

## **Wstęp**

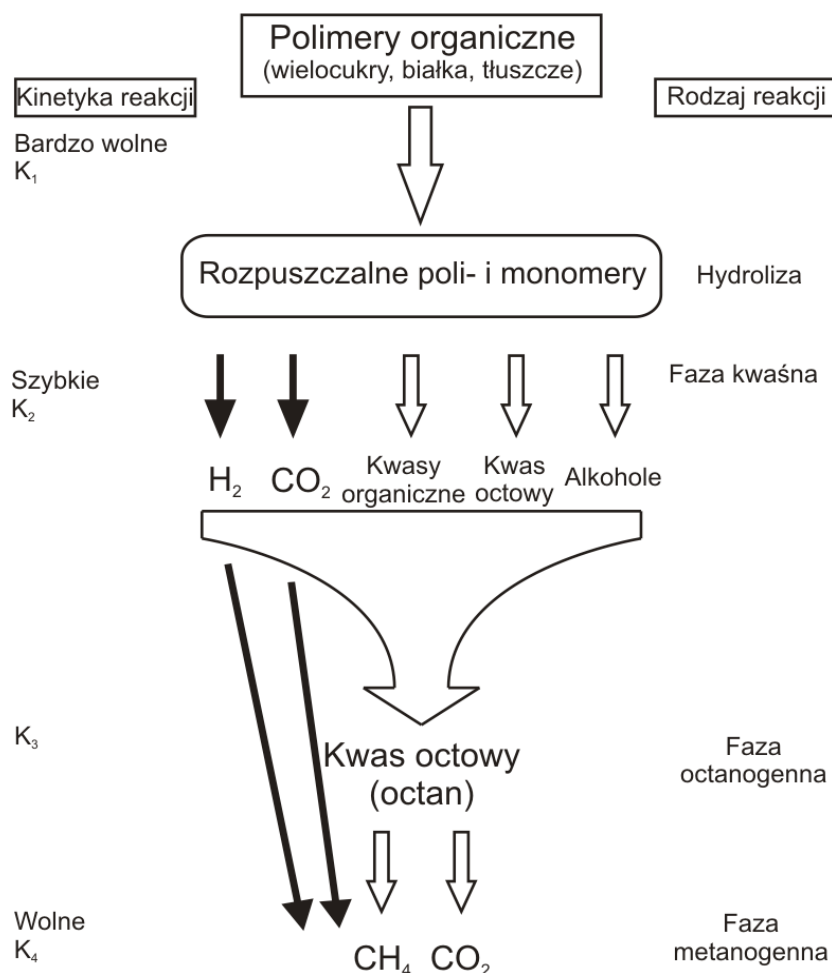
Wraz z rozwojem cywilizacji wzrasta ilość produkowanych odpadów. W 2008 roku wytworzono w Polsce 12,2 Tg odpadów komunalnych, przy czym główną metodą unieszkodliwiania jest deponowanie ich na składowiskach (96,4%). Według danych podanych przez GUS (2009) w roku 2008 w Polsce istniało 879 czynnych składowisk odpadów komunalnych. Zdeponowane na składowisku odpady komunalne podlegają długotrwałym przemianom o złożonym charakterze wśród których można wyróżnić procesy fizyczne, chemiczne oraz biologiczne. Składowisko odpadów komunalnych jest traktowane, jako olbrzymi bioreaktor heterogeniczny, w którym występują trzy stany skupienia: stały – odpady, ciekły – odcieki oraz gazowy – biogaz.

## **Skład odpadów**

Należy zadać pytanie, który ze składników odpadów komunalnych powoduje tak duże zagrożenie dla środowiska, pomijając zagrożenia, które mogą pochodzić od odpadów niebezpiecznych, które znalazły się przypadkowo w odpadach komunalnych. Odpowiedź jest bardzo prosta, jest to materia organiczna zawarta w odpadach komunalnych. Według Krajowego Planu Gospodarki Odpadami 2010 (KPGO, 2006) wynika, że aż 47% odpadów komunalnych stanowią odpady ulegające biodegradacji. Do odpadów ulegających biodegradacji należą: papier i tektura, tekstylia, odpady zielone oraz odpady kuchenne. Odpady ulegające biodegradacji można podzielić na: odpady łatwo (odpady kuchenne), średnio (odpady zielone) oraz trudno biodegradowalne (tekstylia, papier i tektura). Połowiczny czas rozkładu odpadów łatwo biodegradowalnych wynosi 1 rok, średnio degradowanych 5 lat, trudno biodegradowalnych 15 lat (Hokes, 1983).

## **Procesy zachodzące w odpadach**

Wszystkie składowiska odpadów komunalnych w Polsce, rozkład materii organicznej zawartej w odpadach przebiega w warunkach anaerobowych (fermentacja metanowa). Na Rys. 1 przedstawiono etapy rozkładu związków organicznych zawartych w odpadach komunalnych. Rozkład materii organicznej w warunkach anaerobowych przebiega w czterech etapach: hydrolizy, acitogenezy kwasogenezy, octanogenezy oraz metanogenezy.



Rys. 1. Rozkład związków organicznych w warunkach anaerobowych (Żygadło, 2001)

W fazie hydrolizy następuje rozkład spolimeryzowanych w większości nierozpuszczalnych związków organicznych przez enzymy odpowiednich szczepów bakterii hydrolizujących (amylazę, aminokwasy i kwasy tłuszczowe) w rozpuszczalne monomery i dimery. Rozkład spolimeryzowanych związków odbywa się przez enzymy wydzielone pozakomórkowo przez komórki lub w bezpośrednim kontakcie z substratem (Ledakowicz i Krzystek, 2005).

W etapie II zwanym kwasogenezą fakultatywne bakterie rozkładają rozpuszczone w wodzie związki do krótkołańcuchowych kwasów tłuszczowych, alkoholi, aldehydów, dwutlenku węgla oraz wodoru. Lotne kwasy tłuszczowe oraz alkohole stanowią około 76% związków powstałych z związków po hydrolizie, wodór i dwutlenek węgla 4% i octany 20% (Miksch i Sikora, 2010).

Trzecim etapem jest octanogeneza, w którym odpowiednie grupy bakterii rozkładają wyższe kwasy organiczne do kwasu octowego, dwutlenku węgla i wodoru.

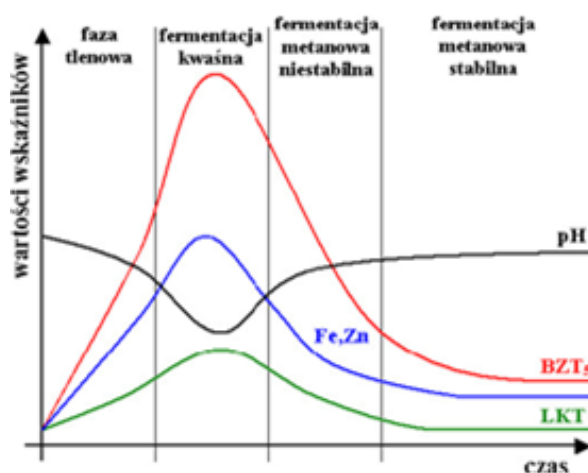
Etap 4 rozkładu materii organicznej w warunkach anaerobowych jest nazywany metanogenezą. W fazie tej bakterie metanogenne wytwarzają metan z kwasu octowego, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, mrówczanu, metanolu, metyloaminy i siarczku dimetylowego (Jędrzak, 2007). W fazie metanogenezy 70% metanu powstaje na skutek redukcji octanów (Klass, 1984).

Etap I i II nazywany jest fermentacją kwaśną a etap III oraz IV – fermentacją metanową. Na przebieg procesu fermentacji metanowej mają wpływ: odczyn pH, substancje poddawane procesowi fermentacji metanowej, związki toksyczne oraz temperatura.

### Skład odcieków

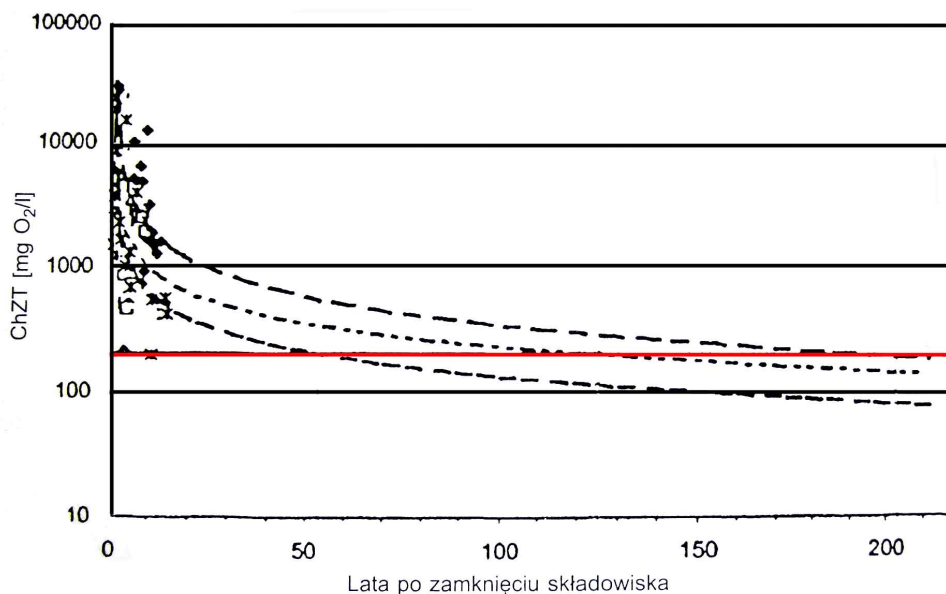
Pośrednim produktem rozkładu materii organicznej do dwutlenku węgla oraz metanu są odcieki.

Skład odcieków jest zmienny w czasie i zależy od procesów jakie zachodzą w odpadach. Zmiany składu odcieków podczas rozkładu materii organicznej w odpadach komunalnych przedstawiono na Rys. 2. W fazie tlenowej możemy zaobserwować wzrost LKT (lotne kwasy tłuszczowe), BZT<sub>5</sub> (biochemiczne zapotrzebowanie na tlen) oraz stężenia Fe i Zn w odciekach, co jest związane z etapem hydrolizy. Największe wartości LKT, BZT<sub>5</sub> oraz stężenia Fe, Zn w odciekach można zaobserwować w fazie kwaśnej. W fazie tej wartość pH osiąga najmniejsze wartości, a LKT i BZT<sub>5</sub> największą, co jest związane z intensywną produkcją kwasów tłuszczowych. Podczas fermentacji metanowej niestabilnej można zaobserwować zmniejszanie się wartości LKT, BZT<sub>5</sub> oraz stężenia Fe, Zn w odciekach. W fazie tej można również zaobserwować wzrost wartości pH. Wzrost pH oraz obniżenie wskaźnika BZT<sub>5</sub> i LKT powodowane jest poprzez zużywanie octanów przez bakterie metanogenne. Podczas fermentacji metanowej stabilnej występuje stabilizowanie zmian wskaźników odcieków.



Rys. 2. Zmiany składu odcieków z anaerobowego składowiska odpadów komunalnych (Oleszkiewicz, 1999)

Na Rys. 3 przedstawiono zmiany wskaźnika ChZT (chemiczne zapotrzebowanie na tlen). Punktami na Rys. 3 zaznaczono zmiany wskaźnika ChZT z trzech składowisk odpadów komunalnych. Liniami przerywanymi zaznaczono prognozowane zmiany wskaźnika ChZT. Kolorem czerwonym zaznaczono dopuszczalną wartość wskaźnika ChZT w odciekach, jaki można wprowadzić do ziemi. Dla niektórych składowisk wartość wskaźnika ChZT może osiągnąć poziom akceptowany po 50 latach od zamknięcia składowiska, a w niektórych przypadkach dopiero po 200 latach.

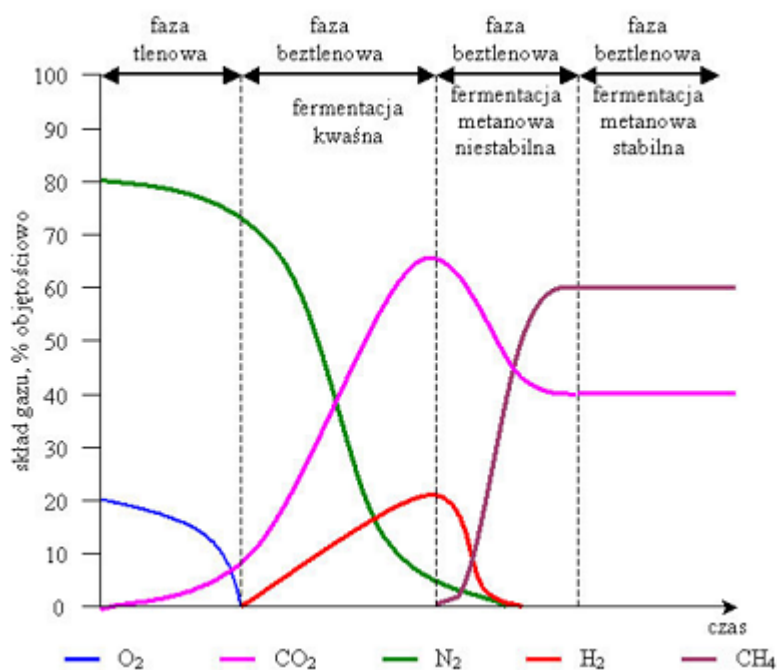


Rys. 3. Zmiany wartości ChZT w czasie z trzech składowisk odpadów (Żygadło, 2001)

### Skład biogazu

Skład biogazu powstającego na składowisku odpadów komunalnych jest także zależny od procesów zachodzących w odciekach. Zmiany składu gazu ze składowiska odpadów komunalnych przedstawiono na Rys. 4. Pierwsza faza tlenowa trwa tylko przez 2 tygodnie, co jest spowodowane szybkim zużyciem tlenu zawartego w przestrzeniach pomiędzy odpadami. W fazie tej stężenie tlenu spada do zera oraz wzrasta stężenie dwutlenku węgla. Następnie w odpadach rozpoczyna się faza beztlenowa, w której można wyróżnić fazę kwaśną, fazę metanową niestabilną oraz fazę metanową stabilną. Faza kwaśna trwa około 2 miesięcy, w której rozpoczyna się produkcja wodoru, następuje dalszy wzrost stężenia dwutlenku węgla oraz zmniejszanie się stężenia azotu w gazie wylotowym ze składowiska. W fazie metanowej niestabilnej można zaobserwować zanik stężenia wodoru oraz azotu w biogazie, a pojawia się produkcja metanu. W fazie tej następuje również zmniejszenie stężenia dwutlenku węgla. W kolejnej fazie, zwanej metanową stabilną, stężenie CH<sub>4</sub> i CO<sub>2</sub> w biogazie utrzymuje się na stałym poziomie (45% - CO<sub>2</sub> i 55% - CH<sub>4</sub>).

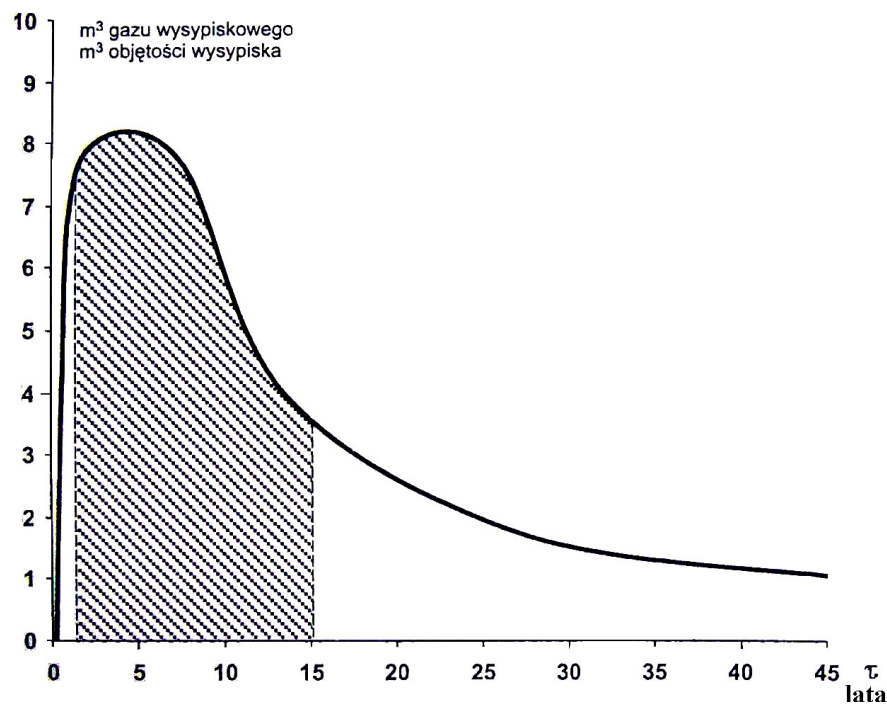
W powstającym biogazie ze składowiska oprócz metanu i dwutlenku węgla występują liczne związki śladowe, do których można zaliczyć: benzen, toluen, siarkowodór, amoniak, aceton, etan, aldehyd octowy oraz związki chloro organiczne (Rosik-Dulewska, 2008).



Rys. 4. Skład gazu ze składowiska odpadów z upływem czasu (Rosik-Dulewska, 2008)

Oprócz zmian składu biogazu zmienia się również ilość produkowanego biogazu w czasie. Na Rys 5. przedstawiono zmiany szybkości produkcji biogazu w zależności od czasu. W pierwszym roku po zamknięciu składowiska można zaobserwować szybki wzrost produkcji biogazu. Maksymalna szybkość produkcji biogazu ze składowiska średnio przypada na piąty rok po zamknięciu składowiska. W kolejnych latach następuje zmniejszanie się produkcji biogazu ze składowiska. Powierzchnią zakresowaną oznaczono obszar, w którym powstający biogaz można wykorzystać do produkcji energii.

Po zakończonym wykorzystywaniu biogazu do produkcji energii, biogaz nadal jest produkowany z małą szybkością. Ten stan może trwać przez okres nawet 100 lat.



Rys. 5. Zmiana ilości powstającego gazu składowiskowego z odpadów stałych w czasie (Żygadło, 2001)

### Efekt cieplarniany oraz właściwości CH<sub>4</sub>

Wskaźnik GWP (Global Warming Potential), określający wpływ poszczególnych związków na efekt cieplarniany, dla metanu jest 23 razy większy niż dla CO<sub>2</sub>. Wyższa wartość wskaźnika GWP dla metanu spowodowana jest silniejszą absorpcją promieniowania podczerwonego, a także tym, że produkty rozkładu CH<sub>4</sub> w troposferze, wskutek reakcji z rodnikami hydroksylowymi, dają również gazy cieplarniane. Roczna emisja metanu ze wszystkich źródeł na świecie szacowana jest na poziomie ok. 500-600 Tg, z czego około 200 Tg pochodzi ze źródeł naturalnych (Grubler, 1998). Do trzech największych źródeł antropogenicznej emisji metanu zalicza się hodowlę zwierząt (85 Tg), uprawę ryżu (60 Tg) oraz składowiska odpadów (od 40 do 60 Tg) (Lelieveld i wsp., 1998). Do pozytywnych właściwości metanu zalicza się jego wartość opałową, dzięki czemu metan może być wykorzystywany do produkcji energii poprzez spalanie. Metan posiada właściwości wybuchowe, przy czym dolna granica wybuchowości wynosi 5%, a górna 15% (Rosik-Dulewska, 2008).

### Spalanie biogazu

Zmniejszenie efektu cieplarnianego biogazu powstającego na składowisku odpadów komunalnych można uzyskać poprzez spalanie biogazu. W wyniku spalania metan zostaje utleniony do dwutlenku węgla, który powoduje 23 razy mniejszy efekt cieplarniany. Spalanie biogazu może być prowadzone z odzyskiem energii lub bez odzysku energii. Spalanie biogazu z odzyskiem energii polega na spalaniu biogazu w silnikach, które napędzają turbiny. Dodatkowo w układzie tym może być odzyskiwana energia cieplna zawarta w spalinach (układ taki nazywa się kogeneracją). Spalanie biogazu bez odzysku energii polega na spalaniu biogazu w pochodni, w których nie ma odzysku energii. Podczas spalania biogazu należy zwrócić uwagę na śladowe zanieczyszczenia występujące w biogazie, gdyż niektóre związki w trakcie spalania mogą tworzyć toksyczne zanieczyszczenia. Powyższe rozwiązania są stosowane dla dużych szybkości produkcji biogazu ze składowiska.

## **Utlenianie metanu w biofiltrze**

Problem pojawia się, gdy produkcja biogazu ze składowiska jest na tyle niska, że spalanie biogazu jest nieekonomiczne. W takim przypadku z pomocą przychodzą mikroorganizmy, które utleniają metan przy niskiej produkcji biogazu do dwutlenku węgla. Mikroorganizmy utleniające metan występują w dobrze przewietrzanych glebach oraz w wodzie (Rożej i wsp., 1999). Zdolności utleniania metanu do dwutlenku węgla posiadają bakterie metanotroficzne (*Methylomonas*, *Methylococcus*, *Methylosinus*). Brak tlenu w warstwie utleniającej metan prowadzi do inhibicji utleniania metanu. Oprócz utleniania metanu w biofiltrze utleniane są również śladowe związki organiczne zawarte w biogazie ze składowiska (Barlaz i wsp. 2004). Do najczęściej stosowanych materiałów jako wypełnienie biofiltra zaliczyć można gleby z powierzchni nakładu składowiska, torf, kompost oraz wypełnienia mieszane. Utlenianie metanu może odbywać się w warstwie nasypowej na składowisku, jak również w kontenerach, zwanych biofiltrami, do których biogaz ze składowiska jest doprowadzany z istniejącej instalacji odgazowywania.

## **Napowietrzanie odpadów**

Do innej grupy metod ograniczania emisji gazów cieplarnianych, jak również odcieków z składowisk odpadów komunalnych należy zaliczyć napowietrzanie bryły odpadów. Na skutek wprowadzania powietrza do odpadów następują zmiany warunków anaerobowych na aerobowe. W warunkach aerobowych występuje szybki rozkład materii organicznej, zawartej w odpadach przez mikroorganizmy aerobowe do wody i dwutlenku węgla (Mertoglu i wsp. 2006). Napowietrzanie odpadów powoduje przyspieszenie stabilizacji składowiska odpadów oraz osiadanie bryły odpadów, zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych, jak również emisji odorów (Ritzkowski i wsp., 2003).

## **Lizymetry**

W celu optymalizacji procesów oraz lepszego zrozumienia procesów zachodzących w odpadach wykonuje się symulacje doświadczalne w specjalnie zaprojektowanych bioreaktorach zwanych również lizymetrami. Lizymetry, czy też bioreaktory zbudowane są z pojemników, które są załadowywane odpadami, a następnie szczelnie zamykane. W lizymetrach bada się zarówno wpływ parametrów operacyjnych, jak również skład odpadów lub innych dodatkowych parametrów na procesy zachodzące w odpadach. Lizymetry są również wykorzystywane do symulacji pracy biofiltrów, w których następuje utlenianie metanu.

## *Literatura*

- Barlaz M. A., Green R. B., Chanton J. P., Goldsmith C. D., Hater R., (2004). Evaluation of a biologically active cover for mitigation of landfill gas emissions. *Environmental Science of Technology*, 38, 4891--4899.
- Grubler A., (1998). *Technology and global change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- GUS, (2009). *Ochrona Środowiska 2009*. Zakład Wydawnictw Statystycznych, Warszawa.
- Hokes J., (1983). Significance of Biogas Production in Waste Tips. *Waste Management & Research*, 1, 323-335.
- Jędrzak A., (2007). *Biologiczne przetwarzanie odpadów*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Klass D. L., (1984). Methane from Anaerobic Fermentation. *Science*, 223, 1021-1028.
- KPGO, (2006). *Krajowy plan gospodarki odpadami 2010*. Uchwała Rady Ministrów, nr 233 z dn. 29 XII 2006.
- Ledakowicz S., Krzystek L., (2005). Wykorzystanie fermentacji metanowej w utylizacji odpadów przemysłu rolno-spożywczego. *Biotechnologia*, 3, 165-183.
- Lelieveld J., Crutzen P.J., Dentener F.J., (1998). Changing concentration, lifetime and climate

forcing of atmospheric methane. *Tellus B*, 50, 128.

Oleszkiewicz J., (1999). *Eksploracja składowiska odpadów – poradnik decydenta*. LEM PROJEKT s.c., Kraków.

Mertoglu B., Calli B., Inanc B., Ozturk I., (2006). Evaluation of in situ ammonium removal in an aerated landfill bioreactor. *Process Biochemical*. 41, 2359-2366.

Miksch K., Sikora J., (2010). *Biotechnologia Ścieków*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

Rosik-Dulewska C., (2008). *Podstawy gospodarki odpadami*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

Ritzkowski M., Heyer K.-U., Stegmann R., (2003). In situ aeration of old landfills: carbon balances, temperatures and settlements. *Materiały konferencyjne: Ninth International Waste Management and Landfill Symposium, Proceedings of Sardinia, Cagliari*.

Rożej A., Stepniewski W., Małek W., (1999). Bakterie metanotroficzne w ekosystemach. *Postępy Mikrobiologii*, 38, 295-313.

Żygadło M., (2001). *Strategia gospodarki odpadami komunalnymi*. Wydawnictwo: Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych, Poznań.



**KAPITAŁ LUDZKI**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

**UNIA EUROPEJSKA**  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



*Publikacja powstała w ramach projektu "Bioenergia dla Regionu - Zintegrowany Program Rozwoju Doktorantów",  
współfinansowanego przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego*