracji energii, ale może wydłużać proces fermentacji. Generalnie można przyjąć zasadę, że wysoka wartość energetyczna roślinnego surowca paszowego gwarantuje wysoką produktywność biogazu.

Tabela 3. Faza zbioru roślin a uzysk biogazu [20]

Substrat	Faza zbioru roślin	Uzysk biogazu [$\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$]
Kiszonka z traw	kwitnienie	200
	z wszystkich pokosów	180
Kiszonka z kukurydzy	dojrzałość woskowa – wysoki udział ziarna	200
	dojrzałość woskowa – średni udział ziarna	185
	dojrzałość mleczna – średni udział ziarna	155
	kiszonka z całych roślin – średni udział ziarna	200
Jęczmień	kwitnienie	75
	mleczna	130
	woskowa	160
Żyto	kwitnienie	85
	mleczna	115
	woskowa	165
Pszenżyto	kwitnienie	180
	mleczna	150
	woskowa	215

Ciągła podaż biomasy roślinnej może być rozwiązana poprzez utworzenie tzw. zielonej taśmy podaży surowca, obejmującej pewną sekwencję różnej biomasy pozyskiwanej z różnych źródeł, w tym z upraw energetycznych w trakcie wegetacji roślin (różne fazy rozwoju), a w okresie zimowym – wykorzystanie zakiszonego substratu. Przykładem biogazowni rolniczej z zieloną taśmą podaży substratu jest biogazownia zbudowana w technologii DRANCO-FARM w Nüstedt (Niemcy), gdzie sukcesywnie wprowadzanymi substratami biogazowni są: kiszonka z kukurydzy, obornik, kiszonka z żyta, słonecznik i zielonka z żyta [11]. Ponadto, biomasa roślinna może być przechowywana w postaci siana, sianokiszonki (trawa, rośliny motylkowe), biomasy z pras silnego zgniotu, składowane pod wiatą (biomasa o małym uwilgotnieniu) lub w odpowiednich silosach (faza glicerynowa).

Sposób obróbki wstępnej surowca przed poddaniem procesowi fermentacji zależy od składu chemicznego biomasy. W procesie fermentacji metanowej jest problem z obecnością w substracie trudno degradowanych organicznych polimerów. Przykładowo, krystaliczna struktura celulozy ogranicza penetrację mikroorganizmów lub enzymów międzykomórkowych, a w przypadku ligniny długi okres degradacji praktycznie wyklucza ligninę jako substrat biogazowni. Wstępna obróbka ma za zadanie rozbicie łańcuchów polimerowych do prostszych łatwo rozpuszczalnych związków chemicznych. Może być prowadzona mechanicznie, chemicznie lub biologicznie lub też mieszanymi metodami.

Tabela 4. Efekty wstępnej obróbki biomasy [20]

Substrat	Uzysk biometanu $\text{m}^3 \text{CH}_4 \cdot \text{kg}^{-1}$	Zmiana [%]
Mechaniczne rozdrobnienie	0,1–6–10 cm	
Słoma pszenicy	0,25–0,16	35
Sorgo	0,42–0,42	0
Koniczyna	0,20–0,14	23
Trawa	0,35–0,27	30
Owies	0,26–0,25	4
Chemiczne	bez obróbki i po obróbce	
Trawa – NaOH 2% 24 h 20°C	0,23–0,25	9
Trawa – NaOH 2% 72 h 20°C	0,23–0,27	17
Trawa – autoklaw	0,23–0,26	13
Biologiczne (biochemiczne)	bez obróbki i po obróbce	
Trawa – enzymy – 24 h 35°C	0,23–0,27	17
Trawa – grzyby – 21 dni 20°C	0,23–0,24	4
Trawa – kompostowanie	0,23–0,19	–17

Wyjściową, mechaniczną metodą homogenizacji biomasy jest rozdrobnienie materiału w młynie/mieszalniku. Pozwala ono zwiększyć efektywność metanogenezy do 35% w zależności od materiału (tab. 4). Generalnie efekt produkcji biometanu jest tym większy im większe jest rozdrobnienie materiału. Spośród innych metod mechanicznych wymienić należy traktowanie parą wodną, hydrolizę termiczną (nasycona para wodna o wysokiej temperaturze i pod ciśnieniem), mokre utlenianie (utleniaczem jest powietrze), stosowanie ultradźwięków lub promieniowania. Do chemicznego traktowania biomasy można wykorzystywać kwasy, zasady, rozcieńczalniki i oksydanty, a do metod biologicznych można zaliczyć wykorzystanie mikroorganizmów lub enzymów przez nie wytwarzanych. Metody tego typu są relatywnie proste w zastosowaniach, jednakże ich efektywność nie jest zadowalająca. Warto zwrócić uwagę na fakt, że fermentacja kompostowanej trawy jest mniej efektywna aniżeli fermentacja zielonki (tab. 4). Decyzja o wyborze konkretnej metody powinna uwzględniać wymagane nakłady, praktyczność i oddziaływanie środowiskowe jak również straty energii organicznej substratów przed traktowaniem. Elementy te skonfrontowane z ogólną wydajnością biogazowni muszą być zbilansowane.

Zasadniczą instalacją biogazowni jest fermentor (poziomy lub pionowy) składający się z zaizolowanej komory fermentacyjnej, systemu grzewczego, systemu mieszania fermentowanej masy, systemu odprowadzającego odpad pofermentacyjny, systemu odprowadzenia biogazu oraz wielu innych, takich jak system rurociągów, a także wskaźników i mierników parametrów procesu [32]. Podstawowym, stale mierzonym parametrem fermentora, oprócz składu biomasy, odczynu, temperatury, poziomu napełnienia jest skład biogazu i wydajność biometanu, ale kontrolowaniu przebiegu fermentacji służą także pomiary lotnych kwasów tłuszczowych (VFA),

stosunku lotnych kwasów tłuszczowych do zawartości ogólnej węgla nieorganicznego (wskazuje proporcję lotnych kwasów organicznych do alkalicznej pojemności buforowej jako miarę zagrożenia zakwaszenia instalacji biogazowej), wzajemnych relacji między poszczególnymi kwasami karboksylowymi (np. propionowy/octowy, masłowy/izomasłowy), potencjału REDOX⁵ (–300 mV) i zawartości amoniaku.

Liczba fermentorów zależy od rodzaju substratu. W przypadku fermentowania biomasy roślinnej zasadne jest zastosowanie dwóch fermentorów – głównego i dodatkowego prowadzącego odzysk biogazu z przefermentowanej biomasy w fermentorze głównym (rys. 3). Dominujące technologie biogazowni rolniczych prowadzą proces fermentacji mokrej w warunkach mezofilowych. Pomimo że w wyższych temperaturach dokonuje się szybsza degradacja materiału i czas przebywania substratu (HRT) w fermentorze jest krótszy dodatkowy uzysk metanu może nie rekompensować większych nakładów energetycznych, a także z wytwarzania większej ilości amoniaku (toksyczność) i redukcji flory bakteryjnej. Należy jednakże nadmienić, że fermentacja termofilowa oraz sucha są przedmiotem wielu aktualnie prowadzonych badań, co może doprowadzić do zmiany obecnych standardów technologicznych biogazowni.

Generalnie, biomasa roślinna wymaga dłuższego czasu przebywania w reaktorze aniżeli biomasa odpadowa z produkcji zwierzęcej (tab. 5), ale także i w tym przypadku wskaźnik HRT może być mniejszy.

Tabela 5. Wydajność biogazu i czas fermentacji wybranych substratów i kosubstratów roślinnych (źródło: opracowanie własne na podstawie [20, 42])

Substrat	Wydajność biogazu [m ³ kg ⁻¹ SMO]	Czas fermentacji [dni]
Słoma	0,367	78
Liście buraków	0,501	14
Łęty ziemniaczane	0,606	53
Łodygi kukurydzy	0,514	52
Koniczyna czerwona	0,445	28
Trawa	0,557	25
Obornik bydłocy, słoma pszeniczna (50:50)	0,323	15(65)
Obornik świński, łęty ziemniaczane (85:15)	0,357	39(58)

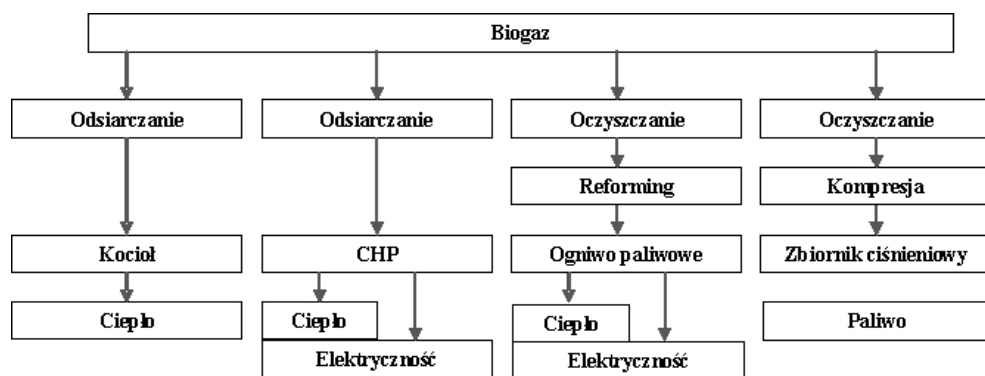
W badaniach Demirela i in. [12] testowano kiszonkę z buraka (bez liści) bez dodatku obornika. Wskaźnik HRT wynosił 25 dni. Zastosowanie substratu z kiszonki buraka wzbogaconego udziałem fosforanów pozwoliło na skrócenie HRT do 15 dni, jednakże taka kompozycja substratu istotnie oddziaływała na strukturę populacji

⁵ W fermentorze wymagany jest niski potencjał redox, przy optimum w przedziale od –300 do –330 mV. W przypadku podwyższenia potencjału substrat należy uzupełnić czynnikami utleniającymi (bez tlenu, siarczanów, azotanów i azotynów).

metanogenów. Autorzy wskazują na celowość uzupełniania tego typu mono-fermentacyjnego substratu czynnikami buforowymi i składnikami odżywczymi, aby zabezpieczyć stabilność procesu. Techniki poprawiające produkcję biogazu stanowią aktualnie przedmiot zainteresowania wielu badaczy. Yadvika i in. [38] dokonali przeglądu różnych technik klasyfikując możliwe podejścia w 4 grupy: wykorzystanie dodatków (roślin, odpadów, szczepów bakterii, związków nieorganicznych), recykling gnojowicy i filtratów gnojowicy, zmiana parametrów procesu (temperatura, HRT, C/N, wielkość cząstek substratu, itd) i wykorzystanie reaktorów biologicznych z immobilizowaną biomasa/biofiltrów. Parawira i in. [25] wykazali celowość współfermentacji takich substratów jak stałe odpady ziemniaczane i liście buraków cukrowych. Mono-fermentacja generowała odpowiednio dla wymienionych substratów 2,1–3,4 kWh CH₄ · kg⁻¹ SMO, podczas gdy współfermentacja umożliwiała uzyskanie większej o 60% wydajności metanu dzięki synergizmowi mikroflory fermentowanej biomasy. Autorzy konkludują, że efektywną konwersję wymienionych substratów zapewniał dwustopniowy proces anaerobowy. Podobnie wysoko efektywne może być współfermentowanie odchodów zwierzęcych z odpadami przemysłu biopaliwowego (faza glicerynowa). Amon i in. [2] wykazali duże zróżnicowanie wydajności metanu 125–166 m³ CH₄ · kg⁻¹ SMO z obornika bydłowego w zależności od systemu produkcji mlecznej. Jednocześnie badając 6% dodatek fazy glicerynowej do obornika świńskiego oraz do mieszanki substratów: kiszonki z kukurydzy (31%), ziarna kukurydzy (15%), obornika świńskiego (54%) uzyskali zwiększenie wydajności metanu odpowiednio o 702 i 110 m³ CH₄ · kg⁻¹ SMO. Podobnie skuteczne było jednoczesne dołączenie do mieszanki podstawowej 6% gliceryny i 10% wytlóków rzepaczanych, skutkujące wyższą o 152 m³ CH₄ · kg⁻¹ SMO.

Załadunek biomasy do fermentora może dokonywać się w cyklach codziennych do tygodniowych lub wsadowo. Prostsza formą jest relatywnie rzadziej stosowany tryb wsadowy polegający na jednorazowym obciążeniu fermentora, następnie uszczelnieniu komory, i po fermentacji – usunięciu odpadu pofermentacyjnego. Mankamentem tego typu technologii jest trudność z eliminowaniem odorów podczas wymiany materiału oraz niestabilna produkcja biogazu zgodnie z krzywą Gaussa. Math-Alvarez J. i in. [23] modelowali mezofilowy dwustopniowy proces anaerobowy przy wsadzie odpadów z rynku owocowo-warzywnego oraz inokulowanym obornikiem świńskim. W pierwszym przypadku proces trwał 33 dni, substrat zaś inokulowany obornikiem osiągnął maksimum produkcji biogazu około 10 dnia fermentacji, i w czasie 3 tygodni proces fermentacji został zakończony. W fermentorach pracujących w trybie ciągłego lub quasi-ciągłego napełniania typowy dzienny wsad biomasy z upraw energetycznych wynosi 2–4 kg SMO na 1 m³ fermentora, przy czym wsad powinien być zbilansowany indywidualnie dla każdego substratu. Jednocześnie z napełnianiem fermentora odpad pofermentacyjny musi być usunięty.

Biogaz, po oczyszczeniu może być wykorzystany jako uniwersalne paliwo we wszelkiego typu instalacjach gazowych (rys. 5). Spośród wielu składników, które muszą być usunięte z biogazu wymienić należy: ditlenek węgla, parę wodną, siarko-



Rysunek 5. Wykorzystanie biogazu (źródło: Weillinger [36])

wodór, siloksany, związki aromatyczne, tlen, azot i fluorowce (chlorki, fluorki, i inne). Jakość biogazu determinuje sposób jego wykorzystania. Zasilanie stacjonarnego kotła nie wymaga wysokiej jakości biogazu; ciśnienie gazu powinno zawierać się w przedziale 8–25 mbar, a ilość siarkowodoru powinna być zredukowana do poziomu poniżej 500 ppm. Z kolei przydatność biogazu do sieciowego wykorzystania z gazem ziemnym wymaga oczyszczenia i minimum 97% zawartości metanu, w przypadku zaś wykorzystania biogazu w wysokotemperaturowych ogniach paliwowych (MCFC⁶, SOFC⁷) nie ma potrzeby usuwania ditlenku węgla. Moc jednostek CHP może zawierać się w szerokich granicach i w zależności od skali wynosić od kilkunastu kW_{el.} do kilku MW_{el.}. Na ten cel mogą być adoptowane silniki diesla wykorzystujące biogaz lub oba rodzaje paliwa. Wydajność energii elektrycznej jednostek CHP może dochodzić do 41%, a ogniów paliwowych do 50% [7, 8]. W niektórych sytuacjach celowe może być zastosowanie mikroturbin z niższą efektywnością produkcji energii elektrycznej rzędu 26–28%.

Oprócz biogazu, końcowym produktem procesu fermentacji jest pozostałość pofermentacyjna, która w sytuacji, gdy spełnia kryteria nawozu organicznego jest wartością dodaną biogazowni rolniczej. W zależności od konsystencji pozostałości jest ona przepompowywana do zbiornika magazynowego lub wypełnia lagunę, gdzie może odbywać się jeszcze wtórna fermentacja (do 20% biogazu) lub też dokonuje się odzysku frakcji stałej, a woda może być ponownie wykorzystana w procesie.

Wśród potencjalnych walorów nawozowych pozostałości pofermentacyjnych wymienić należy:

- możliwość bezpośredniego wykorzystania (obornik wymaga około półrocznej fermentacji);

⁶ Ogniwo paliwowe ze stopionym węglanem, MCFC (ang. Molten Carbonate Fuel Cell).

⁷ Ogniwo paliwowe z zestalonym elektrolitem tlenkowym, SOFC (ang. Solid Oxide Fuel Cell).

- dużą aktywność biologiczną pożytecznej mikroflory przy jednocześnie zneutralizowanym udziale drobnoustrojów patogenicznych, w tym bakterii: *Salmonella*, *Escherichia coli*, *Listeria*, grzybów patogenicznych, wirusów i pasożytów, co sprzyja intensyfikacji procesów mikrobiologicznych i humifikacji gleby;
- utrzymanie wysokiej zawartości azotu amonowego (dłuższe przechowywanie obornika rzutuje niekorzystnie na skład chemiczny, główne straty dotyczą azotu amonowego);
- minimalna zdolność kiełkowania nasion chwastów (1 t obornika zawiera ok. 10 tys. nasion zachowujących zdolność kiełkowania po trawieniu w organizmie zwierzęcia);
- dłuższy rozkład w glebie i lepsze wykorzystanie;
- ekologicznie bezpieczny (nie ma zagrożenia dla wód gruntowych).

W świetle regulacji prawnych w zależności od charakterystyk biologiczno-chemicznych pozostałości pofermentacyjne mogą być traktowane jako odpad, ściek lub nawóz organiczny [29]. Przy traktowaniu pozostałości jako odpadów mogą one podlegać pod metodę odzysku R10 czyli „rozprowadzanie odpadów na powierzchni ziemi w celu nawożenia lub ulepszenia gleby” (Załącznik nr 5 do ustawy o odpadach [27g]). W takim przypadku obowiązują uregulowania m.in. w zakresie: odpad jest wolny od *Clostridium perfringens* (odpady produkcji zwierzęcej); odpowiednia obróbka eliminuje zagrożenie dla ludzi i środowiska; brak bakterii typu *Salmonella*; rozdrobnienie przed zastosowaniem; równomierne stosowanie na glebę (tylko do gł. 30 cm); nie przekraczalne wartości skażenia, np. pestycydami, metalami ciężkimi; nie spowoduje przekroczenia dopuszczalnych zawartości metali ciężkich Cr, Pb, Cd, Hg, Ni, Zn, Cu; oraz analiza odpadów w certyfikowanych laboratoriach. Pozostałość fermentacyjną traktowaną jako ściek reguluje Prawo wodne [27h], a na wykorzystanie niezbędne jest uzyskanie pozwolenia wodnoprawnego, spełnienie norm sanitarnych i dopuszczalnych ilości zanieczyszczeń oraz opracowany plan nawożenia zaopiniowany przez Stację Chemiczno-Rolniczą. Należy dodać, że powyższe kwalifikacje umożliwiają wykorzystanie pozostałości na polach zasilających biogazownię. Pozostałość pofermentacyjna kwalifikowana jako nawóz, z wyłączeniem pozostałości uzyskanych wyłączenie z produktów ubocznych pochodzenia zwierzęcego, może być dystrybuowana, wymaga jednak uzyskania pozwolenia na wprowadzenie do obrotu (art. 2 ust. 1 Ustawy o nawozach i nawożeniu [27f]).

Podsumowanie

Biogazownie rolnicze w Polsce stają się integralnym elementem rozproszonego systemu generacji energii i paliw. Ze środowiskowego, energetycznego i ekonomicznego punktu widzenia inwestowanie w rozwój biogazowni rolniczych jest korzystniejsze niżeli zaniechanie ich rozwoju. Wśród ewidentnych środowiskowych korzyści wymienić należy redukcję emisji gazów cieplarnianych, utylizację odpadów organicznych, neutralizację patogenów, dezaktywację nasion chwastów, produkcję nawozów organicznych, a przez to zmniejszenie zużycia nawozów mineralnych

(dalsza redukcja LCA⁸), ochronę wód gruntowych oraz możliwość ponownego wykorzystania wody z przefiltrowanego odpadu pofermentacyjnego. Z energetycznego punktu widzenia istotna jest produkcja uniwersalnego odnawialnego biopaliwa z biomasy w zdecentralizowanych jednostkach wytwarzania energii oraz implementacja idei prosumenckości (lokalna produkcja i wykorzystanie energii) będąca elementem bezpieczeństwa energetycznego. Ekonomiczny profit biogazowni rolniczej jest wypadkową wyżej wymienionych korzyści. Proces fermentacji metanowej jest wartością dodaną produkcji i przetwórstwa rolniczego, poprzez przekształcanie magazynowanych odpadów w dochodowe centra produkcji energii i uniezależnienie od importu energii. Biogazownia rolnicza pozwala generować zróżnicowane dochody z tytułu zagospodarowania odpadów, emisji świadectw pochodzenia, sprzedaży nawozu organicznego, energii lub biopaliwa.

Mimo że proces fermentacji metanowej jest znany od wieków, wykorzystanie nowych substratów rolniczych otwiera nowe możliwości zwiększenia efektywności biogazowni rolniczych; wymaga jednocześnie rozwiązania wielu niewiadomych tego procesu. Przyszłe rozwiązania stosowane w biogazowni rolniczej powinny umożliwiać elastyczne komponowanie mikroflory do konkretnego substratu, także w kontekście specyficznych organizmów prowadzących proces fermentacji metanowej lub wodorowej. Służyć temu powinna specyfikacja mikroorganizmów zaangażowanych w poszczególne fazy fermentacji oraz zbadanie ich wzajemnych relacji.

Biogazownia rolnicza, mimo różnorodności stosowanych technologii, może być instalacją składającą się z modułów o charakterze organizacyjno-technicznym. Można założyć, że przyszłościowe rozwiązania będą zmierzały w kierunku modularyzacji biogazowni i elastycznego komponowania typoszeregu biogazowni rolniczej w zależności od substratu i planowanej mocy instalacji w skali mikro (kilka do kilkadziesiąt kW), mezo (do 1 MW) i makro (powyżej 1 MW). Duże oczekiwania związane są z mikrogeneracją i powszechnym wykorzystaniem biogazowni w mikroskali, np dla gospodarstw rodzinnych na wzór dostępnych dzisiaj technologii ekologicznego skanalizowania ścieków sanitarnych – mikrooczyszczalni.

Spektrum możliwości pozyskania wielu związków chemicznych z biomasy pochodzenia rolniczego nie zostało jeszcze określone i można założyć, że dalszy rozwój biogazowni rolniczych będzie zmierzał w kierunku zintegrowanej (scentralizowanej) biorafinerii rolniczej [15]. Zbilansowanie substratu organicznego pod kątem maksymalnego wykorzystania, w tym odzysku śladowych ilości nutraceutyków, biodostępnych związków wykorzystanych w dodatkach spożywczych i paszowych, a trudno degradowalnych do produkcji komponentów produktów przemysłowych, może sprawić, że biogazownia będzie składową biorafinerii, a energia lub biopaliwo z biogazowni będą produktami „odpadowymi”, przy tym profity biorafinerii będą wynikały nie z biogazowni, ale przede wszystkim z innych wartościowych produktów biorafinerii.

⁸ LCA – Life Cycle Assessment.

Literatura

- [1] Alexander M. 1961. Introduction to soil microbiology. John Wiley & Sons, Inc. : 227–231.
- [2] Amon Th., Amon B., Kryvoruchko V., Bodiroza V., Pötsch E., Zollitsch W. 2006. Optimising methane yield from anaerobic digestion of manure: Effects of dairy systems and of glycerine supplementation. *International Congress Series* 1293: 217–220.
- [3] Angelidaki I., Ellegaard L., Ahring B.K. 1993. A mathematical model for dynamic simulation of anaerobic digestion of complex substrates focusing on ammonia inhibition. *Biotechnol. Bioeng.* 42: 159–166.
- [4] Bagi Z., Acs N., Balint B., Hovrath L., Perei K.R., Rakhely G., Kovacs K.L. 2007. Biotechnological intensification of biogas production. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 76: 473–482.
- [5] Bioconversion of Organic Residues for Rural Communities. 1979. The United Nations University.
- [6] Biogas as road transport fuel. An assessment of the potential role of biogas as a renewable transport fuel. 2006. National Society for Clean Air and Environmental Protection.
- [7] Biogas Production and Utilisation. IEA Bioenergy: T37:2005:01.
- [8] Biogaz – produkcja i wykorzystanie. Institut für Energetik und Umwelt GmbH.
- [9] Cheremisinoff N.P., Cheremisinoff P.N., Ellerbusch F. 1980. Biomass: applications, technology, and production. New York: M. Dekker, c1980, 221.
- [10] Cseke L.J., Podila G.K., Kirakosyan A., Kaufman P.B. 2009. Plants as Sources of Energy. *Recent Advances in Plant Biotechnology. Part 2*: 165–210.
- [11] De Baere L. Start-up of continuous digestion plant of energy crops. 2007. Mat. Conf. „Renewable resource and biorefineries”, Ghent, Belgium.
- [12] Demirel B., Neumann L., Scherer P. 2008. Microbial community dynamics of a continuous mesophilic anaerobic biogas digester fed with sugar beet silage. *Engineering in Life Sciences* 8(4): 390–398.
- [13] Deublein D., Steinhauser A. 2008. Biogas from waste and renewable resources: an introduction. Wiley VCH.
- [14] El-Shinnawi M.M., Alaa El-Din M.N., El-Shimi S.A., Badawi M.A. 1989. Biogas production from crop residues and aquatic feeds. *Resources, Conservation and Recycling* 3(1): 33–45.
- [15] Gołaszewski J. 2009. Biorafinerie/technologie bioenergetyczne – stan obecny i perspektywy rozwoju. Proceedings of International Conference “Renewable Energy Technologies and Polygeneration”, Poznań: 20–33.
- [16] Gołaszewski J. 2009. Renewables and environmental implications. *Environmental Biotechnology* 5(1): 11–24.
- [17] Gołaszewski J., Olba-Zięty E. 2010. Biogazownia rolnicza – założenia ogólne. Raport z badań – maszynopis.
- [18] Klocke M., Nettmann E., Bergmann I., Mundt K., Soudi K., Mumme J., Linke B. 2008. Characterization of the methanogenic Archaea within two-phase biogas reactor system operated with plant biomass. *Sys. Appl. Microbiol.* 31: 190–205.
- [19] Lapp, H. M.; Schulte, D. D.; Sparling, A. B.; and Buchanan, L. C. 1975. Methane production from animal wastes. I. Fundamental Considerations. *Canadian Agricultural Engineering* 17(2): 97–102.
- [20] Lehtomäki A. 2006. Biogas production from energy crops and crop residues. Jyväskylä University Printing House.
- [21] Leven L., Ericson A.R.B., Schnürer A. 2007. Effects of process temperature on bacterial and archaeal communities in two methanogenic bioreactors treating organic household waste. *FEMS Microbiol. Ecol.* 59: 683–693.
- [22] Linke B. 2009. Biogas plants in Germany – experiences in implementation and processing. Mat. konf. „Bioenergia w rolnictwie ze szczególnym uwzględnieniem biogazu”, Poznań.
- [23] Math-Alvarez J., Vitoria A., Labrés-Luengo P., Cecchi F. 1993. Kinetic and performance study of a batch two-phase anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes. *Biomass and Bioenergy* 5(6): 481–488.
- [24] Nijaguna B.T. 2002. Biogas Technology. New Age International Publishers (p) Ltd. N. Delhi.
- [25] Parawira W., Read J.S., Mattiasson B., Björnsson L. 2008. Energy production from agricultural residues: High methane yields in pilot-scale two-stage anaerobic digestion. *Biomass and Bioenergy* 32(1): 44–50.
- [26] Red. J. Popezyk. Program „Innowacyjna Energetyka – Innowacyjne Rolnictwo”. 2008. Sygnatariusze: Stowarzyszenie Energii Odnawialnej, Polska Izba Biomasy, Polska Izba Gospodarcza Energii Odnawialnej, Stowarzyszenie Niezależnych Wytwórców Energii Skojarzonej.
- [27] Regulacje ustawowe i rozporządzenia podlegające zmianom i regulujące kwestie biogazowni rolniczej i biogazu:

- a. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 23 lutego 2010 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie szczegółowego zakresu obowiązków uzyskania i przedstawienia do umorzenia świadectw pochodzenia, uiszczenia opłaty zastępczej, zakupu energii elektrycznej i ciepła wytworzonych w odnawialnych źródłach energii oraz obowiązku potwierdzania danych dotyczących ilości energii elektrycznej wytworzonej w odnawialnym źródle energii,
- b. Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 roku Prawo energetyczne (Dz. U. 1997 Nr 54, poz. 348 z późn. zm.),
- c. Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. o odpadach. Dz.U. 2001 Nr 62 poz. 628,
- d. Ustawa z dnia 22 stycznia 2010 r. o zmianie ustawy o odpadach oraz niektórych innych ustaw. Dz.U. z 2010 r. Nr 28, poz. 145,
- e. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 27 września 2001 roku w sprawie katalogu odpadów (Dz. U. 2001 Nr 112, poz. 1206),
- f. Ustawa z dnia 11 marca 2004 . o ochronie zdrowia zwierząt oraz zwalczaniu chorób zakaźnych zwierząt (Dz. U. Nr 69, poz. 625 z późn. zm.),
- g. Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 roku o odpadach (Dz. U. 2007 Nr 39, poz.251 tekst jednolity),
- h. Rozporządzenie Ministra Środowiska w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego (Dz. U. 2006 Nr 137, poz. 984),
- f. Ustawa z dnia 10 lipca 2007 roku o nawozach i nawożeniu (Dz. U. 2007 Nr 147, poz. 1033).
- [28] Schattner S., Gronauer A. 2000. Methangärung verschiedener Substrate – Kenntnis-stand und offene Fragen; Gülzower Fachgespräche Band 15: Energetische Nutzung von Biogas: Stand der Technik und Optimierungspotenzial; 28–38; Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe (FNR) e.V.
- [29] Sołtysiak D. 2010. Prawne uwarunkowania wykorzystania masy pofermentacyjnej. Mat. konf. II Seminarium międzynarodowego BIOGAZ 2010, Warszawa.
- [30] Stabnikova O., Liu X.Y., Wang J.Y., Ivanom V. 2006. Quantification of methanogens by fluorescence in situ hybridisation with oligonucleotide probe. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 73: 696–702.
- [31] Suárez-Quiñones T., Plöchl M., Budde J., Heiermann M., Schattauer A., Mayr H., Amon T. 2009. Feedstock optimization and preparation through enzymes and additives. www.eu-agrobiogas.net.
- [32] Szlachta J. 2008. Możliwości produkcji biogazu na bazie substratów rolniczych. Mat. Konf. „Rolnictwo jako producent energii”, Wrocław.
- [33] Updated guidebook on biogas development. 1984. United Nations. Economic and Social Commission for Asia and the Pacific. Energy Resources Development series No. 27.
- [34] Wahlen M. 1993. The global methane cycle. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 21: 407–426.
- [35] Weiland P. 2010. Biogas production: current state and perspectives. *Appl Microbiol Biotechnol.* 85(4): 849–60.
- [36] Wellinger A. 2008. The contribution of AD in delivering renewable energy and the role of IEA Bioenergy Task 37. Mat. Conf. „Co-digestion for an optimized production of biogas and fertilizer” Ludlow, Germany.
- [37] Yadava, L.S. Hesse P.R. 1981. The Development and Use of Biogas Technology in Rural Areas of Asia (A Status Report 1981). Improving Soil Fertility through Organic Recycling, FAO/UNDP Regional Project RAS/75/004, Project Field Document No. 10.
- [38] Yadvika, Santosh, Sreekrishnan T.R., Kohli S., Rana V. 2004. Enhancement of biogas production from solid substrates using difference techniques – a review. *Bioresurce Technology*. www.sciencedirect.com
- [39] Założenia programu rozwoju biogazowni rolniczych. 2009. MRiRW.
- [40] Zhu X.G., Long S.P., Ort D.R. 2008. What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass?. *Current Opinion in Biotechnology* 2(19): 153–159. doi:10.1016/j.copbio.2008.02.004
- [41] Zubr J. 1986. Methanogenic fermentation of fresh and ensiled plant material. *Biomass* 11: 159–171. <http://www.cire.pl/>.

The use of agricultural substrats in Polish biogas plants

Key words: biomass, biogas plant, agricultural biogas, biogas substrate, energy crops, technological process, biogas production, fermentation parameters

Summary

The paper contains a discussion on the technological determinants of agricultural biogas production, including environmental, economic, social and legislative aspects of biogas installations and prospects for development of agricultural biogas plants.

Agricultural biogas plants are becoming an integrated element of distributed energy generation and fuel system. For our natural environment, energy production and economic situation, it is more profitable to invest in the development of agricultural biogas plants than to abandon their growth. Among the most obvious environmental benefits, worth mentioning are reduction in the emission of greenhouse gases, utilization/management of organic wastes, neutralization of pathogens, inactivation of weed seeds, production of organic fertilizers and consequently reduced use of mineral fertilizers (further reduction of LCA), protection of groundwater and a possibility of reusing water from filtered post-fermentation waste. In respect of energy production, it is crucial that universal and renewable fuel may be produced from biomass in decentralised energy generation plants. Another important aspect is the implementation of a pro-consumer concept (local production and energy use), which additionally is a part of the energy safety policy. The economic profit derived from agricultural biogas plants is a product of the above benefits. The process of methane production is an added value of agricultural production and processing as it transforms stored waste into profitable energy generation centres and enables consumers to be independent from imported energy. An agricultural biogas plant generates variable income depending on the waste utilization, property rights arising from green certificates, sale of organic fertilizer, energy or biofuel.

The opportunity of obtaining a variety of different chemicals from agricultural biomass has not been fully explored yet, but it can be assumed that future agricultural biogas plants can be considered as components of an integrated agricultural biorefinery. Balancing the agricultural substrate for its most efficient utilization, including the recycling of trace amounts of nutraceuticals, bioavailable compounds used in food additives and in animal feeds or hardy degradable compounds used for production of industrial components as well as central utilization of post-fermentation waste for energy generation can ensure a more efficient conversion of biomass into energy and other functional products.