T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ATIKSU KULLANILARAK DÜZ PLAKA FOTOBİYOREAKTÖRDE MİKROALG KÜLTİVASYONU

UZEYLE ELCİK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

DANIŞMAN
PROF. DR. BESTAMİ ÖZKAYA

İSTANBUL, 2016

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ATIKSU KULLANILARAK DÜZ PLAKA FOTOBİYOREAKTÖRDE MİKROALG KÜLTİVASYONU

Uzeyle ELCİK tarafından hazırlanan tez çalışması 25.10.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Bestami ÖZKAYA

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Bestami ÖZKAYA

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet ÇAKMAKCI

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr.Erkan ŞAHİNKAYA

İstanbul Medeniyet Üniversitesi

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 2210-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Yüksek Lisans Bursu ve makine-teçhizat ve sarf kullanımı bakımından 1643.STZ.2012-2 nolu SANTEZ projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Bu çalışma Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinden Prof. Dr. Bestami ÖZKAYA yönetiminde hazırlanarak YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü'ne Yüksek Lisans tezi olarak sunulmuştur.

Öncelikle çalışmalarımın her safhasında, engin bilgi ve tecrübelerini esirgemeden akademik yönlendirmeleri ve pozitif enerjisiyle bana her zaman destek olan, tez öğrencisi olmaktan gurur duyduğum çok değerli hocam Prof. Dr. Bestami ÖZKAYA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam esnasında yardımlarını gördüğüm, akademik deneyim ve birikimlerinden yararlandığım değerli hocam Prof. Dr. Mehmet ÇAKMAKCI'ya,

Tez çalışmalarımın tüm aşamalarında şüphesiz en çok emeği geçen, çalışmalarım boyunca gösterdiği sabır ve manevi desteklerinden ötürü sevgili eşim Dr. Harun ELCİK'e,

Tez çalışmam boyunca 2210-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Yüksek Lisans Bursu ile finansal destek aldığım Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'na teşekkür ederim.

Son olarak tüm hayatım boyunca, her konuda bana olan maddi ve manevi desteklerinden ötürü annem Nazife SEZER ve kız kardeşlerime sonsuz teşekkür ederim.

Ekim, 2016

Uzeyle ELCİK

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KISALTMA LİSTESİ viii

ŞEKİL LİSTESİ ix

ÇİZELGE LİSTESİ xi

ÖZET xii

ABSTRACT xiv

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 2
1.3 Hipotez 2

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 4

2.1 Mikroalglerin Genel Özellikleri 4
2.2 Mikroalglerin Tarihçesi 6
2.3 Mikroalgal Türlerin Karakterizasyonu 7
2.4 Mikroalg Kültivasyonu 8
2.4.1 Mikroalg Üretimine Etki Eden Faktörler 8
2.4.1.1 Besin Maddeleri 8
2.4.1.2 Işık 10
2.4.1.3 Sıcaklık 11
2.4.1.4 pH 12
2.4.1.5 Karıştırma 12
2.4.1.6 Çözünmüş Oksijen 12
2.4.1.7 Biyolojik Faktörler 13
2.4.2 Mikroalg Kültivasyon Sistemleri 13
2.4.2.1 Açık Sistemler 13
2.4.2.2 Kapalı Sistemler 15

2.4.2.3 Mikroalg Üretim Sistemlerinin Karşılaştırması 17
2.5 Atıksuların Arıtılmasında Mikroalglerin Kullanımı 18
2.5.1 Evsel Atıksular 19
2.5.2 Sızıntı Suları 20
2.5.3 Endüstriyel Atıksular 22
2.6 Mikroalglerin Hasat Edilmesi 22
2.7 Mikroalgal Biyoyakıtlar 25
2.7.1 Biyodizel 25
2.7.2 Biyoetanol 26
2.7.3 Biyohidrojen 27
2.7.4 Biyometan 28
2.8 Mikroalglerin Diğer Kullanım Alanları 29
2.8.1 İnsanlar İçin Besin Maddesi Olarak Ve Sağlıkta Kullanımı 29
2.8.2 Hayvanlar İçin Besin Kaynağı Olarak Kullanımı 30
2.8.3 Kozmetikte Kullanımı 31

BÖLÜM 3

MATERYAL VE METOT 32

3.1 Çalışmada Kullanılan Mikroalg 32
3.2 Mikroalglerin Yetiştirildiği Sentetik Besin Ortamı 33
3.3 Kültivasyon Çalışmalarında Kullanılan Sızıntı Suyu 35
3.4 Mikroalg Kültivasyonunda Kullanılan Fotobiyoreaktör 37
3.5 Çalışamada Kullanılan Sarf Malzemeler 39
3.6 Çalışamada Kullanılan Cihazlar 41
3.7 Analizler 41
3.7.1 Optik Yoğunluk ve Kuru Ağırlık Analizleri 42
3.8 Mikroalglerin Büyüme Hızlarının ve İkilenme Sürelerinin Hesaplanması 43
3.9 Mikroalglerin Kullandığı CO_2 Miktarının Hesaplanması 44

BÖLÜM 4

BULGULAR VE TARTIŞMA 45

4.1 Farklı Oranlarda Arıtılmış Sızıntı Suyu İle Mikroalg Kültivasyonu 46
4.1.1 Optik Yoğunluk Değerleri 46
4.1.2 Kuru Ağırlık Değerleri 47
4.1.3 NH_4^+-N Değerleri 48
4.1.4 PO_4^{-3}-P Değerleri 49
4.1.5 pH Değerleri 51
4.1.6 Çözünmüş Oksijen Değerleri 52
4.1.7 Sıcaklık Değerleri 53
4.1.8 İletkenlik Değerleri 54
4.2 Mikroalglerin CO_2 Kullanım Miktarı 54
4.3 86 Günlük Mikroalg Kültivasyon Çalışması 55
4.3.1 Optik Yoğunluk Değerleri 55
4.3.2 Kuru Ağırlık Değerleri 56
4.3.3 NO_3^--N ve NH_4^+-N Değerleri 57

4.3.4 PO_4^{-3}-P Değerleri 58
4.3.5 pH Değerleri 59
4.3.6 Çözünmüş Oksijen Değerleri 60
4.3.7 Sıcaklık Değerleri 60
4.3.8 İletkenlik Değerleri 61

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER 63

KAYNAKLAR 65

EK-A 76

Kültivasyondan Sonra Elde Edilen Görüntüler 76

A-1 Kültivasyondan Sonra Düz Plaka Fotobiyoreaktörün Görüntüsü 76
A-2 Kültivasyondan Sonra Mikroalglerin Görüntüsü 77

ÖZGEÇMİŞ 78

KISALTMA LİSTESİ

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
Abs	Absorbans
BBM	Bold's Basal besin ortamı
HCl	Hidroklorik asit
İSTAÇ	İstanbul Çevre Koruma ve Katı Atık Maddeleri Değerlendirme Sanayi ve Ticaret A.Ş.
KOH	Potasyum hidroksit
NaOH	Sodyum hidroksit
PBR	Fotobiyoreaktör

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Yaygın kullanılan bazı mikroalglerin özellikleri 5
Şekil 2.2 pH'ya bağlı olarak inorganik karbon formlarının değişimi 9
Şekil 2.3 Açık kültivasyon sistemleri..... 14
Şekil 2.4 Kapalı kültivasyon sistemleri 16
Şekil 3.1 *Chlorella vulgaris* hücrelerine ait mikroskop görüntüsü 33
Şekil 3.2 *Chlorella vulgaris* hücrelerinin çoğaltılması..... 35
Şekil 3.3 İstaç A.Ş. Odayeri Atıksu Arıtma Tesisi Akım Şeması..... 35
Şekil 3.4 İstaç A.Ş. Odayeri Sızıntı Suyu Arıtma Tesisi havalandırma havuzu 36
Şekil 3.5 İstaç A.Ş. Odayeri Sızıntı Suyu Arıtma Tesisi membran prosesleri 36
Şekil 3.6 Hava hattına bağlanan 0.22 µm gözenek çapına sahip hidrofobik filtre..... 37
Şekil 3.7 Düz plaka fotobiyoreaktörün hazırlanma görüntüleri..... 38
Şekil 3.8 Düz plaka fotobiyoreaktörün tamamlanmış görüntüsü 39
Şekil 3.9 Optik yoğunluk analizinde kullanılan UV–VİS spektrofotometre 42
Şekil 3.10 Kuru ağırlık analizi için kullanılan süzme düzeneği..... 43
Şekil 3.11 Kesikli sistemlerde mikroorganizmaların büyüme kinetiği 44
Şekil 4.1 Kültivasyon süresi boyunca mikroalg kültürlerindeki optik yoğunluk değerlerinin değişimi..... 46
Şekil 4.2 Kültivasyon süresi boyunca mikroalg kültürlerindeki kuru ağırlık değerlerinin değişimi 47
Şekil 4.3 Kültivasyon süresi boyunca mikroalg kültürlerindeki NH_4^+-N değerlerinin değişimi 48
Şekil 4.4 Kültivasyon süresi boyunca mikroalg kültürlerindeki PO_4^{-3}-P değerlerinin değişimi 49
Şekil 4.5 Kültivasyon süresi boyunca mikroalg kültürlerindeki pH değerlerinin değişimi 51
Şekil 4.6 Kültivasyon süresi boyunca mikroalg kültürlerindeki çözünmüş oksijen değerlerinin değişimi..... 52
Şekil 4.7 Kültivasyon süresi boyunca mikroalg kültürlerindeki sıcaklık değerlerinin değişimi 53
Şekil 4.8 Kültivasyon süresi boyunca mikroalg kültürlerindeki iletkenlik değerlerinin değişimi 54
Şekil 4.9 86 günlük kültivasyon süresi boyunca mikroalg kültürlerindeki optik yoğunluk değerlerinin değişimi (solda: BBM besin ortamı, sağda: %10 oranında hazırlanmış sızıntı suyu) 56

Şekil 4.10 86 günlük kültivasyon süresi boyunca mikroalg kültürlerindeki kuru ağırlık değerlerinin değişimi (solda: BBM besin ortamı, sağda: %10 oranında hazırlanmış sızıntı suyu) 57
Şekil 4.11 86 günlük kültivasyon süresi boyunca mikroalg kültürlerindeki azot konsantrasyonlarının değişimi (solda: BBM besin ortamı, sağda: %10 oranında hazırlanmış sızıntı suyu) 57
Şekil 4.12 86 günlük kültivasyon süresi boyunca mikroalg kültürlerindeki PO_4^{-3}-P konsantrasyonlarının değişimi (solda: BBM besin ortamı, sağda: %10 oranında hazırlanmış sızıntı suyu) 58
Şekil 4.13 86 günlük kültivasyon süresi boyunca mikroalg kültür ortamındaki pH'ın değişimi (solda: BBM besin ortamı, sağda: %10 oranında hazırlanmış sızıntı suyu) 59
Şekil 4.14 86 günlük kültivasyon süresi boyunca mikroalg kültür ortamındaki çözünmüş oksijen konsantrasyonunun değişimi (solda: BBM besin ortamı, sağda: %10 oranında hazırlanmış sızıntı suyu) 60
Şekil 4.15 86 günlük kültivasyon süresi boyunca mikroalg kültür ortamındaki sıcaklık değerinin değişimi (solda: BBM besin ortamı, sağda: %10 oranında hazırlanmış sızıntı suyu) 61
Şekil 4.16 86 günlük kültivasyon süresi boyunca mikroalg kültür ortamındaki iletkenlik değerinin değişimi (solda: BBM besin ortamı, sağda: %10 oranında hazırlanmış sızıntı suyu) 61

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Farklı kapalı mikroalg üretim sistemlerinin karşılaştırması 17
Çizelge 2.2 Açık ve kapalı mikroalg üretim sistemlerinin karşılaştırması..... 18
Çizelge 2.3 Farklı atıksu kaynaklarının toplam azot ve toplam azot konsantrasyonları 22
Çizelge 2.4 Mikroalg hasadında kullanılan yöntemlerin avantaj ve dezavantajları..... 24
Çizelge 2.5 Bazı mikroalg türlerinin metan üretim potansiyeli..... 28
Çizelge 2.6 Mikroalgal ürünlerin üretim durumu 31
Çizelge 3.1 *Chlorella vulgaris*'in taksonomisi..... 32
Çizelge 3.2 Bold's Basal besin ortamı..... 34
Çizelge 3.3 Çalışamada kullanılan sarf malzemeler 40
Çizelge 3.4 Çalışamada kullanılan ekipman/cihaz'lar 41
Çizelge 3.5 Çalışamada analiz edilen parametreler 41
Çizelge 4.1 Mikroalg hücrelerinin spesifik büyüme hızları ve ikilenme süreleri..... 47
Çizelge 4.2 Mikroalglerin $C0_2$ kullanım miktarları..... 55

ÖZET

ATIKSU KULLANILARAK DÜZ PLAKA FOTOBİYOREAKTÖRDE MİKROALG KÜLTİVASYONU

Uzeyle ELCİK

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bestami ÖZKAYA

Fosil yakıtların hızla tükenmesi ve çevreye olumsuz etkileri sebebiyle alternatif ve çevre dostu enerji kaynakları giderek önem kazanmaktadır. Son yıllarda mikroalgal biyokütle özellikle biyodizel olmak üzere biyoyakıt üretimi için alternatif bir ham madde kaynağı olarak görülmektedir. Mikroalgler bünyelerinde yüksek miktarda lipit biriktirebilmeleri ve karasal bitkilere göre daha hızlı büyümeleri sebebiyle biyodizel üretimi için umut verici bir ham madde kaynağıdır. Ancak, mikroalgal biyokütleden biyodizel üretim maliyetleri hala oldukça yüksektir.

Düşük maliyetli mikroalgal biyodizel üretimi için alternatif birçok yöntem sunulmuştur. Bu yöntemler içerisinde en önemlilerden bir tanesi mikroalg kültivasyonunda atıksuların kullanılmasıdır. Mikroalglerin atıksu kullanılarak kültivasyonu, atıksular içerisinde bol miktarda besin maddesi bulunması sebebiyle, besin maddesi kullanımı açısından maliyet tasarrufu sağlar. Bunun yanı sıra mikroalg kültivasyonunda atıksu kullanılması, inorganik kirleticilerin (amonyum, nitrat ve fosfat gibi) mikroalgal biyokütle içerisinde özümsenmesi ile, atıksuyun arıtılmasını sağlar.

Bu çalışmada düşük maliyetli biyodizel üretimi için mikroalg kültivasyonunda besin kaynağı olarak arıtılmış çöp sızıntı suyunun kullanılabilirliği ve atıksu içerisinde bulunan kirleticilerin mikroalgal hücreler tarafından giderilebilirliği araştırılmıştır.

Kültivasyon çalışmalarında tek hücreli mikroalglerden *Chlorella vulgaris* kullanılmıştır. Mikroalgal hücrelerin kültivasyonu özel olarak imal edilen düz plaka fotobiyoreaktörde

farklı oranlarda hazırlanan arıtılmış çöp sızıntı suyu ile gerçekleştirilmiştir. Mikroalgal kültür ortamında belirli zaman aralıklarıyla optik yoğunluk, kuru ağırlık, NH_4^+-N, NO_3^--N ve PO_4^{-3}-P analizleri gerçekleştirlmiştir. Kültür ortamının pH, çözünmüş oksijen, sıcaklık, iletkenlik değerleri belirli zaman aralıklarıyla ölçülmüştür. Ayrıca, mikroalglerin spesifik büyüme hızları, ikilenme süreleri ve CO_2 kullanım miktarları belirlenmiştir.

Çalışma sonuçlarına göre en iyi mikroalgal büyüme %25 oranında hazırlanan arıtılmış çöp sızıntu suyu ile gerçekleşmiştir. %25 oranında hazırlanan atıksu ile yapılan çalışmada mikroalglerin spesifik büyüme hızı 0.095 gün^{-1}, ikilenme süresi 7.29 gün ve CO_2 kullanım miktarı 0.191 g CO_2/L gün olarak belirlenmiştir.

%25, %50 ve %100 oranlarında hazırlanan arıtılmış atıksularda mikrolgal hücrelerin azot giderim verimleri sırasıyla %28, %75 ve %8.5 olarak analiz edilmiştir. Aynı oranlarda mikroalgal hücrelerin fosfor giderme verimleri sırasıyla %95, %47 ve %2.5'dir.

Çalışma sonuçları, arıtılmış çöp sızıntı suyunun mikroalg kültivasyonunda kullanılabilirliğinin uygun olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte arıtılmış çöp sızıntı suyunda bulunan yüksek konsantrasyonlardaki amonyumun mikroalgal büyümeyi yavaşlattığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mikroalg, kültivasyon, biyokütle, fotobiyoreaktör, atıksu arıtımı, biyodizel

ABSTRACT

MICROALGAE CULTIVATION IN FLAT PLATE PHOTOBIOREACTOR USING WASTEWATER

Uzeyle ELCIK

Department of Environmental Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Bestami OZKAYA

Due to the rapidly depletion of fossil fuels and their the adverse environmental impacts, alternative and environmentally friendly energy resources becomes increasingly important. In recent years, microalgal biomass has been recognized as a alternative source of raw material in biofuel production especially for biodiesel. Microalgae are a promising raw material source for biodiesel production due to their ability to accumulate high amounts of lipids and faster growth compared to terrestrial plant. However, biodiesel production costs from microalgal biomass are still quite high.

Low cost alternative methods for microalgal biodiesel production has been presented. One of the most important of these methods is the use of wastewater in microalgae cultivation. The cultivation of microalgae using wastewater saves cost of nutrients supplement since nutrients are in abundance in wastewater. Besides that wastewater usage for microlgae cültivation provides the treatment of the wastewater by assimilating inorganic pollutants (such as ammonium, nitrate and phosphate) into their biomass.

In this study, the availability of treated landfill leachate as a nutrient source in microalgae cultivation for low-cost biodiesel production and the treatability of pollutants in wastewater by microalgal cells were investigated.

Chlorella vulgaris from unicellular microalgae was used in cultivation studies. Cultivation of microalgal cells was carried out in specially manufactured flat-plate

photobioreactor with treated landfill leachate prepared in different proportions. In the microalgal culture medium, optical density, dry weight, NH_4^+-N, NO_3^--N and PO_4^{-3}-P analysis were periodically performed. pH, dissolved oxygen, temperature and conductivity values of the culture medium were measured at certain time. Furthermore, the specific growth rate, doubling time and the amount of CO_2 usage of microalgae were determined.

According to study results, the best microalgal growth happened with contains 25% of treated landfill leachate. In the study prepared with 25% of the wastewater, specific growth rate, doubling time and the amount of CO_2 usage of microalgae were determined 0.095 day^{-1}, 7.29 day and 0.191 g CO_2/L day, respectively.

Nitrogen removal efficiencies of the microalgal cells in 25%, 50% and 100% of treated landfill leachate were analysed as 28%, 75% and 8.5%, respectively. In the same proportions, phosphorus removal efficiency of microalgal cells are 95%, 47% and 2.5%, respectively.

Study results showed that the availability of treated landfill leachate in microalgae cultivation is suitable. However, the inhibition of microalgal growth was determined at high ammonium concentrations in the treated landfill leachate.

Keywords: Microalgae, cultivation, biomass, photobioreactor, wastewater treatment, biodiesel

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Günümüzde zirai, kentsel ve endüstriyel proseslerden büyük miktarlarda atıksular üretilmektedir. Üretilen bu atıksuların içeriğinde yüksek miktarlarda azot ve fosfor gibi besin maddelerinin bulunması su kaynaklarında ötröfikasyona sebep olabilmektedir ve ekosistemin dengesini bozabilmektedir. Ötröfikasyon, 20. yüzyılın ortalarından itibaren devam eden önemli bir çevre problemidir.

Atıksuların arıtımında, besin maddelerinin ve toksik metallerin alıcı ortama deşarj edilmeden önce veya tekrar kullanımından önce kabul edilebilir değerlere düşürülmesi gerekmektedir. Ancak, birçok konvansiyonel kimyasal ve fiziksel atıksu arıtma teknolojisi ekonomik değildir. Bu yöntemlere alternatif olarak mikroalglerin, birçok türde atıksudan azot, fosfor ve toksik metallerin gideriminde etkili olduğu kanıtlanmıştır. Kensel, tarımsal ve endüstriyel atıksularda mikroalg kültivasyonu ile ilgili çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda, önemli miktarda besin maddesi giderimi ve mikroalgal biyokütle üretimi elde edilmiştir. Dolayısıyla, kontrollü şartlar altında gerçekleştirilen mikroalg kültivasyonu atıksular için potansiyel bir biyolojik arıtma yöntemi olarak görülmektedir.

Mikroalgler aynı zamanda çevre dostu bir biyoyakıt ham madde kaynağıdır. Bu sebeple son yıllarda mikroalglerin ticari olarak üretimleri oldukça ilgi odağı haline gelmiştir. Diğer biyoyakıt ham maddeleri ile karşılaştırıldığında mikroalgler birçok avantaja sahiptir. Mikroalglerin kültivasyonu için tarıma elverişli topraklara ve tatlı sulara ihtiyaç yoktur. Mikroalgler tuzlu sularda ve verimsiz alanlarda yetiştirilebilir. Mikroalgler, hızlı

bir şekilde büyüyebilmektedirler ve yüksek yağ içeriğine sahiptirler. Mikroalgler, CO_2'i fotosentez yoluyla bünyelerine alarak sera gazı emisyonlarının azaltılmasına katkıda bulunurlar. Mikroalgler, atıksular içindeki besin maddelerini kullanarak atıksuların arıtımında alternatif bir yöntem olarak kullanılabilmektedir. Mikroalgal biyokütlenin yağı ekstrakte edildikten sonra kalan kısım hayvan yemi veya bitkiler için gübre olarak kullanılabilir.

Sonuç olarak, mikroalg kültivasyonu ile biyoyakıt üretimi, CO_2 azaltımı ve atıksuların arıtımı gibi birçok uygulama birleştirilebilir. Özellikle, mikroalgal biyoyakıtların üretiminde besin kaynağı olarak atıksuların kullanılması, biyoyakıt üretim maliyetlerinin azaltılmasında önemli bir rol oynamaktadır.

1.2 Tezin Amacı

Mikroalglerin atıksu kullanılarak yetiştirilmesi biyoyakıt üretimi için ekonomik ve çevresel açıdan birçok fayda sağlamaktadır. Atıksuların mikroalg kültivasyonunda kullanılması ile mikroaglerin gelişimi için gerekli olan besin maddesi atıksulardan sağlanır ve mikroalg üretim maliyetleri azalır. Ayrıca, atıksu içerisindeki organik ve inorganik kirleticilerin mikroalgal hücreler tarafından kullanılmasıyla atıksuların arıtımı gerçekleşir.

Bu tez çalışmasının amacı düşük maliyetli biyodizel üretimi için mikroalgal biyokütle üretiminde besin kaynağı olarak arıtılımış çöp sızıntı sularının kullanılabilirliğinin araştırılmasıdır. Ayrıca, tez çalışması kapsamında mikroalgal biyokütle üretimi ile birlikte arıtılmış çöp sızıntı suyu içerisinde bulunan azot ve sentetik olarak kültür ortamına eklenen fosfor elementlerinin arıtılabilirliği de araştırılmıştır.

1.3 Hipotez

Mikroalgal biyokütle, biyodizel üretimi için gelecek vaat eden ham madde kaynaklarından bir tanesi olarak değerlendirilmektedir. Fakat, mikroalglerden ekonomik biyodizel üretimi için en önemli dezavantaj yüksek maliyetli mikroalg kültivasyonudur. Mikroalgler kuru ağırlık olarak yaklaşık %50 karbon içerirler. Bu sebeple 1 kg algal biyokütle üretimi için 1.8 kg CO_2 gerekmektedir. Buna ek olarak

literatürde, 1 kg mikroalg esaslı biyodizel üretimi için 3726 kg suya, 0.33 kg azota ve 0.71 kg fosfata ihtiyaç olduğu rapor edilmiştir. Bu sebeple, su kaynaklarının, inorganik besinlerin (başlıca azot ve fosfor) ve CO_2'in yüksek miktarda tüketimi mikroalgal biyokütle üretimini pahalı hale getirmektedir. Yapılan çalışmalarda, düşük maliyetli CO_2, besin maddeleri ve su kaynağı elde edilmesi durumunda maliyetin %50'den fazla düşebileceği ifade edilmiştir.

Mikroalglerin arıtılmış çöp sızıntı suyu ile yetiştirilerek düşük maliyetli biyodizel üretiminin gerçekleştirilmesi ve atıksudan besin maddesi gideriminin sağlanması bu çalışmanın hipotezini oluşturmaktadır.

BÖLÜM 2

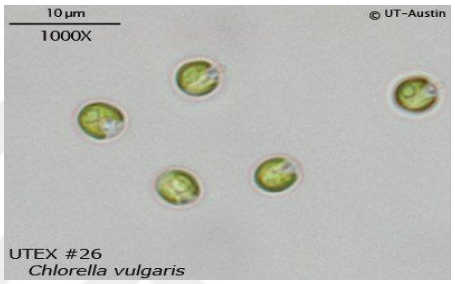
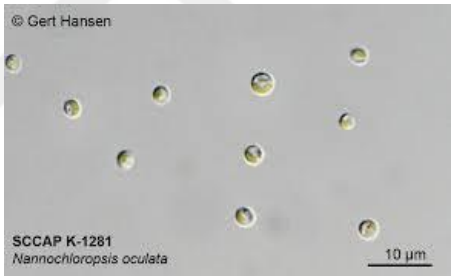
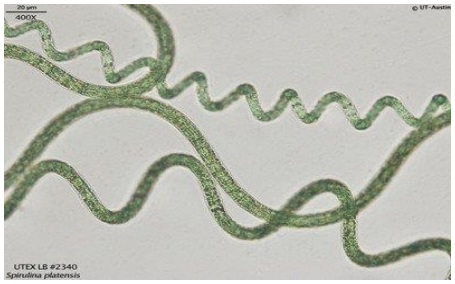
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Mikroalglerin Genel Özellikleri

Mikroalgler tek hücreli veya basit çok hücreli yapıları sayesinde hızlı bir şekilde çoğalabilen prokaryotik veya ökaryotik mikroorganizmalardır [1]. Prokaryot ve ökaryot mikroalgal hücrelerin organelleri birbirinden farklıdır [2]. Prokaryotik hücreler (siyanobakteri) kloroplast, mitokondri ve çekirdeğe sahip değildir, fakat klorofil a ve yüksek protein içeriğine sahiptir [2]. Yaygın bilinen birçok tipteki algleri içeren ökaryotik mikroalgal hücreler ise kloroplast, mitokondri ve çekirdeğe sahiptir ve bu gibi organeller hücrelerin yaşam ve çoğalma fonksiyonlarını kontrol ederler [3]. Ökaryotik mikroalgler genellikle renklerine, yaşam sürelerine ve basit hücresel yapılarına göre katagorize edilirler [3]. Mikroalgler yaygın olarak yeşil algler (*Chlorophyta*), kırmızı algler (*Rhodophyta*) ve diatomlar (*Bacillariophyta*) olarak sınıflandırılırlar [4]. Ayrıca mikroalgler ototrofik veya heterotrofik olarak da sınıflandırılırlar [3]. Ototrofik mikroalgler gelişimleri için karbondioksit ve tuzlar (nitrat, fosfat) gibi inorganik bileşenlere ve ışığa ihtiyaç duyarlar [4]. Ototroflar kendi aralarında fotoototroflar ve kemoototroflar olarak iki ayrı gruba ayrılmaktadır [4]. Fotoototroflar enerji kaynağı olarak güneş enerjisini kullanırken, kemoototroflar organik bileşenlerin haricinde bir enerji kaynağına ihtiyaç duyarlar [3]. Heterotrof mikroalgler ise fotohetorotrof ve kemohetorotrof olarak iki gruba ayrılabilmektedir [4]. Fotohetorotroflar güneş enerjisini enerji kaynağı olarak kullanırken, kemohetorotroflar enerji elde etmek için organik bileşikleri oksitler [4]. Ancak miksotrofik olarak adlandırılan bazı mikroalgler farklı enerji ve karbon kaynaklarını kullanabilmektedir [5]. Miksotrofik mikroalgler hem fotosentez yapabilmekte hem de organik besinleri metabolize edebilmektedir [3].

Sucul bitkilerin aksine, mikroalglerin gerçek embriyoları, kökleri, gövdeleri ve yaprakları yoktur [6]. Basit yapıları sayesinde mikroalgler, zorlu ortam şartlarına uyum sağlayabilmekte ve hızlı bir şekilde çoğalabilmektedirler [4].

Mikroalglerin genel yapısı $CO_{0.48}H_{1.83}N_{0.11}P_{0.01}$ molekül formülü ile ifade edilmektedir [7]. Mikroalglerin yapısında yağlar (%7-23), karbonhidratlar (%5-23) ve proteinler (%6-52) bulunmaktadır [6]. Mikroalglerin yapısını oluşturan kimyasal kompozisyonu ağırlıklı olarak mikroalg türüne ve yetiştirme şartlarına göre değişmektedir [6]. Yaygın kullanılan bazı mikroalglerin özellikleri Şekil 2.1'de verilmiştir.

Chlorella vulgaris Boyut: 2-10 µm Cins: yeşil agler Şekil: küresel	
Nannochloropsis oculata Boyut: 2-3 µm Cins: deniz algleri Şekil: tek hücreli küresel	
Spirulina platensis Boyut: çap: 3-10 µm, uzunluk 50-500 µm Cins: Siyonabakteri Şekil: küresel	
Botryococcus braunii Boyut: 2-10 µm Cins: yeşil agler Şekil: oval	

Şekil 2.1 Yaygın kullanılan bazı mikroalglerin özellikleri

2.2 Mikroalglerin Tarihçesi

Mikroalglerin ilk kullanımı 2000 yıl öncesine kadar uzanmaktadır [4]. Mikroalgler o yıllarda Çin'de kıtlık sebebiyle hayatta kalmak için kullanılmıştır [4]. Değerli bir ürün olarak mikroalgler üzerinde gerçekleştirilen ilk çalışmalar II. Dünya Savaşı sırasında gerçekleştirilmiştir. Harder ve von Witsch 1942 yılında bazı mikroalglerin lipit kaynağı ve besin takviyesi olarak kullanılabileceğini önermişlerdir [4]. Bununla birlikte 1950'lerde dünya nüfusunun artması ve yetersiz protein kaynakları sebebiyle alternatif ve konvansiyonel olmayan protein kaynaklarının araştırılması gündeme gelmiştir ve algal biyokütlenin alternatif bir besin kaynağı olarak kullanılabileceği ortaya çıkmıştır [8]. Aynı zamanda mikroalglerin antibiyotikler içerisinde kullanılabileceği düşüncesi ile biyolojik sistematiği araştırılmaya başlanmıştır [8]. 1960'ların başında mikroalglerin biyolojisi ve fizyolojisi iyi bir şekilde bilinmekteydi [8]. İlk büyük ölçekli mikroalg yetiştiriciliği 1960'lı yılların başında Nihon Chlorella tarafından Japonyada *Chlorella* türünün yetiştirilmesi ile gerçekleştirilmiştir [1]. 1970'li yıllarda ilk petrol krizinin ortaya çıkması ile enerji üretimi için fosil yakıtlara alternatif bir enerji kaynağı olarak mikroalglerin kullanılması gündeme gelmiştir ve mikroalglerin enerji kaynağı olarak kullanımına ilgi hızlı bir şekilde artmıştır [1]. 1980'lerde ABD Enerji Bakanlığı Sucul Türler Programı vasıtasıyla mikroalglerin fosil yakıtlara rakip olabilecek enerji kaynağı olarak kullanılması amacıyla araştırmalara başlamıştır [4]. ABD tarafından gerçekleştirilen bu çalışmaların amacı yağ içeren mikroalglerdeki yağ üretiminin biyokimyası ve fizyolojisinin araştırılmasıdır [1]. 1980'lere kadar Asya'da aylık 1000 kg'dan fazla mikroalg üreten 46 adet büyük ölçekli mikroalg yetiştirme tesisi kurulmuştur [8]. 1986 yılında Western Biotechnology (Hutt Lagoon, Avustralya) ve Betatene (Whyalla, Avustralya) firmaları tarafından β-karoten kaynağı olarak kullanımı için *Dunaliella salina* üretim tesisleri kurulmuştur. Daha sonra yakın zamanda İsrail ve ABD'de de benzer üretim tesisleri kurulmuştur [8]. Aynı zamanda Hindistanda büyük ölçekli siyanobakteri (mavi-yeşil alg) üretimi başlamıştır [8]. 1987-1990 yılları arasında ABD Enerji Bakanlığının gerçekleştirildiği çalışmalar kapsamında Roswell (New Mexico) şehrinde 1000 m^2 kapasiteli iki adet açık yüksek hızlı havuz işletilmiştir ve düşük maliyetli biyodizel üretimi için mikroalglerin kullanımının uygun olduğu sonucuna

ulaşılmıştır. Ancak 1995 yılında Enerji Bakanlığı petrol fiyatlarının düşmesi sebebiyle bu araştırmalara ayrılan bütçeyi azaltmıştır ve dolayısıyla çalışmalar sonlanmıştır [1].

Son zamanlarda ABD ve Hindistanda astaksantin kaynağı olarak Haematococcus pluvialis üretim tesisi kurulmuştur [8]. Yaklaşık 30 yıl gibi kısa bir süre içerisinde mikroalgal biyoteknoloji endüstrisi önemli ölçüde gelişmiştir [8]. Günümüzde, mikroalg biyokütle piyasası yılda yaklaşık 5000 ton kuru mikroalgal biyokütle üretmektedir ve yaklaşık 1.25x109 dolar ($) ciro elde etmektedir [8]. Algal yakıtlar henüz ticarileşmiş olmasa da hali hazırda yüzlerce yenilikçi firma algal yakıtların ticarileşmesi için yatırımlar yapmaktadır [9].

2.3 Mikroalgal Türlerin Karakterizasyonu

Mikroalgler sadece sucul ortamda değil, var olan bütün yeryüzü ekosistemi içerisinde bulunmaktadır. Mikroalglerin 50.000'den fazla türü olduğu tahmin edilmesine rağmen yaklaşık 30.000 türü üzerinde çalışılmış ve incelenmiştir [1]. Geçtiğimiz yıllarda farklı ülkelerde araştırmacılar tarafından geniş mikroalg koleksiyonları oluşturulmuştur [1]. Örneğin, Coimbra Üniversitesi tatlı su mikroalg koleksiyonu (Portekiz) 4000'den fazla suş ve 1000'den fazla türe sahiptir. Göttingen Üniversitesi (Almanya), 1920'lı yıllarda çalışmalarına başlamıştır ve yaklaşık 2213 suç ve 1273 türe sahiptir [1]. 1953 yılında kurulan Teksas Üniversitesinin algal kültür koleksiyonu (UTEX) diğer bir iyi bilinen mikroalg koleksiyonlarındandır ve yaklaşık 3000 farklı alg türüne sahiptir [10].

Kültür koleksiyonlarında yetiştirilen mikroalgler zamanla çoğalma kabiliyeti, farklı ortamlara adapte olabilme yetenekleri gibi bazı kendilerine özgü özellikleri kaybetmiş olabilmektedir [10]. Bu nedenle biyokütle üretimi için farklı ortam şartlarına adapte olabilen ve dirençli türlerin elde edilmesi önemlidir. Ayrıca, mikroalgal biyokütle üretimi maksadıyla türlerin gelişimi ve kültivasyonu ile ilgili bilgi edinmek için bölgesel çevresel değişiklikler göz önünde bulundurularak o bölgede yaşayan mikroalglerin incelenmesi önerilmektedir [11].

İdeal bir karakterizasyon 3 ana kritere göre yapılmalıdır. Bu kriterler büyüme fizyolojisi, metabolit ürünler ve türlerin direncidir [10]. Mikroalglerin büyüme fizyolojisi maksimum spesifik büyüme oranı, maksimum hücre yoğunluğu, çevresel değişkenlere

tolerans (ör., sıcaklık, pH) ve doğal ortam ile laboratuvar ortamındaki performans değişikliği gibi durumları kapsamaktadır. Metabolit ürünlerin belirlenmesi sadece metabolit kompozisyonu ve içeriğini değil aynı zamanda karbonhidrat, protein ve lipitlerin değerli hücresel muhtevasını da içermektedir [10]. Bu kapsamda, mikroalgal hücrelerin hızlı lipit analizlerinin yapılması yağ içeren türlerin belirlenmesinde faydalı olacaktır. İdeal bir analitik yöntem yağ asidi profilini, nötral ve polar lipitleri belirleyebilmelidir [10]. Seçilen mikroalgal türlerden biyokütle üretimi için stabil kültür yoğunluğu, direnç, predatörlere karşı duyarlılık gibi mikroalglerin dayanıklılığını gösteren parametrelerin göz önünde bulundurulması da önemli bir parametredir [10]. Ayrıca, seçilen türlerin dayanıklılığının belirlenmesi için biyokütle üretim şartlarının küçük ölçekli simulasyonunun yapılması gereklidir [10].

2.4 Mikroalg Kültivasyonu

2.4.1 Mikroalg Üretimine Etki Eden Faktörler

Mikroalglerin üretiminde fiziksel, kimyasal ve biyolojik faktörler önemli rol oynamaktadır. Bunlar içerisinde sıcaklık ve ışık fiziksel faktörlere, besin maddeleri ve karbondioksit kimyasal faktörlere, türlerin birbirleriyle rekabet etmeleri ve virüslerin enfeksiyonu biyolojik faktörlere örnek olarak verilebilir.

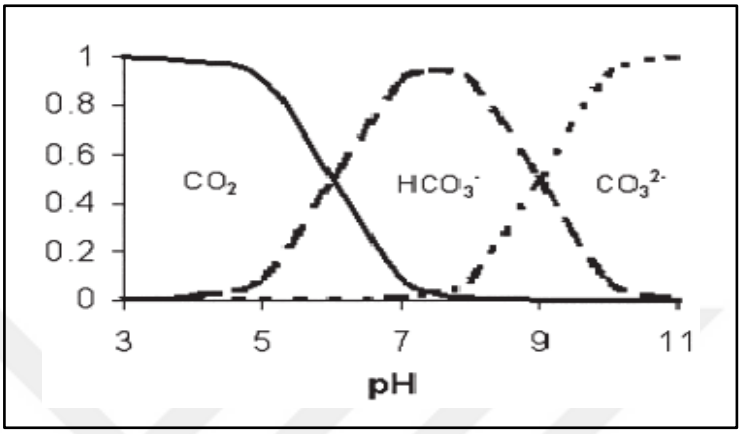
2.4.1.1 Besin Maddeleri

Karbon: Mikroalgler fotosentez yoluyla inorganik karbonu bünyelerine alırlar. Fotosentez sırasında güneş enerjisi oksijen ile birlikte kimyasal enerjiye dönüşmektedir ve ikinci adımda kimyasal enerji karbondioksitin şekerlere dönüşümünü sağlamaktadır. Fotosentez için genel stokiyometrik formül Eşitlik 2.1'de verilmiştir.

$$6H_2O + 6CO_2 + ışık \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \quad (2.1)$$

Mikroalgler tarafından inorganik karbon kaynağı olarak genellikle CO_2 ve HCO_3^- kullanılmaktadır. Bikarbonatın CO_2'ye dönüşümünde karbonik anhidraz enzimleri görev almaktadır [12]. Bunların haricinde bazı alg türleri organik asitler, şekerler, asetat ve gliserol gibi organik karbon kaynaklarını da kullanabilmektedir. Organik karbon kaynakları hem kemoheterotforik hem de fotoheterotforik olarak

özümsenebilmektedir. Ayrıca, atmosferdeki karbondioksit havalandırma yoluyla mikroalglerin yetiştirilmesinde kullanılabilmektedir. Karbondioksitin su içerisindeki çözünme miktarı önemli ölçüde pH'a bağlıdır. 9'dan yüksek pH'da inorganik karbonun büyük kısmı karbonat (CO_3^{-2}) formundadır ve algler tarafından kullanılamaz [12] (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 pH'ya bağlı olarak inorganik karbon formlarının değişimi

Bunun yanı sıra ortamdaki CO_2 miktarının azalması algal büyümeyi sınırlandırabilmektedir. Fakat bu etki genellikle çok belirgin değildir.

Azot: Karbona kıyasla, biyokütlenin %10'dan fazlasını içeren azot, mikroalgler için ikinci önemli besin kaynağıdır. Azot birçok formda bulunmaktadır ve mikroalglerin en yaygın kullandığı azot bileşikleri amonyum (NH_4^+) ve nitrattır (NO_3^-) [13]. Besin ortamı içerisinde amonyum öncelikli tüketilen bileşiktir. Bu durumun temel sebebi amonyumun özümsenmesi sırasında bir redoks reaksiyonunun gerçekleşmemesi ve dolayısıyla daha az enerji gerektirmesidir [14]. Bu sebeple yüksek amonyum konsanstrasyonlarına sahip atıksular mikroalglerin yetiştirilmesinde etkili bir şekilde kullanılabilir [14]. Amonyum ve nitrata ek olarak, üre ($CO(NH_2)_2$) ve nitrit (NO_2^-) de azot kaynağı olarak kullanılabilir. Ancak yüksek konsantrasyonlardaki nitrit mikroalgler için toksik etki yapabilmektedir. Ayrıca, birçok mikroalg türü metabolik ihtiyacından fazla azotu bünyesine alabilmektedir ve daha sonra azot yetersizliğinde bünyesine aldığı bu azotu kullanabilmektedir.

Fosfor: Mikroalglerin gelişimi için önemli bir diğer besin kaynağı fosfordur. Fosfor mikroalgler tarafından inorganik ortofosfat (PO_4^{-3}) olarak bünyelerine alınır. Ortofosfat

alımı aktif bir prosestir ve enerji gerektirir. İnorganik fosfatların yetersiz olduğu durumlarda organik fosfatlar, fosfataz enzimleri tarafından hücre yüzeyinde ortofosfatlara dönüştürülebilmektedir. Mikroalgler azotta olduğu gibi ihtiyacından fazla fosfatı polifosfat granülleri formunda hücre içerisinde depolayabilmektedir. Depolanan bu fosfatların fosfat yokluğunda kullanılması büyümenin devam etmesi için yeterli olabilmektedir.

Diğer Besin Maddeleri: Azot ve fosfor mikroalg gelişimi için gerekli olan genel besin maddeleri olmasına rağmen sülfür, potasyum kalsiyum ve magnezyum gibi besin maddelerine de ihtiyaç vardır. Bunların yanı sıra mikroalglerin gelişimi için düşük miktarda mangan, molibden, bakır, demir, çinko, bor, nikel gibi mikro besin maddelerine de ihtiyaç vardır. Mikroalgal gelişimin mikro besin maddeleri tarafından sınırlanmaması için genellikle kültür ortamı içerisine sentetik besin ortamı eklenmektedir.

2.4.1.2 Işık

Mikroalgler karbon kaynaklarına bağlı olarak birçok yöntem kullanılarak yetiştirilebilir. Bu yöntemler arasında en yaygın kullanılanı fototrofik kültivasyondur [15]. Fototrofik mikroalgler fotosentez sırasında ışığı kullanırlar. Mikroalglerin bünyelerinde bulunan klorofil a molekülü fotosentez için genellikle 400-700 nm dalga boyundaki ışığı kullanır. Fakat klorofil gelen ışığın %30-40'dan fazlasını absorbe edemez. Işığın yetersiz absorbsiyonu fotosentezi engelleyebilmektedir. Mikroalgler sadece yeterli ışık yoğunluğu altında gelişebilmektedir. Mikroalglerin kullandığı ışığın yoğunluğu türe göre değişebilmektedir. Mikroalg kültivasyonu için 76-600 µmol/m^2/s aralığındaki ışık yoğunlukları uygulanabilmektedir [16], [17]. Örneğin, *Phaeidactylum cruentum* için ışık doygunluk noktası 185 µmol/m^2/s iken *Aphanothece microscopia* için 150 µmol/m^2/s'dir. Mikroalgler yüksek ışık yoğunluklarına maruz kaldığında fotoinhibisyon meydana gelebilir ve fotosentez durabilir. Işık yoğunluğuna ek olarak, ışık rengi de pigment absorbsiyonunu etkilemektedir. Beyaz ışık kullanıldığı durumda, mikroalgler fotosentez için sadece sınırlı spektrumdaki ışığı kullanırlar. Araştırmalar sonucunda, kırmızı ışığın diğer renklere göre daha etkili olduğu kanıtlanmıştır. Kırmızı ışık, klorofil a ve b pigmentlerinin uyarılmasında daha etkilidir. Mavi ışık, kırmızı ışığa göre %40 daha

fazla enerji içermektedir. Fakat mavi ışık fotosentez için uygun değildir. Mavi ışık genellikle gen transkripsiyonu ve enzim aktivasyonu için kullanılmaktadır.

Mikroalgler çeşitli türdeki ışık kaynakları ile gelişebilmektedir. Konvansiyonel olarak, mikroalg kültivasyonunda tüp şeklindeki ışıklar ve ampüller kullanılmaktadır.

Işık kaynağı mikroalg üretiminde maliyet oluşturan parametrelerden bir tanesidir. Düşük maliyetli ve verimli ışık kaynakları ile ekonomik mikroalg kültivasyonu sağlanabilir. Yeh vd. [18] halojen lamba, floresan lamba, helikal floresan lamba'nın mikroalg gelişimindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışma sonuçlarına göre, en yüksek lipit üretimi floresan lamba ile gerçekleşmiştir. Bu ışık kaynakları ile karşılaştırıldığında, LED lambalar yüksek verimli ve düşük maliyetlidir. LED lambaların elektirik tüketimi (20.16 KW/h) klasik ışık kaynaklarından (40.43 KW/h) daha azdır.

Ayrıca, karanlık-aydınlık döngü de mikroalg kültivasyonunu etkileyen faktörlerdendir. Tatlı su ve deniz mikroalgleri için genel olarak 12:12, 14:10, 10:14, 16:8 (karanlık-aydınlık) döngüleri uygulanmaktadır.

2.4.1.3 Sıcaklık

Mikroalglerin sıcaklığa toleransı türe göre değişiklik göstermekle birlikte genel olarak birçok mikroalg türü 15-25 °C aralığında yetişmektedir. Örneğin, *Chlorella sp., Schizochytrium sp., Aurantiochytrium sp., H. pluvialis* ve *B. Braunii* türleri 20-25 °C sıcaklıkları arasında yetiştirilebilmektedir [19], [20], [21]. Yapılan çalışmalarda, *Chaetoceros sp.* türünün 33 ve 35 °C'lerde geliştiği ifade edilmiştir [22]. *Monoraphidium sp. SB2* türü için optimum sıcaklık aralığı 25-35 °C olarak rapor edilmiştir [23]. Sıcaklık, mikroalglerin lipit üretimini de etkileyen bir faktördür. *Chlorella* türleri için 25 °C sıcaklıkta bünyelerinde %63'ün üzerinde lipit biriktirebilmektedir [16]. Yapılan çalışmalarda, *Chlorella* türlerinin (*C. protothecoides, C. vulgaris, C. minutissima* ve *C. Emersonii*) lipit üretimi için optimum sıcaklığını 25-28 °C olarak rapor edilmiştir [16], [24], [25]. *Rhomonas sp.* türü için 25-27 °C arasında karbonhidrat, lipit, protein üretiminin maksimum olduğu rapor edilmiştir.

30-50 °C sıcaklık aralığı mikroalglerin gelişimi için uygun değildir. Bu sıcaklık aralığında sadece *Chlorella vulgaris, Chlorella sorokiana, Scenedesmus almeriensis* gibi sıcak su kaynaklarından izole edilen birkaç mikroalg türü yetişmektedir [26], [27], [28].

2.4.1.4 pH

pH enzimlerin aktivitelerini etkilemesi sebebiyle mikroalgal gelişim için önemli faktörlerden bir tanesidir [29]. Genel olarak, mikroalglerin pH'ya karşı tolerans aralıkları türe göre değişiklik göstermektedir. Bununla birlikte birçok mikroalg türünün gelişimi için optimum pH 7'dir [30]. pH mikroalglerin besin kullanımı ile doğrudan ilişkilidir. Karbondioksit (CO_2) ve nitrat (NO_3^-) alımında pH artarken, amonyum (NH_4^+) alımında azalmaktadır. Genellikle, mikroalgal gelişim pH 10'un üzerinde inhibe olmaktadır [30]. Mikroalg kültivasyonunda pH daha çok karbon türleri (karbondioksit, karbonat ve bikarbont) ile kontrol altına alınmaktadır.

2.4.1.5 Karıştırma

Mikroalgal kültür ortamı içerisinde hücrelerin, sıcaklığın ve gazların homojen dağılımı için karıştırma işlemi önemlidir. Ayrıca, özellikle büyük ölçekli mikroalg yetiştirme sistemlerinde belirli ölçüde türbülans oluşması, mikroalgal hücrelerin reaktör içerisindeki karanlık bölgelerden aydınlık bölgelere sirkülasyonunun sağlanması için arzu edilmektedir. Bununla birlikte, mekanik karıştırma ve hava karbarcıkları ile karıştırma sebebiyle meydana gelen yüksek sıvı hızları ve türbülans mikroalgal hücrelere zarar verebilir [31]. Bu sebeple, mikroalgal türe göre değişiklik gösteren türbülansın optimum seviyesi (bu seviyenin üzerinde hücreler ölür) üretim veriminin azalmasını önlemek için araştırılmalıdır.

2.4.1.6 Çözünmüş Oksijen

Çözünmüş oksijen, mikroalgal hücrelerin gelişimi için önemli bir parametredir. Oksijen mikroalglerin solunumu sırasında kullanılır ve fotosentez ile salınır. Fotosentez sırasında üretilen oksijen, birçok enzimi oksijenik yan ürünler oluşturmak için oksitleyebilir. Meydana gelen bu oksijenik yan ürünler mikroalgal büyümeyi durdurmaktadır [2].

2.4.1.7 Biyolojik Faktörler

Sadece fiziksel ve kimyasal faktörler değil aynı zamanda biyolojik faktörler de mikroalg kültivasyonunu etkilemektedir. Karışık kültür ortamı içerisinde bazı türler diğerlerinin gelişimini inhibe edebilmektedir. Bazı siyanobakteriler ökaryotik alglerin gelişimi için inhibitör maddeler üretebilmektedir. Benzer şekilde bazı ökaryotik algler antibakteriyel maddeler üretebilmektedir. Saf tek kültürler içerisine bulaşan parazitler, protozoa ve rotiferler zararlı olabilmektedir. Algal kültürü zararlı türlerin enfeksiyonundan korumak için kısa süreliğine pH 2'de asitlendirme işlemi yapılabilir. Asitlendirme işlemi birçok protozoa ve rotifer giderimi için yeterlidir. Alternatif olarak biyosidler kullanılabilir. Fakat bunlar, algal ürün kalitesini bozabilir, pahalıdır ve çevreye uyumlu değildir.

2.4.2 Mikroalg Kültivasyon Sistemleri

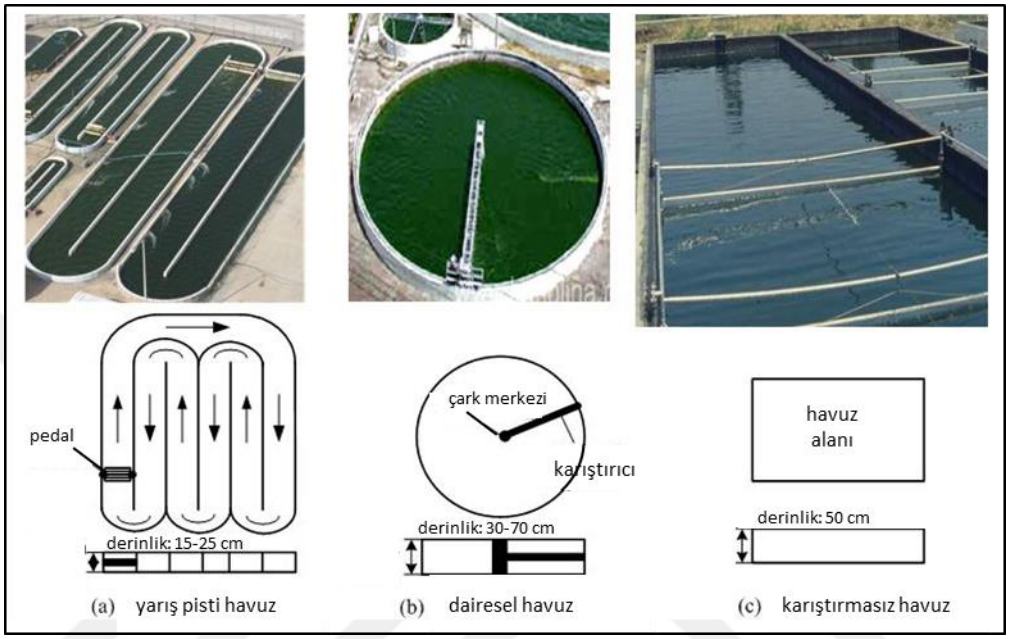
Literatürde mikroalg kültivasyonu için çok sayıda sistemin kullanıldığı rapor edilmiştir [32]. Bu mikroalg kültür sistemleri maliyete, ürün çeşidine, besin kaynaklarına bağlı olarak değişmektedir. Mikroalg kültür sistemleri genellikle tasarım şartlarına göre açık ve kapalı sistemler olarak sınıflandırılmaktadır [33]. Açık sistemler açık havada işletilen havuzlar, lagünler, derin kanallar, sirküle edilen sığ tesislerden oluşmaktadır. Kapalı sistemler ise farklı şekillerde şeffaf malzemeden üretilmiş sistemlerdir. Kapalı sistemler, açık havada güneş ışığı altında veya kapalı ortamda yapay ışık kaynağı kullanılarak işletilmektedir.

2.4.2.1 Açık Sistemler

Açık havuzlar kolay inşa edilmesi ve nispeten kolay işletilmesi sebebiyle büyük ölçekli mikroalg kültivasyonu için uzun yıllardır kullanılmaktadır. Bu sistemler, göller, lagünler, göletler gibi doğal sular olarak ve yapay havuzlar ve konteynerler gibi yapay su sistemleri olarak sınıflandırılır. Uygulamaya bağlı olarak farklı şekilde, boyutta ve türde açık sistemler bulunmaktadır. Şekil 2.3'de farklı tipteki açık mikroalg sistemlerinin görüntüleri verilmiştir.

Bu sistemler arasında karıştırmasız havuz en ekonomik ve işletmesi kolay olanıdır. Karıştırmasız havuzlar *Dunaliella salina* gibi bazı mikroalg türlerinin ticari amaçlı

üretiminde kullanılmaktadır [34]. Karıştırmasız havuzlar doğal su göletlerinde inşa edilir ve derinlikleri 50 cm'den azdır. Lee [35] Güneydoğu Asyada karıştırmasız doğal göllerden yıllık 30 ton'un üzerinde kuru mikroalg hasat edildiğini rapor etmiştir. Ancak, karıştırmasız açık havuzlar protozoa, bakteri ve virüslerin kontaminasyonuna karşı korunmasız olması sebebiyle bu havuzlarda mikroalgal gelişim sınırlıdır [36].



Şekil 2.3 Açık kültivasyon sistemleri, [37]

Günümüzde en yaygın kullanılan açık mikroalg yetiştirme sistemi karıştırma pedallı yarış pisti havuzlardır [38]. Karıştırma pedallı yarış pisti havuzlar 30 yıldan fazla süredir kullanılmaktadır. Bu tip açık havuzlar genellikle sığdır ve derinlikleri yaygın olarak 15-25 cm arasındadır. Yarış pisti havuzlar genellikle tek kanaldan veya birbiri ile bağlantılı kanallardan oluşur. Kültür ortamının sirkülasyon döngüsü bir pedal yardımı ile sağlanır. Bu sirkülasyon sayesinde mikroalgal hücrelerin dibe çökmesi ve bir araya gelerek flok oluşturmaları önlenmektedir [39]. Birçok yarış pisti havuz 30 cm/s'den fazla su hızı ile işletilmektedir. Yarış pisti havuzlarda, günlük kuru biyokütle üretimi 60-100 mg/L'ye kadar çıkabilmektedir. Yarış pisti havuzlar çoğunlukla *Chlorella sp., Spiriluna platensis, Hematococcus sp.* ve *Dunaliella salina* türlerinin ticari üretiminde kullanılmaktadır [40].

Dairesel havuzlar, büyük ölçekli mikroalg kültivasyonu için kullanılmaktadır. Bu sistemler yaygın olarak Güneydoğu Asya'da *Chlorella sp*. kültivasyonu için kullanılmaktadır [41]. Dairesel havuzlar en eski büyük ölçekli açık mikroalg yetiştirme

sistemleridir. Bu sistemlerin derinliği 30-70 cm ve çapları ise 45 metre'den fazladır. Bu havuzlar içerisindeki mikroalgal kültür ortamı güneş ışığı altında sürekli hareket eden pedal yardımı ile karıştırılır.

Açık sistemlerin inşaat ve işletme maliyetleri düşüktür. Örneğin, yarış pisti havuzların inşaat maliyeti 25 $\$/m^2$ olarak rapor edilmiştir [37]. Açık mikroalg sistemlerinin ölçek büyütme işlemleri kolaydır. Çünkü her bir havuz birbirinden bağımsız olarak işletilmektedir ve ölçek büyütme işlemi havuz sayısını artırarak sağlanabilmektedir. Bu sistemlerin atıksu arıtma tesislerine entegrasyonu da mümkün olabilmektedir.

Açık sistemlerin avantajarının yanı sıra bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Kontaminasyonlara açık olması sebebiyle sadece belirli türlerin yetiştirilmesi mümkün olabilmektedir. Açık havuzlar içerisinde karıştırmanın ve gaz transferinin yetersiz olması sebebiyle fotosentez etkinliğinin sınırlanması mikroalg üretim verimini düşürmektedir. Sezonsal sıcaklık ve güneş ışığı yoğunluğunun değişmesi de biyokütle üretim verimini negatif etkilemektedir. Açık sistemlerdeki mikroalg yoğunluğunun düşük (0.6-1 g/L) olması ve mikroalg hücrelerinin boyutlarının küçük olması (5-10 µm) sebebiyle hasat işlemleri oldukça maliyetlidir.

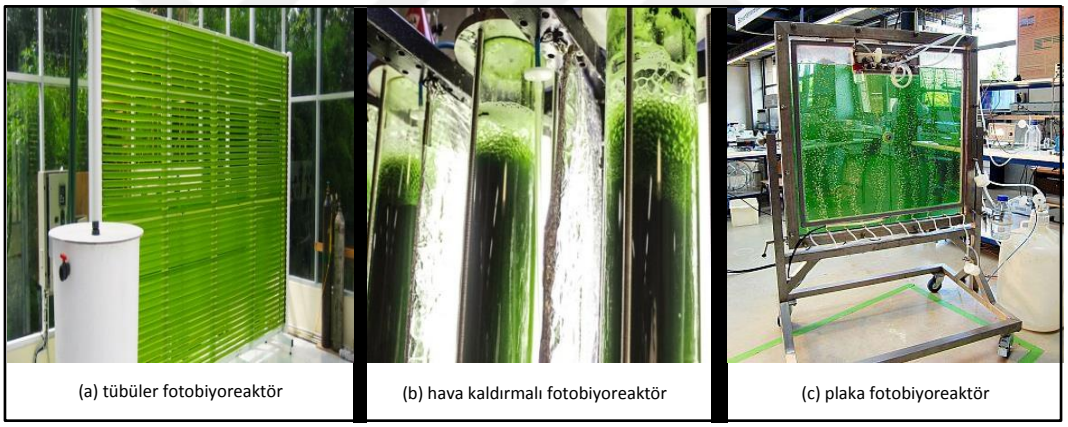
2.4.2.2 Kapalı Sistemler

Kapalı sistemler çoğunluka fotobiyoreaktör (PBR)'ler olarak bilinirler ve açık sistemlerin bazı dezavantajlarını giderebilmektedirler. Kapalı biyoreaktörlerin farklı konfigürasyonlara (tübüler, plaka, sütun vb.) sahip çeşitleri bulunmaktadır [33]. Kapalı kültivasyon sistemlerinden bazılarının görüntüsü

Şekil 2.4'de verilmiştir. Kapalı sistemlerin en önemli avantajları su buharlaşmasının minimizasyonu ve rekabetçi tür, patojen vb. organizma kontaminasyonunun en aza indirilmesidir.

Tübüler fotobiyoreaktörler, büyük ölçekli açık hava mikroalg kültivasyonu için en uygun sistemlerdir [42]. Bu fotobiyoreaktörler şeffaf malzemeden imal edilmektedir. Tübüler fotobiyoreaktörlerde hava, CO_2 ve besin maddesi ilavesi ve oksijen tahliyesi sisteme bağlı bir besleme tankı ile yapılmaktadır [43]. Bu kültivasyon sistemlerinin en temel özelliği birim hacim başına geniş yüzey alanlarına sahip olmalarıdır. Bu özellik sayesinde

mikroalglerin güneş ışığına maruziyeti artmaktadır. Tüplerin çapları genellikle 10 cm'den küçüktür. Tipik bir tübüler mikroalg kültür sisteminde, mikroalgal kültür tüpler içerisinde sirküle olur ve bir pompa vasıtasıyla besleme haznesine geri döner. Pompa aynı zamanda sistem içerisinde yüksek türbülanslı akış sağlayarak mikroalgal büyokütlenin çökelmesini önler. James ve Al-Khars [44] dikey hava kaldırmalı tübüler fotobiyoreaktörde *Chlorella ve Nannochloropsis* türlerinin gelişimini ve biyokütle üretim verimini araştırmıştır. Yaptıkları çalışmada *Nannochlropsis* için 109-264 g/m^3 gün, *Chlorella* türü için 32.5-95.3 g/m^3 gün üretim verimleri elde etmişlerdir. Tübüler fotobiyoreaktörler daha geniş yüzey alanı elde edebilmek için sarmal şekilde de tasarlanabilmektedir. Sarmal şekilde tasarlanmış tübüler fotobiyoreaktörlerde ışık teması yüksektir, kontaminasyon sınırlıdır ve kültür ortamı içerisinde CO_2 transferi yüksektir [33]. Yapılan bir çalışmada, *P.tricornutum* türünün sarmal fotobiyoreaktörde kültivasyonunda 1.5 g/L gün biyokütle üretim verimliliği elde edilmiştir [45].



(a) tübüler fotobiyoreaktör (b) hava kaldırmalı fotobiyoreaktör (c) plaka fotobiyoreaktör

Şekil 2.4 Kapalı kültivasyon sistemleri

Plaka fotobiyoreaktörler, ışık yolunun 1-30 cm arasında olduğu, şeffaf, dikdörtgen biçiminde tasarlanmış reaktörlerdir [37]. Bu tip reaktörler genellikle eğimli veya dikey olarak sıralanmaktadır. Plaka fotobiyoreaktörler geniş yüzey alanlarına sahiptir. Bu özellikleri sayesinde biyoreaktör içerisindeki mikroalgal hücreler ışığa daha fazla maruz kalmaktadır ve hücrelerin fotosentetik etkinlikleri artmaktadır. Buna bağlı olarak biyokütle üretim verimleri daha fazla olmaktadır. Plaka reaktörler nispeten ucuzdur ve bu reaktörlerin temizlenmesi kolaydır [46]. Düz plaka fotobiyoreaktörler hem açık havada hem de kapalı ortamda mikroalgal biyokütle üretimi için uygundur. Kapalı plaka biyoreaktörler sisteme verilen hava kabarcıkları vasıtasıyla karışmaktadır. Yüksek

fotosentetik etkinlikleri ve reaktör içerisinde düşük çözünmüş oksijen birikimi sebebiyle plaka reaktörler, büyük ölçekli mikroalg kültivasyonu için tübüler fotobiyoreaktörlere göre daha uygundur [42].

Hava kaldırmalı reaktörler birbirine bağlı iki bölgeden meydana gelmektedir. Reaktör içerisindeki sıvı sirkülasyonu reaktörün alt kısmından verilen hava ile sağlanmaktadır. Bu sistemlerde yüzey/hacim oranı düşüktür. İnşaat ve işletme maliyetleri yüksektir. Büyük ölçekli mikroalg üretimi için oldukça fazla reaktör gerekmektedir. Bunların yanı sıra hava kaldırmalı reaktörlerin kütle transfer hızı yüksektir, enerji tüketimi düşüktür ve bu reaktörleri steril şartlar altında işletmek kolaydır. Ayrıca, mikroalgal kültür daha az fotoinhibisyona ve fotooksidasyona maruz kalmaktadır.

Farklı kapalı fotobiyoreaktör sistemleri kullanılarak gerçekleştirilen mikroalg kültivasyonlarına ait bilgiler Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Farklı kapalı mikroalg üretim sistemlerinin karşılaştırması

Fotobiyoreaktör	**Işık kaynağı**	**Kapasite, (L)**	**Mikroalg**	**Biyokütle kons., (g/L)**	**Referans**
Tübüler	Yapay	5.5	*Spirulina platesnsis*	0.62	[47]
	Güneş	200	*P. tricornutum*	1.19	[48]
	Güneş	75	*P. tricornutum*	1.38	[49]
Hava kaldırmalı	Yapay	3	*Haematococcus pluvialis*	4.09	[50]
	Yapay	170	*Chaetoceros*	0.80	[51]
	-	200	*Porphyridium cruentum*	3	[52]
Plaka	Yapay	3.4	*Dunaliella*	1.5	[53]
	Güneş	5	*Phaeodactylum*	1.38	[54]
	Güneş	200	*Nannochloropsis*	0.225	[55]
	Güneş	440	*Nannochloropsis sp.*	0.27	[55]

2.4.2.3 Mikroalg Üretim Sistemlerinin Karşılaştırması

Mikroalgal biyokütle üretimi için kullanılan sistemler açık ve kapalı sistemler olarak sınıflandırılmaktadır. Kullanılan bu sistemlerin kendilerine özgü avantaj ve

dezavantajları vardır. Örneğin, açık sistemlerde buharlaşma ile su kaybı meydana gelirken, kapalı sistemlerde bu problem olmamaktadır. Sıcaklık kontrolü açık sistemlerde nispeten daha kolay iken, kapalı sistemlerde oldukça zordur. Çizelge 2.2'de açık ve kapalı mikroalg üretim sistemlerinin karşılaştırması verilmiştir.

Çizelge 2.2 Açık ve kapalı mikroalg üretim sistemlerinin karşılaştırması, [56]

Faktör	**Açık sistemler**	**Kapalı sistemler**
Alan ihtiyacı	yüksek	düşük
Su kaybı	çok yüksek	düşük
CO_2 kaybı	yüksek, havuz derinliğine bağlı olarak	düşük
Sıcaklık	oldukça değişken	soğutma gerekli
Temizleme	düşük	gerekli
Kontaminasyon	yüksek	yok
Buharlaşma	yüksek	yok
Biyokütle kalitesi	değişken	tekrar üretilebilir
Hasat maliyeti	yüksek	düşük
Otomatik soğutma sistemi	yok	var
Otomatik ısıtma sistemi	yok	var
Enerji gereksinimi (W)	4000	1800

2.5 Atıksuların Arıtılmasında Mikroalglerin Kullanımı

Atıksular içerisindeki azot ve fosfor gibi besin maddelerinin mikroalgler kullanılarak giderimi 1950'li yıllarda önerilmiştir [57]. Bu tarihten sonra mikroalgleri kullanarak atıksuların arıtılması ile ilgili birçok laboratuvar ve pilot ölçekli çalışma gerçekleştirilmiştir [58]. Yapılan çalışmaların sonuçları, atıksular içerisindeki azot, fosfor ve diğer elementlerin giderimi için mikroalglerin kullanımının uygun olduğunu göstermiştir [14]. Mikroalgal türler genellikle farklı karakterizasyona sahip atıksulara karşı hassastır. Özellikle, değişen besin maddesi konsantrasyonları, atıksu içerisindeki mikroalglerin gelişimini inhibe edebilen kirleticiler, önemli iz elementlerin eksikliği

mikroalgal hücrelerin gelişimini etkileyen faktörlerdir [58]. Mikroalg kültivasyonunun verimliliği algal türe ve büyüme şartlarına göre de değişebilmektedir [58]. Genel olarak, *Chlorella sp.* ve *Scenedesmus sp.* farklı özellikteki atıksulara karşı daha toleranslı olduğu rapor edilmiştir [59]. Yun vd. [60] bir çelik fabrikası atıksuyunda *Chlorella vulgaris* türünü yetiştirmiştir ve atıksuda 0.022 g/L gün amonyum giderimi elde etmiştir. Martinez vd. [61] evsel atıksu içerisinde bulunan amonyum ve fosforu *Scenedesmus obliquus* türü ile gidermeye çalışmıştır. Çalışmada 98 saat bekletme süresinde %98 fosfor giderimi ve 183 saat bekletme süresinde %100 amonyum giderimi gerçekleştirilmiştir. Bu türlerin yanı sıra Sawayama vd. [62] *Botryococcus braunii* türünü ön arıtımı yapılmış kanalizasyon suyundaki azot ve fosforun giderimi için kullanmıştır.

2.5.1 Evsel Atıksular

Aktif çamur prosesi ile karşılaştırıldığında, evsel atıksuların arıtılmasında mikroalgal atıksu arıtımının kullanımı daha etkilidir [59], [63]. Böylelikle hem mikroalgal biyokütle üretimi hem de atıksu arıtımı gerçekleşmektedir. Sydney vd. [64] kirletici giderme kapasitesi ve lipit üretme yeteneği yüksek 13 adet mikroalg türü ikincil evsel atıksu arıtma tesisi çıkışından alınan su ile yetiştirmiştir. Çalışma sonuçlarına göre en yüksek lipit üretimi (%36.14), 1.88 g/L biyokütle üretimi ile *Botryococcus braunii* türünde elde edilmiştir. Mahapatra vd. [65] *Chlorella minutissima* türünü heterotrofik şartlar altında ham atıksu ile yetiştirmiştir ve çalışmada, 380 mg/L büyüme oranı elde edilmiştir. Miksotrofik büyüme şartları altında yapılan çalışmada ise *Euglene sp.*, ham atıksuya karşı en yüksek toleransı göstermiştir ve bu türün lipit içeriği %24.6, biyokütle yoğunluğu 1.24 g/L olarak belirlenmiştir [65]. Başka bir çalışmada, Ramachandra vd. [66] atıksu arıtma tesisinden izole edilen *Euglene sp.* türünün %24.6 lipit içeriğine sahip olduğunu, göllere beslenen atıksudan alınan *Spirogyra sp.* ve *Phormidium sp.* türlerinin ise sırasıyla %18.4 ve %8.8 lipit içerdiğini rapor etmiştir. Lipit oranlarındaki bu farklılık, evsel atıksu arıtma tesislerinde besin maddesi miktarının yüksek olmasından kaynaklanmış olabilir.

Gao vd. [67]'lerine göre ham atıksuya ek olarak arıtılmış atıksu da mikroalg kültivasyonu için yeterli miktarda besin maddesi içermektedir. Gao vd. [67] membran

fotobiyoreaktör kullanarak *Chlorella vulgaris* türünü arıtılmış atıksu kullanarak yetiştirmiştir ve çalışmalarında 39.93 mg/L gün biyokütle üretim verimi elde etmiştir. Başka bir çalışmada *Chlorella vulgaris* arıtılmış evsel atıksu içerisinde yetiştirilmiştir ve atıksuda %53.8 azot, %49.6 fosfor giderimi elde edilmiştir [64]. *Scenedesmus quadricauda* türü atıksudan fosfor gideriminde yüksek performans göstermektedir [68]. Souza Silva vd. [69] bir atıksu stabilizasyon havuzundan Micractinium sp., *Eudorina sp., Chlorella sp., Pandorina sp., Carteria sp., Aphanocapsa sp., Microcystis sp., Oscillatoria sp., Planktothrix sp., Hyalophacus sp., Phacus sp.* ve *Cyclotella sp.* türlerini izole etmiştir. Çalışma sonuçlarına göre izole edilen türlerin lipit içeriğinin %33.7'nin üzerinde olduğu belirlenmiştir. Bu çalışma sonuçlarına göre, Souza Silva vd. [69] ham ve arıtılmış atıksu kullanılarak tek kültürlü veya karışık mikroalg kültivasyonunun mümkün olduğunu rapor etmişlerdir.

Chlorella sp., Chlamydomonas sp., Spirulina sp., Scendesmus sp., Nostoc sp. ve Oscillatoria sp. türleri son yıllarda atıksu arıtımında kullanılmaktadır [70]. Örneğin, atık stabilizasyon havuzlarının yüzeyinde yaşayan mikroalgler atıksu arıtımı için kullanılmaktadır. Bu mikroalg türleri bakterilerle birlikte simbiyotik ilişki içerisinde atıksu arıtımı için faaliyet göstermektedir [71]. Bakteriler, atıksu içerisindeki organik ve inorganik kirleticileri aerobik olarak indirger ve CO_2 üretir, mikroalgler ise üretilen bu maddeleri kullanır. Mikroalgler, fotosentetik aktivileri için güneş ışığı ve CO_2 varlığında bu besinleri bünyelerine alarak kullanırlar. Fotosentezle üretilen oksijen, organik maddenin oksidasyonu için bakteriler tarafından kullanılır [72], [73]. Bu mikroalg-bakteri ilişkisi ile atıksuların arıtılması prosesi aktif çamur proseslerinin yerine geçebilecek potansiyele sahiptir [74].

Sonuç olarak, mikroalglerin evsel atıksulardaki organik ve inorganik kirleticilerin giderilmesinde etkili bir şekilde kullanılabileceği görülmüştür. Ancak, mikroalg esaslı başarılı bir atıksu arıtımı için uygun mikroalgal türün seçilmesi, atıksu konsantrasyonu ve kültivasyon yöntemi göz önünde bulundurulmalıdır.

2.5.2 Sızıntı Suları

Çöp depolama sahaları evsel katı atıkların arıtıldığı doğal biyoreaktörlerdir. Çöp sızıntı suları özellikle kentsel bölgelerde oldukça fazla miktarda üretilirler. Fazla miktarda

üretilen bu atıksular mikroalg kültivasyonu için kullanılabilmektedir. Yüksek hızlı algal havuzlar, çöp sahalarında üretilen sızıntı sularının ikincil arıtımı için yaygın olarak kullanılmaktadır. Literatürde, *Ankistrodesmus convolutus, Euglene gracilis, C. vulgaris, S. quadricauda ve Chlorococcum oviforme* türlerinden meydana gelen bir karışık kültür ortamının yüksek hızlı algal havuzda kullanıldığı ve 2-5.54 g(kuru ağırlık)/L biyokütle üretildiği rapor edilmiştir [75]. Edmundson vd. [76] mikroalgal kültivasyondan önce ham sızıntı suyunun pH'sının hidroklorik asit (HCl) kullanarak 7±0.1'e ayarlanması gerektiğini ifade etmiştir. Bu işlemin amacı sızıntı suyunun toksisitesini azaltmaktır. Hidroklorik asit ile pH'sı ayarlanmış bir sızıntı suyu ile yetiştirilen *Scenedesmus sp.* ile 0.55 g/L gün biyokütle üretimi elde edilmiştir. Alkali bir su olan sızıntı suyunda HCl ayarlaması yapılmaması durumunda sadece alkali şartlarda gelişebilen *Spirulina sp.* gibi türlerin kullanılması gerekmektedir. Literatürde, sızıntı suyunun *Scenedesmus sp.* ve *Dunaliella sp.* türlerinin gelişimini inhibe ettiği, *Chlorella sp.* türünün ise sızıntı suyunda yetişebildiği ve lipit üretebildiği rapor edilmiştir.

Lin vd. [77] *Chlorella pyrenoidosa* ve *Chlamydomonas snowiae* türlerini sızıntı suyu kullanarak yetiştirmiştir. Çalışma sonuçlarına göre 670 mg/L'nin üzerinde amonyak azotu konsantrasyonunun mikroalglerin gelişimini inhibe ettiği ifade edilmiştir. 134 mg/L amonyak azotu konsantrasyonunda *Chlorella pyrenoidosa* türünün sadece %10'u gelişebilmektedir. Ek olarak, 39-143 mg/L amonyak azotu *Chlorella vulgaris*'in spesik büyüme hızını düşürmektedir [78]. Yapılan bir çalışmada, mikroalg-bakteri karışık kültürü içerisinde %10'luk sızıntı suyu kullanılarak 1.58 g/L biyokütle ve 24.1 mg/L gün lipit üretim verimliliği elde edilmiştir [79]. Bu çalışmalar sonucunda mikroalg üretimi için sızıntı suyunun seyreltilmesi gerektiği sonucu çıkarılabilir. Ototrofik mikroalg üretiminde ışık tesirini arttırmak için, sızıntı suyunun arıtılarak bulanıklığı giderilmelidir [77].

Sızıntı suyu, organik ve inorganik kirleticilerin kompleks bir karışımıdır. Oldukça toksiktir ve değişken kirletici profiline sahiptir. Bu sebeple sızıntı sularının arıtımı için konvansiyonel havalandırma proseslerinden oluşan atık stabilizasyon havuzları kullanılmaktadır. Martins vd. [80] mikroalgler kullanılarak sızıntı sularından %75-95 amonyum gideriminin mümkün olabileceğini rapor etmiştir.

2.5.3 Endüstriyel Atıksular

Dünyada endüstriyel uygulamalar için 1987-2003 yılları arasında yıllık ortalama 665 milyar ton su kullanıldığı rapor edilmiştir. İşletme prosesine göre değişmekle birlikte birçok endüstriyel atıksu diğer atıksu çeşitlerine göre, daha fazla ağır metal içermektedir. Ayrıca, endüstriyel atıksular diğer atıksulara göre daha az azot ve fosfor içermektedir [81]. Bu sebeple, yüksek metal giderim verimi elde etmek için metal sorpsiyon kapasitesi yüksek türlerin seçilmesi önemlidir. Şimdiye kadar, mikroalglerin metal sorpsiyon yetenekleri ile ilgili sadece birkaç tür üzerinde araştırma yapılmıştır.

Farklı atıksu kaynaklarındaki toplam azot ve toplam fosfor konsantrasyonları Çizelge 2.3'de verilmiştir.

Çizelge 2.3 Farklı atıksu kaynaklarının toplam azot ve toplam azot konsantrasyonları

Atıksu	Çeşit	Toplam azot, (mg/L)	Toplam fosfor, (mg/L)	Referans
Evsel	güçlü	85	15	[82]
	orta	40	8	[82]
	zayıf	20	4	[82]
Endüstriyel	tekstil	21-57	1.0-9.7	[83], [84]
	deri	273	21	[85]
	kağıt	1.1-10.9	0.6-5.8	[86]
	Zeytinyağı	532	182	[87]
	süt ürünleri/gıda	2400	480	[88]
Sızıntı suyu	-	410-1185	-	[89]

2.6 Mikroalglerin Hasat Edilmesi

Mikroalgal biyokütle üretiminden sonra en önemli adım mikroalgal biyokütlenin hasadıdır. Mikroalgal biyokütle hasadında santrifüj, sedimentasyon, filtrasyon, flokülasyon, flotasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Hasat yönteminin seçimi mikroalgal türe, istenilen ürünün kalitesine, hasat verimliliğine ve ekonomik faktörlere bağlıdır. Mikroalg hasat maliyeti toplam üretim maliyetinin %20-30'u kadardır. Optimum hasat yöntemi kullanılan mikroalg türünden bağımsız olmalıdır, düşük kimyasal ve enerji sarfiyatı gerektirmelidir, hızlı olmalıdır, maliyeti uygun olmalıdır ve hasat verimi yüksek olmalıdır.

Sedimentasyon, mikroalgal biyokütle hasadında kullanılan en kolay yöntemlerden bir tanesidir. Sedimentasyon, yer çekimi kuvveti esaslı bir yöntemdir ve mikroalgal hücreler kültivasyon ortamından ayrılarak dibe çökerler. Bu yöntem, büyük hacimli mikroalg üretiminde en yaygın kullanılan biyokütle ayırma yöntemlerinden bir tanesidir. Sedimentasyon, düşük maliyetli ve düşük enerji tüketimine sahip bir yöntemdir ve *Spirulina sp.* gibi büyük boyutlu türlerin hasadında etkilidir [42]. Ancak, mikroalglerin çökelme hızı mikroalgal türe, hücre boyutuna, kültür yoğunluğuna, ışığa ve besin maddesine bağlıdır. Yeşil mikroalgler ve diatomlar için ortalama çökelme hızı sırasıyla 0.1 m/gün ve 0.2 m/gün'dür. Ancak, zayıf ışık kullanımı ve büyüme ortamı içerisindeki besin maddesi eksikliği çökelme hızının azalmasına sebep olabilmektedir [90].

Flokülasyon yöntemi, biyokütle çökelme hızını arttırmak için ilave flokülant kullanılarak gerçekleştirilen, sedimentasyon yönteminin geliştirilmişidir. Mikroalgal hücrelerin yüzeyleri negatif yüklüdür ve pozitif yüklü flokülantlar bu negatif yüklü hücreler ile flok oluşturarak çökelmesini hızlandırır. İdeal bir flokülant toksik olmamalıdır, düşük maliyetli olmalıdır, düşük konsantrasyonlarda bile etkili olmalıdır ve kültür ortamı içerisinde bulunan besin maddelerinin geri kazanımını etkilememelidir. Mikroalg hasadı için en yaygın kullanılan flokülantlar alüminyun sülfat, demir klorür ve polielektrolitlerdir [42], [91]. Kimyasal flokülasyona ek olarak, mikroalg hasadı biyoflokülasyon yöntemi ile bakteriler vasıtasıyla da gerçekleştirilebilir. Mikroalgal bakteriyel floklar yardımıyla 30 dakikalık bir süre içerisinde mikroalg kültür ortamından biyokütlenin %97.5'i hasat edilebilmektedir [90]. Bunun aksine, Ho vd. [92] büyük ölçekli havuz sistemlerinde ve tuzlu sularda gerçekleştirilen mikroalg üretiminde, flokülasyon ile hasat yönteminin etkili olmadığını rapor etmiştir.

Mikroalgal biyokütle hasadı için kullanılan diğer bir yöntem flotasyondur. Büyük boyutlu ve daha yoğun hücrelerin hasadında sedimentasyon yöntemi etkili olurken, çözünmüş hava flotasyonu küçük boyutlu ve daha hafif hücrelerin hasadı için uygulanabilir. Bu yöntemin uygulanması basittir. Flotasyon yönteminde, sisteme verilen küçük hava kabarcıkları sayesinde mikroalgal hücreler kültür ortamının yüzeyine çıkar. Daha sonra mikroalgal biyokütle yüzeyden hasat edilir. Bu yöntemde

küçük hava kabarcıklarının üretimi için yüksek basınç gereklidir. Bu sebeple flotasyon yönteminin enerji ihtiyacı fazladır.

Filtrasyon yöntemi mikroalgal hücrelerin kazanılmasında kullanılan etkili bir yöntemdir. Mikroalg hücreleri filtre yüzeyinde tutularak mikroalgal kültür ortamından ayrılmaktadır. Mikroalg hasadında makrofiltrasyon (>10 µm), mikrofiltrasyon (0.1-10 µm), ultrafiltrasyon (0.02-0.2 µm) ve ters ozmoz (<0.001 µm) filtrasyonları uygulanmaktadır. Örneğin, 5-6 µm büyüklüğündeki *Chlorella sp.* türü mikrofiltrasyon kullanılarak hasat edilebilir. Filtrasyon yönteminin en önemli dezavantajları membran tıkanması, enerji tüketiminin fazla olması, mikroalgal hücreler üzerindeki kesme stresidir. Bu dezavantajlar arasında bulunan membran tıkanması NaClO kullanılarak ve akış hızı ayarlanarak giderilebilir [93].

Santrifüj, merkezkaç kuvvetinin etkisi ile katıların ve sıvıların birbirinden ayrılması için kullanılan bir ayırma prosesidir. Ayırma işlemi partikül boyutuna, mikroalg kültür ortamının yoğunluğuna bağlıdır. Literatürde, santrifüj hızının artması ile mikroalg geri kazanma veriminin artacağı rapor edilmiştir. Santrifüj yöntemi mikroalg hasadı için en hızlı ve hasat verimi yüksek yöntemlerden bir tanesidir. Bu yöntemle büyük hacimler işleme alınabilir. Ancak, santrifüj yöntemi mikroalgal hücrelere zarar verebilmektedir. Ayrıca, büyük ölçekli hasat işlemlerinde enerji tüketiminin yüksek olması üretim maliyetlerini artırmaktadır [42].

Çizelge 2.4'te mikroalg hasadında yaygın olarak kullanılan yöntemlerin avantaj ve dezavantajları verilmiştir.

Çizelge 2.4 Mikroalg hasadında kullanılan yöntemlerin avantaj ve dezavantajları, [94]

Yöntem	**Avantaj**	**Dezavantaj**
Santrifüj	Hızlı, kolay, verimli	Maliyeti yüksek, enerji tüketimi fazla, hücre zararı var
Kimyasal flokülasyon	Maliyeti düşük, hücre zararı düşük, uygulaması kolay	Toksik, büyük hacimde çamur üretilir
Biyo-flokülasyon	Verimi yüksek, hücre zararı yok	Diğer flokülantlara göre daha fazla enerji gerektirir
Filtrasyon	Maliyeti düşük, su yeniden kullanılabilir	Yavaş bir prosestir
Koagülasyon - filtrasyon	Filtrasyon verimini artırır, hücre zararı yok	Koagülantlar filtre yüzey yükünü arttırabilir

2.7 Mikroalgal Biyoyakıtlar

Yüksek lipit ve karbonhidrat içeriğine sahip mikroalgal biyokütle biyoyakıt ham maddesi olarak kullanılabilmektedir. Mikroalgal biyokütle biyodizel, biyoetanol, biyohidrojen, metan ve biyoelektrik üretimi için uygundur.

2.7.1 Biyodizel

Biyodizel, trigliseritlerin metanol ile birlikte transesterifikasyonu sonucunda üretilmektedir. Trigliseritlerin kaynağına bağlı olarak biyodizel, birinci, ikinci ve üçüncü nesil yakıtlar olarak sınıflandırılmaktadır. Birinci nesil biyodizel soya ve kanola yağı gibi yemeklik yağlardan üretilirken, ikinci nesil biyodizel jatrofa yağı gibi yenilmeyen yağlardan üretilmektedir [95], [96]. Üçüncü nesil biyoyakıtlar ise ham madde kaynağı olarak mikroalgler gibi mikroorganizmaların kullanıldığı yakıtlardır. Yüksek lipit içerikleri sebebiyle mikroalgler biyodizel üretimi için umut verici alternatif olarak görülmektedir. Mikroalgler karasal bitkilere göre birçok avantaja sahiptir. Mikroalglerin biyokütle üretim verimi daha yüksek ve hızlıdır. Lipit üretimleri daha yüksektir. Yetiştirilmeleri için verimli alanlara ihtiyaç yoktur [97], [98].

Transesterifikasyon işleminde etanol gibi diğer alkoller de kullanılabilmektedir, fakat diğer alkoller metanolden daha pahalıdır. Bu reaksiyon sonucunda yağ asidi metil esterleri ve gliserol oluşmaktadır. Dönüşüm hızını ve reaksiyon zamanını azaltmak için reaksiyonda bir katalizör kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan katalizörler KOH ve NaOH'dur ve bu katalizörlerin kullanılması durumunda reaksiyon için atmosferik basınç altında 60 °C sıcaklıkta 90 dakika gereklidir.

Mikroalgal biyodizel üretimi için hızlı gelişmeleri ve yüksek lipit içeriğine sahip olmaları sebebiyle *Nannochloropsis* türleri uygundur. *Nannochloropsis* türleri içerisinde *Nannochloropsis gaditana* yüksek kalorifik değeri sebebiyle birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Jazzar vd. [98] süperkritik şartlar altında metanol ile transesterifikasyon işlemi uygulayarak *Nannochloropsis gaditana* türünü biyodizel üretimi için kullanmıştır. Çalışma sonuçlarına göre en yüksek oranda biyodizel üretimine (0.48 g/g lipit) 50 dakikalık reaksiyon süresinde ve 255-265 °C'de ulaşıldığı rapor edilmiştir.

Birçok çalışmada farklı türdeki bitkisel ürünlerin ve mikroalglerin yağ içeriği ve biyodizel üretim verimi karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, mikroalgler düşük yağ içeriğine (%30) sahip olsa bile %48'den fazla yağ içeriğine sahip hint yağına göre, mikroalglerden daha fazla biyodizel üretimi mümkün olabilmektedir. Mikrolglerin %70 yağ içermesi durumunda 121.104 kg biyodizel/ha yıl üretim elde edildiği görülmüştür [1]. Bu üretim değeri mısır bitkilerine göre 800 kat daha fazladır. Ayrıca, mısır bitkilerine göre 160 kat daha az alan ihtiyacı gerektirmektedir [1].

2.7.2 Biyoetanol

Mikroalgal ham madde kullanılarak elde edilen diğer bir biyoyakıt biyoetanoldür. Biyoetanol üç grup altında sınıflandırılabilir. Birinci nesil biyoetanol şeker ve nişasta üretilen bitkilerden, ikinci nesil biyoetanol ağırlıklı olarak lignoselülozik biyokütleden, üçüncü nesil biyoetanol mikroalglerden üretilmektedir. Şimdiye kadar, biyoetanol üretiminde en yaygın kullanılan ham madde şeker kamışıdır. Bunun sebebi, biyoetanol üretiminde şeker kamışında bulunan şekerin fermantasyonunun kolay olmasıdır. Ancak şeker kamışının fiyatı yüksektir. Lignoselülozik biyokütle ve nişasta bazlı atıkların fiyatı düşüktür fakat bu maddelerden fermente edilebilir şeker üretilebilmesi için enzimatik olarak hidroliz olmaları gerekir. Mikroalgler biyoetanol üretimi için düşük maliyetli alternatif bir kaynaktır. Mikroalgler çok miktarda karbonhidratı bünyelerinde biriktirebilmeleri sebebiyle biyoetanol üretimi için ideal bir ham madde kaynağı olarak görülmektedir [99]. *Spirulina, Chlamydomonas* ve *Chlorella* gibi mikroalg türleri yüksek miktarda (>%50 kuru ağırlık) glikojen nişastası içermektedir. Glikojen nişastası enzimatik olarak biyoetanole dönüşüm için glikoza çevrilebilir [99], [100]. Glikozun biyoetanol ve karbondioksite dönüşümü Eşitlik 2.2'deki reaksiyona göre olmaktadır.

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2CH_3CH_2OH + 2CO_2 \qquad (2.2)$$

Hirano vd. [101] 250'den fazla mikroalg türünün biyoetanol üretim potansiyelini araştırmıştır. Bu türlerin arasında en yüksek nişasta içeriklerine sahip *Chlamydomonas reinhardtii* ve *Chlorella vulgaris* türlerinin sırasıyla %45 ve %37 nişasta içerdiği rapor edilmiştir.

Son yıllarda, mikroalgler eş zamanlı olarak biyodizel ve biyoetanol üretiminde kullanılmaktadır. Bu proseste, fermantasyon aşamasından önce lipit ekstrakte edilmektedir. Birçok araştırma çalışması biyoetanol üretimi için mikroalglerin kullanımının uygunluğunu doğrulamıştır. Mikroalglerden biyoetanol üretiminin başlıca avantajı biyodizel üretimine göre daha az enerji tüketilmesidir.

2.7.3 Biyohidrojen

Mikroalglerden üretilen diğer bir temiz, yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynağı biyohidrojendir. Mikroalglerden biyohidrojen üretimi ilk olarak 1970'li yıllarda başlamıştır [102]. Mikroalglerin genetik, metabolik, enzimatik karakteristiklerinin biyohidrojen üretimi için uygun olduğu kanıtlanmıştır. Kültür şartlarına bağlı olarak (aerobik karanlık, anaerobik karanlık gibi), nişastanın oksidatif reaksiyonu farklı olmaktadır ve üretilen hidrojen, etanol, karbondioksit vb. mikroalgal türe göre değişiklik göstermektedir.

Hidrojen üretimi birçok yöntem kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. En yaygın kullanılan yöntemler doğrudan ve dolaylı biyofotoliz yöntemleridir. Doğrudan biyofotoliz, fotosentez ile mikroalglerin su moleküllerini ayırması sonucunda gerçekleşir. Bu reaksiyon sonucunda elektronlar açığa çıkar ve elektronlar fotosistem II ve fotosistem I tarafından ferrodoksine transfer edilir. Bu süreç genellikle çok zaman almaz [103]. Bu prosesin basitleştirilmiş reaksiyonu Eşitlik 2.3'te verilmiştir.

$$H_2O + g\ddot{u}ne\text{ş}\ enerjisi \rightarrow H_2 + \frac{1}{2}\ O_2 \qquad (2.3)$$

Dolaylı biyofotolizde ise hidrojen birden fazla adımda üretilmektedir. Karbondioksit fotosentetik reaksiyonlarda su moleküllerinin parçalanması için kimyasal enerji kaynağı olarak karbonhidrat formunda depolanır. Dolaylı biyofotolizin amacı geçici olarak oksijen üretiminden hidrojen üretimini ayırmaktır. Bu yöntem nitrojenaz esaslı sistemler tarafından kullanılmaktadır [104], [105] ve Eşitlik 2.4-2.5 ile ifade edilir.

$$12H_2O + 6CO_2 + ı\text{ş}ık\ enerjisi \rightarrow C_6H_{12}O_6 + O_2 \qquad (2.4)$$

$$C_6H_{12}O_6 + 12H_2O + ı\text{ş}ık\ enerjisi \rightarrow\ 12H_2 + 6CO_2 \qquad (2.5)$$

Biyohidrojen üretiminde yüksek hidrojen üretme potansiyeli sebebiyle en yaygın kullanılan türlerden bir tanesi *Chlamydomonas reinhardtii'*dir [106].

2.7.4 Biyometan

Mikroalglerden biyometan üretimi ile ilgili çalışmalar ilk olarak 1950'li yıllarda başlamıştır. Enerji krizinin başlaması ile birlikte, mikroalglerden metan üretimi fosil yakıtlara rakip bir alternatif olarak görülmüştür [36], [107]. Mikroalglerden metan üretimi, yağ ekstraksiyonundan sonra kalan atık biyokütlenin anaerobik parçalanması ile meydana gelmektedir. Anaerobik parçalanma işleminde, organik madde anaerobik mikroorganizmalar tarafından metan (%55-75) ve karbondioksite (%25-45) dönüştürülmektedir. Biyometan üretimi basitleştirilmiş olarak Eşitlik 2.6 ile ifade edilmektedir.

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3CH_4 + 3CO_2 \quad (2.6)$$

Çizelge 2.5'te metan üretiminde kullanılan bazı mikroalg türlerine ait bilgiler verilmiştir. Yapılan çalışmalarda en iyi biyometan üretme verimi sırasıyla *Chlamydomonas reinhardtii, Dunaliella salina, Arthrospira platensis* ve *Euglena gracilis* türleri ile elde edilmiştir.

Çizelge 2.5 Bazı mikroalg türlerinin metan üretim potansiyeli

Mikroalg	**Metan üretimi, (m3/kg)**	**Hidrolik bekletme süresi, (gün)**	**Organik yükleme oranı, (uçucu katı/L gün)**	**Referans**
Ulva sp.	0.20	8	4.80	[108]
Gracilaria sp	0.28-0.40	12-16	-	[109]
Chlorella vulgaris	0.24	33	0.97	[110]
Scenedesmus sp.	0.22	3.80	3.23	[111]
Chlamydomonas reinhardtii	0.58	-	-	[112]
Dunaliella salina	0.50	-	-	[112]
Arthrospira platensis	0.48	-	-	[112]
Euglena gracilis	0.48	-	-	[112]

Metan üretiminde sıcaklık, pH, organik yükleme oranı ve hidrolik bekletme süresi gibi birçok faktör etkilidir. Metan üretim verimini arttırmak için bu parametrelerin optimize edilmesi gerekmektedir. Genellikle, uzun katı bekletme süresi ve yüksek organik yükleme metan üretim verimini arttırmaktadır [56].

Mikroalglerden üretilen metan elektiriğe dönüştürülerek endüstriyel mikroalg üretim tesislerinde kullanılabilir. Böylelikle üretim maliyetleri azaltılabilir. Ayrıca, yarış pisti havuzlarda aynı anda atıksuların arıtımı ve biyometan üretimi gerçekleştirilebilir [46], [113].

2.8 Mikroalglerin Diğer Kullanım Alanları

2.8.1 İnsanlar İçin Besin Maddesi Olarak Ve Sağlıkta Kullanımı

Mikroalglerden üretilen besin maddeleri mikroalgal biyoteknolojinin öncelikli çalışma alanlarıdır. Mikroalgler, besin maddesi olarak insanlar tarafından binlerce yıldır kullanılmaktadır. Günümüzde mikroalgal besin maddeleri tablet, kapsül ve toz olarak satılmaktadır. Mikroalgal besin maddeleri ayrıca ekmek, bisküvi, dondurma gibi yaygın kullanılan yiyecekler içerisine, yiyeceklerin besin değerini arttırmak için eklenmektedir [114]. Kimyasal çeşitliliği sebebiyle mikroalgal besin maddeleri doğal gıda renklendiricisi olarak da kullanılabilmektedirler. *Arthrospira, Chlorella, D. salina* ve *Aphanizomenon flos-aquae* türleri ticari uygulamalarda yaygın olarak kullanılan türlerdir.

Chlorella türü sağlıklı besin ve besin takviyesi olarak kullanılmaktadır. Bu mikroalgler mide ülseri ve yaraların iyileşmesinde etkilidir, ayrıca damar sertliği ve kolestrol rahatsızlıklarına karşı önleyici etkisi vardır. *Spirulina (Arthrospira)* yüksek protein içeriği ve besin değeri sebebiyle besin maddesi olarak kullanılmaktadır. *Spirulina* türü ayrıca insan bünyesinde sentezlenmeyen önemli yağ asidi (linolenik asit) kaynağıdır. Bu mikroalg türü hiperlipideminin azaltılması, hipertansiyonun önlenmesi ve böbrek yetmezliğine karşı etkilidir [115]. *Dunaliella sp.* gıda sektöründe yaygın olarak kullanılan yeşil mikroalglerdendir. Özellikle, lipit ve protein içerikleri, gliserol konsantrasyonları, β-karoten içerikleri sebebiyle tercih edilmektedir. *Dunaliella salina* türü özellikle yüksek oranda (%14 kuru ağırlık) β-karoten içeriğine sahip olması sebebiyle ilgi görmektedir [116].

Özellikle deniz mikroalgleri linolenik asit, araşidonik asit, eikosapentaeonik asit, dokosaheksaenoik asit gibi çoklu doymamış yağ asitleri içermektedir [117], [118]. *N. oculata, Phaeodactylum tricornutum* ve *Thalassiosira pseudonana* çoklu doymamış yağ

asitlerinin üretilmesinde kullanılan türlerdir. Bu yağ asitleri beslenmede, birçok hastalığın önlenmesinde ve tedavisinde kullanılmaktadır [119], [120]. Yağ asitlerinin içeriği mikroalgal türe göre değişiklik gösterebilmektedir. Ayrıca, kültür ortamının şartları yağ asitlerinin miktarını etkilemektedir [121], [122].

Alglerde bulunan karotenoidlerin besin değeri ve tedavi edici özelliği vardır. β-karoten ve fukoksantin gibi karotenler anti-tümor ve kanser önleyici özelliklere sahiptir [123], [124]. Ayrıca, karotenlerin iltihaplanmayı önleyici özelliği vardır. Birçok mikroalg türünde karotenoidlerin konsantrasyonu ortalama %0.1-2 arasındadır. Fakat, *Dunaliella* türü optimum büyüme şartlarında %14'ün üzerinde β-karoten üretebilmektedir. Bu sebeple *Dunaliella* türü β-karotenin ticari üretimi için en yaygın kullanılan mikroalg türüdür. Astaksantin, alglerden elde edilen diğer bir karotenoid türüdür. Astaksantin güçlü bir antioksidandır ve bağışıklık sisteminin güçlenmesinde, UV ışınlarından korunmada, iltihaplara karşı korunmada etkilidir. Karotenoidlerin diğer bir çeşidi Lutein'dir. *Muriellopsis sp.* türü bünyesinde Lutein gibi yüksek miktarda karotenoid depolayabilen bir türdür. Lutein, dejeneratif hastalıkların önlenmesinde ve tedavisinde kullanılmaktadır [125].

2.8.2 Hayvanlar İçin Besin Kaynağı Olarak Kullanımı

Su ürünleri hayvanları besin zinciri yoluyla besinlerini temin ederler. Algler besin zincirinin en temel üreticisidir. Alglerin besin içerikleri larvaların ve yetişkinlerin hayatta kalması ve gelişmesi için önemlidir. Besin zinciri içerisinde algler balık larvalarının tükettiği zooplanktonlar tarafından tüketilmektedir. Genellikle, su ürünleri için besin kaynağı olarak *Skeletonema, Chaetoceros, Isochrysis, Dunaliella, Phaeodactylum, Navicula, Pavlova, Amphora, Nannochloropsis, Cyclotella, Tetraselmis, Nitzschia* ve *Chlorella* türleri yetiştirilmektedir.

Su ürünleri haricinde bazı algal türler birçok türde hayvan için besin kaynağı olarak kullanılabilmektedir. Özellikle *Chlorella, Scenedesmus* ve *Spirulina* türlerinin bağışıklık, doğurganlık, kilo kontrolü, cilt üzerinde yararlı etkileri olduğu rapor edilmiştir [3].

2.8.3 Kozmetikte Kullanımı

Bazı mikroalg türleri özellikle cilt bakımı olmak üzere kozmetik endüstrisinde kullanılmaktadır. *Arthrospira* ve *Chlorella* kozmetik alanında kullanılan başlıca mikroalg türleridir [126]. Mikroalg esaslı maddeler genellikle yüz ve cilt bakımı ürünlerinde (yaşlanma karşıtı krem, düzeltici bakım ürünleri, yumuşatıcı vb.) bulunabilmektedir. Mikroalgler ayrıca, güneşten korunma ve saç bakım ürünlerinde kullanılmaktadır.

Dünya genelinde mikroalgal ürünlerin üretim durumu ile ilgili ayrıntılı bilgiler Çizelge 2.6'da verilmiştir.

Çizelge 2.6 Mikroalgal ürünlerin üretim durumu, [3]

Mikroalg	**Yıllık üretim**	**Üretici ülke**	**Uygulama, ürün ve fiyat (€)**
Spirulina	3000 ton kuru ağırlık	Çin, Hindistan, ABD, Myanmar, Japonya	İnsan beslenmesi (36 kg^{-1}), hayvan beslenmesi, kozmetik
Chlorella	2000 ton kuru ağırlık	Tayvan, Almanya, Japonya	İnsan beslenmesi (36 kg^{-1}), kozmetik, su ürünleri (50 L^{-1})
Dunaliella salina	1200 ton kuru ağırlık	Avustralya, İsrail, ABD, Japonya	İnsan beslenmesi, kozmetik, β-karoten (215-2150 kg^{-1})
Aphanizomenon flos-aquae	500 ton kuru ağırlık	ABD	İnsan beslenmesi
Haematococcus pluvialis	300 ton kuru ağırlık	ABD, Hindistan, İsrail	Su ürünleri (50 L^{-1}), astaksantin (7150 kg^{-1})
Crypthecodinium cohnii	240 ton Dokosaheksaenoik asit yağı	ABD	Dokosaheksaenoik asit yağı (43 g^{-1})
Shizochytrium	10 ton Dokosaheksaenoik asit yağı	ABD	Dokosaheksaenoik asit yağı (43 g^{-1})

BÖLÜM 3

MATERYAL VE METOT

3.1 Çalışmada Kullanılan Mikroalg

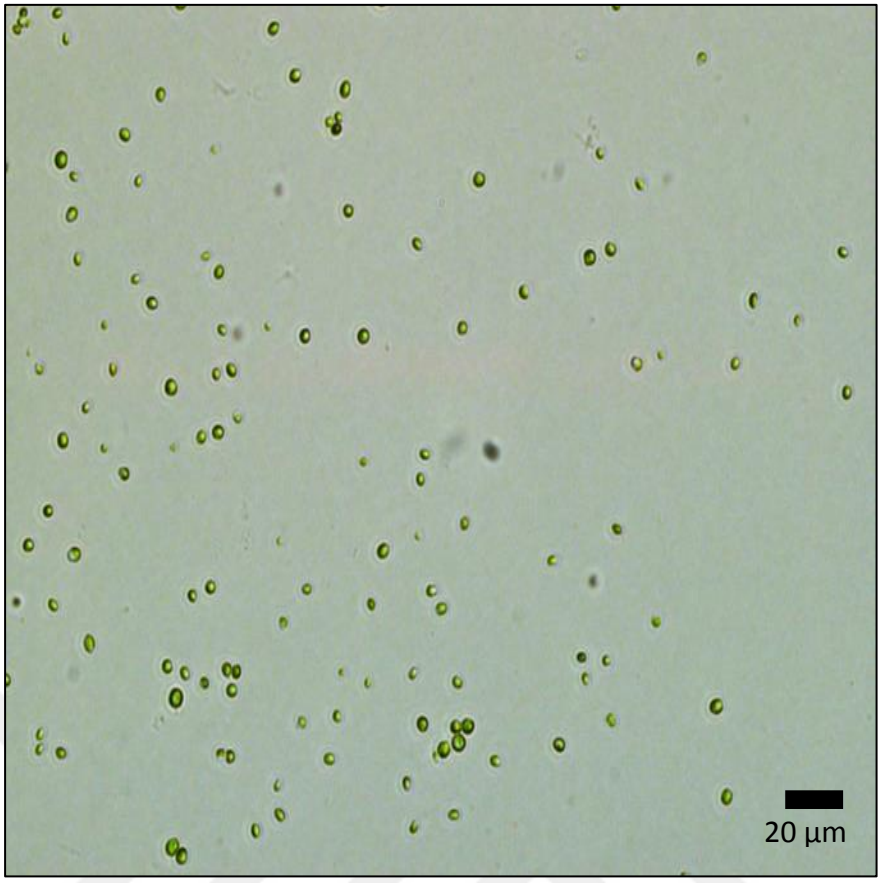
Bu çalışmada, mikroalg türü olarak *Chlorella vulgaris* kullanılmıştır. *Chlorella vulgaris* tek hücreli, ökaryotik yeşil bir tatlı su mikroalgidir. *Chlorella vulgaris* iyi bir protein, yağ, karbonhidrat, vitamin ve mineral kaynağıdır. Ayrıca, hızlı büyüme özelliği ve enerji, sağlık, kozmetik vb. birçok alanda kullanılabilmesi sebebiyle tercih edilmektedir.

Chlorella vulgaris türüne ait bilimsel sınıflandırma Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 *Chlorella vulgaris*'in taksonomisi, [127]

Alem	Plantae, (bitkiler alemi)
Bölüm	Chlorophyta, (yeşil algler, klorofitler)
Sınıf	Chlorophyceae, (klorofişler)
Takım	Chlorococcales
Aile	Oocystaceae
Cins	*Chlorella*
Tür	*Chlorella vulgaris*

Çalışmada kullanılan *Chlorella vulgaris* ilk olarak Olympus BX51 marka kameralı mikroskop kullanılarak incelenmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 *Chlorella vulgaris* hücrelerine ait mikroskop görüntüsü

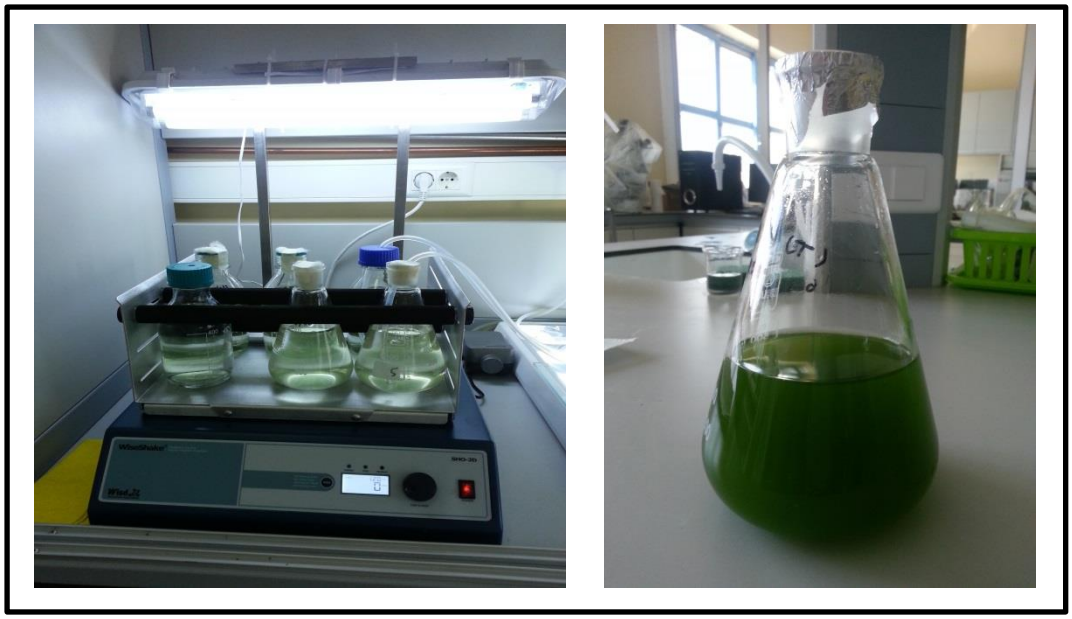
Elde edilen mikroskop görüntülerinden *Chlorella* hücrelerinin küre ya da elips biçiminde olduğu görülmüştür. Ayrıca, mikroalg hücrelerinin çaplarının ortalama 5 µm olduğu tespit edilmiştir.

3.2 Mikroalglerin Yetiştirildiği Sentetik Besin Ortamı

Chlorella vulgaris yetiştirilmesinde yaygın olarak Bold's Basal besin ortamı (BBM) kullanılmaktadır. Bu çalışmada Bold's Basal besin ortamı kullanılmıştır ve besin ortamının içeriği Çizelge 3.2'de verilmiştir. İlk olarak otoklav kullanılarak cam malzelerin 121 °C'de 15 dakika boyunca sterilizasyonu gerçekleştirilmiştir. Mikroalgal hücreler sentetik besin ortamı kullanılarak plaka biyoreaktöre aşılanmak üzere yetiştirilmiştir. Mikroalg yetiştirme işlemi Daihan Sho-2d marka orbital çalkalayıcı kullanılarak erlenlerde gerçekleştirilmiştir. Orbital çalkalayıcıdaki mikroalg yetiştirme işlemi 120 rpm karıştırma hızında, floresan ışığı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Erlenlerdeki mikroalg yetiştirme işlemi mikroalgler yeterli yoğunluğa ulaşana kadar (yaklaşık 30 gün) devam etmiştir.

Çizelge 3.2 Bold's Basal besin ortamı

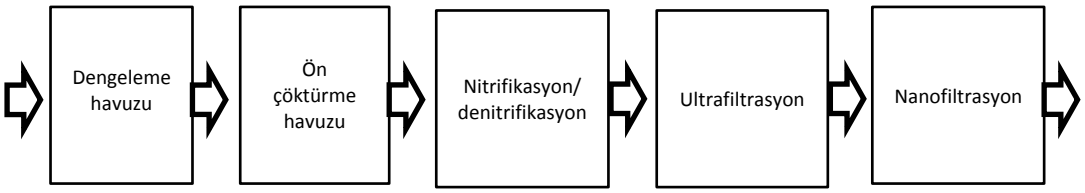
Bold's Basal besin ortamı (BBM)		
Stoklar		**400 ml için**
1.	$NaNO_3$	10.0 g
2.	$MgSO_4.7H_20$	3.0 g
3.	NaCl	1.0 g
4.	K_2HPO_4	3.0 g
5.	KH_2PO_4	7.0 g
6.	$CaCl_2.2H_20$	1.0 g
7.	İz element çözeltileri	**1000 ml için**
	$ZnS0_4.7H_20$	8.82 g/L
	$MnCl_2.4H_2O$	1.44 g/L
	MoO_3	0.71 g/L
	$CuSO_4.5H_20$	1.57 g/L
	$Co(NO_3)_2.6H_20$	2.24 g/L
8.	H_3BO_3	1.486 g/L
9.	EDTA	50.0 g/L
	KOH	12 g/L
10.	$FeSO_4.7H_20$	4.98 g/L
	H_2SO_4 (konst.)	1.0 ml/L
Besin Ortamı		**1000 ml için**
	Stok Çözeltiler 1 -6	10.0 ml (her çözeltiden)
	Stok Çözeltiler 7-10	1.0 ml (her çözeltiden)



Şekil 3.2 *Chlorella vulgaris* hücrelerinin çoğaltılması

3.3 Kültivasyon Çalışmalarında Kullanılan Sızıntı Suyu

Bu çalışmada İstaç A.Ş. Odayeri Çöp Sızıntı Suyu Arıtma Tesisi çıkışından alınan numuneler ile mikroalg kültivasyonu gerçekleştirilmiştir. Ayrıca atıksudaki besin maddelerinin giderim verimleri araştırılmıştır. Arıtma tesisinin akım şeması Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3 İstaç A.Ş. Odayeri Atıksu Arıtma Tesisi Akım Şeması

İstaç A.Ş. Odayeri Çöp Sızıntı Suyu Arıtma Tesisi 1995 yılında işletilmeye başlanmıştır. Bu tesisin arıtma kapasitesi 2000 m^3/gün sızıntı suyudur. Depolama sahasından toplanan sızıntı suları ön çöktürme havuzuna gelerek bir miktar organik ve inorganik madde giderimi sağlanır. Daha sonra, sızıntu suyu nitrifikasyon/denitrifikasyon havuzlarına iletilir ve burada biyolojik arıtım gerçekleşir. Biyolojik arıtımdan geçen sızıntı suyu 30 nm gözenek çapına sahip ultrafiltasyon membranlarına iletilir. Burada yüksek molekül ağırlıklı bileşenler tutulur. Son olarak 10 nm gözenek çapına sahip nanofiltrasyon membranlarına gelen sızıntı suyundan bakteriler, virüsler, pestisitler,

organik maddeler, ağır metaller ve bazı tuzlar giderilir. Arıtma tesisine ait görüntüler Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.4 İstaç A.Ş. Odayeri Sızıntı Suyu Arıtma Tesisi havalandırma havuzu



Şekil 3.5 İstaç A.Ş. Odayeri Sızıntı Suyu Arıtma Tesisi membran prosesleri

Odayeri sızıntı suyu nanofiltrasyon tesisi çıkış suyu karakterizasyonu: Renk; 12 PtCo, KOİ; 1145 mg/L, UV_{254} abs; 0.5, İletkenlik; 24.5 mS/cm [128], NH_4^+-N; 2000 mg/L.

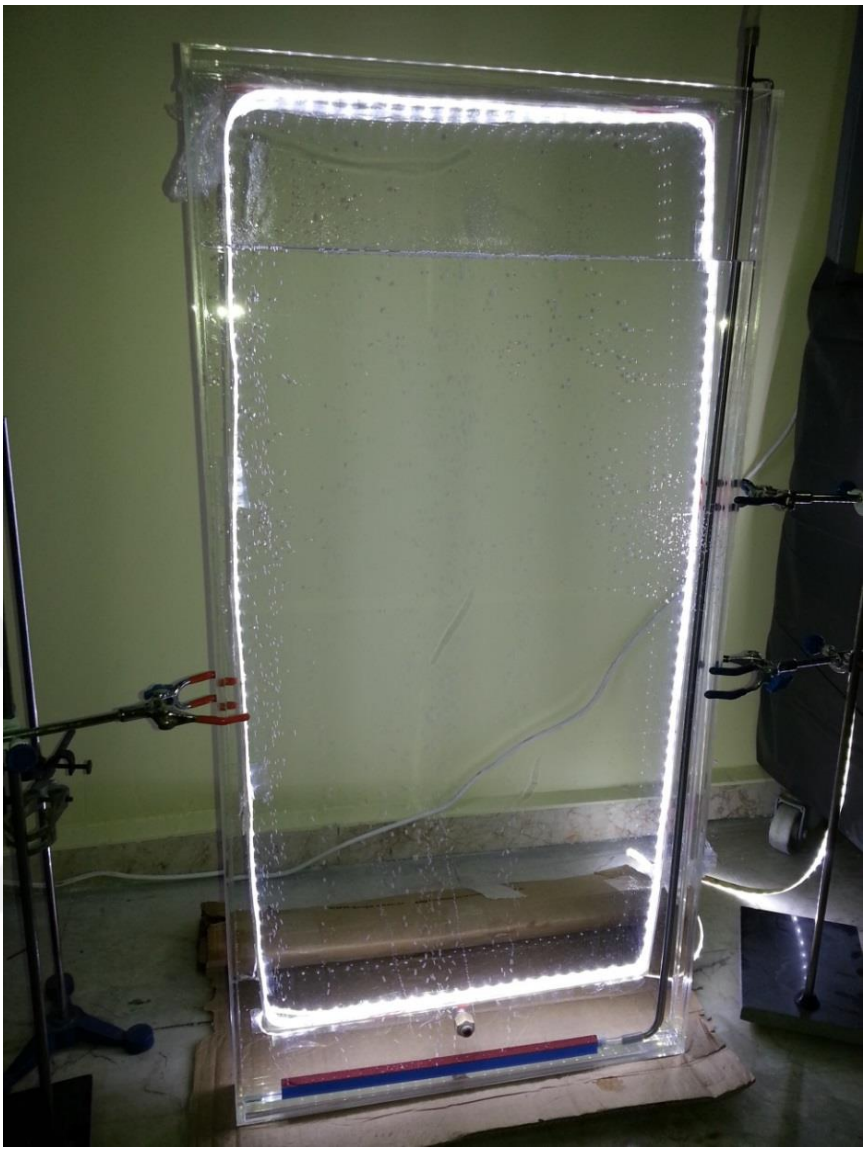
3.4 Mikroalg Kültivasyonunda Kullanılan Fotobiyoreaktör

Bu çalışmada mikroalg kültivasyonunda yaygın olarak kullanılan düz plaka fotobiyoreaktör kullanılmıştır. Düz plaka fotobiyoreaktör 10 mm kalınlığında pleksiglas malzemeden imal edilmiştir. Sistemin boyutları 50x100x4,5 cm (en-yükseklik-derinlik) olarak tasarlanmıştır. Sistemin kullanılabilir hacmi yaklaşık olarak 20 L'dir. Hava pompası kullanılarak sisteme tabandan difüzörler yardımıyla 32 L/dakika hava verilmiştir. Atmosferden mikroorganizma kontaminasyonu olmaması için hava hattına 0.22 µm boyutunda gözeneklere sahip hidrofobik filtre entegre edilmiştir. Hidrofobik filtrenin görüntüsü Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6 Hava hattına bağlanan 0.22 µm gözenek çapına sahip hidrofobik filtre

Işık kaynağı olarak, sistemin etrafını saran şerit led ışıklar ve biyoreaktörün ön yüzeyine bakacak şekilde konumlandırılmış bir adet büyük led ışık kullanılmıştır. Düz plaka fotobiyoreaktöre gelen ışık şiddeti MIC (Model 98209) marka ışıkölçer ile ölçülerek, sisteme gelen ışık 100 µmol m^{-2} s^{-1} olarak ayarlanmıştır. Düz plaka fotobiyoreaktörün devreye alınma aşamasındaki ilk görüntüsü Şekil 3.7'da verilmiştir.



Şekil 3.7 Düz plaka fotobiyoreaktörün hazırlanma görüntüleri

Düz plaka fotobiyoreaktörün ilk deneme çalışmaları saf su kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Su sızmalarının olmaması için biyoreaktördeki bağlantı yerleri kloroform kullanılarak sağlamlaştırılmıştır. Ayrıca, sistem içerisindeki su basıncının fotobiyoreaktörü etkilememesi için demir kıskaç kullanılarak köşelerden desteklenmiştir. Son olarak, pleksiglas malzemeden üretilen fotobiyoreaktör kolay taşınabilmesi için demir atölyesinde üretilen tekerlekli demir iskelet üzerine yerleştirilmiştir. Düz plaka fotobiyoreaktörün mikroalg yetiştirme çalışmalarına başlanmadan önceki son hali Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.8 Düz plaka fotobiyoreaktörün tamamlanmış görüntüsü

3.5 Çalışamada Kullanılan Sarf Malzemeler

Bu çalışmada kullanılan sarf malzemeler Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3 Çalışamada kullanılan sarf malzemeler

No	Kimyasal (Sarf malzeme) Adı	Kimyasal Kodu, (Merck)
1	Di-potassium hydrogen orthophosphate (K_2HPO_4)	1.051.011.000
2	Potassium di-hydrogen orthophosphate (KH_2PO_4)	1.048.730.250
3	Magnesium sulphate ($MgSO_4X7\ H_2O$)	1.058.860.500
4	Sodium Nitrate ($NaNO_3$)	1.065.441.000
5	Calcium chloride ($CaCl_2x2H_2O$)	1.023.821.000
6	Sodium Chloride (NaCl)	1.064.041.000
7	EDTA tetrasodium salt (EDTA-Na_4)	1.084.181.000
8	Potassium hydroxide (KOH)	1.050.331.000
9	Ferrous sulphate ($FeSO_4X7H_2O$)	1.039.651.000
10	Boric acid (H_3BO_3)	1.001.651.000
11	Zinc sulphate ($ZnSO_4X7H_2O$)	1.088.830.500
12	Manganese chloride ($MnCl_2x4H_2O$)	1.059.271.000
13	Cupric sulphate ($CuSO_4X5H_2O$)	1.027.901.000
14	Cobaltous nitrate ($Co(NO_3)2X6H_2O$)	1.025.360.100
15	Sodium molybdate ($Na_2MoO_4X2H_2O$)	1.065.210.100
16	Sulfuric acid (H_2SO_4)	1.007.312.511
17	Sodium hydroxide pellets (NaOH)	1.064.821.000
18	Hydrochloric acid (HCl)	1.00317.1000
19	Sodium hydroxide (NaOH)	1.06462.1000
20	Amonyum Azotu Merck Test Kiti	1145440001
21	Nitrat Azotu Merck Test Kiti	1147640001
22	Fosfat Fosforu Merck Test Kiti	1145430001

3.6 Çalışamada Kullanılan Cihazlar

Çalışmada kullanılan Ekipman/Cihaz'ların listesi Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4 Çalışamada kullanılan ekipman/cihaz'lar

No	Ekipman/Cihaz/Enstrüman Adı	Ekipman/Cihaz/Enstrüman Markası
1	Otoklav	NÜVE-OT 40 L
2	Spektrofotometre	PHOTOLAB 6600 UV-VIS
3	Etüv	ELEKROMAG M6040P
4	pH-Ç.O.-İletkenlik ölçer	THERMO-ORİON 5 STAR
5	Manyetik karıştırıcı	DAIHAN WİSESTİR MSH-20A
6	Işık şiddeti ölçer	MMIC MODEL 98209
7	Bilgisayar	ACER
8	Orbital çalkalayıcı	DAİHAN SHO-2D
9	AKM süzme seti	-

3.7 Analizler

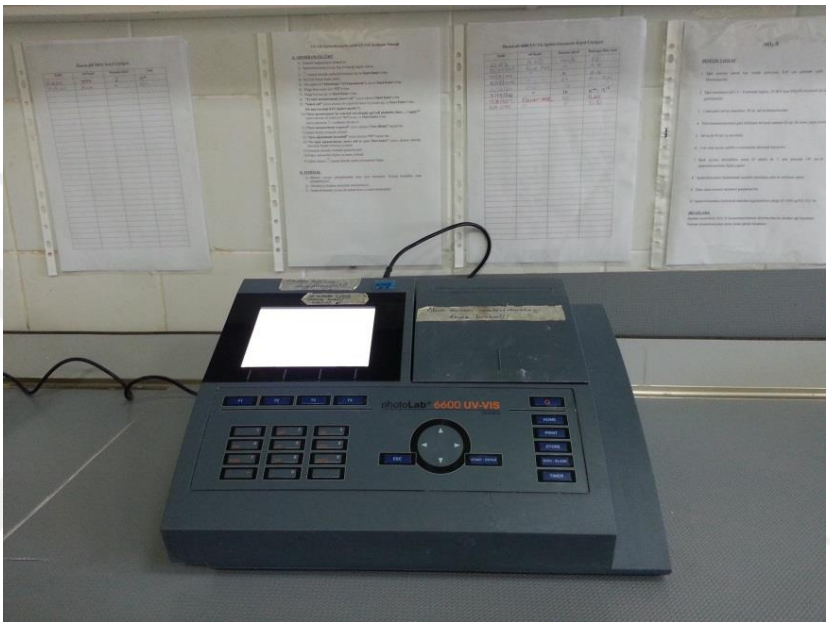
Çalışmada analiz edilen parametreler, kullanılacak metot ile deney yöntemleri Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5 Çalışamada analiz edilen parametreler

No	Parametre	Metot Adı	Deney Yöntemi
1	pH	Elektrokimyasal Metot	SM 4500 H^+ B
2	İletkenlik	Laboratuvar Metotu	SM 2510 B
3	Sıcaklık	Laboratuvar Metotu	SM 2550 B
4	Optik yoğunluk	Spektrofotometrik Metot	680 nm
5	Toplam AKM	Gravimetrik Metot	SM 2540 D
6	Çözünmüş oksijen oksijen doygunluğu	Membran Elektrot Metotu	SM 4500 O G
7	Amonyum azotu	Merck Test Kiti Metodu	WTW PhotoLab 6600 UV-VIS kat. No: 14544
8	Nitrat azotu	Merck Test Kiti Metodu	WTW PhotoLab 6600 UV-VIS kat. No: 14764
9	Fosfat fosforu	Merck Test Kiti Metodu	WTW PhotoLab 6600 UV-VIS kat. No: 14543

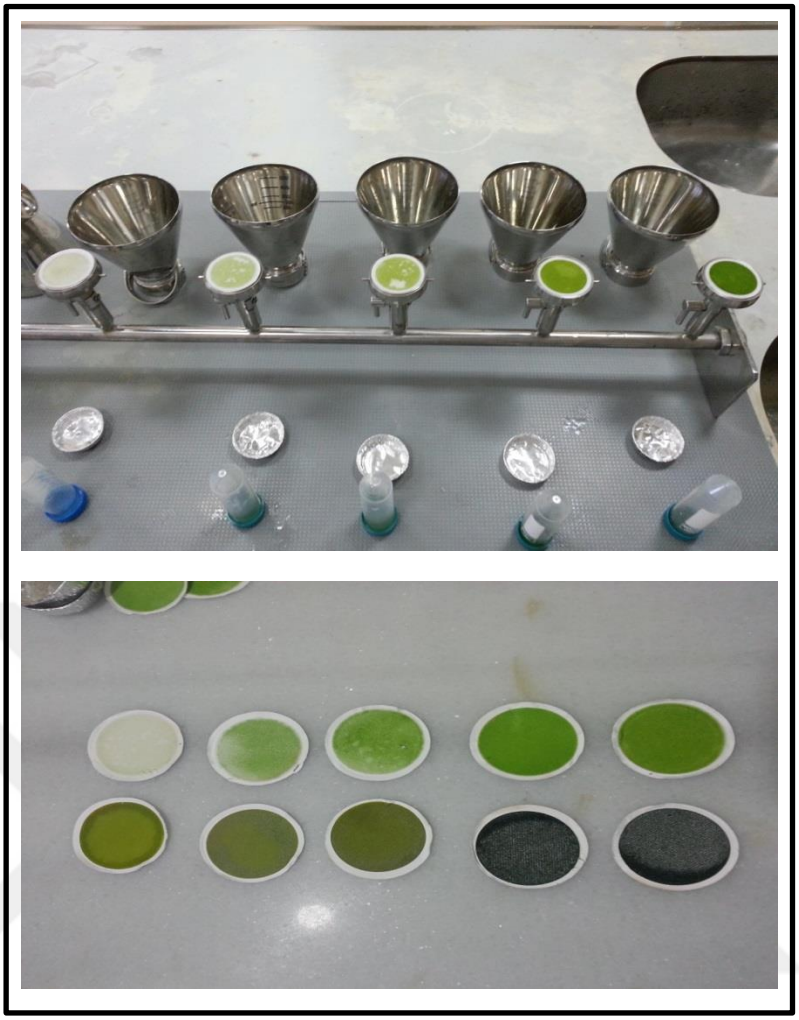
3.7.1 Optik Yoğunluk ve Kuru Ağırlık Analizleri

Mikroalglerin zamana bağlı olarak gelişimleri optik yoğunluk ve kuru ağırlık analizleri ile hesaplanmıştır. Optik yoğunluk analizi belirli zaman aralıkları ile biyoreaktörden yaklaşık 10 ml mikroalg kültürü alınarak gerçekleştirilmiştir. Alınan mikroalg kültürü 10 mm kalınlığındaki cam tüpler içerisine konularak bir spektrofotometrede 680 nm dalga boyunda ölçülmüştür. Ölçülen değerler absorbans biriminde kaydedilmiştir. Optik yoğunluk analizinde kullanılan spektrofotometrenin görüntüsü Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9 Optik yoğunluk analizinde kullanılan UV–VİS spektrofotometre

Mikroalglerin kuru madde analizi için ilk olarak filtrasyonda kullanılacak 0.45 µm cam elyaf filtre kağıtları desikatörde 30 dakika bekletilerek sabit tartıma getirilmiştir. Sabit tartıma getirilen filtre kağıtları hassas terazi kullanılarak tartılmıştır. Daha sonra biyoreaktörden alınan 50 ml mikroalg kültürü süzme seti vasıtasıyla filtre kağıdından süzülmüştür. Filtrasyon işleminden sonra filtre kağıtları 105 °C'de etüv'de 2 saat boyunca kurutulmuştur. Kurutulan filtre kağıdı tekrar desikatörde 30 dakika bekletilerek sabit tartıma getirilmiştir. Son olarak desikatörden alınan filtre kağıdı tekrar tartılmıştır. Son tartımdan filtrenin ağırlığı çıkartılarak filtre üzerindeki mikroalgal kuru madde ağırlığı hesaplanmıştır. Kuru madde analizinde kullanılan süzme düzeneği ve kullanılan filtrelere ait görüntüler Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10 Kuru ağırlık analizi için kullanılan süzme düzeneği

3.8 Mikroalglerin Büyüme Hızlarının ve İkilenme Sürelerinin Hesaplanması

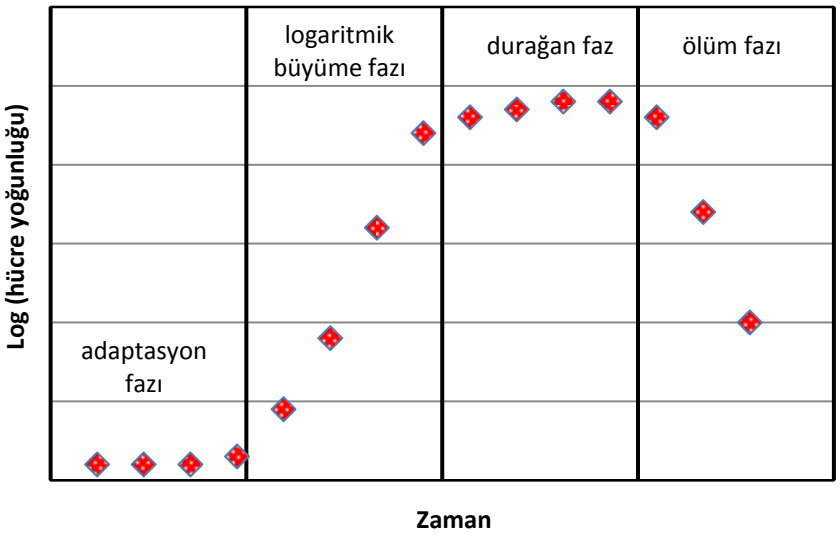
Kesikli çalışmalarda mikroorganizmaların çoğalması adaptasyon fazı, logaritmik büyüme fazı, durağan faz ve ölüm fazı olmak üzere dört adımda gerçekleşir (Şekil 3.11). Bu çalışamada mikroalgal hücrelerin spesifik büyüme hızı, kültivasyon sırasındaki logaritmik büyüme fazı esas alınarak hesaplanmıştır. Hesaplamada kullanılan denklem Eşitlik 3.1'de verilmiştir [129]. Başlangıçtaki adaptasyon fazı hesaplamada ihmal edilmiştir.

$$\frac{dX}{dt} = \mu X \qquad \rightarrow\rightarrow\rightarrow \qquad \mu = \frac{\ln(\frac{X}{X_0})}{(t - t_0)} \tag{3.1}$$

Eşitlikte, μ spesifik büyüme hızını (gün^{-1}), X_0 ve X sırasıyla logaritmik büyüme fazındaki ilk ve son hücre yoğunluğu değerlerini, t_0 ve t ise logaritmik büyüme fazındaki ilk ve son zamanları (gün) ifade etmektedir.

Mikroalglerin sayısının iki katına çıkması için gereken ikilenme süresi ise Eşitlik 3.2'de verilen denklem yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\ln(2) = \mu t_i \quad \rightarrow\rightarrow\rightarrow \quad t_i = \frac{0.693}{\mu} \tag{3.2}$$



Şekil 3.11 Kesikli sistemlerde mikroorganizmaların büyüme kinetiği

3.9 Mikroalglerin Kullandığı CO_2 Miktarının Hesaplanması

Mikroalgler için karbon kaynağı olarak sisteme verilen havadaki CO_2 kullanılmıştır. Mikroalgal büyokütlenin kullandığı CO_2 miktarı Eşitlik 3.3 yardımıyla hesaplanmıştır [130].

$$R_{CO_2} = C_C * \mu_L \left(\frac{M_{CO_2}}{M_C}\right) \tag{3.3}$$

Eşitlikte, R_{CO2} biyokütlede tutulan CO_2 miktarını (g/L gün), Cc mikroalgal biyokütlede bulunan C miktarını (%), μ_L biyokütlenin kuru ağırlığındaki artış miktarı (g/L gün), Mco_2 ve Mc sırasıyla CO_2, in ve C'un moleküler ağırlığını ifade etmektedir.

BÖLÜM 4

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında mikroalglerin kültivasyonu düz plaka fotobiyoreaktör kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kültivasyon çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen faaliyetler aşağıda verilmiştir.

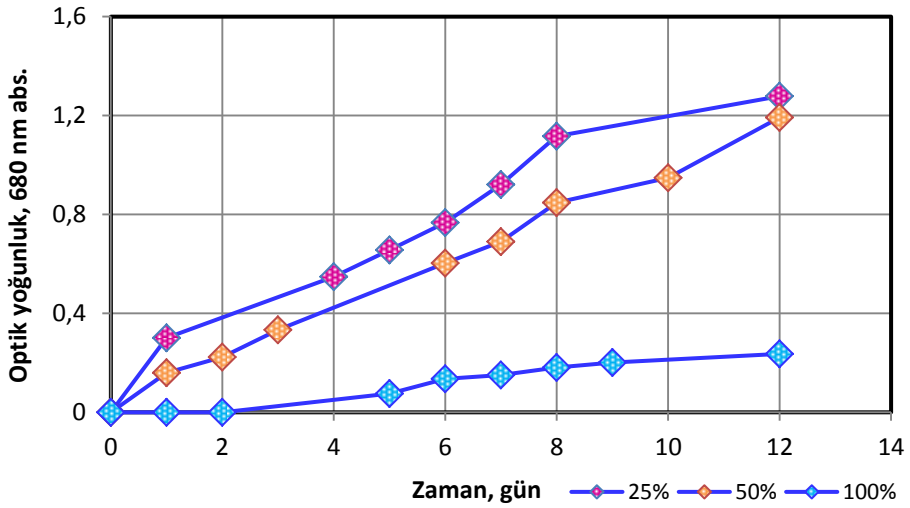
1. Farklı oranlarda (%25, %50, 100) hazırlanmış çöp sızıntı suyu membran tesisi çıkış suyu ile 12 gün boyunca mikroalglerin kültivasyonu ve mikroalglerin gelişimine etki eden parametrelerin takip edilmesi;
   1.1. Mikroalgal kültür ortamında optik yoğunluk, kuru ağırlık, NH_4^+-N, PO_4^{-3}-P analizlerinin yapılması.
   1.2. Mikroalgal kültür ortamında pH, çözünmüş oksijen, sıcaklık, iletkenlik parametrelerinin izlenmesi.
   1.3. Mikroalglerin spesifik büyüme hızlarının ve ikilenme sürelerinin belirlenmesi.
   1.4. Mikroalglerin CO_2 kullanım miktarlarının belirlenmesi.
2. 86 günlük kültivasyon çalışmasında mikroalglerin gelişiminin ve mikroalgal çoğalmaya etki eden parametrelerin izlenmesi;
   2.1. Kültivasyonun ilk 42 günlük süresinde BBM sentetik besin ortamı kullanılmıştır. Daha sonra %10 oranında, seyreltilmiş çöp sızıntı suyu membran tesisi çıkış suyu kullanılmıştır.
   2.2. Çalışmada belirli zaman aralıklarıyla optik yoğunluk, kuru ağırlık, NH_4^+-N ve NO_3^--N, PO_4^{-3}-P analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca mikroalgal büyümeyi etkileyen pH, çözünmüş oksijen, sıcaklık, iletkenlik gibi parametreler belirli aralıklarla ölçülmüştür.

4.1 Farklı Oranlarda Arıtılmış Sızıntı Suyu İle Mikroalg Kültivasyonu

Bu çalışmada %25, %50 ve %100 oranlarında hazırlanan çöp sızıntı suyu membran tesisi çıkış suyu ile düz plaka fotobiyoreaktörde mikroalg kültivasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, optik yoğunluk, kuru ağırlık, NH_4^+-N, PO_4^{-3}-P analizleri gerçekleştirilmiştir. Mikroalg hücrelerinin spesifik büyüme hızları ve ikilenme süreleri hesaplanmıştır. Ayrıca, mikroalgal kültür ortamının kültivason süresi boyunca pH, çözünmüş oksijen, sıcaklık, iletkenlik değerleri ölçülmüştür.

4.1.1 Optik Yoğunluk Değerleri

Mikroalglerin zamana bağlı olarak çoğalmalarını izlemek amacıyla mikroalgal kültür ortamının optik yoğunluk değerleri ölçülmüştür. 12 günlük kültivasyon süresi boyunca elde edilen optik yoğunluk değerleri Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1 Kültivasyon süresi boyunca mikroalg kültürlerindeki optik yoğunluk değerlerinin değişimi

Optik yoğunluk değerlerini incelediğimizde en iyi gelişimin elde edilen 1.278 abs değeri ile %25 oranında hazırlanmış arıtılmış sızıntı suyunda gerçekleştiği görülmektedir. %50 oranında hazırlanmış atıksu ile gerçekleştirilen çalışmada ise 12. Günün sonunda optik yoğunluk değeri 1.192 abs olarak ölçülmüştür. %100 oranında hazırlanan atıksu da ise mikroalglerin çok az gelişim gösterdiği mikroalgal büyümenin inhibe olduğu görülmektedir. Çizelge 4.1'de kültüvasyon süresi boyunca hesaplanan spesifik büyüme hızları ve ikilenme süreleri verilmiştir.

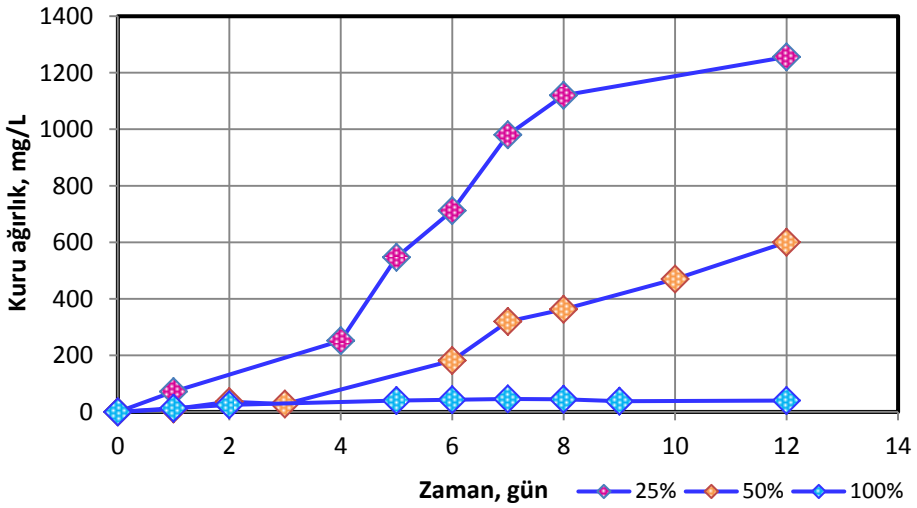
Çizelge 4.1 Mikroalg hücrelerinin spesifik büyüme hızları ve ikilenme süreleri

Oran	Spesifik büyüme hızı, (gün^{-1})	İkilenme süresi, (gün)
%25	0.095	7.29
%50	0.070	9.90
%100	0.019	36.47

Mikroalgal hücrelerin spesifik büyüme hızlarını incelediğimizde arıtılmış sızıntı suyu konsantrasyonu arttıkça büyüme hızlarının yavaşladığı görülmektedir. Park vd. [131] *Scenedesmus accuminatus* türünü kullanarak seyreltilmiş hayvansal atıksu ile gerçekleştirdikleri kültivasyon çalışmasında en yüksek spesifik büyüme hızını 0.091 gün^{-1} olarak hesaplamışlardır. Ayrıca, başlangıç mikroalgal hücre yoğunluğu arttıkça spesifik büyüme hızının azaldığını rapor etmişlerdir [131]. Başka bir çalışmada, Converti vd. [132] *Chlorella vulgaris* türünü Bold's Basal besin ortamında yetiştirmiştir ve en yüksek spesifik büyüme hızını 25 °C'de 0.14 gün^{-1} olarak belirlemiştir.

4.1.2 Kuru Ağırlık Değerleri

Mikroalgal büyümeyi gösteren diğer bir parametre mikroalgalerin kuru ağırlık değerleridir. Kuru ağırlık değerlerinin zamana bağlı değişimi Şekil 4.2'de verilmiştir.

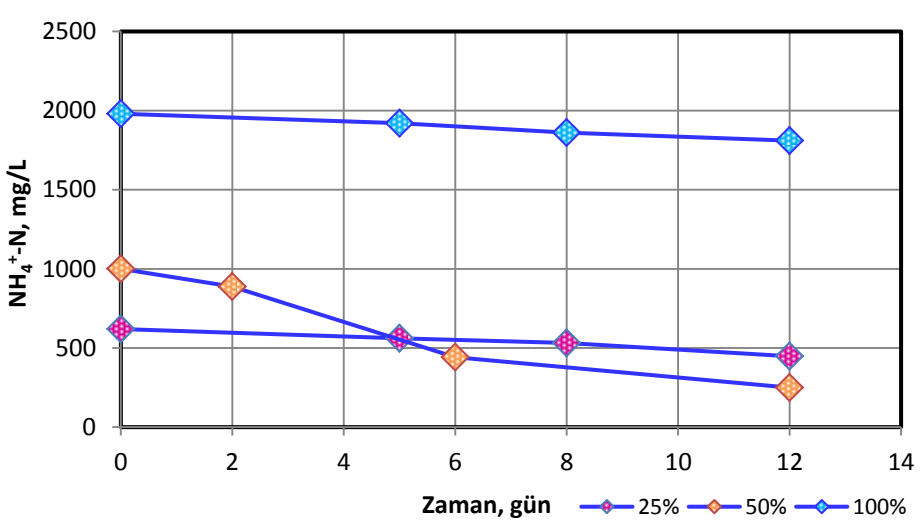


Şekil 4.2 Kültivasyon süresi boyunca mikroalg kültürlerindeki kuru ağırlık değerlerinin değişimi

Kuru ağrlık değerleri incelendiğinde en iyi gelişimin %25 oranında hazırlanmış arıtılmış sızıntı suyu ile elde edildiği görülmektedir. Seyreltilmemiş atıksu ile gerçekleştirilen çalışmada ise kuru ağırlık değerlerinin zamanla artmadığı görülmektedir.

4.1.3 NH_4^+-N Değerleri

Mikroalg kültivasyonu için atıksuların kullanılması ile hem atıksuyun arıtımı hem de mikraolg kültivasyonu gerçekleştirilmiş olmaktadır. Bu çalışmada arıtılmış sızıntı suyu içerisinde bulunan NH_4^+-N konsantrasyonlarının zamana bağlı olarak değişimi araştırılmıştır. Kültivasyon süresi boyunca analiz edilen NH_4^+-N konsantrasyonları Şekil 4.3'te verilmiştir.



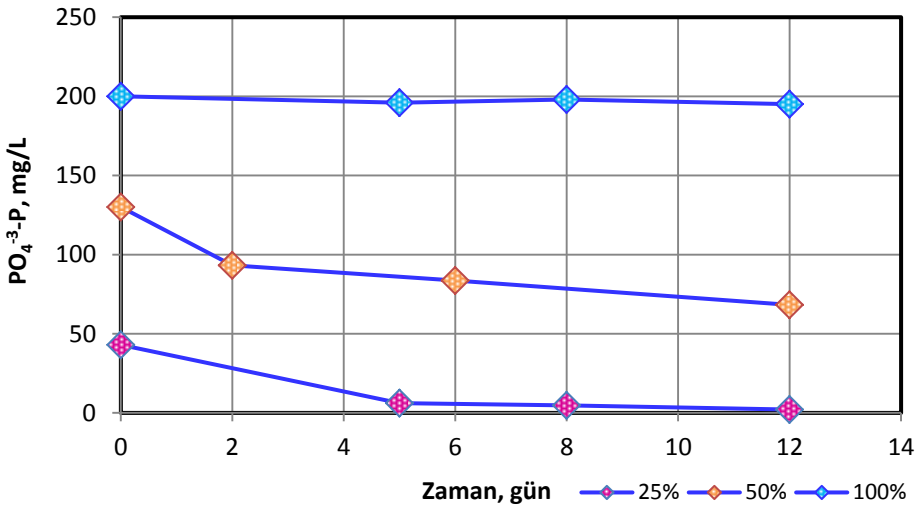
Şekil 4.3 Kültivasyon süresi boyunca mikroalg kültürlerindeki NH_4^+-N değerlerinin değişimi

Kültivasyon süresi boyunca değişen NH_4^+-N değerleri karşılaştırıldığında, %50 oranında seyreltilmiş atıksu ile gerçekleştirilen çalışmada 12. günün sonunda NH_4^+-N konsantrasyonu 250 mg/L'ye (%75 NH_4^+-N giderimi) kadar düşmüştür. %25 oranında hazırlanan atıksuda ise NH_4^+-N konsantrasyonundaki azalma daha yavaş (~%28 giderim) gerçekleşmiştir. Seyreltilmemiş atıksuda ise çok az bir azalma meydana gelmiştir. Bu durumun temel sebebi yüksek NH_4^+-N konsantrasyonunun mikroalgler üzerinde toksik etki göstererek mikroalgal büyümeyi yavaşlatmasıdır/durdurmasıdır. Cheah vd. [58] *Chlorella pyrenoidosa* ve *Chlamydomonas snowiae* türlerinin gelişiminde 670 mg/L üzerinde NH_4^+-N konsantrasyonlarının inhibisyon etkisi yaptığını rapor etmiştir. He vd.

[78] 39-143 mg/L NH_4^+-N içeren atıksuyun, *Chlorella vulgaris* türü mikroalglerin spesifik büyüme hızını düşürdüğünü ifade etmiştir. Benzer şekilde, Kim vd. [133] mikroagal besin ortamında 330 mg/L amanyum bulunması durumunda *Chlorella vulgaris* tününün gelişiminin %50 oranında azaldığını ifade etmiştir. Ayrıca, pH 8-9 aralığında 700 mg/L amonyum konsantrasyonunun *Chlorella vulgaris* türünün gelişimini durdurduğunu ifade etmiştir[133].

4.1.4 PO_4^{-3}-P Değerleri

Mikroalglerin gelişimi için gerekli olan diğer bir element fosfattır. Arıtılmış sızıntı suyu içerisinde fosfat konsantrasyonu oldukça düşüktür. Bu sebeple mikroalg kültürü içerisine fosfat kaynağı olarak belirlenen konsantrasyonlarda K_2HPO_4 kimyasalı eklenmiştir. Şekil 4.4'te zamana bağlı olarak belirlenen PO_4^{-3}-P konsantrasyonlarındaki değişim verilmiştir.



Şekil 4.4 Kültivasyon süresi boyunca mikroalg kültürlerindeki PO_4^{-3}-P değerlerinin değişimi

Mikroalgal kültür içerisindeki PO_4^{-3}-P konsantrasyonlarının değişimi incelendiğinde, en hızlı azalma %25 oranında hazırlanan arıtılmış sızıntı suyu ile gerçekleşmiştir. %25'lik atırılmış sızıntı suyunda başlangıçta 43 mg/L olan fosfat konsantrasyonu 12. günün sonunda 2.1 mg/L'ye kadar düşmüştür. Giderim verimi %95 olarak hesaplanmıştır. Kültivasyon süresi boyunca yaklaşık 3.40 mg/L gün PO_4^{-3}-P giderimi gerçekleşmiştir. %50'lik arıtılmış sızıntı suyunda ise PO_4^{-3}-P giderim hızı 5.14 mg/L gün olarak

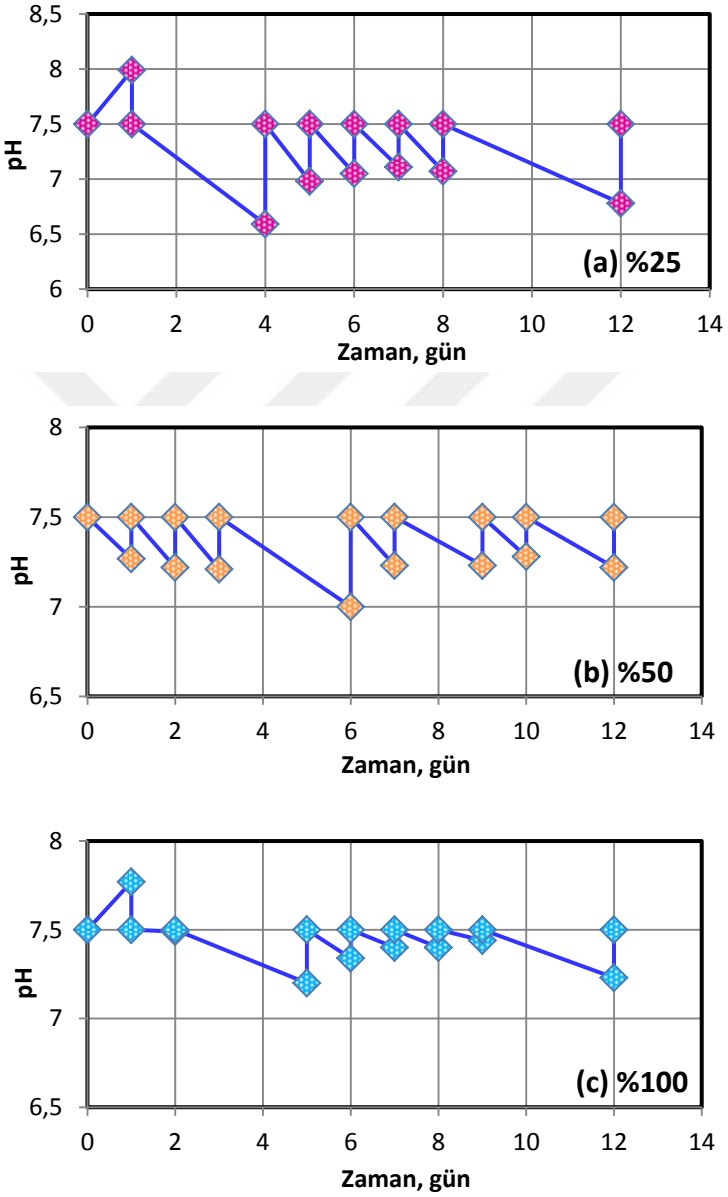
hesaplanmıştır. Fakat %50'lik arıtılmış sızıntı suyunda PO_4^{-3}-P giderim verimi yaklaşık %47'dir. Seyreltilmemiş atıksu ile yapılan çalışmada ise PO_4^{-3}-P giderimi ihmal edilecek kadar azdır. Bu durumun temel sebebi, yüksek besin maddesi konsantrasyonlarının mikroalgal büyümeyi yavaşlatması olarak ifade edilebilir.

Aslan ve Kapdan [134] sentetik atıksu ile yaptıkları çalışmada *Chlorella vulgaris* türünün 7.7 mg/L PO_4^{-3}-P konsantrasyonlarının altında besin maddesi gideriminde etkili olduğunu rapor etmiştir. Ayrıca, Aslan ve Kapdan [134] fosfat giderim veriminin kültür ortamına, başlangıç besin maddesi konsantrasyonuna, ışık yoğunluğuna, azot/fosfor oranına, karanlık/aydınlık döngüsüne ve algal türe göre değişiklik gösterdiğini ifade etmiştir.

Rasoul-Amini vd. [135] *Chlorella sp.* türünü kullanarak evsel atıksu arıtma tesisi ikincil arıtım çıkışından aldıkları atıksuda PO_4^{-3}-P giderimi çalışmaları gerçekleştirmiştir. Yaptıkları çalışmada başlangıç PO_4^{-3}-P konsantrasyonu 19.11 mg/L iken 14. günün sonunda 3.37 mg/L'ye düşerek %82 giderim verimi elde etmişlerdir [135]. Lim vd. [136] *Chlorella vulgaris* türü ile yaptığı çalışmada tekstil atıksuyundan PO_4^{-3}-P giderim verimini araştırmıştır. 12 günlük kesikli kültivasyon çalışması sonunda PO_4^{-3}-P konsantrasyonu 7.14 mg/L'den 4.76 mg/L'ye düşmüştür ve %33 oranında bir giderim verimi sağlanmıştır [136]. Ayrıca Lim vd. tekstil atıksuyunu sentetik Bold's Basal besin ortamı ile desteklemiştir. Bu çalışmada, başlangıç PO_4^{-3}-P konsantrasyonu 96.07 mg/L'den 12. günün sonunda 64.23 mg/L'ye düşerek, %33 giderim verimi elde etmişlerdir [136]. Gonzalez vd. [137] hayvancılık endüstrisi atıksuyu ikincil arıtım prosesinden alınan suda *Chlorella vulgaris* türünü kullanarak PO_4^{-3}-P giderim çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre başlangıç 112 mg/L PO_4^{-3}-P konsantrasyonunda %20-55 giderim verimi elde etmişlerdir [137]. Kong vd. [138] *Chlamydomonas reinhardtii* türünü kullanarak sentetik besin ortamından PO_4^{-3}-P giderimi çalışmaları gerçekleştirmiştir. Yaptıkları çalışmada 120 mg/L başlangıç PO_4^{-3}-P konsantrasyonunda %14 giderim verimi elde etmişlerdir [138]. Ruiz-Marin vd. [139] *Scenedesmus obliquus* türü ile evsel atıksu kullanarak yaptığı çalışmalarda %18-64 PO_4^{-3}-P giderim verimi elde etmiştir.

4.1.5 pH Değerleri

pH mikroalglerin gelişimini etkileyen en önemli parametrelerden bir tanesidir. pH mikroalgal kültür ortamındaki azot çeşidine ve konsantrasyonuna göre değişiklik göstermektedir. Şekil 4.5'te farklı oranlarda arıtılmış sızıntı suları ile yapılan çalışmalardaki pH değişimi verilmiştir.



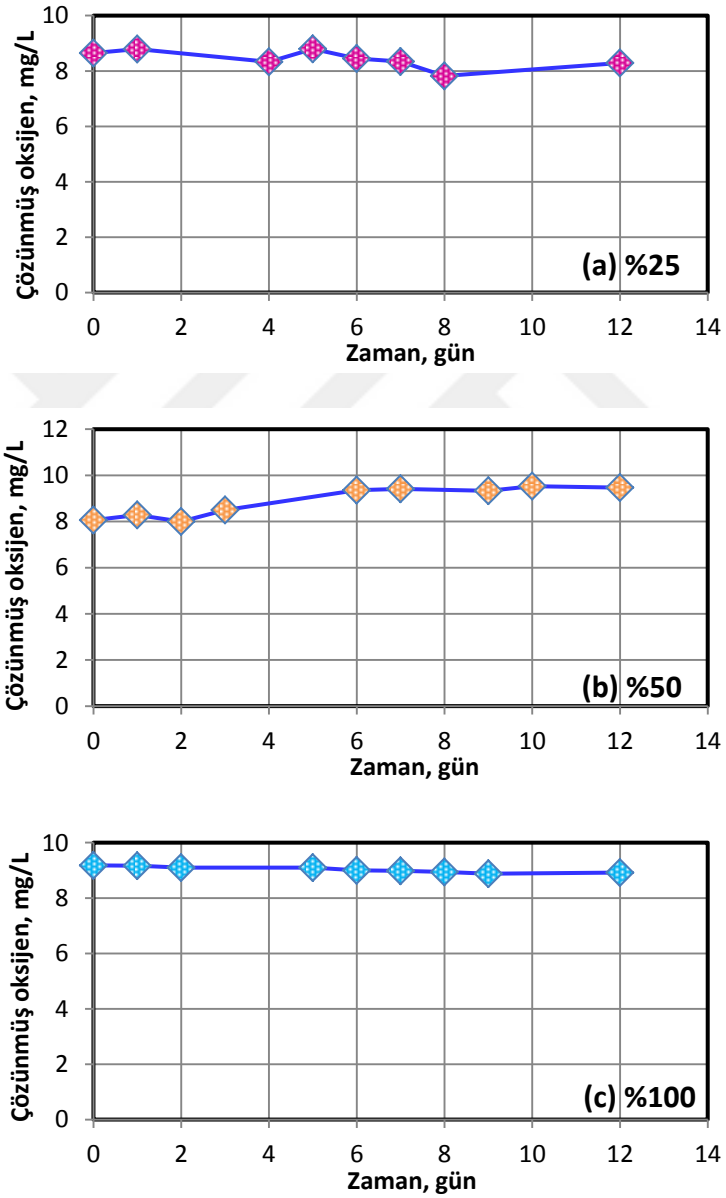
Şekil 4.5 Kültivasyon süresi boyunca mikroalg kültürlerindeki pH değerlerinin değişimi

Kültivasyon çalışmalarında pH belirli aralıklarla 7.5'a ayarlanmıştır. Bütün deney setlerinde pH'ın azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Bu durumun temel sebebi kültür ortamı içerisinde azot kaynağı olarak NH_4^+-N bulunmasıdır. Mikroalgal kültür

ortamı içerisinde NH_4^+-N bulunması durumunda pH azalma eğilimindedir [2]. Kim vd. [133] yaptıkları çalışamada benzer şekilde amonyumun azot kaynağı olarak kullanılması sebebiyle pH'ın 3'lere kadar düştüğünü rapor etmişlerdir.

4.1.6 Çözünmüş Oksijen Değerleri

Şekil 4.6'da kültivasyon süresi boyunca mikroalgal kültür ortamlarındaki çözünmüş oksijen değerleri verilmiştir.

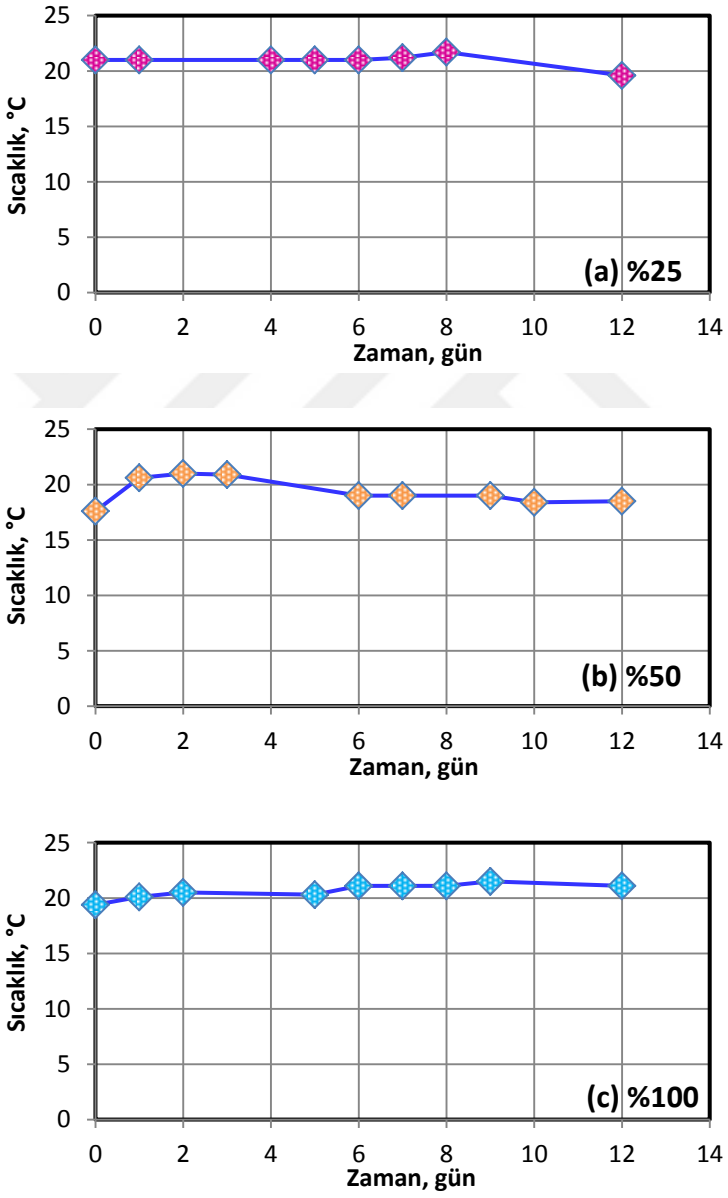


Şekil 4.6 Kültivasyon süresi boyunca mikroalg kültürlerindeki çözünmüş oksijen değerlerinin değişimi

Mikroalgal büyüme için optimal çözünmüş oksijen konsantrasyonu 7-9 mg/L arasında olmalıdır. Çözünmüş oksijen değerleri incelendiğinde, bütün deney setlerindeki çözünmüş oksijen konsantrasyonlarının 8-9.5 arasında olduğu görülmektedir.

4.1.7 Sıcaklık Değerleri

Deneysel çalışmalarda kültivasyon süresi boyunca değişen sıcaklık değerleri Şekil 4.7'de verilmiştir.

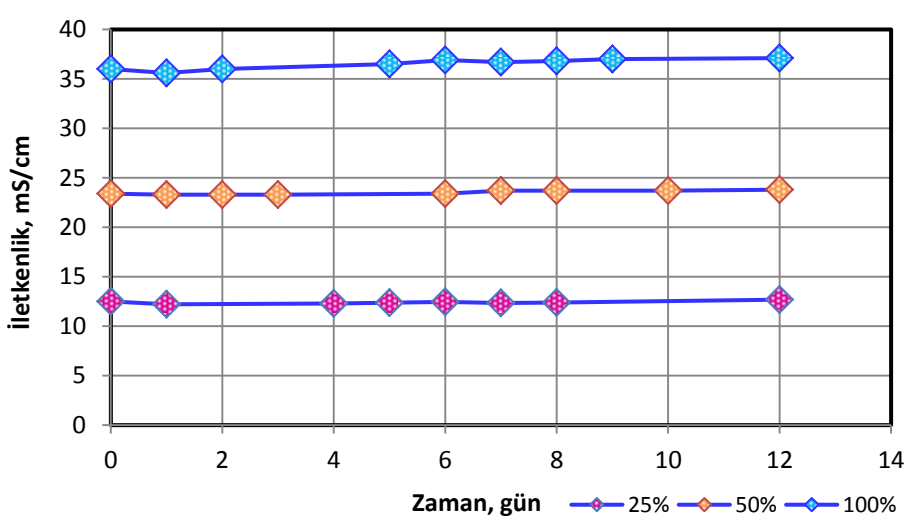


Şekil 4.7 Kültivasyon süresi boyunca mikroalg kültürlerindeki sıcaklık değerlerinin değişimi

Mikroalgal gelişimi etkileyen diğer bir önemli parametre kültür ortamının sıcaklığıdır [91]. Birçok mikroalg türünün gelişimi için gerekli sıcaklık aralığı 15-25 °C arasındadır [140]. Farklı oranlarda arıtılmış atıksu ile yapılan çalışmadaki sıcaklık değerleri incelendiğinde, sıcaklıkların genel olarak 18.5-22 °C arasında değiştiği görülmektedir. Bu sıcaklık değerleri mikroalglerin gelişimi için uygundur.

4.1.8 İletkenlik Değerleri

İletkenlik su içerisindeki iyonlardan kaynaklanmaktadır. Şekil 4.8'de farklı oranlarda arıtılmış sızıntı suları ile yapılan kültivasyon çalımasında, mikroalgal kültür ortamlarının iletkenlik değerleri verilmiştir.



Şekil 4.8 Kültivasyon süresi boyunca mikroalg kültürlerindeki iletkenlik değerlerinin değişimi

İletkenlik değerleri incelendiğinde arıtılmış atıksu oranı arttıkça mikroalgal kültür ortamının iletkenlik değerlerinin arttığı görülmektedir. Kültivasyon süresi boyunca bütün çalışmalarda iletkenlik değerlerinde önemli bir değişimin olmadığı görülmektedir.

4.2 Mikroalglerin CO_2 Kullanım Miktarı

Mikroalglerin en önemli avantajlarından bir tanesi de CO_2'i bünyelerine alarak kullanabilmeleridir [30]. Literatürde *Chlorella sp.* ve *Canarium littorale* gibi mikroalg türlerinin CO_2 kullanma oranlarının oldukça yüksek olduğu (>1 g/L gün) rapor edilmiştir

[30]. Çizelge 4.2'de bu çalışmada farklı oranlarda (%25, %50, %100) arıtılmış sızıntı suyu ile gerçekleştirilen mikroalg kültivasyon çalışmalarında mikroalglerin CO_2 kullanım miktarları verilmiştir.

Çizelge 4.2 Mikroalglerin $C0_2$ kullanım miktarları

Oran	R_{CO2}, g/L gün
%25	0.191
%50	0.091
%100	0.006

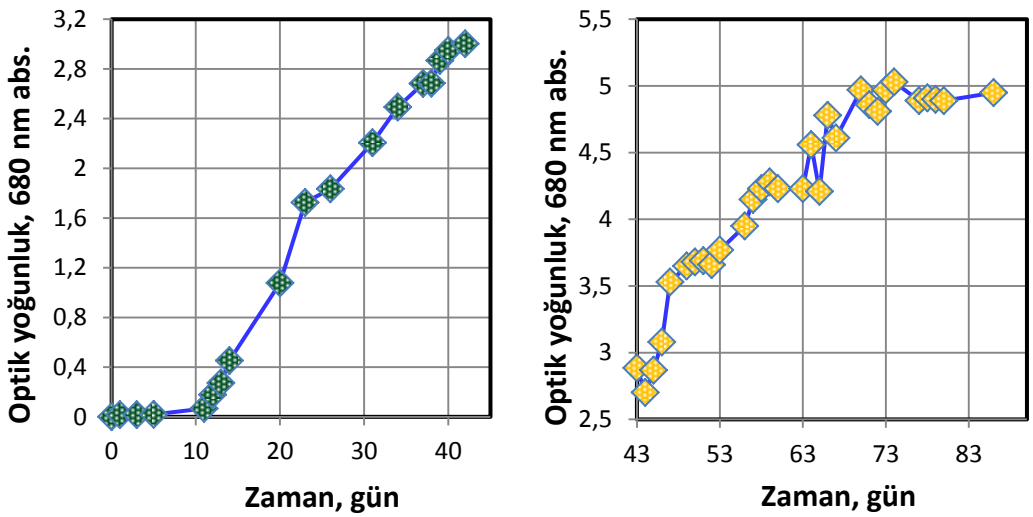
CO_2 kullanım miktarları incelendiğinde, mikroalgal biyokütle üretim miktarlarına bağlı olarak değiştiği görülmektedir.

4.3 86 Günlük Mikroalg Kültivasyon Çalışması

Bu çalışmada, uzun süreli mikroalg kültivasyonu gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında mikroalgal kültür oramında besin kaynağı olarak sentetik Bold's Basal besin ortamı kullanılmıştır. Sentetik besin ortamı kullanarak mikroalglerin daha hızlı bir şekilde büyümesi ve inhibisyon etkisinin minimuma indirilmesi amaçlanmıştır. Sentetik besin ortamı ile mikroalg kültivasyonu 42 gün devam etmiştir. Daha sonra fotobiyoreaktöre %10 oranında hazırlanmış arıtılmış sızıntı suyu ilave edilmiştir. Bu çalışmada 44 gün devam etmiştir ve 86. günün sonunda üretilen mikroalgal biyokütle fotobiyoreaktörden alınmıştır. 86 günlük çalışma süresi boyunca belirli zaman aralıklarıyla mikroalg kültür ortamının optik yoğunluk, kuru ağırlık, NH_4^+-N ve NO_3^--N, PO_4^{-3}-P değerleri analiz edilmiştir. Ayrıca, kültür ortamının pH, çözünmüş oksijen, sıcaklık ve iletkenlik değerleri belirli aralıklarla ölçülmüştür.

4.3.1 Optik Yoğunluk Değerleri

Şekil 4.9'da mikroalglerin kültivasyonu boyunca kültür ortamının optik yoğunluk değerleri verilmiştir.

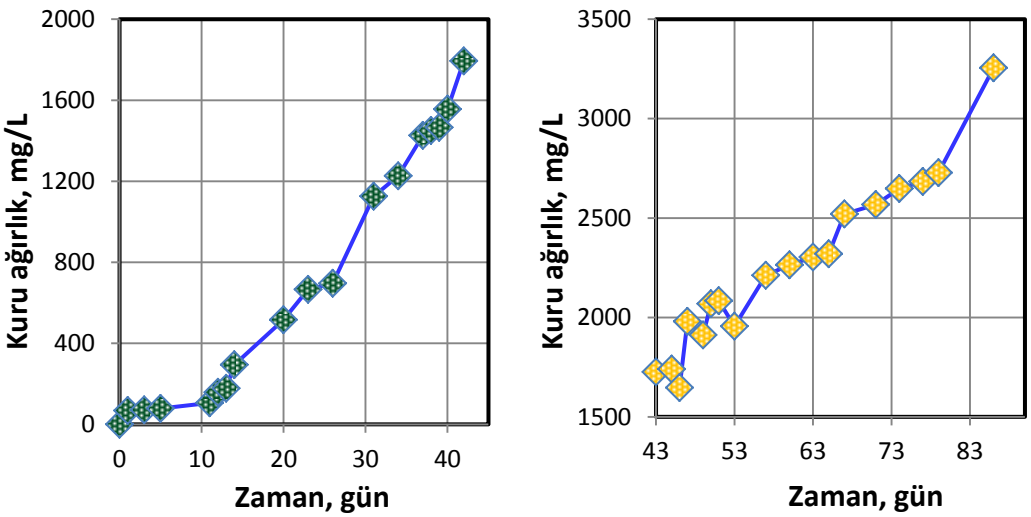


Şekil 4.9 86 günlük kültivasyon süresi boyunca mikroalg kültürlerindeki optik yoğunluk değerlerinin değişimi (solda: BBM besin ortamı, sağda: %10 oranında hazırlanmış sızıntı suyu)

Sentetik besin ortamı kullanılarak gerçekleştirilen ilk 42 günlük periyotta, kültivasyonun ilk 10 günü içerisinde mikroalglerin adaptasyon fazında olduğu görülmektedir. Daha sonra mikroalgal büyüme logaritmik büyüme fazında gerçekleşerek 42. güne kadar artarak devam etmiştir. 43. günden itibaren %10 oranında hazırlanmış arıtılmış sızıntı suyu ile mikroalg kültivasyon işlemine devam edilmiştir. Arıtılmış sızıntı suyu ile yapılan çalışmada optik yoğunluk değerleri 70. güne kadar logaritmik büyüme fazında artarak devam etmiştir. Optik yoğunluk değerlerine göre 70-86 günler arasında mikroalgal büyüme durgunluk evresine girmiştir.

4.3.2 Kuru Ağırlık Değerleri

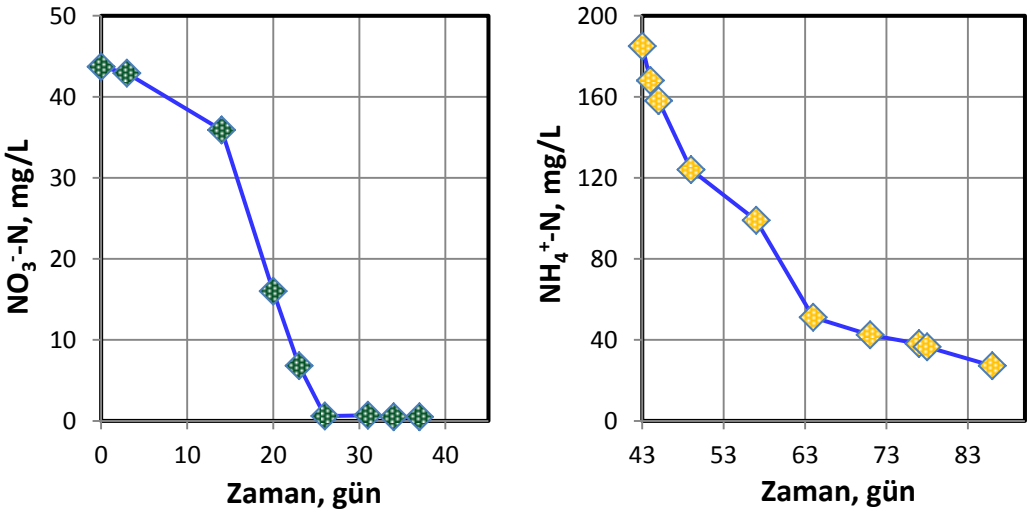
Optik yoğunluk ve kuru ağırlık değerleri arasında bir ilişki vardır. Mikroalgal büyüme bu parametreler göz önünde bulundurularak izlenebilmektedir. Şekil 4.10'da kültivasyon süresince mikroalgal biyokütlenin kuru ağırlık değerlerindeki değişim verilmiştir. Sentetik besin ortamı ile gerçekleştirilen çalışmada, mikroalglerin gelişimi ilk 10 gün boyunca durağan devam etmiştir. Bu aşamada mikroalgler adaptasyon fazındadır. Daha sonra optik yoğunluk değerlerinde olduğu gibi biyokütle ağırlığı artarak devam etmiştir. Arıtılmış sızıntı suyu ile gerçekleştirilen kültivasyon çalışmasında ise benzer şekilde biyokütle miktarı zamanla artmıştır.



Şekil 4.10 86 günlük kültivasyon süresi boyunca mikroalg kültürlerindeki kuru ağırlık değerlerinin değişimi (solda: BBM besin ortamı, sağda: %10 oranında hazırlanmış sızıntı suyu)

4.3.3 NO_3^--N ve NH_4^+-N Değerleri

Çalışmanın ilk 42 günlük bölümünde azot kaynağı olarak NO_3^- kullanılmıştır. Daha sonra azott kaynağı olarak %10 oranında hazırlanan atıksu içerisindeki NH_4^+ kullanılmıştır. Kültür ortamları içerisindeki azot miktarlarının değişimi Şekil 4.11'de verilmiştir.



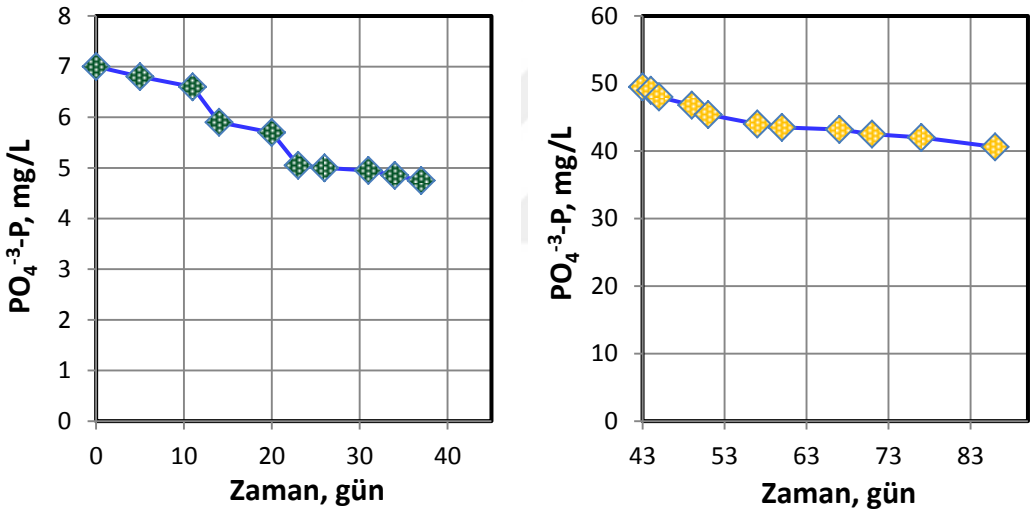
Şekil 4.11 86 günlük kültivasyon süresi boyunca mikroalg kültürlerindeki azot konsantrasyonlarının değişimi (solda: BBM besin ortamı, sağda: %10 oranında hazırlanmış sızıntı suyu)

Bold's Basal besin ortamı içeriğinde belirtilen NO_3^--N konsantrasyonu 43.7 mg/L olarak analiz edilmiştir. Mikroalgal kültür içerisindeki NO_3^--N azalma eğilimini incelediğimizde,

26. günün sonunda %98.6 NO_3^--N giderimi sağlandığı görülmektedir. Bu süre içerisindeki NO_3^--N giderim hızı 1.65 mg/L gün olarak hesaplanmıştır. Arıtılmış sızıntı suyu ile gerçekleştirilen çalışmayı incelediğimizde, başlangıçta 185 mg/L olan NH_4^+-N konsantrasyonu 86. günün sonunda 27.2 mg/L'ye düşmüştür. Bu süre içerisinde NH_4^+-N giderim hızı 3.66 mg/L gün olarak hesaplanmıştır. Park vd. [131] *Scenedesmus sp.* türü ile gerçekleştirdiği çalışmada hayvancılık atıklarının anaerobik çürütücü çıkışından aldığı atıksu ile NH_4^+-N giderimini araştırmıştır. Çalışmada en yüksek NH_4^+-N giderim hızını 1.5 g/L mikroalg kültürü ile 6.46 mg/L gün olarak hesaplamışlardır [131].

4.3.4 PO_4^{-3}-P Değerleri

Şekil 4.12'de mikroalgal külür ortamlarındaki PO_4^{-3}-P konsantrasyonlarının değişimi verilmiştir.



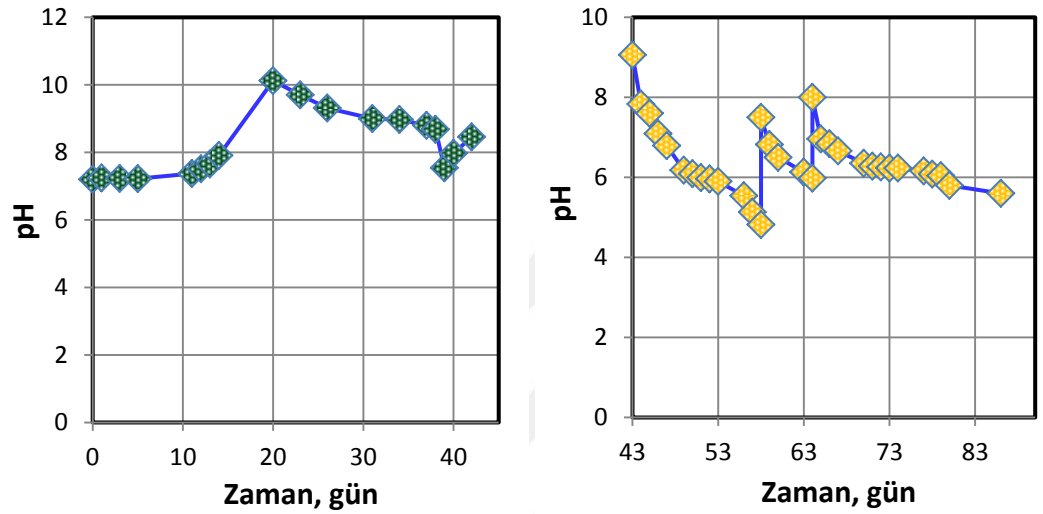
Şekil 4.12 86 günlük kültivasyon süresi boyunca mikroalg kültürlerindeki PO_4^{-3}-P konsantrasyonlarının değişimi (solda: BBM besin ortamı, sağda: %10 oranında hazırlanmış sızıntı suyu)

Sentetik besin ortamındaki PO_4^{-3}-P konsantrasyonlarının değişimi incelendiğinde, başlangıçta 7 mg/L olan fosfat konsantrasyonu 37. günün sonunda 4.75 mg/L'ye düşmüştür. Bu süre içinde fosfat giderim hızı 0.06 mg/L gün olarak hesaplanmıştır. Literatürde, *Chlorella sorokiniana* türü için fosfat giderim hızı 1.39-1.42 mg/L gün olarak verilmiştir [133]. Arıtılmış sızıntı suyu ile gerçekleştirilen çalışma incelendiğinde, kültivasyon süresi boyunca PO_4^{-3}-P konsantrasyonunun 49.5 mg/L'den 40.6 mg/L'ye düştüğü görülmektedir. Bu çalışmada PO_4^{-3}-P giderim hızı 0.20 mg/L gün olarak

hesaplanmıştır. PO_4^{-3}-P giderim hızlarındaki bu farklılık mikroalgal türe, kültür şartlarına ve besin maddesi türüne göre değişiklik gösterebilmektedir.

4.3.5 pH Değerleri

Şekil 4.13'de kültivasyon süresi boyunca mikroalgal kültür ortamının pH değerlerinin değişimi verilmiştir.



Şekil 4.13 86 günlük kültivasyon süresi boyunca mikroalg kültür ortamındaki pH'ın değişimi (solda: BBM besin ortamı, sağda: %10 oranında hazırlanmış sızıntı suyu)

Literatürde, kültür ortamının pH değerinin mikroalglerin besin maddesi kullanımı ile doğrudan ilişkili olduğu rapor edilmiştir [2]. Mikroalglerin CO_2 ve nitratı kullanması durumunda pH'ın yükseleceği, amonyumu kullanması durumunda pH'ın düşeceği ifade edilmiştir [2].

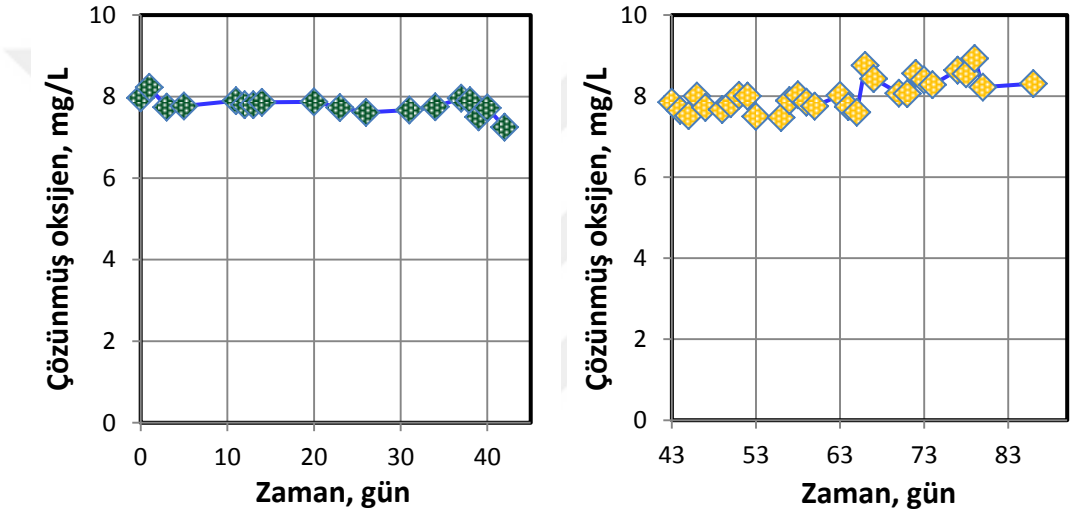
Sentetik besin ortamı ile yapılan çalışmadaki pH değerleri incelendiğinde, ph 7.1'den 20. güne kadar artarak 10.1 değerlerine ulaştığı görülmektedir. Bu artışın temel sebebi, kültür ortamı içerisinde azot kaynağı olarak nitratın kullanılmasıdır. Kültür ortamı içerisinde NO_3^--N konsantrasyonu 26. günde 0.6 mg/L'ye kadar düşmüştür. Bu süreden sonra ortamda nitrat konsantrasyonunun azalması sebebiyle ortamın pH'ı da azalma eğilimine girmiştir ve 42. günün sonunda pH 8.4 değerlerine düşmüştür.

Arıtılmış sızıntı suyu ile yapılan çalışmada azot kaynağı olarak amonyum kullanıldığı için pH sürekli azalma eğilimdedir. Başlangıçta (43. gün) pH değeri 9 iken 58. günde 4.8'e kadar düşmüştür. 58. günde mikroalgal gelişimin yavaşlamaması için pH değeri 0.1 N

NaOH kullanılarak 7.5'e ayarlanmıştır. 64. günde pH değerinin 5.9'a düşmesi sebebiyle mikroalgal kültür ortamına tekrar 0.1 N NaOH ilave edilerek pH 8'e ayarlanmıştır. Literatürde birçok mikroalg türünün gelişimi için optimum pH aralığı 6-9 olarak ifade edilmiştir. 64. günden sonra pH azalması devam etmiştir ve 86. günün sonunda pH 5.6 olarak ölçülmüştür.

4.3.6 Çözünmüş Oksijen Değerleri

Şekil 4.14'te mikroalgal kültür ortamında zamana bağlı olarak çözünmüş oksijen konsantrasyonunun değişimi verilmiştir.

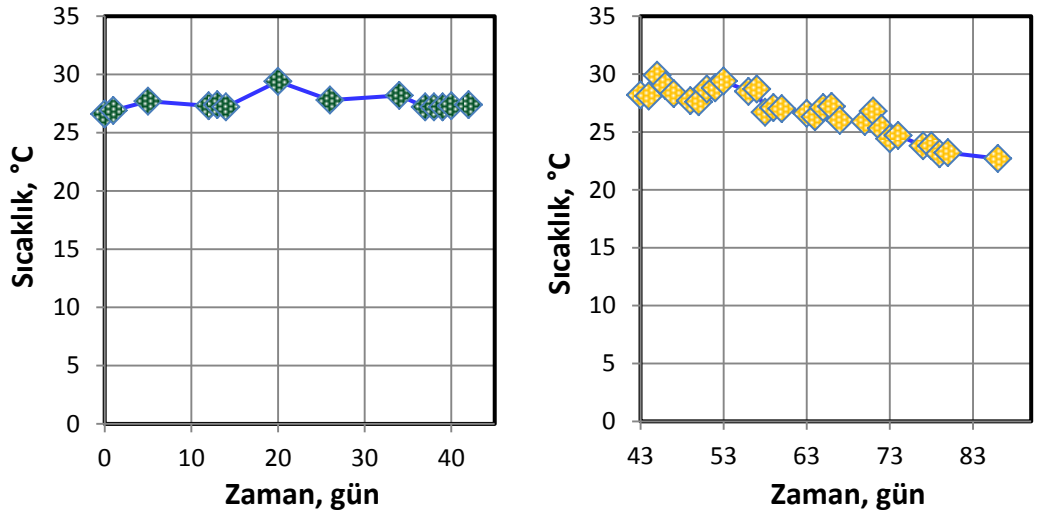


Şekil 4.14 86 günlük kültivasyon süresi boyunca mikroalg kültür ortamındaki çözünmüş oksijen konsantrasyonunun değişimi (solda: BBM besin ortamı, sağda: %10 oranında hazırlanmış sızıntı suyu)

Mikroalgal gelişim için çözünmüş oksijen konsantrasyonu 7-9 mg/L arasında olmalıdır. Çözünmüş oksijen değerleri incelendiğinde her iki çalışmada (BBM besin ortamı ve arıtılmış sızıntı suyu kullanımı) da çözünmüş oksijen konsantrasyonları 7-9 mg/L arasındadır ve mikroalgal gelişim için uygun aralıktadır.

4.3.7 Sıcaklık Değerleri

Şekil 4.15'te mikroalg kültivasyon süresi boyunca sıcaklık değerlerinin değişimi verilmiştir. Sentetik besin ortamı kullanılarak gerçekleştirilen mikroalg kültivasyon çalışmasında sıcaklık değerleri 25-30 °C arasında oldukça stabil devam etmiştir.

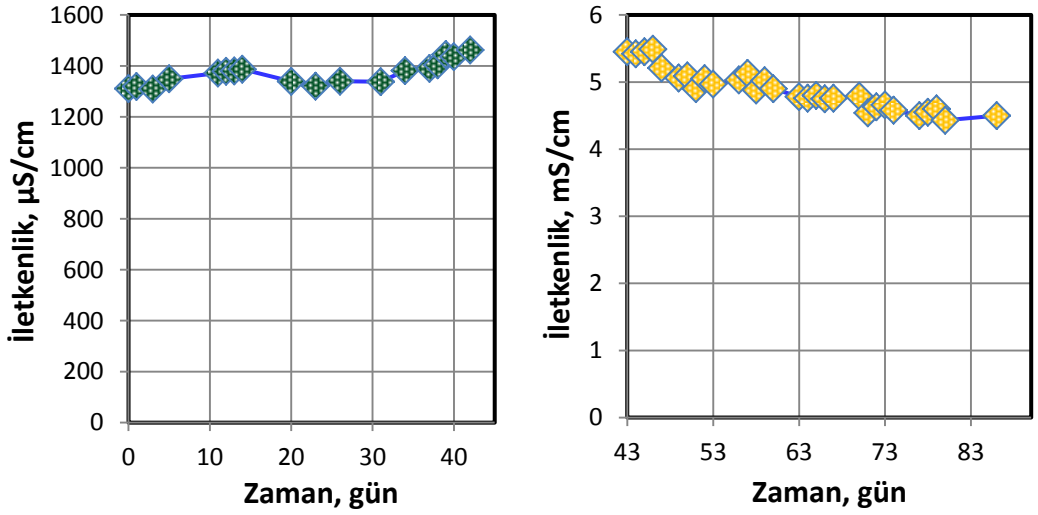


Şekil 4.15 86 günlük kültivasyon süresi boyunca mikroalg kültür ortamındaki sıcaklık değerinin değişimi (solda: BBM besin ortamı, sağda: %10 oranında hazırlanmış sızıntı suyu)

Arıtılmış sızıntı suyu ile yapılan çalışmada ise sıcaklık değerleri 22-30°C arasında sürekli düşme eğiliminde devam etmiştir. Rashid vd. [2] yüksek lipit üretim verimi için *Chlorella vulgaris* türünün 30 °C'de yetiştirilmesi gerektiğini ifade etmiştir.

4.3.8 İletkenlik Değerleri

Şekil 4.16'da kültür ortamlarının zamana bağlı olarak değişen iletkenlik değerleri verilmiştir.



Şekil 4.16 86 günlük kültivasyon süresi boyunca mikroalg kültür ortamındaki iletkenlik değerinin değişimi (solda: BBM besin ortamı, sağda: %10 oranında hazırlanmış sızıntı suyu)

Sentetik besin ortamı ile yapılan çalışmada iletkenlik değerleri 1311-1436 µS/cm arasında ölçülmüştür. Arıtılmış sızıntı suyu ile yapılan çalışmada ise iletkenlik değerleri sentetik besin ortamına göre oldukça yüksektir. Başlangıçta 5.45 mS/cm olarak ölçülen iletkenlik 86. günün sonuna kadar azalarak 4.5 mS/cm'e düşmüştür.

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada arıtılmış çöp sızıntı suyunun mikroalg kültivasyonunda besin maddesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Mikroalgal kültür düz plaka fotobiyoreaktör kullanılarak yetiştirilmiştir. Ayrıca, mikroalglerin atıksudan besin maddesi giderim potansiyelleri incelenmiştir. Farklı oranlarda çöp sızıntı suyu kullanılarak gerçekleştirilen çalışmanın sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

12 günlük %25, %50 ve %100 oranlarında hazırlanan arıtılmış çöp sızıntı suyu ile yapılan çalışmada;

- En iyi mikroalg gelişimi optik yoğunluk değerlerine göre %25 oranında hazırlanan atıksu ile gerçekleşmiştir. Çalışma sonunda, %25, %50 ve %100 oranlarında hazırlanan arıtılmış çöp sızıntı suları ile yetiştirilen mikroalgal kültürlerin optik yoğunluk değerleri sırasıyla 1.278 abs, 1.192 abs ve 0.236 olarak ölçülmüştür.
- %25, %50 ve %100 oranlarında hazırlanan arıtılmış çöp sızıntı suları ile yetiştirilen mikroalg hücrelerinin sırasıyla spesifik büyüme hızları 0.095 gün $^{-1}$, 0.070 gün $^{-1}$, 0.019 gün $^{-1}$, ikilenme süreleri 7.29 gün, 9.90 gün ve 36.47 gün, CO_2 kullanım miktarları 0.191 g/L gün, 0.091 g/L gün ve 0.006 g/L gün olarak hesaplanmıştır.
- %25, %50 ve %100 oranlarında hazırlanan arıtılmış çöp sızıntı suları ile gerçekleştirilen çalışmalarda sırasıyla NH_4^+-N giderim verimleri %28, %75 ve %8.5, PO_4^{-3}-P giderim verimleri %95, %47 ve %2.5 olarak belirlenmiştir.

86 günlük Bold's Basal sentetik besin ortamı ve %10 oranında hazırlanmış arıtılmış sızıntı suyu ile yapılan kültivasyon çalışmasında;

- Sentetik besin ortamında 42 günlük kültivasyon süresi sonunda optik yoğunluk değeri 3.00 abs olarak, daha sonraki %10 oramında arıtılmış atıksu ile yapılan çalışmada 86. günün sonunda optik yoğunluk değeri 4.94 abs olarak ölçülmüştür. Kuru ağrılık değerleri 42. günün sonunda 1.74 g/L, 86. günün sonunda 3.25 g/L olarak analiz edilmiştir.
- Azot giderim verimleri, sentetik besin ortamında NO_3^--N kullanılarak yapılan çalışmada 26. günün sonunda %98.85 ve NO_3^--N giderim hızı 1.65 mg/L gün, arıtılmış sızıntı suyu ile NH_4^+-N kullanılarak yapılan çalışmada %85.29 ve NH_4^+-N giderim hızı 3.66 mg/L gün olarak hesaplanmıştır.
- Fosfor giderim verimleri, sentetik besin ortamında 37. günün sonunda PO_4^{-3}-P giderim verimi %32.14 ve fosfat giderim hızı 0.06 mg/L gün, arıtılmış atıksu ile yapılan çalışamda PO_4^{-3}-P giderim verimi %17.94 ve PO_4^{-3}-P giderim hızı 0.20 mg/L gün olarak belirlenmiştir.

Deneysel çalışmalar neticesinde arıtılmış çöp sızıntı suyunun mikroalg kültivasyonu için kullanılabilirliğinin uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Gerçekleştirilen kültivasyon çalışmaları sonuçları aşağıda değerlendirilmiştir;

- Mikroalgal kültür ortamında yüksek konsantrasyonlarda amonyum bulunması mikroalgal büyümeyi yavaşlatmaktadır. Mikroalglerin atıksu kullanılarak yetiştirilmesi çalışmalarında optimum azot ve fosfor konsantrasyonları belirlenmelidir.
- Yüksek miktarda mikroalgal biyokütle üretimi için kullanılan atıksuya toleranslı mikroalg türleri belirlenmelidir.
- Mikrolgal büyümeyi etkileyen sıcaklık, pH, ışık şiddeti, kültür yoğunluğu gibi parametreler optimize edilmelidir.
- Mikroalgal büyümeyi inhibe eden diğer mikroorganizmaların kültür ortamına kontaminasyonu engellenmelidir.

KAYNAKLAR

[1] Mata, T.M. Martins, A.A. Ve Caetano, N.S., (2010). "Microalgae For Biodiesel Production And Other Applications: A Review", Renewable And Sustainable Energy Reviews, 14: 217-232.

[2] Rashid, N. Ur Rehman, M.S. Sadiq, M. Mahmood, T. Ve Han, J.-I., (2014). "Current Status, İssues And Developments İn Microalgae Derived Biodiesel Production", Renewable And Sustainable Energy Reviews, 40: 760-778.

[3] Brennan, L. Ve Owende, P., (2010). "Biofuels From Microalgae—A Review Of Technologies For Production, Processing, And Extractions Of Biofuels And Co-Products", Renewable And Sustainable Energy Reviews, 14: 557-577.

[4] Baicha, Z. Salar-García, M.J. Ortiz-Martínez, V.M. Hernández-Fernández, F.J. De Los Ríos, A.P. Labjar, N. Lotfi, E. Ve Elmahi, M., "A Critical Review On Microalgae As An Alternative Source For Bioenergy Production: A Promising Low Cost Substrate For Microbial Fuel Cells", Fuel Processing Technology.

[5] Li, Y.Q. Horsman, M. Wang, B. Wu, N. Ve Lan, C.Q., (2008). "Effects Of Nitrogen Sources On Cell Growth And Lipid Accumulation Of Green Alga Neochloris Oleoabundans", Applied Microbiology And Biotechnology, 81: 629-636.

[6] Zhu, L., (2015). "Biorefinery As A Promising Approach To Promote Microalgae İndustry: An İnnovative Framework", Renewable And Sustainable Energy Reviews, 41: 1376-1384.

[7] Chisti, Y., (2007). "Biodiesel From Microalgae", Biotechnology Advances, 25: 294-306.

[8] Spolaore, P. Joannis-Cassan, C. Duran, E. Ve Isambert, A., (2006). "Commercial Applications Of Microalgae", Journal Of Bioscience And Bioengineering, 101: 87-96.

[9] Chisti, Y. Ve Yan, J., (2011). "Energy From Algae: Current Status And Future Trends: Algal Biofuels – A Status Report", Applied Energy, 88: 3277-3279.

[10] Zhu, J. Rong, J. Ve Zong, B., (2013). "Factors İn Mass Cultivation Of Microalgae For Biodiesel", Chinese Journal Of Catalysis, 34: 80-100.

[11] Andersen, R.A., (2005). Algal Culturing Techniques: Academic Press.

[12] Borowitzka, M.A., (1998). Limits To Growth, Ed. Wastewater Treatment With Algae. Springer, 203-226.

[13] Oliver, R. Ve Ganf, G., (2000). Freshwater Blooms In: The Ecology Of Cyanobactria, Their Diversity İn Time And Space. Whitton, BA And M. Potts: Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 149–194.

[14] Cai, T. Park, S.Y. Ve Li, Y., (2013). "Nutrient Recovery From Wastewater Streams By Microalgae: Status And Prospects", Renewable And Sustainable Energy Reviews, 19: 360-369.

[15] Singh, U.B. Ve Ahluwalia, A.S., (2013). "Microalgae: A Promising Tool For Carbon Sequestration", Mitigation And Adaptation Strategies For Global Change, 18: 73-95.

[16] Illman, A.M. Scragg, A.H. Ve Shales, S.W., (2000). "Increase İn Chlorella Strains Calorific Values When Grown İn Low Nitrogen Medium", Enzyme And Microbial Technology, 27: 631-635.

[17] Hsieh, C.-H. Ve Wu, W.-T., (2009). "Cultivation Of Microalgae For Oil Production With A Cultivation Strategy Of Urea Limitation", Bioresource Technology, 100: 3921-3926.

[18] Yeh, K.L. Chang, J.S. Ve Chen, W.M., (2010). "Effect Of Light Supply And Carbon Source On Cell Growth And Cellular Composition Of A Newly İsolated Microalga Chlorella Vulgaris ESP-31", Engineering İn Life Sciences, 10: 201-208.

[19] Fábregas, J. Otero, A. Maseda, A. Ve Domínguez, A., (2001). "Two-Stage Cultures For The Production Of Astaxanthin From Haematococcus Pluvialis", Journal Of Biotechnology, 89: 65-71.

[20] Yokochi, T. Honda, D. Higashihara, T. Ve Nakahara, T., (1998). "Optimization Of Docosahexaenoic Acid Production By Schizochytrium Limacinum SR21", Applied Microbiology And Biotechnology, 49: 72-76.

[21] Zhang, B.Y. Geng, Y.H. Li, Z.K. Hu, H.J. Ve Li, Y.G., (2009). "Production Of Astaxanthin From Haematococcus İn Open Pond By Two-Stage Growth One-Step Process", Aquaculture, 295: 275-281.

[22] Renaud, S.M. Thinh, L.-V. Lambrinidis, G. Ve Parry, D.L., (2002). "Effect Of Temperature On Growth, Chemical Composition And Fatty Acid Composition Of Tropical Australian Microalgae Grown İn Batch Cultures", Aquaculture, 211: 195-214.

[23] Wu, L.F. Chen, P.C. Ve Lee, C.M., (2013). "The Effects Of Nitrogen Sources And Temperature On Cell Growth And Lipid Accumulation Of Microalgae", International Biodeterioration & Biodegradation, 85: 506-510.

[24] Xiong, W. Li, X. Xiang, J. Ve Wu, Q., (2008). "High-Density Fermentation Of Microalga Chlorella Protothecoides İn Bioreactor For Microbio-Diesel Production", Applied Microbiology And Biotechnology, 78: 29-36.

[25] Zhang, W. Wu, H. Ve Zong, M., (2008). "Study On Microbial Oil Production With Chlorella Pyrenoidosa", Microbiology, 6: 855-860.

[26] Scragg, A.H. Illman, A.M. Carden, A. Ve Shales, S.W., (2002). "Growth Of Microalgae With İncreased Calorific Values İn A Tubular Bioreactor", Biomass And Bioenergy, 23: 67-73.

[27] Sakai, N. Sakamoto, Y. Kishimoto, N. Chihara, M. Ve Karube, I., (1995). "Chlorella Strains From Hot Springs Tolerant To High Temperature And High CO2", Energy Conversion And Management, 36: 693-696.

[28] Sanchez, J.F. Fernandez-Sevilla, J.M. Acien, F.G. Ceron, M.C. Perez-Parra, J. Ve Molina-Grima, E., (2008). "Biomass And Lutein Productivity Of Scenedesmus Almeriensis: İnfluence Of İrradiance, Dilution Rate And Temperature", Applied Microbiology And Biotechnology, 79: 719-729.

[29] Ying, K. Gilmour, J. Ve Zimmerman, W.B., (2014). "Effects Of CO2 And Ph On Growth Of The Microalga Dunaliella Salina", Journal Of Microbial & Biochemical Technology, 6: 167-173.

[30] Zeng, X. Danquah, M.K. Chen, X.D. Ve Lu, Y., (2011). "Microalgae Bioengineering: From CO2 Fixation To Biofuel Production", Renewable And Sustainable Energy Reviews, 15: 3252-3260.

[31] Eriksen, N.T., (2008). "The Technology Of Microalgal Culturing", Biotechnology Letters, 30: 1525-1536.

[32] Demirbas, A., (2010). "Use Of Algae As Biofuel Sources", Energy Conversion And Management, 51: 2738-2749.

[33] Bahadar, A. Ve Bilal Khan, M., (2013). "Progress İn Energy From Microalgae: A Review", Renewable And Sustainable Energy Reviews, 27: 128-148.

[34] Benemann, J.R. Tillett, D.M. Ve Weissman, J.C., (1987). "Microalgae Biotechnology", Trends İn Biotechnology, 5: 47-53.

[35] Lee, Y.-K., (1997). "Commercial Production Of Microalgae İn The Asia-Pacific Rim", Journal Of Applied Phycology, 9: 403-411.

[36] Chaumont, D., (1993). "Biotechnology Of Algal Biomass Production: A Review Of Systems For Outdoor Mass Culture", Journal Of Applied Phycology, 5: 593-604.

[37] Shen, Y. Yuan, W. Pei, Z. Wu, Q. Ve Mao, E., (2009). "Microalgae Mass Production Methods", Transactions Of The ASABE, 52: 1275-1287.

[38] Richmond, A. Boussiba, S. Vonshak, A. Ve Kopel, R., (1993). "A New Tubular Reactor For Mass Production Of Microalgae Outdoors", Journal Of Applied Phycology, 5: 327-332.

[39] Borowitzka, M.A., (1999). Commercial Production Of Microalgae: Ponds, Tanks, And Fermenters, J.T.J.G.B. R. Osinga Ve Wijffels, R.H., Ed. Progress İn Industrial Microbiology. Elsevier, 313-321.

[40] Moheimani, N.R. Ve Borowitzka, M.A., (2006). "The Long-Term Culture Of The Coccolithophore Pleurochrysis Carterae (Haptophyta) İn Outdoor Raceway Ponds", Journal Of Applied Phycology, 18: 703-712.

[41] Lee, Y.-K., (2001). "Microalgal Mass Culture Systems And Methods: Their Limitation And Potential", Journal Of Applied Phycology, 13: 307-315.

[42] Rawat, I. Ranjith Kumar, R. Mutanda, T. Ve Bux, F., (2013). "Biodiesel From Microalgae: A Critical Evaluation From Laboratory To Large Scale Production", Applied Energy, 103: 444-467.

[43] Pirt, S., (1983). "Maximum Photosynthetic Efficiency: A Problem To Be Resolved", Biotechnology And Bioengineering, 25: 1915-1922.

[44] James, C.M. Ve Al-Khars, A.M., (1990). "An İntensive Continuous Culture System Using Tubular Photobioreactors For Producing Microalgae", Aquaculture, 87: 381-393.

[45] Acién Fernández, F.G. Hall, D.O. Cañizares Guerrero, E. Krishna Rao, K. Ve Molina Grima, E., (2003). "Outdoor Production Of Phaeodactylum Tricornutum Biomass İn A Helical Reactor", Journal Of Biotechnology, 103: 137-152.

[46] Ugwu, C.U. Aoyagi, H. Ve Uchiyama, H., (2008). "Photobioreactors For Mass Cultivation Of Algae", Bioresource Technology, 99: 4021-4028.

[47] Huntley, M.E. Ve Redalje, D.G., (2007). "CO2 Mitigation And Renewable Oil From Photosynthetic Microbes: A New Appraisal", Mitigation And Adaptation Strategies For Global Change, 12: 573-608.

[48] Fernández, F.A. Sevilla, J.F. Pérez, J.S. Grima, E.M. Ve Chisti, Y., (2001). "Airlift-Driven External-Loop Tubular Photobioreactors For Outdoor Production Of Microalgae: Assessment Of Design And Performance", Chemical Engineering Science, 56: 2721-2732.

[49] Hall, D.O. Acién Fernández, F. Guerrero, E.C. Rao, K.K. Ve Grima, E.M., (2003). "Outdoor Helical Tubular Photobioreactors For Microalgal Production: Modeling Of Fluid‐Dynamics And Mass Transfer And Assessment Of Biomass Productivity", Biotechnology And Bioengineering, 82: 62-73.

[50] Kaewpintong, K. Shotipruk, A. Powtongsook, S. Ve Pavasant, P., (2007). "Photoautotrophic High-Density Cultivation Of Vegetative Cells Of Haematococcus Pluvialis İn Airlift Bioreactor", Bioresource Technology, 98: 288-295.

[51] Krichnavaruk, S. Powtongsook, S. Ve Pavasant, P., (2007). "Enhanced Productivity Of Chaetoceros Calcitrans İn Airlift Photobioreactors", Bioresource Technology, 98: 2123-2130.

[52] Rubio, F.C. Fernandez, F. Perez, J. Camacho, F.G. Ve Grima, E.M., (1999). "Prediction Of Dissolved Oxygen And Carbon Dioxide Concentration Profiles İn Tubular Photobioreactors For Microalgal Culture", Biotechnology And Bioengineering, 62: 71-86.

[53] Barbosa, M.J. Zijffers, J.W. Nisworo, A. Vaes, W. Van Schoonhoven, J. Ve Wijffels, R.H., (2005). "Optimization Of Biomass, Vitamins, And Carotenoid Yield On Light Energy İn A Flat‐Panel Reactor Using The A‐Stat Technique", Biotechnology And Bioengineering, 89: 233-242.

[54] Meiser, A. Schmid-Staiger, U. Ve Trösch, W., (2004). "Optimization Of Eicosapentaenoic Acid Production Byphaeodactylum Tricornutumin The Flat Panel Airlift (FPA) Reactor", Journal Of Applied Phycology, 16: 215-225.

[55] Richmond, A. Ve Cheng-Wu, Z., (2001). "Optimization Of A Flat Plate Glass Reactor For Mass Production Of Nannochloropsis Sp. Outdoors", Journal Of Biotechnology, 85: 259-269.

[56] Harun, R. Singh, M. Forde, G.M. Ve Danquah, M.K., (2010). "Bioprocess Engineering Of Microalgae To Produce A Variety Of Consumer Products", Renewable And Sustainable Energy Reviews, 14: 1037-1047.

[57] Abdel-Raouf, N. Al-Homaidan, A.A. Ve Ibraheem, I.B.M., (2012). "Microalgae And Wastewater Treatment", Saudi Journal Of Biological Sciences, 19: 257-275.

[58] Cheah, W.Y. Ling, T.C. Show, P.L. Juan, J.C. Chang, J.-S. Ve Lee, D.-J., (2016). "Cultivation İn Wastewaters For Energy: A Microalgae Platform", Applied Energy, 179: 609-625.

[59] Nascimento, I.A. Marques, S.S.I. Cabanelas, I.T.D. Pereira, S.A. Druzian, J.I. De Souza, C.O. Vich, D.V. De Carvalho, G.C. Ve Nascimento, M.A., (2013). "Screening Microalgae Strains For Biodiesel Production: Lipid Productivity And Estimation Of Fuel Quality Based On Fatty Acids Profiles As Selective Criteria", Bioenergy Research, 6: 1-13.

[60] Yun, Y.S. Lee, S.B. Park, J.M. Lee, C.I. Ve Yang, J.W., (1997). "Carbon Dioxide Fixation By Algal Cultivation Using Wastewater Nutrients", Journal Of Chemical Technology And Biotechnology, 69: 451-455.

[61] Martínez, M.E. Sánchez, S. Jiménez, J.M. El Yousfi, F. Ve Muñoz, L., (2000). "Nitrogen And Phosphorus Removal From Urban Wastewater By The Microalga Scenedesmus Obliquus", Bioresource Technology, 73: 263-272.

[62] Sawayama, S. Inoue, S. Dote, Y. Ve Yokoyama, S.-Y., (1995). "CO2 Fixation And Oil Production Through Microalga", Energy Conversion And Management, 36: 729-731.

[63] Zhou, W. Chen, P. Min, M. Ma, X. Wang, J. Griffith, R. Hussain, F. Peng, P. Xie, Q. Li, Y. Shi, J. Meng, J. Ve Ruan, R., (2014). "Environment-Enhancing Algal Biofuel Production Using Wastewaters", Renewable And Sustainable Energy Reviews, 36: 256-269.

[64] Sydney, E.B. Da Silva, T.E. Tokarski, A. Novak, A.C. De Carvalho, J.C. Woiciecohwski, A.L. Larroche, C. Ve Soccol, C.R., (2011). "Screening Of Microalgae With Potential For Biodiesel Production And Nutrient Removal From Treated Domestic Sewage", Applied Energy, 88: 3291-3294.

[65] Mahapatra, D.M. Chanakya, H.N. Ve Ramachandra, T.V., (2013). "Euglena Sp As A Suitable Source Of Lipids For Potential Use As Biofuel And Sustainable Wastewater Treatment", Journal Of Applied Phycology, 25: 855-865.

[66] Ramachandra, T.V. Durga Madhab, M. Shilpi, S. Ve Joshi, N.V., (2013). "Algal Biofuel From Urban Wastewater İn India: Scope And Challenges", Renewable And Sustainable Energy Reviews, 21: 767-777.

[67] Gao, F. Yang, Z.-H. Li, C. Wang, Y.-J. Jin, W.-H. Ve Deng, Y.-B., (2014). "Concentrated Microalgae Cultivation İn Treated Sewage By Membrane Photobioreactor Operated İn Batch Flow Mode", Bioresource Technology, 167: 441-446.

[68] Han, L. Pei, H. Hu, W. Jiang, L. Ma, G. Zhang, S. Ve Han, F., (2015). "Integrated Campus Sewage Treatment And Biomass Production By Scenedesmus Quadricauda SDEC-13", Bioresource Technology, 175: 262-268.

[69] Silva, A. Costa, M.C. Lopes, A.C. Neto, E.F. Leitao, R.C. Mota, C.R. Ve Dos Santos, A.B., (2014). "Comparison Of Pretreatment Methods For Total Lipids Extraction From Mixed Microalgae", Renewable Energy, 63: 762-766.

[70] Azarpira, H. Behdarvand, P. Dhumal, K. Ve Pondhe, G., (2014). "Comparative Studies On Phycoremediation Of Sewage Water By Using Blue Green Algae", Int J Biosci, 4: 58-64.

[71] Makareviciene, V. Skorupskaite, V. Ve Andruleviciute, V., (2013). "Biodiesel Fuel From Microalgae-Promising Alternative Fuel For The Future: A Review", Reviews İn Environmental Science And Bio-Technology, 12: 119-130.

[72] Unnithan, V.V. Unc, A. Ve Smith, G.B., (2014). "Mini-Review: A Priori Considerations For Bacteria–Algae İnteractions İn Algal Biofuel Systems Receiving Municipal Wastewaters", Algal Research, 4: 35-40.

[73] Veeresh, M. Veeresh, A.V. Huddar, B.D. Ve Hosetti, B.B., (2010). "Dynamics Of İndustrial Waste Stabilization Pond Treatment Process", Environmental Monitoring And Assessment, 169: 55-65.

[74] Wang, L.A. Min, M. Li, Y.C. Chen, P. Chen, Y.F. Liu, Y.H. Wang, Y.K. Ve Ruan, R., (2010). "Cultivation Of Green Algae Chlorella Sp İn Different Wastewaters From Municipal Wastewater Treatment Plant", Applied Biochemistry And Biotechnology, 162: 1174-1186.

[75] Mustafa, E.-M. Phang, S.-M. Ve Chu, W.-L., (2012). "Use Of An Algal Consortium Of Five Algae İn The Treatment Of Landfill Leachate Using The High-Rate Algal Pond System", Journal Of Applied Phycology, 24: 953-963.

[76] Edmundson, S.J. Ve Wilkie, A.C., (2013). "Landfill Leachate–A Water And Nutrient Resource For Algae-Based Biofuels", Environmental Technology, 34: 1849-1857.

[77] Lin, L. Chan, G.Y.S. Jiang, B.L. Ve Lan, C.Y., (2007). "Use Of Ammoniacal Nitrogen Tolerant Microalgae İn Landfill Leachate Treatment", Waste Management, 27: 1376-1382.

[78] He, P.J. Mao, B. Shen, C.M. Shao, L.M. Lee, D.J. Ve Chang, J.S., (2013). "Cultivation Of Chlorella Vulgaris On Wastewater Containing High Levels Of Ammonia For Biodiesel Production", Bioresource Technology, 129: 177-181.

[79] Zhao, X. Zhou, Y. Huang, S. Qiu, D. Schideman, L. Chai, X. Ve Zhao, Y., (2014). "Characterization Of Microalgae-Bacteria Consortium Cultured İn Landfill Leachate For Carbon Fixation And Lipid Production", Bioresource Technology, 156: 322-328.

[80] Martins, C.L. Fernandes, H. Ve Costa, R.H.R., (2013). "Landfill Leachate Treatment As Measured By Nitrogen Transformations İn Stabilization Ponds", Bioresource Technology, 147: 562-568.

[81] Ahluwalia, S.S. Ve Goyal, D., (2007). "Microbial And Plant Derived Biomass For Removal Of Heavy Metals From Wastewater", Bioresource Technology, 98: 2243-2257.

[82] Christenson, L. Ve Sims, R., (2011). "Production And Harvesting Of Microalgae For Wastewater Treatment, Biofuels, And Bioproducts", Biotechnology Advances, 29: 686-702.

[83] Chinnasamy, S. Bhatnagar, A. Hunt, R.W. Ve Das, K.C., (2010). "Microalgae Cultivation İn A Wastewater Dominated By Carpet Mill Effluents For Biofuel Applications", Bioresource Technology, 101: 3097-3105.

[84] Şen, S. Ve Demirer, G.N., (2003). "Anaerobic Treatment Of Real Textile Wastewater With A Fluidized Bed Reactor", Water Research, 37: 1868-1878.

[85] Durai, G. Ve Rajasimman, M., (2011). "Biological Treatment Of Tannery Wastewater- A Review", Journal Of Environmental Science And Technology, 4: 1-17.

[86] Slade, A. Gapes, D. Stuthridge, T. Anderson, S. Dare, P. Pearson, H. Ve Dennis, M., (2004). "N-Virotech®-A Novel Process For The Treatment Of Nutrient Limited Wastewaters", Water Science And Technology, 50: 131-139.

[87] Ammary, B.Y., (2004). "Nutrients Requirements İn Biological İndustrial Wastewater Treatment", African Journal Of Biotechnology, 3: 236-238.

[88] Ding, J.F. Zhao, F.M. Cao, Y.F. Xing, L. Liu, W. Mei, S. Ve Li, S.J., (2015). "Cultivation Of Microalgae İn Dairy Farm Wastewater Without Sterilization", International Journal Of Phytoremediation, 17: 222-227.

[89] Zainol, N.A. Aziz, H.A. Ve Yusoff, M.S., (2012). "Characterization Of Leachate From Kuala Sepetang And Kulim Landfills: A Comparative Study", Energy And Environment Research, 2: 45.

[90] Milledge, J.J. Ve Heaven, S., (2013). "A Review Of The Harvesting Of Micro-Algae For Biofuel Production", Reviews İn Environmental Science And Bio/Technology, 12: 165-178.

[91] Razzak, S.A. Hossain, M.M. Lucky, R.A. Bassi, A.S. Ve De Lasa, H., (2013). "Integrated CO2 Capture, Wastewater Treatment And Biofuel Production By Microalgae Culturing—A Review", Renewable And Sustainable Energy Reviews, 27: 622-653.

[92] Ho, S.-H. Chen, C.-Y. Lee, D.-J. Ve Chang, J.-S., (2011). "Perspectives On Microalgal CO2-Emission Mitigation Systems — A Review", Biotechnology Advances, 29: 189-198.

[93] Pires, J.C.M. Alvim-Ferraz, M.C.M. Martins, F.G. Ve Simões, M., (2012). "Carbon Dioxide Capture From Flue Gases Using Microalgae: Engineering Aspects And Biorefinery Concept", Renewable And Sustainable Energy Reviews, 16: 3043-3053.

[94] Ahmad, A. Yasin, N.M. Derek, C. Ve Lim, J., (2014). "Comparison Of Harvesting Methods For Microalgae Chlorella Sp. And İts Potential Use As A Biodiesel Feedstock", Environmental Technology, 35: 2244-2253.

[95] Salar-García, M.J. Ortiz-Martínez, V.M. Olivares-Carrillo, P. Quesada-Medina, J. De Los Ríos, A.P. Ve Hernández-Fernández, F.J., (2016). "Analysis Of Optimal Conditions For Biodiesel Production From Jatropha Oil İn Supercritical Methanol: Quantification Of Thermal Decomposition Degree And Analysis Of Fames", The Journal Of Supercritical Fluids, 112: 1-6.

[96] Ortiz-Martínez, V.M. Salar-García, M.J. Palacios-Nereo, F.J. Olivares-Carrillo, P. Quesada-Medina, J. Ríos, A.P.D.L. Ve Hernández-Fernández, F.J., (2016). "In-Depth Study Of The Transesterification Reaction Of Pongamia Pinnata Oil For Biodiesel Production Using Catalyst-Free Supercritical Methanol Process", The Journal Of Supercritical Fluids, 113: 23-30.

[97] Singh, A. Ve Olsen, S.I., (2011). "A Critical Review Of Biochemical Conversion, Sustainability And Life Cycle Assessment Of Algal Biofuels", Applied Energy, 88: 3548-3555.

[98] Jazzar, S. Olivares-Carrillo, P. Pérez De Los Ríos, A. Marzouki, M.N. Acién-Fernández, F.G. Fernández-Sevilla, J.M. Molina-Grima, E. Smaali, I. Ve Quesada-Medina, J., (2015). "Direct Supercritical Methanolysis Of Wet And Dry Unwashed Marine Microalgae (Nannochloropsis Gaditana) To Biodiesel", Applied Energy, 148: 210-219.

[99] John, R.P. Anisha, G.S. Nampoothiri, K.M. Ve Pandey, A., (2011). "Micro And Macroalgal Biomass: A Renewable Source For Bioethanol", Bioresource Technology, 102: 186-193.

[100] Demirbas, M.F., (2011). "Biofuels From Algae For Sustainable Development", Applied Energy, 88: 3473-3480.

[101] Hirano, A. Ueda, R. Hirayama, S. Ve Ogushi, Y., (1997). "CO2 Fixation And Ethanol Production With Microalgal Photosynthesis And İntracellular Anaerobic Fermentation", Energy, 22: 137-142.

[102] Benemann, J.R., (2000). "Hydrogen Production By Microalgae", Journal Of Applied Phycology, 12: 291-300.

[103] Melis, A. Zhang, L.P. Forestier, M. Ghirardi, M.L. Ve Seibert, M., (2000). "Sustained Photobiological Hydrogen Gas Production Upon Reversible İnactivation Of Oxygen Evolution İn The Green Alga Chlamydomonas Reinhardtii", Plant Physiology, 122: 127-135.

[104] Klinthong, W. Yang, Y.H. Huang, C.H. Ve Tan, C.S., (2015). "A Review: Microalgae And Their Applications İn CO2 Capture And Renewable Energy", Aerosol And Air Quality Research, 15: 712-742.

[105] Prince, R.C. Ve Kheshgi, H.S., (2005). "The Photobiological Production Of Hydrogen: Potential Efficiency And Effectiveness As A Renewable Fuel", Critical Reviews İn Microbiology, 31: 19-31.

[106] Kruse, O. Ve Hankamer, B., (2010). "Microalgal Hydrogen Production", Current Opinion İn Biotechnology, 21: 238-243.

[107] Hu, Q. Sommerfeld, M. Jarvis, E. Ghirardi, M. Posewitz, M. Seibert, M. Ve Darzins, A., (2008). "Microalgal Triacylglycerols As Feedstocks For Biofuel Production: Perspectives And Advances", The Plant Journal, 54: 621-639.

[108] Morand, P. Ve Briand, X., (1999). "Anaerobic Digestion Of Ulva Sp. 2. Study Of Ulva Degradation And Methanisation Of Liquefaction Juices", Journal Of Applied Phycology, 11: 164-177.

[109] Bird, K.T. Chynoweth, D.P. Ve Jerger, D.E., (1990). "Effects Of Marine Algal Proximate Composition On Methane Yields", Journal Of Applied Phycology, 2: 207-213.

[110] Gonzalez-Fernandez, C. Sialve, B. Ve Molinuevo-Salces, B., (2015). "Anaerobic Digestion Of Microalgal Biomass: Challenges, Opportunities And Research Needs", Bioresource Technology, 198: 896-906.

[111] Tartakovsky, B. Lebrun, F.M. Ve Guiot, S.R., (2015). "High-Rate Biomethane Production From Microalgal Biomass İn A UASB Reactor", Algal Research, 7: 86-91.

[112] Mussgnug, J.H. Klassen, V. Schlüter, A. Ve Kruse, O., (2010). "Microalgae As Substrates For Fermentative Biogas Production İn A Combined Biorefinery Concept", Journal Of Biotechnology, 150: 51-56.

[113] Sheehan, J. Dunahay, T. Benemann, J. Ve Roessler, P., (1998). "A Look Back At The US Department Of Energy's Aquatic Species Program: Biodiesel From Algae", National Renewable Energy Laboratory, 328.

[114] Liang, S. Liu, X. Chen, F. Ve Chen, Z., (2004). Current Microalgal Health Food R & D Activities İn China, Ed. Asian Pacific Phycology İn The 21st Century: Prospects And Challenges. Springer, 45-48.

[115] Vílchez, C. Garbayo, I. Lobato, M.V. Ve Vega, J., (1997). "Microalgae-Mediated Chemicals Production And Wastes Removal", Enzyme And Microbial Technology, 20: 562-572.

[116] Metting Jr, F., (1996). "Biodiversity And Application Of Microalgae", Journal Of İndustrial Microbiology, 17: 477-489.

[117] Borowitzka, M.A., (1988). "Microalgae As Sources Of Essential Fatty Acids", Aust. J. Biotech., 1: 58-62.

[118] Cohen, Z. Ve Cohen, S., (1991). "Preparation Of Eicosapentaenoic Acid (EPA) Concentrate Fromporphyridium Cruentum", Journal Of The American Oil Chemists Society, 68: 16-19.

[119] Okuyama, H., (1992). "Minimum Requirements Of N-3 And N-6 Essential Fatty Acids For The Function Of The Central Nervous System And For The Prevention Of Chronic Disease", Experimental Biology And Medicine, 200: 174-176.

[120] Zevenbergen, J. Ve Rudrum, M., (1993). "The Role Of Polyunsaturated Fatty Acids İn The Prevention Of Chronic Diseases", Lipid/Fett, 95: 456-460.

[121] Sukenik, A., (1991). "Ecophysiological Considerations İn The Optimization Of Eicosapentaenoic Acid Production By Nannochloropsis Sp. (Eustigmatophyceae)", Bioresource Technology, 35: 263-269.

[122] Chrismadha, T. Ve Borowitzka, M.A., (1994). "Effect Of Cell Density And İrradiance On Growth, Proximate Composition And Eicosapentaenoic Acid Production Ofphaeodactylum Tricornutum Grown İn A Tubular Photobioreactor", Journal Of Applied Phycology, 6: 67-74.

[123] Okuzumi, J. Nishino, H. Murakoshi, M. Iwashima, A. Tanaka, Y. Yamane, T. Fujita, Y. Ve Takahashi, T., (1990). "Inhibitory Effects Of Fucoxanthin, A Natural Carotenoid, On N-Myc Expression And Cell Cycle Progression İn Human Malignant Tumor Cells", Cancer Letters, 55: 75-81.

[124] Davison, A. Rousseau, E. Ve Dunn, B., (1993). "Putative Anticarcinogenic Actions Of Carotenoids: Nutritional İmplications", Canadian Journal Of Physiology And Pharmacology, 71: 732-745.

[125] Del Campo, J.A. García-González, M. Ve Guerrero, M.G., (2007). "Outdoor Cultivation Of Microalgae For Carotenoid Production: Current State And Perspectives", Applied Microbiology And Biotechnology, 74: 1163-1174.

[126] Stolz, P. Ve Obermayer, B., (2005). "Manufacturing Microalgae For Skin Care", Cosmetics And Toiletries, 120: 99-106.

[127] Güner, H. Ve Aysel, V., (1989). "Tohumsuz Bitkiler Sistematiği, Cilt", IE Ü. Fen Fak. Kitaplar Serisi, 108: 245.

[128] Campagna, M. Çakmakcı, M. Büşra Yaman, F. Ve Özkaya, B., (2013). "Molecular Weight Distribution Of A Full-Scale Landfill Leachate Treatment By Membrane Bioreactor And Nanofiltration Membrane", Waste Management, 33: 866-870.

[129] Samorì, G. Samorì, C. Guerrini, F. Ve Pistocchi, R., (2013). "Growth And Nitrogen Removal Capacity Of Desmodesmus Communis And Of A Natural Microalgae Consortium İn A Batch Culture System İn View Of Urban Wastewater Treatment: Part I", Water Research, 47: 791-801.

[130] Prabakaran, P. Ve Ravindran, A.D., (2012). "Lipid Extraction And CO2 Mitigation By Microalgae", Journal Of Biochemical Technology, 4: 469-472.

[131] Park, J. Jin, H.-F. Lim, B.-R. Park, K.-Y. Ve Lee, K., (2010). "Ammonia Removal From Anaerobic Digestion Effluent Of Livestock Waste Using Green Alga Scenedesmus Sp", Bioresource Technology, 101: 8649-8657.

[132] Converti, A. Casazza, A.A. Ortiz, E.Y. Perego, P. Ve Del Borghi, M., (2009). "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: Process Intensification, 48: 1146-1151.

[133] Kim, S. Lee, Y. Ve Hwang, S.-J., (2013). "Removal Of Nitrogen And Phosphorus By Chlorella Sorokiniana Cultured Heterotrophically İn Ammonia And Nitrate", International Biodeterioration & Biodegradation, 85: 511-516.

[134] Aslan, S. Ve Kapdan, I.K., (2006). "Batch Kinetics Of Nitrogen And Phosphorus Removal From Synthetic Wastewater By Algae", Ecological Engineering, 28: 64-70.

[135] Rasoul-Amini, S. Montazeri-Najafabady, N. Shaker, S. Safari, A. Kazemi, A. Mousavi, P. Mobasher, M.A. Ve Ghasemi, Y., (2014). "Removal Of Nitrogen And Phosphorus From Wastewater Using Microalgae Free Cells İn Bath Culture System", Biocatalysis And Agricultural Biotechnology, 3: 126-131.

[136] Lim, S.-L. Chu, W.-L. Ve Phang, S.-M., (2010). "Use Of Chlorella Vulgaris For Bioremediation Of Textile Wastewater", Bioresource Technology, 101: 7314-7322.

[137] González, L.E. Cañizares, R.O. Ve Baena, S., (1997). "Efficiency Of Ammonia And Phosphorus Removal From A Colombian Agroindustrial Wastewater By The Microalgae Chlorella Vulgaris And Scenedesmus Dimorphus", Bioresource Technology, 60: 259-262.

[138] Kong, Q.X. Li, L. Martinez, B. Chen, P. Ve Ruan, R., (2010). "Culture Of Microalgae Chlamydomonas Reinhardtii İn Wastewater For Biomass Feedstock Production", Applied Biochemistry And Biotechnology, 160: 9-18.

[139] Ruiz-Marin, A. Mendoza-Espinosa, L.G. Ve Stephenson, T., (2010). "Growth And Nutrient Removal İn Free And İmmobilized Green Algae İn Batch And Semi-Continuous Cultures Treating Real Wastewater", Bioresource Technology, 101: 58-64.

[140] Larsdotter, K., (2006). "Wastewater Treatment With Microalgae-A Literature Review", Vatten, 62: 31-38.

EK-A

Kültivasyondan Sonra Elde Edilen Görüntüler

A-1 Kültivasyondan Sonra Düz Plaka Fotobiyoreaktörün Görüntüsü



A-2 Kültivasyondan Sonra Mikroalglerin Görüntüsü



86. gün sonunda

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Uzeyle ELCİK

Doğum Tarihi ve Yeri : 03.06.1986 - Yunak

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : uzeylesezer@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	**Alan**	**Okul/Üniversite**	**Mezuniyet Yılı**
Yüksek Lisans	Çevre Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2016
Lisans	Çevre Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2011
Lise	Sayısal	Polatlı Anadolu Lisesi	2004

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	**Firma/Kurum**	**Görevi**
2013-2015	İSKİ	Çevre Mühendisi