

## Streszczenie w języku polskim

Zużycie paliw kopalnych w globalnej gospodarce negatywnie wpływa na zasoby naturalne, przyczyniając się do ich zmniejszenia oraz zanieczyszczenia środowiska. W obliczu tych problemów badania nad alternatywnymi źródłami energii nabierają coraz większego znaczenia. Jedną z obiecujących technologii są mikrobiologiczne ogniwa paliwowe (ang. Microbial Fuel Cell, MFC), które wykorzystują mikrobiologiczne procesy konwersji substratów organicznych w energię elektryczną. Wykorzystanie tej technologii w praktyce może nie tylko redukować emisję szkodliwych gazów cieplarnianych, ale także zminimalizować zależność od paliw kopalnych. Czynniki ograniczające pełnoskalowe stosowanie MFC, takie jak niska moc wyjściowa, wysoki opór wewnętrzny czy luki w wiedzy na temat zależności między mikroorganizmami a generowaniem mocy elektrycznej, skłaniają do badań nad rozwojem i doskonaleniem MFC. Celem pracy było określenie wpływu wielkości anody, modyfikacji anody  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  oraz kompozytem zredukowanego tlenku grafenu (ang. reduced graphene oxide, rGO) i Fe na wydajność MFC, skład mikrobiomu anodowego oraz potencjał metaboliczny błony biologicznej.

Początkowo w badaniach testowano wpływ wielkości anody na pracę MFC. Do MFC wprowadzano krótkołańcuchowe kwasy tłuszczowe (KKT) z beztlenowej fermentacji wstępnych osadów ściekowych. W MFC o powierzchni anody  $600 \text{ cm}^2$  eksploatowanym przy obciążeniu  $69,12 \text{ mg ChZT}/(\text{g s.m.}\cdot\text{d})$  uzyskano moc ogniwa wynoszącą  $15,3 \text{ mW}/\text{m}^2$ . Zwiększenie powierzchni anody do  $1200 \text{ cm}^2$  (obciążenie  $36,21 \text{ mg ChZT}/(\text{g s.m.}\cdot\text{d})$ ) nie zwiększyło gęstości mocy, ale poprawiło efektywność usuwania związków organicznych. W błonie biologicznej anody podczas fazy wpracowania MFC licznie występowały *Deftia* sp. i *Methanobacterium* sp. W fazie stabilnej pracy MFC w błonie biologicznej zwiększył się udział egzoelektrogenów z rodzaju *Rhodospseudomonas* sp., co przyczyniło się do bardziej efektywnej i stabilnej produkcji energii elektrycznej. W MFC o większej powierzchni anody w błonie biologicznej licznie występowały *Leucobacter* sp., *Frigoribacterium* sp. i *Phenylobacterium* sp., co skutkowało wysokim i stabilnym usuwaniem ChZT (ponad 85%). W kolejnym etapie badań w MFC zasilanym odpadowymi KKT anodę modyfikowano  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  w dawce  $2,5 \text{ g}/\text{m}^2$  anody. Modyfikacja spowodowała poprawę transferu elektronów do anody, zwiększając gęstość mocy, gęstość prądu i napięcie, odpowiednio 3,6-krotnie, 1,8-krotnie i 1,4-krotnie w stosunku do MFC z anodą niemodyfikowaną. Dodatek  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  znacząco wpłynął na mikrobiom błony biologicznej, przyczyniając się do rozwoju *Pseudomonas* sp. i *Geothrix* sp. o wysokim potencjale produkcji energii elektrycznej. To dowodzi, że modyfikacja anody  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  może korzystnie wpływać na skład mikrobiologiczny błony biologicznej na anodzie, co

przekłada się na efektywność pracy MFC. Aby zbadać wpływ dawki  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  na wydajność MFC, anodę modyfikowano  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  w dawce 1,25, 2,5, 5 i 10  $\text{g}/\text{m}^2$  powierzchni anody.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  w dawce od 1,25 do 5  $\text{g}/\text{m}^2$  poprawiło wytwarzanie energii elektrycznej, przy czym najwyższą gęstość mocy ( $1,39 \text{ mW}/\text{m}^2$ ) uzyskano w MFC z anodami modyfikowanymi 2,5 oraz 5  $\text{g Fe}_2\text{O}_3/\text{m}^2$ . Moc ogniów z 2,5 oraz 5  $\text{g Fe}_2\text{O}_3/\text{m}^2$  anody była 2,8 razy wyższa, a rezystancja odpowiednio 5,6 i 4,7 razy niższa niż w reaktorze kontrolnym. Z badań wynika, że dawka 10  $\text{g Fe}_2\text{O}_3/\text{m}^2$  anody skutkowała dwukrotnym obniżeniem gęstości mocy w stosunku do anody niemodyfikowanej. Usuwanie substancji organicznych ze ścieków było bardziej stabilne w MFC z anodami modyfikowanymi niższymi dawkami  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Chociaż głównym źródłem węgla w ściekach był octan, wśród KKT w ściekach odprowadzanych z MFC dominowały kwasy propionowy i walerianowy; proporcja kwasu propionowego do innych KKT zwiększała się ze wzrostem dawki  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  wykorzystanej do modyfikacji anody. Modyfikacja anody  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  stymulowała wzrost mikroorganizmów produkujących polimery zewnątrzkomórkowe z rodzajów *Zoogloea* i *Acidovorax*, co sprzyjało tworzeniu błony biologicznej. W mikrobiomach anod modyfikowanych dawkami 1,25 i 2,5  $\text{g Fe}_2\text{O}_3/\text{m}^2$  dominującymi bakteriami, potencjalnie odpowiedzialnymi za produkcję energii elektrycznej, były *Pseudomonas* sp., *Oscillochloris* sp. i *Rhizobium* sp., natomiast przy 5 i 10  $\text{g Fe}_2\text{O}_3/\text{m}^2$  – egzoelektrogeny *Dechloromonas* sp. i *Desulfobacter* sp. W ostatnim etapie badań anody modyfikowano jonami Fe(III) (w dawkach 34 i 68 mg na powierzchnię anody, co odpowiada 0,85 i 1,7  $\text{g Fe}/\text{m}^2$  anody) oraz rGO (stała dawka: 200 mg na powierzchnię anody). Najwyższą gęstość mocy ( $8,55 \text{ mW}/\text{m}^2$ ) oraz napięcie ( $342,7 \pm 72,8 \text{ mV}$ ) osiągnięto w MFC z anodą zmodyfikowaną kompozytem rGO/68 mg Fe. Całkowite opory wewnętrzne i opór przenoszenia ładunku w tym MFC były odpowiednio około 4 i 2 razy niższe niż w kontrolnym MFC. Poziomy pojemności dwuwarstwowej, czyli zdolności do magazynowania ładunku na styku powierzchni elektrolitu i elektrod przewodzących zmodyfikowanych anod, mierzone przy potencjale 900 mV, były do 3,7 razy wyższe (MFC z anodą zmodyfikowaną rGO/68 mg Fe) niż w kontrolnym MFC. Sekwencjonowanie mikrobiomu anodowego i analiza statystyczna wskazały, że udział procentowy *Pseudoxanthomonas* sp. *Themomonas* sp., *Dechloromonas* sp., *Microcystis* sp., *Sphingopyxis* sp. i *Paracoccus* sp. w błonie biologicznej pozytywnie korelował z wytwarzaniem energii elektrycznej w MFC. Analiza potencjału metabolicznego mikrobiomów anodowych wykazała, że produkcja energii elektrycznej była głównie związana z odwrotnym cyklem kwasu cytrynowego. W MFC z anodą zmodyfikowaną kompozytem rGO/34 mg Fe stwierdzono najwyższy potencjał metaboliczny produkcji i konwersji energii, obrony komórek bakteryjnych

przed niekorzystnymi warunkami środowiskowymi (np. stresem oksydacyjnym), replikacji, rekombinacji oraz naprawy DNA.

W badaniach dowiedziono, że modyfikacja anody zarówno związkami żelaza, jak i kompozytem rGO/Fe, pozwala zwiększyć gęstość mocy generowanej przez ogniwo MFC, poprawiając właściwości pojemnościowe elektrody oraz zmniejszając opór wewnętrzny ogniwa. Mikroorganizmy odgrywały kluczową rolę w produkcji energii elektrycznej, a ich skład i potencjał metaboliczny zależały od sposobu modyfikacji anody. Modyfikacja anod kompozytem rGO/Fe zwiększyła potencjał metaboliczny mikrobiomu w zakresie produkcji i konwersji energii, co podkreśla znaczenie inżynierii materiałowej w optymalizacji eksploatacji MFC. Uzyskane wyniki wskazują na możliwość poprawy produkcji energii elektrycznej z odpadów i ścieków w MFC przez modyfikację anod i wnoszą nową wiedzę, która może być wykorzystana do zrównoważonej produkcji energii elektrycznej, promując ekologiczne i efektywne wykorzystanie zasobów naturalnych.

**Słowa kluczowe:** mikrobiologiczne ogniwa paliwowe, krótkołańcuchowe kwasy tłuszczowe, żelazo, zredukowany tlenek grafenu, zbiorowiska mikrobiologiczne