



Mikrobiyal Yakıt Hücresinde Nişasta İçerikli Atığın Oksidasyonu ile Elektrik Üretimi

Elif Durna Pişkin^{1,*}, Nevim Genç²

^{1,2}Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye

Makale Tarihiçesi

Gönderim: 26.09.2022

Kabul: 16.01.2023

Yayın: 30.06.2023

Araştırma Makalesi

Öz – Organik içeriği yüksek atıkların enerji üretiminde kullanılması çevresel ve ekonomik açıdan tercih edilen bir yaklaşımdır. Bu çalışmada patates nişastası üretim prosesinden oluşan nişasta atığının mikrobiyal yakıt hücresinde elektrik üretim potansiyeli değerlendirilmiştir. Mikrobiyal yakıt hücresi olarak karbon kumaş elektrotların kullanıldığı çift odacıklı hücre kullanılmıştır. Nişasta atığının sulu karışımı ham, asidik koşullarda termal işlem (pH:2.5, 180 dk kaynatma) (AT) ve asidik koşullarda yüksek basınçta termal işlem (135 °C, pH 2.15, 2 atm, 60 dk) (ABT) gördükten sonra kullanılarak ön işlemin elektrik üretimine etkisi değerlendirilmiştir. Nişasta karışımı anot bölgesinde elektron verici substrat, oksijen ise katot bölgesinde elektron alıcısı olarak kullanılmıştır. 100 Ω dirence karşı voltaj eğrileri çıkarılmıştır. Polarizasyon eğrisi ile elde edilen maksimum güç yoğunlukları ham, AT ve ABT biyokütelleri ile işletimlerde sırasıyla 1.894 mW/m², 10.919 mW/m² ve 8.926 mW/m² olarak elde edilmiştir. Ham, AT ve ABT biyokütelleri ile işletilen MYHler için elde edilen iç dirençler ise sırasıyla, 9692 Ω, 1363 Ω ve 1760 Ω olarak belirlenmiştir. 2600 dk işletilen MYH denemeleri sonrası ham AT ve ABT işletimleri için KOİ giderim verimleri sırasıyla 40.27, 44.44 ve 52.46 olarak bulunurken, kolombik verimleri sırasıyla 1.79, 5.03 ve 1.93 olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler – Atık nişasta, elektrik üretimi, kolombik verimlilik, mikrobiyal yakıt hücresi, termokimyasal ön işlem

Electricity Generation by Oxidation of Starch-Containing Waste in Microbial Fuel Cell

^{1,2*}Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kocaeli University, Kocaeli, Turkey

Article History

Received: 26.09.2022

Accepted: 16.01.2023

Published: 30.06.2023

Research Article

Abstract – The use of wastes with high organic content in energy production is an environmentally and economically preferred approach. In this study, the electricity generation potential of the starch waste generated from the potato starch production process in the microbial fuel cell was evaluated. A dual-chamber cell using carbon cloth electrodes was used as a microbial fuel cell. The effect of pre-treatment on electricity generation was evaluated by using the slurry of starch waste after raw and pre-treatment (thermal treatment (AT) in acidic conditions and high-pressure thermal treatment (ABT) in acidic conditions). The starch mixture was used as an electron donor substrate in the anode compartment, and oxygen as an electron-donating substrate in the cathode compartment. Voltage curves against 100 Ω resistance are plotted. The maximum power densities obtained by the polarization were obtained as 1.894 mW/m², 10.919 mW/m² and 8.926 mW/m² in the operations with raw, AT, and ABT biomass, respectively. The internal resistances obtained for MFCs operated with raw, AT and ABT biomass were determined as 9692 Ω, 1363 Ω and 1760 Ω, respectively. The COD removal efficiencies for the raw AT and ABT operations after the 2600 min run MFC trials were found to be 40.27, 44.44 and 52.46, respectively, while the coulombic efficiencies were determined as 1.79, 5.03 and 1.93, respectively.

Keywords – Waste starch, electric production, coulombic efficiency, microbial fuel cell, thermochemical pretreatment

¹ elif.durna@kocaeli.edu.tr

² ngenc@kocaeli.edu.tr

* Corresponding Author

1. Giriş

Dünya nüfusunun hızla büyümesi, artan endüstriyel faaliyetlerine ve dolayısı ile artan atık oluşumuna neden olmaktadır. Üretim prosesleri sonrası oluşan katı, sıvı ve/veya gaz atıklarının uygun biçimde bertaraf edilmesi gerekmektedir. Atık yönetiminde yakma ve araziye düzenli depolama uygulamaları diğer yöntemlere kıyasla daha yaygın kullanılmaktadır (Bozkurt vd., 2022; Elif Gulsen Akbay vd., 2022).

Atıktan yeşil enerjinin geri kazanımı için pek çok metot önerilmektedir. Bu metotlar içinde mikrobiyal yakıt hücresi (MYH) tercih edilen bir seçenek olmuştur. MYH'ler biyo-elektrokimyasal reaktörler olup atık suda mevcut organik maddeyi tüketebilen mikroorganizmaların katalitik etkisi ile enerji üreterek aynı zamanda atık suyu arıtabilmektedirler. Hücre performansını etkileyen pek çok faktör mikrobiyal büyümeyi, aktiviteyi, elektron transferini, biyokimyasal reaksiyonları ve güç üretimini direkt olarak etkilemektedir. MYH sisteminde anot bölgesinde elektrot üzerinde büyüyen ekzoelektrojenik mikroorganizmalar tarafından organik maddeden proton ve elektronlar üretilmektedir. Ekzoelektrojen mikroorganizmalar biyo-elektrokatalitik olarak aktif türlerdir (Yasri vd., 2019). Üretilen elektronlar iletken dış devre yardımı ile katoda hareket eder, protonlar ise proton değişiren membrandan geçerek katoda hareket eder. MYH'lerde anodik ve katodik bölmelerde meydana gelen oksidatif ve redüktif reaksiyonlar arasındaki potansiyel farklılığından dolayı güç üretilir (Kim vd., 2008; Wilberforce vd., 2022).

Konvansiyonel anaerobik atık yönetim yaklaşımları atıklardan biyogaz üretir. Ancak biyogazın yanarak elektriğe dönüşümü sırasında % 65 entropi kaybı oluşmaktadır. Ayrıca biyogaz içeriğindeki H₂S, yanma sırasında SO_x'leri oluşturabilir. MYH sisteminde ise organik maddenin parçalanması veya yanması sırasında salınan biyojenik CO₂ karbon nötral olarak düşünüldüğünden dünyadaki sera gazı seviyesini arttırmaz. MYH'ler düşük çevre sıcaklığında ve nötral pH'da işletilebildikleri gibi ucuz ve bol bulunabilen organik endüstriyel ve kentsel katı atıklar/atık sular gibi biyo-polimerik maddeleri elektrik üretimi için kullanabilirler (Hoang vd., 2022).

MYH performansı için organik substrat önemli bir değişkendir. Mikroorganizmaların aktivitesini ve elektron-proton üretimini etkiler. Artan mikrobiyal aktivite, substrat dönüşümünü artırır, dolayısı ile güç üretimi ve kolombik verim artar. Substrat yükleme hızı MYH performansında oldukça önemlidir. Substrat yükleme hızındaki artış anot elektrot yüzeyinin kaplanarak ekzoelektrojenler ile diğer ortamda mevcut mikroorganizmalar arasında rekabet oluşmasına yol açabilir. Bu durum kolombik verimi ve elektrik üretimini negatif olarak etkileyebilir. Düşük substrat yükleme hızında ise yüksek iç direnç elektrik üretiminde asıl problemdir. Bu yüzden büyük ölçekli uygulamalara geçmeden önce substrat ve mikroorganizmalar için proses koşullarının optimizasyonu önerilmektedir. Substrat konsantrasyonu artışı belirli bir seviyeye kadar güç üretimini artırırken çok yüksek konsantrasyonlar üzerinde zararlı etki gösterebilir (Hoang vd., 2022).

Biyolojik parçalanabilirliği düşük organik atıklara fiziksel, kimyasal, enzimatik veya mikrobiyal ön işlemlerin uygulanması, bu atıkların hidrolizini sağlayıp fermantasyon bakterileri için karbonu ulaşılabilir kılar. Nişasta bakımından zengin atıkların enzimatik ön arıtımından olumlu sonuçlar alınmıştır (Gupte vd., 2022). Anaerobik koşullar altında nişasta ilk önce çözünür maddelere hidroliz olur, sonra hidroliz ürünleri fermantasyon sırasında asitleştirici mikroorganizmalar tarafından basit bileşiklere dönüşür (Ye vd., 2019). Fermantasyon ve nişasta hidrolizinden üretilen organik asitler (formik asit, asetik asit, propiyonik asit ve n-bütirik asit) ekzoelektrojen bakteriler tarafından tamamen kullanılabilir. MYH'de organik asitler anot mikrobiyal topluluğu ve elektrik üretimini etkiler (Zafar vd., 2022; Zhang vd., 2022).

Nişastadan meydana gelen organik asitlerin sistem performansı üzerine üç önemli rolü vardır (Zhang vd., 2022). Bunlar;

-Öncelikle organik asitler anot mikrobiyal topluluk için karbon ve enerji kaynağıdır.

- Organik asitler, hidrofobik organik kirleticilerin katı fazdan desorpsiyonunu ve çözünürlüğünü geliştirerek parçalanabilirliklerini artırır.

-Organik asitler sistemin pH'ını etkiler, bu durum ise mikrobiyal topluluğun yapısını ve aktivitesini ciddi biçimde etkiler. Organik asitler nişastadan oluşurken aynı zamanda anot mikroorganizmaları tarafından tüketilir.

MYH'lerde yüksek katı içerikli atıkların kullanımı yüksek iç direnç, kütle transferi sınırlaması, yavaş biyolojik parçalanma kinetiği, düşük kolombik verim ve düşük enerji geri kazanımı gibi dezavantajlara sahiptir (Zafar vd., 2022).

Atık heterojenitesinin artışı atığın metabolize edilmesini güçleştirir. Bu nedenle yüksek katı içerikli atıkların homojenitesinin sağlanabilmesi için genellikle partikül boyutunu azaltma ve ön arıtım uygulamaları önerilmektedir. Fermantasyon için kullanılacak biyokütlenin ön arıtımı, atığın biyolojik dönüşümünde önemli bir adımdır. Ön arıtım ile atığın yüzey özellikleri gelişir. Böylece mikrobiyal etkileşim artar, kompleks karbonhidrat, protein ve lipitlerin hidroliz hızı gelişir ve daha iyi parçalanma sağlanır (Zafar vd., 2022).

Bu çalışmada patates cipsi üreten endüstriden katı formda oluşan ve hali hazırda geri dönüşüm proseslerinde yakıt olarak kullanılan nişasta atığının MYH sisteminde elektrik üretim potansiyeli değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

MYH'nin anot bölgesinde elektron verici olarak patates cipsi üretim prosesi sonucunda oluşan nişasta atığı kullanılmıştır. Atığın özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1

Çalışmada kullanılan patates cipsi endüstrisi nişasta atığının özellikleri

Analiz	Sonuç
Nem (% kütleli olarak)	39.04
Kül (Kuru madde) (%)	0.42
Protein (Kjeldahl) (Kuru madde) (%)	0.16 ±0.05
Asit miktarı (mL/100 gr)	2.2

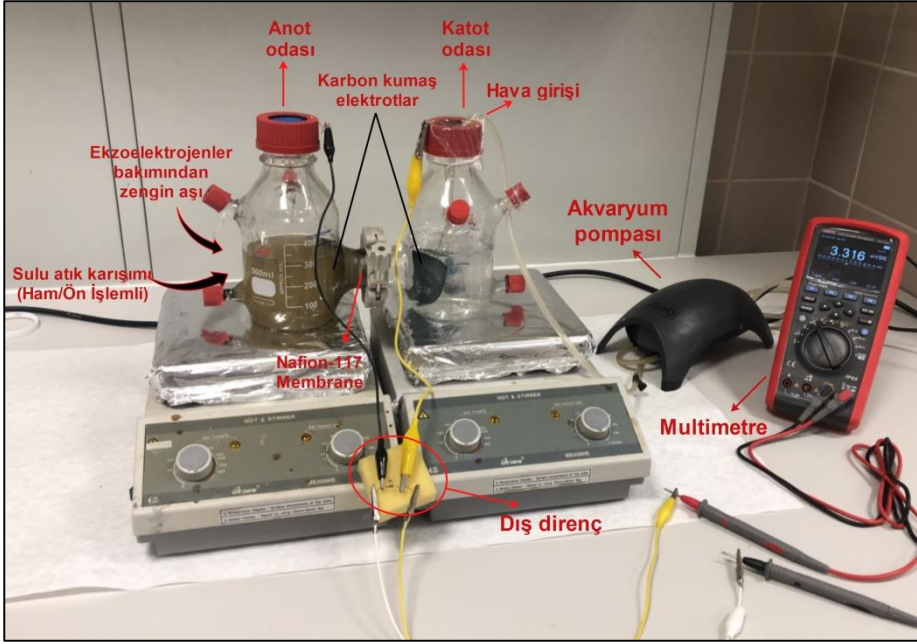
MYH sisteminde, nişasta atığı saf suya ilave edildikten sonra kaba filtreden geçirilerek sistem ekipmanlarına zarar verebilecek maddelerden arındırıldıktan sonra kullanılmıştır. Atık karışımı ham ve termokimyasal ön işlem (asidik koşullarda termal işlem (AT) ve asidik koşullarda yüksek basınçta termal işlem (ABT) gördükten sonra kullanılmıştır.

2.1. Atığa Uygulanan Ön İşlem

Sulu nişasta çözeltisine iki farklı ön işlem uygulanmıştır. İlk ön işlemde (AT) atık karışımının pH'ı 0,1 N HCl kullanılarak 2.5'a getirildikten sonra 180 dakika boyunca ısıtıcı üzerinde kaynatılmıştır. İkinci ön işlemde (ABT) ise pH'ı 2.5'a getirilen atık karışımı 60 dakika 2 atm basınç ve 135 °C sıcaklık şartlarına maruz bırakılmıştır. Bu ön işlem için Nüve Ot 90 Dik Tıp Laboratuvar Buharlı Sterilizatörü kullanılmıştır. Ön işlem sonrası karışımlar oda sıcaklığına getirildikten sonra ilk hacmine saf su ilavesi ile tamamlanarak, 0,1 N NaOH ile pH 7.4'e ayarlanmıştır. Ön işlem görmüş nişasta atıkları anot bölgesine substrat kaynağı olarak ilave edilmiştir.

2.2. MYH Sistemi

Denemeler H-tipi her bir bölme hacmi 500 mL olan cam reaktörde kesikli olarak yürütülmüştür. Ham ve ön işlem görmüş nişasta çözeltisi anot bölgesinde substrat olarak kullanılmıştır, katot bölgesinde elektron alıcı olarak ise oksijen kullanılmıştır. Anot ve katot bölmelerinde Fuel Cell Store'dan temin edilen ve kalınlığı 356 mikron olan AvCarb 1071 düz karbon kumaş kullanılmıştır. 22 cm² düz karbon kumaş elektrot materyali 0.2 mm bakır tel ile bağlanarak anot bölgesinde oluşan elektronların katot bölgesine transferi sağlanmıştır. Anot ve katot arasındaki devre 100 Ω direnç kullanılarak kapatılmıştır. Anot ve katot bölmelerini proton geçiren membran (DupontTMNafion® 117) ile ayrılmıştır. Membran 40 °C de 24 saat 30% H₂O₂ ile şartlandırıldıktan sonra kullanılmıştır. Anot bölgesi her bir deney öncesi anaerobik koşulların sağlanabilmesi amacı ile azot gazı ile süpürülmüştür. Katot bölgesinde elektron alıcı olarak oksijen sağlanması suyun akvaryum pompası (Tetra Aps 400 akvaryum hava motoru) ile 200 L/sa debide havalandırılması ile gerçekleştirilmiştir. Anot bölgesine ekzoelektrojenler bakımından zenginleştirilmiş aşı kullanılmıştır. Kullanılan aşı yaklaşık üç ay süresince substrat olarak gıda endüstrisi arıtma çamurunun kullanıldığı MYH sisteminden alınmıştır. Anot bölgesinde besin ihtiyacı 1 mL NH₄Cl (172.22mg/L), 1 mL MgCl₂ (55.55 mg/L), 0.5mL KCl (72.22 mg/L), 1 mL NaCl (64.44 mg/L), 5 mL K₂HPO₄ (1888 mg/L), 8 mL KH₂PO₄ (2600 mg/L) ilavesi ile karşılanmıştır. Ayrıca, katot bölgesinin tamponlama kapasitesini artırmak için 0.5mL K₂HPO₄ (212.5 mg/L) ve 20 mL KH₂PO₄ (5777 mg/L) ilave edilmiştir. Reaktör 3 g nişasta atığı/L ile beslenerek 430 mg/L UAKM/L biyokütle konsantrasyonu ile işletilmiştir. Deneysel sistem Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan çift odacıklı MYH düzeneği

2.3. Analiz

Anot bölmesinde atığın oksidasyon derecesi KOİ analizi yapılarak belirlenmiştir. KOİ analizi Standard Methods, 1989, 5220 D'ye göre kapalı reflüks metodu ile yapılmıştır. KOİ giderim verimi Denklem 2.1'e göre hesaplanmıştır.

$$\text{Giderim verimliliği (\%)} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (2.1)$$

Burada C_0 ve C_t sırası ile nişasta karışımının ilk ve t zamanı sonundaki KOİ değerini göstermektedir.

Hücreler arası potansiyel bilgisayara bağlı yazılım ile kontrol edilen bir dijital multimetre (UT181A True RMS Data logging Multimeter) ile 10 dakikalık aralıklarla ölçülmüştür. Gerilim, sabit bir harici direnç ($R_{dış}$) üzerinden ölçülürken, akım (I) Denklem 2.2'ye göre Ohm yasasından hesaplanmıştır (Logan vd., 2006).

$$I = V/R_{dış} \quad (2.2)$$

Burada V, bir dış direnç ($R_{dış}$) üzerinden ölçülen voltajı, I elektrik akımını göstermektedir. Güç (P) üretimi Denklem 2.3'e göre hesaplanmıştır ve elektrotun yüzey alanı ile normalize edilmiştir.

$$P = I \times V \quad (2.3)$$

Kolombik verimlilik (%), substrattan anota aktarılan toplam kolombların aktarılabilen maksimum kolomba oranı olarak ifade edilir. Elde edilen toplam kolomblar, akımı zaman içinde entegre ederek belirlenir, böylece bir t zamanında değerlendirilen kesikli MYH işlemi için kolombik verimlilik Denklem 3.1'e göre hesaplanır (Jia et al., 2008).

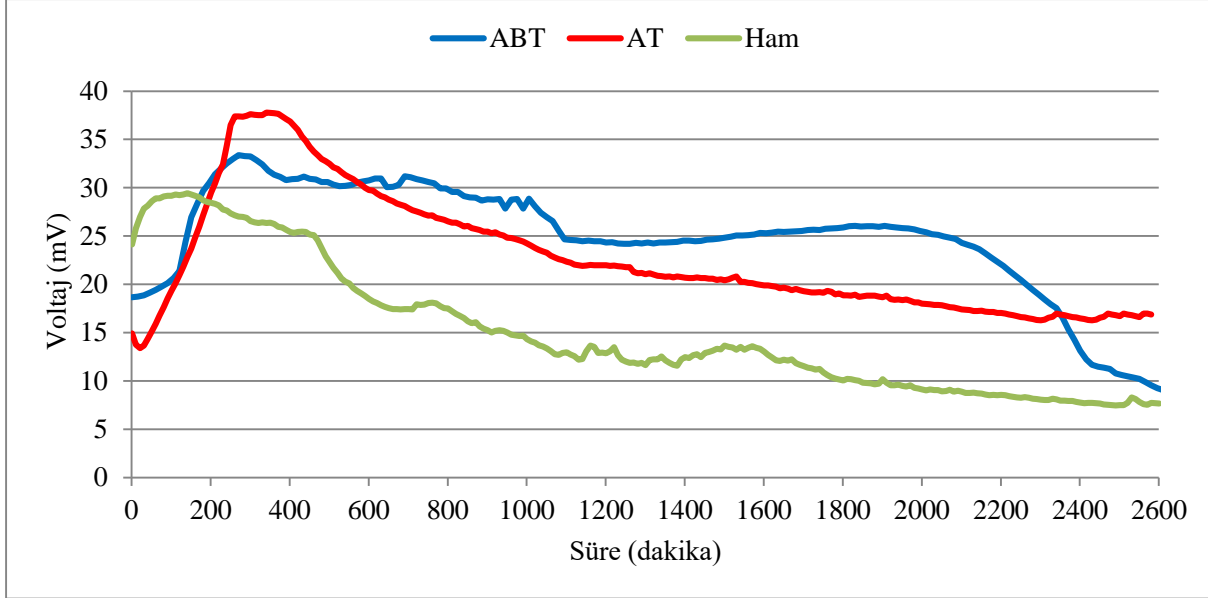
$$CE (\%) = \frac{8 \int_0^t Idt}{FV_{an}\Delta KOİ} \times 100 \quad (2.4)$$

burada F, Faraday sabitidir, $\Delta KOİ$, t zaman içindeki KOİ'deki değişimdir ve V_{an} , anot odasının çalışma hacmidir.

Güç yoğunluğunu akım yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak tanımlayan bir güç eğrisi, polarizasyon eğrisinden hesaplanır. Polarizasyon eğrisi, 100000 ve 10 Ω arasındaki farklı dış dirençlere karşı okunan voltaj düşüşü ile belirlenmiştir. Voltaj/akım eğrilerinin eğilim çizgileri oluşturularak eğimlerinden iç dirençler hesaplanmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

İki bölmeli MYH sisteminde anot bölgesinde ham ve ön işlem görmüş atık oksidasyonu ile oluşan elektronlar, katot bölgesine transfer olduktan sonra oksijen ile birleşerek suyu oluşturmaktadır. İki bölme arasındaki elektron transferi sırasında ölçülen voltaj değerleri Şekil 2’de verilmiştir.



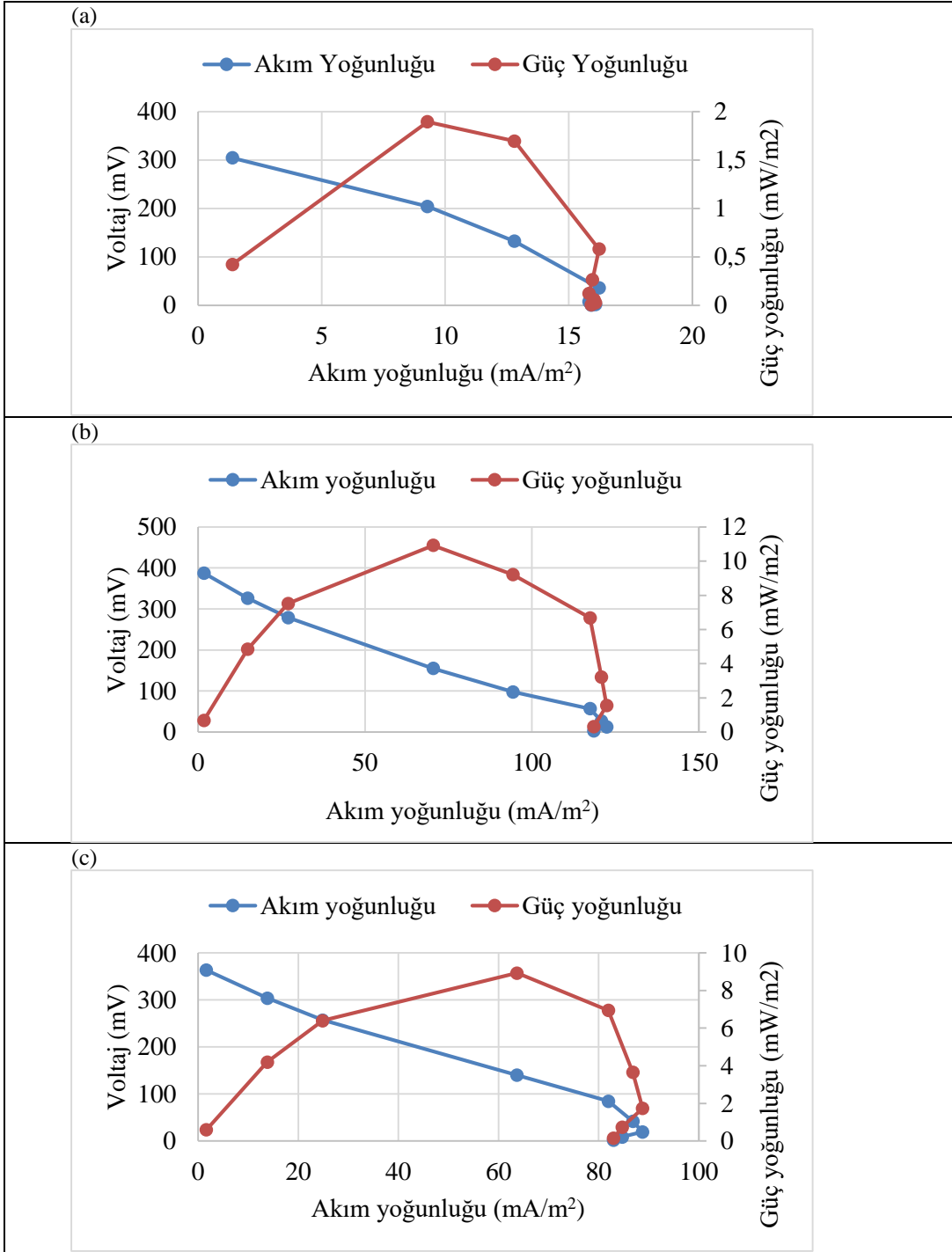
Şekil 2. Ön arıtmı ve ham nişasta atıkları ile işletilen MYH’lerde 100 Ω dirence karşı elde edilen voltaj grafikleri (ABT (135 °C, pH 2.15, 2 atm, 60 dk), AT (pH 2.5, 180 dk kaynatma))

Şekil 2’de görüldüğü üzere ham atık karışımında kolay parçalanabilen organik maddelerin varlığından dolayı ilk 100. dakikada artan parçalanma hızları voltaj değerini maksimum 29 mV’a artırmıştır. Ancak daha zor parçalanabilen organiklerin ortamda kalması sonucu parçalanma hızı azalmış bunun sonucu olarak da voltaj değerlerinde azalma eğilimi gözlemlenmiştir. AT ve ABT ile beslenen MYH’lerde kolay parçalanabilen organik maddelerin oranı arttığından dolayı kısa bir adaptasyon süresinde sonra voltaj değerlerinde artış belirlenmiştir. 300. dakikada AT ve ABT ile beslenen MYH’lerde maksimum 37 ve 33 mV değerleri belirlenmiştir. Karışıma ön işlemin uygulanması voltaj değerinde belirgin bir artışa sebep olmuştur.

Gerçekleştirilen MYH işletimlerinde anot bölgesinde KOİ giderimleri ham, AT ve ABT için sırasıyla %16.84, %44.44 ve %56.80 olarak elde edilmiştir. Ön arıtım yapılmamış dirençli selülozik nişasta biyokütlesinde parçalanabilir organik maddenin azlığı nedeni ile düşük giderim gözlemlenmiştir. Ön işlemlerin varlığı KOİ gideriminde ve elektrik üretiminde belirgin artışa neden olmuştur.

Elektrik üretim potansiyeli, elektron vericisinin, elektron alıcısının, elektrot malzemesinin ve katolitin özelliklerine göre değişir (Xiao vd., 2014). MYH’ler dahil olmak üzere yakıt hücrelerinin elektriksel verimliliğini karakterize etmek için polarizasyon eğrilerinin kullanılması yaygın olarak kabul edilmiştir (Koók vd., 2021). Polarizasyon eğrileri, her deney için stabil voltaj elde edildiğinde oluşturulmuştur. Eğriler şekil 3’de gösterildiği gibi, 10 Ω ila 100000 Ω dış direnç arasında elde edilen voltaj değerleri ile oluşturulmuştur. Polarizasyon eğrisi ile elde edilen maksimum güç yoğunlukları ham, AT ve ABT ile gerçekleştirilen deneylerde sırasıyla 1.894 mW/m², 10.919 mW/m² ve 8.926 mW/m² olarak elde edilmiştir. Polarizasyon eğrileri, aktivasyon polarizasyonu ve kütle aktarımı ile ilişkili genel kayıplar hakkında bilgi almak için yararlıdır. Polarizasyon eğrisi sırasında çıkarılabilir gücü sınırlayan güç aşımı olgusu ortaya çıkabilir (Koók vd., 2021). Bu durum güç yoğunluğu eğrisinin (en yüksek güçten sonra) daha yüksek akım yoğunlukları beklenirken daha düşük akım yoğunluklarına geriye katlanması olarak tanımlanır. Güç aşımının arkasındaki ana neden çoğunlukla anot yüzeyindeki yetersiz biyofilm gelişimidir, ancak elektrotun düşük kapasitansı, düşük hammadde iletkenliği, optimal olmayan organik yükleme, toksik bileşikler yada polarizasyon taraması örnekleme oranının yanlış ayarlanması gibi diğer faktörler de katkıda bulunabilir (Koók vd., 2021). Çalışmada gerçekleştirilen üç polarizasyon eğrisinde yüksek akım yoğunluklarında bu durum gözlemlenmiştir. Bu güç aşımının yetersiz elektron

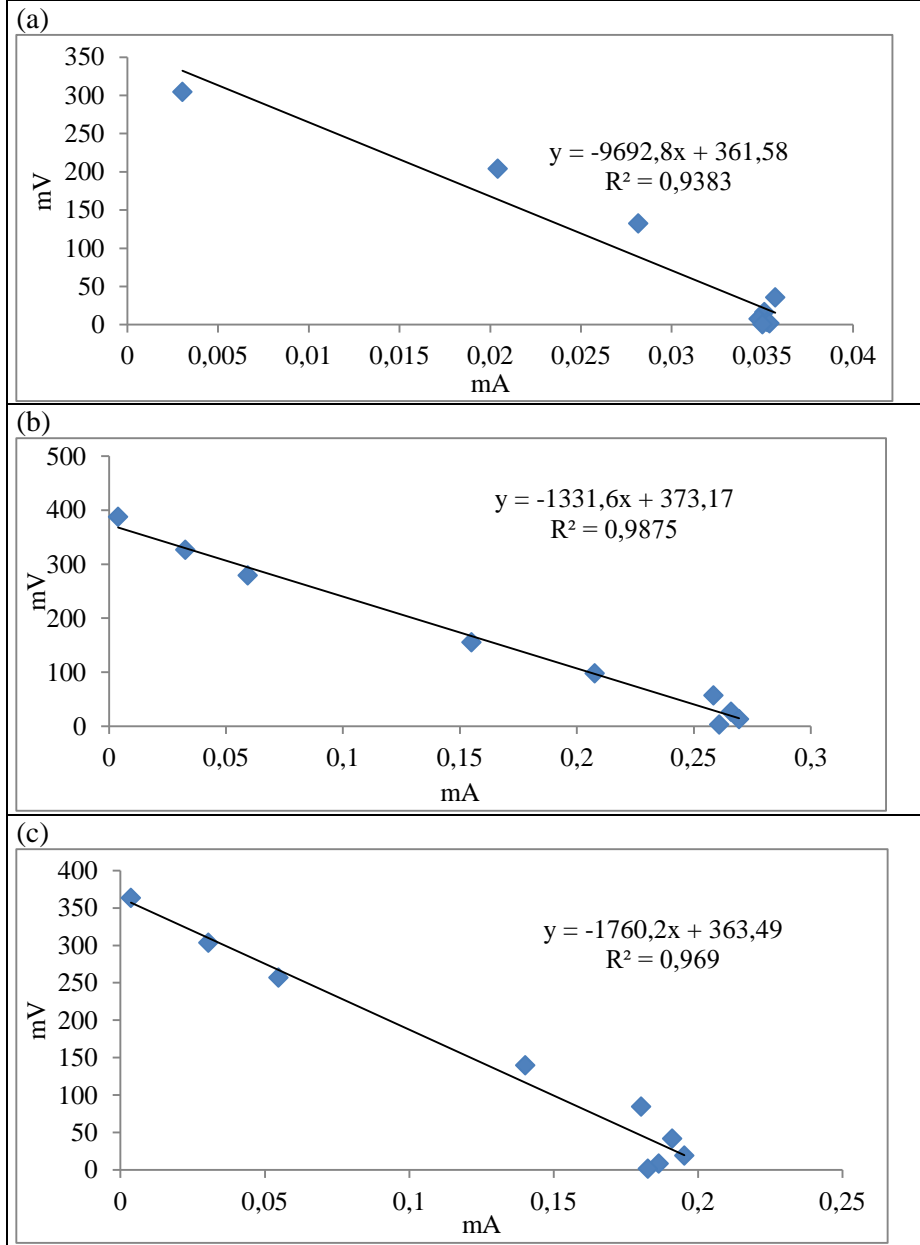
transfer mekanizmalarından kaynaklı olan anodik biyofilmin yetersiz elektroaktivitesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Yetersiz elektron transfer mekanizmaları düşük biyokütle, mikrobiyal topluluklardaki farklılıklar veya anotta farklı elektron transfer yollarının kullanılması nedeniyle oluşabilir (Zhu et al., 2012).



Şekil 3. Ham (a), AT (b) ve ABT (c) deneylerin polarizasyon eğrileri

Değişen dış dirençlerle oluşturulan ve akımın bir fonksiyonu olarak çizilen voltaj eğrilerinin eğimleri MYH'lerin iç dirençlerini temsil eder. İç dirençlerdeki değişim elektron kayıpları ile ilgilidir ve iç direncin düşük olması istenir. İç dirençteki azalma anot üzerindeki biyofilmin zenginleşmesi ve olgunlaşmasından kaynaklanan artan mikrobiyal aktivitenin bir sonucu olabilir. İç dirençteki artış ise katot üzerindeki katalizörünün azalması, proton geçirgen membrandan proton geçişi kaybı ve benzeri gibi etmenler ile MYH'nin performans düşüşünün bir sonucu olabilir (Lu et al., 2009). Aşağıdaki şekillerde MYH sistemlerinin iç direnç hesabı için oluşturulan akım/voltaj eğrileri, eğrilerin denklemleri ve regresyon katsayıları gösterilmiştir. Eğrilerin eğimleri

MYH sistemlerinin iç dirençlerini ifade etmektedir. Şekil 4'te iç eğrilerin hesaplanabilmesi için çizilen voltaj/akım grafikleri gösterilmektedir. Ham, AT ve ABT biyokütleleri ile gerçekleştirilen deneylerde iç dirençler sırasıyla 9692 Ω , 1363 Ω ve 1760 Ω olarak belirlenmiştir. Yaqoob vd. (2022) patates atık suyu ile gerçekleştirdikleri çalışmalarında maksimum 36.84 mA/m² akım yoğunluğu elde ederken sistemin iç direncini 1557 Ω olarak belirlemişlerdir (Ali vd., 2022).



Şekil 4. MYH işletmelerinin voltaj/akım grafikleri ve iç dirençleri gösteren eğimleri (Ham (a), AT (b) ve ABT (c))

Uno vd. (2017) nişasta ve laktik asit ile gerçekleştirdikleri çalışmalarında nişastayı ve laktik asiti kullanabilen özel mikroorganizmaları MYH sisteminde paralel ve ardışık şekilde çalışmışlardır. 100 mL hacimli tek odacıklı MYH sistemlerinde katotta Pt katalizörlü elektrot ile çalışmışlardır. İki farklı işletme modelleri ile maksimum güç yoğunluğu olarak 49.9 mW/m² ve 12.1 mW/m² elde etmişlerdir (Uno vd., 2017). Jenol vd. (2019) hidrolize ettikleri % 58 nişasta içeriğine sahip atık ve *Clostridium beijerinckii* saf kültürü ile MYH sistemi işletmişlerdir. Katotta Pt katalizörlü karbon kullandıkları çift odacıklı MYH ile maksimum 73.8 mW/cm² güç yoğunluğu ve %10.7 kolombik verim elde etmişlerdir (Jenol vd., 2019). Mevcut çalışma ile elde edilen güç yoğunlukları ve kolombik verimlerin literatür ile kıyaslanabilir olduğu görülmüştür. Görece daha düşük verimlerin elde edilmesinin, çalışmada karışık kültür ile aşılama gerçekleştirilmesi ve kullanılan anot hacmi (450

mL) ile elektrot alanlarının (22 cm²) daha yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yüksek hacimler ve büyük elektrot alanları MYH çalışmalarının ticarileştirilmesi için gerekli olmakta birlikte güç kayıplarının artmasına neden olmaktadır.

3.1. Kolombik Verimin Değerlendirilmesi

Kolombik verim hesaplanırken Faraday sabiti olarak 96485, Van anot hacmi olarak 0.4 L alınmıştır. Her bir set için voltaj eğrilerinin altında kalan alanlar $A \times sn$ biriminden ham, AT ve ABT işletimleri için sırasıyla 20.130, 62.212 ve 41.620 olarak hesaplanmıştır. 2600 dk sonrası ham AT ve ABT işletimleri için KOİ giderim verimleri sırasıyla 40.27, 44.44 ve 52.46 olarak bulunurken, kolombik verimler sırasıyla 1.79, 5.03 ve 1.93 olarak belirlenmiştir. Elde edilen kolombik verimlilikler organik maddeden salınan elektronların büyük bölümlerinin akım oluşumu için kullanılmadığını göstermektedir. Olası alternatif elektron kayıpları arasında metanojeniz, biyokütle oluşumu, enstrümental kayıplar ve diğer elektron alıcılarının kullanımı yer alır (Shimoyama vd., 2008). Lu vd. (2009), nişasta proses atık suyunu kullandıkları çalışmalarında kolombik verimi %8 olarak elde etmişlerdir. Düşük Kolombik verim gerçek atık su ile çalışılan MYH'lerde genel bir sorundur. Bu durumun ana nedeninin anot odasında diğer muhtemel elektron alıcılarının (sülfat ve nitrat gibi) elektronları tüketmesi olduğu düşünülmektedir. Aynı zamanda katottan anot odasına oksijen difüzyonunun etkisi substratın aerobik bozunmasına yol açarak kolombik verimin düşmesine neden olur (Lu vd., 2009). Hirose vd. (2021) *Escherichia coli* suşu ile gerçekleştirdikleri çalışmada MYH hücresinde nişasta atığının potansiyelini incelemişlerdir. Nişasta atığına 20 dk boyunca 121 °C ön işlem uygulamışlardır. Tek odacıklı olarak işlettikleri MYH hücresi ile % 3-3.5 aralığından kolombik verim elde etmişlerdir (Hirose vd., 2021). Mevcut çalışmada AT ön işlemi ile % 5.03 kolombik verim elde edilmiştir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada patates cips üretiminden oluşan nişasta atığının MYH sisteminde elektrik üretim potansiyeli değerlendirilmiştir. Atığa termokimyasal ön işlemlerin uygulanmasının elektrik üretimini ne yönde etkilediği ortaya konulmuştur. Elde edilen veriler aşağıda özetlenmiştir:

-MYH sisteminde maksimum güç yoğunlukları ham, AT ve ABT atığı için sırasıyla 1.894 mW/m², 10.919 mW/m² ve 8.926 mW/m² olarak elde edilmiştir. İç dirençler ise sırasıyla 9692 Ω, 1363 Ω ve 1760 Ω olarak belirlenmiştir.

- MYH sistemlerinde yüksek elektrik üretiminin sağlanması yanı sıra atığın biyolojik iyileştirilmesi de hedeflenmektedir. Gerçekleştirilen MYH işletimlerinde anot bölgesinde KOİ giderimi ham, AT ve ABT için sırasıyla %16.84, %44.44 ve %56.80 olarak elde edilmiştir. Ön işlem uygulanması organik madde giderimini büyük oranda artırmıştır.

- Ham AT ve ABT işletimleri için KOİ giderim verimleri sırasıyla 40.27, 44.44 ve 52.46 olarak bulunurken, kolombik verimler sırasıyla 1.79, 5.03 ve 1.93 olarak belirlenmiştir. Özellikle AT ön işleminin dirençli organik maddeyi parçalayarak substratın elektron verici olarak kullanımı kolaylaştırarak kolombik verimi arttırdığı söylenebilir.

-Bu çalışma biyolojik parçalanabilirliği yüksek olan endüstriyel atıkların biyolojik iyileştirilmesinde ve atıktan enerji eldesinde MYH'lerin bir alternatif olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Parçalanabilirliği düşük olan nişasta atıklarının MYH sistemlerinde uygun ön işlemlere tabi tutularak güç üretiminde, KOİ gideriminde ve kolombik verimde artış sağlayabileceği görülmüştür.

Yazar Katkıları

Elif Durna Pişkin: Veri toplamış ve analizini yapmıştır. Verilerin makale formatına getirilmesini sağlamıştır.

Nevim Genç: Makalenin genel prosedürünü planlamış ve tasarlamıştır. Verilerin makale formatına getirilmesini sağlamıştır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

Kaynaklar

- Ali Yaqoob, A., Al-Zaqri, N., Suriaty Yaakop, A., & Umar, K. (2022). Potato waste as an effective source of electron generation and bioremediation of pollutant through benthic microbial fuel cell. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2022.102560>
- Bozkurt, B., Günkaya, Z., Özkan, A., Günkaya Göktuğ, & Banar, M. (2022). Endüstriyel Atık Çamurlardan Elde Edilen Vitrikiye Ürünlerle İlgili Bir Değerlendirme. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 34(1), 27–37. <https://doi.org/10.7240/JEPS.918430>
- Elif Gulsen Akbay, H., Deniz, F., Ali Mazmanci, M., Deepanraj, B., & Dizge, N. (2022). Investigation of anaerobic degradability and biogas production of the starch and industrial sewage mixtures. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102054. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2022.102054>
- Gupte, A. P., Basaglia, M., Casella, S., & Favaro, L. (2022). Rice waste streams as a promising source of biofuels: feedstocks, biotechnologies and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 112673. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2022.112673>
- Hirose, N., Kazama, I., Sato, R., Tanaka, T., Aso, Y., & Ohara, H. (2021). Microbial fuel cells using α -amylase-displaying Escherichia coli with starch as fuel. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 132(5), 519–523. <https://doi.org/10.1016/J.JBIOESC.2021.07.008>
- Hoang, A. T., Nižetić, S., Ng, K. H., Papadopoulos, A. M., Le, A. T., Kumar, S., Hadiyanto, H., & Pham, V. V. (2022). Microbial fuel cells for bioelectricity production from waste as sustainable prospect of future energy sector. *Chemosphere*, 287, 132285. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.132285>
- Jenol, M. A., Ibrahim, M. F., Bahrin, E. K., Kim, S. W., & Abd-Aziz, S. (2019). Direct Bioelectricity Generation from Sago Hampas by Clostridium beijerinckii SR1 Using Microbial Fuel Cell. *Molecules*, 24(13). <https://doi.org/10.3390/MOLECULES24132397>
- Jia, Y. H., Tran, H. T., Kim, D. H., Oh, S. J., Park, D. H., Zhang, R. H., & Ahn, D. H. (2008). Simultaneous organics removal and bio-electrochemical denitrification in microbial fuel cells. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 31(4), 315–321. <https://doi.org/10.1007/S00449-007-0164-6/FIGURES/8>
- Kim, I. S., Chae, K.-J., Choi, M.-J., & Verstraete, W. (2008). Microbial Fuel Cells: Recent Advances, Bacterial Communities and Application Beyond Electricity Generation. *Environ. Eng. Res*, 13(2), 51–65.
- Koók, L., Nemestóthy, N., Bélafi-Bakó, K., & Bakonyi, P. (2021). The influential role of external electrical load in microbial fuel cells and related improvement strategies: A review. *Bioelectrochemistry*, 140, 107749. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2021.107749>
- Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., Aelterman, P., Verstraete, W., & Rabaey, K. (2006). Microbial fuel cells: Methodology and technology. *Environmental Science and Technology* 40(17), 5181–5192. <https://doi.org/10.1021/es0605016>
- Lu, N., Zhou, S. gui, Zhuang, L., Zhang, J. tao, & Ni, J. ren. (2009). Electricity generation from starch processing wastewater using microbial fuel cell technology. *Biochemical Engineering Journal*, 43(3), 246–251. <https://doi.org/10.1016/J.BEJ.2008.10.005>
- Shimoyama, T., Komukai, S., Yamazawa, A., Ueno, Y., Logan, B. E., & Watanabe, K. (2008). Electricity generation from model organic wastewater in a cassette-electrode microbial fuel cell. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 80(2), 325–330. <https://doi.org/10.1007/S00253-008-1516-0/TABLES/3>
- Uno, M., Phansroy, N., Aso, Y., & Ohara, H. (2017). Starch-fueled microbial fuel cells by two-step and parallel fermentation using Shewanella oneidensis MR-1 and Streptococcus bovis 148. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 124(2), 189–194. <https://doi.org/10.1016/J.JBIOESC.2017.03.016>
- Wilberforce, T., Abdelkareem, M. A., Elsaid, K., Olabi, A. G., & Sayed, E. T. (2022). Role of carbon-based nanomaterials in improving the performance of microbial fuel cells. *Energy*, 240, 122478. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.122478>
- Xiao, B., Han, Y., Liu, X., & Liu, J. (2014). Relationship of methane and electricity production in two-chamber microbial fuel cell using sewage sludge as substrate. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(29), 16419–16425. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2014.08.024>
- Yasri, N., Roberts, E. P. L., & Gunasekaran, S. (2019). The electrochemical perspective of bioelectrocatalytic activities in microbial electrolysis and microbial fuel cells. *Energy Reports*, 5, 1116–1136. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2019.08.007>
- Ye, F., Xiao, L., Liang, Y., Zhou, Y., & Zhao, G. (2019). Spontaneous fermentation tunes the physicochemical properties of sweet potato starch by modifying the structure of starch molecules. *Carbohydrate Polymers*, 213, 79–88. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2019.02.077>

- Zafar, H., Peleato, N., & Roberts, D. (2022). A review of the role of pre-treatment on the treatment of food waste using microbial fuel cells. *Environmental Technology Reviews*, 11(1), 72–90. <https://doi.org/10.1080/21622515.2022.2058426>
- Zhang, H., Chao, B., Gao, X., Cao, X., & Li, X. (2022). Effect of starch-derived organic acids on the removal of polycyclic aromatic hydrocarbons in an aquaculture-sediment microbial fuel cell. *Journal of Environmental Management*, 311, 114783. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2022.114783>
- Zhu, X., Tokash, J. C., Hong, Y., & Logan, B. E. (2012). Controlling the occurrence of power overshoot by adapting microbial fuel cells to high anode potentials. *Bioelectrochemistry*, 90. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2012.10.004>