

Jerzy Dudek

Institut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

Wpływ odpadów biodegradowalnych na potencjał energetyczny składowiska

W artykule opisano mechanizm powstawania gazu na składowisku odpadów komunalnych. Przedstawiono dane literaturowe dotyczące gazu wytwarzanego w warunkach laboratoryjnych podczas procesów rozkładu materii organicznej. Opisano sposoby obliczania produktywności gazowej składowiska oraz przeprowadzono analizę możliwości wykorzystania biogazu produkowanego z odpadów o różnej zawartości materii organicznej do produkcji energii.

Słowa kluczowe: biogaz, składowisko odpadów, gaz składowiskowy, potencjał energetyczny składowiska, odgazowanie składowisk, produktywność gazowa składowiska, energia odnawialna.

The impact of biodegradable wastes on the power generation potential of waste dumps

The paper describes the mechanism of gas generation in municipal waste dumps. Literature data on gas generation in laboratory conditions during the process of organic matter decay are provided. Methods for the calculation of waste dumps gas generation productivity are described. The possibility of utilization of biogas containing various amounts of organic matter for power generation purposes are discussed.

Key words: biogas, landfill site, landfill gas, landfill power generation potential, landfill gas extraction system, landfill gas productivity, renewable energy.

Powstawanie gazu na składowisku odpadów komunalnych

Zgodnie z definicją zawartą w rozporządzeniu Ministra Gospodarki (Dz.U. z 2008 roku nr 156, poz. 969) „biogaz jest to gaz pozyskany z biomasy, w szczególności z instalacji przeróbki odpadów zwierzęcych i roślinnych, oczyszczalni ścieków oraz składowisk odpadów”. Gaz ten jest paliwem wytwarzanym przez mikroorganizmy z materii organicznej w wyniku fermentacji metanowej biomasy lub substancji organicznej zawartej w odpadach. Podczas eksploatacji składowisk odpadów komunalnych dąży się do maksymalnego zagęszczenia odpadów. Powoduje to stopniowe zmniejszanie ilości tlenu w warstwie odpadów i wpływa korzystnie na rozwój bakterii metanogennych. Prowadzona w taki sposób eksploatacja ma również uzasadnienie ekonomiczne, ponieważ przedłuża żywotność składowiska oraz zmniejsza koszty jego budowy.

Odpady komunalne gromadzone na składowiskach to głównie związki organiczne, biodegradowalne (ponad 40%).

Przy odpowiednich warunkach środowiskowych, takich jak: temperatura, pH, wilgotność, anaerobioza (życie w środowisku niezawierającym wolnego tlenu) czy zawartość azotu, odpady ulegają procesom biologicznego, chemicznego i fizycznego rozkładu. Efektem zachodzących wewnątrz składowiska procesów jest – między innymi – powstawanie gazu składowiskowego. Zważywszy na fakt, że na składowisku zachodzą przemiany fizykochemiczne oraz procesy rozkładu substancji organicznych z udziałem mikroorganizmów, można taki obiekt potraktować jak gigantyczny bioreaktor. Spełnione są bowiem warunki niezbędne do procesów metabolizmu bakterii, tj.: obecność masy organicznej biodegradowalnej, właściwa wilgotność, brak dostępu tlenu, udział mikroorganizmów z odpadów i z gleby.

Z punktu widzenia produkcji biogazu, im więcej jest w masie odpadów zawierających frakcję organiczną, tym lepiej – ponieważ więcej wytworzy się gazu. Jednakże na

składowiskach występuje również frakcja nieorganiczna, która – mimo że nie ulega biodegradacji – ma wpływ na intensywność procesów biochemicznych. Do odpadów tego typu zalicza się: metale, żużel, kamienie, szkło, gruz budowlany, ale także metale ciężkie, które wprawdzie w małych ilościach trafiają na składowiska komunalne, ale mają toksyczny wpływ na mikroorganizmy, spowalniając procesy ich metabolizmu.

Głównymi komponentami wydzielającego się gazu składowiskowego jest metan i dwutlenek węgla. Typowy skład biogazu w stanie bezwodnym przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Typowy skład biogazu w stanie bezwodnym

Składnik gazu	Udział gazów w stanie bezwodnym [%]
Metan	45÷60
Dwutlenek węgla	40÷60
Azot	2÷5
Tlen	0,1÷1,0
Merkaptany	0÷1,0
Siarczki, dwusiarczki	0÷1,0
Amoniak	0,1÷1,0
Wodór	0÷0,2
Tlenek węgla	0÷0,2
Składniki śladowe	0,01÷0,6

Czynniki mające wpływ na produkcję biogazu

Na wydzielanie się gazu składowiskowego ma wpływ szereg czynników wewnętrznych i zewnętrznych. Są nimi:

- jakość odpadów – odpowiednie przygotowanie odpadów do biologicznego rozkładu polegające przede wszystkim na ich rozdrobnieniu. Im mniejsze cząstki, tym prędzej zachodzi hydroliza, czyli pierwszy niezbędny proces rozkładu. Rozdrabnianie odpadów w jakikolwiek sposób ułatwia kontakt: bakterie – woda – substrat. Istotny jest również rodzaj składowanych odpadów. Korzystne dla procesu gazyfikacji jest składowanie ustabilizowanych i odwodnionych do 30% suchej masy osadów ściekowych pochodzących z oczyszczalni ścieków. W tym przypadku następuje intensyfikacja powstawania gazu, ponieważ wprowadzane są przetrwalnikowe formy bakterii i podatny do produkcji gazu substrat [3];
- wilgotność odpadów – bakterie metanowe pracują w każdym stopniu uwodnienia, dlatego im wyższa jest wilgotność sterty odpadów, tym lepiej dla procesu gazyfikacji. Utrzymanie wilgotności powyżej wodochłonności odpadów spowoduje, że bakterie będą migrować wraz z odciekami do kolejnych sektorów składowiska. Recykulacja odcieku sprawi, że produkcja gazu wzrośnie o 20÷50%. Zwiększenie wydzielania biogazu będzie miało miejsce również wówczas, gdy do sterty składowanych odpadów dodamy osady ściekowe uwodnione w 80 procentach. Nie wpłynie to jednak na wzrost odcieków, gdyż odpady miejskie mają dużą chłonność wody. Trzeba również zwrócić uwagę na fakt, że proces gazyfikacji wymaga sporej ilości wody, która wchodzi w reakcje w czasie gazyfikacji i ułatwia

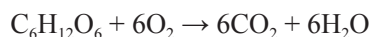
się wraz z parą wodną do atmosfery (wskutek wysokiej temperatury);

- temperatura – średnia temperatura w stercie odpadów waha się w granicach 45÷65°C i rośnie wraz z głębokością. Wysoka temperatura sprzyja rozkładowi, a więc również intensyfikuje produkcję gazu;
- związki odżywcze i bakterie – produkcja gazu wzrośnie, gdy dojdzie do kontaktu między bakteriami a pożywką, która powinna być równomiernie rozprowadzana wraz z wodą po całym składowisku odpadów;
- gęstość odpadów – ekonomiczna eksploatacja składowiska wymaga, aby odpady były ubijane, np. kompaktorem. Gwarantuje to przede wszystkim dłuższą żywotność składowiska, ale również zmniejsza porowatość masy odpadów i eliminuje powietrze z tych porów, umożliwiając tym samym zapoczątkowanie rozkładu beztlenowego. Gęstość odpadów przy ich ubijaniu za pomocą kompaktora waha się w granicach 500÷600 kg/m³. Istotne jest, że przy takich warunkach odcieki mogą swobodnie migrować przez masę odpadów, co sprzyja gazyfikacji. Inną metodą ubijania śmieci jest balotowanie, czyli prasowanie odpadów w prostopadłości. Bloki w tej metodzie są ustawiane obok siebie. To rozwiązanie nie sprzyja jednak produkcji gazu, gdyż problemem staje się migracja odcieków przez poszczególne bloki.
- pH odcieku na składowisku musi zawierać się w przedziale 6,5÷8.
- Zasadowość powinna być wysoka, np. $Z = 2000 \text{ mg/LCaCO}_3$, oraz musi wystąpić jak najniższy stosunek lotnych kwasów tłuszczowych do zasadowości.

Fazy powstawania gazu składowiskowego

W naturalnych procesach rozkładu substancji organicznej w masie odpadów na składowisku można wyróżnić fazę tlenową i beztlenową.

Na składowiskach zagęszczonych faza tlenowa trwa krótko, około kilka tygodni, aż do wyczerpania tlenu w układzie, a chemizm tych procesów (na modelu glukozy) jest następujący:



W procesach aerobowych połowa substancji organicznej biodegradowalnej zamieniana jest w CO_2 , a pozostała część ulega przemianom w biomasę mikroorganizmów. Rozkład tlenowy jest istotny, gdyż prowadzi do samozagrzewania się masy odpadów, co sprzyja rozwojowi bakterii mezofilnych, dla których optymalna temperatura rozwoju to $30\div 40^\circ\text{C}$.

Faza tlenowa to I faza powstawania biogazu. W przestrzeniach między odpadami jest dużo gazu, który z czasem staje się coraz bogatszy w dwutlenek węgla, poza tym ma on skład zbliżony do powietrza. Na tym etapie bakterie aerobowe utleniają skomplikowane związki organiczne do prostych substancji.

Po zużyciu tlenu następuje dalszy, tzw. beztlenowy rozkład związków organicznych. W złożu odpadów zaczynają dominować warunki beztlenowe, w których odbywać się będą trzy (niektóre źródła mówią o czterech) dalsze etapy gazyfikacji.

Faza beztlenowa jest złożonym procesem biologicznym z udziałem zróżnicowanych mikroorganizmów. Podczas rozkładu beztlenowego ok. 95% substancji organicznych ulega katabolizmowi do produktów gazowych: CH_4 i CO_2 . Pozostałość stanowi biomasa bakteryjna. Biodegradacji ulegają głównie celuloza i cukry złożone. Około 15% udziału w tych przemianach stanowią białka i tłuszcze.

Decydujące znaczenie w procesach biodegradacji ma udział wilgoci w odpadach. Woda zawarta w odpadach jest przede wszystkim źródłem transportu dla enzymów i pożywek bakteryjnych, ale także umożliwia modyfikację struktury enzymów, rozpuszcza metabolity i decyduje o prężności komórek bakteryjnych. Minimalny udział wilgoci w odpadach, niezbędny do zainicjowania fermentacji, wynosi 25%, ale optymalna wartość to $40\div 75\%$. Powyżej tej wartości procesy gazyfikacji zostaną spowolnione, gdyż zbyt duża ilość wody spowoduje obniżenie temperatury składowiska.

Drugą, a zarazem pierwszą w warunkach beztlenowych, fazą powstawania gazu składowiskowego jest tzw. „kwaśna fermentacja”, niektóre źródła określają ją mianem hydrolizy niedotlenionej. Na tym etapie odpady fermentują intensywnie do kwasów tłuszczowych. W gazie zaczyna dominować dwutlenek węgla, zaś pomiary odcieku zasygnalizują spadek pH. Jest to faza krótka, trwająca około 2 miesiące.

W niestabilnej fazie metanowej, czyli trzeciej fazie gazyfikacji, pojawiają się warunki

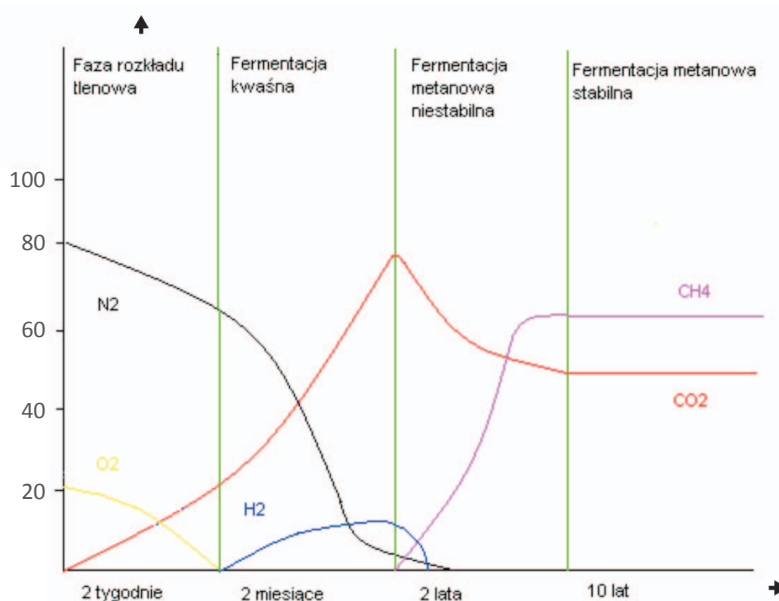
sprzyjające powstawaniu metanu. Proces ten zachodzi najaktywniej w dwóch przedziałach temperatur: mezofilowym $30\div 37^\circ\text{C}$ i termofilowym $50\div 65^\circ\text{C}$.

Rośnie udział metanu w gazie, a kwasy tłuszczowe rozkładające się dalej do kwasu octowego są zamieniane na CH_4 i CO_2 . Koniec tej fazy następuje, gdy stężenie CH_4 osiągnie 50%. Na suchych składowiskach zakończenie tego etapu może w ogóle nie wystąpić, a na wilgotnych trwa on około 3 miesiące.

W czwartej fazie skład gazu oraz jego szybkość wytwarzania się są raczej stałe. Zawartość metanu utrzymuje się na poziomie $50\div 70\%$ i zależy od zasadowości składowiska – im bardziej alkaliczne odpady, tym więcej metanu. Jest to etap długoterminowy i trwa zazwyczaj od 10 do 20 lat. W miarę upływu czasu wyczerpuje się rozkładalna materia organiczna i zawartość metanu spada; powietrze zaczyna infiltrować w masę odpadów i następuje piąta faza, czyli okres dojrzewania, w której zaczynają zamierać procesy beztlenowej mineralizacji. Faza ta może nastąpić po 10 latach na składowisku z recyrkulacją odcieków, a na suchym składowisku po 50, a nawet 100 latach. Jest to tzw. „faza wyciszenia” i znamionuje koniec aktywności biologicznej składowiska.

Graficznie skład gazu ze składowiska można zobrazować za pomocą funkcji wieku odpadów według Farquahara i Roversa (rysunek 1).

Procentowy udział CH_4 i CO_2 w gazie zależy od kinetyki przemian i warunków panujących w środowisku reakcji oraz rodzaju odpadów. Dostępne źródła literaturowe informują o zawartościach metanu w biogazie rzędu:



Rys. 1. Skład gazu składowiskowego w funkcji wieku odpadów (według Farquahara i Roversa)

- 50÷60% – przy rozkładzie biologicznym segregowanej substancji organicznej z gospodarstw domowych [1],
- 57% z odpadów owocowych [7],
- 68÷72% z odpadów warzywnych [7],
- 43÷71% z ługowanych odpadów przemysłu cukrowniczego [12],
- 31÷57% z surowych odpadów buraczanych [12].

Dla porównania, w tabelicy 2 przytoczono dane na temat gazu powstającego w warunkach laboratoryjnych z odpadów owocowych i warzywnych [10].

Tabelica 2. Porównanie średnich składów biogazu otrzymanego w warunkach laboratoryjnych

Rodzaj materiału ulegającego rozkładowi	Średnia zawartość składnika w gazie [% obj.]		
	CH ₄	CO ₂	H ₂ S
AP	56,6	36,1	7,3
CRW	71,8	22,5	5,7
RC	68,0	25,1	6,9

AP – odpady owocowe, CRW – odpady warzywne, RC – częściowo przereagowane odpady warzywne.

Powyższe dane wykazują znaczne różnice w zawartościach metanu w biogazie, pomimo jego pochodzenia z wyselekcjonowanych odpadów i prowadzenia badań w stabilnych warunkach laboratoryjnych. W przypadku rzeczywistych składowisk – o przypadkowej i niejednorodnej strukturze, składzie oraz chemizmie odchylenia od średniego składu biogazu – będą znacznie większe.

Na podstawie analizy składu gazu można określić w jakiej fazie produkcji tego składnika znajduje się składowisko. Najwyższe stężenia metanu w gazie występują w fazie stabilnej metanogenezy. Pozostałe fazy charakteryzują się wyraźnie zróżnicowanym stosunkiem metanu do dwutlenku węgla, a ponadto – zróżnicowaniem udziału pozostałych składników: wodoru, tlenu i azotu.

Szybkość procesów tworzenia gazu składowiskowego jest wprost proporcjonalna do ilości materii organicznej zawartej w odpadach i ściśle uzależniona od warunków panujących w analizowanym obszarze [1].

Analiza danych literaturowych pozwala wytypować najważniejsze zmienne, mające bezpośredni wpływ na metanogenezę. Należy tu wymienić następujące parametry:

- temperaturę w badanym punkcie składowiska,
- zawartość wilgoci w badanym punkcie składowiska,
- zapach – wyczuwalną woń ubocznych produktów procesów gnilnych,
- parametry aktywności mikrobiologicznej – ilość mikroorganizmów i ich rodzaj,

- aktywność enzymatyczną – np. esterazy, amylazy, proteazy,
- zawartość polisacharydów,
- zawartość całkowitego węgla pierwiastkowego w materii organicznej (TOC),
- wiek odpadów,
- zawartość glukozy,
- $[C_{w\text{ cukrach prostych}}/C_{\text{całkowite}}]$,
- odczyn,
- obecność czynników redukujących (amoniak, siarkowodór),
- obecność kwasów organicznych,
- obecność jonów: azotu(V) i/lub azotu(III),
- obecność jonów siarki(VI).

Badania wpływu niektórych spośród wymienionych parametrów na przebieg metanogenezy prowadzone były na największym składowisku odpadów w USA [5, 11]. Próby pobierano na różnych głębokościach, w zakresie od 3 do 21 m, a następnie poddawano inkubacji w specjalnych pojemnikach oraz analizowano ilość wydzielającego się metanu.

Rezultaty systematycznie prowadzonych badań wykazują znaczne różnice w uzyskanych wynikach. Maksymalna szybkość metanogenezy wynosiła 700 mmol/kg × dobę. Statystyczna analiza otrzymanych wyników pozwoliła określić hierarchię czynników od najsilniej do najslabiej oddziałujących:

- wilgoć (optymalna zawartość 55%; przy 33% wilgotności produkcja metanu zanika),
- pH (optymalnie 6,8÷7,2),
- obecność jonów siarczanowych i odpowiednich szczepów bakterii,
- głębokość z jakiej pobierano próbkę,
- wiek próbki,
- temperatura,
- zawartość celulozy itp.

Należy podkreślić, że nie we wszystkich przypadkach hierarchia ta była zachowana, np. wyższą metanogenezę wykazywały próbki pobierane z młodych pokładów i mniejszych głębokości. Znaczną szybkość tworzenia metanu, rzędu 400 mmol/kg/dobę, wykazała również próbka pobrana z głębokości około 10 m, o wilgotności poniżej 33% [6].

Dla porównania, w tabelicy 3 przedstawiono szybkości metanogenezy zaczerpnięte z innych źródeł literaturowych.

Porównanie to wskazuje na drastyczne różnice szybkości metanogenezy uzyskanej w zbliżonych warunkach laboratoryjnych i świadczy, że wydajność procesu tworzenia metanu jest bardzo trudna do oszacowania w sposób wiarygodny i stanowi źródło największych błędów w rozważaniach modelowych [7, 12].

Tablica 3. Porównanie szybkości tworzenia metanu zaczerpniętych z danych literaturowych

Szybkość metanogenezy [dm ³ /(kg × dobę)]	Komentarz	Źródło literaturowe
0,23	Odpady organiczne z gospodarstw domowych; wydajność przewidywana dla procesu przemysłowego w oparciu o szacunkowe obliczenia.	[1]
1,33	Odpady owocowe (mieszane z obornikiem); inkubacja w warunkach laboratoryjnych.	[7]
3,36	Świeże odpady warzywne (mieszane z obornikiem); inkubacja w warunkach laboratoryjnych.	[7]
4,83	Przegniłe odpady warzywne (mieszane z obornikiem); inkubacja w warunkach laboratoryjnych.	[7]
0,39	Świeże odpady buraczane (bez obornika); inkubacja w warunkach laboratoryjnych; wydajność średnia dla najintensywniejszej metanogenezy.	[12]
0,39	Świeże odpady buraczane (z obornikiem); wydajność średnia dla najintensywniejszej metanogenezy.	[12]
0,02	Niezupełnie przereagowana biomasa pobrana ze składowiska; inkubacja w warunkach laboratoryjnych; wydajność maksymalna.	[8]
0,01	Niezupełnie przereagowana biomasa pobrana ze składowiska; inkubacja w warunkach laboratoryjnych; wydajność średnia.	[9]
0,00	Niezupełnie przereagowana biomasa pobrana ze składowiska; inkubacja w warunkach laboratoryjnych; wydajność dla mediany z 35 pomiarów.	[9]

Skład gazu produkowanego na składowiskach

Podstawowymi komponentami gazu wytwarzanego na składowisku są metan i dwutlenek węgla. Ponadto w gazie tym mogą występować niewielkie ilości azotu, wodoru, tlenu, siarkowodoru, tlenku węgla i amoniaku. Proporcje metanu i dwutlenku węgla mogą się zmieniać w bardzo szerokich granicach, w zależności od intensywności przebiegu dwóch zasadniczych procesów rozkładu: aerobowego i anaerobowego. W fazie zaawansowanej i stabilnej metanogenezy zawartość metanu waha się zwykle w granicach 50÷60%, a dwutlenku węgla 30÷40%. W tablicy 4 przedstawiono wyniki pomiarów podstawowych składników gazu pobranego z losowo wybranych studni odgazowujących kilku polskich składowisk odpadów komunalnych w 2012 roku [4].

Zarówno rozważania teoretyczne, jak i wyniki badań laboratoryjnych potwierdzają, że decydujący wpływ na skład produkowanego gazu, a tym samym na wielkość potencjału energetycznego składowiska ma zawartość frakcji organicznej w odpadach.

Tablica 4. Wyniki pomiarów podstawowych składników gazu

Składowisko	Skład gazu [% obj.]			
	CH ₄	CO ₂	O ₂	N ₂
Brzesko – Jadowniki	71,9	26,4	0,8	0,9
Choszczno – Stradzewo	48,7	31,5	0,3	19,5
Kraków – Barycz	56,2	35,1	0,1	8,6
Myślenice – Borzęta	62,1	37,2	0,2	0,5

Wykorzystanie biogazu do produkcji energii

Pozyskiwany biogaz w instalacjach odgazowania składowisk odpadów komunalnych stanowi znaczący potencjał energetyczny możliwy do racjonalnego wykorzystania w oparciu o układy kogeneracyjne produkujące równocześnie energię elektryczną i ciepłą. Zasilane biogazem ze składowisk układy kogeneracyjne powinny być przydatne w tworzeniu krajowego systemu energetyki rozproszonej, mającego na celu zwiększenie dostępności energii dla odbiorców, podniesienie elastyczności systemu energetyki ciepłej oraz wprowadzenie zasady konkurencyjności na rynku energii.

W celu zapewnienia opłacalności poniesienia nakładów na budowę instalacji do odgazowania składowiska oraz wykorzystania gazu do produkcji energii wykonuje się prognozę produktywności gazowej oraz przeprowadza szereg pomiarów mających na celu wyznaczenie wartości opałowej, ciepła spalania, liczby Wobbego i temperatury spalania gazu.

Wykonanie analizy opłacalności jest obecnie konieczne, ponieważ, zgodnie z dyrektywą 1999/WE w sprawie składowania odpadów, państwa członkowskie muszą stale ograniczać na składowiskach ilość odpadów komunalnych ulegających biodegradacji.

Elementem decydującym o podjęciu decyzji o sposobie zagospodarowania gazu jest określenie jego zasobów oraz możliwości ich wykorzystania przez długi okres czasu.

Aby ocenić wartość energetyczną składowiska, na którym zdeponowano różne ilości odpadów biodegradowalnych, wykonano obliczenia modelowe, przyjmując następujące założenia:

- strumień objętości generowanego przez składowisko gazu w rzeczywistości odpowiada strumieniowi gazu emitowanego do środowiska,
- stężenie metanu w gazie produkowanym wynosi 50% (V/V),
- ilość zdeponowanych odpadów wyniesie 1 mln ton,
- odpady będą składowane w latach 2010–2020,
- przyjęto 2-procentowy roczny przyrost masy odpadów zdeponowanych w latach 2010–2020,
- skład morfologiczny przyjęty do obliczeń przedstawiono w tabelicy 5,

Tabela 5. Struktura odpadów organicznych

Rodzaj odpadu	Masa zdeponowanych odpadów [kg]		
	Odpady organiczne 100%	Odpady organiczne 50%	Odpady organiczne 35%
Papier i tekstylia	153 000	76 500	53 550
Odpady z ogrodów i parków	45 000	22 500	15 750
Spożywcze	321 000	160 500	112 350
Drewno, skóra	4 000	2 000	1 400
Balast (odpady obojętne)	477 000	477 000	477 000
Całkowita ilość odpadów	1 000 000	738 500	660 050

- obliczenia wykonano dla trzech wariantów, zakładając:
 - rzeczywisty udział frakcji organicznej w odpadach,
 - obniżony o 50% udział frakcji organicznej w odpadach,
 - obniżony o 65% udział frakcji organicznej w odpadach.

Wyniki obliczeń produktywności gazowej składowiska odpadów komunalnych zestawiono w tabelicy 6 oraz przedstawiono na rysunku 2.

Obliczenia wykonano w oparciu o opracowany w Instytucie Nafty i Gazu model rozkładu substancji organicznej, który został wykorzystany do stworzenia komputerowego programu MPGW. Program ten służy do obliczania produktywności gazowej i szacowania emisji metanu oraz dwutlenku węgla ze składowisk odpadów komunalnych [2].

Na podstawie oszacowanej produktywności gazowej na lata 2010–2050 opracowano analizę potencjału energetycznego składowiska dla trzech wariantów:

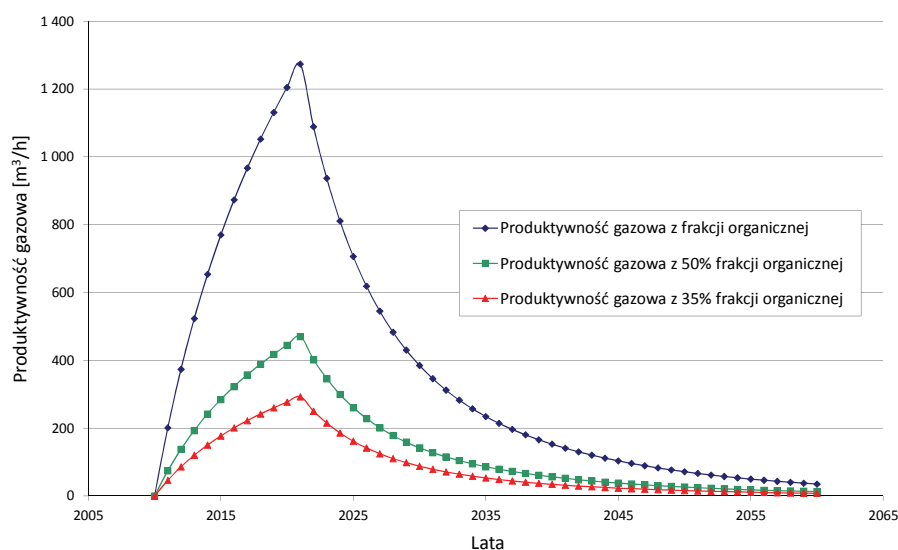
- wariant I – rzeczywisty udział frakcji biodegradowalnej w masie odpadów,
- wariant II – pomniejszony o 50% udział frakcji biodegradowalnej w masie odpadów,
- wariant III – pomniejszonej o 65% udział frakcji biodegradowalnej w masie odpadów.

Przy założeniu, że eksploatacja składowiska od 2010 roku zapewni ciągły dopływ odpadów do 2020 roku, produkcja gazu osiągnie maksymalną wartość w 2021 roku, która wyniesie:

- około 1275 Nm³/h dla wariantu I,
- około 470 Nm³/h dla wariantu II,
- około 290 Nm³/h dla wariantu III.

Należy podkreślić, że wytworzony przez składowisko całkowity strumień objętości biogazu w warunkach prowadzenia rzeczywistego odgazowania składowiska nie jest możliwy do wykorzystania. W oparciu o doświadczenie oraz wyniki testów weryfikujących prognozy produktywności gazowej przyjmuje się, że strumień gazu możliwy do pozyskania wynosi około 60% strumienia gazu oszacowanego za pomocą modelowania. Przy stosowaniu takiego współczynnika odzysku oszacowana ilość gazu możliwa do pozyskania

w roku 2021 wyniesie odpowiednio: 765 Nm³/h, 280 Nm³/h, 170 Nm³/h.



Rys. 2. Produktywność gazowa składowiska odpadów (trzy warianty)

Tablica 6. Produktywność gazowa składowiska odpadów (trzy warianty)

Rok	Masa składowanych odpadów [t]	Rzeczywisty udział frakcji biodegradowalnej w masie odpadów		Redukcja frakcji biodegradowalnej względem obliczeń wyjściowych			
				-50%		-65%	
		gaz [Nm ³]	gaz [Nm ³ /h]	gaz [Nm ³]	gaz [Nm ³ /h]	gaz [Nm ³]	gaz [Nm ³ /h]
2010	82 177,94	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2011	83 821,50	881 184,9	201,2	325 377,5	74,3	202 953,3	46,3
2012	85 497,93	1 637 237,0	373,8	604 549,7	138,0	377 003,2	86,1
2013	87 207,89	2 292 299,0	523,4	846 431,6	193,2	527 729,0	120,5
2014	88 952,05	2 865 711,0	654,3	1 058 164,0	241,6	659 599,1	150,6
2015	90 731,09	3 372 984,0	770,1	1 245 474,0	284,4	776 197,9	177,2
2016	92 545,71	3 826 582,0	873,6	1 412 965,0	322,6	880 404,9	201,0
2017	94 396,63	4 236 536,0	967,2	1 564 341,0	357,2	974 537,9	222,5
2018	96 284,56	4 610 941,0	1 052,7	1 702 590,0	388,7	1 060 467,0	242,1
2019	98 210,25	4 956 342,0	1 131,6	1 830 129,0	417,8	1 139 703,0	260,2
2020	100 174,50	5 278 047,0	1 205,0	1 948 919,0	445,0	1 213 474,0	277,0
2021	0	5 580 375,0	1 274,1	2 060 553,0	470,4	1 282 775,0	292,9
2022	0	4 771 210,0	1 089,3	1 761 769,0	402,2	1 096 075,0	250,2
2023	0	4 104 674,0	937,1	1 515 651,0	346,0	942 326,3	215,1
2024	0	3 553 129,0	811,2	1 311 993,0	299,5	815 141,0	186,1
2025	0	3 094 502,0	706,5	1 142 645,0	260,9	709 418,3	162,0
2026	0	2 711 147,0	619,0	1 001 091,0	228,6	621 080,4	141,8
2027	0	2 388 942,0	545,4	882 116,9	201,4	546 864,0	124,9
2028	0	2 116 573,0	483,2	781 544,7	178,4	484 154,4	110,5
2029	0	1 884 961,0	430,4	696 021,8	158,9	430 853,8	98,4
2030	0	1 686 809,0	385,1	622 854,3	142,2	385 276,4	88,0
2031	0	1 516 243,0	346,2	559 872,9	127,8	346 064,8	79,0
2032	0	1 368 525,0	312,4	505 327,8	115,4	312 124,2	71,3
2033	0	1 239 821,0	283,1	457 803,9	104,5	282 569,3	64,5
2034	0	1 127 025,0	257,3	416 154,1	95,0	256 682,4	58,6
2035	0	1 027 612,0	234,6	379 445,7	86,6	233 880,1	53,4
2036	0	939 520,0	214,5	346 917,7	79,2	213 686,6	48,8
2037	0	861 063,2	196,6	317 947,6	72,6	195 712,4	44,7
2038	0	790 855,7	180,6	292 023,5	66,7	179 637,5	41,0
2039	0	727 753,5	166,2	268 723,0	61,4	165 197,9	37,7
2040	0	670 808,4	153,2	247 696,0	56,6	152 174,7	34,7
2041	0	619 230,4	141,4	228 650,8	52,2	140 385,6	32,1
2042	0	572 358,0	130,7	211 343,2	48,3	129 678,1	29,6
2043	0	529 634,0	120,9	195 567,4	44,7	119 923,6	27,4
2044	0	490 586,7	112,0	181 149,1	41,4	111 013,3	25,3
2045	0	454 814,2	103,8	167 940,1	38,3	102 854,6	23,5
2046	0	421 972,2	96,3	155 813,2	35,6	95 368,2	21,8
2047	0	391 763,9	89,4	144 658,8	33,0	88 485,8	20,2
2048	0	363 932,0	83,1	134 381,9	30,7	82 148,0	18,8
2049	0	338 251,9	77,2	124 899,5	28,5	76 303,1	17,4
2050	0	314 526,8	71,8	1 161 390,0	26,5	70 906,0	16,2

Z prowadzonych przez Instytut Nafty i Gazu badań wynika, że do pozyskania 100 kW potrzebne jest spalanie około 40 Nm³ biogazu o zawartości około 60% metanu. Zatem potencjał energetyczny składowiska o przedstawionej produktywności gazowej pozwoli w latach 2015–2025 na zainstalowanie urządzeń energetycznych pracujących w ruchu ciągłym o mocy:

- 1750 kW dla I wariantu,

- 650 kW dla II wariantu,
- 400 kW dla III wariantu.

Przeprowadzona analiza wykazała, że zmniejszenie składowanej frakcji biodegradowalnej na składowiskach odpadów komunalnych w znaczący sposób ograniczy potencjał energetyczny i w konsekwencji spowoduje brak zainteresowania odzyskiem biogazu.

Podsumowanie

Prowadzone na świecie badania wykazały, że zawartość materii organicznej posiadającej w swoim składzie mikroflorę metanogenną w odpadach komunalnych deponowanych na składowiskach powoduje intensyfikację procesu generowania biogazu, czego dowodem jest porównanie rzeczywistego czasu osiągnięcia fazy stabilnej metanogenezy z danymi pozyskanymi z literatury (tablica 3). Przeprowadzona analiza wyników potwierdziła, że decydujący wpływ na ilość produkowanego gazu, będącego cennym nośnikiem energii, ma struktura deponowanych odpadów, a przede wszystkim udział frakcji biodegradowalnej w całkowitej masie odpadów. Aktualnie na wielu krajowych składowiskach posiadających instalacje do odgazowania z powodzeniem montuje się urządzenia do produkcji energii

cieplnej i elektrycznej. Sytuacja ta może ulec zmianie, ponieważ zgodnie z dyrektywą 1999/WE w sprawie składowania odpadów w 2009 roku państwa członkowskie miały ograniczyć o połowę ilość odpadów komunalnych ulegających biodegradacji kierowanych na składowiska, w porównaniu z poziomem z 1995 roku. Polska wraz z innymi państwami członkowskimi uzyskała czteroletnie przedłużenie tego terminu. Jednak do 2010 roku redukcja ta miała wynosić 25%, aby do 2013 roku osiągnąć wymagane 50%. Następny etap przypadnie w 2016 roku, kiedy wymagany poziom redukcji osiągnie 65% poziomu z roku 1995. Przytoczone rozważania wskazują, że budowa nowych instalacji do produkcji energii z gazu składowiskowego może stać się inwestycją nieopłacalną.

Prosimy cytować jako: *Nafta-Gaz* 2013, nr 12, s. 915–922

Literatura

- [1] Barlaz A. M., Ham R. K., Schaefer D. M.: *Microbial, chemical and methane production characteristics of anaerobically decomposed refuse with and without leachate recycling*. *Waste Management & Research* 1992, 10, pp. 257–267.
- [2] Dudek J., Klimek P., Kolodziejak G.: *Modelowanie matematyczne produktywności gazowej składowisk odpadów komunalnych*. *Nafta-Gaz* 2008, nr 1, s. 30–35.
- [3] Dudek J., Klimek P.: *Produktywność gazowa składowiska odpadów komunalnych*. *Nafta-Gaz* 2005, nr 11, s. 469–473.
- [4] Dudek J.: *Produkcja gazu ze składowisk odpadów komunalnych w świetle ograniczenia deponowania odpadów biodegradowalnych*. XXIII Ogólnopolska Konferencja Szkoleniowa, ABRYS Sp. z o.o., Kraków, Myslenice 19–21.02.2013. *Składowiska odpadów w nowych regionach gospodarki odpadami komunalnymi*, Poznań 2013.
- [5] Gurijala K. R., Sufflita J.: *Environmental factors influencing methanogenesis from refuse in landfill samples*. *Environmental Science & Technology* 1993, 27, no. 6, pp. 1176–1181.
- [6] Hegberg B. A., Hallenbeck W. H., Brennum G. R., Wadlen R. A.: *Setting Standards for yard waste compost*. *BioCycle*, February 1991, pp. 58–61.
- [7] Jakobsen S. T.: *Chemical reactions and air change during decomposition of organic matters*. *Resources, Conservation and Recycling* 1992, vol. 6, pp. 259–266.
- [8] Jimenez E. I., Garcia V. P.: *Compositing of domestic refuse and sewage sludge. II. Evolution of carbon and some "humification indexes"*. *Resources, Conservation and Recycling* 1992, vol. 6, pp. 243–257.
- [9] Jimenez E. I., Garcia V. P.: *Evaluation of City Refuse Compost Maturity. A Review*. *Biological Wastes* 1989, vol. 27, pp. 115–142.
- [10] Kalia V. C., Kumar A., Jain S. R., Joshi A. P.: *Biomethanation of plant materials*. *Bioresource Technology* 1992, 41, no. 3, pp. 209–212.
- [11] Sufflita J. M. et al.: *The world's largest landfill. A multidisciplinary investigation*. *Environmental Science & Technology* 1992, 26, no. 8, pp. 1486–1494.
- [12] Zehner A. J. B.: *Ecology of methane formation*. *Water Pollution Microbiology* 1978, vol. 2, pp. 349–376.



Mgr inż. Jerzy DUDEK
Starszy specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie Technologii Energii Odnawialnych.
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25A
31-503 Kraków
E-mail: jerzy.dudek@inig.pl