

*Jakub Sikora, Wojciech Stawowski, Andrzej Woźniak, Janusz Zemanek*

**OKREŚLENIE ILOŚCI BIOGAZU  
Z RÓŻNYCH ODPADÓW ORGANICZNYCH  
POCHODZENIA KOMUNALNEGO**

***DETERMINING THE AMOUNT OF BIOGAS DERIVED  
FROM VARIOUS MUNICIPAL ORGANIC WASTES***

**Streszczenie**

Biogaz „gaz wysypiskowy” – powstaje w wyniku fermentacji beztlenowej związków pochodzenia organicznego. Zawiera od 30 do 70% metanu, od 30 do 60 % CO<sub>2</sub> oraz niewielką ilość innych składników takich jak azot, wodór, para wodna. Jego wartość opałowa waha się w granicach 17–27 MJ/m<sup>3</sup>. Biogaz ma szerokie zastosowanie: wykorzystuje się go głównie jako paliwo dla generatorów prądu elektrycznego, jako źródło energii do ogrzewania wody, a po oczyszczeniu i sprężeniu jako paliwo do napędu silników spalinowych. W Polsce wytwarzany jest głównie w niewielkich biogazowniach rolniczych. Pozyskuje się go również poprzez odgazowywanie obiektów poskładowiskowych.

Przeprowadzone przez autorów badania mają na celu określenie ilości biogazu możliwych do uzyskania z typowych frakcji, jakie występują w odpadach komunalnych tj.: obierki z ziemniaków, liście kapusty, obierki warzyw, skórki z owoców cytrusowych i bananów oraz odpady pochodzenia zwierzęcego.

Do badań przyjęto sześć rodzajów bioodpadów pochodzenia roślinnego oraz jedną próbę kontrolną zmieszaną losowo ze wszystkich pięciu rodzajów odpadów. Frakcje te zostały rozdrobnione i uwodnione do zawartości suchej masy ok. 10%.

Biogaz pozyskiwano w procesie fermentacji beztlenowej w regulowanym środowisku temperaturowym. W tym celu wykorzystano komorę z regulowaną temperaturą (utrzymując w niej ok. 33<sup>0</sup> C – optymalna dla bakterii metanowych mezofilnych), w której umieszczono hermetyczne pojemniki z próbkami. Pomiar ilościowy wyprodukowanego biogazu i mieszanie próbek następowało dwukrotnie w ciągu doby.

**Słowa kluczowe:** biogaz, biomasa, frakcja biodegradowalna, odpady biodegradowalne

### Summary

*Biogas, landfill gas originates from fermentation of organic compounds. The fuel contains between 30 and 70% of methane, between 30 and 60% CO<sub>2</sub> and small amounts of other components, such as nitrogen, hydrogen or water vapour. Its fuel value oscillates around 17-27 MJ/m<sup>3</sup>. Biogas is widely used, mainly as a fuel for electricity generators, the source of energy for water heating and after cleaning and compressing also as a fuel for engines. It is manufactured mainly in small agricultural biogas plants. It is obtained by means of degassing post-landfill objects.*

*The investigations conducted by the Authors aimed at determining the amount of biogas possible to obtain from typical fractions which occur in municipal wastes, i.e. potato peelings, cabbage leaves, vegetable peelings, citrus fruit and banana skins and animal wastes.*

*The research considered six kinds of biowastes of plant origin and one control sample randomly mixed of all five kinds of wastes. The fractions were broken and liquefied to dry matter content of about 10%.*

*Biogas was obtained through anaerobic fermentation process in a regulated temperature environment. A chamber with fixed temperature was used for this purpose (the temperature was set at c.a. 33°C – optimal for mesophilic methane bacteria) in which tightly sealed containers with samples were placed. The quantitative measurement of generated biogas in the sample mixture was conducted twice a day.*

**Key words:** biogas, biomass, biodegradable fraction, biodegradable wastes

### WPROWADZENIE

Podstawą produkcji energii w Polsce jest węgiel kamienny, dostarcza on 75,87% energii pierwotnej, 14,53% – węgiel brunatny, 3,66% – gaz ziemny, 2,4% – wszystkie rodzaje energii odnawialnych, 0,41 – ropa naftowa [www.biogaz.com.pl]. W skali światowej węgiel zapewnia blisko 40% produkcji energii elektrycznej. Jest on najobfitszym źródłem energii pierwotnej, którego udokumentowane rezerwy wystarczą na około 200 lat [Gajda i in. 2002]. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że procesy spalania paliw są podstawowym źródłem skażenia atmosfery stałymi i gazowymi, toksycznymi i nietoksycznymi produktami spalania. Prawie wszystkie składniki spalin można uznać za zanieczyszczające środowisko przyrodnicze [www.biogazownie.pl].

Pod względem energetycznym 2 tony biomasy równoważne są 1 tonie węgla kamiennego. Także pod względem ekologicznym biomasa jest lepsza niż węgiel gdyż podczas spalania emituje mniej SO<sub>2</sub> niż węgiel. Bilans emisji dwutlenku węgla jest zerowy, ponieważ podczas spalania do atmosfery oddawane jest tyle, CO<sub>2</sub> ile wcześniej rośliny pobrały z otoczenia [Grzybek i in. 2003].

Ostatnimi czasy duże nadzieje pokłada się w wykorzystaniu biogazu powstałego w wyniku fermentacji biomasy. Fermentacja beztlenowa jest złożonym procesem biochemicznym zachodzącym w warunkach beztlenowych. Substancje

organiczne rozkładane są przez bakterie na związki proste – głównie metan i dwutlenek węgla. W czasie procesu fermentacji beztlenowej do 60% substancji organicznej jest zamienione w biogaz. Biogaz składa się głównie z metanu ( $\text{CH}_4$ ) – 55–70%, 32–37%  $\text{CO}_2$ , 0,2–0,4%  $\text{N}_2$  oraz  $6\text{g}/100\text{m}^3$   $\text{H}_2\text{S}$ . Tempo rozkładu zależy w głównej mierze od charakterystyki i masy surowca, temperatury oraz optymalnie dobranego czasu trwania procesu. Prawidłowa temperatura fermentacji wynosi 30–35<sup>0</sup> Celsjusza dla bakterii mezofilnych i 50–60 stopni dla bakterii termofilnych [Buraczewski i in. 1999]

Jako biomasę do produkcji biogazu stosuje się obecnie głównie: słomę, liście buraków, łęty ziemniaczane, łodygi kukurydzy, koniczynę, trawę oraz osady ściekowe. Są to instalacje przy gospodarstwach rolniczych lub oczyszczalniach ścieków.

Całkowicie ignoruje się natomiast możliwość wykorzystania odpadów biodegradowalnych pochodzących ze strumienia odpadów komunalnych (biogaz odzyskuje się z nich tylko w drodze odgazowywania terenów poskładowiskowych – metan jest gazem cieplarnianym i jako taki powinien być spalany a nie emitowany do atmosfery). Przeprowadzone przez autorów wcześniejsze badania mówią o znacznym, bo ponad 50% udziale tych odpadów w całym strumieniu (resztki pochodzenia roślinnego i zwierzęcego 33%, papier 21%) [Kurek i in. 2008]. Ponadto Dyrektywa Rady Europejskiej 99/31/WE z 26 kwietnia 1999 w sprawie składowania odpadów wymaga ograniczenia zawartości substancji biodegradowalnych deponowanych na składowiskach do 75% masy wyjściowej w ciągu 5 lat od wdrożenia, do 50% w ciągu 8 lat, do 35% w ciągu 15 lat. Za moment wdrożenia przyjmuje się 1 maja 2004 roku a punktem odniesienia jest ilość odpadów wytworzona w 1995 r. Oznacza to, że w Polsce będą musiały w najbliższych latach powstać instalacje do unieszkodliwiania tych odpadów w sposób inny niż przez składowanie.

Najczęściej występujące frakcje biodegradowalne w odpadach komunalnych to: odpady z ziemniaków, liście kapusty, obierki warzyw, skórki z owoców cytrusowych i bananów oraz odpady pochodzenia zwierzęcego.

Wartość opałowa biogazu zależy głównie od zawartości metanu w biogazie. Z 1 kg węglowodanów powstaje średnio  $0,42\text{ m}^3$   $\text{CH}_4$ . z 1 kg białek –  $0,47\text{ m}^3$   $\text{CH}_4$  a z tłuszczów –  $0,75\text{ m}^3$   $\text{CH}_4$ . Wartość opałowa metanu wynosi  $35\text{ MJ}/\text{m}^3$ . Średnią wartość opałową biogazu uzyskiwanego z bioodpadów komunalnych określa się na poziomie ok.  $21,54\text{ MJ}/\text{m}^3$ . Energia zawarta w  $1\text{ m}^3$  takiego biogazu odpowiada energii zawartej w  $0,93\text{ m}^3$  gazu ziemnego.  $1\text{ dm}^3$  oleju napędowego,  $1,25\text{ kg}$  węgla lub odpowiada  $9,4\text{ kWh}$  energii elektrycznej.

## CEL I ZAKRES OPRACOWANIA

Celem badań jest określenie ilości biogazu możliwych do uzyskania z typowych frakcji występujących w odpadach komunalnych. Pośrednio wymagało

to zaprojektowania i wykonania stanowiska badawczego. Badaniami objęto sześć rodzajów najczęściej występujących w odpadach komunalnych bioodpadów pochodzenia roślinnego oraz jedną próbę kontrolną zmieszaną losowo ze wszystkich pozostałych.

### **METODYKA BADAŃ**

Do badań wyodrębniono następujące frakcje: buraki czerwone, ziemniaki, marchew i pietruszka, owoce cytrusowe, pomidory, kapustne, mieszanina frakcji.

Wszystkie frakcje zostały rozdrobnione, następnie z każdej pobrano ok. 10 gramową próbkę. Próbki zostały zważone w celu określenia ich masy przed wysuszeniem. Pomiary masy przeprowadzono na wadze elektronicznej WPE 300. Urządzenie to cechuje się dokładnością  $\pm 0,01$ g. Do suszenia wykorzystano konwekcyjną suszarkę laboratoryjną z wymuszonym obiegiem powietrza Elkon 110. Próbki były suszone do momentu ustalenia się równowagowej zawartości wody, tzn., do czasu, kiedy na wadze po 3 kolejnych pomiarach nie stwierdzono ubytku masy. Po wysuszeniu próbki zostały powtórnie zważone. Ich wilgotność obliczono na podstawie równania 1.

$$\theta = \left( \frac{m_p}{m_k} - 1 \right) \times 100 [\%] \quad (1)$$

gdzie:

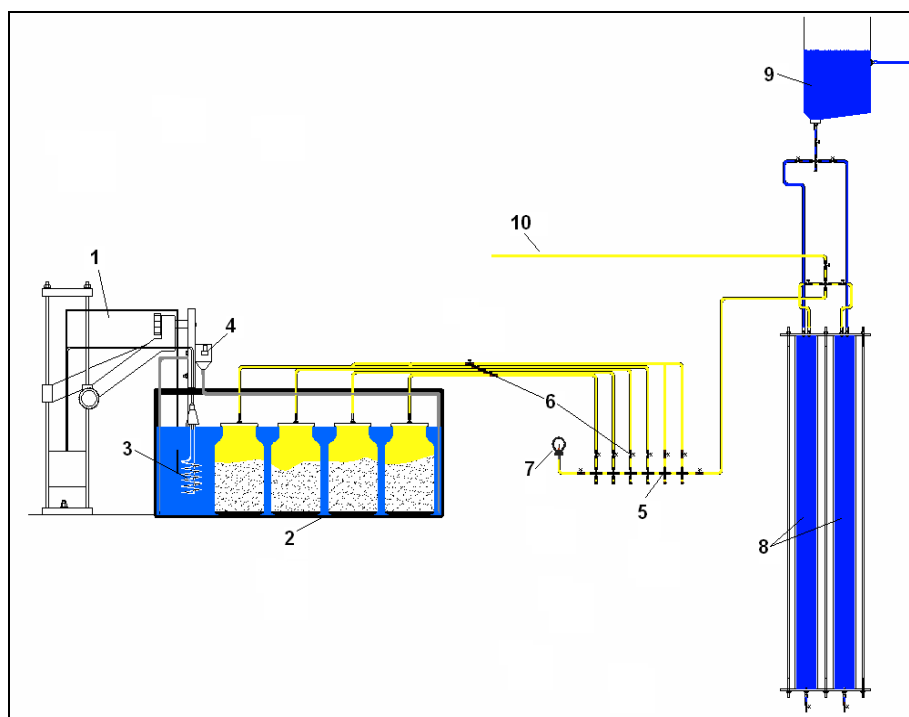
- $\theta$  – wilgotność wagowa [%],
- $m_p$  – masa początkowa próbki [g],
- $m_k$  – masa końcowa próbki [g].

Masa końcowa stanowi zawartość suchej masy w poszczególnych frakcjach. Rozdrobniony materiał uwodniono do wilgotności około 90% tworząc warunki do optymalnego rozwoju bakterii mezofilnych a następnie zadano go w ilości 1 000 g do szczelnie zamkniętych pojemników fermentacyjnych.

Fermentatory zainstalowano w zbiorniku z regulowanym środowiskiem temperaturowym, tworzącym część stanowiska badawczego, które składało się dodatkowo z tablicy rozdzielczej oraz układu pomiarowego. Schemat stanowiska przedstawiono na rysunku 1.

Do stelaża (1) znajdującego się obok zbiornika (2) zostały przymocowane urządzenia służące do utrzymania stałego środowiska temperaturowego. Sterowanie odbywało się za pomocą termostatu elektronicznego ESCO ES-20 (stycznik 16A) z dokładnością do  $\pm 0,2$  °C wynikającą z histerezy czujnika. Spadek temperatury o wartość przekraczającą  $0,1$  °C powodował włączenie grzałki o mocy 1500 W (3) z jednoczesnym uruchomieniem pompy wodnej Hanning DPO 25-205 (4) w celu zapewnienia równomiernego rozkładu temperaturowego

w całej komorze. Po podgrzaniu wody do temperatury przewyższającej zadaną o  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  następowało wyłączenie grzałki i z 30-sto sekundowym opóźnieniem pompy.



**Rysunek 1.** Schemat stanowiska badawczego  
**Figure 1.** Scheme of experimental site

Tablicę rozdzielczą (5) stanowiły szeregowo połączone rozdzielacze wraz z zaworami odcinającymi (6) i manometrem (7) mierzącym ciśnienie w poszczególnych gałęziach pomiarowych. Dzięki zastosowaniu takiego układu do obsługi wszystkich fermentatorów wystarczył jeden system pomiarowy.

Układ pomiaru objętości (8) składał się z dwóch plastikowych rur wypełnionych wodą z zaworami spustowymi oraz zbiornika do uzupełniania poziomu wody w rurach (9). Rury zostały połączone z tablicą rozdzielczą oraz z dopływem uzupełniającym poziom cieczy. Ze względu na specyficzny zapach gaz usuwano poza obiekt laboratorium odprowadzeniem (10).

Fragment stanowiska badawczego przedstawiający fermentatory zainstalowane w zbiorniku, układ sterowania warunkami termicznymi (grzałka i pompa) oraz tablicę rozdzielczą zobrazowano na rysunku 2.



**Rysunek 2.** Fragment stanowiska badawczego  
**Figure 2 .** Part of experimental site

Ciśnienie pochodzące z fermentatorów zostało doprowadzone poprzez tablicę rozdzielczą do układu pomiarowego. Manometr zamontowany przy tablicy rozdzielczej wskazuje wartość ciśnienia panującego w danym pojemniku. W celu pomiaru objętości gazu z rur wypełnionych cieczą, zostaje wypuszczona woda, aż do wartości zerowej wskazywanej przez manometr. Waga cieczy wypartej na podstawie ciężaru właściwego wody przeliczona na jednostkę objętości stanowi miarę objętości gazu powstałego z określonych frakcji.

Pomiary wykonywano dwa razy na dobę od momentu umieszczenia w pojemnikach wsadu do zakończenia eksperymentu. Podczas pomiarów każdorazowo mieszano próbki, co pozwalało na intensywną fermentację w całej objętości pojemnika. Temperatura wody w zbiorniku była stale monitorowana i wynosiła 33° C (optymalna temperatura dla bakterii metanowych mezofilnych).

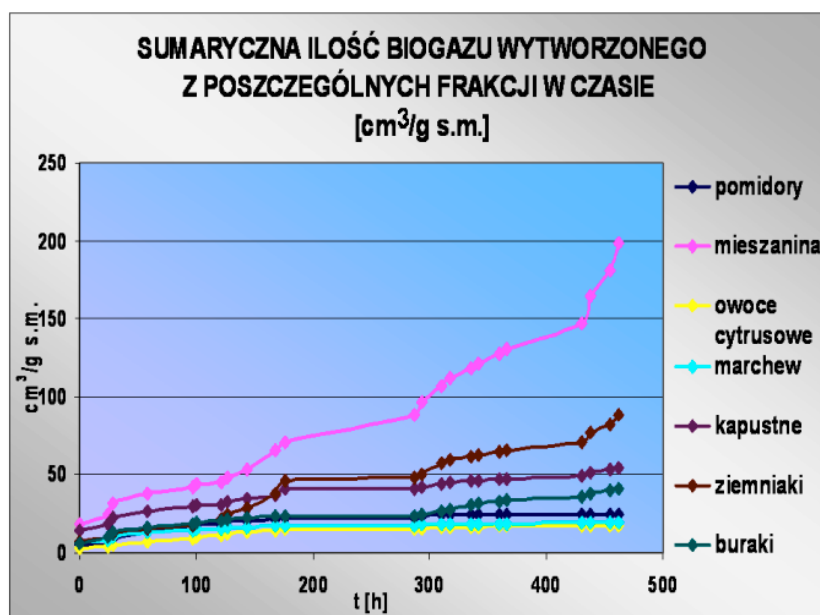
## WYNIKI

Wsad odmierzany był wagowo, co przy różnych masach właściwych prób dawało różne jego objętości. Wysoki poziom uwodnienia próbek (wilgotność około 90%) spowodował, że w niektórych próbach zawiesina uległa całkowitej sedymentacji, w innych utrzymywała się na powierzchni aż do czasu prefer-

mentowania. Różnice w objętościach poszczególnych wsadów w stosunku do ich masy zainspirowały autorów do przedstawienia wyników pomiarów dzieląc je na trzy grupy, ze względu na ilość wytworzonego biogazu w czasie w zależności od:

- wagi suchej masy wsadu,
- objętości wsadu,
- masy całkowitej wsadu.

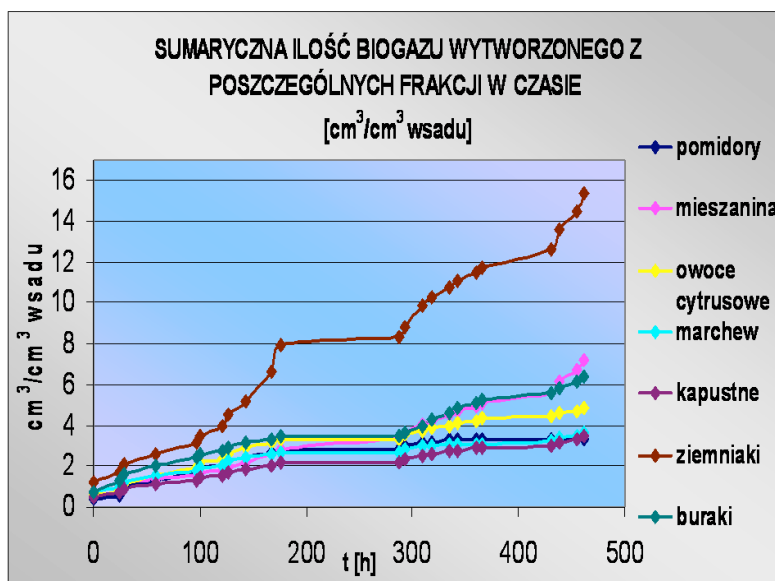
Na rysunku 3 zobrazowano przebieg przyrostu ilość wytwarzanego biogazu w czasie, względem suchej masy wsadu. Widać na nim wyraźnie, że najbardziej produktywną próbką jest mieszanina wszystkich frakcji. Natomiast pomidory, marchew i owoce cytrusowe przez cały okres badań utrzymywały bardzo niski poziom produkcji biogazu. Prawdopodobnie frakcje te nie zawierają enzymów potrzebnych w pierwszej fazie fermentacji beztlenowej, które umożliwiają hydrolizę wielkocząsteczkowych związków organicznych do rozpuszczalnych związków prostszych.



Rysunek 3. Wykres zależności przyrostu wyprodukowanego biogazu względem suchej masy wsadu

Figure 3. Graph of the dependence between generated biogas and input dry mass

Drugi wykres (rys. 4) przedstawia zależność objętości wytworzonego biogazu do objętości wsadu. Widoczne są znaczne różnice pomiędzy ilością biogazu otrzymanego z ziemniaków w stosunku do innych frakcji. W pozostałych próbach nie stwierdzono istotnych rozbieżności pod względem ilości biogazu.



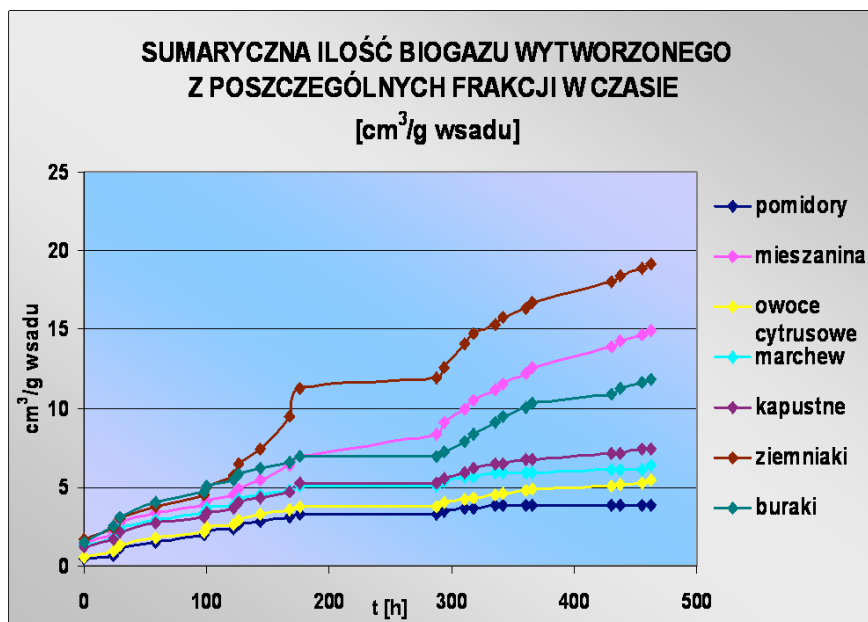
Rysunek 4. Wykres zależności przyrostu wyprodukowanego biogazu względem objętości wsadu

Figure 4. Graph of the dependence between generated biogas and input volume

Kolejny wykres (rys. 5) przedstawia stosunek objętości produkowanego biogazu do masy całkowitej wsadu. Widać na nim znaczącą różnicę produkcji biogazu pomiędzy próbką z ziemniaków w stosunku do innych frakcji. Najprawdopodobniej jest to związane z szybkim rozkładem skrobi w pierwszym etapie fermentacji i przejściem do drugiego, w którym zachodzi faza kwaśna i faza octanowa a produkty przejściowe podlegają przemianom do kwasu octowego, wodoru i dwutlenku węgla, czemu towarzyszy wydzielanie się znacznych ilości gazu. Próby zawierające pomidory i owoce cytrusowe, podobnie jak na wcześniejszym wykresie wykazują minimalny przyrost produktów fermentacji.

Zauważalne na wykresach, spowolnienie fermentacji metanowej w środkowej ich części spowodowane zostało wyłączeniem aparatury w skutek awarii. Wywołało to spadek temperatury do ok. 20 °C, co skutkowało prawie całkowitym zatrzymaniem procesu fermentacji. Wyjątek stanowi próba zawierająca wsad z mieszaniną frakcji, w której nadal lecz w mniejszym stopniu, następowała reakcja.





**Rysunek 5.** Wykres zależności przyrostu wyprodukowanego biogazu względem całkowitej masy wsadu

**Figure 5.** Graph of the dependence between generated biogas and input total weight

## WNIOSKI

Projekt miał na celu odpowiedzieć na wstępne pytania, jakie zadali sobie autorzy w związku z planowaną budową laboratorium do pozyskiwania biogazu. Na ich podstawie wyciągnięto wnioski dotyczące potrzeb na zakup sprzętu. Stwierdzono potrzebę nabycia przepływomierza masowego do badania bardzo małych przepływów z jednoczesnym pomiarem przepływu masowego, objętościowego oraz gęstości i temperatury oraz wielofunkcyjnego analizatora biogazu. Badania przeprowadzone z wykorzystaniem planowanej do zakupu aparatury pozwolą odpowiedzieć m. in. na pytania: ile gazu i o jakiej zawartości metanu można wyprodukować z różnych rodzajów odpadów, jak wygląda dynamika powstawania metanu w różnych warunkach termicznych i wilgotnościowych.

## BIBLIOGRAFIA

- Buraczewski G., Bartoszek B. *Biogaz: wytwarzanie i wykorzystanie*. PWN, Warszawa 1999.  
 Gajda A., Barc W., Jaworski W. *Energetyka polska na tle energetyki europejskiej. dokonania w ochronie powietrza*. Biuletyn Miesięczny PSE SA Nr 12 (138), 2002, s. 2–9.  
 Grzybek A., Gradziuk P., Kowalczyk K. *Biogaz*. Warszawa 2003.

Kurek S., Małucha K., Toch R., Zemanek J. *Wyznaczanie procentowego składu frakcji w odpadach komunalnych w zależności o systemu zbiórki* Materiały konferencyjne: IV Ogólnopolska Młodzieżowa Konferencja Naukowa nt.: „Nowe tendencje rozwoju rolnictwa i obszarów wiejskich”, 2008, s. 100–103.

Lewandowski Witold M. 2007, *Proekologiczne odnawialne źródła energii*, WNT, Warszawa.

<http://www.biogaz.com.pl/> – 10.01.2007

<http://biogazownie.pl/> – 10.01.2007

Dr hab. inż. Andrzej Woźniak, Prof. UR

Dr inż. Jakub Sikora

Mgr inż. Janusz Zemanek

Wojciech Stawowski

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Katedra Technicznej Infrastruktury Wsi

30-149 Kraków ul. Balicka 116B

Tel. (012) 662 4660

[awozniak@ar.krakow.pl](mailto:awozniak@ar.krakow.pl), [jzemanek@ar.krakow.pl](mailto:jzemanek@ar.krakow.pl),

Recenzent: *Prof. dr hab. inż. Antoni T. Miler*