

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde disakkaritlerden elektrik üretimi

Tunç ÇATAL^{*1}, Hakan BERMEK¹, Kaichang LI², Hong LIU³

¹İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Moleküler Biyoloji-Genetik ve Biyoteknoloji Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul
²Oregon Devlet Üniversitesi, ³Ağaç Bilimleri ve Mühendisliği Bölümü, ³Biyoloji ve Ekoloji Mühendisliği Bölümü,
97331, Corvallis, Oregon, ABD

Özet

Bu çalışmada, lignoselülozik biyokütlelerin asit hidrolizatlarında yaygın olarak bulunan disakkaritlerden elektrik üretimi, tek odalı, hava-katot mikrobiyal yakıt hücreleri kullanılarak araştırılmıştır. Başlıca iki disakkariti (D-sellobiyoz, D-maltoz) kapsayan karbon kaynakları ile elektrik üretimi gözlenmiştir. Sodyum asetat ile zenginleştirilmiş karışık bakteri kültürü, test edilen bütün disakkaritlere kolayca adapte olmuştur. Yeni karbon kaynağına adaptasyon için gerekli süre de benzerlik gösterdi. Test edilen disakkaritler için elde edilen en yüksek güç yoğunluğu, 0.44-0.66 mA cm⁻² direnç yoğunluğunda, sellobiyoz için 1262±5 mW m⁻², maltoz içinse 1893±67 mW m⁻² olarak bulunmuştur. Kolombik yeterli sellobiyoz için yüzde 18, maltoz içinse yüzde 30 olarak bulunmuştur. Test edilen disakkaritler için, en yüksek volt eldesi ve substrat konsantrasyonu arasındaki ilişki 120 ohm dış dirençte doyumluk kinetiği sonuçları ile uyumluluk göstermiştir. Ön görülen en yüksek volt üretimi substratın çeşidine bağlı olarak, sellobiyoz için 0.34 V, yarı doyumluk kinetik sabiti, 626 mg L⁻¹ (R²= 0.971), maltoz için ise 0.40 V ve yarı doyumluk kinetik sabiti 733 mg L⁻¹ (R²= 0.998) olarak bulunmuştur. Test edilen disakkaritler için yüzde 81'nin üzerinde kimyasal oksijen talebinde azalma sağlanmıştır. Test edilen disakkaritlerin elektrik üretiminde karbon kaynağı olarak kullanılabilmesi keşfedilmiştir. Çalışmamızın sonuçları, lignoselülozik maddelerden türevli disakkaritlerin ve lignoselüloz türevli maddelerin ön muamele ile mikrobiyal yakıt hücreleri için uygun birer karbon kaynağı olabileceklerini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrik, disakkarit, mikrobiyal yakıt hücresi, performans.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Tunç ÇATAL. catalt@itu.edu.tr, tunccatal@yahoo.com; Tel: (212) 285 73 01.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Moleküler Biyoloji-Genetik ve Biyoteknoloji Programı'nda tamamlanmış olan "Effects of various carbohydrates on electricity generation in microbial fuel cells" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 05.08.2008 tarihinde dergiye ulaşılmış, 10.09.2008 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.03.2010 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Electricity generation from disaccharides using microbial fuel cells

Extended abstract

Researches on the finding renewable energy alternatives to fossil fuels have been great attention in recent years. The production of fuel and energy from lignocellulosic biomass such as agricultural residues and woody biomass has drawn significant attention because of the abundance, ready availability and renewable nature of these resources. The main components of lignocellulosic biomass are cellulose, hemicelluloses and lignin. Our previous study indeed demonstrated that all monosaccharides that can be directly generated from hydrolysis of lignocellulosic biomass were good sources for electricity generation in MFCs. However, lignocellulosic biomass cannot be directly utilized by microorganisms in MFCs for electricity generation. In other words, lignocellulosic material has to be converted to sugars or other low-molecular-weight compounds. The most commonly used method of converting lignocellulosic biomass to the sugars is through a dilute-acid pre-treatment and subsequent acid- or enzymatic hydrolysis processes. The dilute-acid pre-treatment and the subsequent acid hydrolysis generate a number of byproducts, such as furan derivatives, phenolic compounds and carboxylic acids. Our previous study shows that most of the phenolic compounds and furan derivatives do not have inhibitory effect on electricity generation. However, upto know, there is no information about the electricity generation in air-cathode single chamber mediator-less microbial fuel cells from tested disaccharides. The acid hydrolysates from lignocellulosic materials such as pine wood or corn stover supposedly contain severall monosaccharides and disaccharides previously described. Our preliminary results show that sulfuric acid hydrolysatation (10%) of pine wood flour generate electricity in MFCs. However, it is poorly understood whether all the disaccharides can be utilized by bacteria in an MFC for electricity generation.

Microbial fuel cell (MFC) technology uses microorganisms to catalyze the direct production of electricity from organic materials, and provides a new method for green energy generation from biomass. Various organic materials, such as glucose, xylose, acetate, butyrate, lactate, etc. as well as those from

waste streams such as wastewaters can be used to generate direct electricity by MFCs.

In this study, the direct production of electricity from disaccharides of lignocellulosic biomass was examined. MFC performances by the disaccharides were evaluated as the following parameters: (1) Voltage generation, (2) power density generation, (3) Coulombic efficiency, (4) the removal of chemical oxygen demand and the effect of substrate concentration on electricity generation. Voltage was measured using a multimeter with a data acquisition system. Power density ($mW m^{-2}$) was calculated according to $P=IV/A$, where I is the current, V voltage, and A the projected area of the anode.

Electricity was produced from all disaccharides tested, including *D*-maltose and *D*-cellobiose. The mixed bacterial culture enriched using sodium acetate as a carbon source adapted well to all carbon sources tested. The adaptation time, which was defined as the time between adding a disaccharide solution to a MFC and reaching a maximum power output at 1000Ω , was similar for each disaccharide. However, once the bacteria adapted to a new disaccharide, electricity was quickly recovered when the disaccharide solution was refilled. Maximum power density obtained from these disaccharides were $1262 \pm 5 mW m^{-2}$ for *D*-cellobiose, $1893 \pm 67 mW m^{-2}$ for *D*-maltose at current density of 0.44 and $0.66 mA cm^{-2}$, respectively. For two disaccharides tested, the maximum voltage output at 120Ω external resistance initially increased with the disaccharide concentration; however, further increases above a certain level did not improve the electricity generation. Coulombic efficiency was 18% for *D*-cellobiose and 30% for *D*-maltose. For disaccharides tested, the relationship between the maximum voltage output and the substrate concentration appeared to follow saturation kinetics at 120Ω external resistance. The estimated maximum voltage output ranged between 0.34 - $0.40 V$ and half-saturation kinetic constants of 626 to $733 mg L^{-1}$ for *D*-cellobiose and *D*-maltose, respectively. Chemical oxygen demand (COD) removal was over 81% for disaccharides tested. Results from this study indicated that lignocellulosic biomass-derived disaccharides might be a suitable resource for electricity generation using MFC technology.

Keywords: Electricity, microbial fuel cell, disaccharide, performance.

Giriş

Fosil yakıtlara alternatif olarak, yenilenebilir enerji kaynaklarının araştırılması son yıllarda gittikçe önem kazanmaktadır. Ziraat atıkları ve odun türevli biyokütleler gibi lignoselülozik maddelerden yakıt ve enerji üretimi, yaygın olarak bulunmaları, kolay eldeleri ve yenilebilir doğalarından ötürü pekçok araştırmacının da ilgisini çekmektedir (Petrus ve Noordermeer, 2006; Ragauskas vd., 2006). Lignoselülozik biyokütlenin ana bileşenleri, selüloz, hemiselüloz ve lignindir. Selüloz, D-glukoz içeren bir homopolisakkarit olmasına karşın, hemiselüloz, esas olarak üç heksozun (D-glukoz, D-galaktoz, D-mannoz), iki pentozun (D-ksiloz, L-arabinoz) ve galakturonik asit, glukuronik asit gibi uronik asitlerin kompleksleşmesi ile oluşmuş heteropolisakkarit bir yapıdadır. Lignoselülozik biyokütle aynı zamanda, L-ramnoz, L-fruktoz, D-fukoz ve D-riboz gibi az miktarda monosakkarit ihtiva etmektedir. Lignin doğada en yaygın bulunan aromatik yapıda, fenilpropan ünitelerinin çeşitli kimyasal bağlarla çapraz bağlanması ile oluşmuş karmaşık bir polimerdir (Brigham vd., 1996). Lignoselülozik biyokütleden monosakkarit eldesi için ön işlem ve akabinde, hidroliz etanol ve diğer biyokimyasallar gibi biyoyakıtların üretimi için gerekli olan bir aşama ve yöntemdir (Wiseloge vd., 1996). Bu ön işlem ve hidrolizden türevlenen ürünlerin içeriği, biyokütlenin çeşidine ve aynı zamanda uygulanan ön işlemin ve hidroliz yönteminin çeşidine bağlıdır. Lignoselülozik biyokütleden enerji ve yakıt üretimi için elde edilen tüm bu ön işlem ve hidroliz ürünlerinin verimli olarak kullanımı, ekonomik anlamda oldukça önem taşımaktadır (Petrus ve Noordermeer, 2006; Hinman vd., 1989). Önceki çalışmamızda bu tür monosakkaritlerden elektrik üretimi rapor edilmiştir (Catal vd., 2008a). Lignin türevli fenolik maddelerin ve furan türevi bileşiklerin elektrik üretimine önemli bir etkisinin olmadığı ayrıca bildirilmiştir (Catal vd., 2008b). Ancak, şu ana kadar lignoselülozik hidrolizatlarda bulunan D-maltoz ve D-sellobiyoz disakkaritlerinin, tek odalı hava-katot mikrobiyal yakıt hücrelerinde elektrik üretimine etkilerine dair bir bilgi mevcut değildir.

Mikroorganizmaların, organik maddelerden direkt olarak elektrik üretiminde katalizör olarak

kullanıldığı mikrobiyal yakıt hücre teknolojisi, biyokütlelerden yenilenebilir enerji üretimi için yeni bir alternatif yaklaşım olarak kabul edilmektedir (Logan ve Regan, 2006; Rabaey vd., 2005; Rezaei vd., 2007). Mikrobiyal yakıt hücreleri glukoz, asetat, butirat, laktat, etanol, sistein ve sığır serum albümin gibi çeşitli substratlardan elektrik üretimi için bakterilerin kullanıldığı bir çalışma prensibine sahiptir. Bahsi geçen substratları ihtiva eden atık su ve gıda endüstrisine ait atık sular da mikrobiyal yakıt hücreleri ile elektrik üretiminde kullanılabilir (Rabaey vd., 2005; Liu ve Logan, 2004; Liu vd., 2005; Logan vd., 2005). Mısır bitkisine ait atık biyokütle kısımlarının seyreltik asit (1.2% w/v) ile ön muamelesinden elde edilen hidrolizat kullanılarak, mikrobiyal yakıt hücrelerinde direkt olarak elektrik üretilebilmiştir (Zuo vd., 2006). Öncül çalışmamızda ise odun temelli lignoselülozik biyokütle örneği olan çam odun tozunun sülfürik asit (% 10) muamelesi ile elde edilmiş hidrolizatının mikrobiyal yakıt hücrelerinde elektrik üretiminde kullanılıp kullanılmayacağı araştırılmış ve elektrik üretimi gözlenmiştir. Çam odun tozunun ve mısır bitkisinin biyokütle atıklarından elde edilecek asit hidrolizatlarının monosakkarit içeriği rapor edilmiş ve ayrıca bu tür hidrolizatlarda disakkaritlerin mevcut olduğu bildirilmiştir. Ancak, tüm bu disakkaritlerin tek odalı hava-katot mikrobiyal yakıt hücrelerinde elektrik üretimi için kullanılıp kullanılmayacağı henüz araştırılmamıştır. Herbir disakkaritten elde edilebilecek güç verimi ise bilinmemektedir.

Bu çalışmada, temel olarak, lignoselülozik hidrolizatlarda yaygın bulunan bileşenlerden, D-maltoz ve D-sellobiyoz disakkaritlerinin elektrik üretiminde kullanılıp kullanılmayacağı araştırılmıştır. Çalışmamızda ayrıca disakkaritlere dair kolombik yeterlik, kimyasal oksijen talebinin indirgenme oranı, substrat konsantrasyonunun maksimum volt ve yarı doygunluk sabitleri ile performans değerlendirilmesi yapılmıştır.

Materyal ve yöntem

Mikrobiyal yakıt hücreleri daha önceden rapor edilen yönteme göre modifiye edilerek atölyede

yapılmıştır (Liu ve Logan, 2005). 12 mL hacmindeki yakıt hücresinde elektrotlar 1.7 cm aralıklı karşılıklı olarak yerleştirildiler. Su geçirmez karbon örtü (non-wet proofed carbon cloth) (tip A, E-TEK, Somerset, NJ, USA) anot olarak ve su geçiren karbon örtü (wet-proofed carbon cloth) (tip B, E-TEK Division, Inc., Somerset, NJ, USA) katot olarak kullanılmıştır. Katodun dışarıya bakan yüzeyi karbon tozu ve poly(tetrafluoroethylene) (PTFE) ile rapor edildiği gibi kaplanmıştır (Cheng vd., 2006). Katodun içeriye bakan yüzeyi nasyon kullanılarak 0.5 mg cm⁻² platin tozu ile kaplandı. Tüm deneyde kullanılan katot yüzey alanı 7 cm² iken, anot iki farklı yüzey alanı kullanılarak test edilmiştir (2 ve 7 cm²).

Mikrobiyal yakıt hücreleri orijinal olarak yerel atıksu sisteminden zenginleştirilen bakteri kültürü kullanılarak inoküle edilmiş ve laboratuvar şartlarında MFC içerisinde asetat karbon kaynağı kullanılarak muhafaza edilmiştir. Başlangıçta sodyum asetat (2000 mg L⁻¹) karbon kaynağı olarak ve daha önceden stok olarak hazırlanan besiyeri kullanıldı. Besiyeri daha önce de rapor edilen takip eden kimyasalları içermektedir: NH₄Cl (0.31 g L⁻¹); NaH₂PO₄·H₂O (5.84 g L⁻¹); Na₂HPO₄·7H₂O (15.47 g L⁻¹); KCl (0.13 g L⁻¹), mineral solusyonu (12.5 mL) ve vitamin solusyonu (12.5 mL) (Liu ve Logan, 2004; Lovley ve Phillips, 1988). Sodyum asetat içeren besiyeri volt 0.05 V'un altına düştüğünde yenilenmiştir. Tekrar edilebilir volt üretimi 1000 ohm dış dirençte elde edildiğinde, karbon kaynağı değiştirildi. Standardize edilen toplam organik karbon konsantrasyonu disakkaritler için 480 mg L⁻¹'dir.

Güç yoğunluğunu ifade eden grafikler 50 ila 1000 ohm arasında değişen farklı dirençler kullanılarak elde edilmiştir. Her bir dirençte deney iki kere tekrar edilmiştir. Çeşitli konsantrasyonlarda disakkaritler (150-1400 mg L⁻¹), substrat konsantrasyonun elektrik üretimine etkisini anlamak için test edilmiştir.

Volt, bilgi toplama sistemi (2700, Keithly, Cleveland, OH, USA) kullanılarak ölçülerek bilgisayara kayıt edilmiştir. Güç yoğunluğu ta-

kip eden denkleme göre hesaplandı: ($P=IV/A$, I , akım, V , volt, ve A , anodun yüzey alanı. Mikrobiyal yakıt hücrelerinin performanslarını değerlendirmede önemli bir parametre olan kolombik yeterlik takip eden denkleme göre hesaplanmıştır: $E_c=C_p/C_{Ti} \times 100\%$ (C_p : toplam kolomb, zamana göre akımın integrasyonu ile hesaplanmıştır, C_{Ti} : Kolombun ilave edilen substratın teorik miktarı).

Volt, Michaelis-Menten kinetik denklemi ile substratın bir fonksiyonu olarak hesaplanmıştır:

$$V = \frac{V_{\max} S}{K_s + S} \quad (1)$$

V_{\max} , maksimum volt ve K_s , yarı doyumluk sabiti Excel Solver (Microsoft, version 2003) kullanılarak hesaplanmıştır.

Operasyon sonrası mikrobiyal yakıt hücresinden alınan sıvı örnek steril bir şırınga (0.22 µm) filtresi yardımı ile filtre edilmiştir. Elde edilen filtrat, standard yöntemlere göre kimyasal oksijen talebi araştırılmasında kullanılmıştır (American public health assoc., 1992). Mikrobiyal yakıt hücrelerindeki planktonik bakteriyal konsantrasyonlar, 600 nm'de spektrofotometre (UV-1700 Pharmaspec, Shimadzu, Japonya) yardımı ile optik yoğunluklar ölçülerek değerlendirilmiştir.

DeneySEL ÇALIŞMA SONUÇLARI

Mikrobiyal yakıt hücrelerinin elektrik üretimine başlamasında, ilk olarak sodyum asetat karbon kaynağı olarak kullanılmıştır. Tekrarlanabilir ve durağan elektrik üretimi gözlemlendikten sonra, kültür besiyerine bahsi geçen disakkaritlerden biri eklenmiştir. Her iki disakkarit de yeni bir bakteriyal inokülasyona gerek kalmaksızın elektrik üretimine neden olmuştur (Şekil 1). Adaptasyon süreleri her iki disakkarit için benzerdi. Adaptasyon süresi, disakkaritin ilk ilave edildiği an ile 1000 ohm'luk dirençte en yüksek voltun elde edildiği ana kadar ki süre olarak tanımlanmıştır. Bakteriler maltoza oldukça kolay adapte olmuş ve adaptasyon süresi 14 saat ola-

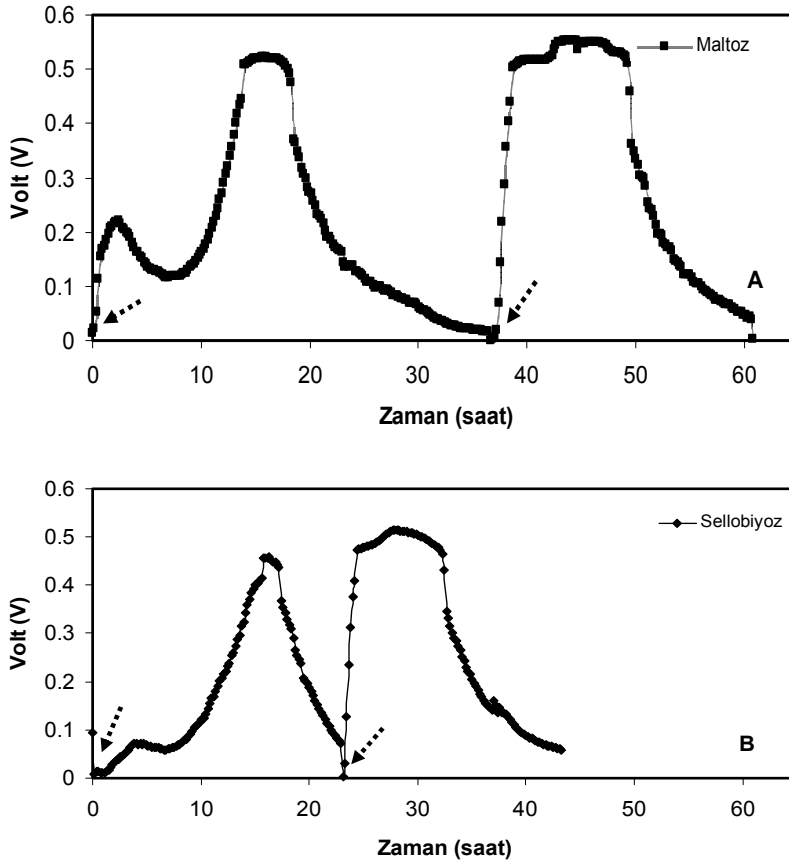
rak bulunmuştur. İlk deneyde yaklaşık 16 saat süresinde sellobiyoz ile en yüksek volta ulaşılmıştır. Solusyonlar tazelandığında elektrik üretimi disakkarit içeren besiyeri eklenir eklenmez gözlenmiştir (Şekil 1).

Önceki çalışmada, aynı deney düzeneğinde glukoz kullanıldığında adaptasyon süresi yaklaşık 1 saat olarak bulunmuştur (Catal vd., 2008a). Fruktoz, galaktoz, fukoz, mannoz, ksiloz, galakturonik asit ve glukuronik asit için adaptasyon süreleri (yaklaşık 12-18 saat arası), bu çalışmada test edilen disakkaritler için benzerdi, ancak arabinoza (yaklaşık 70 saat) nazaran daha kısaydı (Catal vd., 2008a). Bakteriler yeni bir disakkarite adapte olduktan sonra, tekrar aynı disakkarit verildiğinde elektrik üretimi hemen akabinde gözlemlendi (Şekil 1).

Çeşitli elektrik üreten bakterilerin saf kültürleri ancak belli substratları kullanabilmektedir. Ör-

neğin, *Geobacter* türlerinin kullanılabilirdiği karbon kaynağı asetat gibi basit organik asitler ile sınırlıdır (Chaudhuri ve Lovley, 2003). Karbon kaynağı olarak glukoz ile beslenen mikrobiyal yakıt hücrelerinden izole edilen *Pseudomonas* türleri, asetat gibi diğer fermentatif ürünleri elektrik üretimi için kullanamaz (Rabaey vd., 2005; Rabaey vd., 2004). *Shewanella* türleri laktat ve piruvat gibi sınırlı sayıda organik asitleri anaerobik koşullar altında asetata tam olmayarak okside eder ki bu durumda elektrik üretim verimini sınırlamaktadır (Rabaey vd., 2005; Rabaey vd., 2004).

Daha önceki çalışmalar ve bizim çalışmamız, mikrobiyal yakıt hücresinde özellikle karbon kaynaklarının karışımı kullanılacağı zaman, karışık bakteri kültürünün saf bir bakteri kültürüne göre daha üstün olduğunu göstermiştir (Rabaey vd., 2005; Liu ve Logan, 2004; Zuo vd., 2006; Min vd., 2005).



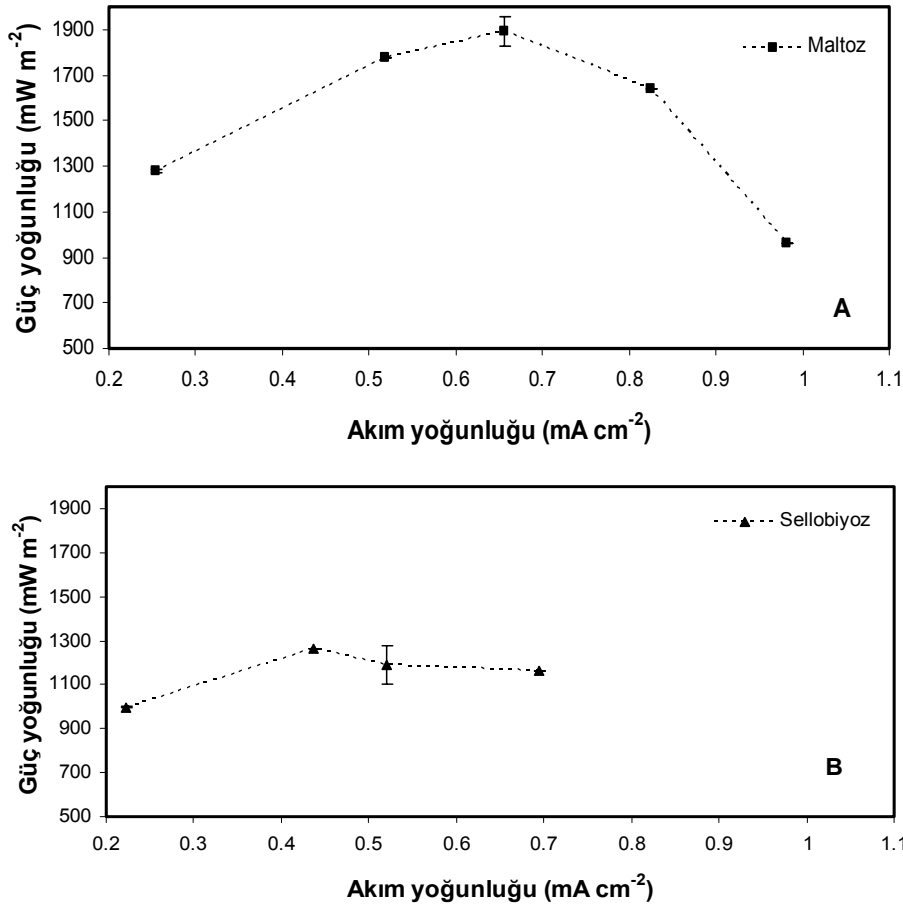
Şekil 1. Maltoz (A) ve sellobiyozdan (B) elektrik üretimi (oklar substratın ilave edildiği anı göstermektedir)

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde her iki disakkarit ile elde edilen güç yoğunlukları, 1000'den 50 ohm'a kadar değişen dirençler kullanılarak elde edilmiştir. Test edilen disakkaritlerden D-maltoz en yüksek güç yoğunluğunu üretmesine rağmen, D-sellobiyoz daha düşük güç yoğunluğu üretmiştir. En yüksek güç yoğunluğu D-maltoz için 0.66 mA cm^{-2} akım yoğunluğunda, $1893 \pm 67 \text{ mW m}^{-2}$ (Şekil 2A), D-sellobiyoz için 0.44 mA cm^{-2} akım yoğunluğunda $1262 \pm 5 \text{ mW m}^{-2}$ 'dir (Şekil 2B). Önceki çalışmamızda rapor edilen monosakkaritler tarafından üretilen güç yoğunluğu sonuçları, disakkaritlerin sonuçları ile kıyaslandığında, monosakkaritler genel olarak daha yüksek güç yoğunluğu üretmişlerdir (Catal vd., 2008a). Örneğin, glukoz, ksiloz ve glukuronik asit sırası ile, 2164 ± 2 , 2331 ve $2767 \pm 27 \text{ mW m}^{-2}$ güç yoğunluğu üretmişlerdir. (Tablo 1) (Catal vd., 2008a). Mannoz ise riboz ve galakturonik asitten daha yüksek güç yoğunluğu üretmiştir. Sonuçlarımız lignoselülozik

hidrolizatlarda bulunan disakkaritler, D-maltoz ve D-sellobiyozun, diğer monosakkaritlerle beraber mikrobiyal yakıt hücrelerinde elektrik üretimi için iyi bir substrat olabileceğini göstermiştir.

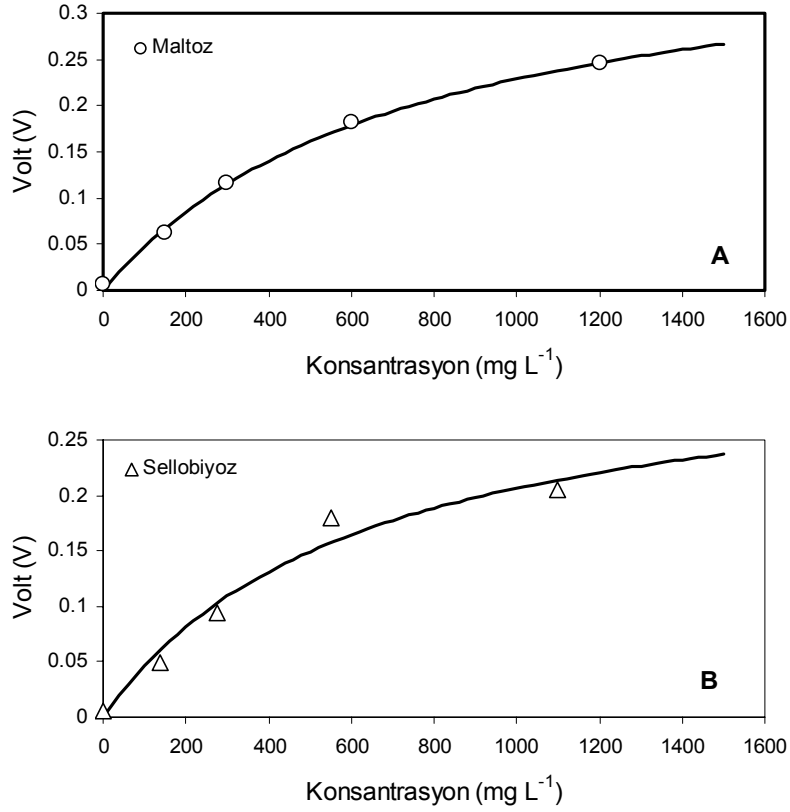
Test edilen disakkaritler için 120 ohm 'da en yüksek volt, disakkarit konsantrasyonu ile beraber artmıştır. Ancak belli bir düzeyin üzerindeki konsantrasyon artışı elektrik üretiminde artışa neden olmamıştır (Şekil 3). D-maltoz için en yüksek volt (V_{max}), 733 mg L^{-1} yarı doyumluk sabitinde (K_s) ($R^2=0.998$), 0.40 V olarak elde edilmiştir. D-sellobiyoz içinse, en yüksek volt (V_{max}), 626 mg L^{-1} yarı doyumluk sabitinde (K_s) ($R^2=0.971$) 0.34 V olarak bulunmuştur (Şekil 3, Tablo 1).

Voltun 0.05 altına düştüğü deney sonunda, tüm monosakkaritler için kimyasal oksijen talebinin yaklaşık yüzde $80-95$ 'i azaltıldı (Tablo 1). Ancak, toplam substrat konsantrasyonundan hesaplanan kolombik yeterlik 120 ohm 'da yüzde $21-37$ idi.



Şekil 2. Maltoz (A) ve sellobiyoz (B) disakkaritlerden elde edilen akım yoğunluğunun bir fonksiyonu olan güç yoğunluk eğrileri

Disakkaritlerden elektrik üretimi



Şekil 3. Farklı karbon kaynaklarını kullanarak 120 ohm'luk dış dirençte substrat konsantrasyonunun etkileri

Tablo 1. Disakritlerden elektrik üretimini gösteren mikrobiyal yakıt hücresi performansı

Karbon kaynağı	Güç yoğunluğu (mW m ⁻²)	KY ^a (%)	KOT azalması (%)	OY _{600nm} ^b	V _{max} (V)	K _s (mg L ⁻¹)	R ² (%)	Kaynaklar	
Monosakkarit	Glukoz	2164±2	28	93±2	0.245	0.39	637	0.993	Catal vd., 2008a
	Ksiloz	2331±62	31	95±2.1	0.131	0.38	352	0.960	Catal vd., 2008a
	Glukuronik asit	2767±27	24	89±0.8	0.207	0.44	725	0.987	Catal vd., 2008a
Disakkarit	Maltoz	1893±67	30	82±12	0.201	0.40	733	0.998	Bu çalışma
	Sellobiyoz	1262±5	18	81±1	0.379	0.34	626	0.971	Bu çalışma

^a 120 ohm dış dirençteki Kolombik yeterlik (KY)

^b Deney sonunda elde edilen solusyonun 600 nm'de optik yoğunluğu (OY)

Bu durum önemli miktarda elektronun kaybedildiğini göstermektedir. Hava-katotlu mikrobiyal yakıt hücrelerinde substrattan solusyondaki nitrat, sülfat ve oksijen gibi diğer elektron alıcılarına elektron transferi ya da bakteriyel büyüme için substrat kullanımı, fermentasyon ve/veya

metanojenez gibi birçok faktör bu kayıba neden olmuş olabilir (Liu ve Logan, 2004). Solusyonda nitrat ve sülfat konsantrasyonları oldukça az olduğu halde (< 0.35 mmol L⁻¹), önemli miktardaki oksijen membransız hava-katod aracılığı ile nüfuz edebilmekte ve aerobic bakteriler tarafından

substratı okside edebilmektedir (Liu ve Logan, 2004). Tek odalı ve hava-katot mikrobiyal yakıt hücrelerinde, katot yüzeyine örtü eklenmesi gibi bir modifikasyon, sisteme oksijen difüzyonunu önemli ölçüde azaltmakta ve kolombik yeterliği artırmaktadır (Fan vd., 2007). Aerobik bakterilere nazaran (Rabaey vd., 2005) anaerobik bakterilerin hücre verimi daha düşük olmasına rağmen, katot yüzeyinde aerobik bakterilerin büyümesi (Liu ve Logan, 2004) ve solusyonda anaerobik/aerobik bakterilerin büyümesi kolombik yeterlikte önemli bir azalmaya yol açabilmektedir. Disakkaritlerin kullanıldığı deney sonunda bakteri konsantasyon değerleri asetat kullanılarak ölçülen değerlerden (Optik yoğunluk_{600 nm}=0.069), 1.5-4.5 kat daha yüksekti (Tablo 1). Bu disakkaritlerin bakteri büyümesi için daha hızlı tüketimi kolombik yeterlikteki azalma ile bağdaştırılabilir.

Sonuçlar

İki disakkaritten elektrik tek odalı hava-katot mikrobiyal yakıt hücrelerinde başarı ile üretilmiştir. Sodyum asetat kullanılarak zenginleştirilen karışık bakteri kültürü test edilen tüm karbon kaynaklarına kolayca adapte olmuştur. En yüksek güç yoğunluğu maltoz için, $1893 \pm 67 \text{ mW m}^{-2}$, sellobiyoz için $1262 \pm 5 \text{ mW m}^{-2}$ olarak bulundu. Ön görülen en yüksek volt üretimi, sellobiyoz için 0.34 V, yarı doygunluk kinetik sabiti, 626 mg L^{-1} ($R^2 = 0.971$), maltoz için ise 0.40 V ve yarı doygunluk kinetik sabiti 733 mg L^{-1} ($R^2 = 0.998$) olarak bulunmuştur. Tüm disakkaritler için yüzde 81'nin üzerinde kimyasal oksijen talebi (KOT) azaltılmıştır. Disakkaritler için kolombik yeterlik yüzde 18-30 arasındadır. Sonuçlarımız lignoselülozik materyallerin asit hidrolizinden elde edilecek disakkaritlerin elektrik üretimi için kullanılabilirliğini göstermektedir. Basit şekerler (Catal vd., 2008a), şeker alkolleri dahil hemen hemen tüm bileşenlerin (Catal vd., 2008c), oldukça geniş bir substrat kullanım özelliğine sahip olduğu bu teknoloji, verimli enerji üretimi için önem taşımaktadır. Lignoselülozik maddelerden elde edilen asit hidrolizatlarında yaygın olarak bulunan inhibitor karakterdeki fenoliklerin ve furan türevi bileşiklerin, elektrik üretimine çok önemli bir etkisi olmadığı da rapor edildiğinden (Catal vd., 2008b), lignoselülo-

zik maddelerden elektrik eldesi alternatif bir yöntem olarak öne sürülebilir.

Kaynaklar

- American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation, (1992). In Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 18th ed., American Public Health Association, Washington, DC.
- Bjerre, A.B., Olesen, A.B., Fernqvist, T., Ploger, A. ve Schmidt, A.S., (1996). Pretreatment of wheat straw using combined wet oxidation and alkaline hydrolysis resulting in convertible cellulose and hemicellulose, *Biotechnology and Bioengineering*, **49**, 568-577.
- Bond D.R. ve Lovley, D.R., (2003). Electricity production by *geobacter sulfurreducens* attached to electrodes, *Applied and Environmental Microbiology*, **69**, 1548-1555.
- Brigham, J.S., Adney, W.S. ve Himmel, M.E., (1996). *Hemicelluloses: diversity and applications* in Wyman, C.E., eds, *Handbook on bioethanol: Production and utilization*, Taylor and Francis, 119-142, Washington, DC.
- Catal, T., Li, K., Bermek, H. ve Liu, H., (2008a). Electricity production from twelve monosaccharides using air cathode microbial fuel cells, *Journal of Power Sources*, **175**, 196-200.
- Catal, T., Fan, Y., Li, K., Bermek, H. ve Liu, H., (2008b). Effects of furan derivatives and phenolic compounds on electricity generation in microbial fuel cells, *Journal of Power Sources*, **180**, 162-166.
- Catal, T., Xu, S., Li, K., Bermek, H. ve Liu, H., (2008c). Electricity generation from polyalcohols in single-chamber microbial fuel cells, *Biosensors and Bioelectronics*, **24**, 855-860.
- Chaudhuri, S.K. ve Lovley, D.R., (2003). Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediatorless microbial fuel cells, *Nature Biotechnology*, **21**, 1229-1232.
- Cheng, S., Liu, H. ve Logan, B.E., (2006). Power densities using different cathode catalysts (Pt and CoTMPP) and polymer binders (Nafion and PTFE) in single chamber microbial fuel cells, *Environmental Science and Technology*, **40**, 364-369.
- Fan, Y., Hu, H. ve Liu, H., (2007). Enhanced Coulombic efficiency and power density of air-cathode microbial fuel cells with an improved

- cell configuration, *Journal of Power Sources*, **171**, 348-354.
- Hinman, N.D., Wright, J.D., Hoagland, W. ve Wyman, C.E., (1989). Xylose fermentation. An economic analysis, *Applied Biochemistry and Biotechnology*, **20-21**, 391-401.
- Liu, H. ve Logan, B.E., (2004). 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*, **38**, 4040-4046.
- Liu, H., Cheng, S. ve Logan, B.E., (2005). Power generation in fed-batch microbial fuel cells as a function of ionic strength, temperature, and reactor configuration, *Environmental Science and Technology*, **39**, 658-662.
- Logan, B.E. ve Regan, J.M., (2006). Electricity-producing bacterial communities in microbial fuel cells, *Trends in Microbiology*, **14**, 512-518.
- Logan, B.E., Murano, C., Scott, K., Gray, N.D. ve Head, I.M., (2005). Electricity generation from cysteine in a microbial fuel cell, *Water Research*, **39**, 942-952.
- Lovley, D.R. ve Phillips, E.J.P., (1988). Novel mode of microbial energy-metabolism-organic carbon oxidation coupled to dissimilatory reduction of iron or manganese, *Applied and Environmental Microbiology*, **54**, 1472-1480.
- Min, B., Kim, J.R., Oh, S., Regan, J.M. ve Logan, B., (2005). Electricity generation from swine wastewater using microbial fuel cells, *Water Research*, **39**, 4961-4968.
- Pan, X. ve Sano, Y., (2005). Fractionation of wheat straw by atmospheric acetic acid process, *Bioresource Technology*, **96**, 1256-1263.
- Petrus, L. ve Noordermeer, M.A., (2006). Biomass to biofuels, a chemical perspective, *Green Chemistry*, **8**, 861-867.
- Rabaey, K., Boon, N., Siciliano, S.D., Verhaege, M. ve Verstraete, W., (2004). Biofuel cells select for microbial consortia that self-mediate electron transfer, *Applied and Environmental Microbiology*, **70**, 5373-5382.
- Rabaey, K., Ossieur, W., Verhaege, M. ve Verstraete, W. (2005). Continuous microbial fuel cells covert carbohydrates to electricity, *Water Science and Technology*, **52**, 515-23.
- Ragauskas, A.J., Nagy, M., Kim, D.H., Eckert, C.A., Hallett, J.P. ve Liotta, C.L., (2006). From wood to fuels: integrating biofuels and pulp production, *Industrial biotechnology*, **2**, 55-65.
- Rezaei, F., Richard, T.M., Brennan, R.A. ve Logan, B.E., (2007). Substrate-enhanced microbial fuel cells for improved remote power generation from sediment-based systems, *Environmental Science and Technology*, **41**, 4053-4058.
- Wiseloge, A., Tyson, J. ve Johnsson, D., (1996). *Biomass feedstock resources and composition* in Wyman, C.E., eds, *Handbook on bioethanol: production and utilization*, Taylor and Francis, 105-118, Washington, DC.
- Zuo, Y., Maness, P.C. ve Logan, B.E., (2006). Electricity production from steam-exploded corn stover biomass, *Energy&Fuels*, **20**, 1716-1721.