



Potencjał produkcji biogazu z odpadów we wrocławskim Ogrodzie Zoologicznym

Anna Dębska^{}, Sebastian Koziółek^{**}, Jerzy Bieniek^{*},
Andrzej Białowiec^{*}*

^{}Uniwersytet Przyrodniczy, Wrocław*

*^{**}Politechnika Wroclawska*

1. Wprowadzenie

Nowoczesne ogrody zoologiczne są czymś więcej niż tylko me-
nażeriami. Podejmują wysiłek w zakresie ochrony zasobów naturalnych
i bioróżnorodności. Są także miejscem badań i edukacji. Światowa orga-
nizacja ogrodów zoologicznych i akwariów wskazuje, iż każdego roku
około 700 mln ludzi odwiedza ogrody zoologiczne, co stanowi 11%
światowej populacji.

Negatywnym aspektem funkcjonowania zróżnicowanych i kom-
pleksowych habitatów jest wysokie zapotrzebowanie energii, wody i in-
nych zasobów. Przykładem obiektów o wysokim zużyciu energii są po-
mieszczenia, w których panują tropikalne warunki przez cały rok. Nie-
mniej jednak, każdy ogród zoologiczny posiada własną specyfikę, co
w konsekwencji prowadzi do zróżnicowania w zużyciu zasobów pomiędzy
ogrodami zoologicznymi. Analizy wykonane dla ogrodów w Niemczech,
Austrii i Szwajcarii wskazują na szeroki zakres konsumpcji energii w od-
niesieniu do jednostkowej powierzchni ogrodu lub jednego zwierzęcia
(Kusch 2012a, Simon 2010). Według tych danych zapotrzebowanie na
energię elektryczną ($n = 11$) wynosi od 0,52 do 26,32 kWh/(m²a), ze śred-
nią wartością 7,42 kWh/(m²a). W odniesieniu do zwierzęcia konsumpcja
prądu mieści się w zakresie od 26,13 do 1978,38 kWh/(zwierz. a), ze śred-
nią wartością 553,09 kWh/(zwierz. a). Zapotrzebowanie na ciepło ($n = 12$)
mieści się w zakresie od 0,31 do 95,45 kWh/(m²a), ze średnią wartością

19,43 kWh/(m²·a), a w przeliczeniu na zwierzę od 36,29 do 2445,95 kWh/(zwierz. a), ze średnią wartością 1012,23 kWh/(zwierz. a).

Innym z oddziaływań ogrodów zoologicznych na środowisko są wytwarzane w nich odpady. Odpady te dzielą się na cztery kategorie: odchody zwierząt, odpady z pielęgnacji terenów zielonych, odpady gastronomiczne oraz odpady wytworzone przez zwiedzających. Ze względu na organiczny charakter tych odpadów jednym z pożądaných kierunków ich zagospodarowania jest wykorzystanie energetyczne. Wytworzona energia może być użyta na potrzeby zoo. Wykorzystanie powstającej na terenie ogrodu biomasy oraz generowanych przez zwiedzających odpadów, stanowi wytworzenie i wykorzystanie na potrzeby ogrodu energii ze źródeł odnawialnych. Dodatkową korzyścią jest silna edukacyjna misja dotycząca zagospodarowania biomasy, odpadów, wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych, zrównoważonego rozwoju, która skierowana jest do szerokich grup społecznych, osób w różnym wieku. Samo użycie biomasy do wytwarzania energii ze źródła odnawialnego jest znane od lat, niemniej jednak ze względu na bardzo niską eksplorację naukową oraz inżynierską problematyka zagospodarowania biomasy odpadowej z ogrodów zoologicznych otwiera nowe obszary dla innowacji i wdrożeń. Przykładowo, w ogrodzie zoologicznym w Denver (USA) wytworzone z odchodów zwierzęcych oraz odpadów wytwarzanych przez zwiedzających pelety poddawane są zgazowaniu. Najczęściej odpadowa biomasa w ogrodach zoologicznych jest kompostowana lub też przekazywana zewnętrznemu podmiotowi do zagospodarowania, jak to ma miejsce obecnie w Ogrodzie Zoologicznym we Wrocławiu.

Ze względu na to, iż wytwarzane na terenie zoo odpady mają charakter organiczny oraz, iż są one podatne na rozkład biologiczny, możliwe jest wytwarzanie z nich biogazu, który dalej może być wykorzystany jako źródło energii elektrycznej, ciepła czy jako paliwo w pojazdach poruszających się po ogrodzie (Simon 2010, Kusch 2012a, Klasson i Nghiem 2003). Beztlenowe przetwarzanie biomasy i odpadów z energetycznym wykorzystaniem biogazu zastosowano w ogrodach zoologicznych w Monachium, Heidelbergu, Toronto, czy też w Johannesburgu (Kusch, 2012b). Kusch (2012b) wskazuje także, iż oprócz ekonomicznych aspektów poprawy efektywności energetycznej ogrodu zoologicznego, występują dodatkowe dwie korzyści związane z energetycznym wykorzystaniem biomasy i odpadów powstających w zoo: wytworzenie pozytywnego wizerunku ogrodu zoologicznego, jako obiektu o niskim

oddziaływaniu na środowisko, wypełnienie misji edukacyjnej poprzez przybliżenie informacji o możliwości pozyskiwaniu energii ze źródeł odnawialnych i umożliwienie zwiedzającym zapoznania się z instalacją. Z tego względu podjęto prace badawczo-rozwojowe, których celem jest zaprojektowanie i skonstruowanie mikrobiogazowni zasilanej odpadami wytwarzanymi na terenie Ogrodu Zoologicznego we Wrocławiu. W niniejszym artykule zaprezentowano szacunki możliwej do wytworzenia ilości biogazu, w oparciu o własne badania potencjału produkcji biogazu z odchodów różnych gatunków zwierząt oraz dane ilościowe wytwarzanych odpadów we wrocławskim Ogrodzie Zoologicznym.

2. Materiały i metody

2.1. Opis obiektu badań

We wrocławskim Ogrodzie Zoologicznym odpadową biomasę stanowią głównie odchody zwierząt. Ze względu na odmienną charakterystykę, odchody zwierząt roślinożernych i mięsożernych są zbierane oddzielnie. Dodatkowym strumieniem biomasy w ogrodach zoologicznych są pozostałości pożywienia zwierząt, ściółka, odpady zielone, odpady z restauracji, odpady ze zbiorników bezodpływowych oraz odpady opakowań i odpady komunalne. W Ogrodzie Zoologicznym we Wrocławiu biomasa odchodów zwierzęcych pochodzi od ssaków i ptaków. Odchody od pozostałych zwierząt, ze względu na niewielkie ilości odprowadzane są do kanalizacji miejskiej. Odchody zwierząt dużych zmieszane z resztkami siana i słomy w ilości ok 350 Mg rocznie trafiają na specjalną płytę gnojową, skąd obecnie wywożone są sukcesywnie przez podwrocławskich rolników na ich pola. Odchody pozostałych zwierząt ze ścięciami z wybiegów – resztkami karmy, piórami, piaskiem, korą itp. trafiają do kontenerów i wywożone są przez zewnętrzny podmiot gospodarczy jako odpady zmieszane.

Wrocławskie ZOO zajmuje powierzchnię 33 ha. Z tego 1/3 zajmują pawilony i utwardzone alejki oraz stawy i baseny. Pozostała powierzchnia to tereny zielone – część z nich to wybiegi zwierząt a część to klomby i trawniki. Odpady zielone – trawa z trawników, liście (ok. 200 Mg rocznie) trafiają na płytę kompostową na zapleczu zoo, skąd po kilku latach w formie próchnicy trafiają na tereny zielone zoo. Resztki gałęzi są zrąbkowane i trafiają na wybiegi zwierząt jako ściółka albo wy-

sypywane są na alejki, bądź pod rośliny. Występuje nierównomierność w produkcji biomasy w ciągu roku. 350 Mg stanowi obornik (odchody zwierząt kopytnych zmieszane ze słomą, sianem i trocinami). Produkowany jest on przez cały rok, ale w miesiącach letnich – od połowy maja do połowy września, gdy zwierzęta większość czasu spędzają na wybiegach, ze względu na jego ususzanie jest go mniej – ok. 50 Mg. Natomiast pozostałe 300 Mg produkowane jest poza sezonem letnim. Liście, zeschła trawa itp. gromadzone są w ilości około 150 Mg głównie w miesiącach jesiennych (X-XII). Natomiast skoszona trawa i resztki z ogrodnictwa w miesiącach V-VII oraz X-XI w ilości ok. 50 Mg. Szacuje się także, że w odpadkach z innych działów zoo (ptaki, małpy, małe ssaki terrarium, zwierzęta drapieżne) oraz w odpadkach z barów jest ok 50% odpadów biologicznych (odchody zwierząt zmieszane z korą, trocinami, torfem, sianem itp. ściółką, resztki karmy, odpadki z kuchni). Te odpady zmieszane są z pozostałymi odpadami nieorganicznymi (piasek) i łącznie rocznie jest ich ok 260 Mg (Białowiec i Koziołek, 2014).

Zródłem odpadów komunalnych jest 160 pracowników ogrodu oraz około milion zwiedzających w ciągu każdego roku. Odpady komunalne są wyrzucane bez segregacji przez zwiedzających do pojemników rozstawionych na terenie zoo. Pojemniki opróżniane są codziennie, a następnie wstępnie segregowane przez pracowników zoo, na opakowania, które trafiają do prasokontenera oraz odpady zmieszane. Oba rodzaje są odbierane przez zewnętrzne podmioty gospodarcze. Łączna masa odpadów komunalnych powstających na terenie zoo to 130 Mg/rok. W zoo zlokalizowanych jest 5 dużych lokali gastronomicznych (dwa z nich prowadzą działalność całoroczną). Oprócz tego w sezonie letnim działa kilka lodziarni a w kilku punktach rozstawione są całoroczne automaty sprzedające napoje w kubkach, puszkach, bądź w butelkach oraz słodycze. Wszelkie odpady z tych miejsc – w tym resztki kuchenne trafiają do kontenerów jako odpady zmieszane. Oddzielane są tylko opakowania objętościowe, które trafiają do prasokontenera.

Wrocławski Ogród Zoologiczny w roku 2013 zużył 1700 MWh energii elektrycznej oraz 16800 GJ ciepła (4666,67 MWh). W przeliczeniu na powierzchnię 33 ha odpowiada to 5,15 kWh/(m²·a) energii elektrycznej i 14,14 kWh/(m²·a) ciepła. Dane te wskazują, iż zużycie prądu i ciepła w 2013 roku we Wrocławskim ZOO nie przekroczyło średnich wartości dla ogrodów niemieckich, austriackich i szwajcarskich. We

wrocławskim Ogrodzie Zoologicznym znajduje się 4091 sztuk zwierząt. Zużycie prądu w przeliczeniu na zwierzę wyniosło w 2013 roku 405,5 kWh/(zwierz. a), a ciepła 1140,7 kWh/(zwierz. a). Wartości te zbliżone są do wartości średnich zużycia prądu i ciepła w ogrodach niemieckich, austriackich i szwajcarskich (Kusch 2012a, Simon 2010).

2.2. Badania potencjału produkcji biogazu z odchodów zwierząt z wrocławskiego Ogrodu Zoologicznego

Przeprowadzono badania potencjału produkcji biogazu z odchodów zwierząt z Wrocławskiego Ogrodu Zoologicznego. Próbkę, które zostały wykorzystane do doświadczenia pochodziły od trzech gatunków zwierząt roślinożernych: słonia, nosorożca i tapira, trzech gatunków mięsożernych i jednego gatunku zwierząt wszystkożernych: niedźwiedź. Badaniom poddano także odchody pochodzące z woiher psasich.

W pierwszej kolejności pobrane próbki odchodów poddano anali-zom właściwości podstawowych:

- suchej masy,
- suchej masy organicznej.

Analizy wykonano zgodnie z PN-93/Z-15008/02

Potencjał produkcji biogazu wykonano z wykorzystaniem metody DIN 38 414-S8. Do zaszczeplenia odchodów zwierzęcych został użyty przefermentowany osad, pochodzący z oczyszczalni ścieków w Jastrzębiu Zdroju. Zaszczepka nie posiadała inhibitorów (tab. 1)

Biogaz wytwarzano metodą fermentacji metanowej, w warunkach mezofilowych w temperaturze 37,5°C, a czas zatrzymania odchodów w reaktorze HRT mieścił się w zakresie od 35 do 38 dni (do uzyskania 90% odgazowania). Pomiaru wykonano w 6 powtórzeniach. Fermentory były ogrzewane poprzez płaszcz wodny. Fermentory zostały przedmu-chane azotem, w celu usunięcia powietrza. Na górną część butli nałożono rurkę eudiometru. Od tego momentu dokonywano pomiarów ilościowych i jakościowych wytwarzanego biogazu.

Za każdym razem przed przystąpieniem do odczytu objętości ga-zu na skali eudiometru, mieszana była zawartość butli, ruchami kołowymi. Oprócz objętości gazu, za pomocą analizatora GA 2000 firmy Geo-tech mierzono również jego skład. Analizowano zawartość w biogazie następujących składników: CH₄, CO₂, O₂, N₂, H₂S, NH₃

Tabela 1. Zestawienie ilości substratu i zaszczepki użytej w badaniu z uwzględnieniem liczby powtórzeń n (w każdym z powtórzeń przypisanych do nastawy I lub II zastosowana tą sama proporcje pomiędzy substratami).

Table 1. Presentation of amounts of substrates, and inoculum used in experiments including number of repetitions n (in each set of the experiment I, and II the same proportion between substrate and inoculum were used).

Zwierzę	I nastawa (n = 3)		II nastawa (n = 3)	
	Substrat [g]	Zaszczepka [g]	Substrat [g]	Zaszczepka [g]
Lew angolski	55	345	70	330
Wilk	45	355	50	350
Tygrys sumatrzański	45	355	75	325
Słoń indyjski	50	350	50	350
Nosorożec indyjski	60	340	80	320
Tapir anta	140	250	180	220
Niedźwiedź brunatny	70	330	80	340
Ptaki	35	365	40	360

W początkowym okresie, objętość gazu była odczytywana codziennie. Wraz ze zmniejszeniem się intensywności wytwarzania biogazu, odczyty były wykonywane co trzy dni. W trakcie badań rejestrowano temperaturę i ciśnienie otoczenia, dzięki czemu znormalizowano uzyskane wyniki produkcji biogazu.

Przeprowadzono modelowanie przebiegu produkcji biogazu. Wyznaczono potencjał produkcji biogazu, przy założonym poziomie istotności ($p < 0,05$). Do wyznaczenia potencjału produkcji biogazu zastosowano równanie pierwszego rzędu, zakładając, że szybkość reakcji jest wprost proporcjonalna do zawartości frakcji biologicznie rozkładalnych oraz, że produkcja biogazu jest wynikiem asymilacji węgla organicznego przez mikroorganizmy (Czurejno i Gaj 2005, Gaj i Cybulska 2002a, Gaj i Cybulska 2002b). Potencjał produkcji biogazu B_0 wyznaczono zgodnie z równaniem:

$$B_t = B_0 \cdot (1 - e^{-k \cdot t})$$

gdzie:

B_t – ilość biogazu wyprodukowana z jednostki masy odpadów po czasie t [$\text{dm}^3/\text{kg s.m.o.}$],

B_0 – potencjalna produkcja biogazu z jednostki masy odpadów [$\text{dm}^3/\text{kg s.m.o.}$],

k – stała szybkości produkcji biogazu [d^{-1}],

t – czas [d].

Estymację parametrów kinetycznych wykonano z zastosowaniem metody regresji nieliniowej, w której stopień wyjaśnienia dopasowania funkcji do danych testowano poprzez oszacowanie współczynnika determinacji R^2 . Estymację parametrów kinetycznych wykonano z wykorzystaniem oprogramowania Statistica 10 (tab. 2).

Tabela 2. Średnie (\pm odchylenie standardowe) parametry kinetyczne produkcji biogazu, dla $n = 6$, przy danym współczynniku determinacji R^2

Table 2. Mean values \pm standard deviation) of kinetic parameters of biogas production, for $n = 6$, and with estimated determination coefficient R^2

Zwierzę	Parametry kinetyczne		
	Potencjał produkcji biogazu [dm ³ /kg s.m.o.]	Stała szybkości reakcji k [h ⁻¹]	Współczynnik determinacji R^2
Lew angolski	402,4 \pm 148,5	0,132 \pm 0,047	0,996 \pm 0,002
Wilk	345,8 \pm 149,0	0,163 \pm 0,060	0,993 \pm 0,003
Tygrys sumatrzański	301,6 \pm 141,56	0,158 \pm 0,073	0,995 \pm 0,002
Słoń indyjski	491,5 \pm 34,9	0,060 \pm 0,006	0,997 \pm 0,001
Nosorożec indyjski	560,7 \pm 139,1	0,045 \pm 0,018	0,994 \pm 0,003
Tapir anta	480,5 \pm 65,6	0,060 \pm 0,10	0,993 \pm 0,003
Niedźwiedź brunatny	556,7 \pm 86,4	0,222 \pm 0,362	0,981 \pm 0,011
Ptaki	247,1 \pm 178,8	0,223 \pm 0,065	0,995 \pm 0,001

3. Wyniki i dyskusja

3.1. Podstawowa charakterystyka odchodów zwierząt z ogrodu zoologicznego

Wśród zwierząt mięsożernych odchody wilka charakteryzowały się najwyższą procentową zawartością suchej masy, ale także najmniejszym udziałem suchej masy organicznej. Odchody lwa angolskiego odznaczają się natomiast najniższą zawartością suchej masy. Najwyższą zawartość materii organicznej zanotowano w odchodach tygrysa sumatrzańskiego (tab. 3).

Zaobserwowano różnicę w suchej masie w odchodach zwierząt roślinożernych w porównaniu do mięsożernych. Odchody zwierząt mięsożernych były mniej wilgotne, jednakże odchody zwierząt roślinożernych charakteryzowały się wyższą zawartością materii organicznej. Badania wykazały, iż odchody niedźwiedzia posiadały bardzo niską zawartość suchej masy, przy jednoczesnym wysokim udziale materii organicz-

nej w suchej masie. W przypadku ptaków zaobserwowano, odwrotnie niż u niedźwiedzia, wysoki udział suchej masy, przy jednocześnie niskiej zawartości materii organicznej (tab. 3).

Tabela 3. Podstawowe właściwości odchodów zwierząt z wrocławskiego Ogrodu Zoologicznego – podano wartości średnie oraz odchylenia standardowe \pm dla liczby powtórzeń $n = 6$

Table 3. The basic characteristics of animal manure from Wrocław Zoological Garden – the mean values and standard deviations \pm for number of repetitions $n = 6$ have been given

Zwierzę	Sucha masa [%]	Średnia sucha masa odchodów [%]	Sucha masa organiczna [% s.m.]	Średnia sucha masa organiczna odchodów z poszczególnych grup zwierząt [% s.m.]
Lew angolski	43,7 \pm 0,6	49,4 \pm 7,0	29,8 \pm 0,9	29,7 \pm 5,4
Wilk	57,2 \pm 0,8		24,3 \pm 0,6	
Tygrys sumatrzeński	47,4 \pm 1,1		35 \pm 0,9	
Słoń indyjski	22,4 \pm 0,7	23,1 \pm 0,6	52,1 \pm 0,8	53,7 \pm 2,4
Nosorożec indyjski	23,4 \pm 2,3		56,4 \pm 1,7	
Tapir anta	23,4 \pm 2,1		52,5 \pm 1,8	
Niedźwiedź brunatny	11,3 \pm 4,2	11,3 \pm 4,2	87,3 \pm 3,2	87,3 \pm 3,2
Ptaki	79,7 \pm 4,1	79,7 \pm 4,1	25,4 \pm 4,2	25,4 \pm 4,2

3.2. Potencjał produkcji biogazu z odchodów zwierząt z ogrodu zoologicznego

Potencjał produkcji biogazu mieścił się w zakresie od 247,1 do 560,7 dm³/kg s.m.o., przy czym najwyższą wartość zanotowano w przypadku nosorożca i niedźwiedzia, a najniższą ptaków (tab. 2). Potencjał produkcji biogazu zwierząt mięsożernych był podobny i mieścił się w zakresie od 301,6 do 402,4 dm³/kg s.m.o. W przypadku zwierząt roślinożernych ilość wytworzonego biogazu zmieniała się w zakresie od 480,5 do 560,7 dm³/kg s.m.o. (tab. 2).

Badania wykazały, iż w przeliczeniu na mokłą masę, najwyższym potencjałem produkcji biogazu charakteryzowały się odchody zwierząt roślinożernych, z których średni potencjał produkcji biogazu wyniósł 63,5 dm³/kg m.m. (tab. 4). Średnia ważona potencjału produkcji biogazu z odchodów od wszystkich zwierząt oszacowana została na poziomie

60,4 dm³/kg m.m. Wartość ta wykorzystana została do szacowania całkowitego potencjału produkcji biogazu we Wrocławskim Ogrodzie Zoologicznym.

Tabela 4. Średni (± odchylenie standardowe) potencjał produkcji biogazu w przeliczeniu na suchą masę organiczną i mokra masę

Table 4. The mean potential of biogas production on dry organic matter, and on wet matter

Zwierzę	Średni potencjał produkcji biogazu dla grup zwierząt [dm ³ /kg s.m.o.]	Średni potencjał produkcji biogazu dla grup zwierząt [dm ³ /kg m.m.]	Szacunkowy udział masy odchodów od poszczególnych grup zwierząt w ogólnej masie odchodów [%]
Lew angolski	350±50,5	50,2±2,2	Mięsożerne 15%
Wilk			
Tygrys sumatrzański			
Słoń indyjski	510,9±43,5	63,5±9,2	Roślinożerne 75%
Nosorożec indyjski			
Tapir anta			
Niedźwiedź brunatny	556,7±86,4	54,9±6,3	Wszystkożerne 5%
Ptaki	247,1±178,8	50,0±4,8	Ptaki 5%
Średnia arytmetyczna	423,3±218,9	55,7±6,3	–
Średnia ważona	475,9	60,4	–

3.3. Potencjał produkcji biogazu z innych rodzajów odpadów powstających w ogrodach zoologicznych

Do szacowania potencjału produkcji biogazu z odpadów zielonych oraz odpadów gastronomicznych wykorzystano dane dostępne w literaturze. Na terenie ogrodów zoologicznych powstają odpady zielone z pielęgnacji zieleni, ogrodów. Produkcja biogazu z odpadów zielonych stanowi około 490 m³/Mg suchej masy organicznej, co przy średniej wilgotności tych odpadów na poziomie 77% i zawartości materii organicznej wynoszącej 88% suchej masy, ilość możliwego do uzyskania biogazu wynosi około 99 dm³/kg mokrej odpadów zielonych (Agrobiogas 2007S2010).

Kolejnym istotnym źródłem odpadów powstających na terenie ogrodów zoologicznych, mogących stanowić wsad do biogazowni są odpady spożywcze wytwarzane w restauracjach. Ich potencjał produkcji biogazu jest wysoki i wynosi 530 dm³/kg suchej masy organicznej, co przy średniej wilgotności tych odpadów na poziomie 81% i zawartości

materii organicznej wynoszącej 72% suchej masy, ilość możliwego do uzyskania biogazu wynosi około 73 dm³/kg mokrej odpadów żywnościowych (Agrobiogas 2007S2010).

4. Potencjał produkcji biogazu we wrocławskim Ogrodzie Zoologicznym

Ze względu na dużą różnorodność biomasy i odpadów z ogrodu zoologicznego proces fermentacji będzie miał charakter ko-fermentacji, tj. wspólnego przetwarzania biologicznego materiałów o różnej charakterystyce fizycznej i chemicznej. Składnikami będą trzy rodzaje materiałów:

- 350 Mg odchodów zwierzęcych (43,2% całości),
- 200 Mg odpadów zielonych (24,7% całości),
- 260 Mg odpadów żywnościowych i innych bioodpadów (32,1% całości).

Łącznie przetwarzanych będzie 810 Mg/rok.

Przyjmując zatem średnią produkcję biogazu z odchodów zwierzęcych na poziomie 60,4 m³/Mg mokrej masy wsadu (tab. 3), z odpadów zielonych 99 m³/Mg mokrej masy wsadu i odpadów spożywczych na poziomie 73 m³/Mg mokrej masy wsadu wyliczono średnią ważoną produkcję biogazu 74,0 m³/Mg mokrej masy wsadu. Roczna produkcja biogazu wyniesie zatem 59940 m³/rok. Przy założeniu 8000 godzin pracy biogazowni w ciągu roku, oraz udziale metanu w biogazie na poziomie średnim 55% daje to produkcję godzinową metanu na poziomie 4,1 m³/h. Przy założonej kaloryczności metanu na poziomie 35,7 MJ/m³ energia zawarta w biogazie wynosi około 147 MJ, co odpowiada 40,9 kWh. Przy założonej sprawności urządzenia zamieniającego energię chemiczną na prąd elektryczny 30% możliwy do wyprodukowania prąd wynosi 12,3 kWh. Wprowadzenie układu kogeneracyjnego umożliwi także uzyskanie około 50% ciepła, co stanowi 20,5 kWh. Łącznie w ciągu roku możliwe jest wyprodukowanie 98,4 MWh energii elektrycznej i 590,4 GJ ciepła. Zauważyć należy, iż powyższe szacunki oparte są na założeniu, iż produkcja biogazu stanowić będzie wypadkową, średnią ważoną, potencjałów produkcji biogazu z poszczególnych rodzajów odchodów. W rzeczywistości produkcja biogazu uzyskana po zmieszaniu wszystkich rodzajów odchodów w podobnych proporcjach może być inna, ze względu

na potencjalne korzystne i niekorzystne oddziaływania zawartych w odchodach komponentów. Z tego względu, oraz ze względu na nieznaną jak dotąd wpływ takich parametrów jak stosunek C/N, kwasowość, zasadowość, zawartość lotnych kwasów tłuszczowych, odczyn konieczna jest kontynuacja podjętych badań zarówno w reaktorach wsadowych (szacowanie kinetyki i potencjału produkcji biogazu) jak i w reaktorach przepływowych w celu doboru parametrów technologicznych procesu.

5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały, iż zwierzęta roślinożerne charakteryzują się względnie najwyższym potencjałem produkcji biogazu zarówno w przeliczeniu na suchą masę organiczną jak na mokłą masę. Wykazano także, iż przy łącznej produkcji odpadów na terenie wrocławskiego Ogrodu Zoologicznego wielkość potencjału produkcji biogazu jest niewielka. Szacowana, godzinowa produkcja metanu jest na poziomie $4,1 \text{ m}^3/\text{h}$. Z tego względu ewentualne rozwiązania technologiczne oparte powinny być na koncepcji mikrobiogazowni, chyba że możliwe jest dostarczenie znacznych ilości biomasy z zewnątrz. Ze względu na stosunkowo niski potencjał produkcji biogazu, ewentualna mikrobiogazownia spełniać będzie rolę instalacji do przetwarzania, odzysku odpadów oraz rolę edukacyjną. Nie należy się spodziewać znaczącego pokrycia zapotrzebowania ogrodu zoologicznego z tego źródła energii. Niemniej jednak, obiekt taki może mieć duże znaczenie edukacyjne i promujące właściwe postępowanie z odpadami oraz pozyskiwanie energii ze źródeł odnawialnych.

Ze względu na niewielką liczbę badań nad fermentacją metanową odpadów powstałych w ogrodach zoologicznych, kinetyka produkcji biogazu z odchodów pochodzących od wielu zwierząt egzotycznych jest nieznaną. Dodatkowo, w ogrodach zoologicznych, jako rezerwuarach bioróżnorodności, występuje wysokie bogactwo fauny, co stwarza dogodne warunki do prowadzenia badań nad wieloma gatunkami zwierząt, nie tylko największymi producentami odchodów, w aspekcie potencjału i kinetyki produkcji biogazu z odchodów.

W przypadku podjęcia decyzji o budowie i uruchomieniu mikrobiogazowni zasilanej odpadami z ogrodu zoologicznego skorzystać można z prezentowanych w literaturze rekomendacji (Kusch 2012a):

- Zastosowanie suchej fermentacji metanowej – jako przykład podaje instalację w Heidelbergu.
- Stosowanie technologii prostych i odpornych mechanicznie i procesowo na różne rodzaje substratów (Sidelko i Chmielińska-Bernacka, 2013)
- Zastosowanie kofermentacji z różnymi rodzajami odpadów, np. odpady z restauracji, w celu poprawy efektywności produkcji biogazu.
- Zastosowanie kogeneracji przy energetycznym wykorzystaniu biogazu.
- Energetyczne wykorzystanie pozostałego pofermentu.

Kusch (2012b) wskazuje na następujące techniczne i ekonomiczne problemy związane z wytwarzaniem biogazu z biomasy odpadów z ogrodów zoologicznych:

- Dostępność biomasy i odpadów jest limitowana sezonowością ich powstawania.
- Istnieje niewielka ilość danych naukowych i eksploatacyjnych dotyczących produkcji biogazu z poszczególnych substratów powstających na terenie ZOO jak również ich mieszanin, z uwzględnieniem prawidłowego zbilansowania pierwiastkowego substratów do procesu fermentacji metanowej.
- Ze względu na charakterystykę odchodów zwierzęcych, szczególnie obornika od zwierząt roślinożernych zawierającego materię lignocelulozową oraz odpadów zielonych tj. trawa, kora, trociny, substrat kierowany bez obróbki wstępnej do biogazowni jest trudnodostępny dla mikroorganizmów
- W odpadach dodatkowo występować może znaczna ilość materiałów mineralnych: kamieni, piasku co czyni ten materiał mało przydatnym do fermentacji mokrej.
- Ze względu na wymienione zróżnicowanie biomasy powstawać mogą problemy z rozdzielaniem się mieszaniny w reaktorze, co wykazano w przypadku fermentacji obornika końskiego (Kusch i in. 2008). Wymaga to stosowania wydajnych systemów homogenizacji i mieszania.

Kusch (2012b) wskazuje także, iż oprócz ekonomicznych aspektów poprawy efektywności energetycznej ogrodu zoologicznego, występują dodatkowe dwie korzyści związane z energetycznym wykorzystaniem biomasy i odpadów powstających w zoo: wytworzenie pozytywne-

go wizerunku ogrodu zoologicznego, jako obiektu o niskim oddziaływaniu na środowisko, wypełnienie misji edukacyjnej poprzez przybliżanie informacji o możliwości pozyskiwaniu energii ze źródeł odnawialnych i umożliwienie zwiedzającym zapoznania się z instalacją.

Podziękowania

Autorzy składają podziękowania Prezesowi Zarządu Ogrodu Zoologicznego we Wrocławiu Panu Radosławowi Ratajszczakowi oraz pracownikom za umożliwienie przeprowadzenia badań i pomoc przy ich realizacji.

Literatura

- Białowiec, A., Koziołek, S. (2014). Jak zagospodarować odpady z ogrodów zoologicznych? *Przegląd komunalny*, 11(278)/2014.
- Czurejno, M., Gaj, K. (2005). Modelowanie gazowego i energetycznego potencjału składowisk odpadów komunalnych. *Ochrona Powietrza i Problemy Odpadów*, 39, 3.
- Gaj, K., Cybulska, H. (2002a). Modelowanie emisji biogazu ze składowisk odpadów komunalnych. Część 1. Podstawy modelowania, analiza wybranych modeli i zakresy stosowanych parametrów. *Chemia i inżynieria ekologiczna*, 9, Nr 1.
- Gaj, K., Cybulska, H. (2002b). Modelowanie emisji biogazu ze składowisk odpadów komunalnych. Część 2. Algorytm obliczeniowy. *Chemia i inżynieria ekologiczna*, 9, Nr 2-3.
- Klasson, K.T, Nghiem, N.P. (2003). *Energy production from Zoo animal wastes*. Tennessee: Oak Ridge National laboratory.
- Kusch, S. (2012a). Organic wastes as energy source in zoos. *Proceedings, WasteEng 2012 – 4th International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorization, Porto, Portugal, 10-13 Sept 2012*, 1399-1404.
- Kusch, S. (2012b). Energy Efficiency of Zoos: An Interdisciplinary Challenge with Special Benefits in Urban Environments. *Advanced Research in Scientific Areas*, 2012, 1353-1356.
- Kusch, S., Oeschner, H. Jungbluth, T. (2008). Biogas production with horse dung in solidphase digestion systems. *Bioresource Technology*, 99, 5.
- Norma PN-Z-15008-02:1993, tytuł: Odpady komunalne stałe – Badania właściwości paliwowych – Oznaczanie wilgotności Całkowitej.
- Sidelko, R., Chmielińska-Bernacka, A. (2013). Zastosowanie reaktora kompaktowego do fermentacji metanowej odpadów komunalnych. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 15, 683-693.

Simon, L. (2010). *Wie Zoos Energiefressern den Riegen vorschieben*. Booklet published by Zoo Osnabrück

U Agrobiogas. 2007S2010. Europejska inicjatywa instytucji badawczo rozwojowych na rzecz zwiększenia efektywności wykorzystania biogazu. Projekt 6. Programu Ramowego Badań i Rozwoju Unii Europejskiej. <http://www.euSagrobiogas.net/index.php>

The Biogas Production Potential from Wrocław Zoological Garden

Abstract

The article presents the functional conditions of Wrocław Zoological Garden. The current way of biowaste utilisation, which is focused on transferring the waste towards outside parties or also managing them in the most simplest way possible (uncontrollable composting in prisms), has been shown. The article shows the results of the biogas production potential from the manure of chosen animals, that come from the Wrocław Zoological Garden. Samples were taken from three chosen herbivores species: An elephant, a rhino and a tapir and from three carnivores species: a lion a tiger and a wolf and on of omnivorous group: a bear. The research also included the manure of exotic birds. Manure samples were tested in terms of basic properties: dry mass and dry organic mass. The analysis was performed according to PN-93/ Z-15008/02. Biogas produced by the methane fermentation in the mesophilic conditions is at 37.5°C and the retention HRT time in the reactor is in the range of 35 to 38 days. The modelling of the biogas production was executed. The decrease in dry matter in the manure of herbivores in comparison to the carnivorous has been found. Excreta of these animals were characterized by higher organic matter content. The research showed that in terms of wet mass, the highest potential for biogas production by the manure of herbivores was characterized, with an average potential of biogas production amounted to 63.5 dm³/kg w.m. The weighted average biogas production potential was estimated at 60.4 dm³/kg w.m. On the basis of the data presented in the literature, the biogas production potential from the organic matter and organic waste was estimated on the area of Wrocław Zoological Garden. Average biogas production from animal manure was to 60.4 m³/Mg w.m., green waste was to 99 m³/Mg w.m. and organic waste was to 73m³/Mg w.m., calculated weighted average biogas production was 74 m³/Mg. w.m. Production biogas will be 59940 m³ for every year. The results of research show, we can receive 98,4 MWh electricity and 590,4 GJ heat, if we build a micro_biogas plant.

Streszczenie

W artykule przedstawiono uwarunkowania funkcjonalne wrocławskiego Ogrodu Zoologicznego. Został przedstawiony obecny sposób zagospodarowania wytwarzanych bioodpadów, który nastawiony jest na przekazanie odpadów zewnętrznym podmiotom, lub też zagospodarowanie części bioodpadów na miejscu, w najprostszy możliwy technicznie sposób – niekontrolowane kompostowanie w pryzmach. W artykule przedstawiono wyniki badań potencjału produkcji biogazu z odchodów wybranych zwierząt, pochodzących z Wrocławskiego Ogrodu Zoologicznego. Próbkę pochodziły od trzech gatunków zwierząt roślinożernych: słonia, nosorożca i tapira, trzech gatunków zwierząt mięsożernych: lwa, tygrysa, wilka i jednego gatunku zwierząt wszystkożernych: niedźwiedzia. Badaniom poddano także odchody od ptaków egzotycznych. Próbkę odchodów poddano analizom właściwości podstawowych: określenie suchej masy i suchej masy organicznej. Analizy wykonano zgodnie z PN-93/Z-5008/02. Biogaz wytwarzano metodą fermentacji metanowej, w warunkach mezofilnych w temperaturze 37,5°C, a czas zatrzymania odchodów w reaktorze HRT mieścił się w zakresie od 35 do 38 dni. Przeprowadzono modelowanie przebiegu produkcji biogazu. Wyznaczono potencjał produkcji biogazu. Zaobserwowano spadek suchej masy w odchodach zwierząt roślinożernych w porównaniu do mięsożernych. Jednakże, odchody tych zwierząt charakteryzowały się wyższą zawartością materii organicznej. Badania wykazały, iż w przeliczeniu na mokłą masę, najwyższym potencjałem produkcji biogazu charakteryzowały się odchody zwierząt roślinożernych, z których średni potencjał produkcji biogazu wyniósł 63,5 dm³/kg m.m. Średnia ważona potencjału produkcji biogazu z odchodów zwierzęcych oszacowana została na poziomie 60,4 dm³/kg m.m. Na podstawie danych dostępnych w literaturze oszacowano również potencjał produkcji biogazu z opadów zielonych oraz odpadów gastronomicznych wytwarzanych na terenie WOZ. Przyjmując średnią produkcję biogazu z odchodów zwierzęcych na poziomie 60,4 m³/Mg mokrej masy wsadu, z odpadów zielonych 99 m³/Mg mokrej masy wsadu i odpadów spożywczych na poziomie 73 m³/Mg mokrej masy wsadu wyliczono średnią ważoną produkcję biogazu 74,0 m³/Mg mokrej masy wsadu. Roczna produkcja biogazu wyniesie 59940 m³/rok. Analiza uzyskanych wyników badań wykazała, że skonstruowanie mikrobiogazowni, zasilanej odpadami wytworzonymi na terenie Ogrodu Zoologicznego daje możliwość wyprodukowania 98,4 MWh energii elektrycznej i 590,4 GJ ciepła.

Słowa kluczowe:

odpady organiczne, potencjał produkcji biogazu, ogród zoologiczny

Keywords:

organic wastes, biogas production potential, zoological garden