

Jeszcze jedna funkcja mikrobiologicznych ogniw paliwowych w oczyszczaniu ścieków: wytwarzanie wody o wysokiej jakości

Zhen HE – Wydział Inżynierii Wodno-Lądowej i Mechaniki, Uniwersytet Wisconsin-Milwaukee, USA

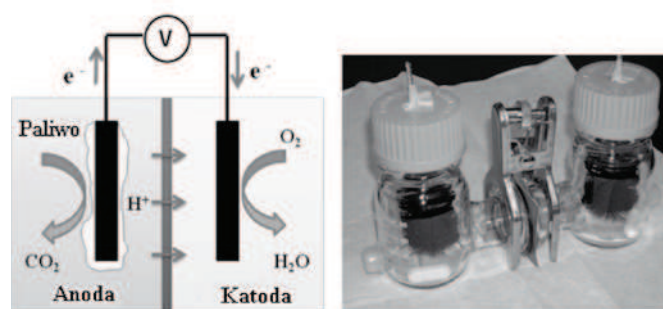
Prosimy cytować jako: CHEMIK 2012, 66, 1, 3-10

Wstęp

Misja, jaką spełnia oczyszczanie ścieków, przeszła transformację od prostego usuwania zanieczyszczeń do bardziej zrównoważonego zadania, którego dodatkowym celem jest mniejsze zużycie energii i wyższy stopień odzyskiwania wody. Mniejsze zużycie energii, to skuteczny proces oczyszczania i/lub odzyskiwania energii z zanieczyszczeń, a wyższy stopień odzyskiwania wody wymaga dodatkowego przetwarzania, zwykle za pomocą procesów membranowych, w celu uzyskania wody o wysokiej jakości i zdolnej do ponownego wykorzystania. Obecnie nie dysponujemy jednak jedną technologią oczyszczania, która obejmowałaby oczyszczanie ścieków, wytwarzanie bioenergii i odzysk wody.

Mikrobiologiczne ogniwa paliwowe (MFC) stały się obiektem zainteresowania ze względu na możliwość zintegrowanego oczyszczania ścieków i wytwarzania bioenergii. MFC są reaktorami bioelektrochemicznymi, w których mikroorganizmy utleniają różne związki organiczne lub nieorganiczne w komorze anodowej [1]. Przepływ elektronów z anody do katody w obwodzie zewnętrznym generuje prąd elektryczny lub moc, jeśli podłączony jest odbiornik (Rys. 1). Bezpośrednie wytwarzanie energii elektrycznej z zanieczyszczeń organicznych czyni z MFC obiecującą metodę oczyszczania ścieków. Istnieją jednak pewne kluczowe problemy, takie jak: optymalna konfiguracja reakcji, koszt katalizatorów i elektrod oraz lepsze poznanie procesów mikrobiologicznych, które trzeba zoptymalizować przed praktycznym zastosowaniem metody.

Rys. 1. Schemat i prototyp laboratoryjny mikrobiologicznych



ogniw paliwowych

Na ogół badania nad MFC koncentrują się na optymalizacji budowy reaktora oraz procesów mikrobiologicznych i elektrochemicznych:

- (a) Tradycyjne MFC są dwukomorowe typu H, wzorowane na chemicznych ogniwach paliwowych. Takie MFC są proste, łatwe do zbudowania i wykorzystania do podstawowych badań, ale nie nadają się do oczyszczania ścieków. W związku z tym pojawiło się wiele konfiguracji przeznaczonych specjalnie do oczyszczania ścieków. Na przykład, MFC z przepływem do góry (ang. *upflow* MFCs), analogicznie jak w reaktorach z zawieszonym osadem beztlenowym (UASB – ang. *upflow anaerobic sludge blanket*) okazały się skuteczne w wytwarzaniu energii elektrycznej i usuwa-

niu substancji organicznych [2, 3]. MFC z katodą powietrzną nie wymagają membran jonowymiennych i mają mniejszy opór wewnętrzny, dzięki czemu wytwarzają więcej energii elektrycznej [4], ale problem stanowi powiększenie ich wielkości.

- (b) W MFC mikroorganizmy działają jako biokatalizatory; zatem poznanie ich zachowania ma zasadnicze znaczenie dla podwyższenia sprawności MFC. W badaniach mikrobiologicznych starano się odpowiedzieć na pytanie, dlaczego mikroorganizmy mogą przenosić elektrony z i do elektrod oraz jak te elektrony są przenoszone? Na podstawie badań na czystych kulturach zaproponowano trzy mechanizmy: 1) bezpośrednie przenoszenie elektronów bez udziału sztucznych mediatorów; 2) przenoszenie elektronów za pośrednictwem rozpuszczalnych przenośników elektronów - specyficznym mikrocząsteczkowych związków, łatwo ulegających reakcjom, zarówno utleniania jak i redukcji, tzw. mediatorów redox, oraz 3) przenoszenie elektronów przez nanodrudty bakteryjne [5, 6]. Elektrochemicznie aktywne organizmy, takie jak *Geobacter spp.* i *Shewanella spp.* są szeroko wykorzystywane jako organizmy modelowe do badania przenoszenia elektronów [7, 8]. Badania mikrobiologiczne kultur mieszanych stosuje się do oznaczania zbiorowiska mikrobiologicznego na elektrodzie, rozpoznania gatunków dominujących i wyodrębniania nowych elektrochemicznie aktywnych szczepów [9].
- (c) Elektrochemia odgrywa ważną rolę w zrozumieniu czynników ograniczających sprawność działania MFC. Techniki elektrochemiczne, takie jak voltamperometria cykliczna (CV) i elektrochemiczna spektroskopia impedancyjna (EIS), wykorzystuje się do rozpoznawania zjawisk elektrochemicznych na elektrodzie [10] i uzyskiwania dokładnych wartości oporu wewnętrznego MFC [11].

W niniejszym artykule omówione zostaną pokrótce możliwe sposoby wytwarzania wody o wysokiej jakości za pomocą MFC podczas oczyszczania ścieków. Skoncentrujemy się tu wyłącznie na MFC, mimo że na tej bazie opracowano nowe układy bioelektrochemiczne, takie jak mikrobiologiczne ogniwa elektrolityczne (MEC) [12] i mikrobiologiczne ogniwa odsalające (MDC) [13].

Tradycyjne funkcje MFC

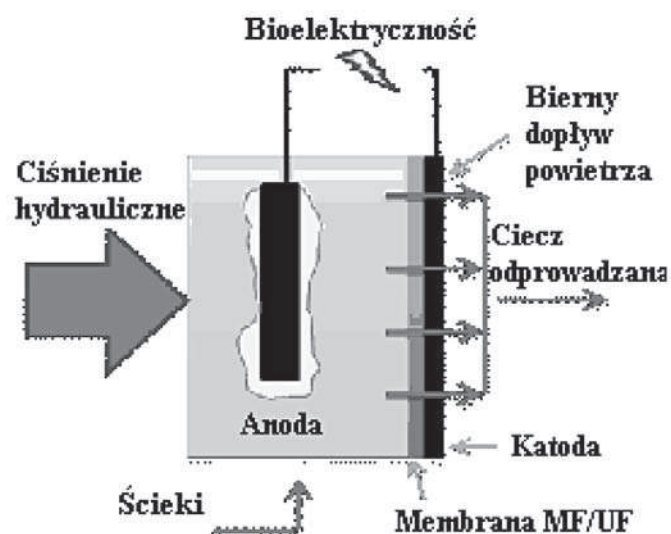
MFC przeznaczone są głównie do dwóch celów: usuwania zanieczyszczeń i wytwarzania energii. Działanie MFC można połączyć z innymi metodami oczyszczania ścieków. W charakterze substratów w komorze anodowej MFC badano różnorodne substancje, zarówno proste jak octany i glukoza, jak i złożone, takie jak prawdziwe ścieki i substancje ropopochodne. MFC mogą również usuwać związki nieorganiczne, na przykład azotany na drodze denitryfikacji bioelektrochemicznej. Więcej informacji na temat substratów do MFC można znaleźć we wcześniejszym artykule przeglądowym [14]. W trakcie usuwania zanieczyszczeń w wyniku reakcji bioelektrochemicznych wytwarzana jest bioelektryczność. Aby móc konkurować z beztlenową komorą fermentacyjną, która jest powszechnie stosowana do uzyskiwania bioenergii (biogazu) ze ścieków, MFC muszą osiągać wydajność w produkcji energii powyżej 250 W/m³. Taką wartość osiągnięto

tylko w małych MFC (o pojemności od kilku do kilkuset mililitrów), jednak w większych reaktorach (o pojemności większej niż kilka litrów) uzyskuje się mniejszą gęstość mocy, chyba że zapewni się specjalne warunki, na przykład dopływ czystego tlenu. Uzyskanie zadowalającej produkcji energii w dużych MFC zadecyduje o komercyjnym sukcesie tej technologii.

Nowa funkcja polegająca na wytwarzaniu wody o wysokiej jakości

Ważnym zagadnieniem, które pomijano we wcześniejszych badaniach nad MFC, był dalszy los oczyszczonych ścieków. Oczywiście jest, że przekształcenie tego strumienia w wodę o wysokiej jakości może zaspokoić rosnącą potrzebę ponownego wykorzystania wody i pomóc utworzyć bardziej zrównoważony system oczyszczania ścieków. Są dwa sposoby podejścia do wytwarzania wody o wysokiej jakości z MFC. Po pierwsze, ciecz wypływająca z MFC (od anody) może być doczyszczana w dodatkowym procesie membranowym, takim jak mikro-, ultra- czy nanofiltracja, albo osmoza odwrócona (RO). Po drugie, niektóre z tych procesów membranowych można zintegrować z MFC uzyskując dodatkowe korzyści. Jesteśmy przekonani, że to drugie podejście rokuje duże nadzieje dla rozwoju MFC. W związku z tym w dalszej części artykułu koncentrujemy się na układzie zintegrowanym do produkcji wody.

Zintegrowane układy MFC badaliśmy dwutorowo, w zależności od typu membrany. Z jednej strony chodziło o opracowanie MFC na podobieństwo beztlenowych bioreaktorów membranowych (AMBR – ang. *Anaerobic Membrane Bioreactor*) z użyciem membran mikro/ultrafiltracyjnych do oddzielenia komory anodowej od katodowej (Rys. 2). Z powodu konieczności doprowadzenia tlenu do katod, w tego typu MFC nie można stosować odsysania wody pod ciśnieniem w komorze katodowej, tak jak w większości bioreaktorów MBR/AMBR. Zamiast tego stosuje się ciśnienie hydrauliczne do przetłoczenia roztworu anodowego przez membranę filtracyjną. Zastosowanie dodatniego ciśnienia jest korzystne, ponieważ eliminuje konieczność napowietrzania przedziału katodowego, jako że realizowane jest bierne dostarczanie powietrza, a przesączająca się woda może zwilżać katodę. Wstępne badania wykazały możliwość realizacji tej koncepcji. Obecnie zbierane są dalsze dane. Druga możliwość, to integracja osmozy wymuszonej z MFC, czego rezultatem jest osmotyczne MFC (OsMFC). OsMFC są atrakcyjne ze względu na ich szybki rozwój i zastosowanie osmozy wymuszonej. Aby lepiej zrozumieć OsMFC, konieczne jest zrozumienie osmozy wymuszo-

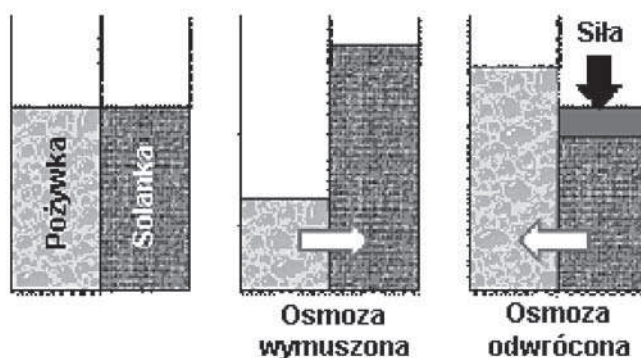


nej, którą pokrótce opisano dalej.

Rys. 2. MFC z membraną mikro- albo ultrafiltracyjną jako separatorem do odzysku wody pod ciśnieniem hydraulicznym

Osmoza wymuszona

Osmoza wymuszona (FO – ang. *forward osmosis*), to ruch wody przez membranę półprzepuszczalną pod wpływem ciśnienia osmotycznego wody [15, 16]. Roztwór stężony (wciągający) po tej stronie membrany (która powinna charakteryzować się wysoką skutecznością osmotyczną), gdzie jest permeat, wytwarza ciśnienie osmotyczne. Roztwory stężone powinny dać się łatwo i tanio oddzielić, dając w rezultacie wodę pitną [17]. Na Rysunku 3 przedstawiono przepływ rozpuszczalnika w osmozie wymuszonej i odwróconej (RO – ang. *reverse osmosis*). W porównaniu do procesów membranowych, których siłą napędową jest ciśnienie (takich jak RO) FO może być prowadzona pod niskim ciśnieniem hydraulicznym; charakteryzuje się ona wysokim stopniem oddzielania wielu zanieczyszczeń i mniejszym *foulingiem* membran [15].



Rys. 3. Przepływ rozpuszczalnika w osmozie wymuszonej i odwróconej

Badania nad technologią OsMFC dotyczyły głównie opracowania membran, stosowanych roztworów i zastosowań. Membrany FO wykonane są z gęstych, nieporowatych i selektywnie przepuszczalnych materiałów [15, 18, 19]. Jako roztwory stężone (wciągające) badano różne substancje chemiczne, w tym dwutlenek siarki, siarczan glinu, glukozę, azotan potasu, mieszaninę amoniaku i dwutlenku węgla, i niedawno uzyskane nanocząstki magnetyczne [15, 20÷23]. Technologię FO badano pod kątem wytwarzania wody o wysokiej jakości ze ścieków, odcieków ze składowisk odpadów, cieczy nadosadowych z komór fermentacyjnych [24÷27], stosowano ją również do odsalania wody morskiej, w przemyśle farmaceutycznym, przetwarzaniu żywności i do wytwarzania energii elektrycznej [28÷31].

Osmotyczne mikrobiologiczne ogniwa paliwowe (OsMFC)

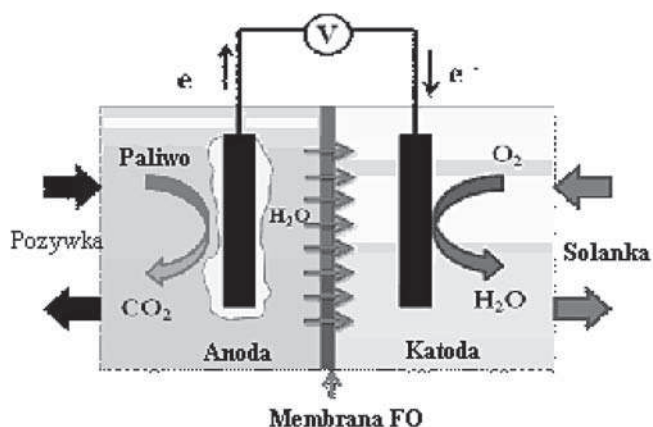
Kluczowe kryteria decydujące o tym, że technologia oczyszczania ścieków jest ekologicznie zrównoważona, to: a) skuteczne usuwanie zanieczyszczeń jako podstawowy cel większości procesów oczyszczania ścieków; b) odzysk energii z wytworzeniem użytecznej energii z odpadów organicznych i zmniejszeniem zużycia energii w systemie oczyszczania; c) odzysk wody z wytworzeniem wody o wysokiej jakości, do ponownego użycia lub do innych celów mogących zmniejszyć zapotrzebowanie na wodę i w efekcie również generowanie ścieków. Zarówno MFC jak i FO mają swoje zalety i wady, m.in.:

- MFC mogą służyć do utylizacji różnych zanieczyszczeń w ściekach i wytwarzają potencjalnie użyteczną bioelektryczność, ale nie są w stanie, bez dodatkowego przetwarzania, wytwarzać wody o wysokiej jakości do ponownego wykorzystania.
- Technologia FO umożliwia uzyskanie wody o wysokiej jakości ze ścieków, ale pozostające podczas procesu koncentraty z procesów FO wymagają dalszej obróbki, polegającej zwykle

na biodegradacji w warunkach tlenowych [32]. W wyniku przetwarzania w warunkach dostępu powietrza, energia zawarta w zanieczyszczeniach organicznych nie jest odzyskiwana.

Synergiczne połączenie tych dwu pozornie niepowiązanych ze sobą technologii, może zapewnić ich wzajemne uzupełnienie i dać w rezultacie zrównoważoną technologię oczyszczania ścieków. Technicznie wykonalne jest połączenie FO z MFC z utworzeniem osmotycznego mikrobiologicznego ogniwa paliwowego (OsMFC) do równoczesnego odzysku wody, oczyszczania ścieków i produkcji bioenergii (Rys. 4). Anoda w OsMFC jest taka sama jak w tradycyjnym MFC, na której ścieki podlegają reakcjom bioelektrochemicznym, natomiast komora katodowa zawiera katolit o wysokim zasoleniu, taki jak roztwór wyciągający [33]. Membrana FO funkcjonuje jako separator między anodą a katodą, a zalety i korzyści wynikające z takiego układu są następujące:

- ze ścieków można uzyskać wodę o wysokiej jakości w procesie FO
- przepływ wody przez membranę FO może sprzyjać transportowi protonów, które mogą buforować katolit i przez to wspomagać wytwarzanie energii elektrycznej
- zatężone odpady organiczne można utleniać wytwarzając przy tym bioelektryczność
- membrana FO, i przepływ wody mogą zapobiegać dyfuzji tlenu w głąb anody, stwarzając warunki beztlenowe dla reakcji anodowych.



Rys. 4. Schemat osmotycznego mikrobiologicznego ogniwa paliwowego

Potencjalne zastosowania OsMFC, to odzysk wody i odsalanie wody morskiej. (a) OsMFC uzyskują funkcję odzysku wody dzięki wdrożeniu FO z dodatkowym odzyskiem bioenergii. Specjalnym warunkiem ponownego użytkowania wody jest zatężenie i zawrócenie roztworu wyciągającego; do czego konieczna jest dodatkowa obróbka z użyciem RO; istnieje możliwość wykorzystania energii elektrycznej wytworzonej w OsMFC i zmniejszenia tym samym jej zużycia przez system RO, co w efekcie daje energowydajny system. (b) Woda wytworzona w OsMFC może być wykorzystana do rozcieńczenia wody morskiej, zmniejszenia jej zasolenia, jak również zużycia energii w dalszych procesach odsalania. Dzięki temu woda morska pełni rolę roztworu wyciągającego bez potrzeby recykulacji tego roztworu. Jeśli OsMFC połączy się z MDC [34], to możemy uzyskać kompleksowy system oczyszczania ścieków i zmaksymalizowanej produkcji bioenergii.

Badania potwierdziły słuszność koncepcji zastosowania OsMFC do jednoczesnego oczyszczania ścieków, odzysku wody i wytwarzania bioenergii [33]. Uzyskane dane wskazują, że energia elektryczna generowana była zarówno w OsMFC jak i w tradycyjnym MFC (z użyciem membrany kationowymiennej jako separatora) z zastosowaniem NaCl albo wody morskiej jako roztworu wyciągającego (katolitu), wykazując, że membrany FO mogą działać jako separatory

w MFC bez pogarszania wydajności produkcji energii elektrycznej. Ogólnie rzecz biorąc, OsMFC wytwarzały więcej energii elektrycznej od MFC, zwłaszcza gdy katolit był wysokozasolony. Stwierdzono, że strumień wody może transportować protony od anody do katody, podtrzymując reakcję katodową i buforując rosnące pH. Okazało się również, że roztwory wyciągające, które doskonale spisywały się w procesie FO, takie jak roztwory chlorku wapnia albo cukru, nie zapewniały wydajnego wytwarzania energii elektrycznej w OsMFC z powodu problemów związanych z *foulingiem* membran i małą przewodnością.

Kluczem do opracowania sprawnego systemu OsMFC jest połączenie FO (np. strumień wody) i MFC (np. wytwarzanie energii elektrycznej) w jeden proces. I zanim przejdziemy do praktycznego etapu rozbudowy skali OsMFC, konieczne jest zbadanie i zrozumienie kilku ważnych problemów. Przykładowo, roztwór wyciągający spełnia podwójną rolę w OsMFC, wytwarzając ciśnienie osmotyczne i stanowiąc medium dla reakcji katodowej. Optymalny roztwór wyciągający (katolit) dla OsMFC musi spełniać kilka kryteriów, w tym niski koszt, wysokie przewodnictwo, „ekologiczność” oraz możliwość odzysku przy niewielkim zużyciu energii. Niedawno przeprowadzone badania wykazały, że rozpuszczalne w wodzie nanocząstki magnetyczne mogą stanowić dobry składnik roztworu wyciągającego, który można odzyskiwać za pomocą pola magnetycznego, zamiast energochłonnego procesu RO [22, 35]. To odkrycie może zrewolucjonizować technologię FO tworząc z niej proces niskoenergetyczny i wielce interesujący z punktu widzenia przyszłych zastosowań OsMFC. Innym czynnikiem krytycznym jest *fouling* membran, jako że membrany FO są znacznie bardziej podatne na to zjawisko niż membrany jonowymienne stosowane w tradycyjnych MFC. *Fouling* membran FO może niekorzystnie wpływać na strumień wody, ale też intensyfikować wytwarzanie energii elektrycznej poprzez podnoszenie przewodności anody wskutek odwrotnego przepływu wody (i soli). Metody zapobiegania *foulingowi* stosowane w procesach FO wymagają zbadania ich przydatności w OsMFC ze względu na obecność mikroorganizmów w anodzie.

Podsumowanie

Nowa funkcja wytwarzania wody o wysokiej jakości uczyni z MFC atrakcyjną technologię ekologicznie zrównoważonego oczyszczania ścieków. Jednak badania w tym zakresie są jeszcze w powijakach. Zapewnienie możliwości wytwarzania wody w MFC przyniesie dodatkowe korzyści, takie jak wyeliminowanie napowietrzania, zwiększenie przewodnictwa katolitu czy wzmożenie transportu protonów. Przy opracowywaniu MFC opartych na membranach MF/UF lub FO powinno wykorzystywać się istniejącą wiedzę o procesach AMBR i FO. Do osiągnięcia tego celu konieczny będzie znaczny nakład pracy, ale nowe zastosowania otwierają szerokie perspektywy.

Literatura

1. Logan B.E., Hamelers B., Rozendal R.A.; Schroder U., Keller J., Freguia S.m Aelterman P., Verstraete W., Rabaey K.: *Microbial fuel cells: methodology and technology*. Environmental Science and Technology 2006, **40**, 17, 5181-5192.
2. He Z., Wagner N., Minteer S.D., Angenent L.T.: *An upflow microbial fuel cell with an interior cathode: assessment of the internal resistance by impedance spectroscopy*. Environmental Science & Technology 2006, **40**, 17, 5212-5217.
3. Rabaey K., Clauwaert P., Aelterman P., Verstraete W.: *Tubular microbial fuel cells for efficient electricity generation*. Environmental Science and Technology 2005, **39**, 20, 8077-8082.
4. Liu H., Logan B.E.: *Electricity generation using an air-cathode single chamber microbial fuel cell in the presence and absence of a proton exchange membrane*. Environmental Science and Technology 2004, **38**, 14, 4040-6.
5. Katz E.: Shipway A.N., Willner I.: *Biochemical fuel cells*. In Handbook of Fuel Cells – Fundamentals, Technology and Applications; Vielstich W., Gasteiger H.A., Lamm A., Eds. John Wiley & Sons, Ltd: 2003; Vol. 1.

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., Culley 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., Nealon K.H., Fredrickson J.K.: *Electrically conductive bacterial nanowires produced by Shewanella oneidensis strain MR-1 and other microorganisms*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 2006, **103**, 30, 11358-63.
7. Lovley D.R.: *Microbial fuel cell: novel microbial physiologies and engineering approaches*. Current Opinion in Biotechnology 2006, **17**, 3, 327-332.
8. Bretschger O., Obratsova A., Sturm C.A., Chang, I.S., Gorby Y.A., Reed S.B., Culley D.E., Reardon C.L., Barua S., Romine M.F., Zhou J., Beliaev A.S., Bouhenni R., Saffarini D., Mansfeld F., Kim B.H., Fredrickson J.K., Nealon K.H.: *Current production and metal oxide reduction by Shewanella oneidensis MR-1 wild type and mutants*. Applied and Environmental Microbiology 2007, **73**, 21, 7003-7012.
9. Logan B.E.: *Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells*. Nature Reviews Microbiology 2009, **7**, 5, 375-81.
10. Fricke K., Harnisch F., Schroder U.: *On the use of cyclic voltammetry for the study of anodic electron transfer in microbial fuel cells*. Energy & Environmental Science 2008, **1**, 1, 144-147.
11. He Z., Mansfeld F.: *Exploring the use of electrochemical impedance spectroscopy in microbial fuel cell studies*. Energy & Environmental Science 2009, **2**, 215-219.
12. Logan B.E., Call D., Cheng S., Hamelers H.V., Sleutels T.H., Jeremiassi A.W., Rozendal R.A.: *Microbial electrolysis cells for high yield hydrogen gas production from organic matter*. Environmental Science & Technology 2008, **42**, 23, 8630-40.
13. Cao X., Huang X., Liang P., Xiao K., Zhou Y., Zhang X., Logan B.E.: *A new method for water desalination using microbial desalination cells*. Environmental Science & Technology 2009, **43**, 18, 7148-52.
14. Pant D., Van Bogaert G., Diels L., Vanbroekhoven K.: *A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production*. Bioresource Technology 2010, **101**, 6, 1533-1543.
15. Cath T.Y., Childress A.E., Elimelech M.: *Forward osmosis: principles, applications, and recent developments*. Journal of Membrane Science 2006, **281**, 70-87.
16. Ng H.Y., Tang W., Wong W.S.: *Performance of forward (direct) osmosis process: membrane structure and transport phenomenon*. Environmental Science & Technology 2006, **40**, 7, 2408-13.
17. McCutcheon J.R., Elimelech M.: *Influence of concentrative and dilutive internal concentration polarization on flux behavior in forward osmosis*. Journal of Membrane Science 2006, **284**, 1-2, 237-247.
18. Yang Q., Wang K.Y., Chung T.S.: *Dual-layer hollow fibers with enhanced flux as novel forward osmosis membranes for water production*. Environmental Science & Technology 2009, **43**, 8, 2800-5.
19. Yip N.Y., Tiraferri A., Phillip W.A., Schiffman J.D., Elimelech M.: *High performance thin-film composite forward osmosis membrane*. Environmental Science & Technology 2010, **44**, 10, 3812-8.
20. Kravath R.E., Davis J.A.: *Desalination of seawater by direct osmosis*. Desalination 1975, **16**, 151-155.
21. McCutcheon J.R., McGinnis R.L., Elimelech M.: *A novel ammonia-carbon dioxide forward (direct) osmosis desalination process*. Desalination 2005, **174**, (1), 1-11.
22. Ling M.M., Wang K.Y., Chung T.S.: *Highly water-soluble magnetic nanoparticles as novel draw solutes in forward osmosis for water reuse*. Industrial & Engineering Chemistry Research 2010, **49**, 12, 5869-5876.
23. Li D., Zhang X., Yao J., Simon G.P., Wang H.: *Stimuli-responsive polymer hydrogels as a new class of draw agent for forward osmosis desalination*. Chem Commun (Camb) 2011, **47**, 6, 1710-2.
24. Cath T.Y., Gormly S., Beaudry E.G., Flynn M.T., Adams V.D., Childress A.E.: *Membrane contactor processes for wastewater reclamation in space. I. direct osmotic concentration as pretreatment for reverse osmosis*. Journal of Membrane Science 2005, **257**, 85-98.
25. Cath T.Y., Childress A.E.: *Membrane contactor processes for wastewater reclamation in space. II. combined direct osmosis, osmotic distillation, and membrane distillation for treatment of metabolic wastewater*. Journal of Membrane Science 2005, **257**, 111-119.
26. Holloway R.W., Childress A.E., Dennett K.E., Cath T.Y.: *Forward osmosis for concentration of anaerobic digester centrate*. Water Research 2007, **41**, 17, 4005-14.
27. Cornelissen E.R., Harmsen D., Beerendonk E.F., Qin J.J., Oo H., de Korte K.F., Kappelhof J.W. M.N.: *The innovative osmotic membrane bioreactor (OMBR) for reuse of wastewater*. Water Science & Technology 2011, **63**, 8, 1557-1565.
28. Talaat K.M.: *Forward osmosis process for dialysis fluid regeneration*. Artificial Organs 2009, **33**, 12, 1133-5.
29. Leob S.: *Large-scale power production by pressure-retarded osmosis using river water and sea water passing through spiral modules*. Desalination 2002, **143**, 115-122.
30. Beaudry E.G., Lampi K.A.: *Membrane technology for direct osmosis concentration of fruit juice*. Food Technology 1990, **44**, 121.
31. Singer E.: *New technologies deliver in treating neurological diseases*. Natural Medicines 2004, **10**, 12, 1267.
32. Achilli A., Cath T.Y., Marchand E.A., Childress A.E.: *The forward osmosis membrane bioreactor: A low fouling alternative to MBR processes*. Desalination 2009, **239**, 10-21.
33. Zhang F., Brastad K., He Z.: *Integrating forward osmosis into microbial fuel cells for wastewater treatment, water extraction and bioelectricity generation*. Environmental Science & Technology 2011, **45**, 6690-6696.
34. Jacobson K.S., Drew D., He Z.: *Use of a liter-scale microbial desalination cell as a platform to study bioelectrochemical desalination with salt solution or artificial seawater*. Environmental Science & Technology 2011, **45**, 4652-4657.
35. Liu Z., Bai H., Lee J., Sun D.D.: *A low-energy forward osmosis process to produce drinking water*. Energy & Environmental Science 2011, **4**, 2582-2585.

Dr Zhen HE – adiunkt (Assistant Professor) na Wydziale Inżynierii Wodno-Lądowej na Uniwersytecie Wisconsin-Milwaukee w USA. Tytuł inżynierski zdobył na Uniwersytecie Tongji w Chinach, tytuł magisterski na Uniwersytecie Technicznym w Danii, doktorat na Washington University w St. Louis w USA. Specjalność inżynieria środowiska. Działalność badawcza dotyczy głównie zrównoważonych ekologicznie metod oczyszczania wody i ścieków z zastosowaniem technologii bioelektrochemicznych oraz metod wytwarzania bioenergii ze ścieków.
E-mail: zhenhe@uwm.edu

VII Kongres Technologii Chemicznej 8-12 lipca 2012, Kraków

Organizatorzy:

- Wydział Chemii, Uniwersytet Jagielloński
- Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki, Akademia Górniczo-Hutnicza
- Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej, Politechnika Krakowska
- Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Przemysłu Chemicznego (SITPChem)

Dane kontaktowe:

Wydział Chemii, Uniwersytet Jagielloński
ul. Ingardena 3
pok. 414 30-060 Kraków
E-mail: techem7@gmail.com
Tel./Fax.: +48 12 663 2009
www: www.techem7.pl