

Leszek Rogalski, Joanna Rzepka

OKREŚLENIE EMISJI BIOGAZU ZE SKŁADOWISKA ODPADÓW KOMUNALNYCH

Streszczenie. W pracy podjęto problem emisji biogazu, którego głównymi składnikami są metan (CH_4) i dwutlenek węgla (CO_2). Są one jednocześnie gazami cieplarnianymi. Mając na uwadze możliwość pozyskiwania biogazu do celów energetycznych, określono zawartość CH_4 i CO_2 z potencjału gazowego złoża odpadów komunalnych. W obliczeniach posłużono się modelem Tabasarana. W oparciu o dane z zamkniętego składowiska odpadów komunalnych w Makowie Mazowieckim, wykazano, że w 2011 roku emisja biogazu może wynieść od 1,2 do $7,95 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Jeżeli uwzględni się jeszcze, że pozyskanie biogazu wynosi około 50%, wówczas jego ilość nie gwarantuje opłacalności. W wariantach o korzystnych parametrach wydajności może okazać się zasadna, co potwierdzają dane wariantów porównawczych, a szczególnie pierwszego.

Słowa kluczowe: odpady komunalne, składowisko, obliczenia, emisja biogazu.

WSTĘP

W momencie powstania składowisk tzw. uporządkowanych, wykształcają się na nich dwa rodzaje ekosystemów mikrobiologicznych: metanogenne (w anaerobowej warstwie odpadów) i metanotroficzne (w napowietrznej warstwie powierzchniowej) [7] oraz pojawia się problem powstawania biogazu, który nie jest toksyczny, a jego skład jest zmienny w czasie [9].

Odgazowywanie składowisk odpadów może odbywać się w sposób pasywny lub aktywny. Pasywny polega na wykonaniu studni i zainstalowaniu pochodni spalających gaz, który wydobywa się pod własnym ciśnieniem. Natomiast w odgazowywaniu aktywnym pozyskany gaz ze studni połączonych ze sobą kolektorami poziomymi jest wpięty do urządzeń produkujących energię elektryczną [5, 6] Stopień pozyskania biogazu podczas odgazowywania aktywnego wynosi 0,5 [3], czyli na poziomie 50% dla funkcjonującego składowiska i do 80% po jego zamknięciu [2].

Jeżeli składowanie odpadów odbywało się w sposób uporządkowany, to światło i tlen nie mają dostępu do nagromadzonych odpadów, w związku z tym procesy metabolizmu zaczynają przebiegać w warunkach beztlenowych. Falkowska i Lewandowska [7] podają, że tworzenie metanu odbywa się z udziałem bakterii

Joanna RZEPKA – Starostwo Powiatowe w Makowie Mazowieckim, joannarzepka@powiat-makowski.pl

Leszek ROGALSKI – Uniwersytet Warmińsko – Mazurski w Olsztynie, Katedra Ochrony Powietrza i Toksykologii Środowiska, leszek.rogalski@uwm.edu.pl

metanowych w warunkach niskiego potencjału redoks w III fazach. Rozwój technologii fermentacji metanowej jest bardzo intensywny, powstają innowacyjne modyfikacje prowadzenia tego procesu [12, 13].

Do oceny zagrożeń środowiskowych związanych z emisją biogazu niezbędna jest miarodajna prognoza ilości i czasowej zmienności produkowanego biogazu. Prognozy takie opracowywane są głównie na podstawie modeli matematycznych (ze względu na koszty badań oraz złożoność procesów rozkładu) [19]. W szacunkowych obliczeniach wykorzystywane są modele kinetyczne rozkładu substancji, a algorytmy zawierają znaczną ilość założeń uproszczających. Należy użyć dokładnych danych wyjściowych opartych na prowadzonej ewidencji odpadów deponowanych na składowisku, a w przypadku jej braku opierać się na danych statystycznych [8].

Szybkość rozkładu odpadów uzależniona jest od aktywności mikrobiologicznej złoża limitowanej stężeniem substratu [1]. W chwili obecnej dodatkowo uwzględniana jest również fazowość przemian zachodzących w złożu odpadów w zależności od faz: hydrolizy, acidogenezy i metanogenezy oraz pH środowiska [4, 18].

W literaturze znane są modele opisujące powstawanie biogazu tj.: Tabasarana [16], IGNIG [15], El-Fadel a [4], Zacharofa i Butlera [18].

W modelu Tabasarana [16], którym posłużono się w badaniach, potencjalną produkcję biogazu przypadającą na jednostkę masową odpadów określono równaniem nr 1 [11, 14, 17]:

$$G_o = 1,868C_{org}(0,014 \cdot T + 0,28) (1 - 10^{-kt}) [m^3 \cdot Mg^{-1}] \quad (1)$$

gdzie:

G_o - potencjalna produkcja biogazu z odpadów [$m^3 \cdot Mg^{-1}$],

Współczynnik 1,868- określa ilość biogazu o 50 % zawartości CO_2 i o 50 % zawartości CH_4 powstającego z 1 kg węgla organicznego [$m^3 \cdot kg \text{ Corg}^{-1}$]

C_{org} - zawartość węgla organicznego w odpadach [$kg \cdot Mg^{-1}$],

T- temperatura fermentacji w złożu odpadów [$^{\circ}C$],

k- stała rozpadu metanogenego,

t- rok produkcji biogazu [rok].

Z dużym prawdopodobieństwem można powiedzieć, że każde składowisko charakteryzuje inna wartość współczynnika k. W warunkach niemieckich za czas połowicznego rozpadu przyjęto okres 6 lat, co daje wartość współczynnika $k=0,05$. Dla warunków polskich przyjęto średnio wartość $k=0,03$ lub $0,04$. Wyznaczenie dokładnej wartości tego współczynnika nastęrcza szereg trudności ze względu na wyznaczenie czasu połowicznego rozpadu frakcji organicznej odpadów. Bezpośrednio wpływają na to:

- niedostateczna wilgotność,
- niejednakowa zdolność odpadów do biodegradacji,
- zagęszczenie odpadów [17].

MATERIAŁ I METODY BADAŃ

Składowisko odpadów komunalnych w Makowie Mazowieckim znajduje się w granicach miasta – w odległości ok. 1 km od centrum w kierunku Ciechanowa,

wewnątrz 30 letniego lasu. W bezpośrednim sąsiedztwie nie występuje zabudowa mieszkaniowa, ani obiekty użyteczności publicznej. Jest zlokalizowane na wysoczyźnie morenowej płaskiej, graniczącej z płaskim tarasem rzeki Orzyc z niewielkimi formami wydmowymi. Eksploatowano je w latach 1992-2007 r.

Parametry składowiska:

- powierzchnia całkowita - 2,0 ha
- powierzchnia użytkowa - 1,7 ha
- pojemność geometryczna całkowita składowiska 62 000 m³
- projektowana rzędna dna - 112 m n.p.m.
- dopuszczalna miąższość odpadów - 5 m

Na składowisku odpadów komunalnych zdeponowane są następujące odpady: z gospodarstw domowych, odpady o podobnych cechach pochodzące z przemysłu i handlu oraz innych obiektów infrastruktury komunalnej, odpady technologiczne nie stanowiące zagrożenia dla środowiska, odpady paleniskowe, papier i różnego rodzaju opakowania, odpadki żywnościowe, przedmioty codziennego użytku, przedmioty użytku gospodarczego i rolnego oraz odpady rolnicze pochodzące z upraw.

Szacuje się, że na składowisku zdeponowane jest ok. 54 400 m³ odpadów tj. ok. 22 000 Mg. Dane te są szacunkowe z uwagi na to, iż przez cały okres funkcjonowania instalacji odpady nie były wazone.

Obiekt funkcjonował jako jednokwaterowy. Odpady dowożono na odpowiednią część składowiska, układano metodą zsywywania i zagęszczano sypczaczem gaśnicowym. Warstwy odpadów mają grubość do 50-70 cm. Pomiędzy tymi warstwami jest przesyпка z piasku grubego o warstwie 15-20 cm. Średnia miąższość odpadów wynosi ok. 5-6 m.

WYNIKI I DYSKUSJA

Zawartość metanu i dwutlenku węgla określono na podstawie wyznaczenia potencjału gazowego złoża poprzez dokonanie modelowych obliczeń zasobności gazowej. Do tego celu wykorzystano model Tabasarana, w którym potencjalną produkcję biogazu przypadającą na jednostkę masową odpadów (G_0) określono równaniem 1. Biogaz generowany na składowiskach odpadów należy rozpatrywać w dwóch aspektach, tj. jako źródło emisji różnych gazów, głównie cieplarnianych lub alternatywne źródło energii. Na terenie badanego obiektu nie zbudowano instalacji do jego pozyskiwania, dlatego występowanie metanu i dwutlenku węgla obliczono wykorzystując jednostkowe wskaźniki produkcji biogazu oraz modelowe obliczenia zasobności gazowej.

Obliczeń ilości powstającego biogazu dokonano w następujących wariantach: w I i II przyjęto założenia teoretyczne w oparciu o wskazania literaturowe, w III posłużono się parametrami badanego obiektu.

Wariant I:

1. Średnia zawartość C_{org} – 220 [kg · Mg⁻¹ odpadów].
2. Temperatura w złożu odpadów – 33 [°C].
3. Stała szybkość rozkładu odpadów k – 0,04 .

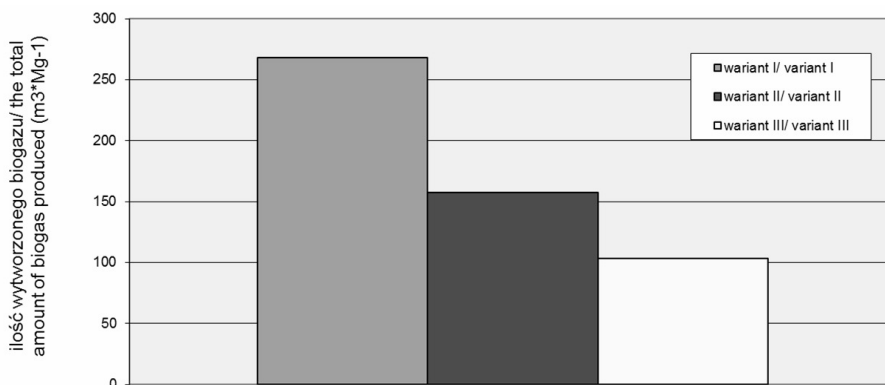
Wariant II:

1. Średnia zawartość C_{org} – 180 [kg·Mg⁻¹odpadów].
2. Temperatura w złożu odpadów – 22 [°C].
3. Stała szybkość rozkładu odpadów k – 0,03 .

Wariant III :

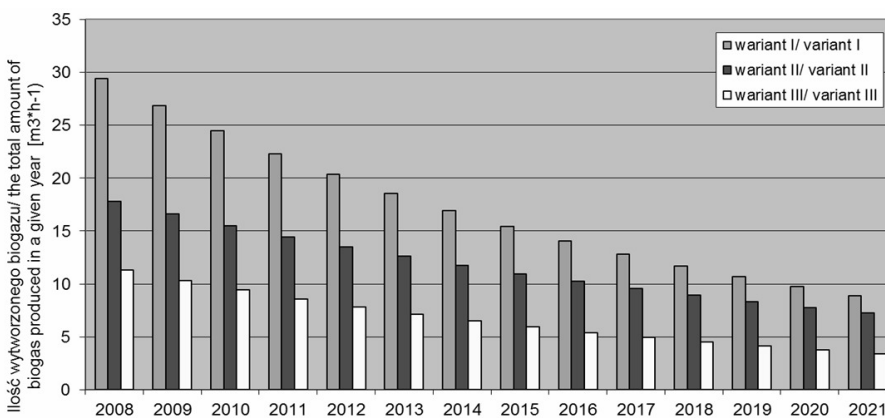
1. Średnia zawartość C_{org} – 112,2 [kg·Mg⁻¹odpadów].
2. Temperatura w złożu odpadów – 20 [°C].
3. Stała szybkość rozkładu odpadów k – 0,04 .

Otrzymane wyniki produkcji biogazu do 2021, obliczone dla trzech wariantów zestawiono w tabeli 1. Najkorzystniejszy do całkowitej produkcji biogazu jest wariant I, mniej korzystny wariant II i najmniej III. Ze składowiska w Makowie Mazowieckim (wariant III) można uzyskać od 2.271.701,9 m³ do 3.461.526,2 m³, co mieści się w przedziale od 103,3 m³ do 157,3 m³ przypadających na Mg zdeponowanych odpadów (rys. 1).



Rys. 1. Średnia wielkość produkcji biogazu [m³·Mg⁻¹]

Fig. 1. The average size of biogas production [m³·Mg⁻¹]



Rys. 2. Godzinowa produkcja biogazu [m³·h⁻¹]

Fig. 2. Hourly biogas production [m³·h⁻¹]

Tabela 1. Produkcja biogazu z odpadów komunalnych obliczona modelem Tabasarana

Table 1. Production of biogas from municipal waste calculated model Tabasarana

Rok	Q _{ci} [m ³]	Q _{r1} [m ³]	Q _{h1} [m ³]	Q _{c2} [m ³]	Q _{r2} [m ³]	Q _{h2} [m ³]	Q _{c3} [m ³]	Q _{r3} [m ³]	Q _{h3} [m ³]
2008	4037804,7	257664,9	29,4	2169636,3	155909,5	17,8	1554173,9	99176,7	11,3
2009	4272797,9	234993,2	26,8	2315139,6	145503,2	16,6	1644624,1	90450,2	10,3
2010	4487114,3	214316,4	24,5	2450931,1	135791,5	15,5	1727115,7	82491,6	9,4
2011	4682573,1	195458,8	22,3	2577659,1	126728,0	14,5	1802348,9	75233,2	8,6
2012	4860833,7	178260,6	20,3	2695928,6	118269,5	13,5	1870962,4	68613,5	7,8
2013	5023409,3	162575,6	18,6	2806304,1	110375,5	12,6	1933538,7	62576,3	7,1
2014	5171679,9	148270,6	16,9	2909312,5	103008,4	11,8	1990608,9	57070,2	6,5
2015	5306904,4	135224,5	15,4	3005445,5	96133,0	10,9	2042657,6	52048,7	5,9
2016	5430230,6	123326,2	14,1	3095162,1	89716,6	10,2	2090126,5	47468,9	5,4
2017	5542705,4	112474,8	12,8	3178890,5	83728,4	9,6	2133418,7	43292,2	4,9
2018	5645283,7	102578,3	11,7	3257030,4	78139,9	8,9	2172901,6	39482,9	4,5
2019	5738836,2	93552,5	10,7	3329954,7	72924,4	8,3	2208910,5	36008,9	4,1
2020	5824157,1	85320,9	9,7	3398011,7	68056,9	7,8	2241751,0	32840,5	3,7
2021	5901970,6	77813,6	8,9	3461526,2	63514,5	7,3	2271701,9	29950,9	3,4

Q_c – całkowita ilość wytworzonego biogazu/the total amount of biogas produced in a given year

Q_h – ilość biogazu wytworzonego w ciągu godziny/the amount of biogas generated per hour, 1, 2, 3 oznaczają odpowiednio wariant I, II i III/1, 2, 3 denote the variant I, II, III

Otrzymane wyniki są zbliżone do wyników otrzymanych przez Rettenbergera [11] i Czurejko [3] – 60 do 180 m³. Najwyższe wartości produkcji biogazu: rocznej (tab. 1) i godzinowej (rys. 2) otrzymanow roku 2008 we wszystkich trzech wariantach. W roku 2011 będzie wyprodukowane od ok. 75.233 do 126.728 m³ biogazu, tj. średnio od 8,6 do 14,46 m³ na godzinę.

Zwiększając zawartość C_{org} w odpadach komunalnych do 220 kg·Mg⁻¹, można uzyskać 5.901.970,6 m³ (wariant I), tj. o 3.630.268,7 m³, co stanowi 61,5 % więcej, niż w wariacie III. Czurejko [3] podaje, że potencjał gazowy składowiska odpadów zwiększa recyrkulacja odcieków. Powoduje ona wzrost współczynnika k z 0,03 do 0,11 i automatycznie zwiększa ilość produkowanego biogazu. Na badanym obiekcie odcieki nie są ujmowane, dlatego nie można zwiększyć omawianego współczynnika. Ponadto do przesyпки między warstwami odpadów używano piasek gruby. Pawłowska i in. [10] podają, że w takich warunkach ulega utlenianiu od 14 do 55% ogólnej ilości biogazu. W uwarunkowaniach składowiska w Makowie Mazowieckim w roku 2011 emisja gazu może wynieść w przedziale od 1,2 do 7,95 m³·h⁻¹. Jeżeli uwzględnimy jeszcze, że praktycznie możliwe jest pozyskanie tylko 50% ogólnej ilości biogazu [2, 3], to otrzymamy od około 0,6 dookoło 4 m³·h⁻¹, co jest wartością niewystarczającą by czynić postępowanie inwestycyjne związane z pozyskiwaniem biogazu. W warunkach natomiast o korzystniejszych parametrach wydajności np. w wariacie II lub jeszcze bardziej w I- pozyskiwanie biogazu może być zasadne.

WNIOSKI

1. Wytwarzanie biogazu, którego głównymi składnikami są CO₂ i CH₄, uwarunkowane jest zawartością substancji organicznej w złożu. Wyliczone ilości modelem Tabasarana dla obiektu w Makowie Mazowieckim (wariant III) nie gwarantują zasadności jego pozyskiwania.
2. Zagospodarowanie składowiska z wkomponowaniem w krajobraz leśny będzie równoważyć emisję dwutlenku węgla poborem tegoż gazu w procesie fotosyntezy.
3. Pozyskiwanie biogazu ze składowiska odpadów komunalnych winno być uwzględnione w planach jego organizacji, eksploatacji i w zagospodarowaniu przestrzennym.

PISMIENICTWO

1. Barzaconi L., Lopez I., Anido C. 1997. Hydrolysis constant and VFA inhibition In acidogenic phase of MSW anaerobic degradation. Water Science Technology: 479- 484.
2. Czajkowski M., Bartczak A., Markiewicz O., Markowska A. 2007. Porównanie kosztów zewnętrznych wybranych metod składowania stałych odpadów komunalnych. *Ekonomia i Środowisko*, 35/ 36: 346-351.
3. Czurejko M. 2006. Biogaz składowiskowy jako źródło alternatywnej energii. *Energetyka*, 10: 777-781.

4. El-Fadel M., Fidikakis A.N., Leckie J.O. 1996. Transport of gas and heat In sanitary land fill I, Model formulation. Waste Management: 483-504.
5. Dudek J., Klimek P. 2008. Doświadczenie związane z energetycznym wykorzystaniem biogazu ze składowisk odpadów komunalnych. *Polityka Energetyczna*, 11, 2: 25-32.
6. Dudek J., Rachwalski J. 1997. Migracja gazu wysypiskowego ze składowiska odpadów komunalnych na tereny przyległe – metody ograniczenia zagrożenia. *Ochrona Powietrza i Problemy Odpadów*, 2: 69-84.
7. Falkowska I., Lewandowska A. 2009. *Aerozole i gazy w atmosferze ziemskiej- zmiany globalne*. Wyd. Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk.
8. Klimek P., Kołodziejczak G. 2007. Potencjał gazowy składowisk odpadów komunalnych a możliwość jego wykorzystania. INiG.
9. Lewandowski W.M. 2007. Proekologiczne odnawialne źródła energii. *WNT*: 350-372.
10. Pawłowska M., Szkutnik E., Wasąg H., Stępniewski W. 2005. Wykorzystanie metanotrofii do redukcji emisji metanu ze składowisk odpadów. *Mat. VII Ogólnopolskiej Konf. Naukowej, Ustronie Morskie*.
11. Rettenberger G. 1992. Der Deponiegashaushalt in Alttablagerungen- Leitfaden Deponiegas. Zentraler Fachdienst Wasser- Boden- Abfall- Altlasten bei der Landesanstalt für Umweltschutz Baden – Württemberg: 1-16.
12. Sadecka Z. 2002. Toksyczność i biodegradacja insektycydów w procesie fermentacji metanowej osadów ściekowych. Wydawnictwo Naukowo- Techniczne UZ, Zielona Góra.
13. Sadecka Z. 2010. Podstawy biologicznego oczyszczania ścieków. Seidel – Przywecki sp. z o.o.
14. Stępnia S. 2006. Ustalenie potencjału gazowego. *Metody określania prognoz wysypisk komunalnych. Przegląd Energetyczny* 4 (44): 33-35.
15. Schuster T. 1999. Analiza metod prognozowania produktywności gazowej wysypisk odpadów komunalnych i opracowanie programu najlepiej odpowiadającego krajowym warunkom klimatycznym oraz sposobem składowania odpadów. IGNiG.
16. Tabasaran O. 1994. *Siedlungsabfaelle. Abfallwirtschaft, Abfalltechnik*, Ernst & Sohn. Berlin.
17. Wandrasz J.W., Landrat M. 2002. Model matematyczny wytwarzania biogazu w składowiskach odpadów. *Ochrona Środowiska*, 2(85): 13-16.
18. Zacharof A.I., Butler A.P. 2004. Stochastic modeling of landfill processes incorporating waste heterogeneity and data uncertainty. *Waste Management*: 241-250.
19. Zalewska- Bartosz J. 2006. Zunifikowana metodyka pomiarów składu i emisji biogazu w celu weryfikacji prognozy produktywności gazowej na składowiskach odpadów komunalnych. INiG.

ESTIMATION OF BIOGAS EMISSIONS AT A MUNICIPAL LANDFILL SITE

Abstract: The paper addresses the problem of biogas emissions. The main components of the studied biogas are greenhouse gases, methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂). In view of the renewable energy potential of biogas generation, the content of CH₄ and CO₂ in municipal waste landfill gas was determined in the study, using the Tabasaran model. Based on data acquired at the closed municipal landfill site in Maków Mazowiecki, it was shown that in 2011 biogas emissions could range from 1.2 to 7.95 m³·h⁻¹. Since biogas production rate oscillates around 50%, the noted biogas quantity does not ensure the economic viability of the process. The expected profitability could be achieved for optimal yield parameters, as shown by data obtained in the compared variants, particularly the first.

Keywords: municipal waste, landfill site, estimation, biogas emission.