Çevre Biyoteknolojisinde Yeni Teknolojiler

*[1]Fatih Karadağlı and [1]Beytullah Eren
[1]Sakarya University, Faculty of Engineering, Department of Environmental Engineering, Sakarya, Turkey

Özet

Bu çalışmada çevre biyoteknolojisi alanında geliştirilmekte olan üç yeni teknoloji sunulmaktadır. Bu teknolojiler: 1- Fiber-membranlı biyorektörlerin su ve atıksu arıtımında kullanılması, 2- Güneş ışığı ve karbondioksit kullanan mikroorganizmalarla biyoyakıt üretilmesi, 3- Organik atıkların parçalanması sırasında elektrik üretimi,. Bazı mikroorganizmalar organik atıkları parçalarken elektrik üretimi yapabilmektedirler. Bu gözleme bağlı olarak 'mikrobiyal elektrokimyasal hücreler' olarak bilinen yeni bir teknoloji geliştirilmektedir. Yuzeysel sularda bulunan mavi-yeşil algler, güneş ışığını ve karbondioksiti kullanarak organik maddeler üretebilmektedirler. Bu maddeler biyoyakıtlardan biyoplastiklere kadar gibi geniş bir ürün yelpazesi için hammadde görevini görmektedir. Membranlı biyorektörlerde, hidrojen ve oksijen gibi gazlar membranlar aracılığıyla, atıksu içerisinde çözündürülmektedir. Bu sırada mikroorganizmalar membran yüzeyinde biyofilm tabakası şeklinde çoğalmakta, ve membran yüzeyinde oksijen alarak atıksu içerisindeki kirletici maddeleri verimli şekilde parçalayabilmektedir. Çevre biyoteknolojisi alanından geliştirilen bu yeni teknolojiler, yenilenebilir enerji üretimi ve çevre kirliliğinin önlenmesine yönelik yenilikçi çalışmalardır.

Anahtar Kelimeler: Mikrobiyal elektrik, biyoyakıtlar, biyofilmler, membranlar

1. Su ve Atıksu Arıtımında Fiber-Membranlı Biyoreaktörler

Günümüzde sularda bulunan kirleticilerin sayısı ve yapısı değişmektedir. Yeni kirleticilere örnek olabilecek bazı maddeler ve bunların kimyasal formülleri, sağlık etkileri, ve zararsız formları aşağıda Tablo 1'de sunulmaktadır [1]. Bu kirleticilerin ortak özelliği oksitlenmiş formda olmalarıdır. Bu maddelerin zararsız formlarına dönüşebilmeleri için elektron alarak indirgenmeleri gerekir. Bu işlemi etkili bir şekilde gerçekleştirebilmek için yeni teknolojiler geliştirilmektedir. Bu teknolojilerden fiber-membranlı biyorekatörlerin ayrıntıları bu çalışmada takdim edilmektedir.

Tablo 1'deki kirleticilerin bazıları sularda düşük konsantrasyonlarda bulunmakta olup, bu düşük seviyelerde bile insan sağlığı açısından tehlikelidirler, ve arıtılmaları gerekmektedir. Mevcut su arıtma teknolojileri bu maddeleri kısıtlı ölçüde gidermektedir. Mevcut teknolojiler arasında pıhtılaştırma-yumaklaştırma, çökeltme, ve kum filtreleri gibi üniteler bulunmaktadır, ve bunlar öncelikle içme su kaynaklarında görülen doğal partikülleri gidermeye yönelik proseslerdir. Bu teknojilerle sulardaki doğal tanecikler ve sularda çözünmüş halde bulunan büyük moleküllerin kısmi düzeyde giderilmesi mümkündür. Bu nedenle, sularda düşük konsantrasyonlarda bulunan yeni kirlieticileri gidermek için yeni ve etkili teknolojilere ihtiyaç duyulmaktadır [2].

*Corresponding author: Address: Sakarya University, Faculty of Engineering, Department of Environmental Engineering, Esentepe Campus, 54187, Sakarya, TURKEY. E-mail address: fkaradagli@sakarya.edu.tr, Phone: +902642955636 Fax: +902642955601

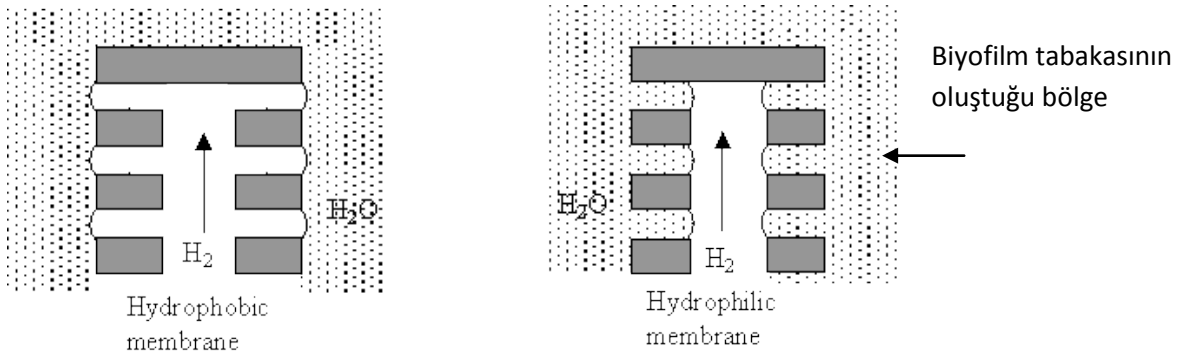
Tablo 1. Su kaynaklarında tespit edilen oksitlenmiş kimyasal maddeler [1].

Kirletici madde	Kimyasal formulü	Olumsuz etkileri	Zararsız formu
Nitrat ve nitrit	NO_3^-, NO_2^-	1-Methemoglobinemi: çocuklarda dokulara yetersiz oksijen gitmesi; 2- Yüzeysel sularda ötrofikasyon; 3-Hipoksiya:Beyinde oksijen yetersizliği	N_2 gazı
Perklorat ve klorat	ClO_4^-,ClO_3^-	Endokrin (hormon) sisteminin bozulması Tiroid glandı ve fonksiyonunlarının bozulması	Cl^- ve H_2O
Bromat	BrO_3^-	Gen yapısının bozulması ve kanser	Br^- ve H_2O
Selenat ve Selenit	SeO_4^{2-} ve SeO_3^{2-}	Yenidoğan bebeklerde farklı bozukluklar	Se^0 (katı)
Arsenat (arsenik)	$H_2AsO_4^-$	Zehirlenme, kalp krizi ve kanser vakaları	As_2S_3 (katı)
Kromat	CrO_4^-	Karaciğer ve böbreklerde tahribat	$Cr(OH)_3$ (katı)
Halojenli organikler,	C_2Cl_4, C_2HCl_3	Zehirlenmeler ve kanser	Cl- ve C_2H_4

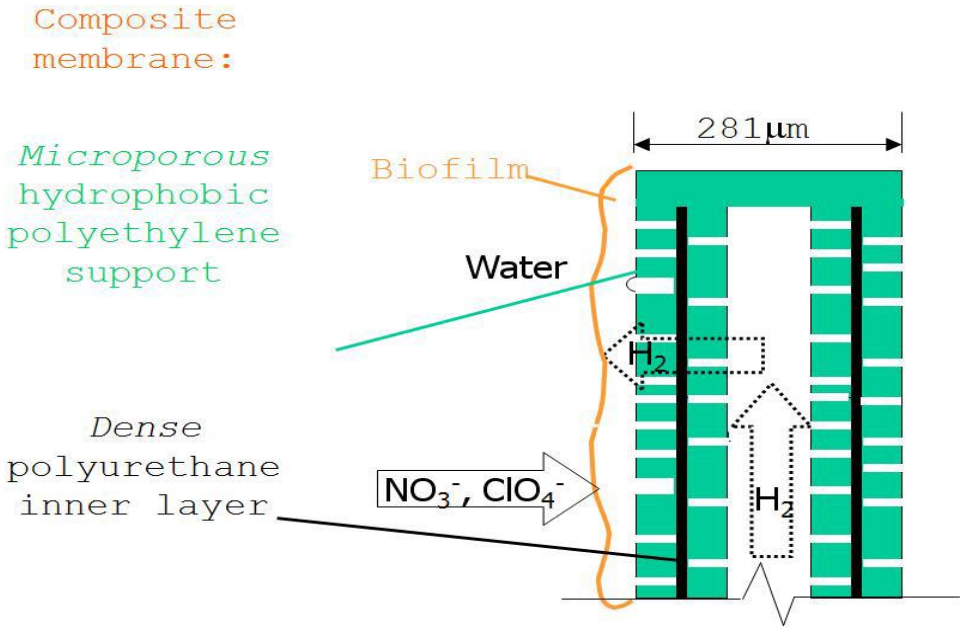
Bu amaç doğrultusunda, mikrofiltrasyon, ultrafiltrasyon ve nanofiltrasyon gibi membranlı filtrasyon işlemleri suların moleküler düzeyde arıtılmasını sağlayabilmektedir. Bunların yanısıra, fiber-membranlı biyoreaktörler suların moleküler düzeyde arıtılması için önemli ilerleme sağlamıştır. Bu reaktörler laboratuvar çalışmalarında ve pilot ölçekli uygulamalarda başarı göstermiş, ve son yıllarda gerçek arıtma uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır [2-8].

Aşağıdaki Şekil 1'de, fiber membranın ayrıntıları ve Şekil 2'de de fiber-membranlı biyofilm reaktörlerinin ana çalışma prensipleri sunulmaktadır. Bu sistemde, hidrojen gazı (H_2) gibi gazlar, fiber-membranların iç kısmında dış kısmına doğru olacak şekilde basınçla sisteme beslenmektedir. Bu şekilde, H_2 gazı fiberler aracılığıyla baloncuk yapmadan difuzyon yoluyla atıksuda çözünmektedir. Bu geçiş sırasında, H_2 gazını elektron vericisi substrat olarak kullanan mikroorganizmalar, fiber yüzeyinde biyofilm tabakası oluşturmakta ve H_2'den aldıkları elektronları su içerisinde bulunan oksitlenmiş kirleticilere (Tablo 1) aktararak, enerji elde etmektedirler. Böylece, ilgili kirletici maddelerin indirgenmelerini ve zararsız hale gelmesini sağlamaktadırlar [4-8].

Şekil 2'de gösterildiği üzere, H_2 gazı fiber içerisinde dışarıya doğru hareket etmektedir. Bu geçiş sırasında, H_2 gazı biyofilm tabakasındaki mikroorganizmalar tarafından, reaktöre giren kirleticilerin indirgenmesi için kullanılmaktadır. Bu tüketime bağlı olarak, ilgili kirletici maddeyi indirgeyebilen mikrobiyal gruplar zamanla biyofilm tabakası içinde dominant hale gelmektedirler [5]. Böylece, kirleticilerin açısından, arıtma verimliliği (>%95) seviyesine yükselmektedir [6-8].

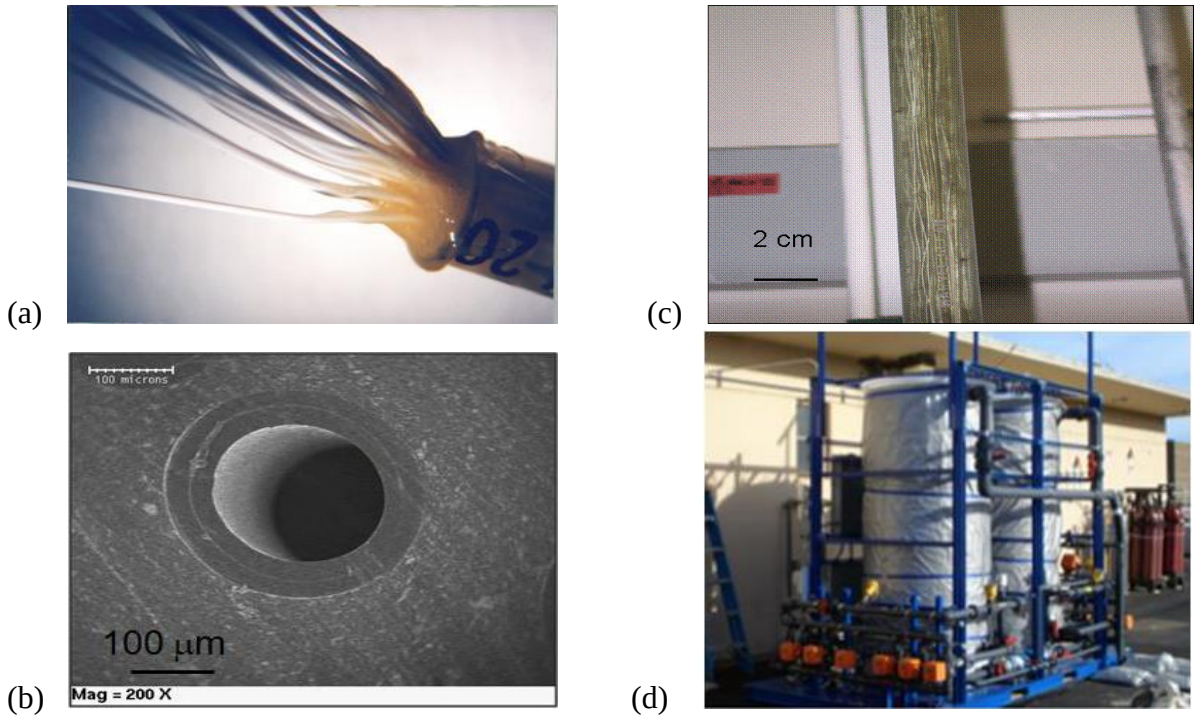


Şekil 1. Gaz transferi için kullanılan hidrofobik ve hidrofilik fiber membranlar [2].



Şekil 2. Fiber-membranların çalışma prensipleri ve membran detayları [2].

Aşağıdaki Şekil 3'de, fiber-membranların kesitleri, laboratuar ölçekli modelleri ve gerçek saha uygulamalarında kullanılan modelleri sunulmaktadır.



Şekil 3. Gazların suda baloncuk yapmadan çözünmesini sağlayan fiber membranlar, ve biyoreaktörler; (a) fiberlerin bir buket haline getirilmiş hali, (b) Fiberlerin elektron mikrokobu ile çekilmiş ara kesit yüzeyi, (c) laboratuvar ortamında çalışan fiber-membranlı biyoreaktör, (d) Fiber-membranlı biyoreaktörlerin saha uygulamaları.

Şekil 3a'da fiberlerin bir buket şekline getirilmiş hali gösterilmektedir. Bu buket plastik bir boru içerisine yerleştirilmek suretiyle, bir reaktör haline getirilmektedir. Şekil 3b'de ilgili fiber buketinin laboratuar ölçekli biyoreaktör haline getirilmiş hali gösterilmektedir. Bu sistem 3-4 cm çapında plastik ve şeffaf bir boru olup, fiber-membranlar iç kısımda ve serbes şekilde bulunmaktadırlar. Fiber buketinin alt tarafından reaktöre gaz beslemesi yapılmaktadır. Bununla birlikte, plastik borunun yan cephesinden atıksular sisteme giriş yaparak boru içerisinde yukarıya doğru ilerlemektedir. Bu durumda, mikroorganizmalar fiberlerden gelen H_2 gazını kullanarak, atıksu içerisindeki oksitlenmiş molekülleri indirgemektedirler.

Doğal sularda, kirleticilerle birlikte nitrat (NO_3^-) ve sulfat (SO_4^{2-}) gibi doğal iyonlarda bulunmaktadır. Reaktörün giriş suyunda bu tür iyonların olması, reaktördeki biyofilm tabakası içerisinde farklı mikroorganizma topluluklarının dominant olmasına neden olmaktadır. Örneğin, giriş suyunda fazla miktarda nitrat (NO_3^-) olması, fiberlerde nitratı indirgeyici mikrobiyal grupların çoğalmasını sağlamaktadır. Bu tür durumlarda, fiberlerin yüzeyindeki biyofilm tabakaları kalınlaşmaktadır ve biyofilm tabakasında zamanla kısmi kopmalar (biofouling) görülmektedir [6-8]. Ancak, biofilm tabakaları hızlı şekilde yeniden oluştuğu için, bu tür olaylar reaktör performansını büyük oranda etkilememektedir. Bu nedenle, fiber-membranlı biyoreaktörler, özellikle, sularda az miktarda bulunan, ancak insan sağlığı açısından ciddi tehlike arz eden kirleticilerin giderilmesinde başarılı olmaktadır.

2. Biyoyakıt Reaktörleri

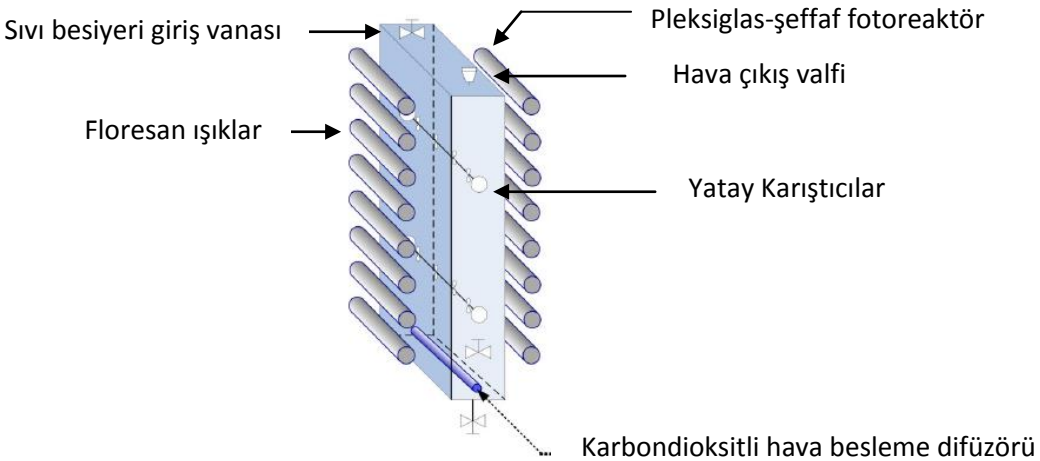
Fosil yakıtların kullanımı sonucu atmosfere bırakılan karbondioksit, küresel ısınmaya ve okyanusların asidifikasyonuna sebep olmaktadır [9]. Böylece, yeryüzündeki ekosistemler ve ekolojik dengeler bozulmakta ve canlı türleri olumsuz yönde etkilenmektedir [9]. Bu nedenle, fosil yakıtlara alternatif bulma çalışmaları önemli araştırma konularındandır. Tarım ürünlerinden fermentasyonla etanol üretimi, yağlı tohumlardan biyodizel üretimi, ve atık maddelerden biyogaz eldesi bu arayışlar arasındadır [10-11]. Bu alternatiflerden, tarım ürünlerinin enerji üretiminde kullanılması, dünyadaki gıda ihtiyacının karşılanmasında olumsuz etkiler yapacaktır. Yine ilgili alternatiflerden, atık maddelerden biyogaz üretimi uzun yıllardır araştırılmaktadır [11]. Bu proseste, organik maddeler önce fermentasyonla uçucu asitlere dönüşmekte, ve sonra kademeli olarak denitrifikasyon, sulfat indirgenmesi, ve metan oluşumu gibi fazlardan geçmektedir. Bu proses, bir çok parametre (pH, hava girişi, sıcaklık gibi) açısından hassasiyet göstermekte, ve metan eldesi uzun zaman almaktadır. Bu nedenle, yeni bilimsel çalışmalar hızlı çoğalan mikroorganizmalara ve verimi yüksek proseslere yönelmektedir.

Bu çerçevede, doğal sularda bulunan mavi-yeşil alg türleri olarak bilinen mikroorganizmalar üzerinde yoğunlaşılmaktadır [12]. Bu mikroorganizmalar havadaki karbondioksiti ve güneş ışığını kullanarak fotosentez yoluyla organik madde ve oksijen üretmektedirler [13]. Bu üretim reaksiyonu genel olarak aşağıdaki şekilde temsil edilmektedir.

$$CO_2 + H_20 \xrightarrow{\text{Güneş Işığı}} (CH_2O\,*) + O_2$$

Burada (CH_2O*) molekülü bu işlem sonucunda oluşan organik maddeleri temsil etmektedir. Oluşan ürünler arasında uçucu yağ asitleri ve lipidler bulunup, bu maddeler biyodizel gibi biyoyakıtlar ve biyopolimer üretimlerinde hammadde olarak kullanılmaktadır [14]. Alg türü canlılar güneş ışığı ve karbondioksiti kullanarak, uçucu yağ asitleri ve lipid türü maddeleri üretmektedir. Bu nedenle, alg türü mikroorganizmaların bu proseste kullanılması ön plana çıkmaktadır [13]. Bu genel bakış açısının yanısıra, bu teknolojide alglerin tercih edilmesinin başlıca sebepleri şu şekildedir: 1- Algler çevresel şartlara karşı toleranslıdırlar, ve bir çok su ortamında hızlıca büyümektedirler; bu nedenle, evsel atıksu arıtma tesislerinin deşarj suları kullanılarak çoğaltılabilirler, ve bu şekilde, yüzeysel su kirliliği kontrol edilebilir, 2- Termik santrallerin baca gazlarından çıkan karbondioksiti karbon kaynağı olarak kullanılabilirler, ve böylece, atmosfere bırakılan karbondioksit salınımları düşürülebilir, 3- Alglerin üretilmesi, enerji üretimi için kullanılan diğer tarımsal ürünlere (mısır, soya fasulyesi gibi) göre hektar başına çok daha fazla verimlidir, ve gıda üretimi için gerekli arazi alanına herhangi bir etkisi bulunmamaktadır, 4- Üretilen biyokütle ve oluşan diğer ürünler biyodizel başta olmak üzere, biyopolimerler ve biyokauçuk gibi maddelerin üretiminde kullanılmaktadır [12-14].

Mevcut çalışmalar, alg türlerinin aşağıda Şekil-4'de sunulan fotobiyoreaktörlerde çoğaltılmasıyla yapılmaktadır. Bu düzenek şeffaf plastikten inşaa edilmiş bir reaktör olup, her iki tarafında floresan lambalar yerleştirilmiştir, ve bu lambalar ışık kaynağı olmaktadır. Reaktöre giriş ve bölümlerine ait ayrıntılar yine şekil üzerinde gösterilmektedir [15].



Şekil 4. Deneysel çalışmalar için kullanılan fotobiyorektör [15].

Mavi-yeşil alg türleri arasında, gen haritası tamamen çıkarılmış, ve metabolik fonksiyonları çok iyi bilinen *Syenochysistis sp.* PCC6803 (PCC6803) türü uçucu yağ asitlerini ve lipidleri yüksek oranda üretebilmektedir [16-17]. PCC6803 türü pH, tuzluluk, sıcaklık, ultraviyole ışık etkisi, ve karbondioksit miktarı gibi bir çok parametreye karşı yüksek tolerans göstermektedir. Bu nedenle, PCC 6803 türü kullanılarak test çalışmaları gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmalar ilgili teknolojiyle ilgili temel bilimsel soruların test edilmesinde ve anlaşılmasında faydalar sağlamaktadır.

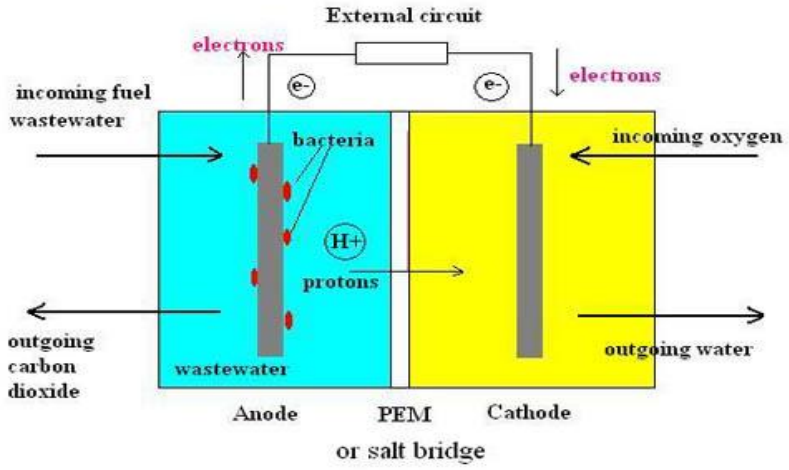
Son dönemlerde yürütülen çalışmalar, PCC6803 türünün fotobiyoreaktörlerde yüksek verimle çoğaltılması ve hasat edilmesi [18], hasat edilen mikroorganizmaların membranlarının kırılması ve oluşan biyokütlenin su içeriğinin minimum düzeye indirilmesi [19], ve lipidlerin ekstraksiyonu için uygun çözücülerle biyodizel gibi ürünlere dönüştürülmesi üzerine yoğunlaşmaktadır [20].

Bu çalışmaların yanısıra, ilgili teknolojinin karışık alg kültürleriyle ve doğal sularda kullanılabilmesi için denemeler yapılmaktadır. Bu şekilde, biyodizel, biyopolimer, biyokauçuk, ve biyoplastik gibi ürünlere hammadde olabilecek maddelerin üretiminin gerçekleştirilmesi bu teknolojiyle mümkün olabilecektir.

3. Mikrobiyal Elektrik Üretimi

Doğada bulunan bazı mikroorganizmalar, organik maddelere oksidasyona uğratıp, bu parçalanma sırasında ortaya çıkan elektronları bir iletken üzerinden elektron alıcısına aktarabilmektedir. Bu özellik kullanılarak, atıksularda bulunan organik maddelerin parçalanması sırasında, elektrik enerjisinin üretilmesi, yeni bir araştırma konusu olarak gündeme gelmiştir. Bu işlem, mikrobiyal elektrokimyasal hücreler adı verilen unitelerde gerçekleştirilmektedir. Bu hücrelerin ana kısımları aşağıdaki Şekil 5'de sunulmaktadır. Bu düzenek, anot bölümü (sol taraf) ve katot bölümü (sağ taraf) olarak iki ana birimden oluşmaktadır. Bu iki kısım aralarındaki bir membran perde ile ikiye ayrılmaktadır. Membran perde proton (H^+) gibi iyonların bir taraftan diğer tarafa geçişine izin veren bir membrandır [21].

Bu sistemde, evsel atıksu gibi organik atıklar, anot bölümünden sisteme giriş yapmaktadır. Bu atıklar, anot bölümünde bulunan mikroorganizmalar tarafından oksidasyona uğratılır ve parçalanmış olur. Bu parçalanma sırasında mikroorganizmalar organik maddelerden elektron alırlar ve bunları anot elektroduna aktarırlar. Bu aktarım sırasında, mikroorganizmalar anot elektrodu üzerinde biyofilm tabakası oluşturmaktadır [21-22]. Bu şekilde, mikroorganizmalar organik atıkların parçalanmasında elde edilen elektronları, iki bölümü birbirine bağlayan bir iletken aracılığıyla katot bölümüne aktarılır. Bu aktarma sırasında elektrik akımı elde edilmiş olur, ve iletken hat üzerine yerleştirilen bir akım-ölçer ile miktarı belirlenir. Katot bölümüne iletilen elektronlar katot elektrodu tarafından suda bulunan çözünmüş oksijene aktarılır [21-22]. Suadaki çözünmüş oksijen, elektronları alarak ve sudaki proton iyonları ile birlikte su molekülüne dönüşür. Bu sistemin önemli bir parçası iki bölüm arasındaki iyon akışını sağlayan membran veya tuz köprüsüdür. Bu köprü Şekil 5'de orta kısımdaki beyaz bölüm olup, iki kısım arasındaki proton iyonu dengesini sağlamaktadır.



Şekil 5. Mikrobiyal elektrokimyasal hücrelerin ana hatlarıyla sunumu.

Mikrobiyal elektrokimyasal hücrelerinde parçalanabilecek atıkları belirlemek için bir çok organik atıkla denemeler yapılmıştır. Bunlar arasında gerçek atıksular bulunmakla birlikte, bu teknolojinin geliştirilmesi için daha basit moleküler yapıya sahip olan organik maddeler, deneysel çalışmalarda daha sık kullanılmaktadır. Bu maddeler arasında asetik asit başta omak üzere, uçucu organik asitler, protein ve lipidler, glukoz ve benzeri şekerler bulunmaktadır [23].

Mikrobiyal elektrokimyasal hücrelerdeki elektrik üretimini etkileyen bir faktör, anot elektrotu üzerinde oluşan biyofilm tabakasının kalınlığı ve mikrobiyal kompozisyonudur [24-25]. Biyofilm tabakasının çok kalın olması halinde, organik maddeden elde edilen elektronların anota iletilmesi güçleşmektedir, ve bu nedenle, biyofilm tabakasının belirli bir optimum kalınlıkta olması gerekir. Bunun yanısıra, biyofilm tabakasındaki mikrobiyal çeşitlilik, katot bölümüne aktarılan elektrik miktarını etkilemektedir. Örneğin, atıksu içerisinde nitrat - NO_3^-, veya sulfat - SO_4^{2-} gibi oksitlenmiş moleküllerin olması durumunda; bu molekülleri elektron alıcısı kullanabilecek mikoorganizmalar biyofilm tabakası içeirisinde çoğalırlar. Bu durumda, sistemde elektrik üretimi azalırken, sulfat veya nitrat indirgenmesi gibi prosesler dominant hale gelir [24-25]. Bu tür problemleri kontrol altına almak için, mikrobiyal elektrokimyasal hücrelerde üretilen elektrik enerjisi düzenli şekilde ölçülür, ve belirli referans değerle karşılaştırılır. Bu şekilde, sistemin elektrik üretim verimliliği, ve biyofilm tabakasındaki mikrobiyal yapı hakkında anlık bilgi edinmek mümkündür [26]. Bu bilgilere bağlı olarak, sistemde meydana gelen aksamalar hızlı şekilde belirlenir, ve düzeltmek için yine hızlı şekilde müdahale imkanı olmaktadır.

4. Sonuç

Bu çalışmada çevre biyoteknolojisi alanındaki bazı yenilikçi teknolojilerin ayrıntıları sunulmuştur. Bu teknolojiler çağımızda insanlığın karşı karşıya kaldığı bazı enerji ve çevre kirliliği problemlerine mühendislik çözümleri getirmek için geliştirilen teknolojilerdir. Bunların bazıları uygulamaya geçmiş, ve bazılarının geliştirilmesi devam etmektedir. Fiber-membranlı biyoreaktörler, sularda tespit edilen yeni kirleticileri etkili şekilde giderebilmekte ve saha uygulamalarında kullanılmaktadır. Biyoyakıt üretimi için kullanılan sistemler fosil yakıtlara alternatif olabilecek enerji kaynakları üretmek için atılmış önemli bir adımdır. Benzer şekilde, bu teknolojiyle atmosphere bırakılan karbondioksit miktarlarının düşürülmesi söz konusu olacaktır. Yeni teknolojilerden olan mikrobiyal elektrokimyasal hücreler, atıksuların arıtılması sırasında elektrik enerjisi üretilmesini sağlamakta, ve enerji problemlerinin azaltılmasında olumlu bir adım olmaktadır.

Kaynaklar

[1] Rittmann BE. Environmental biotechnology in water and wastewater treatment. J Env Eng-ASCE 2010; 136(4):348-353.
[2] Rittmann BE. The membrane biofilm reactor: the natural partnership of membranes and biofilms. Wat Sci Tech 2005;53(3):219-225.
[3] Nerenberg R, Rittmann BE, Najm I. Perchlorate reduction in a hydrogen-based membrane-biofilm reactor. J Am Wat Works Assoc 2002; 94(11):103-114.

[4] Tang Y, Ziv-el M, Chou C, Shin JH, ve ark. Bioreduction of nitrate in groundwater using a pilot-scale hydrogen-based membrane biofilm reactor. Front Environ Scien and Eng in China 2007; 4(3):280-285.
[5] Ziv-el M, Rittmann, BE. Systematic evaluation of nitrate and perchlorate bioreduction kinetics in groundwater using a hydrogen-based membrane biofilm reactor. Wat Res 2009;43(1): 173-181.
[6] Chang J, Krajmalnik-brown R, Rittmann BE. Bioreduction of trichloroethene using hydrogen-based membrane biofilm reactor. Env Sci Tech 2008;42(2):477-483.
[7] Chang J, Chang-hoon A, Zhou C ve ark. Bio-reduction of N-nitrosodimethylamine (NDMA) using a hydrogen based membrane biofilm reactor. Chemosphere 2008;70(3):516-520.
[8] Chang J, Rittmann BE, Wright FW, ve ark. Simultaneous bio-reduction of nitrate, perchlorate, selenate, chromate, arsenate, and dibromochloropropane using hydrogen based membrane biofilm reactor. Biodegradation 2007;18(2):199-209.
[9] National Research Council. 2009. Ecological Impacts of Climate Change. Washington D.C.: National Academies of Sciences; 2009.
[10] Farrell AE, Plevin RJ, Turner BT, Jones AD, ve ark. Ethanol can contribute to energy and environmental goals. Science 2006;311(5760):506-508.
[11] Appels L, Joost L, Degreve J, Helsen L ve ark. Anaerobic digestion in global bio-energy production: potential and research challenges. Renew Sustain Ener Rev 2011;15(9):4295-4301.
[12] Rittmann BE. Opportunities for renewable bioenergy using microorganisms. Biotech Bioeng 2008;100(2):203-12.
[13] Chisti Y . Biodiesel from microalgea. Biotech Adv 2007;25(3):294-306.
[14] Hu Q, Sommerfeld M, Jarvis E,Ghirardi M, ve ark. Microalgal triacylglycerolas feedstockfor biofuel production: Perspectives and advances. Plant J 2008;54(4):621-639.
[15] Kim HW,Marcus AK, Shin JH, Rittmann BE. Advanced control for photoautotrophic growth and CO_2-utilization efficiency using a membrane carbonation photobioreactor (MCPBR). Environ Sci Tech 2011; 45(11): 5032-8.
[16] Vermaas W. Molecular genetics of the cyanobacterium Synechocystis sp. PCC6803: Principles and possible biotechnology applications. J Appl Phys 1996;8(4-5):263-273.
[17] Kaneko T, Sato S, Kotani H, Tanaka A, Asamizu E, ve ark. Sequence analysis of the genome of the unicellular cyanobacterium *synechocystis* sp. strain PCC 6803. Sequence determination of the entire genome and assignment of the potential protein-coding regions. DNA Res. 1996; 3(3):109-136 ve 185-209.
[18] Sheng J, Vannela R, Rittmann BE. Evaluation of cell-disruption effects of pulsed-electric-field treatment of *Synechocystis* PCC6803. Environ Sci Tech 2011;45(8):3795-3802.
[19] Sheng J, Vannela R, Rittmann BE. Evaluation of methods to extract and quantify lipids from S*ynechocystis* PCC 6803. Bioresour Tech 2011;102:1697-1703.
[20] Kim WH, Vannela R, Zhou C, Rittmann BE. Nutrient acquisition and limitation for the photautotrophic growth of *Synechocystis* sp. PCC 6803 as a renewable biomass resource. Biotech Bioeng 2010;108(2):277-285.
[21] Marcus AK, Torres CI, Rittmann BE. Evaluating the Impacts of Migration in the biofilm anode using the model PCBIOFILM. Electrochimica Acta 2010;55(23):6964-6972.

[22] Torres CI, Krajmalnik-Brown, R, Parameswaran P, Marcus AK, ve ark. Selecting Anode-Respiring Bacteria Based on Anode Potential: Phylogenetic, Electrochemical, and Microscopic Characterization. Environ Sci Tech 2009;43(24):9519–9524.
[23] Lee HS, Parameswaran P, Marcus AK, Torres CI, Rittmann BE. Evaluation of energy-conversion efficiencies in microbial fuel cells (MFCs) utilizing fermentable and non-fermentable substrates. Water Res 2008;42(6-7):1501-1510.
[24] Parameswaran P, Zhang H, Torres CI, Rittmann BE, Krajmalnik-Brown R. Microbial community structure in a biofilm anode fed with a fermentable substrate: The significance of hydrogen scavengers. Biotech Bioeng 2009;105(1):69-78.
[25] Parameswaran P, Torres CI, Lee HS, Krajmalnik-Brown R, Rittmann BE. Syntrophic interactions between anode respiring bacteria (ARB) and non-ARB in a biofilm anode: electron balances. Biotech Bioeng 2009;103(3):513-523.
[26] Torres CI, Marcus, AK, Rittmann, BE. Proton transport inside the biofilm limits electrical current generation by anode-respiring bacteria. Biotech Bioeng 2008;100(5):872-881.