

currence of natural polyisoprenes w: Koyama T., Steinbuchel A., *Bio-polymers*, vol.2 Polyisoprenoids, Wiley V-CH, Weinheim 2001, 1-25.

[16]. Coran A. Y., *Vulcanization*, w: Eirich F. R., *Science and technology of rubber*, Academic Press, Nowy Jork 1978, 291-338.

[17]. Metherell C., 1992, *Compounding and vulcanization*, *Developments in Crop Science*, 23, 426-450.

[18]. Malaysian Rubber Board, 2015, *Natural Rubber Statistics 2015*, <http://www.lgm.gov.my/nrstat/nrstats.pdf>, 24.02.2016.

[19]. Tideman A. F., 1982, *Plant industry division report. The progress towards commercialization of the guayule plant (*Parthenium argentatum*) as a source of rubber in the United States of America*, Department of Agriculture, South Australia 1982, 5-6.

[20]. SSP. Rubber Thailand, 2009, http://ssprubberthailand.com/en/product2.php?category_id=10, 09.03.2016.

Tomasz Smolarek

e-mail: „Tomasz Smolarek” <176476@edu.p.lodz.pl>

Instytut Chemii Ogólnej i Ekologicznej, Wydział Chemiczny, Politechnika Łódzka

Kalkulator biogazowy jako użyteczne narzędzie do obliczeń wskaźników pracy biogazowni

Wstęp

W ostatnich latach odnotowuje się szybki rozwój energetyki biogazowej na terenie wielu krajów Azji Południowo-Wschodniej, Europy Zachodniej i Środkowej, a także Skandynawii. Jako surowce są stosowane m. in. uprawy energetyczne, odpadowa biomasa roślinna, odchody zwierzęce, odpady poubojowe i biomasa z przemysłu rolno-spożywczego [1-4]. Biogaz pozyskiwany jest w wyniku fermentacji wyżej wymienionej biomasy i osadów ściekowych w zamkniętych komorach fermentacyjnych, a także odprowadzany ze składowisk odpadów komunalnych [5-7]. Produkcja biogazu – jako paliwa ekologicznego, zaliczanego do odnawialnych źródeł energii (OZE), znajduje istotne wsparcie ekonomiczne w państwach Unii Europejskiej i niektórych innych krajach świata [6, 8, 9]. Według planów Unii Europejskiej do 2020 r., udział energii pochodzącej ze źródeł OZE w krajach członkowskich powinien osiągnąć poziom 15% lub wyższy. Biogaz oczyszczany jest z siarkowodoru w stopniu zapewniającym bezpieczeństwo urządzeń końcowych, a następnie wykorzystywany w nich do produkcji energii elektrycznej, ciepłej lub mechanicznej [6, 9-15].

W lipcu 2010 r. rząd polski przyjął dokument pt. „Kierunki rozwoju biogazowni rolniczych w Polsce w latach 2010-2020”, który chociaż celowy, okazał się w praktyce niewystarczający [16]. Mimo, iż sektor produkcji biogazu rolniczego może liczyć na życzliwą postawę rządzących w Polsce i korzystne zapisy w Ustawie o odnawialnych źródłach energii z 20 lutego 2015 r. [17], to i tak potrzebuje znacznie silniejszego wsparcia finansowego i technicznego niż to ma miejsce dotychczas [6, 8, 9].

Ciągle zwiększa się liczba biogazowni w naszym kraju, a w „Rejestrze wytwórców biogazu rolniczego” prowadzonym przez Prezesa Agencji Rynku Rolnego na dzień 19 lutego 2016 r., znajdowało się 80 obiektów łącznie umożliwiających wytwarzanie 339 666 451 m³/rok biogazu i mających zainstalowaną moc elektryczną równą 87,94 MW [18]. Ogólna liczba instalacji biogazowych w Polsce jest znacznie większa, gdy uwzględnimy obiekty przetwarzające osady ściekowe i pozyskujące biogaz z wysypisk odpadów komunalnych [11].

W składzie biogazu występuje głównie metan (CH₄) oraz ditlenek węgla (CO₂), ale obecne są także niewielkie stężenia: siarkowodoru (H₂S), azotu (N₂), wodoru (H₂), amoniaku (NH₃), pary wodnej (H₂O), tlenku węgla (CO) i tlenu (O₂). Zawartość poszczególnych składników w biogazie zarówno surowym jaki i odsiarczonym jest wysoce zmienna [6, 9, 11, 12].

Kalkulatory biogazowe – ogólna charakterystyka i przeznaczenie

Kalkulator biogazowy jest obliczeniowym narzędziem instalowanym zwykle on-line, służącym zależnie od wariantu oprogramowania, do określania skali potencjalnej produkcji biogazu, ilości wytwarzanej energii elektrycznej oraz ciepłej, kosztów realizacji projektu, a niekiedy i czasu zwrotu poniesionych nakładów inwestycyjnych. Wyniki obliczeń należy traktować jako przybliżone i przed podjęciem decyzji o ewentualnej budowie biogazowni niezbędne jest przeprowadzenie kompleksowej analizy składu substratów oraz ich faktycznej wydajności w wytwarzaniu biogazu, wraz z określeniem zawartości metanu w produkcie [3].

Dopiero na podstawie badań laboratoryjnych można realnie skalkulować wydajność biogazowni, a co za tym idzie – również jej opłacalność [13]. Kalkulator biogazowy przydatny jest także przy optymalizacji planów budowy biogazowni. Instrument w wersji podstawowej zawiera w swych ustawieniach zwykle możliwość ingerencji w koszty inwestycji i substratów, ale przed przystąpieniem do obliczeń należy dostosować go do realiów panujących w danym kraju i rozpatrywanym regionie. Każdy kalkulator posiada domyślne ustawienia danych, a ingerencja w zmianę ich powinna być prowadzona przez osoby kompetentne [19, 20]. Stosując kalkulator biogazowy można między innymi aktualizować ceny substratów zależnie od pory roku i stopniowo dodawać kolejne reagenty. Poza tym poszczególne kalkulatory zwykle mają specyficzne dla nich funkcje dodatkowe [19, 20]. Potencjalny inwestor, na wstępnym etapie decyzyjnym, może skorzystać w Internecie z kilku kalkulatorów przygotowanych do pracy w języku polskim [3, 13], w tym zmieszonych pod adresami:

- <http://www.biogazenergia.pl/kalkulator-efektywnosci> – portal BIOGAZIENERGIA.pl [21];
- <http://www.mae.com.pl/kalkulator-biogazowy.html> – Mazowiecka Agencja Energetyczna Sp. z o.o. [22];
- <http://ioze.pl/kalkulatory/biogazowy> – Stowarzyszenie Inicjatyw OZE [23];
- <http://www.ekocde.pl/ekologia/37/kalkulator-biogazownie-rolnicze/>, Centrum Doradztwa Energetycznego Sp. z o.o. [24].

Analiza przedsięwzięcia inwestycyjnego, przeprowadzana w oparciu o kalkulatory biogazowe, powinna składać się z czterech etapów. W pierwszym z nich należy określić rodzaje i masy substratów. Drugi powinien zawierać parametry funkcjonowania biogazowni, efekty procesu fermentacji oraz wartości produkcji energii elektrycznej i ciepłej [19]. Trzeci etap ma umożliwić wprowadzenie jednostkowych cen kosztów oraz przychodów, zdefiniowanie parametrów sieci ciepłowniczej oraz wprowadzenie wartości dofinansowania zewnętrznego, zmniejszającego koszty całkowite budowy instalacji. Krok czwarty powinien być klarowną prezentacją wyników całej symulacji technologiczno-inwestycyjnej [19, 25].

Opis wybranego kalkulatora biogazowego i metodyka obliczeń

Do zasadniczej części obliczeń przyjęto kalkulator biogazowy Portalu BIOGAZIENERGIA.pl ze strony internetowej: <http://www.biogazenergia.pl/kalkulator-efektywnosci> [21], oprócz prostej struktury pozwalał on bowiem obli-

czyć wskaźniki ekologiczne inwestycji. System wykonywał obliczenia dla przykładowych substratów poddawanych fermentacji metanowej przy założonych podstawowych parametrach technicznych instalacji. Jako surowce można było wybrać odpady: z hodowli zwierzęcej, poubojowe, z produkcji rolnej, z przemysłu rolno-spożywczego, komunalne i rośliny energetyczne. Dla wybranych rodzajów substratów przyjęta została masa ładunku w wysokości po 10 000 ton wsadu/rok.

W celu porównania produkcji biogazu i metanu, które można uzyskiwać z różnych substratów, obliczono ich teoretyczne ilości dla pierwszych czterech reagentów także za pomocą kalkulatora biogazowego ze strony: <http://www.mae.com.pl/biogaz/> [22]. Jednak wobec otrzymania takich samych wyników jak przy użyciu kalkulatora [21] zaniechano dalszych obliczeń. Następnie wyznaczono objętości potencjalnie produkowanego biogazu i metanu w odniesieniu do substratów występujących w tabeli 1, przy czym kalkulator [23] umożliwiał obliczanie ilości produkowanego biogazu, a kalkulator [24] metanu.

Dzięki współczynnikom redukcji zanieczyszczeń kalkulatora oszacowano zmniejszenie emisji: ditlenku węgla, tlenków azotu, tlenków siarki, pyłów w przeliczeniu dla tony/rok.

Charakterystyka technologiczna instalacji obejmowała także wskaźniki takie jak:

- łączna masa zużytych substratów w t/rok;
- produkcja metanu i biogazu wyrażona w tysiącach m³;
- moc energetyczna i ciepła instalacji w MW;
- roczna produkcja energii elektrycznej i ciepłej w MWh/rok.

Jednak aspektów ekonomicznych inwestycji nie rozpatrywano, ze względu na ograniczony moduł kalkulatora w tym zakresie, np. brak cen surowców [21].

Wyniki obliczeń i ich interpretacja

W tabeli 1 przedstawiono wskaźniki technologiczne i ekologiczne obliczone na podstawie internetowego kalkulatora biogazowego dla założonych materiałów wsadowych, w tym produkcję (prod.) biogazu i metanu, a także możliwe redukcje (red.) emisji: ditlenku węgla, tlenków azotu, siarki i pyłów.

Obliczenia wykonano za pomocą kalkulatora biogazowego: bez gwiazdek [21], *[22], **[23], **[24].

Stwierdzono, że w wyniku fermentacji metanowej największą ilość metanu można otrzymać z komunalnych odpadów organicznych, tj. 1316,6 tys. m³/rok, jak również odpowiadającą jej wysoką ilość biogazu na poziomie 2194,3 tys. m³/rok. Najniższa produkcja metanu i biogazu wystę-



Tabela 1. Wybrane wskaźniki technologiczne [21-24] i ekologiczne [21] biogazowni obliczone za pomocą kalkulatorów biogazowych dla 10 tys. t/rok wybranych surowców

Wsad 10 000 [t/rok]	Prod. metanu [tys. m ³] [21, 22*, 24***]	Prod. biogazu [tys. m ³] [21, 22*, 23**]	Red. emisji CO ₂ [t/rok] [21]	Red. emisji tlenków azotu [t/rok] [21]	Red. emisji tlenków siarki [t/rok] [21]	Red. emisji pyłów [t/rok] [21]
Obornik z tuczu trzody chlewnej	432,9 433,0* _** 770***	721,6 721,6* 627,8** _***	991,4	1,62	2,529	0,126
Obornik z hodowli bydła	450,6 450,6* _** 325,2***	751,1 751,1* 459,0** _***	1032,0	1,695	2,633	0,131
Mączka zwierzęca	861,3 861,3* _***	1435,5 1435,5* _**	1972,3	3,240	5,032	0,251
Osady poflotacyjne z rzeźni	899,7 899,7* _***	1499,5 1499,5* 1332,2**	2060,3	3,385	5,256	0,262
Kalafior – liście	356,6 _***	594,3 _**	816,6	1,341	2,083	0,104
Kukurydza-kiszonka	941,0 1260***	1568,4 1663,2**	2154,9	3,541	5,498	0,274
Serwatka	178,0 _***	296,7 _**	407,6	0,669	1,040	0,051
Wywar pogorzelniany piwny	855,6 _***	1426,0 _**	1959,2	3,219	4,998	0,249
Ścinki roślin (odpadowa zieleń miejska)	1000,5 1500***	1667,5 _**	2291,1	3,764	5,845	0,291
Organiczne odpady komunalne	1316,6 _***	2194,3 _**	3014,9	4,954	7,692	0,384
Razem	7292,8	12 154,9	16 700,3	27,428	42,606	1,739

powąła w przypadku fermentacji serwatki, odpowiednio: metanu – 178,0 tys. m³ a biogazu – 296,7 tys. m³. Obornik z hodowli bydła w porównaniu do obornika z tuczu trzody chlewnej pozwala wyprodukować więcej biogazu. Osady poflotacyjne z rzeźni, mączka zwierzęca i wywar pogorzelniany piwny mają zbliżone wskaźniki produkcji metanu i biogazu. Z substratu zieleni miejskiej można również wyprodukować stosunkowo dużo metanu, tj. 1000,5 m³/rok oraz biogazu 1667,5 m³/rok.

Największa redukcja emisji ditlenku węgla, tlenków azotu i siarki oraz pyłów została odnotowana podczas fermentacji organicznych odpadów komunalnych. Redukcja powyższych zanieczyszczeń podczas fermentacji serwatki jest z kolei najniższa.

Wskaźniki ekologiczne i energetyczne obliczone za pomocą stosowanego kalkulatora biogazowego dla łącznego wsadu dziesięciu reagentów o masie 100 000 t wsadu/rok [21]:

- redukcja emisji ditlenku węgla: 0,6749 t/MWh;
- redukcja emisji tlenków azotu: 0,0011 t/MWh;

- redukcja emisji ditlenku siarki: 0,0017 t/MWh;
- emisja pyłów: 0,000086 t/MWh;
- moc elektryczna: 3,093 MW;
- moc cieplna: 3,678 MW;
- produkcja energii elektrycznej: 24 744,8 MWh/rok;
- produkcja energii cieplnej: 29 426 MWh/rok;
- wartość kaloryczna metanu: 9,17 kWh/m³;
- sprawność: cieplna: > 0,44; elektryczna: > 0,37.

Dzięki kalkulatorom biogazowym możliwe jest wstępne opracowanie charakterystyki biogazowni, w tym efektów ekologicznych i ekonomicznych pracy instalacji przy założonej, różnorodnej bazie surowców [24].

Wnioski

1. Proces fermentacji metanowej jest perspektywiczną metodą otrzymywania odnawialnej energii, pozwalającą także na redukcję objętości bioodpadów i rolnicze wykorzystanie pofermentu.

2. Podczas fermentacji należy kontrolować wybrane parametry procesu w celu jego optymalizacji. Dzięki rozwojowi techniki biogazowej można stosować szeroką gamę biomateriałów do produkcji biogazu, a jakość substratów wpływa na ilość i skład produkowanego biogazu z jednostki masy surowca.
3. Aktualnie dostępnych jest on-line kilka kalkulatorów biogazowych pracujących w języku polskim. Systemy te pozwalają na dobranie odpowiedniego substratu bądź mieszaniny w celu optymalizacji procesu fermentacji.
4. W kalkulatorach biogazowych jedne systemy dają wyniki bardzo podobne dla tych samych ilości substratów, np. umieszczone w Portalu BIOGAZIENERGIA.pl oraz na stronie Mazowieckiej Agencji Energetycznej Sp. z o.o., natomiast w stosunku do innych kalkulatorów różnice w rezultatach obliczeń są znaczne. Zdaniem Autorów pracy [19] dla niektórych substratów przekraczają nawet 60%.
5. W większości kalkulatorów biogazowni pomijane są koszty pracy obsługi, przywozu i składowania substratów, a także wywozu masy pofermentacyjnej [19].
6. Kalkulatory opracowane przez firmy BIOGAZIENERGIA oraz Mazowiecką Agencję Energetyczną posiadają rozbudowane bazy substratów, dysponują jednak dość ograniczonym modułem ekonomicznym.
7. Dzięki kalkulatorom można wstępnie ocenić opłacalność inwestycji budowy biogazowni, a także wskaźniki emisji zanieczyszczeń do środowiska. Wyniki otrzymane z kalkulatora biogazowego należy jednak traktować jako dane doradcze nie decyzyjne, mogą one bowiem nie uwzględniać wszystkich rzeczywistych substratów i parametrów procesu.

Literatura

- [1] Muradin M., Foltynowicz Z., 2014, Potential for Producing Biogas from Agricultural Waste in Rural Plants in Poland, Sustainability, 6, 5065-5074.
- [2] Curkowski A., Mroczkowski P., Oniszk-Popławska A., Wiśniewski G., Biogaz rolniczy – produkcja i wykorzystanie. Mazowiecka Agencja Energetyczna Sp. z o.o., Warszawa 2009, http://www.mae.com.pl/files/poradnik_biogazowy_mae.pdf, 26.02.2016 r.
- [3] Smolarek T., Praca inżynierska pt. Wpływ rodzaju surowca poddawanego fermentacji na skład biogazu i metody jego analizy, Instytut Chemii Ogólnej i Ekologicznej, Politechnika Łódzka, Łódź 2015.
- [4] Zagdański D., 2014, Realizacja i funkcjonowanie biogazowni rolniczej. Przykład wybranego obiektu, Aura, 6, 16-18.
- [5] Wilk J., 2011, Wykorzystanie osadów ściekowych do produkcji biogazu, Aura, 5, 18-20.
- [6] Cebula J., Wybrane metody oczyszczania biogazu rolniczego i wysypiskowego, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012.
- [7] Zajęc G., Szyszlak-Bargłowicz J., Słowik T., 2013, Produkcja

i wykorzystanie biogazu w oczyszczalni ścieków „Hajdów”, Gaz, Woda, Tech. Sanit., 2, 93-95.

- [8] Aleksandrow S., Michalak D., 2013, Analiza potencjału regionu łódzkiego pod kątem budowy biogazowni, Acta Innov., 7, 28-44.
- [9] Żarczyński A., Rosiak K., Anielak P., Wolf W., 2014, Praktyczne metody oczyszczania biogazu z siarkowodoru. Cz. 1. Zastosowanie sorbentów stałych, Acta Innov., 12, 24-35 http://www.proakademia.eu/gfx/baza_wiedzy/255/praktyczne_metody_oczyszczania_biogazu_z_siarkowodoru.pdf, 22.02.2016 r.
- [10] Żarczyński A., Rosiak K., Anielak P., Ziemiński K., Wolf W., 2015, Praktyczne metody usuwania siarkowodoru z biogazu. II. Zastosowanie roztworów sorpcyjnych i metod biologicznych, Acta Innov., 15, 57-71, http://www.proakademia.eu/gfx/baza_wiedzy/315/15_57-71.pdf, 22.02.2016 r.
- [11] Rosiak K., Klemba K., Żarczyński A., 2016, Technologie otrzymywania biometanu z biogazu, Aura, 1, 14-17.
- [12] Klemba K., 2015, Biogazownia jako potencjalne źródło zagrożeń emisjami odorowymi oraz działania prewencyjne, Eliksir, 2, 22-27.
- [13] Kowalczyk-Juško A., Pozostałości z przetwórstwa rolno-spożywczego, <http://www.gmina.bio-gazownie.edu.pl/pozostalosci-z-przetworstwa-rolno-spozywczego>, 16.02.2016.
- [14] Aleszczyk Ł., 2015, Adsorpcyjne metody usuwania siarkowodoru z biogazu, Przem. Chem., 12, 2199-2202.
- [15] Klemba K., Żarczyński A., Wolf W. M., Anielak P., 2016, Praktyczne metody usuwania siarkowodoru z biogazu. III. Propozycja ankiety jako metody kompleksowej oceny aspektów ekonomicznych i ekologicznych technologii odsiarczania biogazu, Gaz, Woda, Tech. Sanit., 6 (w druku).
- [16] Kierunki rozwoju biogazowni rolniczych w Polsce w latach 2010–2020. Ministerstwo Gospodarki, Warszawa 2010.
- [17] Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii, Dz. U. 2015, poz. 478.
- [18] Materiały Prezesa Agencji Rynku Rolnego pt. Rejestr wytwórców biogazu rolniczego, stan na dzień: 19.02.2016 r.; http://www.arr.gov.pl/data/02004/rejestr_wytworcow_biogazu_rolniczego_19022016.pdf [dostęp: 24.02.2016].
- [19] Sławiński, K., Piskier, T., Bujaczek, R., 2012, Ocena przydatności kalkulatorów biogazowni przy planowaniu budowy biogazowni rolniczej, Inż. Rolnicza, 16(4), 369-375.
- [20] Piłarska A., Piłarski K., Dach J., Boniecki P., 2013, Perspektywy i problemy rozwoju biogazowni rolniczych w Polsce. Techn. Rolnicza Ogrodnicza Leśna, 4, 2-5.
- [21] Portal BIOGAZIENERGIA.pl, <http://www.biogazenergia.pl/kalkulator-efektywnosci>, 20.02.2016.
- [22] Mazowiecka Agencja Energetyczna Sp. z o.o., <http://www.mae.com.pl/kalkulator-biogazowy.html>, 20.02.2016.
- [23] Stowarzyszenia Inicjatyw OZE, <http://ioze.pl/kalkulatory/biogazowy>, 20.02.2016.
- [24] Centrum Doradztwa Energetycznego Sp. z o.o., Kalkulator biogazowy – biogazownie rolnicze, <http://www.ekocde.pl/ekologia/37/kalkulator-biogazownie-rolnicze/>, 24.02.2016.
- [25] Myczko A. (red.), 2011, Budowa i eksploatacja biogazowni rolniczych. Poradnik dla inwestorów zainteresowanych budową biogazowni rolniczych. Instytut Technologiczno-Przyrodniczy. Warszawa-Poznań, ISBN 978-83-62416-23-3.

