

Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinde Anot ve Katot Bölmelerinin Birbirinden Ayrılmasında Kullanılan Bazı Yöntemler

Deniz UÇAR, Dilan TOPRAK

Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa.
denizucar@harran.edu.tr

Geliş Tarihi:19.09.2013; Kabul Tarihi:24.11.2013

Özet

Anahtar kelimeler
Mikrobiyal Yakıt
Hücreleri; Anot
Bölmesi; Katot Bölmesi;
Ayrım

Tuz köprüleri, proton değişim membranları, katyon değişim membranları ve bipolar membranlar birçok çalışmada mikrobiyal yakıt hücrelerinde anot ve katot bölmelerinin ayrılması için kullanılmaktadır. Bu araçlardan, proton değişim membranı iyi bilinmesi nedeniyle en yaygın olarak kullanılan araçtır. Katot bölmesinde bazı spesifik kirlenmelerin giderilmesi için istenilen çevresel koşulları sağlayabilmek adına bipolar membranlar ve katyon değişim membranları kullanılmaktadır. Maliyet açısından değerlendirildiğinde ise tuz köprüleri en ucuz ayırım mekanizmasıdır ancak yüksek iç direnç nedeniyle verimleri düşüktür. Bu çalışmada iki bölmenin ayrılmasında kullanılan araçlar özetlenmiştir. Ayrıca avantaj ve dezavantajları karşılaştırılmıştır.

Several Methods to Separate Anode and Cathode Chambers in Microbial Fuel Cells

Abstract

Key words
Microbial Fuel Cells;
Anode Chamber;
Cathode Chamber;
Separation

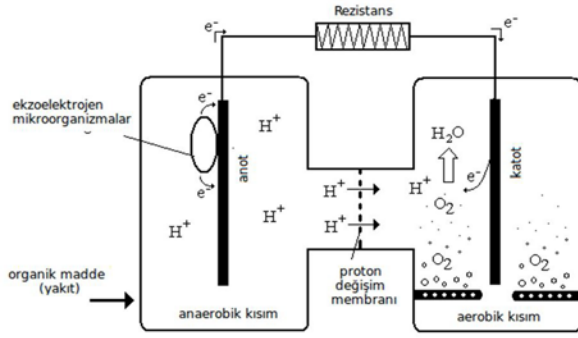
Application of salt bridges, proton exchange membranes, cation exchange membranes as well as bipolar membranes are used in many studies to separate anodic and cathodic chambers of Microbial Fuel Cells. Among those methods proton exchange membrane is the most common used tool due to its well known application. To remove some specific pollutants in cathodic chamber, bipolar membranes, cation exchange membranes are used to provide a desired environmental conditions. Salt bridges are the best separation methods when considered for cost, however their efficiency is low due to their high internal resistance. This study summarizes the tools used to separate these two chambers. Advantages, disadvantages and application areas are compared.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Mikrobiyal yakıt hücreleri substratın anaerobik oksidasyonu sonucunda elde edilen elektronlar ile elektrik akımı oluşturabilen reaktörlerdir (Huang ve ark., 2011). Genellikle bir proton değişim membranı ile ayrılmış iki gözlü anot ve katot bölmelerinden oluşurlar. Anot bölmesinde asetate, glukoz, laktat, etanol gibi organik maddelerin (Pant ve ark. (2010)'nın derlemesinde özetlenmiştir) oksidasyonu gerçekleşirken protonlar, elektronlar ve bir miktar karbon dioksit exoelektrojen mikroorganizmalar tarafından su ortamına

salınırlar. Daha sonra protonlar, proton değişim membranı yoluyla ve elektronlar ise harici bir bağlantı ile (genellikle bakır tel) katot bölmesine transfer olurlar (Logan, 2008). Bu elektron akımı sırasında elektrik üretilir ve katot bölmesine ulaşan elektronlar sıklıkla oksijenin kullanıldığı bir son elektron alıcı ile buluşurlar (Pant ve ark., 2010). Tipik bir mikrobiyal yakıt pili şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Literatürde H tipi mikrobiyal yakıt hücresi olarak da bilinen iki bölmeli mikrobiyal yakıt hücresi.

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde oksijen kullanıldığında oksijenin katot bölgesinde kalması ve anaerobik bakterilerin çalıştığı anot bölgesine ulaşmaması gerekir. Bu durumda proton değişim membranları ile iki bölme birbirleri ile ayrılarak sadece protonların geçişi sağlanmaktadır (Logan, 2008). Başka elektron alıcılar kullanıldığında ise yine bir ayırım yapılarak bu elektron alıcıların katot bölgesine yakın durmaları sağlanmalıdır (Kim ve ark., 2007; Strycharz ve ark., 2010). Bu sayede daha etkin bir indirgeme yapılabilmektedir. Anot ve katot bölmelerinin ayrılması bu nedenle gereklidir (Kim ve ark., 2007). Bazı durumlarda katot bölgesindeki indirgeme reaksiyonları özel şartlara ihtiyaç duymaktadır (pH gibi). Bu sebeple istenen çevresel şartlara ulaşabilmek için bazen proton transferinin yanı sıra diğer katyon ya da anyonlarında katot bölgesine geçişinin sağlanması gerekmektedir (Heijne ve ark., 2006). Bipolar membranlar bu durum için bir örnek teşkil etmektedir.

Bir diğer ayırım aracı ise katyon değişim membranlarıdır. Katyon değişim membranları (cation exchange membrane) proton değişim membranları gibi çalışırlar ancak genellikle daha sağlam yapılı ve düşük maliyetlidirler (Rabeay ve ark., 2005; He ve ark., 2005; Kim ve ark., 2007).

Membran uygulamalarından farklı olarak bir diğer ayırım metodu tuz köprüleridir. Düşük maliyet tuz köprüleri için en önemli avantajdır. Anot ve katot bölmeleri agar tuz köprüleri ile ayrılabilir ve bu kısımlardaki tuz konsantrasyonları da mikrobiyal yakıt hücrelerinin verimliliğini etkileyen önemli bir faktördür (Sevda ve Sreekrishnan, 2012).

Mikrobiyal yakıt pillerinde anot ve katot

bölmelerini ayırmak için çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Bu çalışmada bu bölmeleri ayırmak için kullanılan materyal ve yöntemler, performans, avantaj – dezavantaj ve uygulama yönleri açısından genel olarak değerlendirilmiştir. Tüm yöntemlerde sonuç kısmında genel hatları ile tartışılmıştır.

2. Anot ve Katot Hücrelerinin Ayırım Yolları

2.1. Tuz Köprüleri

Tuz köprüleri protonların geçişi için tasarlanmış agar ve sodyum klorür tuzlarıdır (Sevda ve Sreekrishnan, 2012). Düşük maliyet en önemli avantajları iken yüksek iç direnç en büyük dezavantajlarıdır. Membran teknolojileri ile kıyaslandığında güç çıkışları oldukça düşüktür. Yapılan bir çalışmada proton değişim membranı ile *Geobacter metallireducens* ve karma kültür kullanılarak mikrobiyal yakıt hücreleri işletilmiş ve sırasıyla 40 ± 1 ve 38 ± 1 mW/m² güç yoğunluğu elde edilmiştir. Aynı çalışma kapsamında tuz köprüleri ile *G. metallireducens* bakterilerinin kullanılmasıyla kurulan yakıt hücresinde ise 2.2 mW/m² güç yoğunluğu elde edilmiştir. Bu durum tuz köprülerinin neden olduğu yüksek iç direnç nedeniyle açıklanmaktadır (Min ve ark. 2005).

Tuz köprülü yakıt hücrelerinden elde edilen güç yoğunluğu agar tuz köprüsünde bulunan tuz konsantrasyonu ile orantılıdır. Güç yoğunluğu artan tuz konsantrasyonları ile artmaktadır. Yapılan bir çalışmada tuz köprüsündeki tuz konsantrasyonu %1'den %10'a yükseltildiğinde volumetrik güç yoğunluğunda 1.71 'den 84.99 mW/m³ değerine ulaştığı bildirilmiştir (Sevda ve Sreekrishnan, 2012). Sevda ve Sreekrishnan'ın yapmış olduğu çalışmada (2012) maksimum güç yoğunluğu %5'lik tuz ile %10'luk agar çözeltisi ile elde edilmiştir. Bu koşullardaki KOI giderim ve maksimum güç yoğunluğu ise sırasıyla 88.41% ve 84.99 mW/m³ olarak bildirilmiştir. Tuz köprüleri kullanılarak 100 mW/m² mertebelerinde güç yoğunlukları bazı azo boyalarının giderildiği çalışmalarda ölçülmüştür (Khan ve ark. 2012).

2.2. Membran Uygulamaları

2.2.1. Proton Değişim Membranı

Proton değişim membranları anot ve katot bölmelerinin ayrımı için en yaygın kullanılan malzemedir. Yüksek iyonik iletkenlik sağlamasından dolayı (10^{-2} Scm^{-1}) nafion kullanılan membranlar içinde en yaygın kullanılan membrandır (Min ve ark. 2005). Doğru membran seçimi ile katot bölmesinden anot bölgesine oksijen geçişi tamamen engellenebilir. Bu seçim aynı zamanda katot bölmesindeki substrat kaybını da engellemektedir.

Liu ve ark., tek hücreli bir mikrobiyal yakıt pilinde membranın kaldırılması durumunda oksijen difüzyonunun arttığını ve kolombik verimin (coulombic efficiency) % 44-55'ten % 9-12'ye düştüğünü bildirmişlerdir. Ancak yine de membranı kaldırılan yakıt hücresinde güç yoğunluğu düşen iç dirençle birlikte artmıştır. Nafion'un en büyük dezavantajı yüksek maliyetidir ($1400 \text{ \$ /m}^2$) (Logan, 2008).

Bazı durumlarda nafion membranları Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} ve Mg^{2+} gibi pozitif yüklü diğer bazı katyonlarında geçirebilir. Rozendal ve ark.'a göre (2006), bu katyonların sudaki konsantrasyonları, protonların konsantrasyonundan 10^5 kat fazla olabilmektedir. Bu durum pH'nın anot kısmında düşerken katot kısmında ise yükselmesi ve anot kısmından katot kısmına proton geçişinin olumsuz etkilenmesi ile sonuçlanabilir. Anot kısmındaki pH düşüşü bakteriyel faaliyeti ve dolayısı ile akım üretimini etkilemektedir. Bu nedenle nafion kullanılan sistemlerde alkalinite özenle takip edilmelidir (Logan, 2008).

2.2.2. Katyon Değişim Membranı

Katyon değişim membranları bazı durumlarda proton değişim membranlarına düşük maliyetleri ($80 \text{ \$ /m}^2$) (Logan 2008) ve sağlam yapıları (Rabaey ve ark., 2005; He ve ark., 2005; Kim ve ark., 2007) nedeni ile tercih edilirler. Ultrex CMI 7000 (Harnisch ve ark., 2008), Hyflon (Ieropoulos ve ark.,

2009) ve Zirfon (Pant ve ark., 2010) literatürde rastlanan bazı katyon değişim membranlarıdır. Literatürde birçok çalışmada hem enerji üretimi hem de bazı spesifik kirleticilerin giderilmesi için yapılan çalışmalarda kullanılmıştır. Virdis ve ark. (2008) eş zamanlı karbon ve azot giderimi için yaptıkları çalışmada organik madde ve amonyum içeren atıksuyu öncelikle anot bölgesine pompalamışlardır. Bu sayede organik maddelerin oksidasyonu sağlanmıştır. Sonrasında anot yapısının çıkış suyu harici bir havalandırma tankına alınarak burada amonyumun oksidasyonu sağlanmıştır. Son olarak sadece nitrat taşıyan atıksu katot bölgesine gönderilmiş ve burada nitrat indirgemesi anot kısmından gelen elektronlarla sağlanmıştır. Yazarların katyon değişim membranı kullandıkları bu çalışmada katot bölgesine giriş yapan amonyum konsantrasyonu çıkış konsantrasyonundan daha düşük çıkmıştır. Bu durum anot bölgesindeki amonyumun bir gurup diğer katyon ile birlikte membran üzerinden katot bölgesine geçişi ile açıklanmaktadır.

Bazı durumlarda katyon değişim membranları, protonların haricinde başka katyonları da katot bölgesine geçirdiğinden dolayı uygun ayırım araçları değildir (Rozendal ve ark., 2006). Katot bölgesinde özel koşulların gerekli olduğu koşullarda farklı membran tipleri (bipolar membranlar) kullanılmaktadır.

2.2.3. Anyon Değişim Membranı

Katyon değişim membranları düşük konsantrasyonları nedeniyle proton transferinde verimsiz olmaları nedeniyle bazı araştırmacılar anyon değişim membranları üzerinde durmaya başlamışlardır. Anyon değişim membranı kullanılan mikrobiyal yakıt hücrelerinde proton transferini kolaylaştırmak için fosfat ya da karbonat kullanılır. Bu maddeler yakıt hücresinde proton taşıyıcı ya da pH tamponu olarak işlev görürler. (Torres et al., 2008; Harnisch ve Schröder, 2009). Fosfat anyonlarının tamponlama etkisi yakıt hücrelerinde pH dengelenmesine yardımcı olur (Zuo ve ark., 2008). Sonuç olarak anyon değişim

membranlarında (örnek olarak AMI-7001) proton transferi diğer membranlara nazaran ciddi oranda artar.

Anyon değişim membranı kullanılan bir yakıt hücresinde membran hidroksit anyonlarının (ya da karbonat) transferini sağlar. Bu durumda bazı avantajlar sunmaktadır :

- 1) Oksijen indirgenmesi reaksiyonları asidik ortamlara kıyasla alkali ortamlarda daha kolay olurlar
- 2) Alkali ortamlarda Elektro oksidasyon kinetikleri birçok substrat türü için artış gösterir.
- 3) İyon transferi ile ilişkili elektro osmotik direnç sıvı yakıtın karşılıklı geçişine engel olur. Bu sayede de daha konsantre sıvı yakıtın kullanılmasını sağlar.

Tüm bu avantajlar anyon değişim membranlarını diğerlerine nazaran daha cazip hale getirirler. Bu sayede anyon değişim membranları ile konvansiyonel proton/katyon değişim membranlarına nazaran daha yüksek performans elde edilebilir (Zuo ve ark., 2008). Mo ve ark., (2009) yaptıkları çalışmada katyon de anyon değişim membranları kullanarak yakıt hücreleri işletmişler ve anyon değişim membranı kullanıldığı durumda daha stabil membran direnci ve katolit direnci ile daha stabil güç yoğunlukları gözlemlenmişlerdir. Anyon değişim membranları ile membran boyunca düşük pH gradientinin kontrolü sağlanabilir.

2.2.4. Bipolar Membran

Bipolar membranlar iki adet monopolar membranın birlikte montajından elde edilen yapılardır. Bu nedenle monopolar membranlardan farklı olarak seçici geçirgen özellikte olup sadece pozitif ya da negatif yüklü iyonların bir taraftan diğer tarafa geçişine izin verirler (Harnisch ve Schröder, 2009).

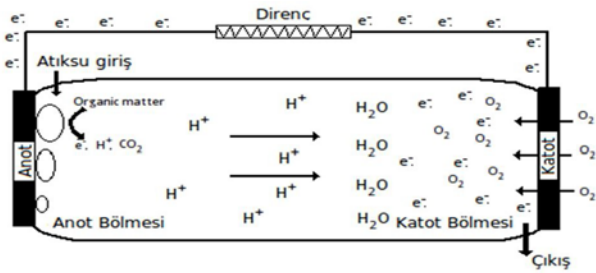
Katot bölmesinde spesifik koşullar (sabit bir pH değeri gibi) gerektiğinde istenmeyen anyon ve

katyonların katot bölmesine geçmeleri arzu edilmez. Heijne ve ark.'nın 2006 yılında yaptıkları çalışmadaki düşük pH değeri bu durum için bir örnektir. Fe³⁺ indirgenmesi Heijne ve ark.'nın yaptığı çalışmada 0.86 W/m² güç yoğunluğu 4.5 A/m² akım yoğunluğu ile başarılmıştır. Fe³⁺ indirgenebilmesi için çözelti içinde çözünebilir kalması gereklidir ve bu durum içinde düşük pH değerine ihtiyaç vardır. pH değerinde yükselme, membran üzerine demir çökeleklerinin oluşmasına sebebiyet verip membranın zarar görmesi ile sonuçlanmaktadır. Bu sebeple pH yükselmesine sebep olabilecek istenmeyen anyon ve katyonların katot bölmesine geçişinin engellenmesi için bipolar membran kullanılmıştır. Bipolar membranlar hem katyon hem de anyon değişim kısımlarını seriler halinde içermektedir (Simons ve ark.,1978; Hurvitz ve ark.,2001). Böylece harici asit dozajı yapmadan katot bölmesinin pH'sının 2.5'in altında kalması bipolar membranların kullanılması ile sağlanabilmektedir (Heijne ve ark., 2006).

Yukarıda sayılan membran tipleri ve performanslarına ek olarak, Kim ve ark. (2007), bir grup membranı (proton, katyon, anyon ve ultrafiltrasyon membranları) mikrobiyal yakıt hücrelerinde deneyerek performans kıyaslaması yapmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki anyon değişim membranı kullanan yakıt hücresi 4 cm'lik elektrot aralığı ile en iyi güç yoğunluğuna ulaşmıştır (% 72 'lik kolombik verimle 610 mW/m² olarak). Bu durum genel olarak protonların, negatif yüklü fosfat anyonları ile birlikte transferi nedeniyle olmaktadır. Fosfat anyonlarının tamponlama etkisinden dolayı güç yoğunluğu artmaktadır. Diğer bir sebep ise anyon değişim membranının iç direnci çok fazla artırmamasıdır. Fakat elektrot aralığı arttırıldığında (4 cm'den 12 cm'ye) güç yoğunlukları birbirine yakın değerler olarak ölçülmüştür (yaklaşık 33-38 mW/m²). Farklı güç yoğunlukları ancak elektrotlar birbirlerine yakın konumlandırıldıklarında ortaya çıkmıştır (Kim ve ark., 2007)

2.3. Membransız Sistemler

Membranlar, önceki bölümlerde belirtildiği üzere, anot ve katot bölmelerinin ayrılması için kullanılmaktadır. Ancak, herhangi bir membran kullanmadan da bu iki bölüm birbirinden ayrılabilir. Bu sistemlerde katot bölgesine sağlanan oksijen anot bölgesinden gelen protonlar ve elektronlar ile birleşerek su molekülünü oluşturur. Substratın oksidasyonu nedeniyle ortaya çıkabilecek elektron ve proton miktarı hesap edilebileceğinden dolayı katot tarafından hücre içine sadece gerekli oksijen miktarının girmesi ile mikrobiyal yakıt hücresinin sadece katot tarafının oksijenli olması sağlanabilir. Bu sayede sisteme giren oksijen anot bölgesine ulaşmadan elektron ve protonlarla buluşarak su molekülünü oluşturur (Şekil. 2).



Şekil. 2. Membransız mikrobiyal yakıt hücresi (Reaktöre giren sınırlı konsantrasyondaki oksijen anot bölgesindeki mikroorganizmalara ulaşmadan elektron ve oksijen ile reaksiyon verir).

Literatürde çeşitli avantajlarından dolayı birçok çalışmada tek bölümlü (membransız) yakıt hücreleri kullanılmaktadır. Eysel atıksu arıtma tesisi ön çökeltim sonrasında alınan bir gerçek atıksu membransız bir yakıt hücresine verilmiş ve 210 – 220 mg/L'lik giriş KOI değeri % 80'lik bir giderime uğrayarak 26 mW/m²'lik bir güç üretmiştir (Liu ve ark.,2004). Yazarların belirttiği üzere membransız sistemlerde doğru ayırımı sağlayabilmek için reaktör içine olan hava (oksijen) akışı özenle ayarlanmalıdır. Bu nedenle Liu ve ark., çalışmalarında aktif havalandırma yerine pasif havalandırma yöntemlerini tercih etmişlerdir (4.5 – 5.5 L/min).

Sonuç

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde elektron donör ile elektron alıcıların ayrı bölmelerde tutulmaları zorunludur. Bu amaçla kullanılan yöntem ve araçlar bu makalede özetlenmiştir. Genel olarak membranlar ve tuz köprüleri iç direncin arttırılması gibi ortak bir dezavantaja sahiptirler. Diğer taraftan membransız sistemlerde protonların anot bölgesinden katot bölgesine herhangi bir dirençle karşılaşmadan serbest geçişlerinden dolayı en ideal yöntem olarak görünmektedir. Ancak anot katot ayırımının herhangi bir ayırım metodu kullanmadan yapılması oldukça hassas bir süreçtir. Ayırım için kullanılan araçlar içinde tuz köprüleri ve katyon değişim membranları en düşük maliyetli yöntemler olsa da, çalışmalarda amaç sadece elektron donör ve alıcıların ayrılması olduğunda literatürde proton değişim membranları en yaygın ayırma araçları olarak karşımıza çıkmaktadır. Katot bölgesinde özel şartların istendiği durumlarda ise bipolar membranlar sadece protonların geçişine izin verdikleri için en ideal ayırım aracıdır.

Kaynaklar

- Harnisch, F., Schröder, U., 2009. Selectivity versus mobility: separation of anode and cathode in microbial bioelectrochemical systems. *ChemSusChem*, 2, 921–926.
- Harnisch, F., Schröder, U., 2009. Selectivity versus mobility: separation of anode and cathode in microbial bioelectrochemical systems. *ChemSusChem*, 2, 921-926.
- Heijne, A.T., Hamelers, H.M., De Wilde, V., Rozendal, R. ve Buisman, C. N., 2006. A Bipolar Membrane Combined with Ferric Iron Reduction as an Efficient Cathode System in Microbial Fuel Cells. *Environmental Science & Technology*, 40, 5200-5205.
- Hurwitz, H.D. ve Dibiani, R., 2001. Investigation of electrical properties of bipolar membranes at steady state and with transient methods. *Electrochimica Acta*, 47, 759-773.
- Harnisch, F., Sch Harnisch, F., Schröder, U., Scholz, F., 2008. The suitability of monopolar and bipolar ion exchange membranes as separators for biological fuel cells. *Environmental Science & Technology*, 42, 1740-1746.

- Huang, L., Regan, J.B., Quan, X., 2011. Electron transfer mechanisms, new applications, and performance of biocathode microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 102, 316-323.
- Ieropoulos, I., Greenman, J., Melhuish, C., 2009. Improved energy output levels from small-scale Microbial Fuel Cells. *Bioelectrochemistry*, 78, 44-50.
- He, Z., Minteer, S. D. ve Angenent, L.T., 2005. Electricity generation from artificial wastewater using an upflow microbial fuel cell. *Environmental Science & Technology*, 39, 5262-5267.
- Kim, J.R., Cheng, S., Oh, S.E. ve Logan, B.E., 2007. Power Generation Using Different Cation, Anion, and Ultrafiltration Membranes in Microbial Fuel Cells. *Environmental Science & Technology*, 41, 1004-1009.
- Khan, M.R., Bhattacharjee, R. ve Amin, M.S.A., 2012. Performance of the Salt Bridge Based Microbial Fuel Cell. *International Journal of Engineering and Technology*, 2, 115-123 .
- Logan, B. 2008. *Microbial Fuel Cells*. John Wiley&Sons, Inc. Yayıncılık.
- Li, Z., Zhang, X. ve Lei, L., 2008. Electricity production during the treatment of real electroplating wastewater containing Cr^{6+} using microbial fuel cell. *Process Biochemistry*, 43, 1352-1358.
- Li, Y., Lu, A., Ding, H., Jin, S., Yan, Y., Wang, C., Zen, C. ve Wang, X., 2009. Cr(VI) reduction at rutile-catalyzed cathode in microbial fuel cells. *Electrochemistry Communications*, 11, 1496-1499.
- Liu, H., Ramnarayanan, R., Logan, B.E., 2004. Production of Electricity during Wastewater Treatment Using a Single Chamber Microbial Fuel Cell. *Environmental Science & Technology*, 38, 2281-2285
- Min, B., Cheng, S. ve Logan, B.E., 2005. Electricity generation using membrane and salt bridge microbial fuel cells. *Water Research*, 39, 1675-1686 .
- Mo, Y., Liang, P., Huang, X., Wang, H., Cao, X., 2009. Enhancing the stability of power generation of single-chamber microbial fuel cells using an anion exchange membrane. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 84, 1767-1772.
- Pant, D., Bogaert, G.V., Smet, M.D., Diels, L., Vanbroekhoven, K., 2010. Use of novel permeable membrane and air cathodes in acetate microbial fuel cells. *Electrochimica Acta*, 55, 7710-7716.
- Pant, D., Van Bogaert, G., Diels, L. ve Vanbroekhoven, K., 2010. A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production. *Bioresource Technology*, 101, 1533-1543.
- Rabaey, K., Clauwaert, P., Aelterman, P. ve Verstraete, W., 2005. Tubular Microbial fuel cells for efficient electricity generation. *Environmental Science & Technology*, 39, 8077-8082.
- Rozendal R.A., Hamelers, H.V.M. ve Buisman., C.J.N., 2006. Effects of Membrane Cation Transport on pH and Microbial Fuel Cell Performance, *Environmental Science & Technology*, 40, 5206-5211.
- Sevda, S. ve Sreekrishnan, T.R., 2012. Effect of salt concentration and mediators in salt bridge microbial fuel cell for electricity generation from synthetic wastewater. *Journal of Environmental Science and Health, Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 47, 878-886.
- Simons, R. ve Khanarian, G., 1978. Water dissociation in bipolar membranes: experiments and theory. *Journal of Membrane Biology*, 38, 11- 30.
- Strycharz, S.M., Gannon, S.M., Boles, A.R., Franks, A. E., Nevin, K.P., Lovley, D.R., 2010. Reductive dechlorination of 2-chlorophenol by *Anaeromyxobacter dehalogenans* with an electrode serving as the electron donor. *Environmental Microbiology Reports*, 2, 289-294.
- Torres, C.I., Marcus, A.K., Rittmann, B.E., 2008. Proton transport inside the biofilm limits electrical current generation by anode-respiring bacteria. *Biotechnology and Bioengineering*, 100, 872-881.
- Wang, Z., Lim, B. ve Chio, C., Removal of Hg^{2+} as an electron acceptor coupled with power generation using a microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, 102, 6304-6307.
- Wang, G., Huang, L. ve Zhang, Y., 2008. Cathodic reduction of hexavalent chromium [Cr(VI)] coupled with electricity generation in microbial fuel cells. *Biotechnology Letters*, 30, 1959-1966.
- Wei, L., Yuan, Z., Cui, M., Han, H. ve Shen, J., 2012. Study on electricity-generation characteristic of two-chambered microbial fuel cell in continuous flow mode. *Hydrogen Energy*, 37, 1067-1073.
- Zuo, Y., Cheng, S., Logan B.E., 2008. Ion exchange membrane cathodes for scalable microbial fuel cells. *Environmental Science & Technology*, 42, 6967-6972.
- Zuo, Y., Cheng, S., Logan, B.E., 2008. Ion exchange membrane cathodes for scalable microbial fuel cells. *Environmental Science & Technology*, 42, 6967-6972.