

Sürdürülebilir ve çevre dostu biyoyakıt hammaddesi: Mikroalgler Sustainable and eco-friendly raw materials for biofuels: Microalgae

Sevil ÇALIŞKAN ELEREN^{1*} , Burak ÖNER² 

¹Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye.

sceleren@uludag.edu.tr

²Fen Bilimleri Enstitüsü, Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye.

onerburak@yandex.com

Geliş Tarihi/Received: 05.02.2018, Kabul Tarihi/Accepted: 16.04.2018

* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2018.93992

Derleme Makalesi/Review Article

Öz

Son yıllarda petrol rezervlerinin hızlı tüketilmesi ve buna bağlı olarak meydana gelen sera gazlarının çevre üzerinde olumsuz etkileri neticesinde, endüstriyel ekonomi ve toplum tüketimi için sürdürülebilir ve çevre dostu alternatif enerji kaynağı olan mikroalgler ön plana çıkmıştır. Bu çalışma kapsamında, biyoyakıt üretim proseslerinin seçimini etkileyen mikroalglerin kimyasal kompozisyonu, mikroalg kültürü yetiştirilmesini etkileyen faktörler, kültür yetiştirmede kullanılan sistemler, biyoyakıt üretim prosesleri ve ekonomik analizleri incelenmiştir. Mikroalglerin içeriği, dönüştürme proseslerini etkilemekte ve elde edilen biyoyakıtlar farklılık göstermektedir. Bu inceleme neticesinde, mikroalgler kullanılarak biyodizel, biyoetanol, metan ve mikroalg kalıntılarının yakılması veya gazlaştırılması ile ısı ve elektrik üretiminin söz konusu olabileceği tespit edilmiştir. Mevcut teknolojiler ile biyoyakıt üretimi için alg yetiştirilmesinin tam ölçekli uygulamaları oldukça pahalıdır. Alg üretim maliyetlerini azaltmak için bölgesel enerji santralleri veya endüstriyel baca gazı ve atıksu arıtma tesisleri etkili ve entegre bir şekilde kullanılabilir.

Anahtar kelimeler: Mikroalg, Biyoyakıt, Baca gazı, Atıksu arıtımı

Abstract

Microalgae, a sustainable and environmentally friendly alternative energy source for the industrial economy and community consumption, has come to the forefront in recent years due to the rapid depletion of oil reserves and consequent negative effects of greenhouse gases on the environment. In this study, the chemical composition of microalgae affecting the selection of biofuel production processes, factors affecting microalgae cultivation, cultivated systems, biofuel production processes and its economic analysis are examined. The content of microalgae affects the conversion processes, and the obtained biofuels from microalgae show differences. As a result of this investigation, it has been concluded that the heat and electricity production may be obtained from burning or gasification of microalgae residues. Biodiesel, bioethanol and methane can also be produced using microalgae. The full-scale applications of algae cultivation for biofuel production with existing technologies are quite expensive. To reduce algal production costs, the regional power plants or the industrial flue gas and the wastewater treatment plants should be used in an effectively and integrally.

Keywords: Microalgae, Biofuel, Flue gas, Wastewater treatment

1 Giriş

Dünya üzerinde her alanda ihtiyaç duyulan ve bu talebe karşılık olarak arz edilen enerji arasındaki fark her geçen gün daha da artmaktadır. Enerji ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılan fosil yakıtlar dünyada sadece birkaç ülkede bulunmakta ve bu durum diğer ülkeleri enerji konusunda bu ülkelere bağımlı kılmaktadır [1]. Fosil yakıtların sınırlı olması ve gelecekte yüksek miktarda enerji ihtiyacı söz konusu olacağı göz önüne alındığında, bu enerji krizi fosil yakıtlar ile sürdürülemez hale gelecektir [2]. Diğer taraftan ekonomik, ekolojik ve çevresel açılardan da fosil yakıtlar sürdürülebilir değildir [3].

Fosil yakıtların tüketilmesi ile birlikte küresel ısınmaya sebep olan CO₂ miktarı önemli ölçüde artmaktadır. Petrol rezervlerinin hızlı tüketilmesi ve buna bağlı olarak meydana gelen sera gazlarının çevre üzerinde olumsuz etkileri son yıllarda etkisini arttırmıştır. Bu nedenle, endüstriyel ekonomi ve toplum tüketimi için sürdürülebilir ve çevreye zararsız kaynakların kullanımı ön plana çıkmaya başlamıştır [3]. Günümüzde güneş, rüzgâr, jeotermal, okyanus enerjisi ve biyoyakıt gibi birçok enerji kaynağı fosil yakıtların yerini almaya başlamıştır [4]. Uluslararası işbirlikçiler, gelecekteki enerji talebini karşılamak için sera gazı emisyonlarını ortadan kaldırma potansiyeline sahip çevre dostu biyoyakıtları alternatif enerji kaynağı olarak düşünmektedirler [2].

ABD Enerji Bakanlığı (DOE), 1978'ten 1996'ya kadar Golden, Colorado'da Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı'nda sucül türler programında algal yakıt araştırmalarına 25 milyon dolar ayırmıştır. Bu program, bugünkü alg temelli tabanlı biyoyakıt araştırmalarına bir kilometre taşı olarak yol açmıştır [5]. Son zamanlarda yapılan çalışmalarda mikroalglerin yenilenebilir enerji kaynakları içerisindeki potansiyeli dikkat çekicidir. Üçüncül nesil biyoyakıt olan mikroalglerin [6] fosil yakıtların yerine kullanılması dünya genelinde savunulan bir çözümdür [7],[8]. Algler temel olarak tek hücrelilerden çok hücreli yapıya kadar değişen geniş bir gruba içeren ototrofik organizmalardır. Bunlar, karasal biyokütleler ile karşılaştırıldığında çok daha büyük mikrobiyal biyokütle üretimi ve hektar başına daha fazla lipid üretme yeteneğine sahiptirler. Besinsel amaçlı ürün üretimi için uygun olmayan topraklarda yetiştirilebilir ve sudan verimli bir şekilde nutrient giderimi sağlarlar. Tarıma elverişli olmayan arazilerde yetişirken çoğu alg daha az suya ihtiyaç duyar ve bazı alg türleri bu su ihtiyaçlarını bölgedeki alkali ve tuzlu su rezervuarlarından sağlarlar [9],[10]. Algler karbon kaynağı olarak CO₂'i kullandıklarından dolayı, CO₂ salınımını azaltırlar. Yenilenebilir bir enerji kaynağı olan biyoyakıt üretilmesi ile birlikte, ilgili çevresel etkiler en aza indirilmiş olur [11]. Mikroalgler konvansiyonel ürünlerle karşılaştırıldığında çok yüksek büyüme hızına ve biyokütle üretmek için yüksek fotosentetik aktivitelere sahiptir. Özellikle sahip olduğu yüksek lipid içeriğinden dolayı biyodizel üretiminde alternatif kaynaklar arasında gösterilmektedir

[12],[13]. Mikroalg türlerinde lipit içeriği %1-70 arasında değişirken, belirli şartlar altında bazı türlerde bu değer %90'lara ulaşabilir [14].

Yapılarında büyük ölçüde karbonhidrat, yağ ve protein bulunan, hem sucul hem de karasal ekosistemlerde yaşayabilen mikroalglerin; biyoyakıt kaynağı olarak bazı avantajları vardır;

- Yüksek oranda güneş enerjisini tutma kapasitesine sahip, fotosentez yoluyla organik madde üretebilmesi,
- Fiziksel ve kimyasal stres altında fazla miktarda spesifik bileşikler üretebilmesi,
- Basit hücresel bölünme döngüsüne sahip olması,
- Farklı çevresel koşullarda (su, sıcaklık, tuzluluk ve ışık) gelişim gösterebilmesi,
- CO₂ yoluyla güneş enerjisini kimyasal enerjiye dönüştürebilen ve hızlı çoğalabilen canlılar olması,
- Yüksek büyüme hızı ve verimliliğe sahip olması,
- Fotosentez yoluyla verimli CO₂ alımı ile sera gazı emisyonunu azaltması,
- Tarımsal amaçlar için uygun olmayan alanlarda yetiştirilebilmesi sebebiyle biyoyakıt kaynağı olarak kullanımı avantajlıdır [13],[15].

Mikroalglerin bu avantajları, biyoyakıt üretimi için geçerliliği olan potansiyel bir hammadde olarak tanımlanmasını sağlar. Mikroalglerin lipit içeriği biyoyakıt üretiminde (biyodizel üretimi için) en değerli bileşen olarak tanımlanmasına rağmen, protein ve karbonhidrat içerikleri de farklı biyoyakıt türlerinin üretiminde kullanılabilir. Biyoyakıt üretim prosesinin ekonomisi için algal biyokütlelerin tüm kimyasal kompozisyonunun belirlenmesi gereklidir [16].

2 Mikroalglerin kimyasal kompozisyonu

Mikroalgler basit gelişimleri ve enerji korunumuna öncelik veren yapıları sayesinde bitkilere oranla daha hızlı büyüme oranına sahiptirler [17]. Farklı çevresel koşullarda yaşayabilme yeteneğinin yanı sıra yetiştirilme dönemlerindeki üretim parametrelerinin mikroalg gelişimine etkisi oldukça fazladır. Mikroalglerin yaşama koşulları ve üremeleri için gerekli parametrelerin literatür verileri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Mikroalglerin yetiştirilmesi için gerekli parametreler.

Parametreler	Literatür Verileri	Kaynaklar
pH	5,8-9	[18],[19]
Sıcaklık (°C)	25-36	[20],[21],[22]
Tuzluluk (g/l)	15-150	[23]
Işık Yoğunluğu (µmol m ⁻² s ⁻¹)	90-360	[24],[22]
Işıklanma Süresi (gündüz: gece)	12/12	[20],[25]
(h)	24/0	[25]

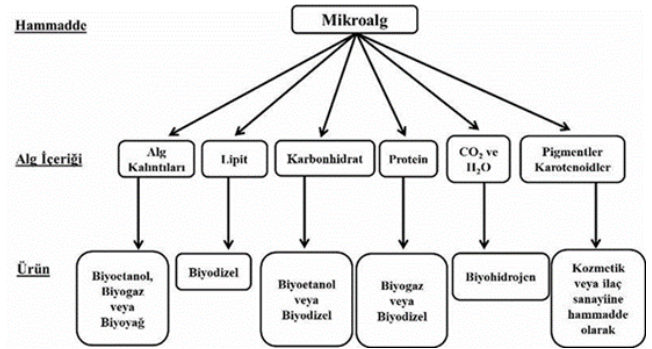
Mikroalgler 24 sa. gibi kısa bir sürede sayılarını 2 katına çıkarabilmektedirler. Mikroalgler yağ, karbonhidrat ve protein açısından oldukça zengindir ve çeşitli dönüşüm prosesleri ile farklı biyoyakıt türlerinin üretimlerini sağlarlar. Bazı mikroalg türlerinin içerdiği yağ, karbonhidrat ve protein miktarları Tablo 2'de verilmiştir.

Mikroalgler geniş enerji potansiyeline sahip çok yönlü bir hammadDEDİR. Mikroalglerde, doğal proteinler, lipitler, karbonhidratlar, vitaminler, pigmentler ve enzimlerin yüksek konsantrasyonlarından dolayı çok çeşitli ürünler üretilebilir

[40]. Alglerin içeriklerine bağlı olarak farklı dönüşüm yöntemleri kullanılıp, alglerden biyodizel, biyoetanol, biyogaz ve biyohidrojen gibi birçok yakıt üretilir [3],[41]-[44], (Şekil 1). Diğer taraftan, bazı alg türlerinin yüksek lipit içeriği biyodizel üretimi için umut vaat ederken, uzun zincirli yağ asitleri, pigmentler ve proteinler; beslenme ve ilaç uygulamaları için ayrılır [45].

Tablo 2: Bazı alg türlerinin protein, karbonhidrat ve yağ içerikleri.

Alg	Lipit İçeriği (%)	Protein (%)	Karbonhidrat (%)
<i>Chlorella protothecoides</i>	50.5 [26]	46.3 [27]	15.43 ± 0.17 [39]
<i>Botryococcus braunii</i>	27.37 [29]	-	20-76 [28]
<i>Spirulina platensis</i>	29.5 [31]	75.76 [30]	41.52 [30]
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	36-42 [38]	-	-
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	47 [32]	-	-
<i>Chlorella vulgaris</i>	51.41 [33]	44.3 [34]	58 [35]
<i>Scenedesmus obliquus</i>	54.6 [37]	50-56 [36]	76.6 [36]
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	23-62 [26]	48 [36]	17 [36]



Şekil 1: Mikroalglerin içeriğine bağlı olarak elde edilen ürünler.

Yüksek C/N oranı veya stres koşulları gibi özel kültürel koşullar altında algler tarafından çok miktarda lipit biriktirilir (ağırlık içeriğinin %30-50'si kadar). Mikroalg lipitler iki şekilde sınıflandırılır. 14-20 karbon içeren yağ asitleri biyodizel üretimi için uygundur. 20'den fazla karbon içeren çoklu doymamış yağ asitleri ise sağlıklı besin takviyeleri olarak kullanılır [45].

Etkili bir mikroalg lipit üretimini sağlamak için lipit içeriği ve biyokütle üretim hızı eş zamanlı düşünülmelidir. Yüksek oranda hücresel lipit, çözülebilir polisakkarit ve protein içeren mikroalgler; biyogaz ve biyoyağlara kolaylıkla piroliz edilebilir [33]. Yani sadece yağ değil, proteinler ve suda çözünen karbonhidrat bileşenleri de termokimyasal yöntemlerle kolayca gaz ve yakıtlara dönüştürülebilir [46],[47].

2.1 Mikroalg kültürü yetiştirilmesini etkileyen faktörler

Mikroalg kültürü yetiştirilmesi için sıcaklık, ışık yoğunluğu, karıştırma koşulları, besin kompozisyonu ve gaz değişimi gibi çevresel koşullar önemlidir. Her bir mikroalg türü için çevresel koşullar farklılık göstermektedir [48].

2.1.1 Sıcaklık

Mikroorganizmalara benzer şekilde mikroalglerin büyüme oranı sıcaklık optimum koşullara ulaşana kadar üstel bir şekilde artmaktadır. Optimum sıcaklığın üstünde, sıcaklık artışı çoğalma hızının düşüşüne neden olur. Bu olay özellikle güneş

radyasyonu ve sıcaklık kontrolünün sınırlı olduğu ortamlarda oldukça önemlidir. Bu nedenle ortam koşullarına uygun alg türlerinin seçilmesi önem arz etmektedir [48]. Yapılan bazı araştırmalara göre yüksek büyüme sıcaklığı protein içeriğinin azalmasına, lipit ve karbonhidrat içeriğinin artmasına sebep olmakta iken, diğer araştırmalara göre ise yüksek büyüme sıcaklığı protein içeriğinin artmasına karbonhidrat ve lipit içeriğinin azalmasına sebep olmaktadır [48],[49]. Çelişki gibi gözükse de bu farklılık, mikroalglerin kimyasal kompozisyonunun üzerinde, sıcaklığın etkisinin türden türe farklılık göstermesi şeklinde açıklanabilir.

2.1.2 Işık yoğunluğu

Algal hücrelerdeki protein, yağ ve karbonhidrat miktarı [49],[50] ve kalitesi [50] çoğalma koşulları (sıcaklık ve ışık yoğunluğu) ile değişim gösterir. Işık kaynağı ve ışık yoğunluğu, açık ve kapalı mikroalg kültür sistemlerinin her ikisinde de çoğalma performansını etkileyen kritik faktörlerdendir. Işık faktörü fotosentez reaksiyonları sırasında önemli bir rol oynar. Aydınlatma tasarımında aydınlık-karanlık döngü modeli üzerinde yoğun çalışmalar yapılmıştır. Genel olarak mikroalgler, fotosentez için 400-700 nm dalga boylarındaki ışığı kullanırlar. Mikroalgler tarafından absorbe edilen dalga boyları türe göre değişir [51],[52]. Işık kullanım verimliliği, mikroalg türlerinin yetiştirilmesinden iyi sonuç almak için her koşulda en uygun düzeyde tutulmalıdır. Çok düşük ışık yoğunluğunda alg büyüme hızı düşük olmaktadır. Fotosentetik aktivite ışık yoğunluğu ile birlikte eşik noktasına kadar artmaktadır. Işık yoğunluğu, eşik noktasının üzerine çıktığı zaman hücre içerisindeki kloroplastlarda ışık reseptörlerine zarar verir ve fotoinhibisyon olarak bilinen fotosentez hızının düşmesine sebep olur [48],[53],[54]. Fotobiyoreaktörlerde alg kültürleri, ışık dağılımında homojensizliğe neden olan yüksek optik yoğunluğa ulaşmaktadırlar. Diğer bir ifadeyle yüzeyde bulunan hücreler ışığı doğrudan maruz kalmakta ve ışınımın çoğunu absorbe etmektedir. Fotobiyoreaktörlerde karanlık bölgede kalan mikroalg kültürleri ise büyümelerini sınırlayan ışığın yalnızca küçük bir bölümünü alabilirler. Sonuç olarak ışık dağılımının homojensizliği fotobiyoreaktörlerin derinliği boyunca mevcut enerjiyi kullanma verimliliğinde düşüslere neden olmaktadır [48],[55]. Farklı aydınlatma stratejilerine sahip çeşitli biyoreaktör dizaynları geliştirilerek, mikroalg üretimi ve yağ/lipit oranları artırılmaya çalışılmıştır [13]. Fotobiyoreaktörlerin etkinliğini arttırmak ve yüksek seviyede mikroalg biyokütlesi üretmek için iyi bir aydınlatma tasarımı ile (belirli bir ışık yoğunluklu) karanlık/aydınlık döngü modeli kullanılmalıdır [54],[56]. Işık rejimi; ışık yoğunluğu, reaktör tasarımı ve boyutlar, hücre yoğunluğu, hücrelerin pigmentasyonu ve karıştırma gibi pek çok faktörden etkilenir [57]. Dış mekândaki fotobiyoreaktörler de ışık rejiminden etkilenir. Bunlarda coğrafi konum, hava durumu ve saat dilimleri (aydınlık/karanlık) önemlidir [57].

2.1.3 Karıştırma etkisi

Karıştırma performansı alg kültürlerinin büyümesinde büyük katkı sağlamaktadır. Kuvvetli karıştırma alg hücrelerini süspansiyon halinde tutar, termal tabakalaşmayı ortadan kaldırır, besini homojen olarak dağıtır ve özellikle fotobiyoreaktörlerde oksijen birikimini önlemek için gaz-sıvı kütle transferini geliştirir. Ancak, mikroalg hücrelerine zarar veren fazla karıştırma uzak durmak gerekir. Karıştırmanın diğer bir etkisi de ışıklandırma sürecinde karanlık bölgede yer alan alg hücrelerini aydınlık bölgeye taşımasıdır [58]. Reaktör içindeki hafif eğim ve karıştırma özelliklerine bağlı olarak

algler, ışık periyodunun hafif bir değişimle karakterize edildiği belirli bir aydınlık/karanlık döngüye maruz kalır. Bu aydınlık/karanlık döngüler, üretkenliği ve biyokütle verimini belirler [59].

2.1.4 Besin

Alg yetiştiriciliği ve hasat işleminin her ikisinde de enerji ve maliyet yoğunudur. Özellikle algal biyoyakıt üretimi için mevcut işleme ve kültivasyon yöntemleri ekonomik ve sürdürülebilir değildir. Algal biyokütle üretimi için nutrient içeren uygun çoğalma ortamı gereklidir. Mevcut yöntemlerle büyük miktarda nutrient kullanımı gerekmektedir. Bu durumda ihtiyaç duyulacak olan besin miktarının temini konusunda maliyetlerin artması sonucu, çevresel fayda-maliyet sorunu ortaya çıkacaktır. Algler çoğalma için esas olarak ışık (enerji), karbon kaynağı (ototrofik metabolizma için CO₂), büyüme ortamı (su) ve besinlere (azot-fosfor) ihtiyaç duyarlar. Bazı alg türleri karbon kaynağı olarak evsel ve endüstriyel atıksu gibi atık organik kaynakları kullanabilirler [60]. Çoğu kültür ortamında gerekli olan makro besinlerden azot ve fosforun oranı 16N:1P olmalıdır. Alg kültürü gelişimi için gerekli olan besin maddelerinin optimizasyonu üretim maliyetlerini düşürerek ekonomik fayda sağlamaktadır [48],[60].

2.1.5 Gaz değişimi

Fototrofik büyüme sırasında mikroalgler karbondioksiti (CO₂) tüketirler ve oksijen (O₂) üretirler. Kapalı sistemlerde O₂ yüksek konsantrasyonlara ulaştığında mikroalgler bu durumdan negatif yönde etkilenirler. Bu nedenle ortamdaki yüksek O₂ miktarı, sisteme CO₂ gazı ilave edilerek dengelenir. Yüksek O₂:CO₂ oranı mikroalglerin büyüme ve üreme kapasitesine olumsuz etki edebilmektedir. CO₂, kültür sistemlerinde pH'ın kontrol edilmesinde önemli bir etken maddedir [48],[61].

2.2 Mikroalg yetiştirilmesi için kullanılan sistemler

Kendilerine ait spesifik özelliklerinden dolayı alg türlerinin yetiştirildiği ortamlar farklılık göstermektedir. Mikroalg yetiştirme sistemleri açık havuzlar ve kapalı fotobiyoreaktörler olarak sınıflandırılabilir. Maliyetlerinin az olması ve basitliğinden dolayı açık havuzlar [13],[62] daha çok tercih edilmektedir. Ancak açık sistemlerde, istenmeyen türlerin oluşması ve daha az verimlilik gibi etkenler mikroalg yetiştirilmesi için dezavantaj oluşturmaktadır [48]. Kapalı fotobiyoreaktörlerde alglerin yetişmesi için gerekli olan fiziksel ve kimyasal parametreler kontrol altında tutulabilir. Ayrıca kapalı sistemler, istenmeyen türlerin oluşumunun engellenmesi, sabit kültür koşullarının oluşturulması, hidrodinamiğinin ve sıcaklığın sabit tutulabilmesi ve ışık dağılım verimliliğinin düzenlenebilmesi gibi avantajlara da sahiptir. Algler dış ortamlarda, göletler, tanklar ve havuzlarda yetiştirilebilmektedir. İç ortamlarda ise torbalarda üretim gibi küçük ölçekli sistemlerde; big-bag sistemleri, tübüler fotobiyoreaktörler, düz-levha fotobiyoreaktörler gibi büyük ölçekli sistemlerde yetiştirilmektedir [63]-[65].

2.2.1 Açık havuzlar

Fototrofik büyüme koşulları altında, mikroalgler güneş enerjisini absorblar ve havadaki ve sucul yaşamdaki besinlerden karbondioksiti özümserler. Reaktör seçimi, mikroalg üretim verimliliğini etkileyen ana faktördür.

Açık havuzlar, yatırım maliyetinin ve sermayesinin düşük olmasından dolayı endüstriyel faaliyetlerde kullanılan ve büyük alanlara ihtiyaç duyulan sistemlerdir. Bu sistemlerde

sıcaklık kontrolü, günlük ve sezonsal dalgalanmalardan dolayı zordur. Işık yoğunluğunun zayıf olması, sıcaklık dalgalanmaları, pH'nın etkisi ve çözünmüş oksijen konsantrasyonu mikroalglerin büyüme parametrelerini sınırlandırabilir. Düşük biyokütle verimliliği (0.1-1.5 g/L) ile oluşan işletme zayıflığı ve istenmeyen türlerin oluşması sistem kontrolünü zorlaştırmaktadır. Açık havuzlar farklı formlarda kullanılabilirler. Bunlar; yosun havuzları, sıg veya büyük dairesel havuzlardır.

Merkezi mil etrafında dönen karıştırıcı dairesel havuzlar bilinen en eski alg yetiştirme tanklarıdır. Bu sistemlerin tasarımı, daha büyük karıştırıcının inşasının güç olmasından dolayı 10000 m² olacak şekilde tasarlanır.

Yosun havuzları mikroalg üretimi için kullanılan en yaygın yöntemdir. Bu sistemler kapalı döngü ve oval şekilli sirkülasyon kanalları şeklinde, 0.2-0.5 metre aralığında, homojenliği sağlamak için bir çark ile karıştırılacak şekilde inşa edilir. Yosun havuzları beton, fiber cam ya da membranlardan yapılabilir.

Spirulina ve *Chlorella*, açık sistemlerde en çok yetiştirilen mikroalg türleridir. Açık sistemlerde mikroalg ekimi düşünüldüğünde mikroalglerin biyolojisi, arazi maliyeti, sistemdeki su ve besin, yerel iklim koşulları ve oluşacak nihai ürün gibi birçok parametre göz önünde bulundurulmalıdır [15].

2.2.2 Kapalı sistemler (Fotobiyoreaktörler)

Mikroalgler için kapalı kültür sistemleri, açık sistemlere nazaran bazı avantajlara sahiptir. Bu tür sistemler güneş ışığının daha geniş bir yüzey alanına dağılmasını sağlar. Bu şekilde aydınlatmanın verimli kullanılması nedeniyle daha yüksek hücre yoğunluğuna ulaşılır [66]. Kapalı sistemlerin kullanılmak istenmemesinin en önemli nedeni ise yüksek yatırım maliyetleridir. Fotobiyoreaktörler, alglerin yetiştirilmesi esnasında açık sistemlere göre ortam şartlarının kontrolünün sağlanabilmesi, daha düşük alan ihtiyacı, su ve CO₂ kayıplarının az olması ve hemen hemen tüm mikroalg türlerinin yetiştirilmesine olanak sağlaması ile daha yüksek biyokütle verimliliği sağlamakta, kirlilik oluşumu minimize edilmekte ve güneş ışığından daha verimli istifade edilmektedir [67]. Kapalı sistemler içinde en fazla boru ve plaka şeklinde fotobiyoreaktörler kullanılmaktadır. Bunun dışında torba şeklinde biyoreaktörler de vardır. Fotobiyoreaktörler inşa edilirken çeşitli şeffaf plastikler veya konteynerler kullanılmaktadır. Uzun yıllar süren araştırmalar sonucu düz-panel, tübüler ve dikey-kolon fotobiyoreaktörler gibi yüksek verimli özelliklere sahip birbirinden farklı fotobiyoreaktörler tasarlanmıştır [68].

Düz-panel fotobiyoreaktörler daha iyi ısı transferi ile düşük enerji tüketimi, etkili karıştırma, ölçek büyütme uygunluğu, düşük yatırım maliyeti ve taşıma kolaylığı gibi etkilerden dolayı diğer sistemlere göre daha fazla avantaj sağlamaktadır [69]. Pulz [70] tarafından geliştirilen birkaç panelin yatay olarak yerleştirilmesiyle elde edilen biyoreaktör ve Richmond ve Cheng-Wu [71] tarafından geliştirilen plakaların dikey olarak yerleştirilmesinden oluşan iki tip düz panel fotobiyoreaktör de mevcuttur. Yatay olarak kullanılan paneller yüksek stabilizasyon sağlamaları ve daha kolay mikroalg yetiştirilmesine imkan verdiğinden dolayı mikroalg üretimi için daha çok tercih edilmektedir [72].

Tübüler fotobiyoreaktörleri diğer açık sistemlerle kıyaslandığında; yüksek yatırım maliyetine karşılık, dış ortamlarda mikroalg yetiştirilmesi için kültür koşullarının daha

iyi kontrolü, kirliliğin azaltılması ve yüksek ışık kullanım verimliliği sağlamaktadırlar [73],[74]. Bu sistemler birbiri ardına düz yatay şeffaf boruların dizilimi ile oluşan yatay sistemler ve birbiri ardına dikey şekilde yerleştirilmiş dikey sistemler olarak ikiye ayrılmaktadır. Borular genellikle cam veya plastikten 0.1 m çapında olacak şekilde üretilmektedir [75]. Dikey tübüler fotobiyoreaktörler mikroalglerin fotoototrofik büyümesi için daha iyi karıştırma veriminden ve daha yüksek CO₂ tutma süresinden dolayı daha elverişlidir [76].

Birçok fotobiyoreaktör seçenekleri arasında dikey kabarcık kolon fotobiyoreaktörleri basit dizayn edilmesinden, kolay işletilmesinden ve enerji tasarrufu sağlamasından dolayı avantajlı konumdadır. Ayrıca mikroalg yetiştirilmesi için kullanılan bu tip fotobiyoreaktörler ekonomik açıdan da ön plana çıkmaktadır. Mikroalg yetiştirilmesi için kullanılan dikey kolon fotobiyoreaktörler ışığın sınırlı kullanılmasından dolayı dezavantaj sağlamaktadırlar. Dikey kolon fotobiyoreaktörleri yüksek hacimsel gaz transfer katsayısı ile karakterize edilir. Bu duruma alttan verilen gaz kabarcığı sebep olur. Bu gaz kabarcıkları da sadece verimli CO₂ kullanımına değil, aynı zamanda optimum O₂ giderimine de olanak tanır [77],[78].

Plastik torba tip fotobiyoreaktörler son yıllarda düşük maliyetlerinden dolayı ticari mikroalg üretimi için kullanılmaktadır. Bu tip torbalar hücre verimini arttırmak için aeratörler ile birlikte kurulur. Birçok araştırmacı tarafından tercih edilmesinin yanında dezavantajları da vardır. Yerçekimi nedeniyle torbaların bozulması sonucunda ışık kısıtlamaları ve sızıntılar yaygındır. İkinci olarak yetersiz karıştırma nedeniyle bazı bölgelerde hücre büyümesi inhibe olabilir. Torba bozulmalarından dolayı uzun vadede ekonomik değerlerdir ve bozulan plastik torbaların bertarafı da problem teşkil eder [79].

2.3 Mikroalglerden biyoyakıt üretimi

Enerji sektörünün ihtiyacını ortadan kaldırmak için, biyodizel, biyoetanol, biyogaz ve biyohidrojen gibi biyoyakıtlar, fosil yakıtların yerine alternatif yakıt kaynağı olarak tercih edilmektedir. Biyoyakıtlar birinci, ikinci ve üçüncü nesil biyoyakıtlar olarak üç farklı yakıt grubu altında toplanmaktadır [3].

Dünyamızda nüfus artışına paralel olarak gıda maddesi temininde yaşanan sıkıntılar, bitkilerin besin kaynağı olarak mı yoksa yakıt olarak mı kullanılacağı tartışmalarının beraberinde getirmiştir. Ancak gelecekte yaşanması muhtemel enerji krizleri alternatif enerji kaynaklarına ihtiyaç sorunlarını daha da şiddetlendirecektir. Bu nedenle biyoyakıt üretimi için besin kaynağı olarak arz edilmeyen yeni kaynak arayışlarına gidilmiştir. Üçüncül nesil biyoyakıt olan algler yeni kaynak arayışında umut verici hammaddelelerdir [3],[80].

Mikroalglerin hammadde olarak kullanıldığı farklı proseslerin uygulanması ile elde edilen biyoyakıt ürünleri Şekil 2'de verilmiştir.

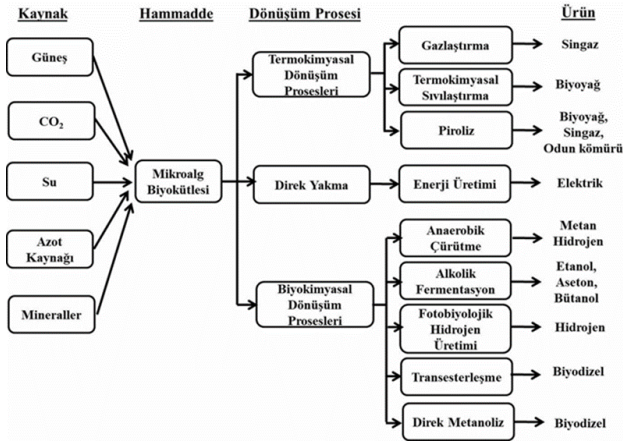
2.3.1 Mikroalglerden biyodizel üretimi

Biyodizel bitkisel yağlar, kullanılmış atık yağlar ve hayvansal yağların uygun katalizör eşliğinde alkol ile kimyasal tepkimesi sonucu açığa çıkan bir yakıt türüdür [82].

Mikroalglerden biyodizel üretimi, alg biyokütlesinin sahip olduğu lipit içeriğine bağlı kalmaktadır. Mikroalglerin yağ verimleri (ağırlıkça %70 veya %30 yağ içeren mikroalgler için sırası ile 136900 l/ha ve 58700 l/ha) farklı biyokütle kaynakları ile karşılaştırıldığında, (kolza tohumu (1190 l/ha) ve palmye yağı (5950 l/ha) gibi biyodizel üretiminde çok fazla kullanılan

biyokütlelerden) daha fazla yağ verimine sahip olduğu görülmektedir [83].

Mikroalglerden elde edilen lipitler kimyasal açıdan bitkisel yağlara benzemektedir ve biyodizel için alternatif hammadde olarak düşünülebilmektedir. Trigliseridler, mikroalglerin kolayca biyodizelle dönüştürülebilmesi için sahip oldukları ana bileşenlerden bir tanesidir. Mikroalglerden elde edilen biyodizel enerji dostu ve sürdürülebilir bir seçenektir. Üretilen biyodizel önemli bir motor değişikliği yapılmadan dizel motorlarda belli oranlarda harmanlanarak kullanılabilir [70].



Şekil 2: Mikroalgal biyokütleden biyoyakıt üretimi için dönüşüm prosesleri. ([3],[43],[81]'ten uyarlanmıştır).

2.3.2 Mikroalglerden biyoetanol üretimi

Biyoetanol fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı benzin gibi yakıt türlerine alternatif bir biyoyakıttır. Biyoetanol, temel substrat olarak karbondioksiti kullanılmasıyla fermentasyon sonucu üretilen bir yakıt türüdür. Biyoetanol birincil nesil olan gıda ürünlerinden şekerli ne nişastalı hammaddelerden, ikincil nesil olan lignoselülozik biyoküttelelerden elde edilebilmektedir. Birincil nesil biyoküttelelerin gıda olarak talep edilmesinden ve ikincil nesil biyoküttelelerin ise biyoetanol üretiminden önce ön arıtım uygulanması gerekliliğinden dolayı farklı yakıt arayışlarına gidilmiştir. Üçüncül nesil biyokütteleler olarak bilinen mikroalgler biyoetanol üretimi için en uygun biyokütle türleri arasında yerini almıştır [84],[85].

Mikroalgler biyoetanol üretimi için lipid dışında güneş ışığına bağlı olarak karbondioksiti karbondihidrata dönüştüren hücre fabrikalarıdır. Mikroalg esaslı biyoetanol fermentasyonu lignoselülozik biyoküttelelerin fermentasyonuna göre daha fazla avantaja sahiptir. Mikroalg esaslı karbondihidratlar, ağırlıklı olarak polisakkarit, nişasta ve selüloz formundadır. Hidroliz reaksiyonu sayesinde karbondihidratlar fermente şekere hidroliz edilmektedirler. Genellikle kimyasal (asit ve alkalın) veya enzimatik hidroliz, karbondihidratların hidrolizi için kullanılan yaygın metotlardır. Mikroalglerden elde edilen şeker, fermentasyon ile biyoetanole dönüştürülür. Ayrıca hidroliz ve fermentasyon (AHF) ve eş zamanlı sakkarifikasyon ve fermentasyon (ZSF), fermentasyon prosesi için yaygın olarak kullanılan iki yöntemdir [86],[87].

2.3.3 Mikroalglerin anaerobik fermentasyonu sonucu metan üretimi (biyokimyasal dönüşüm teknolojisi)

Mikroalgler taksonomik sıralamada süper alem adı altında değerlendirilmekte ve oldukça yüksek oranlarda ışık enerjisini ve inorganik besinleri fotosentez yolu ile organik biyokütleyle dönüştürebilmektedir. Mikroalgal biyoküttelelerin

fermentasyonu, anaerobik bozunma ve fotobiyolojik üretim teknikleri gibi farklı yaklaşımlar ile biyokimyasal dönüşümü gerçekleştirilebilir. Bu dönüşüm teknolojileri çoğunlukla mikroorganizma ve enzimatik prosesleri içerir. Ancak bu teknikler düşük dönüşümleri ve yüksek üretim maliyetlerinden dolayı pek tercih edilmezler [43]. Alkollik fermentasyon, biyolojik materyalin (şeker, selüloz, nişastanın) etanole dönüşümü prosesidir. Anaerobik bozunma, mikroalglerin biyogaza dönüşümüdür [44]. Birçok araştırma mikroalglerin anaerobik bozunma ile metan üretimi için uygun bir biyokütle olduğunu göstermektedir. Karasal bitkiler yerine bozunma yeteğine sahip mikroalglerin, lignoselüloz yapılarından yoksun olduğu için biyogaz tesislerinde hammadde olarak kullanımı uygun görülmektedir [88]. Biyogaz içerisindeki yüksek miktarlarda CO₂ ve H₂S oluşması durumunda yakıtın kullanımı ve verimi kısıtlanmaktadır [89]. Karbondioksiti biyolojik olarak hapseden mikroalgler, CO₂ miktarını azaltarak metan içeriğinde artışa neden olduklarından dolayı biyogaz kalitesini arttırmak için kullanılabilirler.

Mikroalgler H₂ gazı üretmek için gerekli genetik, metabolik ve enzimatik karakteristiklere sahiptirler. Ökaryotik mikroalglerden anaerobik koşullar altında hidrojen gazı üretilir (ya CO₂ fiksasyonu prosesinde elektron verici olarak veya aydınlık/karanlık sürecinde geliştirilerek). Fotosentez boyunca; mikroalg su moleküllerini hidrojen ve oksijene dönüştürür. Daha sonra hidrojen iyonları hidrojenaz enzimi ile anaerobik koşullarda hidrojen gazına dönüştürülür.

2.3.4 Mikroalg posasından termokimyasal dönüşüm teknikleri ile yakıt eldesi

Mikroalglerden biyodizel üretimi için lipid ekstraksiyonundan sonra büyük miktarlarda kalıntılar oluşmaktadır. Bu kalıntılardan, hayvan yemi veya biyoetanol üretimi söz konusu olabilir. Mikroalg biyokütle kalıntılarında elde edilebilecek diğer bir alternatif biyoyakıt ise; piroliz veya hidrotermal proseslerden biyoyağ üretimidir [90],[91]. Algal biyokütlenin 24 MJ/kg civarında sahip olduğu yüksek ısı değerinden dolayı biyoyakıt üretimi için mikroalgler ön plana çıkmaktadır. Doğrudan yakma, gazlaştırma, piroliz ve sıvılaştırma gibi prosesler olan termokimyasal uygulamalar ile yakıt üretiminde biyolojik kütlelerin organik bileşenleri termal olarak ayrıştırılabilmektedir.

Biyokütlenin gazlaştırılması ile düşük değerli hammaddeden yüksek değerli bir ürün elde edilmektedir. Gazlaştırma prosesinde çeşitli karbonlu içerikler yüksek sıcaklıklarda (800-1000 °C) yakıt gazına veya sentez gazına dönüştürülmektedir. Gazlaştırma prosesinde ürün elde etme aşamasında su buharından faydalanılmaktadır [92].

Yakma, hava veya oksijen varlığında biyokütle yakıtlarının çeşitli enerji türlerine dönüştürülme prosesidir. Bu süreçte fotosentetik olarak biyoküttelede depolanan kimyasal enerji sıcak gazlara dönüşür. Yakma prosesi için nem içeriği %50'den az olmalıdır. Yakma prosesi, mikroalgal biyokütle kullanımı için literatürdeki en basit ısı-enerji üretimi kombinasyonudur [43]. Yakma prosesleri dünya genelinde üretilen biyoenerjinin %97'lik kısmını oluşturmaktadır [93]. Piroliz, oksijensiz ortamda 425-500 °C sıcaklıkta gerçekleşmekte ve protein, karbondihidrat ve lipid içeriğine bağlı olarak mikroalglerden elde edilen piroliz yağı oranı %50'lere kadar çıkabilmektedir. Elde edilen piroliz yağı çeşitli işlemler sonunda yakıt olarak kullanılabilir [94].

Hidrotermal sıvılaştırma prosesi ile mikroalgler katalizör eşliğinde ya da katalizör olmadan sıvı ham yağa dönüştürülmektedir. Reaksiyon 280-370 °C sıcaklıkta ve 10-25 Mpa basınç altında su içerisindeki ıslak biyokütle üzerinde gerçekleşir. Mikroalglerden hidrotermal sıvılaştırma yöntemi ile biyolojik yağ üretimi son yıllarda yoğun ilgi görmektedir. Büyük ölçüde lipid içeriğine bağlı olarak elde edilen biyodizel nazaran hidrotermal sıvılaştırma sadece lipid içeriğini değil ayrıca karbonhidrat ve proteinleri de dönüştürmektedir [91].

3 Eysel ve endüstriyel atıksular ile mikroalg üretimi

Alg temelli biyoyakıtlar tarafından sunulan faydalara rağmen, özellikle mevcut teknolojiler ile suni ortamlarda biyoyakıt üretimi için alg yetiştirilmesinin tam ölçekli uygulamaları oldukça pahalıdır. Bu sistemler ile biyoyakıt üretiminin, pozitif enerji geri dönüşü ve ekonomik olması mümkün değildir. Alglerin yetiştiriciliği ve hasadı için büyük enerji girdileri gereklidir. Bu nedenle alg üretiminin atıksu arıtımı ve enerji tesislerinden CO₂ kullanımı gibi endüstriyel faaliyetler ile entegrasyonu ekonomik maliyetlerin azaltımı için fayda sağlar. Mikroalglerin atıksularda üretimi, azot fosfor giderimi ve mikroalg yetiştiriciliği için önemli bir kazanım sağlayabilir. Mikroalglerin verimli bir şekilde yetiştirmek için baca gazı da kullanılabilir. Bu fayda-maliyet analizinde hesaba katılabilir. Aynı şekilde mikroalglerin de tüm bileşenlerini kullanmak gereklidir. Atıksu arıtımının, baca gazı kullanımının ve biyoyakıt üretimi için mikroalg yetiştiriciliğinin eş zamanlı yapılması; mikroalglerin biyoyakıt üretiminin enerji maliyetini azaltıp, gaz emisyonu, nutrient ve tatlısu kaynak maliyetlerinin azaltılması ile ilgili olarak cazip bir seçenek olur.

Mikroalgler evsel ve endüstriyel atıksularda çoğalabilirler. Atıksuda yetişen mikroalglerin yüksek biyokütle verimliliği, atıksuda mikroalg yetiştirilmesinin yenilenebilir ve sürdürülebilir bir kaynak olarak uygun bir yaklaşım olmasını sağlar.

Zhou ve diğ. [95], algleri yetiştirmek için atık su kullanmanın, muhtemel nutrient ve su ile ilişkili üretim maliyetlerini düşüren en umut verici yol olduğunu bildirmişlerdir. Atıksuda mikroalglerin verimli büyümesi, değişkenlerin çeşitliliğine bağlıdır. Her büyüme ortamında olduğu gibi büyüme ortamının pH'ı ve sıcaklığı, N, P ve organik karbon konsantrasyonları, ışık, O₂ ve CO₂ kritik değişkenlerdir [96]. Atıksu ortamında N ve P gibi nutrient konsantrasyonları yüksektir. N' un büyük bir kısmı, yüksek konsantrasyonlarında alg büyümesini inhibe edebilen amonyak formundadır [96]-[98]. Kadmiyum veya civa gibi toksinlerin varlığı veya organik kimyasallar, atıksuda alg büyümesinin diğer kritik faktörleridir ve bu durum özellikle endüstriyel kaynaklı atıksularda bir sorun oluşturur. Patojenik bakteriler veya avcı zooplanktonlar alg büyümesi üzerinde negatif etki oluşturan biyotik faktörlerdir [99]. Bu değişkenler, bir atıksu arıtma tesisinden diğerine veya atıksu karakteristiğine bağlı olarak değişir [100].

Pek çok çalışmada [101]-[104], evsel atıksuların arıtılması için *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Phormidium*, *Botryococcus*, *Chlamydomonas* ve *Spirulina* gibi çok çeşitli mikroalglerin kullanılmasının etkinliğinin umut verici olduğu rapor edilmiştir [105].

Mikroalgler evsel atıksulardan N ve P'u oldukça etkili bir şekilde gidermektedirler. *Chlorella* ve *Scenedesmus*'un çeşitli türleri çok yüksek oranda (>% 80) N ve P giderimi sağlayabilir

[106]-[108]. *C.vulgaris* birincil arıtılmış kanalizasyondan N'nin %90'ından fazlasını fosforun %80'inini giderir [99]. *Chlorella* ve *Scenedesmus* genellikle oksidasyon havuzlarında [109] ve yüksek hızlı alg havuzlarında [110] fitoplanktonik toplulukların baskın türleridir. Örneğin, *Chlorella vulgaris* atık sudan N ve P'u, *Chlorella kessleri*'den daha etkili bir şekilde tüketir [111]. Başka bir çalışmada da *Scenedesmus obliquus*'un evsel atıksularda *C. vulgaris*'ten daha iyi büyüdüğü tespit edilmiştir [112].

Eysel atıksularda yetiştirilen farklı türlerde alglerin (*Chlamydomonas reinhardtii*, *Scenedesmus obliquus*, *Botryococcus braunii*, *Chlorella sp.*, *Micractinium sp.*, *Actinastrum sp.*) atıksu karakteristiği ve atıksu arıtma tesisinin tipine göre farklı biyokütle üretim potansiyelleri (25-2000 mg/L.gün) ve farklı lipid verimlilikleri (8-505 mg/L.gün) vardır [96],[103],[106],[113],[114].

Hindistan'da atıksu arıtımı yapılan oksidasyon havuzlarında *Chlorella minutissima* türü tespit edilmiştir [115]. *C. minutissima* ham kanalizasyon suyunun yüksek konsantrasyonlarında iyi yetişebilir ve oksidasyon havuz sisteminin sonraki adımlarının hâkim türü olur. Analizler, bu türün karanlıkta heterotrofik olarak büyüebileceğini, geniş bir pH aralığında ve tuz varlığında yaşayabildiğini, ışıktaki mikotrofik olarak davranarak çeşitli organik karbon substratlarını kullandığını göstermiştir. Ayrıca, N kaynağı olarak amonyak veya nitrattan da yararlanabildiği tespit edilmiştir. 10 günlük büyüme sonrası, bu alglerin çoğalması ile biyokütle verimliliği, fotoheterotrofik koşullar altında 379 mg/L'ye ulaşırken, fotoototrofik şartlar altında 73.03 mg/L olduğu görülmüştür [115]. Bu tür, evsel atıksuların arıtımını gerçekleştiren yüksek hızlı havuz sistemlerinde yüksek biyokütle verimliliğini sağlamak için iyi bir aday olabilir.

Wang ve diğ. [104]'nin yaptığı çalışmada, yerel belediyenin evsel atıksu arıtma tesisinde, arıtma tesisinin dört farklı noktasından ((1)birincil çökeltme öncesi atıksu, (2) birincil çökeltme işleminden sonra atıksu, (3)aktif çamur tankından sonra atıksu ve (4) çamur santrifüjünde üretilen üstsu) alınan atıksu örneklerinde yeşil alg *Chlorella sp.*' nin çoğalmasının ve atıksulardan azot, fosfor, KOİ ve metal iyonlarının giderim verimleri değerlendirilmiştir. Ekspansiyon fazda ortalama spesifik büyüme oranları sırasıyla 1, 2, 3 ve 4 No.lu noktalardan alınan atıksular için 0.412, 0.429, 0.343 ve 0.948 gün⁻¹ olmuştur. NH₄-N'nun giderim oranları 1, 2 ve 4 No.lu noktalardan alınan atıksular için sırasıyla % 82.4, % 74.7 ve %78.3 olarak tespit edilmiştir. 1, 2 ve 4 nolu noktalardan alınan atıksulardan, sırasıyla %83.2, %90.6 ve %85.6 fosfor ve %50.9, %56.5 ve %83.0 oranında ise KOİ giderilmiştir [104].

Yapılan bir başka çalışmada [103] St. Paul Metro evsel atıksu arıtma tesisinin giriş, çıkış ve konsantre üst suyu olmak üzere üç farklı noktasından alınan ve farklı seviyelerde nutrient içeriğine sahip olan atıksularda, biyocoil fotobiyoreaktör kullanılarak *C. reinhardtii* mikroalg türünün biyokütle verimi ve azot ve fosfor giderimi değerlendirilmiş, CO₂ ve pH'ın büyüme üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Çalışmalar, *C. reinhardtii* için optimal pH'ın 7.5 aralığında olduğunu göstermiştir. Deneysel sonuçlar, alg kuru biyokütle dönüşüm oranının, biyocoilde maksimum 2.0 g/L.gün'e ulaştığını göstermiştir. *C. reinhardtii*'nin yağ içeriği kuru biyokütle ağırlığında %25.25 (ağırlık/ağırlık) olmuştur. Biyocoilde santrifüj üst atıksuyundan, günde litre başına 55.8 mg azot ve 17.4 mg fosfor etkili bir şekilde uzaklaştırılmıştır [103].

Zhou ve diğ. [95] yaptıkları çalışmada, bir kültür ortamı olarak evsel atıksuyunu kullanarak çeşitli hidrolik bekleme

sürelerinde kesikli ve yarı sürekli ekim işlemlerinde alg büyümesi, atıksu nutrient giderim verimliliği ve *Auxenochlorella protothecoides* UMN280' nin lipit birikimini incelemiştir. *Auxenochlorella protothecoides* UMN280'in 6 günlük seri üretiminin sonuçları, yüksek büyüme hızı (0.490/gün), yüksek biyokütle verimliliği (269 mg/L/gün) ve yüksek lipit üretkenliği (78 mg/L/gün) ile atıksudan toplam azot, toplam fosfor, KOİ ve toplam organik karbon (TOK) için maksimum giderim verimliliği sırası ile %59, %81, %88 ve %96'nın üzerinde olduğunu göstermiştir [95].

Tarımsal kökenli yüksek oranda gübre içeren atıksular da mikroalg yetiştiriciliğinde kullanılabilir. Tarımsal kökenli atıksularda yetişen mikroalgler karbonhidrat ve/veya protein bakımından zengin olur ve biyodizel dışında biyoyakıt üretimine de katkıda bulunur.

Evsel atıksulara kıyasla, genellikle gübreden kaynaklanan tarım kaynaklı atıksuyun N ve P içeriği oldukça yüksek olabilir [116]. Çalışmalar mikroalglerin tarım kaynaklı atıksularda verimli bir şekilde büyüdüğünü ve atıksulardan P ve N'un gideriminde etkili olduğunu göstermiştir [116]-[118]. Örneğin, An ve diğ. [117] tarafından yapılan bir çalışmada, yeşil alg *Botryococcus braunii*' nin, domuz ahır atıksuyunda iyi geliştiğini ve %80 oranında NO₃ giderdiğini tespit etmişlerdir. Tarım kaynaklı atıksularda yetiştirilen farklı türlerde alglerin (*B. braunii*, *Chlorella sp.*, *Scenedesmus sp.*, *Microspora williana*, *Ulothrix zonata*, *Ulothrix aequalis*, *Rhizoclonium hieroglyphicum*, *Oedogonium sp.*, *R. Hieroglyphicum*, *R. Hieroglyphicum*, *Chlorella sp.*, *Micractinium sp.*, *Actinastrum sp.*) biyokütle üretim potansiyeli 6 ila 700 mg/L.gün aralığında değişmekte olup, lipit verimlilikleri 0.54 ila 69 mg/L.gün gibi geniş bir aralıkta bulunur [100].

Birçok çalışmada [119]-[127], alg üretimi için süt endüstrisi atıksularını kullanmıştır. Bununla birlikte, süt endüstrisi atıksularında yetiştirilen alglerin biyokütle veriminin düşük olması bir problemdir. Literatür araştırması, süt endüstrisi (mandıra) atıksularında yetiştirilen alglerin en yüksek biyokütle veriminin 0.7 g/L'nin altında olduğunu göstermiştir [119-121].

Alg büyümesi üzerinde aşırı yüksek oranda organik madde içeriğinin inhibisyonunun önlenmesi için, Woertz ve diğ. [114] alg aşılama öncesi süt endüstrisi atıksuyunu %10 oranında seyreltmislerdir. Yine de, hasat edilen alg biyokütlesi 0.6 g/L'den daha az olmuştur.

Birçok araştırmacı [128]-[131] süt endüstrisi atıksularında farklı mikroalg türlerinin biyokütle üretimini çalışmıştır. Lu ve diğ. [128], *Chlorella sp.* tarafından ham süt atıksularında en yüksek biyokütle veriminin, iç ortam pilot ölçekli kültürlerde 0.26 g/L/gün ve dış ortam pilot ölçekli kültürlerde 0.11 g/L/gün'e ulaştığını bildirmiştir. Maksimum KOİ, toplam N ve toplam P giderim hızları iç ortam pilot ölçekli tesiste sırasıyla 88.38, 38.34 ve 2.03 mg/l.gün iken, dış ortam pilot ölçekli tesisinde 41.31, 6.58, 2.74 mg/l.gün olmuştur [128]. Hena ve diğ. [129], *Chlorella saccharophila* için artırılmamış süt çiftliği atıksularında 0.201 g/L/gün ve *Scenedesmus sp* için 0.211 g/L/gün biyokütle verimini tespit etmişlerdir. Atıksudan nutrient giderim veriminin %98'in üzerinde olduğunu belirtmiştir.

Yapılan diğer bir çalışmada [130], *Chlorella vulgaris* kullanılarak süt endüstrisi atıksuyunun arıtımı ve biyokütle üretim potansiyeli değerlendirilmiştir. 10 gün sonunda, süt endüstrisi atıksuyunda; biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ), KOİ, askıda katı madde (SS), toplam azot (TN) ve toplam fosfor

(TP) maksimum giderim yüzdelerinin sırası ile %85.61, %80.62, %29.10, %85.47 ve %65.96 olduğu bulunmuştur. 7 günde maksimum 1.23 g/L kuru biyokütle elde edilmiştir. Biyokütle verimi, süt endüstrisi atıksuyundaki nutrient azalmasından büyük ölçüde etkilenmiştir. *C. vulgaris* tarafından süt endüstrisi atıksuyunda üretilen biyodizelin, Amerikan Test ve Malzeme Derneği (ASTM)-D6751 ve Avrupa Standartları (EN) 14214 standartları ile iyi bir uyum içinde olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, mikroalg kültürleri için süt endüstrisi çıkış atıksuyunun kullanılması, gelişmiş, çevre dostu bir arıtma süreci olarak yararlı ve pratik bir strateji olabilir [130].

Sreekanth ve diğ. [131] yaptığı çalışmada, *Chlorella vulgaris*, *Botryococcus braunii* ve karışık alg kültürü kullanılarak, iç ve dış ortamlarda süt endüstrisi atıksularının arıtılabilirliği incelenmiştir. Biyokütle verimliliği 6. günde maksimum değere çıkmıştır. İç ve dış mekân çalışmalarında; iç ortam kültürlerinde *C. vulgaris* suşunda 0.51 g/L biyokütle verimliliği ve 0.030 g/L lipit verimi, dış ortam kültürlerinde 0.59 g/L biyokütle verimi ve 0.035 g/L lipit verimi elde edilmiştir.

Alg besin ortamı olarak süt endüstrisi nihai atıksuyunun, kâğıt hamuru ve kâğıt endüstrisi atıksuyu ile karıştırıldığı bir çalışmada [127], süt endüstrisi atıksuyunun nutrient profili geliştirilmiş ve daha yüksek biyokütle verimi elde edilmiştir (1.12 g/L). Bu çalışma, karışımın atıksuların nutrient profillerini ve alglerin biyokütle verimini arttırmak için olası bir yol olduğunu ortaya koymuştur.

Başka bir çalışmada [132], süt endüstrisi atıksularındaki alg büyümesinin sınırlayıcı faktörünün, amonyak azotu eksikliği olduğunu göstermiştir. Yapılan çalışmalar, ortalama amonyak azotunun (NH₃-N) içeriğinin süt endüstrisi atıksularında 48 mg/L iken ve bazı süt endüstrisi atıksularında NH₃-N içerikleri 5 mg/L'den daha az olduğunu göstermiştir [125]. Lincoln ve diğ. [126], mandıra atıksularındaki NH₃-N'nin 72 saatte tamamen algler tarafından tüketildiğini, diğer nutrientlerin giderim verimliliğinin yüksek olmadığını göstermiştir. Bu nedenle, süt endüstrisi atıksuyunda yetiştirilen alglerin düşük biyokütle verimine yol açan etkenin NH₃-N'nin eksikliği olduğu varsayılmıştır [132]. Lu [132] tarafından yapılan çalışmada, süt endüstrisi atıksuları daha yüksek amonyak azotu içeriğine sahip olan bir mezbahaya atıksuyu ile karıştırılmıştır. Sonuçlar, düşük maliyetle karışım atıksularının, nutrient profili ve biyokütle dönüşümünü iyileştirdiğini göstermiştir. Karışık atıksularda yetişen algler yüksek protein (%55.98-%66.91) ve yağ içeriğine (%19.10-%20.81) sahip olur. Böylece süt endüstrisi atıksularında yetiştirilen alglerin düşük biyokütle veriminin temel sorunu çözülmüştür. Yetiştirilen algler, hayvan yemi ve biyoyakıt üretmek için kullanılabilir gibi, atıksudaki nutrient içeriğini de önemli ölçüde azaltır [132].

Tarım kaynaklı atıksulardan önemli bir tanesi de peyniraltı suyudur. Peyniraltı suyu içerdiği yoğun protein nedeniyle mikroalg yetiştirilmesi için uygun bir besin kaynağı olarak kullanılabilir. Böyle bir atıksu mikroalg biyokütlesi üretimi maliyetini azaltırken, mikroalglerin peyniraltı suyunu kullanması ile peyniraltı suyunun neden olduğu çevresel problemlerin çözümüne katkıda bulunur. Peyniraltı suyu mikroalglerde lipit birikimi için umut verici bir karbon kaynağıdır. Bu atıksu, biyoyakıt üretimine yönelik mikroalg yetiştiriciliğine kolayca entegre edilebilir. Ayrıca bu uygulama ile süt ürünleri endüstrisi yan ürünlerinin sınırlı uygulama alanlarına değerli bir alternatif sunulmuş olur.

Yapılan bir çalışmada [133], 4 farklı yetiştirme ortamında (Blue Green Medium (BG11), Blue Green Medium (BG11)+ Peyniraltı suyu, Bold's Basal ortamı (BMM) +Peynir altısuyu ve çeşme suyunda) *Chlorella vulgaris* üretilmeye çalışılmıştır. 21 gün süren denemeler sonucunda en yüksek hücre sayısı, biyokütle ve oransal lipit miktarı artışı Bold's Basal ortamı+Peynir altısuyuyla yetiştirilen *Chlorella vulgaris*'de elde edilmiştir. Biyokütle ve oransal yağ miktarları, sırasıyla 10.14 g/L ve %20,7 olarak belirlenmiştir. Yapılan denemelerde peynir altı suyunun *Chlorella vulgaris* üretiminde besin kaynağı olarak kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır [133].

Seo ve diğ. [134] alkali koşullar altında peyniraltı suyunda *Cryptococcus curvatus* için 7.2 g/L/gün'lük çok yüksek bir biyokütle verimi ve 4,68 g/L.gün lipit üretim seviyesi (oransal olarak %65 lipit miktarı ile) elde etmişlerdir.

Tsolcha ve diğ. [135] yaptıkları çalışmada, aerobik olarak arıtılmış peyniraltı atıksuyu, fotoheterotrofik koşullar altında *Choricystis* benzeri alg üretimi için substrat olarak değerlendirilmiş ve su ile seyreltilmiştir (seyreltme faktörü 0.05'ten 0.35'e kadar). KOİ, TN ve PO₄⁻³ kirletici yükleri, sırasıyla %92.3, %97.3 ve %99.7 oranında azaltılmıştır. Alg biyokütellerin lipit içeriği, 60.8-119.5 mg/L lipit üretimine karşılık gelen %9.2 ila% 13,4 arasında değişmektedir. Üretilen lipidlerdeki doymuş ve tekli doymamış yağ asitlerinin oranı %79'a ulaşarak, sistemi biyodizel üretimi için uygun hale getirmiştir. Üretilen biyokütlenin, bir biyodizel kaynağı olarak kullanılabileceği belirtilmiştir [135].

Endüstriyel kaynaklı atıksuların arıtımında alglerin kullanımı, atıksulardan N ve P'un gideriminden ziyade, ağır metal kirleticilerinin (kadmiyum, krom, çinko, vb.) ve organik kimyasal toksinlerin (hidrokarbonlar, biyositler ve yüzey aktif maddeler) [136]-[138] giderimi içindir. Genellikle düşük N ve P konsantrasyonu ve yüksek toksin konsantrasyonları nedeniyle, birçok endüstriyel atıksuda alg büyüme hızları düşüktür. Endüstriyel atıksularda yetiştirilen alg türlerinin (*B. braunii*, *Chlorella saccharophila*, *Dunaliella tertiolecta*, *Pleurochrysis carterae*) biyokütle üretim potansiyelleri (23 ila 34 mg/L.gün) ve lipit verimlilikleri (4.0 ila 4.5 mg/L.gün), evsel ve tarım kaynaklı atıksularda yetiştirilenlerden daha azdır [100].

Yapılan bir çalışmada [102] halı endüstrisi atıksuların (halı fabrikası atıksuları) önemli alg biyokütlesi üretimini sağlamada potansiyel olarak önerilebileceği gösterilmiştir. Dünyanın Halı Başkenti Dalton'da 100-115 milyon L/gün atıksu üretildiği belirtilmiştir. %10-15 oranında evsel atıksu ve % 85-90 halı endüstrisi atıksularını içeren bir atıksu kullanılarak yürütülen çalışmada, alg temelli biyokütle ve biyodizel üretiminin fizibilitesi değerlendirilmiştir. Halı atıksularından yerli alg suşları izole edilmiştir. 15 doğal alg konsorsiyumu izolatları ile atıksularda % 96'nın üzerinde nutrient giderimi sağlanmıştır. Atıksuda yetiştirilenler bu konsorsiyumun biyokütle üretim potansiyeli ve lipit içeriği sırasıyla ~ 9.2-17.8 ton/ha.yıl ve %6.82 olmuştur. Konsorsiyumdan elde edilen alg yağının yaklaşık %63.9'u biyodizel dönüştürülebilir. İki tatlı su mikroalgi *B. braunii* ve *Chlorella saccharophila* ile bir deniz algi *Pleurochrysis carterae*'nin ham atıksuda yetiştirildiği ispat edilmiştir. Bu sektörden elde edilen büyük miktarda atık su ile önemli miktarda biyokütle üretililebileceği ve biyokütleden de potansiyel olarak biyodizel üretililebileceği belirtilmiştir.

Son zamanlarda, farklı mikroalg türlerinin kullanımı ile CO₂ salınımının azaltılması ve biyodizel üretiminin birlikte değerlendirilme potansiyeli, bir kilometre taşı olarak yeni çalışmalara ışık tutmaya başlamıştır. Mikroalg endüstrisi, CO₂

salınımının azaltımı ve yenilenebilir enerji üretimi ile birlikte büyük ölçüde sürdürülebilir bir platform oluşturur. Bu teknolojide, mikroalg kültürünün yetiştirilmesi, hasat edilmesi ve kurutulmasında yoğun enerji gereksinimi ve gerekli inorganik nutrientler gibi pek çok konu ve problem gözardı edilmektedir. Ciddi sorunlara neden olan bu kısıtlamaların üstesinden gelmek için daha fazla CO₂ tutulumunun olduğu tübüler tip fotobiyoreaktörler kullanılabilir. Mikroalg yetiştirmek için sanayi baca gazının kullanımı makul bir seçenektir.

Bacagazları gibi küresel CO₂ emisyonu üzerinde önemli etkisi olan gazlar içerisinde bulunan CO₂, NO_x, bileşikleri ile çinko, demir, bakır gibi iz elementler fotosentetik canlılar için önemli bir besin kaynağıdır. Mikroalglerin kültür sistemlerinin çimento fabrikası gibi işletmelerle entegre üretiminin gerçekleştirilmesi, mikroalg üretim maliyetlerinin düşürülmesine yardımcı olur. Baca gazlarının mikroalgler için CO₂ kaynağı olmasının yanısıra özellikle kış döneminde sıcak baca gazı ile kültür sıcaklığının artırılması ve böylece mikroalgler için optimum sıcaklığın oluşturulması da sağlanabilir. Baca gazı sıcaklıkları genelde 65-95 °C olmakla birlikte kaynak endüstrilere bağlı olarak daha yüksek sıcaklıklara çıkabilir (250-450 °C). Bu durumlarda baca gazları mikroalg yetiştiriciliğinde kullanılmadan önce bir soğutma ünitesi gerekli olabilir.

CO₂ giderme verimliliği açısından yüksek potansiyele sahip mikroalglerin (*Botryococcus braunii*, *Chlorella sp.*, *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus obliquus*) kullanımı, büyük miktarda CO₂ özümseyebilmeleri ve bunun yanında önemli miktarda lipit üretmeleri açısından biyoyakıt üretiminde umut vericidir. Örneğin, baca gazındaki CO₂ konsantrasyonu %5'ten %12.5'a yükselirse, mikroalg biyodizel üretmek için tüm fosil enerji girdisinde %72.6'lık bir azalmaya neden olur [82]-[139]. Bu olumlu sonuç, tipik bir mikroalg çiftliğinde enerji yükünü baca gazı kullanarak azaltmak ve aynı zamanda atmosfere doğrudan CO₂ salınımını azaltmak açısından önemlidir. Baca gazı içinde yüksek CO₂ konsantrasyonu dışında bulunan O₂, H₂O, CO, NO_x, SO_x, ağır metaller, partikül maddeler gibi pek çok farklı içerik mikroalglerin büyümesini etkileyebilir. Ancak uygun mikroalg türlerinin seçimi ile bu etkiler minimuma indirilebilir. Mikroalg yetiştiriciliğinde yüksek konsantrasyonda SO₂ önerilmez. Bu nedenle mikroalg yetiştiriciliğinde baca gazı kullanılmadan önce kükürt giderim ünitesi yapmak gerekir. Mevcut çevresel şartlara yüksek adaptasyon sağlayan mikroalg türleri seçip geliştirerek, özellikle termoelektrik santrallerinin yakınında mikroalg çiftlikleri kurulup CO₂ emisyonu azaltılabilir. Termoelektrik santrallerine yakın yerlerdeki havuzlardan izole edilen mikroalg türleri bu tür ortam koşullarına daha dayanıklıdır.

4 Biyoyakıt üretimi için ekonomik analiz

Mikro-algler, sürdürülebilir biyoyakıtlar üretmek için potansiyel bir hammadde olarak büyük ilgi görmektedir [140]. Fakat ilk yatırım maliyeti ve üretim maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle biyoyakıtlar, şimdiye kadar petrol bazlı yakıtlarla doğrudan rekabet edememiştir [141]. Gelecekteki ekonomik uygulanabilirliği ve çevresel sürdürülebilirliği belirlemek için mikroalg üretiminin; enerji-karbon dengesi, çevresel etkiler ve üretim maliyeti olmak üzere üç yönü incelenmelidir. Pozitif bir enerji dengesine ulaşmak için yüksek derecede optimize edilmiş üretim sistemleri kullanılmalı ve teknolojik ilerlemeler sürekli takip edilip uygulanmalıdır [140].

Biyoyakıt üretimi için mikroalg yetiştirilmesi amacıyla atıksulardaki nutrientlerin tüketilmesi ve böylece atıksuların arıtımının yapılması; atıksu arıtım maliyetini büyük ölçüde azaltmak, atıksulardan biyolojik nutrient giderimi, biyokütle üretim maliyetini büyük ölçüde azaltmak, sera gazı emisyonunu ve ilgili işlemlerin çevresel etkilerini önemli ölçüde düşürmek ve fosfor bakımından zengin ürünlerin oluşumu gibi pek çok fayda sağlar [142]. Ayrıca, biyoyakıt üretimi, atık su arıtımı, karbon kredileri ve diğer yan ürünlerle sağlanan ek gelirler, entegre sistemin ekonomik geçerliliğini daha da haklı gösterir [143].

Atıksu kullanılarak üretilen alg temelli biyoyakıt üretim sisteminin ekonomik performansını tam olarak anlamak ve değerlendirmek için, sistemlerin bazı ek bileşenlerinin kapsamlı bir tekno-ekonomik analiz çerçevesi içinde dikkate alınması gerekir. Bu analiz çerçevesinde; (1) atıksu arıtım maliyeti tasarrufu, (2) bölgesel veya ulusal ticaret pazarında N, P ve/veya CO₂ kredilerinin satışı, (3) üretilen biyoyağın bir rafineri tesisine satışı, (4) oluşan singazın bir ısıtma gazı olarak satışı ve (5) biyoyakıt yanması sonucu oluşan külün fosforlu gübre olarak satışı [141] dikkate alınmalıdır.

Pek çok araştırmacı [141],[144]-[149] çeşitli mikroalg temelli biyoyakıt elde etme yöntemlerinin ekonomik fizibilitesini ortaya koymak için teknoekonomik analiz (TEA) yapmışlardır. Bu çalışmalar yakıt maliyetinin; ürünler, yetiştirme sistemleri, biyokütle verimliliği, lipit içeriği, üretim kapasiteleri ve dönüşüm teknolojileri gibi farklılıkları nedeni ile büyük bir değişkenliğe sahip olduğunu göstermektedir [141].

Xin ve diğ. [141], Saint Paul' deki evsel atıksu arıtan ve günde toplam 10.298 ton alg biyokütlesi üretimi sağlayan tesiste maliyet hesabı üzerine kapsamlı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu kapsamda incelenen tesiste, atıksularda mikroalgın üretilmesi, flokülasyon yoluyla mikroalg toplanması, biyokütlenin güneş ile kurutulması, biyokütleden biyoyağ pirolizi ve yan ürünlerin kullanımı analiz edilmiştir. Ana maliyetler; alg yetiştirme birimleri ve proses ekipmanları maliyeti ile işletme maliyetlerini (işletim giderleri veya kimyasallar, güç, işçilik, bakım, sigorta ve vergiler) kapsamaktadır.

Sistem için en yüksek sermaye yatırımı, toplam proje yatırımının % 47.7'si ile (127.755 \$/yıl) fotobiyoreatör oluşturmaktadır. Alg hasat sistemi, flokülasyon tankı (1278 \$/yıl) ve iki adet santrifüj (2555 \$/yıl) birimlerinden oluşmaktadır. Arazi, fotobiyoreatörün arazi kullanımını büyük ölçüde azaltan yapısından dolayı en düşük sermaye yatırımına sahip olmuştur. Arazinin maliyeti (1552 \$/yıl), toplam projenin %0.58'ini oluşturmuştur. Mikroalgın yetiştirilmesi için tüm besinler atıksu ile sağlandığı için elektrik maliyeti 5438 \$/yıl olmuştur. Mikroalgın hasatı için kullanılan, kimyasal ve santrifüj için elektrik maliyeti ise sırasıyla 396.985 \$/yıl ve 13.372 \$/yıl olmuştur. Amortisman bedeli 26.7633 \$/yıl olarak alınmıştır. İş gücü bedeli 220.000 \$/yıl olarak belirlenmiştir. Bakım maliyeti 161.457 \$/yıl iken (kurulum maliyetlerinin %2'si), genel gider maliyeti 110.000 \$/yıl (toplam işçilik maliyetlerinin %50'si) olarak belirlenmiştir. Flokülantlar işletme maliyetleri arasında %33.8 ile en yüksek gidere sahiptir. İkinci en büyük gider olan ekipman amortismanını(%22.8), %19 ile operatörlerin ve müdürün toplam maaşı izlemiştir. Ayrıca bakım giderleri, sigorta ve vergiler toplam işletme maliyetlerinin %13.7'sini oluşturmuştur. Bazı teknolojilerin değiştirilmesi ile maliyette önemli iyileştirmeler yapılabileceği tespit edilmiştir. Üç kritik

bileşen olan üretim, hasat ve dönüşüm teknolojilerinde yenilikler gerçekleştirilirse, net karlılık oranının % 18.7'ye çıkması ile toplam proje yatırımının %20 azaltılacağı tespit edilmiştir. Hasat için elektrikli çökelme kullanıldığında, biyoyağ dönüşüm hızının %40'lara ulaştığı belirlenmiştir. Eğer toplam proje yatırımı %20 düşürülür ve elektrikli çökelme kullanılır ise net karlılık oranı %15.67'ye çıkacağı belirtilmiştir. Hesaplamalara dayanarak, biyoyakıt maliyetini ham petrol ile rekabetçi hale getirmek için, alg temelli biyoyakıtların atıksu kullanılarak üretimi gibi uygun teknikler düşünülebilir [141].

Ventura ve diğ. [145] yaptıkları bir çalışmada, yıllık 1000 ton kuru alg üretimi (ağırlıkça% 30'luk bir lipit içeriği ve 30 g/lık biyokütle verimliliği ile) için, nutrient maddeleri maliyetlerinin; toplam işletme maliyetlerinin %29.51-%31.46'sını oluşturduğunu, bunun da bir ton kuru alg için 145.5-149.3 \$'a eşdeğer olduğunu belirtmiştir. Atıksu temelli alg üretim tesislerin, sadece besin maliyetini (yaklaşık 550.000 \$/yıl) değil, aynı zamanda atıksu arıtma maliyetini (yaklaşık 564.768 \$/yıl) de karşıladığını; ancak, alg temelli biyoyakıtın ham petrol ile rekabet edebilmesi için, biyoyakıt teknolojisini geliştirmenin çok önemli olduğunu belirtmişlerdir.

ABD Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı tarafından yapılan on yıllık bir maliyet analizi, alglerden elde edilen biyodizelin maliyetlerinin 0.53-0.85 \$/L (2012 USD değerleri) aralığında olduğunu göstermiştir [146] Süreç iyileştirme, satıcılardan alınan fiyatlar, devlet veri tabanları ve diğer ilgili veri kaynakları ile güncellenmiş alg temelli biyodizelin maliyetleri 0.42-0.97 \$/L aralığında kalmıştır. Hesaplanan bu maliyetler ümit verici görünmektedir, bu da tek adımlı bir biyodizelin üretim sürecinin ticari gerçekliğe yakın olduğunu göstermektedir. Nagarajan ve diğ. [146] tarafından yapılan bir çalışmada, alg temelli biyodizelin ticarileşme potansiyeli eşzamanlı bir yağ ekstraksiyonu ve transesterifikasyon prosesi ile ele alınmıştır. Alg temelli biyodizelin tekno-ekonomik analizi için arazi maliyetleri, yağ çıkarma verimi, flokülasyon için polielektrolitler ve güneş ışınlarına dayalı fotosentetik verimlilik kullanılmıştır. Hesaplamalara dayanarak, ultrasonikasyonun aracılık ettiği eşzamanlı bir yağ ekstraksiyonu ve transesterifikasyona dayalı alg temelli biyodizelin üretiminin yapılmasının teknik olarak uygun olduğunu belirtmişlerdir.

2008 yılında ABD Enerji Bakanlığı'nın (DOE) hazırladığı bir rapora göre, alg temelli biyodizelin maliyeti 2.11 \$/L olarak soya yağı biyodizelin maliyetinden (1.05 \$/L) çok yüksektir [150]. Ancak, diğer taraftan bir galon soya biyodizelinin elde edilmesinde soya üretimi için 15.600 galon su harcanması gerekirken, mikroalg için sadece 300 ila 1000 galon arasında su gerekir [151]. Buna ek olarak, mikroalg yetiştiriciliğinde deniz suyu da kullanılabilir [152]. Bu durum gözönüne alındığında, etkili bir maliyet hesabı için detaylı bir tekno-ekonomik analiz yapılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Alglerden üretilmiş biyodizelin maliyetleri, alg yetiştirme sistemine bağlı olarak değişmektedir (0.5-49.46 \$/L arasında) [153]-[156]. Açık havuz sistemlerinden üretilen biyodizelin maliyetleri diğer sistemlerdekinden daha düşüktür. Richardson ve diğ. [156] yaptıkları çalışmada, iki farklı alg yetiştirme sisteminde (açık havuz ve fotobiyoreaktör) biyoyakıt üretiminin ekonomik fizibilitesini karşılaştırmıştır. Açık havuzlar ve fotobiyoreaktörlerin, farklı alg yoğunluğu, hücresel lipit içeriği, biyokütle verimliliği ve parazitler nedeniyle üretim kaybı ve bunların hasat ve ekstraksiyon işlemleri üzerindeki

etkileri dikkate alınarak ekonomik fizibilitesi ortaya konmuştur. İki yetiştirme sistemi, gelirler, harcamalar ve üretim maliyeti üzerindeki etkileriyle karşılaştırıldığında, 10 yıllık bir dönemde karşı karşıya kalacağı fiyat ve finansal riskler gözönünde tutularak ekonomik analiz yapılmıştır. Ham biyoyağ için toplam üretim maliyeti açık havuz için 28.7 \$/L ve fotobiyoreaktör için 20.3 \$/L olarak bulunmuştur. Biyokütle üretimindeki her % 1'lik artış için yıllık net nakit gelirinin açık havuz için %0.21 ve fotobiyoreaktör için %0.10 arttığını ortaya koymuştur [156].

Alg havuzlarında alg yetiştirme aşamasında en önemli enerji ihtiyacı, algin havuzda sirkülasyonunu sağlamak için gerekli elektrik enerjisi (enerji payı %22-%79) ve havuz inşasındaki gömülü enerjidir (enerji oranı %8-%70). Azot gübresindeki gömülü enerji de (yetiştirme aşaması için enerji payı %6-%40) enerji ihtiyacına önemli bir katkı sağlar [140]. Ticari alg çiftliklerinde, su, nutrient ve karbondioksit gereksinimi, toplam üretim maliyetinin %10-30' una tekabül eder [157].

Fotobiyoreaktörde enerji tüketiminin büyük bir kısmı, fotobiyoreaktör içinde kültür ortamını pompalamak ve yetiştirme aşaması boyunca sürtünme kayıplarının üstesinden gelmek için (boru şeklinde fotobiyoreaktörler için enerji oranı %86-%92'dir, düz plaka fotobiyoreaktörleri için enerji fraksiyonu %22'dir) kullanılır. Kalan enerjinin çoğunluğu sistem inşaatı (enerji payı %6-12%) içindir [140].

5 Büyük ölçekli mikroalg üretimine yönelik stratejiler

Mikroalg temelli biyoteknoloji alanı dünya çapında yatırımcıların dikkatini çekerek hızla gelişmektedir. Büyük ölçekli tesislerde mikroalglerin yetiştirilmesinden elde edilen ürünler, besin takviyesi, etanol, dizel ve jet yakıtı gibi geniş bir endüstri yelpazesine hizmet eder. Mikroalglerin biyoyakıt amaçlı kullanımı için özellikle Amerika ve Brezilya'da büyük ölçekli tesisler bulunmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı, mikroalg temelli biyoyakıtların başarılı bir şekilde üretilmesi için araştırma ihtiyaçlarını belirlemek amacıyla, bir yol haritası geliştirmiştir. Bu yol haritası uygulanırken, mikroalglerin biyoyakıt üretimi için rekabet edebilen bir hammadde potansiyelini vurgulamak ve bunu geliştirmek için çok daha fazla araştırma ihtiyacı ortaya çıkmıştır [158].

2030 yılında, dünyadaki biyoyakıt üretim hacminin petrol üretimine yaklaşabileceği düşünülmektedir. Alglerden biyoyakıt üretimi maliyetinin yüksek olması, şu anda tercih edilmeme nedeni olsa da; biyoyakıt üretimi alanında çalışan kuruluşların 2014 anket sonuçlarına göre, anketi cevaplayanların %80'inden fazlası, 2020 yılında alglerden elde edilen yakıtın, geleneksel fosil yakıtlarla fiyat olarak rekabet edebilmesinin mümkün olduğuna inandıklarını belirtmişlerdir. Bu inanç, tüm ülkelerde ulusal enerji güvenliğine önem verilmesi ve hızlı bir şekilde gelişen yenilikçi yaklaşımlar sebebiyle olabilir [152].

Örneğin, Tayland' da 2009 yılında mikroalg konusunda, çok sayıda üniversite ve bağımsız araştırmacının içinde olduğu özel bir proje başlatılmıştır. Projenin ana hedefi, biyokütle ve alg yağının biyoyakıt üretimi için bir hammadde olarak, 2017 yılında istikrarlı ve başarılı bir şekilde rekabetçi fiyatlarla ticarileştirilmesidir [152].

Malezya Teknoloji Parkı, Algaetech International SdnBhd'nin çabalarıyla, yeni nesil jet yakıtını rekabetçi bir fiyatla istikrarlı bir şekilde üretme olasılığıyla ilgili araştırmalar

yürütmektedirler. Filipinlerde de, ekonomik olarak kârlı biyodizel üretimi için ham biyomateryal olarak mikroalglerin üretim çalışmaları yürütülmektedir [152].

Airbus uzmanlarına göre, önümüzdeki yıllarda havacılık sektörünün yakıt talebi artacaktır. Bu durum, petrol sıkıntısına, sera gazı emisyonlarının artmasına ve çevre üzerindeki genel olumsuz etkilerinin artmasına neden olacaktır. Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği (IATA), 2020 yılına kadar dünyada kullanılan tüm havacılık yakıtlarının %6' sının yenilenebilir alternatif kaynaklardan elde edilebileceği varsaymaktadır [152].

ABD Enerji Bakanlığı, Bioenerji Teknolojileri Ofisi aracılığıyla, alg biyoyakıtlarının ve biyoürünlerin üretilmesi ve üretim maliyetlerinin azaltılması amacıyla 8 milyon dolara ulaşan çeşitli projelere destek vermektedir. A.B.D. Gelişmiş Savunma Araştırma Projeleri Kuruluşu'nun yürüttüğü BioFuels programı, askeri petrolün geleneksel petrol türevi yakıtlara bağımlılığını azaltmaya yardımcı olmak için performans ölçümlerini karşılayabilen yenilenebilir jet yakıtı (JP-8) geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu yenilenebilir yakıtların, tüketilebilir gıda ürünleri ile rekabet etmeyen selülozik materyallerden ve alg türlerinden elde edilmesi planlanmıştır. İlk çalışmalar, bitkisel yağ trigliseritlerinin JP-8'e dönüştürülmesine odaklanmıştır. BioFuels programı selülozik ve alg hammaddelerini JP-8'e dönüştürme konusunda ilerleme kaydetmeye devam etmektedir. Programda bugüne kadar, alglerden yakıt eldesi ile ilgili olarak açık göletlerde karşılaşılan pek çok problem (açık havuzlarda kontaminasyon, türlerde stabilizasyon gibi) başarı ile çözülmüştür [159].

General Atomics Biyoyakıtlar Programı Yöneticisi David Hazleback [160], alg kaynaklı biyoyakıtların yakıt piyasasında kullanılacak en rekabetçi kaynaklardan biri olduğunu belirtmiştir. Hazleback, yaklaşık 40 milyon dönüm algin, tüm ABD ulaşım sisteminin talebini karşılayabileceğini belirtmiştir. Ancak en büyük zorluğun, alg üretiminin ticari olarak uygun bir fiyatla yapmak olduğunu belirtmiştir [160]. General Atomics'in, İleri Savunma Araştırma Projeleri Ajansı tarafından finanse edilen demonstrasyon tesisi Kauai, Hawaii'de bulunmaktadır [160]. Hawaii, iklim ve enerji fiyatlarına dayanan büyük ölçekli mikroalg üretimi için çeşitli mikroalg araştırma faaliyetlerinin yapıldığı önemli bir yerdir. General Atomics Kauai'deki tesiste mikroalg yetiştirmektedir ve tesisi 11 hektara kadar genişletmiştir [160],[161]. Phycal, Oahu'da 12 hektarlık bir pilot tesis inşa edilmiştir [162]. Cyanotech, 36 hektarlık bir tesiste mikroalgler yetiştirmektedir [163].

IHI Şirketi, Kobe Üniversitesi ve Neo-Morgan Laboratuvarı'ndan oluşan bir grup, anonim şirket olarak faaliyete geçmiş ve Nisan 2015'te Kagoshima Eyaletinde mikroalglerin yetiştirilmesi için açık havada büyük ölçekli sistemde deneme çalışmalarına başlamışlardır. Aynı grup, Nisan 2013'de IHI'nın Yokohama çalışmalarında 1.500 m²'lik bir alan üzerinde, 100 m²'lik bir ekim göletinde başarılı deneysel çalışmalar yürütmüşlerdir.

Bunların dışında, başka araştırmacılar da farklı üretim havuzlarında (Fukuoka Eyaleti; Ishigaki Adası, Okinawa eyaleti; Kiyosaki'deki model çiftliği, Ishinomaki Şehri, Miyagi Eyaleti; Kurihara, Tsukuba Şehri, Ibaraki Eyaleti; Minamigamo, Sendai Şehri, Miyagi Eyaleti ve Nishio Şehri, Aichi Eyaleti), farklı mikroalg türleri ile (*Botryococcus*, *Deniz mikroalgleri*, *Fistulifera family*, *Euglena*, *Nannochloropsis*, *Aurantiochytrium*, *Pseudochorocystis*) büyük ölçekli üretim için demonstrasyon testleri gerçekleştirilmektedir [164].

6 Sonuçlar

Ülkemiz mikroalg üretimi için gerekli olan güneş enerjisi açısından son derece elverişlidir. Evsel veya endüstriyel atıksu [101],[104],[116]-[127] ve baca gazı [139] kullanılarak mikroalg üretilmesi maliyeti minimize edilebilir.

Alg bazlı üretilen biyoyakıtların petrol ile rekabet edecek kapasitede olması gereklidir. Düşük maliyetli ortamda yetişen, yüksek lipit ve büyüme oranları ile yoğunluğuna sahip algler üretilmeli, bunun için de kombine sistemler tercih edilmelidir. Yapılan bazı araştırmalarda, üretilen alglerin lipit oranlarını arttırmak için farklı atıksu kaynaklarının birlikte artırılmasının uygun olabileceği ortaya çıkmıştır. Lipit miktarı elde edilen biyodizel kalitesini doğrudan etkilediği için karışık atıksularda mikroalg yetiştiriciliği gerçekleştirilebilir. Bunun için öncesinde iyi bir fizibilite çalışması yapmak gereklidir. Biyoyakıt elde etmek için seçilen teknolojilerin uzun vadede uygun olması, kısa vadedeki faydalardan daha önemlidir.

Sürdürülebilir ve çevre dostu biyoyakıt hammaddesi olan mikroalgler daha fazla araştırılmalı ve üzerinde çalışmalar yapılmalıdır. Bu çalışmalarda alglerin fraksiyonlarının daha etkili ve pratik ayrılması, hasatta yeni ve daha uygun maliyetli ve yüksek ayırma verimi olan teknolojiler geliştirilmesi önemlidir. Mikroalglerden enerji elde etmek için kullanılan prosesin ekonomik olarak sürdürülebilirliğini sağlamak için kalıntıları da mutlaka değerlendirilmelidir.

Alg üretim maliyetlerini azaltmak için bölgesel enerji santralleri ve atıksu arıtma tesisleri etkili ve entegre bir şekilde kullanılmalıdır. İleri teknolojilerin kullanılması ile mikroalg üretimi ve biyoyakıt dönüşümlerinin devlet tarafından teşvik edilmesi önemlidir.

7 Kaynaklar

- [1] Kumar K, Ghosh S, Angelidaki I, Holdt SL, Karakashev DB, Morales MA, Das D. "Recent developments on biofuels production from microalgae and macroalgae". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 235-249, 2016.
- [2] Milano J, Ong HC, Masjuki HH, Chong WT, Lam MK, Loh PK, Vellayan V. "Microalgae biofuels as an alternative to fossil fuel for power generation". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 180-197, 2016.
- [3] Suganya T, Varman M, Masjuki HH, Renganathan S. "Macroalgae and microalgae as a potential source for commercial applications along with biofuels production: A biorefinery approach". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 909-941, 2016.
- [4] Putrasari Y, Praptijanto A, Santoso WB, Lim O. "Resources, policy and research activities of biofuel in Indonesia: A review". *Energy Reports*, 2, 237-245, 2016.
- [5] Rojan PJ, Anisha GS, Nampoothiri KM, Pandey A. "Micro and macroalgal biomass: A renewable source for bioethanol". *Bioresource Technology*, 102(1), 186-193, 2011.
- [6] Moncada J, Tamayo JA, Cardona CA. "Integrating first, second, and third generation biorefineries: Incorporating microalgae into the sugarcane biorefinery". *Chemical Engineering Science*, 118, 126-140, 2014.
- [7] Hallenbeck PC, Grogger M, Mraz M, Veverka D. "Solar biofuels production with microalgae". *Applied Energy*, 179, 136-145, 2016.
- [8] Jebali A, Acien FG, Gómez C, Fernández-Sevilla JM, Mhiri N, Karray F, Dhoub A, Molina-Grima E, Sayadi S. "Selection of native Tunisian microalgae for simultaneous wastewater treatment and biofuel production". *Bioresource Technology*, 198, 424-430, 2015.
- [9] Hannon M, Gimpel J, Tran M, Rasala B, Mayfield S. "Biofuels from algae: challenges and potential". *Biofuels*, 1(5), 763-784, 2010.
- [10] Schenk PM, Thomas-Hall SR, Stephens E, Marx UC, Mussgnug JH, Posten C, Kruse O, Hankamer B. "Second generation biofuels: high-efficiency microalgae for biodiesel production". *BioEnergy Research*, 1, 20-43, 2008.
- [11] Singh J, Gu S. "Commercialization potential of microalgae for biofuels production". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 2596-2610, 2010.
- [12] Ahmad AL, Mat Yasin NH, Derek CJC, Lim JK. "Microalgae as a sustainable energy source for biodiesel production: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 584-593, 2011.
- [13] Chen C, Yeh K, Aisyah R, Lee D, Chang J. "Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review". *Bioresource Technology*, 102, 71-81, 2011.
- [14] Amaro HM, Guedes AC, Malcata FX. "Advances and perspectives in using microalgae to produce biodiesel". *Applied Energy*, 88, 3402-3410, 2011.
- [15] Costa JAV, Morais MG. *An Open Pond System for Microalgal Cultivation*. Editors: Pandey A, Lee DJ, Chisti Y, Soccol CR. Biofuels from Algae, 1-22, Oxford, UK, Elsevier, 2014.
- [16] Templeton DW, Quinn M, Wychen SV, Hyman D, Laurens LML. "Separation and quantification of microalgal carbohydrates". *Journal of Chromatography A*, 1270, 225-234, 2012.
- [17] Mata TM, Martins AA, Caetano NS. "Microalgae for biodiesel production and other applications: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 217-232, 2010.
- [18] Quia R, Gaob S, Lopez PA, Ogden KL. "Effects of pH on cell growth, lipid production and CO₂ addition of microalgae *Chlorella sorokiniana*". *Algal Research*, 28, 192-199, 2017.
- [19] Das P, Thaher MI, Hakim MAQMA, Al-Jabri HMSJ, Alghasal GSHS. "Microalgae harvesting by pH adjusted coagulation-flocculation, recycling of the coagulant and the growth media". *Bioresource Technology*, 216, 824-829, 2016.
- [20] Lee H, Roh SW, Cho K, Kim K, Cha I, Yim KJ, Song HS, Nam Y, Oda T, Chung Y, Kim SJ, Choi J, Kim D. "Phylogenetic analysis of microalgae based on highly abundant proteins using mass spectrometry". *Talanta*, 132, 630-634, 2014.
- [21] Subhash GV, Rohit MV, Prathima Devi M, Swamy YV, Mohan VS. "Temperature induced stress influence on biodiesel productivity during mixotrophic microalgae cultivation with wastewater". *Bioresource Technology*, 169, 789-793, 2014.
- [22] Huesemann M, Crowe B, Waller P, Chavis A, Hobbs S, Edmundson S, Wigmosta M. "A validated model to predict microalgae growth in outdoor pond cultures subjected to fluctuating light intensities and water temperatures". *Algal Research*, 13, 195-206, 2016.

- [23] Mottet A, Habouzit F, Steyer JP. "Anaerobic digestion of marine microalgae in different salinity levels". *Bioresource Technology*, 158, 300-306, 2014.
- [24] Sun Y, Lia Q, Huang Y, Xia A, Fu Q, Zhu X, Fu J, Li J. "Application of growth-phase based light-feeding strategies to simultaneously enhance *Chlorella vulgaris* growth and lipid accumulation". *Bioresource Technology*, 256, 421-430, 2018.
- [25] Luangpipat T, Chist Y. "Biomass and oil production by *Chlorella vulgaris* and four other microalgae-effects of salinity and other factors". *Journal of Biotechnology*, 257, 47-57, 2017.
- [26] Li Y, Xu H, Han F, Mu J, Chen D, Feng B, Zeng H. "Regulation of lipid metabolism in the green microalga *Chlorella protothecoides* by heterotrophy-photoinduction cultivation regime". *Bioresource Technology*, 192, 781-791, 2015.
- [27] Grossmanna L, Eberta S, Hinrichs J, Weiss J. "Effect of precipitation, lyophilization, and organic solvent extraction on preparation of protein-rich powders from the microalgae *Chlorella protothecoides*". *Algal Research*, 29, 266-276, 2018.
- [28] Gouveia JD, Ruiz J, van den Broek LAM, Hesselink T, Peters S, Kleinegriss DMM, Smithe AG, van der Veena D, Barbosa MJ, Wijffels RH. "Botryococcus braunii strains compared for biomass productivity, hydrocarbon and carbohydrate content". *Journal of Biotechnology*, 248, 77-86, 2017.
- [29] Khichi SS, Anis A, Ghosh S. "Mathematical modeling of light energy flux balance in flat panel photobioreactor for *Botryococcus braunii* growth, CO₂ biofixation and lipid production under varying light regimes". *Biochemical Engineering Journal*, 134, 44-56, 2018.
- [30] Lupatini AL, Bispo LO, Colla LM, Costa JAV, Canan C, Colla E. "Protein and carbohydrate extraction from *S. platensis* biomass by ultrasound and mechanical agitation". *Food Research International*, 99, 1028-1035, 2017.
- [31] Casazza AA, Ferrari PF, Aliakbarian B, Converti A, Perego P. "Effect of UV radiation or titanium dioxide on polyphenol and lipid contents of *Arthrospira* (*Spirulina*) *platensis*". *Algal Research*, 12, 308-315, 2015.
- [32] Vandamme D, Gheysen L, Muylaert K, Foubert I. "Impact of harvesting method on total lipid content and extraction efficiency for *Phaeodactylum tricornutum*". *Separation and Purification Technology*, 362-367, 2018.
- [33] Heo YM, Lee H, Lee C, Kang J, Ahnd J, Lee YM, Kang KY, Choi Y, Kim J. "An integrative process for obtaining lipids and glucose from *Chlorella vulgaris* biomass with a single treatment of cell disruption". *Algal Research*, 27, 286-294, 2017.
- [34] Xie T, Xia Y, Zeng Y, Li X, Zhang Y. "Nitrate concentration-shift cultivation to enhance protein content of heterotrophic microalga *Chlorella vulgaris*: Over-compensation strategy". *Bioresource Technology*, 233, 247-255, 2017.
- [35] Wang Y, Guo W, Yen HW, Ho HS, Lo YC, Cheng CL, Ren N, Chang JS. "Cultivation of *Chlorella vulgaris* JSC-6 with swine wastewater for simultaneous nutrient/COD removal and carbohydrate production". *Bioresource Technology*, 198, 619-625, 2015.
- [36] Ho SH, Kondo A, Hasunuma T, Chang JS. "Engineering strategies for improving the CO₂ fixation and carbohydrate productivity of *Scenedesmus obliquus* CNW-N used for bioethanol fermentation". *Bioresource Technology*, 143, 163-171, 2013.
- [37] Esakkimuthu S, Krishnamurthy V, Govindarajan R, Swaminathan K. "Augmentation and starvation of calcium, magnesium, phosphate on lipid production of *Scenedesmus obliquus*". *Biomass and Bioenergy*, 88, 126-134, 2016.
- [38] Çilgin E. "3. Nesil biyoyakıt teknolojisi alglerin bir dizel motorunda performans ve egzoz emisyonlarına etkisinin araştırılması". *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5, 33-41, 2015.
- [39] Miao X, Wu Q. "Biodiesel production from heterotrophic microalgal oil". *Bioresource Technology*, 97, 841-846, 2006.
- [40] Salla ACV, Margarites AC, Seibel FI, Holz LC, Brião VB, Bertolin TE, Colla LM, Costa JAV. "Increase in the carbohydrate content of the microalgae *Spirulina* in culture by nutrient starvation and the addition of residues of whey protein concentrate". *Bioresource Technology*, 209, 133-141, 2016.
- [41] Zhu LD, Hiltunen E, Antila E, Zhong JJ, Yuan ZH, Wang ZM. "Microalgal biofuels: Flexible bioenergies for sustainable development". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 1035-1046, 2014.
- [42] Dragone G, Fernandes B, Vicente AA, Teixeira JA. *3rd Generation Biofuels From Microalgae*. Editor: Méndez-Vilas A. 2 Current Research, Technology and Education Topics in Applied Microbiology and Microbial Biotechnology Microbiology Series No 2, Vol. 2, 1355-1366, Badajoz, Spain, Formatex, 2010.
- [43] Raheem A, Wan Azlina WAKG, Taufiq Yap YH, Danquah MK, Harun R. "Thermochemical conversion of microalgal biomass for biofuel production". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 990-999, 2015.
- [44] Tian Y, Li C, Bian J, Feng L. "Microalgae Derived Biofuels and Processes Processes". *2011 International Conference on Materials for Renewable Energy & Environment (ICMREE 2011)*, Shanghai, China, 20-22 May 2011.
- [45] Yen HW, Hu IC, Chen CY, Ho SH, Lee DJ, Chang JS. "Microalgae-based biorefinery-From biofuels to natural products". *Bioresource Technology*, 135, 166-174, 2013.
- [46] Huang GH, Chen F, Wei D, Zhang XW, Chen G. "Biodiesel production by microalgal biotechnology". *Applied Energy*, 87, 38-46, 2010.
- [47] Peng W, Wu Q, Tu P. "Effects of temperature and holding time on production of renewable fuels from pyrolysis of *Chlorella protothecoides*". *Journal of Applied Phycology*, 12, 147-152, 2000.
- [48] Gross M. Development and Optimization of Algal Cultivation Systems. MSc Thesis, Iowa State University, Ames, Iowa, US, 2013.
- [49] Renaud SM, Thinh LV, Lambrinidis G, Parry DL. "Effect of temperature on growth, chemical composition and fatty acid composition of tropical Australian microalgae grown in batch cultures". *Aquaculture*, 211, 195-214, 2002.

- [50] Converti A, Casazza AA, Ortiz EY, Perego P, Borghi MD. "Effect of temperature and nitrogen concentration on the growth and lipid content of *Nannochloropsis oculata* and *Chlorella vulgaris* for biodiesel production". *Chemical Engineering and Processing*, 48, 1146-1151, 2009.
- [51] Masojídek J, Koblížek M, Torzillo G. *Photosynthesis in Microalgae*. Editor: Richmond A. Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology. 20-39, Pondicherry, India, Blackwell Publishers, 2004.
- [52] Kim TH, Lee Y, Han SH, Hwang SJ. "The effects of wavelength and wavelength mixing ratios on microalgae growth and nitrogen, phosphorus removal using *Scenedesmus sp.* for wastewater treatment". *Bioresource Technology*, 130, 75-80, 2013.
- [53] Lee CG. "Calculation of light penetration depth in photobioreactors". *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 4, 78-81, 1999.
- [54] Ren, T. Primary Factors Affecting Growth of Microalgae Optimal Light Exposure Duration and Frequency. MSc Thesis, Iowa State University, Ames, Iowa, US, 2014.
- [55] Sforza E, Grisa B, Silva C, Morosinotto T, Bertucco A. "Effects of light on cultivation of *Scenedesmus obliquus* in batch and continuous flat plate photobioreactor". *Chemical Engineering Transactions*, 38, 211-216, 2014.
- [56] Al-Qasbi M, Raut N, Talebi S, Al-Rajhi S, Al-Barwani T. "A review of effect of light on microalgae growth". *The World Congress on Engineering 2012, WCE 2012*, London, UK, 4-6 July, 2012.
- [57] Eriksen NT. "The technology of microalgal culturing". *Biotechnology Letter*, 30, 1525-1536, 2008.
- [58] Huang J, Li Y, Wan M, Yan Y, Feng F, Qu X, Wang J, Shen G, Li W, Fan J, Wang W. "Novel flat-plate photobioreactors for microalgae cultivation with special mixers to promote mixing along the light gradient". *Bioresource Technology*, 159, 8-16, 2014.
- [59] Barbosa MJ, Janssen M, Ham N, Tramper J, Wijffels RH. "Microalgae cultivation in air-lift reactors: Modeling biomass yield and growth rate as a function of mixing frequency". *Biotechnology and Bioengineering*, 82(2), 170-179, 2003.
- [60] Blair MF, Kokabian B, Gude VG. "Light and growth medium effect on *Chlorella vulgaris* biomass production". *Journal of Environmental Chemical Engineering* 2, 665-674, 2014.
- [61] Kliphuis AMJ, Martens DE, Janssen M, Wijffels RH. "Effect of o₂:co₂ ratio on the primary metabolism of *Chlamydomonas reinhardtii*". *Biotechnology and Bioengineering*, 108, 2390-2402, 2011.
- [62] Wolkers H, Barbosa M, Kleinegris D, Bosma R, Wijffels RH. *Microalgae: The Green Gold of The Future?*. Wageningen UR, Propress, 2011.
- [63] Nwoba EG, Ayre JM, Moheimani NR, Ubi BE, Ogbonna JC. "Growth comparison of microalgae in tubular photobioreactor and open pond for treating anaerobic digestion piggery effluent". *Algal Research*, 17, 268-276, 2016.
- [64] Yılmaz HK. "Mikroalg üretimi için fotobiyoreaktör tasarımları". *Ege Üniversitesi Su Ürünleri Dergisi*, 23(1/2), 327-332, 2006.
- [65] Dębowski M, Zieliński M, Krzemieniewski M, Dudek M, Grala A. "Microalgae-cultivation methods". *Polish Journal of Natural Sciences*, 27(2), 151-164, 2012.
- [66] van der Hulst C. Microalgae Cultivation Systems: Analysis of Microalgae Cultivation Systems and LCA for Biodiesel Production. MSc Thesis, Utrecht University, Heidelberglaan, Utrecht, Netherlands, 2012.
- [67] Naz M, Gökçek K. "Fotobiyoreaktörler: Fototropik mikroorganizmalar için alternatif üretim sistemleri". *Ulusal Su Günleri*, İzmir, Türkiye, 6-8 Ekim 2004.
- [68] Kükdamar İ, Tokuç A. "Sıfır karbon binalara ulaşmada anahtar bir cephe önerisi". *12. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, Bayraklı, İzmir, Türkiye, 8-11 Nisan 2015.
- [69] Yang Z, Cheng J, Xu X, Zhou J, Cen K. "Enhanced solution velocity between dark and light areas with horizontal tubes and triangular prism baffles to improve microalgal growth in a flat-panel photo-bioreactor". *Bioresource Technology*, 211, 519-526, 2016.
- [70] Pulz O. *Open-air and semi-closed cultivation systems for the mass cultivation of microalgae*. Editors: Phang SM, Lee YK, Borowitzka MA, Whitton BA. *Algal Biotechnology in the Asia-Pacific Region*, 113-117, University of Malaya, Kuala Lumpur, 1994.
- [71] Richmond A, Cheng-Wu Z. "Optimization of a flat plate glass reactor for mass production of *Nannochloropsis sp.* outdoors". *Journal of Biotechnology*, 85, 259-269, 2001.
- [72] Su Z, Kang R, Shi S, Cong W, Cai Z. "Study on the destabilization mixing in the flat plate photobioreactor by means of CFD". *Biomass and Bioenergy*, 34, 1879-1884, 2010.
- [73] San Pedro A, González-López CV, Acien FG, Molina-Grima E. "Outdoor pilot-scale production of *Nannochloropsis gaditana*: Influence of culture parameters and lipid production rates in tubular photobioreactors". *Bioresource Technology*, 169, 667-676, 2014.
- [74] de Andrade GA, Berenguel M, Guzmán JL, Pagano DJ, Acien FG. "Optimization of biomass production in outdoor tubular photobioreactors". *Journal of Process Control*, 37, 58-69, 2016.
- [75] Slegers PM, van Beveren PJM, Wijffels RH, van Straten G, van Boxtel AJB. "Scenario analysis of large scale algae production in tubular photobioreactors". *Applied Energy*, 105, 395-406, 2012.
- [76] Chen C, Chang Y, Chang HY. "Outdoor cultivation of *Chlorella vulgaris* FSP-E in vertical tubular-type photobioreactors for microalgal protein production". *Algal Research*, 13, 264-270, 2016.
- [77] Seo I, Lee I, Hwang H, Hong S, Bitog JP, Kwon K, Lee C, Kim Z, Cuello JL. "Numerical investigation of a bubble-column photo-bioreactor design for microalgae cultivation". *Biosystems Engineering*, 113, 229-241, 2012.
- [78] Fernandes BD, Mota A, Ferreira A, Dragone G, Teixeira JA, Vicente AA. "Characterization of split cylinder airlift photobioreactors for efficient microalgae cultivation". *Chemical Engineering Science*, 117, 445-454, 2014.
- [79] Huang Q, Jiang F, Wang L, Yang C. "Design of photobioreactors for mass cultivation of photosynthetic organisms". *Engineering*, 3, 318-329, 2017.

- [80] Saladini F, Patrizi N, Pulselli FM, Marchettini N, Bastianoni S. "Guidelines for emergency evaluation of first, second and third generation biofuels". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, 221-227, 2016.
- [81] Naik SN, Goud VV, Rout PK, Dalai AK. "Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 578-597, 2010.
- [82] Sabancı A, Ören N, Yaşar B, Öztürk HH, Atal M, "Türkiye'de biyodizel ve biyoetanol üretiminin tarım sektörü açısından değerlendirilmesi". Türkiye Ziraat Mühendisliği VII. Teknik Kongresi, Ankara, 11-15 Ocak 2010.
- [83] Mohammed S, Ani FN. "An integrated approach for biodiesel and bioethanol production from *Scenedesmus bijugatus* cultivated in a vertical tubular photobioreactor". *Energy Conversion and Management* 101, 778-786, 2015.
- [84] Silva CEF, Bertucco A. "Bioethanol from microalgae and cyanobacteria: A review and technological Outlook". *Process Biochemistry*, 51, 1833-1842, 2016.
- [85] Chisti Y. "Biodiesel from microalgae beats bioethanol". *Trends in Biotechnology*, 26(3), 126-131, 2008.
- [86] Wang H, Ji C, Bi S, Zhou P, Chen L, Liu T. "Joint production of biodiesel and bioethanol from filamentous oleaginous microalgae *Tribonema sp.*". *Bioresource Technology*, 172, 169-173, 2014.
- [87] Lam MK, Lee KT. *Chapter 12-Bioethanol Production from Microalgae*, Editor: Kim SK. Handbook of Marine Microalgae, Biotechnology Advances, 197-208, London, UK, Elsevier Inc, 2015.
- [88] Gruber-Brunhumer MR, Jerney J, Zohar E, Nussbaumer M, Hieger C, Bochmann G, Schagerl M, Obbard JP, Fuchs W, Drosch B. "Acutodesmus obliquus as a benchmark strain for evaluating methane production from microalgae: Influence of different storage and pretreatment methods on biogas yield". *Algal Research*, 12, 230-238, 2015.
- [89] Tongprawan W, Srinuanpan S, Cheirsilp B. "Biocapture of CO₂ from biogas by oleaginous microalgae for improving methane content and simultaneously producing lipid". *Bioresource Technology*, 170, 90-99, 2014.
- [90] Marcilla A, Catalá L, García-Quesada JC, Valdés FJ, Hernández MR. "A review of thermochemical conversion of microalgae". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 11-19, 2013.
- [91] Chiaramonti D, Prussi M, Buffi M, Casini D, Rizzo AM. "Thermochemical conversion of microalgae: challenges and opportunities". *Energy Procedia*, 75, 819-826, 2015.
- [92] Figueira CE, Moreira JrPF, Giudici R. "Thermogravimetric analysis of the gasification of microalgae *Chlorella vulgaris*". *Bioresource Technology*, 198, 717-724, 2015.
- [93] Ferreira AF, Soares DAP, Silva CM, Costa M. "Evaluation of thermochemical properties of raw and extracted microalgae". *Energy*, 92, 365-372, 2015.
- [94] Wang P, Li Z, Bai J, Langa Y, Hu H. "Optimization of microalgal bead preparation with *Scenedesmus obliquus* for both nutrient removal and lipid production". *Ecological Engineering*, 92, 236-242, 2016.
- [95] Zhou W, Li Y, Min M, Hu B, Zhang H, Ma X, Li L, Cheng Y, Chen P, Ruan R. "Growing wastewater-born microalga *Auxenochlorella protothecoides* UMN280 on concentrated municipal wastewater for simultaneous nutrient removal and energy feedstock production". *Applied Energy*, 98, 433-440, 2012.
- [96] Ip SY, Bridger JS, Chi C, Martin, WRB, Rape WGC. "Algal growth in primary settled sewage-the effects of five key variables". *Water Research*, 16, 621-632, 1982.
- [97] König A, Pearson HW, Silva SA. "Ammonia toxicity to algal growth in waste stabilization ponds". *Water Sci. Technol*, 19, 115-122, 1987.
- [98] Wrigley TJ, Toerien DF, "Limnological aspects of small sewage ponds". *Water Research*, 24(1), 83-90, 1990.
- [99] Lau PS, Tam NFY, Wong YS. "Effect of algal density on nutrient removal from primary settled wastewater". *Environmental Pollution*, 89 (1), 59-66, 1995.
- [100] Pittman JK, Dean AP, Osundeko O, "The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources". *Bioresource Technology*, 102(1), 17-25, 2011.
- [101] Olguin EJ. "Phycoremediation: key issues for cost-effective nutrient removal processes". *Biotechnology Advances*, 22(1-2), 81-91, 2003.
- [102] Chinnasamy S, Bhatnagar A, Hunt RW, Das KC. "Microalgae cultivation in a wastewater dominated by carpet mill effluents for biofuel applications". *Bioresource Technology*, 101(9), 3097-105, 2010.
- [103] Kong Q, Li L, Martinez B, Chen P, Ruan R. "Culture of microalgae *Chlamydomonas reinhardtii* in wastewater for biomass feedstock production". *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 160(1), 9-18, 2010.
- [104] Wang L, Min M, Li Y, Chen P, Chen Y, Liu Y. "Cultivation of green algae *Chlorella sp.* in different wastewaters from municipal wastewater treatment plant". *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 162(4), 1174-1186, 2010.
- [105] Rawat I, Ranjith Kumar R, Mutanda T, Bux F. "Dual role of microalgae: phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production". *Applied Energy*, 88(10), 3411-3424, 2011.
- [106] Martinez ME, Sanchez S, Jimenez JM, El Yousfi F, Munoz L. "Nitrogen and phosphorus removal from urban wastewater by the microalga *Scenedesmus obliquus*". *Bioresource Technology*, 73(3), 263-272, 2000.
- [107] Ruiz-Marin A, Mendoza-Espinosa LG, Stephenson T. "Growth and nutrient removal in free and immobilized green algae in batch and semi-continuous cultures treating real wastewater". *Bioresource Technology*, 101(1), 58-64, 2010.
- [108] Zhang ED, Wang B, Wang QH, Zhang SB, Zhao BD. "Ammonia-nitrogen and orthophosphate removal by immobilized *Scenedesmus sp.* isolated from municipal wastewater for potential use in tertiary treatment". *Bioresource Technology*, 99(9), 3787-3793, 2008.
- [109] Masseret E, Amblard C, Bourdier G, Sargos D. "Effects of a waste stabilization lagoon discharge on bacterial and phytoplanktonic communities of a stream". *Water Environment Research*, 72(3), 285-294, 2000.
- [110] Canovas S, Picot B, Casellas, C, Zulkifi, Dubois, A., Bontoux J. "Seasonal development of phytoplankton and zooplankton in a high-rate algal pond". *Water Science and Technology*, 33(7), 199-206, 1996.

- [111] Travieso L, Benitez F, Dupeiron R. "Sewage treatment using immobilized microalgae". *Bioresource Technology*, 40(2), 183-187, 1992.
- [112] Ruiz-Marin A, Mendoza-Espinosa LG, Stephenson T. "Growth and nutrient removal in free and immobilized green algae in batch and semi-continuous cultures treating real wastewater". *Bioresource Technology*, 101(1), 58-64, 2010.
- [113] Orpez R, Martinez ME, Hodaifa G, El Yousfi F, Jbari N, Sanchez S. "Growth of the microalga *Botryococcus braunii* in secondarily treated sewage". *Desalination*, 246(1-3), 625-630, 2009.
- [114] Woertz I, Feffer A, Lundquist T, Nelson Y. "Algae grown on dairy and municipal wastewater for simultaneous nutrient removal and lipid production for biofuel feedstock". *Journal of Environmental Engineering*, 135(11), 1115-1122, 2009.
- [115] Bhatnagar A, Bhatnagar M, Chinnasamy S, Das K. "Chlorella minutissima - a promising fuel alga for cultivation in municipal wastewaters". *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 161(1-8), 523-536, 2010.
- [116] Wilkie AC, Mulbry WW. "Recovery of dairy manure nutrients by benthic freshwater algae". *Bioresource Technology*, 84(1), 81-91, 2002.
- [117] An JY, Sim SJ, Lee JS, Kim BW. "Hydrocarbon production from secondarily treated piggery wastewater by the green alga *Botryococcus braunii*". *Journal of Applied Phycology*, 15(2-3), 185-191, 2003.
- [118] Gonzalez LE, Canizares RO, Baena S. "Efficiency of ammonia and phosphorus removal from a Colombian agroindustrial wastewater by the microalgae *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus dimorphus*". *Bioresource Technology*, 60(3), 259-262, 1997.
- [119] Blier R, Laliberte G, De la Noüe J. "Tertiary treatment of cheese factory anaerobic effluent with *Phormidium bohneri* and *Micractinium pusillum*". *Bioresource Technology*, 52(2), 151-155, 1995.
- [120] El-Sikaily A, El Nembr A, Khaled A, Abdelwehab O. "Removal of toxic chromium from wastewater using green alga *Ulva lactuca* and its activated carbon". *Journal of Hazardous Materials*, 148(1-2), 216-228, 2007.
- [121] Christenson L, Sims R. "Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment, biofuels, and bioproducts". *Biotechnology Advances*, 29(6), 686-702, 2011.
- [122] Woertz I, Feffer A, Lundquist T, Nelson Y. "Algae grown on dairy and municipal wastewater for simultaneous nutrient removal and lipid production for biofuel feedstock". *Journal of Environmental Engineering*, 135(11), 1115-1122, 2009.
- [123] Markou G, Georgakakis D. "Cultivation of filamentous cyanobacteria (bluegreen algae) in agro-industrial wastes and wastewaters: a review". *Applied Energy*, 88(10), 3389-3401, 2011.
- [124] Öztürk I, Eroglu V, Ubay G, Demir I. "Hybrid upflow anaerobic sludge blanket reactor (HUASBR) treatment of dairy effluents." *Water Science and Technology*, 28(2), 77-85, 1993.
- [125] Longhurst R, Roberts A, O'Connor M. "Farm dairy effluent: a review of published data on chemical and physical characteristics in New Zealand." *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 43(1), 7-14, 2000.
- [126] Lincoln E, Wilkie A, Frenc B. "Cyanobacterial process for renovating dairy wastewater." *Biomass Bioenergy* 10(1), 63-68, 1996.
- [127] Gentili FG. "Microalgal biomass and lipid production in mixed municipal, dairy, pulp and paper wastewater together with added flue gases." *Bioresource Technology*, 169, 27-32, 2014.
- [128] Lu W, Wang Z, Wang X, Yuan Z. "Cultivation of *Chlorella* sp. using raw dairy wastewater for nutrient removal and biodiesel production: Characteristics comparison of indoor bench-scale and outdoor pilot-scale cultures". *Bioresource Technology*, 192, 382-388, 2015.
- [129] Hena S, Fatimah S, Tabassum S. "Cultivation of algae consortium in a dairy farm wastewater for biodiesel production". *Water Resources and Industry*, 10, 1-14, 2011.
- [130] Choi H. "Dairy wastewater treatment using microalgae for potential biodiesel application". *Environmental Engineering Research*, 21(4), 393-400, 2016.
- [131] Sreekanth D, Pooja K, Seeta Y, Himabindu V, Reddy PM. "Bioremediation of dairy wastewater using microalgae for the production of biodiesel". *International Journal of Science Engineering and Advance Technology*, 2, 783-791, 2014.
- [132] Lu Q, Zhou W, Min M, Ma X, Ma Y, Chen P, Zheng H, Doan YTT, Liu H, Chen C, Urriola PE, Shurson GC, Ruan R. "Mitigating ammonia nitrogen deficiency in dairy wastewaters for algae cultivation". *Bioresource Technology*, 201, 33-40, 2016.
- [133] Koç C, Duran H. "Determination of the effect of whey as a nutritional supplement in different growth medium regarding to its potential to biodiesel feedstock production". *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi* 32(3), 309-315, 2017.
- [134] Seo YH, Lee I, Jeon SH, Han JI. "Efficient conversion from cheese whey to lipid using *Cryptococcus curvatus*". *Biochemical Engineering Journal*, 90, 149-153, 2014..
- [135] Tsolcha ON, Tekerlekopoulou AG, Akrotas CS, Bellou S, Aggelis G, Katsiapi M, Moustaka MG, Vayenas DV, Chem J. "Treatment of second cheese whey effluents using a Choricystis-based system with simultaneous lipid production". *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 91(8), 2349-2359, 2016.
- [136] Ahluwalia SS, Goyal D. "Microbial and plant derived biomass for removal of heavy metals from wastewater". *Bioresource Technology*, 98(12), 2243-2257, 2007.
- [137] de-Bashan LE, Bashan Y. "Immobilized microalgae for removing pollutants: review of practical aspects". *Bioresource Technology*, 101(6), 1611-1627, 2010.
- [138] Mallick N. "Biotechnological potential of immobilized algae for wastewater N, P and metal removal: a review". *BioMetals* 15, 377-390, 2002.
- [139] Lam MK, Lee KT, Mohamed AR. "Review Current status and challenges on microalgae-based carbon capture". *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 10, 456-469, 2012.
- [140] Slade R, Bauen A. "Micro-algae cultivation for biofuels: Cost, energy balance, environmental impacts and future prospects". *Biomass and Bioenergy*, 53, 29-38, 2013.

- [141] Xin C, Addy MM, Zhao J, Cheng Y, Cheng S, Mud D, Liu Y, Ding R, Chen P, Ruan R. "Comprehensive techno-economic analysis of wastewater-based algal biofuel production: A case study". *Bioresource Technology*, 211, 584-593, 2016.
- [142] Min M, Wang L, Li Y, Mohr MJ, Hu B, Zhou W, Chen P, Ruan R, "Cultivating Chlorella sp. in a pilot-scale photobioreactor using centrate wastewater for microalgae biomass production and wastewater nutrient Removal". *Applied Biochemistry and Biotechnology* 165(1), 123-137, 2011.
- [143] Mata TM, Mendes AM, Caetano NS, Martins AA. "Sustainability and economic evaluation of microalgae grown in brewery wastewater." *Bioresource Technology*. 168, 151-158, 2014.
- [144] Davis RE, Fishman DB, Frank ED, Johnson MC, Jones SB, Kinchin CM, Skaggs RL, Venteris ER, Wigmosta MS. 2014. "Integrated evaluation of cost, emissions, and resource potential for algal biofuels at the national scale." *Environmental Science & Technology*, 48(10), 6035-6042.
- [145] Ventura JRS, Yang B, Lee YW, Lee K, Jahng D. "Life cycle analyses of CO₂, energy, and cost for four different routes of microalgal bioenergy conversion". *Bioresource Technology*, 137, 302-310, 2013.
- [146] Nagarajan A, Chou SK, Cao S, Wub C, Zhou Z. "An updated comprehensive techno-economic analysis of algae biodiesel". *Bioresource Technology*, 145, 150-156, 2013.
- [147] Thilakarathne R, Wright MM, Brown RC. "A techno-economic analysis of microalgae remnant catalytic pyrolysis and upgrading to fuels." *Fuel*, 128, 104-112. 2014.
- [148] Orfield ND, Keoleian GA, Love NG. "A GIS based national assessment of algal bio-oil production potential through flue gas and wastewater coutilization". *Biomass Bioenergy*, 63, 76-85. 2014.
- [149] Lundquist TJ, Woertz IC, Quinn NWT, Benemann JR. "A realistic technology and engineering assessment of algae biofuel production 2010". Energy Biosciences Institute, University of California, Berkeley.
- [150] EERE, 2008. Algae biofuels. In: E.E.R.E. U.S. Department of Energy (Ed.), Growing America's Energy Future. Alternative Fuels Data Center, Washington, DC, USA.
- [151] Elmoraghy M, Farag I. "Bio-jet Fuel from Microalgae Reducing Water and Energy Requirements for Algae Growth". *International Journal of Engineering and Science* 1(2):22-30, 2012.
- [152] Brutyan MM, "Foresight of Microalgae Usage for the Production of Third-Generation Biofuel", *Indian Journal of Science and Technology*, 10(16), 2016.
- [153] Harun R, Davidson M, Doyle M, Gopiraj R, Danquah M, Forde G. "Technoeconomic analysis of an integrated microalgae photobioreactor, biodiesel and biogas production facility." *Biomass & Bioenergy* 35(1), 741-747, 2011.
- [154] Amer L, Adhikari B, Pellegrino J. "Technoeconomic analysis of fivemicroalgae-to-biofuels processes of varying complexity". *Bioresource Technology*, 102 (20), 9350-9359. 2011.
- [155] Delrue F, Setier PA, Sahut C, Cournac L, Roubaud A, Peltier G, Froment AK. "An economic, sustainability, and energetic model of biodiesel production from microalgae". *Bioresource Technology*, 111, 191-200. 2012.
- [156] Richardson JW, Johnson MD, Zhang X, Zemke P, Chen W, Hu Q. "A financial assessment of two alternative cultivation systems and their contributions to algae biofuel economic viability". *Algal Research*, 4, 96-104, 2014.
- [157] Park JBK, Craggs RJ, Shilton AN. "Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production". *Bioresource Technology*, 102, 35-42, 2011.
- [158] Usher PK, Ross AB, Camargo-Valero MA, Tomlin AS, Gale WF. "An overview of the potential environmental impacts of largescale microalgae cultivation". *Biofuels*, 5(3), 331-349, 2014.
- [159] Defense Advanced Research Projects Agency. "Biofuels (Archived)". <https://www.darpa.mil/program/biofuels> (10.04.2018).
- [160] Quinn JC, Catton K, Wagner N, Bradley TH, "Current Large-Scale US Biofuel Potential from Microalgae Cultivated in Photobioreactors", *Bioenergy Research*, 5, 49-60, 2012.
- [161] Business Wire. "Hawaiian Algae Biofuel Companies, Military Customers Featured at BIO's 2010 Pacific Rim Summit" <https://www.businesswire.com/news/home/20101202006322/en/Hawaiian-Algae-Biofuel-Companies-Military-Customers-Featured> (10.04.2018).
- [162] Berner K. "Commercializing algal biofuels". Paper presented at the Pacific Rim Summit on Industrial *Biotechnology & Bioenergy*, Honolulu, HI, 11-14 December 2010.
- [163] Cyanotech. "Welcome to Cyanotech". <http://www.cyanotech.com/index.html> (10.04.2018).
- [164] Asia Biomass Energy Cooperation Promotion Office. "Initiatives for the Large-Scale Outdoor Cultivation of Microalgae". https://www.asiabiomass.jp/english/topics/1505_04.html (10.04.2018).