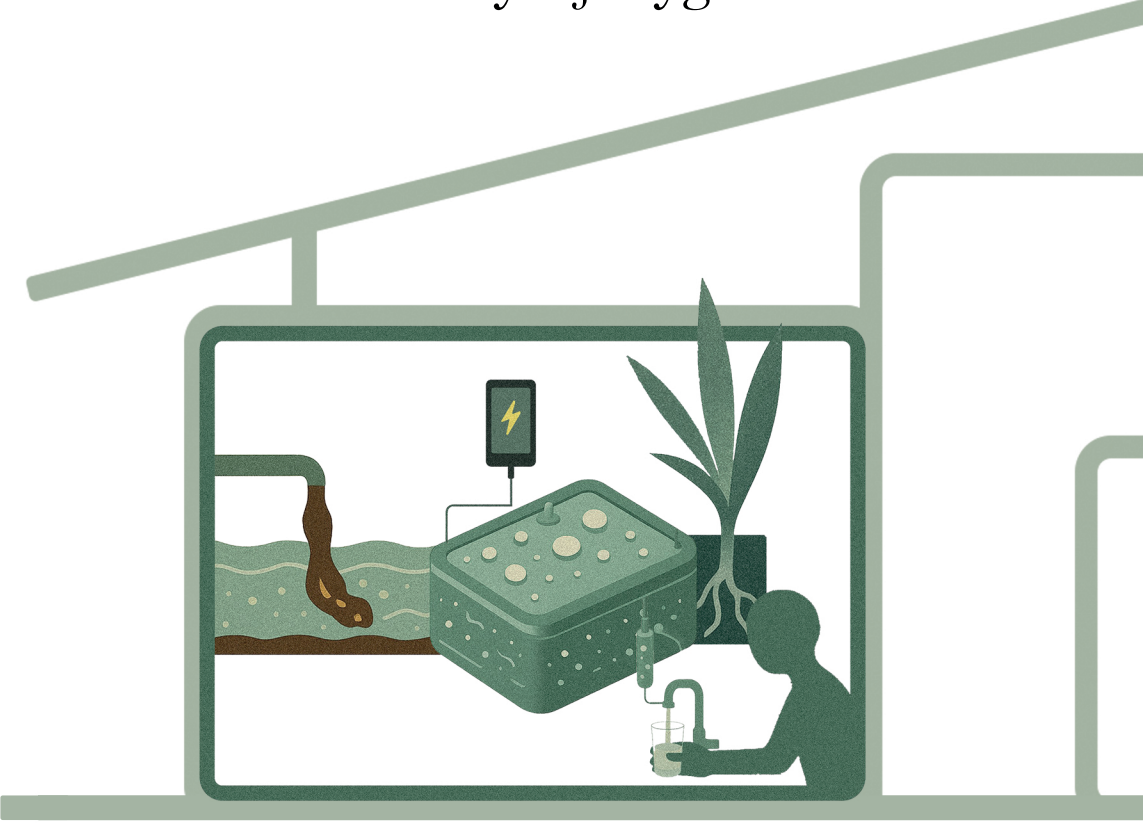


MİKROBİYAL YAKIT HÜCRELERİ

Kuramsal Temelden
Mimarlık ve Peyzaj Uygulamalarına



Metalurji ve Malzeme Yüksek Mühendisi **Nurettin ÇEK**
Mekatronik Yüksek Mühendisi **Selman SEZER**
Doç. Dr. **Aysun TUNA**

Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • C. Cansın Selin Temana

Kapak Tasarım / Cover Design • Gamze Tekin

İç Tasarım / Interior Design • Serüven Yayınevi

Birinci Basım / First Edition • © Kasım 2025

ISBN • 978-625-5749-39-0

© copyright

Bu kitabın yayın hakkı Serüven Yayınevi'ne aittir.

Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz. The right to publish this book belongs to Serüven Publishing. Citation can not be shown without the source, reproduced in any way without permission.

Serüven Yayınevi / Serüven Publishing

Türkiye Adres / Turkey Address: Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak

Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA

Telefon / Phone: 05437675765

web: www.seruvenyayinevi.com

e-mail: seruvenyayinevi@gmail.com

Baskı & Cilt / Printing & Volume

Sertifika / Certificate No: 47083

MİKROBİYAL YAKIT HÜCRELERİ

Kuramsal Temelden Mimarlık ve Peyzaj Uygulamalarına

METALURJİ VE MALZEME YÜKSEK MÜHENDİSİ NURETTİN ÇEK

MEKATRONİK YÜKSEK MÜHENDİSİ SELMAN SEZER

DOÇ. DR. AYSUN TUNA

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	
1. MİKROBİYAL YAKIT HÜCRELERİ	2
1.1. Mikrobiyal Yakıt Hücresi Nedir?.....	2
1.3. Niçin Mikrobiyal Yakıt Hücresi?.....	5
1.4. Mikrobiyal Yakıt Hücresinin Sınırlamaları	8
1.5. Mikrobiyal Yakıt Hücresinin İlişkili Olduğu Bilimsel ve Mühendislik Disiplinler	11
1.6. Mikrobiyal Yakıt Hücresinin Yararları	12
1.7. Mikrobiyal Yakıt Hücresinin Zayıflıkları	14
1.8. Mikrobiyal Yakıt Hücresinin Tarihsel Gelişimi.....	17
2. MİKROBİYAL YAKIT HÜCRESİ TÜRLERİ.....	28
2.1. Tek Odacıklı Mikrobiyal Yakıt Hücresi	29
2.2. Çift Odacıklı Mikrobiyal Yakıt Hücresi	36
2.2.1. H Tipi Çift Odacıklı Mikrobiyal Yakıt Hücresi	40
2.2.2. Silindir Tipi Çift Odacıklı Mikrobiyal Yakıt Hücresi.....	42
2.2.3. Boru Tipi Çift Odacıklı Mikrobiyal Yakıt Hücresi	44
2.2.4. Düz Plaka Tipi Çift Odacıklı Mikrobiyal Yakıt Hücresi	47
2.3. Tek Odacıklı ve Çift Odacıklı Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinin Karşılaştırılması	49
2.4. Mikrobiyal Yakıt Hücresi Reaktör Türlerinin Artıları ve Eksileri.....	54
3. MİKROBİYAL YAKIT HÜCRESİ BİLEŞENLERİ	58
3.1. Anot Odası.....	60
3.2. Katot Odası.....	63
3.3. Elektrotlar	66
3.3.1. Anot Elektrot Malzemeleri.....	69
3.3.2. Katot Elektrot Malzemeleri.....	90

3.4. Organik Madde	103
3.5. Mikroplar	115
3.5.1. Mikroplarla İlişkili Moleküllerin Elektrik Üretimi ile İlişkisi	124
3.6. Membran	126
3.7. Elektrik Devresi.....	134
4.TOPRAK MİKROBİYAL YAKIT HÜCRELERİ	135
4.1. Kompost Mikrobiyal Yakıt Hücreleri	143
4.2. Turba (Torf) Mikrobiyal Yakıt Hücreleri.....	144
4.3. Sediment ve Bentik Mikrobiyal Yakıt Hücreleri.....	145
5.BİTKİ MİKROBİYAL YAKIT HÜCRELERİ	150
6. MİKROBİYAL YAKIT HÜCRESİ TEKNOLOJİLERİNDE YENİ UFUKLAR	159
7. MİMARLIK VE PEYZAJ ÖLÇEĞİNDE MİKROBİYAL YAKIT HÜCRELERİ: YERİNDE ENERJİ, ENERJİ GÖRÜNÜRLÜĞÜ VE TASARIM	167
8.MİKROBİYAL YAKIT HÜCRESİ TEKNOLOJİLERİNİN GELECEK SENARYOLARI	171
KAYNAKLAR.....	177
Teşekkür	192

ÖNSÖZ

Hızlı kentleşme nedeniyle gelecekte çok sayıda insanın şehirlerde yaşayacağı öngörülmektedir. Bu durum daha fazla enerji tüketimine neden olacak ve enerji arz-talebi konusunda dengenin bozulmasına yol açabilme ihtimali vardır. Artan enerji ihtiyacının fosil yakıtlardan elde edilmesi iklim ve çevre sorunlarına yol açacaktır. Yenilenebilir ve çevreye zarar vermeden alternatif enerji kaynakları üretmek, iklim değişikliğinin azaltılması için önemli bir girişimdir. Şehir nüfusundaki artışa bağlı olarak ortaya çıkacak enerji kıtlığını azaltıp karbonsuzlaştırma hedeflerine de katkıda bulunabilen sürdürülebilir enerji çözümlerinden birisi mikrobiyal yakıt hücresi sistemleridir.

Mikrobiyal yakıt hücreleri; Temel Bilimler, Mühendislik, Mimarlık ve Teknoloji bilimlerindeki çeşitli disiplinleri bir araya getiren bir araştırma alanı olarak dikkat çekmiştir. Elektrik üretimi ve atık giderimi veya kazanımı işini aynı anda gerçekleştiren bir elektrokimyasal cihaz olan mikrobiyal yakıt hücreleri, bilimsel prensipleri kullanarak insan yaşamını iyileştirme ve kolaylaştırmada önemli potansiyel sunmaktadır.

Gelişmiş bir geleceğe sahip olmak için Temel Bilimler, Mühendislik, Mimarlık ve Teknoloji ile birlikte ilerleyen disiplinler arası çalışmaların yapılması gerektiği aşikardır. Bu birliktelik olmadan gelişmiş bir geleceği kurmanın mümkün olmadığı görülmüştür. Bu farkındalıkla ortaya çıkarılan bu kitap çalışması; mikrobiyal yakıt hücreleri hakkında genel bilgiler sunmakla işe başlayarak mikrobiyal yakıt hücrelerinin türleri, bileşenleri, yeni ufukları “yaşayan duvar” uygulaması ve gelecek senaryoları hakkında bilgiler sunmuştur.

Nurettin ÇEK, Fırat Üniversitesi, OSTİM Teknik Üniversitesi; nurettin-cek001@gmail.com, nurettin.cek@ostimteknik.edu.tr

Selman SEZER, Fırat Üniversitesi; sesezer07@gmail.com

Aysun TUNA, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi; aysun.tuna@ibu.edu.tr

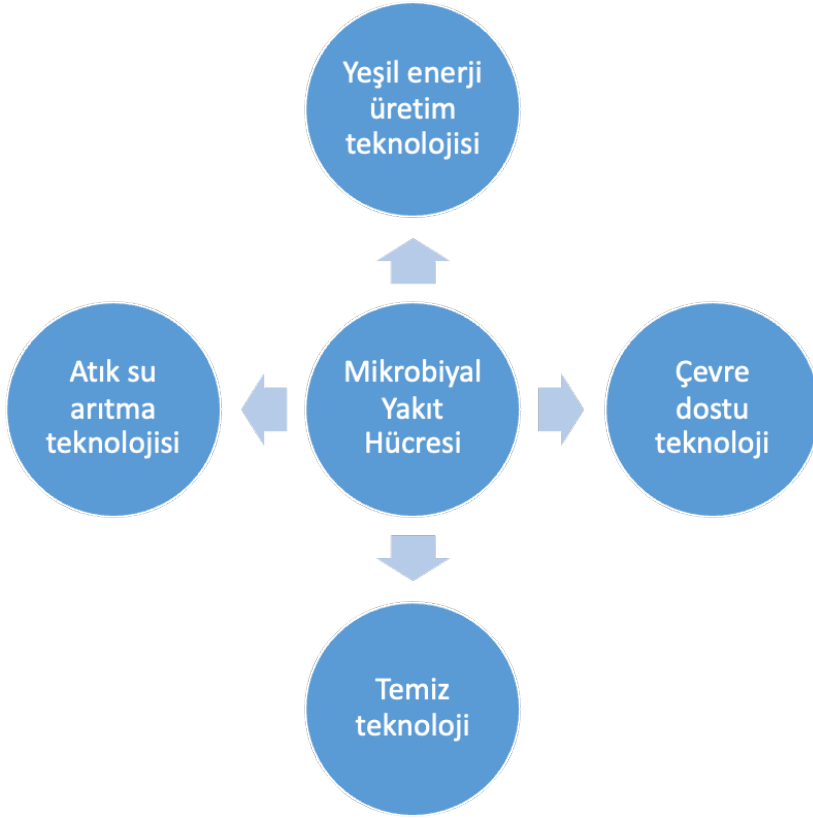
1. MİKROBİYAL YAKIT HÜCRELERİ

1.1. Mikrobiyal Yakıt Hücresi Nedir?

Mikrobiyal yakıt hücresi, organik veya inorganik maddelerin sahip oldukları kimyasal enerjiyi mikroorganizmaların yardımıyla doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren bir tür biyoelektrokimyasal cihaz sistemi olarak tanıtılmaktadır [1, 2]. Bir başka ifade ile mikrobiyal yakıt hücresi, anodik odalarda biyoenerji üretimi için biyokatalizör görevi gören aktif bakterilerin varlığını gerektiren bir tür biyoelektrokimyasal yakıt hücresi olarak ifade edilmektedir [3].

Mikrobiyal yakıt hücreleri, sürdürülebilir biyoenerji üretimi ve yeşil enerji üretimi için umut verici bir yol olarak ortaya çıkmıştır. Elektroaktif mikroorganizmaların gücünden yararlanan mikrobiyal yakıt hücreleri, yenilenebilir bir elektrik kaynağı sunmanın yanı sıra çevresel iyileştirme ve enerji sürdürülebilirliği girişimleri için de önemli bir potansiyele sahiptir. Bu yenilikçi teknoloji, organik maddelerin bozunmasını katalize etmek için mikrobiyal aktiviteden yararlanarak doğal süreçler ve biyoaktif malzemeler yoluyla elektrik üretimine yol açmaktadır. Mikrobiyal yakıt hücresinin ayırt edici avantajlarından birisi sürdürülebilir biyoenerji üretimi ve çevresel iyileştirmeyi birleştiren ikili işlevsellikleridir. Mikrobiyal yakıt hücresi teknolojisinin enerji sistemlerine entegre edilmesiyle, enerji taleplerinin sürdürülebilir bir şekilde karşılandığı ve aynı zamanda kirli alanların iyileştirilmesi yoluyla çevrenin korunmasına katkıda bulunduğu yadsınamaz bir gerçektir. Bu, sinerjik bir yaklaşım elde edilmesine olanak tanımıştır. Bu sayede ortaya çıkan döngüsel ekonomi modeli, daha temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına küresel geçişle uyumludur. Bunun sonucunda fosil yakıt yakılmasıyla ilişkili sera gazı emisyonlarını ve çevresel bozulmayı azaltmaktadır [4].

Mikrobiyal yakıt hücresi ile ilgili yapılan çalışmalarda, mikrobiyal yakıt hücresinin mikrobiyal metabolik aktiviteyi kullanarak organik maddede depolanan kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilen bir tür biyolojik kimyasal reaksiyon cihazı olduğu vurgulanmıştır. Mikrobiyal yakıt hücresi, atık suyu arıtırken elektrik üretir ve enerji üretim sürecinde çevreye neredeyse hiç kirlilik yaratmadığı için çevre dostu bir teknoloji olarak tanıtılmaktadır. Mikrobiyal yakıt hücresi yüksek verimlilik, düşük enerji tüketimi, temiz ve çevre dostu olma gibi avantajlara sahip yeni bir atık su arıtma süreci ve yeni bir yeşil enerji üretim teknolojisi olarak kabul edilmektedir [5].



Şekil 1.1. Mikrobiyal yakıt hücresi teknolojisinin dikkat çeken özellikleri

1.2. Mikrobiyal Yakıt Hücresinin Çalışma İlkeleri

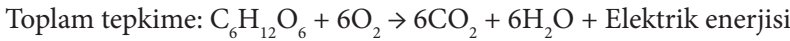
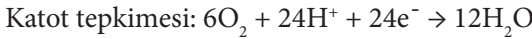
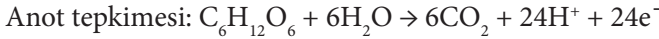
Mikrobiyal yakıt hücresinde mevcut olan organik/inorganik madde substrat olarak adlandırılmaktadır. Bu substrat, mikrobiyal yakıt hücresine aşılana veya doğal olarak mevcut olan mikroorganizmalar tarafından ayrıştırılmaktadır. Bu olay, “substratın mikrobiyal oksidasyonu” olarak veya “substratın mikrobiyal oksidasyon tepkimesi” olarak ifade edilmektedir. Organik madde (substrat) mikrobiyal yakıt hücrelerinin yakıtıdır. Bu olayın ardından substrattan elektron ve protonlar açığa çıkar. Başka bir ifade ile elektron ve protonlar serbest bırakılmaktadır. Bu durum, mikroorganizmaların metabolik aktivitesinin bir göstergesidir. Açığa çıkan elektronlar, sitokromlar veya redoks aktif proteinler tarafından mikrobiyal yakıt hücresinin anot elektrotunun yüzeyine aktarılır ve orada toplanır. Daha sonra bu elektronlar harici bir elektrik devresi (bakır tel gibi) aracılığıyla katot elektrotuna doğru hareket eder. Eş zamanlı olarak, açığa çıkan protonlar, membran veya onun yerini alabilecek

bir elektrolit içerisinde katot elektrota aktarılır. Katot elektrotta, bir elektron alıcısı (örneğin, oksijen veya ferrisiyanür) sağlanır ve bu, diğer olası tepkimeler arasında indirgenir. Bunun sonucunda elektronlar, protonlar ve genellikle havadan sağlanan oksijen birleşir. Burada oksijen, elektronik alıcı olarak ifade edilmektedir. Nihayetinde, su molekülleri oluşur, yani oksijen suya indirgenir. Bu süreçlerin tamamlanması sonucunda mikrobiyal yakıt hücresi elektrik enerjisi üretmektedir [6,7].

Çift odacıklı bir mikrobiyal yakıt hücresinde anot ve katot bölümleri bir membran ile ayrıldığı için burada, anot ve katot arasındaki çözelti konsantrasyonlarındaki fark nedeniyle, elektrik potansiyelinde bir fark üretilir. Bu potansiyel fark, harici elektrik devresi boyunca elektron akışını sağlayarak elektrik gücünün üretilmesinden sorumludur [6].

Teknik olarak, mikroorganizmalar çeşitli yenilenebilir kimyasal kaynaklardan elektrik enerjisi üretebilen ideal katalizörler ve kendi kendini yenileyen sistemlerdir. Mikroorganizmalar, çeşitli atıklardan faydalanarak elektrik enerjisi üretimini sağladıkları için geniş bir yakıt (substrat) tüketme yelpazesi sunmakta esneklik göstermektedirler. Bunun bir sonucu olarak, mikrobiyal yakıt hücresinin yenilenebilir biyokütleden biyoelektrik üretimi için küresel olarak ideal bir teknolojiyi temsil ettiği düşünülmektedir [6].

Geleneksel bir mikrobiyal yakıt hücresinin, bir proton değişim membranıyla ayrılmış anodik ve katodik olmak üzere iki bölmesi vardır. Anot bölümünde, mikroplar anaerobik koşullar altında anolitte asılı kalır ve substratları oksitler. Bunun sonucunda, anot bölümünde elektronlar, protonlar ve diğer metabolitler üretilir. Mikroorganizmalar tarafından salınan elektronlar anot tarafından toplanır ve harici bir devre üzerinden katoda geçirilir. Geçirilen her elektron için, katoda ulaşmak üzere membrandan bir proton taşınır. Mikrobiyal yakıt hücrelerinin katot bölümü genellikle elektron alıcısı olarak oksijen kullanır. Oksijenin suya indirgenmesi, katot bölümünde alınan elektron ve protonların transferiyle sağlanır ve sonuç olarak bir elektrik enerjisi üretilir. Bu dikkate alınarak substrat olarak glikoz ($C_6H_{12}O_6$) kullanan bir mikrobiyal yakıt hücresinde meydana gelen kimyasal tepkimeler şöyledir [1, 7]:



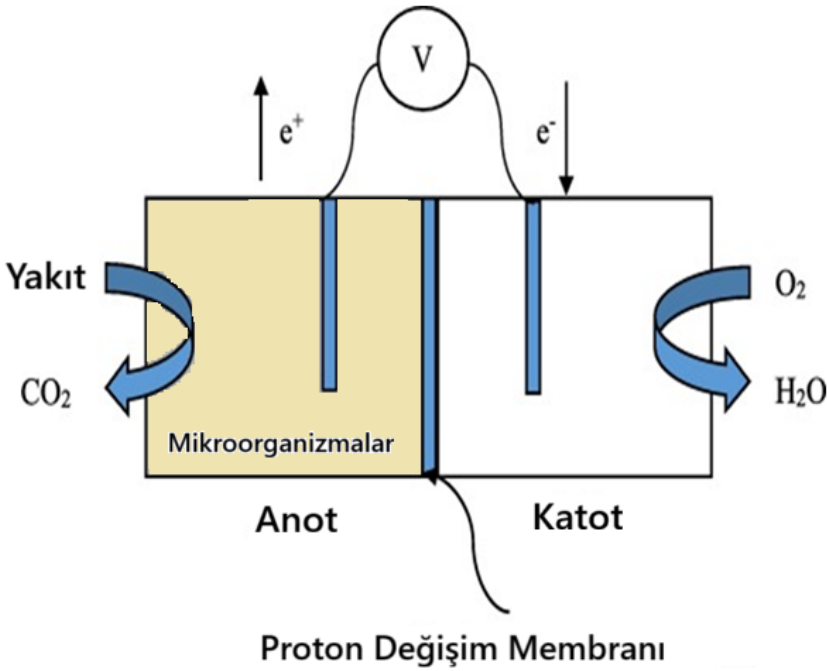
Mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanılan organik maddeye göre anot ve katot tepkimeleri değişebilse de genel itibarıyla toplam tepkimenin çıktısı elektrik enerjisi su buharı ve kısmen karbondioksitten oluşmaktadır. Örneğin; asetatı (CH_3COO) malzemesini model substrat olarak kullanan mikrobiyal yakıt hücresinde gerçekleşen tepkimeler şöyledir [8]:

Anot tepkimesi: $\text{CH}_3\text{COO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{CO}_2 + 7\text{H}^+ + 8\text{e}^-$

Katot tepkimesi: $\text{O}_2 + 4\text{e}^- + 4\text{H}^+ \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$

Toplam tepkime: $\text{CH}_3\text{COO} + 7/4\text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2 + 3/2\text{H}_2\text{O} + \text{elektrik enerjisi}$

Sonuç olarak mikrobiyal yakıt hücrelerinin çalışma ilkeleri Şekil 1.2’de verilmiştir. Burada görüleceği üzere, anot ve katot bölmeleri, proton değişim zarfı (PEM) ile içten ayrılmıştır. PEM’in işlevi, anottan katoda proton geçişini geçirirken, katottan anoda oksijen difüzyonunun kısıtlanması için bir bariyer görevi görmektir. Ayrıca, substratın, katot odasından oksijenin ve elektronların geçişini önlerken protonların geçişine izin verir [9].



Şekil 1.2. Geleneksel mikrobiyal yakıt hücresinin çalışma ilkelerinin şematik gösterimi [9].

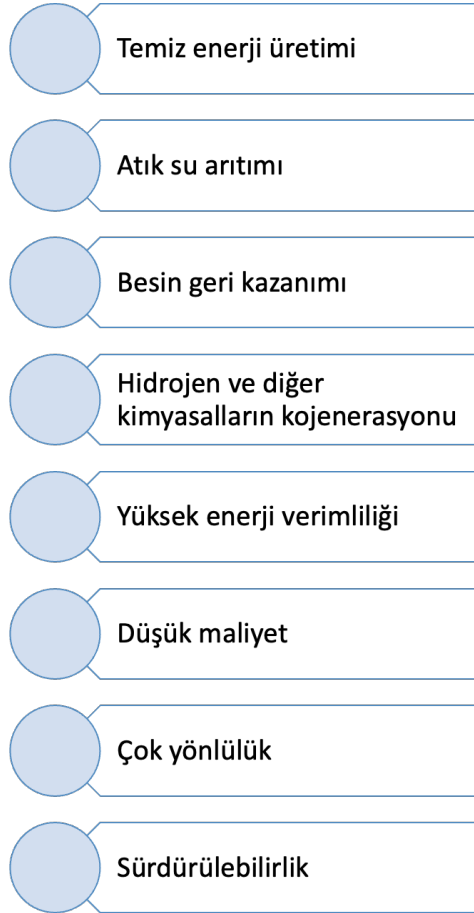
1.3. Niçin Mikrobiyal Yakıt Hücresi?

Mikrobiyal yakıt hücreleri, organik maddeyi elektrığe dönüştürmek için mikroorganizmaların gücünden yararlanan yenilikçi cihazlardır. Sürdürülebilir enerji alanında muazzam bir potansiyel sunmaktadırlar [10]. Bu sebeple, mikrobiyal yakıt hücreleri ile ilgili araştırmalar yapılması ve günlük hayatta yaygın kullanılabilir hale getirilmesi için bazı gerekçeler vardır. Bunlar şöyle sıralanabilir:

- ✓ Mikrobiyal yakıt hücreleri çevre dostu ve sürdürülebilir elektrokimyasal hücrelerdir [10].
- ✓ Mikrobiyal yakıt hücrelerinde daha az veya hiç kimyasal kullanımı olmaması, büyük miktarlarda atık suyu işleme ve sera gazı emisyonu olmaması açısından uygunluk göstermektedirler [10].
- ✓ Mikrobiyal yakıt hücreleri atık suların elektrik üretimi sağlarken aynı anda atık suların temizlenmesine de olanak tanımaktadır. Mikrobiyal yakıt hücreleri gerek atık yönetimi gerek yeşil enerji üretimi açısından yararlar sağlamaktadır [10].
- ✓ Mikrobiyal yakıt hücreleri, zararlı kirleticiler yaymadan temiz enerji üretirler. Bunun için elektrik enerjisini temiz bir şekilde üretmek için bakterileri kullanırlar [11].
- ✓ Mikrobiyal yakıt hücreleri atıksu arıtımında, organik maddelerin parçalanmasında ve elektrik enerjisi üretiminde eş zamanlı olarak kullanılabilir [11].
- ✓ Mikrobiyal yakıt hücreleri, depolanabilen ve diğer endüstriyel amaçlar için kullanılabilen yan ürünler olarak hidrojen, biyoyakıtlar ve biyokimyasallar üretir (hidrojen ve diğer kimyasalların kojenerasyonunu sağlar) [11].
- ✓ Mikrobiyal yakıt hücreleri substratta bulunan besin maddeleri arıtılmış suda geri kazanılır ve gıda bileşenlerini zenginleştirmek için çıkarılabilir [11].
- ✓ Mikrobiyal yakıt hücreleri kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmede oldukça verimlidir (%80'e kadar verimlilik sağlanabilmiştir) [11].
- ✓ Mikrobiyal yakıt hücreleri diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla nispeten ucuzdur, bu da onları yaygın kullanım için daha erişilebilir bir seçenek haline getirir [11].
- ✓ Mikrobiyal yakıt hücreleri, büyük ölçekli güç üretiminden küçük ölçekli şebeke dışı sistemlere kadar çeşitli ortamlarda ve uygulamalarda kullanılabilir [11].
- ✓ Mikrobiyal yakıt hücreleri, sera gazı salınımı yapmayan sürdürülebilir bir enerji kaynağıdır ve bu da onları daha sürdürülebilir bir enerji geleceğine geçişin önemli bir parçası haline getirir. Ayrıca, mikrobiyal yakıt hücreleri sınırsız yakıt tedarikine dayanır ve yabancı yakıtlara olan bağımlılığı azaltır [11].
- ✓ Mikrobiyal yakıt hücresinin elektrik enerjisi üretimi için alternatif bir kaynak olarak kullanımı, yenilenebilir yöntemler kullanan ve herhangi bir toksik yan ürün oluşturmayan güvenilir, temiz ve verimli bir süreç olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle son yıllarda mikrobiyal yakıt hücrelerinin kimyasal enerjinin elektriğe dönüştürülmesi ve geri kazanılması için etkili bir teknoloji olduğu gösterilmiştir [12].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinin ticarileşmesinin şu faydaları sağlayacağına inanılmaktadır [12]:

- Atık malzemelerden düşük maliyetli elektrik üretiminin sağlanması,
- Atık ve ksenobiyotiklerin kolayca bulunabilmesi sayesinde yıl boyunca elektrik enerjisi üretiminin sağlanabilmesi,
- İnsanların evlerinde elektrik üretebilmesine olanak tanınması,
- Mikrobiyal yakıt hücresi, atıkların ve ksenobiyotiklerin temizlenmesine yol açacağından, biyoremediasyon için alternatif bir yöntem olarak kullanılabilir,
- Enerji üretim tesisleri için gerekli büyük altyapının bulunmadığı Afrika gibi yoksul ülkelerde yaşayan insanlar için faydalı olacağı öngörülmektedir.



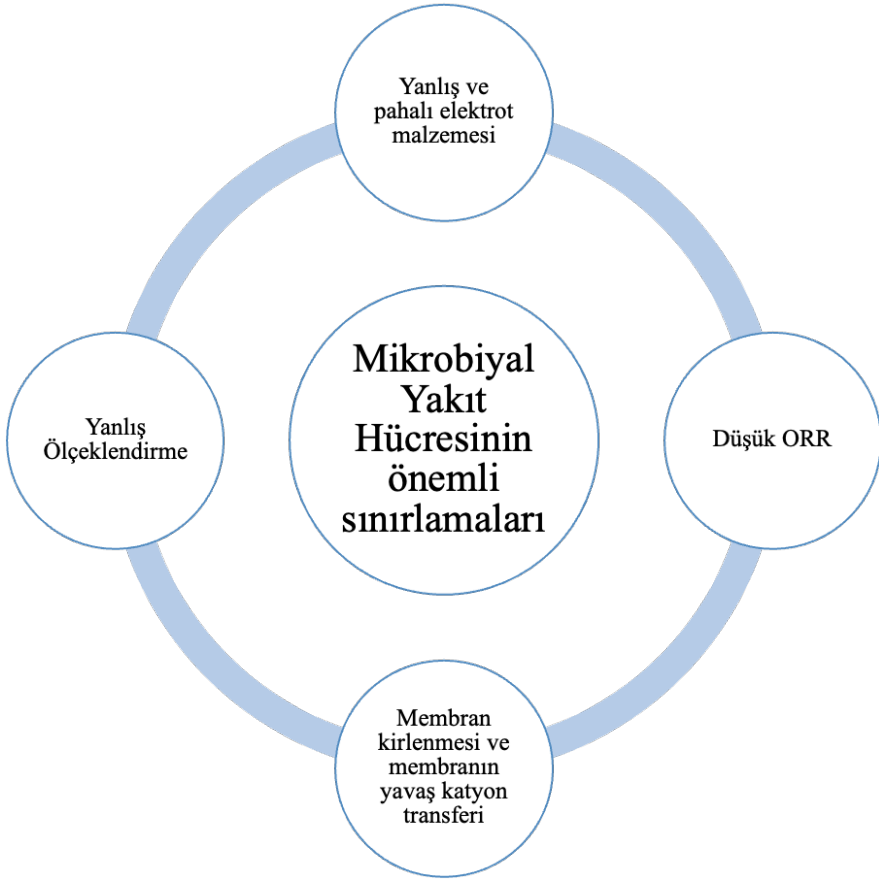
Şekil 1.3. Mikrobiyal yakıt hücresi faydalarının özeti [11].

1.4. Mikrobiyal Yakıt Hücresinin Sınırlamaları

Mikrobiyal yakıt hücresinin ticarileştirilmesindeki en büyük sınırlamanın ölçeklendirme olduğu iddia edilmektedir. Ölçeklendirme yapıldığında mikrobiyal yakıt hücresinde azalan güç çıkışına neden olduğu görülmüştür. Yapılan çalışmalar, ölçeklendirme sırasında mikrobiyal yakıt hücresindeki güç çıkışını etkileyen faktörün elektrotlar arasındaki mesafe olduğunu göstermiştir. Ölçeklendirme sırasında elektrotların boyutu arttıkça, elektrotlar arasındaki mesafe aynı ölçüde artmamıştır. Çünkü ölçeklendirme nedeniyle mikrobiyal yakıt hücresini daha hacimli hale getirmiştir. Artan hacim mikrobiyal yakıt hücresinin güç çıkışının azalmasına neden olmuştur. Ölçeklendirmeyi engelleyen bir diğer faktör de elektrotların maliyetidir. Elektrotların maliyeti yeterince düşük olmalıdır. Ancak, gerçek hayatta elektrotlar çok maliyetlidir. Çünkü bunlar endüstriyel olarak üretilmemektedir ve ayrıca imal edildikleri malzeme çok maliyetlidir [12].

Bir mikrobiyal yakıt hücresinde meydana gelen redoks tepkimeleri sırasında, katot gerçekleşen oksijen indirgeme reaksiyonu (ORR), kimyasal tepkimelerin hız sınırlayıcı unsurudur. Bu nedenle, katot elektrotta katalizörler gerekli olduğu ifade edilmektedir. Son yıllarda yapılan araştırmalar pahalı soy metal katalizörlere alternatifler bulmaya odaklanmıştır. Yüksek özgül yüzey alanına sahip aktif karbon, uygulanabilir bir alternatif olabilir. Aktif karbonla kaplanmış paslanmaz çelik katotlar kullanılarak bir yıldan fazla çalıştırılan mikrobiyal yakıt hücreleri, 1700 mW/m^2 değerini aşan bir güç yoğunluğuna ulaşmıştır. Performans zamanla kötüleşmesine rağmen, katotlar yıkanarak ve aktif karbon tabakasına 17 MPa basınçta tekrar basma kuvveti uygulanarak rejenerasyon (yeniden kazanım) sağlanabilir. Bu basit işlem katotların aktivitesini tamamen geri kazandırmıştır [13].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanılan membranlar, toplam sermaye maliyetinin %60'ını oluşturmaktadır. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanılan proton değişim membranlarında katyonların yavaş transferi, voltaj kayıplarına yol açan bir yük dengesizliği yaratabilir. Bu sorun, yüksek potasyum (K^+), kalsiyum (Ca^{2+}) ve magnezyum (Mg^{2+}) seviyelerine sahip olma eğiliminde olan atık sularda daha belirgindir. Membran ayrıca zamanla membranın bütünlüğünü bozmaktadır. Membranın kirlenmesi, hem biyofilm hem de tuz çökeltileri nedeniyle ortaya çıkabilmektedir. Membransız tasarımlar daha az karmaşıktır, daha az maliyetlidir ve çoğunlukla iyileştirme amaçlı olarak saha ölçekli ünitelerde başarıyla uygulanmıştır [13].



Şekil 1.4. Mikrobiyal yakıt hücresinin önemli sınırlamaları [12,13].

Herhangi bir biyoreaktörün ölçeklendirilmesi, tasarım aşamasında yapılması gereken önemli değişiklikler nedeniyle büyük ölçüde sınırlıdır. Laboratuvar tabanlı reaktörün ve pilot/saha ölçekli bir reaktörün parametreleri, matematiğin basit çarpma/iki katına çıkarma kuralını izleyerek el ele gitmemektedir. Pilot ölçekli mikrobiyal yakıt hücresi tasarımı, üretim malzemesi seçimi (korozyona dayanıklı olmalıdır), elektrot malzemesi (sık aşınma ve yıpranmayı önlemek için dayanıklı ve sürdürülebilir olmalıdır), iletken tellerin bağlanması, diğer olanaklarla bağlantı vb. şeklinde sınırlamalarla karşı karşıyadır. Çalışma koşulları iyi ayarlanmalıdır. Bunun için örneğin; reaktörün tasarımı sırasında dikkate alınmalıdır. Yakıt (substrat) giriş ve çıkış akışının kontrolü için değerler uygun konumda tasarlanmalıdır. Örnekleme veya temizleme portu gibi sistemler doğru hesaplamalarla tasarlanmalıdır. Mikrobiyal yakıt hücresi reaktörünün sarmal tasarımı, mikrobiyal yakıt hücresi odalarının altıgen düzenlemesi, borusal akış tasarımı, ünitelerin istifleme düzenlemesi gibi tasarımlar mikrobiyal yakıt hücresinde kullanılan elektrokimyasal reaktörlerin etkili bir şekilde tasarlanması için benzersiz tasarım varyasyonları olarak bildirilmiştir [14].

Mikrobiyal yakıt hücresinde performansın uzun ömürlü sürmeyişi büyük bir sınırlama olarak dikkat çekmektedir. Mikrobiyal yakıt hücresinin uzun vadeli çalışmasında performansın azalmasına neden olan önemli bir zorluk olarak güç veya güç yoğunluğundaki çıkışının azalması görülmektedir. Güç yoğunluğundaki düşüş, organik maddedeki (substrattaki) mikroorganizmaların popülasyonunun artan büyümesinden kaynaklanabilir ve substratın büyük kısmı, yükleri toplamak yerine metan gibi gazların üretimi için elektrojen olmayan reaksiyonlarda kullanılır. Atık suyu yakıt olarak kullanan mikrobiyal yakıt hücresinde, iklimsel değişiklikler nedeniyle atık suyun gücündeki değişim, mikrobiyal yakıt hücresinin güç üretimini sınırlayabilir. Ek olarak, çalışma sırasında oluşan organik madde biyokütle granülleri, atık su borularının tıkanmasına ve hidrolik bağlantılar için kullanılan boruların kararmasına neden olur. Dahası, mikrobiyal yakıt hücresi reaktöründe homojen karışımın reaktör derinliği boyunca ve çalışma süresi boyunca sürdürülmesi zordur ve bu da difüzyon direncinde bir artışa neden olmuştur. DeneySEL sonuçlarının tekrarlanabilir olması esas olarak reaktördeki mikrobiyal aktivitelere bağlı olduğu bildirilmiştir. Bu da benzer çalışma koşulları korunsa bile tekrarlanan deneylerde tahmin hatalarına ve sonuç çıktılarında değişikliklere neden olmuştur [14].

Tuz çökeltileri, humik asitler ve biyofilm nedeniyle katotların kirlenmesi meydana gelmektedir ve bu da zamanla mikrobiyal yakıt hücresi performansını düşürebilir. Bu sorun, özellikle aralarında minimum mesafe olacak şekilde istiflenmiş birkaç modül varsa ortaya çıkmaktadır. Bu sorunun giderilmesi zor bir işlem olarak görülmektedir. Katot elektrotun kirlenmesi, biyofilm üzerindeki katalizör tabakasının aktif bölgelerinin tıkanmasına ve aktif yüzey alanının %12'ye kadar azalmasına neden olabilmektedir. Yapılan bir çalışmada, bir ay boyunca çalıştırılan büyük ölçekli mikrobiyal yakıt hücrelerinde katot performansının %63 oranında düştüğü görüldükten sonra katot üzerinde biriken biyofilm kazıma işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem neticesinde katot potansiyelinin %89'u geri kazanılmıştır. Ancak, biyofilmi kazıma işleminin zahmetli bir işlem olduğu vurgulanmıştır. Biyofilmi katottan fiziksel olarak çıkarmak için mıknaTisların kullanıldığı çalışmalar da yürütülmüştür. Fakat bunun büyük ölçekli sistemlerdeki uygulanabilirliğinin değerlendirilmesi gerekmektedir. Bir başka işlem ise kirlenen katotların kirlenmeyi sınırlamak için yenisi ile değiştirilmesidir. Yapılan bir başka çalışmada, kumaş ayırıcıları katotlara bağlamak için poliviniliden florür (PVDF) kullanılarak PVDF olmayan katotlardan %220 daha yüksek güç yoğunluğu üretilmiştir [13].

Özellikle, çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücrelerinde katolit çözeltisinde kullanılan tuz içerikli yapılar nedeniyle tuz çökeltileri oluşmaktadır. Bu çökeltiler genellikle katolit buharlaştığında katot yüzeyinde tuz çökeltileri bırakarak oluşur. Bu sorunu çözmek için darbe beslemeli rejimler olarak adlandırılan sistemler kullanılabilir. Bu sistemler, yalnızca sistemi yeni alt tabaka ile yenile-

mekle ve güç çıkışını korumakla kalmaz, aynı zamanda katotları nemli tutarak çökelti tabakalarının gelişmesini de önleyebilir. Tuz kirlenmesinin derecesi ayrıca atık suyun bileşimine de bağlıdır. Tuz konsantrasyonları düşükse güç yoğunluğundaki azalma yüksek bir seviyede olmaz. Hava katotlarının ayrıca, katodu kurutmadan yeterli hava transferine izin veren bir bölme içine de yerleştirilebilmesi de mümkündür. Bu değişiklik, katotta oluşan alkali çözeltinin buharlaşarak geride tuz çökeltileri bırakmamasını mümkün kılar. Katot çözeltisi toplanabilir ve sıvı katottan aşağı doğru akarken, beraberinde tuz birikintilerini de taşır. Atık akışı, sertlik iyonlarının seviyelerini azaltmak için ön işleminden geçirilirse tuz çökmesini kontrol etmek de mümkün hale gelir. Bu, mikrobiyal yakıt hücresinin diğer arıtma üniteleriyle entegre edilmesi durumunda mümkündür [13].

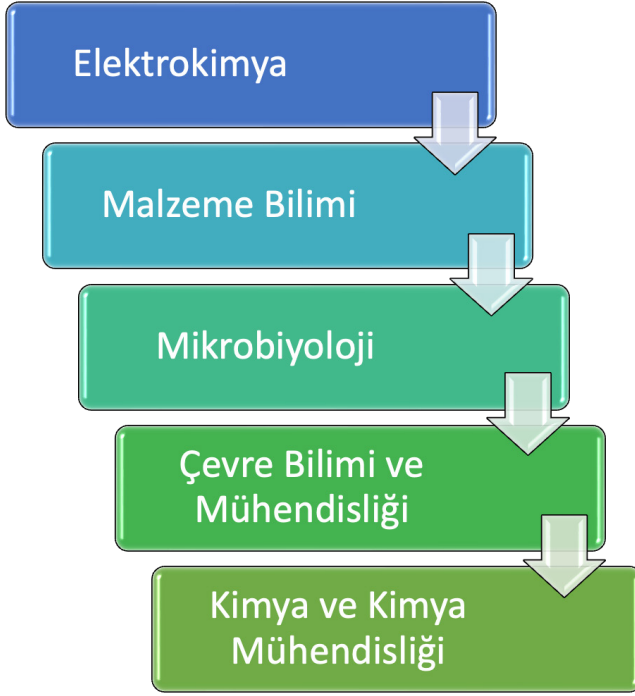
Muazzam potansiyellerine rağmen, düşük güç çıkışı, biyolojik kirlenme ve yüksek işletme maliyetleri gibi zorluklar büyük ölçekli ticarileştirmeyi engellemektedir. Kısaca özetlemek gerekirse, mikrobiyal yakıt hücreleri, organik atıkları elektriğe dönüştürerek umut verici bir çözüm sunsa da, geniş ölçekli uygulamalar için kullanımı şu sebeplerden dolayı engellenmektedir [15]:

- ❖ Düşük güç çıkışı,
- ❖ Yüksek maliyetler,
- ❖ Verimsiz hücre dışı elektron transferi,
- ❖ Elektrot malzemeleri,
- ❖ Yük taşımamı ve katalitik davranıştaki sınırlamalar.

Mikrobiyal yakıt hücrelerinin verimliliğini ve güvenilirliğini artırmak amacıyla nanomalzemelerin, elektroaktif mikroorganizmaların ve gelişmiş membran tasarımlarının entegrasyonu da dahil olmak üzere yenilikçi stratejiler önerilmiştir [15].

1.5. Mikrobiyal Yakıt Hücresinin İlişkili Olduğu Bilimsel ve Mühendislik Disiplinler

Mikrobiyal yakıt hücresinin optimizasyonu ve performans analizi için ilişkili olduğu ana bilimsel ve mühendislik disiplinler Şekil 1.5'te verilmiştir.



Şekil 1.5. Mikrobiyal yakıt hücresinin ilişkili olduğu temel bilimsel ve mühendislik disiplinler [15].

1.6. Mikrobiyal Yakıt Hücresinin Yararları

Mikrobiyal yakıt hücrelerinin önemli yararlı özellikleri mevcuttur. Mikrobiyal yakıt hücrelerinin mikrobiyal aktivite yoluyla atık su gibi organik maddelerde hapsolmuş enerjiyi kullanarak su arıtma endişelerini gidermek ve biyoenerji hasadı yapmak için umut verici bir çözüm olarak ortaya çıktığı göz ardı edilemez bir faydadır. Mikrobiyal yakıt hücresi enerji üretimi ve çevre koruma için yeşil teknolojinin yararlı özellikler sunmasını olanak tanımaktadır. Mikrobiyal yakıt hücresinin sürdürülebilir ve çevre dostu olduğu kanıtlanmış bir gerçektir. Ayrıca mikrobiyal yakıt hücresi kullanılarak elektrik enerjisi üretiminin bir sonucu olarak bu teknoloji ile uyumlu çok çeşitli malzemelerin sentezlenmesine yol açmıştır. Bu sayede malzeme teknolojilerinde gelişmelere de imkan sağlanmıştır [16].

Yapılan bir araştırmanın sonuçları, mikrobiyal yakıt hücresi kullanımıyla patates atıklarındaki biyolojik olarak parçalanabilir organik maddelerin etkili bir şekilde giderilebileceği ve organik madde gideriminin elektrik üretimiyle birlikte gerçekleştiğini doğrulanmıştır. Dolayısıyla mikrobiyal yakıt hücresi teknolojisi, sürdürülebilir enerji üretimi ve atıkların arıtımı için umut vadeden bir teknoloji olduğu bir kez ortaya konulmuştur [17].

Mikrobiyal yakıt hücresinin daha fazla enerji potansiyeli ve daha az sınırlama ile geleneksel havalandırma işlemine benzer şekilde atık su arıtımı için uygulanabilir bir işleme metodolojisi olabileceği ifade edilmektedir. Ayrıca, önerilen mikrobiyal yakıt hücresi sisteminin tasarımı ve işletimi, parametreleri optimize ederek verimliliği arttırabilir. Atık su arıtımında kullanılan mikrobiyal yakıt hücreleri suyu tamamen arıtmadığından bu teknolojinin daha ticari hale getirilmesi için değişikliklere ihtiyaç olduğu bildirilmiştir [17].

Mikrobiyal yakıt hücresi, herhangi bir toksik yan ürün içermeyen her türlü organik atığı kullanarak en iyi enerji çıktısını elde etmenin en güvenli yöntemi olarak bildirilmiştir. Çeşitli enerji üretim teknikleri, biyokütlenin enerjiye dönüşümünü daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirirken, mikrobiyal yakıt hücreleri bu dönüşümü daha düşük sıcaklık aralıklarında, yani 20°C'nin altında dahi gerçekleştirir. Diğer teknolojilerin ortaya çıkardığı bir diğer ikilem ise substrat konsantrasyonudur. Lakin mikrobiyal yakıt hücresi teknolojisinde düşük substrat konsantrasyonu kullanılabilir [18].

Mikrobiyal yakıt hücresi kullanımının bir diğere yararlı yanı ise hammadde bolluğuna sahip olmasıdır. Mikrobiyal yakıt hücresinin elektrik enerjisi üretimi için gerekli olan organik madde, atıklardan sağlanmaktadır. Yapılan araştırmalar, atığın enerjiye dönüştürülmesinin yalnızca atık yönetimi için sürdürülebilir bir çözüm sağlamakla kalmayıp aynı zamanda çoğunlukla gelişmekte olan ülkelerde alternatif, ekonomik olarak uygulanabilir ve çevresel olarak uygun bir kaynak sağladığını bildirmişlerdir. Bu doğrultuda, mikrobiyal yakıt hücreleri atıkları enerjiye dönüştürme yeteneğine sahip oldukları için sürdürülebilir ve çevre dostu teknolojiler olarak kayıtlara geçmiştir [18].

Biyolojik atık arıtma yöntemleri, biyolojik atıktan ısı, yakıt veya gaz elde etmek için termal olmayan işleme teknolojilerini içerir. Lakin termal atık arıtma teknolojisi uygulanabilir olduğunda ve tartışmaya açıldığında, sağlık sorunları, ekonomik dengesizlik, operasyonel komplikasyonlar, sera gazı üretimi ve sanitasyonla ilgili daha geniş eleştiriler de dikkate alınmalıdır. Mikrobiyal yakıt hücresi, tüm bu sorunların üstesinden gelebilen termal olmayan atık arıtma teknolojisidir [18].

Mikrobiyal yakıt hücresi, atıktan enerji elde etmek için mikroorganizmaları elektrokimyasal reaksiyon için katalizör olarak kullanan biyolojik veya biyoelektrokimyasal bir yakıt hücresidir. Mikrobiyal yakıt hücreleri, mikroorganizmaları içeren biyolojik atıklar üzerinde doğal olarak meydana gelen mikrobiyal reaksiyonları taklit ederek biyoenerji üretmek için en güvenli ve basit şekilde çalıştırılır [18].

Mikrobiyal yakıt hücresinin yararları Şekil 1.6'da vurgulanmıştır.



Şekil 1.6. Mikrobiyal yakıt hücresinin dikkat çekici yararları [16,17,18].

1.7. Mikrobiyal Yakıt Hücresinin Zayıflıkları

Mikrobiyal yakıt hücrelerinin zayıf taraflarını ele alan çalışmalarda ciddi zayıflıklardan söz edilmiştir. Bu zayıflıklar temel olarak şunlardır [19]:

- Açık hava katotlarının sınırlı etkinliği,
- Elektrot malzemelerinin yüksek maliyeti,
- Proton değişim membranının yüksek maliyeti.

Mikrobiyal yakıt hücresinin katot yapısı nedeniyle verimliliği önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu nedenle, mikrobiyal yakıt hücresi için bir hava katodu seçmek ve kullanmak kolay bir iş değildir. Katot seçimi, güç üretimi, malzeme fiyatı, üretim karmaşıklığı ve modifikasyon yöntemi dikkate alınarak çok dikkatli yapılmalıdır. Mikrobiyal yakıt hücresi için özel katot mimarileri ve malzemeleri

erişilebilir değildir. Genel olarak, piyasada mikrobiyal yakıt hücresi ürünlerinin bulunmaması, mikrobiyal yakıt hücresi teknolojisinin gerçek dünyada yaygın olarak uygulanmasında (teknolojik veya ekonomik veya her ikisi) hala önemli boşluklar olduğunu göstermektedir [20].

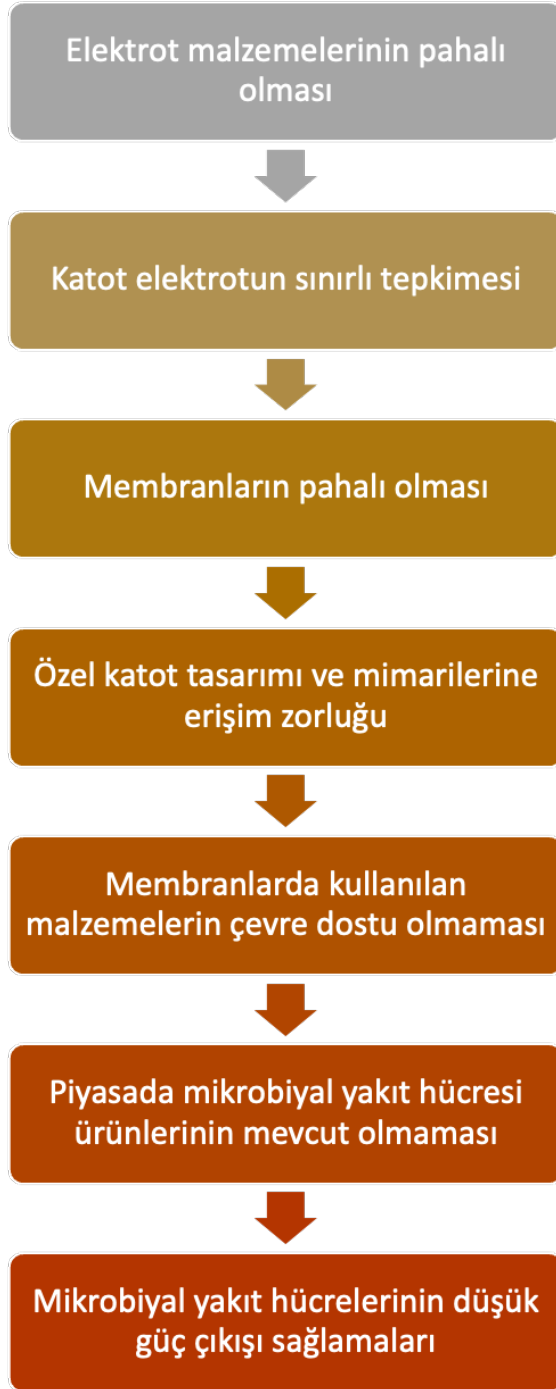
Mikrobiyal yakıt hücresi teknolojisinin temel dezavantajlarından biri, katot-taki yavaş ORR nedeniyle çok az elektrik üretmesidir. Genellikle, soy metal platin (Pt) bazlı katalizörler, bu aşırı potansiyel kayıplarını en aza indirirken mikrobiyal yakıt hücresinin güç performansını iyileştirmek için kullanılır. Ancak bu malzemelerin aşırı maliyetli olduğu görülmüştür [20].

Çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücrelerinde geleneksel olarak kullanılan Nafion malzemeden imal edilen proton değişim membranı yüksek maliyet, yüksek çevresel etki ve biyolojik kirlenme gibi performansla ilgili sorunlar gibi dezavantajlara sahiptir. Bu durum, özellikle son yıllarda uygun alternatif membranlar geliştirmeye yönelik araştırma ilgisinde muazzam bir artışa yol açmıştır [21].

Nafion membranların çevresel etkisi endişe konusu olmuştur. Nafion, çevrede bozulmaya karşı dirençleriyle bilinen perfloroalkil ve polifloroalkil maddeler (PFAS) kategorisinde sınıflandırılır. Kalıcılıkları çok güçlü karbon-flor kovalent bağı nedeniyle. Bu da toprakta ve suda birikmelere sebep olur. Hatta Nafion yutulduğunda insan vücudunda birikmelerine neden olur. Genel olarak, geri dönüştürülmeyen Nafion ya çöplüklere atılır ya da yakılır. Çöplüklere atılırsa, çevredeki ortama sızabilir. Bu nedenle, toprağı ve yeraltı suyunu yüksek kirlenme riski altına sokabilir. Yakılırsa, çeşitli tipte toksik ve kirletici perflorlu bileşikler açığa çıkar. Bu nedenle, birçok hükümet bunların kullanımını giderek daha fazla kısıtlıyor ve Avrupa Komisyonu çoğu PFAS içerikli maddeleri aşamalı olarak kaldırmayı planlamaktadır. Nafion'un muaf olup olmayacağı halen belirsizdir. Nafion'un bir diğer olumsuz etkisi de aktivasyonu için ihtiyaç duyulan potansiyel olarak aşındırıcı kimyasallardan kaynaklanmaktadır. Bu kimyasallara örnek olarak; hidrojen peroksit ve sülfürik asit verilebilir [21].

Proton değişim membranı içeren mikrobiyal yakıt hücrelerinde, dikkate alınması gereken önemli bir gerçek, membran seçiminin, nihai uygulamaya göre optimize edilmesi gerektiğidir. Örneğin; birincil amaç atık su arıtımıysa, maksimize edilmesi gereken ilgili ölçüt kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) giderim verimliliğidir. Amaç maksimum güç üretimi ise güç yoğunluğu kistas olmalıdır. Bir mikrobiyal yakıt hücresi her ikisini de aynı anda yapabilse de, biri genellikle diğerinden daha etkili olur. Bir diğer denge ise kolombik verim (CE) ve KOİ giderimi arasındadır. Membranın yüksek oksijen difüzyonu varsa, katot odasından anoda doğru oksijen geçişi, aerobik mikroorganizmaların doğrudan solunumuyla organik bileşiklerin daha fazla tüketilmesi nedeniyle KOİ giderimini artırır. Ancak bu, CE'yi düşürür. Benzer şekilde, CE ve maksimum güç çıkışı arasında sıklıkla bir denge görülür. Bunun nedeni, yüksek CE'nin yalnızca verimli bir PEM kullanılarak elde edilebilmesidir. Ancak bu, genel Ohmik dirence eklenerek güç çıktısını düşürebilmektedir [21].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinin zayıf yanlarının özeti Şekil 1.6'da sunulmuştur.



Şekil 1.7. Mikrobiyal yakıt hücrelerinin zayıf yanlarının özeti [19, 20, 21].

1.8. Mikrobiyal Yakıt Hücresinin Tarihsel Gelişimi

Tarihsel olarak ilk elektrokimyacı ve biyoelektrik öncüsü olarak kabul edilen Bologna Üniversitesi profesörü olan hekim Luigi Galvani tarafından deneyler başlatılmıştır. 1780 yılında başlayan deneylerde, ölü kurbağa bacaklarının kaslarının bir elektrik kıvılcımıyla vurulduğunda hareket ettiğini (veya seğirdiğini) keşfedilmiştir. Bu deneyde, deneysel numunelerin ölü kurbağa bacağı kaslarını harekete geçiren kuvvet oluşturduğu anlaşılmış ve sinirler tarafından kaslara taşınan bir elektrik sıvısı tarafından üretildiği tanımlanmıştır. Buradan yola çıkarak, Luigi Galvani tarafından “hayvan elektriği” terimini ortaya atılmıştır [22].

Daha sonra, Luigi Galvani ile aynı çağda çalışmalar yapan Pavia Üniversitesi’nde deneysel fizik alanında bir profesör olan Alessandro Volta, Galvani’nin deneylerini kontrol etmiştir. Bu kontroller sonucu, ölü kurbağa bacağındaki kasılmaların, Luigi Galvani tarafından yapılan deneylerde sinirleri ve kasları bağlamak için kullandığı metal kablo nedeniyle meydana geldiği inancı ortaya çıkmıştır [22]. Bu gelişme, elektrik organlarının bir yansıması olarak ele alınmıştır. Volta’nın elektrik pilini icat etmesi için hayati bir rol oynamıştır. Nihayetinde, Alessandro Volta, 1799 yılında elektrik pilini icat etmiştir. Bu pilin icadı, şüphe olmaksızın bir dönüm noktası olmuştur. Volta, icat ettiği pile aynı zamanda “organe électrique artificiel” (yapay elektrik organı) adını vermiştir. Bunun sebebi olarak, yalnızca şekil olarak benzerlik değil, aynı zamanda kendi düşüncesine göre pilin “iletken maddelerle temas” yoluyla elektrik üretebilme yeteneğine sahip olarak doğal organa benzemesi gösterilmiştir. Alessandro Volta, hayvan organizmalarındaki elektriksel etkinin fizyolojik yönlerine gerçekten ilgi duyan bir bilim insanıydı. Bu nedenle, ele ettiği sonuçlar yalnızca pilin icadına yol açması nedeniyle değil, aynı zamanda içsel biyolojik önemleri nedeniyle de çok ciddi bir iştir [23].

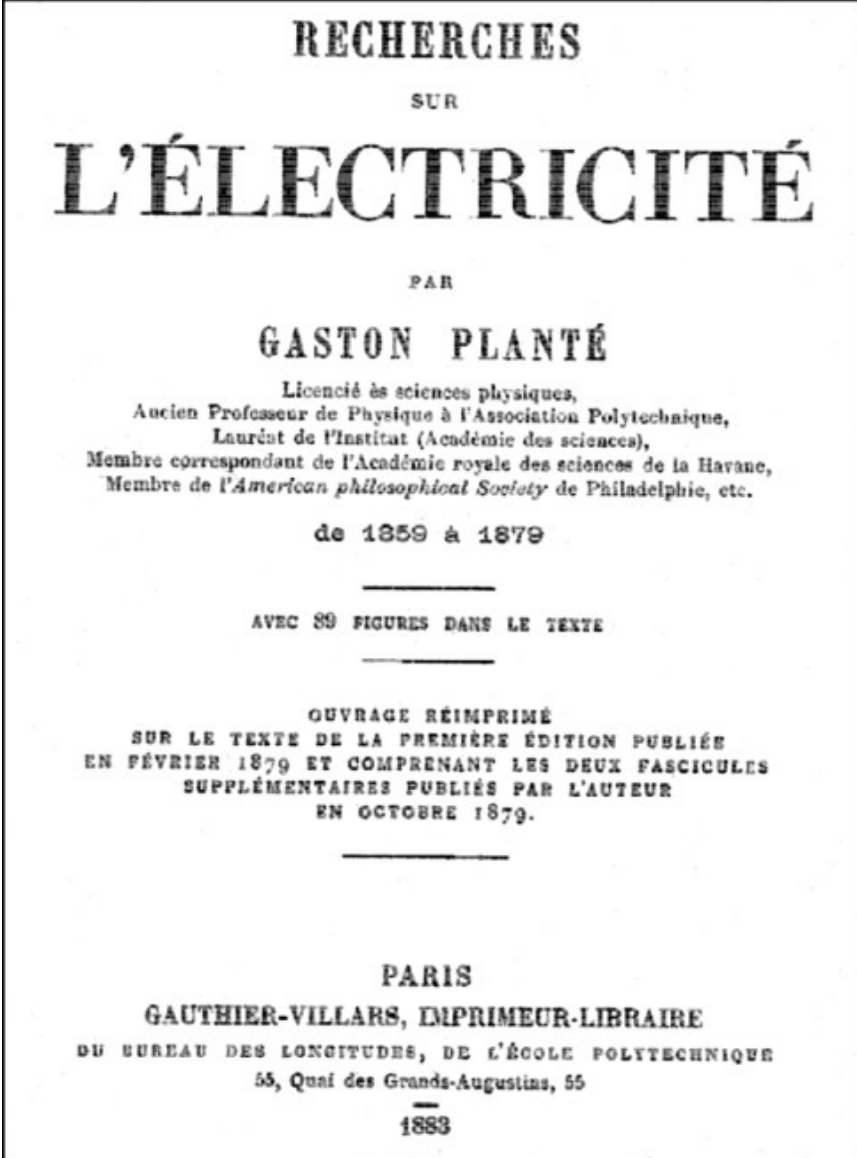
1839 yılında, kimyager ve patent avukatı Sir William Grove, elektroliz deneyimini kullanarak elektrik üretmek için kullanılabilecek ters bir işlem hayal etmiştir. Grove, ilk yakıt hücresinin çalışma prensibini 1893 yılının Şubat ayında makale olarak yayınlamıştır. Bu makale yayınında, iki platinli platin elektrotla temas halindeki hidrojen ve oksijenden oluşan tek bir hücrenin mekanizmasından söz edilmiştir. Söz konusu makalede, tek bir hücreden oluşan mekanizmanın birkaçının seri olarak birleştirilerek gazlı bir voltaik pil oluşturma olasılığına değinmiş ve bunu ilk kez 1842 yılında tanımlamıştır. Bu açıklamayı başka makaleler de izlemiştir. Çalışmalarında bahsettiği hücre (pil), her biri çeyrek inç genişliğinde anodik ve katodik platin kaplı platin folyolara sahip elli tek hücreden oluşuyordu. Grove tarafından yapılan en önemli gözlem, hücrelerindeki gaz, elektrolit ve elektrot fazları arasında “dikkat çekici bir etki yüzeyi”nin gerekliliğiyle ilgili meşhur ifadesi olmuştur. Kullandığı dil, yaklaşık 1955 yılından beri modern yakıt hücresi çağında, biraz farklı bir biçimde tekrarlanan birçok noktayı dile getirmiştir. Grove’un 1842 tarihli makalesindeki sözleri tekrar alıntılanmaya değerdir [24]:

“Kimyasal veya katalitik etkinin... yalnızca sıradan platin folyo ile, sıvı, gaz ve platinin birleştiği çizgide veya filigranda gerçekleştiği varsayılabilirliğinden, asıl zorluk, belirgin bir etki yüzeyi elde etmektir. Platini platinle denemeye karar verdim... Platinin sıvıya temas etmesine izin verildiğinde, sıvının kılcal etkiyle yüzeyinde yayılacağı ve gazlı atmosfere geniş bir yüzey alanı açacağı açıktır.”

Bu çalışmalarından ötürü Sir William Grove “Yakıt Hücresi Biliminin Babası” olarak anılmıştır. Bunun sebebi olarak da Sir William Grove’un ilk olarak 1839’da tanımladığı gazlı voltaik hücreyi icat etmesi gösterilmektedir. Grove, 19. yüzyılın en önemli amatör bilim insanıydı. Fakat yine de bir dizi önemli keşifte bulunmuştur. Kitabının sonraki baskılarında, etilen ve karbon monoksitin yanı sıra hidrojen de dahil olmak üzere birçok farklı reaktanla çalışan yakıt hücrelerini anlatmaktadır. Ayrıca, enerjinin korunumu yasasını doğrulayan ve Helmholtz’dan bir yıl önce gelen ilk kişi olarak da hatırlanmalıdır. Bilimsel keşifleri, kamuoyunda bir hukukçu olarak tanınması nedeniyle daha da dikkat çekicidir [24].

1859 yılında, Fransız fizikçi Gaston Planté tarafından “büyük güçte ikincil pil” olarak adlandırılan kurşun-asit pil icat edilmiştir. Bu pil; saf kurşundan yapılmış, keten bir bezle ayrılmış iki tabakadan oluşan spiral bir rulo, sülfürik asit çözeltisi dolu bir cam kavanoza daldırılarak oluşturulmuştur. 1860 yılının Mart ayında Planté, bir yıl önce prensibini açıkladığı çığır açıcı kurşun-asit aküsünü Académie des Sciences’a sunmuştur. Terminalleri paralel bağlı dokuz elemandan oluşan ahşap bir raf, dikkate değer ölçüde yüksek akımlar sağlamıştır. Planté, 1875 yılına kadar kısa devre, damlama şarjı ve yüzdürme şarjı gibi çeşitli çalışma koşulları altında birçok kurşun-asit hücre tasarımı denemiştir. Oksitleyici bir ortamda “polarizasyon”un ilk ciddi analizini yapmıştır. Planté araştırmalarının sonuçlarını Comptes Rendus de l’Académie des Sciences’de ve çeşitli süreli yayınlarda yayınladı. Daha sonra 1879 yılında yayınlanan Recherches sur l’Électricité adlı kitabında ve 1883 yılındaki ikinci baskısında geniş deneyimlerini anlattı. Söz konusu kitabın İngilizce çevirisi birkaç yıl sonra “The Storage of Electrical Energy and Researches in the Effects Created by Currents Combining Quantity with High Tension (Elektrik Enerjisinin Depolanması ve Miktarı Yüksek Gerilimle Birleştiren Akımların Yarattığı Etkilerdeki Araştırmalar)” başlığı altında yayınlanmıştır. Bu kitap Britanya İmparatorluğu’nda hızla popüler hale gelmiştir. Bu çalışma bugün hala ilgi çeken açık dil ve zarif gösterimin bir örneğidir. Gaston Planté tarafından kitapta, Brezilya Hükümdarı Don Pedro II d’Alcantara’ya “derin şükranlarımın zayıf tanığı, çalışmamı teşvik eden ilk kişi sizsiniz” ifadeleriyle teşekkür edilmiştir. Teknoloji meraklısı Brezilya Hükümdarı, 1877 yılında Gaston Planté’yi laboratuvarında iki kez ziyaret etmiştir. Brezilya Hükümdarı’nın, hayran konukların önünde bir akşam yemeğinde reostatik makinesini tanıtması için yaptığı davet, Gaston Planté’nin Brezilya Gül Nişanı ile ödüllendirilmesine ve maddi destek almasına olanak tanımıştır. Gaston Planté’nin çalışmalarından elektriğin doğasıy-

la ilgili sonuçlar çıkarmıştır. Bu, şöyle ifade edilmiştir; “az önce sıraladığımız benzetmeler, elektriği, ölçülebilir maddenin salt mekanik bir hareketi olarak ele almamızı sağlıyor. Bu hareket, elektrik kıvılcımı, voltaik ark veya genel olarak elektriksel deşarj açısından, çok az miktarda maddenin son derece hızlı akışından veya taşınmasından oluşur.” [25]. Planté'nin ikincil piller ve yüksek voltajlı güç kaynaklarıyla ilgili olaylar hakkındaki kitabını başlık sayfası Şekil 1.8'de verilmiştir.



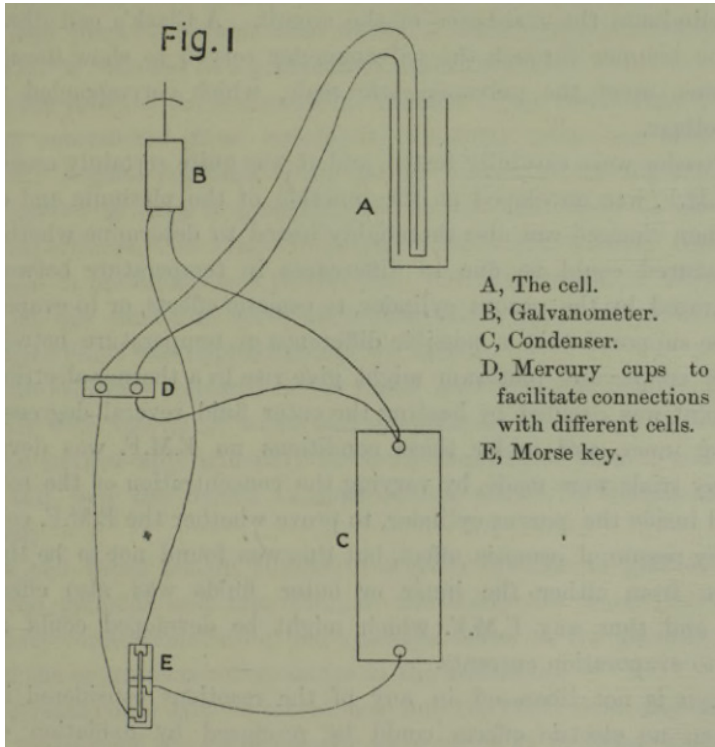
Şekil 1.8. Gaston Planté'nin ikincil piller ve yüksek voltajlı güç kaynaklarıyla ilgili olaylar hakkındaki kitabı olan *Recherches sur l'Électricité*'nin başlık sayfası [25].

1896 yılında, *Electrochemistry: History and Theory* (Elektrokimya: Tarih ve Teori) adlı kitabın yazarı olan Friedrich Wilhelm Ostwald, Grove tarafından icat edilen gaz pilini “pratik açıdan hiçbir önemi olmayan ancak teorik açıdan oldukça önemli” olarak tanımlamıştır [26]. Friedrich Wilhelm Ostwald, fiziksel kimya (fizikokimya) alanının kurucularından birisi olup yakıt hücrelerinin nasıl çalıştığına dair teorik anlayışın çoğunu sağlamıştır. 1893 yılında Ostwald, yakıt hücresinin çeşitli bileşenlerinin birbirine bağlı rollerini deneysel olarak belirlemiştir. Bunlar; elektrotlar, elektrolit, oksitleyici ve indirgeyici maddeler, anyonlar ve katyonlar olarak tanıtılmıştır. Grove, gaz pilindeki eylemin elektrot, gaz ve elektrolit arasındaki temas noktasında meydana geldiğini tahmin etmişti. Fakat daha fazla açıklama yapamamıştı. Fiziksel özellikler ve kimyasal reaksiyonlar arasındaki ilişkideki öncü çalışmalarından yararlanan Ostwald, Grove tarafından icat edilen gaz pilinin bulmacasını çözmüştür. Yakıt hücrelerinin temelinde yatan kimyayı araştırmıştır. Bu araştırmalar, sonraki yakıt hücresi araştırmacıları için alt yapı oluşturmuştur [27]. 1887 yılında, Ostwald tarafından metaller arasında önemli bir potansiyel fark olmadığı ifade edildi. Dahası, Ostwald bir hücrenin potansiyel farkının kaynağının elektrolit ve metal arasındaki elektriksel çift katmandaki iyonik süreçlerde bulunduğu sonucunu çıkardı. Başarılı iyonik fizikokimya okulunun temel taşlarından ikisi olan Ostwald ve Nernst’in çalışmalarıyla çoğu kimyager, kimyasal teorinin doğrulandığını ve voltaik problemin çözüldüğünü düşünüyordu. Ostwald, “Kimyasal teori geri döndü” diye iddiada bulunmuştur. Bu iddianın sonucu “kesin zafer” olarak neticelenmiştir. Konuya değinen birkaç tarihsel çalışmaya rağmen, Wilhelm Ostwald tarafından hazırlanan etkileyici ama yine de güncelliğini yitirmiştir. 1896 tarihli *History of Electrochemistry: Failure or Neglected Paragon* (Elektrokimya Tarihi: Başarısızlık mı Yoksa İhmal Edilmiş Bir Örnek mi?) adlı eseri elektrokimya ile ilgili tartışmanın en iyi ve en ayrıntılı anlatımlarından birisi olduğu görülmektedir [28]. Yakıt hücresinin temelleri ile ilgili çalışmalarından dolayı 1909 yılında, Friedrich Wilhelm Ostwald Nobel Kimya Ödülü’nü almıştır [29].

1880’lerin sonlarında, iki İngiliz kimyager olan Ludwig Mond ve asistanı Carl Langer tarafından katalitik elektrotların ve akış kanallarının geometrisini geliştirerek daha uzun hizmet ömrüne sahip bir yakıt hücresi geliştirmişlerdir. Bu iki araştırmacı, Grove tarafından yapılan yakıt hücresindeki bilinen bilimsel konseptini geliştirilmiş mühendislikle kullandılar. Ludwig Mond ve Carl Langer tarafından yapılan yakıt hücreleri, 6 A/m^2 akım yoğunluğu ve 730 mV gerilim (voltaj) üretmiştir. Bu yakıt hücresi, yakıt olarak kömürden türetilen gazı ve oksitleyici olarak havayı (aslında havadaki oksijeni) kullanarak çalışmıştır. Bahse konu yakıt hücresi, seyreltilmiş sülfürik asitle doldurulmuş ve gözenekli, iletken olmayan bir zarla ayrılmış ve ince delikli platin elektrotlar içeriyordu. Buradan yola çıkarak ilk tasarlanmış yakıt hücresi 1889 yılında tanıtılmış ve patentlenmiştir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan “yakıt hücre-

bırakıldığı oldukça ilgi çekici bir kavramdır. Bu ön bilgilendirmede, organik bileşikler maya ve diğer organizmaların fermentasyon aktivitesi yoluyla parçalandığında herhangi bir EMF (elektromotor kuvvet) oluşup oluşmadığını belirlemek için yapılan bazı deneyler açıklanmaktadır. *Saccharomyces cerevisiae* kültürleri ve bazı bakteri türleri besin ortamında büyütüldü ve yaşamsal süreçlerinin kimyasal etkisi, sıradan galvanik hücre aracılığıyla EMF (elektromotor kuvvet) üretimine paralel bir şekilde elektrik enerjisi üretmek için kullanıldı.” [34].

M. C. Potter tarafından yapılan çalışmaya ait deney düzeneği Şekil 1.10’da verilmiştir.



Şekil 1.10. M. C. Potter tarafından yapılan çalışmaya ait deney düzeneği [34].

Şekil 1.10’daki deney düzeneği kurulup deneyler yapıldıktan sonra M. C. Potter tarafından şu bilgiler aktarılmıştır [34]:

“Şimdi, belirli bakteri türleriyle yapılan bazı deneylere kısaca değinebilirim. *Bacillus coli communis*, *B. Jluorescens*, *B. violaceus* ve *Sarcina lutea*’nın saf kültürleri Dr. Kraiden temin edildi ve daha önce açıklandığı gibi sterilizasyon uygulanarak, bu mikroorganizmaların her birinden kaynama tüplerindeki besin çözeltileri üzerinde aşılama yapıldı. Kullanılan çözelti, bilinen Pasteur çözeltisinin bir modifikasyonuydu, yani şöyle idi:

Potasyum fosfat = 2

Kalsiyum fosfat = 0,2

Magnezyum sülfat = 0,2

Amonyum tartarat = 10

Asparajin = 0,5

Su = 1000" [34].

M. C. Potter tarafından yapılan çalışmanın sonuçları, alkollü fermantasyonda açığa çıkan tek gazın karbondioksit (CO_2) olduğu, platin elektrotların oksidasyona uğramadığı varsayılmıştır. Balistik bir galvanometre ile ölçülen yükün, fermantasyon yapan ve yapmayan sıvılar arasında 0,3 ila 0,5 voltluk bir EMF'ye karşılık geldiği bulunmuştur. Hidroliz sırasında, enzimler veya zayıf asitler tarafından bir potansiyel farkı oluşacağı bildirilmiştir. Elektriksel etkilerin, mikroorganizmaların aktivitesinin bir göstergesi olduğu ve sıcaklıktan, besin ortamının konsantrasyonundan ve mevcut aktif organizma sayısından etkilendiği ifade edilmiştir. Bu etkiler yalnızca mikroorganizmalar için uygun sıcaklık sınırları içinde ve protoplazmik aktiviteye uygun koşullar altında görüleceği belirtilmiştir [34].

1931 yılında Amerikalı bakteriyolog, İngiltere'deki Cambridge Üniversitesi akademisyeni Barnett Cohen, 10 mL hacmine sahip bakteri bazlı birden fazla mikrobiyal yakıt hücresini elektriksel olarak seri bağladı ilk mikrobiyal yakıt hücresi yığınının ortaya çıkarmıştır. Bu mikrobiyal yakıt hücresi toplam 0,2 mA ve 35 V elektrik enerjisi üretmiştir [6, 35, 36].

1960'lı yıllarda, Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) uzun uzay uçuşlarında organik atıkları elektriğe dönüştürmeye ilgi göstermeye başladı. Bu nedenle, yakıt hücresi fikri popüler hale gelmiştir. 1962 yılında, Rohrback grubu, *Clostridium butyricum* bakterisinin glikoz fermantasyonu ile hidrojen üretmek için biyomalzeme olarak kullanıldığı ilk biyolojik yakıt hücresini tasarlamıştır. Tasarlanan bu biyolojik yakıt hücrelerinin bir elektriksel güç kaynağı olarak kullanımı oldukça hızlı bir şekilde yaygınlaştı ve ticari olarak mevcut hale gelmiştir. Ne yazık ki, bu biyolojik yakıt hücresi başarısız olmuş ve sonunda piyasadan silinmiştir. 1966 yılında Keith R. Williams ve Ralf Koslow tarafından yapılan çalışmada, pirinç kabuğunun fermantasyondan faydalanarak yapılan birden fazla biyolojik yakıt hücreleri kullanılarak 6 Volt 40 mA elektrik enerjisi üretilmiştir. Bu biyolojik yakıt hücresi, birçok yararlı enzim ve biyoyakıt üretebildiği için potansiyel enerji üretici olarak tanıtılmıştır. Yakıt hücresi devrimi 1990 yılında, M. J. Allen ve H. Peter Bennetto tarafından Birleşik Krallık'taki Kings College'de yapılan çalışmalarla başlamıştır. Bu çalışmalarda, yakıt hücresi elektrotlarında aracı sistemler kullanılarak hem reaksiyon hızının hem de elektron transferinin verimliliğini art-

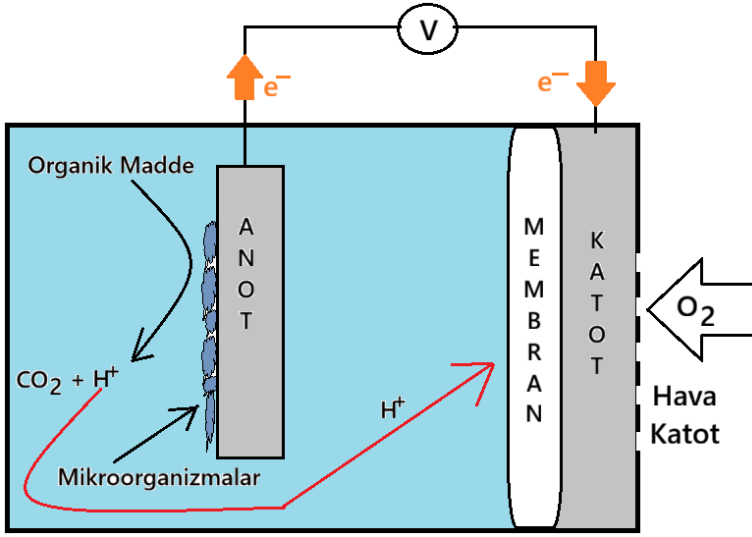
tırmak için çeşitli mikroplar kullanılmıştır. Bu sayede, elektron taşıma zinciri anlayışını ve teknolojiye önemli ilerlemeler birleştirilmiştir. Böylelikle geliştirilmiş biyolojik yakıt hücrelerini gösterilmeye başlanmıştır [36].

1999 yılında, Güney Kore'deki Kore Bilim ve Teknoloji Enstitüsü bünyesindeki araştırmacılar tarafından çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar, Byung Hong Kim grubu tarafından yürütülmüş olup elektrotlarda aracı molekül kullanmayan belirli elektrokimyasal olarak aktif bakteri türleri keşfedilmiştir. Bu kapsamda, bu bakteri türlerinin elektronları elektrotlara taşımak için görev yaptığı anlaşılmıştır [36].

2001 yılında Clare E. Reimers ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada mikrobiyal yakıt hücresi ilk kez olarak toprak ekosistemlerinde uygulanmıştır. Bu çalışmada, toprakta doğal olarak oluşan potansiyel farkın elektron akışı için uygun olduğu anlaşılmıştır. İlave, söz konusu çalışma sayesinde toprak kullanımının membransız mikrobiyal yakıt hücresi konfigürasyonlarına olanak sağladığı ortaya çıkmıştır [37].

2004 yılında Hong Liu ve Bruce E. Logan tarafından yapılan çalışmada, mikrobiyal yakıt hücresinin enerji çıkışını artırmak ve mikrobiyal yakıt hücresinin maliyetini düşürmek için çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda, polimerik bir proton değişim membranının (PEM) varlığında ve yokluğunda karbon elektrotlar içeren bir hava-katot tasarlanmış ve mikrobiyal yakıt hücresinin güç üretimini incelenmiştir [38]. Hong Liu ve Bruce E. Logan tarafından geliştirilen bu mikrobiyal yakıt hücresi, kübik hava-katot mikrobiyal yakıt hücreleri olarak da tanıtılmış olup basit bir tasarıma sahiptir. İlave, basit tasarımının yanı sıra, bu tür mikrobiyal yakıt hücreleri, mikrobiyal yakıt hücrelerinin performansını etkileyen özellikleri araştırmak için kullanılabilen bir fayda sağlamıştır. Dahası, basit tasarımı, mikrobiyal yakıt hücresini etkileyen birçok özelliğin test edilmesini ve daha iyi anlaşılmasını mümkün kılmıştır [39].

Şekil 1.11, Hong Liu ve Bruce E. Logan tarafından geliştirilen kübik hava-katot mikrobiyal yakıt hücresinin şematik gösterimini sunmaktadır.



Şekil 1.11. Hava-katotlu mikrobiyal yakıt hücresi [39].

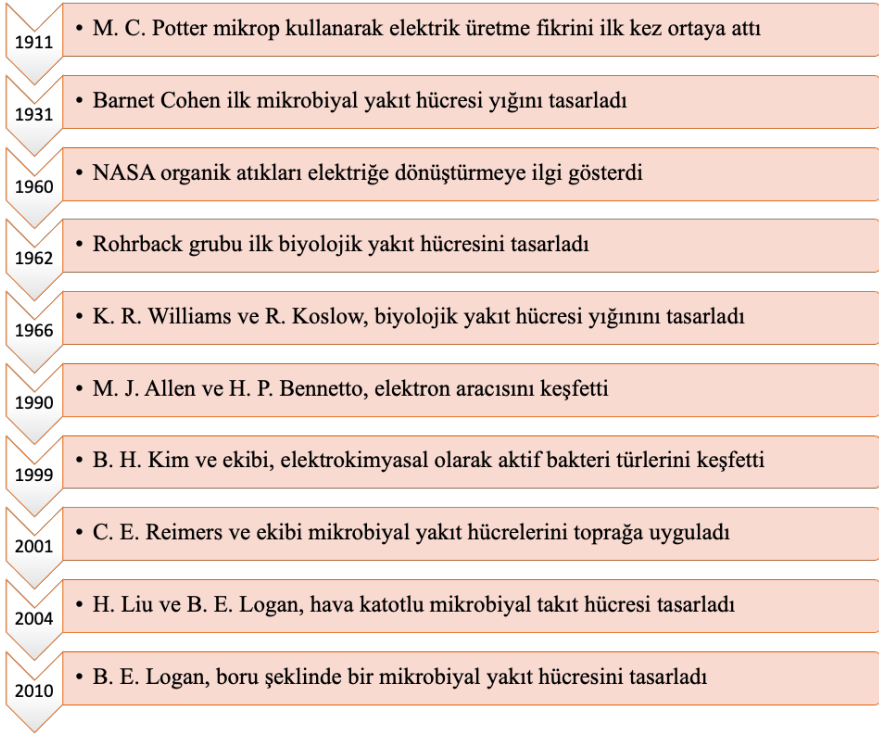
2010 yılında, Bruce E. Logan tarafından ilk kez boru şeklinde bir mikrobiyal yakıt hücresi yapılmış ve yayınlanmıştır. Bu yayında verilen bilgilere göre, mikrobiyal yakıt hücresi boru şeklinde tasarlanmış ve içerisinde karbon fiber fırça anotlar yer almıştır. Mikrobiyal yakıt hücresinin dışı grafit fiber fırça katotlarla kaplanmıştır. Organik madde kaynağı olarak kullanılan atık suyun akışı, borulardan yukarı ve grafit fiber fırça katotlarla kaplı reaktörün dışına doğru gerçekleştirilmiştir. Söz konusu çalışmadan aktarılan bilgilere göre, laboratuvarında farklı mikrobiyal yakıt hücresi teknolojileri üzerinde yapılan bilimsel araştırmalar inanılmaz bir hızla ilerlemiştir. Optimum koşullar altında mikrobiyal yakıt hücrelerinin güç yoğunlukları, reaktör hacmi esas alındığında 1 kW/m^3 değerinin üzerine çıkmıştır. Anot elektrot yüzey alanı esas alındığında mikrobiyal yakıt hücrelerinin güç yoğunlukları $6,9 \text{ W/m}^2$ değerine ulaşmıştır. Sonuç olarak, birkaç yeni pilot ölçekli testten elde edilen sonuçlar, teknolojinin gelecekte ticarileştirilebileceğinin iyi göstergeleri olarak düşünülmüştür [40].

Şekil 1.12, Bruce E. Logan tarafından ilk kez boru şeklinde bir mikrobiyal yakıt hücresi kapsamında, Avustralya, Yatala'daki Foster's bira fabrikası atık suyunu kullanan boru şeklindeki mikrobiyal yakıt hücrelerini göstermektedir.



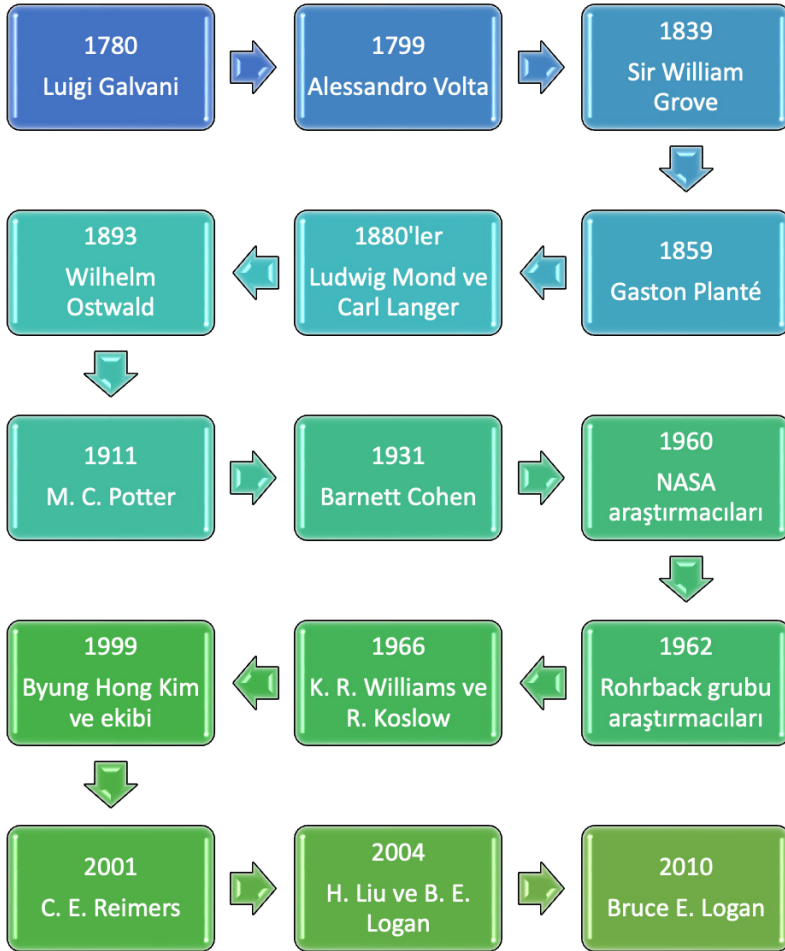
Şekil 1.12. Avustralya, Yatala'daki Foster's bira fabrikasında üretilen atık su kullanılarak güç üretimi için test edilen boru şeklindeki mikrobiyal yakıt hücreleri [40].

2010 yılından günümüze kadar mikrobiyal yakıt hücrelerinin çalışması, tasarımı ve performansı hakkında önemli miktarda literatür yayınlanmıştır. Ancak, mikrobiyal yakıt hücrelerinin gerçek dünya sistemlerinde uygulanması ve ölçeklendirilmesi, çoğu çalışmanın laboratuvar tabanlı olması nedeniyle halen bir zorluk olmaya devam etmektedir. Mikrobiyal yakıt hücrelerinin gerçek sistemlerdeki işleyişini değerlendirmenin ilgi çekici olacağına inanılmaktadır [38]. Mikrobiyal yakıt hücreleri özelinde yapılan gelişmeler Şekil 1.13'te özetlenmiştir.



Şekil 1.13. Mikrobiyal yakıt hücreleri özelinde yapılan önemli gelişmelerin özeti

Mikrobiyal yakıt hücresinin ortaya çıkışından gelişimine kadar olan süreçte katkı sağlayan araştırmacılar ve bilim insanlarının bilgisi Şekil 1.14'te verilmiştir.



Şekil 1.14. Mikrobiyal yakıt hücresinin gelişimine katkı sağlayan önde gelen araştırmacı ve bilim insanları

2. MİKROBİYAL YAKIT HÜCRESİ TÜRLERİ

Mikrobiyal yakıt hücrelerinin tasarımı ile ilgili çalışmalara bakıldığında genellikle dört tür tasarım görülmekte iken son zamanlarda buna bir tasarım daha eklenmiştir. Buradan hareketle, mikrobiyal yakıt hücresi tasarımları şöyledir [41]:

- Tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi,
- Çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi,
- Yukarı akışlı mikrobiyal yakıt hücresi,
- Yığın haline getirilmiş mikrobiyal yakıt hücresi,
- Lazer bz lazer 3D minyatür mikrobiyal yakıt hücresi.

2.1. Tek Odacıklı Mikrobiyal Yakıt Hücresi

Tek bölmeli, tek odalı veya tek odacıklı olarak tanımlanan mikrobiyal yakıt hücrelerinde, organik madde kaynağı (substrat) ve mikroorganizmalar bir arada bulunmaktadır. Bir başka deyişle, bu mikrobiyal yakıt hücresinde organik madde kaynağı mikrobiyal katalizörlerin birlikte yerleştirildiği tek bir anot bölmesi bulunmaktadır [42].

Tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücreleri, proton değişim membranı veya herhangi bir membran içermeyen tasarım tipidir. Tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücreleri, hem katot hem de anodun doğrudan bir mikrobiyal konsorsiyuma maruz kaldığı, umut vadeden basitleştirilmiş bir sistem olarak tasarlanmıştır. Bu tasarımda, bakteriler %90'dan fazla su içerirler. Bu nedenle, iyi iletkenler olan biyofilmler oluştururlar ve elektrotlara yerleşirler. Dahası, katodik biyofilmler, gözenekli katottan gelen oksijeni tüketirler. Bu sayede bir membranın olmadığı durumlarda ortamdaki anaerobik koşulların korunmasına katkıda bulunabilir [43].

Tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücreleri, çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücrelerinin bazı sınırlamalarının üstesinden gelir. Tek odacıklı bir mikrobiyal yakıt hücresinde, anodik ve katodik odalar bulunmamaktadır. Bu nedenle, anot ve katot için farklı elektrolitlere gerek yoktur. Tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücrelerinin çoğu, terminal elektron alıcısı olarak oksijen kullanır. Bazı tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücrelerinde; katot ve membran, katot havaya bakan şekilde birbirine bastırılmıştır [44].

2002 yılında yayınlanan bir çalışmada, tek bölmeli mikrobiyal yakıt hücresi konusunda önemli bir alt yapı hazırlanmıştır. Söz konusu çalışma, yeni bir tek bölmeli yakıt hücresi tasarımı konusunu ele almıştır. Bu çalışmada bahsedilen tek bölmeli mikrobiyal yakıt hücresi merkeze yerleştirilmiş bir anot ve dahili, proton geçirgen bir porselen tabaka içeren pencereye monte edilmiş bir katot içeren kauçuk tıpalı bir şişeden oluşmuştur. Bu mikrobiyal yakıt hücresi tasarımı, katot bölmesinde havalandırma ve ferrisiyanür çözeltisi gerektiren geleneksel iki bölmeli sistemden daha ucuz ve daha pratik olarak tanıtılmıştır. Bu tek bölmeli mikrobiyal yakıt hücresinde; mangan iyonları (Mn^{4+}) içeren grafit anot, nötr kırmızı (NR) kovalent bağlı örgülü grafit anot ve demir (Fe^{3+}) içeren grafit katot dahil olmak üzere bağlı elektron araçları içeren üç yeni elektrot geliştirilmiştir. Bu elektrotlar, geleneksel grafit elektrotlara kıyasla elektrik enerjisi üretimini (yani mikrobiyal elektron transferini) büyük ölçüde arttırmıştır. Mikroorganizma kaynağı olarak kanalizasyon çamuru, *Escherichia coli* mikroorganizması ayrı ayrı araştırılmıştır. Çalışmanın hedefi, mikrobiyal yakıt hücresi sistemlerini daha da geliştirmektir. Tek ve iki bölmeli yakıt hücrelerimizi 20 gün boyunca istikrarlı akım üretimiyle sürekli olarak çalıştırılmıştır. Ayrıca, tek bölmeli yakıt hücresinin katotundaki oksijen (O_2) transferini ve oksidasyonunu iyileştirmeye çalışılmıştır. Katot yüzeyi, ok-

sijeni (O_2 'yi) suya (H_2O 'ya) indirgeyerek ıslanıldığında, oksijen transferi sınırlı olabileceği belirtilmiştir. Biyokatalizör olarak anaerobik kanalizasyon çamuru veya *Escherichia coli* biyokatalizörleri içeren hücreler ve dört farklı anot-katot kombinasyonu kullanılarak laktat kompleks ortamından biyoyakıt hücrelerinde elektrik üretimi sonuçlarına dair elde edilen bazı bulgular Tablo 2.1'de özetlenmiştir [45].

Tablo 2.1. Biyokatalizör olarak anaerobik kanalizasyon çamuru veya *Escherichia coli* biyokatalizörleri hücreleri ve dört farklı anot-katot kombinasyonu kullanılarak laktat kompleks ortamından biyoyakıt hücrelerinde elektrik üretimi (sonuçlar üç bağımsız deneyin ortalamasını temsil etmektedir) [45].

Biyokatalizör	Anot	Katot	Elektrik üretimi ^(a)
			Yaklaşık güç yoğunluğu (anot yüzeyinin mW/m ² si) ^(b)
Kanalizasyon çamuru	Örgü grafit ^(c)	Örgü grafit	0,17
Kanalizasyon çamuru	Örgü grafit	Fe ³⁺ -grafit	0,65
Kanalizasyon çamuru	Nötr kırmızı-Örgü grafit ^(d)	Fe ³⁺ -grafit	5,32 (844,6)
Kanalizasyon çamuru	Mn ⁴⁺ -grafit	Fe ³⁺ -grafit	787,5
<i>Escherichia coli</i>	Örgü grafit ^(c)	Örgü grafit	0,30
<i>Escherichia coli</i>	Örgü grafit	Fe ³⁺ -grafit	0,44
<i>Escherichia coli</i>	Nötr kırmızı-Örgü grafit ^(d)	Fe ³⁺ -grafit	1,20 (152,4)
<i>Escherichia coli</i>	Mn ⁴⁺ -grafit	Fe ³⁺ -grafit	91

^(a) Standart sapmalar %5'in altındaydı.

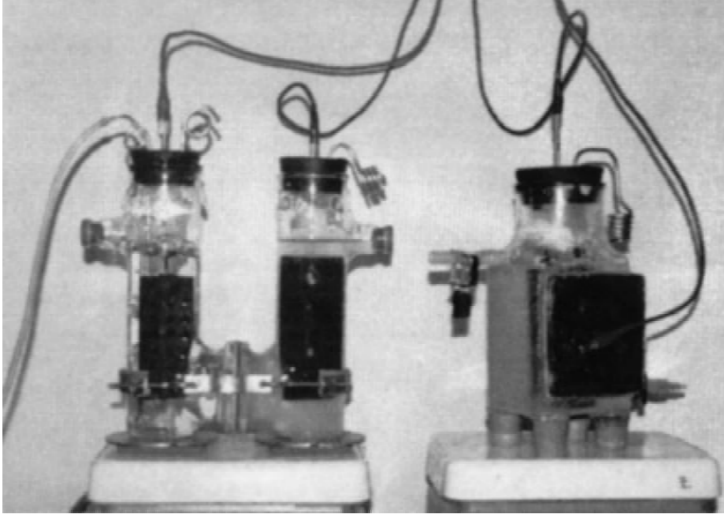
^(b) Biyoyakıt hücresi sisteminde kullanılan elektrot yüzey alanı kullanılarak hesaplanan teorik değer. Üç elektrodun dış şekli ve boyutu aynıydı, ancak ağırlıkları ve yüzey alanları farklıydı.

^(c) İki bölmeli sistem yalnızca grafit-grafit elektrot kombinasyonları için, tek bölmeli sistem ise diğerlerinin tümü için kullanıldı.

^(d) Kovalent bağlı NR'ye sahip modifiye grafit örgülü elektrot. İlk değer, teorik dış artı iç yüzey alanını (1,27 m²) temsil eder. Parantez içinde yalnızca dış yüzey (80 cm²) değeri gösterilmektedir.

Tablo 2.1'den elde edilen sonuçlara göre; kanalizasyon çamurunun, *Escherichia coli*'den daha kolay elektron transferi yapan benzersiz elektrofilik mikroplar içerebileceğini ve yeni Mn⁴⁺-grafit anot ve Fe³⁺-grafit katot kullanan mikrobiyal yakıt hücrelerinin, uzak bölgelerde ihtiyaç duyulan düşük miktarda elektrik enerjisi üretmek için ticari olarak kullanılabileceğine inanılmıştır. Tek bölmeli mikrobiyal yakıt hücresi sistemi, ferrisiyanür çözeltisi veya havalandırma gerektirmemiştir. Pencereye monte edilmiş katodun iç yüzeyi proton geçirgen bir tabaka ile kaplanmıştır. Şekil 2.1, iki bölmeli mikrobiyal yakıt

hücresi (sol) ve tek bölmeli mikrobiyal yakıt hücresinin (sağ) görüntüsünü sunmaktadır [45].



Şekil 2.1. 2002 yılında yapılan bir çalışmadaki iki bölmeli mikrobiyal yakıt hücresi (sol) ve tek bölmeli mikrobiyal yakıt hücresi (sağ) [45].

Tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi tasarımında, katolit (katot çözeltisi elektroliti) kullanımı gerekmemektedir. Tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi sistemi, çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinin aksine havalandırma adımından kaynaklanan enerji tüketimini önemli ölçüde azaltır. Bazı çalışmalarda; asetat, glikoz ve evsel atık su, granül grafit ve katolit olarak ferro-siyanürden yapılmış anotlu tek odacıklı borulu bir mikrobiyal yakıt hücresi tasarımında substrat olarak kullanılmıştır. Elde edilen güç çıkışları sırasıyla $90 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$, $60 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$ ve $48 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$ idi. Elde edilen kolombik verimlilik, atık su açısından %96'ya yakındı. Tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi tasarımının, yüksek uçucu asitler içeren atık suların arıtımı için oldukça verimli olabileceği bildirilmiştir [46].

Tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi, atık sudan organik maddeleri uzaklaştırırken elektrik enerjisi sağlamasının yanı sıra basitleştirilmiş tasarım sunmaktadır. Bu nedenle daha düşük maliyetlidir ve ekonomik faydaları vardır. Bu mikrobiyal yakıt hücrelerinin toplam hacimleri azaltılmış ve güç çıkışı iyileştirilmiştir. Bu özellikler nedeniyle geleneksel iki odacıklı mikrobiyal yakıt hücrelerine göre çeşitli avantajlar sunmaktadır. Tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücrelerinde öne çıkan adım, proton değişim membranı olmayan elektrokimyasal olarak aktif mikroorganizmalar tarafından anoda ekstraselüler elektron transferidir. Bu elektron akışı daha sonra hava katodundaki indirgeme reaksiyonlarına katkıda bulunarak oksijenin pasif difüzyonuna izin vermektedir. Bu nedenle, elektron transferinde yer alan mikroorganizmaların uzun vadeli zenginleştirilmesi ve yetiştirilmesi, tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi tek-

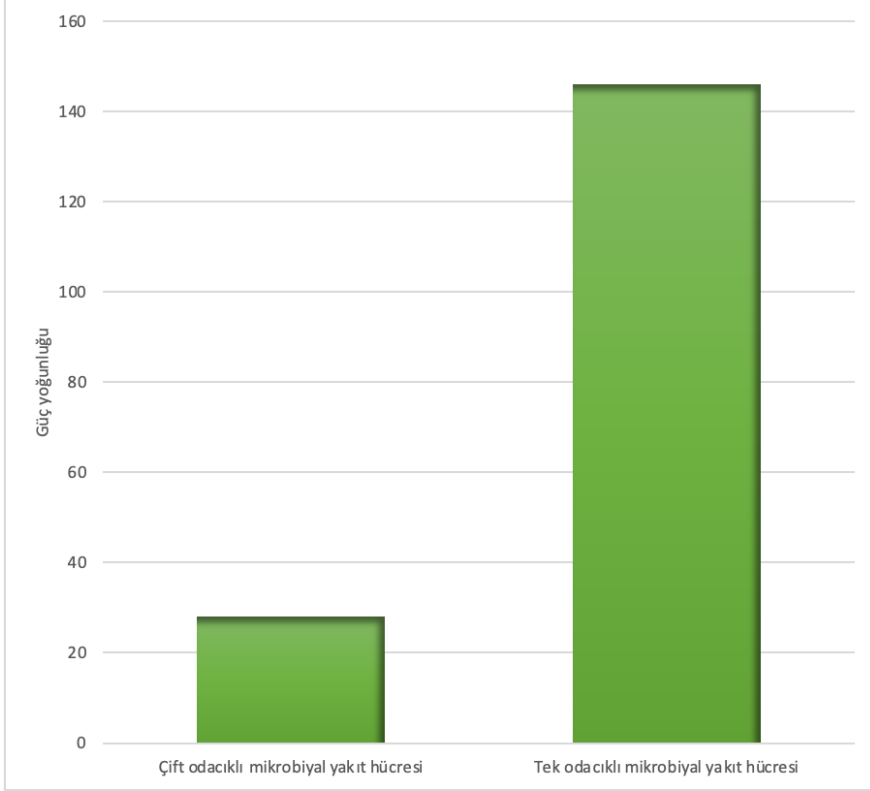
nolojilerinin başarısı için önemli bir faktördür. Yapılan çalışmalar, elektrokimyasal olarak aktif mikroorganizmaların, sürekli tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi sisteminde yüksek amonyak azotu konsantrasyonlarına uyum sağlayabildiğini göstermiştir [47].

Tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinin dikkat çeken yararlı özellikleri Şekil 2.2'de özetlenmiştir.

Proton değişim membranı içermez
Düşük maliyetli olduğu için ekonomik fayda sağlar
Basitleştirilmiş tasarım sunar
Atık sudan kirleticileri uzaklaştırır
Elektrik enerjisi üretimi sağlar
Çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresine kıyasla daha az hacim kaplar
Daha az hacimli olmasına rağmen daha yüksek güç yoğunluğu sunar
Mikroorganizmaların ekstraselüler elektron transferi sayesinde katottaki indirgeme reaksiyonlarına katkı sağlar
Elektron transferinde yer alan mikroorganizmaların uzun vadeli zenginleştirilmesi ve yetiştirilmesine olanak sağlar

Şekil 2.2. Tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinin dikkat çeken yararlı özellikleri [43, 45, 47].

Evsel atık su ile beslenen tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi ve çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinin elektriksel güç yoğunluğunun karşılaştırıldığı bir çalışmada, çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi 28 mW/m^2 güç yoğunluğu sağlarken tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi 146 mW/m^2 güç yoğunluğu sağlamıştır [48]. Buradan hareketle, aynı atık su ile beslenen çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi ve tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinin elektriksel güç yoğunluğu Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Aynı atık su ile beslenen çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi ve tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinin elektriksel güç yoğunluğunun karşılaştırılması [48].

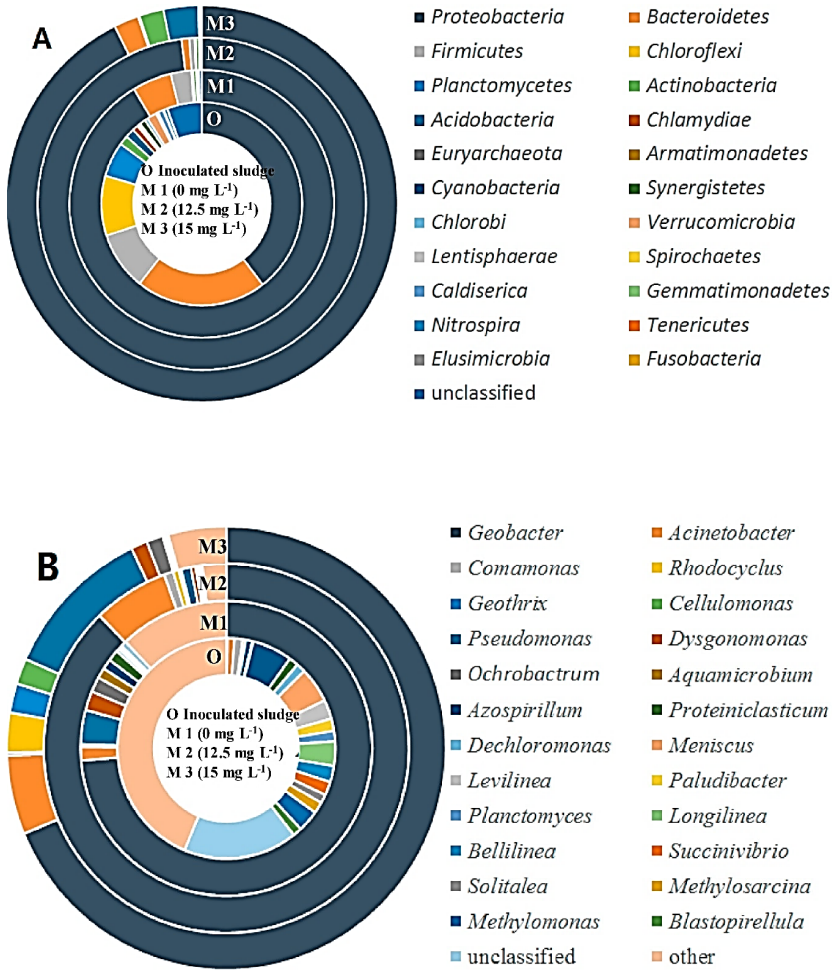
Tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinde, katot bir tarafta hava ile diğer tarafta elektrolitle doğrudan temas halindedir. Tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi tasarımında membranın mevcut olmaması, sermaye maliyetini ve biyokimyasal sistemin iç direncini önemli ölçüde azaltmıştır. Fakat daha sonra üzerinde aerobik biyofilm oluşumuna yol açan organik maddelerin katot matrisine difüzyonu artmıştır. Bu tür bir biyofilm oluşumu, hava katodu üzerine kaplanan katalizör tabakasının aktif bölgelerini tıkamıştır. Nihayetinde uzun vadeli bir çalışma sırasında mikrobiyal yakıt hücresi performansı kötüleşmiştir. Katodun karbon yapısı ve biyouyumluluğu, onu mikroorganizmaların bağlanıp kolonize olması için potansiyel bir bölge haline getirir. Sınır arayüzünden proton taşınmasına izin verecek şekilde yapılmış olan katalitik tabakanın

yüksek potansiyeli ve hidrofilisitesi, biyofilmin büyümesine neden olmaktadır. Biyokirlenme (biyolojik kirlenme), bakteri ve mantar gibi mikroorganizmaların, daha spesifik olarak heterotrofik mikroorganizmaların biyofilm formunda katot yüzeyine bağlanması olarak tanımlanır. Biyofilm, daha sonra sinerjik biyofilm oluşturabilen ve ayrılmaya daha dirençli olan tek bir suş veya karışık kültürden oluşabilir. Biyofilmin hücre dışı polimerik maddeleri, herhangi bir çevresel saldırıya karşı yerleşik hücreleri koruyan bir tabaka görevi görür. Mikrobiyal kaynaklı korozyon, petrol ve gaz endüstrisine her yıl yüksek maliyet yükleyen yüzeyde biyofilm oluşumunun bir sonucu olarak biyolojik kirlenmenin bilinen bir örneğidir. Çeşitli avantajlara rağmen tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücrelerinde, hava soluyan katotta biyofilm oluşumuna ve bunun sonucunda biyolojik kirlenmeye karşı hassastırlar [49].

Tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücrelerinde membranın mevcut olmaması, katot ve çözelti arasında doğrudan temas sağlar. Protonların ve yüklü iyonların katot katalizör bölgelerine erişimini engelleyen ve ayrıca katottan hidroksitin taşınmasını engelleyen bir aerobik bakteri tabakası oluşturur. Bu da elektrolit ve katalizör tabakasında pH dengesizliğine neden olur. Aerobik bakteriler ayrıca dağılık oksijenin bir kısmını tüketebilir ve katottaki oksijen indirgeme reaksiyonunun hızını azaltabilir. Biyofilmin hücre dışı bileşikleri, katot katalizörünün fiziko-kimyasal özelliklerini olumsuz etkileyebilir. Katot üzerindeki biyofilm oluşumu, aktif katalitik bölgeleri ve katodun aktif alanını azaltır ve bu da pratik mikrobiyal yakıt hücresi performansını düşürür. Biyofilm kolonize olup aktif katalitik bölgeleri kapladıkça, katot üzerindeki oksijen indirgeme hızı azalır ve iç direnç kademeli olarak artar. Anodik ve katodik biyofilmlerin substrat rekabeti, katot üzerindeki biyofilm oluşumunun bir diğer yan etkisidir. Sonuç olarak kolombik verimlilik düşer ve mikrobiyal yakıt hücresi tarafından güç üretimi azalır [49].

Yapılan bir çalışmada, tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi kullanılarak anaerobik çamur atığındaki bakır (Cu) giderimi ve elektrik üretimi araştırılmıştır. Araştırmanın sonuçları, mikrobiyal elektrokimyasal indirgemenin katot elektrotta Cu ve Cu₂O ürünleri oluşumunu ortaya koymuştur. Bu bulgular, tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinin bakır giderimine katkıda bulunduğunu göstermiştir. Dahası, mikrobiyal topluluk analizi, mikrobiyal toplulukların farklı bakır konsantrasyonlarıyla değiştiğini göstermiştir. Baskın mikroorganizma türleri, elektrik üretiminde önemli rol oynayabilen *Proteobacteria* ve *Bacteroidetes* iken, bakıra karşı dirençli olan ve bakır gideriminden sorumlu olan mikroorganizmalar ise *Actinobacteria* ve *Acidobacteria* olarak gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, özellikle düşük bakır konsantrasyonlu tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi için, mikrobiyal elektrokimyasal teknoloji kullanılarak kirli sudan ağır metal kirlenmelerinin verimli bir şekilde giderilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Türler arası rekabet ve bakırın artan konsantrasyondaki toksisitesi mikroorganizmaların büyümesini ve metabolizmasını engelleyecektir. Cu²⁺ giderme verimliliğinin ve voltaj çıkışının, mikroorganizma proteinleri, enzimleri ve

DNA'ları hasar gördüğünden nispeten yüksek Cu^{2+} konsantrasyonuyla düştüğü anlaşılmıştır. Evcilleştirme ve yetiştirmeden sonra mikroorganizmanın koruyucu enzimler aracılığıyla bakır toleransını arttırabildiği görülmüştür. Sonuç olarak, tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi kullanımı maliyeti düşürülebilir, iç direnci düşürülebilir ve proton taşınımını kolaylaştırabilir. Organik atık su ile birleştirildiğinde, atık su arıtımı açısından büyük önem taşıyan bakır geri kazanımı ve organik atık suyun eş zamanlı olarak uzaklaştırılması sağlanabilir. Tek bölmeli mikrobiyal yakıt hücresi kullanılarak atık sudan Bakır giderimi ve elektrik üretimini araştıran çalışmada bakırdan etkilenen mikrobiyal topluluk değişikliklerini araştırmak için aşılınmış çamurla karşılaştırıldı. Burada elde edilen mikrobiyal topluluklar; şube düzeyinde Şekil 2.4(A)'da ve cins düzeyinde Şekil 2.4(B)'e verilmiştir [50].



Şekil 2.4. Farklı Cu^{2+} konsantrasyonlarına sahip mikrobiyal yakıt hücrelerindeki mikrobiyal topluluklar [50].

Tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücreleri basitlikleri ve uygun maliyetli tasarımları nedeniyle atık su uygulamalarında popülerdir. Fakat tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücrelerinin, sınırlı enerji geri kazanımı ve tasarım kısıtlamaları gibi nedenlerden ötürü büyük ölçekli uygulamalar için uygun olmadığı bildirilmiştir [43, 51].



Şekil 2.5. Tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücrelerin güçlü ve zayıf tarafları [43, 51].

2.2. Çift Odacıklı Mikrobiyal Yakıt Hücresi

Çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücreleri, mikrobiyal yakıt hücresi yapma girişimlerinin en yaygın ve en eski olanıdır. Bu mikrobiyal yakıt hücrelerinin yapıları, kimyasal yakıt hücrelerine benziyordu. İlk mikrobiyal yakıt hücreleri, iyonik transfer için bir tuz köprüsü veya proton değişim membranı ve elektron akışı için harici bir devre ile birleştirilmiş iki farklı odadan oluşuyordu. Bu odalar anot odası ve katot odası olarak ifade edilmektedir. Geleneksel bir çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinde, mikroorganizma anot yüzeyinde veya anolitte büyür. Elektronlar anoda aktarılır ve protonlar membrandan katoda doğru akar. Katot odası, içine serpilmiş bir kimyasal terminal elektron alıcısı veya hava veya oksijen içerir. Anaerobik bir anotun korunması ve katot odasındaki koşulların indirgeyici olması, çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinin elektrik üretmesi için önemlidir. Çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi, mikrobiyal metabolik reaksiyonların ayrılması ve protonların oksidasyonu nedeniyle daha yüksek güç yoğunlukları üretir. Ancak iki bölmenin yapısı ve ayrılması nedeniyle daha karmaşık yapılara sahiptir. Ayrıca, çoğunlukla oksijen terminal elektron alıcısı olarak kullanılıyorsa hava püskürtücüleri şeklinde sürekli oksidasyona ihtiyaç duymaktadırlar [44].

1911 yılında Potter tarafından tasarlanan ilk mikrobiyal yakıt hücresi, gözenekli bir silindiri içeren bir cam kavanozdan oluşan iki bölmeden oluşmaktaydı. Her iki bölme de elektrolit olarak glikoz ve platin elektrotlar içermektedir. Bahse konu çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi maya (*Saccharomyces*), bakteri (*Bacillus coli communis*, *B. fluorescens*, *B. violaceus* ve *Sarcina lutea*) ve enzimler (invertaz ve diastaz) kullanarak glikozu parçalamıştır. Böylece elektromotor kuvvet (voltaj) üretmiştir [44].

Çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi tasarımı, güç yoğunluğunu ve hücre iç direncini etkilemeden, ayırıcı bir membran kullanarak oksijen difüzyonunu azaltarak tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi tasarımında ortaya çıkan sınırlamalarının üstesinden gelir. Çift odacıklı bir mikrobiyal yakıt hücresi, bölmeler arasında elektrolit hareketini önlemek için bir proton değişim membranı ile ayrılmış bir anot ve katot bölmesinden oluşur. Anot bölgesindeki bakteriler, organik materyalin ayrışması için bir biyokatalizör görevi görerek elektron ve proton üretir. Elektronlar, harici bir devre aracılığıyla katoda giderken, protonlar proton değişim membranı aracılığıyla difüze olur [52].

Tek ve çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi arasındaki temel farklar şöyle sıralanabilir [53]:

- Tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinde membran bulunmaz iken çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinde membran bulunur,
- Çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi sistemlerindedir, her bölmede farklı koşullar sağlanabilir,
- Tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinde iyon geçirgen membran olmadığı için oksijenin anoda difüzyon hızı, çift odacıklı tasarıma göre 2,7 kat daha yüksek olduğu bildirilmiştir,
- Tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinin avantajı, daha düşük kurulum maliyetleri ve daha yüksek güç çıkışı sağlar iken çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinde bu avantajlar mevcut değildir,
- Tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinin dezavantajı, genellikle oksijenin anoda difüzyonudur. Bu durumda, bakteriler tarafından oksijen tüketimi meydana gelir. Bu nedenle, düşük kolombik verim görülür.

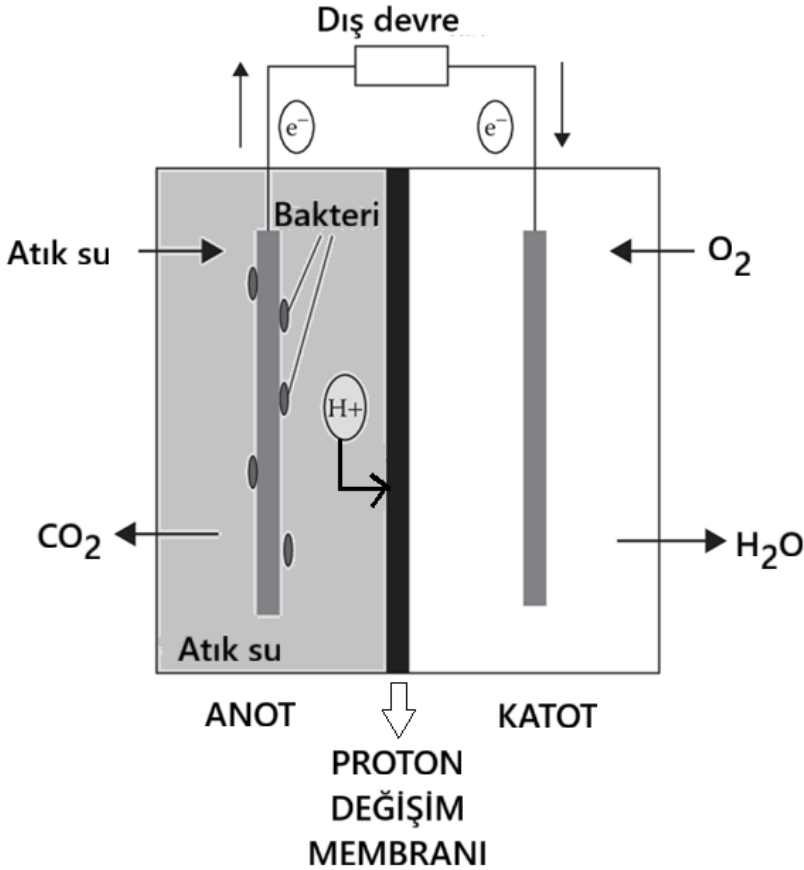
İki bölmeli mikrobiyal yakıt hücresinde, katottan ayrılmış bir anot bulunur. Anotta, bakteriler elektronları substratlardan uzaklaştırır (oksidasyon) ve her bölmenin elektrotlarına bağlı harici bir devre aracılığıyla katot bölgesine aktarır. Protonlar, genellikle bir proton değişim membranı olan ayırıcı aracılığıyla anottan katoda doğru hareket eder. İki bölmeli mikrobiyal yakıt hücrelerinde, anot bölgesinde elektron kaybı (oksidasyon reaksiyonları) ve katot bölgesinde elektron kazanımı (redüksiyon reaksiyonları) gibi eş zamanlı oksidasyon reaksiyonları gerçekleştirir. Anot bölümündeki elektrot, elektron vericisi olarak görev yaparken katot bölümündeki elektrot, elektron alıcısı

olarak görev yapar. Bu tepkimeler, substratı katalize eden mikroorganizmalar tarafından kolaylaştırılır. Anot bölmesinde mikroorganizmalar aracılığıyla gerçekleşen anaerobik substrat oksidasyon süreci, karbondioksit, protonlar ve elektronlar üretir. Protonlar değişim membranından aktarılır ve bir yük bağlandığında elektronlar dış devreden geçer. Katot bölmesine oksijen verildiğinde, yeni alınan elektron ve protonlarla tepkimeye girerek su üretir. Bu işlemlerin sonucu elektrik üretimi ile sonuçlanır [54].

Mikrobiyal yakıt hücresi çalışmalarının ilk dönemlerinde, hücrelerin çoğu çift bölmeli konfigürasyondaydı. Tipik bir çift bölmeli mikrobiyal yakıt hücresi, bir proton değişim zarı veya bir katyon değişim zarı ile ayrılmış anot ve katot bölmelerinden oluşur. Çift bölmeli mikrobiyal yakıt hücrelerinin, kısmen elektrotlar arasındaki mesafeye atfedilen nispeten yüksek iç (ohmik) dirençleri nedeniyle, tek bölmeli mikrobiyal yakıt hücrelerine kıyasla daha düşük enerji üretimine sahip oldukları bilinmektedir. Tezgah ölçekli mikrobiyal yakıt hücrelerinin ölçeklendirilmesi, büyük ölçekli enerji üretimi ve atık su arıtımı için hayati önem taşır. Ancak, çift bölmeli mikrobiyal yakıt hücrelerinin ölçeklendirilmesi, tasarımlarının karmaşıklığı nedeniyle zorlu bir iştir. Geleneksel çift bölmeli mikrobiyal yakıt hücrelerinin bir diğer dezavantajı, katotta elektron alıcılarının kullanılmasıdır. Aracı olarak kullanılan kimyasalların çoğunun sürdürülebilir olmaması nedeniyle, çözünmüş oksijen, kolayca bulunabildiği için mikrobiyal yakıt hücrelerinde sürdürülebilir elektron alıcısı olarak kabul edilir. Çözünmüş oksijen, katottaki peristaltik pompalar tarafından sağlanır. Ancak, çözünmüş oksijen tedariki için kullanılan pompalar, güç sağlamak için elektrik kullanımını gerektirir ve bu da reaktörlerin işletme maliyetini arttırır. Bu ekstra işletme maliyeti, daha ucuz/sürdürülebilir diğer elektron alıcılara olan ihtiyacı doğurmuştur. Çift bölmeli mikrobiyal yakıt hücrelerinde tespit edilen sınırlamaların çoğu, tek bölmeli mikrobiyal yakıt hücrelerinde hafifletilmiştir. Örneğin; tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücrelerinde katotun havaya maruz kalması, oksijene doğrudan erişim sağlar. Bu nedenle, bazı çift bölmeli mikrobiyal yakıt hücrelerinde olduğu gibi pompaları çalıştırmak için elektrik kullanımını ortadan kaldırır [55].

Çift odacıklı bir mikrobiyal yakıt hücresi tarafından enerji üretimini gösteren şematik gösterim Şekil 2.6'da verilmiştir. Burada görüleceği gibi çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi, bir anodik bölme, bir katodik bölme ve bir proton değişim membranı (PEM) içermektedir. Bu mikrobiyal yakıt hücresinin anodik bölmesi, mikroorganizmaların elektron ve proton üretiminde yer aldığı anaerobik bir koşulda tutulur. Oksidasyon yan ürünü olarak karbondioksit oluşur. Anot, daha sonra katoda iletilen elektronları emer. Elektronlar harici bir devre üzerinden geçirilir. Diğer yandan, protonlar PEM veya bir tuz köprüsünden geçerek katodik bölmeye ulaşır. Katodik bölmede su üretmek için genellikle elektron alıcısı olarak işlev gören oksijen (O_2) ile tepkimeye girerler. Sürekli elektrik akımı üretimi, mikroorganizmaları anotun yanı sıra ok-

sijenden veya başka bir elektron alıcısından ayırarak mümkün hale getirilir. Bu koşulu sağlamak için anodik bölme anaerobik hale getirilir. Oksijen indirgeme reaksiyonu (ORR) katotta meydana gelir. Katodik bölmede sürekli bir oksijen kaynağı gerektirir. Çift bölmeli mikrobiyal yakıt hücreleri; H tipi, silindir tipi, boru tipi, düz plaka tipi vb. dahil olmak üzere farklı varyasyonlarda modifiye edilmiş ve araştırılmıştır. Bu modifikasyonlar, büyük ölçekli operasyonlar için operasyonel verimliliği arttırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çift bölmeli mikrobiyal yakıt hücrelerinin temel güçlü yönü; enerji üretmek için büyük ölçekli atık su arıtımında kullanılabilmeleridir. Ölçeklendirilmiş operasyon için gerekli olan operasyon parametreleri arasında uygun pH değerinin korunması, yeterli O_2 mevcudiyeti, iç direncin azaltılması ve elektron aracılarının eklenmesi yer alır [56].



Şekil 2.6. Tipik bir çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinin şematik diyagramı [56].

Çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinin tasarımı elektrik üretimi performansının etkilediği için farklı tasarım türleri araştırılmıştır. Bu tasarım türleri arasından önemli olanları Şekil 2.7'de özetlenmiştir.



Şekil 2.7. Çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi türleri [56].

2.2.1. H Tipi Çift Odacıklı Mikrobiyal Yakıt Hücresi

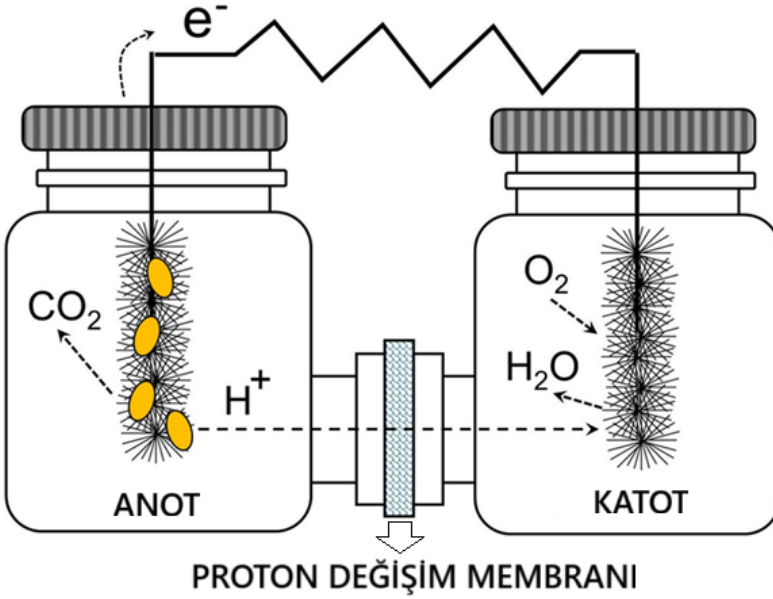
H tipi çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi yapılandırmasında, iki adet şişe bir membran kullanılarak birbirine bağlanır. Burada, membran şişelerin tüplerinin ortasına sıkıştırılır. Lakin tüpün kendisine gerek yoktur. İki bölme ayrı tutulduğu sürece, membranın her iki tarafına bastırılabilir ve geniş bir yüzey oluşturmak için birbirine sıkıştırılabilirler. Şişeleri birleştirmenin uygun maliyetli bir yolu da, ısıtılıp “U” şeklinde bükülmüş, agar ve tuzla doldurulmuş (katyon değişim membranıyla aynı işlevi görmesi için) ve her şişenin kapağından geçirilmiş bir cam tüp kullanmaktır. Ancak tuz köprüsü mikrobiyal yakıt hücresinde, yüksek iç direnç ortaya çıkarmıştır. Bu nedenle tuz köprüsü kullanımını durumunda mikrobiyal yakıt hücresi çok az güç üretir [57].

H şeklindeki çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi sistemleri, yeni malzemeler kullanılarak güç üretiminin veya belirli bileşiklerin bozunması sırasında ortaya çıkan mikrobiyal topluluk türlerinin incelenmesi gibi temel parametre araştırmaları için kabul edilebilir. Ancak genellikle düşük güç yoğunlukları üretirler. Bu sistemlerde üretilen güç miktarı, katodun yüzey alanının anot ve membran yüzey alanına göre oranından etkilenir. Bu sistemler tarafından üretilen güç yoğunluğu, genellikle yüksek iç direnç ve elektrot bazı kayıplarla sınırlıdır. Bu sistemler tarafından üretilen gücü karşılaştırırken, bunları eşit büyüklükteki anotlar, katotlar ve membranlar temelinde karşılaştırmanın en mantıklısı olduğu ifade edilmiştir [57].

H tipi çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücreleri, daha küçük yüzey alanları sayesinde daha düşük proton transferine sahiptir. Sonuç olarak, daha düşük güç yoğunluğu gösterirler. Genelleme yapılırsa, H tipi reaktörlerin daha temel testler için kullanışlı olduğu görülmüştür [10, 56, 58].

Çeşitli çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi tasarımları mevcut olmasına rağmen çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi tasarımları arasında H tipi tasarım en yaygın araştırıldığı için bu tasarım geleneksel bir tasarım halini almıştır. Şekil 2.8'de gösterildiği gibi, bir membran köprüsüne bağlı iki odacığa sahiptir. Anot odası oksidasyon tepkimesi yoluyla elektron üretirken, katot odasında redüksiyon (indirgeme) tepkimesi yoluyla temiz su üretilir. H tipi çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi tasarımı, pahalı bir çözüm sunmuştur. Bu nedenle, bu tasarım ticari uygulamalarda kullanılamamıştır. H tipi çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi tasarımı eğitim amaçlı uygulamalarda kullanılmaktadır. Diğer çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücrelerinde olduğu gibi H tipi çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi tasarımında da katot elektrotların düzenli olarak değiştirilmesi gerekmektedir [59].

Standart bir çift bölmeli H tipi çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinin şematik gösterimi Şekil 2.8'de verilmiştir.



Şekil 2.8. Standart bir çift bölmeli H tipi çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinin şematik gösterimi [10].

Çin Ulusal Doğa Bilimleri Vakfı (Hibe No. 50908129 51072091) ve Çin Ulusal Yüksek Teknoloji Araştırma ve Geliştirme Programı (863 Programı, No. 2011AA060907) kapsamında desteklenerek yapılan bir çalışmada, 60 mg/L gibi düşük konsantrasyonlarda tuzlu suyu tuzdan arındırmak için kapasitif deiyonizasyon sistemine elektriksel güç sağlaması amacıyla güç kaynağı olarak H tipi çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi kullanılmıştır. Yapılan çalışmanın sonuçları, H tipi çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinin düşük tuzlulukta ki suyu tuzdan arındırmak için kapasitif deiyonizasyon sisteminin başarıyla çalıştırdığını kanıtlanmıştır. Böylece, düşük konsantrasyonlu tuzlu suyun eş

zamanlı atık su arıtımı ve tuzdan arındırılması için bir kapasitif deiyonizasyon sistemi-mikrobiyal yakıt hücresi prosesi geliştirilmiştir [60].

H tipi çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinin güçlü tarafları ve zayıf tarafları Şekil 2.9'da özetlenmiştir.



Şekil 2.9. H tipi çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinin güçlü ve zayıf tarafları [56-60].

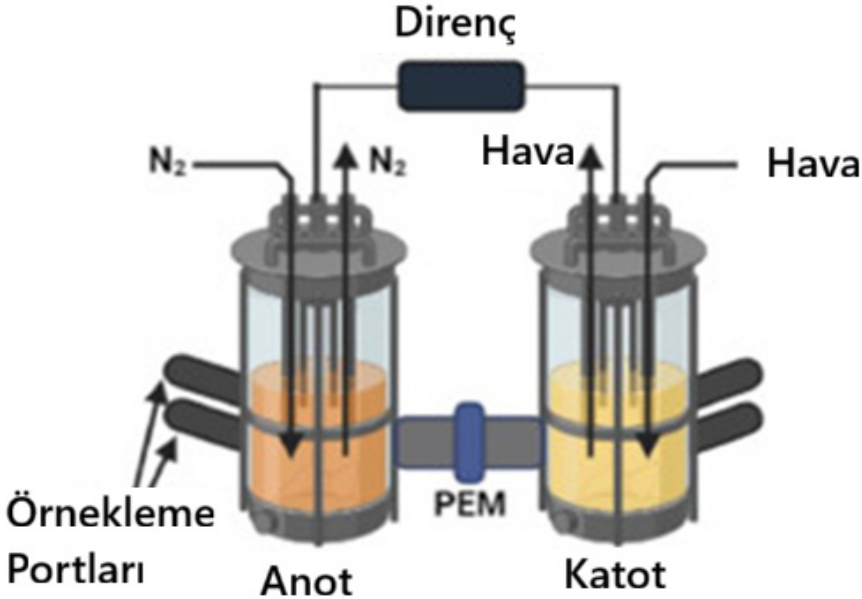
2.2.2. Silindir Tipi Çift Odacıklı Mikrobiyal Yakıt Hücresi

Silindir tipi çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi genellikle iki silindirik odadan oluşmuştur. Silindir tipi çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi ile ilgili yapılan bir çalışmada, her biri 4 cm iç çapında, 5 cm dış çapında ve toplam 100 ml çalışma hacminde olmak üzere iki plastik silindir kullanılarak silindir tipi çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi tasarlanmıştır. Bu mikrobiyal yakıt hücresinde; anot elektrot olarak 1,0 cm × 1,0 cm × 1,0 cm ölçülerinde karbon keçe kullanılmıştır. Katot elektrot olarak ise 3,0 cm × 3,0 cm karbon kumaş elektrot kullanılmıştır.

mıştır. Katot elektro, katot odasındaki indirgeme reaksiyonlarını artırmak için bir platin katalizör ile kaplanmıştır. Deneylerden önce tüm elektrotlar önce 1 M sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisine daldırılmıştır. Ardından elektrot yüzeyindeki kalıntıları gidermek için her bir elektrot bir saat boyunca 1 M hidroklorik asit (HCl) çözeltisine daldırılmıştır. İki bölme, reaktörün boyutuna göre dairesel bir şekle kesilmiş ve sodyum klorür (NaCl) çözeltisine 30 dk boyunca daldırılmış Ultrex CMI-7000 malzemeden yapılmış bir katyon değişim membranı ile ayrılmıştır. Böylece anot odası ve katot odası ortaya çıkarılmış silindirik tipi çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi tasarımı tamamlanmıştır [61].

Silindirik tipi çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi, geometrik şekli silindire benzeyen borular kullanılarak da tasarlanmıştır. Bu kapsamda yapılan bir çalışmada, anot ve katot odası olarak silindirik şeklinde plastik boru kullanılmıştır. Anot odası boyutu; 5 cm çap, 2,54 inç uzunluk olarak tasarlanmıştır. Katot odası boyutu; 5 cm çap, 1,27 inç uzunluk olarak tasarlanmıştır. Anot odası ve katot odası, iki kauçuk conta arasına yerleştirilen 5 cm çapında Nafion'dan yapılan proton değişim membranı kullanılarak ayrılmıştır. Hem anot hem de katot elektrot olarak katı grafit çubuklar kullanılmıştır. Anot odası, bakterilerin elektron transferi için kullanabileceği yüzey alanını artırmak amacıyla karbon keçe ile doldurulmuştur. Bu şekilde silindirik tipi çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi tasarımı yapılmıştır [62].

Silindirik yapılandırmaya sahip standart çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinin şematik gösterimi Şekil 2.10'da verilmiştir.



Şekil 2.10. Geleneksel silindirik tipi çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi [1].

Şekil 2.10'da dikkat edileceği üzere, silindir tipi çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi aynı zamanda H tipi çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi ile benzerlik göstermektedir. Bu nedenle, H tipi çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi ve silindir tipi çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinin güçlü tarafları ve zayıf taraflarının benzer olduğunu düşünüyoruz.

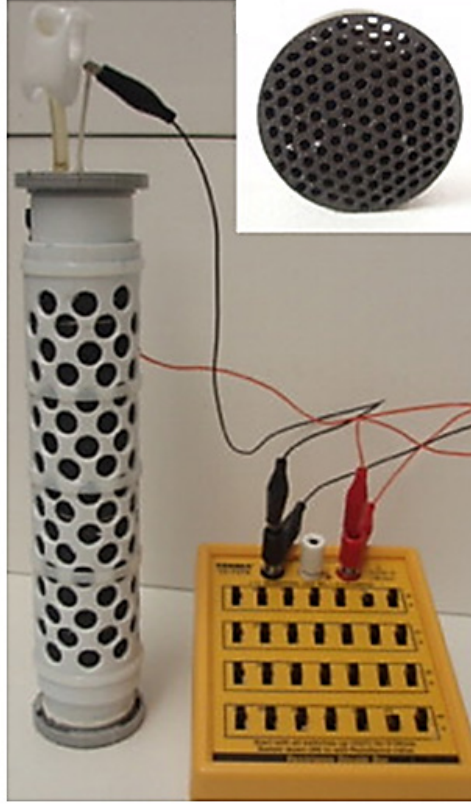
Elektrot mesafesi deneyleri, elektrotlar arasındaki en kısa mesafenin düşük iç direnç nedeniyle maksimum güç üretimi sergilediğini göstermiştir. Buradan yola çıkarak reaktör tasarımının, mikrobiyal yakıt hücrelerinde güç üretimini etkileyen en önemli faktör olduğu bildirilmiştir. Reaktör yapılandırmasının anlaşılması, daha uyumlu olmamıza ve güç üretimiyle birlikte atık suyun işletimi ve eş zamanlı arıtımı için daha az mekansal gereksinim duymamıza yardımcı olacağına inanılmaktadır [63].

2.2.3. Boru Tipi Çift Odacıklı Mikrobiyal Yakıt Hücresi

Boru tipi çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücreleri tasarımında büyük çoğunlukla plastik borular kullanılmıştır. Bu mikrobiyal yakıt hücresi ile ilgili yapılan bir çalışmada, çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi tasarımı için iki adet polivinil klorür (PVC) plastik boru kullanılmıştır. Bu boruların her biri 300 ml hacimli ve 7 cm çapındadır. Her boru, çözelti ekleme ve kablo girişleri için sırasıyla 5 ve 3 mm delikler içermektedir. Borulardan birisi anot odası olarak görev yapmaktadır. Bunun için anot odası tarafındaki delikler hava girişini önlemek için küçük bir kap ile kapatılmıştır. Katot elektrot olarak 6 cm çapında eloksallı alüminyum kullanılmıştır. Anot elektrot olarak 2x4 cm ölçülerinde katalizsiz grafit levha kullanılmıştır. Anot odası ve katot odası arasında düşük maliyetli bir malzeme olarak hidrofobik düşük yoğunluklu polietilen malzeme kullanılmıştır. Atıksu arıtma laboratuvarından alınan anaerobik anot odası tarafında organik madde içeren çözelti olarak kullanılmıştır. Katot odası tarafında elektron alıcısı olarak potasyum permanganat sulu çözeltisi kullanılmıştır [64].

Yapılan bir çalışmada, boru şeklindeki çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücreleri monolitik aktif karbon anot ve katyon değişim membranı veya anyon değişim membranı bulunan silindirik bir polipropilen tüpten (boru şeklinde) oluşuyordu ve bir katotla birleştirilmişti. 23 cm uzunluğunda ve 3,6 cm çapında olan polipropilen tüp, 2 cm aralıklarla eşit aralıklı 1 cm çapında deliklere sahipti ve delikli bölge 19x12 cm ölçülerinde bir membranla kaplıydı. Çok kanallı monolitik karbon, uzunlamasına altıgen kanallara sahip, 10 cm uzunluğunda, 2 cm çapında karbürize prizmatik polimerik bir malzemedir. Bu malzeme ekstrüzyon işlemine tabi tutulmuş ve daha yüksek elektrik iletkenliği sağlama amacıyla 1600 °C'de ısıtılma işlemine tabi tutulmuştur. Anot, polipropilen tüpe eş merkezli olarak yerleştirildi ve mikrobiyal yakıt hücresi reaktörü dikey olarak çalıştırıldı. Katot elektrotu, mikrobiyal yakıt hücresi reaktörü içinde membranla temas halinde ve dış yüzeyinde ise hava ile temas halinde olacak şekilde yerleştirilmiştir [65].

Şekil 2.11. boru şeklindeki çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi tasarımı-na dair bir örneği sunmaktadır.



Şekil 2.11. Boru şeklinde çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi örneği [65].

Yapılan bir başka çalışmada, silindirik bir cam tüp (4 cm çapında, 25 cm yüksekliğinde) ve iki boru şeklindeki elektrot düzeneği kullanılarak boru şeklinde çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi tasarlanmıştır. Anot odası, 250 mL hacminde ve toplam etkin elektrot yüzey alanı $37,7 \text{ cm}^2$ 'dir. Anot elektrot olarak kalay/bakır elek kullanılmıştır. Katot elektrot olarak 3 mm dış çaplı paslanmaz çelikten (0,5 mm tel çapı) yapılmış bir bobin yayı tercih edilmiştir. Proton değişim membranı olarak Tübüler Nafion kullanıldı. Bobin yayı proton değişim membranının içine kaydırıldı. Böylece tübüler membranın iç kısmı iki bölmeli bir mikrobiyal yakıt hücresinin katot kısmı haline getirildi. Birleştirilmeden önce, tübüler membran sırasıyla; %30 hidrojen peroksit (H_2O_2), deiyonize su, 0,5 M sülfürik asit (H_2SO_4) ve tekrar deiyonize sudan oluşan her bir çözeltide bir saat kaynatılarak ön işleme tabi tutuldu. Anot elektrodu olarak, tübüler membranın etrafına kalay kaplı bakır tel sarıldı. Tübüler membranın iç kısmı katot haznesi (iki elektrot için toplam 2,8 mL) olarak kullanıldığından,

damıtılmış su (katolit) tübüler membranın içine sürekli olarak pompalandı ve ikinci bir peristaltik pompa yardımıyla dolaştırıldı. Su, bir hava pompası kullanılarak havalandırıldı. Sıcaklık rampası deneyleri için, reaktör sıcaklığı harici bir ısıtma ceket ve ısıtılmış sirkülasyonlu su banyosu kullanılarak sabitlendi [66].

Ölçeklendirilmiş, tüp (boru) şeklindeki yapılandırmalar genellikle, anodu katottan elektriksel olarak izole etmek için bir ayırıcıyla çevrili boru şeklindeki bir anottan oluşur. Reaktörün boru şeklindeki şekli, genellikle kullanılan silindirik yapı malzemesinin bir ürünüdür. Örneğin; ölçeklendirilmiş reaktörler polivinil klorür, polipropilen, silindirik şişeler, ölçüm silindirleri, naylon boru gibi destekleyici malzemeler kullanılarak tasarlanmıştır. Bu yapılandırmada, bir katyon değişim zarı bir tüpe dönüştürülmüştür. Bu reaktörlerdeki anotlar çoğunlukla silindirik bir fırçadan (grafit veya karbon fiber) oluşur. Granüler malzeme (granüler aktif karbon veya grafit granülleri) veya düz elektrot, bir silindir haline getirilmiş bir tür iletken kumaştan (karbon kumaş, keçe veya örtü) yapılmıştır. Anotlar veya anot odası daha sonra, anodu katottan elektriksel olarak izole etmek için bir tür membran veya ayırıcı malzeme ile sarılır. Katot daha sonra ayırıcının etrafına sarılır. Literatürde, karbon kumaş, karbon fiber veya karbon örtüsü gibi temel malzemelerden oluşan ve katalizör olarak platin, manganez (IV) oksit veya aktif karbon içeren katotlar bildirilmiştir. Ender çalışmalar biyolojik olarak katalize edilmiş bir katot kullanıldığını bildirmiştir. Bunlardan biri, bildirilen tek tasarım olan grafit fiber fırça katotları kullanmıştır. Kullanılan membran veya ayırıcı malzemenin türüne bağlı olarak, elektrot/membran veya elektrot/ayırıcı yapısı, bir membran katot düzeneği veya bir bez katot tertibatı membran elektrot düzeneği olarak adlandırılmıştır. Konfigürasyon ayrıca, bir katot tüpünü çevreleyen silindirik bir anot odası ile tersine çevrilebilir [67].

Ayrıca, bazı boru şeklindeki reaktörlerde kullanılan PVC veya polipropilen borular gibi yapısal destekler, yalnızca elektrotları daha fazla ayırmakla kalmaz, aynı zamanda proton transferini de azaltarak iç direnci arttırmıştır. Delikli boruların yapısal destek olarak kullanılması, delikler nedeniyle elektrotlar arasındaki açık alan yüzdesini düşürerek proton transferi için kullanılabilir alanı azaltmıştır ve bu da mikrobiyal yakıt hücresinin elektriksel güç üretim performansını düşürmüştür. Benzer şekilde, başka bir boru şeklindeki tasarımda, membran elektrot düzeneği için yapısal destek olarak delikli bir boru kullanılmıştır. Bu destekleyici yapı katodun dış tarafında olmasına ve elektrotlar arasındaki kullanılabilir alanı azaltmamasına rağmen, oksijen indirgeme reaksiyonu için katoda ihtiyaç duyulan oksijenin temininin, delikli borunun oluşturduğu daha düşük açık alan nedeniyle muhtemelen sınırlı kalmasına sebep olmuştur. Yapısal desteklerin, gerekli elektrot etkileşimleri ve süreçleriyle etkileşimin sınırlı olacağı şekilde seçilmesi önerilmiştir. Boru şeklindeki çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi tasarımlarının çoğu çamur veya atık su ile çalışmaktadır. Geniş elektrot aralığına sahip bir boru şeklindeki yapılandır-

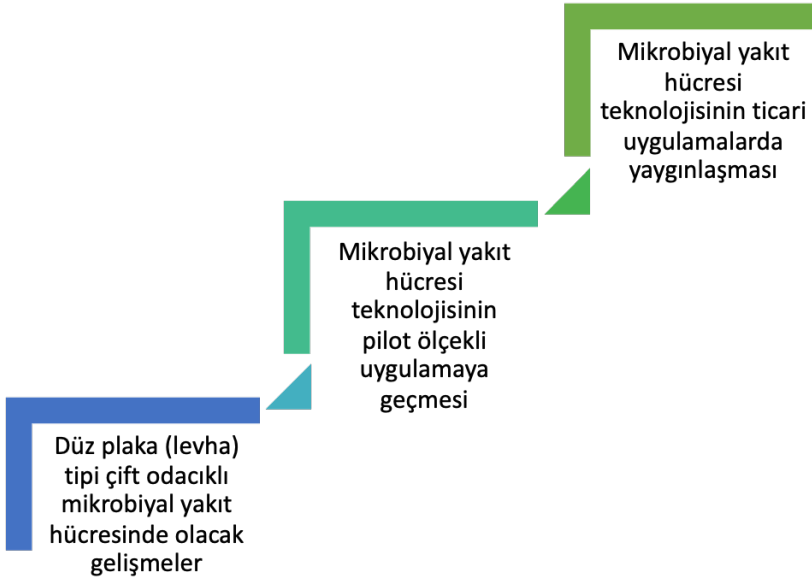
manın düşük performansını arttırmak için anot ve katot elektrotlar arasındaki mesafe azaltılmalıdır. Boru tipi mikrobiyal yakıt hücresi reaktör tasarımları, en yaygın kullanılan reaktör tasarımlarından birisidir [67].

2.2.4. Düz Plaka Tipi Çift Odacıklı Mikrobiyal Yakıt Hücresi

Düz plaka (levha) tipi çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi yapılandırılmaları çoğunlukla, anot ve katot arasına bir tür membran veya ayırıcı malzeme yerleştirilmiş dikdörtgen anot bölmelerinden oluşur. Destekleyici yapısal malzeme olarak çoğunlukla Pleksiglas veya kolayca işlenebilen başka bir plastik türü kullanılır. Bu tasarımlardaki anot ve katot elektrotlar granül grafitten, karbon keçeden, karbon kağıdından ve titanyum plakalardan/ağlardan yapılmıştır. Katottaki tepkimeyi katalize etmek için hem kimyasal hem de biyolojik katalizörler kullanılmıştır. Düz plaka tasarımlarından biri, proton değişim membranlı yakıt hücrelerinde kullanılan bipolar plaka tasarımına benzetilmektedir. Düz plaka tasarımının temel özelliği, anot ile katot arasındaki mesafenin en aza indirilmesidir. Böylece iyonik difüzyon oranlarının artırılması ve elektrot aralığının daha büyük olduğu diğer tasarımlara kıyasla iç direncin azaltılması sağlanmıştır. Düz plakalı reaktörlerde fırça anotlar kullanıldığında, katotlar fırça anotların yalnızca bir veya iki tarafına yerleştirilmiştir. Bu durum boru şeklindeki tasarımlara kıyasla düz plaka tipi çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi anot alanının verimsiz kullanılmasına sebep olur. Lakin, fırça anotlu düz plakalı mikrobiyal yakıt hücresi reaktörleri, elektrot aralığını azaltılabiliyorsa, fırça anotlu boru şeklindeki reaktörlere göre avantajlı olabilir. Ayırıcıların (veya membranların) hem daha küçük hem de daha büyük ölçekli düz plakalı mikrobiyal yakıt hücrelerinde deforme olduğu gözlemlenmiştir. Ayırıcı deformasyonu, anot bölmesi hacmini azaltabilir, elektrotlar arasındaki mesafeyi artırabilir, gazı hapsedebilir ve sonuç olarak performansı düşürebilir. Kullanılan elektrot ve ayırıcı boyutlarının küçük olması nedeniyle bu sorun, daha küçük reaktörlerde muhtemelen daha az yaygındır. Ancak reaktör boyutu arttıkça, elektrot ve ayırıcı boyutu da artacak ve bu da deformasyon olasılığını artıracaktır. Elektrot/ayırıcı yapısını korurken aynı zamanda elektrotların kullanılabilir alanını en üst düzeye çıkaran destekleyici yapıların tasarlanması gerekebilir [67].

Yakın gelecekte, düz plaka tasarımlarının ölçeklendirilmesine daha fazla odaklanılması, bu teknolojinin laboratuvarlardan pilot ölçeğe ve ötesine taşınmasında önemli ilerlemelere yol açacaktır. Dahası, bugüne kadar bildirilen en uzun çalışma yalnızca 1,25 yıl sürmüştür [67].

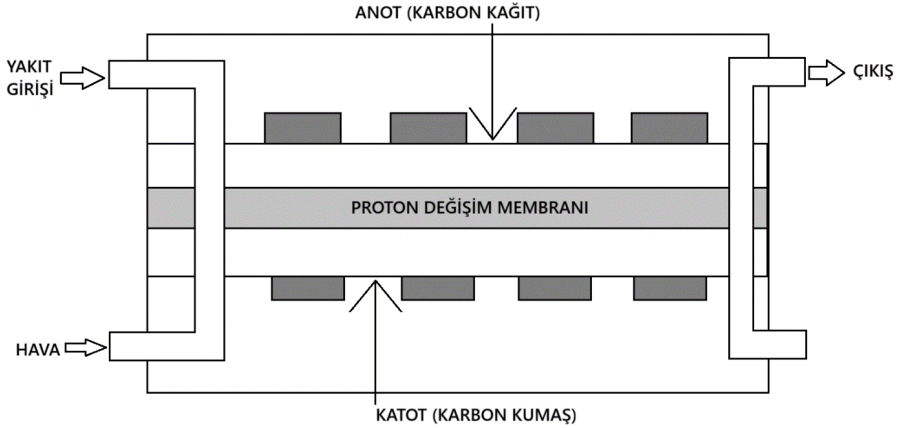
Şekil 2.12, düz plaka (levha) tipi çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinde yaşanacak gelişmelerin ve ortaya çıkacak yeniliklerin nelere sebep olacağı konusundaki öngörüler hakkında fikir sunmaktadır.



Şekil 2.12. Düz plaka tipi çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinde yaşanacak gelişmelerin olası faydalarına yönelik öngörüler [67].

Düz plaka tipi çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi; kübik, dikdörtgen veya mini kare şeklinde bir geometriye sahip olabilir. Bu mikrobiyal yakıt hücresi kimyasal yakıt hücresine benzeyen bir sistemdir. Düz plaka tipi çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinde; proton değişim membranının bir yüzüne katot elektrotu sıcak pres kullanılarak preslenir. Proton değişim membranının bir yüzüne anot elektrotu sıcak pres kullanılarak preslenir. Kübik şekilde olan düz plaka tipi çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinde anot bölmesi atık su ile beslenir ve katot bölmesi herhangi bir katolit olmaksızın hava ile beslenir. Kübik şekilde olan düz plaka tipi çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi ile diğer tipler arasındaki temel fark, küçük mesafe nedeniyle daha az iç direnç olmasıdır. Bu nedenle, bu mikrobiyal yakıt hücresinde elektriksel güç çıkışı artmıştır [68].

Düz plakalı çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi, evsel atık suyu arıtmak için tasarlanmıştır. Bu mikrobiyal yakıt hücresi, elektrot/membran düzeneği tarafından iki yarıya ayrılmış iki iletken olmayan (polikarbonat) plaka arasında oluşturulmuş tek bir kanaldan oluşmuştur. Düz plakalı çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi şematik gösterimi Şekil 2.13'te verilmiştir [69].



Şekil 2.13. Düz plaka tipi çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinin şematik gösterimi [69].

2.3. Tek Odacıklı ve Çift Odacıklı Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinin Karşılaştırılması

Onlarca yıldır, mikrobiyal yakıt hücreleri geleneksel olarak, yüksek sistem performansı gösteren melas içeren bira fabrikası atıkları, damıtma atıkları veya ham şeker kamışı atığı gibi büyük ölçekli endüstriyel atıklar da dahil olmak üzere çeşitli şeker bazlı atıkların substrat olarak kullanımını esas almaktadır. Örneğin; ham şeker kamışı atığıyla çalıştırılan 100 mL hacmindeki bir mikrobiyal yakıt hücresi 8314 mW/m^2 değerine ulaşan güç yoğunluğu sağlamıştır. İlaveten, ham damıtma atığı kullanan 2,6 L hacmine sahip bir mikrobiyal yakıt hücresi $25.194,8 \text{ mW/m}^2$ değerine varan bir güç yoğunluğu üretimi yapmıştır. Bu yüksek performanslar, mikrobiyal yakıt hücresi işletimi için gerekli olan mikroorganizmaların çoğu için optimum karbon kaynakları olan şeker içeren substratların etkinliğini vurgulamaktadır. Karmaşık atık substratlarının yüksek organik yükleme oranı, çeşitli elektrokimyasal olarak aktif mikrobiyal toplulukların gelişimini kolaylaştırarak güç çıkışında bir artışa neden olmuştur. Bu nedenle geleneksel olarak organik atıkların mikrobiyal yakıt hücresi beslemesinde organik madde kaynağı (substrat) olarak kullanılması haklı bir stratejidir [50, 70].

Büyük ölçekli üretim süreçleri, mevcut mikrobiyal yakıt hücresi teknolojilerinin etkili bir şekilde yönetmekte zorlandığı önemli miktarda atık üretmektedir. Bu da bu teknolojinin ölçeklendirilmesini zorlaştırmaktadır. Buna karşılık, evler veya küçük ölçekli tarım çiftlikleri tarafından nispeten küçük miktarlarda üretilen geleneksel olmayan atıklar, mikrobiyal yakıt hücreleri için potansiyel kaynaklar olarak önemli ilgi görmektedir. Bu nedenle, patates, avokado, muz gibi gıda atıkları ve ham insan idrarı ve hayvancılıktan elde edilen çiftlik gübresi, mezbaha atık suyu gibi atıkların mikrobiyal yakıt hücresi teknolojisi için geleneksel olmayan kaynakların geleneksel kaynaklara alternatif olarak kullanımı gündeme gelmiştir. Bu substratlar, enerji yoğun ekstraksiyon

ve kimyasal işlem gerektirmezler. Bunun için bunlar, mikrobiyal yakıt hücresi için yaygın olarak bulunan hazır hammaddeleri temsil etmektedirler. Bu substratlar, gelişmekte olan sıfır atık endüstrilerinde ve rejeneratif tarımda enerji geri kazanımı için henüz keşfedilmemiş bir potansiyele sahiptir. Geleneksel olmayan bu atıkların kimyasal bileşimi ve bileşenlerinin konsantrasyonları, anot biyofilmindeki bakteri topluluğunu ve dolayısıyla genel mikrobiyal yakıt hücresi performansını etkilemede önemli roller oynamaktadır. Bu durum, geleneksel olmayan atıkları mikrobiyal yakıt hücresi teknolojisini ilerletmek ve daha sürdürülebilir ve ölçeklenebilir çözümlere ulaşmak için önemli bir ilgi alanı haline getirmektedir [50, 70].



Şekil 2.14. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanılan geleneksel substratların faydasının şematik gösterimi [50].

Geleneksel olmayan atık kaynaklarının mikrobiyal yakıt hücrelerinde büyük potansiyel sağlayacağı umut edilmektedir. Bu nedenle bu kaynakların mikrobiyal yakıt hücreleri için substrat olarak kullanımı sonucu ortaya çıkması beklenen yararlar Şekil 2.15'te vurgulanmıştır [50, 70].



Mikrobiyal yakıt hücrelerinin
ölçeklenebilirliğine katkı sağlar



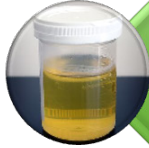
Atık yönetiminin daha etkili
olmasına katkı sağlar



Enerji yoğun ekstraksiyon ve
kimyasal işlem gerektirmezler



Daha yeni araştırma alanıdır



Doğrudan kullanıma hazır ve
yaygın bulunan hammaddelerdir



Sıfır atık endüstrilerinde ve
rejeneratif tarımda enerji geri
kazanımı için potansiyel sunarlar

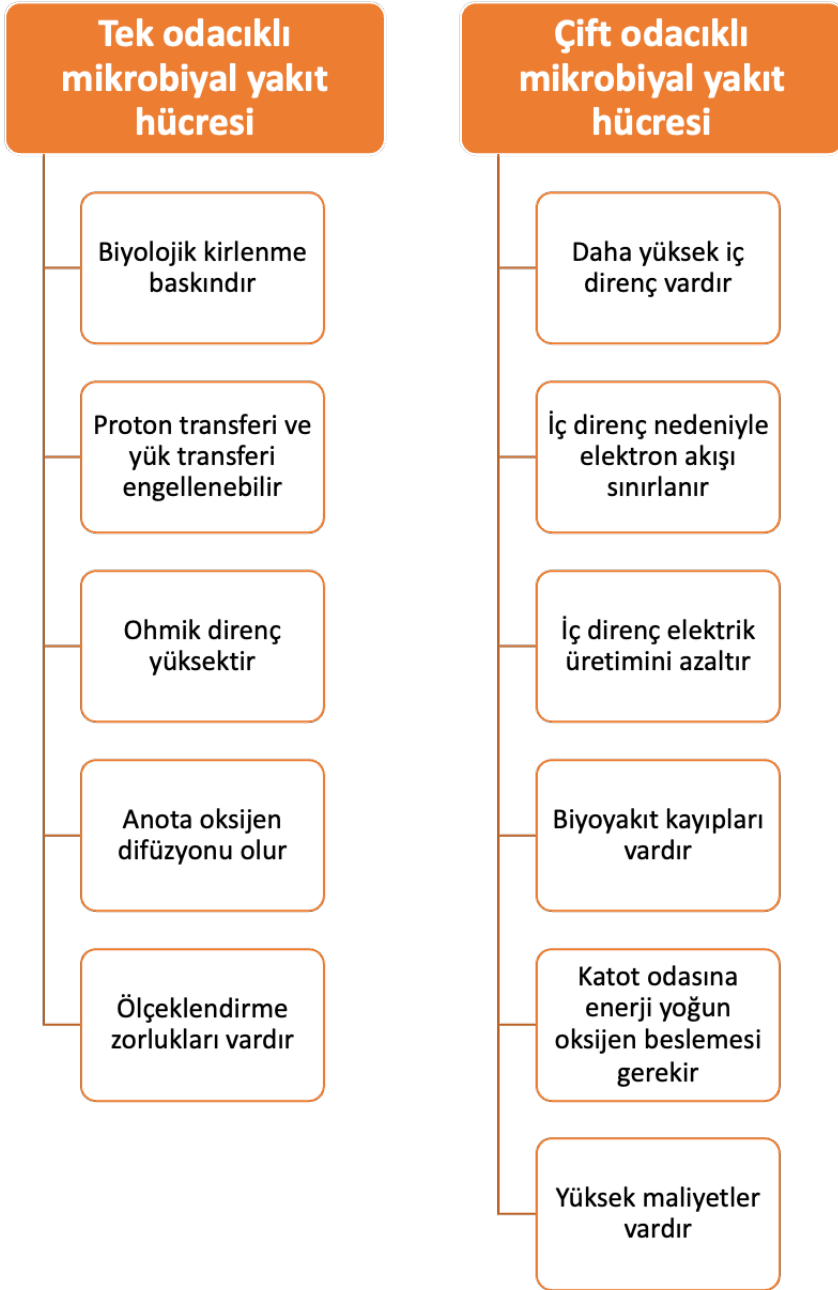
Şekil 2.15. Geleneksel olmayan atık kaynaklarının mikrobiyal yakıt hücrelerinde sağlanması beklenen yararlar [50, 70].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinin karbon nötr enerji teknolojileri konusundaki daha geniş söyleme katkıda bulunacağı öngörülmektedir. Özellikle ölçeklenebilir ve sürdürülebilir mikrobiyal yakıt hücrelerine alışılmadık atık akışlarının entegrasyonu konusunda gelecekteki araştırmalar ve pratik gelişmeler için daha fazla gayret gerekmektedir. Tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi ve çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücrelerinin faydalı taraflarının karşılaştırılması Şekil 2.16'da özetlenmiştir [50, 70].



Şekil 2.16. Mikrobiyal yakıt hücrelerinin faydalı yanlarının karşılaştırılması [50, 70].

Tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi ve çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücrelerinin zayıf tarafları, Şekil 2.17’de özetlenmiştir.



Şekil 2.17. Mikrobiyal yakıt hücrelerinin zayıf taraflarının kıyaslanması [50, 70].

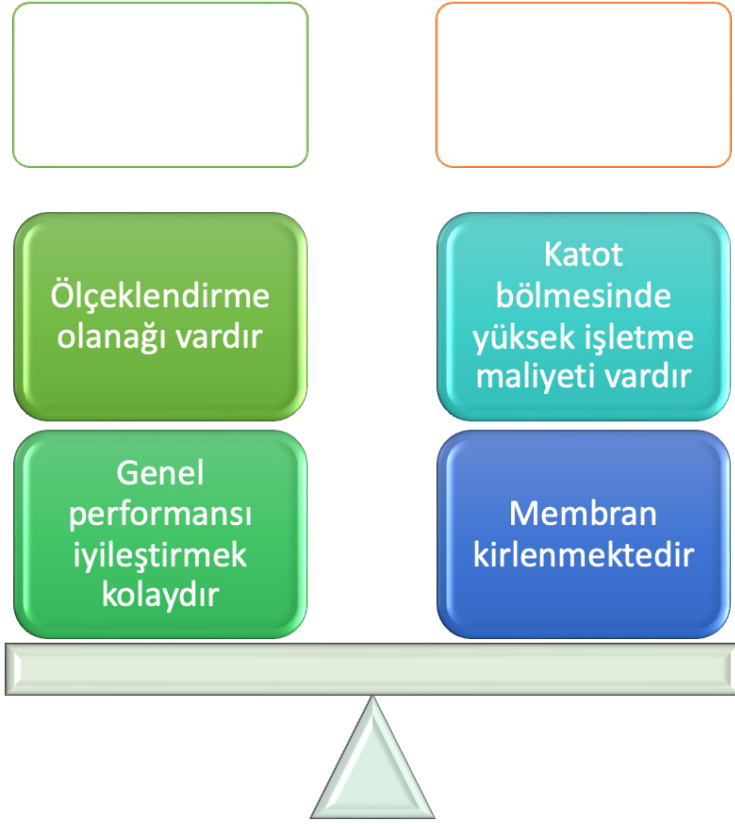
2.4. Mikrobiyal Yakıt Hücresi Reaktör Türlerinin Artıları ve Eksileri

Mikrobiyal yakıt hücreleri temel olarak tek odacıklı ve çift odacıklı olarak reaktör tipinde tanıtılmıştır. Bu tiplerin kendi içlerinde çeşitli varyasyonları mevcuttur. Bu varyasyonlarla ilişkili olan tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinin artı yönleri ve eksi yönlerinin özeti Şekil 2.18’de sunulmuştur.



Şekil 2.18. Tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinin artı ve eksi yönleri [71].

Çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinin artı yönleri ve eksi yönlerinin özeti Şekil 2.18’de sunulmuştur.



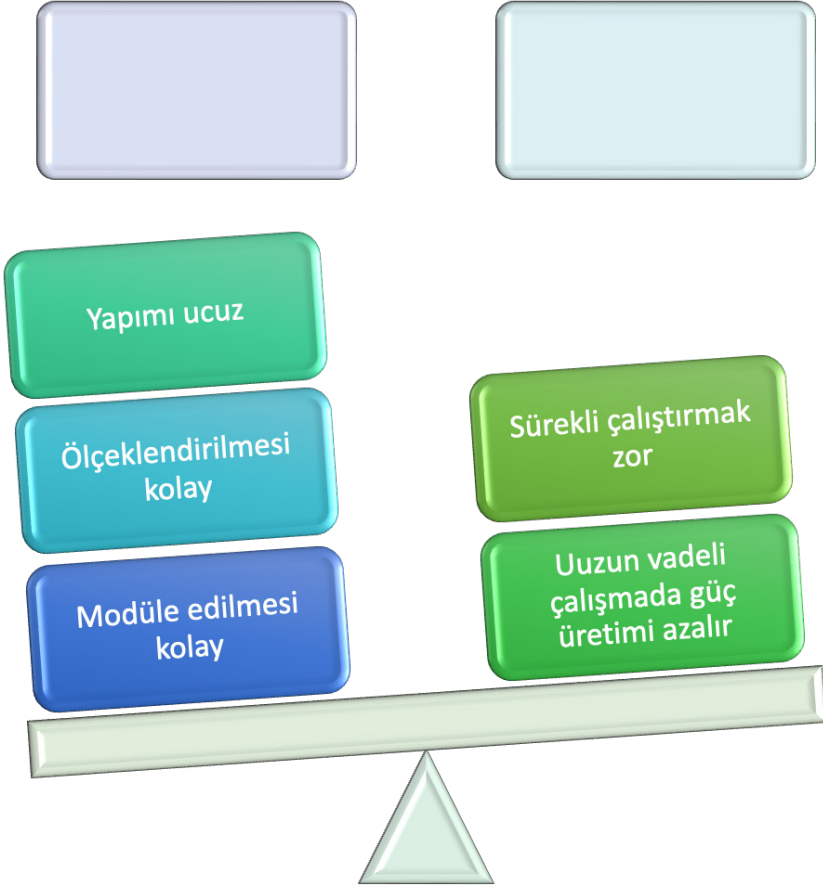
Şekil 2.18. Çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinin artı ve eksi yönleri [71].

Çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi tipi olan silindirik bir mikrobiyal yakıt hücresi tasarımından yola çıkarak ortaya çıkan yukarı akış mikrobiyal yakıt hücresi, anodu tabanda olacak şekilde yapılandırılmıştır ve üst bölümde bulunan cam veya cam yünü katmanlarıyla bölünmüştür. Alt tabaka transferi alt bölümden katoda doğru gerçekleşir ve böylece elektrik üreten ve elektron vericisi olarak sakaroz çözeltisini besleyerek atık suyu arıtan bir yukarı akışlı mikrobiyal yakıt hücresi oluşturulmuştur. Bu mikrobiyal yakıt hücresinin artı ve eksi yönleri Şekil 2.19'da özetlenmiştir [71].



Şekil 2.19. Silindir tipi çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinin artı ve eksi yönleri [71].

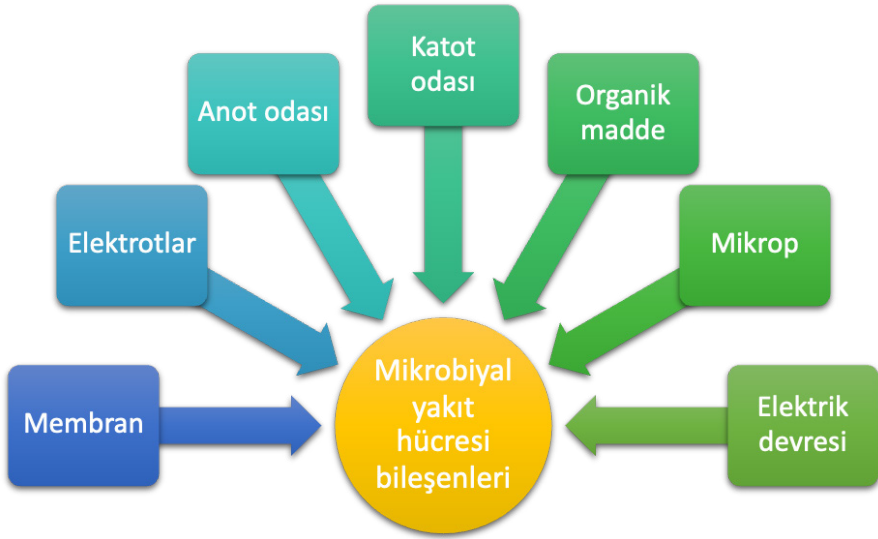
Boru tipi çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinin artı ve eksi yönleri Şekil 2.20’de özetlenmiştir.



Şekil 2.20. Boru tipi mikrobiyal yakıt hücresinin artı ve eksi yönleri [71].

3. MİKROBİYAL YAKIT HÜCRESİ BİLEŞENLERİ

Bir biyoelektrokimyasal sistem olan mikrobiyal yakıt hücreleri, elektriksel güç üretimi ile birlikte atık su arıtma tekniklerine alternatif olarak geliştirilmiştir. Mikrobiyal yakıt hücresi, atık sudaki organiklerin kimyasal enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren elektrojenik mikroorganizmalardan yararlanmaktadır. Mikrobiyal yakıt hücresi sistemleri; anot odası, katot odası, substrat (organik madde), iyon değişim membranı, mikroplar, elektrik devresi ve anot-katot odaları için elektrotlar içeren geleneksel yakıt hücresine benzer bileşenlere sahiptir [72]. Mikrobiyal yakıt hücreleri temel olarak şu bileşenleri Şekil 3.1'de özetlenmiştir.



Şekil 3.1. Mikrobiyal yakıt hücresi bileşenleri [72].

Tüm mikrobiyal yakıt hücrelerinin Şekil 3.1'de belirtilen bileşenlere sahip olması gerekmez. Mikrobiyal yakıt hücresi bileşenleri, benimsenen mikrobiyal yakıt hücresi tasarımının türüne bağlıdır. Mikrobiyal yakıt hücresi sisteminin etkili bir şekilde çalışması, çeşitli bileşenlerin yapımı için uygun malzemenin seçilmesine/kullanılmasına bağlıdır. Mikrobiyal yakıt hücresi, geleneksel yakıt hücrelerinden esas olarak katalizör (mikrop), çalışma koşulları (ortam sıcaklığı, nötr pH) ve substrat (geniş biyokütle ve atık yelpazesi) temelinde ayırt edilebilmektedir [72].

Mikrobiyal yakıt hücresi sistemlerinin elektriksel performansı, mikrobiyal yakıt hücresi bileşenleri arasındaki karşılıklı etkileşimden büyük ölçüde etkilenmektedir. Önemli iyileştirmeler hücre tasarımı, mimarisi ve montajından kaynaklanır. Bu tür gelişmeler genellikle kademeli bir evrim olarak meydana gelmektedir. Örneğin; hava-katot mikrobiyal yakıt hücreleri, oksijenin oksidasyon olarak kullanıldığı durumlarda hücre tasarımını optimize etmek için adım adım geliştirilmiştir. Temel mantık, kütle taşıma sorunlarından dolayı elekt-

roda oksijen sağlanmasındaki sınırlamaları ortadan kaldırmak için katodu en azından bir taraftan doğrudan havaya maruz bırakmaktan oluşmaktadır. Söz konusu örnekte verilen hava-katot mikrobiyal yakıt hücresi, katodun bir taraftan elektrolit üzerine bağlandığı tek odacıklı bir tasarımıdır. Bu tasarım, temel hücreden çok daha düşük iç dirence sahip bir hücre ve substrat malzemesine büyük ölçüde bağımlı olarak elektriksel güç çıkışı sağlamıştır. Bir başka örnek verilmesi gerekirse, membransız hava-katot tasarımında elektrolit bulunmamaktaydı. Bu tasarım yüksek performans ve çok daha düşük maliyetlerle elde edilmiştir. Fakat membranın yokluğunda, anot odasına önemli bir oksijen geçişi gerçekleşmiş ve katot mikroplarla kirlenmiştir. Bu da anot odasındaki substrat oksidasyonu pahasına katot üzerinde bakteri büyümesi için yayılan oksijen kotasının tüketilmesine neden olmuştur. Buna bağlı olarak kulombik verimliliğinin azalmasına neden olmuştur. Katodun bakteriyel kolonizasyonu uzun vadeli çalışmayı da olumsuz etkileyebileceği ifade edilmiştir [73].

Mikrobiyal yakıt hücresi malzemeleri ve tasarımını ele alan mimarisi, başlangıç zamanlarında bulguların düzensiz bir şekilde elde edilip raporlanması nedeniyle zahmetli bir iş olarak görülmüştür. Son zamanlarda, mikrobiyal yakıt hücresi yapısı, karakterizasyonu ve çalışma koşullarıyla ilgili standartların eksikliği devam ettiği bildirilmiştir. Mikrobiyal yakıt hücreleri birbiriyle bağlantılı çeşitli faktörler tarafından yönetilen karmaşık sistemlerdir. Örneğin; mikrobiyal yakıt hücresi performansındaki bir iyileşmenin daha iyi malzemelerden mi yoksa yeni bir mimariden mi kaynaklandığını belirlemek, sistematik bir ürün geliştirme ve/veya “deney tasarımı” için istatistiksel teknikler uygulanıp hem ana etkileri hem de kontrol parametrelerinin etkileşimlerini ayrıştırılıp değerlendirilmediği sürece zor olabilir. Bu tür yaklaşımlar, her ne kadar arzu edilir olsa da nadiren karşılaşılmakta ve kabul edilmektedir. Bu durum, büyük ve zaman alıcı deneysel çalışmalar gerektirmektedir [73].

Mikrobiyal yakıt hücresindeki anodik proseslerin “verimsizlikleri” son zamanlara kadar tespit edilmemiş veya çözülememiştir. Bu nedenle, bu konuda önemli iyileştirme alanları ortaya çıkmaktadır. Son zamanlarda, belirli koşullar altında (örneğin, başlangıçta yüksek yakıt koşulları) organik yakıtın anodofilik mikropların içinde depolanarak açlık sırasında tüketilme olasılığının olduğu vurgulanmıştır. Yapılan bir çalışmada, bir mikrobiyal yakıt hücresi tarafından üretilen akımın yaklaşık %57’sinin harici karbon kaynağının tükenmesinden sonra meydana geldiğini tahmin edilmiştir. Buna dayanarak, harici bir karbon kaynağının depolama mekanizmasının varlığı varsayılmıştır [73].

Katot malzemesi olarak nanoyapılı malzemelerin katot yüzeyinde oksijen indirgeme reaksiyonunu kolaylaştırmak için de kullanılabileceği anlaşıldıktan sonra çeşitli katalizörler yerine yüzey alanına odaklanan oksijen indirgeme aşırı potansiyelini sınırlamak için bir strateji ortaya atılmıştır. Buradan yol çıkarak, aktivasyon enerjisini bir katalizör aracılığıyla düşürmek yerine, yüksek özgül yüzey alanına sahip katalizlenmemiş bir malzeme (yani oldukça göze-

nekli granül grafit) kullanılmıştır. Böylece mikrobiyal yakıt hücresinde daha yüksek güç çıkışları elde edilmiştir [73].

Çoğu mikrobiyal yakıt hücresi tasarımı, anot ve katot bölmelerinin bir iyon değişim membranı veya tuz köprüsü ile ayrılmasını esas almıştır. İyon değişim membranının kullanımı, geleneksel yakıt hücrelerindeki benzerdir. Bir mikrobiyal yakıt hücresinde iyon değişim membranı kullanıldığında; oksijen, ferrisiyanür, diğer iyonlar veya substrat olarak kullanılan organik maddeler gibi kimyasalları geçirebileceğinin farkında olmak önemlidir. Mikrobiyal yakıt hücresinde anot ve katodu ayıran bir membranın seçimi, şu iki karşıt çıkar arasında bir tercihi temsil eder:

- i) Yüksek seçicilik: Protonlar için seçicilik ne kadar yüksek olursa, mikrobiyal yakıt hücresi o kadar iyi çalışacak ve membranın direnci o kadar düşük olacaktır;
- ii) Yüksek stabilite: Membranların kolloidal ve besin açısından zengin bir ortamda dayanıklı olması gerekir [74].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde elektriksel güç çıkışını iyileştirmek için kullanılan çeşitli elektrot malzemeleri ve bunların birçok atık su arıtımı üzerindeki etkileri birçok çalışmada incelenmiştir. Farklı elektrotların farklı davranışlar sergilediği ve elektrot modifikasyonunun mikrobiyal yakıt hücrelerinin performansını artırmak için iyi bir alternatif olduğu kanıtlanmıştır. Mevcut gelişmeler açısından bakıldığında, elektrot malzemelerinin araştırılması daha önemli ve cazip hale gelmiştir. Çünkü makul bir fiyat ve mükemmel performans, mikrobiyal yakıt hücresinin uygulama alanını büyük ölçüde genişleteceği tahmin edilmiştir [75].

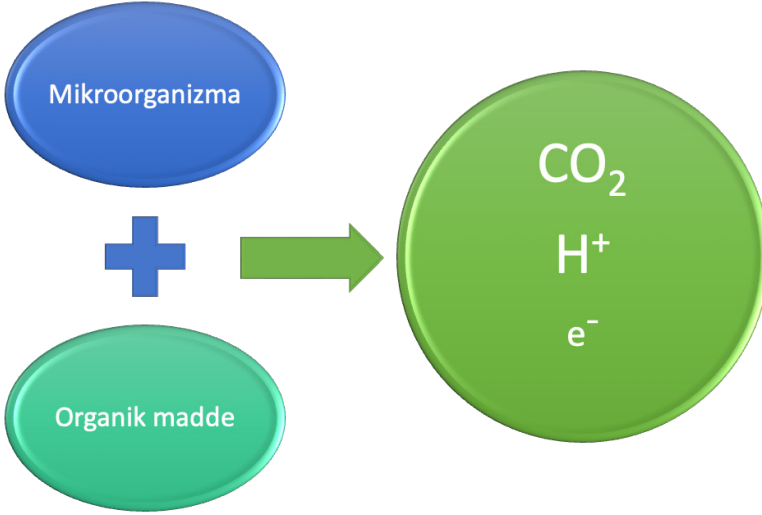
Mikrobiyal yakıt hücresi bileşenleri detaylı olarak ilerleyen bölümlerde ele alınmıştır.

3.1. Anot Odası

Anot odası (bölmesi), mikrobiyal yakıt hücrelerinin önemli bir bileşenidir. Anot odasında bulunan organik madde (substrat) bozunumu ve elektron üretiminde rol oynayan mikroorganizmalar, anaerobik koşullar altında anotta tepkimelere sebep olur. Bu tepkimeler sonucu ortaya çıkan elektronlar, anot odasındaki elektrotlara aktarılır. Buradan yola çıkarak, anot odasındaki oksijenin varlığı, mikroorganizmaların elektrik üretmesi için önemli engeller oluşturmaktadır. Ayrıca, anot odasında substratlar ve araçlar da bulunur. Anotta meydana gelen genel reaksiyonlar Denklem (3.1)'de ifade edildiği gibidir. Bu denklemde görüleceği üzere, biyobozunur organik maddeler, elektrokimyasal olarak aktif mikroorganizmalar tarafından basit moleküllere parçalanır. Bunun sonucunda, karbondioksit (CO_2), protonlar (H^+) ve elektronlar (e^-) açığa çıkar [76].



Denklem (3.1)'den yola çıkarak anot odasındaki organik maddenin mikroorganizmaların tepkimeleri sonucu bozunumunun gerçekleşmesine bağlı olarak tepkime meydana geldiği aşıkardır. Bu tepkimesin çıktısı olarak karbondioksit (CO_2), protonlar (H^+) ve elektronlar (e^-) açığa çıktığı bilinmektedir. Bu tepkime sürecini ifade eden tepkime girdi ve çıktıları Şekil 3.2'de temsili gösterim vasıtasıyla açıklanmaya çalışılmıştır.



Şekil 3.2. Mikrobiyal yakıt hücresinin anot odasındaki tepkime süreçlerinin temsili gösterimi [76].

Anot odası çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücrelerinin önemli bir bileşenidir. Tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücrelerinde odacıklar bulunmadığı için anot odası olarak adlandırılabilir bir bölme de yoktur. Anot bölmesinde genellikle; organik maddeler, mikroorganizmalar ve anot elektrotu yer almaktadır. Mikrobiyal yakıt hücresi araştırmalarında anot odasında yer alan substratlara örnek olarak; glikoz veya asetat gibi şekerler, organik asitler, nişasta ve selüloz gibi karmaşık polimerler, evsel, endüstriyel ve hayvansal atıklar verilebilir. Mikrobiyal yakıt hücreleri tarafından üretilen gücün, anottaki biyokatalizör ve katottaki oksijen indirgeme reaksiyonu için geçerli olan termodinamik kısıtlamalarla sınırlı olduğu bilinmektedir. Bu tepkimelerin koşulları, hücrenin tamamının durumundan etkilenir. Bu, hücreden akımın çekilme hızını, yaşadığı iç kayıpları veya aşırı potansiyelleri, biyokatalistin ekolojik yapısını, elektrotlardaki kimyasal ve iyonik türleşmeyi ve karıştırma ve sıcaklık gibi fiziksel süreçleri içerir. Ancak bunlarla sınırlı olmadığı ifade edilmiştir. Mikrobiyal yakıt hücresi anot bölmesinde bulunan mikrobiyal biyokatalizör, reaktörde rejenerasyon yapabilen ve makul çevre koşullarına uyum sağlayabilen sürdürülebilir bir katalizördür. Dolayısıyla, çalışma koşulları elektrokimyasal olarak aktif biyofilm topluluğu için uygunsa, sistemin performansı artacaktır. Fakat, elverişsiz koşullar düşük elektrojenik mikrobiyal aktiviteye veya hücre ölümüne yol açabilir ve muhtemelen elektrojenik olmayan türlerin hakim

olduğu biyofilm topluluklarına kaymaya neden olabilir. Bu gibi durumlarda, fermentatif veya metanojenik bakteriler elektrot üzerindeki yerleşik elektrokimyasal olarak aktif biyofilmin yerini alabileceği düşünülmektedir [77].

Çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi yapılandırması esas alınarak yapılan bir çalışmada, mikrobiyal yakıt hücrelerinin anot odasının anaerobik ortamda olması gerektiği vurgulanmıştır. Bunun sağlanması amacıyla anot çözeltisinin (1 L deiyonize suda; 4,0896 g Na_2HPO_4 , 2,544 g NaH_2PO_4 , 0,31 g NH_4Cl , 0,13 g KCl ve 12,5 mL eser metal çözeltisi ve 12,5 mL vitamin çözeltisi) tercih edilmiştir. Bu anot çözeltisi 10 dakika boyunca azot (N_2) ile yıkanmıştır. Ardından mikroorganizma aşılması (ilavesi) yapılması gerektiği ifade edilmiştir. Dahası, anot odasına aşılana aktif mikroorganizmaların faaliyetlerine devam etmesi için tek substrat olarak 300 mg/L'lik bir furfural ($\text{C}_4\text{H}_3\text{OCHO}$) çözeltisi kullanılmıştır. Söz konusu çalışma, anot odasını oluşturan mikroorganizma, çözelti, substrat, mikroorganizma ve elektrottan oluşan bileşenlerin önemini açık ortaya koymuştur [78].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinin anot bölmesi genellikle cam veya plastik malzemelerden imal edilmiştir. Anot bölmesinin diğer bileşeni olan elektrot, anot elektrotu olarak da ifade edilebilir. Bu elektrot, çoğu çalışmada karbon esaslı malzemelerden imal edilmiştir. Elektrot malzemesinin elektriksel olarak iletken olması gerekmektedir [76-78].

Şekil 3.3, mikrobiyal yakıt hücrelerindeki anot odası temel bileşenlerini göstermektedir.



Şekil 3.3. Mikrobiyal yakıt hücresi anot odasının temel bileşenleri [76-78].

Birçok mikrobiyal yakıt hücresi çalışmasında güç yoğunluğu, anot elektrotun gerçek (geometrik) yüzey alanı esas alınarak ifade edilmiştir. Bir başka deyişle, mikrobiyal yakıt hücresinin güç yoğunluğu, güç değerinin anot elektrotun geometrik yüzey alanına bölünmesiyle hesaplanmıştır. Bu, anot odası temel bileşeni olan elektrotun önemini ortaya koyan önemli bir bilgidir. Buradan hareketle, yüksek yüzey alanlı elektrotlara dayanan daha verimli bir minyatür tasarıma geçilerek daha yüksek güç üretiminin mümkün olduğuna inanılmıştır [79].

3.2. Katot Odası

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde katot odası oksijen indirgeme tepkimele-
rinin gerçekleştiği bölmedir. Çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücrelerinde katot
bölmesi vardır. Bu bölmenin içerisinde çözelti ve katot elektrotu yer alır. Tek
odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinde ise sadece katot elektrotu yer alır. Mikro-
biyal yakıt hücrelerindeki elektrokimyasal tepkime, yarı hücre indirgeme tep-
kimesi katotta gerçekleştiğinde tamamlanır. Proton değişim membranından
giren protonlar ve elektrik devresini oluşturan elektronlar katotta indirgenir.
Anottan farklı olarak, katot ortamı elektrolitler veya hava olabilir. Çeşitli çö-
zelti, çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücrelerinde yaygın olarak kullanılır. Tek
odacıklı bir mikrobiyal yakıt hücresinde ortam havadır. Atmosferik oksijen,
protonlar ve elektronlarla reaksiyona girerek su molekülleri ürettiğinde bir in-
dirgeme tepkimesi meydana gelmektedir [80]. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde
elektronlar, organik atık sudaki mikroorganizmalar tarafından ortaya çıkarılır.
Üretilen elektronlar genellikle harici bir devre aracılığıyla katoda aktarılır. Ka-
totta, protonlar ve elektronlar oksijenle reaksiyona girmek üzere katalize edilir.
Tek odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinde katot elektrotun bir tarafı, atmos-
ferdeki oksijeni kullanmaktadır. Böylece proton difüzyonuna izin veren gö-
zenekli katot elektrotlar içermektedir. Bunların çift odacıklı yakıt hücrelerine
göre ölçeklendirilmeleri çok daha basittir. Bu nedenle, son zamanlarda yaygın
olarak kullanılmış ve araştırılmıştır [81].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde çoğunlukla, anot bölmesi mikroorga-
nizmalar ve elektron vericisi görevi gören organik bir kaynak olan substrat
barındırırken, katot bölmesi bir elektrolit çözeltisiyle doldurulmuştur. Katot
çözeltileri katolit olarak da adlandırılmıştır. Yaygın kullanılan katolit örnekle-
ri; potasyum ferrisiyanür; potasyum permanganat, asetat tamponu ve sürekli
oksijen beslemeli saf sudur. En yaygın kullanılan katolit örneği ise potasyum
ferrisiyanürdür [80].

Mikrobiyal yakıt hücresi katot odasının temel bileşenleri Şekil 3.4'te ve-
rilmiştir.



Şekil 3.4. Mikrobiyal yakıt hücresi katot odasının temel bileşenleri [80, 81].

Anot ve katot bölmeleri, çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücrelerinde mevcuttur. Bu mikrobiyal yakıt hücresindeki katot odası ve anot odası, elektrik enerjisi üretmek için sürekli çalışmaktadır. Protonlar, proton değişim membranı aracılığıyla anot odasından katot odasına hareket eder. Katot, protonların su molekülleri oluşturmak üzere toplandığı oksijen bakımından zengin bir bölmedir. Çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücrelerinin reaktörlerinin etkinliği, katot odasındaki oksijen temini ve tüketimi, anot odasındaki substratın oksidasyonu, anot odasından anot yüzeyine elektron transferi ve proton değişim membranı geçirgenliği gibi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. Buradan da anlaşılacağı üzere, katot odasının mikrobiyal yakıt hücresinin performansı konusunda büyük rol oynamaktadır [76].

Mikrobiyal yakıt hücresinin katot bölümünde meydana gelen tepkimeye örnek olarak denklem (3.2) verilebilir [76].



Mikrobiyal yakıt hücresinin katot odasındaki performansı anot odasından farklıdır. Elektron alıcısının konsantrasyonu ve türü, protonların bulunabilirliği, katalizörün performansı, elektrot yapısı ve katalizörün kabiliyeti katot performansını etkiler. Oksijenin bulunabilirliği, güçlü oksidasyon potansiyeli ve toksik olmayan son ürünleri, onu katot odası için uygun bir elektron alıcısı yapar. Bazı katotlar, katodun bir tarafı katot odasıyla doğrudan temas halinde, diğer tarafı ise serbest havayla doğrudan temas halinde olacak şekilde yapılandırılmaktadır [76].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinin katot odası, cam veya plastik malzemelerden yapılmıştır. Katot odasının temel bileşeni olan katot elektrottaki yayıf

tepki, oksijenin anoda doğru difüzyonuna yol açar. Bu durumda mikrobiyal yakıt hücresinin elektrik üretim performansı düşmektedir [82].

Katot odasında kullanılan çözeltiler (katolitler) mikrobiyal yakıt hücresinin elektrik üretim performansı açısından önemli unsurlardır. Literatürde, farklı pH değerlerine sahip birkaç malzeme elektron vericisi veya elektron alıcısı olarak kullanılmıştır. Çalışmalarının çoğunda, anot bölmesinde nötr veya düşük alkali pH değerlerine (6-9) sahip çözeltiler kullanılmıştır. Bunun nedeni, nötr pH koşuluna yakın anodik ortamın kontrol edilmesinin, elektroaktif biyofilmin daha iyi işlev görmesini sağlaması olarak bildirilmiştir. Bazı araştırmacılar, anot-odasındaki mikroorganizmaların çoğunun, etkili hücre dışı elektron transferi ve elektrojenik bakteriyel büyüme nedeniyle alkali pH koşullarını tercih ettiğini öne sürmüşlerdir. Bazı araştırmacılar katot odasındaki katolitin pH değerini nötr aralıkta tutmuşlardır. Bu, katot odasında daha az sayıda proton bulunmasına neden olur. Sonuç olarak, sırasıyla harici bir devre aracılığıyla ve membran aracılığıyla anottan katoda elektron ve proton transferi zayıftır. Ancak, bazı araştırmacılar da, katot odasında daha yüksek proton (H^+) bulunabilirliği sağlayan asidik pH'a sahip çözelti kullanmışlardır. Burada, protonlar katodik indirgeme reaksiyonunda bir reaktan olarak hareket etmiştir. Dolayısıyla, harici bir devre aracılığıyla anottan katoda aktarılan elektron sayısı artmıştır. Bu nedenle, katot odasında yeterli protonun bulunması, proton ve elektronların taşınmasındaki sorun da azalmış ve membranın neden olduğu ohmik kayıplar dengelenmiştir. Bundan dolayı, iç direnç (ohmik) kayıpları azalmış ve bunun sonucunda mikrobiyal yakıt hücresinin güç yoğunluğu artmıştır. Yapılan bir çalışmada anot odası ve katot odası çözeltilerinin pH değerlerinin en uygun değeri 1 ila 10 arasında, Taguchi yöntemi kullanılarak araştırılmış ve sonuçlar ANOVA ile değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, mikrobiyal yakıt hücresi için uygun parametre koşulu olarak anot odasının pH değerinin 8, katot odasının pH değerinin ise 1 olması gerektiğini ortaya çıkarmıştır. İlave, mikrobiyal yakıt hücresinin en uygun pH koşullarında sürekli çalışması sağlandığında daha iyi mikrobiyal aktivite gösterdiği anlaşılmış ve anottan katoda doğru proton transferinin daha iyi sağlandığı bildirilmiştir. Buradan yola çıkarak, mikrobiyal yakıt hücresi katot odasında yeterli protonun bulunması, protonların taşınmasından kaynaklanan sınırlamayı ortadan kaldırdığı ifade edilmiştir. Dahası, membranın neden olduğu ohmik kayıpların dengelendiği vurgulanmıştır. Yapılan çalışmaya dayanarak, mikrobiyal yakıt hücresinin anot odasındaki az alkali koşulların ve katot odasındaki yüksek asidik koşulların, mikrobiyal yakıt hücresinin daha yüksek güç yoğunluğu sağlaması için uygun olduğu kanaatine varılmıştır [83].

Tablo 3.1, mikrobiyal yakıt hücresi çalışmalarında kullanılan çeşitli katolit örneklerini sunmaktadır.

Tablo 3.1. Mikrobiyal yakıt hücresi çalışmalarında kullanılan çeşitli katolit örnekleri [83].

Katot odası çözeltisi (Katolit)
Potasyum permanganat (KMnO_4)
Deniz suyu
Potasyum fosfat
Ferrisiyanür + fosfat tamponu
Damıtılmış su + fosfat tamponu
Tampon çözelti
Fosfat tampon çözeltisi
Potasyum ferrisiyanür
Sodyum klorür (NaCl) çözeltisi

Mikrobiyal yakıt hücresinde hava-katot tepkimesi nedeniyle su üretimi için proton kaybından dolayı katolit pH'nın artmasıdır. Yapılan bir çalışmada, tampon kullanılmadan pH değerinin tek bir döngüde 8,5'e yükselebileceği bildirilmiştir. Başka bir çalışmada, iki odacıklı sistemlerde kostik baz çözeltisinin ($\text{pH} > 12$) ortaya çıktığı bildirilmiştir. Nötr bir pH değerini korumak için çoğu çalışmada, tampon çözelti kullanılmıştır. Ancak çok yüksek maliyetli uygulamalar nedeniyle daha büyük ölçekli sistemlerde uygulanabilir olmadığı belirtilmiştir. Yapılan bir çalışmada, yeni bir tür elektron alıcısı olarak hizmet etmek üzere sodyum perkarbonat ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}_2$) adı verilen basit bir katolit kullanılarak pH dalgalanmalarına karşı koyabilen sürdürülebilir bir doğal tamponlama yapılmıştır. Tepkimeler sonucu ortaya çıkan peroksit maddesinin, hava katotlarıyla ilişkili biyolojik kirlenme sorunlarını önlediği, daha güvenli ve transfer edilen elektron molü başına popüler katolit seçenekleri arasında en düşük maliyete sahip olduğu bildirilmiştir. Bu nedenle, sodyum perkarbonat malzemesi modüler sistem ölçeklendirmesi için iyi bir aday olarak tanıtılmıştır [84].

3.3. Elektrotlar

Mikrobiyal yakıt hücresinin elektriksel çıkış gücü temel olarak;

- ✓ Substrat bozunma hızına,
- ✓ Bakterilerden anota elektron transfer hızına,
- ✓ Devre direncine,
- ✓ Sıvıdaki proton kütle transferine,
- ✓ Elektrotun performansına
- ✓ Harici çalışma koşullarına gibi faktörlere bağlıdır [75].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinin ana bileşenlerinden birisi de elektrot malzemeleridir. Elektrotlar veya bir başka deyişle elektrot malzemeleri mikrobiyal yakıt hücrelerinin fiyatını belirler. Bu nedenle, elektrotların mikrobiyal yakıt hücreleri ile atık su arıtma maliyetini etkilediği sonucu da çıkarılabilir. Tüm bunlar, elektrot malzemeleri konusunda araştırmaların giderek ilgi çekmesine ve artmasına yol açmıştır. Yapılan araştırmalar neticesinde, elektrot hazırlıkları ve tasarımlarıyla ilgili çok sayıda çaba sarf edilmiştir. Farklı elektrot malzemeleri fiziksel ve kimyasal özelliklerde değişiklik gösterir. Bu değişikliklere örnek olarak; yüzey alanı, elektrik iletkenliği ve kimyasal kararlılık verilebilir. Bu nedenle mikrobiyal bağlanma, elektron transferi, elektrot direnci ve elektrot yüzey reaksiyon hızı üzerindeki etkileri de farklılık gösterir. Bu nedenle, mikrobiyal yakıt hücrelerinin performansını optimize etmek ve geliştirmek için uygun elektrot malzemelerini seçmek ve geliştirmek büyük önem taşımaktadır [75]. Elektrot, mikrobiyal yakıt hücresinin performansını ve maliyetini belirlemede anahtar bileşendir. Elektrot tasarımı, mikrobiyal yakıt hücrelerini uygun maliyetli ve ölçeklenebilir bir teknoloji haline getirmedeki en büyük zorluk olarak dile getirilmiştir. Mikrobiyal yakıt hücrelerindeki elektrot malzemeleri bazı genel özelliklere ve ayrıca kendi öz özelliklerine sahiptir. Tüm elektrot tipleri için, temel malzemeleri genellikle iyi iletkenliğe, iyi kimyasal kararlılığa, yüksek mekanik mukavemete ve düşük maliyete sahip olmalıdır [85].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanılan elektrotların sahip olması gereken temel özellikler Şekil 3.5'te özetlenmiştir.



Şekil 3.5. Mikrobiyal yakıt hücrelerindeki elektrotların sahip olması gereken temel özellikler [75,85].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde her elektrot grubu için bazı özel gereksinimler vardır. Bu elektrot gruplarından birisi olan biyoelektrotlar yalnızca bir iletken olarak değil, aynı zamanda bir bakteri taşıyıcısı olarak da işlev görür. Biyoelektrotların sahip olması gereken temel özellikler şunlardır [85]:

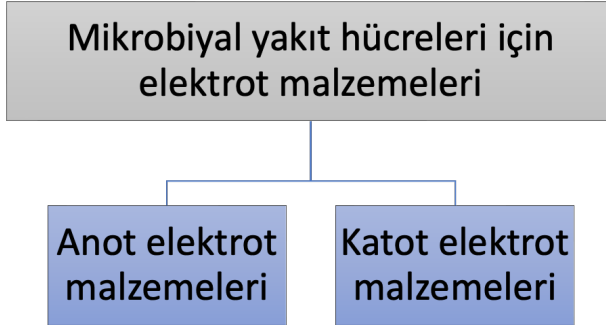
- Yüksek yüzey pürüzlülük,
- İyi biyouyumluluk,
- Bakteri ile elektrot yüzeyi arasında verimli elektron transferidir [85].

Mikrobiyal yakıt hücrelerindeki elektrot malzemelerinin bazı özel yüzey özellikleri, yüksek biyokatalitik aktivite için gereklidir. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde elektrotlarda bakteriyel yapışmayı ve elektron transferini iyileştirmek için, elektrot yüzey modifikasyonu yeni bir ilgi konusu haline gelmiştir. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde daha yüksek güç çıkışı sağlamak için elektrotlarda katalizör bulunmaktadır. Örneğin; elektrotlu malzemesi için katalizörlü elektrotlar, bir temel malzeme, bir katalizör, bir bağlayıcı ve su geçirmez bir kaplamadan oluşmaktadır. Burada, malzeme özellikleri ve işlevleri her parça için farklıdır. Temel malzeme genellikle yalnızca destekleyici malzeme ve akım toplayıcı olarak işlev görmektedir. Yüksek iletkenlik ve mekanik dayanım bunun için kritik öneme sahiptir. Fakat bakteri yapışması için özel bir gereklilik

yoktur. Hava-katotlar için bir katalizör önemlidir. Ancak katalizör olmazsa olmaz bir gereklilik değildir. Gerekirse, katalizör bir bağlayıcı ile alt tabaka yüzeyine immobilize edilmektedir ve su kaybını önlemek için katoda düzenli olarak hidrofobik bir kaplama eklenmektedir. Hava-katotların maliyetini düşürmek için katalizör gerektirmeyen aktif karbon gibi birkaç oldukça spesifik malzeme geliştirilmiş ve raporlanmıştır. Sulu hava-katot için yalnızca temel malzeme, katalizör ve bağlayıcı gereklidir [85].

Elektrot yapılandırması (konfigürasyonu), mikrobiyal yakıt hücrelerini yüksek performanslı ve ölçeklenebilir bir teknoloji haline getirmenin bir başka büyük zorluğu olarak karşımıza çıkmıştır. Kullanılan elektrotlar, genellikle yapılandırmasına göre sınıflandırılmıştır. Elektrot yapılandırması; düz elektrot ve üç boyutlu elektrot olmak üzere iki sınıfta ele alınmıştır. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde biyoelektrotlar için iyi bir yapılandırma yapılmasının amacı bakteri tutunması için geniş bir yüzey alanı sağlanması ve verimli akım toplanmasını garantilemektir. Düz elektrot yapılandırması, hava-elektrot kullanan mikrobiyal yakıt hücreleri için daha yaygındır. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanılan hava-elektrot bir kimyasal katalizör içerdiğinde, oksijenin katalizör, hava ve suyu içeren üç fazlı bir tepkimeye indirgenmesini sağlamak için etkili bir yapılandırmanın gerekli olduğu bildirilmiştir [85].

Mikrobiyal yakıt hücreleri için elektrot malzemeleri genellikle iki sınıfta incelenmektedir. Bunlar Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. Mikrobiyal yakıt hücreleri için elektrot malzemelerinin sınıflandırılması [86].

3.3.1. Anot Elektrot Malzemeleri

Mikrobiyal yakıt hücreleri için uygun anot elektrotlarının tasarımı, mikrobiyal yakıt hücrelerinin gerçek dünyada uygulanmasını genişletmek için kritik öneme sahiptir. Son yıllarda mikrobiyal yakıt hücreleri için yüksek verimli elektrot malzemelerinin geliştirilmesinde muazzam bir ilerleme kaydedilmiştir. Bazı çalışmalarda, bir mikrobiyal yakıt hücresinin temel bileşeninin anot olduğu ifade edilmiştir. Çünkü anot elektrot, mikroorganizmaların “canlı biyokatalizörler” olarak işlev gördüğü bir biyofilm olarak büyüdüğü yerdir. Bu nedenle, anot elektrota biyoanot elektrot da denilmiştir. Mikrobiyal yakıt hü-

resi performansı büyük ölçüde bu canlı biyofilme bağlıdır. Bu nedenle, anot elektrotta sağlam bir elektrokimyasal olarak aktif biyofilm geliştirilmelidir. Anot elektrot mimarilerini optimize etmek için mikrop-elektrot etkileşimlerinin önceden anlaşılması kritik öneme sahiptir. Bu kriterler; yüzey pürüzlülüğü, yüzey kimyası, malzeme türü, gözeneklilik ve hidrofilité olarak sıralanabilir [86].

Mikrobiyal yakıt hücreleri için uygun anot elektrot tasarımı genellikle iki sınıfta incelenmiştir. Bunlar;

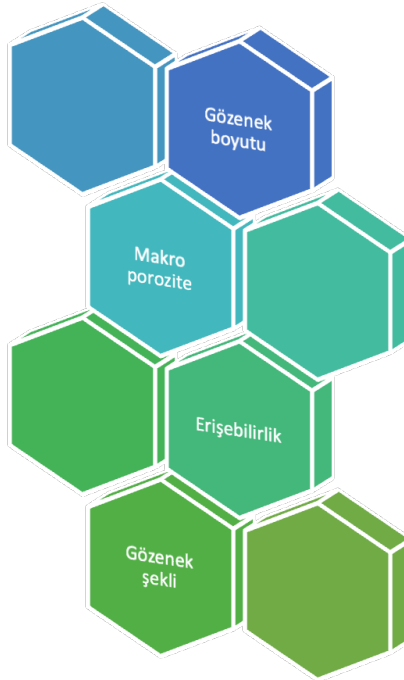
1) Yapısal tasarım

2) Yüzey tasarımı/modifikasyonu olarak belirtilmiştir [86].

Anot elektrotların yapısal tasarımı ile amaçlananlar şunlardır [86]:

- Tıkanma sorunun olmadan iç kolonizasyon ve sürdürülebilir çalışma için uygun makroskobik gözenekli elektrot tasarlamak,
- Yüksek mikrobiyal erişilebilir özgül yüzey alanı (m^2 veya m^3 cinsinden) sağlamak,
- Yüksek hacimli akım yoğunluğu (A/m^3) sağlamak.

Anot elektrotun yapısal tasarımı sürecinde etkili olan temel parametreler Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Anot elektrotun yapısal tasarımı sürecinde etkili olan temel parametreler [86].

Mikrobiyal yakıt hücresi için anot elektrotun yüzey tasarımı/modifikasyonu sürecinde amaçlananlar şöyledir [86].

- Mikrobiyal bağlanma ve hücre dışı elektron transferi için afinite özelliği sağlayan elektrot imal etmek,
- Gerçek elektrot yüzey alanına dayalı yüksek akım yoğunluğu (A/m^2) sağlamak,
- Yüksek hacimli akım yoğunluğu (A/m^3) sağlamaktır.

Mikrobiyal yakıt hücrelerinin anot elektrotu için yüzey tasarımı/modifikasyonu sürecinde etkili olan temel parametreler Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.8. Anot elektrotun yüzey tasarımı/modifikasyonu sürecinde etkili olan temel parametreler [86].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinin anot elektrotunun modifikasyonu için uygulanan yöntemlerden birisi de elektrokimyasal oksidasyon tekniğidir. Bu teknik, elektrot malzemesi modifikasyonu için yeni ortaya çıkan bir yaklaşım olarak bildirilmektedir. Elektrokimyasal oksidasyon tekniği ile anot elektrotun modifikasyonu, kimyasal yaklaşımlara benzer şekildedir ve bu teknikte fonksiyonel gruplar (örneğin, karboksil), elektrot yüzeylerine eklenir. Bunun amacı, biyofilm oluşumunu artırmak ve mikroorganizmalardan anot yüzeylerine elektron taşınmasını kolaylaştırmaktır. Diğer modifikasyon teknikleriyle (örneğin; amonyak işlemi, kompozit kaplama yöntemi ve ısıtma işlemleri) karşılaştırıldığında, elektrokimyasal oksidasyon tekniği, elektrot malzemelerini modifiye etmek için hızlı ve kullanışlıdır. Elektrokimyasal oksidasyon

teknığının başlıca avantajları nispeten düşük sıcaklıklar ve kısa işlem süreleri sağlamasıdır. İlâveten, elektrokimyasal modifikasyonun, yaygın ve düşük maliyetli kimyasal bileşiklerin (örneğin; nitrik/sülfürik asit, amonyum nitrat ve amonyum sülfat) kullanımıyla gerçekleştirilebileceği ve böylece malzemelerin genel maliyetini etkilemeyeceği belirtilmiştir [87].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinin anot elektrotlarının modifikasyonunu kapsayan bir çalışmada, anot elektrot olarak karbon kumaş tercih edilmiştir. Karbon kumaş, 3 saat boyunca asetonda bekletilmiş, ardından deiyonize suyla yıkanmıştır. Sonra, 120°C sıcaklıkta 2 saat boyunca kurutulmuştur. Bu aşamaya kadar olan süreç modifikasyon için hazırlık süreci idi. Karbon kumaş anot elektrotun elektrokimyasal modifikasyonu, ortam sıcaklığında iki elektrotlu bir düzenekte gerçekleştirilmiştir. Bu düzenekte, karbon kumaş çalışma elektrodu olarak kullanılmıştır. Grafit çubuk ise karşıt elektrot olarak kullanılmış ve her iki elektrot arasındaki mesafe 2 cm olarak ayarlanmıştır. Çalışma elektrotu ve karşıt elektrottan oluşan elektrokimyasal sisteme elektroliz akımı 1,25 mA/cm² olacak şekilde 30 dakika boyunca elektrik enerjisi verilmiştir. Bu elektrokimyasal sistemde, elektrolit çözeltileri olarak; nitrik asit + sülfürik asit, amonyum nitrat ve amonyum sülfat kullanıldı. Bu sayede anot elektrotu modifiye etme işleminin başarıyla yapılması sağlandı. Böylece modifikasyon işlemi gerçekleştirilmiş oldu. Modifiye edilmiş anotlar daha sonra üç kez deiyonize suyla yıkandı, 120°C sıcaklıkta 30 dakika boyunca kurutuldu ve mikrobiyal yakıt hücresinde anot elektrot olarak kullanıldı [87].

Mikrobiyal yakıt hücresi anot elektrotunun modifikasyonu için yapılan örnek bir işlemin iş akış şeması Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9. Anot elektrotunun modifikasyonu için yapılan örnek bir işlemin iş akış şeması [87].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde yaygın olarak kullanılan anot elektrot malzemelerine örnek olarak aşağıda sıralanan karbon esaslı malzemeler verilebilir [88]:

- ✓ Karbon kağıdı
- ✓ Karbon kumaş
- ✓ Aktif karbon kumaş
- ✓ Karbon keçe
- ✓ Aktif karbon fiber keçe
- ✓ Grafit keçe
- ✓ Tungsten karbür
- ✓ Grafit folyo vb. yer almıştır.

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde yaygın olarak kullanılan anot elektrot malzemelerine örnek olarak verilen karbon esaslı elektrot malzemeleri önemli özellikler sağlamaktadır. Karbon esaslı elektrot malzemelerinin sağladığı özelliklere örnek olarak; kararlı olmaları, nispeten ucuz olmaları ve iyi iletkenlik göstermeleri verilebilir. Bu iyi özelliklere rağmen, karbon esaslı elektrot malze-

melerinin doğal olarak hidrofobik karakterleri nedeniyle mikrobiyal yapışma güçlü bir şekilde meydana gelmediği bildirilmiştir. Yani mikrobiyal yapışma için bu elektrot malzemelerinin uygun değil olmadığı bildirilmiştir. Bu da zayıf elektron transfer kabiliyetine neden olur ve mikrobiyal salgılamadan kaynaklanan malzemeler tarafından elektrot yüzey kirlenmesi sorununu arttırır. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde yaygın olarak kullanılan anot elektrot malzemelerine örnek olarak verilen karbon esaslı malzemelere yeni bir seçenek olarak uygun maliyetli malzemeler kullanılarak bir anot geliştirilmesi büyük önem arz etmektedir. Aynı zamanda, yaygın olarak kullanılan karbon esaslı anot elektrot malzemelerine yeni bir seçenek olarak geliştirilecek olan anot elektrot malzemelerinin mikrobiyal gelişme/bağlanmayı, substrat metabolizmasını ve hücre dışı elektron transferini arttırmaya yardımcı olması gerekmektedir. Bu sayede mikrobiyal yakıt hücresi performansını ve uygulanabilirliğini arttırmaya katkı sağlayacağına inanılmaktadır. Sonuç olarak mikrobiyal yakıt hücresinin önemli bileşeni olan anot elektrotun iyileştirmelerini sağlayacağı hedeflenmektedir [88].

Karbon esaslı anot elektrot malzemeleri, özellikleri ve zayıf yanları Şekil 10'da özetlenmiştir.

Malzeme adı	• Karbon kağıdı • Karbon kumaş • Aktif karbon kumaş • Karbon keçe • Aktif karbon fiber keçe • Grafit keçe • Tungsten karbür • Grafit folyo
Özellikleri	• Kararlıdır • İyi iletkenidir • Nispeten ucuzdur
Zayıf tarafları	• Hidrofobik karakter • Zayıf mikrobiyal yapışma • Zayıf elektron transferi

Şekil 3.10. Karbon esaslı anot elektrot malzemeleri, özellikleri ve zayıf yanları [88].

Son zamanlarda mikrobiyal yakıt hücresi çalışmalarında anot elektrot için kullanımı araştırılan malzemelerden birisi de karbon nanotüplerdir. Karbon nanotüp, gelecek vaat eden bir elektrot malzemesi olarak tanıtılmıştır. Karbon nanotüp bazı çalışmalarda mikrobiyal yakıt hücrelerinde anot elektrot değiştirici olarak kullanılmıştır. Karbon nanotüp malzemesinin dikkat çeken özellikleri şunlardır [88]:

- Geniş yüzey alanına sahip silindirik şekilli bir karbon malzemesidir
- Kimyasal olarak inettir
- Mekanik olarak kararlıdır
- Mükemmel elektriksel iletkenliğe sahiptir.

Mikrobiyal yakıt hücreleri ile ilgili yapılan bir çalışmada, karbon esaslı malzemelerden birisi de grafen adı verilen malzemedir. Grafen, mikrobiyal yakıt hücrelerinin geliştirilmesine çeşitli yönlerden fayda sağlayabilecek, üstün fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip, gelişmekte olan bir malzeme olarak tanıtılmaktadır. Mikrobiyal yakıt hücresi için grafen esaslı anotların sağlayacağı faydalar olarak şunlar belirtilmiştir [89]:

- Elektron transfer verimliliğinde artış sağlayabilir
- Daha yüksek özgül yüzey alanı sağlayabilir
- Daha aktif mikrop-elektrot-elektrolit etkileşimi sağlayabilir
- Mikrobiyal yakıt hücresi performansını arttırabilir.

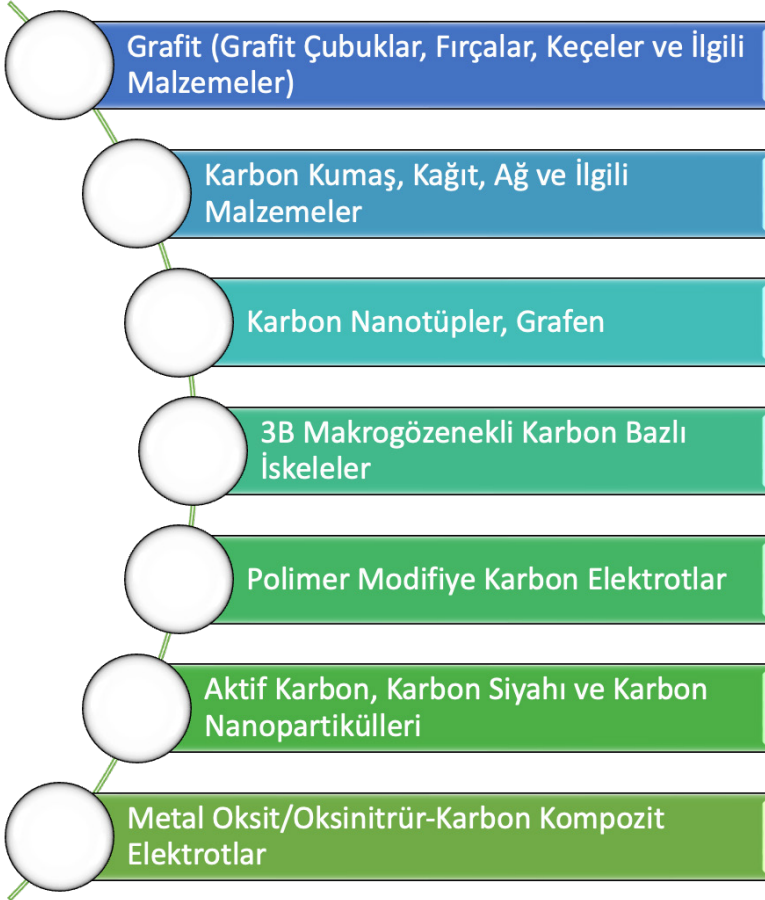
Grafen bazlı malzemeleri içeren erken bir mikrobiyal yakıt hücresi çalışmasında, grafen sentezinde yaygın bir öncül olan grafen oksit anot olarak incelenmiştir. Döngüsel voltametri sonuçları, grafen oksit nanobantlarının daha yüksek sitokrom (redoks aktif proteinler) tepkisi verdiğini ve bunun da daha düşük aktivasyon enerjisi, yani daha düşük bir potansiyel kaybı gösterdiği ortaya konulmuştur. Grafen oksit bir yalıtkan malzeme olarak kabul edilmektedir ve yalnızca indirgendikten sonra grafen benzeri iletkenlik göstermektedir. Bu nedenle araştırmacılar, artan elektrokimyasal aktiviteyi malzeme yüzeyindeki büyük miktardaki fonksiyonel gruplara bağlamışlardır. Grafen oksit malzemesinin özellikleri, polipirölün iletkenliğinden ve grafen oksit malzemesinden gelen fonksiyonel grupların elektrokimyasal aktivitesinden yararlanmak üzere tasarlanmış bir polipiröl/GO kompoziti oluşturularak mikrobiyal yakıt hücresinde anot elektrot olarak incelenmiştir. İncelemenin sonuçlarına göre, kompozit indirgenmiş grafen oksit ve saf polipiröl karşılaştırıldığında, kompozit indirgenmiş grafen oksit gözle görülür derecede daha yüksek bir güç yoğunluğu sağlamıştır. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi ayrıca ohmik dirençte hafif bir azalma ve yük transfer direncinde önemli bir azalma olduğunu ortaya koymuştur [89].

Malzeme bilimindeki gelişmelerle birlikte, grafen malzemesi grafen oksit malzesinin indirgenmesiyle kolayca elde edilebilmektedir. Nihayetinde, çeşitli yöntemlerle grafen malzemeleriyle modifiye edilmiş anot elektrotları mikrobiyal yakıt hücreleri için araştırılmıştır. En basit yöntem, grafeni doğrudan anot elektrotlarına kaplamaktır. Buna örnek olarak; paslanmaz çelik fiber keçe üzerine grafen kaplama yapılması verilebilir. Aktif karbon ve karbon nanotüplerle karşılaştırıldığında, grafen kaplı anot, döngüsel voltmetride dikkate değer ölçüde yüksek elektrokimyasal tepki ve en düşük polarizasyon direncini göstermiştir. Grafen anodunun yük transfer direnci karbon nanotüp anoduna kıyasla daha yüksek ölçülmüştür. Buna rağmen bu, nispeten daha düşük bir heterojen elektron transferini düşündürmektedir [89].

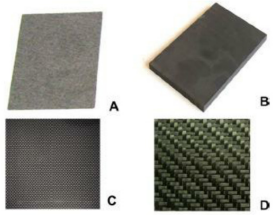
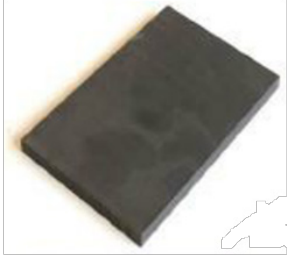
2015 yılında yayınlanan bir makale çalışmasında, grafenin biyoyoumluluğu henüz kesin bir sonuca bağlanmamış olduğu bildirilmiştir. Buna rağmen mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanılan grafen anodunun mikrobiyal metabolizmayı hücre dışı elektron transferini destekleyecek şekilde değiştirdiği bildirilmiştir. Yapılan bir çalışmada, grafen biriktirilmiş bir karbon kumaş anot kullanırken yüksek tepe akımı ve daha düşük tepe ayrımı elde etmişlerdir. Daha önce tartışıldığı gibi, bu sonuçlar kolaylaştırılmış bir hücre dışı elektron transferini göstermiştir. İlginç bir şekilde, tepe akımı tarama hızı veya tarama hızının kareköküne göre çizildiğinde, sırasıyla aracılı ve doğrudan elektron transferini temsil eden, grafen anotunun uyguladığı pozitif etkinin aracılı hücre dışı elektron transferine kıyasla doğrudan hücre dışı elektron transferinde daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir. Bu bulgu, anot yüzeyinde gözlemlenen yüksek miktarda biyokütle ile birlikte, ekzoelektrojenlerin hücre dışı elektron transferi yollarına grafen malzemelerini entegre ettiğinin göstergesi olabilir. Benzer bir sonuç, yapılan bir başka çalışmada da çıkarılmıştır. Söz konusu çalışmada dış zar c tipi sitokrom ile ilişkili döngüsel voltametri yanıtı, mikrobiyolojik olarak indirgenmiş bir grafen/*Shewanella* biyofilminde tespit edilmiş ancak saf bir biyofilmden tespit edilmemiştir. Bu da yüksek oranda entegre bir mikrop/elektrot hibritini göstermektedir. Dahası, elde edilen kompozitin 3B makrogözenekli yapısı, biyokatalizör ve substrat arasında iyi bir etkileşim sağlamıştır. Önemli elektron transfer mekanizmalarından biri olan iletken pililerin geliştirilmesinin şimdiye kadar raporlanmamış olması dikkat çekicidir. Hipotez olarak, grafen bazlı elektrotun biyoyoumluluğu ve gözenekli yapısı, iletken pililerin oluşumu için elverişli olabilir ve mikrop-elektrot etkileşimini daha da kolaylaştırabilir. Grafen malzemelerinin pili oluşumu üzerindeki etkilerinin anlaşılması, grafenin mikrobiyal yakıt hücresinde biyo-elektrot malzemesi olarak uygulanmasını önemli ölçüde ilerletebilir [89].

Son yıllarda yapılan araştırmalar neticesinde, mikrobiyal yakıt hücrelerinde anot olarak kullanılan karbon malzemeler, oldukça belirgin grafitten

çeşitli morfolojilerdeki daha az belirgin karbonlu malzemelere kadar çeşitlilik gösterir. Karbon nanotüpler, grafen ve bunların kompozitleri ile çeşitli nanogözenekli karbonlar da uygulanmıştır. Dahası, heteroatom katkılı veya yüzey fonksiyonlu karbon malzemeler araştırılmıştır. Ayrıca, karbonlu malzemelerden amorf karbona, turbostratik karbon/grafite ve son olarak ideal grafite doğru yumuşak bir geçiş olduğu ve bunun aslında herhangi bir karbon malzemesini oldukça benzersiz kıldığı da belirtilmelidir. Buna rağmen, burada tanımlanan karbon malzemeleri, ilgili yayınlarda adlandırıldıkları gibi yapı ve morfolojilerine göre, ticari grafit ve karbon malzemelerle başlayarak nanoboyutlu karbon allotroplarına ve son olarak karbon kompozitlerine göre kategorize edilmiştir. Bu, Şekil 3.11’de verilmiştir [90].



Şekil 3.11. Mikrobiyal yakıt hücresi anot elektrotlarında kullanılan karbon esaslı malzemeler [90].

Malzeme adı	Görüntüsü
Karbon kağıdı	
Grafit levha	
Karbon kumaş	
Karbon örgü	
Granüler grafit	

Granüler aktif karbon	
Karbon keçe	
Ağsı camsı karbon	
Karbon fırça	

Şekil 3.12. Mikrobiyal yakıt hücresinde kullanılan karbon esaslı anot elektrotlar [91].

Mikrobiyal yakıt hücresi gibi bir elektrokimyasal sistemde elektrot direncinin artması, hücre voltajının azalmasına ve dolayısıyla güç çıkışının azalmasına yol açar. Mikrobiyal yakıt hücresinin bu güç kaybı, küçük ve laboratuvar tabanlı sistemler için düşük görülebilir. Ancak daha büyük ölçekli bir sistemde oluşturacağı etki, elektrokimyasal performansın tamamen çökmesine neden olabilir. Bu nedenle, karbon elektrotlara bir seçenek olarak metalleri mikrobiyal yakıt hücreleri için elektrot malzemeleri olarak düşünmek mantıklı görülmüştür. Periyodik tablodaki elementlere bakıldığında, metallerin çeşitliliği dikkat çekmektedir. Buna rağmen, yalnızca çok sınırlı sayıda metal anot malzemesi olarak uygun görülmüştür. Metal (veya alaşım), biyoelektrokimyasal

sistemin operasyonel potansiyel penceresinde elektrokimyasal olarak inert olmalıdır. Bu da elektrokimyasal olarak soy olması veya elektrokimyasal olarak pasifleştirilebilmesi anlamına gelmektedir. Buna uygun olarak ilk akla gelen metaller, altın ve platin grubudur. Bu soy metaller, tanımlanmış metal yüzeyleri yüksek derecede elektrokimyasal geri dönüşüme izin verdiği için temel biyo-elektrokimyasal sistem araştırmalarında sıklıkla elektrot olarak kullanılmıştır. Ancak bunların yüksek fiyatları, büyük teknik sistemlerde kullanılmalarına izin vermemiştir [92].

Bir başka açıdan bakıldığında, kompakt bir oksit tabakası (pasifleştirme tabakası) metali daha fazla oksidasyondan koruduğu takdirde, ucuz temel metaller (veya alaşımları) potansiyel olarak anot malzemesi olarak kullanılabilir. Bir örnek olarak; mikrobiyal yakıt hücreleri için anot malzemesi olarak önerilen paslanmaz çelik verilebilir. Bu tür elektrotların bir dezavantajı, pasifleştirici oksit tabakasının neden olduğu ve genellikle elektron transferinde güçlü bir geri döndürülemezliğe yol açan ek dirençtir [92].

Soy metaller ve temel metaller arasında, bir mikrobiyoloğun bir biyoelektrokimyasal sistem için elektrot malzemesi olarak büyük olasılıkla düşünmeyeceği metaller vardır. Bunlar; gümüş ve bakır metallerdir. Bu metallerin, “uzun süreli inkübasyondan sonra genellikle canlı mikroorganizmaların geri kazanılmadığı” doğal antimikrobiyal malzemeler olduğu bilinmektedir. Antimikrobiyal etkiye genellikle oligodinamik etki denir. Bu, oksidasyon üzerine metal yüzeyinden serbest kalan eser miktardaki metal iyonlarının antimikrobiyal etkisine dayanır. Gümüş ve bakır standart potansiyelleriyle nispeten asil dirler ve son derece iyi elektrik iletkenleridirler. Dolayısıyla, bakırın iletkenliği polikristalin grafitten yaklaşık 900 kat daha iyidir. Bu da mikrobiyal biyoelektrokimyasal sistemin iç direncini önemli ölçüde azaltmaya ve gerekli elektrot malzemesi miktarını önemli ölçüde azaltmaya olanak tanır [92].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanılan bazı metal elektrotların standart elektrot potansiyelleri (E^0) Şekil 3.13’te verilmiştir.

Altın	• $E^0_{\text{Au/Au}^+} = 1,69 \text{ V}$
Demir	• $E^0_{\text{Fe/Fe}^{2+}} = -0.41 \text{ V}$
Gümüş	• $E^0_{\text{Ag/Ag}^+} = 0,8 \text{ V}$
Bakır	• $E^0_{\text{Cu/Cu}^{2+}} = 0,35 \text{ V}$

Şekil 3.13. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanılan bazı metal elektrotların standart elektrot potansiyelleri [92].

2018 yılında yapılan bir çalışmada, yüksek elektrik iletkenliği özellikleri nedeniyle metallerin mikrobiyal yakıt hücreleri için uygun bir anot malzemesi olarak kabul edildiği ifade edilmiştir. Söz konusu çalışmada, anot olarak yalnızca birkaç tür metal kullanılmış olup bu metaller şunlardır [93]:

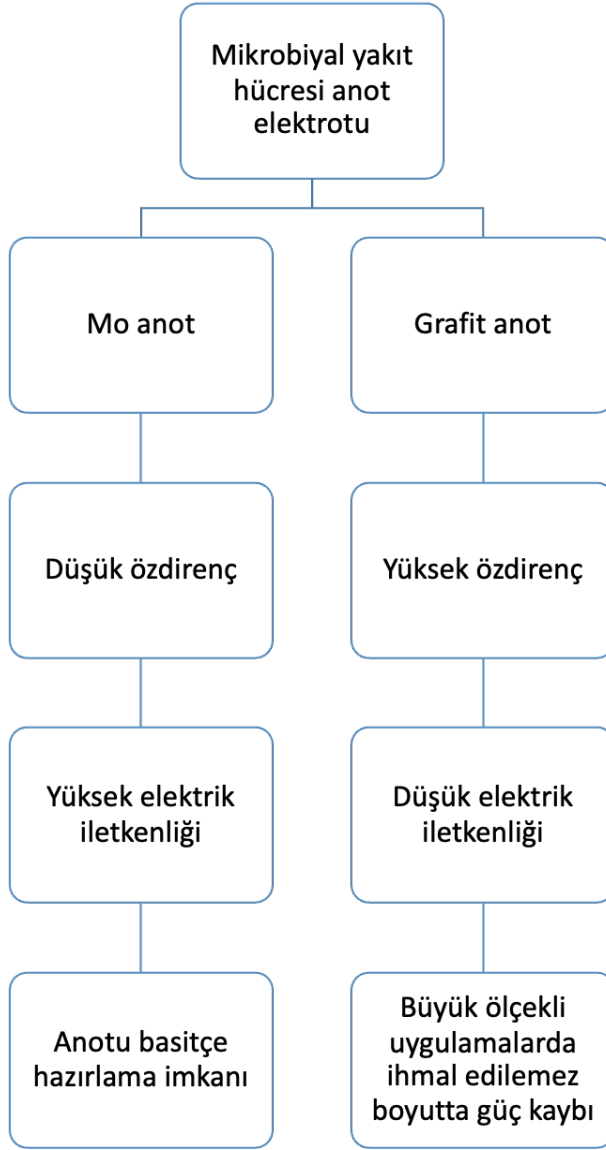
- Alüminyum (Al),
- Titanyum (Ti),
- Demir (Fe),
- Nikel (Ni),
- Bakır (Cu),
- Çinko (Zn),
- Zirkonyum (Zr),
- Niyobyum (Nb),
- Molibden (Mo),
- Gümüş (Ag),
- İndiyum (In),
- Kalay (Sn),
- Tantal (Ta),
- Tungsten (W).

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde anot olarak molibden kullanımının araştırıldığı bir çalışmada, anot yapısal olarak oldukça basit olduğu bildirilmiştir. Üstelik, molibden anotun; Mo keçe, Mo ağ ve Mo levha gibi istenen formlara şekillendirilerek kolayca hazırlanabilir olduğu vurgulanmıştır. Mo malzemenin anot olarak kullanıma hazırlanması için katalizör kaplama gibi karmaşık bir işleme gerek olmadığı belirtilmiştir. Varsayılan katalitik aktiviteye sahip MoO_3 tabakası, malzeme yüzeyinde havanın varlığında doğal olarak oluşmaktadır. Mo, soy metaller olan Pt ve Au'nun kadar pahalı bir metal değildir. Mo metalinin emtia fiyatı Cu, Ni ve Co metalleri karşılaştırılabilir düzeyde olduğu ifade edilmiştir [93].

Mikrobiyal yakıt hücresinde Mo anot hazırlamanın basitliği, pratik bir bakış açısından ince yapı anotlarına göre bariz bir avantajdır. Mo anodunun bir diğer avantajı, karbon bazlı anotlarla karşılaştırıldığında yüksek iletkenliğidir. Mo ve diğer metallerin özgül elektrik özdirenci, grafitinkinden çok daha düşüktür. Bu da, mikrobiyal yakıt hücresinin daha düşük bir iç direnca sahip olmasına ve daha yüksek elektriksel güç çıkışı sağlamasına olanak tanımıştır [93].

İletkenliği ve basit yapısı nedeniyle Mo anotunun büyük ölçekli uygulamalar mikrobiyal yakıt hücresi için kullanımı ümit verici olduğu vurgulanmıştır. Mo metalinin emtia fiyatı, karbon malzemesi grafitin fiyatından daha yüksektir. Japonya'da üretilen Mo ağının fiyatı 1400 ila 4000 ABD Doları/m² civarındadır. Mikrobiyal yakıt hücresi anot elektrotları için karbon kumaşın fiyatı ise 1100 ila 3300 ABD Doları/m² aralığındadır. Buradan anlaşılabileceği üzere, Mo metali ve karbon kumaşın fiyatı karşılaştırılabilir düzeydedir. Dahası, Mo, 5 µm kalınlığında çok ince bir film haline getirilebilir ve buhar biriktirme yoluyla paslanmaz çelik gibi ucuz akım toplayıcılarını çok ince bir şekilde kaplanabilmektedir. Bu tekniklerin, anot hazırlamada Mo kullanımını azaltarak genel maliyette düşüş sağlayabileceği ifade edilmiştir [93].

Mikrobiyal yakıt hücresi için anot elektrot olarak molibden metal malzemelerin kullanımı durumunda ortaya çıkmış olan bulgular ve karbon esaslı malzemelerden birisi olan grafit malzemenin anot olarak kullanılması durumunda ortaya çıkmış olan bulgular Şekil 3.14'te karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.14. Mikrobiyal yakıt hücresi için Mo anot ve grafit anodun sağladığı etkilerin karşılaştırılması [93].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanılan bir başka metal elektrot malzemesi de paslanmaz çeliktir. Paslanmaz çelik malzemenin mikrobiyal yakıt hücresinde anot elektrot olarak kullanımının sebepleri olarak dayanıklı olması, ticari olarak temin edilebilir olması, korozyona dirençli olması, karbonlu malzemelerden daha ucuz olması ve mikrobiyal yakıt hücrelerinin ölçeklendirilmesi için bir dizi ekonomik ve mekanik çözüm sunabilmesi ifade edilmiştir.

Bu özellikleri nedeniyle paslanmaz çelik mikrobiyal yakıt hücreleri için elektrot olarak umut verici bir anot malzemesi olarak tanıtılmıştır. Paslanmaz çelik, mikrobiyal yakıt hücreleri için özellikle yüksek potansiyellerde karbon bazlı malzemelerden daha iyi bir performans göstermiştir. Ancak, paslanmaz çelik malzemenin mikrobiyal yakıt hücresinin anot elektrotu olarak performansını artırmak için ele alınması gereken dezavantajlar vardır. Bunların en önemlileri şunlardır [94]:

- Paslanmaz çeliğin pürüzsüz yüzeyi nedeniyle biyofilm yapışmasının engellenmesi,
- Paslanmaz çelik yüzeyinde mevcut olan yarı iletken özellikteki pasif filmin biyoyumluluğu azaltılması,
- Paslanmaz çelik yüzeyindeki yarı iletken pasif filmin elektriksel iletkenliği azaltılmasıdır.

Bu sorunları çözmek için paslanmaz çelik elektrotun yüzeyi için çeşitli yüzey modifikasyon işlemleri yapılmıştır. Bu işlemlere örnek olarak şunlar verilebilir [94]:

- Asit işlemi,
- Mekanik modifikasyon,
- Karbon modifikasyonu,
- Alev oksidasyonu,
- Kompozit modifikasyonu,
- Paslanmaz çelik köpük veya elyaf keçe kullanımıdır.

Mikrobiyal yakıt hücresinde paslanmaz çelik elektrotun kullanımını konu alan bir çalışmada, alev ile yüzeyi oksitlenmiş paslanmaz çeliğin yüzey pürüzlülüğü sağladığı, elektrokimyasal aktiviteyi arttırdığı ve biyoyumluluğu arttıran hematit düğümlerinin ortaya çıkmasını sağladığı anlaşılmıştır. Çıplak paslanmaz çelik ve karbon bez anotlarının performanslarının kıyaslandığı bir mikrobiyal yakıt hücresinde çıplak paslanmaz çelik ve karbon bez anotlarının sırasıyla kullanımı durumunda elektriksel güç çıkışı sırasıyla %184 ve %24 artmıştır. Yani paslanmaz çelik, karbon bez anotlara kıyasla mikrobiyal yakıt hücresinde daha yüksek elektriksel güç çıkışı sağlamıştır [94].

Mikrobiyal yakıt hücresinde paslanmaz çelik kullanımını araştıran çalışmalara göre, paslanmaz çeliğin verimli bir anot olabilmesi için biyofilm büyümesini, kararlılığını ve elektrokimyasal aktivitesini artırmak gerekmektedir. Bunun için yüksek yüzey pürüzlülüğü ve uygun yüzey bileşimi gereklidir. Bu bilgilerden yola çıkarak yapılan bir çalışmada, paslanmaz çelikte pürüzlülüğün etkisini incelemek için, banyo içeriğini optimize ederek anodizasyon yoluyla 3 boyutlu (3D) nanogözenekli bir paslanmaz çelik anot başarıyla üretilmiştir. 3D

gözenekli tabakanın varlığının, mikrobiyal yakıt hücresinin yüksek elektriksel güç çıkışı koşullarında bile biyofilm büyümesini ve kararlılığını arttırdığı görülmüştür. Anot biyofilminin aktivitesi ve kararlılığı, mikrobiyal yakıt hücreleri tarafından üretilen gücü kontrol etmektedir. Yapılan çalışmada, hem biyofilm büyümesini hem de destek elektroduna yapışmasını artırmak için mikrobiyal yakıt hücrelerinde anot malzemesi olarak 3D nanogözenekli paslanmaz çelik kullanılmıştır. Bu, mikrobiyal yakıt hücrelerinin anot biyofilminin katalitik aktivitesini ve kararlılığını arttırmıştır. Tavlama atmosferinin değiştirilmesinin paslanmaz çelik performansı üzerindeki etkisi incelenmiş ve yüzey elemanlarının oksidasyon durumlarındaki değişimle ilişkilendirilmiştir. Paslanmaz çeliğin anodizasyondan önce veya sonra tavlama, paslanmaz çelik yüzeyinde daha fazla biyoyumlu bileşen bulunmasına olanak tanımıştır. Bu nedenle, biyofilm büyümesine büyük katkıda bulunduğu bulunmuştur [94].

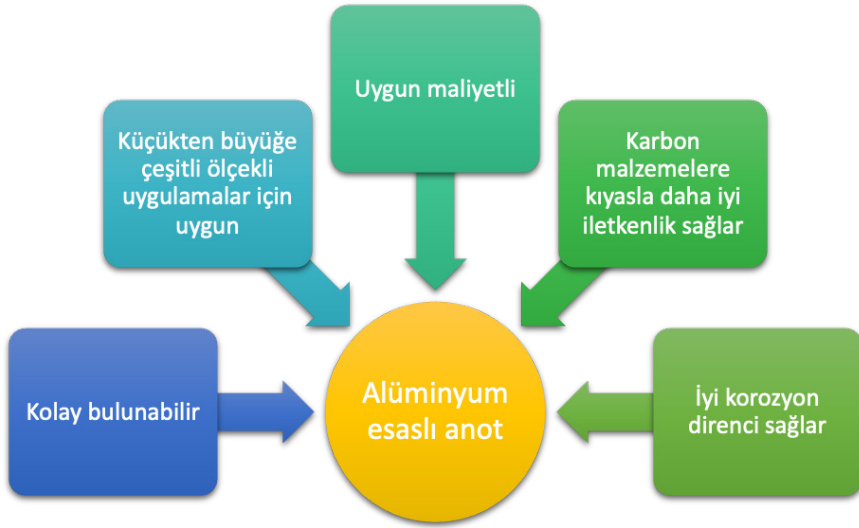
Mikrobiyal yakıt hücresi için anot elektrot olarak kullanılan metal malzemelerden birisi de alüminyum metalinden imal edilen alüminyum alaşımı malzemelerdir. 2013 yılında yapılan bir çalışmada, mikrobiyal yakıt hücresi çalışmalarında anot elektrot olarak alüminyum alaşımlı ağ ve alüminyum alaşımlı ağ kompozit karbon kumaş kullanılmıştır. Bu anot elektrot malzemelerinin bulunduğu mikrobiyal yakıt hücresi tarafından üretilen elektriksel güç karbon kumaş elektrot kullanan bir mikrobiyal yakıt hücresi ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, alüminyum alaşımlı örgü kompozit karbon kumaş elektrot kullanıldığı mikrobiyal yakıt hücresinin alüminyum alaşımlı örgü elektrot kullanılan mikrobiyal yakıt hücresine ve karbon kumaş kullanılan mikrobiyal yakıt hücresine kıyasla sırasıyla, 1497 ve 132,4 kat daha yüksek değerde elektrik enerjisi ürettiğini göstermiştir. Buradan anlaşılabileceği üzere, alüminyum alaşımlı örgü kompozit karbon kumaştan yapılmış elektrot, mikrobiyal yakıt hücresi gücünü önemli ölçüde arttırmaktadır [95].

2021 yılında yayınlanmış bir çalışmada, grafit anodun biyoyumluluğu alüminyum levha kadar iyi olmadığı bildirilmiştir. Burada, anot malzemesinin iletkenliğinin, optimize edilmiş performans için anahtar faktör olduğu sonucuna varılmıştır. Çünkü elektron transfer hızının, anot malzemesinin yüzey yapısına büyük ölçüde bağlı olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca, yapılan çalışma, anot malzemelerinin gözenekliliğinin ve yüzey pürüzlülüğünün mikrobiyal topluluk bolluğunu arttırabileceğini ifade etmiştir [96]. Buradan hareketle, yüzey pürüzlülüğüne sahip alüminyum alaşımı levhaların mikrobiyal yakıt hücresi için karbon esaslı malzemelerle rekabet edebilecek seviyede potansiyel sunduğu düşünülmektedir.

Yapılan bir başka çalışmada, mikrobiyal yakıt hücresi için anot elektrot olarak alüminyum kullanımı, anotta verimli elektron transferi için gerekli olan iyi elektriksel iletkenlik sağlamıştır. Alüminyum daha geniş yüzey alanlarına sahip anot olarak kullanılabilir. Bu sayede, mikrobiyal topluluklar için daha fazla bağlanma noktası sağlamış, elektron transferini ve güç üretimini

arttırmıştır. Alüminyum ayrıca korozyon direncini artıran pasif bir oksit tabakası oluşturmaktadır. Alüminyum uygun fiyatlı ve yaygın olarak bulunabilen bir malzeme olarak tanıtılmıştır. İlaven, alüminyum korozyona karşı dirençli bir malzeme olduğu için mikrobiyal yakıt hücresi sistemlerinin işlevselliğine ve verimliliğine katkıda bulunmuştur. Bu nedenlerden ötürü, alüminyum anot çeşitli tiplerdeki mikrobiyal yakıt hücrelerinden tutun da büyük ölçekli mikrobiyal yakıt hücresi uygulamalarına kadar pratik bir seçim haline gelmiştir [97].

Mikrobiyal yakıt hücresi için alüminyum veya alüminyum alaşımlarının anot elektrot olarak kullanımı sonucu sağlanan faydalar Şekil 3.15'te özetlenmiştir.



Şekil 3.15. Mikrobiyal yakıt hücresi için alüminyum veya alüminyum alaşım anot elektrotunun sağladığı önemli faydalar [95-97].

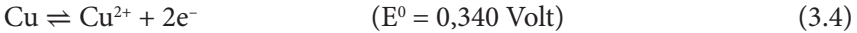
Daha yüksek elektriksel çıkış gücüne ve daha ucuz elektrotta sahip bir mikrobiyal yakıt hücresi tasarlanması amacıyla kullanılan anot elektrot örneklerinden birisi de çinko metalidir. Yapılan bir çalışmada çinko metali kullanılarak yapılan örgü anot elektrotları kullanılmış ve diğer karbon türevi elektrotlara kıyasla daha iyi performans elde edilmiştir. Çinko metali hem asitlerle hem de alkalilerle tepkimeye giren amfoterik bir metal olduğu için her türlü ortamda çalışma kabiliyetine sahiptir. Ayrıca, Zn iyi bir indirgeme potansiyeline sahiptir. Çinkonun indirgeme potansiyeli denklem (3.3)'te verilmiştir [98].



Yapılan bir çalışmada, iki tip anot elektrot (çinko levha ve grafit çubuk) kullanılarak evsel atık sudan elde edilen mikrobiyal yakıt hücresi toplu sisteminde biyoelektrik üretimi karşılaştırılmıştır. Araştırma, laboratuvarında üç gün boyunca mikrobiyal yakıt hücresi sistemi tarafından üretilen voltajı doğ-

rudan ölçerek gerçekleştirilmiştir. Söz konusu araştırmanın sonuçlarına göre, değerlendirilen günler boyunca çinko levha anot elektrotlu mikrobiyal yakıt hücreleri en yüksek 970 mV değerinde voltaj üretmiştir. Grafit çubuk anotlu mikrobiyal yakıt hücreleri ise en yüksek 880 mV voltaj üretmiştir. Bu bulgular, çinko levha elektrotlu mikrobiyal yakıt hücrelerinin atık sudan sürdürülebilir biyoelektrik üretiminin anahtarı olabileceğinin işareti olarak kabul edilmiştir. Yapılan araştırma, çinko levha elektrotlu bir mikrobiyal yakıt hücresi sisteminin biyoelektrik üretmek için yüksek potansiyele sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bir başka deyişle, anot elektrot malzemesi olarak çinko levha kullanılan mikrobiyal yakıt hücrelerinin kullanılmasına ilişkin yapılan araştırmanın önemli bulgusuna göre, çinko anot elektrotlu mikrobiyal yakıt hücresi atık sudan sürdürülebilir biyoelektrik üretiminin anahtarı olabilir [99].

Mikrobiyal yakıt hücresi için anot elektrot olarak denenen metal malzemelerden birisi de bakır malzemedir. Yapılan çalışmalarda, bakır malzemenin, anot olarak ilginç bir seçim olduğu vurgulanmıştır. Çünkü bakır korozyona uğrayabilir ve bu da bakır iyonlarının mikroorganizmalar için toksik olmasından dolayı akımı (ve elektriksel gücü) artırabilir veya azaltabilir. Yani, metal anot elektrotun korozyonu akım üretimini çeşitli yollarla etkileyebilir. Akım, metal korozyonundan veya yüzey alanındaki artışlardan kaynaklanan abiyotik akım üretimi nedeniyle artabilir. Bakır metalinin sulu çözeltide, 25°C sıcaklıkta, korozyonu standart hidrojen elektrotu (NHE) esas alındığında denklem (3.4)'teki gibidir [100].



Denklem (3.4)'te sulu çözeltide bakırın standart hidrojen elektrotuna göre elektrot potansiyeli 0,340 V iken asetat oksidasyonu için ise -0,3 V değerindedir. Yapılan bir çalışmada, mikrobiyal yakıt hücresi için bakır anot kullanıldığında 40 W/m² değerinde çok yüksek bir güç yoğunluğu üretilmiştir. Bu güç yoğunluğu değeri, literatürde bildirilen diğer değerlerden önemli ölçüde (10-40 kat) daha yüksek olduğu için önemli bir gelişme olarak ifade edilmiştir. Buna rağmen, bakır korozyona uğrayabilir. Korozyon nedeniyle bakır iyonlarının mikroorganizmalar için toksik olmasından dolayı akımı (ve gücü) akımı azaltabilir. Bakır anotlarla yapılan testlerde, korozyon sürecinin başlaması durumunda mikrobiyal yakıt hücresindeki bakteri büyümesinin engellendiğini, bunun muhtemelen elektrot korozyonundan kaynaklanan çözünmüş bakırın toksisitesinden kaynaklandığı bildirilmiştir. Bu sonuçlar, bakır elektrotlarının mikrobiyal yakıt hücrelerinde anot olarak kullanılmaması gerektiğini göstermektedir. Bu nedenle, mikrobiyal yakıt hücreleri için oldukça gözenekli ve aşındırıcı olmayan elektrotların kullanılması önerilmiştir [100].

Mikrobiyal yakıt hücresi için anot elektrot malzemesi olarak araştırılan bir diğer metal malzeme de titanyumdur. Titanyum malzemesi, boyutsal olarak kararlı anotlarda elektrot üretimi için metalurjide tercih edilmektedir. Bunun başlıca nedeni, titanyumun kimyasal kararlılığıdır. Bu kararlılık sebebiyle titanyum

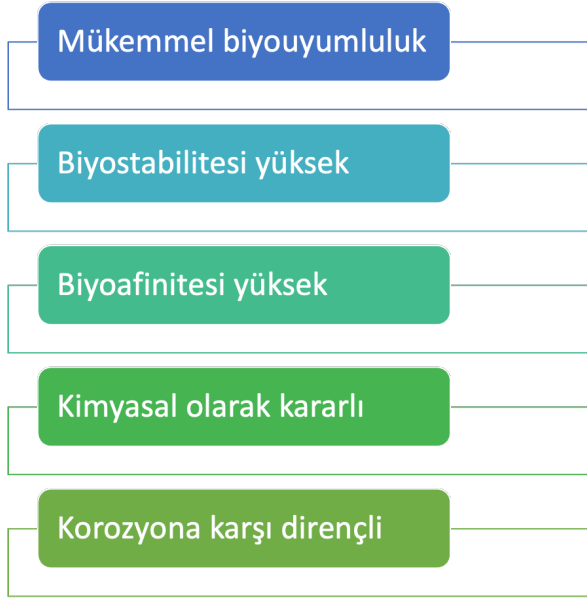
zamanla bozulmaya (korozyona) karşı dirençlidir. Bu özellikler, uzun vadeli mikrobiyal yakıt hücresi çalışmaları için grafit elektrotlara kıyasla titanyumun önemli bir avantajı olarak görülmüştür. Yapılan bir çalışmada, mikrobiyal yakıt hücresi için titanyum içeren dört çeşit anot elektrot tasarlanmıştır. Bunlar [101];

- i) Platin-iridyum kompozit kaplamalı titanyum (Pt-Ti),
- ii) Tantal-iridyum kompozit kaplamalı titanyum (Ta-Ti),
- iii) Hidroklorik asit yüzey işlemleri titanyum (pürüzsüz Ti)
- iv) Alüminyum oksit püskürtmeli titanyum (pürüzlü Ti) olarak bildirilmiştir.

Dört çeşit titanyum elektrot kullanılarak yapılan elektrokimyasal analizlere göre, mikrobiyal yakıt hücresinde biyoanot olarak performans açısından önemli farklılıklar göstermiştir. Pt-Ti ve Ta-Ti biyoanotları, başlatma sırasında kaplanmamış Ti (pürüzlü ve pürüzsüz) biyoanotlara kıyasla daha hızlı ve daha yüksek hücre voltajları ve dolayısıyla daha yüksek akım üretimi göstermiştir. Kapanmamış Ti biyoanotunun hücre voltajları, hücrelerin elektrokimyasal aktivitesinden dolayı artmış ve 2. günden sonra metal kaplı biyoanotlarındaki kadar yüksek olmuştur [101].

Yapılan bir başka çalışmada, mükemmel biyoyoumluluk, biyostabilite ve biyoafinite özellikleri nedeniyle biyomalzeme olarak adlandırılan titanyum esaslı elektrotlar anot elektrotları olarak kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre, titanyum esaslı anot elektrot yüzeyinde biyofilm tabakası oluşmuştur. Bakterilerin kataliz reaksiyonları nedeniyle, titanyum bazlı anot elektrot yüzeyi, organik madde olarak kullanılan kavak ağacı talaşından salınan polimer biyofilm ile kaplanmıştır. Bu sayede mikrobiyal yakıt hücresi elektrik enerjisi üretmiştir. Böylece titanyum, anot elektrot olarak görevini başarı ile yerine getirmiştir [102].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde titanyum metal malzemenin anot elektrot olarak kullanımının gerekçeleri Şekil 3.16'da verilmiştir.



Şekil 3.16. Mikrobiyal yakıt hücreleri için titanyum metal malzemenin anot elektrot olarak kullanımının gerekçeleri [101, 102].

2022 yılında yayınlanan bir çalışmada, toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücresi için titanyum malzeme elektrotlardan akım toplayıcı olarak kullanılmıştır. Akım toplayıcı olarak kullanılan titanyum telin, toplam fiyatın %50'sine kadar denk geldiği tespit edilmiştir. Dahası, telin elektrotta örülmesi, mikrobiyal yakıt hücresi kurulumunda en çok zaman alan işlem olmuştur. Bu nedenle, mikrobiyal yakıt hücresi kurulumunun fiyatını düşürmek ve pratikliğini artırmak için daha ucuz malzemelere gereksinim duyulduğu ifade edilmiştir. Yine aynı çalışmada, tek bir mikrobiyal yakıt hücresi cihazının maliyetinin yaklaşık 2 £ olduğu belirtilmiştir. Düşük miktarlarda titanyum akım toplayıcı kullanılan mikrobiyal yakıt hücresi konfigürasyonunun belirlediği maliyet Watt başına 1,450 £ sınırı olarak bildirilmiştir. Bu sınır, dolaylı olarak daha düşük miktarda titanyum akım toplayıcı içeren mikrobiyal yakıt hücreleri tarafından üretilecek minimum güç gereksinimlerini belirlemiştir. Buradan yola çıkarak, denklem (3.5) ve (3.6)'ya göre, her elektrotta 4 cm titanyum akım toplayıcı bulunan tek bir mikrobiyal yakıt hücresi, Watt başına maliyetin yaklaşık 1,450 £ olması için minimum 0,07 mW üretmelidir. Bu sınırdan daha düşük bir çıkış gücü için, toplam cihaz maliyeti eşiği aşacak ve dolayısıyla uygulanamaz olarak adlandırılan bir bölgeye girecektir. Mikrobiyal yakıt hücresi 0,07 mW değerinden fazla güç üretirse, Watt başına maliyet düşeceği ve böylece mikrobiyal yakıt hücresi tasarımı ekonomik olarak daha uygulanabilir hale geleceği ifade edilmiştir [103].

$$\text{Titanyum akım toplayıcının maliyeti (£)} = \text{titanyum miktarı} \times \text{£2,5 / m} \quad (3.5)$$

$$\text{Watt başına maliyet} = \frac{\text{Titanyum akım toplayıcı maliyeti (£)}}{\text{Güç (mW)}} \times \frac{1000 \text{ mW}}{\text{W}} \quad (3.6)$$

Burada; m metre cinsinden uzunluk, W güç ifadesidir ve Watt biriminden ifade edilir ve mW miliwatt olarak ifade edilen güç birimidir [103].

Biyouyumlu ve aynı zamanda elektriksel olarak iletken uygun bir malzeme bulmanın oldukça zor olduğu bilinmektedir. Maliyet etkinliği, en uygun elektrot malzemesini ararken göz önünde bulundurulması gereken önemli kritik faktördür. Ticari olarak temin edilebilen grafen oksitlerin anotlar için etkili malzeme olduğu ortaya çıkmıştır. Ancak bu malzeme oldukça pahalıdır. Doğal karbon esaslı malzemelerin her zaman daha ucuz olduğu görülmüştür. Mikrobiyal yakıt hücresinin güç maliyeti, birim hücrenin maliyetinin maksimum güç yoğunluğuna bölünmesiyle elde edilebilir. Bu denklem (3.7)'deki eşitlikte ifade edilmiştir [104].

$$\text{Mikrobiyal yakıt hücresi güç maliyeti} = \frac{\text{Birim hücre maliyeti}}{\text{Maksimum güç yoğunluğu}} \quad (3.7)$$

Buradan yola çıkarak, mikrobiyal yakıt hücresini oluşturmak için ucuz malzemelerin kullanılması daha düşük bir güç maliyetine olanak tanıyacaktır. Yapılan bir araştırmada, doğal biyokütleden elde edilen anot için malzeme maliyetinin ton başına 51 ila 381 ABD doları arasında değiştiği bildirilmiştir. Ticari olarak temin edilebilen granül aktif karbon veya grafit granüllerinin ise ton başına maliyetinin yaklaşık 800 ila 2500 ABD doları maliyetinde belirtilmiştir. Bu ikilemin, atık malzemelerin karbonize anot çubuklarına, fırçalarına veya plakalarına dönüştürülmesiyle çözülebileceği bildirilmiştir. Atıkların grafen okside dönüştürülmesi süreci ve modifikasyon tekniği hakkında çalışmalar sınırlıdır. Ancak, doğal atık kaynaklarından sentezlenen grafen oksit malzemesinin özelliklerini iyileştirmek için halen çok fazla çalışma yapılması gerektiği vurgulanmıştır [104].

3.3.2. Katot Elektrot Malzemeleri

Katot malzemeleri, yüksek redoks potansiyeline sahip olması ve protonları kolayca yakalaması gereken mikrobiyal yakıt hücrelerinin güç kapasitesi üzerinde de büyük bir etkiye sahiptir. Günümüzde yaygın kullanılan katot malzemeleri grafit, karbon kumaş ve karbon kağıdıdır. Mikrobiyal yakıt hücresinde performansı arttırmak için, katodu son derece aktif bir katalizörle modifiye etmek en popüler denemedir. Buna örnek olarak; platin (Pt) ile modifiye etmek, en yaygın denemedir. Bu denemelerde, katot tepkimesinin aktivasyon enerjisini azaltacağı ve tepkime hızını arttıracığı varsayılmaktadır [75].

İdeal katot elektrot malzemesinin sahip olması gereken önemli karakteristik özellikler şöyledir [105]:

- Yüksek redoks potansiyeline sahip olmalı,
- Protonları kolayca yakalayabilmeli,
- Oksijen indirgeme tepkimesi (ORR) hızlı bir şekilde gerçekleşmeli,

Oksijen indirgeme tepkimesinin yavaş reaksiyon kinetiği nedeniyle, katot odasındaki oksijen indirgemesi ve elektron kabulü, enerji üretimi için sınırlayıcı adımdır. Bu, kanıtlanmış bir bilgidir. Platin (Pt), mikrobiyal yakıt hücrelerinde ORR ve elektron kabulünü hızlandırmak için katot katalizörü olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, Pt malzemesinin yüksek maliyeti, mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanımının önünde bir engel teşkil etmektedir. Katot malzemeleri, mikrobiyal yakıt hücrelerinin güç kapasitesi üzerinde büyük bir etkiye sahiptir [105].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinin katot elektrotunda kullanılan platin katalizörü nedeniyle ortaya çıkan temel sorunlar Şekil 3.17'de vurgulanmıştır.



Şekil 3.17. Platin katalizör kullanımının ortaya çıkardığı ciddi sorunlar [105].

Yapılan bir çalışmada, 100 kW'lık küçük bir otomobil için polimer elektrolit yakıt hücresinde tek başına Pt malzemesinin maliyeti, 100 kW'lık bir benzinli motorun maliyetinden daha yüksek olmuştur. Pt miktarını azaltarak katot maliyetlerini düşürmek için birçok çaba sarf edilmiştir. Bu da Pt olmayan başka katalizörlerin aranmasına yol açmıştır [105].

Son yıllarda Pt malzemesine alternatif birçok katot katalizörü araştırılmıştır. Bunlar [105];

- Fe-N/C katalizörleri,
- Püskürtmeli biriktirilmiş Kobalt
- Co ve Fe_2O_3
- Fe ve aminoantipirin öncü
- Demir-azot-aktif karbon (Fe-N-AC)
- Fe-azot katkılı karbon nanotüp,
- Demir ftalosiyanınlar
- Manganez oksitlerdir.

Platin malzemesine alternatif geliştirilen elektrot malzemeleri arasında asil metal içermeyen katotlar da mevcuttur. Buna örnek olarak; Fe-N/C katalizörleri verilebilir. Demir (II) ve kobalt bazlı katotlar, platinle benzer performanslar göstermiştir. Ancak, bu malzemelerin uzun vadeli kararlılığı sağlanamamıştır. Karbon siyahı, nikel nanopartikül (Ni)/C, ftalosiyanın/C ve bakır-ftalosiyanın/C olmak üzere dört farklı katalizör türü iki bölmeli mikrobiyal ortamda değerlendirilmiştir. Sonuçlar, bakır ftalosiyanın ve nikel nanopartiküllerinin umut verici olduğunu göstermiştir. Katotta Pt katalizör kullanımını azaltmak veya kaldırmak için potansiyel alternatif katalizörler olabileceğini ortaya konulmuştur. Bakır-ftalosiyanın ($\text{Cu-C}_8\text{H}_4\text{N}_2)_4\text{H}_2$) ile üretilen mikrobiyal yakıt hücreleri, Pt eklenen mikrobiyal yakıt hücreleriyle hemen hemen aynı gücü üretmiştir [105].

Ticari katalizörlerden olan demir ftalosiyanın ve kobalt ftalosiyanın, bakır ftalosiyanın, manganez (II) ftalosiyanın ve kobalt tetrametilfenilporfirin malzemeleri platine alternatif olması için araştırılmıştır. Yapılan çalışmada bahse konu ticari katalizörler karbon destekli bir Pt katot katalizörü (Etek, %20 ağırlıkça) ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları, kobalt tetrametilfenilporfirin malzemesinin ve demir ftalosiyanın katalizör malzemelerinin diğer ticari katalizörlerden daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Mangan di oksit (MnO_2) esaslı katalizörlerin oksijen indirgememesinin üstesinden gelmede iyi sonuçlar sağladığı anlaşılmıştır. Bu katalizörlerin düşük maliyetleri, kolay hazırlanabilmeleri ve ekonomik ölçeklendirme olasılıkları yüksek olduğu vurgulanmıştır. Bu nedenle, MnO_2 katalizörlerin pra-

tik uygulama için potansiyel katalizörler olabileceği düşünülmüştür [105].

Yüksek indirgeme potansiyeline ve doğal bolluğa sahip oksijen, pratik mikrobiyal yakıt hücresi uygulamaları için en uygun elektron alıcısı olarak tanıtılmaktadır. Oksijen indirgeme tepkimesinin yüksek aşırı potansiyeli nedeniyle, mikrobiyal yakıt hücresi katotunda bir katalizöre olan ihtiyaç mevcuttur. Halen, Pt bazlı katalizörler mikrobiyal yakıt hücreleri ve diğer yakıt hücresi sistemleri için en yaygın kullanılan katalizörlerdir. Ancak, yüksek maliyet ve yavaş oksijen indirgeme tepkimesi kinetiği, soy metal bazlı katalizörlerinin uygulanması için sorunlu konulardır. Bu nedenle, platin metalinin yerini alabilen veya en azından içeriğini azaltmaya yardımcı olabilen verimli ancak düşük maliyetli oksijen indirgeme tepkimesi katalizörleri, mikrobiyal yakıt hücrelerinin pratik ve büyük ölçekli uygulamaları için oldukça önemli bir konu olarak güncelliğini korumaktadır [90].

Yapılan çalışmalarda, özellikle geleneksel yakıt hücreleri ve mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanımları için çok sayıda alternatif oksijen indirgeme tepkimeleri katalizörünün incelendiği ve özelliklerinin tanımlandığı belirtilmiştir. Bu çalışmaların çoğu, karbon destekli soy metaller, geçiş metali kompleksleri ve metal oksitler, metal içermeyen heteroatom katkılı karbonlar, hatta mikroorganizmalar dahil olmak üzere karbon malzemelere dayanmaktadır [90].

Mikrobiyal yakıt hücreleri için katot malzemeleri ve tasarımları en zorlu yönler olarak bildirilmiştir. Bunun sebebi olarak mikrobiyal yakıt hücrelerinin performansının katot tarafından sınırlandırılması görülmüştür. Bu sorunun bir süre daha devam etmesi öngörülmüştür. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde anot elektrot olarak kullanılan malzemelerin çoğu, katot elektrotları için de temel malzemeleri olarak kullanılmıştır. Katot için kullanılan bu malzemeler arasındaki temel fark, normalde bir katalizör (örneğin, Pt) kullanılmasıdır. Bu katalizörün kullanım amacı katotta oksijen indirgemesi sağlamasıdır. Ancak katalizör kullanımı her zaman gerekli olmamaktadır [85].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanılan katot elektrot malzemeleri üç temel grupta ele alınmıştır. Bunlar [85];

- 1) Hava katotları,
- 2) Sulu hava katotları,
- 3) Biyo-katotlardır.

Mikrobiyal yakıt hücreleri ile yapılan laboratuvar çalışmalarında en yaygın kullanılan katot elektrotu yapılandırmaları hava katotları ve sulu hava katotlarıdır. Hava katotları genellikle bir difüzyon tabakasından (havaya maruz kalan), iletken bir destek malzemesinden ve bir katalizör/bağlayıcı tabakasından (suya maruz kalan) oluşur. Sulu hava katotları, karbon kağıdı,

karbon kumaş ve platin ağ gibi iletken destek malzemelerinden yapılır ve bir katalizör/bağlayıcı tabakasıyla kaplanır. Ancak, oksijenin suda çözünürlüğü (mol kesri bazında) havada 0,21'dir. Buna kıyasla sulu hava katotlarının performansı yalnızca $4,6 \times 10^{-6}$ 'dır (25°C'de). Bu nedenle, sulu hava katotlarının performansı düşük çözünmüş oksijen konsantrasyonlarıyla sınırlıdır. Hava katotlarının mikrobiyal yakıt hücreleri katotları için daha pratik bir tasarım olduğu düşünülmektedir. Bu yapılandırmanın havalandırma gerektirmemeleri ve daha yüksek güç yoğunlukları üretmeleri nedeniyle diğer katotlara göre çok daha fazla ilgi görmüşlerdir [85].

Hava katotları için destekleyici malzeme olarak bez formunda karbon bazlı elektrotların kullanımı çok yaygındır. Karbon kağıdı ve karbon kumaşla karşılaştırıldığında, destekleyici malzeme olarak paslanmaz çelik kullanan daha ekonomik ve pratik hava katotları birkaç çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan bir çalışmada, metal ağın etrafına bir katot inşa edilmiş ve hammadde olarak paslanmaz çelik ağ kullanarak yeni bir membran elektrot tertibatı hava katodu üretimi yapılmıştır. Bu katot, karbon kumaşa dayalı bir hava katodu ile benzer bir güç yoğunluğuna ulaşmıştır [85].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinden, hava-katotlarda ve sulu hava-katotlarda platin kullanımı katot maliyetini önemli ölçüde arttırmıştır. Katot malzemelerinin fiyatı, hava-katot mikrobiyal yakıt hücrelerinin sermaye maliyetlerinin en büyük yüzdesini (% 47) oluşturabilir. Bu nedenle, birçok araştırmacı, katalizör kullanmak yerine katodik reaksiyon aşırı potansiyelini azaltmak için yüksek özgül alanlı karbon malzemeleri kullanma olasılığını araştırmıştır. Buna örnek olarak; granül grafitten yapılmış, katalizlenmemiş sulu bir hava-katod elektrot nano ölçekli gözenekler nedeniyle iyi bir performans göstermiştir [85].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanılan biyokatotlar, atık su arıtımı ve biyosentez için nispeten düşük maliyet, iyi kararlılık ve çoklu işlevler gibi önemli faydalara sahiptir. Bu nedenle mikrobiyal yakıt hücresi alanında hızla ortaya çıkan bir araştırma konusu haline gelmiştir. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde biyokatot ve anot için genellikle aynı malzemeler kullanılmıştır. Buna örnek olarak; grafit levha, karbon keçe, granül grafit ve grafit fiber fırça gibi karbon bazlı malzemelerden ve paslanmaz çelik ağ verilebilir. Paketlenmiş ve fırça tipi yapıya sahip elektrot malzemeleri, biyokatotların yapılandırması için daha geniş yüzey alanları sağladıkları için diğerlerine kıyasla üstün kabul edilmiştir. Maliyet açısından, pratik uygulama için daha düşük maliyetli elektrot malzemelerine ihtiyaç sürmektedir [85].

Mikrobiyal yakıt hücreleri ile ilgili deneysel çalışmalarda yaygın kullanılan elektrot malzemelerine bakıldığında, mikrobiyal yakıt hücrelerinin sermaye maliyetinin, geleneksel atık su arıtma sistemlerine kıyasla birkaç kat

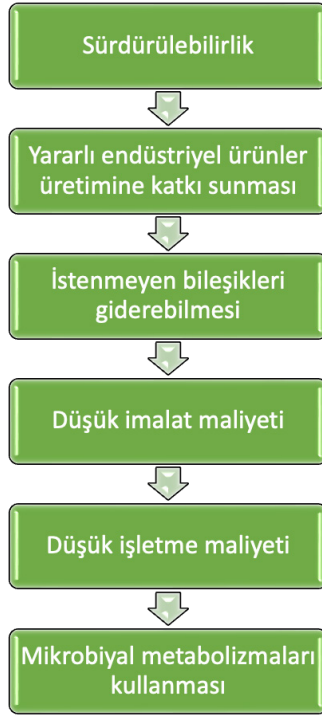
daha pahalı olduğu bildirilmiştir. Mikrobiyal yakıt hücresi çalışmalarında yaygın kullanılan, bazı düşük maliyetli karbon ve metal malzemeler Çin'de faaliyet gösteren üreticilerden temin edilebilmektedir. 2010 yılı verilerine göre bu yaygın elektrot malzemelerinin fiyatları ve diğer bilgileri Tablo 3.2'de verilmiştir. Burada görüleceği üzere, en ucuz elektrot malzemesi granül aktif karbon olup metrekaresi (m^2) cinsinden maliyeti 0,5-1 Çin Yuanı (¥) olarak bildirilmiştir [85].

Tablo 3.2. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde yaygın kullanılan elektrot malzemelerinin kimi özellikleri [85].

Elektrot yapılandırması	Malzeme	Çin'deki maliyeti
Düzlemsel yapı	Karbon kumaş	45-130 (¥/m ²)
Paketlenmiş yapı	Grafit granül	5,5-20 (¥/m ²)
Paketlenmiş yapı	Granül aktif karbon	0,5-1 (¥/m ²)
Paketlenmiş yapı	Karbon keçe	150-300 (¥/m ²)
Fırça yapı	Karbon fiber	150-300 (¥/m ²)
Düzlemsel yapı	Titanyum	100-1000 (¥/m ²)
Düzlemsel yapı	Paslanmaz çelik ağ	7-50 (¥/m ²)

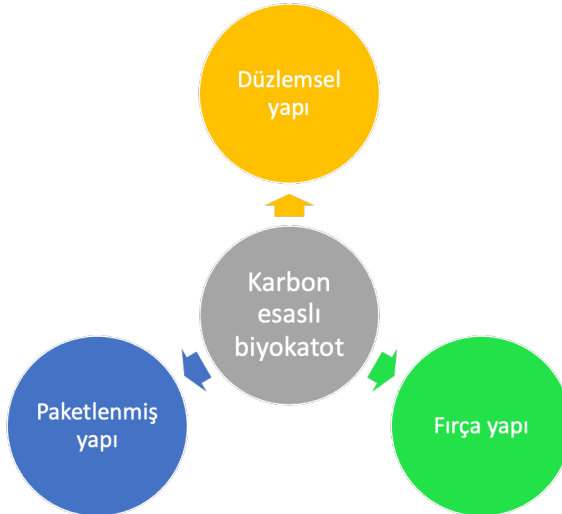
Tablo 3.2'de özellikleri verilen elektrot malzemelerinin performans ve kararlılıkları hakkında endişeler mevcuttur. Atık su arıtımı ve enerji üretiminde belirli bir performans seviyesinin sağlanması varsayımıyla, mikrobiyal yakıt hücrelerinin ticari kullanımı için uygun maliyetli elektrot malzemelerinin daha da geliştirilmesinin şart olduğu vurgulanmaktadır. Elektrot tasarımları, mikrobiyal yakıt hücrelerinin uygun maliyetli bir teknoloji olarak üretiminde karşılaşılan en büyük zorluk olarak bildirilmiştir [85].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde katot elektrot olarak kullanılan biyokatotlar vasıtasıyla sağlanan performans çoğunlukla biyokatot malzemelerinin özelliklerine ve yapılandırmasına bağlıdır. Biyokatot elektrotların önemli faydaları Şekil 3.18'de vurgulanmıştır [106].



Şekil 3.18. Biyokatot elektrotların önemli faydaları [106].

Mikrobiyal yakıt hücresinde, karbonlu malzemeler sıklıkla biyokatot elektrot için kullanılır. Bu malzemeler, Şekil 3.19'daki gibi sınıflandırılmıştır [106].



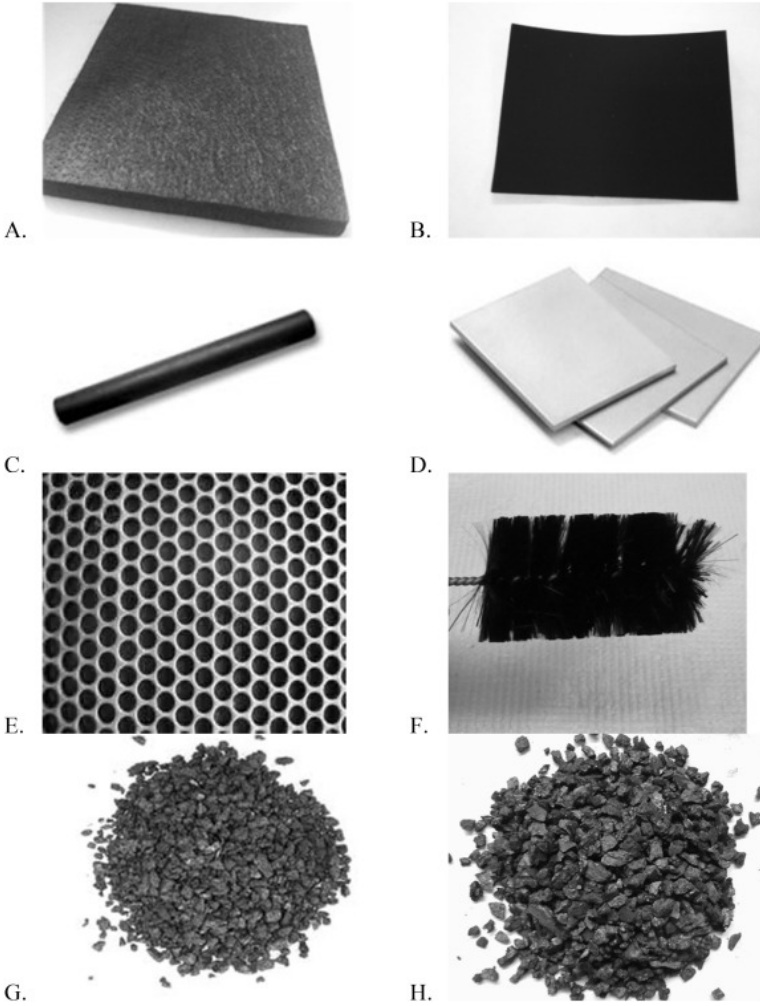
Şekil 3.19. Biyokatot için kullanılan karbonlu malzemelerin sınıflandırılması [106].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde en sık kullanılan düz (düzlemsel) biyokatot yapılarına örnek olarak şunlar verilebilir [106]:

- Karbon kağıdı,
- Karbon kumaş,
- Grafit levha ve
- Karbon/Grafit keçe.

Mukavemet bakımından ele alındığında en iyi seçenek olarak grafit levha karşımıza çıkmaktadır. Grafit levha, karbon kağıdına kıyasla daha iyi mukavemet sağlamaktadır. Karbon kağıdı ise grafit levhadan daha incedir. Bu nedenle, biraz kırılğan bir özellik göstermektedir. Bununla birlikte, hem karbon kağıdının hem de grafit levha kompakt yapı ve pürüzsüz yüzey sağlamaktadır. Bu, yüzey birimi başına biyokütlenin nicel ölçümüne imkan tanımaktadır. Bu sayede biyokatot elektrot yüzeyi mikroorganizma büyümesi için daha fazla bakteri tutunması sağlamıştır. Öte yandan, karbon kumaş, gözenekli yapısından dolayı karbon levhalara kıyasla daha iyi bir bakteri büyüme yüzeyi sağlar. Yapılan bir çalışmada, mikrobiyal yakıt hücresinde biyokatot olarak grafit keçe, karbon kağıdı ve paslanmaz çelik ağ kullanılarak bunlar arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Yapılan karşılaştırma sonucuna göre, grafit keçenin karbon kağıdı ve paslanmaz çelik ağdan daha iyi katalitik aktivite gösterdiği ortaya çıkmıştır. Üstelik grafit keçe hem maksimum akım hem de güç yoğunlukları bakımından en yüksek değeri sağlamıştır. Paslanmaz çelik ağ ve karbon kağıdıyla karşılaştırıldığında, grafit/karbon keçe daha kalın bir malzemedir ve gevşek dokusu bakteri büyümesi için daha iyi bir alan sağlamaktadır [106].

Önceki çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre, karbon bazlı ve paslanmaz çeliğin çeşitli formlarda ve konfigürasyonlarda en yaygın kullanılan destek malzemeleri olduğu bulunmuştur. Yaygın kullanılan biyokatot malzemelerinin görselleri Şekil 3.20'de verilmiştir [106].



Şekil 3.20. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanılan biyokatot malzemeleri: (A) grafit keçe, (B) karbon kumaş, (C) grafit çubuk, (D) paslanmaz çelik levhalar, (E) paslanmaz çelik ağ, (F) grafit elyaf fırça, (G) grafit granülleri, (H) granül aktif karbon. (Beijing Dong Cheng grafit Co., Ltd) [106].

Çeşitli metal malzemeler arasında, paslanmaz çelik, özellikle tortu tipi mikrobiyal yakıt hücrelerinde, biyokatot için standart bir temel malzeme olarak tanıtılmaktadır. Genellikle, bakteri yerleşimi elektrotların çok daha yüksek yüzey pürüzlülüğünü desteklediği için biyofilm oluşumu paslanmaz çelikten ziyade grafit yüzeyinde daha fazla baskındır. Paslanmaz çeliğin, biyofilmle yönlendirilen indirgeme tepkimelerini desteklemek ve ayrıca biyokatot için harika bir destek malzemesi olmak açısından grafitten daha mükemmel elektrokinetik özelliklere sahip olduğu kanıtlanmıştır. Sonuç olarak paslanmaz çelik ağ, biyokatot olarak mikrobiyal yakıt hücrelerinde mükemmel performans göstermiştir [106].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde sülfat indirgeyici bakterilerin performansını araştırmak için aktif karbon kumaş elektrot üzerinde paslanmaz çelik ağdan bir biyokatot üretilmiş ve denenmiştir. Deneme sonuçlarına göre, paslanmaz çelik ağ, aktif karbon kumaşla birleştirildiğinde, paslanmaz çelik ağ içermeyen aktif karbon kumaş biyokatoduna kıyasla biyokatodun performansı artmıştır. Bu artış kendini güç yoğunluğunda beş kat ve akım yoğunluğunda üç kat artış ile göstermiştir [106].

Yapılan ilginç bir çalışmada, doğal deniz suyu ortamında metalik yüzeylerde oluşan biyofilmlerin daha verimli bir oksijen indirgeyici katot oluşturduğu bildirilmiştir. Oksijen indirgemesinin mikrobiyal katalizi, deniz aerobik ortamlarında önemli bir korozyon mekanizmasıdır. Buna rağmen, deniz suyu biyokatotlarının yüksek tuzluluktaki elektrolitlerin çalışması için yararlı olduğu kanıtlanmıştır [106].

Sulu bakır çözeltilisinden bakır geri kazanımı, asitli maden drenaj atık sularında yaygın olarak bulunması nedeniyle diğer ağır metallerin arıtılması ve geri kazanılmasından daha cazip olmasından yola çıkarak yapılan bir çalışmada, mikrobiyal yakıt hücrelerinde elektrik üretimi ile eş zamanlı olarak bakır (Cu) indirgemesi yapılmıştır. Bunun için katot elektrot olarak karbon çubuk, titanyum levha, paslanmaz çelik örgülü ağ ve bakır levha denenmiştir. Bahsedilen katot elektrot malzemelerinin performansları tek tek araştırılmış ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, söz konusu çalışmada denen tüm katot elektrot malzemelerinin katot potansiyelleri, akım yoğunluğu aralığında anot potansiyellerinden çok daha fazla değişmiştir. Bu da, iki bölmeli mikrobiyal yakıt hücrelerinin performansını zaman içinde anottan ziyade katotun kontrol ettiğini göstermektedir. Bu sonuçlar, biriktirilen bakırın katot yüzeyleriyle olan ilişkisinin, bu malzemelerin uzun süreli çalışma sırasında elektrik üretme ve voltaj çıkışı eğilimini değiştirdiğine dair açık bir kanıt sunmuştur. Özellikle titanyum levha ve paslanmaz çelik örgülü ağın difüzyon direncinde gözle görülür bir azalma gözlemlenmiştir. Bu da iç dirençteki belirgin azalmaya önemli ölçüde katkıda bulunmuştur. Bu durum, geleneksel elektrokimyasal işlemlerde biriktirilen bakırla artırılmış yüzey iletkenliği hakkındaki önceki raporlarla tutarlıdır. Benzer şekilde, hem titanyum levha hem de paslanmaz çelik örgülü ağın katotlarında polarizasyon direnci ve ohmik direnç de zamanla bakır birikimi nedeniyle azaldı. Bu sonuçlar, biriktirilen bakırın hem titanyum levha hem de paslanmaz çelik örgülü ağdan oluşan katot elektrotların iç direncini azaltmadaki olumlu etkisini göstermiştir. Sulu bakır çözeltilisinden bakır geri kazanımı sağlanmış ve elektrik üretimi de sağlanmıştır. Sonuçlar, mikrobiyal yakıt hücrelerinde titanyum levha ve paslanmaz çelik örgülü ağ katotlarının Cu(II) giderimi ve güç üretimi için en etkili olduğunu ortaya koymuştur. İlaveten, bu katotların performansı çoklu döngüler boyunca artmıştır. Bu etki, katotlar üzerindeki ohmik direncin azalması ve katodun arayüz yüzey alanının artmasıyla ilişkilendirilmiştir. Genel itibarıyla, pratik

mikrobiyal yakıt hücrelerinde titanyum levha ve paslanmaz çelik örgülü ağın kullanımı için gözlemlenen yüksek performans ve düşük malzeme maliyeti göz önüne alındığında paslanmaz çelik örgülü ağ en umut verici katot malzemesi olarak ifade edilmiştir. Ayrıca, endüstriyel ölçekli mikrobiyal yakıt hücreleri için en verimli katot malzemelerini belirlemek için daha fazla araştırma yapılması gerektiği vurgulanmıştır. Ağır metallerin ve bunların tortularının, su arıtımına ve aynı zamanda yenilenebilir enerji üretimi için mikrobiyal yakıt hücrelerinin genel performansı üzerindeki etkisi hakkında önemli temeller oluşturmuştur [107].

Yapılan bir çalışmada, ticari olarak temin edilebilen bir malzeme olan nikel kaplı karbon fiber malzemesi, karbon kumaşa alternatif bir katot elektrot malzemesi olarak araştırılmıştır. Nikel kaplı karbon fiber malzemesi, karbon kumaş ve karbon fibere kıyasla doğrusal tarama voltametri testinde daha yüksek akım üretimi sağlamıştır. İlave olarak, nikel kaplı karbon fiber malzemesi elektrokimyasal empedans spektroskopisi testinde daha düşük direnç göstermiştir. Bu çalışmada, nikel ile kaplanmış ticari olarak temin edilebilen ve düşük maliyetli bir karbon fiber, aktif karbon katalizörlerini desteklemek için alternatif bir katot elektrot malzemesi olarak incelenmiştir. Elektrot malzemelerinin önceki çalışmalarında nadiren bildirilen maliyet etkinliği, test edilen elektrot malzemeleri için analiz edilmiştir. Nikel, etkili bir elektrot malzemesi olarak incelenmiştir. Nikel köpüğü, Pt bazlı katot kullanan mikrobiyal yakıt hücresi ile karşılaştırılabilir performans elde etmek için aktif karbon katalizörleri için bir akım toplayıcı olarak işlev görebilir. Nikel kaplı karbon fiber malzemesinin hem elektrik üretimi hem de maliyet verimliliği açısından üstün performans gösteren, karbon kumaşa etkili bir katot elektrot malzemesi alternatifi olduğu gösterilmiştir. Geliştirilmiş performans hem nikel kaplı yüzeyden hem de nikel karbon fiber üzerindeki daha yüksek bir aktif karbon katalizör yüklemesinden faydalanmıştır. Nikel kaplı karbon fiber malzemesinin mikrobiyal yakıt hücrelerinde katot elektrot malzemesi olarak kullanılmasının başarısı, elektrotlar için tasarlanmamış ticari olarak temin edilebilen ürünlerden uygun elektrot malzemelerinin araştırılmasının, üretim süreçlerinin ölçeklendirilmesinden kaçınılabileceğini göstermektedir. Ancak bazı temel ve pratik sorunların daha fazla araştırılması gerekmektedir [108].

Mikrobiyal yakıt hücresi sistemlerinin sermaye maliyetinin bazı küçük ölçekli atık su arıtma tesislerinden daha düşük olabileceğine dair bir ön analiz yapılmasına rağmen, mikrobiyal yakıt hücresi sistemlerinin pahalı olduğu genel olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle mikrobiyal yakıt hücresi geliştirmesi için uygun maliyetli malzemeleri araştırmak büyük ilgi görmektedir.

Bir mikrobiyal yakıt hücresinin maliyet etkinliği, performanstan önemli ölçüde ödün vermeyen düşük maliyetli malzemeler kullanılarak iyileştirilebilir [108].

Aktif karbon/nikel kaplı karbon fiber, aktif karbon/karbon kumaş malzemelerini katot elektrot olarak kullanan bir mikrobiyal yakıt hücresinin sağladığı maliyet verimliliği ve elektriksel güç yoğunluğu üretimi Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3. Aktif karbon/nikel kaplı karbon fiber, aktif karbon/karbon kumaş malzemelerini katot elektrot olarak kullanan bir mikrobiyal yakıt hücresinin sağladığı maliyet verimliliği ve elektriksel güç yoğunluğu üretimi [108].

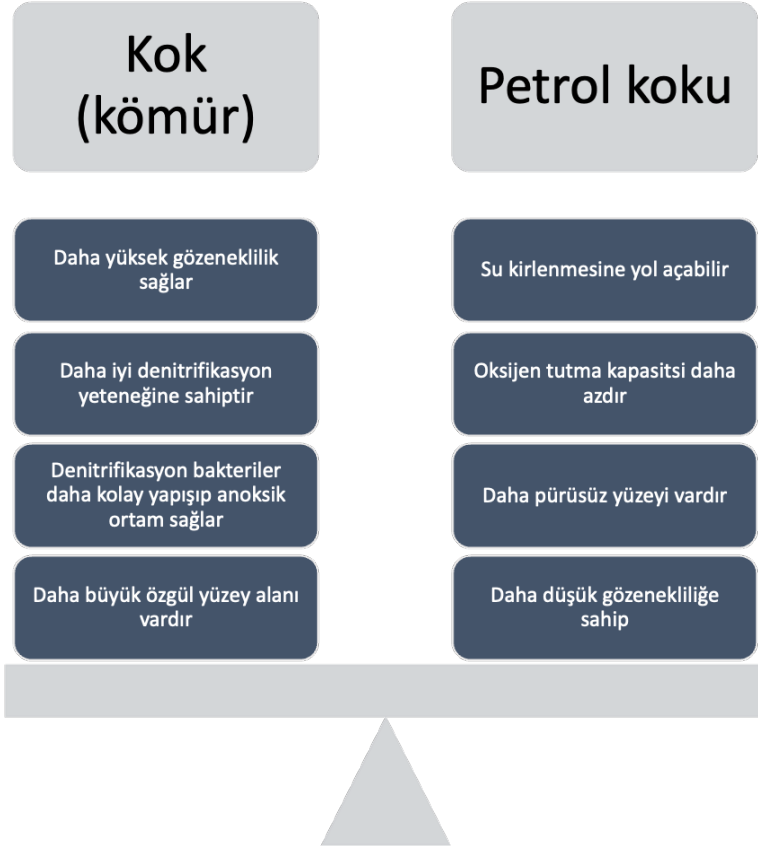
Katot malzemesi	Güç yoğunluğu	Maliyet verimliliği
Aktif karbon/nikel kaplı karbon fiber	4,29 W/m ³	299,0 mW/USD
aktif karbon/karbon kumaş	6,50 W/m ³	151,7 mW/USD

Tablo 3.3'ten anlaşılabacağı üzere, aktif karbon/nikel kaplı karbon fiber malzemesini katot elektrot olarak kullanımı ile aktif karbon/karbon kumaş malzemesine kıyasla neredeyse iki kat maliyet verimliliği sağlanmıştır. Bununla birlikte, Pt bazlı katot, laboratuvar ölçekli mikrobiyal yakıt hücresi sistemlerinin toplam maliyetinin neredeyse %50'sini oluşturmaktadır. Alternatif katalizörler büyük ilgi görmektedir ve bunlar arasında aktif karbonun, çok daha düşük bir maliyetle oksijen indirgeme tepkimesi katalizinde etkili olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, katalizörler için destekleyici malzeme olan katot elektrotu için nikel malzemesi kullanılarak, ticari olarak temin edilebilen ve düşük maliyetli bir karbon fiberi kaplamasının yapılması katalizörlerini desteklemek için alternatif bir katot elektrot malzemesini ortaya çıkarmıştır [108].

Son zamanlarda yapılan bir çalışmada, hem anot hem de katot elektrotlar olarak petrol koku ve kok (kömür) denenmiştir. Deneylerde iki tür mikrobiyal yakıt hücresi kurulmuştur. Birinci tür mikrobiyal yakıt hücresi, 5 cm petrol kok anot tabakası, 25 cm çakıl yalıtım tabakası ve 5 cm petrol kok katot tabakasından oluşmuştur. İkinci tür mikrobiyal yakıt hücresi, 5 cm kok anot tabakası, 25 cm çakıl yalıtım tabakası ve 5 cm kok katot tabakasından oluşmuştur. Sonra, her iki tür mikrobiyal yakıt hücresi için Zhongyuan Çevre Koruma Wulongkou Atıksu Arıtma Tesis'i'nin (CPEP, Zhengzhou, Çin) sedimentasyon tankından toplanan aktif çamur, sentetik atıksu ile karıştırılmış ve mikrobiyal inkübasyon ve evcilleştirme için her bir sisteme eklenmiştir. Bir ay sonra, iki sistem sürekli yukarı akış modunda çalıştırıldı. $36,46 \pm 0.73 \text{ mg/L NH}_4^+-\text{N}$ ve $3,17 \pm 0.16 \text{ mg/L PO}_4^{3-}\text{P}$ içeren sentetik atıksu, çok kanallı peristaltik pompa kullanılarak bu sistemlere pompalandı. Havalandırma taşı, her bir sistemin katot tabakasındaki çakıl tabakasının üzerine yerleştirildi ve her gün 4 saat aralıklı olarak havalandırıldı. İşletme süresi 159 gün sürmüştür. Çalışma kapsamında yapılan gaz kromatografisi-kütle spektrometrisi testine göre, petrol kokunun ve kokun polisiklik aromatik hidrokarbonların ikincil çevre kirliliğine neden olmamıştır. Araştırmamanın sonuçları, kok malzemesinin kirlenici gideri-

mi ve biyoelektrik üretimi açısından sistem performansını arttırdığını göstermiştir. Bu çalışma, iletken bir malzeme olarak kok malzemesinin yapay sulak alandaki mikrobiyal yakıt hücresinin performansını ve kararlılığını artırmak için umut verici potansiyelini vurgulamıştır. Kok malzemesi sayesinde ortaya çıkan üstün taraflardan birisi, denitrifikasyon bakteri çeşitliliğini ve denitrifikasyon fonksiyonel genlerinin (*nirS* ve *nirK*) kopyalarının artmış olmasıdır. Bunun nedeni olarak, N (azot) giderme kapasitesi artıran kokun gözenekli yapısı bildirilmiştir. Ek olarak, kok bazlı elektrotlar fosfor biriktiren bakterilerin (yani, *JG30-KF-CM45*) bolluğunu arttırarak fosfor giderme verimliliğini yükseltmiştir. Kok elektrotların kullanıldığı mikrobiyal yakıt hücresinin en yüksek güç yoğunluğu $172,89 \text{ mW/m}^3$ iken petrol koku elektrotlarının kullanıldığı mikrobiyal yakıt hücresinin en yüksek güç yoğunluğu $28,08 \text{ mW/m}^3$ idi [109].

Mikrobiyal yakıt hücresi çalışmasında hem anot hem de katot elektrot olarak kullanılan kok ve petrol koku malzemelerinin karşılaştırılması Şekil 3.21'de verilmiştir.



Şekil 3.21. Mikrobiyal yakıt hücresi için anot ve katot elektrot olarak kullanılan kok ve petrol kokunun özellikleri [109].

3.4. Organik Madde

Mikrobiyal yakıt hücrelerinin verimliliğini etkileyen temel bileşenlerden birisi de organik madde kaynağıdır. Organik madde substrat olarak da tanımlanmaktadır. Organik madde, mikroorganizmalara gerekli besinleri ve elektron vericilerini sağlar. Bir başka deyişle, organik madde, mikroorganizmalar için besin ve enerji kaynağıdır. Karmaşık polimerlerin, toksik maddelerin veya değişken kimyasal bileşimlere sahip atıkların, herhangi bir mikrobiyal yakıt hücresi sistemine etkili bir şekilde bütünleşmesi konusunda zorluklar vardır. Bu nedenle, mikrobiyal yakıt hücresi teknolojisinin etkili bir şekilde çalışması için uygun organik maddenin (substratın) seçimi önemlidir [50, 70].

Mikrobiyal yakıt hücresinde kullanılan substrat malzemesinin şu özellikleri mikrobiyal büyümeyi, atıksu arıtma potansiyelini, elektron transfer hızını ve elde edilen gücü doğrudan etkiler [110]:

- Substrat bileşimi,
- Karbon kaynağı,
- Besin içeriği ve
- İnhibitör bileşikler.

Mikrobiyal yakıt hücreleri tarafından biyoelektrik üretimi, elektronların anottan katoda büyük kayıplar olmadan ne kadar verimli bir şekilde aktarıldığına bağlıdır. Bu nedenle, optimum hücre performansı için, mikrobiyal yakıt hücresi reaktörü içinde mikropların gelişmesi ve substratı metabolize etmesi için elverişli bir ortam mevcut olmalıdır. Yerinde yapılan mikrobiyal yakıt hücresi çalışmalarında en sık kullanılan substratlar şunlardır [110]:

- Belediye atık suları,
- Bira fabrikası atık suları,
- Süt ürünleri atıksuyu ve
- İdrardır.

Yığın haline getirilmiş ve yerinde ölçeklendirilmiş mikrobiyal yakıt hücresi çalışmaları için belediye atık suyu, idrar ve bira fabrikası atık suyu gibi substratların seçimi göz önüne alındığında, araştırmalar daha basit bir bileşime ve çok çeşitli organik maddelere sahip substratların genellikle enerji üretimi için daha avantajlı olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, sızıntı suyu, maden atık suyu ve tekstil atık suyu gibi diğer substratlar genellikle mikrobiyal yakıt hücrelerinde enerji üretimini engelleyebilen mikrobiyal inhibitörler içermektedir [110].

Mikrobiyal yakıt hücreleri için saf halde olan asetat ve glikoz gibi substratlar genellikle en iyi organik bozunma oranlarına sahiptir. Çünkü saf organik konsantrasyon (kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) olarak) ölçülür ve bu, mikro-

organizmalar için besin olarak kabul edilir. Mikrobiyal yakıt hücresi çalışmalarında en sık kullanılan substratların KOİ giderme verimlilikleri Tablo 3.4'te verilmiştir [110].

Tablo 3.4. Mikrobiyal yakıt hücresi çalışmalarında en sık kullanılan substratların maksimum KOİ giderme verimlilikleri [110].

Substrat	KOİ giderme verimliliği (%)
Belediye atık suyu	96,28
Süt ürünleri atık suyu	96
İdrar	25

Mikrobiyal yakıt hücresi çalışmalarında organik madde (substrat) kaynağı olarak kullanılan atık örnekleri Şekil 3.22'de verilmiştir.



Şekil 3.22. Mikrobiyal yakıt hücresi çalışmalarında organik madde (substrat) kaynağı olarak kullanılan atık örnekleri [110].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanılan çeşitli endüstriyel atık sular ve kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) oranları Tablo 3.4'te verilmiştir. Bu tablodaki değerler, belirli endüstri ve üretim süreçleri de dahil olmak üzere çeşitli faktörlere bağlı olarak önemli ölçüde değişebilir. Örneğin, ilaç atıksuyu bileşimi, üretim sürecinde kullanılan belirli ilaç ve kimyasallara bağlı olarak büyük ölçüde değişebilir. Sızıntı suyu bileşimi, büyük ölçüde depolama sahası atığı türüne bağlıdır. Belirli organik bileşikler, ağır metaller ve patojenler gibi ek parametreler de atıksu kaynağına bağlı olarak önemli olabilir [110].

Tablo 3.4. Çeşitli atıksular arasında KOİ miktarlarının karşılaştırılması [110].

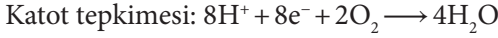
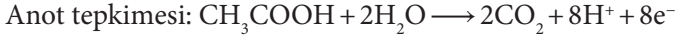
Atıksu Türü	KOİ (mg/L)
Belediye atık suyu	500–1200
Domuz atık suyu	3000–30000
İlaç atıksuyu	1000–5000
Sızıntı suyu	5000 – (≥ 10000)
Bira fabrikası atık suyu	2000–14000
Şeker fabrikası atık suyu	2000–5000
İdrar atık suyu	2000–10000
Kağıt Geri Dönüşümü atık suyu	1000–4000

İlaç, kağıt geri dönüşümü, tekstil, madencilik, pil üretimi ve çöp sahası sızıntı suyu gibi birçok endüstri, bir mikrobiyal yakıt hücresinin işletimi için faydalı ve zararlı özellikler de dahil olmak üzere çeşitli özelliklere sahip atık su üretir. Bu nedenle, bu kaynaklardan gelen atık suların arıtımı için olası bir arıtma teknolojisi olarak mikrobiyal yakıt hücresini değerlendirirken, atık suyun bileşiminin dikkatlice değerlendirilmesi gerekir. Çoğu organik çözücüler içerse de, yüksek konsantrasyonda ağır metaller, antibiyotikler, klor ve kükürt bileşikler, yüksek amonyak vb. gibi zararlı bileşenler, bunların faydalarını gölgede bırakır. Bu nedenle, bu atık suların mikrobiyal yakıt hücrelerindeki genel faydası, zararlı kirleticilerin etkilerini azaltmak için dikkatli yönetim ve ön arıtmaya bağlıdır [110].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde, yaygın olarak kabul gören substrat asetattır. Asetat, elektroaktif mikroplar tarafından birincil karbon kaynağı olarak kullanılan basit bir substrattır. Asetat, oda sıcaklığında fermentasyonlar veya metanogenez gibi mikrobiyal dönüşümler için inerttir. Bu özelliklerinden dolayı olduğundan mikrobiyal yakıt hücrelerinde tercih edilen bir substrattır. Elektrojenik bakteriler substrat olarak asetatı tercih etmektedirler. Asetat malzemesinin substrat olarak kullanıldığı mikrobiyal yakıt hücrelerinde akım üretimi hızla artmaktadır. Dahası, anottaki biyofilm çok miktarda elektrojenik bakteri içermektedir. Bu da ksiloz substratlarına kıyasla daha yüksek kulombik verim

ve hücre voltajına olanak tanımaktadır. Asetat, oda sıcaklığında metanogenez ve fermantasyonlar gibi diğer dönüşümlere karşı inert olduğundan, reaktör tasarımlarını, mikrobiyal yakıt hücresi bileşenlerini ve operasyonel tasarımları ölçeklendirmek için bir substrat olarak kullanılır. Asetat ayrıca çok sayıda metabolik yola sahip diğer karbon kaynakları için de son üründür [111].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde substrat olarak asetat (CH_3COOH) kullanıldığında asetatin biyolojik tepkimesi şu şekilde yazılabilir [3]:



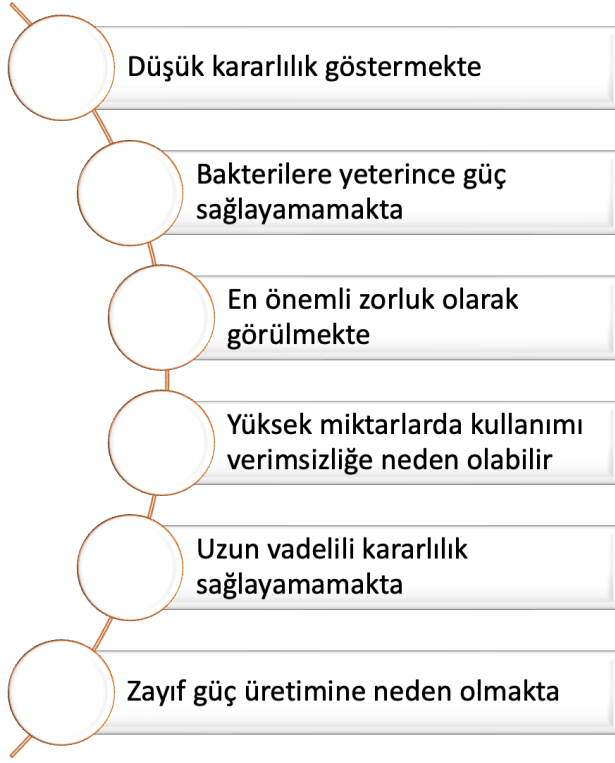
Genel tepkime: $\text{CH}_3\text{COOH} + 2\text{O}_2 \longrightarrow 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{elektrik enerji} + \text{biyokütle}$

Mikrobiyal yakıt hücreleri için asetat substrat olarak kullanıldığında, oksidasyon (yükseltgenme) reaksiyonu anot tarafından, indirgeme (redüksiyon) tepkimesi ise katot tarafından gerçekleştirilmiştir. Asetat, elektroaktif bakterileri uyarmak için yaygın olarak bir karbon kaynağı olarak kullanılan basit bir substrat gibi davranır. Ortam sıcaklığında metanogenez ve fermantasyon gibi mikrobiyal dönüşümlere karşı inert davranışı nedeniyle asetat, yeni mikrobiyal yakıt hücresi malzemeleri, çalışma koşulları veya reaktör prototipleri için ideal bir model olarak substrat olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Dahası, asetat daha yüksek mertebeden karbon kaynakları için birçok metabolik yolun nihai sonucudur (glukoz metabolizması Entner-Doudoroff yolu ile birlikte) [3].

Mikrobiyal yakıt hücresi tarafından üretilen enerji ve substrat konsantrasyonu arasında ilişki vardır. Kullanılan substratların konsantrasyonu belirli bir değerden büyükse, güç üretimi engellenecektir. Yapılan araştırmalarda, organik substrat malzemesinin en kritik zorluk olduğu bildirilmiştir. Organik substratın daha düşük kararlılığı, iyileştirme verimliliği ve enerji üretimi üzerinde bir etkiye sahip olabilir. Bunun sebebi olarak organik substrat bakteri popülasyonuna yeterli güç sağlamadığı bildirilmiştir. Bu durum, mikrobiyal yakıt hücresi tarafından zayıf güç çıkışına sebep olmuştur. Endüstriyel kullanım için mikrobiyal yakıt hücresinde organik substratların uzun vadeli kararlılığı gelecekteki araştırmaların konusu olması tavsiye edilmiştir. Yapılan çalışmalarda, mikrobiyal yakıt hücresinde farklı organik substratların varlığında elektrot-bakteri etkileşimi ve elektrot etkisi hakkında benzer bir bilgi rastlanılmadığı ifade edilmiştir [3].

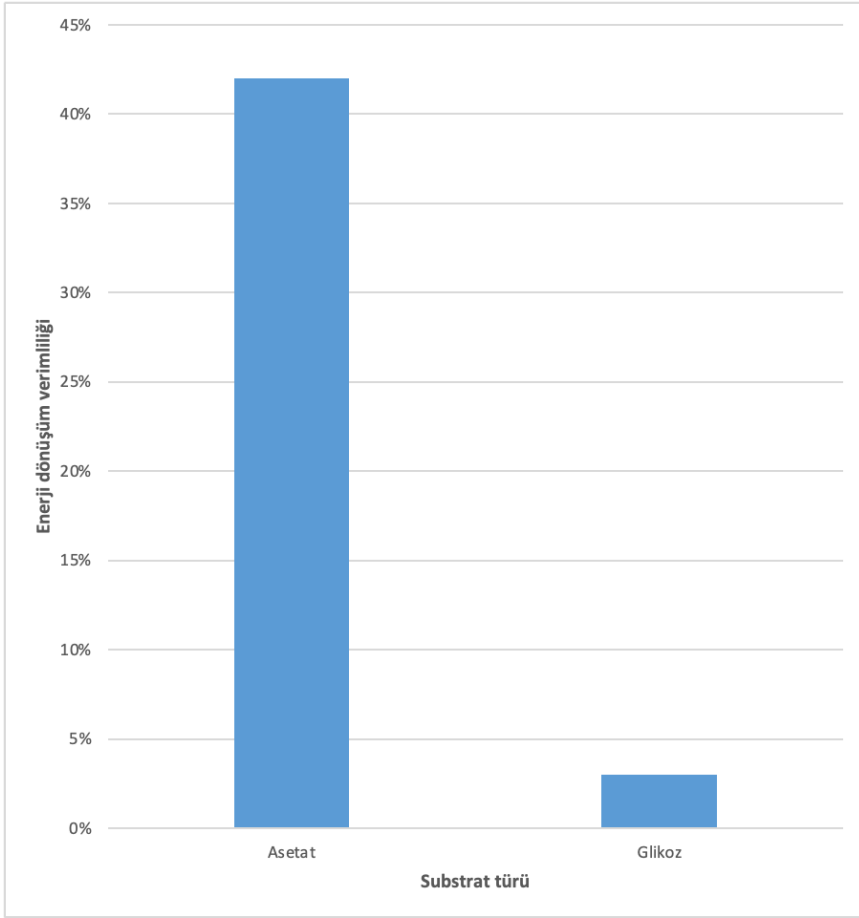
Mikrobiyal yakıt hücresi teknolojisinde, atık suda bulunan organik maddelerden saf maddelere veya karmaşık karışımlara kadar çeşitli malzemeler enerji üretimini kolaylaştırmak için çeşitli substratlar kullanılabilir. Tüm arıtma süreçlerinin amacı, esas olarak suyun kullanımı ve çevre için güvenli olması için içindeki kirleticilerin sayısını azaltmaktır [3].

Şekil 3.23, organik substrat malzemesinin sınırlayıcı unsurları hakkında bilgiler vermektedir.



Şekil 3.23. Mikrobiyal yakıt hücresinde kullanılan organik substratların sınırlayıcı unsurları [3].

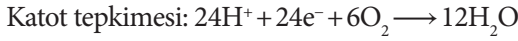
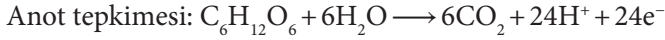
Mikrobiyal yakıt hücresi için popüler bir başka substrat türü olarak glikoz tercih edilmiştir. Yapılan bir araştırmada, mikrobiyal yakıt hücresi için glikoz ve asetat substratlarının enerji dönüşüm verimliliğini karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.24'te verilmiştir.



Şekil 3.24. Mikrobiyal yakıt hücresi için glikoz ve asetat substratlarının enerji dönüşüm verimliliğini karşılaştırılması [3].

Asetat ile enerji dönüşüm verimliliği değeri %42 iken, glikoz kullanıldığında sadece %3 olmuştur. Bu da güç yoğunluğunun ve akımın azalmasına neden olmuştur. Glikozla beslenen mikrobiyal yakıt hücresi, bakteriyel rekabet nedeniyle elektron tükenmesi nedeniyle en düşük enerji dönüşüm verimliliğine sahip olmuştur. Düşük enerji dönüşüm verimliliği değeri, glikozun fermente edilebilir bir ortam olabileceği varsayımına atfedilmiştir. Bu, metanogenez ve fermentasyon gibi enerji üretmeyen çeşitli rekabetçi metabolizmalar tarafından kullanıldığı anlamına gelmektedir. Yapılan bir çalışmada, glikozun parçalanmasıyla çeşitli fermentasyon yan ürünlerinin gelişmesi sonucunda farklı elektrikçilerden veya bunların sentrofik bakterilerinden oluşan daha da dinamik bir karma konsorsiyumun varlığını öne sürülmüştür. Bu iddia, glikozla zenginleştirilmiş mikrobiyal yakıt hücresinin diğerlerinden çok daha geniş bir substrat özgülüğünü haklı çıkarmıştır [3].

Mikrobiyal yakıt hücresinde substrat olarak glikoz ($C_6H_{12}O_6$) kullanılırsa meydana gelen tepkimeler şöyledir [3]:



Mikrobiyal yakıt hücreleri için glikoz malzemesinin substrat olarak kullanılması durumunda, anot tarafından oksidasyon (yükseltgenme) tepkimesi gerçekleştirilirken katot tarafından, indirgeme (redüksiyon) tepkimesi gerçekleştirilmiştir [3].

Sadece glikoz ve asetat değil, sakaroz ve diğer şekerler gibi organik substrat mızemeleri elektron üretmek için mikrobiyal yakıt hücresindeki bakteriler tarafından oksitlenerek oksidasyon tepkimesine maruz bırakılmaktadırlar [3].

Fosil yakıtlara olan talebi azaltmak için güvenilir, sürdürülebilir ve daha iyi huylu bir kaynak olarak alternatif kaynaklar aranmaktadır. Bu aramalar neticesinde biyokütlenin gücü ve önemi anlaşılmıştır. Biyokütle, çeşitli yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları arasında en bol bulunan kaynaklardan biridir. Dahası, biyokütle enerjisinin kullanımı sayesinde karbondioksit (CO_2) emisyonu atmosferden sabitlenen biyokütleyle eşit veya daha düşük olabilmektedir. Biyokütle enerjisinin kullanımı karbon-nötr bir süreç olarak düşünülebilir. Küresel ölçekte, biyokütle bir enerji kaynağı olarak dördüncü sırada yer almakta ve dünyanın enerji ihtiyacının yaklaşık %14'ünü karşılayabilmektedir. Biyokütleyi elektriğe dönüştürmeye yönelik uygulamalardan birisi olan mikrobiyal yakıt hücreleri, yüksek teorik enerji verimliliği (Carnot sınırlı olmayan) ve hafif çalışma koşulları gereksinimi nedeniyle büyük ilgi görmüştür [112].

Organik maddeler mikrobiyal yakıt hücreleri vasıtasıyla doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmüştür. Bu biyolojik enerji dönüşüm süreci Carnot döngüsünden kaçındığı için (termo-elektrik dönüşüm süreçlerinin enerji verimliliğini sınırlayan) yüksek verimliliğe ulaşması beklenmektedir. Daha da etkileyici olanı, mikrobiyal yakıt hücresi ile bu enerji dönüşüm sürecinin ılımlı koşullarda gerçekleştirilebilen biyolojik bir süreç olmasıdır. Bu durum mikrobiyal yakıt hücresini çeşitli uygulamalar için umut verici kılmaktadır. Mikrobiyal yakıt hücrelerinin güç çıkışı hala düşüktür. Mikrobiyal yakıt hücrelerinin nemli ölçüde iyileştirilmesi gerekmektedir [112].

Biyokütle enerji açısından zengin ve bol bir kaynak olarak dikkat çekmektedir. Mikrobiyal yakıt hücresi için ideal bir yakıt olması beklenmektedir. Benzer şekilde mikrobiyal yakıt hücresi biyokütle endüstrisi için cazip bir enerji dönüşüm teknolojisi olarak umut vadetmektedir. Bu nedenle, son yıllarda biyokütle yakıtlı mikrobiyal yakıt hücresini geliştirmek ve optimize etmek için

birçok çaba sarf edilmiştir. Genel olarak, mikroorganizmaların çoğu biyokütleyi doğrudan sindirememektedir. Bu nedenle, biyokütle yakıtlı mikrobiyal yakıt hücresi için genellikle ön işlem gereklidir [112].

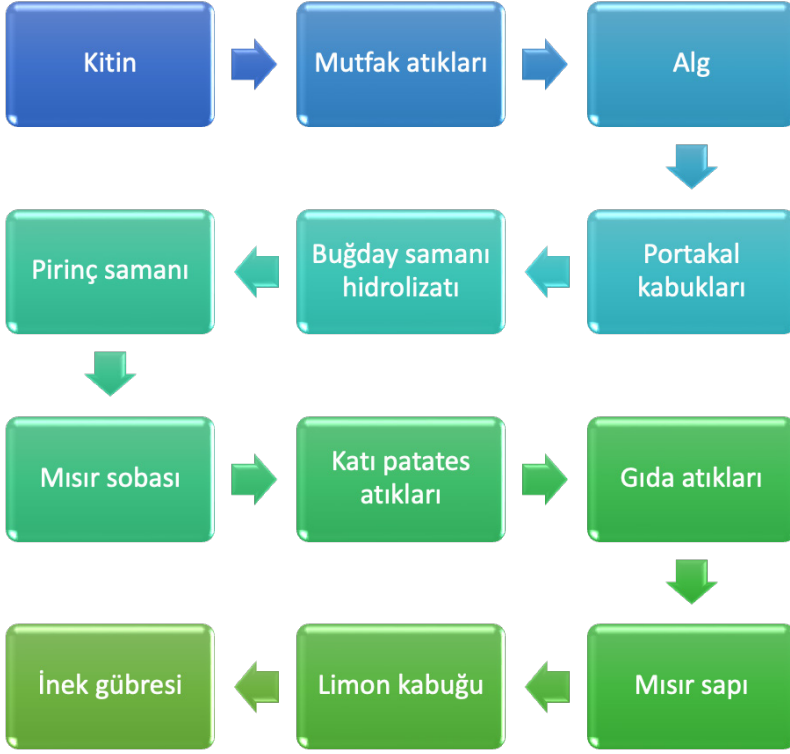
Mikrobiyal yakıt hücresi için biyokütle kullanımının önemli gerekçeleri Şekil 2.25'te verilmiştir.



Şekil 3.25. Mikrobiyal yakıt hücreleri için biyokütle kullanımı için önemli gerekçeler [112].

Tarımsal artıklar, odun ve algler gibi organik maddeleri içeren biyokütle, bol miktarda yenilenebilir enerji kaynağı olarak kabul edilmektedirler. Biyokütlenin enerji sektörü için en umut verici yönlerden biri, biyokütlenin doğrudan elektrik enerjisi biçimine dönüştürülmesidir. Bugüne kadar mikrobiyal

yakıt hücrelerinde biyoenerji üretmek için organik madde (substrat veya yakıt) kaynağı olarak çeşitli biyokütleler kullanılmıştır [15].



Şekil 3.26. Mikrobiyal yakıt hücreleri için kullanılan biyokütleler [15].

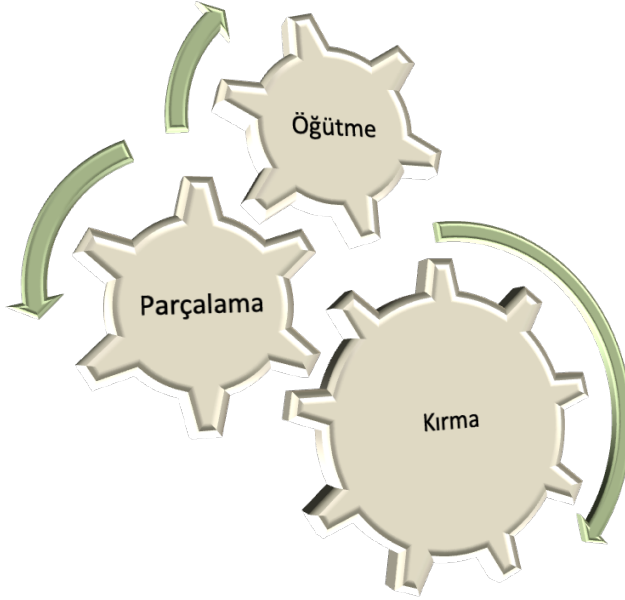
Mikrobiyal yakıt hücrelerinde biyokütle kullanımının, önemli bir zorluğu, mikrobiyal yakıt hücresinin anot odasındaki lignoselülozik biyokütlenin karmaşık yapısını verimli bir şekilde parçalamaktır. Lignoselülozik biyokütle düzgün bir şekilde parçalanmazsa, bu mikrobiyal yakıt hücrelerinin güç yoğunluğunu azaltabilir. Bununla birlikte, birçok mikroorganizma karmaşık lignoselülozik yapıyı etkili bir şekilde parçalamakta zorlanır. Bu da mikrobiyal yakıt hücresinin performansının düşmesine neden olur. Bu sınırlamanın üstesinden gelmek için, lignoselülozdan indirgeyici şekerlerin salınması için çeşitli ön işlem süreçleri gereklidir. Bu ön işlem yöntemleri fiziksel, asidik, alkali ve biyolojik/enzimatik yaklaşımları içerir. Kırma, parçalama ve öğütme gibi fiziksel ön işlem yöntemleri, parçacık boyutunu küçülterek ve biyokütlenin kristal yapısını bozarak mikrobiyal yakıt hücrelerindeki biyokütlenin biyolojik olarak parçalanabilirliğini arttırmaktadır. Yapılan çalışmalar, biyokütle parçacık boyutunun 0,4 mm'nin altına düşürülmesinin hidroliz oranlarını ve verimini önemli ölçüde arttırdığını ve mikrobiyal yakıt hücrelerinde biyolojik olarak parçalanmaya daha fazla malzeme sağladığını göstermiştir [15].

Yapılan çalışmalardan elde edilen önemli bilgilere göre mikrobiyal yakıt hücrelerinde biyokütlenin olması gereken parçacık boyutu ve elde edilen yararlar Tablo 3.5'te vurgulanmıştır.

Tablo 3.5. Biyokütlenin olması gereken parçacık boyutu ve elde edilen yararlar [15]

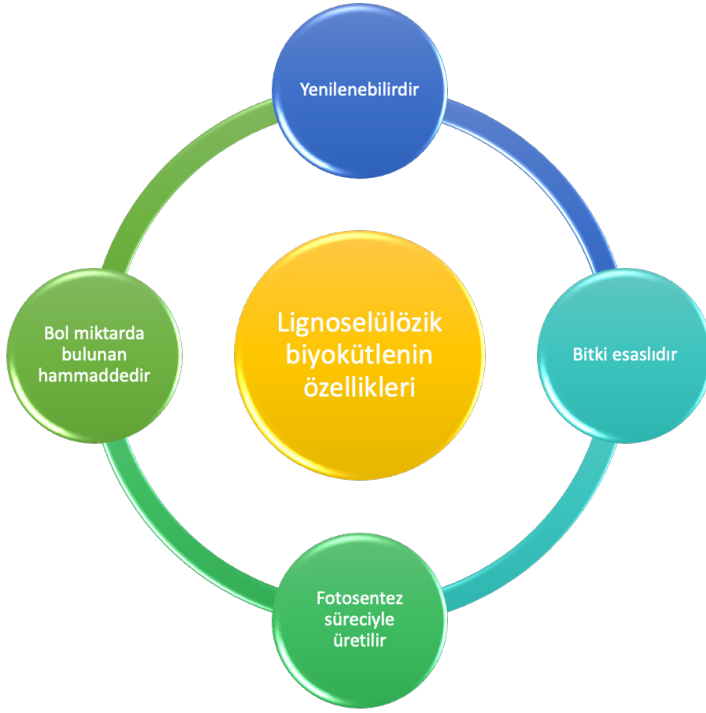
Parçacık boyutu	Elde edilen yararlar
0,4 mm altı	Hidroliz oranını ve verimini önemli ölçüde artırır
0,4 mm altı	Biyolojik olarak parçalanmaya daha fazla malzeme sağlar
0,4 mm altı	Mikrobiyal yakıt hücresi performansını artırır

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde biyokütlenin etkin bir şekilde kullanımı için uygulanan fiziksel ön işlemler Şekil 3.27'de verilmiştir.



Şekil 3.26. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde biyokütlenin etkin bir şekilde kullanımı için uygulanan fiziksel ön işlemler [15].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde organik madde kaynağı olarak kullanılan biyokütlelerden birisi de lignoselülözik biyokütledir. Lignoselülözik biyokütlelerin önemli özellikleri Şekil 3.27'de vurgulanmıştır.



Şekil 3.27. Lignoselülözük biyokütlenin önemli özellikleri [113].

Lignoselülözük biyokütle, ikinci nesil biyokütle sınıfında yer almaktadır. Bunlara örnek olarak;

- Odun yongaları,
- Miskantus, darı,
- Buğday çimi gibi gıda dışı ürünler veya
- Pirinç samanı,
- Buğday samanı,
- Bagas,
- Mısır sapı vb. dahil olmak üzere gıda ürünlerinin yenmeyen kısmı verilebilir [113].

Birinci nesil biyokütle, yenilebilir gıda ürünleri kapsamaktadır. İkinci nesil biyokütle, birinci nesil biyokütle ile ilgili önemli dezavantajları ortadan kaldırdığı için tercih edilir. Lignoselülözük biyokütlenin dünya çapındaki yıllık üretiminin yaklaşık 181,5 milyar ton olduğu bildirilmiştir. Lignoselülözük biyokütle, genellikle nakliye ve depolama harcamalarını azaltmak için yerinde yakılmaktadır. Her yıl büyük miktarda lignoselülözük biyokütle üretilmektedir. Üretilen bu ürünler, bütünleşmiş bir biyorafineri yaklaşımına odaklanarak çeşitli katma

değerli malzemeler üretmek için kullanılabilme potansiyeline sahiptir. Lignoselülozik hammadde kullanan biyorafineri operasyonlarının düzgün çalışması ton başına 50 ila 97 ABD Doları maliyet gerektirmektedir. Lignoselülozik biyokütlenin en dış bölgesinde lignin mevcudiyeti vardır. Bu nedenle, lignoselülozik biyokütle dirençli bir yapıya sahiptir. Bu durum enzimlerin biyokütlenin selülozik ve hemiselüloz kısmına ulaşmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, biyokütlerde kalan şekerlerin %80'inin kaybı, enzim etki sürecini engelleyen ligninin varlığından kaynaklanmaktadır. Buradan hareketle, şekerlerin etkili bir şekilde uzaklaştırılması ve biyokütlenin enzimatik sakkarifikasyonu için lignoselülozik biyokütlerdeki; selüloz, hemiselüloz ve lignin arasındaki moleküler bağların bozulması ve karmaşık yapısının ortaya çıkarılması için ön işlem uygulanması gerekmektedir [113].

Güney Kore'de yapılan bir çalışmada, mikrobiyal yakıt hücrelerinde biyokütlenin organik madde kaynağı olarak kullanımına yönelik ele alınan biyokütle kaynaklarından birisi de kahve atıkları olmuştur. Bir başka deyişle, yapılan çalışmada kullanılan biyokütle örneklerinden birisi de kahve atıklarıdır. Kahve atığı kullanımının gerekçesi olarak; Güney Kore'nin küresel kahve üretiminde önemli bir artış göstermesi ve yoğunlukla kahve dükkanlarına odaklanan büyüyen bir kahve pazarı oluşmasıdır. 2018 yılında Güney Korelilerin yılda yaklaşık 353 fincan kahve tükettiği bildirilmiştir. Bu miktar, dünya nüfusunun yıllık tüketiminin üç katıdır. Sonuç olarak, Güney Kore'de yüksek kahve tüketimi nedeniyle önemli miktarda kahve kalıntısı oluşmaktadır. Büyük miktardaki atıkları yönetmek için etkili yöntemlerin olmaması nedeniyle şu anda büyük miktarda kahve kalıntısı herhangi bir işlem yapılmadan atılmaktadır. Kahve artıklarının yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak kullanılması, döngüsel ekonomi bağlamında iklim değişikliğinin azaltılmasına ve sürdürülebilirliğe umut verici bir katkı olarak görülmektedir. Yapılan bir çalışmada, tortu esaslı mikrobiyal yakıt hücresi oluşturularak kahve atıkları organik madde kaynağı olarak kullanılmıştır. Yapılan çalışmada, kahve kalıntıları mikrobiyal yakıt hücresi sistemi için anodik bölgede tortu iyileştirmesi için yeniden kullanılmıştır. Bahse konu çalışma, mikrobiyal yakıt hücresi sisteminde bioelektrik üretimini arttırmak için elektron üretmek üzere tortu mikropoları için yakıt/ek substrat olarak farklı dozlarda kahve kalıntılarının potansiyelini araştırmıştır. Yapılan çalışmada, kahve atığı konulan mikrobiyal yakıt hücresi 150 gün boyunca test edilmiştir. Yedi günlük çalışma süresince açık devre voltajı 800 mV seviyelerine ulaşmıştır. Kahve kalıntısı gibi ek substrat eklenerek verimli elektron transferi için elektrokimyasal kayıpların azaltılması sağlanabileceği ifade edilmiş ve mikrobiyal yakıt hücresinin en yüksek güç yoğunluğu 33,5 mW/m² değerine ulaşmıştır [114].

3.5. Mikroplar

Bir mikrobiyal yakıt hücresindeki elektrokimyasal olarak aktif bakterilerin ve mikrobiyal topluluğun daha iyi anlaşılması mikrobiyal yakıt hücrelerinin hedeflenen uygulaması için gereken elektrik üretimini artırma çabalarına yardımcı olacaktır. Bunu başarmak için, özellikle mikrobiyoloji alanında kullanılan hızla değişen teknikler ve yöntemler olmak üzere, uygun ve etkili araştırma yöntemleri çok önemli olacaktır. Mikrobiyal yakıt hücresi sistemlerinde elektrik üretiminde elektrokimyasal olarak aktif olduğu bilinen mikroorganizmalar mevcuttur. Bu mikroorganizmalar;

- Elektrokimyasal olarak aktif mikroorganizmalar,
- Anot solunumu yapan bakteriler,
- Elektrikjen
- Ekzoelektrojenik bakteriler gibi farklı terimlerle anılmıştır [115].

Önemli güç yoğunluklarına ulaşan bakterilerin kullanıldığı ilk yakıt hücresi çalışmaları, elektronları hücre içinden elektroda taşımak için elektron mekikleri veya medyatörlerin eklenmesini gerektirmiştir. Ekzojen medyatörlerin yokluğunda bir mikrobiyal yakıt hücresinde disimilatuvar demir indirgeme yeteneğine sahip bakterilerin güç üretebildiğinin bulunması, güç üretiminin yalnızca belirli mikroorganizmalarla sınırlı, nadir bir özellik olabileceğini düşündürmüştür. Az sayıdaki çalışma, mikrobiyal yakıt hücrelerinin çeşitli mikrobiyal topluluklar içerdiğini ortaya koymuştur. Bu, hücrelerin bir elektrot kullanarak solunum yapabilmesi için belirgin ihtiyaç dikkate alındığında beklenmedik bir durum olarak görülmüştür. Mikrobiyal yakıt hücreleri için saf kültür mikroorganizmaları kullanan çalışmalar, anodik biyofilmlerdeki birçok farklı bakterinin güç üretebileceğini doğrulamıştır [116].

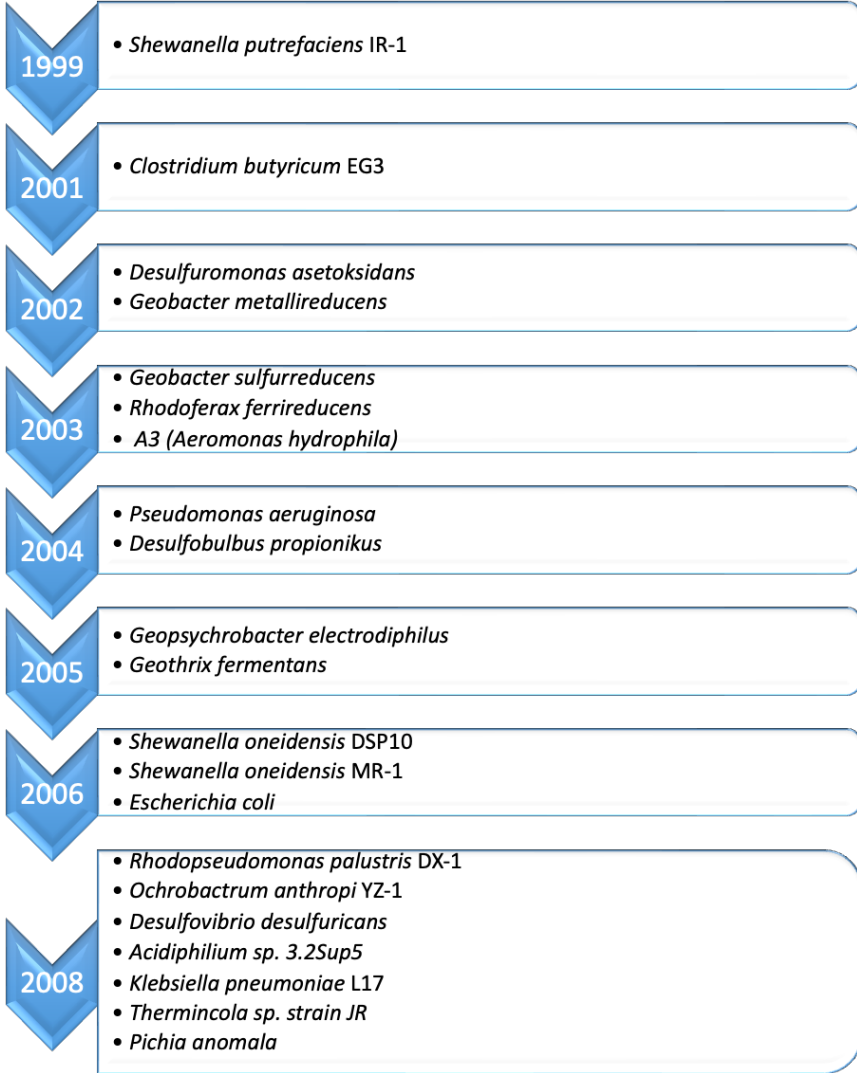
1999 yılında, bir mikrobiyal yakıt hücresinde, metal indirgeyen bir bakteri (Gammaproteobakteri) tarafından elektrik akımı üretiminin doğrudan kanıtı olarak *Shewanella putrefaciens* IR-1 mikroorganizması gösterilmiştir. 2001 yılında, bir mikrobiyal yakıt hücresinde, Firmicutes şubesine ait olan *Clostridium butyricum* EG3 mikroorganizmasının elektrik akımı ürettiği gösterilmiştir. Bu, mikrobiyal yakıt hücresinde kullanılan ilk Gram pozitif bakteri olarak kayıtlara geçmiştir. 2002 yılında, bir tortu mikrobiyal yakıt hücresinin tortu topluluğunda Deltaproteobakteri şubesine ait olan *Desulfuromonas asetoxydans* mikroorganizması tanımlanmış ve mikrobiyal yakıt hücresinde güç ürettiği gösterilmiştir. Yine aynı zamanda, Deltaproteobakteri şubesine ait olan bir başka mikroorganizma türü olan *Geobacter metallireducens* tanımlanmıştır. Bu mikroorganizmanın dengeli potansiyel sisteminde elektrik ürettiği gösterilmiştir. 2003 yılında, dengeli elektrot olmadan Deltaproteobakteri şubesine ait olan *Geobacter sulfurreducens* adlı mikroorganizma sayesinde mikrobiyal yakıt hücresinin elektrik akımı ürettiği ortaya konulmuştur. Yine aynı yıl,

glikozu kullanarak beslenen Betaproteobakteri şubesine ait olan *Rhodoferrum* mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanılmıştır. Aynı zaman diliminde, Deltaproteobakteri şubesine ait olan A3 (*Aeromonas hydrophila*) mikrobiyal yakıt hücrelerinde test edilmiştir. 2004 yılında, Gammaproteobakteri şubesine ait olan *Pseudomonas aeruginosa* mikroorganizması mikrobiyal yakıt hücresinde kullanılmıştır. Böylece, piyosiyenin (Gammaproteobakteri) gibi araçlar aracılığıyla düşük miktarda güç üretildiği gösterilmiştir. Yine aynı yıl, Deltaproteobakteri şubesine ait olan *Desulfobulbus propionikus* mikroorganizması mikrobiyal yakıt hücresinde kullanılmıştır. 2005 yılında, Psikrotolerant (Deltaproteobakteri) olarak tanımlanan *Geopsychrobacter electrodiphilus* mikroorganizması ve Acidobacteria şubesine ait olan *Geothrix fermentans* mikroorganizması mikrobiyal yakıt hücrelerinde test edilmiştir. *Geothrix fermentans* mikroorganizması tanımlanamayan bir aracı (Acidobacteria şubesi) olarak bildirilmiştir [116].

2006 yılında, 1,2 mL hacminde bir mikrobiyal yakıt hücresi içerisine Gammaproteobakteri şubesine ait olan *Shewanella oneidensis* DSP10 mikroorganizması kullanılarak 2 W/m^2 veya 500 W/m^3 güç yoğunluğuna ulaşılmıştır. Bu, o zamanın şartlarında gayet yüksek bir güç yoğunluğu olarak dikkat çekmiştir. Yine aynı yıl, Gammaproteobakteri şubesine ait olan *Shewanella oneidensis* MR-1 mikroorganizması mikrobiyal yakıt hücresinde test edilmiştir. Böylece, akım üretme yeteneğini artıran veya azaltan çeşitli mutantlar tanımlanmıştır. 2006 yılında fark edilen bir başka ilginç gelişme ise, Gammaproteobakteri şubesine ait olan *Escherichia coli* mikroorganizmasının uzun uyum sürelerinden sonra akım ürettiği bulunmuştur [116].

2008 yılında, mikrobiyal yakıt hücresi deneylerinde Alfaproteobakteri şubesine ait olan *Rhodospirillum rubrum* DX-1 mikroorganizması kullanılarak $2,72 \text{ W/m}^2$ değerine ulaşan yüksek güç yoğunlukları sağlanmıştır. Aynı yıl, Alfaproteobakteri şubesine ait bir başka mikroorganizma olan *Ochrobactrum anthropi* YZ-1 mikrobiyal yakıt hücresi çalışmalarında test edilmiştir. Aynı zaman diliminde, Deltaproteobakteri şubesine ait olan *Desulfovibrio desulfuricans* mikroorganizması mikrobiyal yakıt hücrelerinde denenmiştir. Deney sonuçlarına göre, *Desulfovibrio desulfuricans* mikroorganizması laktat üzerinde büyürken sülfat azalmıştır. 2008 yılında bir başka mikrobiyal yakıt hücresi çalışmasında ise, Alfaproteobakteri şubesine ait olan *Acidiphilium* sp. 3.2Sup5 mikroorganizması kullanılarak düşük pH'da ve dengeli potansiyel sisteminde oksijen varlığında elektrik akımı üretilmiştir. Aynı yıl, Gammaproteobakteri şubesine ait olan *Klebsiella pneumoniae* L17 mikroorganizması kullanılarak bu türün ilk kez bir aracı olmadan elektrik akımı ürettiği bildirilmiştir. Aynı yılda, Firmicutes Şubesine ait olan *Thermincola* sp. suşu JR mikrobiyal yakıt hücresinde denenmiştir. Aynı yıl içerisinde, bir maya (mantar alemi) üyesi olan *Pichia anomala* mikrobiyal yakıt hücresinde denenilen güncel nesil olarak tanıtılmıştır [116].

Şekil 3.28, mikrobiyal yakıt hücresi çalışmalarında kullanılan dikkat çeken mikroorganizmaların yıllara göre kullanımına dair özet sunmaktadır.



Şekil 3.28. Mikrobiyal yakıt hücresi çalışmalarında kullanılan dikkat çeken mikroorganizmalar [116].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinin verimliliğini arttırmak için, mikroorganizmaların yakıt hücresi sistemiyle nasıl ve neden elektron alışverişinde bulunduğunu anlamak önemlidir. Nitekim bakteri için dış elektron transferinin neden bu kadar önemli olduğunu ve elektrotla alışverişin nasıl gerçekleştiğini anlamak için bile metabolizma hakkında biraz bilgi sahibi olmak önemlidir. Bakteriler veya mikroorganizmalar, karbon kaynağı olarak çok çeşitli organik bileşikler kullanabilirler. Bunlara örnek olarak; lipitler, proteinler ve karbon-

hidratlar verilebilir. Bu organik bileşikler organizmaya karbon ve enerji sağlamak için işlenebilir. Bakteriler, mikrobiyal yakıt hücrelerinin anot bölmesinde terminal elektron alıcısı olarak bir elektrotu ikame edebilirler. Farklı bakteri suşlarının elektrotta “bağlanma” biçiminin araştırılması, elektronların elektrotta salınabileceği potansiyellerin anlaşılmasına olanak tanımaktadır [117].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde gözlemlenen mikrobiyal çeşitlilik konusunda çok çeşitli topluluklar göstermiştir. Gerçekten de, mikrobiyal yakıt hücrelerinde bulunan mikroorganizmaların doğası ve çeşitliliği, numunenin kökeni, yakıtın doğası, redoks medyatörünün varlığı ve oksik koşullar gibi çeşitli faktörlerin bir fonksiyonudur. Örneğin; mikrobiyal yakıt hücresi aktif çamur veya deniz tortusu içeriyorsa, mikroorganizmaların doğası ve çeşitliliği farklı olacaktır. Çoğu durumda proteobakteriler (Gram-negatif) toplulukların bileşimine hakimdir. Bu toplulukların α -, β -, γ - ve δ - proteobakteriler arasındaki oranlar, aşının doğasına göre çok farklılık gösterebilir. Örneğin; α -proteobakterilerin yapay atık suyla beslenen bir mikrobiyal yakıt hücresinde bulunan toplulukların %64,5’ini ve nehir suyuyla beslendiğinde yalnızca %10,8’ini oluşturduğu gösterilmiştir. Bu, toplulukların bileşiminin yakıt hücresinin operasyonel parametrelerine olan duyarlılığını göstermektedir. Proteobakteriler arasında bazı türler, terminal elektron alıcıları olarak demir veya manganezi indirgeme yeteneği gösterdi ve böylece elektronlarını doğrudan bir elektrodta aktarabilme yeteneğine sahip oldu. *Shewanella putrefaciens*’in (γ -proteobakteriler) bu metalleri indirgeme yeteneği yoğun bir şekilde araştırılmıştır. Bazı *Geobacter* (δ -proteobakteriler) türleri de doğrudan elektron aktarma özellikleri göstermiştir [117].

Proteobakterilerin yanı sıra, bir dizi başka bakterinin de mevcut olduğu gösterilmiştir. Ancak türlerin elektrot üzerinde oluşan biyofilimde nasıl etkileşime girdiği hakkında net bilgiler halen mevcut değildir. Bununla birlikte, karmaşık konsorsiyumların güç çıkışında saf kültürlerden daha verimli olduğu açık bir şekilde ifade edilmiştir. Bu, muhtemelen işlev gören ve henüz açıklığa kavuşturulmamış metabolizma ağlarının bir sonucu olarak düşünülmüştür. Dahası, mikrobiyal yakıt hücrelerindeki karmaşık toplulukların, karmaşık yakıt bileşimlerini tek bir kültüre göre daha verimli bir şekilde metabolize edebilmeleri muhtemeldir [117].

Mikrobiyal yakıt hücresinde bulunan mikroorganizmaların sınıflandırılması ve karşılaştırılması kolay bir iş değildir. Çünkü gerçek elektron transfer mekanizması her zaman bilinmeyebilir ve deneysel koşullar farklı çalışmalarda büyük ölçüde farklılık gösterebilir. Birçok parametre bir deneyden diğerine değiştiği için doğrudan karşılaştırmadan kaçınılmalıdır. Gerçekten de, diğer deneysel koşulların yanı sıra, iç direnç, alt tabaka, elektrotların doğası ve dış yük bir deneyden diğerine çok farklı olabilir. Mikrobiyal türler arasında karşılaştırmaya olanak sağlamak için tam olarak aynı yakıt hücresi tasarımını kullanan sistematik bir çalışma raporlamak, alan için çok değerli bir iş olarak ifade edilmiştir [117].

Mikrobiyal yakıt hücresi çalışmalarında kullanılan mikroorganizmalar, bazı çalışmalarda anot bakterileri ve katot bakterileri olarak iki sınıfta ele alınmıştır. Mikrobiyal yakıt hücresi çalışmalarına kullanılan anot bakterileri Proteobakteriler ve Proteobakteri olmayanlar olarak ele alınmıştır [117].

Mikrobiyal yakıt hücresi çalışmalarında sıklıkça anot bakterileri olarak kullanılan mikroorganizmaların listesi Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.5. Mikrobiyal yakıt hücresinin anotunda kullanılan mikroorganizmalar [117].

Mikroorganizma	
<i>Aeromonas hydrophila</i>	P
<i>Desulfohalobium propionicus</i>	R
<i>Desulfohalobium acetoxidans</i>	O
<i>Escherichia coli</i>	T
<i>Geobacter metallireducens</i>	E
<i>Geobacter sulfurreducens</i>	O
<i>Geopsychrobacter electrodophilus</i>	B
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	A
<i>Rhodospirillum rubrum</i>	K
<i>Rhodospirillum rubrum</i>	T
<i>Rhodospirillum rubrum</i>	E
<i>Rhodospirillum rubrum</i>	R
<i>Shewanella putrefaciens</i>	İ
<i>Shewanella oneidensis</i>	L
<i>Shewanella putrefaciens</i> IR-1	E
<i>Clostridium sp. EG3</i>	R
<i>Clostridium butyricum</i>	Proteobakteri Olmayanlar
<i>Clostridium</i>	
<i>Geothrix fermentans</i>	

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanılan mikrobiyal katotlar hakkında az sayıda yayın görülmüştür. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde genellikle oksijen indirgeyici katotlar kullanılmıştır. Ancak, katottaki tepkimelerin etkili olması için platin gibi pahalı katalizörler gerekmiştir. Permanganat veya ferrisiyanür gibi diğer elektron alıcıları da kullanılmıştır. Ancak bu iki malzeme tarafından gerçekleştirilen indirgeme tepkimesi sürdürülebilir olmadığı bildirilmiştir. Bu malzemeler kullanılarak gerçekleşen tepkime, indirgenmiş bileşiklerin birikmesine yol açmaktadır. Biyokatotların kullanımı sürdürülebilirlik sorunlarının üstesinden gelebilir ve ayrıca daha kapsamlı atık su arıtma stratejilerine imkan verebilir. Biyokatotlarda indirgeme süreci açısından iki ana strateji bilinmektedir, bunlar;

- Manganaz veya demir oksitleri rejenere etmek için mikroorganizmaların kullanılması veya
- Diğer indirgeme reaksiyonları için katot elektronlarının kullanılmasıdır [117].

Katotların, anotlarla aynı tür numunelerle aşılınması yakın zamanda gerçekleşmiştir. Bu tür mikrobiyal yakıt hücrelerinde, biyokatotların oksijen indirgemesi biyokatalize ettiği anlaşılmıştır.

Mikrobiyal yakıt hücresi çalışmalarında kullanılan bir biyokatodun mikrobiyal topluluğunun analizi büyük bir çeşitlilik göstermiştir. Yapılan örnek bir çalışmada, mikrobiyal yakıt hücresinin katot biyofilminde bulunan klonların %50'si *Nitrosomonas* ve *Azovibrio restrictus* cinslerine ait türlere sahip β -proteobakterilerden oluştuğu bildirilmiştir. En yaygın ikinci organizma grubu olarak da *Bacteroidetes* (%21,6) bildirilmiştir [117].

Biyokatotlardaki mikroorganizmaların indirgeme tepkimelerindeki başarıları, mikrobiyal yakıt hücresi gibi biyoelektrokimyasal cihazlarda biyokatotların umut vadeden elektrot malzemeleri olabileceğini düşündürmüştür. Mikrobiyal yakıt hücresinin biyokatotlarında test edilmiş çeşitli mikroorganizmaların bazıları Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.6. Mikrobiyal yakıt hücresi çalışmalarında biyokatotlarda kullanılmış mikroorganizmalardan bazıları [117].

Mikroorganizma
<i>Nitrosomonas</i>
<i>Azovibrio restrictus</i>
<i>Actinobacillus succinogenes</i>
<i>Geobacter metallireducens</i>
<i>Geobacter sulfurreducens</i>
<i>Leptothrix discophora</i>
<i>Thiobacillus ferrooxidans</i>

Bilinen elektron transfer araçlarına sahip ekzoelektrojenler, Tablo 3.7'de verilmiştir. Potter tarafından yapılan ilk çalışmada, *Bacillus coli communis* (*E. coli*), yalnızca 0,3-0,5 Volt seviyelerinde maksimum bir elektromotor kuvveti üretebilmiştir. Ancak günümüzde, mikrobiyal yakıt hücresi çalışmaları için mikrobiyoloji alanındaki geniş ve derin araştırmalar yapılmıştır. Bu sayede, bu gelişmiş teknoloji, öncekinden çok daha verimli elektrik enerjisi üretebilmektedir. Mikrobiyal yakıt hücresi teknolojisindeki en çok incelenen ve en verimli ekzoelektrojenler, *Geobacteraceae* bakteri ailesine aittir. Bir δ -Proteobakteri olan *G. sulfurreducens*, asetati yaklaşık % 100 elektron geri kazanımıyla indirgeyerek elektrik üretebilir. Organizma, altın elektrotlu, asetatin elektron vericisi ve fumarat olarak elektron alıcısı olduğu bir mikrobiyal yakıt hücresinde 3147 mA/m² değerine varan bir akım yoğunluğu üretmiştir. Ancak, *G. metallireducens* (saf kültür), atık su aşı maddesi olarak kullanılan mikrobiyal yakıt hücresinde yalnızca 40 mW/m² güç çıkışı üretebilmiştir. Bir γ -Proteobakteri olan *Shewanella spp.*, demir ve manganezi indirgeyebilmiş ve bunları elektron alıcısı olarak kullanabilmiştir. Anolit olarak laktat ve katolit olarak tamponlu

ferrisiyanür çözeltileri kullanan minyatür bir mikrobiyal yakıt hücresindeki *Shewanella oneidensis* DSP10, 3000 mW/m²'lik bir güç yoğunluğu üretmiştir. Bu oldukça kayda değer bir değerdir olarak bildirilmiştir. *Shewanella putrefaciens*, bir elektron aracı olmadan elektrik üreten ilk organizma olarak kayıtlara geçmiştir. Son zamanlarda, tek odacıklı bir mikrobiyal yakıt hücresi çalışmasında *Shewanella putrefaciens*, anolit olarak kalsiyum klorür (CaCl₂) kullanmış ve maksimum 4,92 W/m³ değerinde güç yoğunluğu sağlamıştır [118].

Tablo 3.7. Elektron transfer araçlarına sahip ekzoelektrojen mikroorganizmalar [118].

<i>Geobacter sulfurreducens</i>
<i>Geobacter metallireducens</i>
<i>Shewanella oneidensis</i>
<i>Shewanella putrefaciens</i>
<i>Rhodopseudomonas Palustris</i>
<i>Thermincola ferriacetica</i>
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>
<i>Desulfovibrio desulfuricans</i>
<i>Desulfovibrio alaskensis</i>
<i>Klebsiella pneumonia</i>

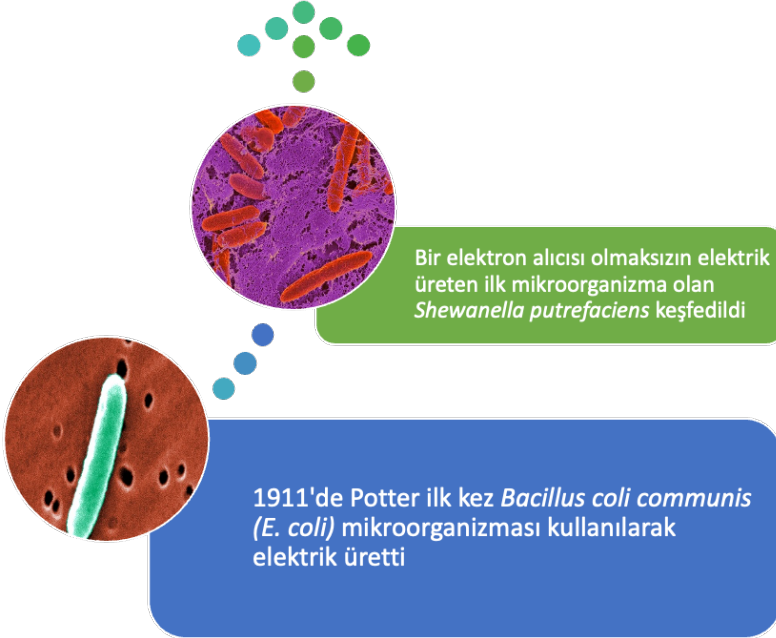
Mikrobiyal yakıt hücresinde yaygın olarak kullanılmayan bazı ekzoelektrojenler ve son zamanlarda keşfedilen birkaç yeni ekzoelektrojen de elektrik üretme yeteneği göstermiştir. Gram negatif, hareketsiz, laktoz fermentasyonu yapan bir bakteri olan *Klebsiella pneumonia*, kübik bir hava odacığındaki mikrobiyal yakıt hücresinde 199,2 mA/m² akım yoğunluğu ve 426,2 mV'luk maksimum voltaj çıkışı üretmiştir. Grafit keçe elektrot olarak kullanılan mikrobiyal yakıt hücresinde Gram pozitif bir bakteri olan *Lysinibacillus sphaericus*, yaklaşık 270 mA/m²'lik maksimum akım yoğunluğu ve 85 mW/m²'lik güç yoğunluğu üretmiştir [118].

Mikrobiyal yakıt hücresinde kullanılan ve yeni mikroorganizma suşları olarak tanıtılan çeşitli mikroorganizma örnekleri şunlardır [118]:

- *Klebsiella pneumonia*,
- *Lysinibacillus sphaericus*,
- *Citrobacter* sp.,
- *Raoultella electrica*,
- *Fontibacter ferrireducens*,
- *Geobacter* türü SD-1,
- *Geobacter anodireducens*,
- *Ochrobactrum* sp. 575.

Mikrobiyal yakıt hücresi teknolojisinde bir ekzoelektrojen mikroorganizmaların keşfedilmesinden bu yana, mikrobiyal yakıt hücresi çalışmalarında elektrik üretimi, biyoremediasyon ve diğer çeşitli uygulamalar için çeşitli ekzoelektrojen grupları denenmiştir. Çok çeşitli substrat ve ekzoelektrojenlerin mevcut olmasına rağmen, mikrobiyal yakıt hücrelerinde yalnızca sınırlı ve spesifik ekzoelektrojenlerin elektrik ürettiği bilinmektedir [118].

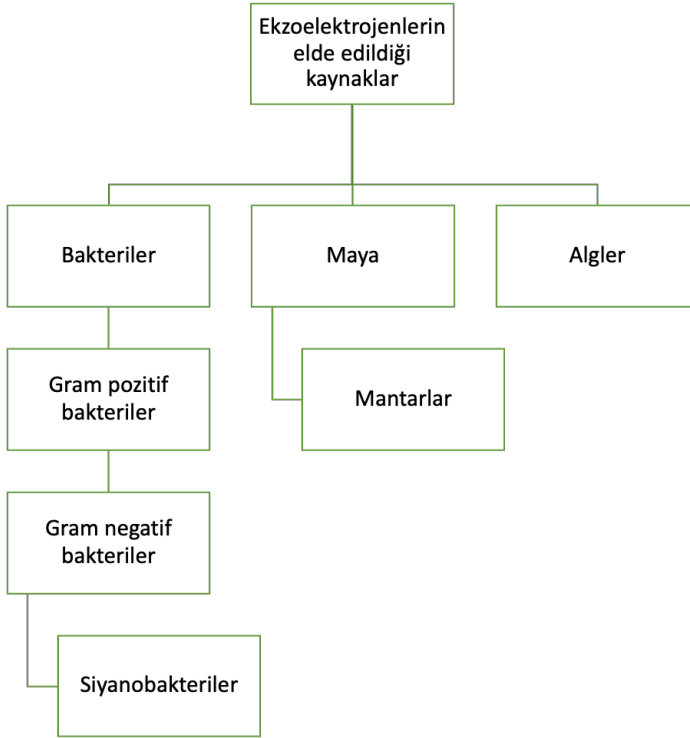
Şekil 3.29, mikrobiyal yakıt hücresi çalışmalarında kullanılan mikroorganizmalar ile ilgili önemli dönüm noktalarına dikkat çekmiştir.



Şekil 3.29. Mikrobiyal yakıt hücresi çalışmalarında mikroorganizmaların sağladığı dönüm noktaları [118].

Mikrobiyal yakıt hücreleri ile ilgili yapılan çalışmaların çoğunda yalnızca sınırlı ve spesifik ekzoelektrojenlerin elektrik üretimine dair bilgiler sağlanmıştır. Gram pozitif bakteriler, Gram negatif bakteriler, maya, siyanobakteriler, algler ve hatta mantarlar gibi çeşitli kategorilerden gelen ekzoelektrojenler, farklı mikrobiyal yakıt hücresi türlerinde halihazırda kullanılmaktadır. Bu mikroorganizmaların, anot bölgesinde karmaşık organik substratları ilgili bileşenlerine tamamen oksitleyebildiği ve böylelikle elektrik üretimi için oldukça verimli olduğu bildirilmiştir [118].

Mikrobiyal yakıt hücresinde kullanılan ekzoelektrojen mikroorganizmaların elde edildiği çeşitli kaynaklar Şekil 3.30'da özetlenmiştir.



Şekil 3.30. Mikrobiyal yakıt hücreleri için ekzoelektrojen mikroorganizmaların elde edildiği çeşitli kaynaklar [118].

Mikrobiyal yakıt hücresi çalışmalarında çeşitli kaynaklardan elde edilen elektron transfer araçlarına sahip ekzoelektrojenler Tablo 3.8’de verilmiştir.

Tablo 3.8. Çeşitli kaynaklardan elde edilen ekzoelektrojen mikroorganizma örnekleri [118].

Mikroorganizma adı	Mikroorganizma alemi
<i>Escherichia coli</i>	Bakteri
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Bakteri
<i>Lysinibacillus sphaericus</i>	Bakteri
<i>Citrobacter sp.</i>	Bakteri
<i>Ochrobactrum sp.</i>	Bakteri
<i>Escherichia coli</i>	Bakteri
<i>Scenedesmus</i>	Algler
<i>Arthrospira maxima</i>	Algler
<i>Cyanobacteria</i>	Algler
<i>Chlorella vulgaris</i>	Algler
<i>Coriolus versicolor</i>	Algler
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Maya
<i>Hansenula anomala</i>	Maya
<i>Candida melibiosica</i>	Maya

3.5.1. Mikroplar İlişkili Moleküllerin Elektrik Üretimi ile İlişkisi

Mikrobiyal yakıt hücresi çalışmalarında anot potansiyeli, bakteri metabolizmasını ve bununla ilişkili olan yakıt hücresinin güç çıkışını belirlemede göz ardı edilemeyecek bir rol oynamaktadır. Bir elektrotun potansiyeli, gümüş/gümüş klorür (Ag/AgCl) gibi bir referans elektroda karşı bir multimetre veya potansiyostat cihazı kullanılarak voltajın ölçülmesiyle ölçülebilir. Elektrot potansiyeli (anot veya katot) aynı zamanda mikrobiyal membran boyunca elektron transfer performansını da tespit etmektedir. Redoks molekülleri, elektronları membran boyunca standart redoks potansiyeli olarak adlandırılan belirli bir potansiyelde transfer eder ve bu potansiyel aynı zamanda elektrodun (anot) potansiyelini de belirler. Başka bir deyişle, elektronlar mikrobiyal hücreyi farklı noktalardan terk edebilir. Bu nedenle, mikrobiyal hücrenin elektronları membran boyunca verimli bir şekilde transfer etmesi için uygun bir elektrot potansiyeli (anot) ayarlamak faydalıdır. Bir elektrotun potansiyeli, referans elektroda karşı bir potansiyostat kullanılarak ayarlanabilir. Redoks moleküllerinin standart redoks potansiyelleri Tablo 3.9'da verilmiştir. Ayrıca, elektrodun redoks özellikleri (yani, bakteri ile elektrot arasında elektron transferinin gerçekleşip gerçekleşmediği) döngüsel voltametri tekniği ile belirlenebilir. Dahası, elektron transfer yolu, bakteri kültürleme potansiyeline bağlı olarak doğrudan elektron transferinden aracı elektron transferine geçebilir [118].

Tablo 3.9, redoks molekülleri olarak adlandırılan moleküllerin standart redoks potansiyellerini hakkında bilgiler sunmaktadır. Mikrobiyal yakıt hücresinde; karbonhidratlar, lipitler ve proteinler içeren organik substratlar, enerji üretmek için anottaki redoks reaksiyonları için elektron vericisi görevi görür. Bu karmaşık organik moleküller, glikoliz ve diğer ilgili işlemlerden geçerek asetil Co-A'yı üretir ve bu da sitrik asit döngüsüne (trikarboksilik asit döngüsü veya Krebs döngüsü olarak da bilinir) katılır. Döngünün tam bir turu, üç eşdeğer nikotinamid adenin dinükleotidini (NAD^+) üç eşdeğer indirgenmiş NADH 'ye dönüştürür. Bir flavin adenozin dinükleotidi (FAD), FADH_2 'ye indirgenir ve CO_2 yan ürün olarak salınır. Bu metabolik yollar (glikoliz ve Krebs döngüsü), hem prokaryotlarda (bakteriler) hem de ökaryotlarda (mayalar) sitoplazmada meydana gelir. NADH ve FADH_2 , elektron taşıyıcıları olarak görev yapar ve elektronlarını bir elektron taşıma zincirine aktararak enerji taşıyıcı molekül adenozin trifosfatı üretir. Bakterilerde solunum reaksiyonu, hücre zarında (dış hücre zarını, iç hücre zarını ve periplazmayı oluşturur) meydana gelir. Bu zar, elektron transferleri için gerekli tüm proteinleri veya enzimleri içerir (mikrobiyal yakıt hücresinin temeli). Mayada ise elektron taşıma zinciri, iç mitokondriyal zarıda bulunur. Elektron taşıma zinciri tipik olarak dört aracı protein içerir. Bunlar; NADH dehidrojenaz, ubiquinon, koenzim Q ve sitokromlardır. Ancak sitokromlar aracı proteinler türe göre değişebilir. Elektronlar bu proteinlerden geçerek son elektron alıcısına ulaşır ve protonlar (indirgenmiş) anotta hücreden dışarı pompalanır ve daha sonra bir proton değişim zarı aracılığıyla katoda aktarılır. Bakterilerin elektron transferini kolay-

laştırabildiği ortaya çıkmadan önce, bakteri hücresinin içinden anot yüzeyine elektron transferini katalize etmek için kimyasal araçlar kullanılıyordu. Bu araçlar genellikle elektron taşıma zincirindeki bileşenleriyle tepkimeye girerek indirgenir, hücrenin dışına salınır ve elektronlarını anoda aktarır [118].

Tablo 3.9. Redoks moleküllerinin standart redoks potansiyelleri [118].

Redoks tepkimesi	Redoks potansiyeli (E'_0)
Ferredoksin (Fe^{3+}) + $e^- \rightarrow$ Ferredoksin (Fe^{2+})	-0,42 Volt
$\text{NAD}^+ + \text{H}^+ + 2e^- \rightarrow \text{NADH}$	-0,32 Volt
$\text{Pirüvate}^{2-} + 2\text{H}^+ + 2e^- \rightarrow \text{Laktat}^{2-}$	-0,18 Volt
$\text{FAD} + 2\text{H}^+ + 2e^- \rightarrow \text{FADH}_2$	-0,18 Volt
$2\text{H}^+ + 2e^- \rightarrow \text{H}_2$	-0,42 Volt
$\text{S} + 2\text{H}^+ + 2e^- \rightarrow \text{H}_2\text{S}$	-0,27 Volt
Sitokrom c (Fe^{3+})+ $e^- \rightarrow$ Sitokrom c (Fe^{2+})	+0,25 Volt
Sitokrom b (Fe^{3+})+ $e^- \rightarrow$ Sitokrom c (Fe^{2+})	+0,07 Volt
Ubikinon + $2\text{H}^+ + 2e^- \rightarrow$ Ubikinon + H_2	+0,10 Volt
$\text{Fumarat}^{2-} + 2\text{H}^+ + 2e^- \rightarrow \text{Süksinat}^{2-}$	+0,03 Volt
$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4e^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	+0,84 Volt
$\text{Fe}^{3+} + e^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$	+0,77 Volt

Mikrobiyal yakıt hücresi elektrotlarında biyofilm oluşumu yaygın görülen bir durumdur. Biyofilm mikroorganizmaların aktivitesi sonucu oluşmaktadır. Biyofilm, bir yüzeye yapışan ve sulu bir ortamda gelişen yapışkan ve koruyucu bir matris olan ekzopolimerlerin üretimiyle sürdürülen, kendiliğinden üretilen sulu mikroorganizmalardan (bakteri, alg, mantar ve protozoa) oluşan bir popülasyondur. Biyofilmler, çevrede sürekli evrim geçiren canlı yapılardır. Bir biyofilmin ilk yaşam döngüsü çok sayıda faza ayrılır. Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek (DLVO) teorisinde iyi tanımlanmış olan, planktonik bakterilerin kırıl-gan kovalent olmayan kuvvetler aracılığıyla yüzeye yapışmaya başladığı birincil yapışma fazını takiben, bakteriler polisakkaritler ve proteinler salgılayarak geri dönüşümsüz bir şekilde yüzeye tutunmaktadırlar. Mikrokoloniler, bakteriler bölündüğünde oluşur. Daha sonra bakteriler, lipidler, proteinler, nükleik asitler ve polisakkaritlerden oluşan bir ekzopolimer matris salgılamaya başlar. Bu, biyofilmin %75-90'ını oluşturabilir ve biyofilm yapısını korurken ona muazzam bir esneklik de sağlayabilir. Biyofilm daha sonra bir olgunlaşma aşamasından geçer. Elektrik enerjisi üretimini ve atık su arıtmını etkileyen en önemli unsurlardan biri biyofilmlerin yaşı ve kalınlığıdır. Bazı elektrokimyasal olarak aktif bakteriler pili ve nanoteller üretebildiğinden, biyofilmler substratın nüfuz etmesini engelleyebileceğinden, bu uzantıların biyofilm stabilitesini iyileştiren, uzun mesafelerde elektron transferini kolaylaştıran ve biyofilm kalınlığının artmasına yardımcı olan ve dolayısıyla üretim oranını artıran nano-güç şebekelerinin oluşturulmasıyla sonuçlanması beklenmektedir. Bu, çevresel koşullar izin verirse kalınlık artışıyla sonuçlanır. Son olarak olgun biyofilm, izole edilmiş bakterileri

veya biyofilm parçalarını serbest bırakan bir dağılma fazından geçer ve bu süreç başka bir yüzeyde biyofilm oluşumuna yol açabilir. Oksijen ve besin gradyanlarının ortaya çıkışı, biyofilmin üç boyutlu büyümesi ve biyofilmin içinde difüzyonu engelleyen hücre dışı bir matrisin varlığından kaynaklanır [119].

Mikrobiyal topluluğu etkileyen önemli parametrelerden birisi pH'dır. Redüksiyon-oksidasyon (REDOX) tepkimeleri nedeniyle, anot etrafındaki pH, anot bölmesinde proton birikimi nedeniyle bazı durumlarda 5'e kadar düşmüştür. Çözelti pH'ı bakteri topluluğu ve bakteri büyümesi üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, çevresel pH'daki herhangi bir değişiklik mikrobiyal topluluğu etkileyebilir. Düşük pH, mikrobiyal aktiviteyi ve biyofilm oluşumunu engeller ve sistem performansını düşürür. Ek olarak, çözelti pH'ındaki değişiklikler elektrot üzerindeki bakteri dağılımını etkileyebilir ve sonuç olarak mikrobiyal yapıyı değiştirebilir. *Geobacter* mikroorganizmasının büyümesinin 6,4'ün altındaki pH değerinde engellendiği ve pH 5,5'in altında büyüme olmadığı gözlemlenmiştir [120].

3.6. Membran

Bir membranın (ayırıcının) mikrobiyal yakıt hücrelerinde birkaç önemli işlevi vardır. Bunlar şöyle sıralanabilir [121]:

- Elektrotlar arasındaki kısa devreyi önlemek ve ilgili kimyasal reaksiyonları ayırmak,
- İyonları (protonlar, anyonlar veya her ikisi) anottan katoda veya tam tersi şekilde ileten bir kanal görevi görmek,
- Organik bileşiklerin (yakıt olarak kullanılan) anottan katoda geçişini ve oksijen gibi elektron alıcılarının katottan anoda geçişini engellemek. Yani membran yüksek tür seçiciliğine sahip olmak,
- Yüksek iyonik iletkenlik sağlamak,
- İyon değişim membranı olarak kullanımları durumunda, iyon iletim kanalları sağlamak için kısmen hidrofilik özelliklere sahip olmak,
- Gözenekli membranlar olarak kullanıldığında hidrofilik özelliklere bağımlı olmamak (yani tamamen hidrofobik olabilirler).

Mikrobiyal yakıt hücresi çalışmaları için çeşitli membran türlerinden söz edilmiştir. Bunların örnekleri şunlardır [121]:

- Katyon değişim membranları (örneğin, sülfonlanmış poli(eter eter keton membranlar),
- Selemin HSF'ler ve sülfonik asit gruplarına sahip polistiren ve divinilbenzen),
- Anyon değişim membranları (örneğin, Zirfon®),
- Ultrafiltrasyon ve mikrofiltrasyon membranları,
- Bipolar membranlar,
- İleri ozmoz membranları,

- Bez (J-kumaş) ayırıcılar,
- Cam elyaf ayırıcılar,
- Saflaştırılmış kaolinden yapılmış katyon değişim tabakaları,
- Nafion[®] 117 çözeltisi ile kaplanmış gözenekli porselen,
- Diyaliz membranları,
- Hidrofilik katyon değişim polimerlerinin ince tabaka püskürtme kaplaması,
- Anyon değişim ve nötr polimerler,
- Gözenekli kumaşlar ve kaba gözenekli filtre malzemesi,
- Politetrafloroetilen membranlar,
- İzogözenekli membran filtreler,
- Biomax ultrafiltrasyon diskleri,
- Cam yünü,
- Naylon membranlar,
- Polikarbonat membranlar,
- Selüloz nitrat membranlar,
- Kaolin,
- Porselen ve polietilen membran interpolimerleri,
- İleri ozmoz membranları ve
- Agar-agar membranları.

Mikrobiyal yakıt hücresi çalışmalarında en yağın kullanılan membran türü Nafion[®] 117 (NF-117) olarak tanıtılan membrandır. Bu membranın, mikrobiyal yakıt hücresi için gereken en iyi özelliklere sahip olduğu bildirilmiştir. Fakat bu membranın kullanımını sınırlayan çeşitli sorunlar vardır. Bunlar şöyle sıralanabilir [121]:

- Yüksek fiyatları vardır,
- Mikrobiyal yakıt hücreleri ölçeklendirildiğinde artan maliyetleri beraberinde getirir,
- Membran kalınlığı arttıkça membran direncinin artmaktadır,
- Membran kalınlığı arttıkça proton iletkenliği azalmaktadır.

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanılan iyon değişim membranları, iyonların membrandan transferi için kullanılmaktadır. İyon değişim membranlarının yapısında genellikle fonksiyonel bir grup bulunur. Bu fonksiyonel gruplar, aynı yüklü iyonları iterken zıt yüklü iyonların membrandan geçmesine izin vermektedir. Membranda bulunan fonksiyonel gruba göre membran sınıfları oluşturulur. Bu membran sınıfları şunlardır [122]:

- Anyon Değişim Membranı,
- Katyon Değişim Membranı,
- Bipolar Membranı.

Katyon Değişim Membranı, çoğunlukla protonun membrandan transferini kolaylaştırdığı için Proton Değişim Membranı (PEM) olarak da adlandırılır. Mikrobiyal yakıt hücresinde kullanılan proton değişim membranları, biyolojik kirlenme sorunu yaşamaktadır. Organik kolloidler, bakteriyel askıda parçacıklar, organik makromoleküller, PEM membranlarının biyolojik kirlenmesinin esas unsurlarıdır. Katyon değişim membranlarının membran omurgasına negatif yüklü gruplar ($-\text{SO}_3^-$, $-\text{COO}^-$, $-\text{PO}_3^{2-}$ veya $-\text{PO}_3\text{H}^-$) sabitlenmiştir. Bu gruplar, tüm katyonların membran üzerinden taşınmasına izin verir. Genellikle bu membran, anotta üretilen protonları katoda doğru aktarmak ve anotta oksijen difüzyonunu önlemek için kullanılır. Ancak protonların yanı sıra, diğer pozitif yüklü bileşenler de membrandan geçebilir [122].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde uygulanabilen membranlar çeşitli ticari adlar altında bulunan perflorosülfonik asit polimerleri (PFSA) için en yaygın kullanılan malzemelere örnek olarak şunlar verilebilir [122]:

- Nafion™ (DuPont),
- 3M,
- Flemion™ (Asahi Glass),
- Hyflon™ (Solvay-Solexis) ve
- Aquivion™ (Solvay).

Protonların anot bölmesinden katot bölmesine geçmesine ve hidrojen gazının ayrılmasına olanak tanıyan membran performansı çeşitli parametrelere bağlıdır. Membranın bağlı olduğu parametreler şunlardır [123]:

- Proton İletkenliği,
- Su Geçirgenliği,
- İyon Taşıma Sayısı,
- Biyolojik Kirlenme,
- İç Direnç,
- Mekanik Dayanıklılık,
- Kimyasal Direnç,
- Oksijen Difüzyonu,
- Membranın yüzeyi.

Yaygın olarak kullanılan membran, erişilebilirliği ve iyi performansı nedeniyle Nafion DuPont Inc. Amerika Birleşik Devletleri tarafından geliştirilmiştir. Bu Nafion perflorlu membran, proton iletkenliğini destekleyen, protonları anot odasından katot odasına aktaran, küçük katyonlara karşı seçici olan, suya karşı

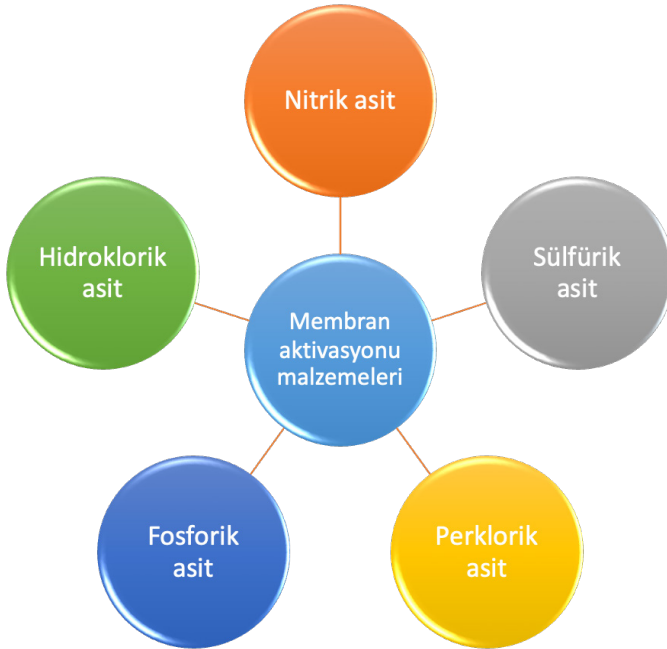
yüksek geçirgenliğe sahip olan ve elektronların geçişini önleyen sülfonik asit gruplarına sahiptir. Nafion membran kullanılmadan önce, iletkenlik kapasitesini aktive eden, havadan emilen olası organik molekülleri ortadan kaldıran ve membranı nemlendiren bir aktivasyon işlemi gereklidir. Bu aktivasyon; nitrik, sülfürik, perklorik asit, fosforik ve hidroklorik asitler gibi güçlü asit çözeltileriyle gerçekleştirilebilir. Ancak standart aktivasyon membran yöntemi, en yaygın kullanılan yöntem olmaya devam eden 1 molar sülfürik asit çözeltisini kullanır [123].

Bu Nafion malzemesinin kullanımının başlıca sınırlamaları şunlardır:

- Yüksek maliyet,
- Oksijen sızıntısı,
- Substrat kaybı ve
- Biyolojik kirlenmedir.

Ek olarak, anot odasındaki substrat atık su veya sızıntı suyu ise, protonlardan daha yüksek konsantrasyonlara sahip diğer katyon türlerinin varlığına rastlanabilir. Bu da protonların taşınmasını engelleyebilir ve mikrobiyal yakıt hücrelerinin performansında düşüşe neden olabilir [123].

Şekil 3.31, Nafion membran kullanılmadan önce yapılması gereken aktivasyon işleminde yaygın kullanılan malzemelerin özetini sunmaktadır.



Şekil 3.31. Nafion membran kullanılmadan önce yapılması gereken aktivasyon işleminde yaygın kullanılan malzemeler [123].

Mikrobiyal yakıt hücresi membranları biyolojik kirlenmeye maruz kalmaktadır. Biyolojik kirlenme, mikrobiyal yakıt hücrelerinde sık meydana gelen ve genel mikrobiyal yakıt hücresi performansını etkileyen bir sorun olarak devam etmektedir. Bu sorunu önlemek ve doğru katot işlevine izin vermek için, nedenlerini belirlemek ve olası azaltma tekniklerini uygulamak önemlidir. Biyolojik kirlenme, malzemenin yüzeyine bağlı heterotrofik mikroorganizmalar tarafından oluşturulan bir biyofilmden oluşmaktadır [123].

Mikrobiyal yakıt hücresi çalışmalarında kullanılan membranların proton iletkenliğine dair bilgiler Tablo 3.10'da verilmiştir.

Tablo 3.10. mikrobiyal yakıt hücresi çalışmalarında kullanılan membranlar ve proton iletkenlikleri [123].

Membranı adı	Proton iletkenliği (S/cm)
Nafion AMPS-MMT	0,0817
Kil malzemesi-% 20 MT-alkali	0,0179
Nafion 117	0,0810
Nafion 117	0,0900
Nafion 117	0,0185
TiO ₂ /SiO ₂	0,0166
Nanometre ölçeğindeki polipirol	0,0208
Gıda atıklarından oluşan membran	0,0700
AMPS = 2-akrilamido-d-metilpropansülfonik asit;	MMT = modifiye montmorillonit

Membran üretiminde kullanılan çevre dostu malzemeler, geliştirilme potansiyeli yüksek başka bir araştırma alanıdır. Organik membran malzemesine bir örnek olarak biyokömür verilebilir. Gıda atıklarından bir membran üretimi için 600°C'de piroliz işlemi yapılmıştır. Ardından polivinil alkol bazlı matrsten sülfonasyon uygulanmış ve son olarak bir mikrobiyal yakıt hücresinde denenmiştir. Yapılan denemede, Nafion 117 membranından daha düşük güç yoğunluğu değerleri elde edilmiş olsa da, düşük maliyetli bir PEM geliştirmek mümkün olmuştur [123].

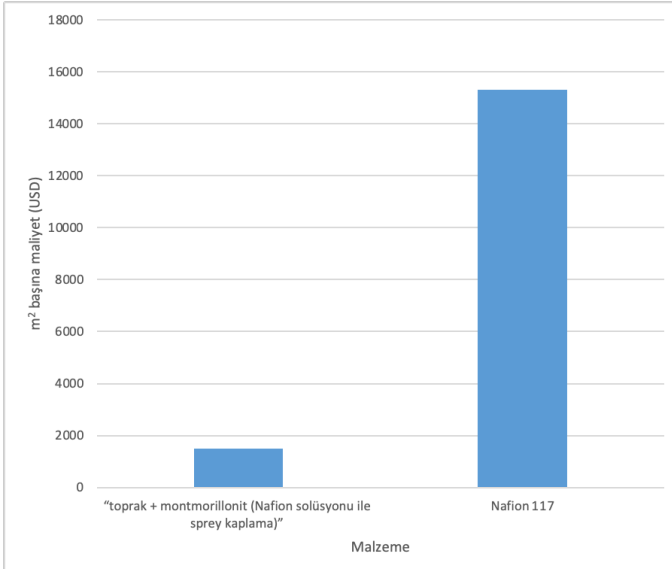
Bir mikrobiyal yakıt hücresinde, membrandan geçen proton transfer hızının genellikle katottaki proton tüketim hızından daha düşük olduğu bildirilmiştir. Bu nedenle, membrandan geçen proton veya katyon değişim hızı açısından sistemin performansını artırmak için daha yüksek olması gerektiği ifade edilmiştir. Bu nedenle, mikrobiyal yakıt hücrelerinin geliştirilmesinde ve ölçeklendirilmesinde membranın maliyeti ve performansı önemli parametrelerdir [124].

Polimerik ayırıcılara kıyasla özel kimyasal, termal ve mekanik özellikler gibi çeşitli avantajlar sunan membran malzemelerinden birisi de kil seramik malzemeleridir. % 100 Kaolin kilinden yapılmış bir membran mikrobiyal kullanılmıştır. Yapılan çalışmanın sonuçları, mikrobiyal yakıt hücresi performansının çift odacıklı bir mikrobiyal yakıt hücresindeki PEM ile karşılaştırılabilir olduğunu gösterdi. Kil seramik membranın kalınlığı değiştirilerek çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresinin performansı araştırılmıştır. Araştırmanın sonuçları, daha az kalınlığa sahip membran kullanılan mikrobiyal yakıt hücresinin daha iyi sonuçlar sağladığını göstermiştir. İnce membranla (4 mm) karşılaştırıldığında, daha kalın membran (8,5 mm), elektrot aralığını arttırmış ve bu da nihayetinde sistemin iç direncini arttırmıştır [124].

Yapılan bir çalışmada mikrobiyal yakıt hücresi için “toprak + montmorillonit (Nafion solüsyonu ile spreyle kaplama)” malzemelerinden membran yapılmış ve mikrobiyal yakıt hücresinde araştırılmıştır. Bu malzeme şu faydaları sağlamıştır [124]:

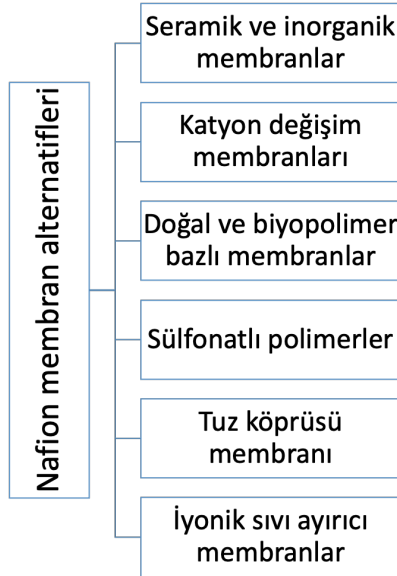
- Yüksek proton kütle transfer katsayısı,
- Nafion membranının değerinin neredeyse yarısı kadar proton transferi göstermiştir,
- Nafion membranının iletkenlik değerinin yaklaşık yarısı kadar iletkenlik değeri sağlamıştır,
- Çalışmada kullanılan tüm membranlar arasında Nafion-117 membran yaklaşık % 43 oranında su tutma kapasitesi gösterirken “toprak + montmorillonit (Nafion solüsyonu ile spreyle kaplama)” membranında yaklaşık %36,74 seviyelerinde su tutma kapasitesi göstermiştir. Bu, Nafion-117’ye yakın olması itibarıyla önemli bir faydadır.

Mikrobiyal yakıt hücresi çalışmalarında test edilen “toprak + montmorillonit (Nafion solüsyonu ile spreyle kaplama)” membran malzemesi ve Nafion-117 membranının maliyeti Şekil 3.32’de karşılaştırılmıştır. Burada görüleceği üzere, toprak + montmorillonit (Nafion solüsyonu ile spreyle kaplama)” membran 1.500\$/m² maliyetle üretilirken, Nafion 117 membranının maliyeti yaklaşık 15.300\$/ m²’dir [124].



Şekil 3.32. Bazı membran malzemelerinin maliyetlerinin karşılaştırılması [124].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde Nafion membranlara alternatif membranlar geliştirilmiştir. Maliyet, çevresel endişe, performans optimizasyonu ve kirlenme bozulma gibi sorunlar nedeniyle Nafion membranlara yeni seçenekler ortaya konulmuştur [125]. Nafion membranlara alternatif membranlar Şekil 3.33'te verilmiştir.



Şekil 3.33. Mikrobiyal yakıt hücreleri için Nafion membranlara alternatif membranlar [125].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde, anottan katoda verimli proton transferi için kritik bir performans sağlayan mükemmel proton iletkenliğine, kimyasal kararlılığa ve mekanik dayanıklılığa sahip olan katyon değişim membranları geliştirilmiştir. Bu membranlara örnek olarak; Fumasep® FKE ve FKS serisi, FuMA-Tech tarafından üretilen membranlar verilebilir. Bu membranlar, daha düşük iç direnç ve daha yüksek güç çıkışı sağlamıştır. Böylece hem laboratuvar hem de pratik uygulamalar için uygun olan mikrobiyal yakıt hücrelerinde Nafion'a mükemmel alternatifler sunmuştur [125].

Anyon değişim membranlarında protonlar yerine hidroksit iyonları (OH^-) vasıtasıyla iyon iletimi sağlamaktadırlar. Bu membralar; daha düşük maliyet, kirlenmeye ve metanol geçişine karşı daha iyi direnç göstermektedir. İlaveten, potansiyel olarak maliyetleri daha da düşürerek değerli olmayan metal katalizörlerin kullanımına olanak tanımaktadırlar. Bu membranların modifikasyonunun nafion membrandan daha iyi güç üretimi sağlamıştır [125].

Seramik ve inorganik membranlar; zorlu çalışma ortamlarında termal ve kimyasal kararlılık sunarak önemli bir fayda sağlar. Bu membralar, kirlenmeye karşı mükemmel dayanıklılık ve direnç sahiptirler. Seramik ve killi, gözenekli, uygun maliyetli membran alternatifleridir. Seramiklerin en küçük gözenek boyutu, büyük katyonları engellemeye yardımcı olur ancak yalnızca H^+ iyonlarının göçüne izin verir. Bir seramik örneği olan kil; alüminyum silikat (Al_2SiO_5), alüminyum oksit (Al_2O_3), silisyum dioksit (SiO_2), titanyum dioksit (TiO_2) ve alüminyum sülfat ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) gibi çeşitli higroskopik bileşiklerden oluşmaktadır. Mikrobiyal yakıt hücresi verimliliğini arttırmak amacıyla kil yüzey modifikasyonu üzerine araştırmalar da devam etmektedir. Bazı araştırmacılar kil membran yüzey özelliğini geliştirmek için hindistan cevizi kabuklarından elde edilen aktif karbonları kullanmışlardır. Aktif karbon tarafından üretilen yüzey alanı, membran boyunca daha iyi proton sıçramasını ve bağlı suyun korunumunu kolaylaştırmıştır. Kil membranı fiyatı 45 USD/m² seviyelerinde olmuştur. Böylece, Nafion 117 membranına göre yaklaşık 40 kat daha az para harcanmıştır [125].

Selüloz, kitosan ve aljinat gibi doğal polimerler Nafion'a çevre dostu alternatifler sunabilen doğal malzemeler olarak dikkat çekmişlerdir. Bu malzemeler aynı zamanda biyopolimer malzemelerdir ve biyolojik olarak parçalanabilir, uygun maliyetlidirler. Gezegendeki en yaygın doğal polimer olan selüloz, olağanüstü nitelikleri, uyarlanabilirliği ve yeni özelliklere sahip türevlere dönüştürülebilme kapasitesi sayesinde proton değişim membralarının gereksinimlerini karşılayabilecek bir malzeme olarak dikkate alınmaya değer yeterli nitelikler göstermiştir [125].

Mikrobiyal yakıt hücreleri için iyi proton iletkenliği ve mekanik özellikleri nedeniyle sülfonatlı polietilen eter keton (SPEEK) gibi polimerler araştırılmaktadır. Bunlar potansiyel olarak Nafion malzemeye göre uygun maliyetli ve yük-

sek performanslı bir alternatif sunabilirler. Yeni kompozit polimer-elektrolit membran, sülfonatlı polisülfonun (SPSU) metal-organik çerçeve ile homojen karışımlarından hafif reaksiyon koşulları altında hazırlanmıştır. Üretilen kompozit, mikrobiyal yakıt hücresinde membran olarak kullanılmış ve ticari nafi-on membrana göre gelişmiş performans göstermiştir [125].

Tuz köprüsü membranları, çevresel etki ve maliyetin önemli olduğu koşullar için uygundur. Ancak aşırı mekanik ve kimyasal kararlılığın kritik gereklilikler olduğu uygulamalar için uygun değildir. Kırmızı alglerden elde edilen doğal bir polisakkarit olan agar, iyon iletken membranlar oluşturmak için kullanılabilir. Bu membranlar biyoyumlulukları, biyolojik olarak parçalanabilirlikleri ve düşük maliyetleri gibi yararlı özelliklerinden dolayı araştırmalarda kullanılır. Farklı bileşime sahip potasyum klorür (KCl), agar ve damıtılmış su kullanılarak mikrobiyal yakıt hücreleri için membran hazırlanmıştır [125].

Bir başka membran türü olan iyonik sıvı ayırıcı membranlar, yaygın olarak OMIM [PF6] (1-oktil-3-metilimidazolyum hekzaflorofosfat) veya BMIM [PF6] (1-bütül-3-metilimidazolyum hekzaflorofosfat) gibi sıvı malzemeler içermektedirler. İyonik sıvı membranlar, yalnızca termofilik mikroplarda ikna edici sonuçlar vermiştir. BMIM [PF6] ve polimer PVDF ile hazırlanan iyonik sıvı membranında verimli kütle transferi gözlemlenmiştir. Termofilik mikroplar için umut verici olduğundan, iyonik sıvı 50-60°C arasındaki sıcaklıklarda çalıştırıldığında verimlidirler. Bazı çalışmalarda, iyonik sıvı içeren membranın nafi-on malzemeye meydan okuyabileceği ve hatta mikrobiyal elektrokimyasal uygulamalara yönelik ek araştırmalar için potansiyel bir aday olduğu iddia edilmiştir [125].

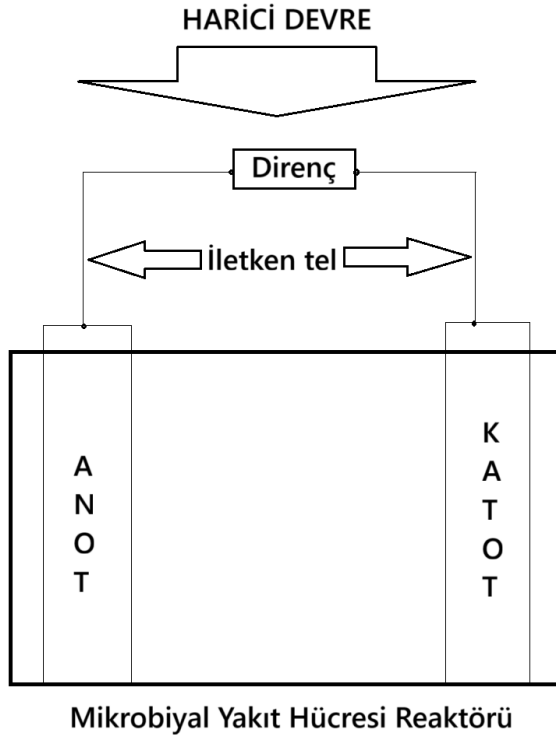
3.7. Elektrik Devresi

Mikrobiyal yakıt hücresinin anot elektrotu ve katot elektrotu arasındaki elektriksel bağlantıyı oluşturan elektrik devresi “dış devre” veya “dış elektrik devresi” olarak anılmaktadır. Dış devre vasıtasıyla anottan gelen elektronlar katota doğru akmaktadırlar [126, 127].

Harici (dış) elektrik devresine çeşitli dış dirençler veya elektriksel devre elemanları bağlanabilmektedir. Harici devreye bağlanan direnç, yük olarak da adlandırılmaktadır. Harici elektrik devresini tamamlamak için iletken teller kullanılmaktadır [127].

Mikrobiyal yakıt hücresindeki harici elektrik devresini oluşturan direnç (yük) mikrobiyal yakıt hücresi performansı üzerinde etkilidir. Mikrobiyal yakıt hücresi güç yoğunluğu; kimyasal oksijen ihtiyacı, pH ve sıcaklık gibi çalışma koşullarının veya elektrot yüzey alanı ve harici direnç gibi yapılandırma seçeneklerinin optimize edilmesi sonucu yükseltilebilir. Bunun için en önemli değişkenlerden birisi de harici devrede yer alan dış dirençtir. Bu durumun sebebi dış direncin uygulanan akımı ve hücre voltajını kontrol etmesi olarak bildirilmiştir [126].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinin haric devresinde bulunan yüksek bir dış direnç, yüksek bir hücre voltajı ve düşük bir akımla sonuçlanır. Harici devredeki düşük dış direnç düşük hücre voltajı ve yüksek bir akımla sonuçlanır. Jacobi Yasasına göre, dış direnç mikrobiyal yakıt hücrelerinin iç direncine eşit olduğunda, mikrobiyal yakıt hücresi tarafından en yüksek güç çıkışı sağlanır. Mikrobiyal yakıt hücresi teknolojisinin temel sorunlarından birinin güç çıkışını en üst düzeye çıkarmak olduğu göz önüne alındığında, dış devrede yer alan dış direncin mikrobiyal yakıt hücresi üzerindeki etkisinin incelenmesi mühendisler açısından oldukça önemli bir konudur [126]. Mikrobiyal yakıt hücresi harici devreyi oluşturan aksamalar ve bağlantıları Şekil 3.34'te verilmiştir.



Şekil 3.34. Mikrobiyal yakıt hücresindeki harici devre ve aksamaları [126, 127].

4. TOPRAK MİKROBİYAL YAKIT HÜCRELERİ

Toprak mikrobiyal yakıt hücreleri; yenilenebilir enerji üretimi, çevre kirliliği arıtımı ve algılama alanlarında geniş potansiyel uygulamalara sahiptir. Bu mikrobiyal yakıt hücresi yeşil bir teknoloji olarak ciddi bir şekilde dikkat çekmiştir. Bunun sonucunda toprak mikrobiyal yakıt hücreleri son on yıllarda şu alanlarda çeşitli işlerde kullanılmak üzere geliştirilmeye çalışılmıştır [128]:

- Düşük güçlü sensör izleme (araştırmacılar ağırlıklı olarak bu konuya odaklanmıştır),

- Kirli toprağın iyileştirilmesi,
- Yeni ortaya çıkan algılama amaçları.

Günümüzün sanayileşmiş toplumunda, hem çevre kirliliği ve hem de enerji kıtlığının ortaya çıkardığı zorlukları yenilikçi ve sürdürülebilir yaklaşımlarla çözümlere kavuşturmak büyük bir gereksinim olarak karşımızda durmaktadır. Sanayi ölçekli faaliyetler ve yoğun tarım yapılması nedeniyle toprak kirliliği ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, ekosistemler için ciddi bir tehdit boyutu ortaya çıkmıştır. Toprak kirliliği ile mücadele etmek için geleneksel toprak iyileştirme teknikleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat geleneksel toprak iyileştirme tekniklerinin şu sorunları vardır [129]:

- Genellikle yüksek işletme maliyetleri vardır,
- Verimsizdirler ve
- İkincil çevresel hasar riski oluşturabilirler.

Geleneksel toprak iyileştirme tekniklerinin ortaya çıkardığı zorluklar, kirlenmiş toprakları aynı anda iyileştirebilen ve yenilenebilir enerji üretimi yapabilen alternatif teknolojilere olan ihtiyacı gözler önüne sermektedir. Buradan yola çıkarak ortaya çıkan biyoremediasyon stratejileri arasında, toprak mikrobiyal yakıt hücreleri umut vadetmektedir. Toprak mikrobiyal yakıt hücreleri, biyoelektrojenizi biyoremediasyonla entegre etme kabiliyetine sahiptir. Bu nedenle, toprak mikrobiyal yakıt hücreleri önemli ölçüde dikkat çekmiştir. Toprak mikrobiyal yakıt hücreleri çevresel zorlukları ele almak için umut verici bir çift işlevli yaklaşım sunmaktadır [129].

Mikrobiyal yakıt hücreleri için toprak önemli bir malzeme olarak dikkat çekmiştir. Toprak, organik bileşikler sayesinde bir enerji kaynağı olarak görülmektedir. Toprak organik bileşiklerden gelen enerjiyi bünyesinde bulunduran ve çeşitli mikroorganizmaları bünyesinde barındıran bir malzemedir. Bu özellikleri nedeniyle mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanılmıştır. Toprak kullanarak elektrik üreten mikrobiyal yakıt hücreleri; “toprak esaslı”, “toprak kaynaklı” veya “toprak” mikrobiyal yakıt hücreleri olarak ifade edilmiştir. Toprakta elektriksel güç üretim sürecinin birkaç potansiyel uygulaması şunlardır [130]:

- Kirletici toksisitesi ve toprak mikrobiyal aktivitesi gibi faktörler, mikrobiyal yakıt hücrelerinin ürettiği tepe voltajı, elektron miktarı ve başlangıç süresi gibi elektrik sinyalleriyle izlenebilir,
- Mikrobiyal yakıt hücrelerinin kullanımının fenol, benzin ve yağ dahil olmak üzere toprak kirleticilerinin ortadan kaldırılmasına yol açacağına inanılmaktadır,
- Mikrobiyal yakıt hücrelerinin çalışması çeltik toprağı ve tortusundan gelen metan emisyonlarını azaltmaktadır.

Mikrobiyal yakıt hücreleri az miktarda elektrik gücü üretir ve elektriksel olarak şarj edilme gereksinimleri yoktur. Bu nedenle, mikrobiyal yakıt hücreleri sürdürülebilir bir teknoloji olarak kabul edilmektedir. Toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinin performansının çoğunlukla topraktaki ekzoelektrojenik bakteriler tarafından üretilen elektrik akımının büyüklüğüne bağlı olduğu ifade edilmektedir. Ancak, toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücresi tarafından üretilen elektriksel gücün niteliği ve farklı topraklardaki ekzoelektrojenik bakterilerin çeşitliliği hakkında çok az şey bilinmektedir [130].

Toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerindeki toprak, organik bileşiklerden gelen kimyasal enerjiyi toprak kaynaklı ekzoelektrojenik mikroorganizmaların katalizlemesiyle doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmektedir [130].

Umut verici mikrobiyal yakıt hücresi türlerinden birisi de toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücreleridir. Toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücreleri, toprak içermeleri nedeniyle gerçek dünya koşullarında uygulamalar için büyük potansiyel sunmaktadır. Ancak bu mikrobiyal yakıt hücrelerinde, düşük enerji üretim oranları ve performans istikrarsızlıkları gibi sorunlar bunların gerçek dünyadaki uygulamalarını sınırlamıştır. Bu sınırlamalardan dolayı, doğrudan pratik uygulamalar için en uygun toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücreleri sistem performansına ulaşılması büyük ihtiyaçtır. Bunun için toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinin hem tasarım mimarisi açısından hem de biyolojik açıdan geliştirilmesi gerektiği kanaati ağır basmaktadır. Toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücresi araştırmalarının odak noktaları şunlardır [131]:

- Toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinin bireysel yönleri,
- Yığın yapılandırması,
- Reaktör tasarımı,
- Elektrot malzemeleri,
- Aşılama ve
- Çalışma koşullarıdır.

Bilim insanları ve araştırmacılar, 2050 yılı için hedeflenen net sıfır karbon hedefine yalnızca karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltabilen yenilenebilir enerji çözümleriyle ulaşılacağını düşünmektedirler. Bu konuda yapılacak çalışmalardan birisi de toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerini geliştirmek ve optimize etmektir. Toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerini çalıştırmak için en pratik ve enerji açısından en verimli stratejiyi bulmak, bu teknolojiyi laboratuvarından saha uygulamalarına geçirmek için çok önemlidir [132].

2050 yılı için hedeflenen net sıfır karbon hedefine ulaşmak için toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücreleri; düşük maliyetli ve karbon nötr bir enerji dönüşüm teknolojisi olarak önemli bir potansiyele sahiptir. Çeşitli mikrobiyal yakıt hücresi tipleri arasında, toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücreleri tartış-

masız en uygun maliyetli olan mikrobiyal yakıt hücresidir. Çünkü destekleyici matris, mikroorganizma kaynağı ve membransız konfigürasyonlarda anot ve katot arasında ayırıcı olarak toprağı kullanırlar. Sonuç olarak, mikrobiyal yakıt hücresinin genel sistem tasarımı basitleştirilir ve sürekli yakıt veya oksijen pompalamasına gerek kalmadan çalışması da basitleştirilmiş olunur [132].

Toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücresi teknolojisi hem düşük maliyetli hem de sürdürülebilir bir güç kaynağı olarak ciddi bir potansiyele sahiptir. Toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücresi teknolojisi, topraktaki biyolojik olarak parçalanabilir maddede depolanan kimyasal enerjiyi doğrudan elektriğe dönüştürmek için elektroaktif mikroorganizmalardan faydalanmaktadır. Geleneksel mikrobiyal yakıt hücrelerine benzer şekilde, toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinin pratik uygulamaları, etkili güç ölçeklendirme stratejileri ve uzun vadeli kararlılık konusundaki zorluklar nedeniyle sınırlanmaktadır. Buradan yola çıkarak tek bir halde olan toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinin fiziksel ve kimyasal kısıtlamalarını hafifletmek için çeşitli stratejiler ortaya atılmıştır. Bunlar [132];

- Optimum elektrot malzemelerinin seçimi,
- Sistem mimarisinin değiştirilmesi ve
- Operasyonel koşulların optimizasyonuna odaklanmıştır.

İnsanın sebep olduğu iklim bozulması ve elektronik atık patlaması, bilişim camiasını her zaman değiştirilip şarj edilmesi gerekli olan mevcut pille çalışan, aşırı tedarik gereksinimi olan, her yerde bulunan bilişim cihazlarına temel alternatifler keşfetmeye itmiştir. Toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücreleri, geleneksel pillerin ve güneş panellerinin yetersiz kaldığı zorlu ortamlarda biyoyumlu ve uygulanabilir bir yenilenebilir enerji kaynağı olarak umut vaat etmektedir. Ancak, toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücreleri henüz geliştirme ve emekleme aşamasındadır. Toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücreleri çevresel faktörlere dayanıklılık ve düşük güç çıkışı gibi zorluklarla karşı karşıyadır. Bu zorluklar, toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinin karasal ortamlarda gerçek dünya uygulamalarını hayata geçirme çabalarını engellemektedir [133].

Toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücresi, organik kirleticilerle kirlenmiş topraklar için maliyet açısından umut verici bir teknoloji olarak kabul edilmiştir. Çoğunlukla biyoelektrik çıktısı ve kirletici giderimi ile karakterize edilen bir toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücresinin performansı, organik kirleticilerle kirlenmiş alanların iyileştirilmesinde uygulanmasının anahtarıdır. Bir toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücresi konfigürasyonuna ve çalışma mekanizmasına göre performansı elektrot malzemeleri, elektrot aralığı, elektron alıcısı, katot katalizörü ve toprak özellikleri gibi konfigürasyon ve çalışma parametrelerinden etkilenecek olsa da, esasen anottaki mikrobiyal topluluğa, mikrobiyal topluluğun aktivitesine ve substrattaki metabolizma verimliliğine bağlıdır. Yapılan bir çalışmada, toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücresini yapay sulak alana

dahil edilmiş ve anot etrafında önemli ölçüde farklı mikrobiyal topluluk oluşumuyla biyoelektrik çıktısının arttığı görülmüştür [134].

Toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücresinin önemli ve faydalı yönleri Şekil 4.1'de vurgulanmıştır.



Şekil 4.1. Toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinin önemli ve faydalı yönleri [129-134].

Doğal daha derin topraklarda, organik maddelerin (veya bazı durumlarda sülfürün) farklı terminal elektron alıcılarıyla oksitlenebildiği veya farklı mikroorganizmalar tarafından fermente edilebildiği anoksik bir ortam oluşmaktadır. Ancak, elektron vericileri veya alıcılarının olmaması nedeniyle biyoremediasyon sırasında topraktaki kalıcı organik kirleticilerin bozunması çok

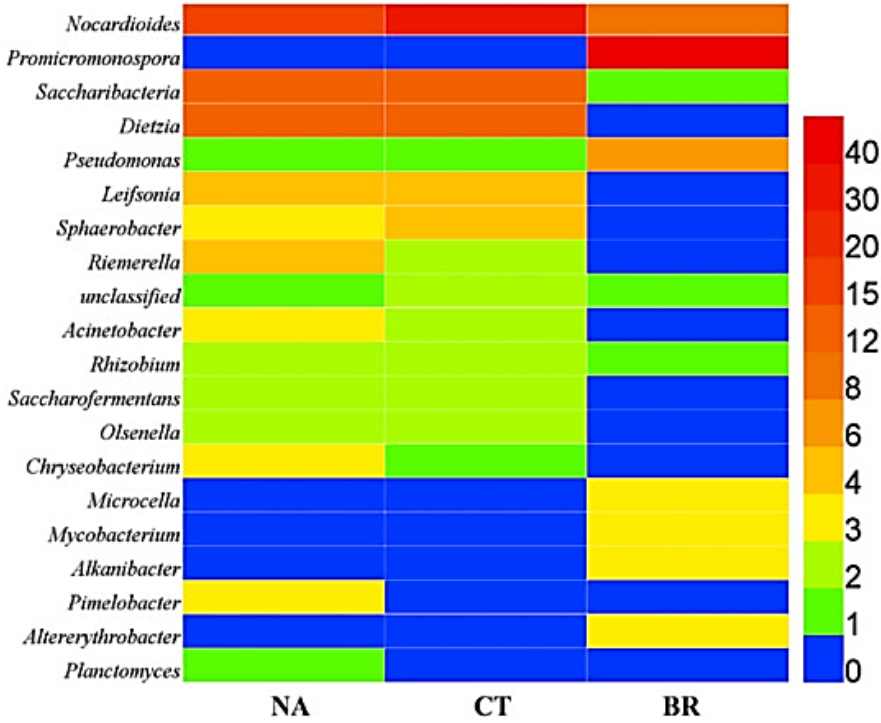
zordur. Toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinde, üstteki suda asılı kalan ve havaya maruz kalan üst yüzey, anaerobik toprak içinde belirli bir derinlikte organik maddelerin oksidasyonu için anodik mikroorganizmalar için terminal elektron alıcısı olarak görev yapabilir. Toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinin çalışmasında toprakta mevcut bulunan mikroorganizmalar önemli bir rol oynamaktadır. Toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücresi çalışmalarının çoğu, anottaki biyofilmin tipik olarak iki bakteri grubu tarafından zenginleştirildiğini bildirmiştir. Bu mikroorganizmalar şunlardır [135]:

- *Desulfocapsa* veya *Desulfobulbus* cinsleri,
- *Desulfuromonas acetoxidans* (*Geobacteracea* familyası).

Toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinin geliştirilmesini ve verimliliğini etkileyen temel faktörler şunlardır [135]:

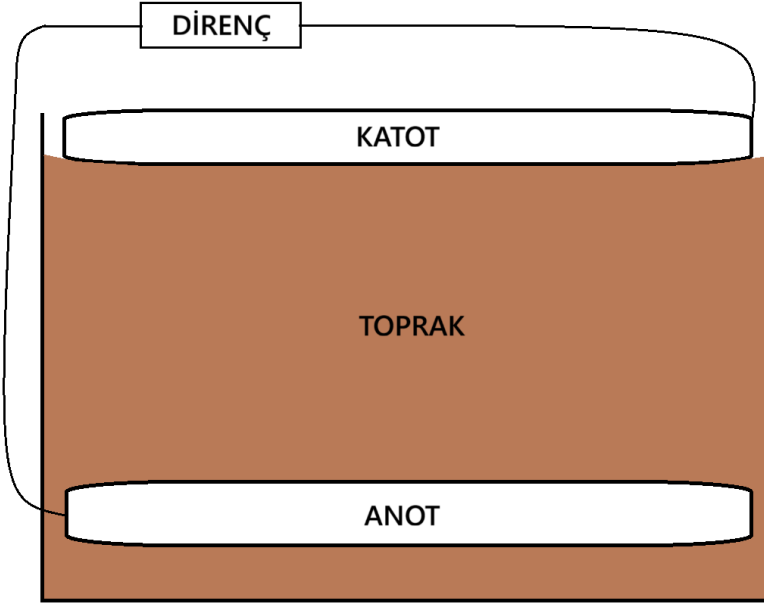
- Elektrot malzemeleri,
- Reaktör yapılandırması veya tasarımı,
- Kütle transferi,
- Toprağın elektriksel iletkenliği,
- pH,
- Toprak mikrobiyal topluluğu,
- Moleküler ağırlık,
- Hidrofilite,
- Toprak tipi,
- Su içeriği,
- Sıcaklık,
- Organik madde,
- Besin elementleri ve
- Toprak gözenekliliği.

Toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücresinin ana bileşeni olan toprak örneklerinde bulunabilecek mikrobiyal cins örnekleri Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Çeşitli toprak örneklerinde bulunan mikroorganizma cinsleri [135].

2000'li yılların başında, mikrobiyal yakıt hücreleri ilk olarak toprak ekosistemine uygulanmıştır. Toprakta doğal olarak oluşan potansiyel farkın elektron akışı için uygun olduğu ve membransız mikrobiyal yakıt hücresi konfigürasyonlarına olanak sağladığı ortaya çıkmıştır. Toprak ekosistemine dayalı bir mikrobiyal yakıt hücresi, tipik olarak anaerobik toprak fazına gömülmüş bir anot ve hava ile temas halinde veya oksijen açısından zengin su fazına yerleştirilmiş bir katottan oluşmaktadır. Laboratuvar deneylerinde, anot ve katot bölmeleri proton geçirgen bir membran ile ayrılabilir. Lakin özellikle saha testlerinde membransız tasarımlar en sık kullanılmıştır. Toprakta mevcut olan mikroorganizmalar, toprakta bulunan organik maddeleri ayrıştırır. Böylece, elektron ve proton üretimi sağlanır. Elektronlar, sistemde akım üretiminden sorumlu olan harici bir devre aracılığıyla anottan katoda aktarılır. Protonlar topraktan katoda geçer. Katotta, elektronlar ve oksijen birleşerek su oluşturur. Bu süreçlerin tamamlanması elektrik enerjisi üretimini sağlar [136].



Şekil 4.3. Toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücresi şematik gösterimi [136].

Toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücreleri şu ekosistemler kullanılarak geliştirilmiştir [136]:

- Çayırlar,
- Bataklıklar,
- Turbalar,
- Sulak alanlar,
- Tarım ekosistemleri,
- Orman ekosistemleri,
- Nehir, göl veya deniz tortuları gibi farklı ekosistemler.

Toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücresi tipleri arasında şunları ayırt edebiliriz [136]:

1) Toprak mikrobiyal yakıt hücreleri, farklı toprak tiplerinde çalışır. Örneğin; tarım arazilerinden, bataklıklardan, çayırlardan, turbalardan ve ormanlardan temin edilen toprak; toprak destekleyici matris, elektrotlar arasındaki ayırıcı ve mikroorganizma ve organik madde kaynağıdır. Bu tip mikrobiyal yakıt hücresinde toprak, bitki yetiştirmeden kullanılır (laboratuvar deneylerinde) veya toprakta büyüyen bitkilerin etkisi ihmal edilir (saha testlerinde).

2) Tortul mikrobiyal yakıt hücreleri, toprak ve su olmak üzere iki fazdan oluşan tortularda çalışırlar. Toprak fonksiyonu toprak mikrobiyal yakıt hücrelerinde olduğu gibidir ve olası büyüyen bitkilerin etkisi göz ardı edilir.

3) Bitki mikrobiyal yakıt hücreleri, canlı bitkilerin köksapında çalışır. Toprak esas olarak destekleyici bir matris, mikroorganizma kaynağı ve elektrotlar arasında bir ayırıcıdır.

4) Yapay sulak alan mikrobiyal yakıt hücreleri, Atık su arıtımına ayrılmış, yapay sulak alanlar ile birleştirilmiş mikrobiyal yakıt hücresi teknolojisini temsil eder.

4.1. Kompost Mikrobiyal Yakıt Hücreleri

Toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücrelerinde, organik maddeyi parçalamak için doğal bakteriler veya salgılanan enzimler kullanılır. Toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücresi, genellikle topraktan elektrik üretmektedir. Toprağa kompost ilavesi sonucu ortaya çıkan bir toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücresi türü de kompost mikrobiyal yakıt hücresidir. Yapılan bir çalışmada, kompostta yakıt olarak üre kullanan bir toprak esaslı mikrobiyal yakıt hücresi elektrik üretimi için araştırılmıştır. Söz konusu çalışma, “toprak esaslı üre mikrobiyal yakıt hücresi sistemleri” olarak tanıtılmıştır. Yapılan çalışma, ucuz ve bol bulunan herhangi bir kompostun mikrobiyal yakıt hücresi için uygun bir aday olduğunu ortaya koymuştur [136].

Yapılan arştırmalarda, organik maddeler açısından zengin olan kompost malzemelerin, bakteri üremesini olumlu yönde etkiledikleri bildirilmiştir. Bu nedenle, mikrobiyal yakıt hücrelerinde kompost malzemenin kullanımı gündeme gelmiştir [137, 138]. Yapılan bir çalışmada, kompostlaşmış toprak, çinko anot ve grafit katot kullanılarak mikrobiyal yakıt hücresi tasarlanmıştır. Yapılan deneyler, mikrobiyal yakıt hücresi sisteminde elektrik enerjisi üretim sürecinin çinko anot kullanılarak gerçekleştirildiğini ve çinkonun alternatif bir anot elektrot malzemesi olduğunu göstermiştir. Ancak, çinkoda oluşan korozyon problemi mikrobiyal yakıt hücresinin uzun vadeli performansı üzerinde ciddi ele alınması gereken bir sorun olarak kendini göstermiştir [97].

Yapılan bir çalışmada, karasal mikrobiyal yakıt hücresi olarak adlandırılan bir mikrobiyal yakıt hücresi için Roma'nın 30 km kuzeyinden bulunan terk edilmiş bir tarım alanından alınan toprak örnekleri ve belediye atık kompostu kullanılmıştır. Kompost varlığı sayesinde mikrobiyal yakıt hücresinin anot, katot ve tarım toprağı arasında mikrobiyal topluluklarda önemli farklılıklar tespit edilmiştir. Kompost varlığında anotta birkaç elektroaktif cins (*Bacillus*, *Fulvigrigra*, *Burkholderia* ve *Geobacter*) tespit edilmiştir. Genel olarak, belediye atık kompostunun kullanımı, anottaki elektroaktif bakterilere yönelik seçici basınç sayesinde, özellikle de üretilen voltaj ve elektrik gücü açısından mikrobiyal yakıt hücrelerinin performansını önemli ölçüde arttırmıştır. Kompost ilavesi sayesinde organik maddedeki hafif artış meydana gelmiştir. Böylece mikrobiyal hücrenin farklı bölmelerinde farklı mikrobiyal toplulukların (kimyasal parçalayıcı bakteriler dahil) seçilmesini mümkün kılmıştır. Kompost içerikli mikrobiyal yakıt hücresi sayesinde belediye organik atığından kompost uygulanması yapıl-

mıştır. Bu, düşük maliyet sağlamış ve dairesel ekonomiye uygun bir yan ürün kullanımına imakna tanımıştır. Böylece çok yönlü faydaları beraberinde getirmiştir. Üstelik asetat, laktat ve glikoz gibi daha pahalı karbon substratları ile karasal mikrobiyal hücrelerle karşılaştırılabilir sonuçlar elde edilmiştir [139].

Kompost mikrobiyal yakıt hücreleri, yapısında kompost içeren mikrobiyal yakıt hücreleridir. Kompost, bitki, gıda atıkları ve organik maddelerin (belediye atıkları gibi) aerobik bozunmasıyla organik atıkların arıtılmasından elde edilen organik bir gübre olarak ifade edilmektedir. Kompost; organik karbon, elektrokimyasal olarak aktif mikrobiyal topluluklar ve mikro elementler açısından zengin bir malzemedir. Bu özellikleri nedeniyle kompost çok çeşitli tarımsal kullanımlar için uygun bir malzeme olarak ifade edilmektedir. Toprağa ilave edilen kompost, topraktağın su tutma kapasitesini, toprak organik madde içeriğini, besin maddelerini ve katyon değişim kapasitesini arttırmaktadır [139].

Yapılan bir çalışmada, mikrobiyal yakıt hücresinde kompost kullanımı, elektron akışını kolaylaştırmıştır. Bu durum kendini, biyo-elektro-katalitik aktivitesinde artış olarak göstermiştir. Bu nedenle, komposttaki mikroorganizmaların biyo-elektro-katalizör görevi görerek önemli bir rol oynadığını ortaya konulmuştur. Kompost esaslı mikrobiyal yakıt hücresi sisteminin, hem toksin giderimini hem güç üretimini eş zamanlı sağlayan çok işlevli cihaz uygulaması için oldukça uygun olduğu bilinmiştir [140].

4.2. Turba (Torf) Mikrobiyal Yakıt Hücreleri

Turba veya torf olarak adlandırılan toprak türü genellikle sulak alanlarda yaygın olan bir toprak türüdür. Turba, organik madde bakımından zengindir, anaerobik şartlar sağlar, asidik karakterdedir ve doğal bir ortamdır. Dünya kara yüzey alanının % 5 ila 8'inin turba ile kaplı olduğu bildirilmiştir. Turbanın mevcut olduğu alanlara örnekler şunlardır [141-143]:

- Tropikal iklimin baskın olduğu bölgeler,
- Deniz tabanları,
- Göl tabanları ve
- Bataklık ortamları.

Turbaların Dünya üzerindeki yayılışına bir örnek olarak Rusya Federasyonu verilebilir. Dünya Enerji Konseyi tarafından verilen bilgilere göre Rusya Federasyonu'nda mevcut olan turba yataklarının alanı 1.390.000 km²'ye varmıştır. Buradaki turba kalıntı rezervleri ise 30,8 milyar ton olarak öngörülmüştür. Uzman kişilerin değerlendirmelerine göre bu rezerv miktarı dünyadaki yatakların %40'ını kapsamaktadır [141].

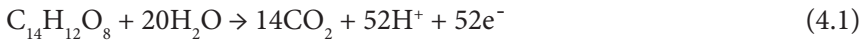
Asidik formda olan ve yüksek miktarda organik madde içeren turba malzemesi ve turba suyu, gerçek dünya koşullarını yansıtan doğal ortamlara örnek verilecek malzemeler arasındadır [144].

Turbanın dikkat çeken özellikleri, faydalı yanları ve dünya çapında geniş bir alana yayılması mikrobiyal yakıt hücresi çalışmalarında bu malzemenin kullanıma yol açmıştır. 2015 yılında yapılan bir çalışmada, turba toprağı sulak alanı kullanılarak mikrobiyal yakıt hücresi tasarlanmıştır. Yapılan çalışmada, bataklıktan temin edilene turba toprağı, Hollanda'nın Alde Feanen milli parkından toplanmıştır. Bu turba toprağı, yeraltı suyu ve *P. australis* bitkilerinden oluşmuştur. Bu çalışma, turba topraklarının mikrobiyal hücreleri için kullanılabileceğini ortaya koymuştur [145].

2022 yılında yapılan bir çalışmada, çift odacıklı mikrobiyal yakıt hücresi tasarımı oluşturulmuştur. Bu tasarımda, mikrobiyal yakıt hücresinin anot odası ticari turbadan elde edilen turba çözeltisi ile doldurulurken katot odası sodyum hidroksit ile doldurulmuş ve her iki oda bir Nafion membranı ile ayrılmıştır. Böylece turba esaslı mikrobiyal yakıt hücresi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Turba esaslı mikrobiyal yakıt hücresinde kullanılan turba malzemesi hem organik madde (substrat) hem de biyokatalizör görevi görmüştür. Turbanın biyokatalizör olarak görev yapmasının sebebi olarak turbada *Clostridium* bakterilerinin mevcut olması bildirilmiştir [146].

2023 yılında bildirilen bir çalışmada, turba mikrobiyal yakıt hücrelerinin geliştirilmesi konusuna odaklanılmıştır. Yapılan çalışmada, Japonya'nın Nagasaki Eyaleti'nin orta kesiminde bulunan Isahaya Şehri'ndeki bir tarım arazisindeki nilüfer havuzundan turba toprakları temin edilmiştir. Bu turba toprağı kullanılarak yapılan mikrobiyal yakıt hücresi, yeşil elektrik enerjisi üretimine doğru üretken bir sistem olarak tanıtılmıştır. Bu mikrobiyal yakıt hücrelerinden altı adeti seri olarak bağlanmış ve 6 Volt seviyelerinde dikkate değer bir çıkış voltajı üretmiştir. Bu, bir LED'i 288 saatten fazla yakabilmiştir [147].

Turba toprağına fulvik asit eklenmesi, turba toprağındaki mikroorganizmaların büyümesini kolaylaştırır ve mikroorganizmaların büyümesi sağlanarak organik maddenin ayrışmasını hızlandırır. Fulvik asit ($C_{14}H_{12}O_8$) eklenen turba esaslı mikrobiyal yakıt hücresinde gerçekleşen tepkime denklem (4.1)'deki gibidir [147]:



4.3. Sediment ve Bentik Mikrobiyal Yakıt Hücreleri

Sediment veya tortu olarak adlandırılan alanlar, organik açıdan zengin ve doğal olarak oluşmuş ortamlardır. Sediment; organik karbon, azot ve fosfor içeren besinlere ev sahipliği yapmaktadır. Bu özellikleri nedeniyle sedimentlerde çeşitli mikroorganizmalar yaşamaktadır [148,149].

Sediment, çeşitli besinlere ve mikroorganizmalara ev sahipliği yaptığı için mikrobiyal yakıt hücresi çalışmlarda kullanılmıştır. İlk sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücresi, Yaquina Körfezi Haliçinden (Newport, OR, Amerika Birleşik Devletleri) ve bir tuz bataklığından (Tuckerton, NJ, Amerika Birle-

şik Devletleri) alınan deniz tortuları kullanılarak laboratuvar koşullarında oluşturulmuştur. Bu sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücresinde kusurlu elektrot tasarımı yapılmış ve sıcaklık dengesi sağlanamadığı için üretilen güç yoğunluğu yalnızca 0,01 mW/m² seviyelerinde kalmıştır. Burada, tortul organik maddesi yakıt olarak kullanılmış ve çözünmüş deniz suyu katotu oksitlemesi amacıyla oksidan olarak kullanılmıştır. Böylece deniz tortusu/deniz suyu arayüzü ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak, doğal bir şekilde ve yenilenebilir elektrik enerjisi elde edilebileceğine dair olasılık ortaya çıktığı için heyecan verici kanıtlar sağlamıştır [148].

Sediment mikrobiyal yakıt hücreleri için organik madde kaynağı olarak kullanılan ortamlar deniz tortuları ve tatlı su tortuları olarak ele alınabilir. Limanlar, derin okyanus soğuk sızıntıları, deniz kenarındaki bataklıklar organik madde kaynağı olan sedimentlere örnek verilebilecek çeşitli deniz ortamlarıdır. Tatlı su tortularına örnek olarak; doğal sulak alanlar, nehir tortuları, göl tortuları, yapay sulak alanlar, atıkla aktive edilen çamur, pirinç toprakları verilebilir [148].

Sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücreleri, elektrik üretimi ve tortu biyoremediasyonu için potansiyel bir seçenek olarak ortaya çıkmıştır. Çoğunlukla karmaşık açık ortamlarda çalıştırılmaktadırlar. Bu nedenle, mikrobiyal ekoloji ve fonksiyonel mikrobiyoloji çalışmaları için bir araç olarak hizmet edebilirler [148].

Sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücresi, doğal su kaynağına daha bağımlı bir şekilde yapılandırılmıştır. Bunun dışında çalışma prensibi olarak geleneksel mikrobiyal yakıt hücresine benzer şekilde çalışır. Sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücresinin anot odası, anaerobik bir ortamda tortu içermektedir. Katot odası ise aerobik yüzey suyu (deniz suyu, göl suyu, nehit suyu gibi doğal su) içermektedir. Bu mikrobiyal yakıt hücresinde doğal bir membran görevi, tortu ile yüzey suyu arasında birkaç metreye kadar su tabakası içermesi ile sağlanmaktadır. Elektrik üretme görevi, deniz veya gölün dibinde zenginleştirilmiş tortuda mevcut olan organik maddeleri oksitleyebilen ve elektronları serbest bırakabilen mikroorganizmalar tarafından sağlanmaktadır. Elektronlar önce anot elektrotu, sonra dış iletken bir ortam kullanılarak katoda iletilmektedir. Burada üstte bulunan sudaki çözünmüş oksijen ve protonlarla birleşerek ve elektrik akımı üretilmektedir. Aynı zamanda, kirleticiler giderilmektedir [150].

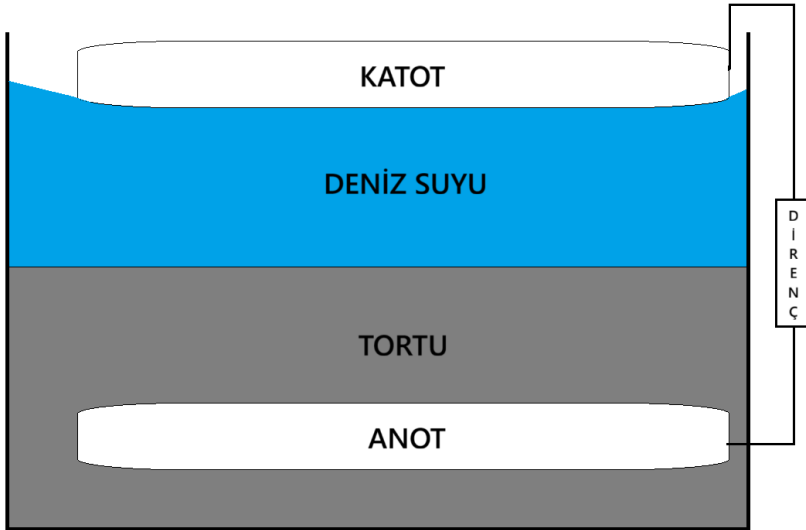
Sediment esaslı bir mikrobiyal yakıt hücresi çalışmasında kullanılan sediment malzemesinin bazı özellikleri Tablo 4.1'de verilmiştir. Bu malzeme, Güney Kore'deki Tongyeong Körfezi'nden toplanan kıyı tortusudur. Bu tortunun koku yayan, siyah renkli ve oldukça bozulmuş bir malzeme olduğu bildirilmiştir. Örneklemeden sonra yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) bir kapta kapatılmıştır [151].

Tablo 4.1. Sediment malzemesinin bazı özellikleri [151].

Ölçümler	Değer
pH	6,58
Oksijen-Redüksiyon Potansiyeli (mV)	-240
Kimyasal oksijen ihtiyacı (mg/L)	33
PO ₄ -P (mg/L)	0,64
NH ₃ -N (mg/L)	2,9

Sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücreleri, biyoelektrik üretimi ve tortu ıslahını iyileştirmek için umut vadeden bir teknolojidir. Ancak, enerji üretimi ve tortu ıslahında pratik uygulamalar için sediment esaslı mikrobiyal yakıt hücresi tasarımı ve optimizasyonunun iyileştirilmesi gerekmektedir [151].

Şekil 4.4 sediment mikrobiyal yakıt hücresinin basit leştirilmiş şematik gösterimini sunmaktadır.

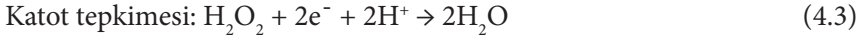
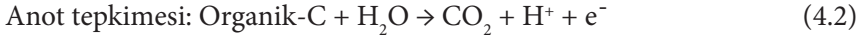


Şekil 4.4. Sediment mikrobiyal yakıt hücresinin şematik gösterimi [148-151].

Bentik mikrobiyal yakıt hücresi veya deniz tortusu mikrobiyal yakıt hücresi, kimyasal enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesiyle sonuçlanan biyo-elektrokimyasal tepkimelerin yaygın bilinen bir uygulaması olarak tanıtılmaktadır [149].

Bir başka tanımlama ile bentik mikrobiyal yakıt hücreleri, organik ve inorganik malzemeler arasındaki bağlarda depolanmış olan kimyasal enerjinin, katalizör olarak görev yapan mikroorganizmalar vasıtasıyla elektriğe dönüştürüldüğü potansiyel enerji üretim kaynakları olarak tanıtılmıştır. Bentik mikrobiyal yakıt hücreleri, iki bölümden oluşur, bunlar; anot ve katot bölümleridir. Anot bölümünde anot elektrotu anaerobik bir ortam olan tortulara gömülmüştür. Katot bölümünde, katot elektrot deniz suyunda yüzmektedir. Tortuda mevcut

olan bakteriler tarafından maddelerin oksidasyonundan üretilen elektronlar, oksidasyon yüzeyinden anoda aktarılır. Anot tarafından emilen elektronlar ve protonlar, anot ve katot elektrotlar arasındaki boşluk aracılığıyla katoda taşınır. Tortulardaki organik karbonun oksidasyonu denklem (4.2)'de, katot tepkimesi denklem (4.3)'te verilmiştir [152].



Bentik mikrobiyal yakıt hücresi, anot ve katot arasındaki normal potansiyel farkına dayalı bir elektrik akımı üretir ve çözünmüş oksijeni azaltır [152].

Yapılan bir çalışmada, bentik mikrobiyal yakıt hücresindeki anot komünunun karşılaştırmalı bir çalışması gerçekleştirilmiştir. Sedimentte tek, dikey ve yatay olan anotların farklı geometrik dizilimleri, güç performansları üzerindeki konumsal değişikliklerin etkisini anlamak için incelenmiştir. Dikey anot konfigürasyonu, yatay ve tek anot sistemine göre sırasıyla 1,2 ve 2,56 kat daha yüksek güç yoğunluğu göstermiştir. Yapılan çalışmada mikrobiyal analiz için 16S rRNA yöntemi kullanılmıştır. Sedimentteki mikropların filogenetik ağacını bilmek için önemli bir araç olduğu bilindiği bu yöntem kullanılmıştır. Analizi gerçekleştirmek için, bentik mikrobiyal yakıt hücresi reaktörlere konulmadan önce homojenize edilmiş bir sediman örneği alınmış ve ilk örnek olarak kabul edilmiştir. Bentik mikrobiyal yakıt hücresi çalışması için gereken tortu, Hindistan'ın Surat kentindeki Dumas sahilinden 15 m derinlikten kapma örnekleyici ile toplandı ve oksijene maruz kalma olasılığını en aza indirmek için kapalı bir kapta taşınmıştır. Tortu, kapalı bir kapta mekanik karıştırıcı kullanılarak homojenleştirilmiş ve kurulumdan önce anaerobik hale getirmek için bir süre azotla temizlenmiştir. Anot, tanımlanmış bir şekil sağlamak için inert plastik kare bir şekle, karbon fiber sarılarak hazırlanırken, karbon fiber fırça katot olarak kullanılmıştır. Tasarlanan bentik mikrobiyal yakıt hücresinde tortudan kaynaklanan mikroorganizmaların cins düzeyinde analizi yapılmış olup bunlar Tablo 4.2'de verilmiştir [149].

Tablo 4.2. Bentik mikrobiyal yakıt hücresinde bulunan mikroorganizmalar [149].

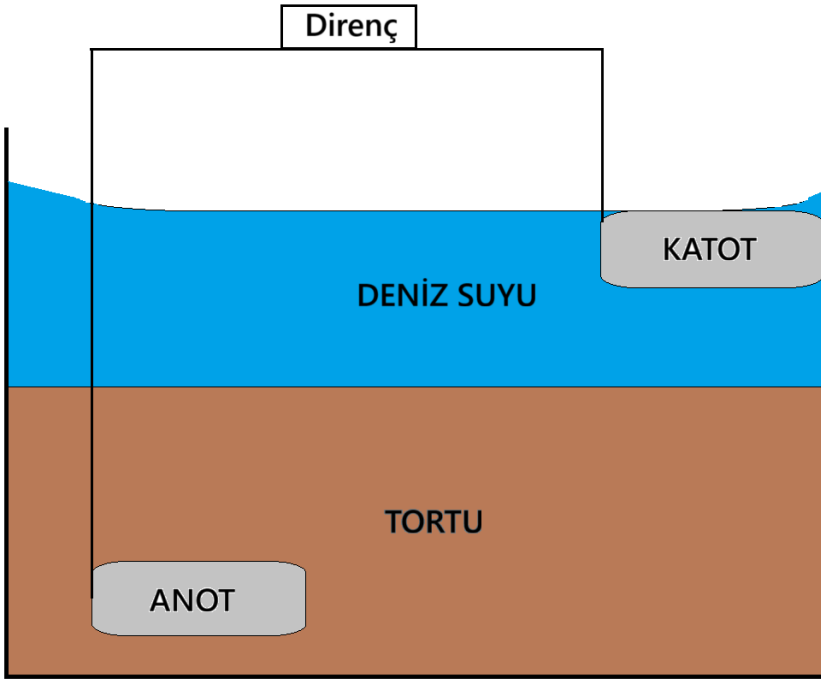
<i>Propionibacterium</i>	<i>Escheriacoli</i>	<i>Bacillus</i>
<i>Pseudomonas</i>	<i>Ralstonia</i>	<i>Prevotella</i>
<i>Shewanella</i>	<i>Reyranella</i>	<i>Propionibacterium</i>
<i>Desulfovibrio</i>	<i>Rhizobium</i>	<i>Bryobacter</i>

Bazı araştırmacılara göre mikrobiyal yakıt hücresi ilk olarak deniz tortularında kullanılmış ve daha sonra bentik mikrobiyal yakıt hücresi olarak

adlandırılmıştır. Bu hücreler enerji kaynakları üretmenin yanı sıra atık su arıtımı da yapabilmektedir. Bentik mikrobiyal yakıt hücresinde, doğal organik atıkların bir substrat olarak oksidasyonu anotta meydana gelirken, metal iyonlarının indirgenmesi katotta meydana gelmektedir. Bunun sonucunda, çözünür metal halinden çözünmeyen bir metal hali ortaya çıkmaktadır. Bentik mikrobiyal yakıt hücresinde doğal organik atıklar, bakteri türleri için bir enerji kaynağı olarak kullanıldığı için bu mikrobiyal yakıt hücrelerinin diğer biyoelektrokimyasal prototiplerden farklı olduğu ifade edilmiştir [153].

Bentik mikrobiyal yakıt hücresi, deniz kıyısı ortamlarından yenilenebilir enerji elde etmek için umut vadeden bir teknoloji olarak sıkça ifade edilmiştir. Bilim camiası bentik mikrobiyal yakıt hücresi teknolojisini on yıldan daha fazla süredir araştırmaktadır. Fakat bentik mikrobiyal yakıt hücrelerinin yerinde performansı hala zorlu bir konudur. Bu zorluğun üstesinden gelmek için çalışmalar devam etmektedir [154].

Şekil 4.5, bentik mikrobiyal yakıt hücresinin şematik gösterimini sunmaktadır.



Şekil 4.5. Bentik mikrobiyal yakıt hücresinin şematik gösterimi [153, 154].

5. BİTKİ MİKROBİYAL YAKIT HÜCRELERİ

Dünya nüfusunun artmasına bağlı olarak öncelikli konulardan birisi de kırsal ve/veya kentsel alanlarda elektrik enerjisi üretimidir. En fazla talep gören enerji türü elektrik enerjisidir. Önümüzdeki 25 yıl içinde elektrik enerjisi tüketiminin artmasının beklendiği ifade edilmiştir. Latin Amerika ve Karayipler Ekonomik Komisyonu (ECLAC), Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerinin 7. maddesini ilerletmek için öneriler geliştirmektedir. Bu bağlamda, önerilerden biri herkes için uygun fiyatlı, güvenilir, sürdürülebilir ve modern enerjiye erişimin sağlanmasıdır. Bu kapsamda, Çin Makine Mühendisliği Şirketi (CMEC) hedeflerine ulaşmak için elektrik piyasasının salmış olduğu CO₂ emisyonlarını azaltmayı amaçlamaktadır. Bunun için geleneksel olmayan yenilenebilir enerji kaynaklarını yaygınlaştırması ve çeşitli enerji matrisine sahip olması gerektiği bildirilmiştir. Yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak küçük ölçeekte enerji üretebilen bir cihaz geliştirmek için bitkileri, toprağı ve mikroorganizmaları entegre etme kavramı ortaya atılmıştır. İlaveten, uzak bölgelerde kullanılabilmesi için sistemin uzun ömürlü olması için optimum çevre koşullarının dikkate alınması gerektiği bildirilmiştir. Bu özelliklerin sağlanması durumunda, sistemin gün boyunca çalışması beklenir ve elektrikli aletlerde veya aydınlatmada kullanılmak üzere yeterli bir güç yoğunluğu elde edilmesi umulur [155].

Geleneksel olmayan yani yenilikçi kaynaklardan enerjinin geliştirilmesi ve üretilmesi şu faktörlerden ötürü önemlidir [155]:

- ✓ Özellikle farklı enerji türlerinin var olmasını sağlar,
- ✓ Ülke ekonomisinin rekabet gücünü artırır,
- ✓ Çevrenin korunmasına katkı sağlar,
- ✓ Enerjinin kullanımı ve korunması bilincini artırır,
- ✓ Yenilenebilir kaynakların korunması açısından toplumsal fayda, kamu yararı ve ulusal ekonomi açısından katkılar sağlar.

Gelecekteki sürdürülebilir elektrik talebini karşılamak için bir tür biyolojik enerji kaynağı olarak tanıtilan biyoelektrik üretimini sağlayan teknolojilerden birisi de bitki mikrobiyal yakıt hücreleridir. Bitki mikrobiyal yakıt hücresi, topraktaki canlı bitki örtüsünü ve bakterileri kullanarak biyokütleyi elektrığe dönüştüren yenilikçi bir teknoloji olarak tanıtılmaktadır. Bitki mikrobiyal yakıt hücresi, rizosfer bölgesinde mikrobiyal aktiviteleri destekleyen bir toprak-bitki-mikrop kompleksi oluşturmaktadır. Bu; su düzenlemesini, besin tutulmasını, organik/inorganik iyon taşınmasını ve ağır metal immobilizasyonunu arttırabilir. Sürdürülebilir mikrobiyal metabolizmasına dayanarak, bitki mikrobiyal yakıt hücresi potansiyel olarak yeşil altyapılarda; toprak ıslahını, toprak-su korunumunu, biyoelektrik üretimini ve biyosensör geliştirmeyi sağlayabilir [156].

Bitki mikrobiyal yakıt hücresi, yerinde yenilenebilir biyoenerji kaynağı sağlama potansiyeline sahip, gelişmekte olan bir sürdürülebilir enerji üretim yöntemidir. Canlı bitkiler, kök sistemlerini rizosfer eksüdatı olarak bilinen organik üretmek ve salgılamak için kullanılmaktadırlar. Bu organik bileşiklere örnek olarak; amino asitler, organik asitler, polisakkaritler ve proteinler verilebilir. Rizosfer içinde, bu rizosfer eksüdatları ekzoelektrojen olarak adlandırılan mikroorganizmalar aracılığıyla elektronlara, protonlara ve karbondioksit döndürülmektedir. Bitki mikrobiyal yakıt hücrelerinde etkileşim ortaya çıkmaktadır ve bu etkileşim, rizosferdeki bitkiler ve mikroorganizmalar arasında gerçekleşmektedir. Mikroorganizmalar; elektronları, protonları (indirgeyici eşdeğerler) ve metabolik ara maddeleri serbest bırakılmaktadırlar. Anot elektron alıcısı olarak görev yapan bir elektrottur. Anota gelen elektrotlar harici bir yük aracılığıyla nemli toprak yüzeyine yerleştirilmiş bir katot elektrotta taşınmaktadır. Bu da anot ve katot elektrotlar arasında farklı elektrik potansiyelleri oluşmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak, elektronlar değişen elektrik potansiyelleri tarafından yönlendirilmektedir. Elektronlar genellikle oksijen indirgemesi için katota taşınır. Böylece bitki mikrobiyal yakıt hücresi tarafından biyoelektrik üretilmektedir [157].

Bitki mikrobiyal yakıt hücrelerinin verimliliği şunlara bağlıdır [157]:

- Her bitki türünün fotosentetik aktivitesine,
- Bitki kök eksüdatlarının miktarına,
- Bitki kök eksüdatlarının türlerine ve
- Bitki kök sistemi gelişimine,
- Bitki örtüsü türlerine,
- İç dirence ve
- Mikrobiyal aktivite gibi faktörlere bağlıdır.

Canlı bitkilerle oluşturulan bitki mikrobiyal yakıt hücresi sistemlerini kullanan son çalışmalar, hem potansiyel gelişimin hem de bitki mikrobiyal yakıt hücresinden akım üretiminin aydınlatma yani fotosentez varlığında meydana geldiğini göstermiştir. Kök eksüdatları, bitki fotosentez metabolizmasının ürünleri olarak belirtilmektedir. Buradan hareketle, bitki kök eksüdatları ile elektrokimyasal olarak aktif bakteri arasındaki bağlantıdan oluşturulan bitki mikrobiyal yakıt hücresi tarafından üretilen elektrokimyasal sinyal (yani, açık devre potansiyeli) gelişimi ve/veya akım üretimi, yetiştirme sırasında canlı bitkilerin sağlık veya metabolik aktivitesinin izlenmesi için yararlı olabilir. Yapılan bir çalışmada, bitki mikrobiyal yakıt hücresi tarafından üretilen açık devre potansiyeli, bitki sağlığı izleme sisteminin temeli olarak kullanılmıştır. Canlı bitkilere sahip bitki mikrobiyal yakıt hücresi, çevresel değişikliklere karşı tutarlı açık devre potansiyeli tepkileri göstermiştir. Ancak, hasarlı veya hiç bitkisi

olmayan bitki mikrobiyal yakıt hücresinde açık devre potansiyeli gelişiminin çevresel değişikliklerle bağlantılı olmadığı anlaşılmıştır [158].

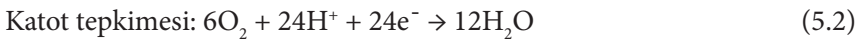
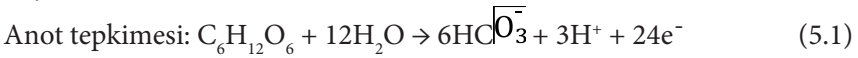
Yapılan araştırmalara göre, bitki mikrobiyal yakıt hücreleri için en uygun bitki türlerinin, anaerobik nehir kıyısı tortularında büyüeyebilen türlerdir. İla-veten, çimler bitki mikrobiyal yakıt hücreleri için en umut verici bitki türleri olarak tanıtılmaktadır. Bunun gerekçesi olarak; sistemlerin belirli sınırlamala-rını aşabilirler ve çalışmaları sırasında sürgünlerden oluşan büyük miktarda biyokütle üretebilmeleri sunulmuştur [159].

Bitki mikrobiyal yakıt hücreleri için bitki seçiminde dikkate alınması gereken önemli noktalar şunlardır [159]:

- Kökleri tamamen toprağa batmış şekilde büyüeyebilen bitkilerin kul-lanılması,
- Su veya bataklık bitkilerinin kullanılması,
- Bitki mikrobiyal yakıt hücresi sisteminin iç mekana yerleştirilmesi planlanıyorsa iç mekan kullanımına uygun bitkilerin kullanılması,
- Bitki mikrobiyal yakıt hücresi sisteminin dış mekana yerleştirilmesi planlanıyorsa dış mekanda yetişen yerel türlerin kullanılmasıdır.

Bitki mikrobiyal yakıt hücresi sisteminde sulak koşullarda yetişen bitkile-rin kullanımının amacı, havadaki oksijenin anoda girmesini önlemektir. Öte yandan, fotosentez atık ürünlerinin sağlanması durumunda tüm bitkilerin bitki mikrobiyal yakıt hücresi sistemine uyumlu olabileceği varsayılmaktadır. Fakat fotosentez süreci bitki türlerine ve dış etkenlere bağlı olarak farklılık gösterebilir. Buradan yola çıkarak, tüm bitkilerin bir enerji kaynağı olması ge-rektiğine inanılmaktadır. Nihayetinde, daha fazla veya daha az verim sağlayan bitki türlerinin bulunması gerektiği sonucuna varılmıştır [159].

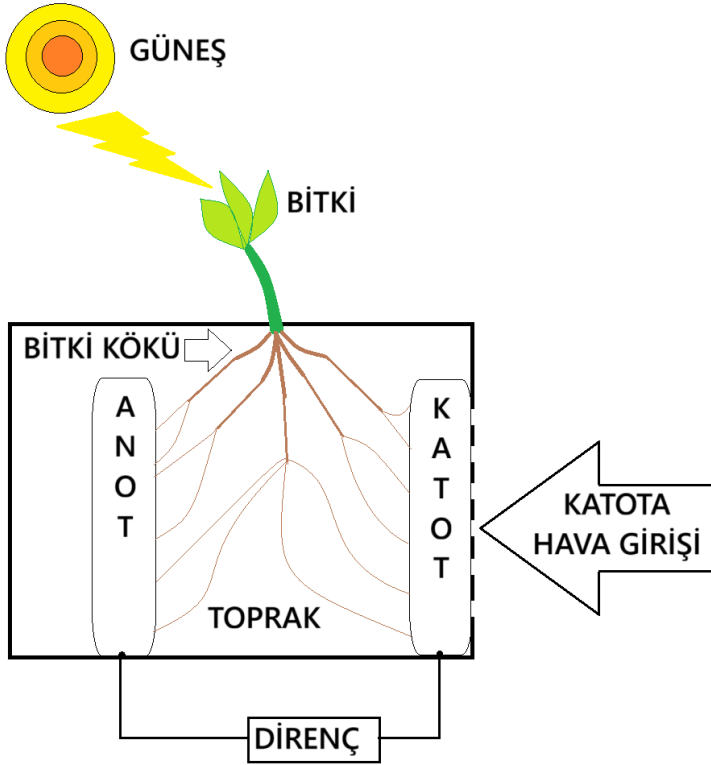
Genel olarak, herhangi bir bitki mikrobiyal yakıt hücresi sisteminde top-rakta bulunan rizodepozitlerin bir fonksiyonu olarak elektrokimyasal olarak aktif bakteriler sayesinde anotta oksidasyon tepkimesi meydana gelmektedir. Bu tepkime denklem (5.1)'de verilmiştir. Öte yandan katotta gerçekleşen ve oksijenin suya indirgenmesini ifade eden katodik tepkime denklem (5.2)'de verilmiştir [159].



Bitki mikrobiyal yakıt hücreleri, bitkilerin güneş ışığı altında yapmış ol-duğu fotosentez sonucu güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürür. Bitki mikrobiyal yakıt hücresinde fotosentez yapan bitkiler organik maddeler üret-mektedir. Üretilen bu organik maddeler, bitki kökleri aracılığıyla çevredeki toprağa kök tortuları olarak salınmaktadır. Bitki mikrobiyal yakıt hücresinde organik madde (substrat) akışı köklerden sürekli girdiyle sağlandığı için bu

mikrobiyal yakıt hücreleri sürdürülebilirdir. Yapılan çalışmalarda, fotosentezlenen karbonhidratların %20'sinin kaynağının kök salgıları olduğu bildirilmiştir. Bitki mikrobiyal yakıt hücreleri tarafından yüksek güç yoğunluğu üretimi, bitki türüne ve toprak organik malzeme içeriğine bağlıdır. Bu nedenle, mikroorganizmalar tarafından parçalanabilen ve dolayısıyla elektron bağışından sorumlu olan kök birikintileri ortaya çıkmıştır. Dahası, yapılan çalışmalarda, bitki mikrobiyal yakıt hücresi tarafından üretilen elektrik enerjisinin güneş ışığına ve gündüzleri bitkilerin yapay olarak gölgelenmesine bağlı olduğu, fotosentezdeki azalma nedeniyle elektrik üretiminin azaldığı ifade edilmiştir. Ayrıca, güneş tarafından gönderilen ışık radyasyonunun bitkileri etkilediği ve güneş radyasyonunun yüksek olduğu durumlarda bitki mikrobiyal yakıt hücresi tarafından üretilen gerilim değerinin yüksek olduğu bulunmuştur [160].

Bitki mikrobiyal yakıt hücresinin şematik gösterimi Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Bitki mikrobiyal yakıt hücresi şematik gösterimi [158-160].

Bitki mikrobiyal yakıt hücreleri için uygun olduğu bildirilen çeşitli bitkiler Tablo 5.1'de listelenmiştir. Burada görüleceği üzere bitkiler çeşitli fotosentetik yollara sahiptir. C_4 bitkileri yüksek oranda CO_2 emme özelliğine sahiptirler. Bu sayede teorik fizyolojik avantajlara sahip olsatirler. Lakin C_4 bitkilerinin dünya çapında dağılımları sınırlıdır. C_3 fotosentetik yoluna sahip bitkiler, bitki

mikrobiyal yakıt hücresi sistemlerinde daha yaygın kullanılmıştır. Bu fotosentetik yola sahip bitkilerin sıklıkla verimli biyoelektrik üretim performansı sergilediği bildirilmiştir. Crassulacean Asit Metabolizması (CAM) fotosentetik yoluna sahip bitkiler de bitki mikrobiyal yakıt hücrelerinde araştırılmıştır. Yapılan çalışmalarla CAM bitkilerinin bitki mikrobiyal yakıt hücrelerinde gerçek zamanlı uygulamalar için potansiyeli ortaya konulmuştur [161].

Bitki mikrobiyal yakıt hücresi sistemlerinin sürdürülebilir gıda sistemlerine entegrasyonuna yönelik çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar, yalnızca merkezi olmayan yenilenebilir enerji üretimine katkıda bulunmakla kalmamış, aynı zamanda temel ekosistem hizmetlerini sürdürürken ve doğal kaynakları gelecekteki popülasyonlar için korurken biyolojik çeşitliliğin korunmasını da desteklemiştir. Böyle bir yaklaşım, daha sürdürülebilir ve eşitlikçi bir dünya inşa etmeye yol açmaktadır. Ancak, umut verici sonuçlara ve kanıtlanmış çevresel faydalara rağmen, bitki mikrobiyal yakıt hücresi teknolojisi güç yoğunluğu sınırlamaları, düşük ekonomik uygulanabilirlik ve sistem ölçeklenebilirliğiyle gibi kritik zorluklarla karşı karşıya kalmaya devam etmektedir. Sonuç olarak, gelişmiş bitki mikrobiyal yakıt hücresi sistemlerinin geliştirilmesi, biyoelektrik üretimini artırmak için bitki türlerinin optimizasyonu, rizosfer mimarisi ve elektrojenik mikrobiyal toplulukların bileşimi gibi temel performans belirleyici faktörlere giderek daha fazla odaklanmaktadır. Pilot deneylerde, bitki mikrobiyal yakıt hücresi, biyosensör ve düşük enerjili dijital cihazlara güç sağlama, kirli alanların iyileştirilmesi ve yeşil çatılarda elektrik üretimi dahil olmak üzere başarılı çeşitli uygulama potansiyelleri sunmuştur [161].

Tablo 5.1. Bitki mikrobiyal yakıt hücreleri için uygun bazı bitkiler [161].

Bitki adı	Fotosentetik yol
<i>Glyceria maxima</i>	C ₃
<i>Oryza sativa</i>	C ₃
<i>Acorus calamus</i>	C ₃
<i>Canna indica</i>	C ₃
<i>Phragmites australis</i>	C ₃
<i>Trigonella foenum-graecum</i>	C ₃
<i>Spartina anglica</i> = <i>Sporobolus arabicus</i>	C ₄
<i>Zea mays</i>	C ₄
<i>Phaseolus vulgaris</i>	C ₃
<i>Vigna unguiculata ssp. sesquipedalis</i>	C ₃
<i>Solanum lycopersicum</i>	C ₄
<i>Sedum spp</i>	CAM
<i>Opuntia spp</i>	CAM
<i>Stevia rebaudiana</i>	C ₃
<i>Ocimum basilicum</i>	C ₃
<i>Brassica juncea</i>	C ₃
<i>Pandanus amaryllifolius</i>	C ₃

Bitki mikrobiyal yakıt hücrelerinin, sürdürülebilir biyoelektrik üretme kabiliyetleri ve tarımsal üretimi artırmaları sayesinde dünya çapında gıda-enerji

ilişkisini dönüştürmek için çığır açan bir çözüm sunduğu bildirilmiştir. Bitki mikrobiyal yakıt hücrelerindeki bitkiler ve elektrojenik mikroplar arasındaki doğal ortaklık, toprak sağlığını, karbon sekestrasyonunu ve ekilebilir arazi restorasyonunu iyileştirirken yenilenebilir enerji üretimini mümkün kılmaktadır [161].

Bitki mikrobiyal yakıt hücresi sistem verimliliğini ve ölçeklenebilirliğini arttırmak şunları içermektedir [161].

- Mikrobiyal konsorsiyumları,
- Nanomalzeme tabanlı elektrotları,
- Akıllı gübreleri,
- Biyogübreleri ve
- Halkalı solucanların kullanımı gibi doğa temelli stratejilerin optimizasyonunu içerir.

Bitki mikrobiyal yakıt hücrelerinin sağladığı faydalar özetle şunlardır [161]:

- ❖ Merkezi olmayan güç üretimi için sürdürülebilir ve yenilenebilir bir imkan sunar,
- ❖ Bu sistemlerde, bitki kökleri doğal olarak organik salgılar salgılar ve bu salgılar, bitki mikrobiyal yakıt hücreleri aracılığıyla sürekli bir biyoelektrik akışı üretmek için kullanılır,
- ❖ Enerji üretim süreci, harici girdi tüketiminden bağımsız olarak çalıştığı için, uzun vadeli sürdürülebilirliğine katkıda bulunur,
- ❖ Özellikle geleneksel elektrik altyapısına erişimi olmayan kırsal ve yarı kurak bölgelerde şebeke dışı uygulamalara iyi hizmet eden merkezi olmayan güç sistemleriyle olağanüstü uyumluluk gösterir,
- ❖ Daha da önemlisi, yenilenebilir enerji sistemi, bitki gelişimine müdahale etmeden çalışarak ekolojik ve tarımsal ortamlarda sürekli, müdahalesiz güç üretimine olanak tanır,
- ❖ Toprak sağlığını iyileştirmenin yanı sıra, bitki mikrobiyal yakıt hücreleri sera gazı emisyonlarını azaltır,
- ❖ Bitki mikrobiyal yakıt hücreleri doğal toprak karbon sekestrasyon süreçlerinden yararlanarak karbon nötr, hatta karbon negatif enerji sistemleri olarak çalışır,
- ❖ Bitki mikrobiyal yakıt hücrelerindeki elektrojen bakteriler atık sudaki organik kirleticileri oksitleyerek elektrik üretirken aynı zamanda çevresel kirleticileri de temizleyebilir,
- ❖ Hem temiz enerji üretmesi, hem su arıtımı özelliği hem de iklim eylemiyle ilgili olanlar olmak üzere birden fazla sürdürülebilir kalkınma hedefine ulaşmak için umut vadeden bir teknoloji olarak konumlandırılmıştır,

- ❖ Bitki mikrobiyal yakıt hücresinde rizosferdeki gelişmiş besin döngüsü ve mikrobiyal aktivite yoluyla toprak sağlığına olumlu katkıda bulunur. Kök salgıları, faydalı bakteriler için besin görevi görmekle kalmaz aynı zamanda hastalığa neden olan patojenleri kontrol eder ve besin maddelerinin daha erişilebilir olmasını sağlayan koşullar yaratır. Doğal süreç, kimyasal gübre ihtiyacını azaltarak toprak sürdürülebilirliğini sağlar ve uzun vadeli ürün üretimini iyileştirerek dayanıklı tarım sistemleri oluşturur.

Bitki mikrobiyal yakıt hücrelerinin dünya çapında halihazırda çeşitli pilot projelerde konuşlandırılmış uygulamaları vardır. Bunların örnekleri şunlardır [161]:

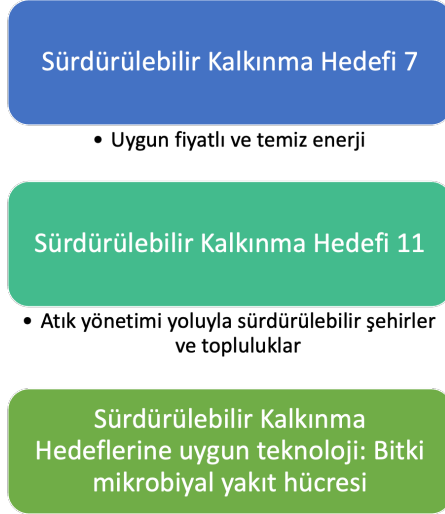
- ✓ Hollanda'daki Wageningen Üniversitesi'ndeki araştırmacılar tarafından yapılan yeşil çatılar,
- ✓ Hollanda'daki Wageningen Üniversitesi'ndeki araştırmacılar tarafından yapılan prototipler,
- ✓ Hindistan'da araştırmacılar, yerli bitki türlerini ve doğal mikrobiyal toplulukları kullanarak pirinç tarlalarında elektrik üretimi için bitki mikrobiyal yakıt hücrelerini kullanmış ve hem toprak kalitesini hem de ürün verimliliğini arttırmıştır,
- ✓ Meksika'da yapılan araştırmalar sayesinde kuraklığa dayanıklı *Opuntia* türlerinin kurak iklimlerde sürekli elektrik üretimi için uygunluğu ortaya konulmuştur.

Bitki mikrobiyal yakıt hücresinin genel faydaları Şekil 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5.2. Bitki mikrobiyal yakıt hücrelerinin genel faydaları [158-161].

Bitki mikrobiyal yakıt hücresinin uyumlu olduğu Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri ve ilişkilendirilmesi Şekil 5.3'te verilmiştir.



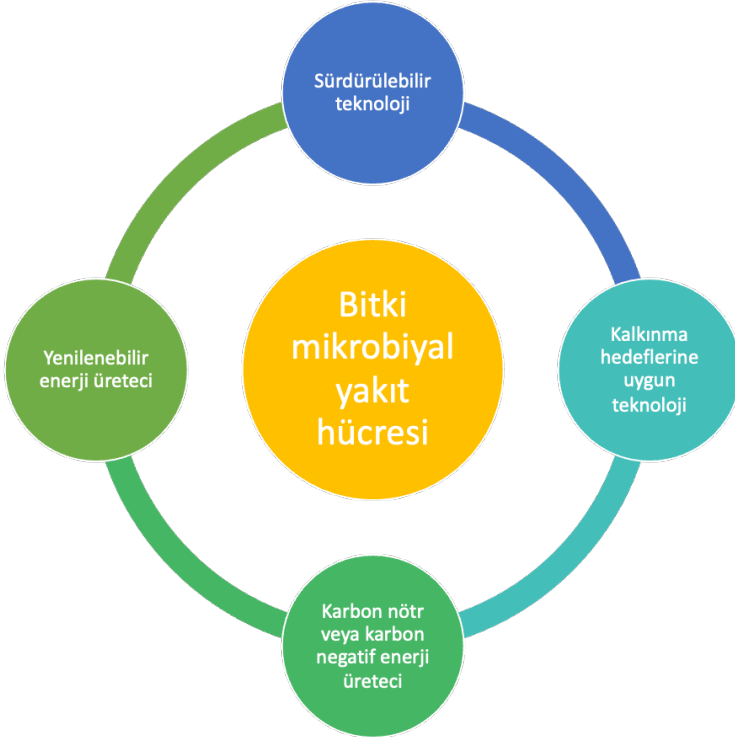
Şekil 5.3. Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri ve bitki mikrobiyal yakıt hücresi ilişkisi [162].

Bitki mikrobiyal yakıt hücrelerinin karşılaştığı en önemli zorluklar şunlardır [162]:

- Diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla bitki mikrobiyal yakıt hücresi nispeten düşük güç çıkışı sağlamaktadır. Bu, bitki mikrobiyal yakıt hücresinin en önemli zorluğudur,
- Aktif olarak büyüyen bitkilerin kullanılmaması bitki mikrobiyal yakıt hücrelerinin güç çıkışını sınırlamaktadır,
- Bitki seçimi ve büyümesindeki zorluklar, bitki mikrobiyal yakıt hücresi performansını ve verimliliğini önemli ölçüde etkilemektedir,
- Farklı bitki türleri ve bunların seçim kriterleri, bitki mikrobiyal yakıt hücresinin biyoelektrik parametrelerinde ve elektrik üretiminde önemli bir rol oynamaktadır,
- Bitki mikrobiyal yakıt hücresi substratındaki mikrobiyal türlerin kontrolü ve çeşitliliğin kontrolü, doğrudan kontrol etmek çok zor olduğu için bitki mikrobiyal yakıt hücrelerinin performansını önemli ölçüde etkileyen karmaşık bir sorundur,
- Bitki mikrobiyal yakıt hücresi için elektron transfer mekanizmalarının türü ve hızından önemli ölçüde etkilenir. Mikroorganizmalardan elektrot arayüzüne elektron transferi, bitki mikrobiyal yakıt hücrelerinin güç yoğunluğunu artırmada kritik bir darboğazdır,

- Bitki mikrobiyal yakıt hücrelerinde elektron transfer mekanizmalarının türünü ve hızını kontrol etme konusundaki karmaşık zorluklar vardır ve mikroorganizmalar ile elektrotların ara yüzü, elektroaktif mikroorganizmaların çeşitliliği ve elektron transferinde yer alan karmaşık süreçlerle ilgili zorlukları içermektedir,
- Bitki yaşlanması, mikrobiyal topluluk değişiklikleri, iç direncin artması, biyofilm oluşumu, elektrot değişimi gibi faktörler bitki mikrobiyal yakıt hücresinin genel sürdürülebilirliği konusunda zorluklar doğurur,
- Büyük ölçekli uygulamalar için bitki mikrobiyal yakıt hücrelerinin uygulanmasında maliyet ve ölçeklenebilirlik açısından karşılaşılan zorluklar; öncelikle yüksek elektrot maliyetlerine, sistem performans analizi için yerleşik terminoloji ve yöntemlerin eksikliğine, sistemin maliyet etkinliğine ve bitki mikrobiyal yakıt hücrelerinin gerçek dünyadaki kontrolsüz ortamlarda kullanımının pratikliğine atfedilmektedir.

Şekil 5.4, bitki mikrobiyal yakıt hücresinin önemli yönlerini özetlemektedir.



Şekil 5.4. Bitki mikrobiyal yakıt hücrelerinin önemli yönleri [160-162].

Bitki mikrobiyal yakıt hücresi mevcut aşamada çok az enerji üretmektedir. Buna rağmen şu uygulamalar için kullanılmaktadır [162]:

- Ultra düşük güç tüketimli uzaktan kumandalı cihazlara ve sensörlere güç sağlamak,

- Biyosensör uygulamaları,
- Atık su arıtımı ve
- Kirli sahaların biyoremediasyonu gibi çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bitki mikrobiyal yakıt hücrelerinin sunduğu alternatif katma değerli işlevlere örnek olarak şunlar verilebilir [162].

- Toprak sağlığını iyileştirmek,
- Atık su arıtımını geliştirmek,
- Mikrobiyal aktivite yoluyla organik kirleticilerin ve fazla toksik maddelerin uzaklaştırılmasını kolaylaştırmak.

Bitki mikrobiyal yakıt hücresi prosesi, çevrenin arıtılmasına ve sürdürülebilir tarım uygulamalarının teşvik edilmesine yardımcı olabilir. Lakin, potansiyeline rağmen bitki mikrobiyal yakıt hücreleri hala düşük güç çıkışı sağlamakta, bitki seçimi ve büyümesi ile ilgili sorunlar yaşamakta, substrattaki mikrobiyal tür ve çeşitliliği kontrol etmede sorun yaşamakta, mikroorganizmaların elektron transfer mekanizmalarını kontrol etmede sorun yaşamakta, uzun vadeli kararlılık ve dayanıklılık konularında sorun yaşamaktadır. Bu sorunlar, bitki mikrobiyal yakıt hücresinin geniş çapta uygulanmasının ölçeklenebilirliği ve maliyeti gibi zorluklarla karşı karşıya kalmasına sebep olmuştur [162].

6. MİKROBİYAL YAKIT HÜCRESİ TEKNOLOJİLERİNDE YENİ UFUKLAR

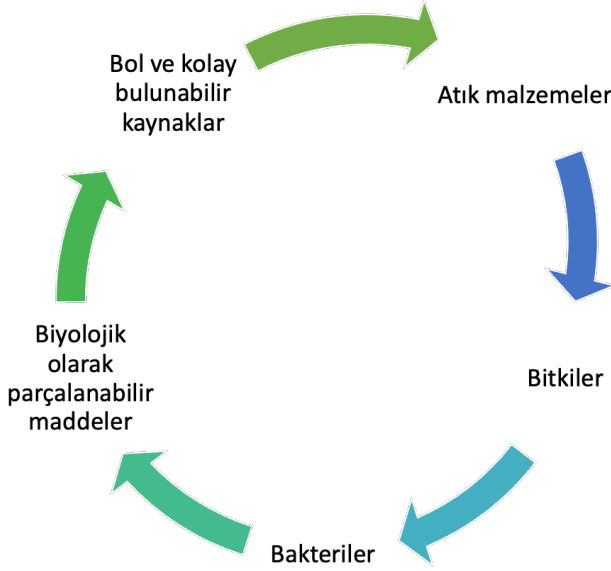
Mikrobiyal yakıt hücreleri; yenilenebilir biyokütle, karmaşık organik atıklar gibi malzemelerden elektriksel güç üretimini mümkün hale getirmiş olan umut verici bir teknoloji olarak yerini almıştır. Proteinler, karbonhidratlar, tarımsal atıklar ve endüstriyel atıklar dahil olmak üzere çeşitli biyolojik olarak parçalanabilir organik maddeler, mikrobiyal yakıt hücrelerinde enerji üretmek için hammadde olarak kullanılabilir. Düşük maliyetli atık malzemeler, bakteri ve bitkiler gibi canlı varlıklar hem bol hem de kolay bulunabilir kaynaklardır. Bu nedenlerden ötürü, bu malzemelerin mikrobiyal yakıt hücrelerinde atıkları değerli ürünlere dönüştürmek veya geri dönüşüm sağlamak için kullanılması yaygınlaşmıştır [15].

Çevresel ve enerji sürdürülebilirliği için umut vadeden bir teknoloji olan mikrobiyal yakıt hücresi teknolojisindeki son gelişmelere bakıldığında, mikrobiyal yakıt hücresi sistem performansını iyileştirmek için nanomalzemelerden yararlanmıştır. Yaygın kullanılan nanomalzemelere örnek olarak şunlar verilebilir [163]:

- Karbon nanotüpler,
- Grafitli karbon nitrür ve
- İndirgenmiş grafen oksit.

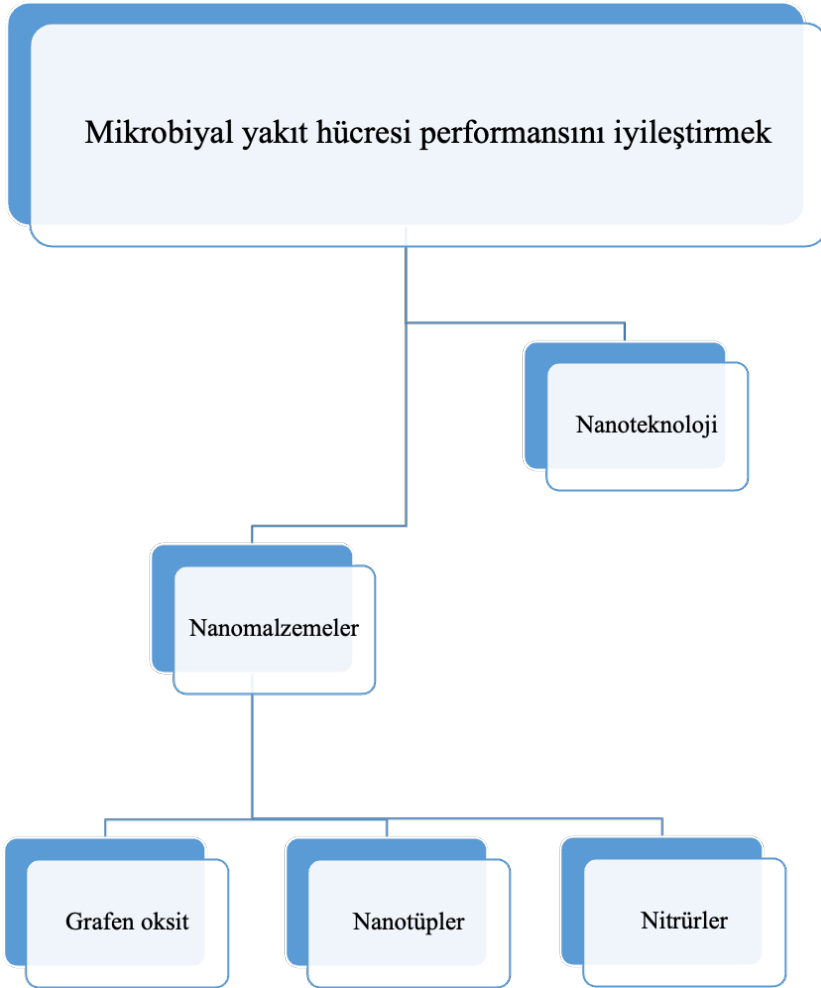
Mikrobiyal yakıt hücrelerinde nanomalzemelerin kullanımı güç yoğunluklarını ve Kulomb verimliliğini arttırmıştır. Böylece, biyoelektrik üretimi daha yüksek seviyelere ulaşmıştır. Nanomalzemelerin kullanımı ile mikrobiyal yakıt hücreleri, daha yüksek voltaj çıkışı sağlamıştır. Bu sayede, mikrobiyal yakıt hücrelerinin gerçek dünya koşullarındaki uygulamalar için daha pratik hale gelmiştir [163].

Şekil 6.1, mikrobiyal yakıt hücreleri konusunda yeni ufuklar için odaklanılması tavsiye edilen kaynakları vurgulamaktadır.



Şekil 6.1. Mikrobiyal yakıt hücreleri konusunda yeni ufuklar için odaklanılması tavsiye edilen kaynaklar [15].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinin sistem performansını iyileştiren çalışmalar da vurgulanan teknoloji ve malzeme örnekleri Şekil 6.2’de vurgulanmıştır.



Şekil 6.2. Mikrobiyal yakıt hücrelerinin sistem performansını iyileştiren çalışmalarda vurgulanan teknoloji ve malzeme örnekleri [163].

Mikrobiyal yakıt hücresi teknolojisindeki yeni ufukların temel unsurlarından biri, mikroorganizmalar ile elektrot yüzeyi arasında verimli elektron transferini kolaylaştıran yeni elektrot malzemelerinin geliştirilmesinde yatmaktadır. Geleneksel mikrobiyal yakıt hücrelerinde elektrot olarak grafit veya karbon kumaş gibi karbon esaslı malzemeler kullanılsa da, son araştırmalar farklı malzemelerin mikrobiyal yakıt hücresi performansını önemli ölçüde etkileyebileceğini göstermiştir. Yeni elektrot malzemelerinden bazıları Tablo 6.1’de verilmiştir [164].

Tablo 6.1. Mikrobiyal yakıt hücreleri için yeni elektrot malzemeleri [164].

Malzeme	Sağladığı etki
Grafen	Güç çıkışı, akım yoğunluğu ve elektron transferinin artışı sağlamıştır.
İletken polimerler	Daha etkili biyofilm oluşumu sağlayarak, akım yoğunluğu ve güç çıkışını artışı sağlamıştır.
Metal oksitler	Metal oksit türü ve yapısına göre güç çıkışı, akım yoğunluğu ve elektron transferinde değişiklikler sağlamıştır.
Karbon nanotüpler	Biyofilm oluşumunun etkili olmasına olanak tanıyarak akım yoğunluğu ve güç çıkışını artışı sağlamıştır.

Mikrobiyal yakıt hücreleri için yeni elektrot malzemesi olarak tanıtılan grafen malzemenin sağladığı faydalar ve eksik kalan yanları Şekil 6.3'te özetlenmiştir.



Şekil 6.3. Mikrobiyal yakıt hücreleri için kullanılan grafen malzemenin sağladığı faydalar ve eksik kalan yanlarının özetlenmesi [164].

İletken polimerler malzemelerin mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanılması sonucunda ortaya çıkmış olan yararlar ve eksik taraflar Şekil 6.4'te verilmiştir.



Şekil 6.4. Mikrobiyal yakıt hücreleri için iletken polimer malzemelerin sağladığı faydalar ve eksik kalan yanlarının özetlenmesi [164].

Karbon nanotüp malzemelerin mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanımı neticesinde ortaya çıkan faydalar ve eksik kalan taraflar Şekil 6.5'te vurgulanmıştır.



Şekil 6.5. Mikrobiyal yakıt hücreleri için karbon nanotüp malzemelerin sağladığı faydalar ve eksik kalan yanlarının özetlenmesi [164].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde metal oksit malzemelerin kullanımı, çeşitli faydalar sağlarken eksik kalan tarafları da mevcuttur. Bunlar Şekil 6.6'da özetlenmiştir.



Şekil 6.6. Mikrobiyal yakıt hücreleri için metal oksit malzemelerin sağladığı faydalar ve eksikliklerin özetlenmesi [164].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanılan yeni malzemeler; artırılmış yüzey alanı, gelişmiş biyoyuyluluk ve azaltılmış elektrik direnci gibi belirgin faydalar sunmaktadırlar. Bu, gelişmiş güç üretimi ve akım yoğunluklarına

yol açmaktadır. Gelişmiş elektrot malzemelerinin kullanımı, mikrobiyal yakıt hücrelerini optimize etmek, daha sürdürülebilir ve verimli enerji dönüşümünün önünü açmak için yeni olanaklar sağlamıştır. Mikrobiyal yakıt hücresi çalışmalarındaki en büyük zorluklardan biri, mikrobiyal hücreler ile elektrotlar arasındaki elektron transferinin verimsizliği olmuştur. Bu soruna çözüm bulma amacıyla ortaya çıkan sentetik biyoloji yaklaşımları, gelişmiş elektron transfer yeteneklerine sahip mikroorganizmalar geliştirmek için güçlü bir araç olarak dikkat çekmektedir. Araştırmacılar, elektron transfer yollarını değiştirerek veya ekzojen elektron araçları ekleyerek mikrobiyal yakıt hücrelerinin genel performansını başarıyla iyileştirmişlerdir [164].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde elektroaktif bakterilerde sitokromlar ve iletken pili gibi önemli elektron transfer proteinlerinin ekspresyonunu artırmak için genetik mühendisliği teknikleri kullanılmıştır. Ayrıca, sentetik elektron mekiklerinin dahil edilmesinin, mikroorganizmalardan elektrot yüzeyine elektron transferini kolaylaştırmada etkili olduğu kanıtlanmıştır. Bu gelişmeler, mikrobiyal yakıt hücrelerinde güç çıkışının artmasına ve daha iyi elektron transfer verimliliğine katkıda bulunmuştur. Bu ilerlemeler, insanoğlunu mikrobiyal yakıt hücresi teknolojisinin pratik uygulamasına bir adım daha yaklaştırmıştır [164].

Araştırmacılar ve mühendisler, mikrobiyal yakıt hücrelerinde elektrot aralığını ve toplam ayak izini (kapladığı alanı) en aza indirirken güç çıkışını en üst düzeye çıkarmak için yığın haline getirilmiş mikrobiyal yakıt hücresi konfigürasyonları, akış geçişli tasarımlar ve modüler sistemler gibi farklı ölçeklendirme stratejileri üzerinde çalışmaktadır. Ortaya konulan bu çabalar, mikrobiyal yakıt hücrelerini şebeke dışı güç üretimi ve büyük endüstriyel ortamlarda atık su arıtımı da dahil olmak üzere çeşitli uygulamalar için uygulanabilir hale getirmeyi amaçlamaktadır [164].

Mikrobiyal yakıt hücreleri, sürdürülebilir ve verimli elektrik üretim yöntemlerinde devrim yaratmayı vaat eden çığır açıcı bir biyoenerji teknolojisinin öncüsü olarak nitelendirilmektedir. Bu yenilikçi cihazlar, çeşitli organik maddeleri elektrik enerjisine dönüştürmek için mikroorganizmaların gücünden yararlanmaktadır. Uyarlanabilirlikleri ve ölçeklenebilirlikleri, mikrobiyal yakıt hücrelerini küçük ölçekli güç kaynaklarından büyük ölçekli elektrik üretimine kadar çok çeşitli uygulamalar için uygun hale getirmektedir. Mikrobiyal yakıt hücresi teknolojisindeki umut verici eğilimler, çeşitli sektörlerle entegrasyonunu, sentetik biyolojinin önemini ve yaygın uygulamasının çevresel ve toplumsal etkilerini ortaya çıkarmıştır. Sürdürülen araştırmalar, optimize edilmiş mikrobiyal yakıt hücresi tasarımları ve elektrojen bakteriler aracılığıyla mikrobiyal yakıt hücresi verimliliklerini arttırmayı amaç edinmiştir. Mikrobiyal yakıt hücrelerinin, daha büyük tesislerin ve geliştirilmiş elektron transfer mekanizmalarının kullanımı ile güç çıkışının artması beklenmektedir. Mikrobiyal yakıt hücresi sistemleri, uzak bölgeler için sürdürülebilir enerji

çözümleri sunarak enerji erişimini ve yaşam kalitesini iyileştirmek için heyecan verici olanaklar ortaya koymaktadır. Mikrobiyal yakıt hücresi teknolojisi ilerledikçe ticarileştirmeleri de mümkün hale gelmektedir. Bu da onları yaygın elektrik üretimi için uygun bir seçenek haline getirmektedir. Araştırmacılar, verimliliği ve elektrojen kapasitelerini en üst düzeye çıkarmak için bitki seçimini, mikrobiyal yakıt hücresi tasarımı ve mikrobiyal toplulukları optimize etmeyi amaçlamaktadır. İlaveten, bitki-mikrobiyal yakıt hücresi sistemlerinin tarımsal uygulamalar ve fitoremediasyon ile entegre edilmesi, enerji üretirken toprak sağlığını da iyileştirmektedir [164].

Mikrobiyal yakıt hücreleri, enerji üretiminde devrim yaratacak ve daha temiz, daha yeşil ve daha sürdürülebilir bir gelecek için çalışacak şekilde konumlandırılmış, biyoloji, mühendislik ve sürdürülebilirliğin birleşimini temsil etmektedir. Mikrobiyal yakıt hücreleri sadece bir teknolojiden çok daha fazlasıdır. Çünkü sürdürülebilir bir enerji devriminin katalizörüdürler. Mikrobiyal yakıt hücresi teknolojisi geliştikçe, sorumlu ve sürdürülebilir bir entegrasyonu sağlamak önemli bir konudur. Bunun için mikrobiyal yakıt hücresi uygulamasının ekosistemler ve mikrobiyal topluluklar üzerindeki uzun vadeli etkilerini anlamak, olası çevresel etkiler ve güvenlik değerlendirmeleri üzerine araştırmalar yapmak hayati önem taşımaktadır [164].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinin endüstriyel entegrasyonunu sağlamak amacıyla mikrobiyal yakıt hücresi teknolojisini büyük ölçekli atık su arıtma, gıda işleme atık yönetimi ve biyoenerji üretimi gibi mevcut endüstriyel süreçlere entegre etmek gerekmektedir. Bu, ekonomik uygulanabilirliği sağlamaya da yol açar. Mikrobiyal yakıt hücreleri için standardizasyon ve politika desteği sağlanmalıdır. Bunun için Hükümetler ve düzenleyici kurumlar, sürdürülebilir enerji ve atık su arıtma sektörlerinde mikrobiyal yakıt hücrelerinin benimsenmesini teşvik etmek için standartlaştırılmış yönergeler, finansman programları ve teşvikler oluşturmaktadır. Mikrobiyal yakıt hücrelerinin ölçeklendirme gösterileri yapılmalıdır. Bu kapsamda, çeşitli operasyonel koşullar altında mikrobiyal yakıt hücrelerinin gerçek dünya performansını değerlendirmek, etkinliklerini ve güvenilirliklerini doğrulamak için büyük ölçekli pilot projeler uygulanmalıdır. Mikrobiyal yakıt hücrelerinin ekonomik uygulanabilirlik çalışmaları ivedilikle ortaya çıkarılmalıdır. Bunun için mikrobiyal yakıt hücresi teknolojisinin maliyet-fayda yönlerini değerlendirmek ve geleneksel enerji ve atık su arıtma teknolojileriyle rekabet edebilirliğini sağlamak için kapsamlı bir tekno-ekonomik analiz yapılmalıdır. Mikrobiyal yakıt hücreleri için yatırım ve pazar penetrasyonu ortaya konulmalıdır. Bu; araştırma kurumları, özel sektörler ve girişim sermayedarları arasındaki artan iş birliği, ticarileştirme çabalarını hızlandırmak, yatırımları güvence altına almak ve pazar benimsenmesini genişletmek için hayati önem taşımaktadır. Gelişmiş yapay zeka ve makine öğrenimi modellerinin dahil edilmesi, Mikrobiyal yakıt hücresi araştırmalarında biyoelektrokimyasal sistemlerin doğasında var olan karmaşıklıklarla başa çı-

kabilen daha gelişmiş modeller geliştirmeye odaklanabilir ve mikrobiyal yakıt hücresi teknolojisinin ticarileştirilmesine ve yaygın olarak benimsenmesine yol açabilir [165].

7. MİMARLIK VE PEYZAJ ÖLÇEĞİNDE MİKROBİYAL YAKIT HÜCRELERİ: YERİNDE ENERJİ, ENERJİ GÖRÜNÜRLÜĞÜ VE TASARIM

Mikrobiyal yakıt hücreleri (MYH) ve bitki-mikrobiyal yakıt hücreleri (Bitki-MYH), organik maddenin mikrobiyal oksidasyonu sonucu açığa çıkan elektron akımını yakalayan biyoelektrokimyasal sistemlerdir. Çevre mühendisliğinde arıtım-enerji eşleştirmesi, malzeme ve elektrokimya alanlarında iç direnç ile elektrot mimarisi, mikrobiyolojide ise elektrot-aktif toplulukların seçilimi başlıca araştırma odaklarını oluşturur. Bu teknik çerçevede, yerinde enerji üretimi, doğa-tabanlı çözümler ve “enerji görünürlüğü” ilkeleri üzerinden mimarlık ve peyzaj mimarlığına yeni uygulama alanları açmaktadır. İç mekânda saksı-reaktör (pot-reaktör) yaklaşımıyla düşük fakat süregelen güç çıktılarını tampon depolama ve görev çevrimi ile anlamlı kullanımlara dönüştürmek; bina kabuğunda yeşil duvar/çatı entegrasyonlarıyla ısı ve ekolojik eş-faydayı birlikte tasarlamak bu kesişimin öne çıkan örnekleridir [166-168].

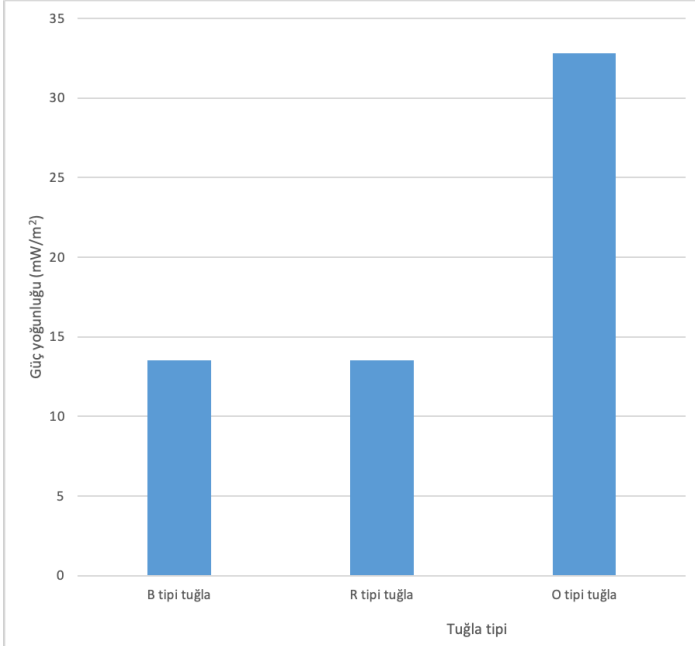
Son yıllarda yapılan çalışmalar MYH’nin mimari alanda kullanılabileceğini göstermiş; teknolojinin doğrudan binalara entegre edilmesi fikri yaygın biçimde tartışılmıştır. İlginin ardında, yapıların gereksinim duydukları enerjinin en azından bir bölümünü yerinde üretebilme olanağı yatmaktadır. Bu bağlamda, yaygın erişilebilirlikleri nedeniyle tuğlaların değerlendirilmesi gündeme gelmiş; böyle bir yaklaşımın hem gelişmekte olan hem de gelişmiş ülkelerde uygulanabilir bir yol açabileceği, geleneksel bina anlayışında “enerji tüketicisinden enerji sağlayıcısına” yönelen bir paradigma değişimini ima ettiği belirtilmiştir. Yerinde üretimin, merkezi atıksu arıtma sistemlerinin yükünü hafifletebileceği de vurgulanmaktadır [166].

Tekil bir MYH modülünden aynı anda anlamlı güç çıktısı ve arıtım verimliliği elde etmenin güçlüğü, mimari uygulamalar için titiz tasarım ve optimizasyon gereğini ortaya koymuştur. Bu kapsamda yürütülen bir çalışmada, “yaşayan duvar” bağlamında çeşitli MYH bileşenlerinin nasıl entegre edilebileceği ve mevcut proses/malzeme bilgisinden yararlanarak nasıl iyileştirilebileceği araştırılmış; iki farklı konumdan temin edilen üç tip konvansiyonel ev tuğlası MYH reaktörü olarak test edilerek elektrokimyasal özellikleri karşılaştırılmıştır. Farklı katot tipleri, anot ve katodun boyutu, elektrot bağlantısı ve konfigürasyonu ile potansiyel hammadde seçenekleri sınanmış; bir tuğla örneği için malzeme karakterizasyonu gerçekleştirilerek entegrasyon olanakları ortaya konmuştur. Çalışmada kullanılan tuğlaların seçili özellikleri Tablo 7.1’de verilmiştir [166].

Tablo 7.1. Mikrobiyal yakıt hücrelerinin “yaşayan duvar” bağlamında kullanımına yönelik yapılan çalışmada kullanılan tuğlaların kimi özellikleri [166].

Tuğla adı	Özellik
B tipi yapı tuğlası	Her biri 28,6 mL ($10 \times 44 \times 65$ mm) olan altı deliğe sahiptir.
R tipi yapı tuğlası	B tipi yapı tuğlasından daha büyük deliğe sahiptir, 5 adet deliği vardır. Her biri 66,3 mL, $17 \times 60 \times 65$ mm ölçülerindedir.
O tipi yapı tuğlası	Yerel bir hava tuğlası örneğidir. $220 \times 35 \times 80$ mm ölçülerinde olup her iki tarafında 2-3 mm derinliğinde oluklar vardır.

Bulgular, ticari olarak temin edilebilen standart ev tuğlalarının önemli bir yapısal değişikliğe gerek olmaksızın MYH reaktörü olarak uygulanabilir olduğunu göstermektedir. O tipi tuğla reaktörlü düzeneklerde kısa vadede elde edilen güç yoğunlukları, literatürdeki diğer MYH'lere göre nispeten düşük kalmakla birlikte, sistemlerin optimize edilmemiş ve yüksek maliyetli katalizör içermeyen prototipler olduğu göz önüne alındığında, kendi kendine yetebilen modüller için yüksek potansiyel ortaya koyulmuştur. Bu sonuçlar, MYH teknolojisine doğrudan erişim ve yerel malzemelerle kurulabilecek sistemlerin özellikle gelişmekte olan ülkelerde ekonomik katkı üretebileceğini düşündürmektedir [166]. Şekil 7.1, farklı tuğla tiplerine dayalı MYH'lerde ulaşılan en yüksek güç yoğunluklarının kıyaslamasını sunar.



Şekil 7.1. Farklı tiplerdeki yapı tuğlaları kullanan mikrobiyal yakıt hücreleri tarafından üretilen en yüksek güç yoğunluğunun kıyaslaması [166].

“Yaşayan duvar” yaklaşımı, Avrupa Komisyonu’nun Döngüsel Ekonomi Eylem Planı (CEAP, 2020) ve 2050 iklim nötrlüğü hedefleriyle uyumludur. Ürün yaşam döngüsünün tüm evrelerinde kaynak verimliliğini ve yerinde döngüleri önceleyen bu politik çerçevede, net-sıfır yapı vizyonu öne çıkmaktadır. MYH’ler bu vizyona uygun düşük eşikli, yerinde ve ölçeklenebilir çözümler sunar. Bu doğrultuda, MYH’lerin ve ilişkili teknolojilerin yapının “yapısına” entegre edilerek kendi kendine yetebilen yaşam alanlarına dönüştürülmesini hedefleyen araştırmalar Living Architecture hattında ilerlemekte; Horizon 2020 FET-OPEN (686585) ve Active Living Infrastructure: Controlled Environment – ALICE (851246) projeleri kapsamında desteklenmektedir [166, 167].

Evsel ölçekte biyoreaktör çıktılarının okunabilirliği, ALICE prototipinde olduğu gibi, erişilebilir dijital arayüzler ve sanatsal görselleştirmelerle güçlendirilmiştir. Litre başına yaklaşık 200 mW güç üreten idrar-kaynaklı MYH yığınlarından elde edilen biyofilm verileri, “Mobes” karakterleri aracılığıyla yorumlanmış; enerji-atık-yaşam ilişkisi kamusal sergilerle görünür kılınmıştır. Prototipin 2021’de Victoria & Albert Müzesi (Dijital Tasarım Hafta Sonu) ve 2022’de Electromagnetic Field festivalinde sunulması, MYH ile çalışan ilk evler yaygınlaşmadan önce dizi konfigürasyonları, enerji görselleştirmesi ve bakım senaryolarının denenmesine olanak sağlamıştır. Whitechapel Galerisi’ndeki *Is this tomorrow?* sergisinde yer alan 13 m²’lik enstalasyon da kent ve konut ekolojilerinde insan-mikrop ilişkilerine dair uyarıcı bir gelecek anlatısı kurmuştur [167].

Tuvaletler ve diğer ıslak hacimler, tatlı suyla taşınan atık akışlarının besin-enerji-biyomolekül açısından zenginliği nedeniyle MYH entegrasyonu için doğal adaylardır. Mikrobiyal işlemde geçen akışların güvenli toprak iadesi ve hidroponik sistemlerde azot-fosfor geri kazanımı ile bitki kök sistemlerinin beslenmesi mümkün olduğunda, sıhhi hacimlere ilişkin teknolojik ve kültürel beklentiler yeniden tanımlanabilir. Bu bakış, MYH “bacaları” gibi yeni mimari tipolojilerin, üretim ve arıtım işlevlerinin iç içe geçtiği biyo-dijital altyapılara evrilmesine zemin hazırlar [167].

Yukarıda bina kabuğuna gömülü ve biyo-dijital arayüzlü uygulamalar tartışılmıştır; ölçek iç mekâna indirildiğinde, evsel kullanıma uygun Bitki-MYH’ler—özellikle yarı gölgeye toleranslı saksı bitkilerine dayalı pot-reaktör konfigürasyonları—tasarım, biyofizik ve elektriksel eşleştirmenin birlikte ele alınmasını gerektirir [166-168].

İç mekân uygulamalarında Bitki-MYH, saksı ile elektrokimyasal reaktörün aynı nesnede birleştiği bir pot-reaktör tipolojisi olarak değerlendirilmedir. Başarı, biyolojik süreçlerin ve elektriksel topolojinin mimari gereklerle eşzamanlı çözümüne bağlıdır. Reaktör içi ortam bitkinin rizosferinde mikrobiyal oksidasyonu desteklerken, kabuk ve yüzey kararları kullanıcı güvenliği, kablo ve bağlantıların görünmezliği ile bakım kolaylığını belirler; bu yönüyle

pot-reaktör, iç mekân deneyimini düşük fakat süregelen bir güç akışıyla ilişkilendiren bir tasarım ögesine dönüşür.

Tür seçimi, elektrokimyasal verim ile mekânsal uyum arasında aracılık eder. Yarı gölgeye uyumlu, su stresi dalgalanmalarına toleranslı ve iç mekânda yaygın kullanılan türler, rizosferdeki eksudat üretimi ve kök morfolojisi sayesinde anoda yakın mikrobiyal kolonizasyonu kolaylaştırır. *Aloe vera* gibi CAM metabolizmasına sahip türlerde gündüz-gece fizyolojisi, görev çevrimli düşük güçlü yüklerin akşam/gece kullanımına alınan kurgularla uyum gösterebilir; tampon depolamayla biriktirilen küçük ölçekli üretim, iç mekânda algılanabilir ışık darbelerine dönüştürülebilir [168]. Dolayısıyla tür-yerleşim-bakım üçlüsü, yalnız estetik ve ergonomik ölçütlerle değil, iç direnç bileşenlerinin zamansal davranışıyla birlikte değerlendirilmelidir.

Substrat ve mikrobiyal topluluk seçimi pot-reaktörün elektrokimyasal omurgasını tanımlar. Gözeneklilik, su-hava dengesi ve iyon iletkenliği ile ilişkilidir; organik madde içeriği ve pH, elektrot-aktif toplulukların seçimini etkiler. Hava arayüzünde oksijenlenme gereksinimi katot performansına, rizosferde indirgen koşulların sürdürülmesi ise anoda doğrudan yansır. İç mekânda bu iki koşulun aynı kesitte birlikte sağlanması, su yönetimi ve havalanma rejiminin dikkatle ayarlanmasını gerektirir. Uygun substrat karışımları ve ölçülü sulama protokolleriyle **anoksik-oksik gradyan** korunarak katotta oksijen indirgenmesi desteklenir; anotta kütle-yük aktarım yolu kısılır [168].

Elektrot mimarisi ve geometri, iç direnç bileşenlerini sınırlamada belirleyicidir. Anodun rizosfere gömülü yerleşimi kök yüzeyine yakın biyofilm oluşumunu destekler; katodun toprak-hava arayüzüne yakın konumu oksijen erişimini kolaylaştırır. Anot-katot aralığının makul düzeyde tutulması ohmik kayıpları azaltır; aşırı yakınlık ise difüzyon kısıtları ve kısa devre risklerini artırabilir. Karbon esaslı elektrotlar biyouyumluluk ve kararlılık açısından avantajlıdır; metalik seçenekler korozyon ve biyofilm etkileşimi bakımından dikkatle değerlendirilmelidir. İç mekânda elektrotların çıkarılabilir/servis edilebilir tasarlanması uzun dönemli kullanım ve güvenlik için ek güvencedir [168].

Kabuk ve yerleştirme kararları reaktörün mekânla kurduğu ilişkiyi belirler. Kablo iletiminin gizlenmesi, düşük gerilimli devrelerin korunması, sızıntılara karşı damlama yönetimi ve kolay müdahaleye izin veren kapak/kanal çözümleri gündelik kullanımı mümkün kılar. Raf, niş ve pencere önü yerleşimlerinde katot oksijenlenmesini engellemeyen hava akımı ve yarı gölge koşulları hem bitki sağlığını hem de elektriksel çıktıyı destekler. “Enerji görünürlüğü” ilkesi, ışık darbelerinin ritim ve sürelerinin mekânın kullanım senaryosuna entegre edilmesiyle teknolojiyi kullanıcı algısına pedagojik bir bağla taşır [167, 168].

Elektriksel topoloji, düşük güçlü üretimin işlevselleştirilmesinde kritiktir. Seri ve seri-paralel mikro kümeler hedef gerilimi sağlar; basit bir tampon depolama birimi üretim ile tüketim arasındaki zaman uyumsuzluğunu telafi

eder; ters akımı önleyen diyot ve yük sınırlayıcı koruma elemanları güvenli işletim sunar. Gün-gece anahtarlaması ve görev çevrimi, üretimin pedagojik görünürlüğünü artırırken bitkinin fizyolojik ritmiyle de uyum kurar. Bu yaklaşım, bina kabuğuna gömülü sistemler için “yaşayan duvar” literatüründe önerilen bütünleşik faaliyet mantığıyla aynı doğrultudadır; yalnızca ölçek farkı söz konusudur [166, 167].

Devreye alma ve izleme, tasarım kararlarının doğrulanması için gereklidir. Zaman serili açık devre gerilimi gözlemleri sistem kararlılığı ve mikroiklim duyarlılığına; periyodik yükleme testlerinden türetilen gerilim-akım-güç davranışının alan/hacim bakımından tutarlı yorumları karşılaştırılabilirliğe işaret eder. Seçili birimlerde empedans çözümlemesi iç direnç bileşenlerini ayırır ve tasarım revizyonlarının (elektrot aralığı, aktif alan, nem rejimi) kanıta dayalı kurgulanmasını sağlar. İç mekânda sürdürülebilirlik, yalnız elektriksel göstergelerle değil, bitki sağlığı, bakım sıklığı ve kullanıcıyla kurulan estetik-işlevsel bağ üzerinden birlikte değerlendirilmelidir [168].

Sonuç olarak pot-reaktör yaklaşımı, “yaşayan duvar” ve biyo-dijital arayüzlerle aynı ekosistemin parçası olarak düşünülmelidir. İç mekân ölçeğinde geliştirilen güvenli, servis edilebilir ve mekâna uyumlu modüller; bina kabuğundaki reaktif malzeme denemeleriyle ortak bir tasarım sözlüğü paylaşır ve döngüsel ekonomi vizyonuna uygun yerinde enerji/arıtım anlatılarını besler [166,167]. Bu bütünlük içinde Bitki-MYH, iç mekân peyzajında yalnız dekoratif bir unsur değil, kullanıcıyı enerji metabolizmasının parçası hâline getiren deneyimsel bir altyapı olarak konumlanır.

8. MİKROBİYAL YAKIT HÜCRESİ TEKNOLOJİLERİNİN GELECEK SENARYOLARI

Mikrobiyal yakıt hücrelerinin geleceği çeşitli sorunların çözümü ile ilişkilidir. Bu sorunlar şöyle sıralanabilir [169]:

- Malzemelerin dayanıklılığının düşük olması,
- Malzemelerin pahalı olması
- Mikrobiyal yakıt hücresi sistemlerinin güç yoğunluklarının halen düşük olması,
- Mikrobiyal yakıt hücresi sistemlerinin yüksek iç dirence sahip olması,
- Mikrobiyal yakıt hücrelerinin elektron alıcılarının yetersiz kalması.

Gelecekte yapılması hedeflenen araştırmaların temel olarak daha az iç dirence sahip mikrobiyal yakıt hücresi reaktörlerinin makul bir tasarımına, elektron transferini artırmak için nanopartiküller kullanmaya, kalıtsal olarak tasarlanmış mikroorganizmalar ve ön işlem görmüş aşı maddesi kullanmaya, mikrobiyal yakıt hücresini başlatma süresini azaltmaya odaklanması gerektiği bildirilmiştir [169, 170].

Mikrobiyal yakıt hücresi için uygun reaktör tasarımının yanı sıra, enerji tasarrufu/çıkarma yöntemleri konusunda da araştırma yapılması gerektiği ifade edilmiştir. Mikrobiyal yakıt hücresini başlatma aşamasında voltaj düşüktür ve aralıklı noktada maksimum değere ulaşmaktadır. Voltaj üretimi, çalışma parametrelerinden etkilenmektedir. Bir sistemi çalıştırmak için sabit bir voltaj gereklidir, ancak mikrobiyal yakıt hücrelerinin ürettiği voltaj nispeten düşük ve istikrarsızdır. Ohmik kayıplar, bakteriyel metabolik kayıplar, kütle transfer kayıpları ve aktivasyon kayıpları gibi faktörler potansiyel (voltaj) kayıplarının ortaya çıkmasına neden olabilir. Bu nedenle, en uygun çalışma noktaları belirlenmeli ve mikrobiyal yakıt hücresi sistemi sürekli en yüksek güç üretimi için bu koşullara otomatik olarak uyum sağlayan hale getirilmelidir [169, 170].

Son yirmi yılda mikrobiyal yakıt hücrelerinin laboratuvar ölçeğinden saha ölçeğine kurulumu için çok sayıda çalışma yapılmış ve artık mikrobiyal yakıt hücrelerinin ticari kullanımının zamanının geldiği düşünülmektedir. Mikrobiyal yakıt hücrelerinin saha ölçeğinde uygulanması için optimize edilmesi gereken faktörler şunlardır [171]:

- Alt tabaka türü,
- Elektrot malzemesi,
- Çalışma koşulları gibi birçok faktörün optimize edilmesi gerekiyor.

Mikrobiyal yakıt hücresi teknolojisi umut vadeden bir teknoloji olduğu için ticarileştirilmesini sınırlandıran çeşitli zorluklar bulunmaktadır. Sonuç olarak, endüstriyel uygulamalarda ele alınması gereken başlıca endişeler şunlardır [171]:

- Genel sistem maliyeti,
- Alan standardizasyonu,
- Başarılı saha testleri.

Gelecekteki çalışmaların mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanılan yüksek maliyetli malzemeler için bile, güç yoğunluğunun daha yüksek değerine göre sistematik bir maliyet analizine odaklanması tavsiye edilmiştir. Herhangi bir mikrobiyal yakıt hücresi sistem kurulumunda güç-maliyet oranı odak noktası olmalıdır [171].

Mikrobiyal yakıt hücreleri için güç performansını belirtmek ve birbirleriyle ve diğer teknolojilerle kolay karşılaştırmayı kolaylaştırmak için yöntemi standartlaştırmak için bazı önlemlerin alınması gerektiği ifade edilmiştir. Birçok araştırmacı halen W/m^2 cinsinden güç yoğunluğunu kullanmaktadır. Ancak anodik yüzey alanı da farklı bir perspektife sahiptir. Hangi tür anodik alanın seçilmesi gerektiği konusunda, yani nano yüzey alanı, makro yüzey alanı veya mikro yüzey alanı, farklı güç çıkışlarına yol açabileceğinden, böyle özel bir fikir birliği yoktur. Benzer şekilde, farklı bir elektrot malzemesi konfigüras-

yonu, elektrot alanını ölçmek için çelişkili bir tekniğe sahiptir. Örneğin; elektrot katlanmışsa, hangi alan dikkate alınacaktır? Katlanmış mı, katlanmamış mı? Hacimsel güç çıkışı (W/m^3), anot hacmi veya mutlak güç çıkışı hakkında bir çelişki olmadığından ölçmenin yolu olmalıdır [171].

Mikrobiyal yakıt hücreleri konusunda yapılacak çalışmalar başarılı saha testlerine odaklanmalıdır. Mikrobiyal yakıt hücrelerinin sahada kullanımı, bakım gerektirdiği için biraz zordur. Ayrıca, mikrobiyal yakıt hücresi sisteminin kararlılığının daha uzun süre korunması gerekmektedir. Bu sorunun, laboratuvarlarda geliştirilen yeni modifiye elektrot malzemeleri veya teknikleriyle çeşitli çevre koşullarında kararlı ve uzun vadeli çalışma için küçük ölçekli saha kurulumları üzerinde yoğun araştırmalar yapılarak aşılabileceği düşünülmektedir [171].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinin gerçek dünya ortamlarında verimli olması için üstesinden gelmesi gereken zorluklar vardır, bunlar [172];

- pH,
- Sıcaklık,
- Terminal elektron alıcıları,
- Anodik bölmenin elektron transfer mekanizması,
- Substrat,
- Elektrot malzemesi ve
- membran gibi çok sayıda zorluktan oluşur.

Tüm bu zorluklar mikrobiyal yakıt hücrelerinin performansını etkileyebilir. Mikrobiyal yakıt hücrelerinin ölçeklendirilmesiyle ilgili zorluklar arasında yüksek üretim maliyetleri, yüksek iç direnç ve malzeme maliyetleri yer alır. Ayrıca, elektrot üzerindeki daha düşük karışık kültür biyofilm verimliliği, zamanla diğer operasyonel sorunların artması ve yavaş kirletici bozunma kinetiği, süreci daha da karmaşık hale getirmektedir. Bu zorlukların üstesinden gelmek için mikrobiyal yakıt hücresi teknolojisindeki son gelişmeler; derin öğrenme uygulamaları, kendi kendine güç sağlayan biyosensörler, yakıt olarak biyokütle, elektrot malzemesi gelişmeleri gibi uygulamalar dahil olmak üzere birkaç önemli alanı kapsamaktadır. Nanomalzeme tabanlı elektrot araştırması ve modifikasyonu, güç çıkışını artırmak ve maliyetleri düşürmek için önemli olmuştur ve bu da mikrobiyal yakıt hücresi ölçeklenebilirliğini geliştirmiştir. Güç çıkışını arttırma çabasıyla mikrobiyal yakıt hücresi yapılandırma modifikasyonu son araştırmaların odak noktası olmuştur [172].

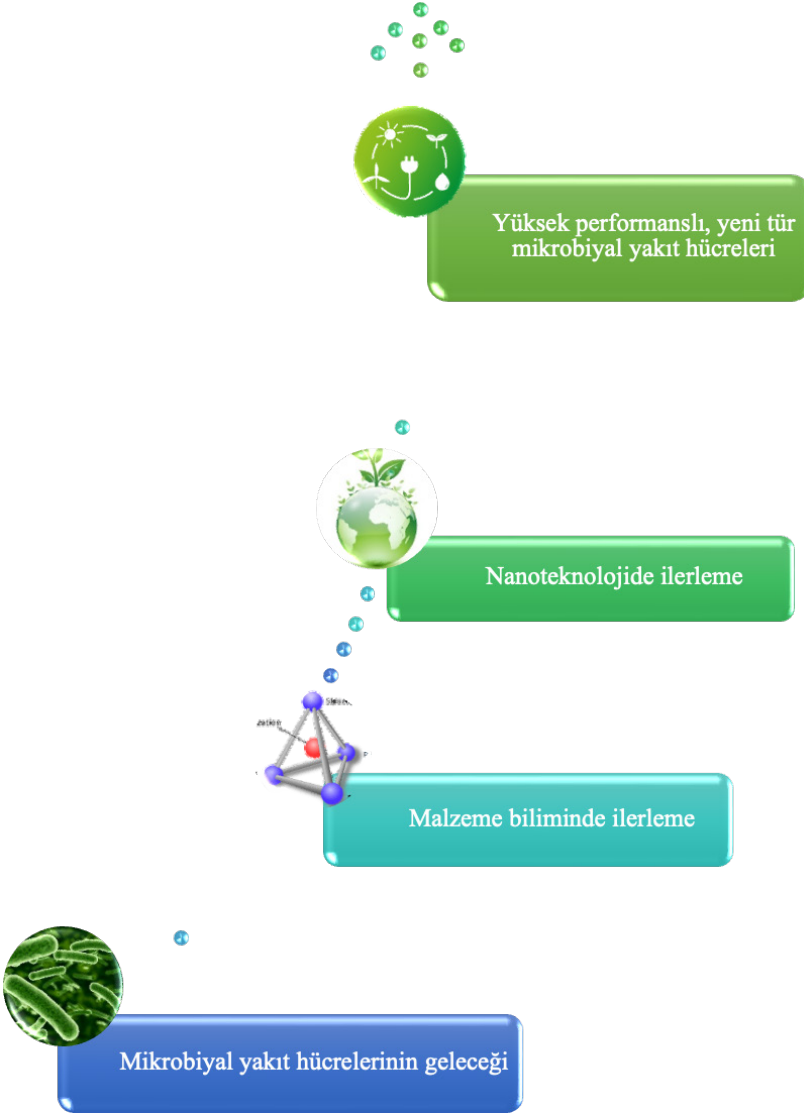
Nobel Fizik Ödülü sahibi Giorgio Parisi, iklim değişikliğinin insanlık için 'büyük bir tehdit' olduğunu ve dünyanın mümkün olan en kısa sürede harekete geçmesinin çok önemli olduğunu belirtmiştir. Net sıfır karbon emisyonuna yönelik bir yaklaşımla yeni ve alternatif enerji/elektrik üretim yöntem-

leri günün ihtiyacı olmuştur. İnsan müdahaleleri, inovasyon ve araştırmalarla yüksek enerji talebi sorunu ve iklim değişikliği önümüzdeki yıllarda ele alınabilir. Güneş, rüzgar ve hidro, öncelikle elektrik üretimi için fosil yakıtların tükenmesi sorununu ele almak için kullanılan yüksek maliyetli yenilenebilir kaynaklardan bazılarıdır. Kimyasal enerjinin geleneksel bir yakıt hücresi kullanılarak elektrik enerjisine dönüştürülmesi yükselen bir teknoloji olmuştur. Yakıt hücresi teknolojisinin sahip olduğu başlıca avantajlar yüksek verimlilik, döner ekipmana ihtiyaç duyulmaması, CO_2 , NO_x , SO_x gibi toksik inorganik oksitlerin emisyonunun olmamasıdır. Potansiyel yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi olan mikrobiyal yakıt hücreleri, biyokütleyle dayalı teknoloji olarak büyük potansiyel sunmaktadır. Bu teknoloji uygun sonuçlarla ticari kullanım için daha fazla araştırılabilir ve ölçeklendirilebilir. Organik madde kullanımı ve mikrobiyal aktivitenin yardımıyla elektrik üretimi kavramı uzun zamandır bilinmektedir. Mikrobiyal yakıt hücresinin çalışma süreci, geleneksel yakıt hücresininkine oldukça benzerdir. Mikrobiyal yakıt hücresi, yenilenebilir kaynaklardan biyoelektrik üretimin devrim niteliğinde bir yöntem olarak tanıtılmaktadır. Mikrobiyal yakıt hücresinin geniş çaplı uygulanmasını ve ticarileştirilmesini engelleyen bazı zorluklar mevcuttur. Çeşitli mikrobiyal yakıt hücresi bileşenleri için malzemelerin akıllıca kullanılması, performansı artırmak ve maliyeti düşürmek için çok önemlidir. Malzeme bilimindeki son gelişmeler ve nanoteknoloji, gelecekte mikrobiyal yakıt hücrelerinden elde edilen elektrik enerjisinin üretimi, taşınması ve kullanımı için benzersiz araçlar sunabilir. Tüm zorluklara rağmen, mikrobiyal yakıt hücresi mevcut yenilenebilir enerji kaynaklarıyla rekabet etme konusunda daha büyük bir potansiyele sahiptir. Mikrobiyal yakıt hücresi teknolojisinin evriminde ilerleme, bu elemanların ve performansını arttıran en uygun aralıklarının kapsamlı bir şekilde araştırılması ile sağlanabilir [173].

Mikrobiyal yakıt hücrelerinde kullanılan membranların yüksek proton iletkenliği, çevre dostu olması, kolay bulunabilir olması, yüksek stabilite sağlaması, daha uzun çalışma ömrü sunması, kirlenme önleyici özellikler göstermesi gibi özelliklere sahip düşük maliyetli membran malzemesi geliştirilmesi gereksinimi hem bu zaman için hem de gelecek zaman için önemli bir ihtiyaçtır. Membran malzemelerinde yaşanacak gelişmelerin, mikrobiyal yakıt hücrelerinin gelecekte daha iyi performans göstermesine olanak tanıyacağı hedeflenmektedir [174].

Nanoteknolojinin mikrobiyal yakıt hücrelerini geliştirme potansiyelinin yüksek olduğu bildirilmiştir. Mikrobiyal yakıt hücrelerinde elektrot yüzeylerinde kalın biyofilmlerin gelişimi, yüksek yüzey alanlı/biyouyumlu nanomalzemeler tarafından desteklenmektedir. Mikrobiyal kolonizasyon ve elektrot yüzeyi arasında bağlantı görevi görerek, iletken nanopartiküller elektron transferinde ortaya çıkan empedansı düşürür. Fakat nanopartikül şeklinin elektron taşınımı üzerindeki etkisine dair daha fazla araştırma ihtiyacı vardır [174].

Şekil 8.1, mikrobiyal yakıt hücrelerinin geleceklerine yönelik gidişat ve beklentileri özetlemektedir.



Şekil 8.1. Mikrobiyal yakıt hücrelerinin geleceğine yönelik gidişat tahmini [169-174].

Bazı çalışmalarda, mikrobiyal yakıt hücrelerinin mürettebatlı uzay keşifleri için oldukça iyi bir tercih haline geldiği bildirilmiştir. İlaveten, bitkiler, kapalı devre biyosferler ve genel olarak uzaydaki mikroorganizmalar konusunda, mikrobiyal yakıt hücrelerinin dünya dışı görevlerde rol oynayabileceği öngörülmektedir. Mikrobiyal yakıt hücrelerinin gelecek uygulamaları için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Mikrobiyal yakıt hücrelerinin ay regolitleri, altyapı

ve yapısal destek için uygunluğunu değerlendirmek üzere titiz çalışmaların konusu haline gemiştir. Bu kapsamda MELiSSA projesi, kapalı devre ortamında yaşam desteğinin tüm yönlerini araştıran belki de en uzun süredir devam eden program olarak tanıtılmıştır. BEATRICE gibi projelerin kapalı bir sistemde belirli eko-döngüleri daha yakından araştırmaya başlaması bu kadar büyük girişimlerle birlikte gerçekleşmektedir. BEATRICE projesi, özellikle mikrobiyal yakıt hücrelerini yan ürünleriyle (elektrik, besin dengesi sağlanmış gübre) ve mikro yeşilliklerle birleştirerek, güvenli ve sağlıklı bir şekilde aydınlatma ve gıda sağlamayı amaçlamıştır. Bunun için yerel bir insan atığı arıtma sistemi oluşturmanın uygulanabilirliğini araştırmaktadır. Mikropların biyo-dönüşüm ve tam geri dönüşüm için olağanüstü yeteneklerinden yararlanma olasılığının, dünya çevremizi onarmak ve sürdürülebilirliği desteklemek için sayısız fırsat sunduğu ifade edilmektedir [174].

Mikrobiyal yakıt hücresinin de üyesi olduğu Biyoelektrokimyasal Sistemler, canlı ve yapay olanın aynı sirkadiyen ritme sahip olacak ve topluma değer katacak şekilde tasarlanabileceği bir biyo-hibrit sunar. Güler yüzlü hizmet robotlarının bahçelerimiz, oluklarımız, evsel atıklarımız ve şehir genelindeki kanalizasyonlarımızla ilgilendiği, konutlarda gerçek zamanlı elektrik üretimiyle tamamen kendi kendine yetebilen ve toplumumuzun, küçük ve güçlü mikropların metabolik eylemleriyle biyokütlenin çoğunu faydalı yakıtlara ve gübrelere dönüştürebildiği bir gelecek hayal edilmektedir [174].

KAYNAKLAR

- Naha, A., Debroy, R., Sharma, D., Shah, M. P., & Nath, S. (2023). Microbial fuel cell: A state-of-the-art and revolutionizing technology for efficient energy recovery. *Cleaner and Circular Bioeconomy*, 5, 100050. <https://doi.org/10.1016/j.clcb.2023.100050>
- Tan, W. H., Chong, S., Fang, H., Pan, K., Mohamad, M., Lim, J. W., . . . Yang, T. C. (2021). Microbial Fuel Cell Technology—A critical Review on Scale-Up Issues. *Processes*, 9(6), 985. <https://doi.org/10.3390/pr9060985>
- Fadzli, F. S., Bhawani, S. A., & Mohammad, R. E. A. (2021). Microbial fuel cell: recent developments in organic substrate use and bacterial electrode interaction. *Journal of Chemistry*, 2021, 1–16. <https://doi.org/10.1155/2021/4570388>
- Tesfaye, T., Shuka, Y., Tadesse, S., Eyoel, T., & Mengesha, M. (2025). Improving the power production efficiency of microbial fuel cell by using biosynthesized polyaniline coated Fe₃O₄ as pencil graphite anode modifier. *Scientific Reports*, 15(1), 587. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84311-5>
- Fan, L., & Xue, S. (2016). Overview on electricigens for microbial fuel cell. *The Open Biotechnology Journal*, 10(1), 398–406. <https://doi.org/10.2174/1874070701610010398>
- Flimban, S. G. A., Ismail, I. M. I., Kim, T., & Oh, S. (2019). Overview of Recent Advancements in the Microbial Fuel Cell from Fundamentals to Applications: Design, Major Elements, and Scalability. *Energies*, 12(17), 3390. <https://doi.org/10.3390/en12173390>
- De Los Ángeles Fernandez, M., De Los Ángeles Sanromán, M., Marks, S., Makinia, J., Del Campo, A. G., Rodrigo, M., & Fernandez, F. J. (2015). A grey box model of glucose fermentation and syntrophic oxidation in microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 200, 396–404. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.10.010> <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17597269.2017.1302682#d1e133>
- Obileke, K., Onyeaka, H., Meyer, E. L., & Nwokolo, N. (2021). Microbial fuel cells, a renewable energy technology for bio-electricity generation: A mini-review. *Electrochemistry Communications*, 125, 107003. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2021.107003>
- Sonawane, A. V., Rikame, S., Sonawane, S. H., Gaikwad, M., Bhanvase, B., Sonawane, S. S., . . . Gaikwad, R. (2024). A review of microbial fuel cell and its diversification in the development of green energy technology. *Chemosphere*, 350, 141127. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141127>
- Khan, S. S., Amjad, M., Shareef, H., & Larkin, S. (2023). Review of microbial fuel cell from a techno-economic perspective. *Energy Exploration & Exploitation*, 42(1), 373–398. <https://doi.org/10.1177/01445987231208510>
- Chaturvedi, V., & Verma, P. (2016). Microbial fuel cell: a green approach for the utilization of waste for the generation of bioelectricity. *Bioresources and Bioprocessing*, 3(1), 38. <https://doi.org/10.1186/s40643-016-0116-6>

- Tabassum, N., Islam, N., Ahmed, S. (2022). Practical Limitations with Microbial Fuel Cell Technology. In: Ahmad, A., Mohamad Ibrahim, M.N., Yaqoob, A.A., Mohd Setapar, S.H. (eds) *Microbial Fuel Cells for Environmental Remediation. Sustainable Materials and Technology*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2681-5_5
- Jadhav, D. A., Mungray, A. K., Arkatkar, A., & Kumar, S. S. (2021). Recent advancement in scaling-up applications of microbial fuel cells: From reality to practicality. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 45, 101226. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101226>
- Dakal, T. C., Singh, N., Kaur, A., Dhillon, P. K., Bhatankar, J., Meena, R., . . . Kumari, K. (2025). New horizons in microbial fuel cell technology: applications, challenges, and prospects. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 18(1), 79. <https://doi.org/10.1186/s13068-025-02649-y>
- Dhillon, S. K., Kundu, P. P., & Jain, R. (2022). Catalytic advancements in carbonaceous materials for bio-energy generation in microbial fuel cells: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(10), 24815–24841. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17529-9>
- Din, M. I., Iqbal, M., Hussain, Z., & Khalid, R. (2020). Bioelectricity generation from waste potatoes using single chambered microbial fuel cell. *Energy Sources Part a Recovery Utilization and Environmental Effects*, 46(1), 12596–12606. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1797944>
- Din, M. I., Nabi, A. G., Hussain, Z., Khalid, R., Iqbal, M., Arshad, M., . . . Hussain, T. (2021). Microbial fuel cells—A preferred technology to prevail energy crisis. *International Journal of Energy Research*, 45(6), 8370–8388. <https://doi.org/10.1002/er.6403>
- Do, M., Ngo, H., Guo, W., Liu, Y., Chang, S., Nguyen, D., . . . Ni, B. (2018). Challenges in the application of microbial fuel cells to wastewater treatment and energy production: A mini review. *The Science of the Total Environment*, 639, 910–920. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.136>
- Ahtesham, A., & Shahadat, M. (2025). Overview of microbial fuel cell and challenges. In *Elsevier eBooks* (pp. 183–210). <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-21602-2.00006-5>
- Sharma, A., Đelević, L., & Herkendell, K. (2024). Next-Generation Proton-Exchange Membranes in microbial fuel cells: Overcoming Nafion's limitations. *Energy Technology*, 12(6). <https://doi.org/10.1002/ente.202301346>
- Santoro, C., Arbizzani, C., Erable, B., & Ieropoulos, I. (2017). Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. A review. *Journal of Power Sources*, 356, 225–244. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.109>
- [1] Dogan, F. & Minter, S. (2009). Development of Microbial and Enzymatic Fuel Cells for Bio-Inspired Power Sources, Research Report, Air Force Research Laboratories, USA, 2009.

- Appleby, A. (1990). From Sir William Grove to today: fuel cells and the future. *Journal of Power Sources*, 29(1–2), 3–11. [https://doi.org/10.1016/0378-7753\(90\)80002-u](https://doi.org/10.1016/0378-7753(90)80002-u)
- Kurzweil, P. (2010). Gaston Planté and his invention of the lead–acid battery—The genesis of the first practical rechargeable battery. *Journal of Power Sources*, 195(14), 4424–4434. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.12.126>
- Katz, E., & Bollella, P. (2020). Fuel cells and biofuel cells: From past to Perspectives. *Israel Journal of Chemistry*, 61(1–2), 68–84. <https://doi.org/10.1002/ijch.202000039>
- Understanding the history of fuel cells. (2007, January 1). Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4510259>
- [2] Kragh, H. (2000). Confusion and controversy: Nineteenth-century theories of the Voltaic pile. In F. Bevilacqua, & L. Fregonese (Eds.), *Nuovo Voltiana: Studies on Volta and his Times* (Vol. 1, pp. 133–157). Università degli Studi di Pavia.
- Chakraborty, S., Elangovan, D., Palaniswamy, K., Fly, A., Ravi, D., Seelan, D. a. S., & Rajagopal, T. K. R. (2022). A review on the numerical studies on the performance of proton Exchange Membrane fuel cell (PEMFC) flow channel designs for automotive applications. *Energies*, 15(24), 9520. <https://doi.org/10.3390/en15249520>
- Katz, E. (2024). Electrochemical contributions: Ludwig Mond (1839–1909). *Electrochemical Science Advances*, 4(2). <https://doi.org/10.1002/elsa.202400002>
- Coman, V. (2009). Heterogeneous electron transfer studies with ligninolytic redox enzymes and living bacteria. Applications in biosensors and biofuel cells. Doctoral Thesis (compilation), Centre for Analysis and Synthesis, Lund University, Swedish.
- Thomas, M. (1948). Prof. M. C. Potter. *Nature*, 161(4094), 590–591. <https://doi.org/10.1038/161590a0>
- Majumder, D., Maity, J., Tseng, M., Nimje, V., Chen, H., Chen, C., . . . Chen, C. (2014). Electricity Generation and Wastewater Treatment of Oil Refinery in Microbial Fuel Cells Using *Pseudomonas putida*. *International Journal of Molecular Sciences*, 15(9), 16772–16786. <https://doi.org/10.3390/ijms150916772>
- M. C. Potter (1911). Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds. *Proceedings of the Royal Society of London - Series B: Containing Papers of a Biological Character*, 84(571), 260–276. <https://doi.org/10.1098/rspb.1911.0073>
- Gajda, I., Greenman, J., & Ieropoulos, I. A. (2018). Recent advancements in real-world microbial fuel cell applications. *Current Opinion in Electrochemistry*, 11, 78–83. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2018.09.006>
- Slate, A. J., Whitehead, K. A., Brownson, D. A., & Banks, C. E. (2018). Microbial fuel cells: An overview of current technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 60–81. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.044>

- Reimers, C. E., Tender, L. M., Fertig, S., & Wang, W. (2000). Harvesting Energy from the Marine Sediment–Water Interface. *Environmental Science & Technology*, 35(1), 192–195. <https://doi.org/10.1021/es001223s>
- Mahurede, T. P., Chihobo, C. H., Utete, B., & Taru, P. (2023). A review of microbial fuel cell prototypes, their efficacy in wastewater treatment and the contextual situation for Zimbabwe. *Fuel Communications*, 17, 100094. <https://doi.org/10.1016/j.jfueco.2023.100094>
- Shirpay, A. (2024). Operational principles of MFCs. In: *IntechOpen eBooks*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1004175>
- Logan, B. E. (2009). Scaling up microbial fuel cells and other bioelectrochemical systems. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(6), 1665–1671. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2378-9>
- Jalili, P., Ala, A., Nazari, P., Jalili, B., & Ganji, D. D. (2024). A comprehensive review of microbial fuel cells considering materials, methods, structures, and microorganisms. *Heliyon*, 10(3), 25439. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25439>
- Jinisha, R., Regin, J. J., & Maheswaran, J. (2020). A review on the emergence of single-chamber microbial fuel cell on wastewater treatment. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 983(1), 012002. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/983/1/012002>
- Cristiani, P., Carvalho, M., Guerrini, E., Daghighi, M., Santoro, C., & Li, B. (2013). Cathodic and anodic biofilms in Single Chamber Microbial Fuel Cells. *Bioelectrochemistry*, 92, 6–13. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2013.01.005>
- Tamboli, E., & Eswari, J. S. (2018). Microbial fuel cell configurations. In: *Elsevier eBooks* (pp. 407–435). <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-64052-9.00016-9>
- Park, D. H., & Zeikus, J. G. (2002). Improved fuel cell and electrode designs for producing electricity from microbial degradation. *Biotechnology and Bioengineering*, 81(3), 348–355. <https://doi.org/10.1002/bit.10501>
- Ida, T. K., & Mandal, B. (2022). Microbial fuel cell design, application and performance: A review. *Materials Today Proceedings*, 76, 88–94. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.131>
- Kim, H., Nam, J., & Shin, H. (2011). Ammonia inhibition and microbial adaptation in continuous single-chamber microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 196(15), 6210–6213. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.03.061>
- Liu, H., & Logan, B. E. (2004). Electricity generation using an Air-Cathode single chamber microbial fuel cell in the presence and absence of a proton exchange membrane. *Environmental Science & Technology*, 38(14), 4040–4046. <https://doi.org/10.1021/es0499344>
- Lawati, M. J. A., Jafary, T., Baawain, M. S., & Al-Mamun, A. (2019). A mini review on biofouling on air cathode of single chamber microbial fuel cell; prevention and mitigation strategies. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 22, 101370. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101370>

- Wu, Y., Zhao, X., Jin, M., Li, Y., Li, S., Kong, F., . . . Wang, A. (2018). Copper removal and microbial community analysis in single-chamber microbial fuel cell. *Bioresour- ce Technology*, 253, 372–377. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.046>
- Zadeh, P. G., Rezanian, S., Fattahi, M., Dang, P., Vasseghian, Y., & Aminabhavi, T. M. (2024). Recent advances in microbial fuel cell technology for energy generati- on from wastewater sources. *Process Safety and Environmental Protection*, 189, 425–439. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.06.077>
- Bruno, L.B., Jothinathan, D., Rajkumar, M. (2018). Microbial Fuel Cells: Fundamen- tals, Types, Significance and Limitations. In: Sivasankar, V., Mylsamy, P., Omi- ne, K. (eds) *Microbial Fuel Cell Technology for Bioelectricity*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92904-0_2
- Saravanan, N., Karthikeyan, M. (2018). Study Of Single Chamber And Double Cham- ber Efficiency And Losses Of Wastewater Treatment. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 5(3), 1225-1230.
- [3] LeBlanc, J. J. (2019). Effect of Electrode Surface Area on Performan- ce of Two-Chambered Microbial Fuel Cell. Master of Science Thesis, University of Louisiana at Lafayette.
- [4] Adeniran, J. A. (2014). Energy Generating Performance of Domes- tic Wastewater Fed Sandwich Dual-Chamber Microbial Fuel Cells. Master The- sis, University of Johannesburg.
- Roy, H., Rahman, T. U., Tasnim, N., Arju, J., Rafid, M. M., Islam, M. R., . . . Islam, M. S. (2023). Microbial fuel cell construction features and application for susta- inable wastewater treatment. *Membranes*, 13(5), 490. <https://doi.org/10.3390/ membranes13050490>
- Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schroder, U., Keller, J., Freguia, S., Aelterman, P., Verstraete, W., Rabaey, K. (2006). “Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology”, *Environmental Science & Technology*, 40, (17), 5181–5192. <https:// doi.org/10.1021/es0605016>
- Selvasembian, R., Mal, J., Rani, R., Sinha, R., Agrahari, R., Joshua, I., . . . Pradhan, N. (2021). Recent progress in microbial fuel cells for industrial effluent treatment and energy generation: Fundamentals to scale-up application and challenges. *Bio- resource Technology*, 346, 126462. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126462>
- Logan, B. E. (2012). Essential Data and Techniques for Conducting Microbial Fuel Cell and other Types of Bioelectrochemical System Experiments. *ChemSusC- hem*, 5(6), 988–994. <https://doi.org/10.1002/cssc.201100604>
- Yuan, L., Yang, X., Liang, P., Wang, L., Huang, Z., Wei, J., & Huang, X. (2012). Capaci- tive deionization coupled with microbial fuel cells to desalinate low-concentra- tion salt water. *Bioresource Technology*, 110, 735–738. <https://doi.org/10.1016/j. biortech.2012.01.137>
- Chou, T. Y., Whiteley, C. G., Lee, D., & Liao, Q. (2013). Control of dual-chambered microbial fuel cell by anodic potential: Implications with sulfate reducing ba- cteria. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(35), 15580–15589. <https:// doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.04.074>

- [5] Kim, M. H. (2009). An Analysis of Anaerobic Dual-Anode Chambered Microbial Fuel Cell (MFC) Performance. Master's Thesis, University of Tennessee.
- Samsudeen, N., Radhakrishnan, T. K., & Matheswaran, M. (2014). Performance comparison of triple and dual chamber microbial fuel cell using distillery wastewater as a substrate. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 34(2), 589–594. <https://doi.org/10.1002/ep.12005>
- Allami, S., Hasan, B., Redah, M., Hamody, H., & Ali, Z. D. A. (2018). Using low cost membrane in Dual-Chamber microbial fuel cells (MFCs) for petroleum refinery wastewater treatment. *Journal of Physics Conference Series*, 1032, 012061. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1032/1/012061>
- Kim, J. R., Premier, G. C., Hawkes, F. R., Dinsdale, R. M., & Guwy, A. J. (2008). Development of a tubular microbial fuel cell (MFC) employing a membrane electrode assembly cathode. *Journal of Power Sources*, 187(2), 393–399. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.11.020>
- Karluvali, A., Köroğlu, E. O., Manav, N., Çetinkaya, A. Y., & Özkaya, B. (2015). Electricity generation from organic fraction of municipal solid wastes in tubular microbial fuel cell. *Separation and Purification Technology*, 156, 502–511. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.10.042>
- Janicek, A., Fan, Y., & Liu, H. (2013). Design of microbial fuel cells for practical application: a review and analysis of scale-up studies. *Biofuels*, 5(1), 79–92. <https://doi.org/10.4155/bfs.13.69>
- Nawaz, A., Haq, I. U., Qaisar, K., Gunes, B., Raja, S. I., Mohyuddin, K., & Amin, H. (2022). Microbial fuel cells: Insight into simultaneous wastewater treatment and bioelectricity generation. *Process Safety and Environmental Protection*, 161, 357–373. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.03.039>
- Feng, C., Sharma, S. C. D., & Yu, C. (2014). Microbial fuel cells for wastewater treatment. In: *Springer eBooks* (pp. 411–437). https://doi.org/10.1007/978-3-319-09287-4_18
- Apollon, W., Rusyn, I., Paucar, N. E., Hibbert, M., Kamaraj, S., & Sato, C. (2025). Energy Recovery from Organic Wastes Using Microbial Fuel Cells: Traditional and Nonconventional Organic Substrates. *Resources*, 14(3), 47. <https://doi.org/10.3390/resources14030047>
- ermana, R., Ihsan, Y. N., Riyantini, I., & Agung, M. U. K. (2020). Comparative study between Single-Chamber and Dual-Chamber microbial fuel cell on petroleum hydrocarbon degradation in contaminated sediment. *Applied Journal of Environmental Engineering Science*, 6(2). <https://doi.org/10.48422/imist.prsm/ajes-v6i2.20591>
- Vidhyeswari, D., Surendhar, A., & Bhuvaneshwari, S. (2022). General aspects and novel PEMs in microbial fuel cell technology: A review. *Chemosphere*, 309, 136454. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136454>

- Rinaldi, A., Mecheri, B., Garavaglia, V., Licoccia, S., Di Nardo, P., & Traversa, E. (2008). Engineering materials and biology to boost performance of microbial fuel cells: a critical review. *Energy & Environmental Science*, 1(4), 417. <https://doi.org/10.1039/b806498a>
- Khera, J., & Chandra, A. (2012). Microbial fuel cells: recent trends. *Proceedings of the National Academy of Sciences India Section a Physical Sciences*, 82(1), 31–41. <https://doi.org/10.1007/s40010-012-0003-2>
- Zhou, M., Chi, M., Luo, J., He, H., & Jin, T. (2011). An overview of electrode materials in microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 196(10), 4427–4435. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.01.012>
- Budihardjo, M. A., Syafrudin, N., Effendi, A. J., Hidayat, S., Purnawan, C., Lantasi, A. I. D., . . . Ramadan, B. S. (2020). Waste valorization using solid-phase microbial fuel cells (SMFCs): Recent trends and status. *Journal of Environmental Management*, 277, 111417. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111417>
- Premier, G., Michie, I., Boghani, H., Fradler, K., & Kim, J. (2016). Reactor design and scale-up. In: *Elsevier eBooks* (pp. 215–244). <https://doi.org/10.1016/b978-1-78242-375-1.00007-1>
- Luo, Y., Zhang, R., Liu, G., Li, J., Qin, B., Li, M., & Chen, S. (2010). Simultaneous degradation of refractory contaminants in both the anode and cathode chambers of the microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, 102(4), 3827–3832. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.11.121>
- Ringeisen, B. R., Ray, R., & Little, B. (2006). A miniature microbial fuel cell operating with an aerobic anode chamber. *Journal of Power Sources*, 165(2), 591–597. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.10.026>
- Thapa, B. S., Oh, S., Peera, S. G., & Singh, L. (2020). Fundamentals of bioelectroactive fuel cells. In: *Elsevier eBooks* (pp. 1–23). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821729-0.00001-4>
- Izah, S. C., Aigberua, A. O., & Srivastav, A. L. (2022). Microbial fuel cells. In: *Elsevier eBooks* (pp. 105–129). <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-90396-7.00014-6>
- Nawaz, A., Hafeez, A., Abbas, S. Z., Haq, I. U., Mukhtar, H., & Rafatullah, M. (2020). A state of the art review on electron transfer mechanisms, characteristics, applications and recent advancements in microbial fuel cells technology. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 13(4), 365–381. <https://doi.org/10.1080/17518253.2020.1854871>
- Kumar, P., & Mungray, A. K. (2016). Microbial fuel cell: optimizing pH of anolyte and catholyte by using taguchi method. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 36(1), 120–128. <https://doi.org/10.1002/ep.12459>
- Forrestal, C., Huang, Z., & Ren, Z. J. (2014). Percarbonate as a naturally buffering catholyte for microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 172, 429–432. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.014>

- Wei, J., Liang, P., & Huang, X. (2011). Recent progress in electrodes for microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 102(20), 9335–9344. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.07.019>
- Kalathil, S., Patil, S., & Pant, D. (2017). Microbial fuel cells: electrode materials. In: *Elsevier eBooks* (pp. 309–318). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409547-2.13459-6>
- Li, B., Zhou, J., Zhou, X., Wang, X., Li, B., Santoro, C., . . . Schuler, A. J. (2014). Surface modification of Microbial fuel cells anodes: Approaches to Practical design. *Electrochimica Acta*, 134, 116–126. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.04.136>
- Hindatu, Y., Annuar, M., & Gumel, A. (2017). Mini-review: Anode modification for improved performance of microbial fuel cell. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 236–248. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.138>
- Yuan, H., & He, Z. (2014). Graphene-modified electrodes for enhancing the performance of microbial fuel cells. *Nanoscale*, 7(16), 7022–7029. <https://doi.org/10.1039/c4nr05637j>
- Li, S., Cheng, C., & Thomas, A. (2016). Carbon-Based Microbial-Fuel-Cell electrodes: from conductive supports to active catalysts. *Advanced Materials*, 29(8), 1602547. <https://doi.org/10.1002/adma.201602547>
- Bhargavi, G., Venu, V., & Renganathan, S. (2018). Microbial fuel cells: recent developments in design and materials. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 330, 012034. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/330/1/012034>
- Baudler, A., Schmidt, I., Langner, M., Greiner, A., & Schröder, U. (2015). Does it have to be carbon? Metal anodes in microbial fuel cells and related bioelectrochemical systems. *Energy & Environmental Science*, 8(7), 2048–2055. <https://doi.org/10.1039/c5ee00866b>
- Yamashita, T., & Yokoyama, H. (2018). Molybdenum anode: a novel electrode for enhanced power generation in microbial fuel cells, identified via extensive screening of metal electrodes. *Biotechnology for Biofuels*, 11(1). <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1046-7>
- Abbas, A. A., Farrag, H. H., El-Sawy, E., & Allam, N. K. (2020). Microbial fuel cells with enhanced bacterial catalytic activity and stability using 3D nanoporous stainless steel anode. *Journal of Cleaner Production*, 285, 124816. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124816>
- Chen, Y., Wang, C., Yang, Y., & Chen, W. (2013). Application of aluminum-alloy mesh composite carbon cloth for the design of anode/cathode electrodes in *Escherichia coli* microbial fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(25), 11131–11137. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.010>
- Abbas, S. Z., Yong, Y., & Chang, F. (2021). Anode materials for soil microbial fuel cells: Recent advances and future perspectives. *International Journal of Energy Research*, 46(2), 712–725. <https://doi.org/10.1002/er.7288>

- Sukitha, P. M., & Kannan, V. R. (2025). Investigating the Integration of Electrodes with the Rhizosphere of *Oryza Sativa* through Wetland Plant Microbial Fuel Cell for Sustainable Bioenergy Production. *Desalination and Water Treatment*, 101027. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101027>
- [6] Çek, N. (2017). Examination of Zinc Electrode Performance in Microbial Fuel Cells. *Gazi University Journal of Science*, 30(4), 395-402.
- Munfarida, I., Munir, M., & Nilandita, W. (2023). A comparative study of two types of anode electrodes in a microbial fuel cell for producing bioelectricity from residential wastewater. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 1268(1), 012052. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1268/1/012052>
- Zhu, X., & Logan, B. E. (2013). Copper anode corrosion affects power generation in microbial fuel cells. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 89(3), 471–474. <https://doi.org/10.1002/jctb.4156>
- Michaelidou, U., Ter Heijne, A., Euverink, G. J. W., Hamelers, H. V. M., Stams, A. J. M., & Geelhoed, J. S. (2010). Microbial communities and electrochemical performance of Titanium-Based anodic electrodes in a microbial fuel cell. *Applied and Environmental Microbiology*, 77(3), 1069–1075. <https://doi.org/10.1128/aem.02912-09>
- Erensoy, A., & Çek, N. (2021). Investigation of Polymer Biofilm Formation on Titanium-Based Anode Surface in Microbial Fuel Cells with Poplar Substrate. *Polymers*, 13(11), 1833. <https://doi.org/10.3390/polym13111833>
- Dziegielowski, J., Di Lorenzo, M. (2022). Towards cost-effective soil microbial fuel cell designs”, *E3S Web of Conferences*, 334, 08007.
- Banerjee, A., Calay, R., & Mustafa, M. (2022). Review on material and design of anode for microbial fuel cell. *Energies*, 15(6), 2283. <https://doi.org/10.3390/en15062283>
- Yuan, H., Hou, Y., Abu-Reesh, I. M., Chen, J., & He, Z. (2016). Oxygen reduction reaction catalysts used in microbial fuel cells for energy-efficient wastewater treatment: a review. *Materials Horizons*, 3(5), 382–401. <https://doi.org/10.1039/c6mh00093b>
- Rusli, S. F. N., Bakar, M. H. A., Loh, K. S., & Mastar, M. S. (2018). Review of high-performance biocathode using stainless steel and carbon-based materials in Microbial Fuel Cell for electricity and water treatment. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(58), 30772–30787. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.11.145>
- Wu, D., Huang, L., Quan, X., & Puma, G. L. (2016). Electricity generation and bivalent copper reduction as a function of operation time and cathode electrode material in microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 307, 705–714. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.01.022>
- Luo, S., & He, Z. (2016). Ni-Coated carbon fiber as an alternative cathode electrode material to improve cost efficiency of microbial fuel cells. *Electrochimica Acta*, 222, 338–346. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.10.178>

- Zhang, X., Du, J., Qu, M., Wang, M., Lin, K., Jiang, X., . . . Xu, Y. (2025). Comparative assessment of coke and petroleum coke as potential electrode materials in constructed wetlands-microbial fuel cells. *Journal of Water Process Engineering*, 74, 107796. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107796>
- Thakur, S., Calay, R. K., Mustafa, M. Y., Eregno, F. E., & Patil, R. R. (2025). Importance of substrate type and its constituents on overall performance of microbial fuel cells. *Current Research in Biotechnology*, 100272. <https://doi.org/10.1016/j.crbiot.2025.100272>
- Sonawane, J. M., Mahadevan, R., Pandey, A., & Greener, J. (2022). Recent progress in microbial fuel cells using substrates from diverse sources. *Heliyon*, 8(12), e12353. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12353>
- Moradian, J. M., Fang, Z., & Yong, Y. (2021). Recent advances on biomass-fueled microbial fuel cell. *Bioresources and Bioprocessing*, 8(1), 14. <https://doi.org/10.1186/s40643-021-00365-7>
- Kaur, P., Saini, P., Kaur, S., & Shah, M. P. (2024). Recent Trends in Electricity Generation from Lignocellulosic Biomass-Fueled Microbial Fuel Cells. *Indian Journal of Microbiology*, 65(2), 555–572. <https://doi.org/10.1007/s12088-024-01414-3>
- Noor, N. N. M., Woo, H., Lee, I., Kim, J., & Kim, K. (2025). Valorization of coffee residues improve bioelectricity generation and benthic nutrient removal in sediment microbial fuel cells. *Biomass and Bioenergy*, 194, 107637. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107637>
- Zhi, W., Ge, Z., He, Z., & Zhang, H. (2014). Methods for understanding microbial community structures and functions in microbial fuel cells: A review. *Bioresour Technology*, 171, 461–468. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.08.096>
- Logan, B. E. (2009). Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells. *Nature Reviews Microbiology*, 7(5), 375–381. <https://doi.org/10.1038/nrmicro2113>
- Schaetzle, O., Barrière, F., & Baronian, K. (2008). Bacteria and yeasts as catalysts in microbial fuel cells: electron transfer from micro-organisms to electrodes for green electricity. *Energy & Environmental Science*, 1(6), 607. <https://doi.org/10.1039/b810642h>
- Kumar, R., Singh, L., Wahid, Z. A., & Din, M. F. M. (2015). Exoelectrogens in microbial fuel cells toward bioelectricity generation: a review. *International Journal of Energy Research*, 39(8), 1048–1067. <https://doi.org/10.1002/er.3305>
- Abdulwahhab, M. A., Najim, S. T., & Abdulwahhab, M. A. (2023). Microbial fuel cell review: thermodynamic and influencing factors, exoelectrogenic bacteria, anode and cathode configuration. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 98(7), 1559–1583. <https://doi.org/10.1002/jctb.7371>
- Almatouq, A., Babatunde, A. O., Khajah, M., Webster, G., & Alfodari, M. (2020). Microbial community structure of anode electrodes in microbial fuel cells and microbial electrolysis cells. *Journal of Water Process Engineering*, 34, 101140. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101140>

- Ramirez-Nava, J., Martínez-Castrejón, M., García-Mesino, R. L., López-Díaz, J. A., Talavera-Mendoza, O., Sarmiento-Villagrana, A., . . . Hernández-Flores, G. (2021). The implications of membranes used as separators in microbial fuel cells. *Membranes*, 11(10), 738. <https://doi.org/10.3390/membranes11100738>
- Shabani, M., Younesi, H., Pontié, M., Rahimpour, A., Rahimnejad, M., & Zinatizadeh, A. A. (2020). A critical review on recent proton exchange membranes applied in microbial fuel cells for renewable energy recovery. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121446. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121446>
- Borja-Maldonado, F., & Zavala, M. Á. L. (2022). Contribution of configurations, electrode and membrane materials, electron transfer mechanisms, and cost of components on the current and future development of microbial fuel cells. *Heliyon*, 8(7), e09849. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09849>
- Suransh, J., Tiwari, A. K., & Mungray, A. K. (2020). Modification of clayware ceramic membrane for enhancing the performance of microbial fuel cell. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 39(6). <https://doi.org/10.1002/ep.13427>
- Rathinavel, N., Samuel, J. O. E., Veleeswaran, A., Nallathambi, S., Ponnuchamy, K., Muthusamy, G., . . . Alagarsamy, A. (2025). Exploring the Key factors enhancing the Microbial Fuel Cell performance. *Process Safety and Environmental Protection*, 193, 385-402. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.10.090>
- Potrykus, S., León-Fernández, L. F., Nieznański, J., Karkosiński, D., & Fernandez-Morales, F. J. (2021). The influence of external load on the performance of microbial fuel cells. *Energies*, 14(3), 612. <https://doi.org/10.3390/en14030612>
- Bose, D., Santra, M., Sanka, R. V. S. P., & Krishnakumar, B. (2020). Bioremediation analysis of sediment-microbial fuel cells for energy recovery from microbial activity in soil. *International Journal of Energy Research*, 45(4), 6436-6445. <https://doi.org/10.1002/er.6163>
- Nguyen, H., Nguyen, D., & Taguchi, K. (2022). A compact, membrane-less, easy-to-use soil microbial fuel cell: Generating electricity from household rice washing wastewater. *Biochemical Engineering Journal*, 179, 108338. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2022.108338>
- Aftab, Q., Wang, X., Lu, J., Tariq, M., & Liu, Y. (2025). Advancing soil microbial fuel cells: Exploring bioelectrogenesis mechanisms for integration into environmental bioremediation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 214, 115495. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115495>
- Jiang, Y., Zhong, W., Han, C., & Deng, H. (2016). Characterization of electricity generated by soil in microbial fuel cells and the isolation of soil source exoelectrogenic bacteria. *Frontiers in Microbiology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01776>
- Simeon, I. M., Weig, A., & Freitag, R. (2022). Optimization of soil microbial fuel cell for sustainable bio-electricity production: combined effects of electrode material, electrode spacing, and substrate feeding frequency on power generation and microbial community diversity. *Biotechnology for Biofuels and Bioproductions*, 15(1). <https://doi.org/10.1186/s13068-022-02224-9>

- Dziegielowski, J., Metcalfe, B., & Di Lorenzo, M. (2021). Towards effective energy harvesting from stacks of soil microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 515, 230591. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230591>
- Yen, B., Jaliff, L., Gutierrez, L., Sahinidis, P., Bernstein, S., Madden, J., ... Hester, J. (2023). Soil-Powered Computing. *Proceedings of the ACM on Interactive Mobile Wearable and Ubiquitous Technologies*, 7(4), 1–40. <https://doi.org/10.1145/3631410>
- Yu, B., Feng, L., He, Y., Yang, L., & Xun, Y. (2020). Effects of anode materials on the performance and anode microbial community of soil microbial fuel cell. *Journal of Hazardous Materials*, 401, 123394. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123394>
- Abbas, S. Z., & Rafatullah, M. (2021). Recent advances in soil microbial fuel cells for soil contaminants remediation. *Chemosphere*, 272, 129691. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129691>
- Toczyłowska-Mamińska, R., Mamiński, M. Ł., & Kwasowski, W. (2025). Microbial fuel cell technology as a new strategy for sustainable management of Soil-Based ecosystems. *Energies*, 18(4), 970. <https://doi.org/10.3390/en18040970>
- Magotra, V. K., Kumar, S., Kang, T. W., Inamdar, A. I., Aqueel, A. T., Im, H., ... Jeon, H. C. (2020). Compost Soil Microbial Fuel Cell to Generate Power using Urea as Fuel. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61038-7>
- Wang, C., Liao, F., & Liu, K. (2013). Electrical analysis of compost solid phase microbial fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(25), 11124–11130. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.02.120>
- Garbini, G. L., Caracciolo, A. B., Rolando, L., Visca, A., Borello, D., Cosentini, C., ... Grenni, P. (2023). Effects of municipal waste compost on microbial biodiversity and energy production in terrestrial microbial fuel cells. *New Biotechnology*, 78, 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2023.10.009>
- Cui, H., Hou, S., Wang, X., Li, L., Dai, X., & Zhu, H. (2024). Microbial fuel cell-assisted composting yields higher performance on metals passivation, antibiotics degradation, and resistance genes removal. *Environmental Research*, 120421. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120421>
- Devi, P., Yadav, S., Pundeer, R., Gupta, S., Anand, H., Choubey, R. K., Kumar, V., Gaur, A., & Kumar, S. (2024). Study of derivatives of (E)-1-(3-aryl-1-phenyl-1H-pyrazol-4-yl)but-2-en-1-one for enhancing reduction efficiency of compost based microbial fuel cell. *Applied Physics A*, 131(1), 28. <https://doi.org/10.1007/s00339-024-08163-6>
- Orhan, A., & Çek, N. (2025). Turba Ortamında Titanyumun Korozyonunun Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi ile İncelenmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 37(1), 467-474. <https://doi.org/10.35234/fumbd.1607863>
- Orhan, A., & Çek, N. (2025). Turba Çözeltisinin Titanyumun Çukurlaşma Korozyonu Üzerindeki Rolünün Ortaya Çıkarılması. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 897-906. <https://doi.org/10.17780/ksujes.1627638>

- Orhan, A., & Çek, N. (2025). Asidik Toprak Örneğindeki Titanyumun Elektrokimyasal Tekniklerle Korozyon Özelliklerinin Araştırılması. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(26), 187-197. <https://doi.org/10.54365/adyumbd.1643873>
- Çek, N & Orhan A. (2025). Understanding the Corrosion Behaviour of Graphite in Peat Environment for Environmental and Sustainability Applications. *Journal of Polymer & Composites*, 13(Special Issue 1), S728-S737. <https://journals.stmjournals.com/jopc/article=2024/view=188605>
- Wetser, K., Liu, J., Buisman, C., & Strik, D. (2015). Plant microbial fuel cell applied in wetlands: Spatial, temporal and potential electricity generation of *Spartina anglica* salt marshes and *Phragmites australis* peat soils. *Biomass and Bioenergy*, 83, 543–550. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.11.006>
- Erensoy, A., Mulayim, S., Orhan, A., Çek, N., Tuna, A., & Ak, N. (2022). The system design of the peat-based microbial fuel cell as a new renewable energy source: The potential and limitations. *Alexandria Engineering Journal*, 61(11), 8743–8750. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.02.020>
- Li, C., Omine, K., Zhang, Z., Sivasankar, V., Sano, H., & Chicas, S. (2023). Development of peat microbial fuel cells (Peat MFCs) – the green and sustainable generators of electricity. *Energy Conversion and Management*, 279, 116771. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116771>
- Yang, X., & Chen, S. (2020). Microorganisms in sediment microbial fuel cells: Ecological niche, microbial response, and environmental function. *The Science of the Total Environment*, 756, 144145. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144145>
- Prakash, O., Pushkar, P., Mungray, A. K., Mungray, A., & Kailasa, S. K. (2018). Effect of geometrical position of a multi-anode system in power output and nutritional variation in benthic microbial fuel cells. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(1), 1558–1568. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.01.058>
- Lu, X., Li, X., Qi, H., Chen, C., & Jin, W. (2024). Enhanced pollution control using sediment microbial fuel cells for ecological remediation. *Bioresource Technology*, 418, 131970. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131970>
- Noor, N. N. M., Kim, K., & Kim, K. (2024). Utilization of tubular bamboo biochar anode with different lengths in sediment microbial fuel cells. *Fuel*, 381, 133371. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.133371>
- Tavakolian, M., Taleghani, H. G., & Khorshidian, M. (2020). New design of benthic microbial fuel cell for bioelectricity generation: Comparative study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(43), 23533–23542. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.181>
- Daud, N. N. M., Al-Zaqri, N., Yaakop, A. S., Ibrahim, M. N. M., & Guerrero-Barajas, C. (2024). Stimulating bioelectric generation and recovery of toxic metals through benthic microbial fuel cell driven by local sago (*Cycas revoluta*) waste. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(12), 18750–18764. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32372-4>

- Joiner, K. L., Tukeman, G. L., Obratsova, A. Y., & Arias-Thode, Y. M. (2020). Impact of sediment parameters in the prediction of benthic microbial fuel cell performance. *RSC Advances*, 10(44), 26220–26228. <https://doi.org/10.1039/d0ra03459b>
- Ballestas, E. R., Bortoluzzi, E. C., Minervino, A. H. H., Palma, H. H., Neckel, A., Ramos, C. G., & Moreno-Ríos, A. L. (2023). Power generation potential of plant microbial fuel cells as a renewable energy source. *Renewable Energy*, 221, 119799. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119799>
- Chen, B., Cai, W., & Garg, A. (2023). Relationship between bioelectricity and soil–water characteristics of biochar-aided plant microbial fuel cell. *Acta Geotechnica*, 18(7), 3529–3542. <https://doi.org/10.1007/s11440-022-01787-z>
- Li, L., Chen, B., Cai, W., & Garg, A. (2025). In-situ monitoring of soil water characteristics using plant microbial fuel cell: Implications on slope stability analyses. *Ecological Engineering*, 215, 107608. <https://doi.org/10.1016/j.ecoeng.2025.107608>
- Yoon, T. H., Song, H. J., Jung, W. Y., Kim, J. E., Kim, K. J., Kim, H. H., . . . Kim, H. J. (2018). Monitoring plant health using a plant microbial fuel cell. *Bulletin of the Korean Chemical Society*, 39(10), 1193–1197. <https://doi.org/10.1002/bkcs.11575>
- Martinez, R. D. R., & Bermudez, M. E. A. (2023). Production of electrical energy from living plants in microbial fuel cells. *Clean Energy*, 7(2), 408–416. <https://doi.org/10.1093/ce/zkac092>
- Sophia, A. C., & Sreeja, S. (2017). Green energy generation from plant microbial fuel cells (PMFC) using compost and a novel clay separator. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 21, 59–66. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2017.05.001>
- Rusyn, I., Mittal, Y., & Apollon, W. (2025). Plant microbial fuel cells: An innovative path toward integrated food and energy production for a sustainable future. *Journal of Power Sources*, 656, 238068. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.238068>
- Chong, P. L., Chuah, J. H., Chow, C., & Ng, P. K. (2024). Plant microbial fuel cells: A comprehensive review of influential factors, innovative configurations, diverse applications, persistent challenges, and promising prospects. *International Journal of Green Energy*, 1–50. <https://doi.org/10.1080/15435075.2024.2421325>
- Rahim, Z. A., Iqbal, M. S., & Bakar, N. A. (2025). Exploring innovations and trends in microbial fuel cells using TRIZ patent literature review. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*. <https://doi.org/10.1002/jctb.7895>
- Pandya, R. S., Kaur, T., Bhattacharya, R., Bose, D., & Saraf, D. (2023). Harnessing microorganisms for bioenergy with Microbial Fuel Cells: Powering the future. *Water-Energy Nexus*, 7, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.wen.2023.11.004>
- Ojha, R., Dash, J., Satpathy, S. S., Ojha, P. C., & Pradhan, D. (2025). A brief review on factors affecting the performance of microbial fuel cell and integration of artificial intelligence. *Discover Sustainability*, 6(1). <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01619-6>

- You, J., Rimbu, G. A., Wallis, L., Greenman, J., & Ieropoulos, I. (2019). Living architecture: toward energy generating buildings powered by microbial fuel cells. *Frontiers in Energy Research*, 7. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2019.00094>
- Armstrong, R. (2023). Towards the microbial home: An overview of developments in next-generation sustainable architecture. *Microbial Biotechnology*, 16(6), 1112–1130. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.14256>
- Çek, N., Tuna, A., Çelik, A., Orhan, A., & Sezer, S. (2025). Enhancing bioelectricity generation with Aloe vera-based plant microbial fuel cells: a performance and optimization study. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15, 22765–22776. <https://doi.org/10.1007/s13399-025-06820-1>
- Priya, A., Subha, C., Kumar, P. S., Suresh, R., Rajendran, S., Vasseghian, Y., & Soto-Moscoso, M. (2022). Advancements on sustainable microbial fuel cells and their future prospects: A review. *Environmental Research*, 210, 112930. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112930>
- Dwivedi, K. A., Huang, S., Wang, C., & Kumar, S. (2021). Fundamental understanding of microbial fuel cell technology: Recent development and challenges. *Chemosphere*, 288, 132446. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132446>
- Chakma, R., Hossain, M. K., Paramasivam, P., Bousbih, R., Amami, M., Toki, G. F. I., . . . Karmaker, A. K. (2025). Recent applications, challenges, and future Prospects of microbial fuel cells: A review. *Global Challenges*. <https://doi.org/10.1002/gch2.202500004>
- Sarma, R., Kakati, B.K. (2022). Modern Challenges and Future Perspective of Microbial Fuel Cells. In: Ahmad, A., Mohamad Ibrahim, M.N., Yaqoob, A.A., Mohd Setapar, S.H. (eds) *Microbial Fuel Cells for Environmental Remediation. Sustainable Materials and Technology*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2681-5_19
- Mahajan, P., & Panwar, P. (2022). Perspective and future scope of nanotechnology in modification of microbial fuel cell. *Materials Today Proceedings*, 71, 179–185. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.369>
- Ieropoulos, I. A., & Moreno, D. Z. (2025). Microbial fuel cells powering robots and beyond; historical perspective and future directions. *Bioelectrochemistry*, 166, 109010. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2025.109010>

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından ARDEB 1005 – Ulusal Yeni Fikirler ve Ürünler Araştırma Destek Programı kapsamında desteklenen, 125Y062 numaralı ve “Bitki Mikrobiyal Yakıt Hücreleri ile Kendi Enerjisini Üreten İç Mekân Peyzajları Sistem ve Mekân Tasarımı” başlıklı proje kapsamında yapılmıştır.

Mikrobiyal yakıt hücreleri (MFC), organik maddeleri mikroorganizmalar aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürme kapasitesi sayesinde sürdürülebilir enerji alanında çığır açan bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Bu kitap, mikrobiyal yakıt hücrelerinin temel prensiplerinden reaktör tasarımlarına, elektrot malzemelerinden toprak, turba ve bitki tabanlı sistemlere kadar geniş bir perspektif sunarken, özellikle bitki mikrobiyal yakıt hücresi (P-MFC) temelli iç mekân enerji üretim sistemlerine yönelik ilk uygulamalardan örnekler de içermektedir. Çalışma, temel bilimler, mühendislik, mimarlık ve peyzaj mimarlığı teknoloji disiplinlerini buluşturan bütüncül bir yaklaşımla MFC teknoloji-sinin bilimsel altyapısını ve uygulama potansiyelini kapsamlı biçimde ele alma...