

WPŁYW ATERMICZNYCH WŁAŚCIWOŚCI MIKROFALOWEGO PROMIENIOWANIA ELEKTROMAGNETYCZNEGO NA INTENSYFIKACJĘ PROCESU FERMENTACJI METANOWEJ ŚCIEKÓW MLECZARSKICH

Dawid Szwarc¹, Marcin Zieliński¹, Patryk Nicewicz¹,
Karolina Szwarc¹, Magdalena Rokicka¹, Marcin Dębowski¹

¹ Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Wydział Nauk o Środowisko, Katedra Inżynierii środowiska, ul. Warszawska 117A 10-720 Olsztyn, e-mail: dawid.szwarc@uwm.edu.pl

STRESZCZENIE

Celem badań było określenie wpływu elektromagnetycznego promieniowania mikrofalowego na aktywność mikroorganizmów prowadzących proces fermentacji metanowej ścieków mleczarskich. Substratem wykorzystywanym w badaniach były modelowe ścieki mleczarskie, spreparowane na bazie odłuszczonego mleka w proszku. Osad beztlenowy, na potrzeby przeprowadzenia badań, pobierany był z reaktora beztlenowego pracującego w warunkach mezofilowych, a następnie ogrzewano go za pomocą promieniowania mikrofalowego (wariant 1) lub ogrzewania konwencjonalnego w szafie termostaticznej (wariant 2). Badania podzielone były na dwa etapy, których kryterium podziału była temperatura procesu. Etap pierwszy przewidywał określenie wpływu promieniowania mikrofalowego w temperaturze 38 °C, natomiast etap drugi w temperaturze 58 °C. Wyniki badań wykazują, że wykorzystanie mikrofalowego pola elektromagnetycznego może wpływać na wzrost ilości produkowanego biogazu. Ponadto obróbka osadu, przy pomocy elektromagnetycznego pola mikrofalowego, intensyfikuje usuwanie związków organicznych w procesie fermentacji metanowej.

Słowa kluczowe: fermentacja metanowa, promieniowanie mikrofalowe, ścieki mleczarskie, biogaz.

IMPACT OF ATHERMIC PROPERTIES OF THE ELECTROMAGNETIC MICROWAVE RADIATION ON THE PROCESS OF ANAEROBIC DIGESTION OF DAIRY WASTEWATER

ABSTRACT

The aim of this study was to determine the effect of electromagnetic microwave radiation on the activity of microorganisms for the process of anaerobic digestion of dairy sewage. The substrate used in the study was a model dairy wastewater crafted based on skimmed milk powder. The sludge was necessary for the anaerobic testing were taken from the anaerobic reactor operated at mesophilic conditions, then it was heated by microwave irradiation (Option 1) or heating in a conventional thermostatic cabinet (Option 2). The study was divided into two stages, where the criterion of division was the temperature of the process. A first step provided to determine the effect of microwave irradiation at 38 °C, and the second step at 58 °C. The studies show that the use of microwave electromagnetic field may affect an increase of the biogas produced. Furthermore, sludge treatment using electromagnetic microwave field enhances the removal of organic compounds in the methane fermentation process.

Keywords: anaerobic digestion, microwave radiation, dairy wastewater, biogas.

WSTĘP

Fermentacja metanowa jest jedną z najlepiej poznanych metod przetwarzania materii organicznej do nośników energii, którymi jest m.in. biogaz zawierający wysokoenergetyczny metan. Proces ten okazuje się atrakcyjną metodą uniesz-

kodliwiania odpadów i pozyskiwania energii. Beztlenowe oczyszczanie ścieków charakteryzuje się wysoką sprawnością usuwania związków organicznych, dlatego też bardzo często wykorzystywane jest do oczyszczania ścieków pochodzących z różnych gałęzi przemysłu spożywczego. Rosnące zainteresowanie fermentacją meta-

nową oraz zwiększająca się liczba powstających instalacji do beztlenowego przetwarzania odpadów, skutkują poszukiwaniem nowych technologii pozwalających na obniżenie kosztów z jednoczesnym zwiększeniem efektywności zarówno oczyszczania ścieków jak i produkcji energii. Pomimo wielu zalet proces anaerobowego oczyszczania ścieków posiada również ograniczenia wynikające z charakterystyki procesu fermentacji metanowej. Do takich ograniczeń zaliczana jest potrzeba utrzymania odpowiedniej temperatury procesu, dlatego też ważne jest znalezienie sposobu ogrzewania reaktorów beztlenowych.

Jedną z możliwości jest wykorzystanie ogrzewania mikrofalowego. Posiada ono wiele zalet między innymi objętościowy charakter oraz selektywność ogrzewania. Oznacza to, że ogrzewaniu ulega cała objętość obiektu do głębokości wnikania mikrofal, a promieniowanie mikrofalowe oddziałuje tylko na materiały posiadające odpowiednie właściwości. Właściwości oddziaływania mikrofalowego promieniowania elektromagnetycznego na organizmy żywe można podzielić na dwie grupy: właściwości termiczne i atermiczne.

Zjawisko właściwości atermicznych promieniowania mikrofalowego nie zostało jeszcze do końca poznane. Literatura wspomina o zjawisku polaryzacji jonowej (między przestrzennej). Jony o różnych znakach znajdujące się w komórce mikroorganizmu, pod wpływem działania pola elektromagnetycznego (mikrofalowego) przemieszczają się na bieguny, powstałe w wyniku działania tego pola. Jony rozsuwają się zgodnie z biegunami i komórka zamienia się w dipol [Banik i in. 2003]. Istnieją przesłanki w literaturze, że odpowiada to za intensyfikację aktywności enzymatycznej procesów przebiegających w aktywnym polu elektromagnetycznym (mikrofalowym), w porównaniu do warunków ogrzewania konwencjonalnego [Dębowski i in. 2010]. Właściwości atermalne mogą wpływać na strukturę gatunków procesu i ich aktywność enzymatyczną, RNA i DNA komórek i syntezę białka. Zależy to od czasu pochłaniania mikrofal, ich siły i częstotliwości [Zielińska i in. 2013]. Badania wykazały, że mikrofały wpływają na struktury chromosomowe, komórkowe funkcje, tolerancje komórek na działanie mutagenów i naprawę uszkodzeń. Wykazano, że niskie promieniowanie mikrofalowe o małej mocy, może doprowadzać do mutacji w komórkach ssaków i owadów. Białko, RNA i DNA wchłanianie promieniowanie o czę-

stotliwości 65–75 [GHz], co może zakłócać naprawy tego białka, a nawet wywoływać mutacje genowe u bakterii. Mikrofały mogą też zwiększać tempo wzrostu określonych gatunków bakterii lub powodować ich szybszą regenerację, albo zapewnić większą odporność na warunki środowiskowe, np. tempo wzrostu drożdży *Saccharomyces cerevisiae* może być zwiększone o 15–30% przy niektórych częstotliwościach mikrofal [Banik i in. 2003].

Badania dotyczące wpływu promieniowania mikrofalowego na efektywność usuwania azotu ze ścieków, z wykorzystaniem źródeł biologicznych, potwierdzają pozytywny wpływ mikrofal na aktywność mikroorganizmów. Badania genetyczne wykazały, iż wyższa sprawność usuwania azotu związana była ze znaczącym wzrostem bioróżnorodności mikroorganizmów [Zieliński i Krzemieniewski 2010].

Doniesienia literaturowe potwierdzają również wpływ mikrofal na skład gatunkowy i liczbę bakterii metanogennych w procesie fermentacji metanowej. Badania dowiodły, iż na skład gatunkowy metanogennych archeonów duży wpływ miało wykorzystanie ogrzewania mikrofalowego w procesie fermentacji, o czym świadczyły uzyskane wartości indeksu Shanona-Wienera [Zieliński i in. 2011].

Celem podjętych badań było określenie wpływu promieniowania mikrofalowego na aktywność osadu beztlenowego w zależności od temperatury (warunki mezofilowe i termofilowe) oraz obciążenia zanieczyszczeniami organicznymi.

METODYKA

Materiał badawczy

Eksperyment mający na celu określenie wpływu atermicznych właściwości promieniowania mikrofalowego na aktywność osadu beztlenowego prowadzono w warunkach laboratoryjnych z wykorzystaniem szklanych reaktorów beztlenowych.

Substratem wykorzystywanym do zasilania reaktorów fermentacyjnych były modelowe ścieki mleczarskie sporządzone na bazie odtłuszczonego mleka w proszku.

Osad beztlenowy wykorzystany do zaszczerpienia reaktorów fermentacyjnych pochodził z zamkniętej komory fermentacyjnej oczyszczalni ścieków „Łyna” w Olsztynie (Tabela 1).

Tabela 1. Charakterystyka osadu beztlenowego.**Table 1.** Characteristics of anaerobic sludge.

Sucha masa	[%]	2,81±0,38
Sucha masa organiczna	[% s.m.]	58,62±1,91
Sucha masa mineralna	[% s.m.]	41,38±1,91
Azot całkowity	[mg/g s.m.]	31,25±2,89
Fosfor całkowity	[mg/g s.m.]	1,92±0,34
TC	[mg/g s.m.]	291,67±32,36
TOC	[mg/g s.m.]	187,93±28,49
Stosunek C:N	–	9,33±0,10
pH	–	7,06±0,25
Białko	[% s.m.]	18,61±2,25
Tłuszcze	[% s.m.]	3,46±0,48
Cukry	[% s.m.]	1,28±0,47

ORGANIZACJA BADAŃ

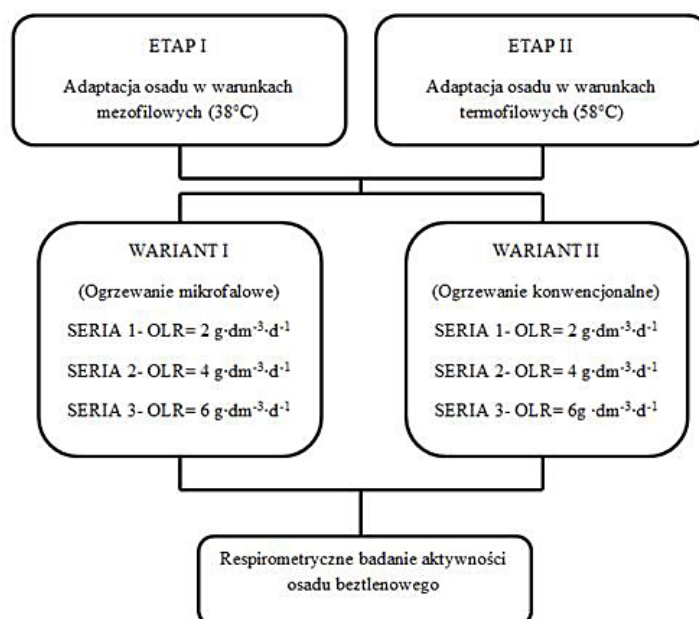
Badania podzielone były na dwa etapy, których kryterium podziału była temperatura procesu. Etap pierwszy (EI) przewidywał adaptację osadu beztlenowego w warunkach mezofilowych w temperaturze 38°C, uwzględniając różne obciążenia komory ładunkiem zanieczyszczeń organicznych. Etap ten podzielony był na dwa warianty różnicowane ze względu na sposób ogrzewania reaktora beztlenowego. Wariant pierwszy (WI) przewidywał ogrzewanie za pomocą elektromagnetycznego promieniowania mikrofalowego, natomiast w wariacie drugim (WII) wykorzystano ogrzewanie konwencjonalne.

W etapie drugim (EII) przeprowadzono adaptację osadu beztlenowego w sposób analogiczny do EI z wyjątkiem temperatury procesu, która w tym przypadku wynosiła 58°C (rys. 1).

W początkowej fazie badań prowadzono proces adaptacji osadu beztlenowego. Przebieg adaptacji osadu anaerobowego polegał na 60 dniowym prowadzeniu procesu fermentacji metanowej osadu beztlenowego obciążonego trzema różnymi ładunkami zanieczyszczeń organicznych w zależności od serii (tab. 2). Adaptacja w zależności od etapu prowadzona była w temperaturze 38°C i 58°C. Proces anaerobowego rozkładu substancji organicznej, prowadzony w trakcie adaptacji miał charakter fermentacji mokrej z przepływowym systemem dozowania substratu.

W trakcie prowadzenia adaptacji wykonywana była analiza zawartości związków organicznych wyrażonych w ChZT w ściekach dopływających i odpływających.

Po zakończeniu procesu adaptacji wykonano ocenę aktywności osadu beztlenowego w oparciu o pomiary respirometryczne. W tym celu do komór reakcyjnych wprowadzono po 100 cm³ osadu beztlenowego uzyskanego w poszczególnych seriach adaptacji obu etapów. Do każdej z komór reakcyjnych wprowadzono ścieki mleczarskie z obciążeniem wynoszącym 5 g·dm⁻³. Wszystkie próby przedmuchano azotem w celu osiągnięcia warunków beztlenowych. Przygotowane zestawy pomiarowe poddano 20 dniowej inkubacji w sza-



Rys. 1. Schemat organizacji badań
Fig. 1. Scheme of research organization

Tabela 2. Charakterystyka substratu wprowadzanego do komory fermentacyjnej**Table 2.** Characteristics of substrate fed to the digester

Parametry	Jednostka	Seria I OLR = 2 g·dm ⁻³ ·d ⁻¹	Seria II OLR = 4 g·dm ⁻³ ·d ⁻¹	Seria III OLR = 6 g·dm ⁻³ ·d ⁻¹
ChZT	mg O ₂ ·dm ⁻³	1996 ± 5	3996 ± 6	5987 ± 6
TOC	mg C·dm ⁻³	609,7 ± 27,2	1227,6 ± 29,4	1801,9 ± 37,8
Azot ogólny	mg N·dm ⁻³	95,2 ± 3,3	192,1 ± 5,2	283,9 ± 5,8
Fosfor ogólny	mg P·dm ⁻³	17,0 ± 0,9	35,2 ± 1,5	50,1,0 ± 2,3

fie termostatycznej w temperaturze 38°C dla etapu pierwszego i 58°C dla etapu drugiego.

Przed procesem fermentacji metanowej w zestawach respirometrycznych zostały wykonane analizy mieszaniny inokulum z substratem. Analizowano stężenie suchej masy, suchej masy organicznej, suchej masy mineralnej oraz stężenie związków organicznych wyrażonych jako ChZT.

Analogiczne analizy zostały wykonane po zakończeniu procesu fermentacji metanowej. Dodatkowo uzyskany biogaz został poddany analizie ilościowej oraz jakościowej przy pomocy chromatografu gazowego.

Ponadto w celu porównania aktywności osadu beztlenowego po procesie adaptacji zastosowano dodatkową metodę polegającą na analizie szybkości wzrostu mikroorganizmów z wykorzystaniem analizatora μ -Trac 4200 SY-LAB.

STANOWISKO BADAWCZE

Stanowisko badawcze składało się z dwunastu szklanych reaktorów o objętości czynnej 1 dm³. Reaktory zostały wyposażone w czujniki temperatury, system mieszania, układ dozowania substratu i odbioru produktów procesu.

W wariantcie pierwszym zawartość komory fermentacyjnej ogrzewana była przy pomocy promieniowania mikrofalowego generowanego przez magnetron o mocy 900W. Sterowanie temperaturą polegało na regulacji długości czasu pracy magnetronu. W celu utrzymania temperatury na poziomie 35°C jednorazowa dawka energii wprowadzanej do układu wynosiła 1,75 Ws. Generator mikrofal pracował przez 7 sekund z 5 minutowymi odstępami czasu. W przypadku temperatury 55 °C jednorazowa dawka energii wprowadzana do układu wynosiła 2,5 Ws. Generator pracował przez 10 sekund z 5 minutowymi odstępami.

W wariantcie drugim wykorzystującym konwencjonalne ogrzewanie, komory fermentacyjne ogrzewane były w szafie termostatycznej firmy Pol-Eko.

Zestawy respirometryczne OxiTop firmy WTW wykorzystane w analizie aktywności osadu, składają się z komory reakcyjnej i aparatury pomiarowo-rejestrującej, pozwalającej na pomiary ciśnienia parcjalego wewnątrz komory.

METODY ANALITYCZNE

Zawartość suchej masy, suchej masy organicznej i mineralnej przeprowadzono metodą grawimetryczną. Oznaczenie zawartości związków organicznych wyrażonych w ChZT przeprowadzono metodą dwuchromianową Hach-Lange z wykorzystaniem mineralizatora HT200S i spektrofotometru DR5000 Hach-Lange.

W przypadku analizy zawartości ChZT w odplywie z reaktorów przeplywowych, analizę przeprowadzano w odwirowanej cieczy nadosadowej. Analizę składu jakościowego i ilościowego przeprowadzono za pomocą chromatografu gazowego GC Agilent 7890 A wyposażonego w detektor termokonduktometryczny (TCD).

Do analizy szybkości wzrostu mikroorganizmów wykorzystano analizator mikrobiologiczny μ -Trac 4200 SY-LAB. Urządzenie opiera się na pomiarze zmian składu jonów w ośrodku pomiarowym w funkcji czasu i ich zapisie. Przykładając do dwóch elektrod zanurzonych w ośrodku pomiarowym prąd zmienny, powstałe warunki powodują zmianę impedancji oraz admitancji. W badaniu wykorzystano pomiar pośredni polegający na wykrywaniu ditlenku węgla produkowanego w procesie metabolizmu mikroorganizmów, pozwalającego na możliwość rejestrowania stanu ich aktywności. Podczas pomiarów, zmiany impedancji nie są wykrywane bezpośrednio w pożywce, a w roztworze wodorotlenku potasu poprzez wchłonięcie przez niego powstałego uprzednio CO₂. Wyniki pomiarów przedstawione są jako M% czyli względne zmiany impedancji w odniesieniu do wartości początkowej.

W celu analizy szybkości wzrostu mikroorganizmów do komórek pomiarowych wprowadzo-

no po 5 cm³ inokulum w postaci osadu poddane go adaptacji. Każda próba obciążona ładunkiem zanieczyszczeń organicznych zgodnie z założeniami poszczególnych serii badawczych. W zależności od etapu badawczego cele pomiarowe zostały poddane inkubacji w analizatorze μ -Trac 4200 w temperaturze 38 °C i 58 °C

WYNIKI

W trakcie adaptacji osadu anaerobowego analizowana była zawartość związków organicznych wyrażonych w ChZT w ściekach wprowadzanych i odbieranych z reaktorów pracujących w warunkach przepływowych. Uzyskane wyniki wykazały, że na skuteczność usuwania związków organicznych bezpośrednio wpływało zarówno obciążenie komór ładunkiem zanieczyszczeń organicznych jak również sposób ogrzewania reaktorów.

Średnia zawartość ChZT w ściekach dopływających dla kolejnych serii kształtowała się następująco: 1996, 3996, 5987 mg O₂·dm⁻³.

Najwyższy stopień usuwania związków organicznych wykazano w reaktorze z obciążeniem 2 g·dm⁻³·d⁻¹ pracującym w warunkach termofilowych utrzymywanych przy pomocy ogrzewania mikrofalowego. Zawartość ChZT w ściekach odpływających wynosiła 206 mg O₂·dm⁻³, co skutkowało sprawnością na poziomie ok. 89,7%. Osiągnięta efektywność usuwania była wyższa o ok. 5,6% od analogicznej serii wykorzystującej ogrzewanie konwencjonalne.

W przypadku reaktora z obciążeniem 6 g·dm⁻³·d⁻¹ wartość ChZT na odpływie kształtowała się na poziomie 1245 mg O₂·dm⁻³, co odpowiadało sprawności na poziomie 79,2%, i była niższa od

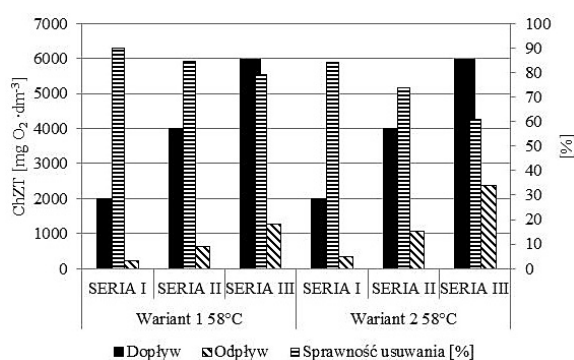
reaktora ogrzewanego konwencjonalnie, w którym uzyskano końcową wartość wynoszącą 2353 mg O₂·dm⁻³ i sprawność rzędu 60,7% (rys. 2).

Uzyskane wyniki w etapie I pozwoliły stwierdzić, że wykorzystanie elektromagnetycznego promieniowania mikrofalowego spowodowało niższe wartości wskaźnika ChZT w ściekach odpływających we wszystkich seriach tego etapu, przy czym należy zauważyć że różnice w osiągniętych sprawnościach rosły wraz ze zwiększaniem obciążenia.

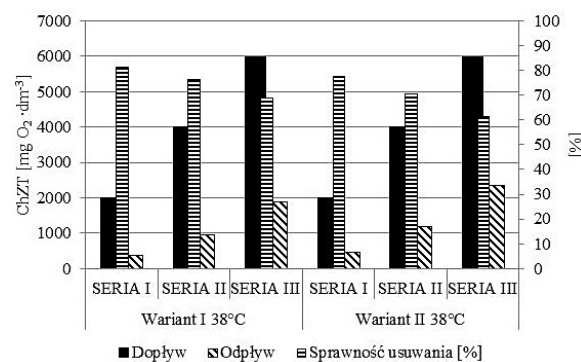
Analogicznie do poprzedniego etapu w warunkach mezofilowych również stwierdzono, iż wyższy stopień usunięcia związków organicznych wyrażonych w ChZT uzyskano we wszystkich seriach ogrzewanych mikrofalowo. Najniższą zawartość ChZT na odpływie odnotowano w reaktorze z obciążeniem 2 g·dm⁻³·d⁻¹. Wynosiła ona 375 mg O₂·dm⁻³ i była niższa o 78 mg O₂·dm⁻³ niż w reaktorze ogrzewanym konwencjonalnie. W reaktorze z OLR= 6 g·dm⁻³·d⁻¹ na odpływie uzyskano wartość 1874 mg O₂·dm⁻³ dla ogrzewania mikrofalowego, a dla konwencjonalnego 2329 mg O₂·dm⁻³ (rys. 3).

Wyniki uzyskane z analizy respirometrycznej pozwoliły na porównanie aktywności osadu beztlenowego. Próby zróżnicowane były pod względem obciążenia komory ładunkiem zanieczyszczeń organicznych (Serie), rodzaju ogrzewania reaktorów fermentacyjnych (Warianty) oraz warunków temperaturowych prowadzenia fermentacji metanowej (Etapu).

Wyniki badań respirometrycznych dały możliwość określenia współczynnika produkcji biogazu w poszczególnych próbach. W przypadku badań prowadzonych w warunkach mezofilowych, współczynnik produkcji biogazu dla



Rys. 2. Wartość ChZT na dopływie i odpływie oraz sprawność usuwania w warunkach termofilowych
Fig. 2. The value of COD in the inlet and outlet and removal efficiency in thermophilic conditions



Rys. 3. Wartość ChZT na dopływie i odpływie oraz sprawność usuwania w warunkach mezofilowych
Fig. 3. The value of COD in the inlet and outlet and removal efficiency in mesophilic conditions

prób adaptowanych mikrofalowo kształtował się na poziomie od $403 \text{ cm}^3 \cdot \text{g s.m.o}^{-1}$ w przypadku reaktora z obciążeniem $2 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ do $373 \text{ cm}^3 \cdot \text{g s.m.o}^{-1}$ dla obciążenia $6 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ (rys. 4). Dla wariantu z adaptacją konwencjonalną współczynnik produkcji biogazu maksymalnie osiągnął $382 \text{ cm}^3 \cdot \text{g s.m.o}^{-1}$ w przypadku serii z obciążeniem $2 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$, a najniższą wartość wynoszącą $354 \text{ cm}^3 \cdot \text{g s.m.o}^{-1}$ uzyskano w serii o obciążeniu $6 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ (rys. 5). Wykorzystanie ogrzewania przy pomocy elektromagnetycznego promieniowania mikrofalowego wpłynęło na wzrost współczynnika produkcji biogazu o ok. 5,5% dla najlepszej serii.

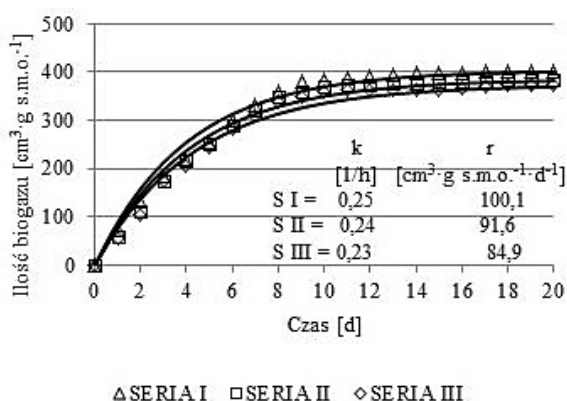
W badaniach przeprowadzonych w warunkach termofilowych, z wykorzystaniem promieniowania mikrofalowego w procesie adaptacji, maksymalną wartość współczynnika osiągnięto w próbie o obciążeniu $2 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ i wynosiła $456 \text{ cm}^3 \cdot \text{g s.m.o}^{-1}$. Najniższą wartość zanotowano w reaktorze o obciążeniu $6 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ osiągając $422 \text{ cm}^3 \cdot \text{g s.m.o}^{-1}$ (rys. 6). W próbach adaptowanych konwencjonalnie maksymalny współczynnik produkcji biogazu wynosił $429 \text{ cm}^3 \cdot \text{g s.m.o}^{-1}$ w reaktorze z najniższym obciążeniem. W tym przypadku uzyskano ok. 6,3% wzrost współczynnika produkcji biogazu na korzyść zastosowania ogrzewania mikrofalowego.

Porównując uzyskane wyniki z obu etapów należy zauważyć, że współczynniki produkcji biogazu dla wariantów wykorzystujących ogrzewanie mikrofalowe jak i konwencjonalne, wyższe wartości uzyskiwały w warunkach termofilowych. Fermentacja w temperaturze 58°C

pozwoiliła na zwiększenie produkcji o ok. 14,5% w serii z obciążeniem $4 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ w przypadku ogrzewania mikrofalowego i ok 12,3% w serii z obciążeniem $2 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ wykorzystując ogrzewanie konwencjonalne (rys. 4–7).

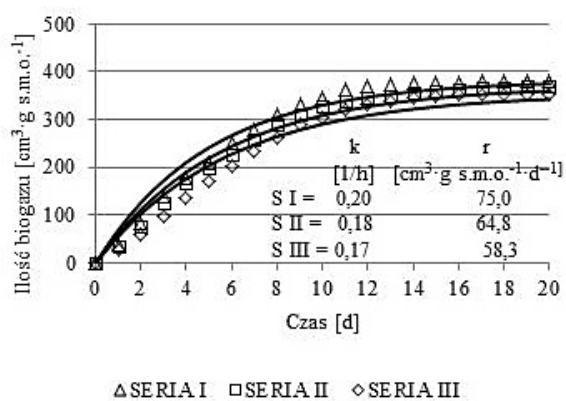
Analiza szybkości produkcji biogazu w warunkach mezofilowych wykazała, że największą różnicą pomiędzy szybkościami produkcji charakteryzowały się reaktory pracujące z obciążeniem $2 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$. Osad adaptowany w warunkach promieniowania mikrofalowego osiągnął szybkość produkcji biogazu na poziomie $r = 100,1 \text{ cm}^3 \cdot \text{g s.m.o}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, a osad wpracowywany z wykorzystaniem ogrzewania konwencjonalnego $r = 75 \text{ cm}^3 \cdot \text{g s.m.o}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$. W przypadku dwukrotnie zwiększonego obciążenia ładunkiem związków organicznych w wariacie z adaptacją mikrofalową szybkość wynosiła $r = 91,6 \text{ cm}^3 \cdot \text{g s.m.o}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ i była wyższa o $26,8 \text{ cm}^3 \cdot \text{g s.m.o}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ od osadu wykorzystanego w wariacie adaptowanym konwencjonalnie. W reaktorach z obciążeniem $6 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ wyższą szybkością procesu charakteryzował się osad adaptowany mikrofalowo osiągając $r = 84,9 \text{ cm}^3 \cdot \text{g s.m.o}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ w stosunku do $r = 58,3$ (rys. 4, rys. 5).

Badania prowadzone w warunkach termofilowych również wykazał, iż najwyższe szybkości produkcji biogazu osiągały wszystkie serie z inokulum adaptowanym promieniowaniem mikrofalowym. Najwyższą szybkość osiągnięto w reaktorze z obciążeniem wynoszącym $2 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ gdzie $r = 122,6 \text{ cm}^3 \cdot \text{g s.m.o}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, podczas gdy dla osadu wpracowanego konwencjonalnie była niższa o $29,4 \text{ cm}^3 \cdot \text{g s.m.o}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$. Najniższe szybkości



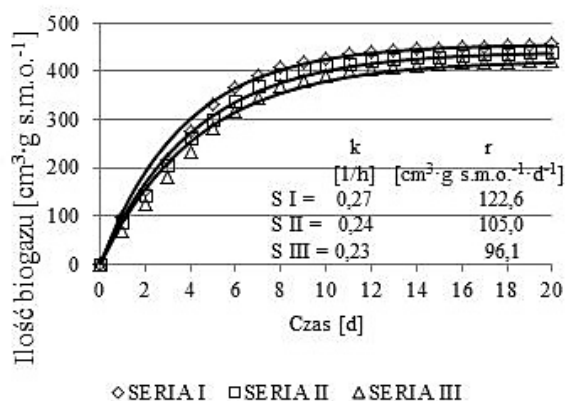
Rys. 4. Szybkość oraz współczynnik produkcji biogazu w badaniach respirometrycznych dla Wariantu I w warunkach mezofilowych

Fig. 4. The speed and rate of biogas production in the respirometric tests for Variant I in mesophilic conditions



Rys. 5. Szybkość oraz współczynnik produkcji biogazu w badaniach respirometrycznych dla Wariantu II w warunkach mezofilowych

Fig. 5. The speed and rate of biogas production in the respirometric tests for Variant II in mesophilic conditions



Rys. 6. Szybkość oraz współczynnik produkcji biogazu w badaniach respirometrycznych dla Wariantu I w warunkach termofilowych

Fig. 6. The speed and rate of biogas production in the respirometric tests for Variant I in thermophilic conditions

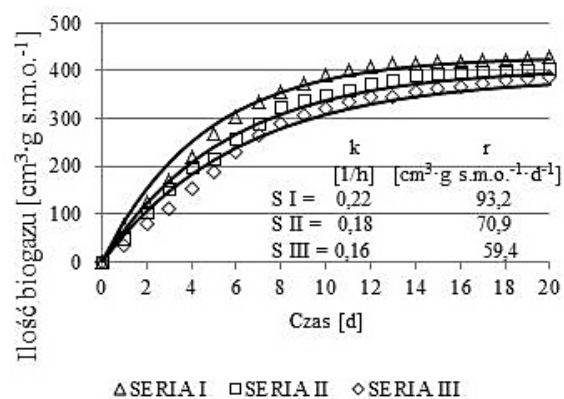
produkcji biogazu uzyskano w seriach z największym obciążeniem ładunkiem związków organicznych i wynosiły one odpowiednio $r = 93,1$ i $59,4 \text{ cm}^3 \cdot \text{g s.m.o.}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, dla osadu eksponowanego na mikrofalę i ogrzewanego konwencjonalnie (rys. 6, rys. 7). Uzyskane wyniki wykazały, że niezależnie od sposobu ogrzewania w fazie adaptacji, aktywność osadu w każdej serii była wyższa w warunkach termofilowych.

Chromatograficzna analiza jakościowa biogazu nie wykazała istotnych różnic pomiędzy testowanymi seriami badawczymi. Uzyskane wskaźniki szybkości wzrostu mikroorganizmów z wykorzystaniem analizatora mikrobiologicznego μ -Trac 4200 korelują z aktywnością osadu beztlenowego określonego przez współczynnik produkcji biogazu w wykonanych badaniach respirometrycznych.

W obu etapach najwyższy wzrost impedancji wykazano w wariantach wykorzystujących promieniowanie mikrofalowe do ogrzewania reaktorów. W warunkach termofilowych względny przyrost impedancji wynosił 77% w serii z najniższym obciążeniem i był wyższy o ok. 12,8% niż w opcji z ogrzewaniem konwencjonalnym. Najniższe przyrosty uzyskano w serii z obciążeniem $6 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ (rys. 8, rys. 9).

W warunkach mezofilowych największą szybkością wzrostu charakteryzował się osad pracujący z obciążeniem $2 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ uzyskując przyrost na poziomie 57,5% i był wyższy o 3,5% niż z ogrzewaniem konwencjonalnym (rys. 10, rys. 11).

Porównując szybkość wzrostu mikroorganizmów w odniesieniu do warunków temperaturo-



Rys. 7. Szybkość oraz współczynnik produkcji biogazu w badaniach respirometrycznych dla Wariantu II w warunkach termofilowych

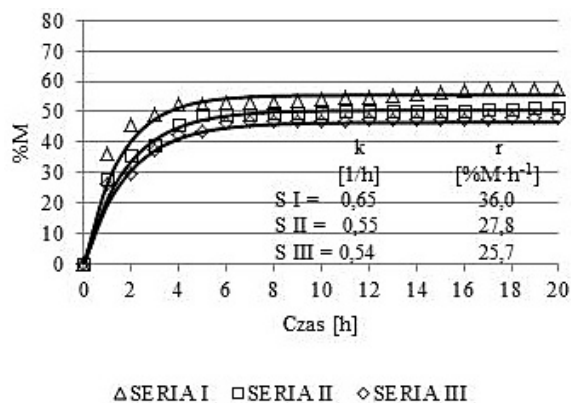
Fig. 7. The speed and rate of biogas production in the respirometric tests for Variant II in thermophilic conditions

wych stwierdzono, że przy obu sposobach ogrzewania lepsze wyniki uzyskano w warunkach termofilowych. W przypadku opcji z mikrofalowym ogrzewaniem uzyskano wzrost większy o 19,5%, natomiast w reaktorach ogrzewanych konwencjonalnie wzrost był wyższy o 10,5% dla najlepszych serii.

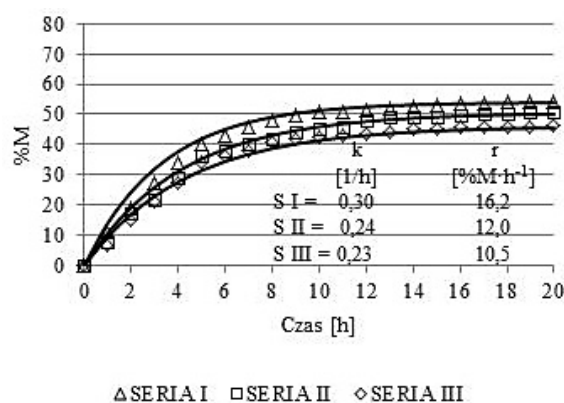
W obu etapach jeszcze wyższe różnice na korzyść adaptacji osadu beztlenowego z wykorzystaniem promieniowania mikrofalowego występują w przypadku szybkości wzrostu impedancji.

W warunkach mezofilowych najwyższą szybkość wzrostu impedancji wynoszącą $36\% \text{ M} \cdot \text{h}^{-1}$ uzyskano w serii z obciążeniem $2 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ podczas gdy w opcji konwencjonalnej uzyskano $16,2\% \text{ M} \cdot \text{h}^{-1}$. Wraz ze zwiększaniem obciążenia różnice w szybkości wzrostu malały. W serii z obciążeniem $6 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ w przypadku inokulum wpracowanego mikrofalowo szybkość wzrostu impedancji wyniosła $25,7\% \text{ M} \cdot \text{h}^{-1}$, a konwencjonalnie $10,5\% \text{ M} \cdot \text{h}^{-1}$ (rys. 8, rys. 9).

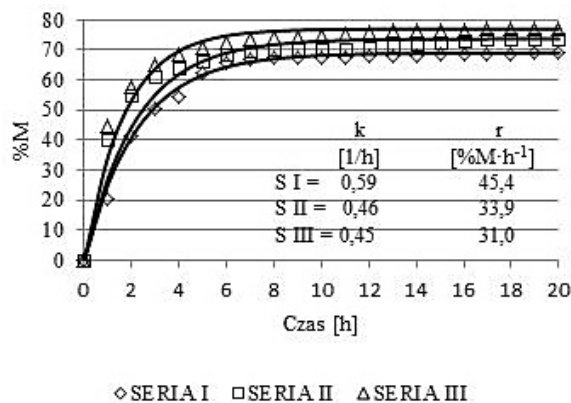
Dużo większe szybkości wzrostu impedancji odnotowano w przypadku procesu prowadzonego w $58 \text{ }^\circ\text{C}$. Dla serii o najniższym obciążeniu adaptowanej z wykorzystaniem promieniowania mikrofalowego uzyskano wynik $45,4\% \text{ M} \cdot \text{h}^{-1}$ natomiast dla analogicznej serii wpracowanej z zastosowaniem ogrzewania konwencjonalnego $17,2\% \text{ M} \cdot \text{h}^{-1}$ (rys. 10, rys. 11). Podobnie jak w warunkach mezofilowych najniższą szybkość wzrostu zanotowano w serii z obciążeniem $6 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$. Wszystkie serie eksperymentu, niezależnie od sposobu adaptacji, charakteryzowały się wyższą aktywnością w warunkach termofilowych, przy czym należy pod-



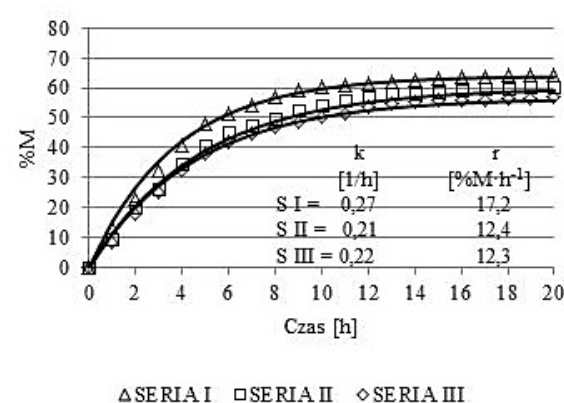
Rys. 8. Względne zmiany impedancji dla Wariantu I w warunkach mezofilowych
 Fig. 8. Relative changes in the impedance for Variant I in mesophilic conditions



Rys. 9. Względne zmiany impedancji dla Wariantu II w warunkach mezofilowych
 Fig. 9. Relative changes in the impedance for Variant II in mesophilic conditions



Rys. 10. Względne zmiany impedancji dla Wariantu I w warunkach termofilowych
 Fig. 10. Relative changes in the impedance for Variant I in thermophilic conditions



Rys. 11. Względne zmiany impedancji dla Wariantu II w warunkach termofilowych
 Fig. 11. Relative changes in the impedance for Variant II in thermophilic conditions

kreślić, iż w wariantach z wykorzystaniem elektromagnetycznego promieniowania mikrofalowego odnotowano dużo większe szybkości wzrostu impedancji w porównaniu z osadem wpracowanym konwencjonalnie.

DYSKUSJA

Zastosowanie elektromagnetycznego promieniowania mikrofalowego jako sposobu adaptacji osadu beztlenowego pozwoliło na osiągnięcie wyższego stopnia usunięcia związków organicznych w stosunku do wykorzystania ogrzewania mikrofalowego. Wpływ ten zauważono we wszystkich seriach badawczych charakteryzujących się różnymi obciążeniami dopływającego ładunku zanieczyszczeń organicznych. Najlepsze

wyniki osiągnięto w przypadku reaktorów o obciążeniu 2 g·dm⁻³·d⁻¹, dla których sprawność usuwania ChZT wynosiła 89,7% w warunkach termofilowych i 81,2% w warunkach mezofilowych.

Omil i in. [2003] w swoich badaniach dotyczących oczyszczania ścieków mleczarskich technologią beztlenową wykazali możliwość uzyskania 90% sprawności usuwania związków organicznych wyrażonych w ChZT przy obciążeniu ładunkiem zanieczyszczeń organicznych na poziomie od 5 do 6 kg ChZT ·m⁻³·d⁻¹.

Viraraghavan i Varadarajan [1996] wykazują zależność pomiędzy temperaturą procesu a sprawnością usuwania ChZT ze ścieków mleczarskich. Ich badania dowodzą, iż w temperaturze 12,5°C sprawność usuwania ChZT wynosiła 45%, natomiast w temperaturze 30°C sprawność ta wzrosła do 76%. Dodatkowo udowodnili, iż

sprawność usuwania ChZT jest ściśle powiązana z obciążeniem komory ładunkiem związków organicznych. W przypadku obciążenia wynoszącego $1,04 \text{ kg ChZT} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ w temperaturze $12,5^\circ\text{C}$ sprawność usuwania wynosiła 65% natomiast przy obciążeniu $2 \text{ kg ChZT} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ efektywność oczyszczania spadła do 58%. Przy największym obciążeniu ładunkiem związków organicznych wynoszącym $4 \text{ kg ChZT} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ sprawność układu spadła do 45%.

Wykonane badania eksperymentalne nad wpływem promieniowania mikrofalowego na aktywność osadu beztlenowego potwierdziły zależność pomiędzy temperaturą procesu oraz obciążeniem komory ładunkiem zanieczyszczeń organicznych. W przypadku wykorzystania promieniowania mikrofalowego do adaptacji osadu anaerobowego w warunkach mezofilowych z obciążeniem $2 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ sprawność usuwania ChZT wynosiła 81,2%, dwukrotne zwiększenie obciążenia spowodowało spadek sprawności o 4,9%, natomiast trzykrotne zwiększenie obciążenia obniżyło efektywność oczyszczania ścieków o 12,5%.

W przypadku gdy osad adaptowany był z wykorzystaniem ogrzewania konwencjonalnego różnica w usuwaniu ChZT pomiędzy reaktorami z OLR wynoszącym 2 i $4 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ kształtowały się na poziomie 16,2%. Analogiczną zależność zauważono w warunkach termofilowych, jednak w przypadku osadu wpracowanego przy wykorzystaniu promieniowania mikrofalowego spadek wraz z ze zwiększaniem obciążania był mniejszy. Różnica w efektywności pomiędzy skrajnymi obciążeniami wynosiła 10,5%.

Banik i in. [2006] wykorzystując promieniowanie elektromagnetyczne o częstotliwościach 13,5–36,5 do napromieniowania bakterii *Methanosarcina barkeri*- DSM 804, wykazali pozytywne oddziaływanie na proces beztlenowego rozkładu materii organicznej w postaci zwiększenia produkcji metanu jak również zwiększenia zawartości metanu w uzyskiwanym biogazie. Dowiedli oni również, iż ekspozycja na promieniowanie mikrofalowe prowadzi do wzrostu liczby kolonii. Maksymalną zawartość metanu, którą udało się osiągnąć autorom wykorzystując promieniowanie mikrofalowe wynosiła 76,5%, natomiast w reaktorze kontrolnym 52,3%.

Wyniki uzyskane w ramach badań własnych również potwierdzają wpływ promieniowania mikrofalowego na współczynnik produkcji biogazu, szybkości produkcji biogazu czy też szybkości wzrostu mikroorganizmów.

Maksymalny współczynnik produkcji biogazu w warunkach termofilowych wynosił $456 \text{ cm}^3 \cdot \text{g s.m.o}^{-1}$ i był wyższy o $27 \text{ cm}^3 \cdot \text{g s.m.o}^{-1}$ od współczynnika osiągniętego w reaktorze nie wystawionym na działanie promieniowania mikrofalowego. W przypadku warunków mezofilowych różnic ta wynosiła $21 \text{ cm}^3 \cdot \text{g s.m.o}^{-1}$.

Analizując szybkość produkcji biogazu najwyższą wartość osiągnięto w reaktorze z ogrzewaniem mikrofalowym w temperaturze 58°C i wynosiła $r = 122,6 \text{ cm}^3 \cdot \text{g s.m.o}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, podczas gdy dla osadu wpracowanego konwencjonalnie była niższa o $29,4 \text{ cm}^3 \cdot \text{g s.m.o}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$.

Pozytywny wpływ promieniowania mikrofalowego we wszystkich seriach badawczych potwierdziły badania szybkości wzrostu impedancji opisującej szybkość wzrostu mikroorganizmów. Najwyższe efekty osiągnięto w warunkach termofilowych, a szybkość wynosiła $r = 16 \% \text{ M} \cdot \text{h}^{-1}$.

PODSUMOWANIE

Zastosowanie elektromagnetycznego promieniowania mikrofalowego w procesie adaptacji osadu beztlenowego wpłynęło na zwiększenie efektywności procesu fermentacji metanowej ścieków mleczarskich. Osad poddany ogrzewaniu mikrofalowemu wykazał wyższą sprawność w usuwaniu związków organicznych wyrażonych w ChZT. Wykorzystanie promieniowania mikrofalowego pozytywnie wpłynęło na ilość produkowanego biogazu.

Ekspozycja na elektromagnetyczne promieniowanie mikrofalowe bezpośrednio wpłynęła na wzrost aktywności mikroorganizmów co potwierdzają badania respirometryczne jak również analiza szybkości wzrostu mikroorganizmów. Należy zaznaczyć, że pozytywny wpływ mikrofalowego ogrzewania w procesie adaptacji widoczny był w każdej serii badawczej, to wyższe efekty uzyskiwano w warunkach termofilowych.

BIBLIOGRAFIA

1. Banik S., Bandyopadhyay S., Ganguly S., Dan D. 2006. Effect of microwave irradiated *Methanosarcina barkeri* DSM-804 on biomethanation. *Biore-source Technology*, 97, 819–823.
2. Banik S., Bandyopadhyay S., Ganguly S. 2003. Bioeffects of microwave – a brief review. *Biore-source Technology*, 87, 155–159.

3. Dębowski M., Zieliński M., Krzemieniewski M. 2010. Wpływ promieniowania mikrofalowego na przebieg fermentacji metanowej odpadów poubojowych w warunkach termofitowych. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 12, 381–392.
4. Omil F., Garrido J.M., Arrojo B., Mendez R. 2003. Anaerobic filter reactor performance for the treatment of complex dairy wastewater AT industrial scale. *Water Research*, 37, 4099–4108.
5. Viraraghavan T., Varadarajan R. 1996. Low-temperature kinetics of anaerobics-filter wastewater treatment. *Bioresource Technology*, 57, 165–171.
6. Zielińska M., Cydzik-Kwiatkowska A., Zieliński M., Dębowski M. 2013. Impact of temperature, microwave radiation and organic loading rate on methanogenic community and biogas production during fermentation of dairy wastewater. *Biore-source Technology*, 129, 308–314.
7. Zieliński M., Dębowski M., Zielińska M., Cydzik-Kwiatkowska A., 2011, Raport z realizacji projektu badawczego MNiSW nr.: N N523 455436.
8. Zieliński M., Krzemieniewski M. 2010. Impact of microwave radiation on nitrogen removal and the quantity of nitrifiers in biofilm. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37(4), 661–666.