

## Sürdürülebilir Biyoenerji Üretimi İçin Mikroalg Tabanlı Mikrobiyal Yakıt Hücreleri

Ahmet SAATÇI<sup>1\*</sup>, Banu TAŞKAN<sup>2</sup>, Ergin TAŞKAN<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Çevre Sağlığı Programı, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Bingöl Üniversitesi, Bingöl, Türkiye  
<sup>2,3</sup> Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye  
<sup>1</sup> asaatci@bingol.edu.tr, <sup>2</sup> btaskan@firat.edu.tr, <sup>3</sup> etaskan@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 05/11/2021;

Kabul/Accepted: 03/02/2022)

**Öz:** Nüfus artışı ve endüstriyel gelişme nedeniyle küresel enerji ihtiyacı ve enerji tüketimi endişe verici bir oranda artmaktadır. Artan enerji talebini karşılamak için alternatif yenilenebilir enerji kaynaklarına ihtiyaç vardır. Mikrobiyal yakıt hücreleri (MYH'ler) atıklardan doğrudan elektrik üretebilmesi ve eş zamanlı olarak atıkların arıtımını gerçekleştirebilmesinden dolayı yenilenebilir enerji üretimi açısından son yıllarda oldukça dikkat çekmektedir. Diğer taraftan mikroalgler, bünyelerinde enerji değeri yüksek bileşikler depolaması ve fotosentez yoluyla CO<sub>2</sub>'yi uzaklaştırarak oksijen üretmesi nedeniyle yenilenebilir enerji üretimi alanında ve çevresel uygulamalarda ön plana çıkmıştır. Son yıllarda mikroalglerin MYH sistemlerinde kullanılması ile mikroalglerin MYH'nin verimliliğini artırabildiği ve biyoelektrik üretimi için uygun maliyetli ve sürdürülebilir bir yaklaşım sağlayabildiği anlaşılmıştır. Mikroalg tabanlı MYH'ler (MT-MYH) diğer MYH sistemlerine kıyasla daha fazla sürdürülebilir olmasına rağmen, şu an literatürdeki veriler yetersizdir. Bu sistemlerin verimliliğini artırmak ve büyük ölçekli uygulamaların yaygınlaşabilmesi için bu sistemler üzerine yapılan araştırmaların artırılması gerekmektedir. Bu çalışmada sürdürülebilir bir biyoenerji üretimi için mikroalg tabanlı MYH'ler detaylı bir şekilde analiz edilerek ele alınmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Mikrobiyal Yakıt Hücresi, Mikroalg, Biyoelektrik, Enerji Üretimi.

### Microalgae-based Microbial Fuel Cells For Sustainable Bioenergy Production

**Abstract:** The global energy requirement and energy consumption have been increasing at an alarming rate because of the population increase and industrial development. Alternative renewable energy sources are needed to provide increased energy demand. The microbial fuel cells (MFCs) have attracted much attention in recent years in terms of renewable energy production because of the MFCs can directly electricity generation from the wastes and simultaneous wastewater treatment. On the other hand, microalgae have come to the forefront of renewable energy production and environmental applications because they can store the high energy-value compounds and produce oxygen by removing CO<sub>2</sub> through photosynthesis. In recent years, it has been discovered that the use of microalgae in MFC systems can increase the efficiency of MFC and provide a cost-effective and sustainable approach to bioelectric generation. Although microalgae-based MFCs are more sustainable than other MFC systems, the data in the literature are insufficient at the moment. In order to increase the efficiency of these systems and to spread large-scale applications, the research on these systems should be increased. In this study, microalgae-based MFCs were analyzed and discussed in detail for sustainable bioenergy production.

**Key words:** Microbial Fuel Cell, Microalgae, Bioelectricity, Energy Production.

### 1. Giriş

Günümüzde artan küresel enerji ihtiyacının %87'si fosil yakıtlar ile karşılanmakta ve bu yakıtların kullanımları sırasında karbondioksit (CO<sub>2</sub>) salınımı meydana gelmektedir. Bu durum, küresel ısınma gibi ciddi çevresel problemlere neden olmaktadır [1]. Fosil yakıt tüketimine bağlı CO<sub>2</sub> emisyonlarının sadece on yıl içinde (2009-2019) 388.5 ppm'den 409.95 ppm'e ulaştığı rapor edilmiştir [2]. Atmosferdeki CO<sub>2</sub> değeri her geçen gün artmakla birlikte 2021 yılı ağustos ayında bu değer 414.47 ppm'e ulaştığı rapor edilmiştir [3]. CO<sub>2</sub> emisyonlarını azaltmak için alternatif temiz enerji kaynakları geliştirmek son derece önemlidir. Günümüzde rüzgar, güneş ve biyoenerji gibi temiz ve yenilenebilir enerji kaynakları karbon nötr ve sürdürülebilir teknolojilerdir. Ancak bu teknolojilerin kurulum ve işletme maliyetlerinin yüksek olması halen önemli bir dezavantajdır [4]. Atıksu arıtımı ve eş zamanlı elektrik üretimi sağlamanın yanı sıra herhangi bir CO<sub>2</sub> emisyonuna neden olmaması, mikrobiyal yakıt hücresi (MYH) teknolojisini diğer alternatif sürdürülebilir enerji üretim sistemleri karşısında ön plana çıkarmaktadır [5].

\* Sorumlu yazar: [asaatci@bingol.edu.tr](mailto:asaatci@bingol.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-4283-2230, <sup>2</sup> 0000-0001-7751-1165, <sup>3</sup> 0000-0002-9496-3697

MYH'ler organik veya inorganik maddeleri mikroorganizmaların metabolik aktivitesi yoluyla elektrik enerjisine dönüştüren biyoelektrokimyasal reaktörlerdir [6]. 20. yüzyılın başlarında Potter tarafından *Escherichia coli* bakterisinin kullanımı ile elektrik üretimi için ilk olarak mikroorganizmaların kullanımı kavramı ortaya çıkmış ve yaklaşık 0.2 mA'lık küçük bir elektrik akımı üretilebilmiştir [7]. MYH'lerde bakteriler organik maddelerin ayrıştırılması ve elektron üretimi amacıyla yaygın bir şekilde kullanılmasına karşın şu ana kadar kullanılmış bakteri türlerinin birçoğu yüksek verimde bir elektrik akımı üretememiştir. Son yıllarda ise MYH sistemlerinde mikroalglerin kullanımı oldukça yaygın hale gelmiştir [8]. Mikroalg tabanlı MYH'ler (MT-MYH), fotosentez yaparak biyoyakıt üretebilen ve eş zamanlı olarak CO<sub>2</sub> giderimi yapabilen fosil yakıtlara kıyasla oldukça verimli, temiz ve yenilenebilir bir enerji üretim teknolojisidir [9,10]. Bu sistemlerde enerji üretimi, biyokütle tarafından güneş enerjisinin kimyasal enerjiye dönüştürülmesine bağlıdır. Mikroalgler, %9'a kadar enerji dönüşüm verimliliği sağlayabilen, fotosentetik organizmalar arasında en yüksek enerji dönüşüm verimliliğine sahip organizmalardır [11]. Bu nedenle, atıksu arıtımı ve enerji üretimi için doğrudan mikroalg biyokütlesi veya canlı mikroalglerin kullanılması daha yüksek enerji dönüşümü sağlaması açısından daha yüksek güç çıkışı için umut verici bir yaklaşım olabilir. Alg tabanlı biyoelektrokimyasal sistemler, MYH'ler, mikrobiyal karbon yakalama hücreleri (MKYH), MT-MYH'ler veya sediment tipi MYH'ler (SMYH) olarak çeşitli temel konfigürasyonlarda kullanılmaktadır [5].

Mikroalgler MYH'lerde anot veya katot bölmelerinde farklı amaçlar için rahat bir şekilde kullanılabilir. Mikroalglerin yüksek besin içeriğinden (protein, lipid ve karbonhidrat) dolayı MYH'lerin anot bölgesinde elektroaktif mikroorganizmalar için besin maddesi olarak kullanılarak yüksek elektrik üretimi sağlanabilmektedir. Bunun yanında mikroalgler MYH'nin katot bölgesinde oksijen üretici olarak kullanılarak katot için harici havalandırma ihtiyacını karşılayabilmektedir. Diğer taraftan yapılan son literatür çalışmalarında mikroalg hücrelerinin anot bölgesinde elektrik üreticisi (elektroaktif mikroorganizma) olarak kullanıldığı çalışmalar mevcuttur [2]. Özetle mikroalglerin MYH sisteminde kullanımını, klasik MYH çalışmalarına kıyasla birçok avantaj sağlamakta ve sürdürülebilir elektrik üretimi açısından gelecek vadetmektedir.

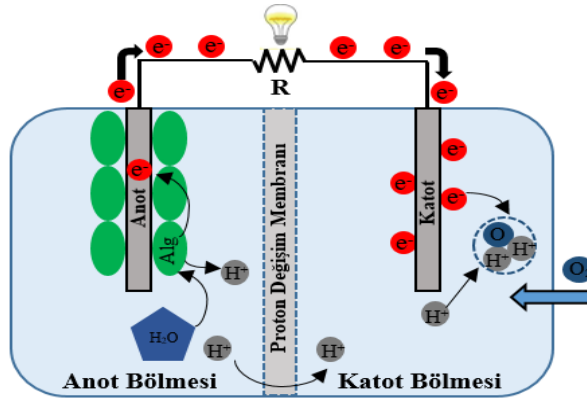
Bu derleme çalışmasında, mikroalglerin çeşitli MYH sistemlerinde kullanımını tartışılmıştır. Ayrıca, MT-MYH'lerin performansı ve uygulamaları hakkında detaylı bir analiz yapılmıştır.

## 2. Alglerin Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinde Kullanımı

### 2.1. Elektron Üretici Olarak Kullanımı

Geleneksel MYH'lerde kullanılan mikroorganizmaların hücre yüzeyleri iletken değildir ve metabolik parçalanma sonucu oluşan elektronlar doğrudan anot sıvısına taşınmaz. Bu nedenle hücreler ve elektrotlar arasında arabulucu olarak nötr kırmızısı (NR), metilen mavisi (MB), tiyonik ve fenolik bileşikler gibi çeşitli toksik özelliği olabilen ve kararsız elektrokimyasallar kullanılmaktadır. Kullanılan fenolik araçlar pahalıdır ve uzun süreli işletmelerde mikroorganizmalar için toksik özellik gösterebilir [12].

Elektron üretme yeteneği olan mikroalgler, ortamda herhangi bir yapay redoks medyatörü, elektrokatalitik bir elektrot veya elektroaktif bir bakteri bulunmadan anot bölgesinde ototrofik şartlar altında biyoelektrik üretebilirler. Anot yüzeyine tutunmuş mikroalgler ürettikleri elektronları medyatör aracılığıyla taşınmak yerine yapısında bulunan ve pili adı verilen iletken nano teller vasıtasıyla doğrudan elektrota iletebilirler (Şekil 1).



Şekil 1. Mikroalglerin elektron üretici olarak kullanımı

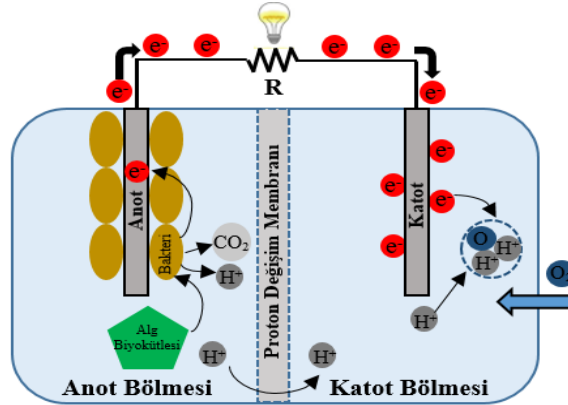
Mikroalgler MT-MYH'lerin anot bölgesinde başarılı bir şekilde elektron üreticisi olarak kullanılmıştır. Literatürde bazı mikroalglerin elektrik üretimi amacıyla MYH sisteminde biyokatalizör olarak kullanıldığı çalışmalar Tablo 1'de özetlenmiştir. MYH sisteminde güç üretimi karanlıkta solunum reaksiyonunun ve ışıktaki fotosentetik reaksiyonun akım üretebileceği anodik biyofilm ile oluşturulabilir. Anot bölgesinde mikroalgler tarafından oksijen üretilmesi, oksijenin güçlü bir elektron alıcısı olması nedeniyle elektron akışını önemli ölçüde azaltarak MT-MYH için sınırlayıcı bir etken olur. Oksijen MYH'nin anot bölgesi için sınırlayıcı olduğundan mikroalgal anotun verimi, aydınlık fazda üretilen oksijenin karanlık fazda (fotosentezin olmadığı durumda) mikroalgler veya diğer bakteriler tarafından besin maddesinin oksidasyonunda kullanılmasına bağlıdır. [13].

**Tablo 1.** Mikroalglerin anot bölgesinde elektron üreticisi olarak kullanıldığı çalışmalar

Mikroalg türü	MYH konfigürasyonu	Güç yoğunluğu (mW/m <sup>2</sup> )	Ref
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	Tek bölmeli	6.03	[14]
<i>Spirulina platensis</i>	Tek bölmeli	1.64 (aydınlık) ve 0.132 (karanlık)	[15]
<i>Spirulina platensis</i>	Tek bölmeli	10	[16]
<i>Spirulina platensis</i>	Tek bölmeli	6.5	[17]
<i>Chlorella vulgaris</i>	Tek bölmeli	40.81	[18]
<i>Chlorella sorokiniana</i>	Tek bölmeli	83.4 ± 2.1	[19]
<i>Chlorella vulgaris</i>	Tek bölmeli	0.45	[20]
<i>Clorophytom plants</i>	Çift bölmeli	10	[21]

## 2.2. Besin Maddesi Olarak Kullanımı

Mikroalg biyokütlesi, düşük maliyeti ve yüksek besin içeriğinden dolayı MYH'lerin anot bölgesinde besin kaynağı olarak kullanım için oldukça uygundur. Mikroalg biyokütlesi temel olarak protein, karbonhidrat ve lipitlerden oluşmaktadır [22]. Bu bileşenler, MYH'lerde yüksek elektron üretimi sağlayabilen yüksek enerjili bileşiklerdir. MYH sisteminde anot biyofilminde bulunan bakteriler, mikroalg biyokütlesini parçalayıp elektron ve protonları üreterek sürdürülebilir bir elektrik üretimi sağlayabilmektedir (Şekil 2).



**Şekil 2.** Mikroalg biyokütlesinin MYH'de besin maddesi olarak kullanımının şematik gösterimi

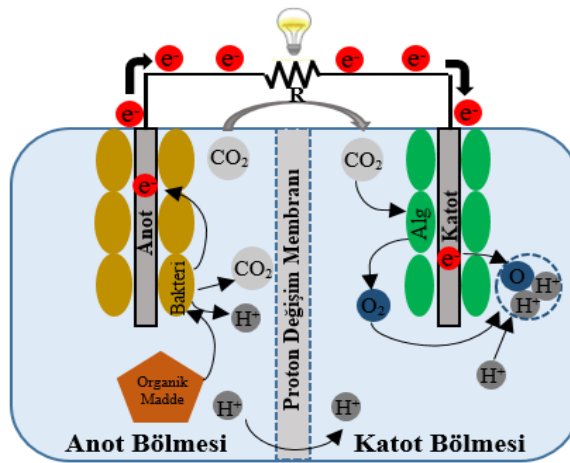
Mikroalg biyokütlesinin kompleks yapıdaki hücre duvarı ve lipid içeriği, anot biyofilminde bulunan elektroaktif türler için besin maddesi olarak kullanımını zorlaştırmaktadır. Bu dezavantaj, mikroalg biyokütlesine uygulanabilecek ön işlemler ile giderilebilir. Literatürde sonikasyon (ses dalgaları) [23], ısı işlem [24] veya mikrodalga [25] gibi çeşitli teknikler kullanılarak MYH sisteminde kullanılmadan önce mikroalg biyokütlesinin biyolojik olarak ayrıştırılabilirliği artırılmaya çalışılmıştır. Yapılan çalışmalar, uygulanan ön işlemin biyokütle içeriğine bağlı olarak etkilerinin değiştiğini ve bazı durumlarda mikroalg biyokütlesinin herhangi bir ön işlem uygulanmadan da besin maddesi olarak kullanılabilirliğini göstermiştir [23-25]. Literatürden elde edilen veriler, mikroalg biyokütlesinin MYH için iyi bir besin maddesi olduğunu ve diğer organik besin maddeleriyle kıyaslanabilir bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

**Tablo 2.** MYH’lerde anot bölgesinde besin maddesi olarak kullanılan çeşitli mikroalg biyokütellerinin enerji üretim potansiyelleri

Mikroalg türü	Ön işlem metodu	Güç üretimi ve biyokütle konsantrasyonu	Ref.
<i>Chlorella vulgaris</i> ve <i>Ulva lactuca</i>	Yok	<i>Chlorella vulgaris</i> ile 2.5 kWh/kg <i>Ulva lactuca</i> ile 2 kWh/kg	[22]
	<i>Ulva lactuca</i> -tambur kurutma (%93 toplam su kaybı)	0.98 W/m <sup>2</sup>	
	<i>Chlorella vulgaris</i> -sprey kurutma		
Aktif çamur ve <i>Scenedesmus obliquus</i>	Yok	5 g/L biyokütlede 1.78 W/m <sup>2</sup> , 2 g/L biyokütlede 0.85 W/m <sup>2</sup> ve 1 g/L biyokütlede 0.56 W/m <sup>2</sup>	[23]
	Mikroalg biyokütlesine sonikasyon	0.604 V	
<i>Scenedesmus obliquus</i>	Asit-termal ön işlem	102 mW/m <sup>2</sup>	[24]
	Yok	86 mW/m <sup>2</sup>	
<i>Laminaria saccharina</i>	Otoklav	218 mW/m <sup>2</sup>	[25]
	Mikroalga	118 mW/m <sup>2</sup>	
<i>Synechococcus leopoliensis</i>	Ön çürütmeli kaskad sistem	42 W/m <sup>3</sup>	[26]
Lipid tabakası ekstrakte edilmiş mikroalgler	Modifiye Bligh ve Dyer ekstraksiyon yöntemi ile lipid ekstraksiyonu	67.07 mW/m <sup>2</sup>	[27]
<i>Chlorella vulgaris</i>	Yok	15 mW/m <sup>2</sup>	[28]
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	Yok	5.3 mW/m <sup>2</sup>	

### 2.3. Oksijen Üreticisi Olarak Kullanımı

Mikroalg hücrelerinin MYH sisteminde ana kullanım alanlarından biri de katot bölgesinde oksijen üreticisi olarak kullanımınıdır. MYH’lerde elektrik üretiminin sürekliliğini sağlamak için katot bölgesinde yeterli çözünmüş oksijen seviyesi sağlanmalıdır. Bu amaçla kullanılan en yaygın metot, katot bölgesinin harici bir hava kaynağı kullanılarak mekanik olarak havalandırılmasıdır. Katot bölgesinde yeterli çözünmüş oksijen seviyesini sağlamak için uygulanan mekanik havalandırma toplam işletme maliyetinin yaklaşık %50’sini oluşturmaktadır [29]. Katot bölgesinde fototrofik mikroorganizmalar kullanarak oksijen üretmek bu mevcut dezavantajın üstesinden gelebilmek için oldukça avantajlı bir yöntemdir. Mikroalgler fotosentez yolu ile katotta gerekli oksijeni üretirken, karbon kaynağı olarak CO<sub>2</sub>’i kullanır (Şekil 3). Bu açıdan bakıldığında, MYH’lerin katot bölgesinde fototrofik mikroorganizmaların kullanımı ciddi avantajlara sahiptir.

**Şekil 3.** MYH’de mikroalglerin oksijen üreticisi olarak kullanımının şematik gösterimi

MYH'nin pratik uygulamasını sınırlandıran faktörlerden biri de etkili ve sürdürülebilir katot reaksiyon katalizörlerinin bulunamamasıdır. Mikroalgelere dayalı biyo-katotların kullanımı, katot bölgesi için daha ekonomik doğal bir alternatiftir [30,31]. Literatürde MYH'lerin katot bölgesinde oksijen üreticisi olarak farklı mikroalg türlerin kullanıldığı çeşitli çalışmalar Tablo 3'te özetlenmiştir.

**Tablo 3.** MYH katodunda oksijen üreticisi olarak farklı mikroalg türleri ile yapılan çalışmalar

Katot	Anot	Tür	Güç yoğunluğu	Ref
Karbon keçe	Karbon fiber kumaş	<i>Chlorella vulgaris</i>	3720 mW/m <sup>3</sup>	[32]
Karbon fiber kumaş	Platin (pt) kaplı karbon kumaş	<i>Scenedesmus obliquus</i>	30 mW/m <sup>2</sup>	[33]
Karbon fiber kumaş	Pt katalizörlü karbon keçe	<i>Chlorella vulgaris</i>	187 mW/m <sup>2</sup>	[34]
Siyah akrilik	Karbon fiber kumaş	<i>Synechococcus leopoliensis</i>	42.500 mW/m <sup>3</sup>	[26]
Karbon kumaş	Karbon kumaş	<i>Chlorella vulgaris</i>	13.5 mW/m <sup>2</sup>	[35]
Grafit keçe	Karbon fiber kumaş	<i>Chlorella vulgaris</i>	2572.8 mW/m <sup>2</sup>	[36]
Grafit keçe	Grafit keçe	<i>Laminaria saccharina</i>	250 mW/m <sup>2</sup>	[25]
Karbon kağıdı	Karbon kağıdı	<i>Scenedesmus obliquus</i>	102 mW/m <sup>2</sup>	[24]
Karbon bezler	Karbon bezler	Lagün alg kültürü	11.5 mW/m <sup>2</sup>	[37]
Karbon keçe	Karbon keçe	<i>Chlorella vulgaris</i>	24.4 mW/m <sup>2</sup>	[38]
Grafit karbon	Grafit karbon	<i>Chlorella vulgaris</i>	3.35 mW/m <sup>2</sup>	[39]
Karbon keçe	Karbon fiber kumaş	<i>Chlorella vulgaris</i>	2485.35 mW/m <sup>3</sup>	[40]
Karbon fiber fırçalar	Karbon kumaş	<i>Chlorella vulgaris</i>	5600 mW/m <sup>3</sup>	[41]
Grafit çubuk	Grafit çubuk	<i>Chlorella vulgaris</i>	0.95 mW/m <sup>2</sup>	[30]
Grafit fiber fırça	Pt katalizörlü hava katodu	<i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Ulva lactuca</i>	980 mW/m <sup>2</sup> ve 760 mW/m <sup>2</sup>	[22]

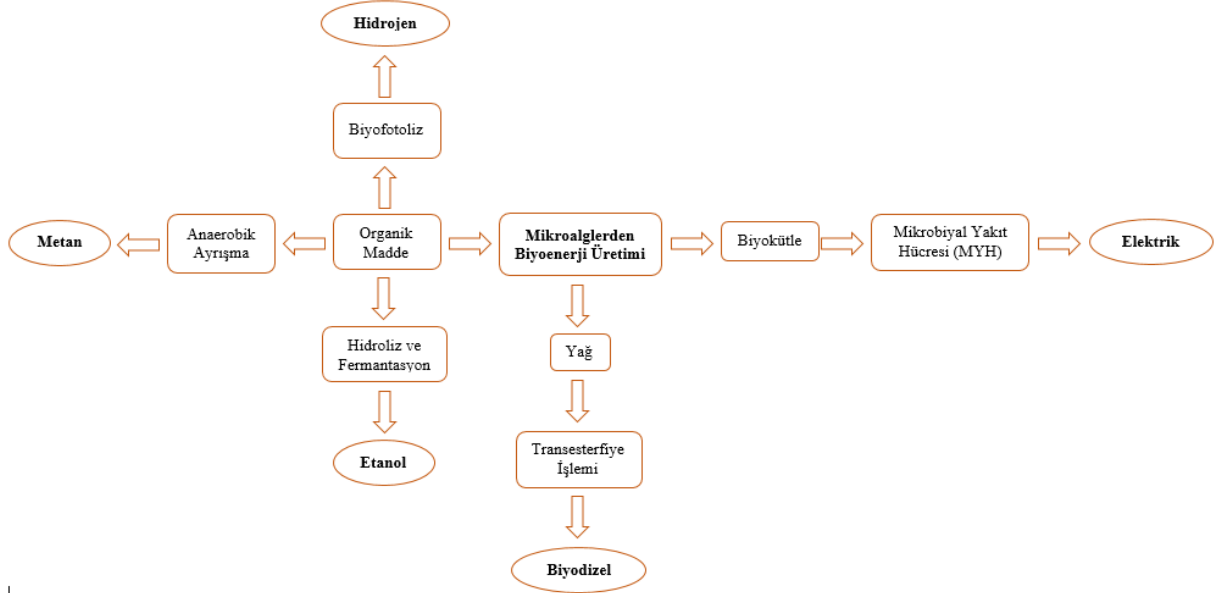
Yapılan çalışmalarda, katot bölgesinde *Chlorella vulgaris* kullanılan MYH, abiyotik katoda kıyasla 2.8 kat daha yüksek güç üretmiştir [38]. *Chlorella vulgaris*'in yanı sıra, *Scenedesmus obliquus*'un da MYH katot bölgesinde biyoelektrik üretmek için kullanılabilen bir mikroalg olduğu bulunmuştur. *Scenedesmus obliquus*'un katotta kullanılması, geleneksel MYH'ye kıyasla %32 daha yüksek güç üretmiştir [33]. Buna karşın, CO<sub>2</sub> konsantrasyonu yükseldikçe *Scenedesmus obliquus* büyüme oranının arttığı, ancak daha yüksek konsantrasyonlarda önemli düzeyde düştüğü gözlenmiştir. [42]. Mikroalg tabanlı MYH'lerde elektrik üretim miktarını etkileyen bir diğer etken ise mikroalg konsantrasyonudur. Yapılan çalışmalarda mikroalg tabanlı MYH'lerde CO<sub>2</sub>'nin uzaklaştırılması için farklı mikroalg konsantrasyonları analiz edilmiş ve mikroalg yoğunluğunun artmasının elektrik üretimini artırdığı tespit edilmiştir [41]. Literatürde yapılan çalışmalar, mikroalglerin etkili oksijen üreticiler olarak MYH'lerin performansını artırmak için verimli, uygun maliyetli bir yaklaşım olmakla birlikte katodik reaksiyonu hızlandırabileceğini göstermiştir [43].

### 3. Mikroalg Tabanlı Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinin Sınırlamaları

Mikroalglerin MYH'lerde kullanımı çevre dostu ve sürdürülebilir bir yaklaşım olmasına rağmen kullanımı sınırlandıran etkenler bulunmaktadır. MT-MYH şu ana kadar laboratuvar ölçekli olarak uygulanmış bir teknolojidir ve bu teknolojinin büyük ölçekli kullanımını proton değişim membranı (PDM) maliyeti, anot ve katot elektrotlarının maliyeti, katot katalizörlerinin ve anot bölgesinde kullanılan medyatörlerin maliyeti sınırlandırmaktadır [44,45]. MYH'lerin yatırım maliyetinin büyük kısmı, PDM (%38) ve elektrot ve katalizör (%47) kaynaklı olup [46] işletme maliyetlerinin yaklaşık %50'si mekanik havalandırma ihtiyacından oluşmaktadır [29]. Mikroalglerin MYH'lerin katot bölgesinde kullanılmasıyla mikroalgler tarafından üretilen oksijen, mekanik havalandırma ihtiyacını azaltmaktadır. Bunun yanı sıra mikroalglerin kullanımıyla oluşturulan biyo-katotlar, pahalı katot malzemelerine ekonomik bir alternatif olarak görülmekte fakat düşük güç üretimi kullanımı sınırlandırmaktadır[30]. Ototrofik mikroalglerin yavaş büyüme hızı da kullanımı sınırlandıran bir diğer etkidir. MT-MYH sistemlerinin pratik olarak uygulanabilmesi için hem mikroalg biyokatotların hem de MYH proseslerinin önündeki sınırlamaların kaldırılması gerekir [8].

### 4. Mikroalg Tabanlı Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinin Uygulamaları

Klasik MYH biyokimyasal enerjiyi, MT-MYH ise ışık enerjisini metabolik reaksiyon ve fotosentez yoluyla elektriğe dönüştürmek için canlı mikroorganizmaları kullanan gelişmiş yenilenebilir enerji üretim teknolojileridir. Mikroalgleri MYH'ye dâhil eden MT-MYH sistemi ise; elektrik üretimi, atık su arıtımı, CO<sub>2</sub> giderimi ve biyokütle üretiminin tek bir sistemde birleştirildiği sürdürülebilir bir teknolojidir. Mikroalgal biyokütle, biyodizel, biyoetanol, biyohidrojen, metan ve biyoelektrik üretmek için uygun bir biyomateryaldir (Şekil 4).



Şekil 4. Mikroalg biyokütlesi kullanılarak enerji üretim şeması [31]

#### 4.1. Biyoelektrik Üretimi

Elektrik üretimi, MYH'lerin öngörülen ana uygulama alanıdır. Mikroorganizmaların yardımıyla MYH'ler organik bileşiklerde depolanan kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürme potansiyeline sahiptir. MYH'ler biyoelektrik üretim kapasitesi için bir asırdan fazla bir süredir araştırılmaktadır [47]. Laboratuvar ölçekli biyoreaktörlerde önceden hazırlanmış veya doğal kaynaklardan elde edilen mikroalg biyokütlesi, MT-MYH'lerde kullanılabilir. Wang ve ark., mikroalg tabanlı katot kullanmış bir MYH'de 21 mW/m<sup>2</sup> maksimum güç üretimi elde etmiş ve katotun modifikasyonu (karbon nanotüp kaplaması) ile güç çıkışını 38 mW/m<sup>2</sup>'ye yükseltmiştir [48]. Xu S. ve ark., *C. Pyrenoidosa*'yı, hava katotlu MYH anotunda kullanmış ve klasik MYH'den elde edilenden (0.03 W/m<sup>2</sup>) 200 kat daha fazla (6.03 W/m<sup>2</sup>) güç çıkışı elde etmişlerdir [14]. Farklı mikroalgler kullanılarak yapılan çalışmalarda, MT-MYH sistemi ile üretilen maksimum güç yoğunluklarının 10 mW/m<sup>2</sup> ile 1780 mW/m<sup>2</sup> arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmalar, ışık yoğunluğu ve süresi [39], sıcaklık [49], CO<sub>2</sub> kaynağı [35] gibi çeşitli faktörlerin MYH'nin güç üretimini ciddi şekilde etkileyen parametreler olduğunu göstermiştir. MT-MYH'lerde üretilen maksimum güç üretimi, kullanılan alg türlerine, büyüme koşullarına ve kullanılan besin maddesine göre değişmekte olup yapılan araştırmalar mikroalg kullanımı ile MT-MYH'nin yüksek güç üretim değerlerine ulaşabileceğini kanıtlamıştır.

#### 4.2. Biyoyakıt Üretimi

MYH'lerin hem katot hem de anot bölmelerinde mikroalgler kullanılarak farklı biyoyakıt türlerinin üretimi sağlanmıştır [2]. De Schampelaire ve Verstraete [50] tarafından yapılan bir çalışmada klasik bir MYH sisteminin anot bölmesinde üretilen CO<sub>2</sub> bir fotobiyoreaktör sistemine verilerek mikroalg kültürlenmesinde kullanılmıştır. Bu fotobiyoreaktör sisteminde üretilen mikroalg biyokütlesi, biyogaz üretimi amacıyla bir anaerobik fermentör sisteminde besin kaynağı olarak kullanılmıştır. Ayrıca anaerobik fermantasyon atık suları, MYH'nin anot bölmesinde organik besin kaynağı olarak kullanılmıştır. Bu sistem ile 2-2.5 ton/ha.y mikroalg biyokütlesi ve 500 N.m<sup>3</sup>/g biyogaz üretimi elde edilmiştir.

Başka bir çalışmada biyodizel, bioetanol ve biyoelektrik üretimi tek bir sistemde entegre edilmiştir [51]. Bunun için *Chlorella vulgaris* içeren fotobiyoreaktörler ve bir MYH reaktörü, mevcut bir bioetanol üretim sistemi ile birleştirilmiştir. Fermantasyon işlemi sonucunda açığa çıkan CO<sub>2</sub>'in katotta *Chlorella vulgaris* hücreleri tarafından kullanılması sağlanmıştır. Aynı zamanda MYH'nin katot bölmesinde üretilen mikroalg biyokütlesi, elektrik üretiminin fermentasyon basamağı için anotta hammadde olarak kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, *Chlorella vulgaris*'in yüksek düzeyde yağ içerdiği rapor edilmiştir. Literatürde birçok mikroalg türü biyoyakıt üretimi için kullanılmıştır. Sonuçlar düşük lipit içeriği ve yüksek karbonhidrat içeriğine sahip mikroalg biyokütlelerin dahi piroliz gibi ön işlemlerden geçirildikten sonra bioetanol gibi farklı biyoyakıtların üretimi için kullanılabilir olduğunu göstermiştir [52].

### 4.3. Atıkların Arıtımında Alginin Kullanımı

MT-MYH'lerin potansiyel uygulamalarından atık iyileştirme üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Esas olarak biyolojik oksidasyon sonucunda açığa çıkan gazların MT-MYH'ye verilmesiyle mikroalgler tarafından eşzamanlı atık su arıtımı ve CO<sub>2</sub> giderimi yapılabilmektedir. Arıtma çamuru [53], evsel atık su [54], gıda atıkları [55], bira fabrikası atıkları [56], farmasötik atık su [57] gibi atıklar MYH'ler için besin kaynağı olarak kullanılabilir. Ayrıca, literatürde yapılmış çalışmalarda araştırmacılar farklı MYH konfigürasyonları tasarlamıştır. Örneğin, Jiang ve ark. [58] atık suyu iyileştirmek ve biyoelektrik üretmek için membransız bir MYH ile entegre bir fotobiyoreaktör sistemi tasarlamıştır. Bu tasarım, KOİ, fosfor (P) ve azotu (N<sub>2</sub>) gidermek ve eşzamanlı elektrik üretimi sağlamak için yukarı akışlı MYH'nin atık su ile beslenmesi esasına dayanmaktadır. Bu sistemde, maksimum 481 mW/m<sup>3</sup> güç yoğunluğu ve %99.3 fosfor, %99.0 azot, %78 KOİ giderimi gerçekleşmiştir. Daha sonra, *Scenedesmus abundance* fotobiyoreaktör sisteminde kültürlenerek ilaç endüstrisi atık sularının ön arıtımını sağlamak ve biyoelektrik üretimi amacıyla MT-MYH ile birleştirilmiştir. Bu sistemde, atık su ilk olarak ön arıtma işlemi için fotobiyoreaktöre besleme yapılmıştır. Daha sonra ileri arıtım gerçekleştirmek için MT-MYH'de hammadde olarak kullanılmış ve sürdürülebilir elektrik üretimi sağlanmıştır. Ön arıtım sonunda sistem, maksimum 0.740 V, 0.838 W/m<sup>2</sup> güç yoğunluğu ve %95 oranında KOİ giderimi sağlamıştır. Bir başka çalışmada, katot katalizörü olarak *Synechococcus sp.* ve *Chlorococcum sp.*'den oluşan MT-MYH kullanılarak mutfak atık sularının arıtımı araştırılmıştır. Elde edilen maksimum güç yoğunlukları, *Chlorococcum sp.* ile 30.2 mW/m<sup>2</sup> iken, *Synechococcus sp.* ile 41.5 mW/m<sup>2</sup> olarak rapor edilmiştir. Bu tür entegre sistemleri sıfır çevresel etkiye sahip elektrik ve mikroalg biyokütle üretimini sağlamanın yanı sıra farklı atık su türlerinin biyolojik arıtımı için de kullanılabilir [2].

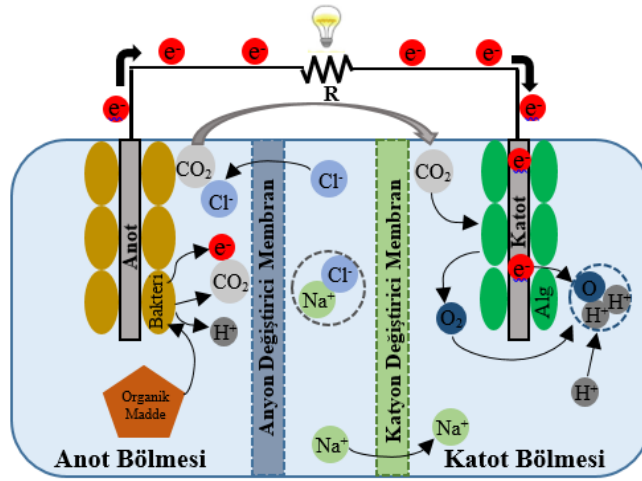
MYH, enerji üretimi ve kirleticilerin atık sudan uzaklaştırılması için umut verici bir yaklaşım olmasına rağmen, süt endüstrisi atık suyu ve hayvan dışkıları gibi amonyumu (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) fazla atıksuların kullanıldığı sistemlerde yüksek miktarda amonyak (NH<sub>3</sub>) oluşturmaktadır [59]. MYH'lerde toplam azot (TN) giderimi %95'e ulaşabilirken, NH<sub>3</sub> buharlaşması, NH<sub>3</sub> gideriminin yaklaşık %60'ına karşılık gelmektedir. Elektrik üretimi sırasında, katotta pH'nın yükseldiği ve bu da NH<sub>4</sub><sup>+</sup> iyonunun katot yoluyla serbest NH<sub>3</sub>'a dönüşümünü arttırdığı bulunmuştur [60]. MYH'lerin NH<sub>3</sub> emisyonu, iklim değişikliği ve hava kalitesi üzerinde olumsuz etkisi yüksek olan ve kullanımını sınırlandıran önemli bir faktördür. Bu bağlamda, enerji üretimine etki etmeden NH<sub>3</sub> emisyonunu azaltmak amacıyla farklı çalışmalar yapılmıştır. Son zamanlarda Li ve ark. [61], NH<sub>3</sub> emisyonunu 0.037 mg N/L'ye düşüren yeni bir bakır (Cu) ilaveli 3D katot geliştirmiştir. Bu çalışma ile yüksek güç yoğunluğu (14.4 W/m<sup>3</sup>) ve kirletici giderimi (%88.1 KOİ ve %92.8 TN) sağlanmıştır.

MT-MYH'lerin etkin ve ekonomik bir şekilde kullanımı için mikroalglerin üretim maliyeti önem taşımaktadır. Mikroalg üretiminde açık havuzlar ve kapalı fotobiyoreaktörler olmak üzere iki tip sistem kullanılmaktadır. Açık havuzlara kıyasla, fotobiyoreaktörlerde biyokütle eldesi daha fazla ancak mikroalglerin ihtiyaç duyduğu ışığı sağlamak için kullanılan yapay ışık kaynakları nedeniyle yatırım maliyeti daha yüksektir [62]. Bununla birlikte bu dezavantajlar, MT-MYH sisteminde üretilen mikroalglerin biyoenerji üretiminde hammadde olarak kullanımı ile aşılabılır [63]. Mikroalg üretim maliyetinin oluşturduğu sınırlamalar, eşzamanlı mikroalg büyümesi ve enerji üretimi için entegre sistemlerin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Örneğin Wu ve ark. [64] atık suyun mikroalgler için kültür ortamı olarak kullanıldığı çift bölmeli entegre bir MYH sistemi geliştirmiş, atıksu kullanımı ile fotobiyoreaktör maliyetini, katotta mikroalg kullanarak katalizör kullanım maliyetini ortadan kaldırmıştır. Tahmini yatırım maliyetinin geleneksel MYH sistemine kıyasla daha düşük olduğunu gözlemiştir. Gajda ve ark.[65], katotta yetiştirilen mikroalg ile beslenen ve aynı anda elektrik ve sistemde kullanılacak biyokütleyi üreten biyotik bir MYH geliştirmiştir. Aynı zamanda mikroalg biyokütlesi, anot bölmesindeki mikroorganizmalar tarafından besin maddesi olarak kullanılmak üzere anoda devridaim edilebilir. Bu çalışma MYH'lerin katotunda üretilen biyokütleden elektrik üretmek için sürdürülebilir bir alternatif olarak kabul edilmektedir. Powell ve Hill [51] biyodizel, bioetanol ve biyoelektrik üretimini tek bir sisteme entegre

ederek katotta üretilen  $CO_2$ 'yi yakalayan *Chlorella vulgaris*'i büyütmek için bir fotobiyoreaktörü bir MYH'ye bağlamış, eş zamanlı olarak elde edilen alg biyokütlesini sistemin elektrik üretmesini sağlayan anotta besin maddesi ve biyodizel için hammadde olarak kullanılmıştır. Tüm sistem açısından, MT-MYH'nin atıksu arıtımının yanında eş zamanlı olarak mikroalg biyokütlesi ve elektrik üretmek için gelecek vadeden bir yaklaşım olduğuna şüphe yoktur.

#### 4.4. Tuzluluk Giderimi

Geleneksel yöntemler kullanılarak kullanılan deniz suyundan tuz arındırma işlemleri yüksek maliyet gerektiren sistemlerdir. Fakat mikroalg tabanlı tuzdan arındırma hücresi (MT-DMYH) adı verilen özel yakıt hücreleri geleneksel sistemlere kıyasla daha düşük maliyetli olup sera gazı ve atık ısı emisyonlarını azaltabilmektedir. MT-DMYH'ler, deniz suyundan tuzu arındırırken eş zamanlı olarak biyoenerji üretimi sağlamak için çevre dostu bir yaklaşım olarak verimli bir şekilde kullanılabilir. MT-DMYH, anyon ve katyon değişirici membranların kullanılması ile deniz suyu içerisindeki anyonları ve katyonları elektrik yükü altında çekerek iyonların ayrılmasını sağlamaktadır (Şekil 5) [66].



Şekil 5. MT-DMYH şematik gösterimi

Ashwani ve diğ. [67], *Scenedesmus obliquus* mikroalgini MT-DMYH'lerin katot bölgesinde kullanmış ve sistemin tuz giderim verimini araştırmışlardır. 20 g NaCl/L giriş konsantrasyonu için sistemin tuz giderim verimliliği %42.6 olarak elde edilmiş, 35 g NaCl/L giriş konsantrasyonunda ise giderim verimliliğinin %55.3'e ulaştığı rapor edilmiştir. Diğer bir çalışmada araştırmacılar, *Chlorella pyrenoidosa*'yı biyokatot olarak kullandıkları farklı konsantrasyonlarda toplam çözünmüş katı madde (TDS) (2.5 g/L ve 5.0 g/L) tuzlu su ile beslenen beş odacıklı bir MT-DMYH tasarlamıştır. 2.5 g/L tuzluluk seviyesi ile çalışan MT-DMYH, maksimum 45.52 mW/m<sup>2</sup> güç yoğunluğu, %71 tuz giderim verimliliği ve hava katotlu bir MYH'den %78 daha fazla KOİ giderim verimliliği sağlayarak yüksek bir performans sergilemiştir. Kokabian ve ark. [68] tarafından yapılan çalışmada, *Chlorella vulgaris* kullanılarak üç farklı MT-DMYH konfigürasyonunun performansı (statik, sürekli ve fotobiyoreaktör) detaylı bir şekilde incelenmiştir. Statik MT-DMYH kullanılarak maksimum 0.75 W/m<sup>2</sup> güç yoğunluğu üretilirken, maksimum biyokütle büyüme hızının sürekli modda 7 mg/L.sa düzeyinde olduğu rapor edilmiştir. Çalışma sonucunda, güç yoğunluğu ile birlikte KOİ'nin giderim oranı, TDS konsantrasyonunun artırılmasına bağlı olarak artmıştır.

MT-DMYH'lerde mikroalg tabanlı biyokatot kullanılan çeşitli çalışmalar Tablo 5'te özetlenmiştir. Bu çalışmalar MT-DMYH'nin potansiyel enerji ve mikroalg biyokütle üretimi ile atık suların tuzdan arındırılması için yenilenebilir, umut verici ve sürdürülebilir bir teknoloji olduğunu kanıtlamaktadır.

Tablo 5. MT-DMYH'lerin tuz giderim verimleri ve ulaşılan maksimum güç yoğunlukları



Mikroalg Türü	Atıksu Türü	Tuzluluk Derecesi (g/L)	Tuzluluk Giderimi (%)	KOİ Giderimi (%)	Maksimum Güç Yoğunluğu (mW/m <sup>3</sup> )	Referans
<i>Chlorella vulgaris</i>	Mandıra	35	52	-	20.25	[69]
<i>Chlorella vulgaris</i>	Aritma çamuru		64.2	68.02	1.1	[70]
<i>Chlorella vulgaris</i>	Sentetik		40	63.3	151	[71]
<i>Chlorella vulgaris</i>	Sentetik (farklı kons.)	35	32.2	64	675	[68]

## 5. Sonuçlar

Bu derleme çalışmasında, MT-MYH sistemleri ile biyoenerji üretimi detaylı bir şekilde analiz edilerek tartışılmıştır. Mikroalg biyokütlesi pahalı besin kaynaklarına kıyasla düşük maliyetli ve sürdürülebilir bir besin kaynağıdır. Mikroalgler, MYH'lerin anot ve katot bölmelerinde işletme maliyetini azaltmak ve sistem performansını arttırmak amacı ile kullanılabilirler. Ayrıca, MYH'lerin anot bölmesinde elektron üreticisi olarak görev yapmasının yanında elektroaktif bakteriler için besin kaynağı olarak kullanılabilirler. Diğer taraftan, katot bölmesinde mekanik havalandırma sistemlerine kıyasla düşük maliyetli bir oksijen üreticisidir. Katot bölmesinde mikroalg kültürlenmesi, oksijen üretiminin yanında düşük maliyetli alg biyokütle üretimi gerçekleştirilmesine imkân tanımaktadır. Tüm bunlara ilave olarak, MT-MYH sistemleri biyodizel üretimi, atıksu arıtımı ve tuz giderimi gibi uygulamalarda kullanım potansiyeli nedeni ile gelecek vadettirmektedir. Elde edilen veriler, MT-MYH sistemlerinin yakın gelecekte büyük ölçekli olarak inşa edilip uygulanabilir bir şekilde işletilebilmesi için optimizasyon ve modelleme çalışmalarına ihtiyaç duyulacağını göstermektedir.

## Kaynaklar

- [1] F. A. Alatraktchi, Y. Zhang, and I. Angelidaki, "Nanomodification of the electrodes in microbial fuel cell: Impact of nanoparticle density on electricity production and microbial community," *Appl. Energy*, vol. 116, pp. 216–222, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.058>.
- [2] M. E. Elshobary, H. M. Zayed, J. Yun, G. Zhang, and X. Qi, "Recent insights into microalgae-assisted microbial fuel cells for generating sustainable bioelectricity," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 4, pp. 3135–3159, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.251>.
- [3] "Dünya Karbondioksit Salımını (2021)." <https://www.co2.earth>.
- [4] E. Kabir, P. Kumar, S. Kumar, A. A. Adedun, and K.-H. Kim, "Solar energy: Potential and future prospects," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, pp. 894–900, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.094>.
- [5] S. Arun, A. Sinharoy, K. Pakshirajan, and P. N. L. Lens, "Algae based microbial fuel cells for wastewater treatment and recovery of value-added products," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 132, p. 110041, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110041>.
- [6] B. E. Logan and J. M. Regan, "Electricity-producing bacterial communities in microbial fuel cells," *Trends Microbiol.*, vol. 14, no. 12, pp. 512–518, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tim.2006.10.003>.
- [7] M. C. Potter. "Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds," *Proc. R. Soc. London, Ser. B*, vol. 84, pp. 260–276, 1911.
- [8] D.-J. Lee, J.-S. Chang, and J.-Y. Lai, "Microalgae–microbial fuel cell: A mini review," *Bioresour. Technol.*, vol. 198, pp. 891–895, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.09.061>.
- [9] H. M. Zayed, X. Qi, J. Yun, and H. Zhang, "Anaerobic Digestion of Microalgae Biomass for Methane Production BT - Microalgae Biotechnology for Development of Biofuel and Wastewater Treatment," M. A. Alam and Z. Wang, Eds. Singapore: Springer Singapore, 2019, pp. 397–421.
- [10] M. Ashour, M. E. Elshobary, R. El-Shenody, A.-W. Kamil, and A. E.-F. Abomohra, "Evaluation of a native oleaginous marine microalga *Nannochloropsis oceanica* for dual use in biodiesel production and aquaculture feed," *Biomass and Bioenergy*, vol. 120, pp. 439–447, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.12.009>.
- [11] M. Shukla and S. Kumar, "Algal growth in photosynthetic algal microbial fuel cell and its subsequent utilization for biofuels," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, pp. 402–414, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.067>.
- [12] J. K. Jang *et al.*, "Construction and operation of a novel mediator- and membrane-less microbial fuel cell," *Process Biochem.*, vol. 39, no. 8, pp. 1007–1012, 2004, doi: [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(03\)00203-6](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(03)00203-6).
- [13] J. R. Kim, S. H. Jung, J. M. Regan, and B. E. Logan, "Electricity generation and microbial community analysis of alcohol powered microbial fuel cells," *Bioresour. Technol.*, vol. 98, no. 13, pp. 2568–2577, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.09.036>.
- [14] C. Xu, K. Poon, M. M. F. Choi, and R. Wang, "Using live algae at the anode of a microbial fuel cell to generate electricity," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 22, no. 20, pp. 15621–15635, 2015, doi: [10.1007/s11356-015-4744-8](https://doi.org/10.1007/s11356-015-4744-8).

- [15] C.-C. Fu, C.-H. Su, T.-C. Hung, C.-H. Hsieh, D. Suryani, and W.-T. Wu, "Effects of biomass weight and light intensity on the performance of photosynthetic microbial fuel cells with *Spirulina platensis*," *Bioresour. Technol.*, vol. 100, no. 18, pp. 4183–4186, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.03.059>.
- [16] C.-C. Lin, C.-H. Wei, C.-I. Chen, C.-J. Shieh, and Y.-C. Liu, "Characteristics of the photosynthesis microbial fuel cell with a *Spirulina platensis* biofilm," *Bioresour. Technol.*, vol. 135, pp. 640–643, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.138>.
- [17] C.-C. Fu, T.-C. Hung, W.-T. Wu, T.-C. Wen, and C.-H. Su, "Current and voltage responses in instant photosynthetic microbial cells with *Spirulina platensis*," *Biochem. Eng. J.*, vol. 52, no. 2, pp. 175–180, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2010.08.004>.
- [18] C. Karthikeyan *et al.*, "3D Flower-Like FeWO<sub>4</sub>/CeO<sub>2</sub> Hierarchical Architectures on rGO for Durable and High-Performance Microalgae Biophotovoltaic Fuel Cells," *Appl. Biochem. Biotechnol.*, vol. 192, no. 3, pp. 751–769, 2020, doi: [10.1007/s12010-020-03352-4](https://doi.org/10.1007/s12010-020-03352-4).
- [19] J.-H. Hwang *et al.*, "A strategy for power generation from bilgewater using a photosynthetic microalgal fuel cell (MAFC)," *J. Power Sources*, vol. 484, p. 229222, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.229222>.
- [20] F.-L. Ng *et al.*, "Integration of bioelectricity generation from algal biophotovoltaic (BPV) devices with remediation of palm oil mill effluent (POME) as substrate for algal growth," *Environ. Technol. Innov.*, vol. 21, p. 101280, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101280>.
- [21] D. P. B. T. B. Strik, H. V. M. Hamelers (Bert), J. F. H. Snel, and C. J. N. Buisman, "Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell," *Int. J. Energy Res.*, vol. 32, no. 9, pp. 870–876, Jul. 2008, doi: <https://doi.org/10.1002/er.1397>.
- [22] S. B. Velasquez-Orta, T. P. Curtis, and B. E. Logan, "Energy from algae using microbial fuel cells," *Biotechnol. Bioeng.*, vol. 103, no. 6, pp. 1068–1076, Aug. 2009, doi: [10.1002/bit.22346](https://doi.org/10.1002/bit.22346).
- [23] N. Rashid, Y.-F. Cui, M. Saif Ur Rehman, and J.-I. Han, "Enhanced electricity generation by using algae biomass and activated sludge in microbial fuel cell," *Sci. Total Environ.*, vol. 456–457, pp. 91–94, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.03.067>.
- [24] S. Kondaveeti, K. S. Choi, R. Kakarla, and B. Min, "Microalgae *Scenedesmus obliquus* as renewable biomass feedstock for electricity generation in microbial fuel cells (MFCs)," *Front. Environ. Sci. Eng.*, vol. 8, no. 5, pp. 784–791, 2014, doi: [10.1007/s11783-013-0590-4](https://doi.org/10.1007/s11783-013-0590-4).
- [25] V. Gadhamshetty, D. Belanger, C.-J. Gardiner, A. Cummings, and A. Hynes, "Evaluation of Laminaria-based microbial fuel cells (LbMs) for electricity production," *Bioresour. Technol.*, vol. 127, pp. 378–385, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.079>.
- [26] X. A. Walter, J. Greenman, B. Taylor, and I. A. Ieropoulos, "Microbial fuel cells continuously fuelled by untreated fresh algal biomass," *Algal Res.*, vol. 11, pp. 103–107, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.06.003>.
- [27] A. Khandelwal, A. Vijay, A. Dixit, and M. Chhabra, "Microbial fuel cell powered by lipid extracted algae: A promising system for algal lipids and power generation," *Bioresour. Technol.*, vol. 247, pp. 520–527, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.119>.
- [28] A.-M. Lakaniemi, O. H. Tuovinen, and J. A. Puhakka, "Production of Electricity and Butanol from Microalgal Biomass in Microbial Fuel Cells," *BioEnergy Res.*, vol. 5, no. 2, pp. 481–491, 2012, doi: [10.1007/s12155-012-9186-2](https://doi.org/10.1007/s12155-012-9186-2).
- [29] A. Gonzalez del Campo, J. F. Perez, P. Cañizares, M. A. Rodrigo, F. J. Fernandez, and J. Lobato, "Characterization of light/dark cycle and long-term performance test in a photosynthetic microbial fuel cell," *Fuel*, vol. 140, pp. 209–216, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.087>.
- [30] E. E. Powell, R. W. Evitts, G. A. Hill, and J. C. Bolster, "A Microbial Fuel Cell with a Photosynthetic Microalgae Cathodic Half Cell Coupled to a Yeast Anodic Half Cell," *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 33, no. 5, pp. 440–448, Jan. 2011, doi: [10.1080/15567030903096931](https://doi.org/10.1080/15567030903096931).
- [31] Z. Baicha *et al.*, "A critical review on microalgae as an alternative source for bioenergy production: A promising low cost substrate for microbial fuel cells," *Fuel Process. Technol.*, vol. 154, pp. 104–116, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.08.017>.
- [32] Y. Zhang, Y. Zhao, and M. Zhou, "A photosynthetic algal microbial fuel cell for treating swine wastewater," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 26, no. 6, pp. 6182–6190, 2019, doi: [10.1007/s11356-018-3960-4](https://doi.org/10.1007/s11356-018-3960-4).
- [33] R. Kakarla and B. Min, "Evaluation of microbial fuel cell operation using algae as an oxygen supplier: carbon paper cathode vs. carbon brush cathode," *Bioprocess Biosyst. Eng.*, vol. 37, no. 12, pp. 2453–2461, 2014, doi: [10.1007/s00449-014-1223-4](https://doi.org/10.1007/s00449-014-1223-4).
- [34] T. Liu, L. Rao, Y. Yuan, and L. Zhuang, "Bioelectricity Generation in a Microbial Fuel Cell with a Self-Sustainable Photocathode," *Sci. World J.*, vol. 2015, p. 864568, 2015, doi: [10.1155/2015/864568](https://doi.org/10.1155/2015/864568).
- [35] A. González del Campo, P. Cañizares, M. A. Rodrigo, F. J. Fernández, and J. Lobato, "Microbial fuel cell with an algae-assisted cathode: A preliminary assessment," *J. Power Sources*, vol. 242, pp. 638–645, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.05.110>.
- [36] H. He, M. Zhou, J. Yang, Y. Hu, and Y. Zhao, "Simultaneous wastewater treatment, electricity generation and biomass production by an immobilized photosynthetic algal microbial fuel cell," *Bioprocess Biosyst. Eng.*, vol. 37, no. 5, pp. 873–880, 2014, doi: [10.1007/s00449-013-1058-4](https://doi.org/10.1007/s00449-013-1058-4).
- [37] J. Lobato, A. González del Campo, F. J. Fernández, P. Cañizares, and M. A. Rodrigo, "Lagooning microbial fuel cells: A first approach by coupling electricity-producing microorganisms and algae," *Appl. Energy*, vol. 110, pp. 220–226,

- 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.04.010>.
- [38] X. Wu, T. Song, X. Zhu, P. Wei, and C. C. Zhou, "Construction and Operation of Microbial Fuel Cell with *Chlorella vulgaris* Biocathode for Electricity Generation," *Appl. Biochem. Biotechnol.*, vol. 171, no. 8, pp. 2082–2092, 2013, doi: [10.1007/s12010-013-0476-8](https://doi.org/10.1007/s12010-013-0476-8).
- [39] D. F. Juang, C. H. Lee, and S. C. Hsueh, "Comparison of electrogenic capabilities of microbial fuel cell with different light power on algae grown cathode," *Bioresour. Technol.*, vol. 123, pp. 23–29, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.07.041>.
- [40] M. Zhou, H. He, T. Jin, and H. Wang, "Power generation enhancement in novel microbial carbon capture cells with immobilized *Chlorella vulgaris*," *J. Power Sources*, vol. 214, pp. 216–219, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.04.043>.
- [41] X. Wang *et al.*, "Sequestration of CO<sub>2</sub> discharged from anode by algal cathode in microbial carbon capture cells (MCCs)," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 25, no. 12, pp. 2639–2643, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.bios.2010.04.036>.
- [42] E. E. Powell, M. L. Mapiour, R. W. Evitts, and G. A. Hill, "Growth kinetics of *Chlorella vulgaris* and its use as a cathodic half cell," *Bioresour. Technol.*, vol. 100, no. 1, pp. 269–274, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.05.032>.
- [43] W. Logroño *et al.*, "Single chamber microbial fuel cell (SCMFC) with a cathodic microalgal biofilm: A preliminary assessment of the generation of bioelectricity and biodegradation of real dye textile wastewater," *Chemosphere*, vol. 176, pp. 378–388, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.02.099>.
- [44] K. K. Jaiswal *et al.*, "Microalgae fuel cell for wastewater treatment: Recent advances and challenges," *J. Water Process Eng.*, vol. 38, p. 101549, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101549>.
- [45] A. J. Slate, K. A. Whitehead, D. A. C. Brownson, and C. E. Banks, "Microbial fuel cells: An overview of current technology," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 101. Elsevier Ltd, pp. 60–81, Mar. 01, 2019, doi: [10.1016/j.rser.2018.09.044](https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.044).
- [46] I. Chakraborty, S. Das, B. K. Dubey, and M. M. Ghangrekar, "Novel low cost proton exchange membrane made from sulphonated biochar for application in microbial fuel cells," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 239, no. April 2019, p. 122025, 2020, doi: [10.1016/j.matchemphys.2019.122025](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122025).
- [47] A. S. Mathuriya and J. V. Yakhmi, "Microbial fuel cells - Applications for generation of electrical power and beyond," *Crit. Rev. Microbiol.*, vol. 42, no. 1, pp. 127–143, 2016, doi: [10.3109/1040841X.2014.905513](https://doi.org/10.3109/1040841X.2014.905513).
- [48] D.-B. Wang, T.-S. Song, T. Guo, Q. Zeng, and J. Xie, "Electricity generation from sediment microbial fuel cells with algae-assisted cathodes," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 25, pp. 13224–13230, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.06.141>.
- [49] S. Venkata Mohan, S. Srikanth, P. Chiranjeevi, S. Arora, and R. Chandra, "Algal biocathode for in situ terminal electron acceptor (TEA) production: Synergetic association of bacteria–microalgae metabolism for the functioning of biofuel cell," *Bioresour. Technol.*, vol. 166, pp. 566–574, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.081>.
- [50] L. De Schampelaire and W. Verstraete, "Revival of the biological sunlight-to-biogas energy conversion system," *Biotechnol. Bioeng.*, vol. 103, no. 2, pp. 296–304, Jun. 2009, doi: <https://doi.org/10.1002/bit.22257>.
- [51] E. E. Powell and G. A. Hill, "Economic assessment of an integrated bioethanol–biodiesel–microbial fuel cell facility utilizing yeast and photosynthetic algae," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 87, no. 9, pp. 1340–1348, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2009.06.018>.
- [52] J. Greenman, I. Gajda, and I. Ieropoulos, "Microbial fuel cells (MFC) and microalgae; photo microbial fuel cell (PMFC) as complete recycling machines," *Sustain. Energy Fuels*, vol. 3, no. 10, pp. 2546–2560, 2019, doi: [10.1039/C9SE00354A](https://doi.org/10.1039/C9SE00354A).
- [53] B. Taşkan, E. Taşkan, and H. Hasar, "Electricity generation potential of sewage sludge in sediment microbial fuel cell using Ti–TiO<sub>2</sub> electrode," *Environ. Prog. Sustain. Energy*, vol. 39, no. 5, p. e13407, Sep. 2020, doi: <https://doi.org/10.1002/ep.13407>.
- [54] E. Taskan and H. Hasar, "Comprehensive comparison of a new tin-coated copper mesh and a graphite plate electrode as an anode material in microbial fuel cell," *Appl. Biochem. Biotechnol.*, vol. 175, no. 4, pp. 2300–2308, Feb. 2015, doi: [10.1007/s12010-014-1439-4](https://doi.org/10.1007/s12010-014-1439-4).
- [55] S. Naina Mohamed, P. Ajit Hiranman, K. Muthukumar, and T. Jayabalan, "Bioelectricity production from kitchen wastewater using microbial fuel cell with photosynthetic algal cathode," *Bioresour. Technol.*, vol. 295, p. 122226, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122226>.
- [56] B. Taşkan, "Investigation of Electricity Generation Performance of Grape Marc in Membrane-less Microbial Fuel Cell," *Environ. Res. Technol.*, Mar. 2021, doi: [10.35208/ert.881517](https://doi.org/10.35208/ert.881517).
- [57] J. K. Nayak and U. K. Ghosh, "Microalgae Cultivation for Pretreatment of Pharmaceutical Wastewater Associated with Microbial Fuel Cell and Biomass Feed Stock Production BT - Frontiers in Water-Energy-Nexus—Nature-Based Solutions, Advanced Technologies and Best Practices for Environme," 2020, pp. 383–387, doi: [0.1007/978-3-030-13068-8\\_96](https://doi.org/10.1007/978-3-030-13068-8_96).
- [58] H. Jiang, S. Luo, X. Shi, M. Dai, and R. Guo, "A system combining microbial fuel cell with photobioreactor for continuous domestic wastewater treatment and bioelectricity generation," *J. Cent. South Univ.*, vol. 20, no. 2, pp. 488–494, 2013, doi: [10.1007/s11771-013-1510-2](https://doi.org/10.1007/s11771-013-1510-2).
- [59] N. Yang, G. Zhan, D. Li, X. Wang, X. He, and H. Liu, "Complete nitrogen removal and electricity production in Thauera-dominated air-cathode single chambered microbial fuel cell," *Chem. Eng. J.*, vol. 356, pp. 506–515, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.08.161>.
- [60] J. R. Kim, Y. Zuo, J. M. Regan, and B. E. Logan, "Analysis of ammonia loss mechanisms in microbial fuel cells treating

- animal wastewater,” *Biotechnol. Bioeng.*, vol. 99, no. 5, pp. 1120–1127, Apr. 2008, doi: <https://doi.org/10.1002/bit.21687>.
- [61] D. Li *et al.*, “Characterising and control of ammonia emission in microbial fuel cells,” *Chem. Eng. J.*, vol. 389, p. 124462, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124462>.
- [62] G. SİSMAN-AYDİN, “Mikroalg Teknolojisi ve Çevresel Kullanımı,” *Harran Üniversitesi Mühendislik Derg.*, vol. 4, no. 1, pp. 81–92, Apr. 2019, Accessed: Jan. 19, 2022. [Online]. Available: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/humder/issue/44912/494257>.
- [63] M. K. Lam and K. T. Lee, “Microalgae biofuels: A critical review of issues, problems and the way forward,” *Biotechnol. Adv.*, vol. 30, no. 3, pp. 673–690, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.11.008>.
- [64] J.-Y. Wu *et al.*, “Economic potential of bioremediation using immobilized microalgae-based microbial fuel cells,” *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 23, no. 8, pp. 2251–2264, 2021, doi: 10.1007/s10098-021-02131-x.
- [65] I. Gajda, J. Greenman, C. Melhuish, and I. Ieropoulos, “Self-sustainable electricity production from algae grown in a microbial fuel cell system,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 82, pp. 87–93, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.05.017>.
- [66] N. B., H. Pradhan, P. Sarkar, and M. M. Ghangrekar, “Application of ion exchange membranes in enhancing algal production alongside desalination of saline water in microbial fuel cell,” *MRS Adv.*, vol. 4, no. 19, pp. 1077–1085, 2019, doi: 10.1557/adv.2019.170.
- [67] V. R. V. Ashwaniy and M. Perumalsamy, “Reduction of organic compounds in petro-chemical industry effluent and desalination using *Scenedesmus abundans* algal microbial desalination cell,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 5, no. 6, pp. 5961–5967, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.11.017>.
- [68] B. Kokabian, U. Ghimire, and V. G. Gude, “Water deionization with renewable energy production in microalgae - microbial desalination process,” *Renew. Energy*, vol. 122, pp. 354–361, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.061>.
- [69] M. Khazraee Zamanpour, H.-R. Kariminia, and M. Vosoughi, “Electricity generation, desalination and microalgae cultivation in a biocathode-microbial desalination cell,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 843–848, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.12.045>.
- [70] B. Kokabian and V. G. Gude, “Sustainable photosynthetic biocathode in microbial desalination cells,” *Chem. Eng. J.*, vol. 262, pp. 958–965, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.10.048>.
- [71] B. Kokabian and V. G. Gude, “Photosynthetic microbial desalination cells (PMDCs) for clean energy, water and biomass production,” *Environ. Sci. Process. Impacts*, vol. 15, no. 12, pp. 2178–2185, 2013, doi: 10.1039/C3EM00415E.