

## Araştırma Makalesi

**Mikrobiyal Yakıt Hücreleri ile Çamur Arıtımı ve Elektrik Üretimi***Özlem Demir <sup>a</sup>, Elif Gümüş <sup>b</sup>**<sup>a</sup> Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa**<sup>b</sup> Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa***Öz**

Enerji kaynağı olarak kullanılan fosil yakıtlar hem küresel ısınmanın hem de önemli çevresel problemlerin başlıca nedenlerindedir. Enerji talebindeki artış, fosil yakıtların giderek tükenmesi, çevresel bilincin gelişmesi, araştırmacıları, yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarını bulmaya teşvik etmektedir. Güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, hidroelektrik enerji ve biyoyakıtlar (biyoetanol, biyodizel ve biyohidrojen vb.) başlıca yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Son zamanlarda yakıt olarak organik maddeleri kullanabilen mikrobiyal yakıt hücresi (MYH) sistemleri ortaya çıkmıştır. MYH, özellikle organik maddelerin parçalanmasından oluşan biyokimyasal enerjiyi, mikroorganizmaların katalitik reaksiyonları ile elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Özellikle, evsel atıksu arıtma tesisleri çamurlarının organik içeriğinin fazla olması MYH'nin çamur arıtımı ile birlikte enerji üretimi amacıyla kullanımını gündeme getirmiştir. MYH ve atık çamur arıtımının birleşimi MYH alanındaki uygulamaları genişletecek ve aynı zamanda gelecekte çamur arıtma problemini çözecek bir avantaj sunmaktadır. Aynı zamanda, atıksu arıtma tesisinin işletim maliyetini dengeleyerek sürdürülebilir bir atıksu arıtımı vadetmektedir.

Bu çalışmada, MYH'nin çamurun azaltılması ve elektrik üretimi amacıyla kullanılabilirliğini ortaya koyan çalışmalar araştırılmış ve değerlendirilmiştir. Ayrıca, yapılan araştırmalar, ultrases ve alkali arıtım gibi proseslerle arıtılmış çamurla beslenen MYH'nde elektrik üretiminin arttığını göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Mikrobiyal yakıt hücresi (MYH), atık çamur, elektrik üretimi, ultrases ön arıtım, alkali ön arıtım

**Sludge Treatment and Electricity Generation with Microbial Fuel Cells****Abstract**

Fossil fuels used as an energy source are one of the main reason of both global warming and important environmental problems. Increasing in energy demand, consumption of fossil fuels, development in environmental consciousness encourage the researchers to find renewable and sustainable energy sources. Solar energy, wind energy, hydroelectricity energy and bio-fuels (bioethanol, biodiesel and bio-hydrogen etc.) are the main renewable energy sources. Recently, the microbial fuel cell (MFC) technology used organic matter as fuel has been occurred. MFC, converts biochemical energy from organic matter destruction to electricity with catalytic reactions of microorganisms. Particularly, high organic contents of sludge produced from domestic wastewater treatment plants propose the usage of MFC in sludge treatment with

\* Sorumlu yazar  
e-posta: [odemir@harran.edu.tr](mailto:odemir@harran.edu.tr)

Received: 07.10.2016  
Accepted: 21.12.2016

the aim of energy production. The combination of MFC and sludge treatment extend the MFC applications and offer an advantage as a solution of sludge treatment problem in near future and promise a sustainable wastewater treatment providing a balance in operational cost of wastewater treatment plants.

In this study, the proved researches of MFC used for sludge reduction and electricity production are investigated and assessed. Besides, these researches demonstrated that the electricity production in MFC fed with ultrasonically and alkali pretreated sludge is increased.

**Keywords:** Microbial fuel cell (MFC), waste sludge, electricity generation, ultrasound pretreatment, alkali pretreatment

## Giriş

Fosil yakıtlar, küresel ısınmaya neden olmakla birlikte önemli çevresel problemlere de yol açmaktadır [1]. Fosil yakıtların tükenmesi, enerji ihtiyacının artması ve çevre bilincinin gelişmesi yenilenebilir enerji kaynaklarının arayışını tetiklemiştir [2]. Bu temiz ve yenilenebilir enerji kaynakları arasında Güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, hidroelektrik enerji ve biyoyakıtlar (biyoetanol, biyodizel ve biyohidrojen vb.) gibi enerji kaynaklarını saymak mümkündür [1].

Mikrobiyal yakıt hücresi (MYH) sistemleri, son zamanlarda, organik maddeleri kullanabilen sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak karşımıza çıkmaktadır [2,3].

MYH sistemlerinin yenilenebilir bir enerji kaynağı sayılmasının nedenlerinden biri karbon-nötr olmaları yani organik maddelerin oksidasyonu sonucu atmosfere sadece kararlı olan karbonu salmalarındır [1]. MYH, elektrokimyasal bir hibrid sistem olarak da kabul edilebilir çünkü mikrobiyal ve elektrokimyasal prosesleri birleştiren sistemlerdir [4].

Kısacası, MYH'ni, organik maddelerin sahip olduğu kimyasal enerjiyi, elektrik enerjisine dönüştürmeyi sağlayabilen kimyasal reaktörler olarak tanımlamak mümkündür [1,5].

MYH, glukoz, asetat ve bütirat gibi basit karbonhidratları, domuz atıksuyu, evsel atıksu ve gübre çamur atığı gibi kompleks organik bileşikler gibi sayısız organik maddeyi [6] parçalayarak oluşan biyokimyasal enerjiyi, mikroorganizmaların katalitik reaksiyonları ile elektrik enerjisine dönüştürürken [3] atığı enerjiye dönüştürdüğü için atıksu arıtma tesisinin işletim maliyetini dengeleyecek sürdürülebilir bir atıksu arıtımı vadetmektedir [2]. Organik maddelerin MYH'nde mikroorganizmaların substrat olarak kullanılabilmesi [6] MYH alanındaki uygulamaları genişletecek ve aynı zamanda gelecekte çamur arıtma problemini çözecek bir avantaj sunabilecektir [7].

Çamur arıtımında kullanılan MYH'nde çamurun yüksek organik madde içeriği enerji üretimini beraberinde getirmektedir. Böylelikle MYH, hem arıtma tesislerinde oluşan çamur arıtımda kullanılabilir hem de alternatif bir enerji kaynağı sunacaktır [3]. Atık aktif çamuru MYH'nde elektrik üretimi için kullanan ilk grup olan Dentel ve ark. [8] 'nın yaptığı çalışmada tek bölmeli membran MYH'nde anaerobik olarak çürütülmüş çamur yakıt olarak kullanılmış ve kabaca 0,065 mA ve 0,517 V maksimum voltaj elektrik akımı elde edilmiştir.

MYH sistemlerinde organik maddenin substrat olarak kullanıldığı

bilindiğine göre enerji üretiminin biyokütlenin parçalanma veriminden etkilendiği söylemek mümkündür. Çamurun anaerobik olarak parçalanmasında organik maddelerin hidrolizi hız sınırlayıcı basamak olarak bilinmektedir [6]. MYH sistemlerinde çamur arıtımı gerçekleştirildiğinde ise, biyokütlenin etkili bir şekilde parçalanmasının elektrik üretiminin artışıyla doğru orantılı olacağı sonucuna varılabilir. Bu nedenle, çamurdaki substrat olarak kullanılan organik maddelerin kullanılma performansını arttırmak açısından bir ön arıtım gerekebilir [3]. Ultrases ön arıtım [9], alkali ön arıtım [9,10], termal ön arıtım (Xiao et al., 2011), ozonlama [3] mikrodalga ile çürütme [3] ve anaerobik çürütme [11] gibi ön arıtım metotları MYH’nde çamurdan enerji üretimini geliştirmek için kullanılan yöntemlerdir [2].

Bu çalışmada, MYH genel özellikleri ile tanımlanarak, çamur arıtımı ve elektrik üretimi amacıyla kullanılan MYH ile ilgili çalışmalar araştırılmış ve değerlendirilmiştir.

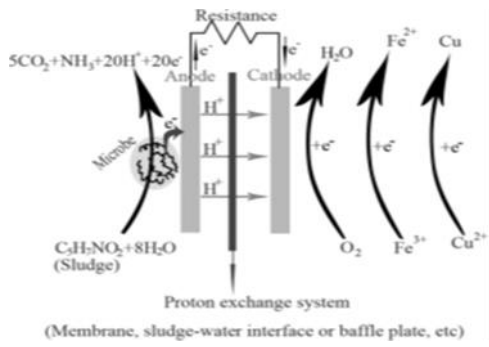
### MYH’nin Yapısı ve Çalışma Prensipleri

MYH’nde, çözünmüş organik maddeler, biyo-elektrokimyasal yollarla elektrik enerjisine dönüştürülmektedir [12]. Bu sistemlerde, mikroorganizmaların katalitik reaksiyonu ile kimyasal enerji elektrik enerjisine dönüştürülmektedir [13]. MYH reaktörü, birbirinden proton değiştirici membran ile ayrılan, elektrokimyasal olarak aktif mikroorganizmaları içeren anot ve abiyotik olan katot bölmelerinden oluşmaktadır (Şekil 1) [5]. Anot bölgesinde, organik maddeler mikroorganizmalarca okside edilerek elektron ve hidrojen üretilir ve

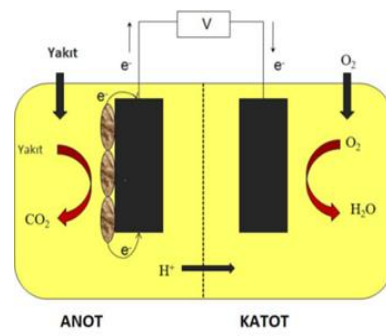
iletken bir maddeden (karbon) yapılmış anot elektrotun yüzeyine aktarılır. Elektronlar, dış bir direnç üzerinden katot olarak kullanılan diğer elektroda iletilir [12]. Hidrojen ise proton değiştirici zardan geçerek katot bölgesine ulaşır ve burada nihai elektron alıcısı (örneğin  $O_2$ ) ile birleşerek suya dönüşür [5]. Yani, katot elektrotun yüzeyinde, elektron alıcı olarak kullanılan oksijen, dış direnç üzerinden gelen elektronlar ve proton seçici membrandan geçerek anottan gelen protonlarla birleşerek su moleküllerini oluştururlar [12]. Kuvvetli bir e- alıcısı olan  $O_2$ ’nin varlığı ve pozitif elektrik yükü oluşturan  $H^+$ ’lar sayesinde, anottaki elektronlar katoda doğru çekilir ve böylece hat üzerinde bir elektrik akımı oluşur. Elektrik enerjisi üretebilmek için anot bölgesinde oksijen ve başka bir elektron alıcı bulunmamalıdır ve anot bölgesi tamamen anaerobik olmalıdır [5]. Şekil 2’de iki bölmeli bir MYH şematik olarak gösterilmiştir.

### MYH’nin Dizaynı ve İşletimi

Şekil 1’de gösterilen atık aktif çamurla işletilen MYH’nde, atık aktif çamurun kimyasal formülü  $C_5H_7NO_2$  olarak verilmiştir. Çamurun anot bölgesinde parçalanır ve elektronlar salınır. Katot bölgesinde oksijen, (hava, Çözünmüş oksijen ( $CO=$ ),  $Fe^{+3}(K_3Fe(CN)_6$ ,  $FePO_4$ ) ve  $Cu^{+2}$  ( $CuSO_4$ ’lı sular) gibi elektron alıcılar kullanılır. Anottan katoda elektron akışı dışsal bir devrede akar ve bir akım oluşturur. Birçok proton değişim yolu görev alır. Mikroorganizmaların katalitik reaksiyonları, MYH’nin biyoelektrik üretiminde önemli rol oynar. *Shewanella putrefaciens*, *Geobacterocea sulfurreducens* ve *Geobacter metallineducens* gibi iyi bakteriler yaygın olarak kullanılmaktadır [7].



Şekil 1. Atık aktif çamurla çalışan MYH'nde elektrod reaksiyonları



Şekil 2. İki Bölmeli MYH reaktörü

## MYH'lerin Bileşenleri

Genellikle bir MYH sistemi anot bölümü, katot bölümü ve seçici geçirgen özellikte olan bir membrandan oluşur (Şekil 2) [1].

### Anot Elektrot

Anot materyali, iletken olmalı, biyolojik ve kimyasal çalışmalara uygun olmalı, reaktör içindeki sıvı ile reaksiyona girmemeli, anot bölgesinde bulunan mikroorganizmalara zarar vermemeli, yüksek gözenekliliğe sahip olmalı, bakterilerce tıkanmaya izin vermemeli, ucuz olmalı ve kolayca yapılabildiği daha büyük uygulamalarda kullanılabilir. Anot için en basit materyaller daha ucuz ve sınırlı bir yüzey alanına sahip; grafit levha veya çubuktur. Karbon tel, kağıt, köpük ve kumaş yaygın olarak kullanılan elektrotlardır [12].

### Katot Elektrot

Katot bölümünde; katı (katot elektrot), gaz (elektronlar, protonlar ve oksijenin tamamı) ve sıvı (katolit) olmak üzere üç fazlı bir reaksiyon oluşmaktadır. Ferrisiyanür  $[Fe(CN)_6]$  iyi performansı nedeniyle MYH sistemlerinde deneysel elektron alıcısı olarak çok popülerdir. Yüksek oksidasyon potansiyeli, maliyetsiz oluşu, sürdürülebilirliği, kimyasal atık üretimi olmaması gibi özelliklerinden dolayı oksijen, MYH için en uygun elektron alıcıdır [1].

## Proton İletken Membran

Proton iletken membranlar; anot ve katot bölmelerini fiziksel olarak ayıran ve elektrik akımını üretmek üzere protonların anottan katoda geçişine izin veren, katot ve anot bölmelerindeki karışımların birbirlerine karışmamasını sağlayan MYH bileşenlerindedir. Bu membranların, anottan katoda proton geçişini sağlamak için geçirgen olmaları gerekmektedir [12]. Eğer membran proton ya da katyon seçici bir membran ise, bu membran sadece pozitif yüklü elementlerin geçişine izin verecektir. MYH sistemlerinde anot bölgesinde, anaerobik ortamda bulunan mikroorganizmaların organik maddelerin parçalaması sonucunda oluşan elektronlar anot elektrota aktarılıp, bir devre aracılığı ile katot bölümüne gönderilirken, oluşan protonlar seçici geçirgen özellikteki membran aracılığı ile katot bölümüne iletilmektedir. Membran katyonların geçişine izin verirken, katot bölümünde bulunan oksijenin de anot bölümüne geçişini engellemektedir. Fakat MYH sistemlerinde membranın kullanılması zorunlu değildir. Membran kullanılıp kullanılmamasına göre MYH sistemleri, membranlı ve membransız MYH olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Membransız MYH sistemlerinde protonların taşınması su ile gerçekleşmektedir. Yapılan çalışmalar, membransız MYH sisteminde, membranlı olandan daha fazla güç üretildiğini göstermiştir. Bipolar membran,

Nafyon, katyon, anyon, ultrafiltrasyon membranları ve nanoporlu polimer filtreler gibi çeşitli membran çeşitleri denenerak yapılan birçok çalışmada iki bölmeli, membranlı, MYH sistemlerinde en yaygın olarak Nafyon membranının kullanıldığı bulunmuştur [1].

### MHY'lerde Elektron Transferi ve Elektrik Üretimi

MYH'nde, hücre dışına aktarıldığı için anot bölmesinde yoğun bir şekilde bulunan H<sup>+</sup>lar, basit dağılma ve elektrik yükü nedeniyle proton değiştirici zardan geçerek katot bölmesine ulaşırlar. H<sup>+</sup>ların varlığı da elektronların katot üzerindeki yoğunluğunun artmasına sebep olur. Daha önce belirtildiği gibi katot bölmesi oksijenlidir. Elektronlar, kuvvetli bir elektron alıcısı olan oksijene doğru geçer ve bu kompleksin çözeltideki H<sup>+</sup>lerle birleşmesi sonucu H<sub>2</sub>O oluşur. Bu durumda, katot bölmesindeki H<sup>+</sup>lar tüketilerek yoğunluğu düşürüldüğü için, anot bölmesinden katot bölmesine H<sup>+</sup> geçişinin sürekliliği sağlanmış olur. Devrenin sürekliliğinin sağlanması ve katot üzerindeki elektronların oksijene aktarılması ile katot elektrot pozitif yüklü olacak ve devreye bir direnç takılması halinde üretilen elektrik enerjisi kullanılabilir hale gelecektir [5].

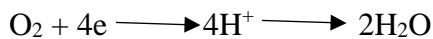
Tipik elektrot reaksiyonları asetat örneği üzerinden aşağıda gösterilmiştir [12].

Anot reaksiyonu:



Asetat

Katot reaksiyonu :



Genel reaksiyon substratın karbondioksit ve suya parçalanmasıyla oluşan elektrik akımıdır. Yukarıdaki reaksiyonlara bağlı olarak, bir MYH'nde dış direnç uygulandığında anottan katota elektron

transferi gerçekleşir ve böylece elektrik akımı üretilebilir.

### MYH'nde Çamur Arıtımı İle İlgili Çalışmalar

Atık aktif çamurla işletilen MYH'nde çamurun parçalanma verimi, MYH'nin performansını belirlemede önemli bir parametredir. Çamurun parçalanma prosesi boyunca, çözünmüş organik maddelerin parçalanması ve partikül halindeki biyokütlelerin yıkımı gerçekleşir. Bu yüzden, sadece çözünmüş KOİ veya benzer faktörler parçalanmayı belirlemek için yeterli değildir. Toplam KOİ giderimi ve uçucu askıda katı (UAKM) yıkım hızı, çamur parçalanma verimini göstermek için önerilebilir. Tabii ki bazı araştırmacılar, askıda katıları (AKM) da bir değerlendirme parametresi olarak kullanmışlardır. Bununla birlikte askıda katıların parçalanması büyük ölçüde uçucu askıda katıların parçalanmasına bağlıdır.

MYH'nde çamur arıtımı ile ilgili çalışmaların çoğu anot bölmesinde gerçekleşen organik maddelerin parçalanması aşamasını hızlandırmak suretiyle uygulanan farklı ön arıtım yöntemleri ile ilgilidir. Ozonlama ve mikrodalga ile çürütme prosesleri çamurun ön arıtımı için kullanılan proseslerdir. Çoğu atıksu çalışmasında, ozonlama prosesi atık çamurdaki katı içeriği azalmak üzere yaygın olarak kullanılan yaklaşımlardan biridir. Ozonlama prosesi, hücre membranının yıkımı ve hücre lizisine yola açacak bir prosesdir. Yıkıma uğramış hücre, organellerini ve hücre bileşenlerini dışa salacaktır ve sonuç olarak solüsyon içindeki çözünmüş organik madde miktarı artacaktır. Diğer yandan, mikro dalga biyoetanol üretiminde lignin bazlı materyallerin ön arıtımı için kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklık ve basınç önemli parametrelerdir. Esnek sıcaklık kontrolü, çabuk sıcaklık artışı, düşük maliyet ve sonuçta ham çamura göre daha yüksek çözünmüş KOİ gibi avantajlar

sunmaktadır. Bu nedenle, anaerobik proresteki hız sınırlayıcı adım olarak bilinen hidrolizin hızlandırılması, mikrodalga işleminin uygulanması ile başarılabılır. Mikrodalga ile ön arıtıma tabi tutulmuş çamur, bakteri büyümesi için karbonhidrat, protein ve yağ gibi, kolay biyolojik olarak parçalanabilen bileşiklere dönüşür [3].

Alkali ve/veya ultrasonik ön arıtımının kullanılması gibi ön arıtma metotlarının kullanımının toplam KOİ giderim verimini arttırdığı söylenebilir. Jiang ve ark. [9] alkaline ve/veya ultrasonikasyon ön arıtıma metodunun kullanımıyla 2 saat işletimin % 35,1 ile ön arıtıma olmaksızın işletilenden yüksek olduğunu göstermiştir. 120 saat işletimle Jiang ve ark. [14], ultrasonik ön arıtımın toplam KOİ giderim verimini %19,2'den % 57'ye arttırmıştır. Fang ve ark. [15], mikrodalga ile arıtılmış çamur üst suyu MYH'nde kullanmış ve 600 saat işletimde % 72,7 toplam KOİ giderim verimi elde etmiştir.

Xiao ve ark. [11], çamurdan enerji üretiminin alkali ön arıtımla geliştirilebildiğini ve volt üretiminin 0.28–0.31 V dan 0.41–0.43 V'a arttığını bulmuşlardır. Bu, alkali ön arıtım prosesinin hücre membranını dezente edip, organik maddelerin çözünmesini sağlayarak çözümlenmiş bulunan organik maddelerin artışına bağlıdır [2]. Ghadge ve ark.[16]'nın yaptığı çalışmada atık aktif çamur çift bölmeli MYH'nde aniyodik bölmede çürütülmüştür. MYH'nin performansı, oksijeni (MFC-1) ve hipokloriti (MFC-2) katyonik elektron alıcısı olarak kullanmak suretiyle değerlendirilmiştir. Hipokloritin katolit olarak kullanılması sonucunda oksijenin kullanılması ile elde edilen güç üretiminin (4.2 W/m<sup>3</sup>) iki katı olan 8.7 W/m<sup>3</sup>'lük bir güç üretimi sağlanmıştır. Çamurun toplam KOİ'si MFC-1 ve MFC-2 için sırasıyla % 65,4 ve % 84,7 oranında azalmıştır.

Toplam ve uçucu askıda katı indirgenmesi MFC-2 ve (sırasıyla % 75,7 ve % 80,2) MFC-1 (sırasıyla % 66,7 ve % 76,4) ile karşılaştırıldığında daha yüksektir. Hipokloritin kullanılması oksijenden 3,8 kat daha yüksek Kolombik verim (%13,8) eldesine neden olmuştur. Hipoklorit daha iyi bir katyodik elektron alıcı olarak görev yapmış ve 8 günlük alıkonma süresi içinde hızlı bir çamur çürütme sağlayarak MYH'nde enerji üretimini arttırmıştır.

Jiang ve ark. [6], potasyum ferrisiyanidi elektron alıcı olarak kullanıp oluşturdukları 2 bölmeli MYH'ni aşırı çamuru parçalamak ve enerji üretmek için kullanmışlardır. Stabil elektrik enerjisi sürekli 250 saatlik işletim boyunca elde edilmiştir. Çamurun giriş toplam KOİ'si 10850 mg/L iken, % 46,4 azalmıştır. MYH de güç üretiminin substrat konsantrasyonu, katot elektrolit konsantrasyonu ve aniyodik pH gibi proses parametrelerine büyük ölçüde bağlı değilken, çamurun çözünabilir KOİ içeriğine sıkı sıkıya bağlı olduğu, çamurun ultrasonik ön arıtımı organik madde çözünürlüğünü hızlandırdığı ve böylece de MYH'nde toplam KOİ giderim hızının arttığını fakat güç üretiminin önemli ölçüde artmadığı bulunmuştur.

Jiang ve ark. [14]'nın yaptığı çalışmaya göre MYH, toplam KOİ giderim hızı ve derecesi ile ilgili, özellikle çamura ultrases uygulandığı zaman etkili bir çamur arıtma ünitesi olabilir. Bu çalışmada, MYH öncesi ve sonrasında, ön arıtıma basamağı olarak ultrases uygulamadan ve uygulamak koşuluyla, çamuru karakterize edilmiştir. 5-günlük elektrik yüklü MYH işletimden sonra ham çamurda ve >0,6 W/mL ultrases ile ön arıtılmış çamurla beslemeden sonra kontrol sistemine kıyasla (klasik anaerobik çürütme testi) sırasıyla %11,3'ten %19,2'ye, ve % 25'ten % 57'ye toplam KOİ gideriminde artış görülmüştür. Ultrases ön arıtımla salınan aromatik proteinler, çözümlenmiş mikrobiyal yan ürünler, karboksilik bileşenler, alifatik bileşenler,

hidrokarbon ve karbonhidrat materyalleri tanımlanmıştır.

Ki ve ark. [17] tarafından yapılan çalışmanın amacı, ön fermentasyona ve darbeli elektrik alan ile ön arıtıma tabi tutulmuş ön çökeltim çamurunun MYH'nde elektron verici olarak kullanılması ile uçucu yağ asiti üretimini araştırmaktır. 3 günlük ön fermentasyon, ön çökeltim çamurunun ön arıtımı olmadan ve darbeli elektrik alanla ön arıtım uygulanan çamurda maksimum uçucu yağ asiti üretimine yol açmıştır. Fermentasyondan önce darbeli elektrik alan ile ön arıtım, uçucu yağ asidi birikimini asetatin 2 katına çıkarmıştır. Darbeli elektrik alan ile ön arıtıma tabi tutulmuş ön çökeltim çamurunun 3 günlük ön fermentasyonunun sentratı ile beslenen anotta 3.1 A/m<sup>2</sup> maksimum akım yoğunluğun görülmüştür ki bu da kontrol sistemin 2,4 katıdır. Ön fermente sentratının kullanılması, Colombik verim (%95), colombik geri kazanım ve KOİ giderim verimi (% 85) açısından başarılı bir performansı sergilemiştir.

Oh ve ark. [2] yaptıkları çalışmada, farklı çamur ön arıtma metotlarını (ultrases ve ısı/alkali birleşimi), farklı kaynaklardan gelen kentsel çamura (ön çökeltim, aşırı çökeltim, anaerobik çürütücü çamuru) uygulayarak, MYH'nde elektrik üretme üzerine etkilerini araştırmışlardır. Ultrasonik olarak ön arıtılmış çamurun MYH'ne girişi ön çökeltim çamurunda 13,59 mW/m<sup>2</sup>, aşırı çamurda 9,78 mW/m<sup>2</sup>, anaerobik çürütücü çamurunda 12,67 mW/m<sup>2</sup> güç yoğunluğu üretirken, ön çökeltim, aşırı çamur ve anaerobik çürütücü çamuru için sırasıyla 87%, 90% ve 57% çözünür KOİ giderimi sağlanmıştır. Isı/alkali birleşimi ile ön arıtılmış çamur (0,04 N NaOH, 120 °C, 1 saat), sırası ile ön çökeltim, aşırı çamur ve anaerobik çürütücü çamuru için 10,03, 5,21 ve 12,53 mW/m<sup>2</sup> güç yoğunluğu ve 83 %, 75 % ve 74 % KOİ giderimi sağlamıştır. Daha yüksek çözünmüş KOİ (KOİç) MYH

performansını arttırmış ve KOİç gideriminin artışı ile orantılı olarak lineer bir şekilde elektrik üretimi artmıştır.

Yusoff ve ark. [3]'nün yaptıkları çalışmada, çamurun farklı yöntemlerle ön arıtımının MYH'nde elektrik üretimine etkileri araştırılmıştır. Ön arıtımın, özellikle de mikrodalga ile ön arıtımın MYH'nde önemli bir elektrik üretim artışına neden olduğu görülmüştür. Mikrodalga ile arıtılmış çamurun olduğu MYH'nde % 55 toplam KOİ ve % 85 çözünmüş KOİ indirgemesi elde edilmiştir. Daha uzun anotla arıtımın ham çamurla karşılaştırıldığı zaman daha fazla avantaj sunmadığı bulunmuştur. Diğer yandan, anottaki çamur 16 S rRNA gen bazlı pyrodislim tekniği ile analizlenmiştir. Farklı ön arıtımı uygulamalarındaki çamurlardaki topluluk kompozisyonunda önemli farklılıklar görülmüştür. Yüksek MYH verimliliğinde anotta dominant olan bakteri türü Bacteroidetes olmuştur. Bu çalışmanın sonuçları, MYH'nde atık çamurun hem çamur azaltımı, hem de elektrik üretiminde kullanılabilmesini ve çamurun uygun ön arıtım prosesiyle arıtılması sonucu tüm proses performansının artırılabilmesini ortaya koymuştur.

## Sonuç

Arıtma çamurlarının MYH'nde kullanılması özellikle evsel atıksu arıtma tesislerinden elde edilen çamurlar için yüksek organik içeriğe sahip olmaları nedeniyle elverişlidir. Fakat çamuru arıtan MYH'nde mikroorganizmalar organik maddeleri substrat olarak kullanırken büyük partikül halindeki çamuru parçalamakta zorlandıklarından hidroliz aşaması anot bölmesindeki anaerobik ortamda hız sınırlayıcı adım olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu yüzden çamurun kullanıldığı MYH sistemleri ile ilgili çalışmaların çoğunda herhangi bir ön arıtım yöntemi ile bir ön arıtım uygulanmış çamur ile MYH beslenmiş ve hız sınırlayıcı olarak

bilinen hidroliz aşaması hızlandırılmaya çalışılmış, organik madde indirgemesi ve MYH'nin kullanıldığı çalışmalar, MYH'nin bu alanda kullanılabilirliğini ortaya koyarken, ultrases ve alkali arıtım gibi proseslerle ön arıtıma tabi tutulmuş çamurla beslenen MYH'nde elektrik üretiminin arttığı göstermiştir.

Çamur arıtımı için kullanılan MYH'nde çamur içindeki koloidal partiküllerin MYH'nin iç yapısını bozma riski, çamurun toksik organik madde ve inorganik bileşik içerme olasılığı güç eldesinin düşük oluşu, düşük çamur dezentegrasyonu, gibi durumlar olumsuz etki yaratabileceğinden mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca, atık aktif çamur kullanan MYH'nin tam ölçekli tesisler için düşünülmesi halinde, arıtma tesislerinde oluşan yüksek çamur hacminin büyük hacimdeki reaktörleri gerektirmesi, anot bölmesinde oluşacak biyofilm büyümesinin dikkate alınmasının zorunluluğu gibi durumlar bu konuda daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

## Kaynaklar

[1] Gezgin M, 2013. Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinde Farklı Substrat Kaynaklarının Arıtma ve Yenilenebilir Enerji Üretimi Üzerine Etkileri. Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş, 48s.

[2] Oh S-E, Yoon JY, Gurung A, Kim D-J, 2014. Evaluation Of Electricity Generation From Ultrasonic And Heat/Alkaline Pretreatment Of Different Sludge Types Using Microbial Fuel Cells. *Bioresource Technology*, 165:21–26.

[3] Yusoff M, Hu A, Feng C, Maeda T, Shirai Y, Hassan MA, Yu C-P, 2013. Influence Of Pretreated Activated Sludge For Electricity Generation In Microbial Fuel Cell Application. *Bioresource Technology*, 145:90–96.

elektrik üretimindeki değişim gözlenmiştir. Çamur azaltımı ve elektrik üretimi amacıyla

[4] Nancharaiyah Y, Venkata V, Mohan S, Lens PNL, 2015. Metals Removal And Recovery In Bioelectrochemical Systems: A Review. *Bioresouce Technology*, 195:102-114.

[5] Taşkan E, 2013. Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinde Farklı Kirleticilere Göre Elektrik Üretim Kapasitesi Ve Mikrobiyal Tür Değişiminin İncelenmesi. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Elazığ, 271s.

[6] Jiang JQ, Zhao QL, Zhang JN, Zhang GD, Lee D J, 2009. Electricity Generation From Bio-Treatment Of Sewage Sludge With Microbial Fuel Cell. *Bioresource Technology*, 100:5808–5812.

[7] Wang Z, Mei X, Ma J, Wu Z, 2012. Recent Advances In Microbial Fuel Cells Integrated With Sludge Treatment. *Chemical Engineering Technology*, 35:1733–1743.

[8] Dentel SK, Strogon B, Chiu P, 2004. Direct generation of electricity from sludges and other liquid wastes. *Water Sci. Technol*, 50 (9):161–168.

[9] Jiang JQ, Zhao QL, Wang K, Wei LL, Zhang, GD, Zhang JN, 2010. Effect Of Ultrasonic And Alkaline Pretreatment On Sludge Degradation And Electricity Generation By Microbial Fuel Cell. *Water Science And Technology*, 61:2915–2921.

[10] Xiao B, Yang F, Liu J, 2013. Evaluation Of Electricity Production From Alkaline Pretreated Sludge Using Two-Chamber Microbial Fuel Cell. *Journal Hazardous Material*, 254– 255:57–63.

[11] Xiao B, Yang F, Liu J, 2011. Enhancing Simultaneous Electricity Production And Reduction Of Sewage Sludge In Two-Chamber Mfc By Aerobic Sludge Digestion And Sludge



Pretreatments. *Journal Hazardous Material*, 189:444–449.

[12] Yılmaz E. 2011. Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinde (MYH) Bulunan Aktif Türlerin Tespiti. Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 112s.

[13] Çallı B, Mertoğlu B, 2011. Organik Atıksu Arıtan Mikrobiyal Yakıt Pilleri İle Doğrudan Elektrik Üretimi. Tübitak Projesi. Proje No:108Y008.

[14] Jiang J, Zhao Q, Wei L, Wang K, Lee D-J, 2011. Degradation And Characteristic Changes Of Organic Matter In Sewage Sludge Using Microbial Fuel Cell With Ultrasound Pretreatment. *Bioresource Technology*, 102:272–277.

[15] Fang L, Liu ZH, Li XM, Yang Q, Zheng Y, Jia B, 2010. Electricity generation by the microbial fuel cells using the supernatant fluid of microwave pretreated sludge as fuel. *Huan Jing Ke Xue*. 2010 31(10):2518-24.

[16] Ghadge AN, Dipak AJ, Harapriya P, Ghangrekar MM, 2015. Enhancing Waste Activated Sludge Digestion And Power Production Using Hypochlorite As Catholyte In Clayware Microbial Fuel Cell. *Bioresource Technology*, 182: 225–231.

[17] Ki D, Parameswaran P, Popat SC, Rittmann BE, Torres CI, 2015. Effects Of Pre-Fermentation And Pulsed-Electric-Field Treatment Of Primary Sludge In Microbial Electrochemical Cells. *Bioresource Technology*, 195:83–88.