

Prof. dr hab. inż. Wiesław Ciechanowicz
Konsorcjum „Bioenergia na Rzecz Rozwoju Wsi”

Mikrobiologiczne ogniwa paliwowe przetwarzające ścieki organiczne bezpośrednio w elektryczność

Dążeniu ludzkości do zrównoważonej przyszłości towarzyszy wzrastające zapotrzebowanie na energię. Będzie ono coraz większe między innymi ze względu na fakt, że zużycie energii przez 80% ludności świata, zamieszkującej Azję, Afrykę oraz Amerykę Południową, wynosiło w 2000 roku 4,4% ogólnego zużycia w skali świata.

Wyzwaniem dla ludzkości staje się także konieczność stosowania źródeł energii neutralnych wobec efektu cieplarnianego.

Równocześnie obserwuje się znaczny przyrost udziału ludności mieszkającej w miastach. W 1990 r. udział ten wynosił 40%, w 2000 r. przekroczył 50%. Oczekuje się, że w 2025 r. może osiągnąć 60%. W miastach następuje duże zagęszczenie użytkowników energii przypadających na jednostkę powierzchni. W tej sytuacji jedynym możliwym odnawialnym źródłem energii mogłyby być odpady przemysłowe i komunalne tworzone przez śmieci i ścieki, zawierające substancję materialną.

Dla obecnie osiągalnych biotechnologii, biomasa jako pierwotny nośnik energii jest zbyt droga, aby wytwarzane wtórne nośniki energii pochodzenia biologicznego spełniały uwarunkowania ekonomiczne. Istnieje więc ze wszech miar pilna potrzeba opracowywania nowych technologii, neutralnych wobec efektu cieplarnianego i ekonomicznie opłacalnych i do tego mogących mieć zastosowanie na terenach zurbanizowanych.

Istnieje szereg sposobów umożliwiających konwersję biomasy do bioenergii. Jedną z nich jest opanowana technologicznie beztlenowa fermentacja metanowa [1, 2]. Inną technologią pozwalającą przetwarzać biomasę do bioenergii jest beztlenowa fermentacja biomasy do etanolu względnie wodoru.

W wielu instytucjach naukowych niektórych krajów, szczególnie w USA, Belgii, Holandii, Korei, Niemiec, opracowuje się technologie bezpośredniej przemiany substancji materialnej, zawartej w ściekach komunalnych i przemysłowych, bezpośrednio w energię elektryczną. Są to mikrobiologiczne ogniwa paliwowe wykorzystujące bakterie [3-8]. Istotą mikrobiologicznego ogniwa paliwowego jest to, że mikroorganizmy „czerpią” elektrony bezpośrednio z atomów wodoru, zawartego w molekułach związków organicznych, stanowiących ciekłe odpady, w sensie pierwotnych nośników energii. Tworzą w ten sposób prąd elektronów, a więc prąd elektryczny. Oznacza to, że w ogniwie tym nie występują procesy pośrednie. Jeżeli sprawność konwersji stanowiłaby 30%, byłby to najbardziej sprawny proces wytwarzania elektryczności.

Napięcie, przy którym uzyskuje się moc, wynosi 0,5 V na pojedynczym biologicznym ogniwie. W celu uzyskania pożądanej

wartości prądu lub napięcia powstaje konieczność łączenia szeregowo lub równolegle odpowiedniej liczby ogniw paliwowych.

Mikrobiologiczne ogniwa paliwowe charakteryzują się niższą gęstością mocy niż inne ogniwa paliwowe zasilane na przykład bezpośrednio wodorem. Mogą być jednak jedynymi zastosowanymi w najbliższej przyszłości po to, aby równocześnie użytkować wszelkie ścieki, a więc zmniejszać zanieczyszczenie wód oraz wytwarzać energię elektryczną.

W wyniku przetwarzania termicznego stałych odpadów można by uzyskać energię ekwiwalentną 0,48 mld ton węgla rocznie mogącą zaspokoić potrzeby 3 mld mieszkańców, obecnie zamieszkujących tereny zurbanizowane [9].

Na podstawie publikowanych danych, uzyskiwanych w wielu instytucjach naukowych, stwierdzić można, że gęstość energii w mikrobiologicznych ogniwach paliwowych zawierała się w dość szerokim zakresie 200–4300 mW/m². Trudno dziś przewidywać, jaka wartość z tego zakresu będzie ogólnie osiągalna po przekroczeniu progu opanowania technologicznego omawianych ogniw, spełniając równocześnie warunek ekonomicznej opłacalności. Niezależnie od tego, nie należy oczekiwać, że zasoby biomasy w formie ścieków, jako źródło wodoru, a więc elektronów, byłoby wystarczające, aby zapewnić przejście cywilizacji do ekonomii wodoru w skali globalnej. Natomiast byłoby możliwe, aby ludzkość pozyskując wodór ze wszelkich ścieków, miała szansę równocześnie oczyszczania wód w skali globalnej.

Dlatego nie dokonuje się oceny skali możliwej substytucji energii nieodnawialnej na terenach zurbanizowanych mikrobiologicznym przetwarzaniem ścieków bezpośrednio do energii elektrycznej.

Należy jednak zauważyć, że skala substytucji energii nieodnawialnej ściekami będzie znacznie wzrastać, gdyż:

- pozostają do wykorzystywania w podobny sposób wszelkie ścieki produkcji roślinnej i przemysłowej oraz ścieki gospodarstw domowych na terenach niezurbanizowanych,
- omawiane technologie mogą być osiągalne w bliskiej przyszłości,
- rozwój technologii mikrobiologicznych ogniw paliwowych nie będzie wymagał znacznych nakładów finansowych, tak jak w przypadku innych źródeł odnawialnych względnie energii jądrowej.

Ponadto, stosując mikrobiologiczne ogniwa paliwowe można by nie tylko „czerpać” bezpośrednio energię ze ścieków, ale także je użytkować, oszczędzając znaczne sumy.

Dla przykładu, koszt utylizacji 125 litrów ścieków w USA wynosi 25 USD rocznie. Według prof. Bruce Logana, (USA), twórcy technologii „czerpania” elektronów ze ścieków, wartość potencjalnej energii zawartej w ściekach jest około 10-krotnie większa niż stanowi koszt ich utylizacji. Technologia w skali pilotowej ma być osiągalna za 1 do 3 lat, a komercjalizacja w ciągu 10 lat. Słowa te zostały wypowiedziane w 2004 roku i opublikowane przez *The American Society of Mechanical Engineers*.

Zasada działania mikrobiologicznego ogniwa paliwowego

Bakterie¹⁾ stają się źródłem energii, gdy przekazują elektrony od darczyńcy elektronów, takiego jak glukoza, do akceptora w sensie odbiornika elektronów, takiego jak tlen, w wyniku czego uzyskuje się wodę. To przekazywanie odbywa się w mikrobiologicznym ogniwie paliwowym, w którym bakterie stanowią biokatalizatory w bezpośredniej przemianie substancji organicznej w elektryczność [3, 8].

W miarę wzrostu potencjalnej różnicy pomiędzy darczyńcą a akceptorem wzrasta znaczenie bakterii jako źródła energii. W mikrobiologicznym ogniwie paliwowym bakterie nie przekazują bezpośrednio wytwarzanych elektronów do ich finalnych akceptorów, lecz są one kierowane do anody.

Bakterie na anodzie utleniają substancję organiczną oraz przemieszczają elektrony do katody poprzez obwód zewnętrzny, wytwarzając w ten sposób prąd elektryczny.

Protony wytwarzane na anodzie przemieszczają się poprzez membranę do katody, gdzie łączą się z tlenem i elektronami tworząc wodę.

Bezpośrednia transmisja elektronów z bakterii do elektrod jest uwarunkowana opornością transmisji. W celu redukcji tej oporności istnieje potrzeba powiększenia powierzchni elektrod, względnie czynników pośredniczących w transmisji elektronów, określanymi mianem „mediatorów”.

Bakterie, które zidentyfikowano jako mogące uczestniczyć w wytwarzaniu energii elektrycznej w mikrobiologicznych ogniwach paliwowych, należą do rodzaju: *Geobacter*, *Shewanella*, *Pseudomonas* i innych.

Rodzaj stosowanych bakterii w mikroorganizmnych ogniwach paliwowych może oddziaływać na gęstość energii oraz na sprawność przetwarzania.

¹⁾ **Bakterie** są to organizmy jednokomórkowe o prostej budowie, wielkości od 0,2 do kilkudziesięciu µm. Rozmnażają się najczęściej przez podział bezpośredni, lecz istnieją mechanizmy wymiany materiału genetycznego między komórkami. W warunkach niekorzystnych mogą wytwarzać przetrwalniki, które są niezwykle odporne na działanie czynników środowiskowych. Bakterie zamieszkują wszelkie środowiska i mogą bytować tam, gdzie nie istnieją jakiegokolwiek formy życia. Większość z nich to organizmy cudzożywne: saprofity lub pasożyty produkujące szkodliwe toksyny bakteryjne. Bakterie mają największe znaczenie w przyrodzie – umożliwiają życie na ziemi. Biorąc udział w mineralizacji substancji organicznych są jednym z głównych czynników umożliwiających krążenie materii w przyrodzie. Przykładem mogą być bakterie azotowe, tworzące cykl azotu w ekosystemie ziemskim, transformujące azot atmosferyczny w związki chemiczne.

Enzymy stanowią ważną biologiczną grupę białek, zwane dawniej również fermentami. Są to katalizatory żywej komórki, mogą być także katalizatorami, analogicznie jak bakterie, przemiany materii organicznej.

Substratami nazywamy substancje ulegające przekształceniom pod wpływem enzymów względnie bakterii.

Potencjalnymi substancjami organicznymi, wykorzystywanymi w produkcji energii elektrycznej przez mikroorganizmne ogniwa paliwowe mogą być: ścieki komunalne, osady morskie, ciekłe odpady ludzkie i zwierzęce, ciekłe odpady pochodzenia rolniczego i przemysłowego.

Elementami substancji organicznej podlegającej biodegradacji są: węglowodany, glukoza, skrobia, kwasy tłuszczowe, octowe, butanowe, aminokwasy, proteiny.

Biokonwersja

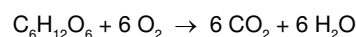
W wyniku konwencjonalnej fermentacji beztlenowej wykorzystującej proces konwersji biologicznej powstaje biogaz. Produktem beztlenowej fermentacji biomasy jest metan lub wodór, stanowiące wtórne nośniki energii. Obydwa mogą być spalane w atmosferze tlenu, ze sprawnością 30%, względnie wykorzystywane jako źródła wodoru w ceramicznych i polimerowych ogniwach paliwowych odpowiednio ze sprawnością 90% i ponad 50%. Obydwa technologie posiadają wady i zalety.

Pierwszą wadą beztlenowej fermentacji jest konieczność magazynowania biogazu. Ponadto biogaz zawiera siarkowodor, którego usuwanie jest obciążone znacznymi kosztami. Ze względów ekonomicznych nie może więc konkurować ze źródłami nieodnawialnymi. Istotą „elektrochemicznych” ogniw paliwowych (jak ogniwa ceramiczne i polimerowe), dokonujących dekompozycji wodoru na anodzie, jest „pobieranie” z atomów wodoru bezpośrednio elektronów, tworzących w obiegu zewnętrznym prąd. Źródłem wodoru w tych ogniwach są wtórne nośniki energii, uzyskiwane w wyniku przetwarzania pierwotnych nośników energii.

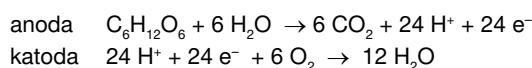
Istotą mikrobiologicznego ogniwa paliwowego, jak już wspomniano, jest fakt, że źródłem wodoru są ciekłe odpady, jako pierwotne nośniki energii, bezpośrednio z których mikroorganizmy same „czerpią” elektrony. Tworzą w ten sposób prąd elektronów, a więc prąd elektryczny. Dominującym ograniczeniem mikrobiologicznych ogniw paliwowych w obecnym czasie jest niska efektywność katod. Ponadto eksploatacja i koszty materiałowe są znaczne, co utrudnia obecnie współzawodnicтво z konwencjonalnymi technologiami.

Jednak w porównaniu z konwencjonalną biokonwersją, mikroorganizmne ogniwo paliwowe charakteryzuje się wieloma zaletami. Są to przede wszystkim: niski poziom koncentracji substratów oraz temperatura poniżej 20°C. Nie oznacza to, że mikroorganizmne ogniwo paliwowe współzawodniczy z beztlenową fermentacją, lecz że może ją uzupełniać. Przykładem może być produkcja wodoru wykorzystująca obydwie technologie [5].

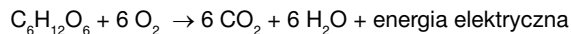
W procesie beztlenowej fermentacji w atmosferze tlenu biomasa ulega przemianie utleniania. Równanie poniżej przedstawia przemianę utleniania glukozy jako jednej z form biomasy



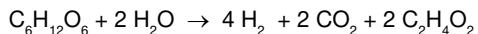
W mikrobiologicznym ogniwie paliwowym materia organiczna jest utleniana na anodzie, której produktem jest CO₂ oraz protony i elektrony. Dla przypadku glukozy [5]:



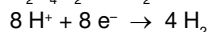
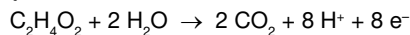
W sumie uzyskuje się



Stosując beztlenową fermentację określonych form biomasy istnieje możliwość produkcji wodoru, jednakże o stosunkowo małej wydajności. Największą wydajność produkcji wodoru można uzyskać z beztlenowej fermentacji glukozy otrzymując równocześnie wodór i kwas octowy, co przedstawia równanie



Można by uzyskać 4 mole H_2 /mol glukozy. Jednakże wydajność obecnie osiągalnej technologii beztlenowej fermentacji wynosi 2–3 mole H_2 /mol glukozy. Wykorzystując wytwarzany jako katalizator kwas octowy w mikrobiologicznym ogniwie paliwowym uzyskuje się dodatkowo



Łącząc beztlenową fermentację z utlenianiem kwasu octowego na elektrodzie w biologicznym ogniwie paliwowym można by uzyskać 12 moli H_2 /mol glukozy. Wymagane napięcie na katodzie ogniwa w przypadku produkcji wodoru powinno wynosić 410–300 mV. Byłoby ono znacznie mniejsze, gdyby stosowano elektrolizę wody; zawierałoby się w granicach 1800–2000 mV.

Pozyskując protony i elektrony z substancji materialnej zamiast z wody, stosując mikrobiologiczne ogniwo paliwowe, istnieje możliwość bezpośredniej produkcji wodoru przy niskim napięciu. Przedstawiona technologia, opublikowana po raz pierwszy w 2005 roku, objęta patentem USA, nie tylko pozwala wykorzystywać ścieki, ale także znacznie redukuje zapotrzebowanie na energię w porównaniu z ogólnie stosowaną elektrolizą wody.

Konwencjonalną technologię beztlenowej fermentacji oraz technologię mikrobiologicznych ogniw paliwowych można rozważać jako technologie mogące się wzajemnie uzupełniać. Połączenie tych dwóch technologii powiększyłoby zakres zastosowania. Podczas gdy beztlenowa fermentacja może być stosowana na skalę przemysłową pracującą w temperaturze powyżej 30°C, technologia mikrobiologicznego ogniwa paliwowego może stanowić technologię niskotemperaturową o zastosowaniu lokalnym [5].

W celu przewyższenia szeregu czynników limitujących zastosowanie mikrobiologicznych ogniw paliwowych, w tym ekonomiczną opłacalność, problemami, które należałoby rozwiązać w bliskiej perspektywie są to obniżenie kosztów materiałowych oraz eksploatacji. Możliwym rozwiązaniem w chwili obecnej, zanim nastąpi masowa produkcja mogąca czynić je opłacalnymi ekonomicznie, jest integracja obydwu technologii w sensie wzajemnego uzupełniania się.

Biokataliza

W beztlenowej fermentacji mikroorganizmy katalizują proces fermentacji. W mikrobiologicznych ogniwach paliwowych, w zależności od konfiguracji oraz celu zastosowania, mikrobiologiczny katalizator może stanowić wspólnotę bakteryjną jednorodną lub niejednorodną, a więc mieszaną.

W przypadku wspólnoty jednorodnej, biokataliza jest cechą aktywności tylko jednej bakteryjnej wspólnoty. W przypadku wspólnoty niejednorodnej aktywność mikrobiologicznego ogniwa paliwowego stanowi wzajemne oddziaływanie wszystkich

bakteryjnych wspólnot, określanymi mianem elektrochemicznego aktywnego konsorcjum, uzyskiwanego ze ścieków.

Istnieje szereg hipotez dotyczących przemieszczania elektronów katalizowanych przez mikroorganizmy w mikrobiologicznym ogniwie paliwowym. Obejmuje to konwencjonalną koncepcję przemieszczania się elektronów współdziałającą z membraną wymiany protonów względnie z czynnikami pośredniczącymi zwanymi mediatorami.

Ostatnio odkryto, że bakterie w mikrobiologicznym ogniwie paliwowym mogą same wytwarzać mediatory [10]. Istnieją trzy sposoby transmisji elektronów do anody przez mikroorganizmy. Jest to stosowanie:

- mediatorów egzogenicznych, takich jak potassium ferric cyanide, thionine,
- mediatorów wytwarzanych przez bakterie względnie poprzez:
- bezpośrednią transmisję elektronów z enzymów (cytochromes) do elektrody.

Mediatory umożliwiają przekazywanie elektronów z wnętrza biologicznych ogniw paliwowych do elektrod.

Istnieje szereg przeciwwskazań w stosowaniu egzogenicznych mediatorów, takich jak koszty dodatkowe, krótki czas życia i toksyczne oddziaływanie na mikroorganizmy. Jednakże, gdy bakterie wytwarzają własne mediatory, względnie przekazują elektrony bezpośrednio do elektrody, działanie systemu charakteryzuje się wysokim poziomem aktywności. Określa się taki system jako nie wymagający egzogenicznej mediacji.

Problem aktywności biokatalizy w mikrobiologicznym ogniwie paliwowym nie jest dotychczas dobrze rozpoznany. Dotyczy to aktywności wspólnot mikrobiologicznych, ich struktury oraz roli, jaką mogą pełnić w procesie katalizy. Dlatego wymagane jest rozpoznawanie tego zjawiska. Zagadnieniem wymagającym lepszego poznania jest także transmisja elektronów. Innymi problemami wymagającymi lepszego rozpoznania są straty omowe, reakcje zachodzące na katodzie.

Parametry określające pracę ogniwa [11]

Moc wytwarzaną w mikrobiologicznym ogniwie paliwowym warunkują zarówno procesy biologiczne jak i elektrochemiczne. Są to: szybkość zachodzenia reakcji, potencjalne napięcie na anodzie i katodzie. Szybkość zachodzenia reakcji warunkuje ilość bakterii w ogniwie, właściwości transmisji w reaktorze, kinetyka bakterii (szybkość wzrostu bakterii oraz ich powinowactwo), sprawność procesu transmisji protonów przez membranę.

Parametrami wpływającymi na potencjalne napięcie anody są: wielkość powierzchni, właściwości elektrochemiczne elektrody oraz zdolność transmisji elektronów. Podobnie jak na anodzie występują straty napięcia na katodzie. Są stosowane sposoby określania sprawności mikrobiologicznego ogniwa paliwowego. Są to sprawność Coulombowska i energetyczna. Istnieją pomiędzy nimi znaczne rozbieżności.

Sprawność Coulombowską wyznacza liczba elektronów transmitowanych odniesiona do liczby elektronów teoretycznie generowanych przez substrat. Sprawność energetyczna także dotyczy energii transmitowanych elektronów, determinowanej napięciem i natężeniem.

Jednakże natężenie prądu i moc nie zawsze stanowią jedyną miarę. Wobec tego akcent powinien być położony na szybkość transmisji elektronów w określonych warunkach, uwzględniając między innymi oporność.

Optymalizacja w sensie biologicznym dotyczy wyboru właściwych biologicznych konsorcjów oraz adaptacja bakterii do optymalnych warunków reaktora.

Bakterie *Geobacter sulfurreducens* oraz *Rhodferax ferrireducens* charakteryzują się zdolnością transmisji do elektrody większości elektronów uzyskiwanych z kwasu octowego i glukozy. W systemie wsadowym uzyskano sprawność Coulombowską do 89%. Istotnymi parametrami wpływającymi na Coulombowską sprawność są: przemiana bakteryjna, transmisja elektronów, membrana wymiany protonów, oporność wewnętrzna elektrolitu, sprawność transmisji elektronów przez tlenowe katody.

Biomasa jako paliwo w mikrobiologicznych ogniwach paliwowych

Biomasa każdego rodzaju może stanowić pierwotny nośnik energii bez względu czy jest rośliną spożywczą, energetyczną czy też stanowi odpady. Substancjami organicznymi, wykorzystywanymi w produkcji energii elektrycznej przez mikrobiologiczne ogniwa paliwowe mogą być: węglowodany, ścieki komunalne, osady morskie, odpady ludzkie i zwierzęce, odpady pochodzenia rolniczego i przemysłowego.

Konfiguracja

W mikrobiologicznym ogniwie paliwowym bakterie są pobudzane do transmisji elektronów do elektrody, z której przemieszają się do zewnętrznego obwodu elektrycznego [3].

Ogniwa te są projektowane w wielu konfiguracjach. Jedną z nich jest dwukomorowy system, gdzie bakterie w komorze anody są odseparowane od komory katody membraną służącą wymianie protonów. W większości dwukomorowych ogniw stosuje się wodne katody, gdzie wspólnie z powietrzem dostarcza się tlen do elektrody. Wielkość mocy generowanej zależy od powierzchni katody w relacji do powierzchni anody oraz membrany. Gęstość mocy wytwarzanej jest ograniczana wysoką wewnętrzną opornością oraz stratami na elektrodzie.

W celu zwiększenia mocy wyjściowej oraz redukcji kosztów mikrobiologicznego ogniwa paliwowego badano ogniwo z powietrzną katodą, eliminując równocześnie polimerową membranę wymiany protonów. Stanowi ono jednokomorowy system o konfiguracji z powietrzną katodą. Tworzą ją anoda i katoda umieszczone po przeciwnych brzegach cylindrycznej komory.

Uzyskano znacznie większą gęstość mocy, wynoszącą 262 mW/m², w porównaniu z przypadkiem, gdy stosowano wodną katodę. Po usunięciu membrany uzyskana gęstość mocy wzrosła do 494 mW/m². Stanowi to rozwiązanie pozwalające zmniejszać koszt o konfigurację mikrobiologicznego ogniwa pozbawionego polimerowej membrany, w której katoda węglowa jest bezpośrednio zasilana powietrzem. W pracy podano rodzaj ogniwa, w którym osiągnięto gęstość mocy 788 mW/m².

Wśród ogniw paliwowych, w których katalizatorem są bakterie, rozróżnia się dwa podstawowe rodzaje: te które generują elektryczność przy udziale mediatorów jako substancji pośredniczącej oraz te, które nie wymagają mediatorów. Największą gęstość mocy, publikowaną do 2004 roku, jest 3600 mW/m². Sądzi się, że w tym przypadku zastosowano mediator. Dokonano tego w Laboratory for Microbial Ecology and Technology, Ghent University, Belgia.

Konfiguracje mikrobiologicznych ogniw paliwowych mogą obejmować zarówno konfigurację dwukomorową, cylindryczną, rurową, w postaci układu zgrupowanego względnie kombinacji elektrod w układzie otwartym osadowym [4, 5].

Opracowano rozwiązania pozwalające zastępować produkcję w układzie wsadowym jako nieciągłą do wytwarzania w sposób ciągły. Opracowano możliwość wzrostu mocy wyjściowej mikrobiologicznych ogniw paliwowych poprzez: izolację określonych mikrobiologicznych organizmów, selekcję czynników pośredniczących – mediatorów wytwarzających organizmy, elektrochemiczną optymalizację powierzchni elektrod.

Wartość napięcia prądu mikrobiologicznego ogniwa paliwowego nadal będzie ograniczona i nie będzie mogła przekroczyć teoretycznej wielkości pojedynczego ogniwa wynoszącej 1,14 V.

Maksymalną wartość natężenia prądu mają determinować:

- rozwiązanie konstrukcyjne mikrobiologicznych ogniw paliwowych, określające straty elektrochemiczne wynikające z wewnętrznej oporności, ograniczeń transportu konwekcyjnego i różnicy gęstości,
- pojemność objętościowa, reprezentującą całkowitą liczbę elektronów wytwarzaną przez substraty wytwarzające prąd,
- sprawność Coulombowską.

Wzrost napięcia lub prądu następuje poprzez łączenie mikrobiologicznych ogniw paliwowych szeregowo lub równolegle.

Można zauważyć, że wytwarzanie prądu elektrycznego w mikrobiologicznych ogniwach paliwowych jest procesem mikrobiologicznym uzależnionym od warunków zewnętrznych. Oznacza to, że obwód zewnętrzny, w sensie użytkownika prądu, mógłby mieć wpływ na mikrobiologiczną produkcję elektryczności. Ponadto, mikrobiologiczne ogniwa paliwowe połączone szeregowo lub równolegle mogłyby nie pracować niezależnie, których produkcja mogłaby być uzależniona od innych ogniw. Dotychczas nie rozpoznano wpływu połączenia szeregowego względnie równoległego na aktywność mikrobiologicznego katalizatora.

W mikrobiologicznym ogniwie paliwowym mikroorganizmy są zgrupowane w biologicznej warstwie i współżyją w bliskim kontakcie z elektrodą [8]. Adaptacja względnie zmiana mikrobiologicznej wspólnoty (środowiska) będzie miała wpływ na budowę i właściwości biologicznej warstwy. Warstwa biologiczna stanowi część elektrolitu, stąd zmiana kompozycji lub struktury biologicznej warstwy mogłaby wpływać na elektrochemiczną charakterystykę, w tym straty w wytwarzaniu prądu.

W mikrobiologicznym ogniwie paliwowym straty elektrochemiczne są rozpoznawane jako:

- straty aktywacji, które mogą być powiększane w wyniku ruchu wytwarzanych mikrobiologicznie elektronów,
- straty omowe wynikające z oporności elektrolitu i elektrod,
- straty masowego przemieszczania, powstające w wyniku zmniejszania się oporności powierzchni elektrody.

Dotąd nie ustalono zależności pomiędzy parametrami elektrochemicznymi z jednej strony oraz pomiędzy rozwojem wspólnoty mikrobiologicznej z drugiej strony.

Dotychczasowe wyniki

Mikrobiologiczne ogniwa paliwowe stają się prostą technologią. Z pewnością mogą znaleźć zastosowanie w utylizacji ścieków przy akceptowalnej przez rynek cenie. Pod warunkiem rozwiązania szeregu problemów biologicznych oraz zmniejszania kosztów elektrod, technologia ta kwalifikuje się jako nowa technologia bezpośredniej przemiany między innymi węglowodanów do elektryczności w nadchodzących latach.

W latach 2004–2006 sukcesywnie wzrastała liczba publikacji dotyczących rozwoju mikrobiologicznych ogniw paliwowych. Obejmowały one prace: podstawowe, wymagające wiedzy z różnych dziedzin, począwszy od mikrobiologii, elektrochemii poprzez naukę o środowisku do zagadnień materiałowych i technologicznych oraz dotyczące konkretnych zastosowań realizowanych głównie w instytutach naukowych USA, takich jak produkcja elektryczności przy wykorzystywaniu:

- ścieków komunalnych, przemysłowych, rolniczych, świńskich i powstałych produkując żywność,
- glukozy, węglowodanów, protein, kwasu octowego oraz butanowego, cystein,
- produkcji wodoru.

Rekomendacje

Prace eksperymentalne, obejmujące konkretne zastosowania technologii mikrobiologicznych ogniw paliwowych, prowadzono w latach 2004–2006 roku w skali laboratoryjnej w wyżej podanych instytucjach naukowych, głównie w USA.

Na podstawie uzyskiwanych wyników wzrasta przekonanie, że rozważana technologia, przetwarzająca ścieki organiczne bezpośrednio do elektryczności, będzie użyteczna. Musi być jednak realizowana w odpowiedniej skali, spełniając określone uwarunkowania ekonomiczne. Wyzwaniem staje się więc poszukiwanie sposobów pozwalających budować większe systemy dla różnych rodzajów ścieków, ekonomicznie opłacalnych.

Podstawowymi zagadnieniami, opanowanie których mogło by przyczynić się do spełnienia wyżej wymienionego wyzwania są przede wszystkim:

- wzrost gęstości mocy, Coulombowskiej sprawności, szybkości zachodzenia procesów konwersji,
- wybór rodzaju konfiguracji reaktora,
- lepsze rozpoznanie mikrobiologii,
- dalszy rozwój technologii o większej skali.

Uwagi końcowe

Produktem ubocznym funkcjonowania cywilizacji są odpady stałe i ciekłe. Odpady ciekłe przedostają się do wód. Woda, tak jak energia, czyste powietrze i stała substancja materialna, wnoszą zasadniczy wkład w utrzymanie produktywności ekonomicznej, dobrobytu społecznego, stylu życia i zachowania środowiska naturalnego.

Obecnie 40% osiągalnej wody o określonej jakości w skali świata jest wykorzystywana dla funkcjonowania ludności na globie ziemskim. Udział ten będzie wzrastał do 80% w 2025 roku, a to między innymi ze względu na degradację jakości wody w wyniku zanieczyszczenia wszelkiego rodzaju ściekami.

Powstaje pytanie, czy te ciekłe odpady, zawierające atomy węgla i wodoru, mogą być bezpośrednim źródłem energii. Czy istnieje możliwość wytwarzania energii z odpadów i równocześnie je utylizować, a więc czynić je mniej szkodliwymi dla środowiska.

We wspólnym artykule opublikowanym w lipcu 2006 roku przez autorów z USA, Belgii, Holandii, Niemiec oraz Australii, pod tytułem *Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology*, a także w kolejnym artykule, z lipca 2006 roku, naukowcy z USA, Kanady, Japonii i Korei, wskazali, że jest to możliwe.

Dowodem na to jest tak wielkie zaangażowanie się krajów z czterech kontynentów świata o najwyższym produkcie krajowym brutto na mieszkańca, przewyższającym wartość 30 000 USD/mk, jak USA, Kanada, Belgia, Holandia, Niemcy, Korea, Japonia oraz Australia.

LITERATURA

- [1] L.T. Angenent, Karim K., Al-Dahhan M., Wrenn B.A., Domínguez-Espinosa R., Production of bioenergy and biochemicals from industrial and agricultural wastewater, *Trends Biotechnol.* 2004, 22 (9), 477–485
- [2] W. Verstraete, Morgan-Sagastume F., Aiyuk S., Rabaey K., Waweru M., Lissens G., Anaerobic digestion as a core technology in sustainable management of organic matter, *Water Sci. Technol.* 2005, 52, 59–66
- [3] Logan, B. E., Hamelers B., Rozendal R., Schrorder U., Keller J., Freguia S., Aelterman P., Verstraete W., and K. Rabaey. 2006. Microbial fuel cells: Methodology and technology. *Environmental Science & Technology* 40:5181-5192
- [4] Rabaey K., Verstraete W., Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation, *Trends Biotechnol.* 2005, 23, 291–298
- [5] Rabaey K., Aelterman P., Clauwaert P., L. De Schamphelaire, Boon N., and Verstraete W. 2006. Microbial fuel cells in relation to conventional anaerobic digestion technology *Engineering in Life Sciences* 6:285-292
- [6] Gorby Y. A., Yanina S., McLean J. S., Rosso K. M., Moyles D., Dohnalkova A., Beveridge T. J., Chang I. S., Kim B. H., Kim K. S., Cullley D. E., Reed S. B., Romine M. F., Saffarini D. A., Hill E. A., Shi L., Elias D. A., Kennedy D. W., Pinchuk G., Watanabe K., Ishii S., Logan B., Nealson K. H., and Fredrickson J.K. (2006) Electrically conductive bacterial nanowires produced by *Shewanella oneidensis* strain MR-1 and other microorganisms. *PNAS* 103, 11358-11363
- [7] Schröder U., Nießen J., Scholz F., 2003. A generation of microbial fuel cells with current outputs boosted by more than one order of magnitude. *Angewandte Chemie* 115: 2986-2989, *Angewandte Chem.* int.edn 42: 2880-2883
- [8] Rozendal R.A., Hamelers H.V.M., Euverink G.J.W., Metz S.J. and Buisman C.J.N., 2006. Principle and perspectives of hydrogen production through biocatalyzed electrolysis *Int. J. Hydrogen Energy*, 31:1632-1640
- [9] Ciechanowicz W., Globalny system energii, Paliwa i Energia XXI Wieku, Oficyna Wydawnicza WIT, Warszawa 2006
- [10] Rabaey K., Boon N., Siciliano S.D., Verhaege M., Verstraete W., Biofuel cells select for microbial consortia that self-mediate electron transfer, *Appl. Environ. Microbiol.* 2004, 70, 5373–5382
- [11] Rabaey K., and Verstraete W. 2005. Microbial fuel cells: sustainable core technology. *Trends in Biotechnology* 23: 291-298

