

## EMISJA BIOGAZU Z OSADÓW DENNYCH ZBIORNIKA WODNEGO W WARUNKACH SILNEJ ANTROPOPRESJI

MACIEJ KOSTECKI, JERZY MAZIERSKI, ELIGIUSZ KOWALSKI

Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk  
ul. M. Skłodowskiej-Curie 34, 41-819 Zabrze

Keywords: biogas, bottom sediments, dam-reservoirs, methane fermentation.

### BIOGAS EMISSION FROM THE BOTTOM SEDIMENTS OF DAM-RESERVOIR IN THE STRONG ANTHROPOPRESSURE

The results of investigation on the amount and chemical composition of biogas emitted from bottom sediments of polluted Dzierżno Duże dam reservoir have been presented. The bottom sediments could be a resource of considerable quantity of biogas, e.g. methane. The dilution of methane in water is similar to that of oxygen. The presence of methane dissolved in the water deteriorates environmental conditions. The quantity of biogas depending on temperature ranged from 2 to 12 dm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d. The biggest singular grow exist in the water temperature 10–15°C. Chemical composition for biogas is dependent on the temperature. Along with the water temperature growth from 7 to 24°C, participation of methane in the biogas increased from 73% to 85%, and the participation of nitrogen from 3.9% to 22.47%. The participation of carbon dioxide decreased from 22% to 4.5%. The heterogeneous process of biogas emission arc running in the kinetic and diffusion area is dependent on temperature. In the low temperature the progress of the process is controlled by the speed of biochemical reaction. The progress of the diffusion process grows in a high temperature, and in the range of 15–24° C the processes is controlled by diffusion of substrates and products of reaction.

#### Streszczenie

Przedstawiono wyniki badań nad ilością i składem chemicznym gazu wydzielanego z osadów dennych silnie zanieczyszczonego zbiornika zaporowego Dzierżno Duże (woj. śląskie). Osady dennie mogą być źródłem znacznych ilości biogazu, w tym metanu, który rozpuszczając się w wodzie pogarsza warunki środowiskowe. Ilość wydzielanego gazu w zależności od temperatury wody wynosiła od 2 dm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d do 12 dm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d. Największy przyrost jednostkowy emisji następuje w przedziale temperatur od 10 do 15°C. Emitowany do powietrza gaz stanowi jeden z elementów jego zanieczyszczenia w rejonie emisji. Ilość i skład gazu są zależne od temperatury. Wraz ze wzrostem temperatury wody od 7°C do 24°C udział metanu zwiększał się z 73% do 85%, udział azotu wzrastał z 3,9% do 22,47%. W miarę wzrostu temperatury zmniejszał się udział dwutlenku węgla, z 22% do 4,5%. Wydzielanie biogazu z osadów dennych jest procesem heterogennym, przebiegającym w zależności od temperatury w obszarze dyfuzyjnym lub kinetycznym. W zakresie niskich temperatur szybkość procesu jest kontrolowana przez szybkość reakcji biochemicznej. Wraz ze wzrostem temperatury rośnie szybkość dyfuzji i w zakresie temperatur 15–24°C proces jest kontrolowany szybkością dyfuzją substratów i produktów reakcji.

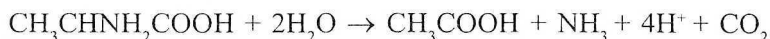
## WPROWADZENIE

Fermentacja metanowa jest procesem stosowanym w technologii utylizacji osadów ściekowych powstających w oczyszczalniach ścieków. Jako proces biologiczny w wyniku którego usuwane są substancje organiczne jest dokładnie opisana w literaturze naukowej i technologicznej [3, 10–14]. W literaturze naukowej wskazuje się także na fakt wydzielania z osadów dennych gazu powstającego jako produkt fermentacji metanowej [3, 4, 9, 10]. Podkreśla się m.in. toksyczne oddziaływanie siarkowodoru i metanu na organizmy żywe, a także rolę pęcherzyków gazu w procesie resuspcji przyspieszającej wymianę pomiędzy osadami dennymi a warstwą przydenna wody [4]. Skąpe są jednak dane na temat wielkości emisji oraz składu gazu wydzielanego z osadów dennych, a także na temat roli jaką ten element może odgrywać w funkcjonowaniu ekosystemów wodnych [9–11].

Zbiorniki zaporowe w warunkach silnej antropopresji otrzymują wraz z wnoszonymi do nich zawiesinami duże ładunki zanieczyszczeń organicznych [5–8]. Zanieczyszczenia organiczne pochodzą ze ścieków komunalnych oraz ze ścieków przemysłowych i wód opadowych [1, 4, 6]. Zawiesiny są deponowane na dnie zbiornika. Poprawia się jakość wody w rzece poniżej zbiornika, jednocześnie zbiornik ulega przyspieszonej degradacji oraz staje się uciążliwy dla najbliższego otoczenia. Wynika to ze stopnia i charakteru zanieczyszczenia [2, 5–7].

Związki rozpuszczone i koloidalne zawieszony w toni wodnej ulegają przemianom w wyniku procesów tlenowych, o ile zapotrzebowanie tlenu jest mniejsze od podaży tlenu, lub częściowo na drodze beztlenowej, gdy występuje deficyt tlenu. W głębszych warstwach lub w przypadku braku glonów zielonych mineralizacja zanieczyszczeń przebiega na drodze beztlenowej z udziałem fakultatywnych bakterii heterotroficznych. Podobne procesy zachodzą w osadach dennych rozkładanych przez drobnoustroje w warunkach beztlenowych z wydzieleniem produktów tego rozkładu.

Procesy rozkładu zanieczyszczeń w warunkach deficytu tlenowego ze względu na charakter przemian biochemicznych mogą przebiegać według szlaków tlenowych lub beztlenowych [14]. W pierwszym przypadku mamy do czynienia z warunkami anoksyicznymi polegającymi na wykorzystaniu azotanów, azotynów i siarczanów, a produktami przemian są azot gazowy oraz siarkowodor. Po zredukowaniu tych związków następują właściwe przemiany beztlenowe. Należy zwrócić uwagę na dwuetapowy charakter przemian beztlenowych, w pierwszym następują procesy hydrolizy i upłynnienia zanieczyszczeń. Produktami tej fazy są kwasy organiczne, aldehydy, alkohole oraz dwutlenek węgla. Produkty tego etapu stanowią substrat dla bakterii metanowych, które rozkładają je z wydzieleniem produktów gazowych: metanu i dwutlenku węgla [10]. Przebieg procesu można zobrazować następującym ciągiem reakcji na przykładzie rozkładu alaniny [14]:



Ważnym czynnikiem procesu fermentacji jest stosunek C/N w osadzie, gdyż decyduje on o prawidłowym przebiegu reprodukcji mikroorganizmów. Stosunek ten w zależności od substratu waha się w granicach 0,108–0,263 [14]. Kwasy organiczne powstające w wyniku rozkładu detritusu także sprzyjają zakwaszeniu środowiska i fermentacji metanowej [2, 15].

W procesie rozkładu osadów ściekowych zawsze powstają produkty gazowe. Skład gazu zależy od składu osadów oraz od charakteru procesów dominujących w warstwie przydennej, a jego ilość od ilości zdeponowanych osadów i zawartości materii organicznej [2, 5, 13, 14]. Istotny jest również wpływ temperatury (pory roku) i obciążenia zbiornika ściekami.

## CEL BADAŃ

Pomimo pewnego podobieństwa, osady denne zbiorników wodnych różnią się od osadów ściekowych. Różne jest także środowisko, w jakim przebiega proces. Podjęto próbę zbadania procesu produkcji i wydzielania biogazu z osadów dennych zanieczyszczonego zbiornika w warunkach *in situ* w celu określenia roli tego procesu jako czynnika środowiskowego oraz warunków jego przebiegu.

## OBIEKT BADAŃ

Wchodzący w skład Zachodniego Węzła Wodnego GOP zbiornik Dzierżno Duże pełni rolę alimentacyjną dla zasilania Kanału Gliwickiego w okresach niskich stanów wody. Pełni również funkcję zabezpieczenia przeciwpowodziowego w dorzeczu Kłodnicy [6–9]. Ponieważ przepływa przez niego cała rzeka Kłodnica rola zbiornika poszerzyła się o funkcję naturalnej oczyszczalni rzecznej. Stało się to oczywiście ze szkodą dla jakości wody w zbiorniku [6].

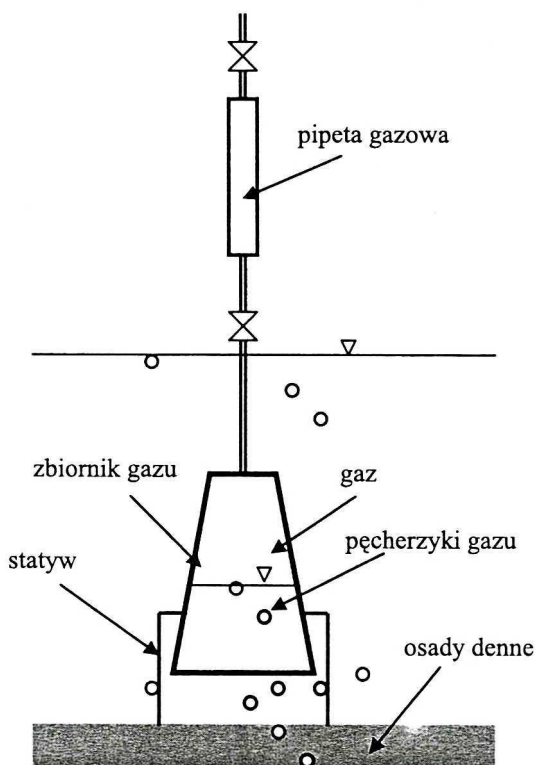
Procesy samooczyszczania zachodzą najbardziej intensywnie w górnej części zbiornika. Ta część zbiornika o powierzchni szacowanej na około 80 ha spełnia funkcję oczyszczalni mechanicznej i biologicznej. W części tej zachodzą również intensywne procesy przeróbki osadów, które wnoszone są do zbiornika przez Kłodnicę. Obiektem badań była praktycznie ta właśnie, reaktywna strefa zbiornika.

## METODYKA BADAŃ

W strefie silnego wydzielania gazu, począwszy od ujścia rzeki Kłodnicy do zbiornika, wzdłuż osi, w odległości około 50 m od siebie, ustawiono sześć łapaczy gazu. Pomiaru ilości biogazu wydostającego się z osadów dennych wykonywano stosując urządzenia do jego przechwytywania własnej konstrukcji (Rys. 1). Wydzielający się gaz zbierano w ustawionym na trójnogu pojemniku. Pojemnik posiadał ujście, przez które węzłem doprowadzano do wyskalowanego zbiornika.

Pomiary wykonywano od marca do czerwca 2001. W sumie wykonano dziewięciokrotnie pomiary objętości gazu na sześciu stanowiskach. W pobranych do szklanych pipet próbach biogazu oznaczano: azot (N), metan (CH<sub>4</sub>), dwutlenek węgla (CO<sub>2</sub>), tlenek węgla (CO), etan (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), propan (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), propylen (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>), izobutan (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>), dwutlenek siarki (SO<sub>2</sub>). Analizy wykonywano metodą chromatograficzną.





Rys. 1. Schemat urządzenia do łapania biogazu emitowanego z osadów dennych  
The installation for the biogas capture

## WYNIKI

Poniżej przedstawiono (Tab. 1) wyniki wielkości emisji biogazów na poszczególnych stanowiskach, zależność pomiędzy wielkością emisji a temperaturą, dynamikę wzrostu wielkości emisji.

Ilość gazu wydzielanego na poszczególnych stanowiskach była różna. Różnice te przedstawiono na rysunku 2.

Ilość gazu wydzielanego z osadów dennych pozostaje w wyraźnej zależności od temperatury. Zależność tę dla poszczególnych stanowisk pomiarowych przedstawiono na rysunku 3.

Na rysunku 4 przedstawiono tę zależność dla wartości średnich.

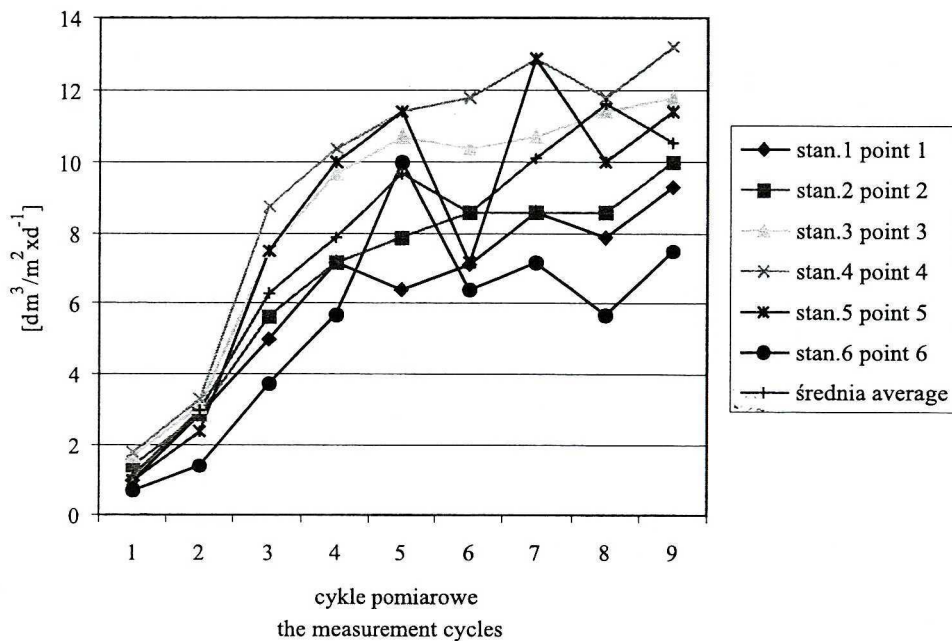
Na podstawie wyników pomiarów określono dynamikę wzrostu emisji. Największy przyrost jednostkowy emisji następuje w przedziale temperatur od 10 do 15°C. (Tab. 2).

Skład emitowanego biogazu

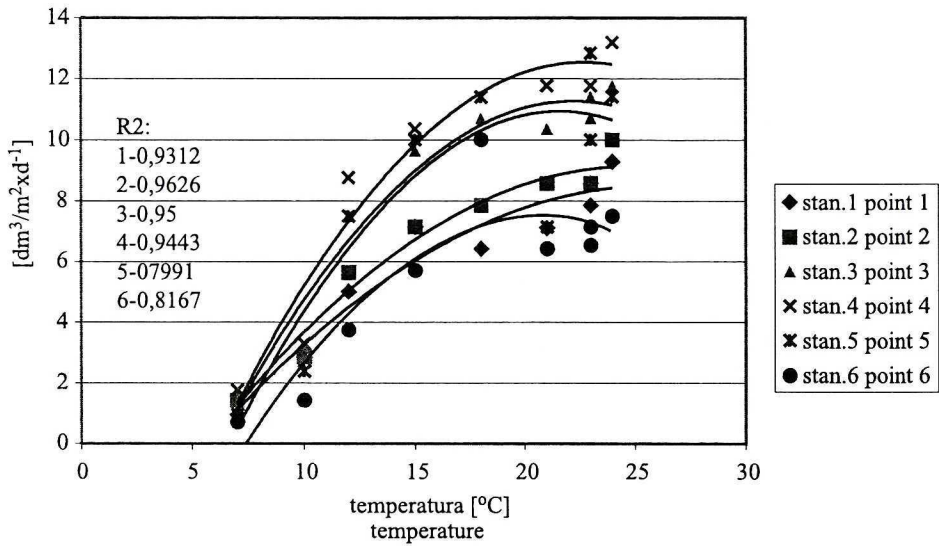
Wykonane analizy wykazały, że skład biogazu zmienia się w zależności od temperatury. W tabeli 3 przedstawiono średnie udziały [%] poszczególnych składników biogazu.

Tabela 1. Wielkość emisji biogazu [ $\text{dm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ ] z osadów dennych zbiornika Dzierżno Duże, w strefie oddziaływania wód rzeki Kłodnicy, w zależności od temperatury  
 The value of biogas emission [ $\text{dm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ ] from the bottom sediments of Dzierżno Duże dam-reservoir, in the dependence of temperature

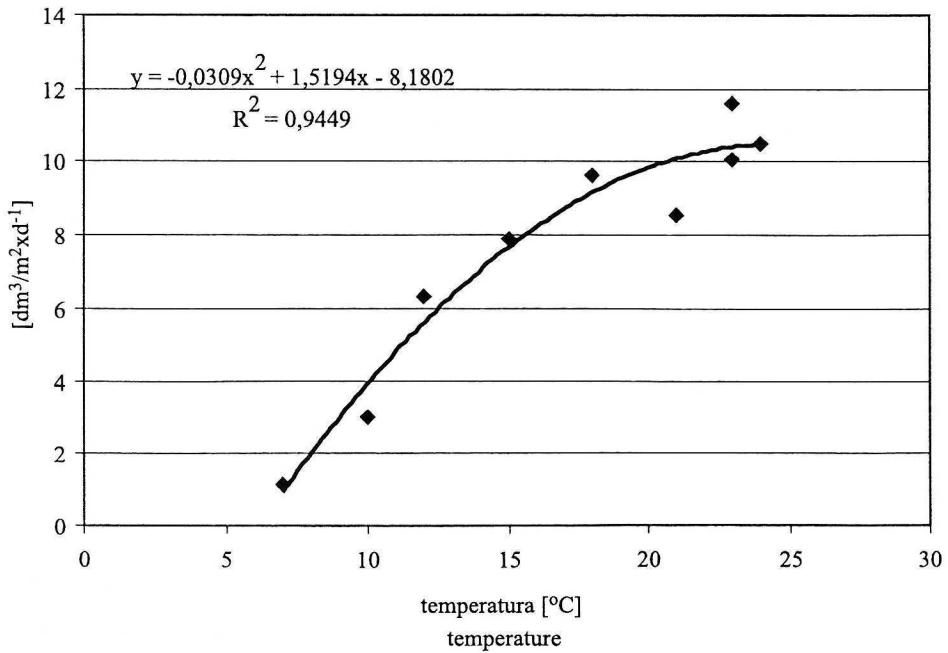
	Temperatura [°C] Temperature [°C]								
	7	10	12	15	18	21	23	23	24
Stanowisko sample point	Wielkość emisji [ $\text{dm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ ] The emission values [ $\text{dm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ ]								
1	0,95	2,85	5	7,14	6,42	7,1	8,57	7,85	9,28
2	1,42	2,85	5,62	7,14	7,85	8,57	8,57	8,57	10
3	1,66	3,1	7,5	9,64	10,7	10,35	10,71	11,42	11,78
4	1,77	3,3	8,75	10,35	11,4	11,78	12,85	11,78	13,2
5	0,95	2,38	7,5	10	11,4	7,14	12,85	10	11,42
6	0,71	1,43	3,75	5,71	10	6,42	7,14	5,71	7,5
średnia average	1,14	3	6,31	7,89	9,64	8,57	10,7	11,6	10,53



Rys. 2. Wielkość emisji biogazu z osadów dennych na poszczególnych stanowiskach – Dzierżno Duże  
 The emission of biogas from the bottom sediments on the sample points



Rys. 3. Zależność wielkości emisji biogazu od temperatury wody na poszczególnych stanowiskach pomiarowych – zbiornik Dzierżno Duże  
The dependency of biogas emission and temperature on the sample points



Rys. 4. Zależność wielkości emisji biogazu z osadów dennych od temperatury wody – zbiornik Dzierżno Duże, wartości średnie  
The dependency of biogas emission from the bottom sediments and water temperature – average values

Tabela 2. Przyrost emisji biogazu w funkcji przyrostu temperatury [ $\Delta V/1^{\circ}\text{C}$ ]  
The increase of biogas emission as the temperature function [ $\Delta V/1^{\circ}\text{C}$ ]

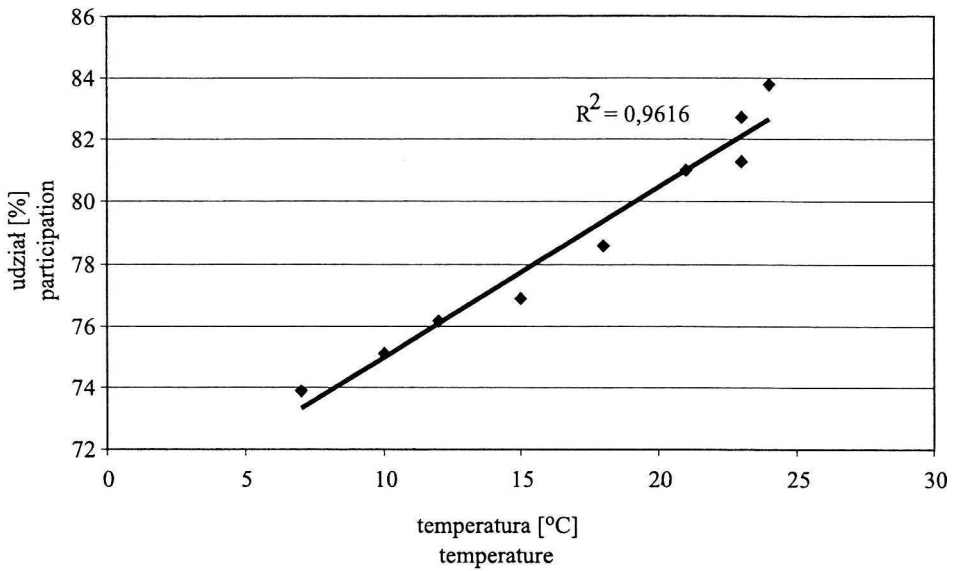
	Zakresy temperatur The ranges of temperature		
	7–10°C	10–15°C	15–24°C
Stanowisko sample point	$\Delta V/1^{\circ}\text{C}$	$\Delta V/1^{\circ}\text{C}$	$\Delta V/1^{\circ}\text{C}$
1	0,63	0,858	0,237
2	0,476	0,858	0,317
3	0,48	1,308	0,237
4	0,51	1,41	0,316
5	0,476	1,524	0,157
6	0,24	0,856	0,198
średnia average	0,62	0,978	0,293

Tabela 3. Zależność udziału (%) poszczególnych składników biogazu wydzielanego z osadów dennych zbiornika Dzierżno Duże od temperatury – wartości średnie  
The dependence of biogas components participation of water temperature – average values

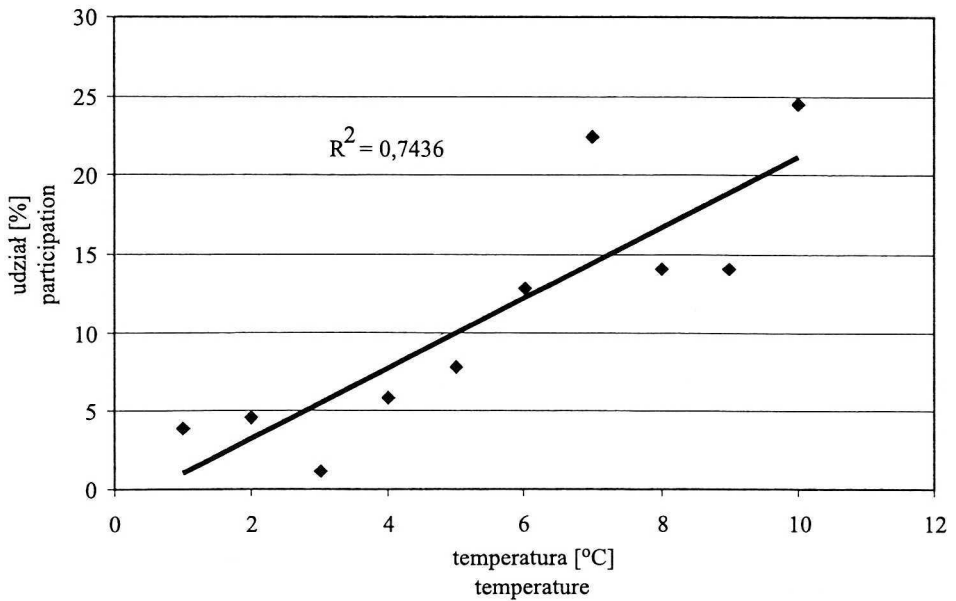
°C	7	10	12	15	18	21	23	24
N	3,94	4,53	1,19	5,84	7,75	12,85	22,47	14,05
CH <sub>4</sub>	73,88	75,1	76,16	76,11	78,59	81,04	82,0	83,76
CO <sub>2</sub>	22,07	20,42	22,65	18	13,66	4,03	4,725	4,5
CO	nw	nw	nw	nw	nw	nw	nw	nw
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,005	0,0013	0,004	nw	0,0033	0,0028	0,004	0,0033
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,00053	0,00059	0,00056	0,00055	0,0001	0,00049	0,00039	0,00034
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	nw	nw	nw	nw	nw	nw	nw	nw
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,0006	0,00035	0,00056	0,00039	0,000039	0,000021	0,00039	0,000044
SO <sub>2</sub>	0,0015	0,00013	nw	nw	0,000037	nw	nw	nw

Udział poszczególnych składników biogazu

Jak wspomniano wyżej, udział składników biogazu wydzielanego z osadów dennych jak: azot, metan i dwutlenek węgla zmienia się w zależności od temperatury (Rys. 5–7).

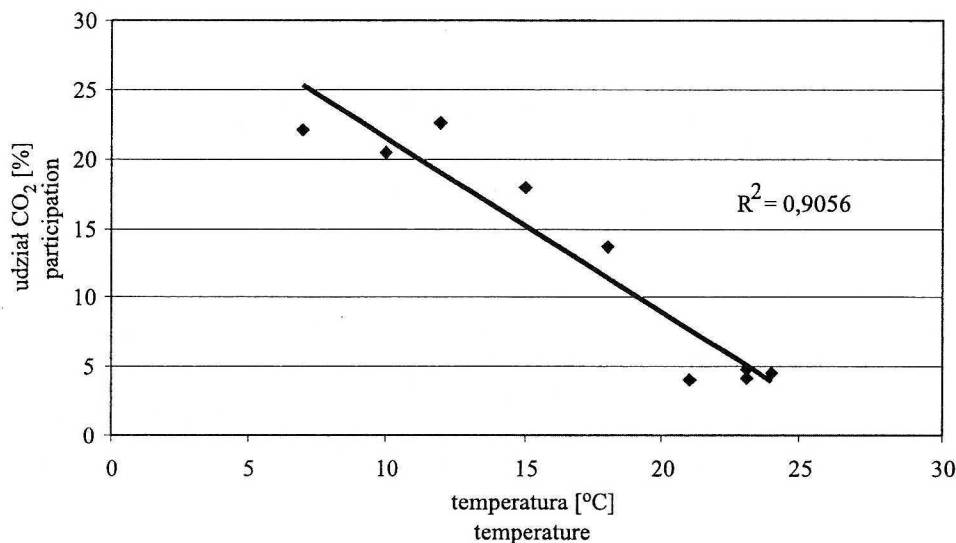


Rys. 5. Zależność udziału (%) metanu ( $\text{CH}_4$ ) w biogazie emitowanym z osadów dennych od temperatury wody – zbiornik Dzierżno Duże  
The dependency of the methane participation [%] and water temperature



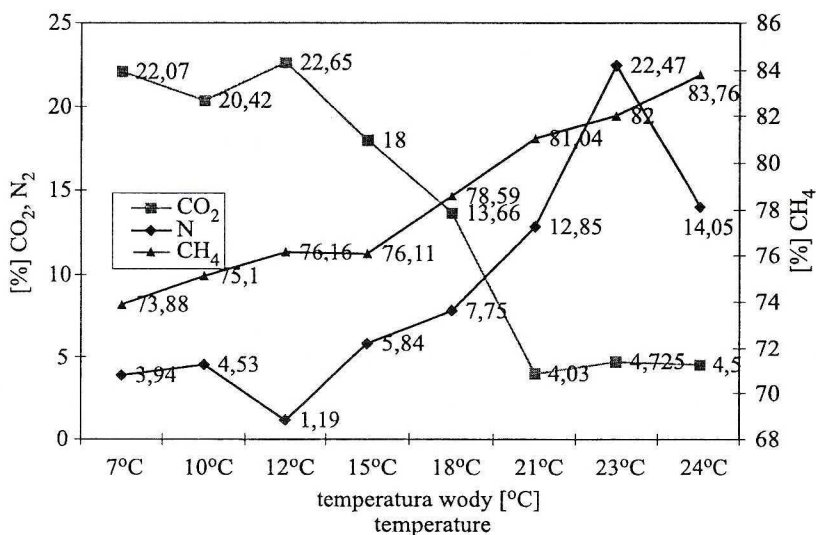
Rys. 6. Zależność udziału azotu ( $\text{N}_2$ ) w biogazie emitowanym z osadów dennych od temperatury wody – zbiornik Dzierżno Duże  
The dependency of the nitrogen participation and temperature





Rys. 7. Zależność udziału [%] dwutlenku węgla (CO<sub>2</sub>) w biogazie emitowanym z osadów dennych od temperatury – zbiornik Dzierżno Duże  
The dependence of the carbon dioxide participation and temperature

Na rysunku 8 przedstawiono zmiany udziału głównych składników biogazu w funkcji temperatury łącznie, w celu silniejszego podkreślenia wyraźnie zauważalnych prawidłowości.



Rys. 8. Zmiany udziału metanu (CH<sub>4</sub>), azotu (N<sub>2</sub>) i dwutlenku węgla (CO<sub>2</sub>) w biogazie w zależności od temperatury wody – Dzierżno Duże

The changes of the methane, nitrogen and carbon dioxide participation in the dependency of the water temperature

## DYSKUSJA WYNIKÓW

Przedstawione wyniki badań nad ilością i składem chemicznym gazu wydzielanego z osadów dennych pozwalają stwierdzić, że osady denne mogą być źródłem znacznych ilości biogazu, którego składniki rozpuszczając się w wodzie pogarszają warunki środowiskowe. Emitowany do powietrza gaz stanowi jeden z elementów jego zanieczyszczenia.

Ilość i skład gazu wydzielanego z osadów dennych pozostaje w wyraźnej zależności od temperatury. Ilość wydzielanego gazu w temperaturze 7°C wynosiła około 2–3 dm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d i dochodziła do 12 dm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d w temperaturze 24°C. Największy przyrost jednostkowy emisji następuje w przedziale temperatur od 10 do 15°C. W temperaturach powyżej 18°C ilość wydzielanego z osadów dennych biogazu wzrasta wolniej i stabilizuje się przy temperaturze około 24°C. Zależność tę dla różnych stanowisk pomiarowych przedstawiono na rysunku 2.

Wraz ze wzrostem temperatury wody, będącej środowiskiem reakcji, od 7°C do 24°C udział metanu wzrastał z 73% w marcu do 85% w czerwcu. Udział azotu wzrastał z 3,9% w marcu do 22,47% w czerwcu. Natomiast w miarę wzrostu temperatury następował spadek udziału dwutlenku węgla, z 22% w marcu do 4,5% w czerwcu.

W niskich temperaturach (7–12°C) udział azotu w emitowanym gazie jest niewielki i nie przekracza 5%. Wraz ze wzrostem temperatury zwiększa się szybkość denitryfikacji, o czym świadczy zwiększający się udział azotu w gazie dochodzący do ponad 22%.

W procesie denitryfikacji w ścisłym związku z powstawaniem azotu gazowego zwiększa się również produkcja CO<sub>2</sub>. Najwyższą zawartość CO<sub>2</sub> w gazie zaobserwowano w zakresie temperatur od 7° do 12°C. Zawartość dwutlenku węgla obniża się wraz ze wzrostem temperatury, co związane jest zwiększającym się wykorzystywaniem CO<sub>2</sub> jako akceptora wodoru w procesie metanogenezy oraz wykorzystywaniem tego gazu w procesie fotosyntezy. Wydaje się, że w temperaturze 21°C szybkość metanogenezy osiąga maksimum i dalszy wzrost temperatury nie powoduje istotnej zmiany zawartości CO<sub>2</sub>.

W oparciu o uśrednione wyniki pomiarów określono wpływ temperatury na szybkość (intensywność) wydzielania gazu. Przyjmując, że wpływ temperatury na szybkość reakcji opisuje równanie Arrheniusa w postaci:

$$\ln r = \ln A - \frac{E_A}{RT}$$

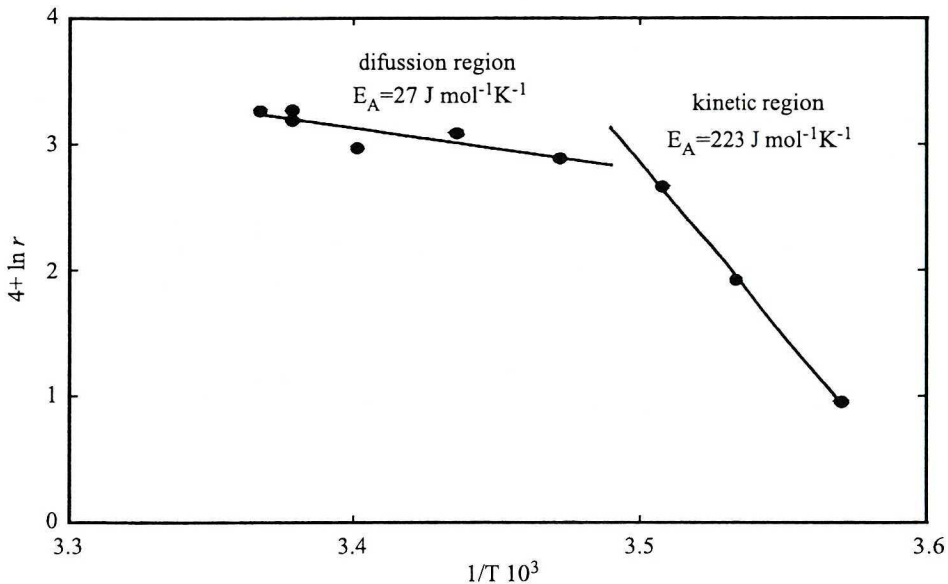
stwierdzono nieliniowy wpływ temperatury na szybkość wydzielania gazu.

Przebieg zależności temperaturowej wskazuje (Rys. 9) na zmianę etapu kontrolującego szybkość reakcji. W zakresie niskich temperatur wody (7–12°C) widoczny jest wyraźny wpływ temperatury na szybkość reakcji. Wpływ czynnika termicznego wyraźnie maleje przy wyższych temperaturach wody (15–24°C).

Proces wydzielania biogazu jest procesem heterogennym, przebiegającym w zależności od temperatury w obszarze dyfuzyjnym lub kinetycznym. Sugeruje to, że w zakresie niskich temperatur, gdzie energia aktywacji wynosi 27 J mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> szybkość procesu jest kontrolowana przez szybkość reakcji biochemicznej. Wraz ze wzrostem temperatury rośnie szybkość dyfuzji i w zakresie temperatur 15–24°C, gdzie energia aktywacji wynosi 283 J mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>, proces jest kontrolowany szybkością dyfuzją substratów i produktów reakcji. W obszarze dyfuzyjnym temperatura w niewielkim stopniu wpływa na proces, istotny wpływ mają natomiast czynniki hydrodynamiczne tj. intensywność mieszania i burzliwość przepływu [16]. Procesy dyfuzji

są powolne, jednak mogą one być stymulowane przez ruchy wodne silniejsze w strefie aktywnego dna i słabsze w warstwie hypolimnionu [4].

Osady dennie z reguły zalegają pod grubą warstwą wody. Wskazuje to na rolę hypolimnionu w procesie dyfuzji gazu, w szczególności na znaczenie występowania letniej stratyfikacji termicznej i tlenowej mas wodnych. Podział słupa wody na warstwy zróżnicowane pod względem temperatury i stężenia rozpuszczonego w wodzie tlenu ogranicza przydenny ruch wody, a zatem może hamująco wpływać na wydzielanie się gazu z osadów dennych.



Rys. 9. Energia aktywacji fermentacji metanowej osadów dennych  
The activation energy for the methane fermentation in the bottom sediments

## WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

1. Osady dennie są źródłem znacznych ilości biogazu, który stanowi element zanieczyszczenia wody oraz powietrza atmosferycznego.
2. Ilość i skład gazu wydzielanego z osadów dennych pozostaje w wyraźnej zależności od temperatury.
3. W zależności od temperatury proces wydzielania biogazu jako heterogeny, przebiega w obszarze dyfuzyjnym lub kinetycznym. W zakresie niskich temperatur fermentacja przebiega w obszarze kinetycznym, w zakresie temperatur wyższych, w obszarze dyfuzyjnym.
4. Stratyfikacja termiczna i tlenowa mas wodnych może wywierać, szczególnie latem, wpływ na dyfuzyjny etap wydzielania biogazu z osadów dennych.

## LITERATURA

- [1] Górniak A.: *Substancje humusowe i ich rola w funkcjonowaniu ekosystemów słodkowodnych*, Prace Uniwersytetu Warszawskiego, filia w Białymstoku, 448, 1–151 (1996).
- [2] Green F.B., L. Bernstone, T.J. Lundquist, J. Muir, R.B. Tresan, W.J. Oswald: *Methane fermentation, submerged gas collection, and the fate of carbon in advanced integrated wastewater pond systems*, Water Science and Technology, **31**, 2, 55–65 (1995).
- [3] Januszkiewicz T.: *Jezióra jako odbiorniki ścieków – skutki zanieczyszczenia i sposoby ochrony*, Wiad. Ekol., **18** (2), 141–147 (1972).
- [4] Kajak Z.: *Hydrobiologia – Limnologia*, PWN, Warszawa 1998.
- [5] Kostecki M., A. Smyła, A. Starczewska: *Ocena stanu sanitarnego zbiornika zaporowego Dzierżno Duże*, Archiwum Ochrony Środowiska, **26**, 4, 57–73 (2000).
- [6] Kostecki M.: *Zawiesina jako element zanieczyszczeń antropogennego ekosystemu wodnego na przykładzie zbiornika zaporowego Dzierżno Duże*, Archiwum Ochrony Środowiska, **26**, 4, 75–94 (2000).
- [7] Kostecki M., M. Czaplicka, A. Węglarz: *Wybrane związki organiczne (BTEX, WWA) w osadach dennych antropogennego zbiornika wodnego Dzierżo Duże*, Archiwum Ochrony Środowiska, **26**, 4, 95–108 (2000).
- [8] Kostecki M., M. Czaplicka: *Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne jako element zanieczyszczenia osadów dennych Kanalu Gliwickiego*, Archiwum Ochrony Środowiska, **27**, 3, 119–135 (2001).
- [9] Martynova M.V., R.N. Murogova, P.I. Rogozyev: *Release of gas from the bottom of a small lake*, Water Resources, **22**, 6, 658–663 (1995).
- [10] Martynova M.V., R.N. Murogova, L.I. Popov: *Gas composition of the Lake Glubokoe bottom sediments*, Water Resources, **23**, 2, 203–208 (1996).
- [11] Martynova M.V., L.I. Popov, R.N. Murogova: *On the composition of gases contained in water and silts of two lakes in Kosino*, Water Resources, **24**, 2, 160–164 (1997).
- [12] Oswald W.J.: *Fundamental Factor in Stabilization Pond Design*, *Advances in Biological Waste Treatment*, Proc. Third Conf. on Biol. Waste Treat. Manhattan Coll, Publ, Oxford 1963.
- [13] Popel F.: *Sludge Digestion and Disposal*, Technische Universität, Stuttgart 1967.
- [14] Schlegel M.G.: *Mikrobiologia ogólna*, PWN, Warszawa 1996.
- [15] Smyła A., A. Starczyńska, M. Kostecki: *Microbiological investigations of Dzierżno Duże dam-reservoir*, XXIV Congress of the Polish Society of Microbiologist. Medical Science Monitor, International Journal of Experimental and Clinical Research. Białystok, Poland, September 12–15, 2000.
- [16] Szarawara J., J. Skrzypek: *Podstawy inżynierii reaktorów chemicznych*, WNT, Warszawa 1980.

Wpłynęło: 28 marca 2003, zaakceptowano do druku: 15 września 2003.