Mgr inż. Mariusz Czurejno

# Biogaz składowiskowy jako źródło alternatywnej energii

Biogaz generowany na składowiskach odpadów należy rozpatrywać w dwóch aspektach, tj. jako źródło emisji zanieczyszczeń i alternatywne źródło energii. Zgodnie z ustawą o odpadach [1], już na etapie projektowania składowisk niezbędne jest określenie sposobu gromadzenia, oczyszczania i wykorzystywania lub unieszkodliwiania gazu składowiskowego. Szacuje się, iż jego energetyczne wykorzystanie jest ekonomicznie opłacalne dla składowisk, na których łączna masa zdeponowanych odpadów wynosi co najmniej $0,5 \cdot 10^6$ Mg [2]. W zależności od wielkości, sposobu zagospodarowania gazu, zastosowanej technologii jego pozyskiwania, od właściwości paliwowych pozyskiwanego biogazu oraz od cen rynkowych uzyskanego ciepła bądź energii elektrycznej okres poniesionych nakładów inwestycyjnych zwraca się po 2 –10 latach. Zważywszy na fakt, iż gaz jest produkowany intensywnie przez kolejne 10 –15 lat po zakończeniu eksploatacji składowiska, energetyczne wykorzystanie gazu składowiskowego może przynieść nie tylko korzyści środowiskowe, ale również wymierne korzyści finansowe.

## Właściwości paliwowe biogazu

Właściwości paliwowe biogazu na wybranych składowiskach zestawiono w tabeli 1.

Należy podkreślić, iż z energetycznego punktu widzenia największe znaczenie ma metan, którego średni udział (w zależności od fazy rozkładu odpadów) w generowanym na składowiskach gazie kształtuje się na poziomie 50%.

Procent zawartości metanu w gazie składowiskowym determinuje sposób zagospodarowania biogazu. W fazie stabilnej metanogenezy ilość metanu w gazie wynosi ok. 60%, co wg normy PN-87/C-96001 kwalifikuje go do 30. podgrupy gazów ziemnych.

Szczegółowe wymagania co do składu jakościowego biogazu normowane są przez producentów urządzeń wykorzystujących biogaz. Odnoszą się one głównie do całkowitej zawartości w biogazie związków siarki, chloru, fluoru oraz pyłu.

## Potencjał gazowy składowisk

Najważniejszym czynnikiem rzutującym na sposób zagospodarowania biogazu jest potencjał gazowy składowisk. Ilość wytwarzanego gazu składowiskowego waha się w granicach od 60 do 180 $m^3$/Mg deponowanych odpadów [4].

Przed przystąpieniem do określenia sposobu postępowania z gazem składowiskowym niezbędne jest określenie zasobności gazowej złoża w funkcji czasu. Pozwala to na optymalny dobór mocy urządzeń (rys. 1).

Potencjał gazowy złoża można określić poprzez:

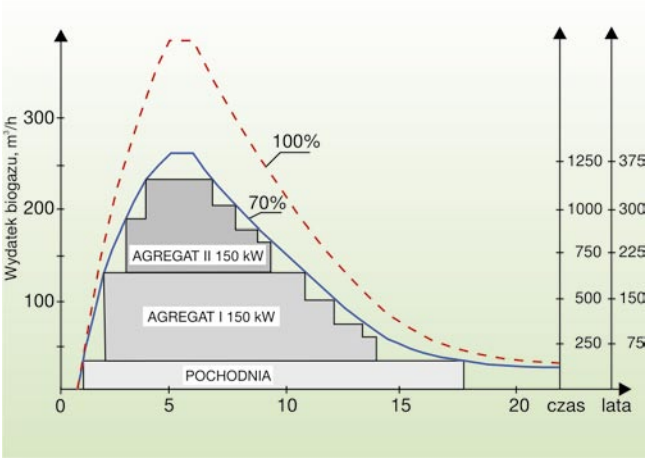
- jednostkowe wskaźniki produkcji biogazu, studium literaturowe,
- modelowe obliczenia zasobności gazowej,
- próbne pompowanie i badanie biogazu.

Dla warunków krajowych można przyjąć, iż z 1 Mg odpadów powstanie ok. 120 $m^3$ biogazu.

**Tabela 1**

Właściwości paliwowe biogazu na wybranych składowiskach odpadów [3]

| Składowisko | Skład biogazu | | Właściwości paliwowe: | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $CH_4$ | $CO_2$ | gęstość | ciepło spalania | wartość opałowa | temperatura zapłonu |
| | % | | kg/$m^3$ | MJ/$m^3$ | | °C |
| *Łódź-Nowosolna* | 63,0 | 35,0 | | 25,1 | | ok. 640 |
| *Warszawa-Radiowo* | 54,6–63,9 | 35,0–41,4 | 1,17–1,25 | 23,9 | 21,5 | – |
| *Bydgoszcz* | 31,4–31,8 | 34,6–35,0 | 0,96 | 13,7–13,8 | 12,3–12,4 | – |
| *Gdańsk-Szadłówki* | 60,0–78,0 | 19,0–37,0 | 0,99–1,17 | 24,0–32,2 | 21,6–21,8 | – |
| Paliwo | | | | | | |
| Metan | 100 | – | 0,72 | 39,82 | 35,88 | 645 |
| Gaz ziemny | 93 | 1 | 0,79 | 41,34 | 37,35 | 640 |




Rys.1. Potencjał energetyczny złoża odpadów oraz odpowiadające jemu moce urządzeń [5]

Poprzez ten wskaźnik można określić całkowitą zdolność produkcyjną biogazu generowanego na składowisku, który z punktu widzenia projektanta, a zwłaszcza doboru mocy urządzeń jest nie wystarczający, gdyż nie określa czasowej zmienności produkowanego biogazu. Istnieje wiele modeli prognostycznych służących określaniu potencjału gazowego złoża odpadów. Według modelu zaproponowanego przez Tabasarana, potencjalną produkcję biogazu przypadającą na jednostkę masową odpadów można określić równaniem [6]:

$$G_o = 1{,}87C_{org}(0{,}014T + 0{,}28) \quad [\mathrm{m^3/Mg}] \qquad (1)$$

gdzie:
$C_{org}$ – zawartość węgla organicznego w odpadach, m³/Mg,
$T$ – temperatura w złożu odpadów, °C.

Przy określeniu czasowego rozkładu generowanego strumienia biogazu Tabasaran wykorzystał pierwszorzędową kinetykę reakcji rozkładu materii organicznej:

$$\frac{dG}{dt} = k(G_o - G) \qquad (2)$$

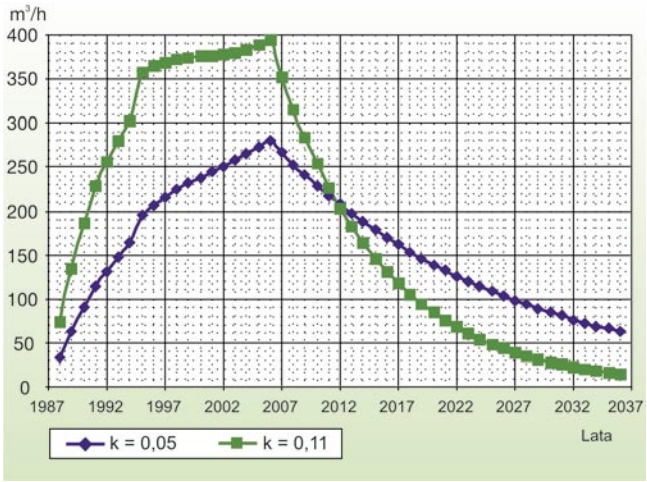
Całkując powyższe równanie po czasie $t$, strumień generowanego biogazu w dowolnym okresie można zapisać w postaci:

$$G_t = G_0(1 - e^{-kt}) \quad [\mathrm{m^3/Mg}] \qquad (3)$$

gdzie:
$G_o$ – potencjalna produkcja biogazu na jednostkę odpadów m³/Mg,
$k$ – stała szybkości rozkładu, a⁻¹.

Czynnikiem stymulującym szybkość generowanego biogazu jest np. recyrkulowanie odcieków składowiskowych. Takie rozwiązanie pozwala przyspieszyć stabilizację biologiczną odpadów oraz zmniejszyć koszty eksploatacyjne składowisk związane z oczyszczanie odcieków.

Wpływ recyrkulacji odcieków na potencjał gazowy przedstawiono na rysunku 2.



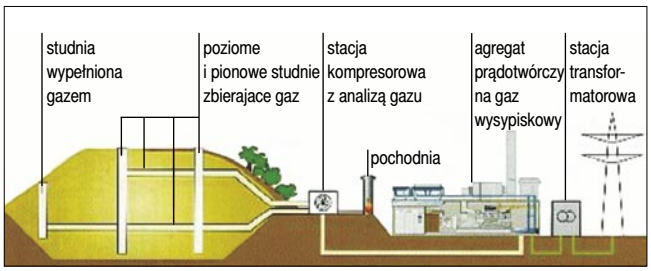

Rys. 2. Potencjał gazowy bez i z recyrkulacją odcieków na składowisku odpadów w Siedlęcinie [7]

Metodologię uwzględnienia recyrkulajcji odcieków do szacowania potencjału gazowego i energetycznego składowisk szczegółowo opisano w [10].

## Koncepcje zagospodarowania biogazu

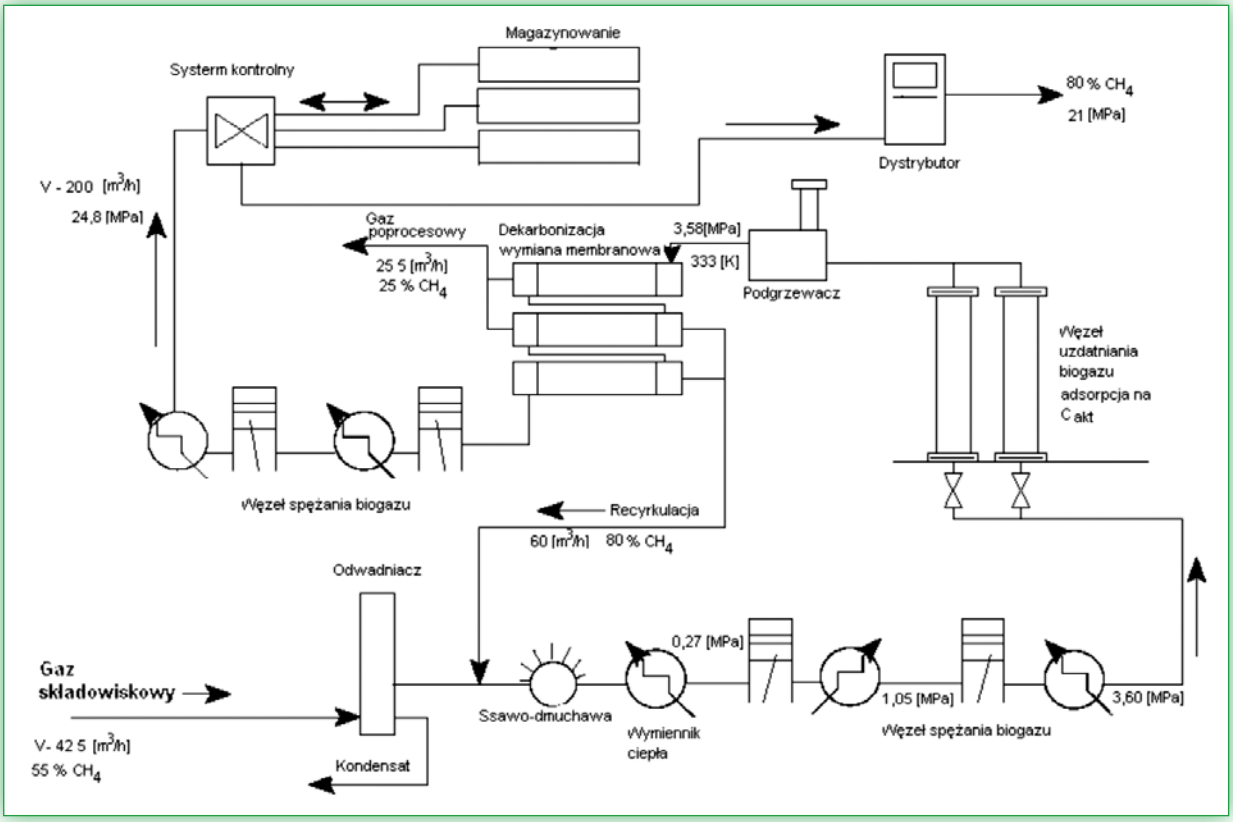
Po określeniu potencjału gazowego składowiska niezbędne jest wybranie optymalnego sposobu wykorzystania gazu, aby inwestycja oprócz korzyści ekologicznych przyniosła wymierne korzyści ekonomiczne.

Biogaz może być przetwarzany na energię elektryczną, cieplną, może być dostarczany do sieci gazowej, stanowić paliwo do pojazdów bądź maszyn pracujących na składowisku. W Polsce biogaz jest przetwarzany wyłącznie na energię elektryczną i cieplną. Wynika to głównie z braku odpowiedniej infrastruktury wokół składowisk oraz relatywnie niskiego potencjału gazowego składowisk.




Rys. 3. Schemat ideowy produkcji CNG z biogazu składowiskowego [9]

Na rysunku 3 przedstawiono standardowy układ systemu wykorzystania energetycznego biogazu. Ze względu na stale rosnące ceny paliw i ich wrażliwość na sytuację polityczno-gospodarczą, perspektywiczną metodą zagospodarowania biogazu jest jego uzdatnianie i zasilanie nim pojazdów pracujących m.in. na składowiskach odpadów.




Rys. 4. Typowy układ odgazowania składowiska i energetycznego wykorzystania biogazu [8]

Takie rozwiązanie zostało wdrożone na składowisku w Puente Hills (USA), na którym składowane jest dziennie ok. 10 000 Mg odpadów. Ok. 36 000 m$^3$/h generowanego biogazu zasila elektrociepłownię o mocy 50 MW, natomiast 420 m$^3$/h biogazu jest uzdatniane (do parametrów gazu ziemnego), sprężane i zasilane są nim pojazdy na składowisku oraz część pojazdów w tamtejszym przedsiębiorstwie gospodarki komunalnym.

W warunkach polskich taka koncepcja zagospodarowania biogazu jest możliwa do wdrożenia na ponadlokalnych, regionalnych składowiskach. Na rysunku 4 przedstawiono typowy schemat produkcji paliwa (CNG) z biogazu składowiskowego.

## Przykładowa analiza koncepcji zagospodarowania biogazu

W ramach [7] przeprowadzona została analiza wybranych koncepcji zagospodarowania biogazu dla składowiska w Siedlęcinie, tj.:

- produkcji energii elektrycznej,
- produkcji energii elektrycznej oraz odzysku ciepła (kogeneracja) i ogrzewania szklarni,
- ogrzewania pieczarkarni.

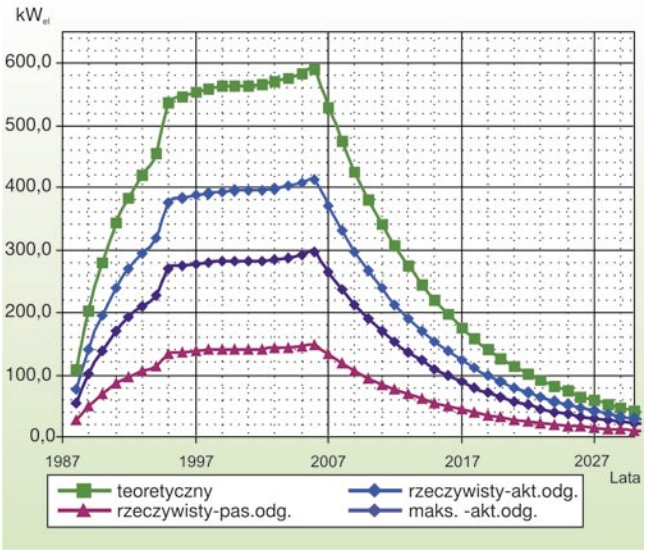
Z wymienionych wariantów interesująca jest koncepcja ogrzewania szklarni, zważywszy na fakt, iż Odział Zieleni Miejskiej MPGK w Jeleniej Górze jest właścicielem kilku szklarni. Zatem ewentualna lokalizacja szklarni w pobliżu składowiska może znacząco zmniejszyć koszty eksploatacyjne.

Dla analizowanego składowiska potencjał gazowy określono za pomocą modelu zaproponowanego przez EPA [11]. Na jego podstawie określono potencjał energetyczny składowiska jako funkcję czasu. Potencjał gazowy składowiska przedstawiono na rysunku 2 (wariant z recyrkulacją odcieków), natomiast odpowiadający jemu potencjał energetyczny składowiska na rysunkach 5 i 6.

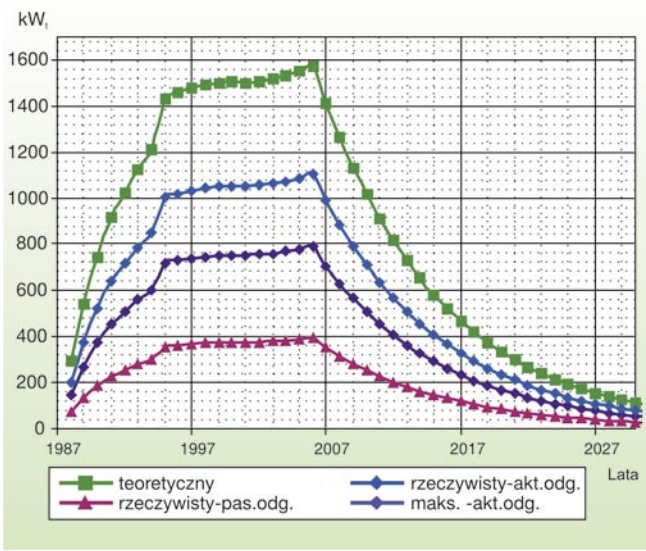
Recyrkulacja odcieków składowiskowych sprzyja wzrostowi stałej biodegradacji odpadów i tym samym zwiększa dynamikę produkcji biogazu. Matematyczne zależności pomiędzy potencjałem gazowym składowiska, w przypadku recyrkulacji odcieków, a ich brakiem szczegółowo opisano w [10].

*Dane przyjęte do obliczeń:*

- eksploatacja składowiska prowadzona w latach 1987–2005,
- średnia roczna ilość deponowanych odpadów – 32 tys. Mg,
- średnia zawartość $C_{org}$ – 112,2; kg/Mg odpadów,
- temperatura w złożu odpadów 293 K,
- stała szybkości rozkładu odpadów k – 0,11 a$^{-1}$,
- jednostkowy potencjał energetyczny biogazu 5 kWh/m$^3$,
- współczynnik konwersji biogazu na energię elektryczną – 0,3,
- współczynnik konwersji biogazu na energię cieplną – 0,8,
- stopień pozyskania biogazu (odgazowanie aktywne) – 0,5
- ogrzewanie – cztery szklarnie o kubaturze – 200 m$^3$,
- sezon grzewczy szklarni – 4000 h,
- sezonowe zapotrzebowanie na ciepło szklarni – 0,51 GWh,
- pieczarkarnia – powierzchnia – 3000 m$^2$,
- sezon grzewczy – 7000 h,
- sezonowe zapotrzebowanie na ciepło – 7,82 GWh.




Rys. 5. Potencjał energetyczny składowiska w odniesieniu do energii elektrycznej




Rys. 6. Potencjał energetyczny składowiska w odniesieniu do energii cieplnej

**Tabela 2**

Charakterystyka analizowanych koncepcji

| Wyszczególnienie | Koszt | | Zysk | | | Prosty okres zwrotu | | | Strumień utylizowanego biogazu |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | mln, zł | | | | | a | | | mln m$^3$ |
| – | Inwestycyjny | Eksploatacyjny | Środki własne | Dotacja z NFOŚiGW (odgazowanie) | Dotacja z UE 50% | Środki własne | Dotacja z NFOŚiGW (odgazowanie) | Dotacja z UE 50% | – |
| Produkcja energii elektrycznej | 3,1 | 0,1 | 0,09 | 0,48 | 1,55 | 14,0 | 10,0 | 5,0 | 16,6 |
| Produkcja energii elektrycznej<br>Ogrzewanie szklarni | 2,7 | 0,11 | 2,06 | 2,45 | 3,39 | 6,0 | 5,0 | 3,0 | 19,9 |
| Ogrzewanie pieczarkarni | 1,1 | 0,1 | 1,56 | 1,95 | 2,1 | 4,0 | 3,0 | 2,5 | 14,0 |

Dla określonego potencjału dobrano kontenerowe agregaty prądotwórcze:

- koncepcja wytwarzania energii elektrycznej – 2 · 164 kW; *CES Sp. z o.o*,
- koncepcja wytwarzania energii elektrycznej i ogrzewania szklarni 2 · 180 kW; *PZL-Wola*,
- ogrzewanie pieczarkarni – kotłownia kontenerowa-modułowa – 4 · 400 kW *Hamworthy*.

Ilość generowanego biogazu pozwala na eksploatowanie dobranych urządzeń przez 15 lat od zakończenia składowania odpadów, tj. do 2020 r. W tabeli 2 zestawiono bilans ekonomiczny poszczególnych koncepcji wraz z ilością zutylizowanego biogazu.

Najkorzystniejszym rozwiązaniem jest energetyczne wykorzystanie biogazu na potrzeby ogrzewania szklarni wraz z jednoczesną produkcją energii elektrycznej (w kogeneracji).

Spośród wszystkich analizowanych koncepcji rozwiązanie takie jest najlepsze, zarówno z punktu widzenia stricte komercyjnego (największy zysk), jak i ochrony środowiska (największa ilość utylizowanego biogazu). W obliczeniach nie uwzględniono potencjalnych strat środowiskowych powodowanych przez emisję biogazu.

Cechą charakterystyczną wszystkich analizowanych rozwiązań zagospodarowania biogazu jest to, iż poniesione nakłady inwestycyjne oraz eksploatacyjne zwracają się.

## Wnioski

Przyjęta przez Sejm Rzeczypospolitej Polskiej w sierpniu 2001 roku „Strategia rozwoju energetyki odnawialnej" zakłada, że udział energii odnawialnej w bilansie paliwowo-energetycznym kraju w 2010 r. wynosić będzie 7,5%, a w 2020 – 14%. Wobec obecnego jej udziału na poziomie ok. 3%, spodziewać się można w najbliższych kilku latach zwiększenia zainteresowania m.in. energetycznym wykorzystaniem biogazu składowiskowego.

Pozyskiwanie i energetyczne wykorzystanie gazu składowiskowego może przynieść korzyści nie tylko środowiskowe (zmniejszenie jego emisji), ale i również ekonomiczne. Są one tym większe, im szybciej będzie on pozyskiwany ze składowiska.

Opracowanie już na etapie projektowania składowiska koncepcji pozyskiwania i wykorzystania generowanego biogazu i jej zrealizowanie zmniejszy koszty eksploatacyjne obiektu jak i jego uciążliwość dla środowiska. Nie bez znaczenia są plany zagospodarowania przestrzennego terenów otaczających składowiska. Można je wykorzystać na wszelkie energochłonne inwestycje z możliwością wykorzystania biogazu jako paliwa.

Przedstawione obliczenia potencjału energetycznego biogazu oraz wybór optymalnej koncepcji jego zagospodarowania należy zawsze policzyć dla konkretnych warunków danego składowiska, m.in. ilości deponowanych odpadów i ich składu, technologii składowania odpadów oraz lokalnej infrastruktury.

LITERATURA


[1] Ustawa o odpadach, Dz.U.2001 nr 62 poz.628 (wraz z późniejszymi zmianami)

[2] Praca zbiorowa. Ekonomiczne i prawne aspekty wykorzystania odnawialnych źródeł energii w Polsce, EC BREC/IBMER, Warszawa 2000

[3] Kalina J.: Paliwa gazowe dla małych układów kogeneracyjnych, Seminarium „Energetyka w procesie przemian". Gliwice 2002

[4] Czurejno M.: Potencjał gazowy składowisk odpadów komunalnych. *Ekopartner* 2003, nr 8/9, s. 22–23

[5] Zalecenia do budowy i eksploatacji do wydobywania i wykorzystywania biogazu z wysypisk. UMiRM/OBREM, Warszawa/łódź, 1993

[6] Gaj K. Cybulska K.: Modelowanie emisji biogazu ze składowisk odpadów komunalnych. *Chemia i Inżynieria Ekologiczna* 2002, nr 1, s. 91–100

[7] Czurejno M.: Koncepcja odgazowania i utylizacji biogazu składowiskowego dla składowiska odpadów w Siedlęcinie. Praca magisterska. Politechnika Wrocławska, Wrocław 2004

[8] Materiały reklamowe firmy *CES Sp. z o.o.*

[9] Czurejno M.: Energetyczne wykorzystanie gazu składowiskowego. II Konferencja Naukowa Studentów „Człowiek, cywilizacja, przyszłość", Wrocław 2004

[10] Czurejno M. Gaj K.: Modelowanie potencjału gazowego i energetycznego składowisk odpadów komunalnych. *Ochrona Powietrza i Problemy Odpadów* 2005, nr 3

[11] Landfill Gas Emissions Model, US EPA, Air Pollution Prevention and Control Division, Research Triangle Park, NC27711, 1998