T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖN ARITILMIŞ ÇAMURUN MİKROBİYAL YAKIT HÜCRELERİ PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Elif GÜMÜŞ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA
2019

T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖN ARITILMIŞ ÇAMURUN MİKROBİYAL YAKIT HÜCRELERİ PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Elif GÜMÜŞ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA
2019

Doç. Dr. Özlem DEMİR danışmanlığında Elif GÜMÜŞ'ün hazırladığı **"Ön Arıtılmış Çamurun Mikrobiyal Yakıt Hücreleri Performansı Üzerine Etkilerinin Araştırılması"** konulu bu çalışma / /2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

İmza

Danışman : Doç. Dr. Özlem DEMİR ……

Üye : Prof. Dr. Sinan UYANIK ……

Üye :Dr. Öğr. Üyesi Adem YURTSEVER ……....

Bu Tezin Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında Yapıldığını ve Enstitümüz Kurallarına Göre Düzenlendiğini Onaylarım.

Doç. Dr. İsmail HİLALİ
Enstitü Müdürü

Bu çalışma HÜBAP Tarafından Desteklenmiştir.
Proje No: 16219

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirilişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
ÇİZELGELER DİZİNİ v
SİMGELER DİZİNİ vi
1. GİRİŞ 1
1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı 3
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 6
2.1. Mikrobiyal Yakıt Hücreleri (MYH) 6
2.1.1. MYH geçmişi 6
2.1.2. MYH teknolojisinin temel prensipleri 7
2.1.3. MYH'nde kullanılan malzemeler 12
2.1.4. MYH'nin konfigürasyonu 15
2.1.5. MYH'nde güç üretimi 18
2.2. Çamur Ön Arıtım İşlemleri 25
2.2.1. Fenton Prosesi 26
2.2.2. Termal Alkali ön işlem 27
2.3. MYH ile Çamur Arıtımı ile İlgili Çalışmalar 27
3. MATERYAL ve YÖNTEM 32
3.1. Deneysel Düzenek 32
3.2. Çamur Karakterizasyonu 32
3.3. MYH'nin Aşılanması ve İşletimi 33
3.3.1. MYH'nde optimum direncin belirlenmesi 33
3.3.2. MYH'nin geri devir çamuru ile işletimi 34
3.3.3. MYH'nin Fenton Prosesi ile modifikasyonu 34
3.3.4. MYH'nin termal alkali ön işlem ile modifikasyonu 35
3.4. Elektriksel Parametrelerin Hesaplanması 35
3.5. Kimayasal Analizler 36
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA 37
4.1. Çamur Karakterizasyonu 37
4.2. Optimum Direncin Belirlenmesi 37
4.3. MYH'nin Geri Devir Çamur ile İşletimi 38
4.4. MYH'nin Fenton Prosesi ile İşlem Görmüş Çamurla İşletimi 44
4.5. MYH'nin Termal Alkali Ön İşlem Görmüş Çamurla İşletimi 49
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER 56
KAYNAKLAR 58
ÖZGEÇMİŞ 66

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ÖN ARITILMIŞ ÇAMURUN MİKROBİYAL YAKIT HÜCRELERİ PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Elif GÜMÜŞ

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Özlem DEMİR
Yıl: 2019, Sayfa: 66

Enerji kaynağı olarak kullanılan fosil yakıtlar sadece küresel ısınmaya neden olmakla kalmayıp, önemli çevresel problemler de yaratmaktadır. Enerji talebindeki artış, fosil yakıtların giderek tükenmesi, çevresel konulara olan ilginin artması, araştırmacıları, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması ile ilgili, temiz ve sürdürülebilir enerji üretecek yeni teknolojik proseslere yöneltmektedir. Bu çalışmada, çamurun yüksek organik içeriğe sahip olması avantajından yola çıkılarak, atıksu arıtma tesisinden alınan geri devir çamuruyla mikrobiyal yakıt hücresi işletimi ile hem çamur arıtımı hem de elektrik üretimi gerçekleştirilmiştir. Çamurun parçalanmasındaki hız sınırlayıcı adım olarak bilinen hidroliz aşaması uygulanan Fenton ve termal/alkali gibi ön arıtım yöntemleri ile hızlandırılmaya çalışılmış ve mikrobiyal yakıt hücresi performansı üzerine etkileri araştırılmıştır. Geri devir çamuru ile işletilen mikrobiyal yakıt hücresinde anaerobik bölmedeki çözünüş kimyasal oksijen ihtiyacı ve organik madde giderimleri sırası ile % 53 ve % 64'tür. Fenton Proses uygulanan çamurla işletilen mikrobiyal yakıt hücresinde bu giderimler sırası ile % 59 ve %60 ve termal/alkali mikrobiyal yakıt hücresinde ise sırası ile % 83.3 ve % 85 olarak bulunmuştur. Bu durumda, çözünüş kimyasal oksijen ihtiyacı ve organik madde giderimlerine göre en verimli sistemin termal/alkali mikrobiyal yakıt hücresinde olduğu görülmüştür. 0. 38 mA/cm^2 akım yoğunluğu ile aynı mikrobiyal yakıt hücresi, elektrik üretiminde de en yüksek performansı göstermiştir. Ham geri devir çamur ile işletilen ve Fenton Prosesli çamur ile işletilen mikrobiyal yakıt hücrelerindeki akım yoğunlukları da sırası ile 0.002 mA/cm^2 ve 0.221 mA/cm^2'dir. Sonuç olarak, ön işlem görmüş çamurla beslenen mikrobiyal yakıt hücresi, anaerobik bölmedeki hız sınırlayıcı adımı hızlandırarak organik maddenin parçalanmasını geliştirerek hem çamur arıtımı açısından hem de elektrik üretimi yönünden olumlu sonuçlar elde edilebileceğini göstermiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Mikrobiyal yakıt hücresi (MYH), atık çamur, elektrik üretimi, alkali ön arıtım

ABSTRACT

MSc Thesis

THE INVESTIGATION OF EFFECTS OF PRETREATED SLUDGE ON MICROBIAL FUEL CELL PERFORMANCE

Elif GÜMÜŞ

Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Environmental Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Özlem DEMİR
Year: 2019, Page: 66

Fossil fuels used as energy sources not only cause global warming, but also create significant environmental problems. The increase in energy demand, the depletion of fossil fuels, the increasing interest in environmental issues, and the use of renewable energy sources, are leading researchers to new technological processes that will produce clean and sustainable energy. In this study, based on the advantage of having high organic content of sludge, both sludge treatment and electricity production were realized with microbial fuel cell operation with return sludge taken from wastewater treatment plant. It was tried to accelerate with the pretreatment methods such as Fenton and thermal/alkali which applied the hydrolysis step which is known as speed limiting step in sludge disintegration and its effects on microbial fuel cell performance were investigated. In the microbial fuel cell operated with return sludge, the dissolution in the anaerobic chamber is 53% and 64%, respectively, with chemical oxygen demand and organic matter removal. In the microbial fuel cell operated with sludge applied Fenton Process, these removals were found to be 59% and 60%, respectively in thermal/alkali microbial fuel cells were 83.3% and 85% respectively. In this case, according to the removal of chemical oxygen demand and organic matter, the most efficient system was found to be the thermal / alkali microbial fuel cell. The same microbial fuel cell with a power density of 0.38 mA / cm2 showed the highest performance in electricity generation. The current densities in microbial fuel cells operated with raw return sludge and Fenton Process sludge were 0.002 mA/cm^2 and 0.221 mA/cm^2 respectively. As a result, the microbial fuel cell fed with pretreated sludge showed that both the sludge treatment and the electricity generation direction could be obtained by improving the decomposition of organic matter by accelerating the speed limiting step in the anaerobic chamber.

KEY WORDS: Microbial fuel cell (MYH), waste sludge, electricity generation, alkali pretreatment

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanması sırasında bana rehberlik eden, yardımlarını esirgemeyen ve akademik gelişimime katkı sağlayan danışman hocam sayın Doç. Dr. Özlem DEMİR'e, çalışma düzeneğinin temini konusunda Prof. Dr. Bestamin ÖZKAYA'ya, deneyler esnasında yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Deniz UÇAR, yüksek lisans öğrencileri Müjgan YILMAZ, Yakup ÇAKMAK, Tülay YILMAZ ve Amine YÜCEL'e en içten duygularımla şükranlarımı sunuyorum.

Son olarak öğrenim hayatım boyunca, her zaman arkamda olduğunu bildiğim ve yanımda hissettiğim eşim Doç. Dr. Veysel GÜMÜŞ, babam Prof. Dr. Ahmet UYANIK ve annem Serap UYANIK'a bana gösterdikleri sabır ve sonsuz güven için çok teşekkür ederim.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Bir MYH'sinin çalışma prensibi (Rabaey ve Verstraete, 2005) 9
Şekil 2.2. Anota farklı yollarla elektron aktarımı (A) MYH doğrudan elektron aktarımı (B) MYH aracılı elektron aktarımı (C) MYH dolaylı elektron aktarımı (Schröder ve ark., 2003) 9
Şekil 2.3. (A) Pencereye monte edilen katodun içini kaplayan proton geçirgen bir katmana sahip bir MYH, (B) Plastik bir silindir odasının karşısına yerleştirilmiş bir anot ve katottan oluşan bir MYH, (C) Ve dış katotlu ve grafit granüllerden oluşan iç anotlu boru şeklinde bir MYH (Park ve Zeikus, 2003; Liu ve Logan, 2004; Rabaey ve ark., 2005b; Biryol, 2013) 16
Şekil 2.4. Tipik bir iki-odacıklı MYH'nin sistematik gösterimi (Du ve ark., 2007) 17
Şekil 2.5. MYH'ndeki bir aracının çalışma prensibinin genel gösterimi (Rabaey ve ark., 2011) 18
Şekil 2.6. Nişasta üzerine çalışan bir MYH için (A) Polarizasyon ve (B) güç eğrileri (Logan ve ark., 2006) 22
Şekil 2.7. Bir MYH'nin elektriksel direncinin belirlenmesi için akım kesme tekniğini uygularken zamanla değişen anodik (düz çizgi) ve katodik (kesikli çizgi) gerilim profilleri (Logan, 2008). 24
Şekil 3.1. MYH düzeneğinin fotoğrafı 32
Şekil 3.2. Deneyde kullanılan cihazlar ve malzemeler 33
Şekil 4.1. En uygun direncin belirlenmesi 38
Şekil 4.2.Aerobik bölmedeki $KOİ_T$ ($KOİ_T$_ae) ve Anaerobik bölmedeki $KOİ_T$ ($KOİ_T$_an) değerlerinin zamansal değişimi 39
Şekil 4.3. Aerobik bölmedeki $KOİ_Ç$ ($KOİ_Ç$_aes) ve anaerobik bölmedeki $KOİ_Ç$ ($KOİ_Ç$_ans) değerlerinin zamansal değişimi 40
Şekil 4.4. TKM ve OM değerlerinin zamansal değişimi (Aerobik bölme) 41
Şekil 4.5. TKM ve OM değerlerinin zamansal değişimi (Anaerobik bölme) 42
Şekil 4.6. İşletim süresi boyunca elektrik üretimi (a-mV, b-Güç, c-Akım yoğunluğu) 43
Şekil 4.7. KOİ_ae ve KOİ_an değerlerinin zamansal değişimi (Fenton prosesi) 44
Şekil 4.8. KOİ_aes ve KOİ_ans değerlerinin zamansal değişimi (Fenton prosesi) 45
Şekil 4.9. TKM ve OM değerlerinin zamansal değişimi (Aerobik bölme) (Fenton prosesi) 46
Şekil 4.10. TKM ve OM değerlerinin zamansal değişimi (Anaerobik bölme) (Fenton prosesi) 47
Şekil 4.11. Fenton prosesi sonucunda elektrik üretiminin değişimi (a-mV, b-Güç, c-Akım yoğunluğu) 48
Şekil 4.12. KOİ_ae ve KOİ_an değerlerinin zamansal değişimi 49
Şekil 4.13. KOİ_aes ve KOİ_ans değerlerinin zamansal değişimi 50
Şekil 4.14. TKM ve OM değerlerinin zamansal değişimi (Aerobik bölme) 51
Şekil 4.15. TKM ve OM değerlerinin zamansal değişimi (Anaerobik bölme) 51
Şekil 4.16. Termal alkali ön arıtım sonucunda elektrik üretiminin değişimi (a-mV, b-Güç, c-Akım yoğunluğu) 53

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 2.1. MYH'lerinde kullanılan mikroorganizmalar (Du ve ark., 2007) 10
Çizelge 2.2. MYH'ler tarafından aracı eklenmeden üretilen genel güç çıktısı değerleri (Biryol, 2013). 12
Çizelge 2.3. MYH temel bileşenleri (Biryol, 2013) 13
Çizelge 4.1. Çamur karakterizasyonu.....37
Çizelge 4.2. MYH sistemlerinin anaerobik bölmesindeki çamur özelliklerinin ve bu sistemlerden elde edilen elektrik değerlerinin karşılaştırılması 55

SİMGELER DİZİNİ

$\in_{Cb}$	Kulombik verimlilik
E	Elektrot potansiyeli
e-	Elektron
F	Faraday sabiti
G	Gibbs Serbest Enerjisi
I_c	Sabit dolum akımı
I_d	Boşalım akımı
KOİ	Kimyasal oksijen ihtiyacı
M	Molekül ağırlığı
MYH	Mikrobiyal Yakıt Hücresi
n	reaksiyonda mol başına değiştirilen elektron sayısı
OM	Organik madde
Pt	Platinyum
Q	Reaksiyon bölümü
q	giren akımın hacimsel akış hızı
R	İdeal gaz sabiti
T	Mutlak sıcaklık (^oC)
TKM	Toplam katı madde
V	Voltaj (Volt)
V_{an}	anot odacığındaki sıvı hacmini
W	Güç (Watt)
Δ	Fark
E^0_{emk}	Standard hücre elektro motor kuvveti

1. GİRİŞ

Fosil yakıtlar, artan insan nüfusuna paralel olarak endüstrileşme ve ekonomik büyümeyi sağlamak amacıyla geçen yüzyıldan beri enerji kaynağı olarak dünyada yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu kaynağın bu denli yaygın kullanılması küresel ısınma nedeniyle iklim değişikliğine neden olmakta, ayrıca çok önemli çevre ve sağlık problemlerini de beraberinde getirmektedir. 20. yüzyılda teknolojinin gelişmesi ve modern yaşamın getirdiği gereksinimlerin karşılanması amacıyla enerjiye olan talepte de ciddi artışlar yaşanmakta, ancak fosil yakıtların sınırlı ve tükenmekte olan bir enerji kaynağı olması nedeniyle alternatif enerji kaynaklarına bir yönelim söz konusu olmaktadır. Fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması amacıyla sürdürülebilir ve çevre dostu olarak nitelendirilebilecek yenilenebilir enerji kaynakları üzerinde yapılan araştırmalar dünyada oldukça rağbet görmektedir. Yenilenebilir enerji kaynağı olarak güneş, rüzgâr ve hidroelektrik enerjinin yanında biyoyakıtlar da günümüzde bir alternatif enerji üretim kaynağı olarak kullanılmaktadır.

Biyoyakıtlar, atık biyokütleden elde edilmesi durumunda çok az miktarda karbon salınımı yapmakta ve sera gazı salınımı açısından avantajlı bir durum ortaya koymaktadırlar (Fargione ve ark., 2008). Son zamanlarda Mikrobiyal Yakıt Hücresi (MYH) teknolojisi, organik maddeleri yakıt olarak kullanabilecek ve sürdürülebilir bir teknoloji olarak ortaya çıkmıştır. MYH ve diğer biyoelektrokimyasal sistemler (BES) hem temel, hem de uygulamalı araştırmalarda enerjinin kullanımı ve kirleticin giderilmesinin yanı sıra değerli olan biyo ürün üretimi için gelecek vadeden sürdürülebilir bir platform yaratmaktadır (Nancharaiah ve ark., 2015). Mikroorganizmalar tarafından organik maddelerin oksidasyonundan elektrik üretilmesi aslında 1910'lardan beri bilinen bir teknolojidir. Potter (1911), ekmek mayası *Saccharomyces Cerevisiae*'yı kullanarak 0,3-0,5 mV elektriğin, glikozun oksidasyonu sırasında üretildiğini gözlemlemiştir.

MYH, mikroorganizmaların katalitik reaksiyonu ile biyokimyasal enerjiyi, elektrik enerjisine dönüştürebilen biyo-elektrokimyasal cihazlardır (Oh ve ark., 2014;

Pant ve ark., 2010). Başka bir ifade ile MYH, mikrobiyal ve elektrokimyasal prosesleri birleştiren elektrokimyasal hibrit sistemlerdir (Nancharaiah ve ark., 2015). Sözü edilen MYH sistemleri de yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir çünkü karbon-nötrdürler yani organik maddelerin oksidasyonu sonucu atmosfere sadece kararlı olan karbon salarlar (Gezginci, 2013). Dahası, MYH, glukoz, asetat ve bütirat gibi basit karbonhidratları, evsel atıksu ve çamur gibi kompleks organik bileşikler (Jiang ve ark., 2009) gibi organik maddelerin parçalanmasından oluşan biyokimyasal enerjiyi, mikroorganizmaların katalitik reaksiyonları ile elektrik enerjisine dönüştürürler (Yusoff ve ark., 2013). MYH organik maddelerin sahip olduğu kimyasal enerjiyi, elektrik enerjisine dönüştürmeyi sağlayan reaktörlerden ibarettir (Gezginci, 2013; Taşkan, 2013). Aynı zamanda, atığı enerjiye dönüştürerek atıksu arıtma tesisinin işletim maliyetini dengeleyecek sürdürülebilir bir atıksu arıtımı vadetmektedir (Oh ve ark., 2014). Klasik yakıt hücrelerinin aksine MYH, yüksek enerji eldesi ve makul reaksiyon (Ör: ortam sıcaklığı, normal basınç ve nötr pH) şartları gibi önemli avantajlara sahiptir.

Özellikle evsel atıksu arıtma tesisleri çamurlarının organik içeriğinin fazla olması MYH'nin çamur arıtımı ile birlikte enerji üretimi amacıyla kullanımını işaret etmiştir. MYH'nde biyokütlenin kullanımı çamurun arıtılması için yararlı bir yaklaşım olarak karşımıza çıkmaktadır ve aynı zamanda alternatif bir enerji kaynağı sunmaktadır (Yusoff ve ark., 2013). Başta protein ve karbonhidrat olmak üzere çamur içinde yüksek konsantrasyonda organik madde bulunmaktadır (Dentel ve ark., 2004; Wang ve ark., 2006; Xiao ve ark., 2013; Oh ve ark., 2014). Dentel ve ark. (2004), MYH'de atık aktif çamuru elektrik üretimi için kullanan ilk gruptur. Tekli bölme membran MYH'de anaerobik olarak çürütülmüş çamuru yakıt olarak kullanmış ve 0,065 mA ve 0,517 V maksimum voltaj elektrik akımı elde etmişlerdir. Çamurun doğrudan elektriğe MYH kullanılarak dönüştürülmesi Scott ve Murano (2007) tarafından ortaya konmuştur. Çalışmada, iki bölmeli MYH kullanılarak çamurdan elektrik üretimini amaçlamaktadır. Substrat konsantrasyonu, katot-katolit konsantrasyonu ve anodik pH gibi proses parametrelerinin etkileri gözlenmiştir. MYH içindeki mikroorganizmalar, protein karbonhidrat ve diğer küçük organik moleküller gibi çözünebilir ve kolaylıkla biyolojik olarak parçalanabilir organik maddeleri

substrat olarak kullanırlar (Jiang ve ark., 2009). MYH ve atık çamur arıtımını birleştirmek MYH alanındaki uygulamaları genişletecek ve aynı zamanda gelecekte çamur arıtma problemini çözecek bir avantaj sunmaktadır (Wang ve ark., 2012).

Bununla birlikte, MYH prosesinde enerji üretimi biyokütlenin parçalanma veriminden etkilenmektedir (Bougrier ve ark., 2008; Yusoff ve ark., 2013). Çamur içindeki çoğu organik madde hareketsizdir, böylece, çamurun anaerobik degradasyonunda hız sınırlayıcı adım organik maddelerin hidrolizidir (Jiang ve ark., 2009).

MYH prosesi boyunca biyokütlenin etkili bir şekilde parçalanması, güç üretiminin geliştirilmesi bakımından çok önemlidir. Bu yüzden, çamurdaki yararlı bu ürünleri artırmak ve sonuçta da substrat olarak organik maddelerin kullanım performansını arttırmak açısından bir ön arıtım gerekebilir (Yusoff ve ark., 2013). Kayma gerilmesi, termal enerji, ultrases, alkali kimyasallar ve ozon uygulamalarını içeren bazı yaklaşımların çamur hidrolizini geliştirdiği rapor edilmiştir (Jiang ve ark., 2009). Ultrases ön arıtım (Jiang ve ark., 2010), alkali ön arıtım (Lin ve ark., 1997; Jiang ve ark., 2010; Xiao ve ark., 2013), termal ön arıtım (Xiao ve ark., 2011), ozonlama (Yusoff ve ark., 2013), mikrodalga ile çürütme (Yusoff ve ark., 2013) ve anaerobik çürütme (Xiao ve ark., 2011) gibi ön arıtımı metotları MYH'de çamurdan enerji üretimini geliştirmek için kullanılmaktadır (Oh ve ark., 2014). Xiao ve ark. (2011), 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 parçalayıp, organik maddelerin çözünmesini sağlayarak çözeltide bulunan organik maddelerin artışına bağlıdır (Kim ve ark., 2009; Zhang ve ark., 2010; Oh ve ark., 2014).

1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı

Enerji talebindeki artış ve küresel ısınmanın önüne geçebilecek temiz enerji kaynakları arayışı son zamanlarda en çok üzerinde çalışılan konu haline gelmiştir. Diğer yandan atıksu arıtma tesislerinin en büyük sorunlarından biri olan çamur

problemi de aynı şekilde araştırmacıların en çok üzerinde durdukları konulardan biridir. Ayrıca, atık çamurlardan enerji elde etme konusunda bu iki sorunu birlikte ele alarak ortadan kaldırabilecek bir yaklaşım olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu bağlamda, organik maddeleri kullanabilen, artan enerji ihtiyacını karşılamak üzere sürdürülebilir bir teknoloji vadeden MYH teknolojisini kullanmanın bu amaca bütünüyle hizmet edeceği düşünülmektedir. Bilindiği üzere özellikle evsel nitelikli atıksuları arıtan atıksu arıtma tesislerinde üretilen çamur yüksek organik madde içeriğine sahiptir. Bu içeriği nedeniyle de MYH'nde kullanılabilmesi çok doğaldır. Fakat organik maddelerin hidrolizi hız sınırlayıcı basamak olduğundan bir ön arıtma işlemiyle desteklenmesi verimi arttıracaktır. Bu amaçla, bu çalışmada, MYH, Fenton ve termal/alkali ön arıtıma tabi tutulmuş çamurla işletilmiş ve ham çamurla beslenen MYH ile arasındaki fark çamur azaltımı ve elektrik üretimi açısından değerlendirilmiştir. Bu çalışmanın amaçları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Çalışma, çamur arıtımında MYH'nin kullanımının araştırılması, uygulanabilirliğinin ön arıtım işlemleri ile geliştirilmesi, atık arıtımı ile birlikte elektrik üretmek suretiyle atıktan enerji elde edilmesi amaçlanmıştır.
- MYH, organik madde içeriği yüksek olan kentsel atıksu arıtma tesisi çamuru ile işletilerek çamur arıtımında MYH'nin performansının değerlendirilmesi hedeflenmiştir.
- MYH ile çamur arıtımında elde edilen verim katı madde ve organik madde indirgemesi açısından değerlendirilecek ve mevcut çamur arıtım prosesleri ile karşılaştırılmıştır.
- Çamur arıtımının yanında MYH ile elektrik üretmek de çalışmanın amaçlarından biridir.
- MYH'nin çamur arıtılmasında kullanılmasının dezavantajlarından biri organik maddelerin zor parçalanmasıdır. Bu çalışmada uygulanacak Fenton ve termal/alkali ön arıtma işlemleri ile bu aşamanın kolaylaştırılması amaçlanmıştır. Bir MYH sistemi, iki farklı ön arıtıma tabi tutulmuş çamurla işletilecek ve çamur arıtım verimi ile elektrik üretimi karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. MYH'nin tam ölçekli uygulamalarına geçilmesi için farklı kaynaklardan gelen çamurla, farklı ön arıtma yöntemleri ile, farklı MYH

konfigürasyonlarında ve farklı işletim koşullarında daha fazla sayıda çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışma ile literatüre, farklı ön arıtım yöntemlerini uygulanması ile yenilikçi bir yaklaşım kazandırmak amaçlanmıştır.

Kısacası, bu çalışmada, çamurun yüksek organik içeriğe sahip olması avantajından yola çıkılarak, Şanlıurfa ili Siverek Atıksu Arıtma tesisinden alınan geri devir çamurunun MYH işletimi ile hem çamur arıtımı hem de elektrik üretimi amaçlanmıştır. Çamurun parçalanmasında hız sınırlayıcı adım olarak bilinen hidroliz aşaması uygulanacak Fenton ve termal alkali gibi ön arıtım yöntemleri ile hızlandırılmaya çalışılarak MYH performansının artması hedeflenmiştir. MYH hem çamur arıtımı hem de elektrik üretimi açısından değerlendirilmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Mikrobiyal Yakıt Hücreleri (MYH)

Atıksular, kimyasal ve biyolojik olarak parçalanabilen organik ve inorganik maddeleri içerirler. Atıksuların enerji kullanılarak temizlenmesi veya bertaraf edilmesinin yerine, son yıllarda bu atıklardaki kimyasal potansiyeli kullanarak enerjinin geri kazanımını hedefleyen çalışmalar oldukça hız kazanmıştır. MYH, atıksu ve materyaller içerisinde bulunan organik maddelerin sahip olduğu kimyasal enerjiyi mikroorganizmaların yer aldığı katalitik reaksiyonlar ile elektrik enerjisine dönüştürebilen biyo elektrokimyasal cihazlardır. Bu cihazların rol aldığı süreçlerde elektrik enerjisi karmaşık kimyasal, biyolojik, elektrokimyasal ve elektriksel reaksiyonlar yardımıyla üretilir. Son yıllarda, MYH kullanılarak elde edilen elektrik enerjisi en umut vadeden, verimli, yenilenebilir ve sürdürülebilir alternatif enerji teknolojilerinden birisi olarak kabul edilmiştir.

2.1.1. MYH geçmişi

MYH) teknolojileri, atıksu arıtımı için diğer teknolojilerden tamamen farklı bir yaklaşım içerir. Bu teknolojilerle atıksu işleme sürecinde elektrik enerjisi harcamaktan daha çok, doğrudan elektrik enerjisi üretimi üzerine yoğunlaşılır.

MYH yaklaşımı çok da yeni değildir, bakterilerin elektrik akımı ürettiği ilk kez 1911 yılında Potter tarafından gözlemlenmiştir (Potter, 1911). Bu konudaki ilerlemeler 1960'lı yıllara kadar oldukça yavaş olmuştur (Lewis, 1966). Bugünkü anlamda yakıt hücrelerinde katalizör olarak mikroorganizmaların kullanılması kavramı ilk olarak 1970'li yıllarda çalışılmaya başlanmış ve ilk evsel atıksu arıtımı yapan MYH ise 1991 yılında üretilmiştir. Bununla birlikte, son zamanlarda pratik uygulamalara fırsat sağlayan, geliştirilmiş güç çıkışlı MYH geliştirilmesi ise 1999 yılında gerçekleştirilmiştir.

İlk çalışmalardan elde edilen enerji üretimi oldukça düşük bulunmuş ve teknolojinin atıksu miktarını azaltmada çok etkili olup olmayacağı da belirsizliğini korumuştur. 2004 yılına gelindiğinde bu düşünce değişmiş ve araştırmacılar MYH kullanılarak elektrik elde edilmesi ile atıksu arıtımı arasındaki bağlantıyı ortaya koymuşlardır. Buna göre, MYH kullanılarak evsel atıksu kabul edilebilir oranda temizlenirken, aynı anda elektrik üretilmesinin de mümkün olabileceği gösterilmiştir. Bu çalışmada üretilen elektrik miktarı (26 mW/m^2) düşük olmasına rağmen, daha önce atıksu kullanılarak elde edilen emsal değerlerden yüzlerce, binlerce kat daha yüksek bulunmuştur. 2000'li yılların başında yapılan araştırmalar, deniz çökeltilerinde bulunan organik ve inorganik maddelerin, yeni tip MYH sistemlerini oluşturmak üzere kullanılabileceklerini göstermiştir. Bu çalışmalar, MYH teknolojisinde çok çeşitli substratın, materyalin, malzemenin, sistemin kullanılabileceğini, organik maddelerden bakteriler yardımıyla elektrik enerjisi üretilebileceğini göstermiştir. Patentli bir çalışmada, basitçe anaerobik deniz çökeltilerine bir elektrotun (anot), çökeltilerin üstündeki aerobik bölgeye de bir elektrotun bağlanmasıyla elektrik enerjisinin elde edilebileceği gösterilmiştir.

Bu tür sistemlerin güç seviyeleri genelde nispeten düşük olmasına rağmen, bu konudaki en önemli gelişme Rabaey ve ark. (2003) tarafından yapılmış, MYH'nde glukoz kullanılmasının güç yoğunluğunu yüz kattan daha fazla artırdığı ve dışsal yardımcı kimyasallara olan ihtiyacı da ortadan kaldırdığını gösterilmiştir. (Logan ve ark., 2006) ise evsel, endüstriyel ve diğer atıksuların arıtılması için ölçeklenebilir bir teknoloji geliştirmeye çalışmışlardır. Hali hazırda MYH yöntemiyle atıksulardan üretilebilecek enerji miktarı bir kentin ihtiyaçlarına yetecek kadar büyük olmamakla birlikte, bir arıtma tesisi işletecek kadar büyüktür. Gelişmeler ile bu güç kapasitesini yakalamak ve su altyapı tesislerinin enerji ihtiyaçlarını sürdürülebilir bir şekilde karşılamak mümkün olabilecektir.

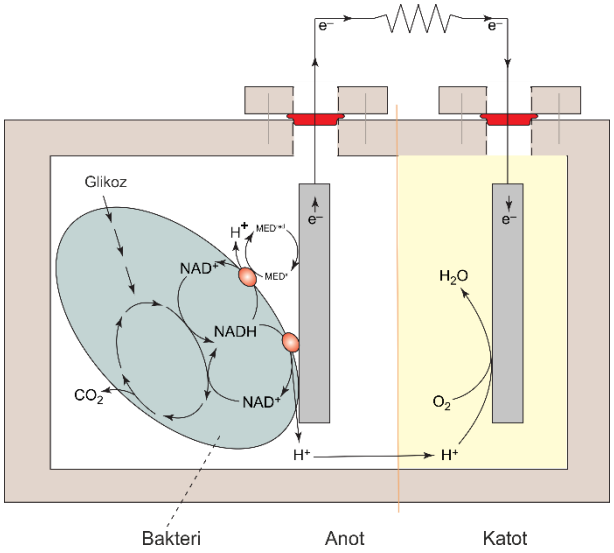
2.1.2. MYH teknolojisinin temel prensipleri

Temel olarak MYH, atıksularda bulunan organik ve inorganik maddeleri oksitlemek ve elektrik akımı üretmek için katalizör olarak bakterileri kullanırlar.

Bakteriler tarafından substratlardan üretilen elektronlar anoda aktarılır ve bir direnç içeren iletken bir materyal ile bağlanmış olan katoda doğru akarlar veya Şekil 2.1'de gösterildiği gibi çalıştırılırlar. MYH substratı anotta oksitleyebilmeli, sürekli veya aralıklı olarak yük akımı sağlayabilmelidir. Aksi takdirde, sistem bir biyo-batarya olarak kabul edilir. Elektronlar, anoda elektron taşıyıcılar veya mekikler ile, direkt membranla ilişkili elektron transferi yoluyla veya bakteriler tarafından üretilen nanoteller veya henüz keşfedilmemiş başka yollarla transfer edilebilirler (Rabaey ve Verstraete, 2005).

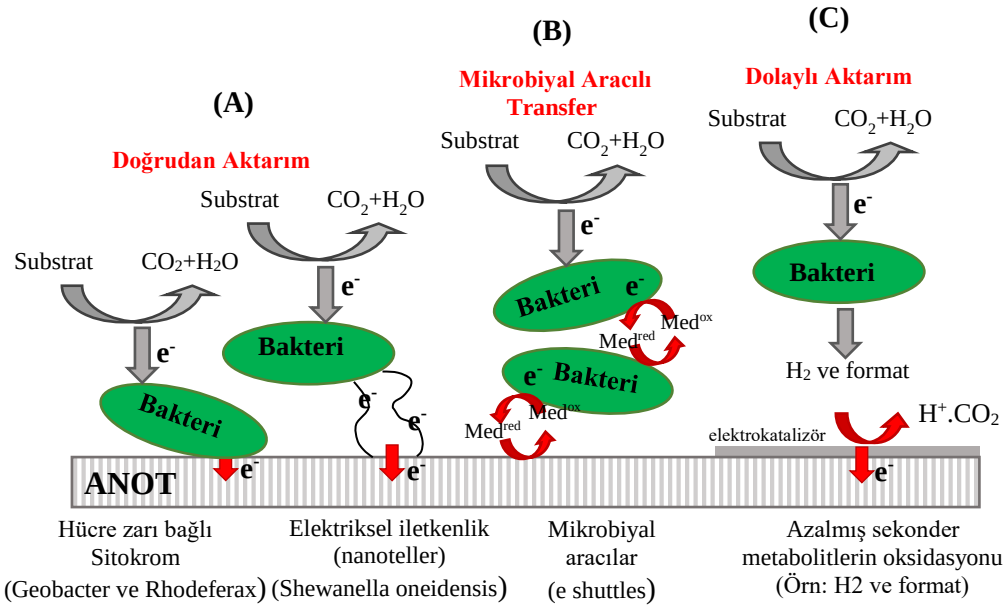
Birçok MYH'nde katoda ulaşan elektronlar, anotta üretilen protonlar ile bir ayırıcı yardımıyla havadan sağlanan oksijeni birleştirir ve sonuçta ürün olarak su elde edilir. Demir (III) siyanür veya Mn (IV) gibi kimyasal oksitleyiciler de değiştirilmeleri veya yenilenmeleri gerekmesine rağmen kullanılabilirler. Örneğin, Mn (IV)'den Mn (II)'ye indirgenebilen Mn gibi metal iyonlarının bulunduğu durumlarda, bakteriler çözünmüş oksijeni kullanarak metalin yeniden oksidasyonunu katalizlemeye yardımcı olabilirler. Günümüzde MYH'leri çok çeşitli malzemeler kullanılarak ve gittikçe artan farklı çeşit yapılandırmalarla imal edilebilmektedir. Bu sistemler sıcaklık, pH, elektron alıcısı, elektrot yüzey alanları, reaktör büyüklüğü ve çalışma süresindeki farklılıkları içeren bir dizi koşul altında işletilebilmektedir (Logan ve ark., 2006).

MYH, tüm mevcut biyo-enerji işlemlerinden farklı olarak ortam sıcaklığında ve hatta düşük sıcaklıklarda verimli bir şekilde çalışabilirler. MYH'den çıkan atık gazın arıtılması gerekmez, çünkü çıkan gaz karbondioksit bakımından zengindir ve normalde faydalı bir enerji içeriği de yoktur. MYH'ler, katotta pasif havalandırma kullanılmadığı sürece, havalandırma için enerji girdisine ihtiyaç duymaz, bu nedenle, elektrik altyapısı olmayan yerlerde yaygın uygulama potansiyeli vardır. Ayrıca enerji ihtiyaçlarını karşılamak için insanlığın kullandığı yakıt çeşitliliğinin de genişlemesine yardımcı olur (Rabaey ve Verstraete, 2005).



Şekil 2.1. Bir MYH'sinin çalışma prensibi (Rabaey ve Verstraete, 2005)

Mikrobiyal elektrik üretiminde, elektronlar doğal bir elektron alıcısı yerine bir elektroda aktarılırlar. Mikroorganizmaların elektronları elektrotlara aktarması için birincil mekanizmalar, Şekil 2.2'de gösterildiği gibi doğrudan aktarım, mikrobiyal aracılı aktarım ve dolaylı aktarımdır.



Şekil 2.2. Anota farklı yollarla elektron aktarımı (A) MYH doğrudan elektron aktarımı (B) MYH aracılı elektron aktarımı (C) MYH dolaylı elektron aktarımı (Schröder ve ark., 2003)

Birçok mikroorganizma, organik maddelerin metabolizmasından türetilen elektronları anoda transfer etme kabiliyetine sahiptir. Bunların bir listesi, substratlarıyla birlikte Çizelge 2.1'de sunulmuştur. Deniz çökeltisi, toprak, atıksu, tatlı su çökeltisi ve aktif çamur bu mikroorganizmalar için zengin kaynaklardır (Niessen ve ark., 2006; Zhang ve ark., 2006).

Metal indirgeyici bakteriler, Fe (III) ve Mn (IV) gibi çözünmeyen elektron alıcılarını kullandıkları çökeltilerin içerisinde yaygın olarak bulunurlar. Hücre zarının dışındaki spesifik sitokromlar, *Shewanella putrefaciens*'yı anaerobik koşullar altında büyütülmesi durumunda elektrokimyasal olarak aktif hale getirir (Kim ve ark., 2002). Aynı durum, MYH'lerde anot yüzeyinde bir biyofilm oluşturduğu ve elektronları asetattan yüksek verimle aktardığı bildirilen *Geobacteraceae* bakteri familyası için de geçerlidir (Bond ve Lovley, 2003).

Çizelge 2.1. MYH'lerinde kullanılan mikroorganizmalar (Du ve ark., 2007)

Bakteriler	Substrat	Uygulamalar
Actinobacillus succinogenes	Glikoz	Nötral kırmızı veya tihonin electron aracısı olarak (Park ve Zeikus, 2000; Park ve Zeikus, 1999; Park ve ark., 1999).
Aeromonas hydrophila	Asetat	Aracısız MYH (Pham ve ark., 2003)
Alcaligenes faecalis, Enterococcus gallinarum, Pseudomonas aeruginosa	Glikoz	Kendinden aracılı MYH'den izole edilmiş 4.31 W m^{-2} maksimum seviyede (Rabaey ve ark., 2004)
Clastridium beijerinckii	Nişasta, glikoz, laktat, melas	Fermente olabilen bakteriler (Niessen ve ark., 2004)
Clostridium butyricum	Nişasta, glikoz, laktat, melas	Fermente olabilen bakteriler. (Niessen ve ark., 2004; Park ve ark., 2001)
Desulfovibrio desulfuricans	Sakkaroz	Sulfat/sulfit aracı olarak. (Ieropoulos ve ark., 2005; Park ve ark., 1997)
Erwinia dissolven	Glikoz	Aracı olarak Demir (III) şelat kompleksleri. (Vega ve Fernández, 1987)
Escherichia coli	Glikoz, sakkaroz	Aracı olarak metilen mavis gerekir (Schröder ve ark., 2003; Ieropoulos ve ark., 2005; Grzebyk ve Poźniak, 2005)
Geobacter metallireducens	Asetat	Aracısız MYH. (Min ve ark., 2005)
Geobacter sulfurreducens	Asetat	Aracısız MYH. (Bond ve Lovley, 2003; Bond ve ark., 2002)
Gluconobacter oxydans	Glikoz	Aracı olarak (HNQ, resazurin or tionin) gerekir. (Lee ve ark., 2002)
Klebsiella pneumoniae	Glikoz	Aracı olarak HNQ biomineralize edilmiş mangan electron alıcısı olarak. (Rhoads ve ark., 2005; Menicucci ve ark., 2006)

Lactobacillus plantarum	Glikoz	Aracı olarak Demir (III) şelat kompleksleri. (Vega ve Fernández, 1987)
Proteus mirabilis	Glikoz	Aracı olarak Thionin (Choi ve ark., 2003; Thurston ve ark., 1985)
Pseudomonas aeruginosa	Glikoz	Aracı olarak piyosiyanin ve fenazin-1-karboksiamid. (Rabaey ve ark., 2004; Rabaey ve ark., 2005a)
Rhodoferax ferrireducers	Glikoz, Ksiloz, sakkaroz, maltoz	Aracısız MYH. (Chaudhuri ve Lovley, 2003; Liu ve ark., 2006)
Shewanella oneidensis	Laktat	Aracı olarak antrakinon-2,6-disulfonat (AQDS). (Ringeisen ve ark., 2006)
Shewanella putrefaciens	Laktat, pruvat, asetat, glikoz	Aracısız MYH. (Kim ve ark., 1999a; Kim ve ark., 1999b); fakat anoda Mn(IV) veya nötral kırmızı gibi bir electron sever ilave edilirse elektrik üretimi. (Park ve Zeikus, 2002)
Streptococcus lactis	Glikoz	Aracı olarak Demir (III) şelat kompleksleri (Vega ve Fernández, 1987)

Karışık bakteri kültürlerini kullanan MYH'ler, tek tür bakteri içeren kültürleri kullanan MYH'lere göre bazı önemli avantajlara sahiptir. Bu avantajlar süreç bozulmalarına karşı daha yüksek direnç göstermeleri, daha yüksek substrat tüketim oranları, daha küçük substrat özgüllüğü gerektirmeleri ve daha yüksek güç çıkışı elde edilmesi olarak sayılabilir (Rabaey ve ark., 2004).

Elektrokimyasal olarak aktif olan karışık bakteri kültürleri, çoğunlukla hem deniz hem de göl çökeltilerinden (Bond ve Lovley, 2003; Tender ve ark., 2002) veya atıksu arıtma tesislerinin aktif çamurlarından zenginleştirilerek elde edilirler (Bond ve Lovley, 2003; Kim ve ark., 2004; Lee ve ark., 2002; Rabaey ve ark., 2004; Tender ve ark., 2002).

Kim ve ark. (2004), elektrokimyasal olarak aktif bakteri popülasyonları arasında azot sabitleyici bakterilerin (örneğin, *Azoarcus* ve *Azospirillum*) bulunduğunu göstermiştir. En yüksek glikoz-güç verimliliği oranı % 80 oranında elde edilmiştir (Rabaey ve ark., 2004). Çizelge 2.2., şimdiye kadar bilinen önemli MYH çalışmalarını özetlemektedir (Rabaey ve ark., 2005b).

Çizelge 2.2. MYH'ler tarafından aracı eklenmeden üretilen genel güç çıktısı değerleri (Biryol, 2013).

Mikroorganizma	Substrat	Anot	Akım [mA]	Güç [mW/m^2]	Kaynak
Shewanella putrefaciens	laktat	Grafit dokuma	0.031	0.19	(Kim ve ark., 2002)
Geobacter sulfurreducens	asetat	grafit	0.4	13	(Bond ve Lovley, 2003)
Rhodoferax ferrireducens	glikoz	grafit	0.2	8	(Chaudhuri ve Lovley, 2003)
	glikoz	Grafit dokuma	0.57	17.4	(Chaudhuri ve Lovley, 2003)
	glikoz	Gözenekli grafit	74	33	(Chaudhuri ve Lovley, 2003)
Mixed seawater culture	asetat	grafit	0.23	10	(Bond ve ark., 2002)
	Sulfit/asetat	grafit	60	32	(Tender ve ark., 2002)
Mixed active sludge culture	asetat	grafit	5	-	(Lee ve ark., 2002)
	glikoz	grafit	30	3600	(Rabaey ve ark., 2003)
	Atıksu	Grafit dokuma	0.2	8	(Kim ve ark., 2004)

2.1.3. MYH'nde kullanılan malzemeler

Tipik bir MYH, bir anodik ve bir proton değişim membranı ile (PDM) ayrılmış bir katodik odacıktan oluşur. Anot odasındaki oksijen, elektrik üretimini engelleyeceğinden, sistemdeki bakteriler oksijenden ayrı tutulacak şekilde sistemin tasarlanması gerekir. Elektrotlar arasında yük transferine izin veren bir membran yerleştirerek iki ayrı odacık oluşturulur ve bakterilerin oksijenden ayrılması sağlanır. Anot odacığında bakteriler büyürken, katot odacığında ise elektronlar odacıktaki çözeltilerle tepkimeye girerler. Tepkime için gereken çözünmüş oksijeni sağlamak için katot odacığından hava geçirilir. Tek odacıklı MYH'de, katodun doğrudan havayla temas etmesi sağlanarak katodik odacığa olan ihtiyaç ortadan kaldırılabilir. Çizelge 2.3'te, MYH bileşenleri ve hücreleri oluşturmak için kullanılan malzemeler özetlenmiştir (Logan ve ark., 2006; Rabaey ve Verstraete, 2005; Bullen ve ark., 2006; Lovley, 2006; Du ve ark., 2007).

Çizelge 2.3. MYH temel bileşenleri (Biryol, 2013)

Parça	Materyal	Önem
Anot	Grafit, karbon-kumaş, graphite keçe, karbon kağıdı, Pt, Pt siyahı, Camsı poröz karbon	Gerekli
Katot	Grafit, Pt, Pt siyahı, Camsı poröz karbon, karbon-kumaş, graphite keçe, karbon kağıdı	Gerekli
Anodik odacık	Cam, polikarbonat, akrilik cam	Gerekli
Katodik odacık	Cam, polikarbonat, akrilik cam	Seçmeli
Proton değişim sistemi	Proton değişim membranı: Nafion, Ultrex, polyethylene.poly (styrene-co-divinylbenzene); tuz köprüsü, porselen septum, veya yalnızca elektrolit	Gerekli
Elektrot katalizörü	Pt, Pt siyahı, MnO_2, Fe^{3+}, polianilin, Elektron aracısı anot üzerine tutturulmuş	Seçmeli

Anot: Reaktör çözeltisi içerisine daldırılan anodik malzemeler iletken, biyo-uyumlu ve kimyasal olarak dayanıklı olmalıdır. Aşındırıcı olmayan paslanmaz çelik ağdan oluşan metal anotlar kullanılabilir, ancak eser miktardaki bakır iyonları bile bakterilere toksik etki gösterdiği için bakır içeren malzemeler kullanılmamalıdır. En kullanışlı elektrot malzemesi, grafit plaka, çubuk veya granül, keçe, kumaş, kâğıt, lifr, köpük ve camsı karbon olarak çeşitli türleri bulunan karbondur. Anot elektrotlarının yapımı için en basit malzemeler, nispeten ucuz, kullanımı kolay ve tanımlanmış bir yüzey alanına sahip oldukları için grafit plakalar veya grafit çubuklardır. Grafit keçe elektrotlarla çok daha büyük yüzey alanlarına ulaşılabilmektedir (Park ve ark., 1999; Gil ve ark., 2003). Akım miktarının toplam iç yüzey alanı ile birlikte karbon keçe> karbon köpük> grafit şeklinde arttığı gösterilmiştir (Chaudhuri ve Lovley, 2003).

Anot performansını arttırmak için farklı kimyasal ve fiziksel stratejiler izlenebilir. Bir çalışmada Mn (IV) ve Fe (III) iyonları kullanılmış ve kovalent olarak bağlanmış nötral kırmızı da anoda elektron transferine aracılık etmesi için görevlendirmiştir (Park ve Zeikus, 2003). Polianilin/Pt kompozitleri gibi elektro-katalitik malzemelerin mikrobiyal metabolitlerin doğrudan oksidasyonuna yardımcı olarak akım oluşumunu iyileştirdiği gösterilmiştir.

Katot: MYH'lerinde iyi performansı nedeniyle ferrisiyanür ($K_3[Fe(CN)_6]$) deneysel elektron alıcısı olarak çok popülerdir (Park ve Zeikus, 2003). Ferrisiyanürün en büyük avantajı, düz karbon katot kullanılması nedeniyle düşük aşırı potansiyel

oluşması ve açık devre potansiyeline yakın bir katot çalışma potansiyeli elde edilmesidir.

Oksijen, yüksek yükseltgeme potansiyeli, kolay bulunabilirliği, düşük maliyeti, sürdürülebilirliği ve kimyasal atık ürün oluşturmaması nedeniyle MYH için en uygun elektron alıcısıdır. Oksijen harcanma hızını arttırmak için genellikle çözünmüş oksijen veya açık hava (gaz difüzyon) katotları için Pt katalizörler kullanılır (Reimers ve ark., 2001; Liu ve ark., 2004; Sell ve ark., 1989). MYH'nin maliyetlerini azaltmak için Pt yüklemesi 0,1 mg cm^{-2} seviyesine kadar düşük tutulabilir (Cheng ve ark., 2006).

Son yıllarda, pirolizlenmiş demir (II) ftalosiyanin veya Cobalt tetrametoksifenilpofirin (CoTMPP) gibi metal içermeyen yeni katalizörlerin MYH'lerinde katot olarak kullanılması önerilmiştir (Cheng ve ark., 2006; Zhao ve ark., 2005; Logan ve Regan, 2006). Bazı çalışmalarda, elektron alıcısı olarak hekzasiyanoferrat ($Fe(CN)_6^{-3}$ ve permanganat (MnO_4^-) iyonları kullanılmıştır (Rabaey ve ark., 2003; You ve ark., 2006). Katodik elektron alıcısı olarak permanganat kullanan çift odacıklı bir MYH'nin diğer elektron alıcılarından daha fazla elektrik gücü ürettiği bildirilmiştir (You ve ark., 2006).

Membran: Anot ve katodu ayıran membranın seçilmesi, iki zıt ilgi alanı arasında seçim yapılmasını gerektirir (Lens ve ark., 2005),

- ✓ Yüksek seçicilik: Proton seçiciliği ne kadar yüksek olursa, biyoyakıt hücresi o kadar iyi çalışır ve membranın direnci düşer.
- ✓ Yüksek kararlılık: Membranların kolloidal ve besin açısından oldukça zengin olan bir ortamda sağlam kalması gerekir.

Nafion™, yakıt hücreleri ve MYH için polimer elektrolit membran (PEM) olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Bond ve Lovley, 2003; Liu ve ark., 2004; Park ve Zeikus, 2000) ve ayrıca protonlar için oldukça seçici olma avantajına da sahiptir. Bununla birlikte, bu membranda bakteri çözeltisinde bulunan amonyağa bağlanan sülfonik asit grupları bulunur. Bu nedenle, bu özellik membran tipinin

seçiciliği için olumlu, fakat kararlılığı için olumsuz bir durum oluşturur. İkinci bir yaklaşım ise, Ultrex ™ gibi daha genel bir katyon değiştirici membran (KDM) kullanılmasıdır (Rabaey ve ark., 2003). Bu tip membran daha büyük bir dirence sahiptir ve daha az seçicidir ancak genellikle daha büyük kararlılık gösterir. Atıksu kullanılacağı zaman batarya MYH'leri için Nafion™ tercih edilecek bir malzeme olacaktır.

Ayrıca seçici bir membran kullanılmayıp, ayırıcı ve açık hava katodu olarak sert bir karbon elektrot da kullanılabilir (Liu ve Logan, 2004). Bu yaklaşım, tatmin edici bir güç çıktısı sağlamakla birlikte, artan oksijen difüzyonu nedeniyle dönüşüm etkinliği azalır (Rabaey ve ark., 2004).

2.1.4. MYH'nin konfigürasyonu

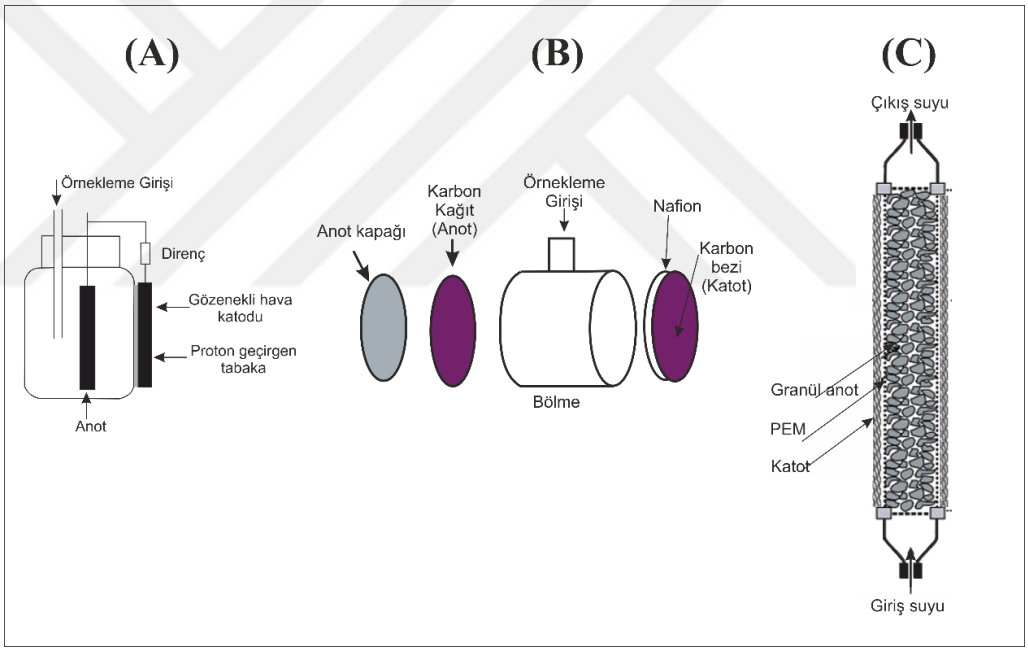
MYH'nde oldukça geniş bir malzeme yelpazesi kullanılmaktadır. Sistemin son tasarımında bu malzemelerin ne şekilde bir araya getirildiği, düzenlendiği ve kullanıldığı reaktör mimarisi olarak adlandırılır. Bu mimari, sistemin güç çıkışını, Coulombic etkinliğini, kararlılığını, ömrünün uzunluğunu, fiyatını ve sonuçta nasıl bir performans göstereceğini belirler. Organik maddelerin mikrobiyal oksidasyonuna dayalı elektrik üretimi için tek veya çift odacıklı MYH reaktörleri tasarlanabilir (Watanabe, 2008).

2.1.4.1. Tek-odacıklı MYH sistemleri

Tek odacıklı MYH, daha basit tasarımlar yapılmasını ve maliyetten tasarruf edilmesini sağlarlar. Bu sistemler tipik olarak, sadece tek bir anodik odadan oluşur ve katodik odacığın havalandırılmasına da gerek duyulmaz. Tek odacıklı MYH ilk olarak, içsel proton geçirgenliği olan porselen tabakalı Fe^{3+} grafit katodu geliştiren Park ve Zeikus tarafından gösterilmiştir. Araştırmacılar Şekil 2.3'te gösterildiği gibi, doğrudan havaya maruz kalan gözenekli bir hava katoduyla birleştirilmiş bir dikdörtgen anot odacığındaki bir anottan oluşan tek odacıklı bir MYH tasarlamışlardır. Protonlar, anottaki çözeltinden gözenekli hava katoduna transfer edilirler (Park ve Zeikus, 2003).

Liu ve Logan (2004), plastik bir silindir odacığın içine yerleştirilmiş bir anot ve dışına yerleştirilmiş bir katottan oluşan bir MYH tasarlamışlardır. Şekil 2.3, MYH biyoreaktörünün laboratuvar prototipinin şemasını göstermektedir.

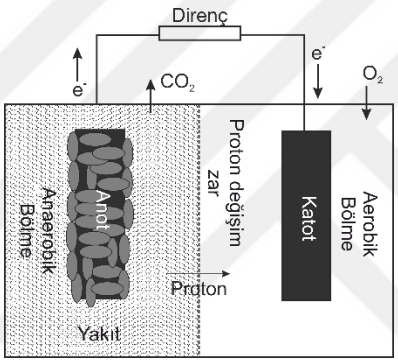
MYH'leri için uygun olan bir oksijen-geçirgen hava-katod membranı Liu ve Logan (2004) tarafından geliştirilmiş ve yaygın olarak kullanılmıştır. Anot, normal karbon kağıdından yapılmıştır. Katod, polimer elektrolit membranı (PEM) doğrudan esnek bir karbon kumaş elektrot üzerine bağlayarak imal edilen bir karbon elektrot/PEM düzeneği veya PEM içermeyen tek başına bir sert karbon kağıdıdır (Liu ve Logan, 2004; Cheng ve ark., 2006). Dış katodlu ve grafit granül kullanan bir iç anotlu tüp şeklindeki MYH sistemi de Şekil 2.3'de gösterilmiştir (Rabaey ve ark., 2005b).



Şekil 2.3. (A) Pencereye monte edilen katodun içini kaplayan proton geçirgen bir katmana sahip bir MYH, (B) Plastik bir silindir odasının karşısına yerleştirilmiş bir anot ve katottan oluşan bir MYH, (C) Ve dış katotlu ve grafit granüllerden oluşan iç anotlu boru şeklinde bir MYH (Park ve Zeikus, 2003; Liu ve Logan, 2004; Rabaey ve ark., 2005b; Biryol, 2013)

2.1.4.2 İki-odacıklı MYH sistemleri

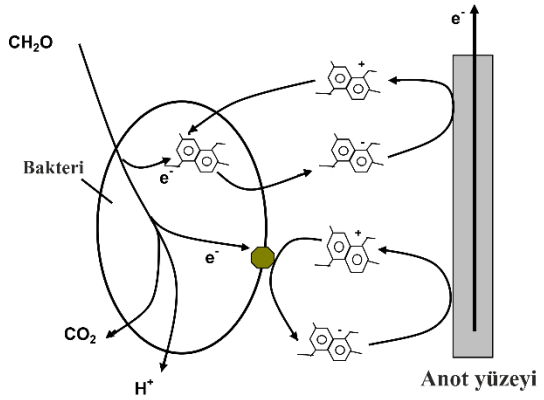
Tipik MYH, herhangi bir tür sıvı ile aşılanabilen iki ayrı odacıktan oluşur. Şekil 2.4'te gösterilen bu tür iki odacıklı bir reaktörde, anaerobik anot odacığı ve bir aerobik katod odacığı genellikle Nafion gibi bir polimer elektrolit membran (PEM) ile birbirinden ayrılmıştır (Oh ve Logan, 2006). Bu tür MYH iki şekilde çalıştırılabilir: Bunlar, elektrotlara elektron aktarımını sağlamak için yapay elektron aracıları ilave etmek suretiyle elektrik üretimi ve aracısız MYH olarak tanımlanan ve eksojen kimyasal ilaveler kullanmadan yapılan elektrik üretimidir (Bond ve Lovley, 2003; Chaudhuri ve Lovley, 2003; Liu ve ark., 2004).



Şekil 2.4. Tipik bir iki-odacıklı MYH'nin sistematik gösterimi (Du ve ark., 2007)

Yükseltgenmiş durumda olan aracılar, Şekil 2.5'te gösterildiği gibi membrandan geçen elektronları yakalayarak kolaylıkla indirgenebilirler. Aracılar daha sonra membran boyunca hareket ederek elektronları anoda bırakırlar ve anot odacığında bulunan çözelti yığınında tekrar yükseltgenmiş hale dönüşürler. Bu döngüsel işlem elektron transferini hızlandırarak güç çıkışını arttırır. İyi olarak tanımlanan aracıların temel özellikleri aşağıda verilmiştir (Ieropoulos ve ark., 2005),

(1) Hücrede kullanılan membrandan kolayca geçebilmesi,
(2) Elektron taşınma sürecinde elektron taşıyıcılarından elektronu kapabilmesi,
(3) Yüksek elektrot reaksiyon hızı,
(4) Anot çözeltisinde iyi çözünürlük,
(5) Biyobozunur olmaması ve mikroorganizmalara karşı toksik olmaması,
(6) Düşük maliyetli olması (Du ve ark., 2007).



Şekil 2.5. MYH'ndeki bir aracının çalışma prensibinin genel gösterimi (Rabaey ve ark., 2011)

2.1.4.3 Biyo-katot MYH sistemleri

Geleneksel MYH, bir PEM ile ayrılan anot ve katot odacıklarından oluşan iki odacıklı bir sistemdir. (Hu, 2008).

Biyo-katotlar iki tipte olurlar: (i) aerobik biyo-katodlar, yükseltgen olarak oksijeni ve Mn (II) veya Fe (II) gibi geçiş metali bileşiklerinin yükseltgenmesine yardımcı olmak amacıyla da mikroorganizmaları kullananlar, (ii) anaerobik biyo-katotlar, nitrat, sülfat, demir, mangan, selenat, arsenat, idrar, fumarat ve karbondioksit gibi bileşikleri nihai elektron alıcıları olarak kullananlar (Sharma ve Kundu, 2010).

Biyo-katotlar ayrıca atıksu arıtılması sırasında nitrat bileşiklerini azaltarak azot giderme işlemine (denitrifikasyon) dahil edilebilirler. MYH'lerde denitrifikasyon kullanılmasıyla, denitrifikasyon biyoreaktörlerine eklenen etanol, metanol veya hidrojen gazı gibi dışsal elektron vericiler yerine, organik atıkların yükseltgenmesinden gelen elektronları kullanılabilirler (He ve ark., 2006).

2.1.5. MYH'nde güç üretimi

Termodinamik olarak uygun koşulların olması durumunda, MYH elektrik üretilebilir. Bir MYH'nde gerçekleşen tüm toplam reaksiyonlar, reaksiyondan elde

edilebilecek maksimum işin bir ölçüsü olarak Joule (J) cinsinden Denklem (2.1)'de verilen Gibbs serbest enerjisine dayanarak belirlenir. (Logan ve ark., 2006).

$$\Delta G_r = \Delta G_r^0 + RT \ln(\Pi) \tag{2.1}$$

Burada,

ΔG_r : Tepkime koşullarındaki Gibbs serbest enerjisi (J), ΔG_r^0 : Standart koşullardaki Gibbs serbest enerjisi (J), (298.15 K, 1 atm basınç, ve 1 M derişimde tüm türler için), R : İdeal gaz sabiti (8.31447 J mol^{-1} K^{-1}), T : mutlak sıcaklık (^oK), Π : aA + bB $\rightarrow$ cC + dD şeklindeki bir tepkime için herhangi bir andaki $\Pi = \frac{a_C^c a_D^d}{a_A^a a_B^b}$ olarak aktifliklerin oranını (birimsiz) gösterir (Logan ve ark., 2006).

Logan ve ark. (2006) Denklem 2.2'de verildiği gibi, reaksiyonun, katod ve anot arasındaki potansiyel farkı olarak tanımlanan toplam hücre elektromotor kuvveti (emk), E_{emk} (V) kullanılarak değerlendirilmesinin MYH hesaplamaları için daha uygun olduğunu ifade etmiştir.

$$W = E_{emk} Q = -\Delta G_r \tag{2.2}$$

Burada $Q = nF$, n, reaksiyonda mol başına değiştirilen elektron sayısını F, Faraday sabitini (9.64853×10^4 Culomb/mol) gösterir.

Elektromotor kuvveti Eşitlik (2.3) ve (2.4)'ten hesaplanabilir,

$$E_{emk} = \frac{-\Delta G_r}{nF} \tag{2.3}$$

Eğer tüm reaksiyonlar standart koşullarda değerlendirilirse, $\Pi = 1$, olur ve

$$E_{emk}^0 = \frac{-\Delta G_r^0}{nF} \tag{2.4}$$

şeklinde hesaplanır. Burada E^0_{emk} (V), standard hücre electromotor kuvvetidir. Tüm reaksiyonun potansiyel cinsinden değeri aşağıdaki gibi yazılabilir,

$$E^0_{emk} = E^0_{emk} - \frac{RT}{nF}\ln(\Pi) \tag{2.5}$$

Bu hesaplanan bu E_{emk} hücre voltajı için üst sınırı gösterir, MFC'den elde edilen gerçek potansiyel ise, çeşitli potansiyel kayıplar nedeniyle daha düşük bulunacaktır. Standart Elektrot Potansiyelleri, MYH'de meydana gelen reaksiyonlar, yarı hücre reaksiyonları veya anot ve katotta ayrıca meydana gelen reaksiyonlar açısından analiz edilebilir. Hesaplama hakkında daha fazla bilgi verilen kaynakta bulunabilir (Logan ve ark., 2006). Örneğin, MYH'sinde bir substrat olan asetatın yükseltgenmesi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$2HCO_3^- + 9H^+ + 8e^- \longrightarrow CH_3COO^- + 4H_2O$$

$$E_{an} = E^0_{an} - \frac{RT}{8F}\ln\left(\frac{\left[CH_3COO^-\right]}{\left[HCO_3^-\right]^2\left[H^+\right]^9}\right) \tag{2.6}$$

Reaksiyonun elektron alıcısının oksijen olması durumunda teorik katot potansiyeli, E_{kat},

$$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O \tag{2.7}$$

$$E_{cat} = E^0_{cat} - \frac{RT}{4F}\ln\left(\frac{1}{pO_2[H^+]^4}\right) \tag{2.8}$$

Çeşitli katolitler kullanılmış ve bu farklı katolitler için teorik katot potansiyelinin 0.361 ila 0.805 V arasında değiştiği gözlenmiştir. Hücrenin elektromotor kuvveti aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$E_{emf} = E_{cat} - E_{an} \quad (2.9)$$

Burada eksi işareti, anot potansiyelinin indirgeme reaksiyonu olarak tanımlanmasının bir sonucudur.

Açık Devre Voltajı (ADV), akım yokken bir süre sonra ölçülebilen hücre voltajı olarak tanımlanır. Teorik olarak, açık devre voltajı hücrenin elektromotor kuvvetine yaklaşmalıdır. Bununla birlikte, uygulamada açık devre voltajı, çeşitli potansiyel kayıpları nedeniyle hücre elektromotor kuvvetinden önemli ölçüde daha düşüktür. Örneğin, tipik oksijen kullanan bir katodun ölçülen potansiyeli pH 7'de yaklaşık 0,2 V bulunur (Logan ve ark., 2006).

2.1.5.1. Nernst eşitliği

Potansiyometri tekniği, elektrik akışı olmayan koşullar altında hücre potansiyellerinin ölçümünü içerir. Bir elektrokimyasal hücrede, indikatör ve referans elektrotlar arasına bir voltmetre gibi yüksek dirençli bir cihaz yerleştirilirse iki yarı hücre arasında hiçbir akım geçmez. İki elektrot arasında var olan potansiyel farkını ölçmek ancak bu koşullar altında mümkündür. Tüm reaksiyona katılan bileşenlerin aktifliğinin 1 olduğu hücreler için ölçülen hücre potansiyeline (kavşak potansiyeli etkisi ihmal edilerek) hücrenin standart potansiyeli, E^0 denir.

Potansiyometrinin gerçek uygulamalarında, reaksiyona katılan bileşenlerin aktifliği nadiren bire eşittir ve ölçülen hücre potansiyelleri hesaplanan E^0 tablo değerlerinden farklılaşır. Denge koşulları altında redoks sistemlerinin tanımlanması için kullanılan temel eşitlik Nernst eşitliğidir (Biryol, 2013).

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF \ln Q} \quad (2.10)$$

Burada,

R: İdeal gaz sabiti (8.3145 J $K^{-1}mol^{-1}$), T : mutlak sıcaklık (^oK),

F : Faraday sabiti (9.6485x10^4 ^{o}Coulomb/mol),

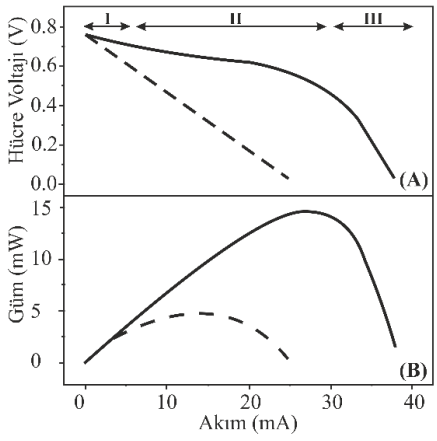
n: Yarı reaksiyonda aktarılan elektron sayısı, ve $Q: aA + bB \rightarrow cC + dD$ şeklindeki bir tepkime için herhangi bir andaki $Q = \frac{[C]^c[D]^d}{[A]^a[B]^b}$ olarak derişimlerin veya kısmi basınçların oranını gösterir (Shriver ve Atkins, 2006).

Reaksiyona katılan bileşenlerin derişimi arttığında ve Q değeri azaldığında, E değeri de artar. Reaksiyonun sağ tarafa doğru gitme eğilimi vardır. Hücre potansiyeli, E, sadece Q eşittir 1 olduğunda E^0 ile aynı değeri alacaktır. Nernst denkleminin 25 °C için adi logaritmik formu aşağıdaki gibi yazılır,

$$E = E^0 - \frac{0.059}{n \ln Q} \tag{2.11}$$

2.1.5.2 Polarizasyon ve güç yoğunluğu eğrileri

Polarizasyon Eğrileri, MYH'lerin analizi ve karakterizasyonu için oldukça güçlü görsel bir araçtır. MYH voltajını, akımın (yoğunluğun) bir fonksiyonu olarak gösterirler, Şekil 2.6'da nişasta üzerinde çalışan MYH için bir örnek verilmiştir.



Şekil 2.6. Nişasta üzerine çalışan bir MYH için (A) Polarizasyon ve (B) güç eğrileri (Logan ve ark., 2006)

Polarizasyon eğrileri, anot, katot veya tüm MYH'leri için bir potansiyostat kullanarak kaydedilebilir. Eğer bu cihaz laboratuvarda mevcut değilse, değişken dış yüklemeleri ayarlamak için değişken bir direnç kutusu kullanılabilir. Yükleme periyodik olarak azaltılarak (veya kısa devrede başladığında artırılarak) voltaj ölçülür ve akım Ohm kanunu kullanılarak hesaplanır. Bir polarizasyon eğrisi elde etmek için değişken bir dış direnç kullanıldığında, akım ve potansiyel değerleri, sadece yalancı-yatışkın-koşullar sağlandığında alınması gerekir.

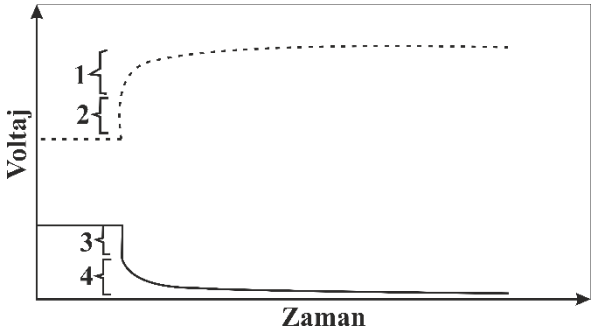
Bu yalancı-yatışkın-koşulların sağlanması, sisteme ve dış dirence bağlı olarak birkaç dakika veya daha fazla sürebilir. Bu koşullar sadece geçici bir yatışkın koşuldur, çünkü zaman uzun olduğunda reaktördeki substrat derişimi anottaki substrat talebine bağlı olarak (sürekli olarak takviye edilmediği sürece) değişecektir. Bu da sırasıyla voltaj ve akım üzerine substrat/ürünler kütle transfer oranını etkileyecektir. Polarizasyon eğrileri genellikle üç bölgeye ayrılabilir,

(i) Voltajda, sıfır akımda açık devre voltajından başlayan dik bir düşüş gözlenmektedir: Bu bölgede aktivasyon kayıpları baskındır,
(ii) Daha sonra voltajda akımla doğrusala yakın olan yavaş bir düşüş gözlenir: Bu bölgede elektriksel (ohmik) kayıplar baskındır,
(iii) Daha yüksek akımlarda voltajın hızlı bir şekilde düşmesi söz konusudur: Bu bölgede derişim kayıpları (kütle aktarım etkileri) baskındır.

Polarizasyon eğrisinin doğrusal olması durumunda, MYH'nin iç direncinin ($R_{iç}$) değeri, doğrunun eğimine eşit olacağından iç direnç polarizasyon eğrisinden kolaylıkla hesaplanabilir. Hesaplamalar hakkında daha fazla bilgi Logan ve ark. (2006)'da bulunmaktadır.

Potansiyostat ile elektrotun potansiyeli veya akımı, belirli koşullar altında elektrodun elektrokimyasal cevabını incelemek amacıyla kontrol edilebilir. Potansiyostat tipik olarak üç-elektrotlu-düzen ile çalıştırılır, bu elektrotlar, bir çalışma elektrodu (anot veya katot), bir referans elektrot ve bir karşı elektrottur. (Bard ve ark., 2001). Potansiyostat, polarizasyon eğrileri elde etmek veya akım kesme tekniğini

kullanarak elektriksel direnci belirlemek için iki elektrotlu bir düzende de çalıştırılabilir (Şekil 2.7) (Larminie ve ark., 2003; Logan, 2008).



Şekil 2.7. Bir MYH'nin elektriksel direncinin belirlenmesi için akım kesme tekniğini uygularken zamanla değişen anodik (düz çizgi) ve katodik (kesikli çizgi) gerilim profilleri (Logan, 2008).

2.1.5.3 Kulombik verimlilik

Kulombik verimlilik (C), tüm substrat tüketimi akım ürettiğinde, gerçekte substrattan anoda aktarılan tüm kulombların, mümkün olan tüm kulomblara olan oranı olarak tanımlanabilir. Kulombik verimlilik belli bir zaman aralığında geçen akım birleştirilerek belirlenebilir, böylece, kesikli-beslemeli modda çalışan bir MYH için belirli bir zaman dilimi, t_b, boyunca değerlendirilen kulombik verimlilik, C_b, aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\in_{Cb} = \frac{M \int_0^{t_b} Idt}{Fbv_{An}\Delta KO\dot{I}} \tag{2.12}$$

Burada M, oksijenin molekül ağırlığını, F, Faraday sabitini, b=4, bir mol oksijen için değiştirilen elektron sayısını, V_{an}, anot odacığındaki sıvı hacmini ve ΔKOİ, t_b zaman aralığında KOİ'de meydana gelen değişmeyi gösterir. Sürekli akım sistemlerinde, yatışkın koşullar altında, aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\in_{Cb} = \frac{MI}{Fbq\Delta KO\dot{I}} \tag{2.13}$$

Burada q, giren akımın hacimsel akış hızı ve ΔKOİ, giren ve çıkan akımın KOİ'leri arasındaki farktır (Logan ve ark., 2006).

Kulombik verimlilik bir elektrokimyasal sistem içindeki elektron transferinin etkinliğini gösterir. Aşağıdaki formül kullanılarak da hesaplanabilir,

$$CE = \frac{\int_0^t I_d dt}{\int_0^t I_c dt} \tag{2.14}$$

Burada, I_d boşalım akımı, I_c ise birçok işlemde sabit olan dolum akımını gösterir.

Kulombik verimliliğin artırılması, biyo-elektrokimyasal sistemlerde en önemli zorluklardan biridir, çünkü ekonomik olarak uygulanabilir bir süreç oluşturmak için organik substrattan elde edilebilecek mümkün olan en fazla sayıdaki elektronun ürünlere aktarılması gerekir (Hamelers ve ark., 2010).

Bir MYH'ndeki elektriksel kayıplar (veya elektriksel polarizasyon), hem elektronların elektrotlara ve ara bağlantılara akışına karşı direnci, hem de katyon-değiştirici-membran (CEM, mevcutsa) ve anodik ve katodik elektrolitler yoluyla iyonların akışına karşı direnci içerir. Bir yükseltgenme/indirgenme reaksiyonu için gerekli olan aktivasyon enerjisi nedeniyle, elektronların, elektrot yüzeyinde reaksiyona giren bir bileşikten veya bir bileşiğe aktarılması sırasında aktivasyon kayıpları meydana gelebilir. Bakteriyel yüzeyde, Şekil 2.8'de gösterildiği gibi çözeltideki bir aracı olarak veya katotta reaksiyona giren nihai elektron alıcısı olarak bulunabilir (Logan ve ark., 2006).

2.2. Çamur Ön Arıtım İşlemleri

Hızlı kentleşme, dünyadaki atıksu arıtma tesislerinin sayısında artışa neden olmaktadır (Shehu ve ark., 2012; Kim ve ark., 2013). Aktif çamur işlemi, büyük miktarda aşırı çamur üretimine rağmen atıksu arıtımı için yaygın olarak

kullanılmaktadır (Kim ve ark., 2013). Bununla birlikte, çamurun işlenmesi ve bertarafı, bir atıksu arıtma tesisinin toplam işletme maliyetinin % 50'sine tekabül eden pahalı bir işlemdir. Bu tür çevresel ve ekonomik kaygılar nedeniyle, çamur azaltma, çamur arıtma ve bertarafı ile ilgili popüler bir konu haline gelmiştir (Kim ve ark., 2013).

Çoğu atıksu arıtma tesisinde, çamurun azaltılması için anaerobik ve aerobik çürütme yaygın olarak kullanılmaktadır. Anaerobik çürütme, atık aktif çamurun arıtımı ve biyogaz üretimi için en yaygın olarak kabul edilen yöntemdir. Bu işlem aynı zamanda % 40–50 oranında çamur azaltmayı da sağlamaktadır (Bougrier ve ark., 2006; Kim ve ark., 2013). Büyük organik moleküllerin hidrolizi, anaerobik çamur arıtımının hız sınırlayıcı aşamasıdır. Çamur, çürütülebilirliğini arttırmak için düşük biyolojik parçalanma oranını hızlandıran dezentegrasyon yöntemi adı verilen bir ön işlem geliştirilmiştir (Chang ve ark., 2011). Kısacası, çürütme sürecini hızlandırmak için, çamur ön arıtım süreci olarak parçalanma geliştirilmiştir (Kaynak ve Filibeli, 2008).

Çamur parçalanması, hücre duvarının bozulmasını ve hücre dışı ve hücre içi madde salınımını sağlar (Zhang ve ark., 2011; Gong ve ark., 2015). Mekanik, akustik, kimyasal, fiziksel, termal ve biyolojik işlemler parçalanma yöntemi olarak kullanılmıştır. Ayrıca, sinerjistik etkiler için bu yöntemlerin kombinasyonları da uygulanmaktadır (Ferrer ve ark., 2008).

2.2.1. Fenton Prosesi

Fenton Prosesi, hidrojen peroksitin oksitleyici etkisi ve demir (II) tuzunun katalizörlüğünde gerçekleşen bir ileri oksidasyon prosesidir. Atıksu arıtımında kullanımı oldukça yaygın olan bu prosesin son yıllarda çamur arıtımı amacıyla kullanımı da gündeme gelmiştir. Bu prosesin kullanımı ile arıtma çamurlarının su verme özelliklerinin geliştirildiği bilinmektedir (Neyens ve ark., 2003; Dewil ve ark., 2005). Bunun yanı sıra laboratuvar ölçeğinde yapılan çalışmalarda, Fenton Prosesi kentsel nitelikli bir arıtma çamuruna uygulanmış artan hidrojen peroksit dozuna bağlı

olarak sıvı fazda kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), azot, fosfor değerlerinin arttığı, Fenton Prosesi'nin çamur dezentegrasyon derecesini artırdığı ve çamurun anaerobik çürümesi öncesinde bir ön arıtma işlemi olarak kullanıldığında stabilizasyonun derecesini arttıracağı belirlenmiştir. Son yıllarda yapılan çalışmalar Fenton Prosesi'nin arıtma çamuru dezentegrasyonu amacıyla kullanılabileceğini göstermiştir Fenton prosesini arıtma çamuru dezentegrasyonu amacıyla uygulamış; en yüksek dezentegrasyon derecesi (%25,2), asidik koşulda (pH=3), 0.067 g Fe(II)/ g H_2O_2 oranında ve 60 g H_2O_2 / kg KM konsantrasyonunda elde edilmiştir. Bu uygulama, mezofilik koşullarda gerçekleştirilen anaerobik çürüme işleminde ham çamura oranla % 44 daha fazla metan gazı üretimine olanak sağlamıştır (Kaynak ve Filibeli, 2008).

2.2.2. Termal Alkali ön işlem

Yüksek verimli ve basit uygulama avantajlarına sahip en pratik yöntemlerden biri NaOH eklenerek alkali işlemdir (Li ve ark., 2012). Alkali muamele için, alkali dozajı ve reaksiyon süresi çamur parçalanmasında önemli etkiye sahiptir (Zhang ve ark., 2012). Alkali işlem, gerekli alkali ve enerjiyi azaltmak için genellikle ısıl işlemle birleştirilir (Shehu ve ark., 2012). Ayrıca, anaerobik çürütmenin verimliliğini arttırmak için çamura alkali ve yüksek basınçlı homojenizasyon kombinasyonunun ön uygulaması yapılabilir (Fang ve ark., 2014). Termo/alkali işleminin atık aktif çamur parçalanabilirliği üzerindeki sinerjistik etkisi çeşitli çalışmalarda incelenmiştir. Termokimyasal yöntemler, termal ve alkali koşullandırma yöntemlerinin avantajlarını birleştirmektedir; yani, termal işlemdeki sıcaklık ve alkalin koşullandırma yöntemindeki alkali dozajını azaltılmaktadır; Bu aynı zamanda çamur arıtma süresini de kısaltır (Wang ve ark., 2016).

2.3. MYH ile Çamur Arıtımı ile 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 biyokütlenin yıkımı gerçekleşir. Bu yüzden, sadece çözünmüş kimyasal oksijen

ihtiyacı ($KOİ_ç$) veya benzer faktörler parçalanmayı belirlemek için yeterli değildir. Toplam KOİ ($_{KOİT}$) ^{giderimi} ve uçucu askıda katı (UAKM) yıkım hızı, çamur parçalanma verimini göstermek için önerilebilir. Tabi 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 lizizine yola açacak bir prosestir. 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 $KOİ_ç$ gibi avantajlar sunmaktadır. Bu nedenle, anaerobik prosesteki hız sınırlayıcı adım olarak bilinen hidrolizin hızlandırılması, mikrodalga işleminin uygulanması ile başarılabilir. Mikrodalga ile ön arıtıma tabi tutulmuş çamur, bakteri büyümesi için karbonhidrat, protein ve yağ gibi, kolay biyolojik olarak parçalanabilen bileşiklere dönüşür.

Ghadge ve ark. (2015)'in yaptığı çalışmada atık aktif çamur çift bölmeli MYH'da aniyodik bölmede çürütülmüştür. MYH'nin performansı oksijeni (MYH-1) ve hipokloriti (MYH-2) katyonik elektron alıcısı olarak kullanmak suretiyle değerlendirilmiştir. Hipokloritin katolit olarak kullanılması sonucunda oksijenin kullanılması ile elde edilen güç üretiminin (4.2 W/m^3) iki katı olan 8.7 W/m^3'lük bir güç üretimi sağlanmıştır. Çamurun toplam KOİ'si MYH-1 ve MYH-2 iki için sırasıyla % 65.4 ve % 84.7 oranında azalmıştır. Toplam ve uçucu askıda katı indirgenmesi MYH-2 de (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. Hipklorit daha iyi bir katyodik elektron alıcı olarak görev yapmış ve 8 günlük alıkonma süresi içinde hızlı bir çamur çürütme sağlayarak MYH'de enerji üretimini arttırmıştır.

Jiang ve ark. (2009), potasyum ferrisiyanidi elektron alıcı olarak kullanıp oluşturdukları 2 bölmeli MYH'yi aşırı çamuru parçalamak ve enerji üretmek için kullanmışlardır. Stabil elektrik enerjisi sürekli 250 saatlik işletim boyunca elde edilmiştir. Çamurun giriş $KOİ_T$'si 10850 mg/L iken, % 46.4 azalmıştır. MYH de güç üretimi substrat konsantrasyonu, katot elektrolit konsantrasyonu ve aniyodik pH gibi proses parametrelerine büyük ölçüde bağlı değildir. Bununla birlikte, MYH deki güç üretimi, çamurun $KOİ_Ç$ içeriğine sıkı sıkıya bağlıdır. Dahası, çamurun ultrasonik ön arıtımı organik madde çözünürlüğünü hızlandırmış ve böylece de MYH'de $KOİ_T$ giderim hızı artmıştır fakat güç üretimi önemli ölçüde artmamıştır.

Jiang ve ark. (2011)'nın yaptığı çalışmaya göre MYH, $KOİ_T$ giderim hızı ve derecesi ile ilgili, özellikle çamura ultrases uygulandığı zaman etkili bir çamur arıtma ünitesi olabilir. Bu çalışmada, MYH öncesi ve sonrasında, ön artıma basamağı olarak ultrases uygulamadan ve uygulamak koşuluyla, çamur karakterize edilmiştir. 5-günlük elektrik yüklü MYH işletimden sonra ham çamurda ve >0,6 W/mL ultrases ile ön arıtımdan sonra kontrol sistemine kıyasla (klasik anaerobik çürütme testi) sırasıyla %11.3'ten %19.2'ye, ve % 25'ten % 57'ye $KOİ_T$ gideriminde artış görülmüştür. Ultrases ön arıtımla salınan aromatik proteinler, çözünmüş mikrobiyal yan ürünler, karboksilik bileşenler, alifatik bileşenler, hidrokarbon ve karbonhidrat materyalleri tanımlanmıştır.

Yusoff ve ark. (2013)'nın yaptıkları çalışmada, çamurun farklı yöntemlerle ön arıtımının MYH'de elektrik üretimine etkileri araştırılmıştır. Ön arıtımın, özellikle de mikrodalga ile ön arıtımın MYH'de önemli bir elektrik üretim artışına neden olduğu görülmüştür. Mikrodalga ile arıtılmış çamurun olduğu MYH'de % 55 toplam KOİ ($KOİ_T$) ve % 85 $KOİ_Ç$ 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 pyrodizlim tekniği ile analizlenmiştir.

Farklı ön arıtımı uygulamalarındaki çamurlardaki topluluk kompoziasyonunda önemli farklılıklar görülmüştür. Yüksek MYH verimliliğinde anotta dominant olan bakteri türü Bacteroidetes olmuştur. Bu çalışmanın sonuçları, MYH'de atık çamurun hem çamur azaltımı, hem de elektrik üretiminde kullanılabileceğini ve çamurun uygun ön arıtım prosesiyle arıtılması sonucu tüm proses performansının arttırılabileceğini ortaya koymuştur.

Oh ve ark. (2014) yaptıkları çalışmada, farklı çamur ön arıtma metotlarının (ultrases ve ısı/alkali birleşimi), farklı kaynaklardan gelen kentsel çamura (ön çökeltim, aşırı çamur, anaerobik çürütücü çamuru) uygulayarak, MYH'de elektrik üretme üzerine etkilerini araştırmışlardır. Ultrasonik olarak ön arıtılmış çamurun MYH'ne girişi ön çökeltim çamurunda 13.59 mW/m^2, aşırı çamurda 9.78 mW/m^2, anaerobik çürütücü çamurunda12.67 mW/m^2, güç yoğunluğu üretirken, ön çökeltim, aşırı çamur ve anaerobik çürütücü çamuru için sırasıyla of 87 %, 90 % ve 57 % $KOİ_Ç$ giderimi sağlanmıştır. Isı/alkali birleşimi ile ön arıtılmış çamur (0,04 N NaOH, 120 ^oC, 1 saat), sırası ile ön çökeltim, aşırı çamur ve anaerobik çürütücü çamuru için 10.03, 5.21 ve 12.53 mW/m^2 güç yoğunluğu ve 83 %, 75 % ve 74 % KOİ giderimi sağlamıştır. Daha yüksek $KOİ_ç$ MYH performansını arttırmış ve $KOİ_Ç$ gideriminin artışı ile orantılı olarak lineer bir şekilde elektrik üretimi artmıştır.

Ki ve ark. (2015) tarafından yapılan çalışmanın amacı, ön fermantasyona ve darbeli elektrik alan ile ön arıtıma tabi tutulmuş ön çökeltim çamurunun ile MYH'de elektron verici olarak kullanılması ile uçucu yağ asiti üretimini araştırmaktır. 3 günlük ön fermantasyon, ön çökeltim çamurunun ön arıtımı olmadan ve darbeli elektrik alanla ön arıtım uygulanan çamurda maksimum uçucu yağ asiti üretimine yol açmıştır. Fermantasyondan önce darbeli elektrik alan ile ön arıtım, uçucu yağ asidi birikimini asetatın 2 katına çıkarmıştır. Darbeli elektik alan ile ön artıma tabi tutulmuş ön çökeltim çamurunun 3 gün ön fermantasyonunun sentratı ile beslenen anotta 3.1 A/m^2 maksimum akım yoğunluğun görülmüştür, ki bu da kontrol sistemin 2.4 katıdır. Ön fermente sentratının kullanılması, Colombik verim (%95), kolombik geri kazanım ve KOİ giderim verimi (%85) açısından başarılı bir performansı sergilemiştir.

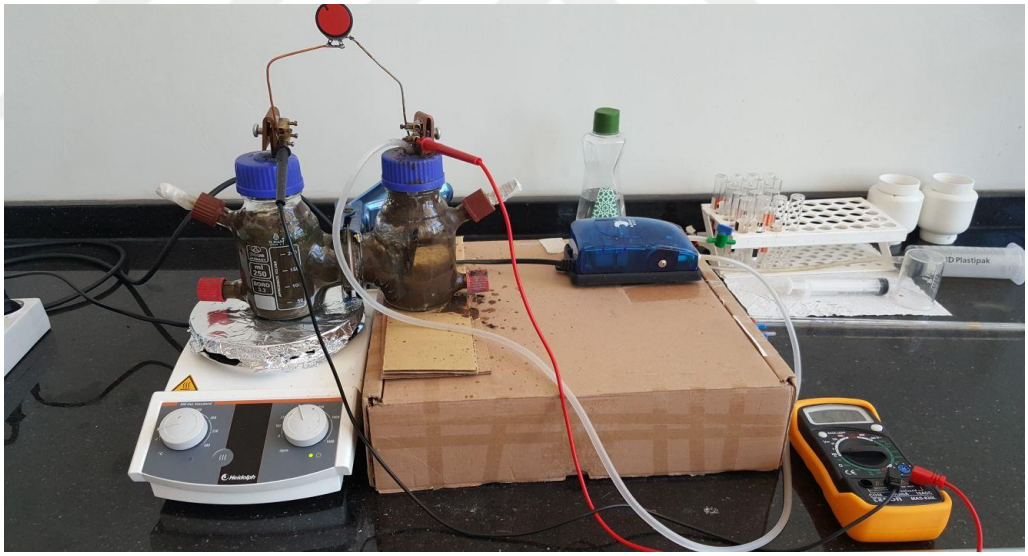
Ge ve ark. (2013)'nın yaptıkları çalışmada yaklaşık 500 gün boyunca 2 adet MYH, çamur arıtımın performansını değerlendirmek üzere işletilmiştir. Faz I'de ön çökeltim çamuru ile beslenen bir MYH, $KOİ_T$'nin % 69.8 ±% 24.1'ini ve uçucu askıda katı maddelerin ise % 68.4 ±% 17.9'unu gidermiştir. Çürütülmüş çamurlu diğer MYH'nde de $KOİ_T$'nin % 36.2 ± 24.4'ünü ve uçucu askıda katı maddelerin % 46.1 ± 19.2'si giderilmiştir. II. aşama'da, her iki MYH'nde ön çökeltim çamurundan $KOİ_T$'nin % 60'ını ve uçucu askıda katı maddelerin % 70'ini gideren iki aşamalı bir sistem olarak çalıştırılmıştır. Enerji analizi, MYH sistemindeki toplam enerjinin anaerobik çürütücüler ile karşılaştırılabilir olmasına rağmen, elektrik enerjisine küçük bir katkısı olduğunu ve metan gazının hala toplam enerji üretimine hâkim olduğunu ortaya koymuştur. Sonuçlara göre, MYH'nin enerji geri kazanımı için ön çökeltim çamurun arıtılması için uygun olmayabileceğini, ancak atıksu anaerobik çürütücülerden cilalamak için potansiyel olarak kullanılabileceğini ileri sürülmüştür.

More ve Ghangrekar (2010), düşük frekanslı ultrases ön arıtıma tabi tutulmuş aşının MYH üzerine etkilerini değerlendirmişlerdir. Karışık anaerobik çamur 2.5, 5, 7.5, ve 15 dk ultrasonik olarak arıtılan çamurla işletilmiş ve herhangi bir işlem görmemiş aşı çamurla işletilen MYH ile karşılaştırılmıştır. Birleşik ön işlemi olarak, ultrasonografi ve aşının ısıtılmasının kullanılmasının MYH'nin performansı üzerindeki etkisi de değerlendirilmiştir. 5 dakika boyunca (40 kHz, 120 W) çamurun ön işlemine ultrasonikasyon ile aşılanmış bir MYH'nde polarizasyon sırasında maksimum güç yoğunluğu, aşı çamuruna herhangi bir ön işleme tabi tutulmadan elde edilenden 2.5 kat daha yüksek olduğu bulunmuştur. Substratın giderilmesinin ultrasonik aşılanmış MYH'nde, herhangi bir ön muamele olmadan işletilen MYH'nden ve birleşik sistemden daha yüksek olduğu bildirilmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Deneysel Düzenek

Çalışmada kullanılan klasik iki bölmeli MYH'leri 275 mL hacme sahip cam malzemeden yapılmıştır. Bölmeler birbirinden CMI-7000 (Ultrex) membranları ile ayrılmıştır. Düzeneğin şematik görüntüsü Şekil 3.1'de verilmiştir. Çalışmada kullanılan T:-T:O_2 şerit elektrot etrafı karbon dolgu ile çevrelenmiş özel bir elektrottur. 6-12 g/cm^3 yoğunluğu ile kristal bir yapıya sahip ve özdirenci 0.00001 ohm'dur (Köroğlu, 2013). Çalışmada kullanılan Utrex CMI-7000 membran, MYH'nde kullanılan diğer bir proton değiştirici membrandır. Çapraz bağlı yapısıyla jel polistiren ve divirilbenzenli güçlü asit polimer membranıdır. CMI-7000 membranı Nafion-117'ye göre biraz daha kalın, daha sert ve düşük maliyetlidir.

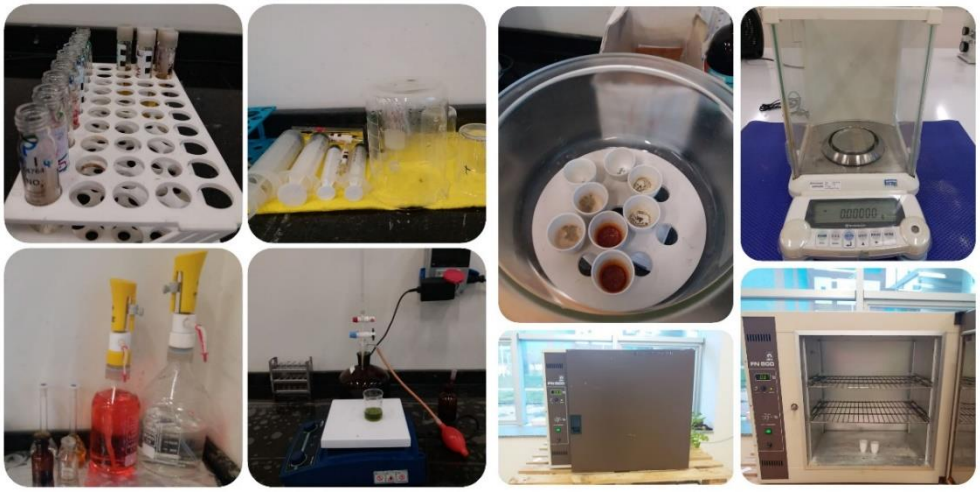


Şekil 3.1. MYH düzeneğinin fotoğrafı

3.2. Çamur Karakterizasyonu

Karakterizasyon çalışmalarında, pH, sıcaklık, toplam katı madde (TKM, organik madde (OM), askıda katı madde (AKM), uçucu askıda katı madde (UAKM),

$KOİ_T$ve $KOİ_Ç$ Standart Metotlara göre yapılmıştır (APHA, 2005). Analizlerin yapılması için kullanılan cihaz ve malzemeler Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Deneyde kullanılan cihazlar ve malzemeler

3.3. MYH'nin Aşılanması ve İşletimi

Anot bölme için Siverek Atıksu Arıtma Tesisi Anaerobik çürütücü çamuru anaerobik çamur aşı olarak kullanılmıştır. İşletime alınma aşamasında 1/3 oranında aşı çamur ilave edilmiştir. Çalışmada, katyonik bölmede elektron alıcısı olarak oksijen kullanılacağı için bir hava motoruyla havalandırılmıştır. Anot bölmesi hava almayacak şekilde kapatılmıştır. Anot bölmesi bir karıştırıcı vasıtası ile sürekli karıştırılmış ve ısıtılmıştır. Sistem anot ve katot bölmeleri ham geri devir çamuru ile beslenerek bir süre işetilmiş ve sistem kararlı hale geldikten sonra optimum direncin belirlenmesi çalışmasına geçilmiştir.

3.3.1. MYH'nde optimum direncin belirlenmesi

MYH 1000 ohm'luk bir ilk harici rezistörle kararlı bir elektrik üretme durumuna ulaşmak için yaklaşık 1 ay boyunca aklime edildi ve sonra iç direnci belirleme çalışmaları yapıldı. Çalışma kapsamında optimum direncin belirlenebilmesi için farklı direnç değerlerine göre elektrik akımı izlenmiştir. Dış direnç 100, 200, 400,

600 ve 800 ohm değerlerine ayarlanarak üretilen elektrik voltmetre ile milivolt cinsinden ölçülmüştür. Daha sonra bu değerler güç ve akım yoğunluğuna dönüştürülmüştür. En yüksek voltajın elde edildiği direnç, optimum direnç olarak kabul edilmiştir. MYH elektrik akımı bir dijital çoklu metre ile ölçülmüştür (Model numarası TT-TECHNIC MAS830L Dijital Multimetre). Elektrik okumaları manuel olarak kaydedilmiştir.

3.3.2. MYH'nin geri devir çamuru ile işletimi

Optimum direncin belirlenmesinden sonra MYH'nin hem anot hem de katot bölmeleri ham geri devir çamuru ile iki günde bir beslenmeye başlanmıştır. Sistemin beslenme günlerinde her iki bölmeden aynı hacimde çamur çekimi ve taze çamur ilavesi yapılmasına karar verilmiştir. İşletimin ilk birkaç günü, aerobik sisteme verilen oksijen miktarının elektrik üretimi üzerindeki etkisi de dikkate alınarak sistemin besleme sıklığı standardize edilmeye çalışılmıştır. Sistemin çamur yaşı 4.5 gün olarak belirlenmiştir. Sistem işletimin süresi boyunca aerobik ve anaerobik bölmelerinde $KOİ_T$, $KOİ_Ç$, TKM ve OM değişimleri ve MYH'deki elektrik üretimi izlenmiştir. Her iki bölme için adı geçen parametreler açısından çamur özelliklerindeki değişimler ve elektrik üretimi değerlendirilmiştir.

3.3.3. MYH'nin Fenton Prosesi ile modifikasyonu

Ön arıtıma tabi tutulmuş çamurun etkilerini görmek için, çamur numuneleri MYH'nin sadece anot bölmesine beslenmeden önce Fenton prosesi uygulanmıştır. Çalışmada Fenton prosesi için 60 mL çamur numunesinin pH'ı H_2SO_4 ile 3'e getirilmiştir. Optimum Fe (II) ve H_2O_2 dozu için 0,067 g Fe(II)/ g H_2O_2 ve 60 g H_2O_2 / kg Katı Madde (KM) literatüre dayanılarak seçilmiştir (Kaynak ve Filibeli, 2008).

Fe(II) kaynağı olarak $FeCl_3.6H_2O$ kullanıldığı için o bileşik içinden istenen miktarda Fe (II) alabilmek için ne kadar $FeCl_3.6H_2O$ kullanılacağı hesaplanmıştır. Daha sonra H_2O_2 ilave edilmiştir. Karışım 100 rpm'de 60 dk döndürülmüştür. Reaksiyondan sonra her çamur numunesi $Ca(OH)_2$ ile nötralize edilmiştir. İşletim

sırasında, MYH'de her iki bölmedeki KOİ ve katı madde ve değişimleri ve elektrik üretimi izlenmiştir. Fenton Prosesi'nin çamur özellikleri ve arıtımındaki etkisi ile elektrik üretimi üzerindeki etkisi yorumlanmıştır.

3.3.4. MYH'nin termal alkali ön işlem ile modifikasyonu

Bu çalışmada, termal/alkali birleşik ön arıtımı 90ºC'de 25 dk, 0,02 mol/L NaOH ile gerçekleştirilmiştir (Demir, 2018). Termal/alkali birleşik ön arıtılmış çamurun pH'ı 7.0–7.2'ye 2 N HCl ilavesiyle ayarlanmıştır. Ön işlem görmüş çamur sadece anot bölmesine verilmiştir. Katot bölmesi ham geri devir çamur ile beslenmeye devam etmiştir. Sistem işletimin süresi boyunca aerobik ve anaerobik bölmelerinde $KOİ_T$, $KOİ_Ç$, TKM ve OM değişimleri ve MYH'deki elektrik üretimi izlenmiştir. Her iki bölme için adı geçen parametreler açısından çamur özelliklerindeki değişimler ve elektrik üretimi değerlendirilmiştir.

3.4. Elektriksel Parametrelerin Hesaplanması

Kapalı devre üzerine 1000 Ω'luk bir direnç yerleştirilmiştir. Devre üzerinden (AO O+,AO O-)uygulanan voltaja göre sistemden akım geçmektedir. Geçen akım direnci üzerinden okunan voltaj ile hesaplanır. Devre üzerindeki net voltajın okunmasıyla aşağıdaki formüle göre iç direnç hesaplanır.

V(Devre üzerindeki Voltaj)= I(Geçen Akım) * R(Akım Direnç+İç Direnç)

Voltaj = Akım*Direnç → V=I*R

Güç=Voltaj*Akım → P=V*I

Güç yoğunluğu (mW/cm^2) $=\frac{P}{A}=\frac{\text{Güç}(Watt)}{Elektrot\ yüzey\ alanı,(cm2)}$ Birimi mW/m^2'ye çevrilebilir.

Akım yoğunluğu (mA/cm^2) $=\frac{I}{A}=\frac{Akım\ (mA)}{Elektrot\ alanı\ (cm2)}$

Hacimsel enerji (W/m^3) $=\frac{P\ (watt)}{v\ (m3)}$ P= Güç (Watt) v= Reaktör hacmi, m^3

Çalışmada işletim süresi boyunca elektrik üretimi izlenmiş ve akım direnci üzerinden geçen voltaj okumalarından sonra yukarıda verilen formüller ile ham geri devir çamuru ile beslenen MYH'nde, Fenton Prosesi ile işlem görmüş çamur ile beslenen MYH'nde ve termal/alkali işlem görmüş çamurla işlem görmüş çamurla beslenen MYH'nde güç ve akım yoğunluğu değerleri hesaplanmıştır.

3.5. Kimyasal Analizler

Beslemenin yapıldığı her gün aerobik ve anaerobik bölmeden atılan çamur numunelerinde, $KOİ_T$ ve $KOİ_Ç$ analizleri Standart Metodlar'da açıklandığı gibi Kapalı Reflux Kolorimetrik Yöntem ile belirlenmiştir (APHA, 2005). pH ve sıcaklık gibi parametreler WTW marka pH metre ile ölçülmüştür. Ham geri devir çamuru ve aşı olarak kullanılan geri devir çamurunun özelliklerinin belirlenmesi için yapılan toplam askıda katı madde (AKM) uçucu askıda katı madde gibi (UAKM) analizleri de Standart Metodlar'a göre belirlenmiştir. Hem çamur karakterizasyonunda hem de MYH işletimlerinde yapılan toplam katı madde ve organik madde analizleri de yine Standart Metodlar'a göre yapılmıştır (APHA, 2005). Tüm $KOİ_T$ numuneleri, 3000 rpm 15 dakika santrifüj edildikten sonra, $KOİ_T$ ölçümleri herhangi bir işlem yapılmadan sadece seyreltme yapılarak gerçekleştirilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Çamur Karakterizasyonu

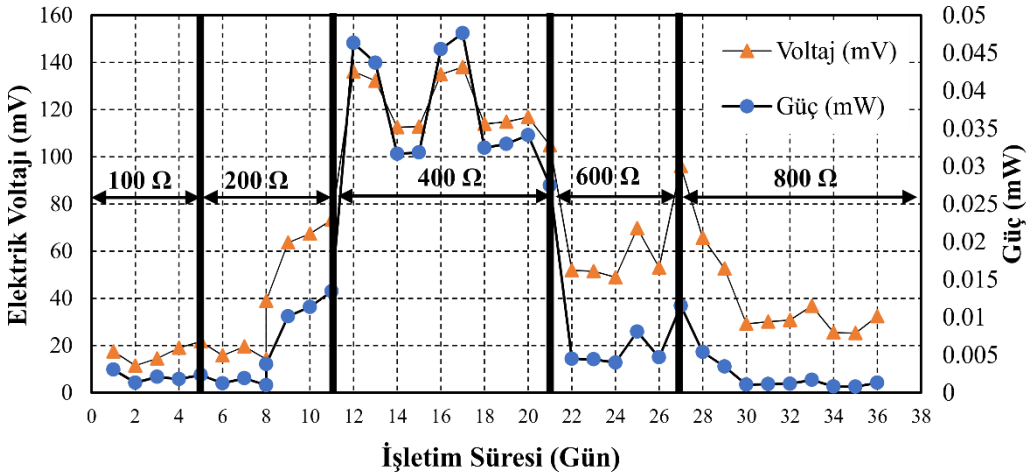
MYH, işletime alınmadan önce atıksu artıma tesisinden alınan geri devir çamuru ve aşı olarak alınan anaerobik çürütücü çamuru için yapılan karakterizasyon çalışmasının sonuçları Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Çamur karakterizasyonu

Parametreler	Geri devir çamuru	Anaerobik çürütücü çamuru
pH	6.4	5.9
Sıcaklık, ^{o}C	23	23
Toplam Katı Madde, (TKM), mg/L	7455	11478
Organik madde (OM), mg/L	2834	11440
Askıda Katı Madde,(AKM) mg/L	290	1040
Uçucu Askıda Katı Madde, (UAKM), mg/L	230	690
Toplam Kimyasal Oksijen İhtiyacı ($KOİ_T$), mg/L	10752	18176
Çözünmüş Kimyasal Oksijen İhtiyacı, ($KOİ_ç$) mg/L	320	16896

4.2. Optimum Direncin Belirlenmesi

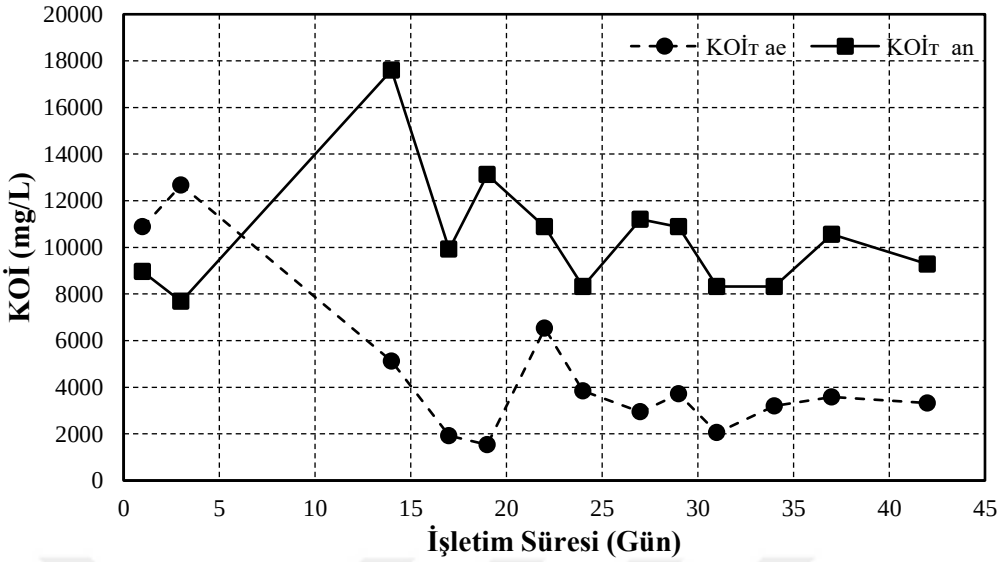
Yapılan deneylerin ilk setinde, direnç değeri 100 ohm (Ω)başlayarak sırasıyla 200, 400, 600 ve 800 ohm değerine kadar yükseltilmiştir. Deneylerin ilk setine göre, seçilen dirence bağlı olarak elde edilen elektrik değeri (Volt) ve güç (mW) Şekil 4.1'de verilmiştir. Buna göre 400 ohm direnç ile elde edilen elektrik değerinin diğer direnç değerlerine göre oldukça yüksek olması nedeniyle, en uygun direnç değeri 400 ohm olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.1. En uygun direncin belirlenmesi

4.3. MYH'nin Geri Devir Çamur ile İşletimi

Şekil 4.2'de anaerobik (anot) ve aerobik (katot) bölmeden alınan numunelerin $KOİ_T$ değerlerinin işletim süresince değişimi verilmiştir. Anaerobik bölmede, 14. günden sonra $KOİ_T$ değerleri azalmaya başlamıştır. En yüksek anaerobik $KOİ_T$ değerleri 14. günde 17600 mg/L ve en düşük anaerobik $KOİ_T$ değeri ise 42. günde 9280 mg/L olarak belirlenmiştir. Anaerobik bölmede bu işletim günleri arasında % 47.2'lik bir $KOİ_T$ azalmasından söz edilebilir. Anaerobik bölmedeki $KOİ_T$'deki azalma, bu bölmedeki anaerobik koşullar sonucu çamur içinde hapsolan $KOİ_T$'in hücre lizisi sonucunda çamur floğunun parçalanması ve çamur üst suyuna salınması ile açıklanabilir. 34. günden sonra da $KOİ_T$ değerlerinde daha fazla bir azalma gözlenmemiştir. 17 ile 42. günler arasında ise KOİ değerleri ortalama 10000 mg/L civarında seyrettiği görülmektedir. Ayrıca, en yüksek aerobik (katot) $KOİ_T$ değeri 2. günde 12672 mg/L, en düşük değer ise 19. günde 1536 mg/L olarak belirlenmiştir. 24 ile 37. günler arasında aerobik bölgedeki KOİ değerlerinin ortalama 3200 mg/L bandında olduğu görülmektedir. Aerobik bölmede, işletim periyodunun 3. günündeki $KOİ_T$ değeri 12672 mg/L iken, çalışmanın 42. gün 3320 mg/L'ye düşerek % 73.8'lik bir $KOİ_T$ giderimi gözlenmiştir.

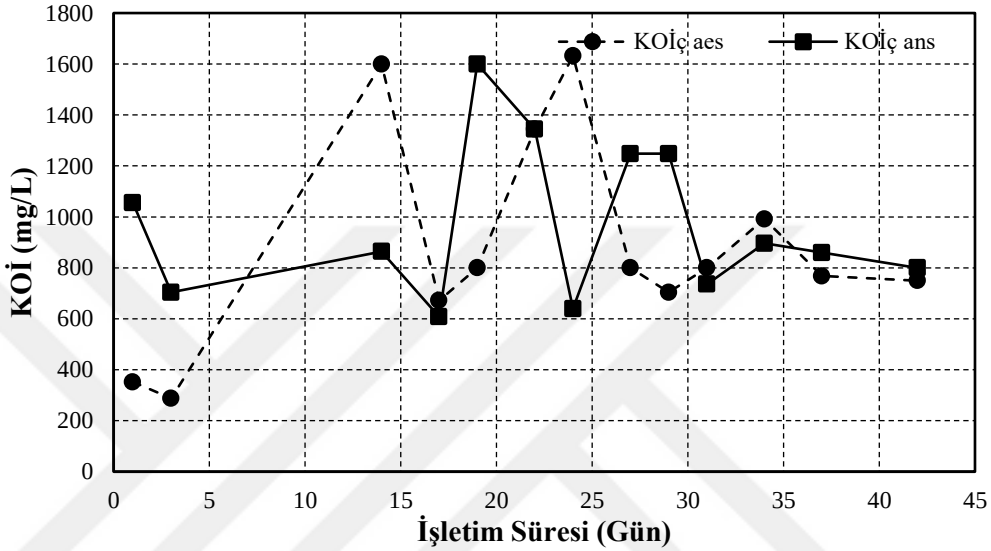


Şekil 4.2.Aerobik bölmedeki $KOİ_T$ ($KOİ_T$_ae) ve Anaerobik bölmedeki $KOİ_T$ ($KOİ_T$_an) değerlerinin zamansal değişimi

Şekil 4.3'te, $KOİ_Ç$ değerlerinin işletim süresince değişimi verilmektedir. Buna göre, ilk işletim günlerinden sonra hem anaerobik ve hem de aerobik kısımdan alınan numunelerin $KOİ_Ç$ değerlerinin 600 ile 1600 mg/L arasında değiştiği görülmektedir. Anaerobik bölmede, organik maddelerin parçalanması sonucu 17. günden sonra 608 mg/L olan $KOİ_Ç$ değeri artarak en yüksek değeri olan 1600 mg/L'ye ulaşmıştır. Bu noktadan sonra KOİç azalmaya başlamıştır. 19. gün 1600 mg/L olan $KOİ_Ç$ işletim periyodu sonunda 800 mg/L'ye düşmüş ve % 50'lik bir $KOİ_Ç$ giderimi elde edilmiştir. Genel olarak, anaerobik fermentasyondaki $KOİ_Ç$ çözünmeyen organik maddelerin hidrolizi ile birlikte fermentasyonun başlangıcında artmaya devam etmiştir. Daha sonra, çözünür organik maddeler kademeli olarak CH_4 ve CO_2'ye mineralize edildiğinden $KOİ_Ç$ azalmıştır. Aerobik bölmede de başlangıçtaki 352 mg/L olan $KOİ_Ç$ değeri 1600 mg/L'ye ulaştıktan sonra işletimin 42. gününde tekrar 750 mg/L'ye düşerek % 53'lük bir giderim sağlanmıştır.

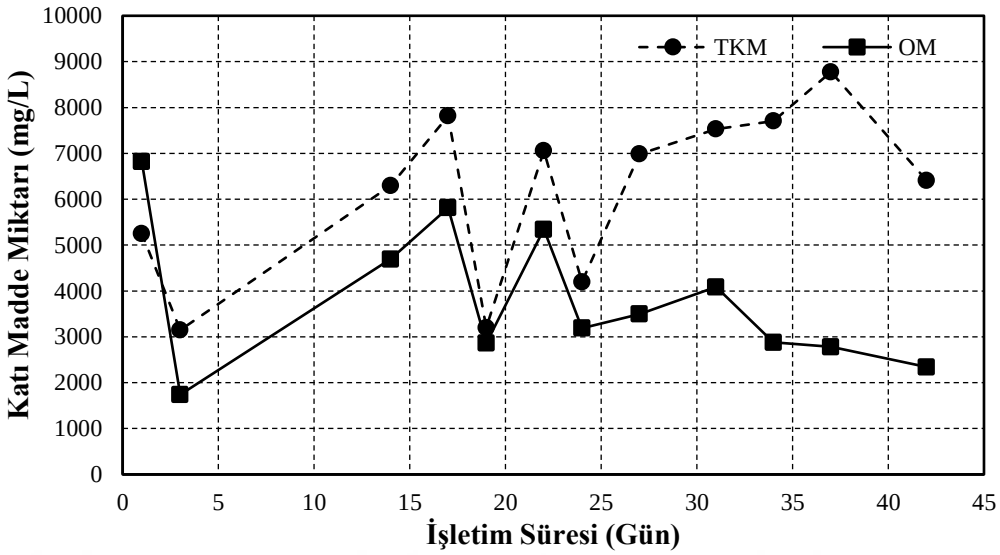
Feng ve ark. (2015) yaptığı çalışmada da ilk 8 günlük fermantasyondan sonra, $KOİ_ç$ konsantrasyonu maksimum seviyeye ulaşmış 22. günde fermantasyonun uzamasıyla birlikte, $KOİ_Ç$ konsantrasyonu azalarak en düşük seviyelere ulaşmıştır. Ge ve ark. (2013)'nın yaptığı çalışmada, ön çökeltim çamuru ile beslenen bir MYH,

$KOİ_T$'nin % 69.8 ±% 24.1'ini gidermiştir. Çürütülmüş çamurlu işletilen MYH'nde de $KOİ_T$'nin % 36.2 ± 24.4'ü giderilmiştir. Ghadge ve ark. (2015)'nın yaptığı çalışmada aniyodik bölmeden çamur numunesi alınarak ise $KOİ_T$ ve $KOİ_ç$ giderme verimleri sırasıyla % 65.4 ± 8.2 ve% 53.60 ± 7.6 olarak rapor edilmiştir.



Şekil 4.3. Aerobik bölmedeki $KOİ_Ç$ ($KOİ_Ç$_aes) ve anaerobik bölmedeki $KOİ_Ç$ ($KOİ_Ç$_ans) değerlerinin zamansal değişimi

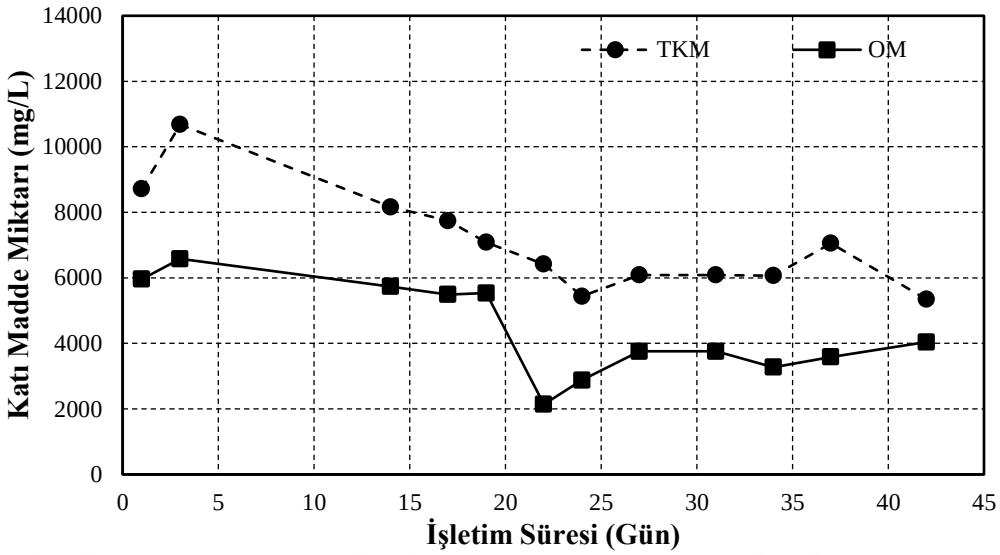
Şekil 4.4'te TKM ve OM değerlerinin işletim süresince değişimi verilmiştir. Buna göre TKM ve OM değerlerinin değişiminin birbirine oldukça paralel olduğu görülmektedir. Bunun yanında, en düşük TKM ve OM değerlerinin sırası ile 3. günde 3146 mg/L ve 1740 mg/L olarak belirlenmiştir. Toplam işletim süresince alınan numunelerde TKM değerlerinin yaklaşık yarısı 6000-8000 mg/L aralığında belirlenmiştir. TKM ve OM değerlerinin ortalamaları sırasıyla, 6196 mg/L ve 3550 mg/L olarak hesaplanmıştır. Aerobik bölmedeki TKM ve OM miktarlarında sürekli bir azalıştan çok bir dalgalanma söz konusudur. Periyot boyunca elde edilen en yüksek TKM giderimi 17 ve 19. günler arasındaki % 63.3'lük giderim ile, işletim periyodunun ilk ve son günü arasındaki % 66'lık OM giderimidir.



Şekil 4.4. TKM ve OM değerlerinin zamansal değişimi (Aerobik bölme)

Anaerobik bölmede, tıpkı $KOİ_T$ ve $KOİ_Ç$'deki değişimlere benzer şekilde TKM ve OM'lerde de değişim beklenmektedir. Anot bölmesindeki anaerobik koşullar sayesinde gerçekleşen çamur parçalanması sonucunda özellikle organik maddedeki azalmadan kaynaklı olarak TKM de azalma beklenmektedir. Çünkü organik maddeler anaeobik koşullarda daha küçük moleküllere hidrolize olmaktadırlar. Şekil 4.4'te anaerobik bölmeden elde edilen numunelerin TKM ve OM değerlerinin işletim süresince değişimi verilmiştir. Buna göre, en yüksek TKM değeri 10678 mg/L ile 3.günde elde edilmiştir. En düşük değerler ise 5436 mg/L ile 24. ve 5342 mg/L ile 42. günde belirlenmiştir. OM değerlerinin de TKM değerlerine benzer bir eğilim sergilediği görülmektedir. İşletimin 3. günü (10678 mg/L) ve 42. günleri (5342 mg/L) dikkate alındığında TKM giderim verimi % 50 iken, 3. gün (5960 mg/L) ve 22. gün (2138 mg/L) dikkate alındığından OM giderim veriminin % 64 olduğu görülmektedir.

Ge ve ark. (2013)'ün yaptığı çalışmada, ön çökeltim çamuru ile işletilen MYH'nde ve uçucu askıda katı maddelerin ise % 68.4 ±% 17.9'u giderilmiştir. Çürütülmüş çamurlu işletilen diğer MYH'nde de uçucu askıda katı maddelerin % 46.1 ± 19.2'si giderilmiştir. Ghadge ve ark. (2015)'nın yaptığı çalışmada MYH'de toplam askıda kat madde ve uçucu askıda katı madde sırasıyla 12'den 4 g/ L'ye ve 10.6'dan 2.5 g/L'ye düşmüştür.

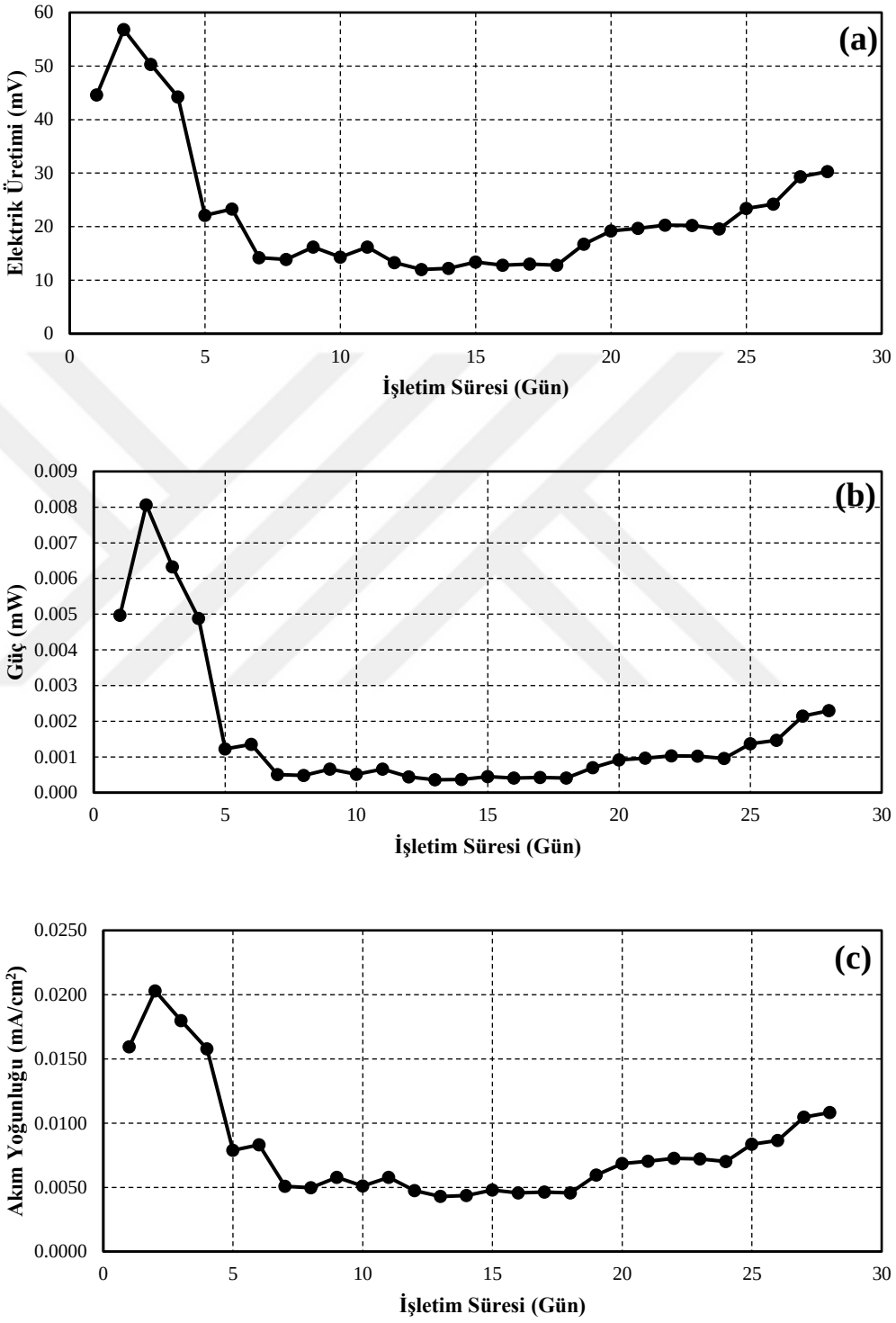


Şekil 4.5. TKM ve OM değerlerinin zamansal değişimi (Anaerobik bölme)

İşletim süresi boyunca elektrik, güç ve akım yoğunluğunun değişimi Şekil 4.6'da verilmiştir. Şekil 4.6 (a)'ya göre, en yüksek elektrik üretimi 57 mV ile 2. işletim gününde, en yüksek elektrik üretimi ise 12 mV ile 13. işletim gününde elde edilmiş olup ortalama elektrik üretimi 22.4 mV olarak elde edilmiştir. Şekil 4.6 (b)'de mW cinsinde güç üretimi verilmiştir. Bunda da beklendiği gibi elektrik üretimi ile paralel bir grafik elde edilmiş olup, en yüksek 0.008 mW, en düşük 0.00036 mW, ortalama ise 0.0016 mW olarak belirlenmiştir. Şekil 4.6 (c)'de verilen akım yoğunluğu incelendiğinde ise ilk işletim günlerinde 0.02 mA/cm^2 sonrasında ise 0.005 mA/cm^2 civarında bir akım yoğunluğu meydana gelmiş, sistem boyunca ortalama akım yoğunluğu ise 0.08 mA/cm^2 olarak belirlenmiştir. Anaerobik çamuru aşılamada kullanan çalışmalar incelendiğinde, Jang ve ark. (2004) çalışmalarında substrat olarak glikoz ve glutamat içeren yapay atık su çamurunu kullanarak en yüksek akım yoğunluğunu 0.02 mA/cm^2, Wang ve ark. (2009), substrat olarak evsel atık su çamurunu kullanmışlar ve en yüksek akım yoğunluğunu 0.06 mA/cm^2, Oh ve Logan (2005) çalışmalarında gıda üretim tesisinden elde edilen çamuru substrat olarak kullanmışlar ve 0.05 mA/cm^2 değerinde bir akım yoğunluğu elde etmişlerdir.

Elektrik üretimi sonuçları incelendiğinde $KOİ_Ç$ gideriminin artmaya başladığı işletim periyodunun 19. gününden sonra elektrikte de artış olduğu görülmektedir.

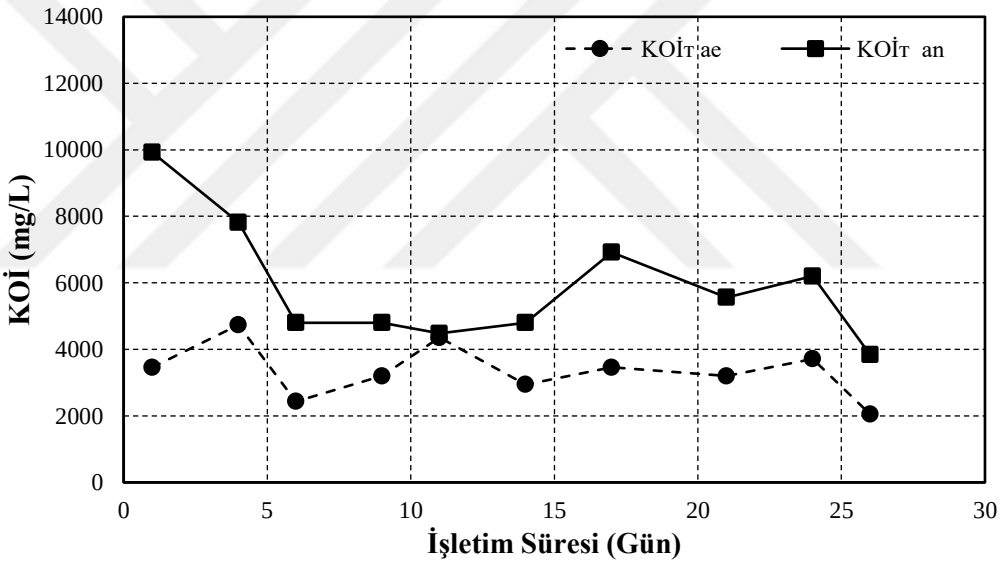
Nitekim Oh ve ark. (2014)'nın yaptığı çalışmada da $KOİ_ç$ gideriminin artışı ile orantılı olarak lineer bir şekilde elektrik üretimi arttığı rapor edilmiştir.



Şekil 4.6. İşletim süresi boyunca elektrik üretimi (a-mV, b-Güç, c-Akım yoğunluğu)

4.4. MYH'nin Fenton Prosesi ile İşlem Görmüş Çamurla İşletimi

Şekil 4.7'de Fenton prosesi ile işlem görmüş çamur kullanılarak anaerobik (anot) ve aerobik (katot) bölmeden alınan numunelerin KOİ değerlerinin işletim süresince değişimi verilmiştir. Fenton Prosesinin ilavesi ile gerçekleşen modifiye edilmiş MYH'nin anaerobik bölmesinde 1. gündeki 9920 mg/L olan $KOİ_T$ değeri işletimin 26. günde 3840 mg/L'ye kadar düşerek $KOİ_T$'de işletim boyunca % 61'lik azalma olduğu söylenebilir. Aerobik bölmede işletim süresi boyunca $KOİ_T$ değeri en yüksek işletimin 4. günü 4736 mg/L ve en düşük 26. günde 2048 mg/L olduğu analizlenmiştir. Bu iki gün arasındaki $KOİ_T$ giderimi % 56.8'dir.

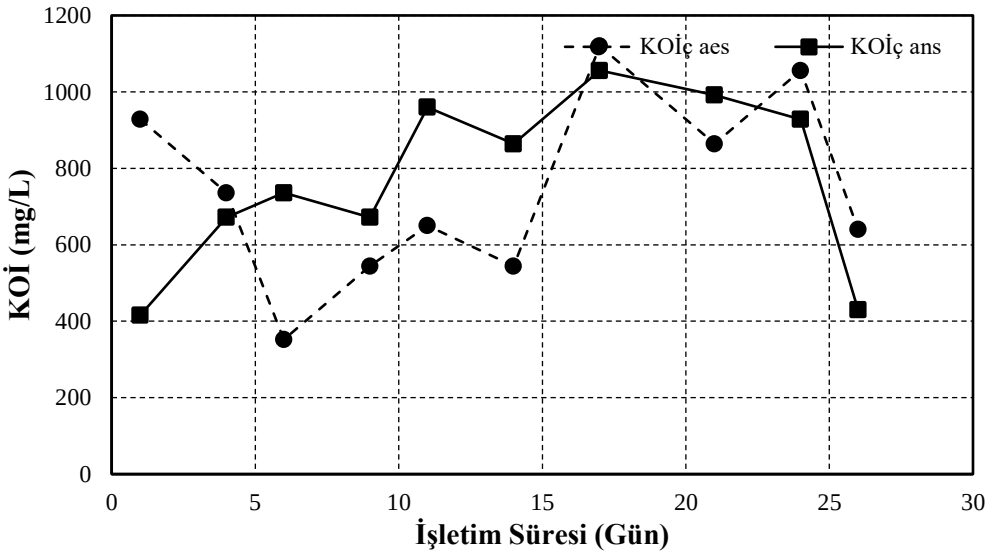


Şekil 4.7. KOİ_ae ve KOİ_an değerlerinin zamansal değişimi (Fenton prosesi)

Şekil 4.8'de Fenton prosesi ile işlem görmüş çamur numunelerin $KOİ_Ç$ değerlerinin işletim süresince değişimi verilmektedir. Anaerobik bölmede çözünmüş KOİ'nin ilk aşamada artması beklenmektedir. Nitekim, işletmenin 1. günü 416 mg/L olan $KOİ_ç$ değeri işletmenin son analiz günü olan 17. gün 1056 mg/L'ye yükselmiştir.17. günden sonra $KOİ_Ç$ azalmaya başlamış ve işletim sonunda 430 mg/L'ye ulaşarak % 59'luk bir $KOİ_ç$ giderimi elde edilmiştir. Fenton ön işlemi ile anaerobik bölmedeki hidroliz aşaması hızlandırılmaya ve daha fazla KOİ'nin

çamurdan sıvı faza geçişi sağlanmaya çalışılmıştır. İşletimin son günlerinde $KOİ_Ç$'nin azalmaya devam ediyor olması daha uzun işletim periyodunda daha yüksek KOİ verimi elde edilebileceğine işaret etmektedir. Elektrik veriminin de hemen hemen aynı günlerde artmaya başlaması işletim periyodunun ikinci yarısında sistemin performansının arttığını göstermektedir. Aerobik bölmede Fenton Prosesi gibi herhangi bir işlemle hidroliz aşaması hızlandırılmaya çalışılmadığından ilk günlerde anaerobik bölmedeki gibi bir artış gözlenmemiştir. Bilakis, en yüksek $KOİ_ç$ azalması 1. gün ve 6. gün arasındaki 928 mg/L'den 352 mg/L'ye düşüşle % 62 ile gerçekleşmiştir.

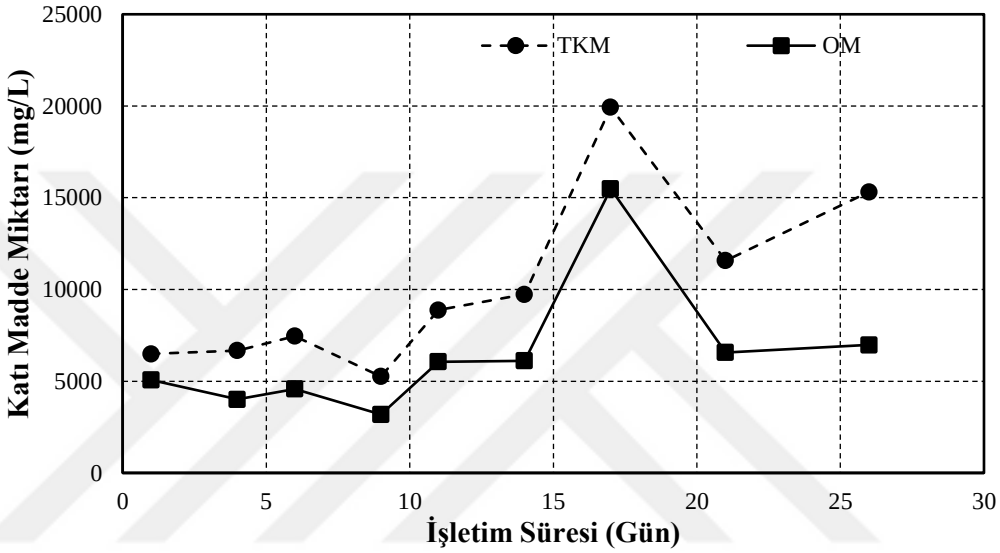
Jiang ve ark. (2009), elektron alıcısı olarak potasyum ferrisiyanürlü iki odacıklı MYH'ni, fazla çamurunu parçalamak ve elektrik üretmek için kullanılmışlardır. Başlangıçtaki 10850 mg/L olan $KOİ_T$'nin % 46.4 oranında azaldığını bulmuşlardır. Ayrıca, ultrasonik çamur ön işlemin organik maddenin çözünmesini hızlandırdığını ve dolayısıyla MYH'ndeki $KOİ_T$ giderim verimini arttığı, ancak akım yoğunluğunun kayda değer bir şekilde artmadığını bildirmişlerdir.



Şekil 4.8. KOİ_aes ve KOİ_ans değerlerinin zamansal değişimi (Fenton prosesi)

Aerobik bölmede Fenton prosesi ile işlem görmüş çamur ile ölçülen TKM ve OM değerlerinin işletim süresince değişimi Şekil 4.9'da verilmiştir. En yüksek TKM

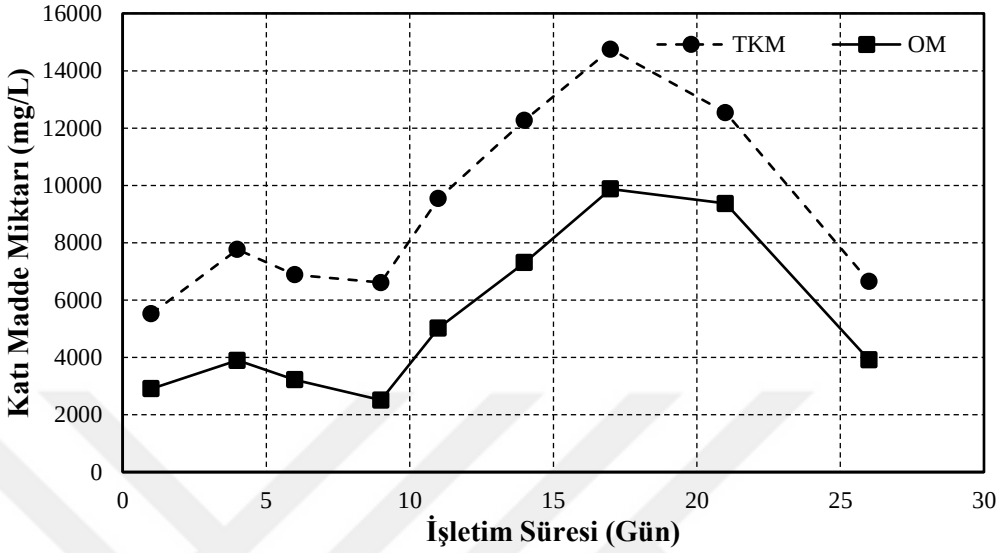
değeri 17. günde 19933 mg/L, en düşük değerin ise 9. günde 5256 mg/L olarak belirlenmiştir. OM değerleri incelendiğinde ise en düşük değer, 3187 mg/L ile 9. günde, en yüksek değer ise 15485 mg/L ile 17. günde belirlenmiştir. TKM ve OM değerlerinin ortalamaları sırasıyla, 9863 mg/L ve 6176 mg/L olarak hesaplanmıştır. En yüksek TKM ve OM giderimi 17.ve 21. günler arasında sırası ile % 42 ve % 57.5 ile elde edilmiştir.



Şekil 4.9. TKM ve OM değerlerinin zamansal değişimi (Aerobik bölme) (Fenton prosesi)

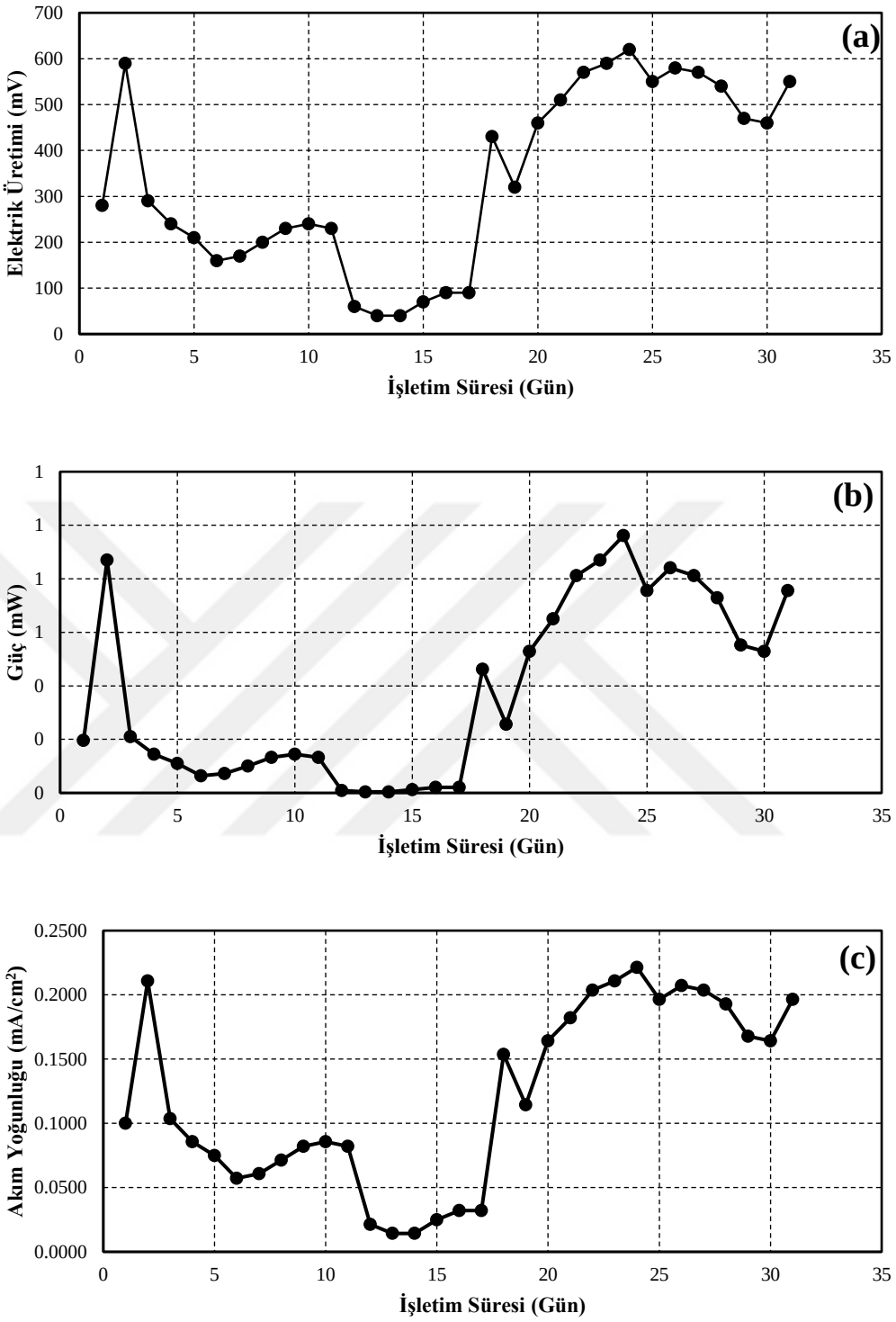
Şekil 4.10'da Fenton Prosesi ile işlem görmüş çamur ile anaerobik bölmeden elde edilen numunelerin TKM ve OM değerlerinin işletim süresince değişimi verilmiştir. Bu değerler incelendiğinde, TKM ve OM değerlerinin dağılımının birbirine paralel olduğu görülmektedir. Buna göre, en yüksek TKM değerleri 14747 mg/L ile 17. günde, en düşük değer ise 5523 mg/L ile 1. günde belirlenmiştir. Bunun yanında, en yüksek OM değeri, 9873 mg/L ile yine 17. günde belirlenmiştir. En düşük OM değeri ise 9. günde 2511 mg/L değerinde olduğu görülmüştür. Anaerobik bölmedeki TKM ve OM'deki azalmalar 17. günden sonra başlamıştır. Anaerobik bölmede 17. gün TKM değeri 14747 mg/L iken OM değeri ise 9873 mg/L periyodun son günü olan 26.Gün TKM değeri 6650 mg/L ve OM değeri ise 3911 mg/L'dir. Bu durumda, 17. gün ve işletimin sonunda elde edilen TKM ve OM giderimleri sırası ile

% 55 ve % 60'tır. Bu değerler işletim periyodunun daha uzun tutulması halinde daha etkili bir azaltım sağlayacağına işaret etmektedir.



Şekil 4.10. TKM ve OM değerlerinin zamansal değişimi (Anaerobik bölme) (Fenton prosesi)

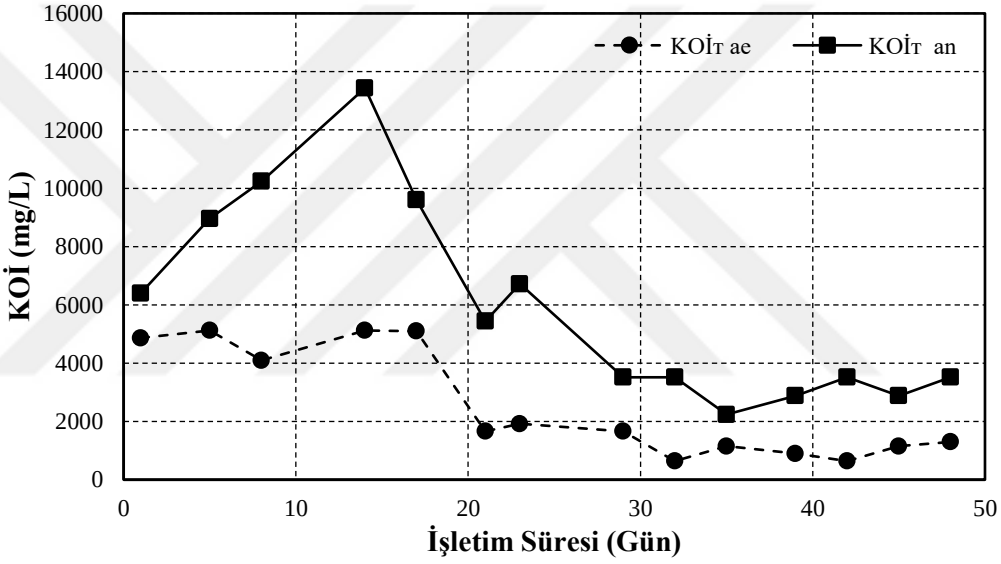
Fenton prosesi ile işlem görmüş çamurun işletim süresi boyunca elektrik, güç ve akım yoğunluğunun değişimi Şekil 4.11'de verilmiştir. Şekil 4.11 (a)'da verilen mV cinsinden elektrik üretim değerleri incelendiğinde, en yüksek elektrik üretimi 620 mV, ortalama elektrik üretimi ise 337 mV olarak belirlenmiştir. Güç değerlerinin değişimi Şekil 4.11 (b)'de verilmiştir. Buna göre, en yüksek güç 0.961 mW, ortalama güç ise 0.38 mW olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.11 (c)'de verilen akım yoğunluğu değerleri incelendiğinde ise en yüksek akım yoğunluğu 0.221 mA/cm^2, en düşük 0.014 mA/cm^2 elde edilmiştir. Literatürde anaerobik çamur ile beslenen sistemlere göre (Jang ve ark., 2004; Wang ve ark., 2009; Oh ve Logan, 2005) Fenton prosesi ile işlem görmüş çamur ile elde edilen akım yoğunluğunun oldukça fazla olduğu görülmüştür. İşlem görmemiş çamurda elde edilen en yüksek akım yoğunluğu olan 0.02 mA/cm^2 değerinden fazla bir akım yoğunluğu elde edilmesi, Fenton presesinin akım yoğunluğunu arttırmada olumlu bir etki gösterdiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.11. Fenton prosesi sonucunda elektrik üretiminin değişimi (a-mV, b-Güç, c-Akım yoğunluğu)

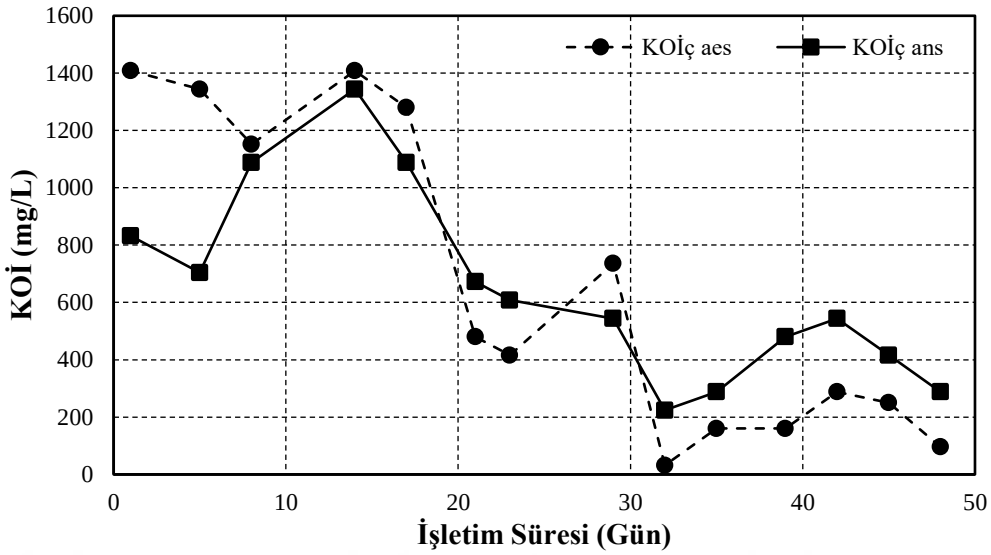
4.5. MYH'nin Termal Alkali Ön İşlem Görmüş Çamurla İşletimi

Şekil 4.12'de termal alkali ön işlem görmüş çamur kullanılarak anaerobik (anot) ve aerobik (katot) bölmeden alınan numunelerin $KOİ_T$ değerlerinin işletim süresince değişimi verilmiştir. Buna göre, en yüksek anaerobik $KOİ_T$ değerleri 14. günde 13440 mg/L, periyodun sonunda yani 35. gün 2240 mg/L değerini almıştır. Bu değerlere göre, anaerobik bölmede en yüksek $KOİ_T$ giderimi % 83.3 olarak bulunmuştur. Ayrıca, en yüksek aerobik (katot) $KOİ_T$ değeri 48. günde 5120 mg/L, periyodun son günü 1300'ye mg/L'ye düşmüştür. Bu da aerobik kısımda %74.6 'luk bir giderim olduğunu göstermiştir.



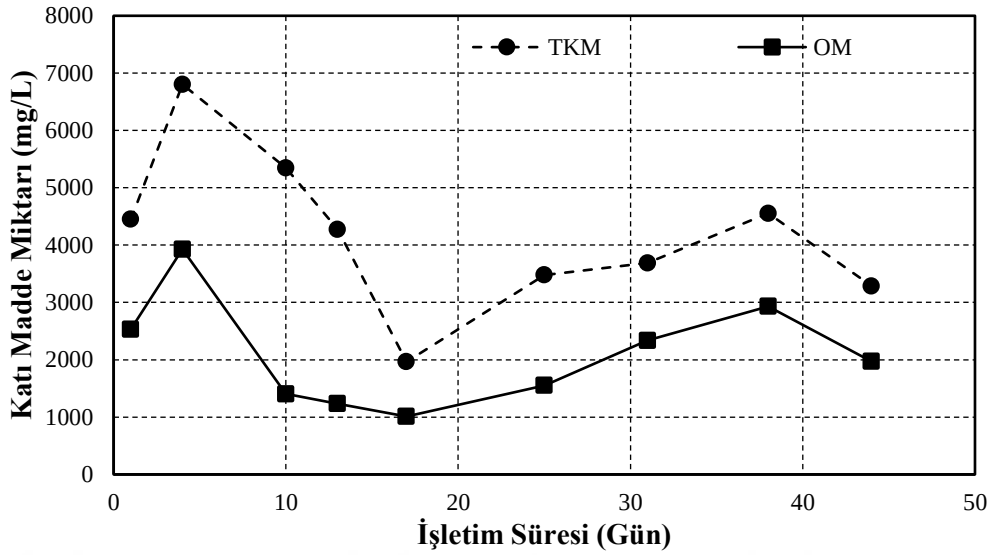
Şekil 4.12. KOİ_ae ve KOİ_an değerlerinin zamansal değişimi

Şekil 4.13'te ise termal alkali ön işlem görmüş çamur numunelerin $KOİ_Ç$ değerlerinin işletim süresince değişimi verilmektedir. Buna göre, aerobik bölmede en yüksek KOİ değeri 14. günde 1408 mg/L, en düşük değer ise 32. günde 32 mg/L olmuş, anaerobik bölmede ise yine 14. günde 1344 mg/L, en düşük değer ise 32. günde 224 mg/L olarak belirlenmiştir. Aerobik bölmede 14. gün ve 32. gün için $KOİ_ç$ giderimi % 93'tür. Anaerobik bölmede, işletim periyodunun ilk 14 günü termal alkali ön işlemin etkisi ile $KOİ_ç$'de artış görülmüş ve 14. günden sonra $KOİ_ç$ azalmaya başlamıştır. 14. gün $KOİ_Ç$ değeri ve 32. gün değerlerine göre en yüksek %83.3 $KOİ_Ç$ giderimi elde edilmiştir.



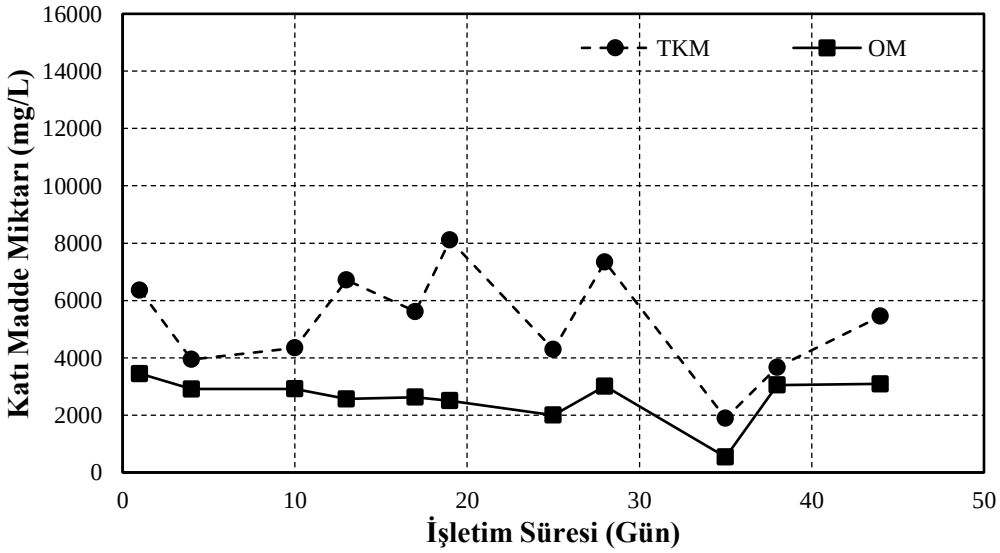
Şekil 4.13. KOİ_aes ve KOİ_ans değerlerinin zamansal değişimi

Aerobik bölmede termal alkali ön işlem görmüş çamur ile ölçülen TKM ve OM değerlerinin işletim süresince değişimi Şekil 4.14'da verilmiştir. Buna göre TKM ve OM değerlerinin değişiminin birbirine oldukça paralel olduğu ve besleme yapıldıktan sonra artış gösterdiği ancak daha sonrasında ise değerlerde bir azalma olduğu görülmektedir. En yüksek TKM değeri 2. günde 6803 mg/L, periyodun sonunda 3287 mg/L'ye düşerek % 52'lik bir TKM giderimi elde edilirken, OM değerleri incelendiğinde 2. günde en yüksek değer ise 3929 mg/L iken en son gün 1970 mg/L'ye düşmüş ve yaklaşık olarak % 50 OM giderimi sağlanmıştır.



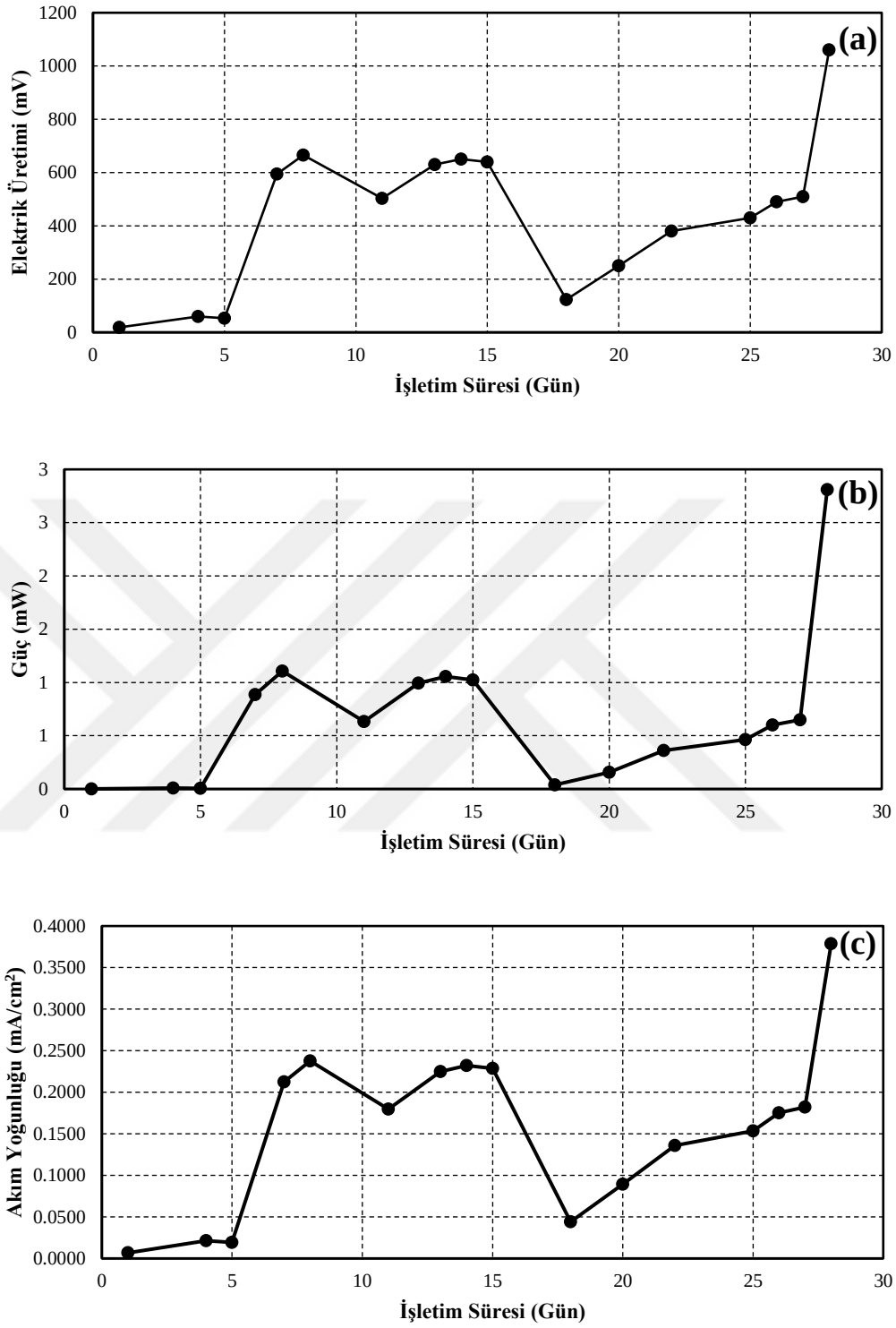
Şekil 4.14. TKM ve OM değerlerinin zamansal değişimi (Aerobik bölme)

Şekil 4.15'da termal alkali ön işlem görmüş çamur ile anaerobik bölmeden elde edilen numunelerin TKM ve OM değerlerinin işletim süresince değişimi verilmiştir. Bu değerler incelendiğinde, TKM ve OM değerlerinin dağılımının birbirine paralel olduğu görülmektedir. Buna göre, başlangıçtaki TKM değerleri 6259 mg/L ve en 35. gün en düşük TKM değeri, 1889 mg/L ile iken aynı günlerin OM değerleri 3449 mg/L ve 537 ng/L'dir. Bu değerlere göre TKM ve OM giderim verimleri sırası ile % 70 ve % 85'dir.



Şekil 4.15. TKM ve OM değerlerinin zamansal değişimi (Anaerobik bölme)

Termal alkali ön işlem görmüş çamurun işletim süresi boyunca elektrik, güç ve akım yoğunluğunun değişimi Şekil 4.16'de verilmiştir. Şekil 4.16 (a) da verilen mV cinsinden elektrik üretim değerleri incelendiğinde, en yüksek elektrik üretimi 1060 mV, ortalama elektrik üretimi ise 440 mV olarak belirlenmiştir. Güç değerlerinin değişimi Şekil 4.16 (b)'de verilmiştir. Buna göre, en yüksek güç 2.81 mW, ortalama güç ise 0.67 mW olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.16 (c)'de verilen akım yoğunluğu değerleri incelendiğinde ise en yüksek akım yoğunluğunun 28. günde 0.38 mA/cm^2, en düşük 0.0067 $mA/cm^{2Öz}$ ile 1. günde elde edilmiştir. Literatürde anaerobik çamur ile beslenen sistemlere göre (Jang ve ark., 2004; Wang ve ark., 2009; Oh ve Logan, 2005) termal alkali ön işlem görmüş çamuru ile elde edilen akım yoğunluğunun oldukça fazla olduğu görülmüştür. Oh ve ark. (2014)'ün çalışmasına göre, ısı/alkali birleşimi ile ön arıtılmış çamur (0,04 N NaOH, 120 ^oC, 1 saat), sırası ile ön çökeltim, aşı çamuru ve anaerobik çürütücü çamuru için 10.03, 5.21 ve 12.53 mW/m^2 akım yoğunluğu ve 83 %, 75 % ve 74 % KOİ giderimi sağlamıştır. Ayrıca, Patil ve ark. (2009) tarafından yapılan ve çikolata fabrikasından elde edilen atık çamurun aktif çamur ile beslenmesi sonucu elde edilen en yüksek akım yoğunluğundan (0.302 mA/cm^2) fazla olduğu görülmüştür. Buna göre, çamurun, termal alkali ön işlem görmesinin elektrik üretimini bariz bir şekilde arttırdığı belirlenmiştir. İşlem görmemiş ve Fenton prosesi ile işlem görmüş çamurdan elde edilen güç ve akım yoğunluğu değerlerine göre, termal alkali ön işlem görmüş çamurda çok daha fazla bir elektrik üretimi olduğu görülmüştür.



Şekil 4.16. Termal alkali ön arıtım sonucunda elektrik üretiminin değişimi (a-mV, b-Güç, c-Akım yoğunluğu)

Elektrik üretim değerleri ile ilgili olarak da geri devir çamuruna herhangi bir hidroliz işlemi yapılmadan MYH ile elde edilen en yüksek akım yoğunluğu değerinin 0.02 mA/cm^2, Fenton prosesi ile elde edilen en yüksek akım yoğunluğu değerinin ise 0.221 mA/cm^2 olduğu görülmektedir. Fenton Prosesi sonucu geri devir çamuru ile elde edilen akım yoğunluğu ham geri devir çamuru ile elde edilenin 10 katı kadar olduğunu söylemek mümkündür. Termal alkali ön işlem görmüş çamurda elde edilen en yüksek akım yoğunluğu 0.38 mA/cm^2 olarak bulunmuştur. Böylece, Fenton Prosesi ve termal alkali işlemlerinin elektrik üretimini arttırdığı görülmüştür.

MYH Sistemlerinin aerobik ve anaerobik bölmelerindeki KOİ, TKM ve OM giderim verimler ile ve bu sistemlerden elde edilen elektrik değerlerinin karşılaştırılması Çizelge 4.2.'de verilmiştir.

Hem aerobik hem de anaerobik bölmesi ham geri devir çamuru ile beslenen MYH sistemlerinde (modifiye olmayan, kontrol) aerobik ve anaerobik bölmelerinin her ikisi de aynı özellikteki çamurla beslendiği için KOİ veya katı madde giderimi açısından çok büyük farklılıklar yoktur. Aerobik bölmedeki $KOİ_T$ ve $KOİ_Ç$ giderim verimleri sırası ile % 47.2 ve % 53 iken, anaerobik bölmedeki $KOİ_T$ ve $KOİ_Ç$ değerleri % 73.8 ve % 50'dir. Aerobik bölmedeki TKM ve OM verimleri sırası ile % 63.3 ve % 66 iken, anaerobik bölmede sırası ile % 50 ve % 64'tür. Özellikle $KOİ_Ç$ giderim verimlerinin ve OM giderimlerinde yakın değerler almıştır.

Fenton Prosesli MYH sisteminde, anaerobik bölme Fenton Prosesi ile işlem görmüş çamurla beslenirken aerobik bölme hem geri devir çamuru ile beslenmeye devam edilmiştir. Anaerobik bölmedeki $KOİ_T$ ve $KOİ_Ç$ değerleri sırası ile % 61 ve % 59'dur. Her iki bölmedeki KOİ giderim verimleri birbirlerine yakın değerler alırken OM giderimleri noktasında anaerobik bölmenin az bir artış gösterdiğini söylemek mümkündür. Anaerobik bölmenin OM giderimi % 57.5 iken anaerobik bölmenin ise % 60'dur. Anaerobik bölmedeki bu küçük artışa göre Fenton Prosesi'nin organik madde indirgemesini olumlu etkilediği söylenebilir. Bunun ötesinde Fenton Prosesi ile kombine edilmiş MYH sisteminin işletimi boyunca anaerobik bölmedeki TKM ve OM'nin giderek azalıyor olması işletim periyodunun daha uzun tutulması halinde daha

yüksek giderim verimleri ile sonuçlanacağı tahmin edilmektedir (Şekil 4.10). Fakat laboratuvar koşullarındaki birtakım aksaklıklar nedeniyle Fenton Prosesli MYH sistemi 1aylık işletim sistemi ile sınırlandırılmıştır.

Termal alkali ön işlemle arıtılmış çamurla işletilen modifiye MYH sisteminde de anaerobik bölme termal-alkali ön işlemle arıtılmış çamurla beslenirken aerobik bölme ham geri devir çamurla beslenmiştir. Aerobik bölmedeki $KOİ_T$ ve $KOİ_Ç$ değerleri sırası ile % 74.6 ve % 97.7 iken anaerobik bölmede her iki değer de% 83.3'tür. Aerobik bölmedeki TKM veOM giderim verimleri sırası ile % 52 ve % 50 iken, anaerobik bölmede sırası ile % 70 ve % 85'e ulaşmıştır. Anaerobik bölmedeki bu değerlere göre MYH sisteminin hem KOİ gideriminde hem de çamur azaltma noktasında başarılı olduğu söylenebilir.

3 sistemi, özellikle anaerobik bölmedeki $KOİ_Ç$ ve OM giderimleri yönünden karşılaştırdığımız zaman geri devir çamuru ile beslenen MYH sistemindeki $KOİ_Ç$ ve OM giderim verimlerinin sırası ile % 50 ve % 64 iken, Fenton prosesli MYH sistemlerinde bu değerler sırası ile % 83.3 ve % 85'tir. Bu durumda, 3 sistem arasından hem KOİ hem de OM giderimi açısından en etkili MYH sisteminin termal/alkali ön işlem ile birleştirilmiş MYH sistemi olduğunu söylemek mümkündür. Bu sistemin yüksek çamur arıtım ve azaltma performansı MYH sistemlerinin temel amaçlarından biri olan elektrik üretimi ile de örtüşmektedir.

Çizelge 4.2. MYH sistemlerinin anaerobik bölmesindeki çamur özelliklerinin ve bu sistemlerden elde edilen elektrik değerlerinin karşılaştırılması

MYH Sistemi	**Aerobik Bölme Giderim (%)**				**Anaerobik Bölme Giderim (%)**				**Elektrik Üretimi (Maksimum değerler)**		
	$KOİ_T$	***$KOİ_Ç$***	***TKM***	***OM***	***$KOİ_T$***	***$KOİ_Ç$***	***TKM***	***OM***	***Voltaj (V)***	***Güç (mW)***	***Akım Yoğunluğu (mA/cm^2)***
Geri devir çamurulu MYH	47.2	53	63.3	66	73.8	50	50	64	57	0.008	0.002
Fentonlu MYH	56.8	62	42	57.5	61	59	55	60	620	0.961	0.221
Termal Alkali MYH	74.6	97.7	52	50	83.3	83.3	70	85	1060	2.81	0.38

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, atıksu arıtma tesisinden alınan geri devir çamurunun MYH işletimi ile Fenton ve termal alkali ön işlemleri muamele görmüş çamurun MYH'deki performansı, çamur arıtımı ve elektrik üretim açısından değerlendirilerek karşılaştırılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar ışığında;

- ✓ MYH'nin, organik içeriği yüksek olan çamurların arıtımı ve elektrik üretimi konusunda etkin bir şekilde işletilebilen sistemler olduğu söylenebilir.

- ✓ Geri devir çamuru ile işletilen MYH'nde her iki bölmede de yaklaşık olarak % 65 OM giderimi sağlanırken, maksimum 0.002 mA/cm^2 akım yoğunluğu gözlenmiştir.

- ✓ Anaerobik bölmesi Fenton Prosesi ile işlem görmüş çamurla beslenerek işletilen MYH'nde her iki bölmede de yaklaşık olarak % 60 OM giderimi sağlanırken, akım yoğunluğu geri devir çamuru ile işletilen MYH'den daha yüksek değeler alarak maksimum 0.221 mA/cm^2'e ulaşmıştır.

- ✓ Anaerobik bölmesi termal alkali ile işlem görmüş çamurla beslenerek işletilen MYH'nde anaerobik bölmesinde % 85'lik OM giderimi ve % 83.3'lük $KOİ_Ç$ giderimi ve maksimum 0.38 mA/cm^2 akım yoğunluğu sağlamıştır.

- ✓ Elektrik üretim değerlerinde ise geri devir çamuruna herhangi bir hidroliz işlemi yapılmadan MYH ile elde edilen en yüksek akım yoğunluğu değeri 0.02 mA/cm^2, Fenton prosesi ile elde edilen en yüksek akım yoğunluğu değeri ise 0.221 mA/cm^2 olarak belirlenmiştir. Fenton prosesi sonucu geri devir çamuru ile elde edilen akım yoğunluğu neredeyse 10 kat daha fazla olmuştur. Bunun yanında, termal alkali ön işlem görmüş çamurda elde edilen en yüksek akım yoğunluğu 0.38 mA/cm^2 olarak bulunmuştur. Böylece, Fenton prosesi termal alkali işlemlerinin elektrik üretimini ciddi anlamda arttırdığı sonucuna varılmıştır.

- ✓ Ön işlem görmüş çamurla beslenen MYH, anaerobik bölmedeki hız sınırlayıcı adımı hızlandırarak organik maddenin parçalanmasını geliştirmiş ve hem çamur arıtımı açısından hem de elektrik üretimi yönünden olumlu sonuçlar elde edilebileceğini göstermiştir.

- ✓ MYH'nin daha verimli işletilmesi için performansa etki eden parametre ve değikenlerin optimizasyonu gerekmektedir. Söz gelimi, en uygun elektrot, hangi proton değiştirici membran kullanılması durumun daha yüksek sonuçlar alıncağı, hangi konfigürasyonda MYH seçileceği, ne tip çamur için MYH sisteminin daha verimli olacağı ve hangi çamur parçalama ön işleminin daha etkili olacağı ile ilgili daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

KAYNAKLAR

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA) 2005. Standard methods for Examination of water and Wastewater, 21th Edition, APHA, Washington D C.

BIRYOL, İ. 2013. Improved Sludge Bioprocessing and Energy Harvesting Using Different Microbial Fuel Cell (MFC) Configurations. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir, 87s.

BOND, D. R., HOLMES, D. E., TENDER, L. M. and LOVLEY, D. R. 2002. Electrode-reducing microorganisms that harvest energy from marine sediments. Science, 295: 483-485.

BOND, D. R. and LOVLEY, D. R. 2003. Electricity production by Geobacter sulfurreducens attached to electrodes. Appl. Environ. Microbiol., 69: 1548-1555.

BOUGRIER, C., ALBASI, C., DELGENÈS, J. P. and CARRÈRE, H. 2006. Effect of ultrasonic, thermal and ozone pre-treatments on waste activated sludge solubilisation and anaerobic biodegradability. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 45: 711-718.

BOUGRIER, C., DELGENÈS, J. P. and CARRÈRE, H. 2008. Effects of thermal treatments on five different waste activated sludge samples solubilisation, physical properties and anaerobic digestion. Chemical Engineering Journal, 139: 236-244.

BULLEN, R. A., ARNOT, T., LAKEMAN, J. and WALSH, F. 2006. Biofuel cells and their development. Biosensors and Bioelectronics, 21: 2015-2045.

CHANG, T.-C., YOU, S.-J., DAMODAR, R. A. and CHEN, Y.-Y. 2011. Ultrasound pre-treatment step for performance enhancement in an aerobic sludge digestion process. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 42: 801-808.

CHAUDHURI, S. K. and LOVLEY, D. R. 2003. Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediatorless microbial fuel cells. Nature biotechnology, 21: 1229–1232.

CHENG, S., LIU, H. and LOGAN, B. E. 2006. Increased performance of single-chamber microbial fuel cells using an improved cathode structure. Electrochemistry Communications, 8: 489-494.

CHOI, Y., JUNG, E., KIM, S. and JUNG, S. 2003. Membrane fluidity sensoring microbial fuel cell. Bioelectrochemistry, 59: 121-127.

DEMIR, Ö. 2018. Performance of thermophilic anaerobic sludge digester after alkaline-assisted thermal disintegration optimization using response surface methodology. Water and Environment Journal, 32: 597-606.

DENTEL, S., STROGEN, B. and CHIU, P. 2004. Direct generation of electricity from sludges and other liquid wastes. Water Science and Technology, 50: 161-168.

DEWIL, R., BAEYENS, J. and NEYENS, E. 2005. Fenton peroxidation improves the drying performance of waste activated sludge. Journal of hazardous materials, 117: 161-170.

DU, Z., LI, H. and GU, T. 2007. A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. Biotechnology Advances, 25: 464-482.

FANG, W., ZHANG, P., ZHANG, G., JIN, S., LI, D., ZHANG, M. and XU, X. 2014. Effect of alkaline addition on anaerobic sludge digestion with combined pretreatment of alkaline and high pressure homogenization. Bioresource technology, 168: 167-172.

FARGIONE, J., HILL, J., TILMAN, D., POLASKY, S. and HAWTHORNE, P. 2008. Land clearing and the biofuel carbon debt. Science, 319: 1235-1238.

FENG, Y., ZHANG, Y., CHEN, S. and QUAN, X. 2015. Enhanced production of methane from waste activated sludge by the combination of high-solid anaerobic digestion and microbial electrolysis cell with iron–graphite electrode. Chemical Engineering Journal, 259: 787-794.

FERRER, I., PONSÁ, S., VÁZQUEZ, F. and FONT, X. 2008. Increasing biogas production by thermal (70 C) sludge pre-treatment prior to thermophilic anaerobic digestion. Biochemical Engineering Journal, 42: 186-192.

GE, Z., ZHANG, F., GRIMAUD, J., HURST, J. and HE, Z. 2013. Long-term investigation of microbial fuel cells treating primary sludge or digested sludge. Bioresource technology, 136: 509-514.

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

GHADGE, A. N., JADHAV, D. A., PRADHAN, H. and GHANGREKAR, M. M. 2015. Enhancing waste activated sludge digestion and power production using hypochlorite as catholyte in clayware microbial fuel cell. Bioresource technology, 182: 225-231.

GONG, C., JIANG, J. and LI, D. a. 2015. Ultrasound coupled with Fenton oxidation pre-treatment of sludge to release organic carbon, nitrogen and phosphorus. Science of the Total Environment, 532: 495-500.

GRZEBYK, M. and POŹNIAK, G. 2005. Microbial fuel cells (MFCs) with interpolymer cation exchange membranes. Separation and Purification Technology, 41: 321-328.

HAMELERS, H. V., TER HEIJNE, A., SLEUTELS, T. H., JEREMIASSE, A. W., STRIK, D. P. and BUISMAN, C. J. 2010. New applications and performance of bioelectrochemical systems. Applied Microbiology and Biotechnology, 85: 1673-1685.

HE, Z., WAGNER, N., MINTEER, S. D. and ANGENENT, L. T. 2006. An upflow microbial fuel cell with an interior cathode: assessment of the internal resistance by impedance spectroscopy. Environmental science & technology, 40: 5212-5217.

HU, Z. 2008. Electricity generation by a baffle-chamber membraneless microbial fuel cell. Journal of Power Sources, 179: 27-33.

IEROPOULOS, I. A., GREENMAN, J., MELHUISH, C. and HART, J. 2005. Comparative study of three types of microbial fuel cell. Enzyme and microbial technology, 37: 238-245.

JANG, J. K., PHAM, T. H., CHANG, I. S., KANG, K. H., MOON, H., CHO, K. S. and KIM, B. H. 2004. Construction and operation of a novel mediator-and membrane-less microbial fuel cell. Process Biochemistry, 39: 1007-1012.

JIANG, J., ZHAO, Q., WANG, K., WEI, L., ZHANG, G. and ZHANG, J. 2010. Effect of ultrasonic and alkaline pretreatment on sludge degradation and electricity

generation by microbial fuel cell. Water Science and Technology, 61: 2915-2921.
JIANG, J., ZHAO, Q., WEI, L., WANG, K. and 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.
JIANG, J., ZHAO, Q., ZHANG, J., ZHANG, G. and LEE, D.-J. 2009. Electricity generation from bio-treatment of sewage sludge with microbial fuel cell. Bioresource technology, 100: 5808-5812.
KAYNAK, G. E. and FILIBELI, A. 2008. Assessment of Fenton process as a minimization technique for biological sludge: effects on anaerobic sludge bioprocessing. Journal of Residuals Science & Technology, 5: 151-160.
KI, D., PARAMESWARAN, P., POPAT, S. C., RITTMANN, B. E. and TORRES, C. I. 2015. Effects of pre-fermentation and pulsed-electric-field treatment of primary sludge in microbial electrochemical cells. Bioresource technology, 195: 83-88.
KIM, B. H., KIM, H. J., HYUN, M. S. and PARK, D. H. 1999a. Direct electrode reaction of Fe (III)-reducing bacterium, Shewanella putrefaciens. Journal of Microbiology and Biotechnology, 9: 127-131.
KIM, B. H., PARK, H., KIM, H., KIM, G., CHANG, I., LEE, J. and PHUNG, N. 2004. Enrichment of microbial community generating electricity using a fuel-cell-type electrochemical cell. Applied Microbiology and Biotechnology, 63: 672-681.
KIM, H. J., HYUN, M. S., CHANG, I. S. and KIM, B. H. 1999b. A microbial fuel cell type lactate biosensor using a metal-reducing bacterium, Shewanella putrefaciens. Journal of Microbiology and Biotechnology, 9: 365-367.
KIM, H. J., PARK, H. S., HYUN, M. S., CHANG, I. S., KIM, M. and KIM, B. H. 2002. A mediator-less microbial fuel cell using a metal reducing bacterium, Shewanella putrefaciens. Enzyme and microbial technology, 30: 145-152.
KIM, J., YU, Y. and LEE, C. 2013. Thermo-alkaline pretreatment of waste activated sludge at low-temperatures: Effects on sludge disintegration, methane production, and methanogen community structure. Bioresource technology, 144: 194-201.
KIM, T.-H., NAM, Y.-K., PARK, C. and LEE, M. 2009. Carbon source recovery from waste activated sludge by alkaline hydrolysis and gamma-ray irradiation for biological denitrification. Bioresource technology, 100: 5694-5699.
KÖROĞLU, E. O. 2013. Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinde Evsel Atıksulardan Elektrik Üretimi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 104s.
LARMINIE, J., DICKS, A. and MCDONALD, M. S. 2003. Fuel cell systems explained, J. Wiley Chichester, UK, 418p.
LEE, S. A., CHOI, Y., JUNG, S. and KIM, S. 2002. Effect of initial carbon sources on the electrochemical detection of glucose by Gluconobacter oxydans. Bioelectrochemistry, 57: 173-178.
LENS, P., WESTERMANN, P., HABERBAUER, M. and MORENO, A. 2005. Biofuels for fuel cells, IWA publishing: London, UK, 544p.
LEWIS, K. 1966. Symposium on bioelectrochemistry of microorganisms. IV. Biochemical fuel cells. Bacteriological reviews, 30: 101-113.

LI, H., LI, C., LIU, W. and ZOU, S. 2012. Optimized alkaline pretreatment of sludge before anaerobic digestion. Bioresource technology, 123: 189-194.
LIN, J.-G., CHANG, C.-N. and CHANG, S.-C. 1997. Enhancement of anaerobic digestion of waste activated sludge by alkaline solubilization. Bioresource technology, 62: 85-90.
LIU, H. and LOGAN, B. E. 2004. Electricity generation using an air-cathode single chamber microbial fuel cell in the presence and absence of a proton exchange membrane. Environmental science & technology, 38: 4040-4046.
LIU, H., RAMNARAYANAN, R. and LOGAN, B. E. 2004. Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell. Environmental science & technology, 38: 2281-2285.
LIU, Z., LIAN, J., DU, Z. and LI, H. 2006. Construction of Sugar-based Microbial Fuel Cells by Dissimilatory Metal Reduction Bacteria. Chinese Journal of biotechnology, 22: 131-137.
LOGAN, B. E. 2008. Microbial fuel cells, John Wiley & Sons: New Jersey, USA, 200p.
LOGAN, B. E., HAMELERS, B., ROZENDAL, R., SCHRÖDER, U., KELLER, J., FREGUIA, S., AELTERMAN, P., VERSTRAETE, W. and RABAEY, K. 2006. Microbial fuel cells: methodology and technology. Environmental science & technology, 40: 5181-5192.
LOGAN, B. E. and REGAN, J. M. 2006. Electricity-producing bacterial communities in microbial fuel cells. TRENDS in Microbiology, 14: 512-518.
LOVLEY, D. R. 2006. Bug juice: harvesting electricity with microorganisms. Nature Reviews Microbiology, 4: 497-508.
MENICUCCI, J., BEYENAL, H., MARSILI, E., VELUCHAMY, R. A., DEMIR, G. and LEWANDOWSKI, Z. 2006. Procedure for determining maximum sustainable power generated by microbial fuel cells. Environmental science & technology, 40: 1062-1068.
MIN, B., CHENG, S. and LOGAN, B. E. 2005. Electricity generation using membrane and salt bridge microbial fuel cells. Water research, 39: 1675-1686.
MORE, T. and GHANGREKAR, M. 2010. Improving performance of microbial fuel cell with ultrasonication pre-treatment of mixed anaerobic inoculum sludge. Bioresource technology, 101: 562-567.
NANCHARAIAH, Y., MOHAN, S. V. and LENS, P. 2015. Metals removal and recovery in bioelectrochemical systems: a review. Bioresource technology, 195: 102-114.
NEYENS, E., BAEYENS, J., WEEMAES, M. and DE HEYDER, B. 2003. Pilot-scale peroxidation (H2O2) of sewage sludge. Journal of hazardous materials, 98: 91-106.
NIESSEN, J., HARNISCH, F., ROSENBAUM, M., SCHRÖDER, U. and SCHOLZ, F. 2006. Heat treated soil as convenient and versatile source of bacterial communities for microbial electricity generation. Electrochemistry Communications, 8: 869-873.
NIESSEN, J., SCHRÖDER, U. and SCHOLZ, F. 2004. Exploiting complex carbohydrates for microbial electricity generation–a bacterial fuel cell operating on starch. Electrochemistry Communications, 6: 955-958.

OH, S.-E. and LOGAN, B. E. 2006. Proton exchange membrane and electrode surface areas as factors that affect power generation in microbial fuel cells. Applied Microbiology and Biotechnology, 70: 162-169.

OH, S.-E., YOON, J. Y., GURUNG, A. and 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.

OH, S. and LOGAN, B. E. 2005. Hydrogen and electricity production from a food processing wastewater using fermentation and microbial fuel cell technologies. Water research, 39: 4673-4682.

PANT, D., VAN BOGAERT, G., DIELS, L. and VANBROEKHOVEN, K. 2010. A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production. Bioresource technology, 101: 1533-1543.

PARK, D., KIM, B., MOORE, B., HILL, H., SONG, M. and RHEE, H. 1997. Electrode reaction of Desulfovibrio desulfuricans modified with organic conductive compounds. Biotechnology techniques, 11: 145-148.

PARK, D., LAIVENIEKS, M., GUETTLER, M., JAIN, M. and ZEIKUS, J. 1999. Microbial utilization of electrically reduced neutral red as the sole electron donor for growth and metabolite production. Appl. Environ. Microbiol., 65: 2912-2917.

PARK, D. and ZEIKUS, J. 1999. Utilization of electrically reduced neutral Red byActinobacillus succinogenes: physiological function of neutral Red in membrane-driven fumarate reduction and energy conservation. Journal of bacteriology, 181: 2403-2410.

PARK, D. and ZEIKUS, J. 2002. Impact of electrode composition on electricity generation in a single-compartment fuel cell using Shewanella putrefaciens. Applied Microbiology and Biotechnology, 59: 58-61.

PARK, D. H. and ZEIKUS, J. G. 2000. Electricity generation in microbial fuel cells using neutral red as an electronophore. Appl. Environ. Microbiol., 66: 1292-1297.

PARK, D. H. and ZEIKUS, J. G. 2003. Improved fuel cell and electrode designs for producing electricity from microbial degradation. Biotechnology and bioengineering, 81: 348-355.

PARK, H. S., KIM, B. H., KIM, H. S., KIM, H. J., KIM, G. T., KIM, M., CHANG, I. S., PARK, Y. K. and CHANG, H. I. 2001. A novel electrochemically active and Fe (III)-reducing bacterium phylogenetically related to Clostridium butyricum isolated from a microbial fuel cell. Anaerobe, 7: 297-306.

PATIL, S. A., SURAKASI, V. P., KOUL, S., IJMULWAR, S., VIVEK, A., SHOUCHE, Y. and KAPADNIS, B. 2009. Electricity generation using chocolate industry wastewater and its treatment in activated sludge based microbial fuel cell and analysis of developed microbial community in the anode chamber. Bioresource technology, 100: 5132-5139.

PHAM, C. A., JUNG, S. J., PHUNG, N. T., LEE, J., CHANG, I. S., KIM, B. H., YI, H. and CHUN, J. 2003. A novel electrochemically active and Fe (III)-reducing bacterium phylogenetically related to Aeromonas hydrophila, isolated from a microbial fuel cell. FEMS Microbiology Letters, 223: 129-134.

POTTER, M. C. 1911. Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds. Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Containing Papers of a Biological Character, 84: 260-276.

RABAEY, K., BOON, N., HÖFTE, M. and VERSTRAETE, W. 2005a. Microbial phenazine production enhances electron transfer in biofuel cells. Environmental science & technology, 39: 3401-3408.

RABAEY, K., BOON, N., SICILIANO, S. D., VERHAEGE, M. and VERSTRAETE, W. 2004. Biofuel cells select for microbial consortia that self-mediate electron transfer. Appl. Environ. Microbiol., 70: 5373-5382.

RABAEY, K., CLAUWAERT, P., AELTERMAN, P. and VERSTRAETE, W. 2005b. Tubular microbial fuel cells for efficient electricity generation. Environmental science & technology, 39: 8077-8082.

RABAEY, K., LISSENNS, G. and VERSTRAETE, W. 2011. Microbial fuel cells: Performances and perspectives, IWA Publishing: London, UK, 399p.

RABAEY, K., LISSENS, G., SICILIANO, S. D. and VERSTRAETE, W. 2003. A microbial fuel cell capable of converting glucose to electricity at high rate and efficiency. Biotechnology letters, 25: 1531-1535.

RABAEY, K. and VERSTRAETE, W. 2005. Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. TRENDS in Biotechnology, 23: 291-298.

REIMERS, C. E., TENDER, L. M., FERTIG, S. and WANG, W. 2001. Harvesting energy from the marine sediment− water interface. Environmental science & technology, 35: 192-195.

RHOADS, A., BEYENAL, H. and LEWANDOWSKI, Z. 2005. Microbial fuel cell using anaerobic respiration as an anodic reaction and biomineralized manganese as a cathodic reactant. Environmental science & technology, 39: 4666-4671.

RINGEISEN, B. R., HENDERSON, E., WU, P. K., PIETRON, J., RAY, R., LITTLE, B., BIFFINGER, J. C. and JONES-MEEHAN, J. M. 2006. High power density from a miniature microbial fuel cell using Shewanella oneidensis DSP10. Environmental science & technology, 40: 2629-2634.

SCHRÖDER, U., NIEßEN, J. and SCHOLZ, F. 2003. A generation of microbial fuel cells with current outputs boosted by more than one order of magnitude. Angewandte Chemie International Edition, 42: 2880-2883.

SCOTT, K. and MURANO, C. 2007. A study of a microbial fuel cell battery using manure sludge waste. Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental & Clean Technology, 82: 809-817.

SELL, D., KRÄMER, P. and KREYSA, G. 1989. Use of an oxygen gas diffusion cathode and a three-dimensional packed bed anode in a bioelectrochemical fuel cell. Applied Microbiology and Biotechnology, 31: 211-213.

SHARMA, V. and KUNDU, P. 2010. Biocatalysts in microbial fuel cells. Enzyme and microbial technology, 47: 179-188.

SHEHU, M. S., MANAN, Z. A. and ALWI, S. R. W. 2012. Optimization of thermo-alkaline disintegration of sewage sludge for enhanced biogas yield. Bioresource technology, 114: 69-74.

SHRIVER, D. and ATKINS, P. 2006. Inorganic chemistry,, Oxford University Press: New York, USA, 822p.

TAŞKAN, E. 2013. Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinde Farklı Kirleticilere Göre Elektrik Üretim Kapasitesi ve Mikrobiyal Tür Değişiminin İncelenmesi. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ, 272s.

TENDER, L. M., REIMERS, C. E., STECHER III, H. A., HOLMES, D. E., BOND, D. R., LOWY, D. A., PILOBELLO, K., FERTIG, S. J. and LOVLEY, D. R. 2002. Harnessing microbially generated power on the seafloor. Nature biotechnology, 20: 821-825.

THURSTON, C., BENNETTO, H., DELANEY, G., MASON, J., ROLLER, S. and STIRLING, J. 1985. Glucose metabolism in a microbial fuel cell. Stoichiometry of product formation in a thionine-mediated Proteus vulgaris fuel cell and its relation to coulombic yields. Microbiology, 131: 1393-1401.

VEGA, C. A. and FERNÁNDEZ, I. 1987. Mediating effect of ferric chelate compounds in microbial fuel cells with Lactobacillus plantarum, Streptococcus lactis, and Erwinia dissolvens. Bioelectrochemistry and Bioenergetics, 17: 217-222.

WANG, F., LU, S. and JI, M. 2006. Components of released liquid from ultrasonic waste activated sludge disintegration. Ultrasonics sonochemistry, 13: 334-338.

WANG, R., ZHAO, Z., YIN, Q. and LIU, J. 2016. Effects of the low-temperature thermo-alkaline method on the rheological properties of sludge. Journal of environmental management, 177: 74-83.

WANG, X., FENG, Y., REN, N., WANG, H., LEE, H., LI, N. and ZHAO, Q. 2009. Accelerated start-up of two-chambered microbial fuel cells: effect of anodic positive poised potential. Electrochimica Acta, 54: 1109-1114.

WANG, Z., MEI, X., MA, J. and WU, Z. 2012. Recent advances in microbial fuel cells integrated with sludge treatment. Chemical Engineering & Technology, 35: 1733-1743.

WATANABE, K. 2008. Recent developments in microbial fuel cell technologies for sustainable bioenergy. Journal of bioscience and bioengineering, 106: 528-536.

XIAO, B., YANG, F. and LIU, J. 2011. Enhancing simultaneous electricity production and reduction of sewage sludge in two-chamber MFC by aerobic sludge digestion and sludge pretreatments. Journal of hazardous materials, 189: 444-449.

XIAO, B., YANG, F. and LIU, J. 2013. Evaluation of electricity production from alkaline pretreated sludge using two-chamber microbial fuel cell. Journal of hazardous materials, 254: 57-63.

YOU, S., ZHAO, Q., JIANG, J. and ZHANG, J. 2006. Treatment of domesticwastewaterwith simultaneous electricity generation in microbial fuel cell under continuous operation. Chemical and biochemical engineering quarterly, 20: 407-412.

YUSOFF, M. Z. M., HU, A., FENG, C., MAEDA, T., SHIRAI, Y., HASSAN, M. A. and YU, C.-P. 2013. Influence of pretreated activated sludge for electricity generation in microbial fuel cell application. Bioresource technology, 145: 90-96.

ZHANG, D., CHEN, Y., ZHAO, Y. and YE, Z. 2010. A new process for efficiently producing methane from waste activated sludge: alkaline pretreatment of sludge followed by treatment of fermentation liquid in an EGSB reactor. Environmental science & technology, 45: 803-808.

ZHANG, E., XU, W., DIAO, G. and SHUANG, C. 2006. Electricity generation from acetate and glucose by sedimentary bacterium attached to electrode in microbial-anode fuel cells. Journal of Power Sources, 161: 820-825.

ZHANG, Q., TANG, L., ZHANG, J., MAO, Z. and JIANG, L. 2011. Optimization of thermal-dilute sulfuric acid pretreatment for enhancement of methane production from cassava residues. Bioresource technology, 102: 3958-3965.

ZHANG, Y., ZHANG, P., ZHANG, G., MA, W., WU, H. and MA, B. 2012. Sewage sludge disintegration by combined treatment of alkaline+ high pressure homogenization. Bioresource technology, 123: 514-519.

ZHAO, F., HARNISCH, F., SCHRÖDER, U., SCHOLZ, F., BOGDANOFF, P. and HERRMANN, I. 2005. Application of pyrolysed iron (II) phthalocyanine and CoTMPP based oxygen reduction catalysts as cathode materials in microbial fuel cells. Electrochemistry Communications, 7: 1405-1410.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Elif GÜMÜŞ
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Samsun / 01.01.1989
Telefon : 0 (553) 489 49 88
e-mail : euelifuyanik@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı	İlçe / İl	Bitirme Yılı
Lise	Cumhuriyet Lisesi	Atakum/ Samsun	2006
Lisans	Çukurova Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi, Su Ürünleri Mühendisliği	Adana	2012
Y. Lisans	Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı	Şanlıurfa	2019

İŞ DENEYİMİ

Yok

UZMANLIK ALANI:

Mikrobiyal yakıt hücreleri, fenton prosesi

YABANCI DİLLER:

İngilizce (IELTS:6.5)

YAYINLAR:

DEMİR, Ö., ve GÜMÜŞ, E. Mikrobiyal Yakıt Hücreleri ile Çamur Arıtımı ve Elektrik Üretimi. *Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, *1*(2), 81-89.