



T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
BİYOTEKNOLOJİ ANABİLİM DALI

EKSTREM SICAKLIK DEĞERLERİNİN MİKROBİYAL YAKIT HÜCRELERİNDE
VOLTAJ ÜRETİMİNE ETKİSİNİN BELİRLENMESİ

ÖZGE ÇETİN

Ocak 2022

T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
BİYOTEKNOLOJİ ANABİLİM DALI

EKSTREM SICAKLIK DEĞERLERİNİN MİKROBİYAL YAKIT HÜCRELERİNDE
VOLTAJ ÜRETİMİNE ETKİSİNİN BELİRLENMESİ

ÖZGE ÇETİN

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Tuba ARTAN ONAT

Ocak 2022

Özge ÇETİN tarafından **Dr. Öğr. Üyesi. Tuba ARTAN ONAT** danışmanlığında hazırlanan “**EKSTREM SICAKLIK DEĞERLERİNİN MİKROBİYAL YAKIT HÜCRELERİNDE VOLTAJ ÜRETİMİNE ETKİSİNİN BELİRLENMESİ**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Biyoloji** Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Sevgi Ertuğrul Karatay (Ankara Üniversitesi)

Üye : Prof. Dr. Ayten Öztürk (Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi. Tuba ARTAN ONAT (Danışman) (Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi)

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/....../2022 tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun/....../2022 tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../2022

Prof. Dr. Murat BARUT
MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Özge ÇETİN

ÖZET

EKSTREM SICAKLIK DEĞERLERİNİN MİKROBİYAL YAKIT HÜCRELERİNDE VOLTAJ ÜRETİMİNE ETKİSİNİN BELİRLENMESİ

ÇETİN, Özge

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Biyoteknoloji Anabilim Dalı

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Tuba ARTAN ONAT

Ocak 2022, 55 sayfa

Evsel veya endüstriyel atık sulardaki organik moleküllerin parçalanarak kimyasal enerjinin ortaya çıkmasını ve bu enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi veya yeni ürünler oluşmasını sağlayan biyo-elektrokimyasal sistemlere Mikrobiyal Yakıt Hücresi (MYH) adı verilir. Gerçekleştirilen tez çalışmasında farklı sıcaklıkların mikrobiyal komünite ve biyoelektrik üretim kapasitesine olan etkisi incelenmiştir. Yapılan deney sonuçlarından anlaşıldığı üzere 15°C sıcaklıkta dengeli gerilim üretimi olmadığı ve bu durumda verimli güç üretimi olmayacağı düşünülmektedir. 45°C sıcaklıkta ise gerilim üretimi 0,5V ve akım üretimi yaklaşık 15 nA olarak belirlenmiştir ve tüm inkübasyon periyodu boyunca dengeli olarak devam etmiştir. Bu bakımdan 45°C sıcaklıkların biyoelektrik üretimi açısından uygun olduğu görülmektedir. Yakıt hücresinde yapılan mikrobiyal parametre takiplerinde ise 45°C sıcaklıkta 3 mg/mL kuruağırlık ve yaklaşık absorbans değeri 6,00 olarak belirlenmiş ve buna bağlı olarak daha yüksek biyomas üretimi olduğu bulunmuştur. Bu durumda biyomas üretimi de dikkate alındığında 45°C sıcaklığın MYH’de daha etkin olarak kullanılabileceği bulunmuştur.

Anahtar sözcükler: Mikrobiyal yakıt pili, sıcaklık, mikrobiyal komünite, biyoelektrokimya, biyoelektrik, voltaj, atık su arıtımı, temiz enerji, yenilenebilir enerji

SUMMARY

DETERMINATION OF THE EFFECT OF EXTREME TEMPERATURE VALUES ON VOLTAGE GENERATION IN MICROBIAL FUEL CELLS

ÇETİN, Özge

Nigde Ömer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Biotechnology

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Tuba ARTAN ONAT

January 2022, 55 pages

Microbial Fuel Cell (MFC) is a bio-electrochemical system that breaks down organic molecules in domestic or industrial wastewater to produce chemical energy and convert this energy into electrical energy or create new products. In the thesis study, the effect of different temperatures on the microbial community and bioelectricity production capacity was investigated. As understood from the test results, it is thought that there is no stable voltage generation at 15°C and in this case there will be no efficient power generation. At 45°C, the voltage generation was 0.5V and the current generation was approximately 15 nA and remained stable throughout the entire incubation period. In this respect, temperatures of 45°C seem to be suitable for bioelectricity production. In the microbial parameter follow-ups made in the fuel cell, 3 mg/mL dry weight and an approximate absorbance value of 6.00 were determined at 45°C, and accordingly, higher biomass production was found. In this case, considering the biomass production, it was found that a temperature of 45°C could be used more effectively in MFC.

Keywords: Microbial fuel cells, temperature, microbial community, bioelectrochemistry, bioelectricity, voltage, wastewater treatment, clean energy, renewable energy

ÖN SÖZ

Öncelikle danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Tuba ARTAN ONAT'a tezim boyunca değerli bilgi ve deneyimleriyle bana rehberlik ettiği için çok teşekkür ederim. Danışman-öğrenci olarak karşılıklı güven neticesinde ilerlediğimiz bu yolda ne zaman bir sıkıntı yaşasam yanımda olup bana destek olduğu için kendisine sonsuz teşekkür ederim. Laboratuvar çalışmalarımız esnasında desteğini ve yardımlarını gördüğüm Dr. Öğr. Üyesi Özhan ŞENOL'a sonsuz teşekkür ederim.

Bu süreçte deneyim, bilgilerini ve yardımlarını benden esirgemeyen sevgili arkadaşlarım Elif CANPOLAT, Dr. Cihan DÜŞGÜN, Zeynep DÜZELTEN BALLI, Bilge Şevval YILDIRIM, Gizem SUNKAR, Ece ÖZCAN ve Cansu ÇİFÇİ'ye desteklerinden ve ilgilerinden dolayı teşekkür ederim. Aynı laboratuvarda çalışmaktan mutluluk ve gurur duyduğum sevgili ekip arkadaşlarım Yunus BOZKURT, Abdurrahman ZEYNO, Çiğdem AYDOĞMUŞ, Alp KOÇDEMİR ve Emre AKSOY'a yardımsever olmalarından dolayı çok teşekkür ederim.

Son olarak beni yetiştiren, her koşulda her daim arkamda olan, ileriye yönelik her adımında beni yüreklendiren maddi manevi her türlü yanımda olan sevgili ailem: annem Gülyüz ÇETİN'e sevgili babam Tuğrul ÇETİN'e, biricik kardeşim Benan ÇETİN'e benimle bir oldukları ve beni asla yalnız bırakmadıkları için özel ve minnet dolu bir teşekkürü borç bilirim. Bu zorlu ve tempolu süreçte laboratuvar çalışmalarında olsun, özel hayatımda olsun her zaman yanımda olan benden desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili nişanlım Evrim Meriç YELKUVAN'a sonsuz teşekkür ederim. Beni yüksek lisans yapmaya teşvik eden teyzem Dr. Öğr. Üyesi Gülşah TANRIÖVER'e teşekkür ederim. Ayrıca emeği geçen bütün arkadaşlarıma ve aile üyelerime teşekkürü borç bilirim.

Bu çalışma, FEB 2018/7 BAGEP numaralı projeye destek sağlayan Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine katkılarından dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
BÖLÜM I GİRİŞ	1
BÖLÜM II KAYNAK ÖZETLERİ	3
2.1 Mikrobiyal Yakıt Hücresi	3
2.1.1 Mikrobiyal yakıt hücrelerinin çalışma prensibi	4
2.1.2 Mikrobiyal yakıt hücrelerinin tipleri	6
2.1.3 Mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanılan malzemeler	7
2.2 Mikrobiyal Yakıt Hücresinin Güç Performansını Etkileyen Faktörler	10
2.2.1 Substrat etkisi	10
2.2.2 Medyatör etkisi	11
2.2.3 Mikrobiyal topluluk	12
2.2.4 Sıcaklık etkisi	13
2.2.5 Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ)	15
2.3 Enerji	16
2.3.1 Türkiye’deki kullanılan enerji kaynakları	18
2.3.2 Biyokütle enerjisi	18
BÖLÜM III MATERYAL VE METOD	20
3.1 Materyal	20
3.1.1 Pil hücresi ve elektrotlar	20
3.1.2 Kullanılan mikrobiyal kültür besiyeri ve diğer çözeltilerin içeriği	21
3.1.2.1 Fosfat tampon çözeltisi	21
3.1.2.2 Anot odacığında kullanılan melashı besiyeri	21
3.1.2.3 Wolfe vitamin çözeltisi	21
3.1.2.4 Katot odacığı için hazırlanan tampon çözeltisi	22

3.1.2.5 Tuz köprüsü	22
3.1.2.6 Mikrobiyal kültür.....	22
3.1.2.7 Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ).....	23
3.1.2.8 DNA izolasyonu ve polimeraz zincir reaksiyonu	23
3.1.2.9 Agaroz jel elektorforezi	24
3.2 Metot.....	25
3.2.1 Mikrobiyal yakıt hücresinin hazırlanması	25
3.2.2 Mikrobiyal yakıt hücresinin verilerinin hesaplanması	25
3.2.3 Anot odacığından örnek alımı ve analizleri.....	27
3.2.4 Polimeraz zincir reaksiyonu ve elektroforez	27
BÖLÜM IV BULGULAR.....	29
4.1 15°C Ait Araştırma Bulguları	29
4.1.1 Mikrobiyal yakıt hücresinde üretilen akım ve gerilim değerleri	29
4.1.2 Mikrobiyal yakıt hücresinde elde edilen güç ve akım yoğunlukları.....	31
4.1.3 Mikrobiyal yakıt hücresinde KOİ giderimi	32
4.1.4 Mikrobiyal yakıt hücresinde elde edilen kulombik etkinlik.....	32
4.1.5 Mikrobiyal kültür gelişimi.....	33
4.1.6 PCR ile elde edilen DNA örneklerine ait bant görüntüleri.....	34
4.2 45°C Ait Araştırma Verileri.....	35
4.2.1 Mikrobiyal yakıt hücresinde üretilen gerilim değerleri	35
4.2.2 Mikrobiyal yakıt hücresinden elde edilen güç ve akım yoğunlukları.....	36
4.2.3 Mikrobiyal yakıt hücresinde KOİ giderimi	37
4.2.4 Mikrobiyal yakıt hücresinde elde edilen kulombik etkinlik.....	38
4.2.5 Mikrobiyal kültür gelişimi.....	39
4.2.6 PCR ile elde edilen DNA örneklerine ait bant görüntüleri.....	39
BÖLÜM V TARTIŞMA VE SONUÇ.....	41
KAYNAKLAR	44
ÖZ GEÇMİŞ	54
TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER	55

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Enerji kaynaklarının gruplandırılması (Koç ve Şenel, 2013)	17
Çizelge 2.3. 2019 yılı Türkiye'nin elektrik üretilen kaynaklarının dağılımı.....	18
Çizelge 3.1. 100 µM stok primerlerinin isimlendirilmesi ve distilasyon miktarları.....	27
Çizelge 4.1. Mikrobiyal yakıt hücresinde komünite analizleri için kullanılan primer çiftleri kodları	35



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Mikrobiyal yakıt hücresi şematik yapısı.....	5
Şekil 2.2. 2019 yılı Türkiye birincil enerji kaynakları yüzdelik dağılım şeması.....	17
Şekil 3.1. Mikrobiyal yakıt hücresi cam malzemeleri	20
Şekil 3.2. Karbon bazlı elektrotlar	20
Şekil 4.1. Mikrobiyal yakıt hücresinde 15°C sıcaklıkta kayıt edilen gerilim değerleri ..	30
Şekil 4.2. 15°C sıcaklıkta kaydedilen akım ve gerilim değerleri.....	30
Şekil 4.3. 15°C sıcaklıkta kaydedilen akım ve gerilim değerleri ile hesaplanan akım ve güç yoğunlukları.....	31
Şekil 4.4. 15°C sıcaklıkta kaydedilen KOİ ve q_m değerleri.....	32
Şekil 4.5. 15°C sıcaklıkta kaydedilen KOİ ve CE değerleri	33
Şekil 4.6. 15°C sıcaklıkta kaydedilen optik yoğunluk ve mikrobiyal kuru ağırlık değerleri.....	33
Şekil 4.7. 15°C sıcaklıkta elde edilen mikrobiyal kültürün PCR analiz görüntüleri	34
Şekil 4.8. Mikrobiyal yakıt hücresinde 45°C sıcaklıkta kayıt edilen gerilim değerleri..	36
Şekil 4.9. 45°C sıcaklıkta kaydedilen akım ve gerilim değerleri.....	36
Şekil 4.10. 45°C sıcaklıkta kaydedilen akım ve gerilim değerleri ile hesaplanan akım ve güç yoğunlukları	37
Şekil 4.11. 45°C sıcaklıkta kaydedilen KOİ ve q_m değerleri.....	38
Şekil 4.12. 45°C sıcaklıkta kaydedilen KOİ ve CE değerleri	38
Şekil 4.13. 45°C sıcaklıkta kaydedilen optik yoğunluk ve mikrobiyal kuru ağırlık değerleri.....	39
Şekil 4.14. 45°C sıcaklıkta elde edilen mikrobiyal kültürün PCR analiz görüntüleri	40

SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
M	Molar
%	Yüzde
g/L	Gram/litre
g	Gram
L	Litre
°C	Santigrat derece
pH	Asitlik ve alkalilik faktörü
µL	Mikrolitre
mM	Milimolar
mL	Mililitre
mg	Miligram
mV	MiliVolt
V	Volt
A	Amper,
nA	Nano amper
W	Güç
nW	Nano güç

Kısaltmalar	Açıklama
MYH	Mikrobiyal Yakıt Hücresi
BES	Biyo-Elektrokimyasal Sistemler
KOİ	Kimyasal Oksijen İhtiyacı
PEM	Proton Değişim Membranı
PCR	Polimeraz Zincir Reaksiyonu
DNA	Deoksiribo Nükleik asit
rRNA	Ribozomal Ribonükleik Asit
G.A.A	Glasiyel Asetik Asit
PBS	Fosfat Tampon Çözeltisi

EDTA	Etilendiamin Tetraasetik Asit
TAE	Tris-EDTA Buffer
PTFE	Politetrafloroetilen
PDMS	Polidimetilsiloksan
PDVF	Polivinilidenflorür



BÖLÜM I

GİRİŞ

Dünya nüfusunun artışına bağlı olarak gelişen teknoloji ve sanayi insanoğlu için daha kolay bir yaşam sağlamaktadır. Diğer taraftan bu gelişmeler ekosistem üzerinde büyük etkilere sahip olmaktadır. Doğanın tahrip olması, doğal kaynaklara atık maddelerin karışması sonucunda çevre kirliliği meydana gelmektedir. Hızlı tüketim ve ortaya çıkan kirliliğin doğru bir şekilde arıtılamaması veya dönüştürülememesi atık madde miktarının hızla artışına neden olmaktadır. Kirliliğin azaltılması için ortama bırakılan atıkların ve atık sularının ayrıştırılması gerekmektedir. Atıklar ve atık sular içerisinde bol miktarda karbon, fosfor ve azotlu yapılar bulunduğu için belirli fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemlerle ayrıştırılabilmektedir. Biyolojik ayrıştırma yöntemleri maliyetinin az olması, mikroorganizmaların kullanılması ve doğa dostu olmasıyla kullanımı en uygun teknikler arasında yer almaktadır.

Sanayi devriminde artan ve günümüzde de artarak devam eden fosil yakıt kullanımı, doğanın tahrip edilerek yakıt ihtiyacının karşılanması yenilenemeyen enerji kaynaklarının kullanıldığını göstermektedir. Yenilenemeyen enerji kaynakları canlı yaşamına ve doğaya zarar vererek kirliliğe neden olmaktadır. Bu yüzden çevre dostu, yenilenebilir, devamlılığı olabilen, enerji ihtiyacını fazlasıyla karşılayabilen, doğadaki atıkların azalmasında rol oynayan, hava kirliliğini azaltan yeni enerji kaynaklarına ihtiyaç ve ilgi giderek artmaktadır. Bu enerji kaynaklarına yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynakları denir. Günümüzde yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynakları arasında güneş, rüzgâr, jeotermal, dönüştürülebilir atıklar, atık ısı salınımı ve biyokütle bulunmaktadır. Güncel araştırmalarda hem çevre kirliliğinin en aza indirilmesi hem de kullanılan enerji kaynaklarının yenilenebilir ve sürdürülebilir olarak geliştirilmesine çalışılmaktadır. Yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji ülkelere refah, temiz bir ortam sağlarken, ekonomik yönden bağımsızlığı güçlendiren, canlı yaşamına değer veren, depolanabilir olma özellikleriyle birlikte dünyada kullanılan en avantajlı enerji elde etme yöntemi olmaktadır.

Yenilenebilir enerjiler alanında son zamanlarda yapılan çalışmalar Biyo-Elektrokimyasal Sistemlere (BES) yönelmektedir. Biyo-elektrokimyasal sistemler mikrobiyal

toplulukların elektrokimyasal aktivitelerine bağlı olarak enerji üretmektedir. Biyo-elektrokimyasal sistemler, yenilenemeyen enerji kaynaklarına bağlılığı azaltmayı sağlayan, mikroorganizmalarla katı, sıvı ve gaz atıklarının giderilmesini amaçlayan, bu substratlardan verimliliği yüksek enerji kazanımını sağlayan ve çevre kirliliğini azaltan sistemlerdir. Bu sistemler mikrobiyal yakıt hücreleri, biyosensörler, mikrobiyal elektroliz hücreleri gibi çeşitli tipleri bulunmaktadır. Evsel veya endüstriyel atık sulardaki organik moleküllerin parçalanarak kimyasal enerjinin ortaya çıkmasını ve bu enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi veya yeni ürünler oluşmasını sağlayan biyo-elektrokimyasal sistemlere Mikrobiyal Yakıt Hücresi (MYH) veya Mikrobiyal Yakıt Pilleri adı verilmektedir.

Mikroorganizma miktarı, mikrobiyal kültür veya komünitede yer alan mikrobiyal çeşitlilik, sıcaklık ve atık madde miktarı gibi çeşitli faktörler biyo-elektrokimyasal sistemlerin aktivitesini etkilemektedir. Biyo-elektrokimyasal sistemlerde ortam sıcaklığındaki değişiklikler mikrobiyal toplulukların farklılaşması ile enerji verim mekanizmasında ve/veya organik moleküllerin parçalanmasında değişikliklere neden olmaktadır.

Bu tez çalışmasında Niğde Akkaya Barajından alınan aktif atık çamur inokulumu ve şeker fabrikalarının atığı olan melasın besi kaynağı olarak kullanılarak iki odacıklı mikrobiyal yakıt hücresindeki uç sıcaklıklarda (15°C ve 45°C) voltaj üretiminin etkisi, mikrobiyal komüniteye olan etkisinin belirlenmesi ve melas nedeniyle oluşan kimyasal oksijen ihtiyacının giderilmesinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

BÖLÜM II

KAYNAK ÖZETLERİ

2.1 Mikrobiyal Yakıt Hücresi

1911 yılında Michael C. Potter tarafından yapılan bir çalışma ile mikrobiyal yakıt hücreleri (MYH) keşfedilmiştir. Potter, bakteri ve mayaların organik maddeleri parçalaması sonucunda ortaya çıkan serbest enerjinin geri kazanılması gerektiğini vurgulamıştır. Çalışmada galvanik hücre ve platin elektrot kullanarak bir sistem oluşturulmuştur. Sistemin içerisindeki mikroorganizmaların besin kaynağını kullanmaları sonucunda açığa çıkarılan elektrik yüklerinin oluşturduğu potansiyel fark incelenmiştir. Çalışma sonucunda elektriksel aktivitenin; metabolik aktivite gösteren mikroorganizma miktarına, besi ortamına, elektrot yapısına ve sıcaklıktaki değişimlere bağlı olduğu ortaya çıkmıştır (Potter, 1911).

1960'lı yıllara kadar mikrobiyal yakıt hücreleri hakkında araştırmalara rastlanılmamıştır. Davis ve Yarbrough, 1962 yılında temelde hidrokarbonları oksitleyebilen mikroorganizmaların elektrik üretiminin ve elektron salınımının ölçülebilir seviyede olup olamayacağını anlamaya çalışmışlardır. 1980'li yıllarda ise mikrobiyal yakıt hücreleri tekrar ilgi çeken araştırma konusu olmaya başlayıp yeni gelişmeleri de beraberinde getirmektedir. Atık gideriminde mikrobiyal yakıt hücrelerinin kullanılabileceği ve aynı zamanda elektrik üretilebileceği gösterilmiştir (Akiba vd., 1987). 1990'lı yıllarda yapılan çalışmalar mikroorganizmaların yaşam döngüsünde ortaya çıkan elektrokimyasal aktiviteler (indirgenme- yükseltgenme tepkimeleri) MYH sistemlerine bakışı önemli ölçüde etkilemiş ve yeni çalışmalara ilham kaynağı olmuştur (Bennetto, 1990).

Mikrobiyal yakıt hücreleri, biyo-kütle ve karbonhidrat gibi organik yapıları substrat olarak kullanan mikroorganizmalar aracılığıyla depolanmış kimyasal enerjiyi ortaya çıkartarak bu enerjinin elektrik enerjisine dönüşmesini sağlayan biyoelektrokimyasal sistemlerdir (Allen ve Bennetto, 1993; Du vd., 2007; Logan vd., 2006; Singh vd., 2010; Zhang vd., 2011). Mikrobiyal yakıt hücrelerinin tasarımı ve analizleri mikrobiyoloji, elektrokimya, malzeme ve çevre mühendisliği gibi birçok bilimsel alanın ortak çalışması ile multidisipliner olarak yapılmakta ve veri sağlamaktadır. Mikrobiyal yakıt hücreleri

farklı bilimsel alanları kapsamasına ek olarak farklı üretim ve uygulama alanlarının geliştirilmesini de sağlamaktadır. Bu alanlara; atık arıtımı, hidrojen ve biyoenerji üretimi örnek olarak gösterilmektedir (Gude, 2016; Logan vd., 2006; Singh vd., 2010).

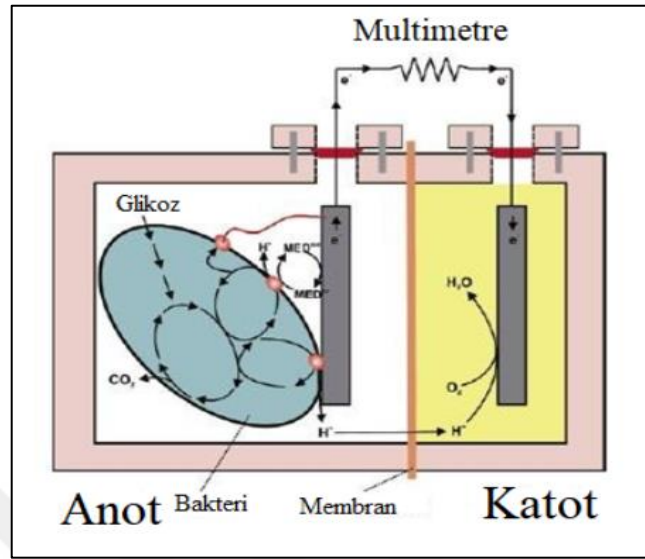
Mikrobiyal yakıt hücrelerinin biyokütle enerjisi elde edebilen sistemlere göre çeşitli avantajları vardır. Parçalanmış organik maddelerden elde edilen enerjiyi direkt olarak elektrik enerjisine dönüştürülmesi ile yüksek verimliliğe sahiptir. Mikrobiyal yakıt hücreleri sıcaklık değişimlerine kolay adapte olabilmesi ve birçok farklı sıcaklıklarda çalışabiliyor olması ile biyokütle ve biyogaz teknolojileri gibi farklı biyo-enerji proseslerinden ayrılan önemli bir avantaja sahiptir. Mikrobiyal yakıt hücrelerdeki kimyasal tepkimeler sonucu çıkan karbondioksit gazının fazla olmaması ve CO₂ emisyonunu azaltması sistemin çevre dostu olduğunu göstermektedir. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde katot odası pasif bir şekilde havalandırıldığı için enerji harcanmasına gerek duyulmamaktadır. Bundan dolayı, MYH elektrik bulunmayan alanlarda bile kullanılabilir ve uygulanabilir olmaktadır (Liu vd., 2004; Rabaey ve Verstraete, 2005; Singh vd., 2010).

Mikrobiyal yakıt hücrelerinin birçok avantajının yanı sıra bazı dezavantajları da vardır. Mikrobiyal yakıt hücrelerinin kurulum ve yatırım maliyetlerinin yüksek olması ekonomik açıdan karşılaşılan bir sorundur. Ayrıca MYH sistemlerinin iç direncin yüksek olması ve elektrotlarda gerçekleşen kayıplardan dolayı güç yoğunluğunun sınırlanması gibi teknik tasarım ve donanım sorunları anot ve katot bölmesindeki güç performansını sınırlandırmaktadır. Mikrobiyal yakıt hücrelerinin katot bölmesinde kullanılan çözeltilerin belirli bir süre sonra bozunması ve düzenli aralıklarla değişiminin yapılması gerekliliği MYH'nin devamlılığını etkileyen faktörlerdendir. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanılan membranın yapısı güç üretimini etkilemektedir. Örneğin, membran olarak tuz köprüsünün kullanılması iç direnci yükselterek güç kazanımını zorlaştırmaktadır (Logan vd., 2006; Pham vd., 2006; Rabaey ve Verstraete, 2005).

2.1.1 Mikrobiyal yakıt hücrelerinin çalışma prensibi

Mikrobiyal yakıt hücreleri; gelecek için ümit vadeden, birçok yeni alanda güç kaynağı olarak kullanılabilir, güncel, yenilenebilir ve sürdürülebilir kaynaklar olarak ilgi çekmektedir. Bir MYH' nin yapısı Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Mikrobiyal yakıt hücreleri

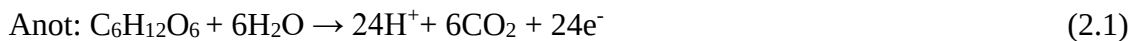
üç kısımdan oluşmaktadır: Anot bölgesi, katot bölgesi ve yarı geçirgen (Proton değişim membranı veya tuz köprüsü) membrandır (Logan vd., 2006).



Şekil 2.1. Mikrobiyal yakıt hücresi şematik yapısı (Logan vd., 2006)

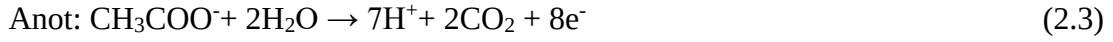
Anot, fermantatif bakterilerin ve besin kaynağının bulunduğu bölmedir. Mikroorganizmalar substratların oksidasyonunu katalizleyerek ortama elektronların ve protonların salınımını sağlamaktadır. Ortamdaki elektronlar ekzoelektrojenik mikroorganizmalar (elektron zincirleri veya nanoteller) veya medyatörler aracılığıyla elektronlar bir elektrota aktararak devre düzeneği üzerinden katot bölgesine doğru akmaktadır. Böylelikle bir gerilim ve akım oluşmaktadır. Katot bölgesinde elektrot ve tampon çözelti bulunmaktadır. Bu bölme devre aracılığı ile aktarılan elektronlar ve membran aracılığı ile aktarılan protonlar oksijen molekülleriyle birleşerek su molekülünü oluşturmaktadır. Anot ve katot bölgesi arasında protonların geçişini sağlayan, iki bölme arasında sıvı sınırlarını koruyan ve elektron geçişine engel olan yarı geçirgen bir membran – Proton Değişim Membranı (PEM) bulunmaktadır. Bu membran sayesinde iyon geçişi kolaylaşmaktadır (Allen ve Bennetto, 1993; Liu vd., 2004; Logan vd., 2006; Mohan vd., 2008; Rabaey ve Verstraete, 2005; Zhang vd., 2011).

Mikrobiyal yakıt hücresi sisteminde glikoz substrat olarak kullanıldığında anot ve katot reaksiyonları aşağıdaki şekilde gerçekleşmektedir:





Benzer şekilde glikoz yerine asetat substrat olarak kullanıldığı zaman gerçekleşen reaksiyon aşağıda gösterilmiştir.



Yukarıdaki katabolizma olaylarında açığa çıkan karbondioksit ve suya ek olarak elektron transferi ile elektrik üretimi gerçekleşmektedir (Logan, 2008; Logan vd., 2006).

2.1.2 Mikrobiyal yakıt hücrelerinin tipleri

Araştırmaların çoğunda MYH’de tek bölmeli veya iki odacıklı sistem tasarımları kullanılmaktadır. Bununla beraber araştırma amacına bağlı olarak farklı MYH konfigürasyonları tercih edilebilmektedir. Çoğunlukla kullanılan iki bölmeli MYH – H tip sistem; anot, katot ve ayırıcı membrandan (Nafion, Ultrex, PEM, tuz köprüsü) meydana gelen sistemlerdir. H tip sistemler; bakteriyel kültürün belirlenmesi, kompleks organik maddelerin kullanımı veya etkinliği bilinmeyen materyalleri kullanarak farklı parametrelerdeki güç verimliliğinin ölçülmesi gibi belli başlı çalışmalarda kullanılmaktadır (Ahn ve Logan, 2010; Lin vd., 2014; Logan vd., 2006; Zhang vd., 2011). Mikrobiyal yakıt hücrelerinin farklı konfigürasyonlarına; pleksiglastandan yapılmış iki bölmeli MYH reaktörü, iki bölmeli kübik reaktör (Cheng vd., 2006), tek bölmeli hava katotlu reaktör (Logan, 2008), grafit parçacıklı silindirik MYH reaktörü (Rabaey vd., 2005), grafit fırça anotlu tek bölmeli MYH reaktörü (Kim vd., 2021), üç katmanlı tek bölmeli MYH reaktörü (Liang vd., 2020), inşa edilen sulak alan MYH reaktörü (Ji vd., 2020) vs. örnek gösterilebilmektedir.

Tek odacıklı MYH sisteminde anot odacığındaki çözeltinin oksijene doğrudan temas edebilmesi için katot odacığının sistemden kaldırılması gerekmektedir. Ancak sistemdeki çözeltinin açık alandan akmaması için politetrafluoroetilen (PTFE) (Dong vd., 2012b), polidimetilsiloksan (PDMS) (Zhuang vd., 2012), polivinilidenflorür (PDVF) (Yang vd., 2014) ile karbon bazlı elektron alıcı materyaller kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda,

PTFE ve PDMS aktif karbonla veya karbon tozu ile sinterlenerek (yüksek sıcaklıkta birleştirme işlemi) kullanılırken PDVF aktif karbonla diyonize su aracılığıyla birleştirilmektedir. Bu materyaller sayesinde sıvı geçişi engellenmektedir. Tek odacıklı MYH sistemleri diğer sistemlere göre daha küçük yapıda reaktör olması; oksijenin açık alandan kolaylıkla alınabilmesini ve katottaki çözelti kullanma ihtiyacının ortadan kaldırılmasını sağlamaktadır. Tek odacıklı MYH sisteminin önemli avantajı ise elektron alıcı olarak oksijenin kullanılması ile güç verimliliğini arttırmasıdır. Hava katotlu MYH'nin düşük maliyetli olması gelecekte uygulanabilirliğinin yüksek olacağını göstermektedir (Ahn ve Logan, 2010; Dong vd., 2012a; Kim vd., 2000; Lin vd., 2014; Liu vd., 2004; Logan vd., 2006; Yang vd., 2014).

2.1.3 Mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanılan malzemeler

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanılan malzemelerin verimli güç üretimi sağlamak için bazı özelliklere sahip olması gerekmektedir. Geniş ve gözenekli yüzey alanı, iletkenliği yüksek yapılar, uzun vadeli ve aşınma yapmayan malzemeler olmalıdır (Logan vd., 2007; Logan, 2008; Wang vd., 2009).

Anot odacığında mikrobiyal topluluk, substrat ve elektrot bulunmaktadır. Bu odacıkta mikrobiyal kültürün gelişmesi sağlanmaktadır. Gelişen mikrobiyal topluluklar farklı solunum tipleri ve elektron taşıma mekanizmaları bilinmektedir. Mikroorganizmalar elektronlarını aktarmak için elektron zincirleri veya nanotel oluşturabilmektedir. Ayrıca mikroorganizmalar aerobik, fakültatif, zorunlu anaerobik solunum yapabilmektedir. Güç verimliliğini arttırması nedeniyle MYH sistemlerinde anaerobik solunum yapabilen mikroorganizma toplulukları tercih edilmektedir (Bond ve Lovley, 2003; Wang vd., 2009).

Anaerobik solunumu sonucunda serbest kalan elektronların aktarımında farklı elektrotlar kullanılmaktadır. Elektrotların yüzey genişliği, mikrobiyal topluluğun tutunması ve aktarılan elektron sayısı güç verimliliğini direkt olarak etkilemektedir. Elektrotlar grafit, mangan veya platin vb. farklı malzemeler ile yapılabilmektedir. Çoğunlukla kullanılan karbon bazlı malzemelere karbon fırça (Ge ve He, 2016), karbon kumaş (Cheng vd., 2006), karbon kâğıt (Min ve Logan, 2004), karbon keçe (Li vd., 2008) ve grafit çubuk (Cecconet vd., 2018) örnek olarak verilebilmektedir. Bu malzemelerin tercih

edilmelerinin nedeni iletkenlik seviyelerinin yüksek olmasıdır. Seçilen malzemenin düşük maliyetli olması, kolay bulunabilir olması, yapılışının basit olması ve kolayca bozunmaması (inert olması) gerekmektedir (Logan vd., 2007; Logan, 2008; Logan vd., 2006; Wang vd., 2009; Zhuang vd., 2012).

Wang vd. (2009) yaptığı çalışmada düşük maliyetli olan karbon ağ elektrotunun ısıtılması ile anotta yüksek güç performansını elde edildiği ve karbon kumaştan elde edilen performanstan yüksek olduğu gösterilmiştir. Bu araştırmada elektrottan elde edilen potansiyelin ölçülmesi sonucunda güç kazancının anot performansına bağlı olduğu belirtilmiştir.

Sonawane vd. (2014) yaptığı çalışmada karbon iplik ve paslanmaz çelik ile tasarlanan geniş yüzeyli anot odacığı bulunan hava katotlu MYH'lerde substrat olarak kullanılan evsel ve damıtma atık sularının güç performansı incelenmiştir. Araştırmadaki verilere göre evsel atık sudan (621 ± 17 mW/m²) elde edilen güç performansının damıtma atık suyundan (364 ± 11 mW/m²) daha yüksek olduğu belirtilmiştir.

Katot odacığı, MYH sistemlerinin tipine göre farklılık göstermektedir. Katot odacığı bir MYH sisteminde, anot odacığından gelen hidrojen iyonlarının oksijenle reaksiyonunun gerçekleştiği kısımdır. Katot odacığında genellikle elektrot ve tampon çözeltisi bulunmaktadır (Logan, 2008; Logan vd., 2006).

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde katot odacığı tampon çözelti içeren ve anot odacığından gelen protonlar ile reaksiyonun gerçekleştiği kısımdır ve kullanılan MYH tipine göre farklılık göstermektedir. H tipi MYH'de katot odacığında elektron alıcısı olarak ferrisiyanür çözeltisi veya oksijence zenginleştirilmiş çözelti kullanılırken elektrot olarak çubuk karbon elektrot veya platin kaplı karbon elektrot tercih edilebilmektedir (Kim vd., 2002; Logan, 2008; Logan vd., 2006; Mohan vd., 2008; Oh vd., 2004).

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde istenilen yüksek güç performansı, ferrisiyanür çözeltisinin katot odacığında kullanılması ve iç direncin az olduğu sistemlerde görülmektedir. Fakat ferrisiyanür çözeltisi kısa sürede bozunduğu için uzun vadede kullanımı ve güç üretimini kısıtlamaktadır. Sistem içerisinde ferrisiyanür kullanılacaksa çözeltinin çalışma boyunca belirli aralıklarla değiştirilmesi gerekmektedir. Katottaki elektrot yüzey alanı güç

üretimini etkilemektedir. Güç performansı, yüzey alanı artıkça artarken, yüzey alanı küçüldüğünde azalmaktadır (Logan, 2008; Logan vd., 2006; Oh vd., 2004).

Oh vd. (2004) yaptığı çalışmada çözünmüş oksijen içeren katot ile ferrisiyanür çözeltisi bulunan katot güç yoğunluklarına göre karşılaştırılmıştır. Ferrisiyanür çözeltisi çözünmüş oksijen çözeltisine göre güç performansında %50-80 artış gerçekleştirmiştir.

Son zamanlarda ilgi gören MYH sistemlerinden birisi de biyokatotlu MYH'dir. Bu sistemler tasarım tipi olarak iki odacıklı MYH sistemlerine benzer olmasıyla birlikte katot odacığında elektrot, mikroorganizma besiyeri ve fotosentetik mikroorganizmalar içermektedir. Biyokatot sistemlerinin, kimyasal çözeltili katotlardaki sorunlara çözüm olacağı düşünülmektedir. Biyokatot sistemlerinin ekonomik olarak uygulanabilir olması, sistem sürdürülebilirliğini arttırması ve oksijen indirgeyici ara malzemelerin ihtiyacını ortadan kaldırmasını sağlamaktadır (Gurung ve Oh, 2012; He ve Angenent, 2006).

Clauwaert vd. (2007) yılında yaptığı çalışmada boru şeklinde tasarlanan ve katot değişim membranı (KDM) kullanılan MYH sistemi tasarlamıştır. Bu sistemde anot odacığındaki mikroorganizmaların elektron üretmesi sağlanırken aynı zamanda katot odacığında bulunan mikroorganizmalar aracılığıyla denitrifikasyonun gerçekleşmesini sağlamıştır. Yapılan bu çalışmada anota ve biyokatota eş zamanlı olarak substrat kullanılmıştır. Bunun sonucunda güç üretimi ile hidrojen gazı oluşturulmuş ve aynı zamanda denitrifikasyon gerçekleştirilmiştir. Platin gibi sıklıkla kullanılan katalizörlere alternatif olarak bakterilerin elektron geçişlerini katalize ettiği gösterilmiştir.

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde anot ve katot odacıkları arasında hidrojen iyonlarının geçişini sağlayan membran adı verilen özel materyaller bulunmaktadır. Proton değişim membranı (PEM), katyon değişim membranı (KDM), Ultrex ve tuz köprüsü MYH sistemlerinde çoğunlukla kullanılan membranlara örnek olarak verilebilmektedir (Logan, 2008; Oh ve Logan, 2006).

Membranların sistem içerisinde farklı görevleri vardır. H tipli bir MYH'de anot ve katot odacıkları arasında bulunan membranlar sıvıların birbirine karışmasını engellemekte, seçici geçirgen olma özellikleriyle iyon geçişinde kolaylık sağlamaktadır. Sistemde membran olmadığında anot odacığında oksijen miktarının artması ve substrat geçişinin

düzenli olmaması gibi durumlar gözlenmektedir. Membranlar bu özelliklerinden dolayı enerji verimliliğini ve biyofilm oluşturan mikroorganizmaların yaşamını doğrudan etkilemektedir. Membranların yüksek maliyetli ve bazı durumlarda güç performansını olumsuz yönde etkilerinin olması dezavantaj olarak düşünülmektedir (Katuri vd., 2011; Li vd., 2011; Logan, 2008).

2.2 Mikrobiyal Yakıt Hücresinin Güç Performansını Etkileyen Faktörler

Mikrobiyal yakıt hücrelerinin güç performansı öncelikli olarak mikrobiyal kültüre, substrat çeşidine ve konsantrasyonuna, medyatörün yapısına ve MYH sistem tasarımına bağlıdır. Bunlara ek olarak elektrotun yapısı ve çeşidi, devre iç direnci, proton akışı, pH, zaman ve sıcaklık gibi farklı etkenlere bağlı olarak da değişiklik gösterir (Ahn ve Logan, 2010; Behera vd., 2010; Logan vd., 2006; Lu vd., 2020; Zhou vd., 2011).

2.2.1 Substrat etkisi

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanılan substratlar sistemin mikrobiyal komünite yapısını önemli oranda değiştirmektedir. Ayrıca substratlar, güç verimini ve yoğunluğunu değiştirerek MYH sistem performansını direkt olarak etkileyebilmektedir. Kullanılabilecek substratlar basit veya karmaşık olabilmektedir. Çalışmalarda en çok kullanılan substratlar asetat ve glikoz olmakla birlikte bütirat, propiyonat, boya atık suyu, gıda işleme atık suyu, lignoselülozik biyokütle, kâğıt atık suyu, sentetik atık su gibi birçok farklı materyal kullanılabilmektedir (Chae vd., 2009; Pant vd., 2010; Velasquez-Orta vd., 2011).

Farklı substratları kullanılarak çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Liu vd. (2004) tarafından tek odacıklı MYH sisteminde substrat olarak asetat ve bütirat kullanılarak elektrik üretimi araştırılmıştır. Asetattan üretilen gücün, bütirattankine oranla %66 fazla olduğu gözlenmiştir. Başka bir çalışmada Bakhshian vd. (2011), çift odacıklı MYH sisteminde anot odacığında melası substrat olarak kullanmıştır. Katot odacığında Reaktif mavi 221 (RB221) boyasını lakkaz enzimi ile boya gideriminde MYH performansının değerlendirilmesi amaçlamıştır. Renk giderimi yapılan MYH sistemindeki renk giderme yapılmayan MYH sistemindekine oranla güç yoğunluğunun %30 fazla olduğu gözlenmiştir. Velasquez-Orta vd. (2011); fırın, bira fabrikası, kâğıt ve süt ürünlerinin atık

sularını substrat olarak kullanılması sonucu tek odacıklı MYH sisteminin performansını değerlendirmiştir. En yüksek akım yoğunluğu kâğıt ve atık su kullanımı kullanılan MYH sisteminde olmuştur. Hisham vd. (2013) yaptığı çalışmada üç farklı substrat (gıda atıklarının sızıntı suyu, aktif çamur ve hurma yağı değirmeninin atığı (POME)) kullanmıştır. Mikrobiyal yakıt hücresinde voltaj üretimi en yüksek olan atık sızıntı suyu (0,455 V) olmuştur. Voltaj üretimini sırayla POME (0,444 V) ile aktif çamur (0,396 V) takip etmiştir.

2.2.2 Medyatör etkisi

Mikroorganizmaların elektronlarını anot elektroduna aktarabilme şekillerine göre ikiye ayrılmaktadır. Medyatörlü MYH sistemlerinde mikroorganizmaların elektron zincirinde bulunan elektronları tutarak hücre içinden ortama aktaran, elektrotta geçişini sağlayan aracı bileşikler bulunmaktadır. Okside olmuş haldeki medyatörler, hücre içerisinde tuttukları elektronların zar boyunca hareketini sağlamaktadır. Elektrotlara elektron aktarımı gerçekleşmesi ile güç üretiminde hızlı bir artış gerçekleşmektedir (Du vd., 2007; Logan vd., 2006; Oh ve Logan, 2006).

Belirli sentetik medyatörler, nötral kırmızı, metilen mavisi, meldoa mavisi, tiyonin örnek olarak gösterilebilmektedir. Sentetik medyatörlerin toksik etkisinin olması ve stabilitelerinin olmaması çalışmaları kısıtlayabilmektedir. Hümik asitler, antraknon-2,6-disülfonat, kükürt oksidasyonları anot elektrotuna transfer yapabilen yapısı ile doğal yapıdaki medyatörlere örnek verilebilmektedir (Logan vd., 2006; Oh ve Logan, 2006; Park vd., 1999).

Medyatörsüz MYH sistemleri ise elektron taşıyıcı aracı bileşiklerin kullanılmadığı hücrelerdir. Medyatörsüz sistemlerde, anot odacığında anodofilik mikroorganizmaların tarafından gerçekleşen anoda elektron transferi veya bazı bakteri türlerinin oluşturduğu, diğer bakteriler arasında elektron transferi yapabilmeyi sağlayan nanotellerden faydalanılmaktadır (Oh ve Logan, 2006).

Öztürk'ün yaptığı yüksek lisans çalışmasında (2018) MYH' de farklı medyatörlerin voltaj aktarım aktivitesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada H tipli MYH sisteminde substrat olarak melas ile metilen mavisi ve nötral kırmızı medyatörleri kullanılmıştır.

Medyatörsüz melaslı sistemde 281 mV elde edilmiş, mediyatörlü ortamda nötral kırmızı için 463 mV ve metilen mavisi için 477 mV bulguları elde edilmiştir. Bu çalışma sonucunda atık giderimi ve elektriksel aktivite gözlenmiştir (Öztürk, 2018).

2.2.3 Mikrobiyal topluluk

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde önemli olan husus substrat oksidasyonu sonucunda açığa çıkan elektronlardan elektrik enerjisi üretebilmektir. Mikrobiyal yakıt hücresinin verimini sağlayan mikroorganizmalara ekzoelektrojenik mikroorganizmalar denmektedir (Du vd., 2007; Logan vd., 2007; Logan, 2008; Logan vd., 2006; Zhang vd., 2015). İlk kurulan MYH sistemlerinde *Escherichia coli*, *Saccharomyces cerevisiae* ve *Proteus vulgaris* kültürleri kullanılmıştır. Güncel çalışmalarda diğer mikroorganizmalara göre elektron transfer mekanizmalarının gelişmiş olduğu türler bulunmaktadır. Bunlar: *Shewanella oneidensis*, *Shewanella putrefaciens* ve *Geobacter*’ dir. *Shewanella*, elektron transferinde kendi medyatörlerini (kinonlarını) ve elektronları toplayabilmek için özelleşmiş protein yapılarını (nanotelleri) üretebilmektedir. Nanoteller ve kinonlar MYH’de güç verimliliğini arttırmaktadır. Saf kültürlerin kısıtlayıcı özellikleri, MYH’de kullanılan karmaşık substratların tamamen parçalayamaması ve fermentatif olarak yeterli elektrik üretememeleridir. Saf kültürlerle kıyasla incelenen karışık kültürlerde daha yüksek güç verimliliği, karmaşık substratları parçalayabilme yeteneği, kolay ve uygun maliyette bulunabilmeleri avantaj sağlamaktadır. Karışık kültürler, atık sulardan ve dip sedimentlerinden elde edilmektedir. Karmaşık mikrobiyal topluluk analizlerinde çoğunlukla *Alcaligenes faecalis*, *Enterococcus gallinarum* ve *Pseudomonas aeruginosa* gibi mikroorganizmalar bulunmaktadır (Ahn ve Logan, 2010; Du vd., 2007; Logan, 2009; Oh ve Logan, 2006; Rabaey vd., 2004; Taşkan, 2016).

Min ve Logan (2004), yaptığı çalışmada PEM ile hazırlanan MYH kullanmıştır. Mikrobiyal yakıt hücresindeki güç çıkışını etkileyen farklı mikrobiyal kültür, membran iç direnç ve anot odacığına sızan çözünmüş oksijen miktarı gibi faktörleri incelemiştir. Yapılan deneyde saf kültür olarak *Geobacter metallireducens* ve karışık kültür (atık su) kullanmıştır. *G. metallireducens* kullanılan iki odacıklı PEM bulunan MYH’de ürettiği güç yoğunluğu 40 mW/m²’dir. *Geobacter spp* kullanan diğer çalışmalarla benzer sonuçlar alındığı belirtilmiştir. Aynı MYH sistemi kullanılarak atık sudan alınan karışık kültürdeki güç yoğunluğu 38 mW/m² olarak elde edilmiştir.

Jong vd. (2006) yaptığı çalışmada çift odacıklı termofilik medyatörsüz olarak hazırlanan MYH'de yapay atık suyu (bira fabrikasının su artıcısındaki termofilik mikroorganizmaların bulunda atık su) ile beslenen hücre oluşturmuştur. Mikrobiyal yakıt hücresinde elde edilen en yüksek güç yoğunluğu 1030 ± 340 mW/m²'dir. Kullanılan besiyerine belirli oranlarda asetat eklenmesiyle KOİ gideriminin %50'si yapılmış ve asetat oksidasyonu uygun koşullarda olduğunda elektron kazanımı %80'e çıkmıştır. Ayrıca ortama fazla miktarda asetat eklenmesiyle ekzoelektrojen mikroorganizmalar için toksik olduğu belirtilmiştir. Denatüre Gradyen Jel Elektforezi (DGGE) ve 16s rRNA gen analizleri ile bakteriyel çeşitlilik analiz edilmiştir. 16s rRNA gen analizi sonucunda 13 farklı bakteri topluluğu belirlenmiştir. 13 farklı topluluğun 7'si Coprothermobacter cinsi, 5'i kültürlenmemiş koloniler ve 1'i Thermodesulfovibrio'dur. Bu çalışma elektrokimyasal aktivite gösteren termofilik popülasyonların kullanıldığını doğrulayan ilk çalışma olmuştur.

2.2.4 Sıcaklık etkisi

Mikrobiyal yakıt hücrelerindeki anaerobik sindirimin gerçekleşmesinde önemli ölçüde etkili olan faktörlerden birisi de sıcaklıktır. Sıcaklık değişimi mikroorganizmaların gelişimini ve metan salınımını doğrudan etkilemektedir (Catal vd., 2011; Gavala vd., 2003).

Metan eldesi anaerobik çürüme sonucunda gerçekleşmektedir. Biyolojik olarak ayrışabilen maddelerin anaerobik mikroorganizmalar tarafında parçalanması sonucu çürüme gerçekleşmektedir. Anaerobik çürüme sonucunda ise biyogaz oluşumu gözlenmektedir. Metanojenler (metan üreten mikroorganizmalar) biyolojik yollarla metanın oluşumunu katalizlemesi ise metanojenez olarak adlandırılmaktadır. Metanojenler çamur atıklarında, tatlı su sedimentlerinde yaşamaktadır. Metan üretiminin sıcaklık aralığı iki farklı şekilde belirtilmektedir: 30°C-40°C arası mezofilik ve 50°C-60°C termofiliktir (Işık ve Ökmen, 2013; Kumar ve Ankaram, 2019; Madigan vd., 1997).

Catal vd. (2011) yapmış oldukları çalışmada tek odacıklı hava katodu kullanarak 8 adet MYH sisteminde substrat ve sıcaklık değişimlerinin voltaj ile anot biyofilmi üzerindeki etkisini incelemiştir. 20°C de yapılan çalışmada glikozdan karışık karbon kaynaklarına geçildiğinde voltaj 0,3'den 0,5'e yükselerek %70'lik bir atış sağlamıştır. Sıcaklık yavaşça

düşürüldüğünde ise voltaj üretiminde düşüş gözlenmiştir. Bu çalışma soğuk stres anında karışık kültür mikroorganizmalarının farklı karbon kaynaklarını anaerobik sindirimde kullanabileceği göstermiştir. Ayrıca KOİ sıcaklığın düşmesiyle azalış göstermiştir. Çalışmanın sonuçları kulombik verimliliğin azalan sıcaklıkla arttığını belirtmiştir.

Liu vd. (2012) yaptığı çalışmada iki adet tek odacıklı MYH sisteminde 25°C ve 15°C’de sıcaklığın MYH üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Yüksek sıcaklıkla başlayıp düzenli aralıklarla sıcaklığı azaltılan sistem MYH A (25°C’den 15°C’ye doğru) olarak ve düşük sıcaklıkla başlayıp sistematik şekilde sıcaklığı yükseltilen sistem MYH B (15°C’den 25°C’ye doğru) olarak adlandırılmıştır. Ölçümler MYH A için ilk 26 gün boyunca 25°C de takip edilmiş ve sonra sıcaklık düşürülerek 20 gün boyunca 15°C de takibi yapılmıştır. MYH B için ise ilk 25 gün boyunca 15°C de inkübe edildikten sonra sıcaklık yükseltilerek 18 gün boyunca 25°C de takibi yapılmıştır. Ayrıca ortamdaki substrat miktarının azalması voltajda düşüşe neden olmuştur. Mikrobiyal yakıt hücresi B’de (15°C) ise voltaj değerinin yaklaşık olarak aynı kaldığı belirlenmiştir. Yakıt hücreleri karşılaştırıldığında MYH B, MYH A’ya göre daha avantajlı olmuştur çünkü daha uzun süre voltaj değeri sabit kalmıştır. Aynı zamanda MYH B MYH A’ya oranla güç yoğunluğu daha fazla olmuştur. Mikrobiyal komünite çalışmalarında ise düşük sıcaklıklarda en çok elde edilen anodik biyofilmlerdeki psikrofilik bakteriler *Geobacter psychrophilus* ve *Simplicispira psychrophila* bulunmuştur.

Mei vd. (2017), farklı sıcaklıklarda (10°C, 20°C ve 30°C) akım ve güç yoğunluğu verilerinin toplanması ile biyofilmden oluşan mikrobiyal topluluk üzerinde sıcaklığın etkisini incelemiştir. 16S rRNA gen ampikonlarını kullanılarak analiz yapılmıştır. Çalışmanın sonuçları incelendiğinde maksimum güç yoğunluğu 30°C’de gözlenmektedir. Kulombik verimlilik (CE) 1000 Ω dış dirence bağlı akım üretimine göre hesaplanmıştır. Sıcaklıktaki düşüşlerle birlikte CE’ler artmıştır. Düşük sıcaklıkta güç yoğunluğu ve substrat kullanım hızı da azalmıştır. 30°C MYH’de güç yoğunluğu daha yüksek bulunmuştur. Farklı sıcaklıklardaki MYH’lerde mikrobiyal kültür çeşitliliği, anodik elektron transferi ve substrat kullanımını önemli ölçüde etkilemiştir. 10°C MYH’lerde belirlenen mikrobiyal kültürde *Acidovorax*, *Zoogloea*, *Simplicispira* ve *Geothrix* baskın popülasyonlar olarak belirlenmiştir. 30°C MYH’de *Geobacter* popülasyonu daha baskın olmuştur.

Campo J. vd. (2016) çift odacıklı MYH hücresi kullanarak KOİ ve sıcaklık stres dayanıklılığının anlaşılması için testler uygulamıştır. 20°C'den 40°C'ye sıcaklığı aralıklı olarak 5°C arttırıp ardından 40°C'ye çıktıktan sonrada 20°C'ye aralıklı olarak 5°C'lik azaltma sonucunda sıcaklık değişimi ayarlanmıştır. Yapılan çalışmada MYH'deki anot odacığında sıcaklığın artmasıyla iyonik iletkenlikte artış gözlenmiştir ve böylece ohmik direnç düşmüştür. Güç yoğunluğunda ise artış gözlenmiştir. Sıcaklık değişimlerinin kısa sürede olması MYH sistemlerinin çok hızlı adaptasyon sağladığını göstermiştir.

2.2.5 Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ)

Kimyasal reaksiyonlar sonucunda oksitlenme özelliği gösteren organik maddelerin oksijen eşdeğerinin belirlenmesine kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) denilmektedir ve organik karbonu oksitlemek için kuvvetli asidik ortam kullanılmaktadır. Su kalitesinin belirlenmesi ve değer ölçümlerinde KOİ testi kullanılmaktadır. Biyolojik olarak oksitlenmiş maddeler kimyasal olarak oksitlenmiş maddelere oranla fazla olması KOİ testinin daha çok kullanıldığını göstermektedir (Boyles, 1997; Pisarevsky vd., 2005).

Moon vd. (2016) yukarı akışlı membransız MYH (ML-MYH) olarak tasarlanmış delikli grafit keçe diski ve düz grafit keçe diski ile birleştirilmiş hücreler arasında KOİ giderimi ve elektrik üretimi incelenmiştir. Delikli MYH'ler, mevcut üretim ve kulombik verimi açısından daha iyi performans göstermiştir. Delikli MYH'lerden üretilen maksimum akım, düz MYH'lerden %34,4 daha yüksek olarak elde edilmiştir. Kulombik verimi %43,5 ile %85,4 arasında değişirken KOİ giderme verimliliği %90'ın üzerinde bulunmuştur. Delikli MYH, düz MYH'den daha yüksek akım ve kulombik verimlilik göstermiştir.

Liao vd. (2014) iki odacıklı MYH'de alkali substratları kullanılarak sistemde elektrik üretimi ve kirlilik giderimi incelenmiştir. Araştırmada sabit pH değerleri (7 ve 9) ile kurulan MYH (MYH pH7 – MYH pH9) ve alkali substratların değiştirilerek uygulanan pH değerleri (7 – 9) ile hazırlanan MYH'ler (MYH-pHV) karşılaştırılmıştır. Alkali substratlar için CE ve KOİ giderimi değerlendirmek için kesikli besleme yapılmıştır (ilk olarak pH9'da). Kullanılan MYH-pHV için maksimum gerilim 73 ± 7 'lik bir CE'ye karşılık gelmiş ve yaklaşık 90 ± 4 civarında en yüksek KOİ giderme verimliliğini elde

edilmiştir. Sistemlerden MYH-pHV'nin artan KOİ giderme verimliliği, değişen besi ortamı pH'ına adaptasyonunun daha güçlü olmasına bağlanmıştır.

2.3 Enerji

Enerji ihtiyacı, dünya nüfusunun hızla yükselmesi ve sanayi ile teknolojinin gelişmesinden dolayı devamlı olarak artmaktadır. Ülkelerin ekonomik ve sosyal refah seviyelerinin başlıca göstergelerinden birisi de üretilen ve tüketilen enerjidir. Enerji kısaca bir işi yapabilme kabiliyeti veya depolanabilen iş gücü olarak tanımlanmaktadır. Enerji; ısı, elektrik, mekanik vb. farklı türlerde bulunurken aynı zamanda bir türden diğerine uygun tekniklerle dönüşümü de sağlanabilmektedir (Erdem ve Kadir, 2015; Koç ve Şenel, 2013).

Yenilenebilir enerji kaynakları, doğanın döngüsel sistemi içerisindeki enerjilerin devamlı olarak elde edildiği ve üretim hızının tüketim hızı ile eş zamanlı olan enerjilere denmektedir (Çıtak ve Pala Kılınç, 2016; Dinçer ve Yüksel, 2019).

Yenilenebilir enerji kaynaklarının birçok avantajı bulunmaktadır:

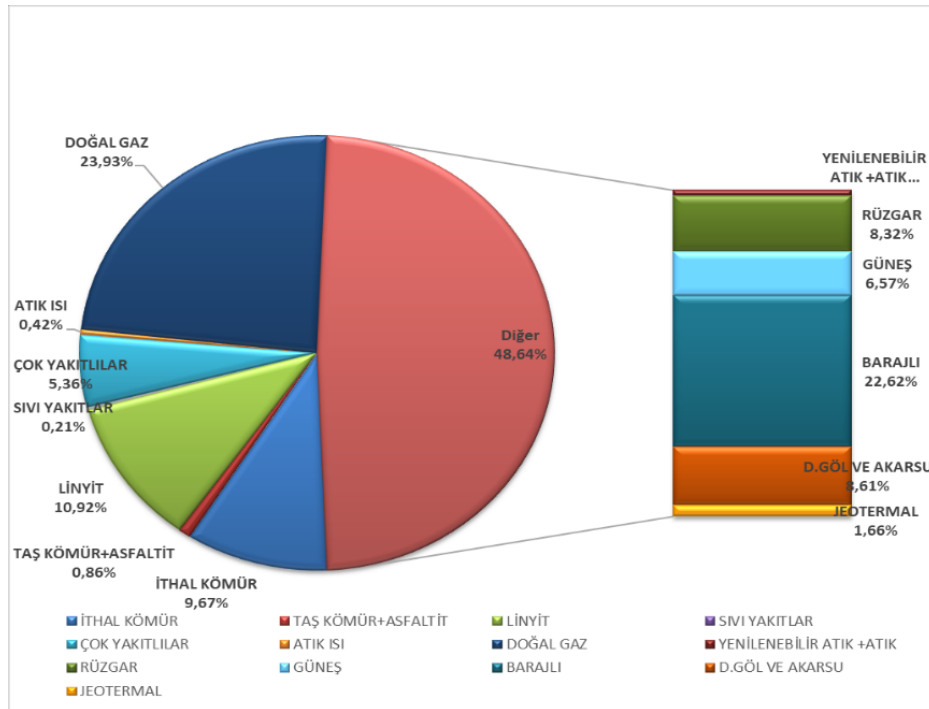
- Çevre dostu bir enerji kaynağı olması
- Sürdürülebilir yapıda olması
- Ekonomik açıdan diğer enerji kaynaklarına göre düşük maliyetli olması
- Ülkelerin enerji potansiyelini yükselterek dışa bağımlılığı düşürmesi
- Ülkelerin kişi başına düşen enerji ihtiyacının yükseltilmesi olarak sıralanabilmektedir (Çıtak ve Pala Kılınç, 2016; Dinçer ve Yüksel, 2019; Melamed vd., 2018).

Enerji elde edilen kaynaklar, kullanılma şekillerine göre ve dönüşebilme durumuna göre sınıflandırılmaktadır.

Çizelge 2.1. Enerji kaynaklarının gruplandırılması (Koç ve Şenel, 2013)

Enerji Kaynakları			
Kullanılışlarına göre		Dönüştürülebilirliklerine göre enerji kaynakları	
A) Yenilenemez	B) Yenilenebilir	A) Birincil (Primer)	B) İkincil (Sekonder)
a) Fosil Kaynaklı	b) Çekirdek Kaynaklı	-Kömür -Petrol -Doğalgaz -Nükleer -Biyokütle -Hidrolik -Güneş -Rüzgâr -Dalga -Gel-git -Hidrojen	-Elektirik -Benzin -Mazot -Motorin -Kok kömürü -Petrokok -Hava gazı -Sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG)
-Kömür -Petrol -Doğal gaz	-Uranyum -Toryum	-Kömür -Petrol -Doğalgaz -Nükleer -Biyokütle -Hidrolik -Güneş -Rüzgâr -Dalga -Gel-git	-Elektirik -Benzin -Mazot -Motorin -Kok kömürü -Petrokok -Hava gazı -Sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG)

Çizelge 2.1.'de gösterildiği gibi enerji kaynakları elde edildikleri yöntemlere göre birincil (primer) ve ikincil (sekonder) enerji olarak ikiye ayrılmaktadır. Enerji kaynağının ham haline birincil (primer) enerji denmektedir. Kömür, petrol, doğalgaz, biyokütle, güneş, hidrolik, dalga, rüzgâr, gel-git birincil (primer) enerji kaynaklarıdır. Enerji kaynağının ham halinin işlem görmüş şekline ise ikincil (sekonder) enerji denmektedir. Kok kömürü, hava gazı, petrokok, elektrik, sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG), benzin, motorin, mazot, ikincil (sekonder) enerji kaynaklarıdır (Erdem ve Kadir, 2015; İncekara ve Oğulata, 2011).



Şekil 2.2. 2019 yılı Türkiye birincil enerji kaynakları yüzdelik dağılım şeması (TEİAŞ, 2019)

2.3.1 Türkiye’deki kullanılan enerji kaynakları

Türkiye’nin elektrik üretimini elde ettiği kaynaklar Şekil 2.2 ve Çizelge 2.3’de gösterilmektedir. En az kullanılan kaynak sıvı yakıtlar (% 0,11) ve yenilenebilir atık ve atık ısı (%1,52) olarak Çizelge 2.3’de gösterilmektedir.

Çizelge 2.2. 2019 yılı Türkiye'nin elektrik üretilen kaynaklarının dağılımı

KAYNAK	ÜRETİM (GWh)	KATKISI (%)
İthal Kömür	60.394,7	19,87
Taşkömürü + Asfaltit	5.627,2	1,85
Linyit	46.872,2	15,42
Doğal Gaz	57.288,2	18,85
Sıvı Yakıtlar	336,0	0,11
Barajlı	65.926,2	21,69
D.Göl ve Akarsu	22.896,6	7,53
Rüzgâr	21.730,7	7,15
Yenilenebilir Atık+Atık Isı	4.624,2	1,52
Jeotermal	8.951,7	2,95
Güneş	9.249,8	3,04
TOPLAM	303.897,6	100,00

2.3.2 Biyokütle enerjisi

Canlı olan biyolojik yapılardan oluşabilen, çoğunlukla depolanan kimyasal enerjiyi bünyesinde barındıran organik malzemelere biyokütle denilmektedir. Atıklara (kentsel, endüstriyel, evsel vb.) fiziksel, kimyasal ve biyolojik tekniklerle yakıt kullanımına hazır hale gelmesiyle biyokütleden enerji elde edilmektedir. Bu enerji ısı ve elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Böylece biyokütle enerjisi yenilenebilir kaynaklar olarak geliştirilebilen teknolojilere olanak sağlamaktadır. Biyolojik proseslerde biyokütle teknolojileri kullanılabilir (Çıtak ve Pala Kılınç, 2016; Erdem ve Kadir, 2015; Kumar vd., 2015; Kumar ve Ankaram, 2019; Lauri vd., 2014).

Biyokütle enerjisi bu yapıların yakılması veya çeşitli işlemlerden geçirilmesi durumunda ortama fazladan CO₂ salınımı yapmamaktadır. Fosil yakıtlarla karşılaştırıldığında doğaya verdiği zarar oldukça düşük seviyelerdedir. Bundan dolayı çevre dostu, yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynakları arasında yer almaktadır. Yakın gelecekte ilgi çeken ve

popölasyonun enerji ihtiyacını karşılayabilecek enerji türü olacağı ön görölmektedir (Bilgili, 2020; Koç ve Şenel, 2013; Tolay ve Waterschoot, 2018).

Türkiye kullanılan en çok tercih edilen yenilenebilir kaynaklardan birisi de biyokötle enerjisidir (Gokcol vd., 2009). Türkiye'nin jeopolitik konumundan dolayı tarımsal alanın verimli olması, iklim şartlarının uygun olması ve su kaynaklarının bulunması biyokötle enerjisi açısından elverişli bir ortama sahiptir (İlleez, 2020). Biyokötle enerjisi aynı zamanda biyodizel, biyogaz ve biyokarbon üretimine kaynak olabilmektedir (Tolay ve Waterschoot). T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Enerji İşleri Genel Müdürlüğü'nün geliştirdiğı Biyokötle enerjisinin Türkiye'deki potansiyel verilerinin bulunduğu Türkiye'nin Biyokötle Enerjisi Potansiyel Atlası (BEPA, 2021) isminde uygulama bulunmaktadır. Böylelikle güncel olarak değışen verilerin takibi kolaylaştırılmıştır (İlleez, 2020).

BÖLÜM III

MATERYAL VE METOD

3.1 Materyal

3.1.1 Pil hücresi ve elektrotlar

Tez çalışmasında MYH sistemini oluşturmak için kullanılan cam malzemeler hacmen 300 mL'lik anot ve katot bölmesi, bölmeler arasında bağlantıyı sağlayabilmek için 150 mL'lik tuz köprüsüdür. Elektron iletimini sağlayan elektrotlar karbon yapıda uzunluğu 10 cm ve çapı 0,8 cm olarak sistemde kullanılmıştır. Sistemdeki mikrobiyal kültürün elektron transferi sonucu elde edilen voltaj farkı Fluke 8846A multimetre aracılığıyla takibi yapılmıştır.



Şekil 3.1. Mikrobiyal yakıt hücresi cam malzemeleri (Öztürk, 2018)



Şekil 3.2. Karbon bazlı elektrotlar (Öztürk, 2018)

3.1.2 Kullanılan mikrobiyal kültür besiyeri ve diğer çözeltilerin içeriği

3.1.2.1 Fosfat tampon çözeltisi

Tez çalışmasında 50 mM fosfat tampon çözeltisi katot odacığında ferrisiyanür ($K_3[Fe(CN)_6]$) çözeltisinde (300 mL) ve anot odacığındaki mikroorganizmaların gelişmesini sağlayan melashlı besiyerinde (1000 mL) kullanılmıştır. Fosfat tampon çözeltisi 2.452 g/L NaH_2PO_4 , 4.576 g/L Na_2HPO_4 ve iletkenliği arttırmak için 0.13 g/L KCl ile hazırlanarak çözeltinin pH'ı 7 değerine ayarlanmıştır.

3.1.2.2 Anot odacığında kullanılan melashlı besiyeri

Tez çalışmasında besiyerde kullanılacak melas için stok hazırlanmıştır. 60 g ham melas tartılarak behere konulmuştur. Üzerine 200 mL çeşme suyu eklenmiştir. 3 mL derişik H_2SO_4 konularak bünzen beki alevinde kaynamaya bırakılmıştır. Kaynadıktan sonra 10 dakika daha kaynatılmış ve ardından pişirme işlemi biterek çözelti oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Soğumuş çözelti fitre kâğıdından geçirilmiş ve süzülen çözeltiye NaOH koyularak pH 7 değerine ayarlanmıştır.

Melas konsantrasyonu Onat, 2020' de belirtilen oranda kullanılmıştır. Melashlı besiyeri 1.0 g/L $(NH_4)_2SO_4$ ve 0.5 g/L KH_2PO_4 tartılıp hazırlanmıştır. Tartılan kimyasallar 200 mL distile su ve stok melasdan da 40 mL üzerine eklenerek çözdürülmüştür. Ardından melashlı besiyerinin pH 7 değerine ayarlanmıştır. Çözelti steril edildikten sonra 750 mL fosfat tamponuna eklemiştir.

3.1.2.3 Wolfe vitamin çözeltisi

• Biotin	2.0 mg
• Folik asit	2.0 mg
• Pridoksin hidroklorit	10.0 mg
• Tiamin. HCl	5.0 mg
• Riboflavin	5.0 mg
• Nikotonik Asit	5.0 mg
• Pantotenat Kalsiyum D-(+)	5.0 mg

• Vitamin B12	0.1 mg
• p-Aminobenzoik asit	5.0 mg
• Tioktik Asit	5.0 mg

Yukarıda verilen maddeler sırayla hassas terazide tartılmıştır ve hazırlanan çözelti 100 mL distile suya tamamlanmıştır. Vitamin çözeltisi stok olarak hazırlanmıştır.

3.1.2.4 Katot odacığı için hazırlanan tampon çözeltisi

Yapılan çalışmada 50 mM 300 mL fosfat tampon çözeltisine 4.94 g $K_3[Fe(CN)_6]$ (ferrisiyanür) tartılıp eklenmiştir. Katot odacığında ferrisiyanür çözeltisi mikroorganizmaların metabolizmaları tarafından üretilen elektronların aktarıldığı son elektron alıcı görevini üstlenmektedir. Ancak, ferrisiyanür çözeltisi etkinliği zamanla azalmaktadır ve bu nedenle 15 günlük periyotlarla yenilenmiştir.

3.1.2.5 Tuz köprüsü

Agar-agarlı tuz köprüsü tez çalışmasında anot ve katot odacıkları arasında iyon geçişini sağlayan nasyona göre daha uygun maliyetli sistem bağlantısı olarak kullanılmıştır. 150 mL'lik tuz köprüsü için 11.16 g KCl ve 4.5 g agar-agar tartılıp distile su ile çözünmesi sağlanmaktadır. Sterilizasyon işlemi gerçekleştirildikten sonra cam bağlantı köprüsü tamamen çözelti ile doldurulmuştur. Ardından tuz köprüsü donmaya bırakılmıştır ve tamamen opak hale geldikten sonra deney sistemi hazırlanmıştır.

3.1.2.6 Mikrobiyal kültür

Mikrobiyal yakıt hücresinde anotta Niğde Akkaya Barajından alınan aktif atık çamur inokulumu kullanılmıştır. Aktif atık çamur +4°C de muhafaza edilmiştir. Mikrobiyal yakıt hücresi kurulumu esnasında anot odacığına 10 mL aktif çamur inokulumu eklenmiştir. Mikrobiyal kültürün gelişmesini hem kuru ağırlık tayinleri hem de 600 nm'de spektrofotometrik ölçümler aracılığıyla belirlenmiştir.

3.1.2.7 Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ)

Yapılan çalışmada MYH sistemindeki kirlilik giderim miktarını belirlemek için kimyasal oksijen ihtiyacı metodu kullanılmıştır. Kimyasal oksijen ihtiyacının tespitinde kullanılan çözeltiler ve reaktifler aşağıda sıralanmıştır.

A Çözeltisi: Standart potasyum dikromat çözeltisi

33.3 g HgSO_4 tartılıp 167 mL H_2SO_4 içerisine aktarılıp çözündürülür. 500 mL distile suda 4.913 g $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ çözündürülür ve hazırlanmış olan H_2SO_4 - HgSO_4 çözeltisi yavaşça eklenir ve karıştırılır. Soğuyan çözelti 1000 mL'ye distile su ile tamamlanır.

B Çözeltisi: Sülfürik asit çözeltisi

5.06 g AgSO_4 500 mL derişik H_2SO_4 içerisinde çözündürülür.

C Çözeltisi: Standart demir amonyum sülfat çözeltisi (DAS)

Bir miktar suda 9.8 g $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ çözündürülür. Üzerine derişik H_2SO_4 5 mL eklenir. Çözelti soğuduktan sonra distile suyla 250 mL'ye tamamlanır.

D Çözeltisi: Ferroin belirteç çözeltisi

139 mg $\text{Fe}(\text{SO}_4) \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ve 297 mg 1,10 fenontrolin monohidrat 20 mL distile suda çözündürülür.

Çözeltiler kahverengi şişelere konulmuş ve ışıktan ve sıcaklıktan korunarak saklanmıştır.

3.1.2.8 DNA izolasyonu ve polimeraz zincir reaksiyonu

PowerSoil DNA Isolation Kiti (MoBio Laboratories Inc.) kullanılarak DNA izolasyonu yapılmıştır. İzole edilmiş DNA örneklerinden 16S rRNA bölge analizleri yapabilmek için aşağıda verilen primerler kullanılmıştır.

1. P3 (40-bp GC kelepçe bölgesi içeren; 5'-CGCCCGCCGCGCCCCGCGCCCGTCCCGCCGCCCCGCCCCGCCTACGGGAGGCAGCAG-3') ve 907R (5'-CCGTCAATTCCTTTT AGTTT-3') (Futamata vd., 2013; Quan vd., 2012).
2. 805R (5'-GAC TAC CAG GGT ATC TAA TCC-3) ve GC-341F (5'-CGC CCG CCG CGC GCG GCGGGC GGG GCG GGG GCA CGG GGG GCC TAC GGG AGG CAG CA-3') (Li vd., 2013; Quan vd., 2012).
3. V3 ve V4 hiper değişken bölgeleri, 341F (5'ACACTGACGACATGGTTCTACANNNNCCTACGGGAGGCAGCAG-3') ve 806R (5'-TACGGTAGCAGAGACTTGGTCTGGACTACHVGGGTWTCTAAT-3') (Yanuka-Golub vd., 2016).
4. 8F (5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3') ve 533R (5'-TTACCGCGGCTGCTGGCAC-3') (Wang vd., 2012).
5. 9F (5'-GAG TTT GAT CCT GGC TCA G-3') ve 1512R (5'-ACG GTA CCT TGT TAC GAC TT-3') (Chae vd., 2009).
6. 27f (5'-AGA GTT TGA TCM TGG CTC AG-3') ve 1492r (5'-TAC GGY TAC TTG TTA CGA CTT-3') (Zhang vd., 2011).
7. 357f (5'-CGC CCG CCG CGC GGC GGC GGG GCG GGG GCA CGG GGG GCC TAC GGG AGGCAG CAG-3') ve 518r (5'-ATT ACC GCG GCT GCT GG-3')(Hou vd., 2012; Zhang vd., 2011).

3.1.2.9 Agaroz jel elektorforezi

Elektroforezde kullanılacak 50x Tris-EDTA(TAE) Buffer hazırlanması için ilk olarak 24.2 g Tris 70 mL distile suda çözündürülmüştür. Çözülen Tris çözeltisine glasiyel asetik asitten (G.A.A) 5.71 mL koyulmuştur. Stok 0.5 M EDTA için 9.305 g 50 mL'de çözündürülmüş ve pH 8 değerine ayarlanmıştır. Buffer karışımı Tris-G.A.A çözeltisine 10

mL 0.5 M EDTA (stoktan) eklenmiştir. Toplam hacim 100 mL'ye tamamlanır. 50x TAE bufferdan 1x'e seyreltilerek kullanılmıştır.

Elektroforezde agaroz jel %1.5 ya da %2'lik olarak hazırlanmaktadır. 100 mL 1x TAE bufferın içerisine seçilen miktarda (1.5 g ya da 2 g) agaroz konularak jel hazırlanmıştır.

3.2 Metot

3.2.1 Mikrobiyal yakıt hücresinin hazırlanması

Yapılan tez çalışmasında iki odacıklı MYH kullanılmıştır. Mikrobiyal yakıt hücresinin cam malzemeleri ve besiyeri içerikleri steril edildikten sonra ilk olarak 150 mL tuz köprüsü dökülerek katılaşmaya bırakılmıştır. Katılaşma işlemi gerçekleştikten sonra MYH cam malzemeleri birleştirilmiştir. Melaslı besiyeri, tampon çözelti ve vitamin solüsyonu karıştırılarak 300 mL kadar anot odacığına doldurulmuştur ve üzerine 10 mL Akkaya Baraj gölü çamur inokulumu eklenmiştir. Karbon elektrot çözeltiye daldırılmıştır. Ortamın anaerobik olması için cam şişeni ağzı parafilmle sıkıca kapatılmıştır. Sistemden azot gazı geçirilerek anaerobik hale getirilmiştir. Katot odacığında ise hazırlanan 300 mL ferrisiyanit çözelti konulmuştur ve içerisine karbon elektrot daldırılmıştır.

Hazırlanan iki odacıklı MYH sistemi çalkalamalı inkübatöre yerleştirilmiştir. Multimetreye bağlanarak 20 dakikada voltaj değerleri kaydedilmiştir. 40 günlük inkübasyon periyodunun ilk 20 günü mikrobiyal komünitenin dengeye gelmesi için geçen süreyi oluşturmaktadır. Sistem ilk 20 gün 1 ohmda daha sonra 5'er gün aralıklarla 10, 100 ve 1000 ohmluk direnç uygulanarak voltaj ve akım değerleri kaydedilmiştir. 40 günlük inkübasyon periyodu boyunca takibi yapılmıştır. Bu deney iki tekrarlı olarak ayrı ayrı 15°C ve 45°C sıcaklıklar için yapılmıştır.

3.2.2 Mikrobiyal yakıt hücresinin verilerinin hesaplanması

Tez çalışmasında kullanılan MYH kesikli beslemeli bir sistem olup 15°C ve 45°C derecede çalkalamalı inkübatörde 100 rpmde çalıştırılmıştır. Sisteme bağlı multimetre

(FLUKE 8846A) ile 20 dakikada bir kayıt altına alınmıştır. Toplanan verilerin ohm yasasına göre hesaplanması yapılmıştır.

$$V = I.R \quad (3.1)$$

Belirtilen formülde V sistemde elde edilen voltajı, I akımı ve R ise sistemden uygulanmış olan direnç olarak temsil edilmiştir. Akım yoğunluğu, hesaplanan akım değeri anotta bulunan elektrodun yüzey alanı dikkate alınarak normalize edilmiştir. Ayrıca güç (P) formülü aşağıda belirtilmiştir.

$$P = I.V \quad (3.2)$$

Mikrobiyal yakıt hücresinin toplam hacmiyle güç çıkışı normalize edilerek hesaplanmıştır.

Melas içerikli besiyerin KOİ değişimi hesaplanırken;

$$\Delta KOİ = (C_{oKOİ} - C_{fKOİ}) \quad (3.3)$$

Formülü kullanılmıştır. $C_{oKOİ}$ başlangıçtaki KOİ miktarı ve $C_{fKOİ}$ son KOİ miktarı olarak gösterilmiştir.

Yapılan tez çalışmasında kullanılan kulombik etkinliğin formülü aşağıda verilmiştir.

$$CE = \frac{M \int_0^t I dt}{V_{an}.n.F.\Delta KOİ} \quad (3.4)$$

Formülde belirtilen M oksijenin molekül ağırlığı, F Faraday sabiti, I akım, V_{an} MYH'nin anot odacığı hacmi ve n bir mol oksijen karşılığında verilen elektronun sayısıdır. Kimyasal oksijen ihtiyacı değişim ($\Delta KOİ$) ise besleme yapıldıktan sonra ölçülen KOİ değerinden 24 saat sonra yapılan besleme öncesi KOİ değeri çıkarılarak bulunmuştur.

3.2.3 Anot odacığından örnek alımı ve analizleri

Deneyi yapılan MYH sisteminin her gün anot odacığından enjektör yardımıyla yaklaşık 100 mL örnek alınmıştır. Ardından yeni besiyerinden tekrar 100 mL alınarak sistemde besleme işlemi yapılmıştır. Alınan örnek optik yoğunluğu, kuru ağırlık tayini ve kimyasal oksijen ihtiyacı için kullanılmıştır. 40 gün süren beslemede ilk, orta ve son gün besleme örnekleri -20°C’ de saklanmıştır. Bu örnekler DNA izolasyonu ve Polimeraz zincir reaksiyonu (PCR) için kullanılmıştır.

3.2.4 Polimeraz zincir reaksiyonu ve elektroforez

Kurutulmuş olarak gelen primerleri 100 µM derişimli stok haline getirebilmek için prosedürde belirtilen distilasyon miktarları kadar ultra distile su eklenerek pipetajla çözünmesi sağlanmıştır. Sulandırılan primerler -20°C’ de muhafaza edilmiştir.

Çizelge 3.1. 100 µM stok primerlerinin isimlendirilmesi ve distilasyon miktarları

Primer Adı	Distilasyon Miktarı	Primer Adı	DistilasyonMiktarı
GC-341F (Primer 1)	407,60	P3F (Primer 8)	377,40
907R (Primer 2)	350,70	341F (Primer 9)	390,20
9F (Primer3)	339,90	806R (Primer 10)	434,70
1512R (Primer 4)	394,30	357F (Primer 11)	470,80
27F (Primer 5)	400,90	805R (Primer 12)	479,40
1492R (Primer 6)	473,90	8F (Primer 13)	315,50
518R (Primer 7)	360,10	533R (Primer 14)	542,80

Hazır stoklardan kullanılacak kadar primer alınmış ve seyreltilmiştir. Polimeraz zincir reaksiyonu için kullanılacak tüp ve pipet uçları steril edildikten sonra tüp içeriği hazırlanmıştır. Polimeraz zincir reaksiyonu tüpü içerisinde;

- 5x FIREPOL Master Mix Ready to Load 4 µL
- Forward primer 0,6 µL
- Reverse primer 0,6 µL

- DNA izolasyon kiti ile izole edilmiş olan deneyler sırasında elde edilen mikrobiyal komüniteye ait DNA (miktarın belirlenmesi ng ölçümlerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir.)
- ddH₂O (DNA miktarına göre değişiklik göstermektedir.)

Toplam tüp hacmi 25 µL olacak şekilde miktarlar hesaplanmıştır. Applied Biosystems PCR cihazında 94°C’de beş dakika başlangıç denatürasyonu, 94°C’de 30 s, 55°C’de 20 s, 72°C’de 42 s ve sonlandırma için 72°C’de 7 dakikaya ayarlanarak PCR yapılmıştır. Elde edilmiş olan PCR ürünleri -20°C de saklanmıştır.

Polimeraz zincir reaksiyonu uygulanan tüplerin bant görüntülerini çıkarmak için elektroforez yapılmıştır. 1x TAE buffer, agaroz jel, marker (0-1000 bp arası) (Thermo Fisher Scientific / Fermentas) ve edityum bromür (EtBr) elektroforezde kullanılmıştır. Hazırlanmış agaroz jelin ilk kuyucuğuna marker konulmuştur. Diğer kuyucuklara PCR ürünlerinden 6 µL veya 7µL konularak negatif yükten pozitif yüke doğru 100 V’da 30 dakika koşturularak bırakılmıştır. Elektroforez bittikten sonra çıkan ürün jel görüntüleme cihazında ultraviyole ışık altında kaydedilmiştir.

BÖLÜM IV

BULGULAR

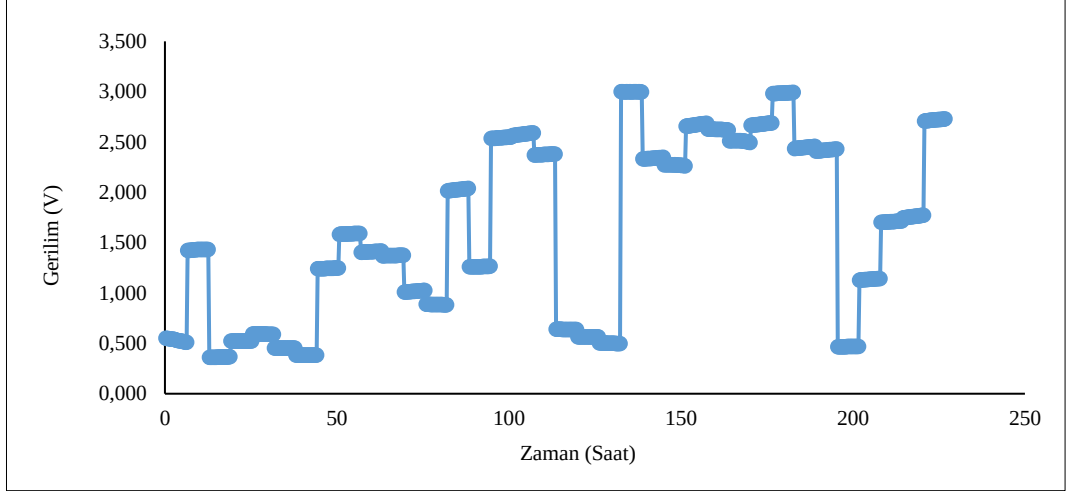
Tez çalışmasında materyal ve metotta belirtildiği gibi MYH sistemi oluşturulmuştur. Yapılan çalışmada sistemde farklı sıcaklıkların (15°C – 45°C) 40 günlük inkübasyonu takip edilmiştir. Her sıcaklık için iki tekrarlı deneyler yapılmıştır. Her gün yeni melaslı besiyeri ile yapılan beslemeler sonrasında MYH’de üretilen gerilim ve akım değerleri 6 saat boyunca Fluke 8846A multimetre ile zamana karşı kaydedilmiştir. Buna göre elde edilen verilen aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir. Bunların yanısıra tez çalışmasında alınan örneklerle mikrobiyal kültürünün optik yoğunluğu, KOİ tayini ile sıcaklığın MYH üzerindeki etkisi incelenmiştir.

4.1 15°C Ait Araştırma Bulguları

Yapılan çalışmada 15°C’de inkübe edilen MYH sisteminde melaslı besiyerinde elde edilen akım ve gerilim değerleri ve ayrıca besiyerine konulan mikrobiyal kültürün optik yoğunluğu ve kirlilik tayini için KOİ verileri belirlenmiştir. Bu verilere göre yapılan hesaplamalar ve elde edilen sonuçlar aşağıda açıklanmıştır.

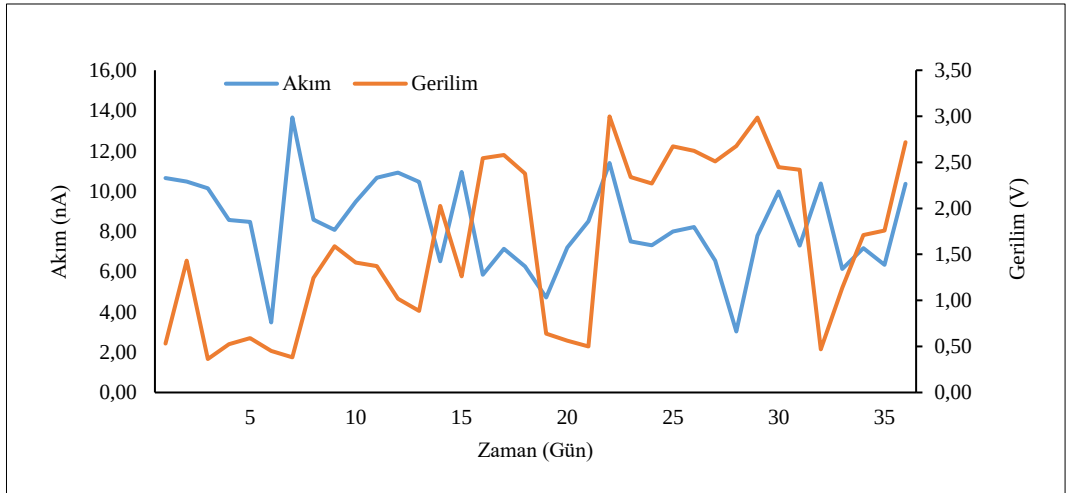
4.1.1 Mikrobiyal yakıt hücresinde üretilen akım ve gerilim değerleri

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde mikrobiyal faaliyet tarafından üretilen ve elektrotlar tarafından yakalanan elektron ve protonların katot odacığına aktarımı ile oluşan gerilim ve sistemde kullanılan tuz köprüsünün direnci nedeniyle oluşan akım değerleri ile aşağıdaki grafikler elde edilmiştir.



Şekil 4.1. Mikrobiyal yakıt hücresinde 15°C sıcaklıkta kayıtlı gerilim değerleri (Grafikte günlük değişimler yatay çizgiler halinde görülmektedir.)

Şekil 4.1’de gösterilen grafikte MYH’de kaydedilen gerilim değerleri gösterilmektedir. Gerilim değerleri 40 gün boyunca her gün 6 saat boyunca kaydedilmiştir. Gerilim değerleri 15°C sıcaklıkta 0,5 V ile 2,5 V arasında dengesiz bir şekilde salınmaktadır. Bu durum ise sabit bir akım değerinin elde edilmesine de mâni olmaktadır. Ancak inkübasyon periyodu ilerledikçe yüksek gerilim değerlerinin daha kolaylıkla elde edilebildiği ve sistemin geçici düşüşler kaydedilse bile 2,5 V gerilim değerlerinde dengeye gelebildiği belirlenmiştir.

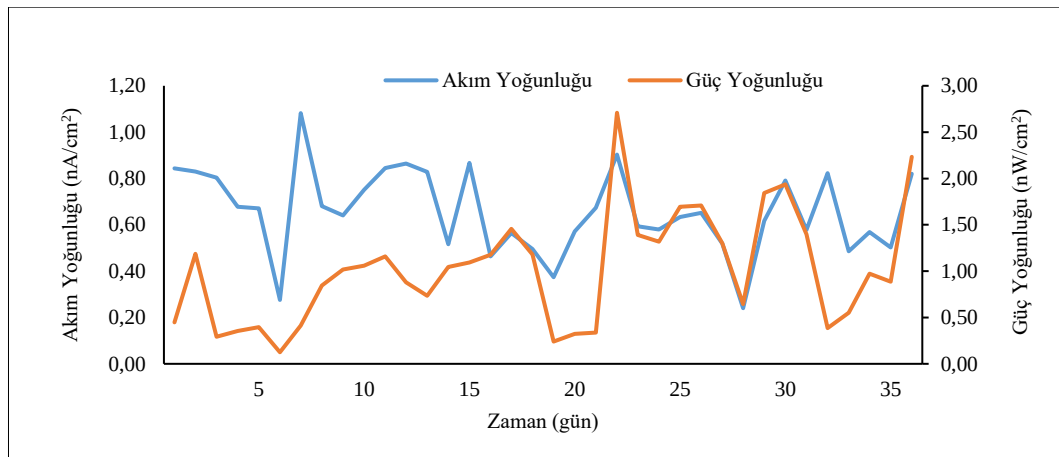


Şekil 4.2. 15°C sıcaklıkta kaydedilen akım ve gerilim değerleri (Günlük ortalama değerler cinsinden gösterilmiştir.)

Yapılan tez çalışmasında 15°C sıcaklıkta akım değerleri de kaydedilmiştir. Akım ve gerilim değerleri multimetre (Fluke 8846A) ile kaydedilen doğrudan elde edilmiş olan verilerdir. Akım değerleri nano amper cinsinden verilmiştir. Gerilim üretimindeki dengesiz salınımların akım değerlerinden de benzer olarak yansıdığı grafikte görülmektedir (Şekil 4.2). Akım değerlerinin salınmasına rağmen inkübasyon periyodu başlangıcında ve bitişinde 10 nA civarında olduğu belirlenmiştir.

4.1.2 Mikrobiyal yakıt hücresinde elde edilen güç ve akım yoğunlukları

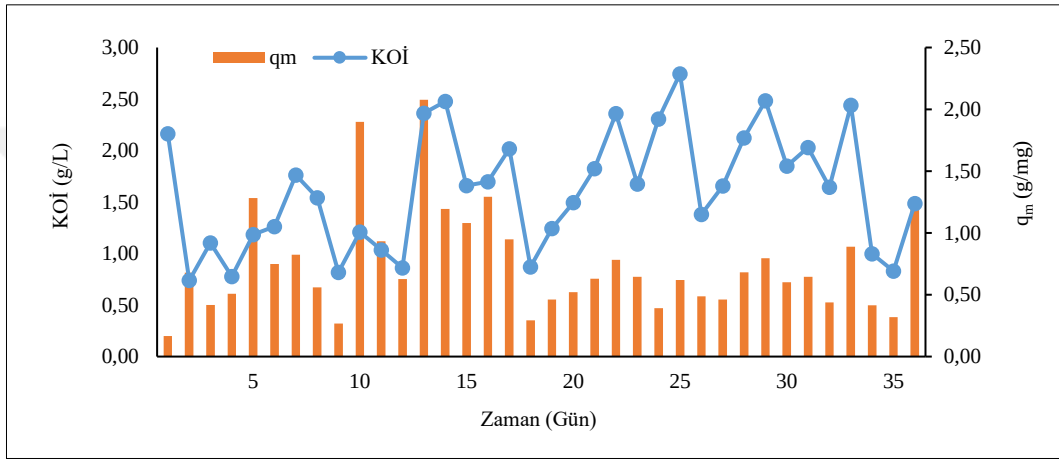
Tez çalışmasında multimetre cihazı ile kaydedilmiş olan akım değerleri elektrot yüzey alanına (12,3 cm²) bölünerek akım yoğunluğu hesaplanmıştır. Güç yoğunluğu hesaplanması için ise cihaz ile kaydedilen akım ve gerilim değerlerinden Ohm yasasına göre güç hesaplanmış ve sonrasında yine elektrot yüzey alanı kullanılarak güç yoğunluğu değeri bulunmuştur. Mikrobiyal yakıt hücresinde üretilen akım ve gerilim değeri temel alınarak yapılan güç yoğunluğu hesaplarında üretilen akım yoğunluğu ile güç yoğunluğu değerlerinin inkübasyon periyodunun 20 ila 30. günlerinde benzer olduğu görülmektedir. Bu durum hem inkübasyon periyodunun başlangıcında üretilen gerilim değerinin dengede olmaması ve salınım göstermesi ile hem de MYH’de kullanılan tuz köprüsünün yüksek iç direncine bağlı olabilir.



Şekil 4.3. 15°C sıcaklıkta kaydedilen akım ve gerilim değerleri ile hesaplanan akım ve güç yoğunlukları
(Akım ve güç yoğunlukları elektrot yüzey alanına göre hesaplanmıştır.) (Günlük ortalama değerler cinsinden gösterilmiştir.)

4.1.3 Mikrobiyal yakıt hücresinde KOİ giderimi

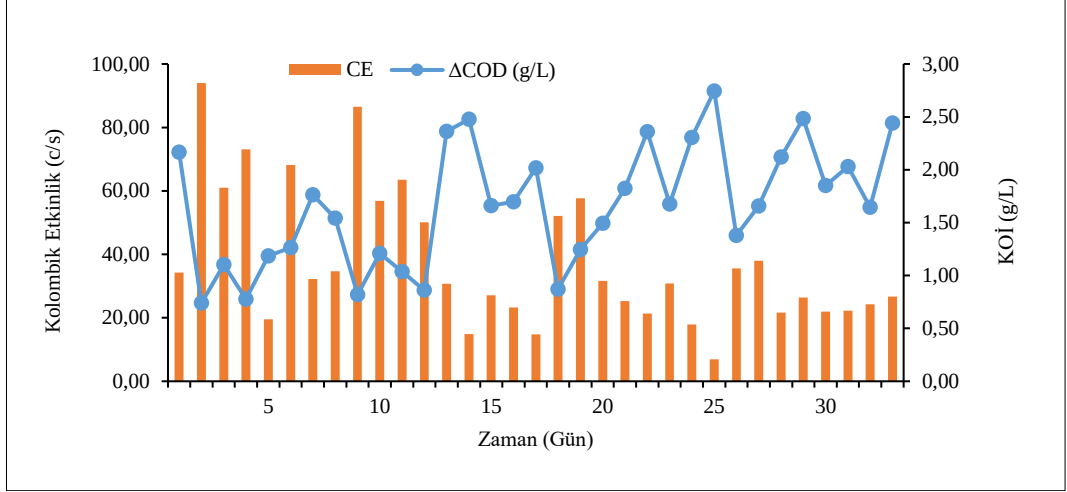
Tez çalışmasında MYH anot odacığında kullanılan melaslı besiyerinin KOİ değeri melasın sahip olduğu yüksek organik madde miktarı nedeniyle oldukça yüksektir ve KOİ'nin giderilmesi bu nedenle önemlidir. Yapılan bu çalışmada KOİ değeri besleme yapıldıktan hemen sonra ve besleme yapılmadan önceki KOİ değerleri farkına göre hesaplanmış ve anot odacığında oluşan biyomas ağırlığına göre mg kuru hücre başına düşen KOİ giderimi hesaplanmıştır. Elde edilen veriler Şekil 4.4'de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. 15°C sıcaklıkta kaydedilen KOİ ve q_m değerleri (KOİ değerleri günlük beslemeler öncesi ve sonrasında analiz edilerek değişim miktarı hesaplanmıştır.)

4.1.4 Mikrobiyal yakıt hücresinde elde edilen kulombik etkinlik

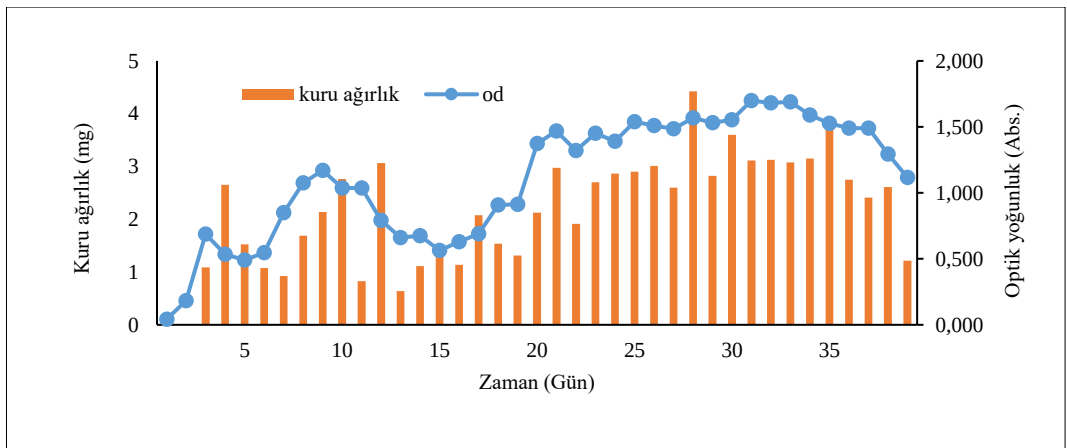
Kulombik etkinlik değeri sistemden bir saniyede geçen kulomb değeri temel alınarak hesaplanmaktadır. Kulombik etkinlik hesaplanmasında kullanılan formül materyal metot bölümünde açıklanmıştır. Harcanan kimyasal okijen ihtiyacı ve anot odacığı hacmine göre hesaplanan kulombik etkinlik değeri ile harcanan KOİ arasındaki ilişki aşağıdaki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 4.5. 15°C sıcaklıkta kaydedilen KOİ ve CE değerleri (KOİ değerleri günlük beslemeler öncesi ve sonrasında analiz edilerek değişim miktarı hesaplanmıştır, CE değerleri ΔKOİ değerleri ile hesaplanmıştır.)

4.1.5 Mikrobiyal kültür gelişimi

Tez çalışmasında MYH'nin anot odacığında gerçekleşen mikrobiyal kültür gelişimi optik yoğunluk ve kuru ağırlık takip edilerek belirlenmiştir. Optik yoğunluğun artışı ile kuru ağırlığında arttığı Şekil 4.6'da verilmiş olan grafikte görülmektedir. Grafikte inkübasyon periyodunun başlangıcında görülen yükseliş ve inkübasyon periyodunun 15. gününden sonra izlenen ikinci yükseliş mikrobiyal komünitede farklı mikroorganizmaları veya popülasyonların olabileceğini göstermektedir.

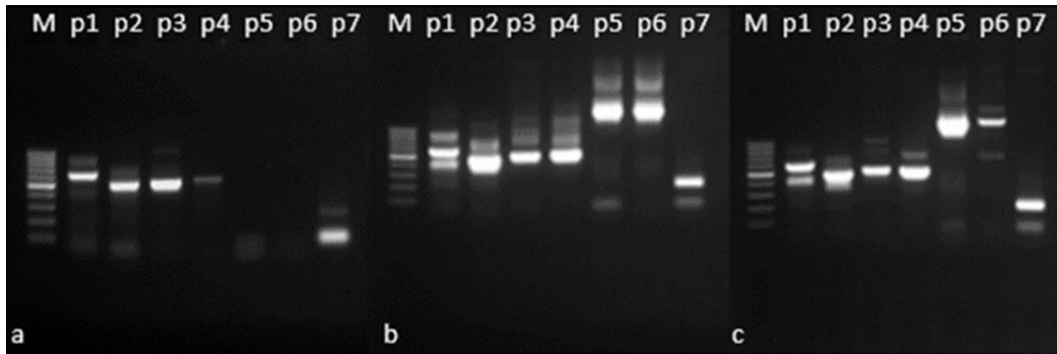


Şekil 4.6. 15°C sıcaklıkta kaydedilen optik yoğunluk ve mikrobiyal kuru ağırlık değerleri

Gerçekleştirilen tez çalışmasında dip sediment inokulumda (Akkaya Baraj Gölünden alınmıştır.) bulunan mikrobiyal kültürün 15°C deki gelişimi spektrofotometre ile ölçülerek elde edilen sonuçlar Şekil 4.6'da verilmektedir. 0-1,6 absorbans değer aralığında olduğu grafikte gösterilmiştir. Sistem denge süresinden (20.gün) sonra mikrobiyal kültürün gelişimi artış göstermektedir. Deneyin son aşamalarında gelişimin yavaşlaması kültürde ölümlerden kaynaklanabilmektedir.

4.1.6 PCR ile elde edilen DNA örneklerine ait bant görüntüleri

Polimeraz zincir reaksiyonu ürünlerinin bant görüntüleri (Şekil 4.) incelendiğinde inkübasyon periyodunun başında (a) 9F-1512R ve 27F-1492R primer çiftlerinde bant görüntüsü elde edilememiştir. İnkübasyon periyodunun 26. gününde alınan örneğin bant görüntüsünde (b) sistemin 20.günden sonra daha önce görüntü vermeyen primer çiftlerine bağlandığı gözlenmiştir. Deneyin son gününde alınan örneğin (c) bütün primer çiftlerinin bant görüntüleri elde edilebilmiştir. En çok 9F-1512R ve 27F-1492R primer çiftlerinin birçok mikroorganizmada ortak bulunan DNA fragmentlerine bağlanabildiği gözlenmiştir. Bantlarda P3-907R, 805R-GC341F, 341F-806R ve 8F-533R genel olarak 400-600 bp uzunluğunda bant verirken 9F-1512R ve 27F-1492R yaklaşık 1000 baz çifti uzunluğundadır.



Şekil 4.7. 15°C sıcaklıkta elde edilen mikrobiyal kültürün PCR analiz görüntüleri

Çizelge 4.1. Mikrobiyal yakıt hücresinde komünite analizleri için kullanılan primer çiftleri kodları

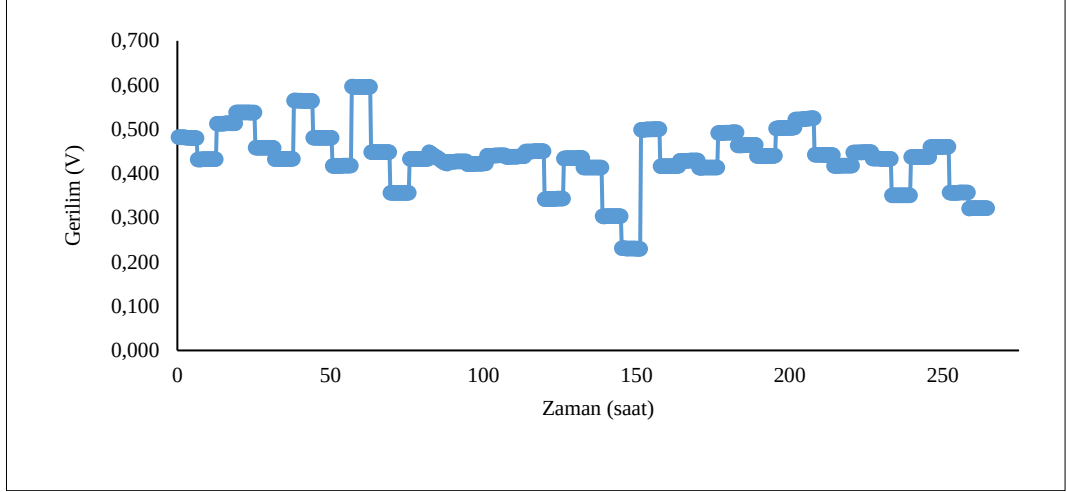
	Primer çiftleri	
p1	P3	907R
p2	805R	GC341F
p3	341F	806R
p4	8F	533R
p5	9F	1512R
p6	27F	1492R
p7	357F	518R

4.2 45°C Ait Araştırma Verileri

Çalışmada MYH 45°C’de inkübe edilmiş ve elde edilen akım ve gerilim değerleri ve ayrıca besiyerine inoküle edilen mikrobiyal kültürün gelişimi optik yoğunluğu ve kirlilik tayini için harcanan KOİ değerleri belirlenmiştir. Bu verilere göre yapılan hesaplamalar ve elde edilen sonuçlar aşağıda açıklanmıştır.

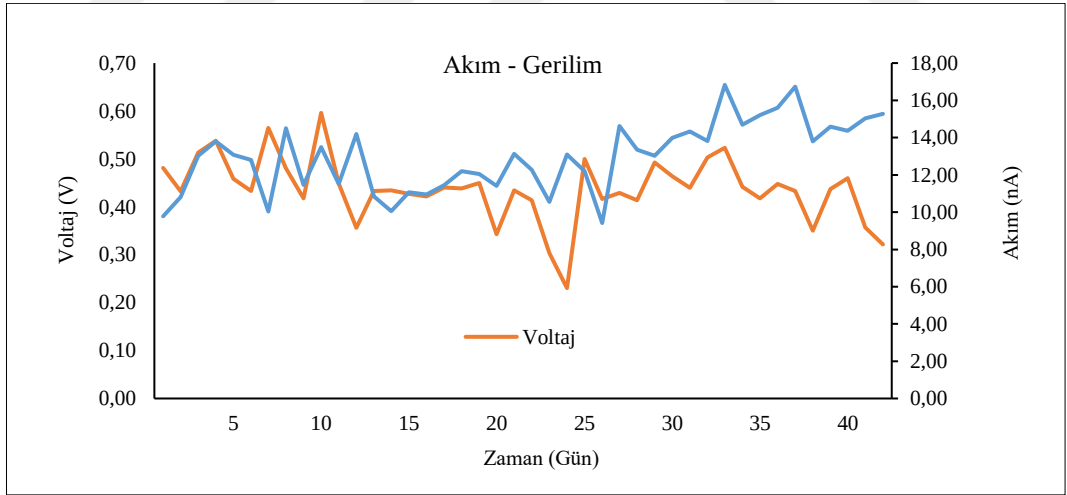
4.2.1 Mikrobiyal yakıt hücresinde üretilen gerilim değerleri

Mikrobiyal yakıt hücresinde 45°C sıcaklıkta kaydedilen gerilim değerlerinin inkübasyon periyodunun başından sonuna kadar yaklaşık olarak 0.4 ila 0.5 V civarında olduğu belirlenmiştir. 45°C sıcaklık gerilim üretiminin dengeli bir şekilde sağlanabildiği görülmektedir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. Mikrobiyal yakıt hücresinde 45°C sıcaklıkta kayıt edilen gerilim değerleri (Grafikte günlük değişimler yatay çizgiler halinde görülmektedir.)

Tez çalışmasında elde edilen akım ve gerilim değerleri Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Akım değerlerinin inkübasyon periyodu boyunca yaklaşık olarak 15 nA civarında tespit edilmiştir. 45°C sıcaklıkta yüksek oranda akım üretilebilmesi MYH’nin yüksek sıcaklıklarda daha verimli olabileceğini düşündürmektedir.

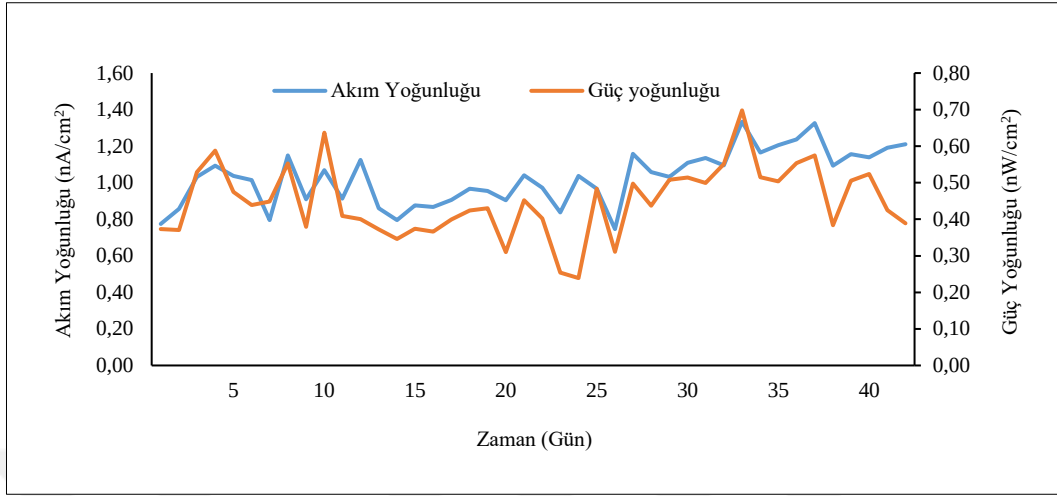


Şekil 4.9. 45°C sıcaklıkta kaydedilen akım ve gerilim değerleri (Günlük ortalama değerler cinsinden gösterilmiştir.)

4.2.2 Mikrobiyal yakıt hücresinden elde edilen güç ve akım yoğunlukları

Mikrobiyal yakıt hücresi 45°C sıcaklıkta inkübe edildiğinde sistemde voltaj ve akım üretiminin dengeli olduğu ve buna bağlı olarak üretilen güç değerlerinin belirli bir

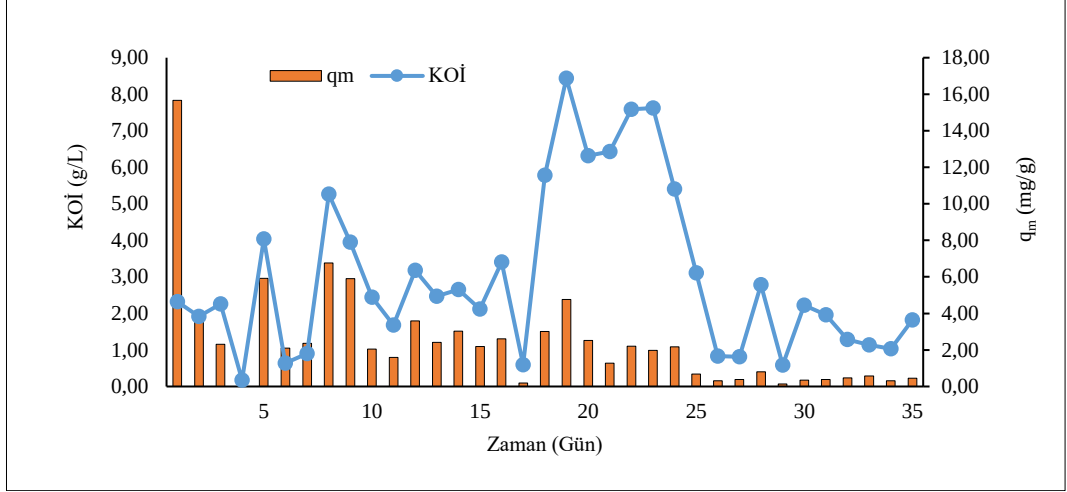
dengede olduğu görülmüştür. Ayrıca akım ve güç yoğunluklarının da birbiri ile dengeli olduğu görülmektedir (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. 45°C sıcaklıkta kaydedilen akım ve gerilim değerleri ile hesaplanan akım ve güç yoğunlukları
(Akım ve güç yoğunlukları elektrot yüzey alanına göre hesaplanmıştır.) (Günlük ortalama değerler cinsinden gösterilmiştir.)

4.2.3 Mikrobiyal yakıt hücresinde KOİ giderimi

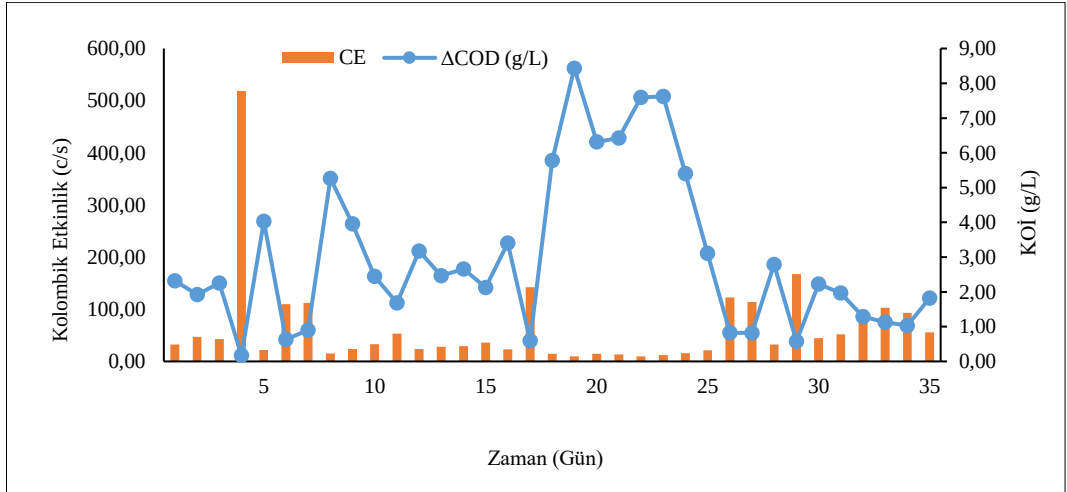
45°C sıcaklıkta yapılan deneylerde harcanan KOİ değerlerinin özellikle inkübasyon periyodunun sonunda yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca q_m değerleri de çok düşük hesaplanmıştır. Bu durum yüksek mikrobiyal gelişme olması ve dolayısıyla yüksek miktardaki biyomas nedeniyle oransal olarak mg hücre başına düşen KOİ değerinin düşmesiyle açıklanabilir.



Şekil 4.11. 45°C sıcaklıkta kaydedilen KOİ ve q_m değerleri (KOİ değerleri günlük beslemeler öncesi ve sonrasında analiz edilerek değişim miktarı hesaplanmıştır.)

4.2.4 Mikrobiyal yakıt hücresinde elde edilen kulombik etkinlik

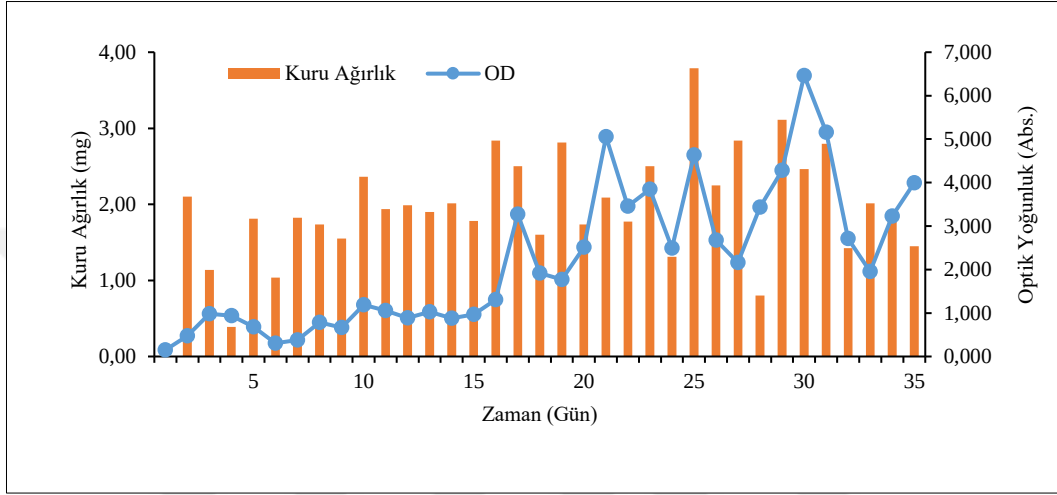
Kulombik etkinlik ile harcanan KOİ ters orantılı olarak hesaplanmaktadır. Yapılan deneyde 45°C sıcaklıkta yüksek biyomas oluşması nedeniyle KOİ giderimi de yüksek oranda gerçekleşmiştir. Buna bağlı olarak kulombik etkinlik düşmektedir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. 45°C sıcaklıkta kaydedilen KOİ ve CE değerleri (KOİ değerleri günlük beslemeler öncesi ve sonrasında analiz edilerek değişim miktarı hesaplanmıştır, CE değerleri Δ KOİ değerleri ile hesaplanmıştır.)

4.2.5 Mikrobiyal kültür gelişimi

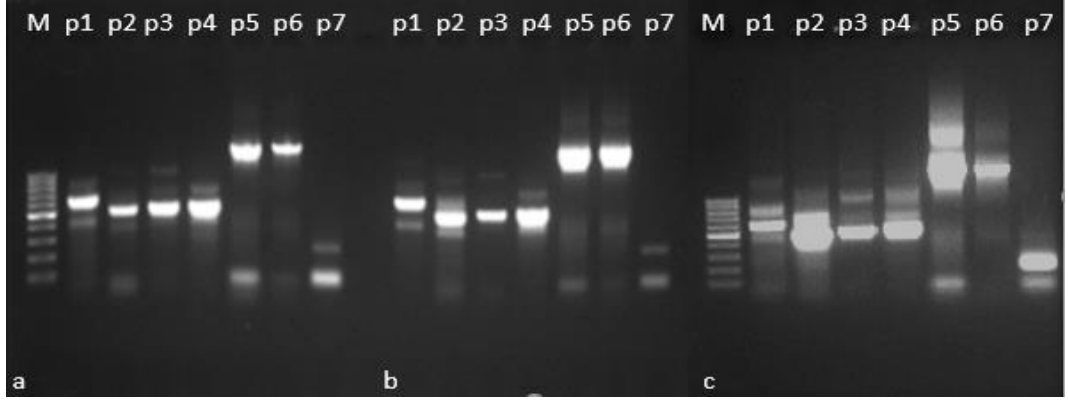
Mikrobiyal kültür gelişimi kuru biyomas ağırlığı ve optik yoğunlukla takip edilmiştir. Yapılan deneyde optik yoğunluğun inkübasyon periyodunun 15. gününden itibaren en yüksek değerlere ulaştığı ve kuru biyomas ağırlığının ise inkübasyon periyodunun başından itibaren yüksek olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.13).



Şekil 4.13. 45°C sıcaklıkta kaydedilen optik yoğunluk ve mikrobiyal kuru ağırlık değerleri

4.2.6 PCR ile elde edilen DNA örneklerine ait bant görüntüleri

Polimeraz zincir reaksiyonu ürünlerinin bant görüntüleri (Şekil 4.14) incelendiğinde inkübasyon periyodunun başında (a) 9F-1512R ve 27F-1492R primer çiftlerinde bant görüntüsü elde edilememiştir. İnkübasyon periyodunun 20. gününde alınan örneğin bant görüntüsünde (b) sistemin 20.günden sonra daha önce görüntü vermeyen primer çiftlerine bağlandığı gözlenmiştir. Deneyin son gününde alınan örneğin (c) bütün primer çiftlerinin bant görüntüleri elde edilebilmiştir. En çok 9F-1512R ve 27F-1492R primer çiftlerinin birçok mikroorganizmada ortak bulunan DNA fragmentlerine bağlanabildiği gözlenmiştir. PCR sonucunda elde edilen DNA bantları 15°C sıcaklıkta elde edilen DNA bantları ile benzerlik göstermektedir.



Şekil 4.14. 45°C sıcaklıkta elde edilen mikrobiyal kültürün PCR analiz görüntüleri

Polimeraz zincir reaksiyon ürünlerinin bant görüntülerinde ilk gün alınan örneğin (a) bant görüntülerinde P3-907R, 805R-GC341F, 341F-806R ve 8F-533R yaklaşık elde edilen uzunluk 400-600 bp arasındadır. Mikroorganizmaların DNA fargmentlerine en çok bağlanan primer grupları 9F-1512R ve 27F-1492R olmaktadır. 22.gün alınan örneğin (b) bant görüntüleri ve son gün bant görüntülerinde (c) primerlerinlerin aktif olarak çalıştığı gözlenmiştir.

BÖLÜM V

TARTIŞMA VE SONUÇ

Mikrobiyal yakıt hücreleri atık maddelerin mikrobiyal metabolizma ile giderilmesi ve aynı zamanda sistemde oluşan mikrobiyal aktivite ile biyoelektrik üretimini amaçlayan sistemlerdir. Yapılan çalışmada kirletici ve aynı zamanda mikrobiyal gelişmeyi desteklemek amacıyla anot odacığında melas çözeltisi kullanılmıştır. Katot odacığında ise elektron yakalayıcı olarak ferrisiyanit çözeltisi kullanılmıştır. Deneyler 15°C ve 45°C sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Mikrobiyal yakıt hücresinde mikrobiyal gelişim parametrelerinin belirlenmesi için optik yoğunluk, kuru biyomas ağırlığı ve harcanan KOİ takip edilmiştir. Bunun yanı sıra biyoelektrik üretimini takip etmek için sistemde üretilen akım ve gerilim değerleri Fluke 8846A multimetre ile 40 günlük inkübasyon periyodu boyunca takip edilmiş ve elde edilen veriler ile akım ve güç yoğunlukları, kulombik etkinlik değerleri hesaplanmıştır.

Gerilim değerleri 15°C sıcaklıkta 0,5 V ile 2,5 V arasında dengesiz bir şekilde salınmaktadır. Bu durum ise sabit bir akım değerinin elde edilmesine de mâni olmaktadır. Ancak inkübasyon periyodu ilerledikçe yüksek gerilim değerlerinin daha kolaylıkla elde edilebildiği ve sistemin geçici düşüşler kaydedilse bile 2,5 V gerilim değerlerinde dengeye gelebildiği belirlenmiştir. Mikrobiyal yakıt hücresinde 45°C sıcaklıkta kaydedilen gerilim değerlerinin inkübasyon periyodunun başından sonuna kadar yaklaşık olarak 0.4 ila 0.5 V civarında olduğu belirlenmiştir. 45°C sıcaklık gerilim üretiminin dengeli bir şekilde sağlanabildiği görülmektedir. Açıklanan bu sonuçlara göre 45°C sıcaklıkta voltaj üretimi tüm inkübasyon periyodu boyunca dengeli olduğu için voltaj üretimi açısından verimli görülmektedir.

Tez çalışmasında multimetre cihazı ile kaydedilmiş olan akım değerleri elektrot yüzey alanına (12,3 cm²) bölünerek akım yoğunluğu hesaplanmıştır (Logan vd., 2006). Güç yoğunluğu hesaplanması için ise cihaz ile kaydedilen akım ve gerilim değerlerinden Ohm yasasına göre güç hesaplanmış ve sonrasında yine elektrot yüzey alanı kullanılarak güç yoğunluğu değeri bulunmuştur. Mikrobiyal yakıt hücresinde 15°C sıcaklıkta üretilen akım ve gerilim değeri temel alınarak yapılan güç yoğunluğu hesaplarında üretilen akım yoğunluğu ile güç yoğunluğu değerlerinin inkübasyon periyodunun 20 ila 30. günlerinde

benzer olduğu gör÷lmektedir. Bu durum hem inkübasyon periyodunun başlangıcında üretilen gerilim değeri dengesiz olmaması ve salınım göstermesi ile hem de MYH'de kullanılan tuz köprüsünün yüksek iç direncine bağılı olabilir. Mikrobiyal yakıt hücresi 45°C sıcaklıkta inkübe edildiğinde sistemde voltaj ve akım üretiminin dengeli olduğu ve buna bağılı olarak üretilen güç değeri belirli bir dengede olduğu gör÷lmüştür. Ayrıca akım ve güç yoğunluklarının da birbiri ile dengeli olduğu gör÷lmektedir.

Tez çalışmasında MYH anot odacığında kullanılan melaslı besiyerinin KOİ değeri melasın sahip olduğu yüksek organik madde miktarı nedeniyle oldukça yüksektir ve KOİ'nin giderilmesi bu nedenle önemlidir. Yapılan bu çalışmada KOİ değeri besleme yapıldıktan hemen sonra ve besleme yapılmadan önceki KOİ değeri farkına göre hesaplanmış ve anot odacığında oluşan biyomas ağırlığına göre mg kuru hücre başına düşen KOİ giderimi hesaplanmıştır. Mikrobiyal yakıt hücresinde bakteriyel gelişim arttıkça mg kuru biyomas başına düşen KOİ giderimi düşmektedir. Kimyasal oksijen ihtiyacı miktarının belirlenmesi ve harcanan KOİ değeri belirlenmesiyle MYH'de önemli bir parametre olan kulombik etkinlikte takip edilmektedir (Logan vd., 2006). Harcanan KOİ ile kulombik etkinlik tüm sıcaklık değerlerinde birbiri ile ters orantılıdır ve bu durum literatür bilgisi ile örtüşmektedir (Catal vd., 2011; Logan, 2008; Moon vd., 2016).

Yapılan tez çalışması ile benzer çalışmalar incelendiğinde araştırmacıların benzer sonuçlar elde ettiğı ve sıcaklık değeri düştüğünde voltaj üretiminin azaldığı, buna karşılık sıcaklık değeri arttığında iletkenlik, voltaj üretiminde ve güç yoğunluğunda artış olduğu belirlenmiştir (Catal vd., 2011; del Campo vd., 2013). Liu vd. (2012) yaptığı çalışmada sıcaklık değeri 15°C'den 25 °C'ye yükselttiğinde daha sabit gerilim değerlerine ulaşıldığını belirlemiş ve aynı zamanda güç yoğunluğunun artışı da gözlemlemiştir. Mei vd. (2017) ise en yüksek güç yoğunluğuna çalışmada kullandıkları en yüksek sıcaklık olan 30°C'de ulaşmıştır. Aynı zamanda sıcaklığın düşmesi ile CE değeri arttığını belirlemiştir.

Mikrobiyal komünitenin gelişmesinin takibi sırasında 15°C sıcaklıkta inkübasyon periyodunun başlangıcında gör÷len yükseliş ve inkübasyon periyodunun 15. gününden sonra izlenen ikinci yükseliş mikrobiyal komünitede farklı mikroorganizmaları veya popülasyonların olabileceğini göstermektedir. Mikrobiyal kültür gelişimi kuru biyomas

ağırlığı ve optik yoğunlukla takip edilmiştir. Yapılan deneyde optik yoğunluğun inkübasyon periyodunun 15. gününden itibaren en yüksek değerlere ulaştığı ve kuru biyomas ağırlığının ise inkübasyon periyodunun başından itibaren yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durum sıcaklığın mikrobiyal gelişim üzerindeki etkisini değerlendirmek açısından temel mikrobiyoloji bilgisi ile uyusmaktadır.

Tez çalışmasında kullanılan primer çiftleri ile yapılan çalışmalar incelenmiştir. Chae vd. (2009) yaptığı çalışmada anaerobik çamur kullanılan MYH' de 9F-1512R primer çifti ve 805R primeri kullanılarak 4 farklı substrat ortamında (asetat, glikoz, bütirat ve propionat) bulunan mikrobiyal topluluğun 16s rRNA analizi yapılmıştır. Sonuçlarda ise glikoz, asetat ve bütiratla beslenen mikrobiyal toplulukta en çok *β-protobacteria* gözlenirken propionat ile beslenen toplulukta *Firmicutes* varlığı belirlenmiştir. Futamata vd. çalışmasında MYH' de laktat ile beslenmiş anaerobik kültür kullanılmıştır. Alınan mikrobiyal kültür örnekleri P3-907R primerleri kullanılarak yapılan 16S rRNA analizinde *Clostridium* ve *Pseudomonas* türlerinin baskın olduğu gözlenmiştir. Deneyin ilerleyen evrelerinde konsantrasyon değişimi *Clostridium* ve *Propionibacterium* ile ilişkili türlerin baskın olduğu belirlenmiştir. Zhang vd. (2011) yaptığı çalışmada üç farklı MYH hücrelerinde glikoz, asetat ve bütirat substrat değişimlerinin mikrobiyal topluluk değişimi ve analizi araştırılmıştır. 16s rRNA analizinde 27R-1492R ve 357F-518R primer çiftleri kullanılmıştır. Analiz sonucunda yoğun ve çok yönlü mikrobiyal toplulukların varlığı (çoğunlukla *Bacteroidetes*, *Bacilli*, *Clostridia*, *Flavobacteria* ve *Deltaproteobacteria*) belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

Ahn, Y. and Logan, B. E., "Effectiveness of domestic wastewater treatment using microbial fuel cells at ambient and mesophilic temperatures", *Bioresource Technology* 101(2), 469-475, 2010.

Akiba, T. H. P. B., Bennetto, H. P., Stirling, J. L. and Tanaka, K., "Electricity production from alkalophilic organisms", *Biotechnology Letters* 9(9), 611-616, 1987.

Allen, R. M. and Bennetto, H. P., "Microbial fuel-cells", *Applied Biochemistry and Biotechnology* 39(1), 27-40, 1993.

Bakhshian, S., Kariminia, H. R. and Roshandel, R., "Bioelectricity generation enhancement in a dual chamber microbial fuel cell under cathodic enzyme catalyzed dye decolorization", *Bioresource Technology* 102(12), 6761-6765, 2011.

Behera, M., Jana, P. S. and Ghangrekar, M. M., "Performance evaluation of low cost microbial fuel cell fabricated using earthen pot with biotic and abiotic cathode", *Bioresource Technology* 101(4), 1183-1189, 2010.

Bennetto, H. P., "Electricity generation by microorganisms", *Biotechnology Education* 1(4), 163-168, 1990.

BEPA, <https://bepa.enerji.gov.tr/>, Erişim Tarihi: 06.09.2021.

Bilgili, M. E., "Adana ilindeki biyokütle potansiyelinin elektrik enerjisi ikamesinde kullanım durumu", *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 3(1), 41-47, 2020.

Bond, D. R. and Lovley, D. R., "Electricity production by *Geobacter sulfurreducens* attached to electrodes", *Applied and Environmental Microbiology* 69(3), 1548-1555, 2003.

Boyles, W., The Science of Chemical Oxygen Demand, **Hach Company**, USA, 1997.

Catal, T., Kavanagh, P., O'Flaherty, V. and Leech, D., "Generation of electricity in microbial fuel cells at sub-ambient temperatures", **Journal of Power Sources** 196(5), 2676-2681, 2011.

Cecconet, D., Molognoni, D., Callegari, A. and Capodaglio, A. G., "Agro-food industry wastewater treatment with microbial fuel cells: Energetic recovery issues", **International Journal of Hydrogen Energy** 43(1), 500-511, 2018.

Chae, K. J., Choi, M. J., Lee, J. W., Kim, K. Y. and Kim, I. S., "Effect of different substrates on the performance, bacterial diversity, and bacterial viability in microbial fuel cells", **Bioresource Technology** 100(14), 3518-3525, 2009.

Cheng, S., Liu, H. and Logan, B. E., "Increased power generation in a continuous flow MFC with advective flow through the porous anode and reduced electrode spacing", **Environmental Science & Technology** 40(7), 2426-2432, 2006.

Clauwaert, P., Rabaey, K., Aelterman, P., De Schamphelaire, L., Pham, T. H., Boeckx, P., Boon, N. and Verstraete, W., "Biological denitrification in microbial fuel cells", **Environmental Science & Technology** 41(9), 3354-3360, 2007.

Çıtak, E. ve Pala Kılınç, P. B., "Yenilenebilir enerjinin enerji güvenliğine etkisi", **Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi** 3(25), 79-102, 2016.

del Campo, A. G., Lobato, J., Cañizares, P., Rodrigo, M. A. and Morales, F. J. F., "Short-term effects of temperature and COD in a microbial fuel cell", **Applied Energy** 101, 213-217, 2013.

Dinçer, H. and Yüksel, S., "Multidimensional evaluation of global investments on the renewable energy with the integrated fuzzy decision-making model under the hesitancy", **International Journal of Energy Research** 43(5), 1775-1784, 2019.

Dong, H., Yu, H. and Wang, X., "Catalysis kinetics and porous analysis of rolling activated carbon-PTFE air-cathode in microbial fuel cells", ***Environmental Science & Technology*** 46(23), 13009-13015, 2012a.

Dong, H., Yu, H., Wang, X., Zhou, Q. and Feng, J., "A novel structure of scalable air-cathode without Nafion and Pt by rolling activated carbon and PTFE as catalyst layer in microbial fuel cells", ***Water Research*** 46(17), 5777-5787, 2012b.

Du, Z., Li, H. and Gu, T., "A state of the art review on microbial fuel cells: a promising technology for wastewater treatment and bioenergy", ***Biotechnology Advances*** 25(5), 464-482, 2007.

Erdem, K. ve Kadir, K., "Enerji kaynakları–yenilenebilir enerji durumu", ***Mühendis ve Makina*** 56(668), 36-47, 2015.

Futamata, H., Bretschger, O., Cheung, A., Kan, J., Owen, R. and Nealson, K. H., "Adaptation of soil microbes during establishment of microbial fuel cell consortium fed with lactate", ***Journal of Bioscience and Bioengineering*** 115(1), 58-63, 2013.

Gavala, H. N., Angelidaki, I. and Ahring, B. K., "Kinetics and modeling of anaerobic digestion process", ***Biomethanation I*** 1, 57-93, 2003.

Ge, Z. and He, Z., "Long-term performance of a 200 liter modularized microbial fuel cell system treating municipal wastewater: treatment, energy, and cost", ***Environmental Science: Water Research & Technology*** 2(2), 274-281, 2016.

Gokcol, C., Dursun, B., Alboyaci, B. and Sunan, E., "Importance of biomass energy as alternative to other sources in Turkey", ***Energy Policy*** 37(2), 424-431, 2009.

Gude, V. G., "Wastewater treatment in microbial fuel cells—an overview", ***Journal of Cleaner Production*** 122, 287-307, 2016.

Gurung, A. and Oh, S.-E., "Application of biocathodes in microbial fuel cells: Opportunities and challenges", *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 45(3), 410-420, 2012.

He, Z. and Angenent, L. T., "Application of bacterial biocathodes in microbial fuel cells", *Electroanalysis: An International Journal Devoted to Fundamental and Practical Aspects of Electroanalysis* 18(19-20), 2009-2015, 2006.

Hisham, N. S. N., Zain, S. M., Jusoh, S., Anuar, N., Suja, F., Ismail, A. and Basri, N. E. A., "Microbial fuel cells using different types of wastewater for electricity generation and simultaneously removed pollutant ", *Journal of Engineering Science and Technology* 8(3), 316-325, 2013.

Hou, B., Hu, Y. and Sun, J., "Performance and microbial diversity of microbial fuel cells coupled with different cathode types during simultaneous azo dye decolorization and electricity generation", *Bioresour Technol* 111, 105-110, 2012.

İlleez, B., "Türkiye’de biyokütle enerjisi", *Türkiye’nin Enerji Görünümü* 1, 317-344, 2020.

İncekara, Ç. Ö. ve Oğulata, S. N., "Enerji darboğazında ülkemizin alternatif enerji kaynakları", *Sosyal ve Beşeri Bilimler Dergisi* 3(1), 1-10, 2011.

Işık, D. ve Ökmen, G., "Metan üreten mikroorganizmalar", *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi* 6(2), 79-85, 2013.

Ji, B., Zhao, Y., Vymazal, J., Mander, Ü., Lust, R. and Tang, C., "Mapping the field of constructed wetland-microbial fuel cell: A review and bibliometric analysis", *Chemosphere* 1, 128366, 2020.

Jong, B. C., Kim, B. H., Chang, I. S., Liew, P. W. Y., Choo, Y. F. and Kang, G. S., "Enrichment, performance, and microbial diversity of a thermophilic mediatorless microbial fuel cell", *Environmental Science & Technology* 40(20), 6449-6454, 2006.

Katuri, K. P., Scott, K., Head, I. M., Picioreanu, C. and Curtis, T. P., "Microbial fuel cells meet with external resistance", **Bioresource Technology** 102(3), 2758-2766, 2011.

Kim, H. J., Park, H. S., Hyun, M. S., Chang, I. S., Kim, M. and Kim, B. H., "A mediator-less microbial fuel cell using a metal reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens*", **Enzyme and Microbial Technology** 30(2), 145-152, 2002.

Kim, K. Y., Rossi, R., Regan, J. M. and Logan, B. E., "Enumeration of exoelectrogens in microbial fuel cell effluents fed acetate or wastewater substrates", **Biochemical Engineering Journal** 165, 107816, 2021.

Kim, N., Choi, Y., Jung, S. and Kim, S., "Effect of initial carbon sources on the performance of microbial fuel cells containing *Proteus vulgaris*", **Biotechnology and Bioengineering** 70(1), 109-114, 2000.

Koç, E. and Şenel, M. C., "Dünyada ve Türkiye’de enerji durumu-genel değerlendirme", **Mühendis ve Makina** 54(639), 32-44, 2013.

Kumar, A., Kumar, N., Baredar, P. and Shukla, A., "A review on biomass energy resources, potential, conversion and policy in India", **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 45, 530-539, 2015.

Kumar, S. and Ankaram, S., Waste to energy model/Tool presentation, In: Current Developments in Biotechnology and Bioengineering, **Elsevier**, India, 2019.

Lauri, P., Havlík, P., Kindermann, G., Forsell, N., Böttcher, H. and Obersteiner, M., "Woody biomass energy potential in 2050", **Energy Policy** 66, 19-31, 2014.

Li, W. W., Sheng, G. P., Liu, X. W. and Yu, H. Q., "Recent advances in the separators for microbial fuel cells", **Bioresource Technology** 102(1), 244-252, 2011.

Li, X. M., Cheng, K. Y., Selvam, A. and Wong, J. W., "Bioelectricity production from acidic food waste leachate using microbial fuel cells: Effect of microbial inocula", **Process Biochemistry** 48(2), 283-288, 2013.

Li, Z., Zhang, X. and Lei, L., "Electricity production during the treatment of real electroplating wastewater containing Cr^{6+} using microbial fuel cell", ***Process Biochemistry*** 43(12), 1352-1358, 2008.

Liang, B., Guo, S., Zhao, Y., Khan, I. U., Zhang, X., Li, K. and Lv, C., "Single iron atoms anchored on activated carbon as active centres for highly efficient oxygen reduction reaction in air-cathode microbial fuel cell", ***Journal of Power Sources*** 450, 227683, 2020.

Liao, Q., Li, L., Chen, R. and Zhu, X., "A novel photobioreactor generating the light/dark cycle to improve microalgae cultivation", ***Bioresource Technology*** 161, 186-191, 2014.

Lin, C. W., Wu, C. H., Chiu, Y. H. and Tsai, S. L., "Effects of different mediators on electricity generation and microbial structure of a toluene powered microbial fuel cell", ***Fuel*** 125, 30-35, 2014.

Liu, H., Ramnarayanan, R. and Logan, B. E., "Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell", ***Environmental Science & Technology*** 38(7), 2281-2285, 2004.

Liu, L., Tsyganova, O., Lee, D. J., Su, A., Chang, J. S., Wang, A. and Ren, N., "Anodic biofilm in single-chamber microbial fuel cells cultivated under different temperatures", ***International Journal of Hydrogen Energy*** 37(20), 15792-15800, 2012.

Logan, B., Cheng, S., Watson, V. and Estadt, G., "Graphite fiber brush anodes for increased power production in air-cathode microbial fuel cells", ***Environmental Science & Technology*** 41(9), 3341-3346, 2007.

Logan, B. E., Microbial Fuel Cells, ***John Wiley & Sons***, USA, 2008.

Logan, B. E., "Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells", ***Nature Reviews Microbiology*** 7(5), 375-381, 2009.

Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., Aelterman, P., Verstraete, W. and Rabaey, K., "Microbial fuel cells: methodology and technology", *Environmental Science & Technology* 40(17), 5181-5192, 2006.

Lu, H., Yu, Y., Xi, H., Zhou, Y. and Wang, C., "A quick start method for microbial fuel cells", *Chemosphere* 259, 127323, 2020.

Madigan, M. T., Martinko, J. M. and Parker, J., Brock Biology of Microorganisms, *Prentice Hall*, USA, 1997.

Mei, X., Xing, D., Yang, Y., Liu, Q., Zhou, H., Guo, C. and Ren, N., "Adaptation of microbial community of the anode biofilm in microbial fuel cells to temperature", *Bioelectrochemistry* 117, 29-33, 2017.

Melamed, M., Ben-Tal, A. and Golany, B., "A multi-period unit commitment problem under a new hybrid uncertainty set for a renewable energy source", *Renewable Energy* 118, 909-917, 2018.

Min, B. and Logan, B. E., "Continuous electricity generation from domestic wastewater and organic substrates in a flat plate microbial fuel cell", *Environmental Science & Technology* 38(21), 5809-5814, 2004.

Mohan, S. V., Saravanan, R., Raghavulu, S. V., Mohanakrishna, G. and Sarma, P. N., "Bioelectricity production from wastewater treatment in dual chambered microbial fuel cell (MFC) using selectively enriched mixed microflora: effect of catholyte", *Bioresource Technology* 99(3), 596-603, 2008.

Moon, H., Jun, Y. W., Kim, D., Ryu, H. G., Wang, T., Kim, K. H., Huh, Y., Jung, J. and Ahn, K. H., "A dipolar anthracene dye: Synthesis, optical properties and two-photon tissue imaging", *Chemistry–An Asian Journal* 11(18), 2518-2523, 2016.

Oh, S., Min, B. and Logan, B. E., "Cathode performance as a factor in electricity generation in microbial fuel cells", *Environmental Science & Technology* 38(18), 4900-4904, 2004.

Oh, S. E. and Logan, B. E., "Proton exchange membrane and electrode surface areas as factors that affect power generation in microbial fuel cells", ***Applied Microbiology and Biotechnology*** 70(2), 162-169, 2006.

Öztürk, M., Mikrobiyal yakıt hücrelerinde elektriksel aktivitede farklı medyatörlerin etkisinin belirlenmesi, ***Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Niğde, s. 25, 2018.

Pant, D., Van Bogaert, G., Diels, L. and Vanbroekhoven, K., "A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production", ***Bioresource Technology*** 101(6), 1533-1543, 2010.

Park, D. H., Laivenieks, M., Guettler, M. V., Jain, M. K. and Zeikus, J. G., "Microbial utilization of electrically reduced neutral red as the sole electron donor for growth and metabolite production", ***Applied and Environmental Microbiology*** 65(7), 2912-2917, 1999.

Pham, T. H., Rabaey, K., Aelterman, P., Clauwaert, P., De Schamphelaire, L., Boon, N. and Verstraete, W., "Microbial fuel cells in relation to conventional anaerobic digestion technology", ***Engineering in Life Sciences*** 6(3), 285-292, 2006.

Pisarevsky, A. M., Polozova, I. P. and Hockridge, P. M., "Chemical oxygen demand", ***Russian Journal of Applied Chemistry*** 78(1), 101-107, 2005.

Potter, M. C., "Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds", ***Proceedings of The Royal Society of London*** 84(571), 260-276, 1911.

Quan, X. C., Quan, Y. P. and Tao, K., "Effect of anode aeration on the performance and microbial community of an air-cathode microbial fuel cell", ***Chemical Engineering Journal*** 210, 150-156, 2012.

Rabaey, K., Boon, N., Siciliano, S. D., Verhaege, M. and Verstraete, W., "Biofuel cells select for microbial consortia that self-mediate electron transfer", ***Applied and Environmental Microbiology*** 70(9), 5373-5382, 2004.

Rabaey, K., Clauwaert, P., Aelterman, P. and Verstraete, W., "Tubular microbial fuel cells for efficient electricity generation", *Environmental Science & Technology* 39(20), 8077-8082, 2005.

Rabaey, K. and Verstraete, W., "Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation", *Trends in Biotechnology* 23(6), 291-298, 2005.

Singh, D., Pratap, D., Baranwal, Y., Kumar, B. and Chaudhary, R. K., "Microbial fuel cells: A green technology for power generation", *Annals of Biological Research* 1(3), 128-138, 2010.

Sonawane, J. M., Marsili, E. and Ghosh, P. C., "Treatment of domestic and distillery wastewater in high surface microbial fuel cells", *International Journal of Hydrogen Energy* 39(36), 21819-21827, 2014.

Taşkan, E., "Sediment tipi mikrobiyal yakıt hücresi kullanılarak arıtma çamurlarından elektrik üretimi", *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 28(1), 15-21, 2016.

Tolay, M. and Waterschoot, A., "Sürdürülebilir Enerji Üretiminde Biyokütle Kullanımı", *Küresel İklim Değişikliği, Çevre ve Enerji II. Uluslararası Sempozyumu*, İstanbul, 2018.

Velasquez-Orta, S. B., Head, I. M., Curtis, T. P. and Scott, K., "Factors affecting current production in microbial fuel cells using different industrial wastewaters", *Bioresource Technology* 102(8), 5105-5112, 2011.

Wang, S., Huang, L., Gan, L., Quan, X., Li, N., Chen, G., Lu, L., Xing, D. and Yang, F., "Combined effects of enrichment procedure and non-fermentable or fermentable co-substrate on performance and bacterial community for pentachlorophenol degradation in microbial fuel cells", *Bioresource Technology* 120, 120-126, 2012.

Wang, X., Cheng, S., Feng, Y., Merrill, M. D., Saito, T. and Logan, B. E., "Use of carbon mesh anodes and the effect of different pretreatment methods on power production in microbial fuel cells", *Environmental Science & Technology* 43(17), 6870-6874, 2009.

Yang, W., He, W., Zhang, F., Hickner, M. A. and Logan, B. E., "Single-step fabrication using a phase inversion method of poly (vinylidene fluoride)(PVDF) activated carbon air cathodes for microbial fuel cells", *Environmental Science & Technology Letters* 1(10), 416-420, 2014.

Yanuka-Golub, K., Reshef, L., Rishpon, J. and Gophna, U., "Community structure dynamics during startup in microbial fuel cells–The effect of phosphate concentrations", *Bioresource Technology* 212, 151-159, 2016.

Zhang, X., He, W., Ren, L., Stager, J., Evans, P. J. and Logan, B. E., "COD removal characteristics in air-cathode microbial fuel cells", *Bioresource Technology* 176, 23-31, 2015.

Zhang, Y., Min, B., Huang, L. and Angelidaki, I., "Electricity generation and microbial community response to substrate changes in microbial fuel cell", *Bioresource Technology* 102(2), 1166-1173, 2011.

Zhou, M., Chi, M., Luo, J., He, H. and Jin, T., "An overview of electrode materials in microbial fuel cells", *Journal of Power Sources* 196(10), 4427-4435, 2011.

Zhuang, L., Zheng, Y., Zhou, S., Yuan, Y., Yuan, H. and Chen, Y., "Scalable microbial fuel cell (MFC) stack for continuous real wastewater treatment", *Bioresource Technology* 106, 82-88, 2012.

ÖZ GEÇMİŞ

Özge ÇETİN tarihinde da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini da tamamladı. 2013 yılında Nevşehir Hacı Bektaş-ı Veli Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümünde lisans eğitimine başladı. 2017 yılında mezun oldu. 2018 yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Biyoteknoloji anabilim dalında tezli yüksek lisansa başladı. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesinde düzenlenen 1. Uluslararası Çevre Teknolojisi ve Yönetim Konferansına (ICETEM) ve Uluslararası Türk Dünyası Fen ve Mühendislik Kongresine (UTUFEM) katıldı.

TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER

Bu tez çalışmasında, 1 (bir) adet uluslararası makale ile 1 (bir) adet uluslararası bildiri üretilmiştir. Bu üretilen çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

Artan Onat, T. and Çetin, Ö., “The optimization of growth parameters in a anodic chamber of a microbial fuel cell”, *Yildiz Technical University, Environmental Research & Technology*, Vol. 3 (1), pp. 15-19, 2020.

Artan Onat, T. and Çetin, Ö., “The Microbial Growth Parameters in a Microbial Fuel Cell”, *1.Uluslararası Çevre Teknolojisi ve Yönetim Konferansı (ICETEM)*, Niğde, 27-29/06/2019.

