



Mikrobiyal Yakıt Hücresi Teknolojisini Kullanarak Atıksu Arıtımı ve Biyoenerji Üretimi: Literatür Araştırması

Yasemin Hilal Dege¹, Ümmihan Danış²

¹ Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, Türkiye

² Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, Türkiye

E-Posta: yaseminhilaldege@gmail.com, ummihan.danis@omu.edu.tr

Gönderim 07.04.2020; Kabul 12.07.2020

Özet: Son yıllarda nüfus miktarının hızlı bir şekilde artması ve sanayinin gelişmesiyle birlikte ihtiyaç duyulan enerji ihtiyacı mevcut kısıtlı kaynaklarla yeteri kadar sağlanamamakta, enerji üretim ve tüketim arasındaki açık giderek artmaktadır. Fosil tabanlı enerji kaynaklarının gelecekte tükeneceği göz önüne alındığında oluşacak su kıtlığı ve çevre kirliliği sorunları; sürdürülebilir bir atıksu arıtımı ve enerji üretimi için çevre dostu olan yeni teknolojiler bulmayı zorunlu kılmaktadır. Son zamanlarda karşımıza çıkan mikrobiyal yakıt hücreleri (MYH), organik maddeyi mikroorganizmaların metabolik aktivitesiyle elektrik enerjisine dönüştürebilen biyoelektrokimyasal sistemlerdir. Bu sistemde aynı anda farklı atıksuların arıtımı ve elektrik üretimi yapılabilmektedir. Bu çalışmada, ilk olarak MYH teknolojisinin genel yapısından, atıksu arıtımı ve enerji üretiminde kullanılmasından bahsedilmiştir. Daha sonra MYH'lerin kullanıldığı, atıksu arıtımı ve enerji üretimiyle ilgili yapılmış çalışmalar derlenmiş ve bu teknolojinin mevcut zorluklarından, gelecek potansiyellerinden bahsedilmiştir.

Anahtar Kelimeler: yakıt hücresi, atıksu arıtımı, enerji üretimi, organik giderim

Wastewater Treatment and Bioenergy Production Using Microbial Fuel Cell Technology: Literature Research

Received 07.04.2020; Accepted 12.07.2020

Abstract: With the rapid increase in the population amount and the development of the industry in recent years, the energy requirement needed cannot be met sufficiently with the limited resources available, and the gap between energy production and consumption is gradually increasing. Considering that fossil-based energy sources will be exhausted in the future, water scarcity and environmental pollution problems; it requires finding new environmentally friendly technologies for sustainable wastewater treatment and power generation. Microbial fuel cells (MFC), which we have encountered recently, are bioelectrochemical systems that can convert organic matter into electrical energy by the metabolic activity of microorganisms. In this system, different wastewater treatment and electricity can be produced simultaneously. In this system, different wastewater treatment and electricity can be produced simultaneously. In this study, firstly, the general structure of MYH technology, its use in wastewater treatment and energy production are mentioned. Then, studies on wastewater treatment and energy production using MYHs were compiled and current difficulties and potentials of this technology were discussed.

Key Words: fuel cell, wastewater treatment, energy generation, organic removal

GİRİŞ

Enerji ihtiyacı ve iklim değişikliği sürdürülebilir kalkınmaya engel olan iki büyük zorluktur ^[1]. Nüfus miktarının hızlı bir şekilde çoğalması ve sanayinin gelişmesiyle birlikte ihtiyaç duyulan enerji, mevcut kısıtlı kaynaklarla yeteri kadar sağlanamamakta, enerji üretim ve tüketim arasındaki açık giderek artmaktadır. Dünya enerji gereksiniminin çoğunu fosil yakıtlardan karşılamaktadır ve bu sebeple fosil yakıt birikimi gün geçtikçe azalmaktadır. Ancak, bu azalmaya paralel olacak şekilde fosil yakıt rezervinde bir artış söz konusu değildir ^[2].

Ülkemizde, fosil tabanlı (doğalgaz, kömür, petrol vb.) enerji kaynakları ve yenilenebilir enerji (güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, hidrojen enerjisi, dalga enerjisi, jeotermal enerji) üretim teknolojileri bulunmaktadır ^[3,4]. Fosil yakıtların yakılması sonucunda, CO₂ (karbon dioksit), CO (karbon monoksit) ve SO₂ (kükürt dioksit) gazları ortaya çıkmaktadır. Bu gazlardan CO₂, O₂ (oksijen) kaynağımız olan ormanların zamanla azalmasıyla birlikte atmosferde giderek artmaktadır. Artan CO₂, atmosferdeki

¹İlgili E-posta/Corresponding E-mail: yaseminhilaldege@gmail.com

Bu makale Yasemin Hilal Dege tarafından yazılmakta olan yüksek lisans tezinden esinlenerek yazılmıştır.

diğer gazlarla birleşerek güneş ışınlarının yansımına engel olarak “sera etkisi” meydana getirmektedir. Bunun sonucunda ise iklim değişiklikleri meydana gelmektedir. Ortaya çıkan diğer bir gaz olan CO, vücudumuzdaki O₂ miktarını düşürerek ölümlere neden olurken, SO₂ de yine ciddi sağlık problemlerinin yaşanmasına yol açmaktadır. Fosil yakıtların giderek azalması, su kıtlığı ve çevre kirliliği sorunları dünyayı sürdürülebilir bir arıtma ve atıksu kullanımı için bir çaba sarf etmeye mecbur bırakmaktadır [5,6].

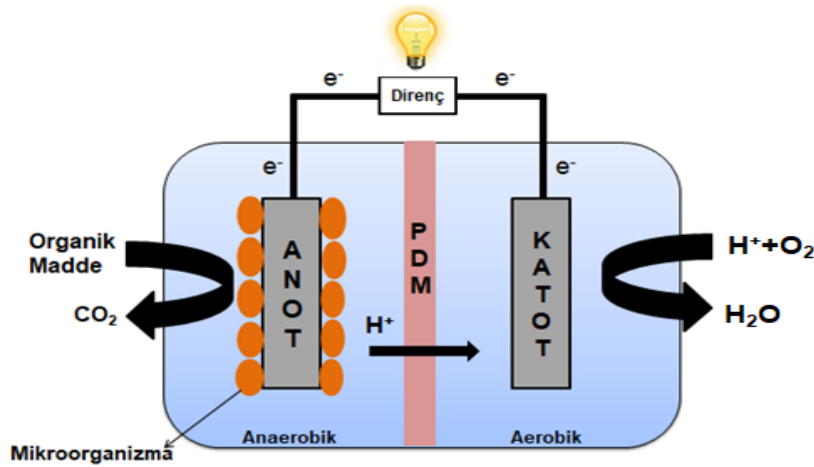
Sağlık, ulaşım, eğitim, altyapı vb. sektörlerde yaşanan ilerlemeyle birlikte hem ülkelerin gelişmişliği hem de meydana getirdikleri atıksu miktarı artmaktadır [7]. Atıksular çevre kirliliğinin başlıca nedenlerindedir ve bu bağlamda, sürdürülebilir atıksu arıtımı enerjinin azalması ve çevre kirliliğinin çoklu zorluklarını kısmen ele almayı vaat eden etkileyici bir kavramdır. Günümüzde mevcut olan atıksu arıtma sistemleri (aktif çamur, membran filtre, damlatmalı filtre, ters ozmos vb.) yüksek enerji, yatırım ve işletme maliyeti gerektirmektedir [7,8]. Aynı zamanda arıtma sonucunda CO₂, N₂O (nitroz oksit) ve diğer gazlar atmosfere yayılır ve bu aşamada fazla arıtma çamuru üretilir. Daha fazla arıtma çamurunun sistemden atılmasının gerekmesi de sistemin sürdürülebilirliğini önemli derecede düşürmektedir [6]. Sürdürülebilir bir arıtma süreci için enerjinin kontrollü kullanımı, dengeli yatırım ve ekonomik çıktı, kararlı arıtma performansı, su islahını ve yeniden kullanım gereksinimini karşılamak için yüksek atıksu kalitesi, daha az kaynak tüketimi, düşük çevresel ayak izi ve iyi sosyal eşitlik olması gerekmektedir [6,8]. Klasik biyolojik atıksu arıtma tesislerinde işletme maliyetinin %50’ si atıksuyun havalandırılması için gerekmektedir. Bu durum gösteriyor ki mevcut arıtma proseslerinde maliyeti azaltmaya dair bir optimizasyon uygulanmalı ve enerji verimi yüksek anaerobik prosesler kullanılmalıdır [9].

Son yıllarda organik maddeleri yakıt olarak kullanarak atıksu arıtımı ve enerji üretimi sağlayan mikrobiyal yakıt hücreleri (MYH) ortaya çıkmıştır [4,10]. MYH sistemleri atıksu arıtımı yapabilmeyen ve elektrik üretebilmeyen yanında düşük çevresel ayak izi ve iyi bir işletim kararlılığı sağlanmaktadır. Bu sebeplerden dolayı MYH’ ler; artan enerji ihtiyacını karşılamak için özellikle aynı anda hem atıksu arıtımı hem de elektrik enerjisi üretimi yapabilen, atık maddeleri üretim yaparken kullanmasıyla atıksu arıtma tesislerinin işletme maliyetlerini düşürecek ve gelecek vaat eden sürdürülebilir bir teknoloji olarak görülmektedir [11]. MYH teknolojisinin yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak görülmesinin sebeplerinden biri de organik maddelerin oksidasyonu neticesinde atmosfere sadece kararlı olan karbonu salmaları yani kısaca karbon nötr olmalarıdır [4,10].

MİKROBİYAL YAKIT HÜCRELERİ

MYH’ lerin Çalışma Prensibi

Mikrobiyal yakıt hücreleri (MYH) genellikle proton değişim membranı (PDM) ile ayrılan anot ve katot bölmelerinden meydana gelmektedir (Şekil 1) [12].



Şekil 1. MYH’ lerin çalışma prensibi

Anot bölgesinde bulunan mikroorganizmalar organik maddeleri oksitleyerek; elektron, proton (H^+), CO_2 ve biyokütle üretirler ^[13-15]. Üretilen elektronlar bir devre ile katot bölgesine aktarılırken, H^+ ise PDM' den (proton değişim membranı) geçerek katot bölgesine ulaşır ve burada O_2 ^[16-19], $(K_3[Fe(CN)_6])$ (potasyum ferrisiyanür) ^[20-22], $S_2O_8^{2-}$ (persülfat), MnO_4^- (permanganaz), MnO_2 (manganez dioksit) ^[23] gibi farklı elektron alıcıları da olabilir ile birleşerek H_2O ' ya (suya) dönüşür^[24]. O_2 ' nin varlığı ve pozitif elektrik yükü oluşturan H^+ lar sayesinde, anottaki elektronlar katoda doğru çekilir böylece hat üzerinde elektrik akımı meydana gelir. Elektrik akımını elde edebilmek için anot bölgesinin tamamen anaerobik, katot bölgesinin ise aerobik olması gerekmektedir ^[2,25-26].

MYH' lerin Elektron Transfer Mekanizmaları

MYH' lerde elektron taşınımı; doğrudan elektron taşınımı ve medyatörler aracılığıyla elektron taşınımı şeklinde gerçekleşmektedir. Doğrudan elektron transferi mikroorganizmaların fiziksel temas aracılığıyla anot elektrot yüzeyi ile yaptıkları taşınımır. Bu taşınım hücre membranlarıyla taşınım veya pili aracılığıyla şeklinde gerçekleşmektedir ^[27-30]

Hücre membranı ile taşınım; MYH' lerde hücre membranları ile doğrudan elektron transferi anodofiller olarak bilinen, *Shewanella* ^[2,31], *Geobacteraceae*, *Geobacter* ^[32,33], *Rhodoferrax*, *G. sulfurreducens* ve *R. ferrireducens* ^[34] bakterileri kullanılır ve bu bakteriler anot elektrot yüzeyi üzerinde biyofilm oluşturarak elektronları anota direkt olarak aktarırlar ^[30,31].

Pili ile taşınım; MYH' lerde pili ile taşınım nanowirelar (elektrokimyasal olarak aktif olduğu kanıtlanan spesifik pili) ile gerçekleşmektedir ^[35-37]. Yapılan bazı araştırmalarda *Geobacter* ve *Shewanella* türlerinin bakteriyel pili denilen iletken uzantılara sahip oldukları bildirilmiştir ^[35]. Pili aracılığıyla elektronunu ileten bakteriler, elektrot yüzey alanı aynı olan hücre membranlarıyla elektronunu ileten bakterilere göre daha kalın biyofilm tabakası oluşturur. Dolayısıyla, pili ile elektronunu ileten bakterilerin ürettikleri elektrik enerjisi hücre membranları aracılığıyla elektronlarını ileten bakterilerden daha fazla olmaktadır ^[31].

Medyatörler aracılığıyla taşınım; MYH' lerde kullanılan mikrobiyal türlerin birçoğunun (örneğin; *Escherichia Coli*, *Pseudomonas*, *Proteus* ve *Bacillus*) dış yüzeyi iletken olmayan bir tabakaya sahip olduğu için elektronlarını anot elektrotta doğrudan aktaramamaktadır. Bu yüzden, elektronlarını anot elektrotta vermek için hücre içine kolaylıkla girip elektron taşıyıcılardan elektronları alan kimyasal (nötral kırmızı ^[31,34], metilen mavisi, tiyonin ^[38,39], sülfat, sülfid vb.) ve biyolojik (piyosiyanın, rifoblavin vb.) medyatörlere ihtiyaç duymaktadırlar ^[2,30,31]. Hücre içine girip elektronları alarak indirgenen medyatörler daha sonra aldıkları elektronları anot elektrotta aktarmakta ve tekrar oksitlenmiş duruma geçerek anot sıvısının içinde dağılmaktadır. Yapılan bu döngü elektron transfer hızını artırırken aynı zamanda elektrik üretiminde artmasını sağlamış olmaktadır ^[40].

MYH' lerin Temel Bileşenleri

Anot elektrot; anot malzemesi ve bu malzemenin yapısı biyofilm oluşumunu, substrat oksidasyonunu ve elektron transferini etkilediğinden, anot bölgesi MYH performansı açısından önemli bir faktördür ^[38,41,42]. Yüksek iletkenlik, yüksek yüzey alanına sahip olmaları, mikrobiyal gelişim için uygun olmaları, nispeten düşük maliyetli olmaları ve üretimleri kolay olması nedeniyle MYH' lerde çoğunlukla karbon malzemeler (karbon bez, karbon kağıt, karbon kumaş vb.) anot malzemesi olarak kullanılmaktadır ^[42-45]. Katot malzemelerin yanı sıra grafit malzemelerde (grafit çubuk, grafit keçe, grafit plaka, grafit granül, grafit fırça) olarak yaygın olarak kullanılan anot malzemelerindedir ^[37,42,46-48]. Kullanılacak anot malzemelerinde dikkat edilmesi gerekenler; tercihen yüksek iletkenliğe sahip olması, uygun mekanik mukavemeteye sahip olması, biyo-uyumlu olması, reaktör çözeltisinde kimyasal stabiliteye sahip olması, toksik ve aşındırıcı olmaması, korozif olmaması, yüksek yüzey alanına sahip olması, ve ucuz ve kolaylıkla temin edilebilir olmasıdır ^[9,30,31,36,46,49,50].

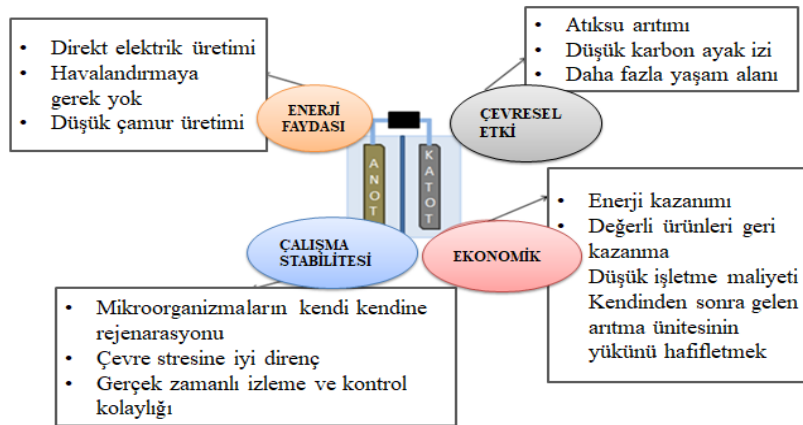
Katot elektrot; katot malzemeleri de anot malzemeleri gibi güç üretimini sınırlayan faktörlerdendir. Çünkü; katodik elektrotun yüzey pürüzlülüğü, biyofilmin yapısal heterojenliğini etkileyebilir bu da biyofilm aktivitelerini ve kütle transferini dolayısıyla açık devre potansiyelini (ADV) etkilemektedir ^[35]. Anot elektrot olarak kullanılan malzemeler katot malzemeleri olarak kullanılmaktadır. Fakat; çoğunlukla grafit bazlı malzemeler kullanılmaktadır ^[13,51]. Karbon bazlı malzemeler O_2 indirgenme reaksiyonuna karşı zayıf katolitik aktiviteye sahip olduğu için, elektron

alıcısı olarak O₂' nin kullanıldığı MYH sistemlerinde ilave bir katalizöre (Pt gibi) ihtiyaç duyulmaktadır [2,35,49,52]. Freguia ve diğ. (2007), yaptıkları çalışmada iki bölmeli bir MYH' de anot ve katot elektrot olarak granüler grafit kullanarak performansını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda çeşitli formlarda katalizli grafit kullanılarak yapılan birçok başka çalışmada elde edilen değerlerden daha yüksek değerlere (21 W/m³ (katot toplam hacmi), 50 W/m³ (katot sıvı hacmi) ulaşmışlar ve MYH üzerine yapılan araştırmaların sadece katalizörlere değil, aynı zamanda yüksek yüzey alanlı malzemelere de odaklanması gerektiğini bildirmişlerdir [53].

Membran; iki bölmeli MYH' lerde anot ve katot bölmelerini birbirinden ayıran bir malzemedir. Anotta oluşan protonların (H⁺) katot bölgesini transfer edilmesini sağlar. Aynı zamanda katot bölgesinden anot bölgesini oksijen difüzyonunu ve katot çözeltisinde yer alan diğer katyonlarında anot bölgesine geçişini de engeller [9,46,52]. MYH' lerde çoğunlukla membran olarak bir PDM olan Nafion-117 kullanılmaktadır [54]. Diğer membran tipleri ile karşılaştırıldığında Nafion oldukça yüksek mekanik dayanıklılığa sahiptir. MYH sistemlerinde ki mükemmel performanslarını rağmen bazı dezavantajları da vardır. Akım ve güç yoğunluklarını arttırmak için membran iç direncinin mümkün olduğu kadar düşük olmalıdır. Nafion membranda en düşük iç dirence sahip membrandır [55]. Negatif yüklü sülfonat gruplarının varlığından dolayı proton kadar diğer katyonlarında (Na⁺ (sodyum), K⁺ (potasyum), Mg²⁺ (magnezyum), NH₄⁺ (amonyum)) anot bölgesinden katot bölgesine transfer etmektedir [56-59]. MYH' lerde kullanılan diğer membranlar ise anyon değişim membranları (ADM), bipolar membranlar (BPM) ve mikrofiltrasyon membranlardır [56,58]. Membran seçiminde; düşük direnç kaybı, yüksek proton iletkenliği, yüksek proton iletkenliği, mekanik dayanıklılık ve kararlılık, oksijen difüzyonu, biyolojik kirlenmeye dayanıklılık, maliyetinin uygun olması vb. konulara dikkat edilmelidir [48,60].

Atıksu Arıtımı ve Biyoenerji Üretimi İçin MYH' ler

MYH teknolojilerinin geleneksel arıtma biçimleri kullanılmadan atıksu arıtımında yüksek potansiyel elde etmesi dünyanın her tarafında çok sayıda mühendis ve bilim insanının ilgisini çekmiş ve bu konuda çalışma yapmalarını sağlamıştır. MYH' lerde atıksular mikroorganizmaların gelişmesi için substrat olarak kullanılmaktadır. Bunlar; karbon kaynağı ile zenginleştirilmiş, nitrojen kaynağı ile zenginleştirilmiş, organik asitli atıksular gibi basit yapıli atıksular ve gıda ve gıda işleme, eczacılık, rafineri ve damıtma, hayvan çiftliklerinden kaynaklı, kağıt endüstrisi, petrokimya, boya endüstrisi, tekstil endüstrisi atıksuları gibi karmaşık yapıli atıksulardır [7,60]. Atıksuları substrat olarak kullanarak elektrik üretimi ve aynı anda atıksuyun içerisindeki kirleticilerin giderilmesini sağlayabilen MYH sistemleri sürdürülebilirlik açısından oldukça önem taşımaktadır (Şekil 2) [6].



Şekil 2. MYH' lerin enerji, çevresel ve ekonomik olarak sağladığı faydalar [6]

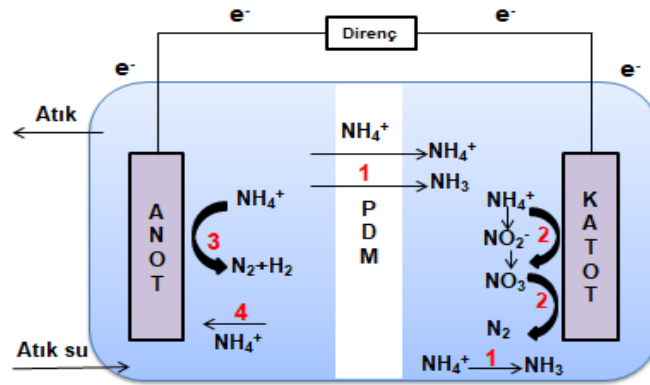
MYH ile yapılan çalışmalarda sıcaklık çoğunlukla 30-37°C tutulmaktadır. Ancak; daha düşük sıcaklık değerlerinin kullanılması (20-25°C) atıksu arıtımı yapacak MYH' lerde işletmeden kaynaklanan maliyeti azaltmaya yardımcı olmaktadır [61].

Sahu (2010), süt endüstrisi atıksuyunu sürdürülebilir ve temiz bir şekilde arıtılabilmesini incelemek için iki bölmeli MYH kullanmıştır. Araştırmacı yaptığı hesaplama ve ölçümler sonucunda (20,5°C sıcaklıkta ve 6,9 pH' ta); maksimum 1,42 V ADV (23,66 mA akımda ve 5,1 mW/m² güç

yoğunluğunda), %51 KOİ (kimyasal oksijen ihtiyacı) giderimi, %42 BOİ (biyolojik oksijen ihtiyacı) giderimi ve 20 ml metan gazı elde etmiştir [62]. Araştırmacının elde ettiği sonuçlara bakıldığında, aynı anda hem endüstriyel atıksuları arıtmak hem de temiz enerji üretmenin mümkün olabileceği görülmektedir.

Daha önceden yapılmış bazı çalışmalarda araştırmacılar tek bölmeli MYH' de iki bölmeliye göre daha yüksek güç yoğunluğu elde etmişlerdir. Örneğin; Min ve diğ. (2005) yaptıkları çalışmada tek bölmeli (membransız ve karbon kumaş elektrot kullanılan) ve iki bölmeli (PDM ve karbon kumaş elektrot kullanılan) olmak üzere iki adet MYH kullanılarak domuz çiftliği atıksuyundan elektrik üretimi incelemişlerdir. Yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda iki bölmeli MYH' de maksimum 45 mW/m² güç yoğunluğu, tek bölmeli MYH' de ise maksimum 261 mW/m² güç yoğunluğu elde etmişlerdir. İki bölmeliye oranla tek bölmeli MYH' de neredeyse 6 kat daha yüksek güç yoğunluğu elde ettikleri görülmektedir. Ayrıca; tek bölmeli MYH' de %86±6 KOİ giderimi, %83±4 NH₄⁺-N (amonyum azotu) giderimi ve %8 kolombik verim elde etmişlerdir [63]. Bu sonuçlardan da anlaşıldığı üzere, MYH' ler aynı anda hem domuz atıksularını arıtmak hem de elektrik üretmek için kullanılabilir.

MYH' lerde atıksudan azot giderimi: Azot atıksularda amonyum, amonyak, nitrat ve nitrit gibi çeşitli formlarda bulunmaktadır [65]. Genellikle azot atıksuda amonyum (NH₄⁺) formunda bulunmaktadır ve NH₄⁺' nın atıksudan giderilmesi nitrifikasyon-denitrifikasyon yoluyla gerçekleştirilmektedir [1,61,64,65]. MYH' lerde atıksudan azot giderimi 4 aşamada gerçekleşmektedir (Şekil 3).



Şekil 3. MYH' lerde azot giderim aşamaları [60]

1. Aşama: İlk olarak MYH reaktörünün anot bölgesine verilen atıksuda bulunan NH₄⁺ iyonu iki bölme arasında yer alan PDM' den katot bölgesine ya pasif halde NH₃ (amonyak) formunda ya da aktif halde NH₄⁺ formunda geçmektedir. pH' ın yükselmesi, NH₄⁺' nın katolitin içinde yer alan NH₃' e kimyasal olarak dönüşmesini ve NH₃' ün MYH sisteminden atılmasını sağlamaktadır [1,64]

2. Aşama: Katot bölgesinde mikrobiyal nitrifikasyon-denitrifikasyon işlemleri; NH₄⁺' nın nitrit (NO₂⁻) ve nitrate (NO₃⁻) dönüşümü (nitrifikasyon) ve NO₃⁻' ün azot gazına (N₂) dönüşümü (denitrifikasyon) şeklinde gerçekleşmektedir [64].

3. Aşama: Anot bölgesinde yer alan mikroorganizmalar vasıtasıyla NH₄⁺, N₂ gazına dönüştürülmektedir [1,65]

4. Aşama: Bu aşamada ise, anot bölgesinde mikroorganizmaların gelişimini sağlamak amacıyla NH₄⁺ biyokütleyle eklenmektedir [1].

Mansoorian ve diğ. (2016), iki bölmeli, anot ve katot elektrot olarak grafit plaka kullanılmış, nafion membranlı ve katalizörsüz bir MYH' de süt endüstrisi atıksuyunun arıtılması üzerine çalışmışlardır. Kullandıkları atıksu 167 mg/L NH₃, 174 mg/L NH₄⁺ içermektedir. Araştırmacılar çalışmaları sonucunda; atıksudan %69,43 NH₄⁺ giderimi, %73,22 NH₃ giderimi, %90,46 KOİ giderimi, %81,72 BOİ giderimi sağlamışlar ve aynı zamanda maksimum 621,13 mW/m² güç yoğunluğu elde etmişlerdir [66].

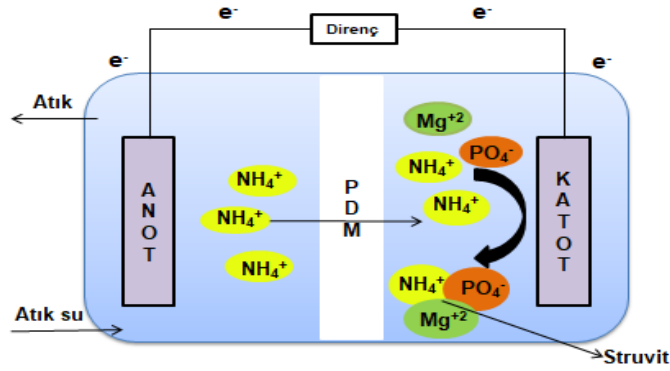
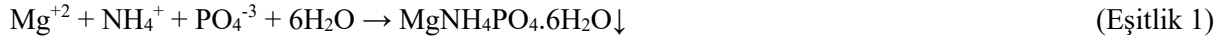
Oon ve diğ. (2015), yapmış oldukları çalışmada bir sulak alan MYH' de eldiven fabrikasından elde edilen atıksudan %40 NO₃⁻ giderimi, %91 NH₄⁺ giderimi ve %100 KOİ giderimi sağlamışlardır. Bununla birlikte aynı zamanda 6,12 mW/m² güç yoğunluğu elde etmişlerdir [67].

Hassan ve diğ., (2018) substrat olarak sızıntı suyu kullandıkları iki bölmeli MYH' de %50,9 toplam azot giderimi, %59,1±0,2 NH₄⁺-N giderimi, %90±1,2 KOİ giderimi, %51,5-70 KV (kolombik verim) ve maksimum 98,6 mW/m² güç yoğunluğu elde etmişlerdir [68].

Zhuang ve diğ. (2012), yaptıkları çalışmada yığılmış MYH' de (40 adet-tek bölmeli seri bağlı) bira fabrikası atıksuyu kullanarak enerji üretimini araştırmışlar ve yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda; %85,5 NH₄⁺-N giderimi, %87,1 KOİ giderimi, %7,6 KV, 3,25 V ADV ve maksimum 97,2 mW/m² güç yoğunluğu sağlamışlardır [69].

Wang ve diğ., (2019) yaptıkları çalışmada, iki bölmeli bir MYH' de substrat olarak biyogaz tesisinden elde edilen atıksu kullanmışlar ve yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda; 296 mW/m² güç yoğunluğu, %72 KOİ giderimi ve %43,9 NH₄⁺-N giderimi elde etmişlerdir [70].

MYH' lerde atıksudan fosfor giderimi: atıksuda yer alan fosfatın (PO₄⁻³) giderimi çoğunlukla yavaş salınımlı gübre olarak veya fosfat bazlı çökelti diye bilinen struvit (MgNH₄PO₄.6H₂O) şeklinde gerçekleştirilmektedir (Şekil 4). Bu yöntemle PO₄⁻³, NH₄⁺ ve Mg⁺² aynı anda geri kazanılabilmektedir (Eşitlik 1) [71].

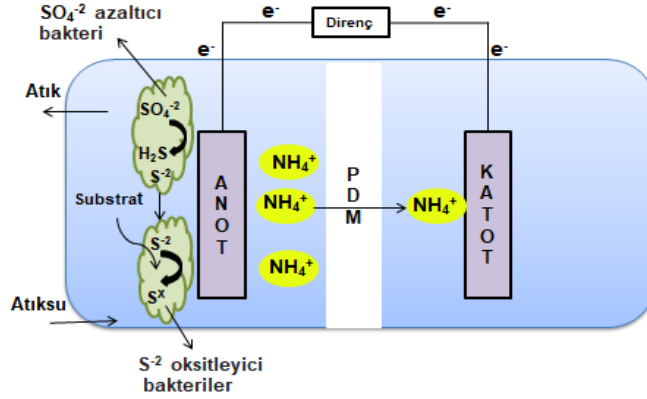


Şekil 4. MYH' lerde fosfor giderimi [60]

Zang ve diğ. (2012), struvit şeklinde çökeltme tekniğini kullanarak idrardan fosfat geri kazanımını ve enerji üretimini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmalar sonucunda %94,6 PO₄⁻³-P geri kazanımı, %28,6 NH₄⁺-N geri kazanımı, %64,9 KOİ giderimi ve 2,6 mW/m³ güç yoğunluğu elde etmişlerdir [72].

MYH' lerde atıksudan sülfat giderimi: MYH' lerde bir redoks ortamının varlığı, atıksudan SO₄⁻² gideriminin tüm aşamaları anot bölgesinde toplanabilmesini sağlamaktadır. Atıksudan SO₄⁻² gideriminde gerçekleşecek reaksiyonlar MYH reaktöründe karışık bir mikrobiyal topluluk tarafından hızlandırılmaktadır. Bu sebeple, anot bölgesine SO₄⁻² azaltıcı ve S⁻² oksitleyici bakteriler aşılmalıdır. Böylece; sisteme aşılana SO₄⁻² indirgeyen bakteriler tarafından SO₄⁻² H₂S' ye indirgenir, S⁻² (sülfür) ise S⁻² oksitleyici bakteriler tarafından S^x e dönüşür ve S⁻²' nin anot bölgesinde çökmesi sağlanır (Şekil 5). Eşitlik 2 ve 3' te atıksudan sülfür giderim aşamaları verilmiştir [1,60]:





Şekil 5. MYH'lerde atıksudan sülfat giderimi ^[60]

Firdous ve diğ. (2008), iki bölmeli, anot-katot elektrot olarak sırasıyla titanyum çubuk-karbon kumaş kullanılmış MYH' de çalışma yapmışlardır. Substrat olarak bitkisel yağ endüstrisi atıksuyu kullanan araştırmacılar yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda; %67,3 SO_4^{2-} giderimi, %73,6 PO_4^{3-} giderimi, %60-90 KOİ giderimi ve 6119 mW/m^2 güç yoğunluğu sağlamışlardır ^[73].

Fazlı ve diğ. (2018), yaptıkları çalışmada petrokimya endüstrisi kostik atıksuyu kullandıkları iki bölmeli bir MYH' de $82,1 \text{ mV}$ voltaj, %98 KOİ giderimi ve %98,98 SO_3^{2-} (sülfite) giderimi elde etmişlerdir ^[74].

Liu ve diğ. (2012), tek bölmeli hava katot MYH' de ilaç endüstrisi atıksuyu kullanmışlar ve çalışmaları sonucunda; %26,46 SO_4^{2-} giderimi, %82 KOİ giderimi, %62,4 TN (toplam azot) giderimi, %30 KV ve maksimum $22,3 \text{ mW/m}^3$ güç yoğunluğu elde etmişlerdir ^[75].

Abbasi ve diğ. (2016), iki bölmeli MYH' de cam endüstrisi atıksuyu ve nişasta işleme atıksuyu kullanarak deneysel çalışmalar yapmışlardır. Araştırmacılar cam endüstrisi atıksuyu kullanarak yaptıkları çalışmalar sonucunda %31 SO_4^{2-} giderimi, %54 PO_4^{3-} giderimi, %76 KOİ giderimi ve 554 mV voltaj üretimi; nişasta işleme atıksuyu kullandıkları çalışmalar sonucunda %90,6 NH_4^+ -N giderimi, %98 KOİ giderimi, %8 KV, $893,3 \text{ mA/m}^2$ akım yoğunluğu ve $239,4 \text{ mW/m}^2$ güç yoğunluğu elde etmişlerdir ^[76].

Tablo 1' de substrat olarak farklı tip atıksuların kullanıldığı MYH performansları verilmiştir

Tablo 1. Farklı tip atıksuların kullanıldığı MYH performansları

Atıksu	MYH Tipi	Anot-Katot Elektrot	Elde Edilen Veriler (maksimum)	Kaynak
Kağıt Geri Dönüşüm Atıksuyu ($22-26^\circ\text{C}$)	Tek Bölmeli	Grafit Fiber Fırça Karbon Kumaş	506 mW/m^2 Güç Yoğunluğu %76±6 KOİ Giderimi %29±1 Selüloz Giderimi %53±3 KV	[77]
Bira Fabrikası Atıksuyu	Tek Bölmeli	Grafit Çubuk Karbon Fiber Örtü	$9,52 \text{ mW/m}^3$ Güç Yoğunluğu %43 KOİ Giderimi %19,7 KV	[78]
Tekstil Endüstrisi Atıksuyu	Tek Bölmeli	Grafit Çubuk	8100 mW/m^3 Güç Yoğunluğu %56 KOİ Giderimi %75 Renk Giderimi	[79]
Domuz Çiftliği Atıksuyu	İki Bölmeli	Karbon Keçe Karbon Kumaş	$1,7 \text{ mW/m}^2$ Güç Yoğunluğu %91 KOİ Giderimi %79-82 Fosfor Giderimi	[80]
Kentsel Atıksu	İki Bölmeli	Grafit Pulları	24 mW/m^2 Güç Yoğunluğu %0,25 KOİ Giderimi	[81]
Evsel Atıksu	Yığılımı MYH (40- Hava Katot)	Karbon Keçe	325 mW/m^2 Güç Yoğunluğu %84 KOİ Giderimi %80 NH_4^+ -N Giderimi	[82]

Endüstriyel Atıksu (Glikoz ve Amonyum Klorür İçeren)	İki Bölmeli	Karbon Plaka	84,28 mW/m ² Güç Yoğunluğu 558,7 mV Voltaj Üretimi 808 mA/m ² Akım Yoğunluğu %78 KOİ Giderimi %22,3 KV	[83]
Evsel Atıksu	İki Bölmeli	Karbon Parça Karbon Fırça	62,93 mW/m ² Güç Yoğunluğu %81,9 KOİ Giderimi %95,5 TN Giderimi %96,5 TP Giderimi %12,44 Kv 6,26 mg/L.d Lipit Giderimi	[84]
Peynir Altı Suyu	İki Bölmeli (Kübik)	Karbon Kağıdı	288,12 mW/m ² Güç Yoğunluğu %95 KOİ Giderimi %26 Kolombik Verim	[85]
Süt Endüstrisi Atıksuyu	İki Bölmeli	Granüler Grafit	26,5 mW/m ² Güç Yoğunluğu %82 KOİ Giderimi %24 Kv	[86]
Şarap Endüstrisi Atıksuyu	Tek Bölmeli Hava Katot	Grafit Elyaf Karbon Kumaş	262,9 mW/m ² Güç Yoğunluğu 819,4 mA/m ² Akım Yoğunluğu %90 KOİ Giderimi %95 BOİ Giderimi %15 KV	[87]
Pirinç Fabrikası Atıksuyu (Aşılama Ultra-sonik İşlem Görmüş)	İki Bölmeli	Paslanmaz Çelik Grafit Levha	427,81 mW/m ³ Güç Yoğunluğu 0,701 V ADV %76,18±2,36 KOİ Giderimi %78,5±4,62 C ₆ H ₅ OH Giderimi %58,87±4,1 TÇKM Giderimi %14,14 KV	[88]

SONUÇLAR

MYH sistemleri gelişmekte olan bir teknolojidir. MYH'lerin öngörülen avantajlarının uygulamada sağlanıp sağlanamayacağını öğrenmek için bu teknolojilerin zorluklarını ve uygulanabilirliğini yerinde incelemek ve gelecekteki sürdürülebilir atıksu arıtımı için yeniden ne şekilde uyarlanarak tasarlanacağını belirlemek gerekmektedir. Bu zamana kadar MYH'lerin geliştirilmesi için farklı substrat ve mikrobiyal türler kullanılmıştır. Fakat, yapılan araştırmalar küçük boyutlu olarak kalmıştır ve günümüzde MYH sistemleri pazarlama için hala hazır değildir. MYH'ler ile önceden yapılan çalışmalara bakıldığında KOİ gideriminin geniş bir aralıkta (%0,25-%98) olduğu görülmektedir. Bir diğer sorun olan güç yoğunluğunun da yine geniş bir aralıkta (9,52-8100 mW/m³; 1,7-6119 mW/m³) olduğu görülmektedir. Ayrıca, birçok çalışmada oldukça küçük reaktör kullanılmaktadır ve genellikle yüksek KOİ giderimi ve güç yoğunluğu bu küçük reaktörler kullanılarak yapılan çalışmalarda elde edilmektedir. Buradanda anlaşıldığı üzere MYH'ler ile atıksu arıtımında elde edilen KOİ giderimi ve güç yoğunluğu hala istenilen potansiyele sahip değildir.

Son zamanlarda MYH teknolojisini fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçlerle entegre ederek (birleştirerek) bu problemlerin üstesinden gelmek hedeflenmektedir. MYH'ler enerji ve kaynak kullanım verimliliğini artırmak için mevcut atıksu arıtma ve yönetim sistemlerine küçük evsel atıksu arıtma sistemlerinden daha geniş kapasiteli sistemlere, yerel ölçekteki septik tanklara ve endüstriyel sektörlerdeki sistemlere entegre edilebilmektedir. Böylelikle; membran alt tabanlı elektrodializ, ozmoz ve filtrasyon gibi sistemlerle MYH entegrasyonu ile ozmotik MYH, tuzdan arındırma MYH ve filtrasyon-MYH gibi yeni arıtma sistemleri oluşmaktadır. Ancak, unutulmamalıdır ki her sistemde olduğu gibi entegre sistemlerle birlikte dikkate alınması gereken işletme ve bakım sorunları meydana gelecektir.

MYH teknolojilerinden istenilen potansiyeli elde edebilmek için anot-katot elektrot malzemeleri, membran malzemeleri, yatırım maliyetleri, hava katot performanslarının düşük olması, reaktörlerin

ölçeklendirilmesi, elde edilen düşük güç yoğunlukları, KOİ giderim verimlerinin düşük olması, aktivasyon kayıpları, ohmik kayıpları, kütle transfer kayıpları vb. konular üzerinde durulmalıdır. Ancak bu konular geliştirildiğinde MYH'lerden istenilen potansiyel elde edilebilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Kumar, S. S., Kumar, V., Malyan, S. K., Sharma, J., Mathimanic, T., Maskarenjd, M. S., Ghoshd, P. C., Pugazhendhi, A., 2019, Microbial Fuel Cells (Mfcs) For Bioelectrochemical Treatment of Different Wastewater Streams, Fuel, Vol. 254,115526.
- [2] Özpek, Ö., 2012, Atıksu Kullanılarak Mikrobiyal Yakıt Hücresi İle Elektrik Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [3] Karçiçeği, D., 2010, PEM Yakıt Hücresi Anodunda Kullanılmak Üzere Platinin İkili Alaşımlarının Sentezi, Karakterizasyonu ve CO Kirliliğinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Yezı, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [4] Demir, Ö., Gümüş E., 2016, Mikrobiyal Yakıt Hücreleri İle Çamur Arıtımı ve Elektrik Üretimi, Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 81-89.
- [5] Çatal, T., Bermek, H., Liu, H., 2009, Removal of Selenite From Wastewater Using Microbial Fuel Cells, Biotechnol Lett, Vol. 31, 1211-1216.
- [6] Li, W. W., Yu, H. Q., He, Z., 2014, Towards Sustainable Wastewater Treatment Byusing Microbial Fuel Cells-Centered Technologies, Energy & Environmental Science, Vol. 7, 911-924.
- [7] Singh, H. M., Pathak, A. K., Chopra, K., Tyagi, V. V., Anand, S., Kothari, R., 2018, Microbial Fuel Cells: a Sustainable Solution For Bioelectricity Generation and Wastewater Treatment, Biofuels, 1759-7277.
- [8] Gude, V. G., 2016, Wastewater Treatment in Microbial Fuel Cells an Overview, Journal of Cleaner Production, Vol. 122, 287-307.
- [9] Akoğlu, B., 2011, Mikrobiyal Yakıt Hücresi Teknolojisi İle Doğrudan Elektrik Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [10] Çetinkaya, A. Y., 2013, Mikrobiyal Yakıt Hücresi Teknolojisi İle Sızıntı Suyundan Elektrik Enerjisi Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [11] Farber, P., Gräbel, J., Kroppen, N., Pötschke, L., Roos, D., Rosenbaum, M., Stegschuster, G., Ueberholz, P., 2019, Electricity Generation in a Microbial Fuel Cell With Textile Carbon Fibre Anodes, Computers and Mathematics With Applications, 1-20.
- [12] Ghangrekar, M. M., Shinde, V. B., 2007, Performance of Membrane-Less Microbial Fuel Cell Treating Wastewater and Effect of Electrode Distance and Area On Electricity Production. Bioresource Technology, Vol. 98, 2879-2885.
- [13] Pant, D., Bogaert, G. B., Diels, L., Vanbroekhoven, K., 2009, A Review Of The Substrates Used in Microbial Fuel Cells (Mfcs) For Sustainable Energy Production, Bioresource Technology, Vol. 101, 1533-1543.
- [14] 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, Vol. 55, 7710-7716.
- [15] Dhungana, P., 2017, Modified Gold Electrode And Hollow Mn3O4 Nanoparticles As Electrode Materials For Microbial Fuel Cell Applications, Yüksek Lisans Tezi, University of South Dakota Department of Chemistry, Nepal.
- [16] Jia, J., Tang, Y., Liu, B., Wu, L., Ren, N., Xing, D., 2013, Electricity Generation From Food Wastes and Microbial Community Structure in Microbial Fuel Cells, Bioresource Technology, Vol. 144, 1-94.
- [17] Jadhav, D. A., Ghadge, A. N., Mondal, D., Ghangrekar, M. M., 2014, Comparison of Oxygen and Hypochlorite as Cathodic Electron Acceptor in Microbial Fuel Cells, Bioresource Technology, Vol. 154, 330-335.
- [18] Mohamed, H. O., Obaid, M., Khalil, K. A., Barakat, N. A. M., 2016, Power Generation From Unconditioned Industrial Wastewaters Using Commercial Membranes-Based Microbial Fuel Cells, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 41, 4251-4263.

- [19] Xu, G., Zheng, X., Lu, Y., Liu, G., Luo, H., Li, X., Zhang, R., Jin, S., 2019, Development of Microbial Community Within The Cathodic Biofilm of Single-Chamber Air-Cathode Microbial Fuel Cell, *Science of the Total Environment*, Vol. 665, 641-648.
- [20] You, S., Zhao, Q., Zhang, J., Jiang, J., Zhao, S., 2006, A Microbial Fuel Cell Using Permanganate As The Cathodic Electron Acceptor, *Journal of Power Sources*, Vol. 162, 1409-1415.
- [21] Flimban, S. G. A., Hassan, S. H. A., Rahman, M. M., Oh, S., 2018, The Effect of Nafion Membrane Fouling On The Power Generation of a Microbial Fuel Cell, *Science Direct*, 1-9.
- [22] Xia, T., Zhang, X., Wang, Y., Gao, Y. Bian, C., Wang, X., Xu, P., 2019, Power Generation and Microbial Community Analysis in Microbial Fuel Cells: A Promising System to Treat Organic Acid Fermentation Wastewater, *Bioresource Technology*, Vol. 284, 72-79.
- [23] Asefi, B., Li, S. Y., Henry, A. M., Sanchez-Torres, V., Hu, A., Li, J., Yu, C. P. 2019, Characterization Of Electricity Production and Microbial Community of Food Waste-Fed Microbial Fuel Cells, *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 125, 83-91.
- [24] He, C. S., Mu, Z. X., Yang, H. Y., Wang, Y. Z., Mu, Y., Yu, H. Q., 2015, Electron Acceptors For Energy Generation in Microbial Fuel Cells Fed With Wastewaters: a Mini-Review, *Chemosphere*, Vol. 104, 12-17.
- [25] Logan, B. E., Regan, J. M., 2006., Electricity-Producing Bacterial Communities in Microbial Fuel Cells, *Trends in Microbiology*, Vol. 14, 512-518.
- [26] Kılıç, A., Uysal, Y., Çınar, Ö., 2011, Laboratuvar Ölçekli Bir Mikrobiyal Yakıt Hücresinde Sentetik Atıksudan Elektrik Üretimi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 17, Sayı 1, ss. 43-49.
- [27] Damiano, L., 2009, Electricity Production From The Management of Munciple Solid Waste Leachate With Microbial Fuel Cells, Thesis, New Hampshire University, Civil Engineering.
- [28] Lu, N., Zhou, S. G., Zhuang, L., Zhang, J. T., Ni, J. R., 2009, Electricity Generation From Starch Processing Wastewater Using Microbial Fuel Cell Technology, *Biochemical Engineering Journal*, Vol. 43, 246-251.
- [29] Gezginci, M., Uysal, Y., Kılıç, A., Çınar, Ö., 2011, Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinde Ekstraselüler Elektron Transferleri, *Biyoloji Bilimleri Araştırma Dergisi*, Vol. 4 (2), 81-85.
- [30] Peixoto, L., 2012, Microbial Fuel Cells For Autonomous Systems: Kinetics and Technological Advances in Wastewater Treatment and Sensor Applications, Doctoral Dissertation for Degree in Chemical and Biological Engineering.
- [31] Güçlü, E. N., 2013, Enterobacter Aerogenes ve Rekombinant Suşlarında Mikrobiyal Yakıt Pili Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- [32] Bond, D. R., Lovley, D.R., 2003, Electricity Production By Geobacter Sulfurreducens Attached To Electrodes, *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 69 (3), 1548-1555.
- [33] Lovley, D. R., 2006, Microbial Fuel Cells: Novel Microbial Physiologies and Engineering Approaches, *Current Opinion in Biotechnology*, Vol. 17, 327-332.
- [34] Rabaey, K., Verstraete, W., 2005, Microbial Fuel Cells: Novel Biotechnology For Energy Generation, *Trends in Biotechnology*, Vol. 23, 291-298.
- [35] Huang, L., Regan, J. M., Quan, X., 2011, Electron Transfer Mechanisms, New Applications and Performance of Biocathode Microbial Fuel Cells, *Bioresource Technology*, Vol.102, 316-323.
- [36] Mustakeem, 2015, Electrode Materials for Microbial Fuel Cells: Nanomaterial Approach, *Mater Renew Sustain Energy*, 4-22.
- [37] Slate, A. J., Whitehead, K. A., Brownson, D. A. C., Banks, C. E., 2019, Microbial Fuel Cells: an Overview of Current Technology, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 101, 60-81.
- [38] Gil, G., Chang, I., Kim, B. H., Kim, M., Jang, J., Park, H. S., Kim, H. J., 2003, Operational Parameters Affecting The Performance of a Mediator-Less Microbial Fuel Cell, *Biosensors and Bioelectronics*, Vol. 18, 327-334.
- [39] Karluvalı, A., 2016, Kompozit Tubular Elektrot Kullanılan Mikrobiyal Yakıt Hücresinde Biyobozunur Atıklardan Elektrik Enerjisi Üretimi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [40] Butler, C. S., 2009, Fundamental and Applied Studies of Microbial Fuel Cells For Sustainable Water and Wastewater Treatment, Master Thesis, Civil Engineering and Geological Sciences, Indiana.

- [41] Rahimnejad, M., Mokhtarian, N., Najafpour, G. D., Wan Daud, W. R., Ghoreyshi, A. A., 2009, Low Voltage Power Generation in Abiofuel Cell Using Anaerobic Cultures, *World Applied Sciences Journal*, Vol. 6, 1585-1588.
- [42] Ghasemi, M., Wan Daud, W. R., Hassan, S. H. A., Oh, S., İsmail, M., Rahimnejad, M., Jahim, J. M., 2013, Nano-Structured Carbon as Electrode Material in Microbial Fuel Cells: a Comprehensive Review, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 580, 245-255.
- [43] Logan, B. E., 2010, Scaling up microbial fuel cells and other bioelectrochemical systems, *Microbiol Biotechnol*, Vol. 85, 1665-1671.
- [44] Liu, Y., Harnisch, F., Fricke, K., Schröder, U., Climent, V., Feliu, J. M., 2010, “The Study of Electrochemically Active Microbial Biofilms On Different Carbon-Based Anode Materials in Microbial Fuel Cells”, *Biosensors and Bioelectronics*, Vol. 25, 2167-2171.
- [45] Hernández-Fernández, F. J., Ríos, A. P., Salar-García, M. J., Ortiz-Martínez, V. M., Lozano-Blanco, L. J., Godínez, C., Tomás-Alonso, F., Quesada-Medina, J., 2015, Recent Progress And Perspectives in Microbial Fuel Cells For Bioenergy Generation and Wastewater Treatment, *Fuel Processing Technology*, Vol. 138, 284-297.
- [46] Ulusoy, I., 2012, Yakıt Hücresi Sisteminde Elektrokimyasal ve Mikrobiyolojik Yaklaşım İle Elektron Transfer Mekanizmasının İncelenmesi, Doktora Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- [47] Yates, M. D., 2014, Sustainable Resource Recovery and Energy Conversion Processes Using Microbial Electrochemical Technologies, Doctor of Philosophy, The Pennsylvania State University Department of Civil and Environmental Engineering.
- [48] Do, M. H., Ngo, H. H., Gua, W. S., Liu, Y., Chang, S. W., Nguyen, N. N., Nghiem, L. D., Ni, B. J., 2018, Challenges in The Application of Microbial Fuel Cells To Wastewater Treatment and Energy Production: A Mini Review, *Science of the Total Environment*, Vol. 639, 910-920.
- [49] Wei, J., Liang, P., Huang, X., 2011, Recent Progress in Electrodes For Microbial Fuel Cells, *Bioresource Technology*, Vol. 102, 9335-9344.
- [50] Huggins, T., Wang, H., Kearns, J., Jenkins, P., Ren, Z. J., 2014, Biochar as a Sustainable Electrode Material For Electricity Production in Microbial Fuel Cells, *Bioresource Technology*, Vol. 157, 114-119.
- [51] Erable, B., Etcheverry, L., Bergel, A., 2009, Increased Power From a Two-Chamber Microbial Fuel Cell With a Low-pH Air-Cathode Compartment, *Electrochemistry Communications*, Vol. 11, 619-622.
- [52] Köroğlu, E. O., 2013, Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinde Evsel Atıksulardan Elektrik Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [53] Freguia, S., Rabaey, K., Yuan, Z., Keller, J., 2007, Non-Catalyzed Cathodic Oxygen Reduction at Graphite Granules in Microbial Fuel Cells, *Science Direct*, Vol. 53, 598-603.
- [54] Tang, X., Guo, K. Li, H., Du, Z., 2010, Microfiltration Membrane Performance in Two-Chamber Microbial Fuel Cells, *Journal of Biochemical Engineering*, Vol. 52, 194-198.
- [55] Leong, J. X., Wan Daud, W. R., Ghasemi, M., Liew, K. B. and Ismail, M. 2013. Ion exchange membranes as separators in microbial fuel cells for bioenergy conversion: a comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 575-587.
- [56] Li, J., 2011, Application of Air-Cathode Microbial Fuel Cell to Industrial Wastewater, Bachelor of Science in Water Supply and Drainage Engineering, Master of Science, Tianjin.
- [57] Dai, J., 2012, Application of Microbial Fuel Cells in a Forested Wetland Environment, *Clemson University Biosystems Engineering*, 70.
- [58] Uçar, D., Toprak, D., 2014, Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinde Anot ve Katot Bölmelerinin Birbirinden Ayrılmasında Kullanılan Bazı Yöntemler, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Vol. 14, 1-6.
- [59] Rismandi-Yazdi, H., Carver, S. M., Christya, A.D., Tuovinen., 2008, Cathodic Limitations in Microbial Fuel Cells: An Overview, *Journal of Power Sources*, Vol. 180, 683-694.
- [60] Palanisamy, G., Jung, H. Y., Sadhasivam, T., Kurkuri, M. D., Kim, S. C., Roh, S. H., 2019, A Comprehensive Review On Microbial Fuel Cell Technologies: Processes, Utilization, and Advanced Developments in Electrodes and Membranes, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 221, 598-621.

- [61] Özcan, E., 2013, Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinde Membran ve İşletme Şartlarındaki Değişimin Güç Üretimine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, 170, İstanbul.
- [62] Sahu, O., 2019, Sustainable and Clean Treatment of Industrial Wastewater With Microbial Fuel Cell, Results in Engineering, Vol. 4, 100053.
- [63] Min, B., Kim, J. R., Oh, S. E., Regan, J. M., Logan, B. E., 2005, Electricity Generation From Swine Wastewater Using Microbial Fuel Cells, Water Research, Vol. 39, 4961-4968.
- [64] Balku, Ş., 2004, Azot Giderimli Aktif Çamur Sisteminde Enerji Optimizasyonu, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [65] Gude, V. G., 2016, Wastewater treatment in microbial fuel cells e an overview. Journal of Cleaner Production, Vol. 122, 287-307.
- [66] Mansoorian, H. J., Mahvi, A. H., Jafari, A. J., Khanjani, N., 2016, Evaluation of Dairy Industry Wastewater Treatment and Simultaneous Bioelectricity Generation in Acatalyst-Less and Mediator-Less Membrane Microbial Fuel Cell'', Journal of Saudi Chemical Society, Vol. 20, 88-100.
- [67] Oon, Y. L., Ong, S. A., Ho, L. N., Wong, Y. S., Oon, Y. S., Lehl, H. K., Thung, W. E., 2015, Hybrid System Up-Flow Constructed Wetland İntegrated With Microbial Fuel Cell For Simultaneous Wastewater Treatment and Electricity Generation, Bioresource Technology, Vol. 186, 270-275.
- [68] Hassan, M., Wei, H., Qiu, H., Su, Y., Jaafry, S. W., Zhan, L., Xie, B., 2018, Power Generation and Pollutants Removal From Landfill Leachate in Microbial Fuel Cell: Variation and İnfluence of Anodic Microbiomes, Bioresource Technology, Vol. 247, 434-442.
- [69] Zhuang, L., Yuan, Y., Wang, Y., Zhou, S., 2012, Long-Term Evaluation of a 10-Liter Serpentine-Type Microbial Fuel Cell Stack Treating Brewery Wastewater, Bioresource Technology, Vol. 123, 406-412.
- [70] Wang, X., Tian, Y., Liu, H., Zhao, X., Wu., Q. 2019, Effects of İnfluent COD/TN Ratio On Nitrogen Removal in İntegrated Constructed Wetland–Microbial Fuel Cell Systems, Bioresource Technology, Vol. 271, 492-495.
- [71] Kuşçuoğlu, S., 2008, K-Struvit Çöktürmesinin Uygulama Esaslarının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [72] Zang, G. U., Sheng, G. P., Li, W. W., Tong, Z. H., Zeng, R. J., Shi, C., Yu, H. Q., 2012, Removal of Nutrients and Energy Production in Urine Purification Using Magnesium Ammonium Phosphate Precipitation and Microbial Fuel Cell Technique, Physical Chemistry Chemical Physics, Vol. 6, 1978-1984.
- [73] Firdous, S., Jin, W., Shahid, N., Iqbal, A., Abbasi, U., Mahmood, Q., Ali, A., 2018, The Performance of Microbial Fuel Cells Treating Vegetable Oil İndustrial Wastewater, Environmental Technology & Innovation, Vol. 10, 143-151.
- [74] Fazli, N., Ahmad Mutamim, N. S., Azwani Jafri, N. M., Mohd Ramli, N. A., 2018, Microbial Fuel Cell (MFC) in Treating Spent Caustic Wastewater: Varies İn Hydraulic Retention Time (HRT) and Mixed Liquor Suspended Solid (MLSS), Journal of Environmental Chemical Engineering, Vol. 6, 4339-4346.
- [75] Liu, R., Gao, C., Zhao, Y. G., Wang, A., Lu, S., Wang, M., Maqbool, F., Huang, Q., 2012, Biological Treatment of Steroidal Drug İndustrial Effluent and Electricity Generation İn The Microbial Fuel Cells, Bioresource Technology, Vol. 123, 86-91.
- [76] Abbasi, U., Jin, W., Pervez, A., Bhatti, Z. A., Tariq, M., Shaheen, S., Iqbal, A., Mahmood, Q., 2016, Anaerobic Microbial Fuel Cell Treating Combined İndustrial Wastewater: Correlation of Electricity Generation With Pollutants, Bioresource Technology, Vol. 200, 1-7.
- [77] Ceconet, D., Molognoni, D., Callegari, A., Capodaglio, G., 2018, Agro-Food İndustry Wastewater Treatment With Microbial Fuel Cells: Energetic Recovery İssues, Science Direct, Vol. 43, 500-511.
- [78] Wu, Y., Zhao, X., Jin, M., Li, Y., Li, S., Kong, F., Nan, J., Wang, A., 2018, Copper Removal and Microbial Community Analysis in Single-Chamber Microbial Fuel Cell, Bioresource Technology, Vol. 253, 272-277.
- [79] Wen, Q., Wu, Y., Zhang, L., Sun, Q., 2010, Production of Electricity From The Treatment of Continuous Brewery Wastewater Using a Microbial Fuel Cell, Fuel, Vol. 89, 1381-1385.

- [80] Kalathil, S., Patil, S. A., Pant, D., 2017, *Microbial Fuel Cells: Electrode Materials*, Elsevier, 2-9.
- [81] Rodrigo, M. A., Canizares, P., Lobato, J., Paz, R., Sáez, C., Linares, J. J., 2007, Production of Electricity From The Treatment of Urban Waste Water Using a Microbial Fuel Cell, *Journal of Power Sources*, Vol. 169, 198-204.
- [82] Estrada-Arriaga, E. B., Hernandez-Romano, J., García-Sánchez, L., Guillen Garcez, R. A., Bahena-Bahena, E. O., Guadarrama-Perez, O., Moeller Chavez, G. E., 2019, Domestic Wastewater Treatment and Power Generation in Continuous Flow Air-Cathode Stacked Microbial Fuel Cell: Effect of Series and Parallel Configuration, *Journal of Environmental Management*, Vol. 214, 232-241.
- [83] Rahmani, A. R., Navidjoudy, N., Rahimnejad, R., Nematollahi, D., Leili, M., Samarghandi, M. R., Alizadeh, S., 2020, Application of The Eco-Friendly Bio-Anode For Ammonium Removal and Power Generation From Wastewater in Bio-Electrochemical Systems”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 243, 118589.
- [84] Yang, Z., Peia, H., Hou, Q., Jian, I., Zhang, L., Nie, C., 2018, “Algal Biofilm-Assisted Microbial Fuel Cell to Enhance Domestic Wastewater Treatment: Nutrient, Organics Removal and Bioenergy Production”, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 332, 277-285.
- [85] Ghasemi, M., Ahmad, A., Jafary, T., Azad, A. K., Kakooei, S., Wan Daud, W. R., Sedighi, M., 2017, Assessment of Immobilized Cell Reactor and Microbial Fuel Cell For Simultaneous Cheese Whey Treatment and Lactic Acid/Electricity Production, *Uluslararası Hidrojen Enerjisi Dergisi*, Vol. 42 (14), 9107-9115.
- [86] Callegari, A., Ceconet, D., Molognoni, D., Capodaglio, A. G., 2018, Sustainable Processing of Dairy Wastewater: Long-Term Pilotapplication of a Bioelectrochemical System, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 189, 563-569.
- [87] Sciarria, T. P., Merlino, G., Scaglia, B., D’Fpifanio, A., Mecheri, B., Borin, S., Licoccia, S., Adani, F., 2015, Electricity Generation Using White and Red Wine Lees in Air Cathode Microbial Fuel Cells, *Journal of Power Sources*, Vol. 274, 393-399.
- [88] Raychaudhuri, A., Behera, M., 2020, Comparative Evaluation of Methanogenesis Suppression Methods in Microbial Fuel Cell During Rice Mill Wastewater Treatment, *Environmental Technology & Innovation*, Vol. 17, 100509.