ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sevgi YILMAZ

ENDÜSTRİYEL ATIKSULARDA MİKROALGAL NÜTRİENT GİDERİMİ VE BİYODİZEL ÜRETİM VERİMLİLİĞİ: SÜT ENDÜSTRİSİ ÖRNEĞİ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ADANA, 2018

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİYEL ATIKSULARDA MİKROALGAL NÜTRİENT GİDERİMİ VE BİYODİZEL ÜRETİM VERİMLİLİĞİ: SÜT ENDÜSTRİSİ ÖRNEĞİ

Sevgi YILMAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu Tez …/…/2018 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından Oybirliği/~~Oyçokluğu~~ ile Kabul Edilmiştir.

…….....	……..	.....
Prof. Dr. Fuat BUDAK	Prof. Dr. Nurcan KÖLELİ	Dr. Öğr. Üyesi Behzat BALCI
DANIŞMAN	ÜYE	ÜYE

Bu Tez Enstitümüz Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında hazırlanmıştır.
Kod No:

Prof. Dr. Mustafa Gök
Enstitü Müdürü

Bu Çalışma Bilimsel Araştırma Koordinasyon Birimi Tarafından Desteklenmiştir.
Proje No: FYL-2016-6697

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ENDÜSTRİYEL ATIKSULARDA MİKROALGAL NÜTRİENT GİDERİMİ VE BİYODİZEL ÜRETİM VERİMLİLİĞİ: SÜT ENDÜSTRİSİ ÖRNEĞİ

Sevgi YILMAZ

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman : Prof. Dr. Fuat BUDAK
Yıl: 2018, Sayfa: 61
Jüri : Prof. Dr. Fuat BUDAK
: Prof. Dr. Nurcan KÖLELİ
: Dr. Öğr. Üyesi Behzat BALCI

Mikroalgal arıtım teknolojileri endüstriyel ve tarımsal kökenli atıksuların artımında klasik atıksu arıtma sistemlerine karşı sürdürülebilir bir alternatif olarak görülmektedir. Son yıllarda mikroalglerden elde edilen biyokütle de, yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak oldukça önem kazanmaktadır.

Bu çalışmada süt endüstrisi atıksularında üretilen *Chlorella vulgaris*'in nütrient giderim ve biyokütle üretim verimi potansiyelinin araştırılması amaçlanmıştır. Çalışmada kullanılan atıksu, Adana'da süt endüstrisi sektöründe faaliyet gösteren bir firmadan sağlanmıştır. Araştırma sonuçları, on günlük üretim sürecinde, *Chlorella vulgaris*'in TN ve TP giderim verimlerinin sırasıyla %95,3 ve %92,7 olduğu, 0,074 gr L^{-1} $gün^{-1}$ olan maksimum kuru madde miktarının ise deneysel çalışmanın ikinci gününde elde edildiğini göstermiştir.

Yapılan çalışmadan elde edilen veriler *Chlorella vulgaris*'in süt endüstrisi atıksularında etkin bir şekilde nütrient giderimi sağladığını ve süt endüstrisi atıksularının sürdürülebilir bir şekilde mikroalgal biyokütle ve biyodizel üretiminde önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Mikroalg, süt endüstrisi atıksuyu, nütrient giderimi, biyoyakıt

ABSTRACT

MASTER THESIS

MICROALGAL NUTRIENT REMOVAL AND BIODIESEL PRODUCTION POTENTIAL IN INDUSTRIAL WASTEWATER: THE CASE OF DAIRY INDUSTRY

Sevgi YILMAZ

ÇUKUROVA UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING

Supervisor : Prof. Dr. Fuat BUDAK
Year: 2018, Pages: 61
Jury : Prof. Dr. Fuat BUDAK
: Prof. Dr. Nurcan KÖLELİ
: Asst. Prof. Dr. Behzat BALCI

The use of microalgal wastewater treatment technologies for agricultural and industrial wastewater has shown to be a sustainable alternative to conventional treatment systems. In addition, the biomass obtained from microalgae also has been recently considered as a renewable source of biofuel.

The aim of this study is to investigate the nutrient removal and biomass production efficiency of *Chlorella vulgaris* cultivated in dairy wastewater. Wastewater used in this research was taken from a dairy industry facility located in Adana province. The results showed that by the end of a 10-day batch culture, *Chlorella vulgaris* could remove total nitrogen and total phosphorus by 95.3% and 92.7% respectively and maximum biomass productivity of 74 mg dry-weight/L/day was achieved to at second day of growth.

The results of the study indicated that *Chlorella vulgaris* effectively removed nutrients from dairy effluent. Dairy wastewater has great potential to cultivate microalgae for biomass and biodiesel production in a sustainable manner.

Key Words: Microalgae, dairy wastewater, nutrient removal, biofuels

GENİŞLETİLMİŞ ÖZET

Günümüzde dünya, etkileri giderek artış gösteren pek çok zorlukla karşı karşıyadır. Bunlardan bazıları küresel ısınma, yetersiz besin ve enerjiye duyulan ihtiyaçtır. Son yıllarda artan küresel enerji ihtiyacının %80'ini fosil yakıtlar karşılamaktadır. Ancak, bu enerji formunun yenilenemez bir kaynak oluşu ile birlikte enerji krizi 21. yüzyılda insanoğlunun karşılaştığı en önemli güçlüklerden birisidir. Düşük maliyetli olması fosil yakıtları cazip bir enerji kaynağı haline getirse de, özellikle atmosfere yaydığı sera gazı emisyonlarının küresel iklim değişikliğine olan olumsuz etkileri nedeniyle uzun dönemde enerji üretiminde fosil yakıt kullanımı sürdürülebilir bir durum değildir. Dolayısıyla yakın gelecekte fosil yakıtlar yerini yenilenebilir, çevre dostu enerji kaynaklarına bırakmak durumundadır. Bu aşamada biyoyakıtlar en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi olarak gündeme gelmektedir.

Özellikle gelişmekte olan ülkelerin enerji ihtiyacının artması dünya genelinde enerjiye olan talebin her geçen gün daha da armasına neden olmaktadır. Enerji ihtiyacımızı sağladığımız fosil yakıtların diğer alternatif enerji kaynaklarına göre düşük maliyetli olmasından dolayı kullanımı son derece yaygındır. Ancak bu yakıtlar atmosfere yaydığı CO_2 ile birlikte sera gazı emisyonlarını arttırarak küresel iklim değişikliğine neden olmaktadırlar. Tüm bunlar göz önünde bulundurulduğunda, bu yakıtların yerini alabilecek alternatif, çevre dostu enerji kaynaklarının araştırılması gündeme gelmiştir. Biyoyakıtlar en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından birisidir. Mikroalgler bu enerji kaynakları arasında yüksek fotosentetik verimliliği, tarıma elverişli olmayan arazilerde üretilebilmesi ve aynı zamanda atıksu arıtma işleminde kullanılması bakımından büyük öneme sahiptir.

Son yıllarda atıksuların kullanılarak mikroalg yetiştirilmesine yönelik araştırmalarda önemli bir artış söz konusudur. Çalışma sonuçlarından elde edilen veriler mikroalglerin atıksudan azot, fosfor ve ağır metal gideriminde yüksek verim sağladığını göstermiştir. İnorganik azot ve fosforu atıksudan uzaklaştırmak oldukça

zor bir işlemdir. Mikroalgler bu iki su kirleticisini büyümeleri için gerekli olan nütrient olarak kullanabilme yetenekleri sayesinde atıksuda bulunan inorganik azot ve fosfor konsantrasyonunu bünyelerine alarak azaltırlar. Pek çok mikroalg türü atıksuda bu özellikleri sayesinde etkin bir şekilde biyokütle artışı sağlayabilirler. Atıksuların arıtılmasında önemli bir yer tutan, özellikle yüksek konsantrasyonda bulunan N ve P besin maddelerinin uzaklaştırılması gerekmektedir. Aksi takdirde bu besinler nehirlerde ve göllerde birikirerek ötrofikasyona neden olabilir.

Diğer yandan hızla artan nüfus gelişen endüstriyel ve tarımsal modernizasyon, alıcı ortama verilmeden önce mutlaka arıtılması gereken yüksek oranda evsel, endüstriyel ve tarımsal atıksuların oluşumuna neden olmaktadır. Atıksuların zengin nütrient içeriğinin mikroalgler için besin kaynağı olması, düşük maliyetli oluşu ve organik atığın oldukça azalması nedenleriyle, atıksuların mikoalglerle arıtımı oldukça ilgi görmektedir. Atıksu arıtımında bu alternatif yaklaşım aktif çamur arıtım proseslerine göre daha fazla giderim verimliliğine sahiptir. Ayrıca, alıcı ortama verilen deşarj suyunda yüksek düzeyde oksijen bulunması, yüzey su kaynaklarına yönelik ötrofikasyon riskini azaltması, oluşan mikroalgal biyokütlenin önemli oranda protein ve yağ içermesi mikroalgal arıtım prosesinin diğer avantajlarıdır.

Tez çalışmasının konusu yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi olan mikroalglerle, atıksu arıtımı ve biyodizel üretim verimliliğinin araştırılması, değerlendirilmesidir. Çalışma kapsamında süt endüstrisi atıksularında yeşil mikroalgler grubuna ait olan *Chlorella vulgaris* ile atıksudan nütrient giderimi, mikroalgal biyokütle üretimi ve yağ verimi potansiyelleri araştırılmıştır.

Çalışmada kullanılan atıksu Adana'da süt endüstrisi sektöründe faaliyet gösteren bir firmanın arıtma tesisi çıkışından alınmıştır. Tesisten alınan atıksu örneği öncelikli olarak filtreden geçirilmiş daha sonra sterilizasyon için 121^0C 1,5 atm basınçta 15 dakika otoklavlama işlemine tabi tutulmuştur. Sterilizasyonu yapılan atıksu ile *Chlorella vulgaris* 1:10 (v/v) oranında karıştırılarak aşılanmıştır. *Chlorella vulgaris* kültürleri 250 mL'lik erlenlerde üretilmeye başlanmış, daha

sonra 1-2 L'lik büyük hacimli erlenlerde ve son olarak yüksek oranlı mikroalg havuzunda üretime devam ettirilmiştir. Deneysel çalışma süresi boyunca sıcaklık 25^0C olarak ayarlanmış ve sabit tutulmuştur. Aydınlık/karanlık döngüsü 14/10 saat, aydınlanma düzeyi 250 µmol m^{-2} s^{-2} olarak ayarlanmıştır. Kültürlerin havalandırma işlemi motorlu hava pompası ile sağlanmıştır. Kültürlerin homojenizasyonu için çalkayıcılar kullanılmıştır. Deneysel çalışma 3 tekerrürlü yapılmış olup, sonuçlar ortalama değerler alınarak hesaplanmıştır. Araştırma süresince tüm analizler aynı gün aynı saatte tekrarlanmıştır

Yapılan çalışmalar sonucunda *Chlorella vulgaris* süt endüstrisi atıksularında etkin bir şekilde nütrient giderimi sağlamış ve biyokütle artışı göstermiştir. Çalışma sonucunda TN giderim verimi %95,27, TP giderimi %92,68 olarak bulunmuştur. On günlük deneme süresince kuru ağırlık olarak elde edilen mikroalgal biyokütle verimi 0,036 gr L^{-1} $gün^{-1}$ olmuştur. Maksimum kuru madde miktarı 0,074 gr L^{-1} $gün^{-1}$ ile denemenin ikinci gününde elde edilmiştir. Mikroalgal büyümenin en hızlı olduğu faz olan ilk dört günde elde edilen kuru madde miktarı ise 0,059 gr L^{-1} $gün^{-1}$ olarak gerçekleşmiştir. Denemenin sonunda yağ analizi yapılan *Chlorella vulgaris*'in yağ verimliliği %20,6 olarak bulunmuştur.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın konusunun belirlenmesinden itibaren tüm süreci büyük bir özveriyle takip eden, engin bilgilerini benimle paylaşan ve yönlendiren, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, her koşulda çözüm odaklı yaklaşan saygı değer Tez Danışmanım Prof. Dr. Fuat Budak'a,

Tez çalışmamın laboratuvar analizlerinin belirli bir kısmında bana laboratuvarının kapılarını açan, bilgisini ve yardımını esirgemeyen Çukurova Üniversitesi Zootekni Bölümü Öğretim Üyesi sayın hocam Prof. Dr. Hasan Rüştü Kutlu'ya,

Çalışmama sağladığı desteklerinden dolayı Prof. Dr. Zeynep Zaimoğlu'na,

Gerek tez çalışmam konusunda gerekse motivasyona ihtiyaç duyduğum her anda yanımda olan, benimle bilgilerini ve dostluklarını paylaşan kıymetli hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Behzat Balcı, Dr. Elçin Erkurt ve Arş. Gör. E. Su Turan'a,

Bu süreçte yanımda olan ve çalışmama katkı sağlayan Meltem Tufan'a,

Her zaman ve her koşulda en büyük destekçilerim olan, sonsuz sevgi ve ilgileriyle beni bugünlere getiren aileme,

Sonsuz teşekkürler…

.

İÇİNDEKİLER **SAYFA**

ÖZ I
ABSTRACT II
GENİŞLETİLMİŞ ÖZET III
TEŞEKKÜR VII
İÇİNDEKİLER VIII
ÇİZELGELER DİZİNİ XII
ŞEKİLLER DİZİNİ XIV
SİMGELER VE KISALTMALAR XVI
1. GİRİŞ 1
2. MİKROALGLER VE MİKROALG ÜRETİM SİSTEMLERİ 5
2.1. Çevresel Faktörler 7
2.1.1. Işık 8
2.1.2. Sıcaklık 9
2.1.3. Nütrientler 9
2.1.3.1. Azot 9
2.1.3.2. Fosfor 10
2.1.4. Karbondioksit 10
2.1.5. pH 11
2.1.6. Karıştırma 11
2.1.7. Tuzluluk 11
2.2. Mikroalg Üretim Sistemleri 12
2.2.1. Açık-Hava Sistemleri 12
2.2.2. Kapalı Sistemler 13
2.3. Mikroalglerin Hasat Yöntemleri 16
2.3.1. Flokülasyon 17
2.3.2. Flotasyon 17

2.3.3. Santrifüj 18
2.3.4. Filtrasyon 18
3. MİKROALGAL ATIKSU ARITIMI 19
3.1. Atıksular 19
3.1.1. Kentsel Atıksular 19
3.1.2. Tarımsal Kaynaklı Atıksular 20
3.1.3. Endüstriyel Atıksular 21
3.1.4. Atıksulardan Nütrient Giderimi 21
3.2. Mikroalgal Nütrient Giderimi 23
4. MİCROALGAL BİYOKÜTLE VE BİYOYAKITLAR 25
4.1. Biyoyakıt 25
4.2. Mikroalg ve Biyodizel 26
5. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 29
6. MATERYAL VE METOD 33
6.1. Materyal 33
6.1.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Mikroalg Türü 33
6.1.2. Atıksu Temini ve Karakterizasyonu 33
6.2. Metod 34
6.2.1. Mikroalg Kültivasyonu 34
6.2.2. Denemenin Kurulması 36
6.3. Deneme Süresince Yapılan Analizler 37
6.3.1. Toplam Azot 37
6.3.2. Toplam Fosfor 37
6.3.3. Kimyasal Oksijen İhtiyacı 38
6.3.4. Optik Yoğunluk 38
6.3.5. Kuru Madde Analizi 38
6.3.6. pH Ölçümü 39
6.3.7. Mikroalglerin Hasat Edilmesi 39
6.3.8. Yağ Analizi 39

7. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA 41
7.1. Mikroalgal Büyüme ve Biyokütle Verimi 41
7.1.1. Optik Yoğunluk 41
7.1.2. Mikroalgal Biyokütle Verimi 42
7.1.3. Spesifik Büyüme Oranı 43
7.2. Nütrient Giderimi 45
7.2.1. Azot Giderimi 45
7.2.2. Fosfor Giderimi 47
7.3. KOİ Giderim Verimliliği 50
7.4. Nütrient Giderimi Mikroalgal Biyokütle Verimliliği ve pH İlişkileri 50
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 53
KAYNAKLAR 55
ÖZGEÇMİŞ 61

ÇİZELGELER DİZİNİ **SAYFA**

Çizelge 2.1. Bazı Mikroalg Türlerinde Ana Hücresel Bileşenlerinin % Dağılımı (Dragone, Fernandes et al. 2010)..... 7

Çizelge 2.2. Bazı Mikroalg Türlerinde Kullanılan Karanlık - Aydınlık Döngüleri Ve Işık Şiddetleri (Elcik and Çakmakcı 2017) 8

Çizelge 2.3. Çeşitli Mikroalg Üretim Sistemlerinin Avantaj ve Dezavantajları (Dragone, Fernandes et al. 2010)..... 16

Çizelge 6.1. Süt Endüstrisi Atıksu Karakterizasyonu 34

Çizelge 6.2. Bold Basal Besi Ortamı (BBM)..... 35

Çizelge 7.1. Çeşitli Atıksularda Yetiştirilen Bazı Mikroalg Türlerinin TN Giderim Verimleri..... 47

Çizelge 7.2 Çeşitli Atıksularda Yetiştirilen Bazı Mikroalg Türlerinin Toplam Fosfor (TP) Giderim Verimleri 49

ŞEKİLLER DİZİNİ **SAYFA**

Şekil 4.1. Biyoyakıtların şematik olarak sınıflandırılması (Dragone, Fernandes et al. 2010) 26
Şekil 6.1. *Chlorella vulgaris* mikroskop görüntüsü 33
Şekil 6.2. Yüksek Oranlı Mikroalg Havuzunda *Chlorella Vulgaris* Kültivasyonu 36
Şekil 6.3. Süt Endüstrisi Atıksularında *Chlorella Vulgaris* Kültivasyonu 37
Şekil 6.4. *Chlorella vulgaris*'in Hasat ve Kurutulma İşlemi 39
Şekil 7.1. Mikroalgal Büyüme ve Deneme Süresince Değişimi 42
Şekil 7.2. Biyokütle Verimi ve Günlük Değişimi (mg/L kuru madde) 43
Şekil 7.3. Günlük Spesifik Büyüme Oranı ve Deneme Süresince Değişimi 44
Şekil 7.4. Deneme Süresince TP Miktarının Günlük Değişimi (mg/L) 45
Şekil 7.5. Toplam Azot Giderim Verimi (%) 46
Şekil 7.6. Deneme Süresince TP Miktarının Günlük Değişimi (mg/L) 48
Şekil 7.7. Toplam Fosfor Giderim Verimi (%) 49
Şekil 7.8. Nütrient Giderimi Mikroalgal Biyokütle Verimliliği ve pH İlişkileri 51

SİMGELER VE KISALTMALAR

AKM	: Askıda Katı Madde
BOİ	: Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı
CO_2	: Karbondioksit Gazı
HCO_3^-	: Bikarbonat
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
N	: Azot
NH_4^+	: Amonyum
NO_2^-	: Nitrit
NO_3^-	: Nitrat
P	: Fosfor
TN	: Toplam Azot
TP	: Toplam Fosfor
YOMH	: Yüksek Oranlı Mikroalg Havuzu

1. GİRİŞ

Hızlı nüfus artışı ile birlikte gelişen endüstriyel ve tarımsal modernizasyon, alıcı ortama verilmeden önce mutlaka arıtılması gereken yüksek oranda evsel, endüstriyel ve tarımsal atıksuların oluşumuna neden olmaktadır. Söz konusu atıksular su kaynaklarının kalitatif ve kantitatif sürdürülebilirliği üzerinde çok ciddi tehditler oluşturmaktadır. Atıksuların arıtılmasında uygun arıtma sistemleri kullanılmadığı durumlarda alıcı ortama verilen deşarj sularında yüksek miktarda bulunan azot ve fosfor elementleri ekosisteme zarar verebilir ve ötrofikasyona neden olabilir. Alıcı ortama verilen bu sular, düşük çözünmüş oksijen konsantrasyonundan dolayı balık ölümlerine, istemeyen pH değişikliklerine ve toksik etkileriyle çevre kirliliğine yol açmaktadır. Atıksularda kirliliğe yol açan bu nütrientleri (azot, fosfor) atıksudan uzaklaştırmak için çeşitli arıtım teknolojileri geliştirilmiştir. Ancak, bu proseslerin önemli bir bölümü yüksek yatırım ve işletme maliyeti, karmaşık işletim prosedürü, önemli miktarda enerji, kimyasal madde kullanımı ve büyük miktarlarda atık çamur oluşumu gibi sorunlarıda beraberinde getirmektedir. Bu nedenle atıksuların ileri arıtımı için gerekli olan enerji ve yüksek maliyet atıksu arıtım sistemlerinde düşük maliyetli, sürdürülebilir ve çevreci yaklaşımların önünü açmıştır (Christenson & Sims, 2011).

Günümüzde dünya, etkileri giderek artış gösteren pek çok zorlukla karşı karşıyadır. Bunlardan bazıları küresel ısınma, yetersiz besin ve enerjiye duyulan ihtiyaçtır. Son yıllarda artan küresel enerji ihtiyacının %80'ini fosil yakıtlar karşılamaktadır. Ancak, bu enerji formunun yenilenemez bir kaynak oluşu ile birlikte enerji krizi 21. Yüzyıl da insanoğlunun karşılaştığı en önemli güçlüklerden biridir. Düşük maliyetli olması fosil yakıtları cazip bir enerji kaynağı haline getirse de özellikle atmosfere yaydığı sera gazı emisyonlarının küresel iklim değişikliğine olan olumsuz etkileri nedeniyle uzun dönemde enerji üretiminde fosil yakıt kullanımı sürdürülebilir bir durum değildir. Dolayısıyla yakın gelecekte fosil

yakıtlar yerini yenilenebilir, çevre dostu enerji kaynaklarına bırakmak durumundadır. Biyoyakıtlar en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından birisidir. İlk nesil biyoyakıtlar şeker kamışı, kanola, mısır gibi tarımsal kaynaklı ürünlerden elde edilmekteydi. Ancak tarımsal kaynaklı biyoyakıtların ekonomik olarak fosil yakıtlar ile rekabet edememesi ve özellikle verimli arazilerin kullanılması sonucu gıda güvencesini tehlikeye atması gibi önemli dezavantajları bulunmaktadır. Ayrıca bitkisel kökenli lignoselülozik biyokütleden elde edilen ikinci nesil biyoyakıtlar gıda biyoyakıt rekabeti sorunu içermemesine rağmen lignoselülozik biyokütleden ligninin ayrılması işleminin yüksek maliyetli oluşu önemli bir sorun oluşturmuştur (Kumar, Mishra, Shrivastav, Park, & Yang, 2015; Pittman, Dean, & Osundeko, 2011; Wu et al., 2014).

Son yıllarda biyoyakıt üretiminde yoğun araştırmalara konu olan mikroalgler, yüksek fotosentetik verimliliği, tarıma elverişli olmayan arazilerde üretilebilmesi, tarımda kullanılmayacak atıksuların değerlendirilerek aynı zamanda atıksu arıtma işleminin gerçekleştirilmesi, üretiminde iklim değişikliklerine neden olan baca gazlarından CO_2'in kullanılması ve biyoyakıt dışında değerli yan ürünler sunması nedeniyle biyoyakıt üretiminde kullanılacak yağlı bitkilere göre çok daha önemli avantajlara sahiptir. Biyokütle ve biyodizel verimliliği açısından mikroalgler yağlı tohumlara göre önemli bir üstünlüğe sahiptir. Yağlı tohumların biyokütle verimi 3-13 ton/ha arasında değişirken bu değer mikroalgler de 50-150 ton/ha arasındadır. Yağ verimi açısından bakıldığında, örneğin kanoladan hektar başına 1,5 ton yağ elde edilirken bu oran mikroalgler için 40 ton/ha'a kadar çıkmaktadır (Kumar et al., 2015).

Çağımızın en büyük problemlerinden biri olan küresel iklim değişikliğine neden olan sera gazı emisyonlarının azaltılmasında CO_2 kullanımı ile mikroalgler bu konuda oldukça çevreci ve sürdürülebilir bir yaklaşım olarak yer almaktadır. Mikroalgler CO_2'i genel olarak; atmosferde mevcut bulunan CO_2, enerji santralleri ve endüstriyel işletmelerin neden olduğu CO_2 ve çözünebilir karbonattan CO_2'i büyümeleri için gerekli olan karbon kaynağı olarak kullanabilirler. Mikroalgler

fotosentez sürecinde bünyesine aldıkları CO_2'i karbonhidrat, lipit ve protein formuna dönüştürür. Böylelikle atmosferden CO_2 gazını yakalayarak küresel ısınmanın etkilerini azaltabilirler (Brennan & Owende, 2010; Kumar et al., 2015).

Bu kapsamda tez çalışmasının amacı; yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi olan mikroalglerle atıksu arıtımı, biyodizel üretim verimliliğinin araştırılması ve değerlendirilmesi olarak hedeflenmiştir. Çalışmada kullanılacak olan atıksu süt endüstrisinden temin edilmiş, atıksudan nütrient giderimi, algal biyokütle ve yağ verimi potansiyelleri araştırılmıştır.

2. MİKROALGLER VE MİKROALG ÜRETİM SİSTEMLERİ

En eski yaşam formlarından biri olarak bilinen mikroalgler, yüksek fotosentetik verimliliğe sahip mikroskobik boyutlardaki, su habitatında organik maddenin birincil sentezleyicileridirler. Tek başına, çiftler halinde, kümeler halinde ya da hepsi birbirine benzeyen yapraklar halinde oluşan geniş bir grup basit tek hücreli organizmalardır. Ancak ilkel bitkiler olduklarından dolayı kök, gövde veya yaprağa sahip değillerdir. En bol bulunan ve fitoplankton olarak adlandırılan tek hücreli planktonlardır. Genel olarak kimyasal kompozisyonları $CO_{0.48}H_{1.83}N_{0.11}P_{0.01}$ formülü ile ifade edilir (Zhu, 2015). Kara kökenli bitkilerle kıyaslandığında yüksek fotosentetik verimlilikleri, nütrientleri ve CO_2 'i hızlıca bünyelerinde depolayıp gelişim göstermeleriyle öne çıkarlar. Tek hücreli veya basit çok hücreli yapılarından dolayı zor koşullar altında hızla büyüme kabiliyetine sahip prokaryotik veya ökaryotik mikroorganizmalardır. Mikroalgler ekosistemde sucul, karasal ve çeşitli çevresel koşullarda yaşayan çok çeşitli türleri temsil ederler. Tahmin edilen 50.000'den fazla tür olmasına rağmen yaklaşık olarak 30.000 kadar tür incelenmiş ve analiz edilmiştir (Brennan & Owende, 2010; Mata, Martins, & Caetano, 2010). Geleneksel olarak mikroalgler renklerine göre sınıflandırılmıştır ve bu özellik belirgin bir önem taşımaktadır. Ancak mevcut mikroalg sınıflandırma sistemleri; pigment çeşitleri, depoladıkları ürünlerin kimyasal çeşitleri ve hücre duvarı bileşenleri kriterlerine dayanmaktadır (Dragone, Fernandes, Vicente, & Teixeira, 2010). Eski zamanlardan bu yana mikroalglerin çeşitli kullanım alanları vardır. Bunlardan bazıları insan sağlığı için gıda maddesi, balıklar ve hayvancılık için yem, yüksek değerli yağlar, kimyasallar, farmasötik ürünler ve pigmentlerdir (Singh & Dhar, 2011). Mikroalgler ekolojik dengenin korunması ve çevre kirliliğinin önlenmesi açısından farklı ve çeşitli görevlere sahiptir. Bu organizmaların farklı kimyasal yapıları sayesinde fotosentetik mikroalgler sera gazlarını atmosferden uzaklaştırmak, biyokütle üretimi ve atıksu arıtımı gibi özelliklere sahiptir (Maity, Bundschuh, Chen, & Bhattacharya, 2014). Algal

biyokütlenin anaerobik sindirimi ile biyometan, algal yağdan biyodizel, mikroalgal karbonhidratların fermantasyonu ile biyoetanol ve fotobiyolojik olarak üretilen biyolojik hidrojen yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak mikroalgal kütleden elde edilebilecek değerli ürünler arasında yer almaktadır (Singh & Dhar, 2011).

Hızlı büyüyen yapıları, yüksek orandaki yağ içerikleri sayesinde mikroalgler enerji üretiminde de önemli bir yer tutmaktadır. Mikroalglerden enerji üretiminde kullanılan çeşitli yollar vardır. Bunlardan en etkili olanı ise mikroalgal biyokütleden elde edilen yağın biyodizele dönüştürülmesidir. Türe bağlı olarak mikroalgler oldukça farklı çeşitlerde lipidler, hidrokarbonlar ve diğer karmaşık yağları üretebilirler. Uygun koşullar altında bazı mikroalg türleri kuru ağırlık başına %50-70 oranında yağ biriktirebilirler. Bununla birlikte tüm mikroalgal yağlar biyodizel için elverişli değildir. Ancak yaygın olarak kullanıma uygundurlar. Ototrofik mikroalgler özel koşullar sağlanması durumunda CO_2'i karbon kaynağı ve ışığı enerji kaynağı olarak kullanabilirler. Bu özellik *Chlorella vulgaris, Batryococcus braunii, Navicula pelliculosa, Scenedesmus acutus, Crypthecodinium cohnii, Dunaliella primolecta, Monallanthus salina, Neochloris oleoabundans, Phaeodactylum tricornutum ve Tetraselmis sueica* gibi çoğu ototrofik mikroalg türlerinde bulunur (Pragya, Pandey, & Sahoo, 2013; Singh & Dhar, 2011). Bazı mikroalg türlerinde kuru madde bazında ana hücresel bileşenlerinin %'lik dağılımı Çizelge 2.1. de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Bazı Mikroalg Türlerinde Ana Hücresel Bileşenlerinin % Dağılımı (Dragone, Fernandes et al. 2010)

Mikroalg Türü	Protein	Karbonhidrat	Yağ
Anabaena cylindrica	43 - 56	25 - 30	4 – 7
Botryococcus braunii	40	2	33
Chlamydomonas rheinhardii	48	17	21
Chlorella pyrenoidosa	57	26	2
Chlorella vulgaris	41 - 58	12 - 17	10 - 22
Dunaliella bioculata	49	4	8
Dunaliella salina	57	32	6
Dunaliella tertiolecta	29	14	11
Euglena gracilis	39 - 61	14 - 18	14 - 20
Porphyridium cruentum	28 - 39	40 - 57	9 - 14
Prymnesium parvum	28 - 45	25 - 33	22 - 39
Scenedesmus dimorphus	8 - 18	21 - 52	16 - 40
Scenedesmus obliquus	50 - 56	10 - 17	12 - 14
Spirogyra sp .	6 - 20	33 - 64	11 - 21
Spirulina maxima	60 - 71	13 - 16	6 - 7
Synechoccus sp .	63	15	11
Tetraselmis maculata	52	15	3

2.1. Çevresel Faktörler

Mikroalg türlerinin uygun koşullar altında biyokütle verimlerini arttırarak yağ üretmedeki doğal yeteneklerinin yanı sıra ışık yoğunluğu, sıcaklık, besin maddesi, pH, karıştırma, tuzluluk gibi çevresel faktörler de mikroalgal biyokütle üretimini etkilemektedir.

2.1.1. Işık

Işık**,** fotoototrofik mikroalglerin temel enerji kaynağı olmasına karşılık varlığı ve yoğunluğu mikroalg kültürlerinin yetiştirilmesinde oldukça önemli bir rol oynamaktadır. Mikroalg kültürleri çok düşük ışık yoğunluklarında neredeyse hiç büyüme göstermezler. Ancak yeterli ışık yoğunluğuna sahip olduklarında kütlelerini erişebilecekleri maksimum değere ulaşıncaya arttırabilirler. Bununla birlikte ışık yoğunluğundaki aşırı artış büyüme hızını arttırmaz ve fotooksidasyona yol açabilir. Bu durumda ışık reseptörlerine zarar vererek fotosentez hızını ve biyokütle verimliliğini düşürebilir. Mikroalglerin fotosentetik etkinlikleri türe bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Örneğin, yeşil mikroalglerin fotosentez yaparken klorofil pigmentleri en iyi 450-475 nm ve 630-675 nm aralığındaki ışık enerjisini absorbe edebilmektedir. Bu nedenle aydınlık/karanlık döngüleri ve ışık şiddeti kültivasyonu yapılan türe göre seçilmelidir (Elcik & Çakmakcı, 2017; Richmond, 2008; Singh & Dhar, 2011).

Çizelge 2.2. Bazı Mikroalg Türlerinde Kullanılan Karanlık - Aydınlık Döngüleri ve Işık Şiddetleri (Elcik & Çakmakcı, 2017)

Mikroalg Türü	Aydınlık/Karanlık döngü (saat)	Işık Şiddeti ($\mu mol\ m^{-2} s^{-1}$)
Chlorella vulgaris	14/10	250
Tetraselmis suecica	12/12	125
Phaeodactylum tricornutum	12/12	125
Chlorococcum sp. RAP-13	13/11	40
Scenedesmus obliquus	14/10	250
Desmodesmus sp. EJ9-6	15/9	120
Nannochlropsis oculata	24/0	150
Spirulina platensis	12/12	27

2.1.2. Sıcaklık

Mikroalglerin büyümesine etki eden önemli faktörlerden birisi de sıcaklıktır. Pek çok tür için uygun sıcaklık koşulları 20-30 ^{0}C arasındadır. Sıcaklığın artması ile mikroalglerin büyüme hızları optimum seviyeye ulaşıncaya kadar artış gösterse de daha sonra azalmaya başlar. Türlerin büyümeleri için optimum sıcaklık değerlerinin üzerine çıkılması durumunda alg hücreleri ölebilir. Biyokütledeki kaybın karanlık dönemlerde daha yüksek sıcaklıklarda arttığı bilinmektedir. Bundan dolayı yetiştiriciliği yapılan mikroalg türünü aydınlık döngüde optimum sıcaklık değerine ulaştırmak ve karanlık döngüde sıcaklığı düşürmek gün boyunca yüksek biyokütle üretkenliğini sağlamak ve biyokütle kaybını en aza indirilmesine yardımcı olur (Chisti, 2008; Singh & Dhar, 2011).

2.1.3. Nütrientler

Mikroalglerin büyümesi için karbon, oksijen, hidrojen, azot, potasyum, kalsiyum, magnezyum, demir, sülfür, fosfor gibi elementlerin yanı sıra iz elementlere de ihtiyaç vardır. Ancak mikroalgal kültürler için en önemli besin maddeleri azot, fosfor ve karbondur. Mikroalgal biyokütlenin kuru ağırlık cinsinden büyük bir kısmını karbon oluşturmaktadır. Mikroalgler karbon kaynağı olarak hem organik hem de inorganik karbonu kullanabilme özelliğine sahiptir. Mikroalgal biyokütle için gerekli olan karbon atmosferde mevcut bulunan CO_2 gazı tarafından karşılanabilir. Azot ve fosfor elementlerini sağlamak içinse atıksuların zengin nütrient içeriğinden faydalanmak mümkündür (Richmond, 2008; Singh & Dhar, 2011).

2.1.3.1. Azot

Azot, mikroalglerin büyümesi, gelişimi, çoğalması ve diğer fizyolojik faaliyetler için en önemli unsurlardan biri olarak bilinmektedir. Genellikle hücre kuru ağırlığının yaklaşık olarak %7-10'unu oluşturan azot, alg hücrelerindeki tüm yapısal ve fonksiyonel proteinlerin temel bileşenidir. Aynı zamanda azot kaynağı

ve konsantrasyonuna bağlı olarak mikroalgal biyokütledeki yağ verimi etkilenebilir. Yapılan çalışmalar biyosentez ve lipit birikiminin çeşitli taksonomi grupları arasında azot sınırlayıcı koşullar altında biyokütle artışı sağladığını göstermiştir. Mikroalgler azot kaynağı olarak amonyum, nitrat, nitrit ve üre formlarını kullanabilmektedir. Ancak bu durum türe bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Yapılan araştırmalar mikroalgler tarafından azot formlarının absorpsiyon ve kullanım sıralamasını amonyum > üre > nitrat > nitrit olarak belirlemiştir (Elcik & Çakmakcı, 2017; Richmond, 2008; Singh & Dhar, 2011).

2.1.3.2. Fosfor

Fosfor tıpkı diğer bitkiler gibi mikroalglerin büyümesi ve gelişimi için gerekli olan çoğu yapısal ve fonksiyonel bileşenleri oluşturarak hücrenin fotosentez, solunum, enerji transferi, hücresel sinyal iletimi gibi metabolik faaliyetlerinde önemli rol oynayan makro besin maddesidir. Mikroalgler fosforun farklı formlarını metabolize edebilirler. Ortofosfat, fosfor formları arasında mikroalgler tarafından kolay bir şekilde absorbe edilebilir ve mikroalg gelişimine önemli katkı sağlar. Fosfor da tıpkı azot gibi mikroalglerin lipit üretimin etkilemektedir. Yapılan çalışmalar fosfor sınırlayıcı şartlar altında bazı türlerin lipit üretimini artırdığını göstermiştir (Borowitzka & Moheimani, 2013; Richmond, 2008).

2.1.4. Karbondioksit

CO_2, bitkiler ve mikroalglerin fotosentez yapması için sınırlayıcı faktörlerden birisidir. Mikroalglerin fotosentez yapabilmesi için ortamda belirli bir konsantrasyonda CO_2 bulunmadır ve maksimum fotosentetik verimlilik %1 - 5 arasındaki CO_2 konsantrasyonları ile elde edilir. Ortamdaki CO_2 seviyesinin artması fotosentez etkinliğini arttırarak mikroalgal biyokütlenin gelişimine katkı sağlar.

2.1.5. pH

Mikroalglerin gelişimini etkileyen diğer bir önemli parametre pH'dır. Ortamda bulunan inorganik karbonun miktarını belirleyen ana faktör olarak bilinmektedir. pH değeri 5'in altına düştüğü durumlarda ortamdaki çözünmüş inorganik karbonların büyük çoğunluğu CO_2 formundadır. pH 6,6 olduğunda, CO_2 ve HCO_3^- eşit, pH 8,3 olduğunda ise neredeyse tümü HCO_3^- formunda olur. Bu sebeple kültivasyon sırasında mikroalglerin CO_2 emilimini ve kullanımını arttırmak için pH değeri sürekli olarak kontrol edilmelidir. Mikroalgler fotosentez yaparken CO_2'i kullanılır ve böylelikle ortamın pH değerinde yükselme olur. Yükselen pH değeri hidroklorik asit veya asetik asit ile kontrol edilebilir. Genellikle 10-11 üzerinde pH değerleri mikroalglerin gelişimini olumsuz etkilemektedir. Çoğu mikroalg türü için uygun pH aralığı 7-9 arasında olduğu bilinmektedir (Elcik & Çakmakcı, 2017; Junying, Junfeng, & Baoning, 2013).

2.1.6. Karıştırma

Karıştırma işlemi büyümeyi etkileyen önemli parametredir. Karıştırma sayesinde hücrelerin dağılımı, ısısı, metabolitlerin homojenizasyonu ve gaz transferleri kolaylaşır. Karıştırma sayesinde mikroalglerin çökmeleri engellenir ve besin maddesinin kullanımı kolaylaşır. Karıştırmanın yavaş olması durumunda kültür içerisinde karanlık bölgeler oluşabilir ve bu durum anaerobik bölgeler oluşturarak mikroalglerin gelişimini olumsuz etkileyebilir. Karıştırmanın hızlı olması durumunda ise mikroalgal hücreler kesme gerilmesinden dolayı zarar görebilir. Bu nedenle optimum karıştırma seviyesi türe bağlı olarak değişmektedir ve kültivasyon sırasında bu durum mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır (Mata et al., 2010).

2.1.7. Tuzluluk

Mikroalgal hücrelerdeki biyokütle üretimini ve yağ verimliliğini etkileyen stres faktörlerinden bir tanesi tuzluluktur. Kültivasyon esnasında her mikroalg türü

için optimum tuzluluk değeri farklılık göstermektedir. Mikroalg türleri, tuzluluk stresini bir dereceye kadar tolere edebilir. Örmeğin deniz mikroalglerinden olan *Dunaliella sp*. yüksek tuzluluk stresi altında yüksek miktarda biyokütle ve lipit üretimi gerçekleştirebilmektedir. Tatlı su mikroalglerinden olan *Chlorella vulgaris*, *Microcystisa eruginosa* gibi türler ise daha az tuzlu besin ortamlarında daha iyi gelişim göstermektedirler (Minhas, Hodgson, Barrow, & Adholeya, 2016; Rashid, Rehman, Sadiq, Mahmood, & Han, 2014).

2.2. Mikroalg Üretim Sistemleri

Doğal büyüme koşulları altında mikroalgler güneş ışığını absorbe eder, atmosferde bulunan mevcut CO_2 kullanır ve sucul ortamdaki besin maddelerinden faydalanır. Bu nedenle kontrollü üretim sistemleri doğal habitat şartları göz önünde bulundurularak optimum koşullarda çoğaltma ve geliştirme sistemine dayalı olmalıdır (Brennan & Owende, 2010). Mikroalg üretim sisteminin seçimi mikroalgal üretim sürecinin verimliliğini ve maliyet etkinliğini önemli ölçüde etkileyen bir unsurdur. Biyokütle üretimi için kullanılan mikroalgal kültivasyon sistemleri arasında geniş bir varyasyon vardır (Singh & Dhar, 2011). Mikroalg üretim sistemleri açık ve kapalı olmak üzere ikiye ayrılabilir. Açık sistemlerde mikroalg kültivasyonu dairesel, eğimli, karıştırmasız ve yarış pisti olarak sınıflandırılan açık havuzlarda gerçekleşir. Kapalı sistemler ise, tüp şeklinde, dikey, düz plaka, halka şeklinde, fermenter tipi ve dahili ışıklandırılmış fotobiyoreaktörler dahil birçok türde kategorize edilebilen fotobiyoreaktör ile gerçekleştirilebilir (Suali & Sarbatly, 2012).

2.2.1. Açık-Hava Sistemleri

Mikroalg üretiminde açık sistemlerin kullanılması 1950'li yıllarda başlamasına karşılık son yıllarda yapılan araştırmalarda yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Açık sistemler bugün büyük ölçekli ticari mikroalg yetiştiriciliğinde en çok kullanılan sistemdir (Dragone et al., 2010). Uygulama da en çok kullanılan

büyük ölçekli üretim sistemleri arasında yarış pisti tipi olarak bilinen yüksek oranlı mikroalg havuzlarıdır (YOMH) (Christenson & Sims, 2011). Bu sistemlerde mikroalg, su ve besinler karıştırıcı pedal sayesinde bir pistin etrafında sürekli olarak dolaşır (A. Demirbas, 2010). YOMH'lar kapalı sistemlerle karşılaştırıldığında düşük maliyetli ve yüksek üretim kapasitesine sahip olması bu sistemin yaygınlaşmasında etkili olmuştur (Mata et al., 2010). Genel olarak yarış pisti tipi havuzlar oval biçimli kapalı döngü resirkülasyon kanalından oluşur. Derinlikleri 0,2-0,5 metre arasında olup mikroalgal büyümeyi ve verimliliği destekleyici karıştırma ve dolaşımdan oluşurlar. Havuz içerisine yerleştiren karıştırıcı pedal sayesinde mikroalglerin çökmesi engellenir, besin sirkülasyonu sağlanır. Sistemde kültivasyon sırasında mikroalg ihtiyaç duyduğu CO_2'i atmosferden alır. CO_2 emilimini artırmak için havuz içerisine havalandırma motorları yerleştirilebilir (Brennan & Owende, 2010). Yarış pisti havuz uygulamasında mikroalg üretim veriminin 10-20 g/m^{2}gün aralığında değiştiği bazı kaynaklarca rapor edilmiştir (Christenson & Sims, 2011). Yarış tipi havuzlarda, *Chlorella* (besin açısından zengin ortamlara adapte), *Spirulina* (yüksek alkaliniteye adapte) ve *Dunaliella* (yüksek tuzluluğa adapte) türleri ticari olarak üretilen en yaygın türlerdir (Brennan & Owende, 2010; Dragone et al., 2010).

2.2.2. Kapalı Sistemler

Kapalı fotobiyoreaktör teknolojisi ile mikroalg üretimi, açık havuz üretim sistemlerinde meydana gelen bazı problemlerin üstesinden gelmek için tasarlanmıştır. Açık havuz sistemlerinden farklı olarak, fotobiyoreaktörler, daha düşük kontaminasyon riski ile uzun süreli üretim verimliliği sağlamaktadır. Fotobiyoreaktör sistemi ile kültivasyonu gerçekleştirilen mikroalg türleri kontaminasyon riski olmadığından ötürü genellikle kozmetik ve ilaç endüstrilerinde kullanılmaktadır (Brennan & Owende, 2010). Fotobiyoreaktörler tek tür mikroalg kültivasyonunun yapıldığı farklı türlerde tanklar veya kapalı sistemlerdir. Pek çok çeşidi bulunmakla birlikte tübüler, düz plaka, dikdörtgen,

sürekli karıştırmalı vb. birçok fotobiyoreaktör sistemi mevcuttur (A. Demirbas, 2010). En yaygın kullanıma sahip olan tübüler fotobiyoreaktörler cam veya esnek plastik malzemelerden üretilen şeffaf tüpler şeklinde dizayn edilmektedir (Elcik & Çakmakcı, 2017). Tübüler fotobiyoreaktörler yatay/dikey, eğimli veya sarmal şekilde olabilir. Tüpler genellikle reaktörün aydınlatma yüzey-hacim oranını en üst düzeye çıkarmak için birbirine paralel veya zeminden düz olarak yerleştirilir. Tüplerin çapı küçük ve sınırlıdır (0.2m çapında veya daha az). Tüpün merkezine ışık penetrasyonunu sağlamak için ışık katsayısı ve doğrusal büyüme hızı artan birim çapıyla azalır. Büyüme ortamı bir rezervuardan reaktöre ve daha sonra rezervuara geri döner. Besinlerin dağılmasını sağlamak, gaz değişimini arttırmak, hücre çökelmesini en aza indirmek, ışık ve karanlık bölgeler arasında eşit ışıklandırma için biyokütleyi dağıtmak amacıyla reaktörde türbülanslı bir akış korunur (A. Demirbas, 2010). Mikroalgler bir pompa yardımı ile veya hava emiş teknolojisi ile tüpler arasında dolaştırılır (Dragone et al., 2010).

Kapalı sistemlerin en eski formlarından biri olan düz plaka fotobiyoreaktörler maksimum ışık temasını sağlamak için saydam malzemeden üretilmiştir (Brennan & Owende, 2010). Işığa temas eden geniş yüzey alanı ve yüksek yoğunlukta (> 80 g l-1) gözlenen fotoototrofik hücreler nedeniyle düz plaka reaktörler yoğun araştırmalara konu olmuştur (Dragone et al., 2010). Yüksek fotosentetik verimliliği, maliyetinin düşük olmasına karşılık CO_2 difüzyon oranını ve kültür ortamının sıcaklığının kontrolündeki zorluklar, mikroalglerin yüzeye tutunma eğilimleri sistemin darboğazlarıdır (A. Demirbas, 2010).

Dikdörtgen tanklar, diğer bir fotobiyoreaktör sistemidir. Tübüler reaktör tasarımından farklı olarak, yeterince yüksek bir gaz hızı kullanıldığında dikdörtgen tanklar ayrıca bir karıştırma cihazına ihtiyaç duymaz. Drenaj boruları ve gaz dağıtıcı tankın altında bulunur (A. Demirbas, 2010).

Sürekli karıştırmalı tank reaktörleri, hem iç hem de dış ortamlarda düşük kontaminasyon riskiyle çalışan geniş, içi boş, silindirik bir borudan oluşur. Mekanik karıştırıcı ve ışık kaynağı reaktörün üst kısmında, drenaj kanalları ve gaz

enjektörleri, reaktörün alt (ve ortada) kısmında yer alır. Reaktör içinde oluşturulan tek tip türbülanslı akış, mikroalg kültürünün gelişimini destekler ve kirlenmeyi önler (A. Demirbas, 2010). Maliyetleri düşük, kompakt ve kullanımı kolaydır (Brennan & Owende, 2010; Dragone et al., 2010).

Çeşitli mikroalg üretim sistemlerinin avantaj ve dezavantajları Çizelge 2.1. de özetlenmiştir.

Çizelge 2.3. Çeşitli Mikroalg Üretim Sistemlerinin Avantaj ve Dezavantajları (Dragone, Fernandes et al. 2010)

Mikroalg Üretim Sistemleri	Avantajları	Dezavantajları
Açık havuz sistemi 	- Yatırım ve işletme maliyetlerinin nispeten ucuz olması - Tarıma elverişli olmayan arazilere kurulabilmesi - Enerji girdilerinin düşük olması - Bakım ve temizliğinin kolay olması	- Biyokütle verimi düşüktür - Değişken çevresel faktörler - Kontaminasyon riski yüksektir - Sınırlı tür yetiştirme imkanı
Kolon Tipi Fotobiyoreaktör 	- Biyokütle verimliliği yüksektir - Alan ihtiyacı azdır - Kontaminasyon riski düşüktür - Enerji ihtiyacı düşüktür - Sterilizasyonun kolaydır - Fotoinhibasyon riski düşüktür	- Açık sistemlere göre maliyeti oldukça yüksektir - Sıcaklık kontrolünde zorluklar mevcuttur - Reaktör tasarımlarımı karmaşıktır - Akış gerilim stresi oluşturur
Panel Tipi Fotobiyoreaktör 	- Alan kullanım verimliliği yüksektir - Kontaminasyon riski düşüktür - Enerji ihtiyacı düşüktür - Temizliği kolaydır - Maliyet nispeten düşüktür - Dış ortamlar için uygundur - Işıktan yararlanma yüzeyi yüksektir	- Büyük işletme kurma zorluğu - Sıcaklık kontrolünde zorluklar - Düşük fotosentetik verimlilik - Panel duvarlarında tutunarak büyüme - Hidrodinamik stres oluşturur
Tabular Tip Fotobiyoreaktör 	- Biyokütle verimliliği yüksektir - Maliyet nispeten düşüktür - Işıktan yararlanma yüzeyi yüksektir - Dış ortamlar için uygundur - Yüksek değerli ürünler yetiştirilebilir	- Panel duvarlarında tutunarak büyüme - Arazi ihtiyacı yüksektir - Fotoinhibasyon riski yüksektir - Yüksek Çözünmüş Oksijen, CO_2, pH değişimleri

2.3. Mikroalglerin Hasat Yöntemleri

Hasat tekniğinin seçimi mikroalg kültürünün boyutuna, yoğunluğuna ve hedef ürünlerin özelliğine göre değişiklik göstermektedir (Singh & Dhar, 2011). Mikroalgal biyokütlenin kültür ortamından ayrılması için hasat işlemleri bir veya

daha fazla katı-sıvı ayırma adımını içerir. Yapılan çalışmalar mikroalglerin hasat işleminin, toplam mikroalg üretme maliyetinin en az %20-30'unu oluşturduğunu göstermiştir. Oluşan bu maliyetin temel nedeni ise mikroalglerin boyutlarının küçük olması (3-30 µm çap) ve kültür ortamlarındaki düşük konsantrasyonlarından (bazı endüstriyel üretim birimlerinde 500 mg/L^{-1}'nin altında) kaynaklanmaktadır (Richmond, 2008). Mikroalgal biyokütlenin hasadı fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemlerle yapılabilir.

2.3.1. Flokülasyon

Flokülasyon yöntemi mikroalgal biyokütlenin parçacık boyutunu artırmak ve hücrelerin bir araya toplanmasını amaçlayan toplu hasat için ilk aşamadır (Brennan & Owende, 2010). pH ayarlaması ve elektrolit ilavesinin sonucunda oluşan birleşme koagülasyon, polimer ilavesinin sonucu olan birleşme ile floklaşma olarak tabir edilmektedir (Richmond, 2008). Mikroalg hücreleri, süspansiyonda kendiliğinden toplanmalarını önleyen bir negatif yük taşıdığından, topaklayıcılar olarak bilinen kimyasalların eklenmesi, negatif yüzey yükünü nötralize eder veya azaltır. Bu kimyasallar, bileşimi ve ürünün toksisitesini etkilemeden mikroalgleri pıhtılaştırır. Bu proses ile mikroalgler hasat edilirken $Al_2(SO_4)$, $Fe_3(SO_4)$ ve $FeCl_3$ gibi metal tuzlar koagülant olarak kullanılmaktadır (Dragone et al., 2010).

2.3.2. Flotasyon

Flotasyon yöntemi ile hasat işlemi, mikro-hava kabarcıkları kullanılarak mikroalg hücrelerinin yukarı doğru çekilmesine dayanır ve bu nedenle, flokülasyondan farklı olarak, herhangi bir kimyasal ilavesi gerektirmez. Bazı türler, mikroalgal lipit içeriği arttıkça suyun yüzeyinde doğal olarak yüzer. Flotasyon potansiyel bir hasat yöntemi olarak belirtilmesine rağmen, teknik veya ekonomik uygulanabilirliği konusunda çok sınırlı literatür bilgisi mevcuttur (Brennan & Owende, 2010; Dragone et al., 2010).

2.3.3. Santrifüj

Santrifüj ile hasat yöntemi mikroalgal biyokütlenin merkezkaç kuvveti ile besi ortamından ayrılması işlemi olarak tanımlanabilir. Hemen hemen her tür mikroalg, santrifüj yöntemi ile kültür ortamından ayrılabilir (Richmond, 2008). Santrifüj yöntemi ile mikroalgal kütlenin geri kazanımı özellikle uzun süreli raf ömrü olan alg konsantrasyonları üretmek için hızlı bir yöntemdir. Ancak hızlı bir yöntem olmasının yanında enerji sarfiyatının yüksek olmasından dolayı büyük hacimler göz önünde alındığında maliyet etkin bir yöntem olmayabilir (Brennan & Owende, 2010; Dragone et al., 2010).

2.3.4. Filtrasyon

Filtrasyon ile hasat yöntemi diğer yöntemler ile karşılaştırıldığında daha uygulanabilir bir yöntem olarak önem kazanmaktadır (Dragone et al., 2010). Filtrasyon yönteminde mikroalg kültürü uygun gözenek çaplı bir filtreden geçirilerek besi ortamından ayrılması sağlanır. Bu süreç filtreler kalın bir mikroalg tabakası ile kaplanana kadar sürekli olarak tekrarlanır. Mikro, ultra, vakum, basınç ve nano filtrasyon vb. gibi filtrasyon yöntemleri mevcuttur. Daha büyük tanecik boyutuna sahip algler, filtreleme yardımı ile birlikte vakumlu filtrasyon ile etkin bir şekilde geri kazanılırken, mikro filtrasyon veya ultra filtrasyon, küçük tanecik boyutlu alglerin geri kazanılmasında etkilidir. Ancak, vakum ve mikro filtrasyon yöntemleri yüksek maliyetlidir. Ayrıca, kirlenme nedeniyle sık sık filtre değişimleri gerektirir. Ancak, santrifüj ile birlikte kullanıldığında, daha iyi ayırma verimine sahiptir. Filtrasyon yöntemleri, ilgi çekici bir susuzlaştırma seçeneği olmasına rağmen, kapsamlı işletme maliyetlerine ve gizli ön konsantrasyon gereksinimlerine sahiptir (Dragone et al., 2010; Pragya et al., 2013).

3. MİKROALGAL ATIKSU ARITIMI

3.1. Atıksular

Hızlı nüfus artışı ve hızla gelişen endüstriyel ve tarımsal modernizasyon, alıcı ortama verilmeden önce mutlaka arıtılması gereken yüksek oranda evsel, endüstriyel ve tarımsal atıksuların oluşumuna neden olmaktadır. Söz konusu atıksular su kaynaklarının kalitatif ve kantitatif sürdürülebilirliği üzerinde çok ciddi tehditler oluşturmaktadır.

Atıksuların zengin nütrient içeriğinin mikroalgler için besin kaynağı olması, düşük maliyetli oluşu ve organik atığın oldukça azalması nedenleriyle, atıksuların mikoalglerle arıtımı son yıllarda oldukça ilgi görmektedir. Atıksu arıtımında bu alternatif yaklaşım aktif çamur arıtım proseslerine göre daha fazla giderim verimliliğine sahiptir. Ayrıca, alıcı ortama verilen deşarj suyunda yüksek düzeyde oksijen bulunması, yüzey su kaynaklarına yönelik ötrofikasyon riskini azaltması, oluşan mikroalgal biokütlenin önemli oranda protein ve yağ içermesi mikroalgal arıtım prosesinin diğer avantajlarıdır (Zhao, Ge, Lui, & Sun, 2016).

Kaynağına bağlı olarak atıksular kentsel, tarımsal ve endüstriyel kaynaklı atıksular olarak üç ana tipe ayrılabilir. Atıksu arıtımında kullanılan geleneksel metotlarda atıksular çeşitli işlemlere tabi tutulurlar. Bunlar iki veya üç aşamadan oluşabilir. Birinci aşama suda bulunan katı maddelerin sedimentasyonu veya yüzdürülmesi, ikinci aşama suda bulunan askıda katı maddeler ve çözünmüş maddelerin fiziksel, kimyasal ve biyolojik proseslerle uzaklaştırılması, üçüncü aşama ise dezenfeksiyon, filtrasyon proseslerini içerir. Tüm bu işlemler sonucunda atıksu arıtılmış olarak adlandırılmaktadır (Chiu et al., 2015).

3.1.1. Kentsel Atıksular

Artan nüfus ve şehirleşme ile birlikte kentsel kaynaklı atıksuların büyük oranda artmasına sebep olmuştur. Kentsel atıksuların içeriğini genel olarak organik atıklar, mikroorganizmalar, evsel ve endüstriyel kimyasal maddeler

oluşturmaktadır. Bu atıksuların içeriği bölgeden bölgeye önemli derecede farklılık göstermektedir. Endüstriyel ve tarımsal kaynaklı atıksular ile kıyaslandığında kentsel atıksular daha az N ve P içeriğine sahiptir. Buna rağmen kentsel atıksular içeriğindeki yüksek organik ve inorganik maddeler sayesinde mikroalg yetiştiriciliğinde kullanılmış olup bununla ilgili çalışmalar mevcuttur. Günlük olarak üretilen atıksu miktarı oldukça yüksek olduğundan, kentsel atıksularda mikroalg yetiştiriciliği yapılabilir. Ancak bazı yörelerde endüstriyel atıksuların kanalizasyona verilmesi nedeniyle kentsel atıksuların içeriğinde kurşun, çinko ve bakır gibi ağır metallerin yüksek oranda bulunmasına sebep olmaktadır. Bu durum bazı mikroalg türleri için toksik etkiye neden olmaktadır (Abinandan & Shanthakumar, 2015; Chen, Zhao, & Qi, 2015).

3.1.2. Tarımsal Kaynaklı Atıksular

Genel olarak tarım sektörü az sayıdaki bölge haricinde dünyanın en büyük su kullanıcısıdır. Tarımsal kaynaklı atıksuların önemli bir kısmını oluşturan büyükbaş ve küçükbaş hayvancılık faaliyetlerinde son yıllarda büyük bir artış olmuştur. N ve P hayvan çiftliklerinde üretilen atıksuyun ana bileşenlerini oluşturmaktadır.

Kentsel kaynaklı atıksularla kıyaslandığında, tarımsal kaynaklı atıksuların N ve P bakımından daha zengin olduğu bilinmektedir. Tarımsal kaynaklı atıksuların nütrient bakımından zengin olması, bu atıksuların mikroalg üretiminde alternatif bir besin kaynağı olabileceğinin göstergesidir. Mikroalgler tarımsal kaynaklı atıksularda büyüyebilir ve verimli bir şekilde nütrient giderimi sağlayabilirler. Bununla birlikte tarımsal kaynaklı atıksulardaki nütrientlerin ve diğer bileşiklerin yüksek konsantrasyonlarda bulunması mikroalglerin büyümelerine engel olabilir. Aynı zamanda suyun yüksek bulanıklığı mikroalgal büyümedeki ışık penetrasyonunu azaltacaktır. Bu nedenle atıksu kullanılmadan önce mutlaka seyreltilmelidir (Chen et al., 2015; Chiu et al., 2015; Pittman et al., 2011).

3.1.3. Endüstriyel Atıksular

Endüstriyel atıksular mevcut su kirliliğinin en önemli kaynaklarından birisidir. Atıksular, organik karbonun yanı sıra önemli miktarlarda organik/inorganik; azot, protein, amonyak, nitrat, fosfar gibi nütrientler içerirler. Bu nütrientler sucul ortamlarda ötrofikasyon, bebeklerde methemoglobinemi ve insanlarda kalp fonksiyonunda bozukluklara neden olabilirler (Kothari, Prasad, Kumar, & Singh, 2013). Farklı endüstrilere ve kirletici maddelere dayalı pek çok endüstriyel atıksu vardır. Her sektör kendi özel kirletici kombinasyonunu üretir. Tarımsal atıksularla kıyaslandığında, endüstriyel atıksuların nütrient konsantrasyonu düşük ancak ağır metal konsantrasyonu yüksek olabilir. Endüstriyel atıksuların içeriğinin karmaşıklığından dolayı mikroalgal biyokütleden yüksek verim elde etmek için atıksunun kompozisyonu incelenerek, bu kompizisyona toleransı yüksek olan mikroalg türünün seçilmesi artıma verimi bakımından avantaj sağlayacaktır (Chiu et al., 2015).

3.1.4. Atıksulardan Nütrient Giderimi

Su ekosistemi, kentleşme, sanayileşme, tarım ve diğer değişimlerden gelen antropojenik faaliyetlerden ciddi şekilde etkilenmektedir. Tüm bu aktiviteler sonucu oluşan atıksularda bulunan, azot ve fosfor gibi elementlerin varlığı ve bunların doğal su kütleleri üzerindeki etkileri büyük önem taşımaktadır. Ötrofikasyon genellikle birincil inorganik besinlerde, özellikle azot ve fosforda bir artış olarak kabul edilir (Richmond, 2008). Nütrient bakımından zengin atıksuların arıtılmadan yüzey sularına deşarj edilmesi sonucu su kalitesinde bozulmaya, balık ölümlerine, düşük çözünmüş oksijen konsantrasyonu ile flora ve faunaya ciddi zararlar verebilir. Ötrofikasyon riski, atıksulardan fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçler yoluyla nütrientlerin uzaklaştırılması işlemlerinin geliştirilmesine yol açmıştır. Genel olarak, atıksulardaki azot ve fosforun giderimi için atıksu arıtım teknolojileri kapsamında geliştirilmiş oksidasyon hendekleri, A^2/O, UCT,

Bardenpho vb. nütrient gideriminde tatmin edici düzeyde başarı sağlayan ve aşağıda kısaca açıklanan ileri arıtım prosesleri içermesi gerekmektedir.

- ***Oksidasyon Hendekleri:*** bu hendeklerde atıksular havalandırma sistemleri ile havalandırılır ve aynı zamanda itme kuvveti ile kanala düşmeleri sağlanır. Oksidasyon hendeğinde hava alan bölüm havalandırıcı ile yönlendirilen su akışının ön kısmında, anoksik bölüm ise havalandırıcının arka kısmında bulunur. Atıksunun çıkış noktası reaktörün havalandırma bölümündedir. Sistemde tek bir anoksik bölüm olmasından dolayı N giderimi Bardenpho prosesine göre düşüktür.
- ***A^2/O:*** bu proses denitrifikasyon için anoksik bir bölüm içermektedir. Anoksik bölümde kalma süresi yaklaşık olarak bir saattir. Bu bölümde çözünmüş oksijen konsantrasyonu düşüktür ancak nitrat ve nitrit formunda bulunan kimyasal bağlı oksijen havalı bölümden geri devir yapılarak sisteme verilir. Bu sistemde işletme kolaylığı olmasının yanı sıra N ve P giderim verimi düşüktür.
- ***UCT:*** genel olarak A^2/O prosesine benzemesine karşılık bu proseste aktif çamurun havalandırmalı bölüm yerine anoksik bölüme geri dönmesidir. Anoksik bölüme geri dönen aktif çamur ile nitrat havasız bölüme girmeden, havasız bölümde fosfor elementinin daha iyi bir şekilde açığa çıkması sağlanmış olur.
- ***Bardenpho Prosesi (5 basamaklı):*** N gideriminde kullanılan klasik Bardenpho prosesinin P giderimi içinde modifiye edilmiş şeklidir. Beş basamaktan oluşan bu sistem havalı, havasız ve anoksik bölümleri içerir. Havasız ve anoksik bölüm N, P ve C gideriminde rol oynamaktadır. Beşinci basamak P giderimi için tasarlanmıştır.

Ancak, bu proseslerin önemli bir bölümü yüksek yatırım ve işletme maliyeti, kompleks işletim prosedürü ve büyük miktarlarda atık çamur oluşumu gibi sorunlarını da beraberinde getirmektedir. Çeşitli fiziko-kimyasal arıtma yöntemlerinde yüksek miktarda kimyasal madde kullanımı, enerji tüketimi ve insan gücüne ihtiyaç duyulmaktadır. (Kothari, Pathak, Kumar, & Singh, 2012; Mennaa, Arbib, & Perales, 2015; Sathasivan, 2009).

3.2. Mikroalgal Nütrient Giderimi

Son yıllarda atıksuların kullanılarak mikroalg yetiştirilmesine yönelik araştırmalarda önemli bir artış söz konusudur. Araştırma sonuçlarından elde edilen veriler, mikroalglerin atıksudan azot, fosfor ve ağır metal gideriminde yüksek verim sağladığını göstermiştir. İnorganik azot ve fosforu atıksudan uzaklaştırmak oldukça zor bir işlemdir. Mikroalgler bu iki su kirleticisini büyümeleri için gerekli nütrient olarak kullanabilme yetenekleri sayesinde atıksuda bulunan inorganik azot ve fosfor konsantrasyonunu asimile ederek azaltırlar. Birçok mikroalg türü bu özellikleri sayesinde atıksularda etkin bir şekilde biyokütle artışı sağlayabilir. Atıksu arıtımında önemli bir yer tutan özellikle yüksek konsantrasyonda bulunan N ve P besin maddelerinin uzaklaştırılması gerekmektedir. Aksi takdirde bu besinler nehirlerde ve göllerde birikirse ötrofikasyona neden olabilir. (Chiu et al., 2015; Pittman et al., 2011).

Atıksu arıtımında bu alternatif yaklaşım aktif çamur arıtım proseslerine göre daha fazla giderim verimliliğine sahiptir. Ayrıca, alıcı ortama verilen deşarj suyunda yüksek düzeyde oksijen bulunması, yüzey su kaynaklarına yönelik ötrofikasyon riskini azaltması, oluşan mikroalgal biyokütlenin önemli oranda protein ve yağ içermesi mikroalgal arıtım prosesinin diğer avantajlarıdır (Chiu et al., 2015; Pittman et al., 2011). Genel olarak mikroalgler atıksu arıtımında, bazı mikroalg türleri ile koliform bakterilerin elimine edilmesi, hem kimyasal hem de biyolojik oksijen ihtiyacının azaltılması, N, P ve ağır metallerin sudan

uzaklaştırılması gibi uygulamalarda kullanılabilir (Abdel-Raouf, Al-Homaidan, & Ibraheem, 2012).

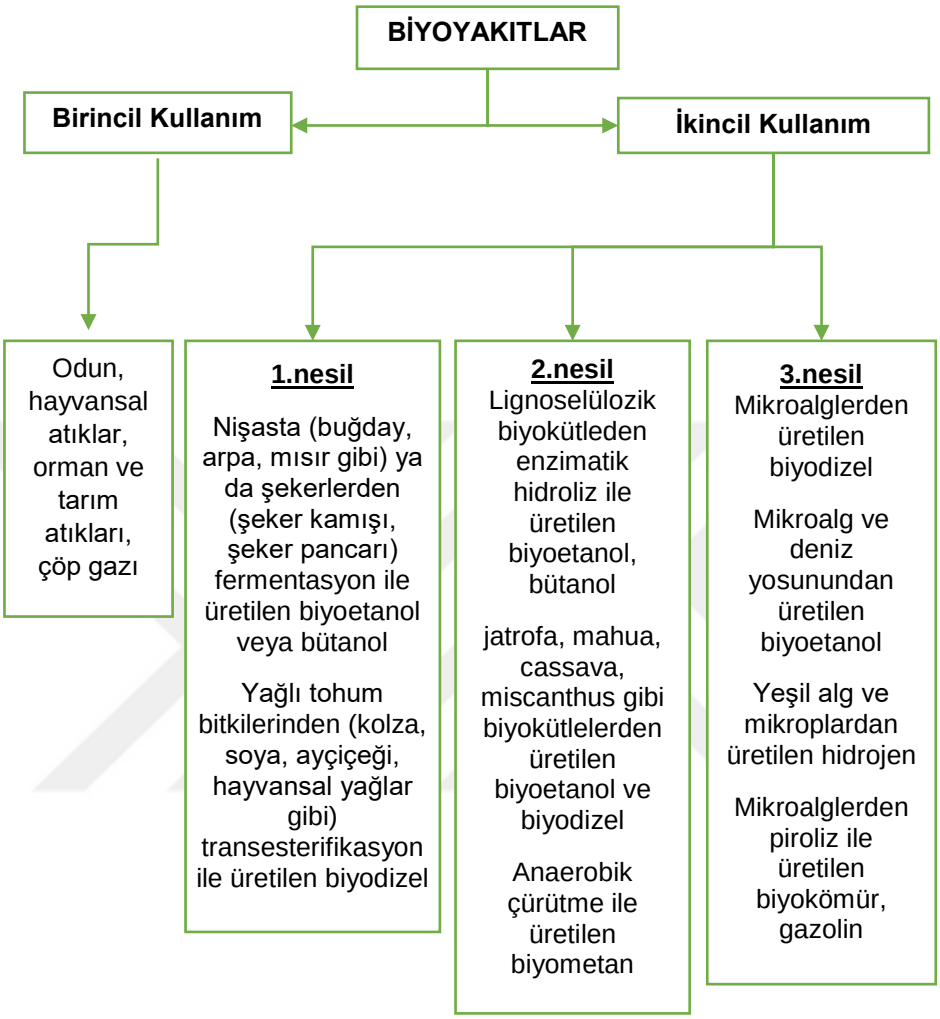
Mikroalgler temiz su ve deniz suyu, kentsel, endüstriyel ve tarımsal kaynaklı atıksular gibi çeşitli sucul ortamlarda büyüyebilirler. Bol miktarda nütrient içeren atıksular temiz su ve deniz suyu ile kıyaslandığında mikroalgler için daha cazip bir büyüme ortamı sağlamaktadır (Zhou et al., 2014). Bu yöntem bize atıksuların kimyasal madde kullanmaksızın etkin bir şekilde düşük maliyetle arıtılması olanağını sağlamaktadır (Chen et al., 2015). Bu konuda yapılan çalışmaların büyük çoğunluğunu laboratuvar ölçekli pilot havuzlar kullanılarak yetiştirilen mikroalgler ile yapılan çalışmalar oluşturmaktadır. Çalışmaların asıl amacı ise sularda istenmeyen N, P ve bazı diğer metallerin mikroalgler ile giderim veriminin analiz edilmesidir (Pittman et al., 2011). Çeşitli fiziko-kimyasal arıtım metotları yüksek miktarda kimyasal madde, enerji ve insan gücü gerektirmektedir. Ancak atıksuların biyolojik arıtma yöntemleri daha çevreci, ekonomik ve sürdürülebilir bir yaklaşım olarak kabul görmektedir. Biyolojik arıtma metotlarında mikroalglerin kullanılması karbon tutma kapasiteleri ve N, P ve S gibi önemli kirleticileri sudan uzaklaştırmasından dolayı tercih edilmesi gereken arıtım yöntemidir. Atıksu, mikroalgler için potansiyel bir büyüme ortamıdır. Atıksu arıtımında mikroalglerin kullanılması ekstra nütrient beslemesi olmaksızın düşük maliyetle biyokütle üretiminde ciddi bir artış sağlanabilir. (Kothari et al., 2013).

4. MİCROALGAL BİYOKÜTLE VE BİYOYAKITLAR

4.1. Biyoyakıt

Son yıllarda artan nüfus, gelişen teknoloji ile birlikte enerjiye duyulan ihtiyaçta küresel olarak bir artış göstermiş ve buna bağlı olarak fosil yakıtların kullanımı da önemli ölçüde artmıştır. Düşük maliyetli olması fosil yakıtları cazip bir enerji kaynağı haline getirse de, atmosfere yaydığı CO_2 ile birlikte sera gazı emisyonlarını arttırarak küresel iklim değişikliğine neden olmasından dolayı günümüzde bu yakıtların yerini alabilecek yenilenebilir, çevre dostu enerji kaynaklarına olan yönelim her geçen gün artmaktadır. Biyoyakıtlar en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından birisidir. Piyasa da kullanılan önemli biyoyakıtlar şeker kamışı veya mısır nişastasından elde edilen biyoetanol ve yağlı tohumlardan elde edilen biyodizeldir. Ancak tarımsal kaynaklı biyoyakıtların ekonomik olarak fosil yakıtlar ile rekabet edememesi ve özellikle verimli arazilerin kullanılması sonucu gıda güvencesini tehlikeye atması gibi önemli dezavantajları bulunmaktadır (Pittman et al., 2011).

Biyoyakıt terimi, ağırlıklı olarak biyolojik olarak yenilenebilir besleme stoklarından üretilen katı, sıvı veya gaz yakıtlar olarak adlandırılır. Biyoetanol ve biyodizel olmak üzere iki adet biyolojik olarak yenilenebilir yakıt vardır. Üretimi neredeyse tamamen gıda ürünlerinden olan biyoetanol iyi bir alternatif yakıt türüdür. Ancak biyodizel, diğer yakıt çeşitleri ile kıyaslandığında çevre dostu olması nedeniyle son zamanlarda daha cazip hale gelmiştir. Biyoyakıtlar üretim teknolojilerine göre: birinci nesil biyoyakıtlar, ikinci nesil biyoyakıtlar ve üçüncü nesil biyoyakıtlar olarak sınıflandırılabilir (M. F. Demirbas, 2011). Biyoyakıtların şematik olarak sınıflandırılması Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Biyoyakıtların şematik olarak sınıflandırılması (Dragone, Fernandes et al. 2010)

4.2. Mikroalg ve Biyodizel

Enerji üretimi içim mikroalglerin kullanılması 50 yılı aşkın bir süredir devam etmekle birlikte, yakın zamanlarda sıvı yakıtlar üretmek için mikroalg hücrelerinden elde edilen lipitlerin kullanılması kavramı ortaya çıkmıştır. Mikroalglerden sıvı yakıt elde edilmesi 1980'lerin ortalarında başlamıştır (A. Demirbas, 2010). Mikroalgler, yeterli ışık kaynağı varlığında pratik olarak her

yerde büyüyebilir. Türe bağlı olarak mikroalgler oldukça farklı çeşitlerde lipitler, hidrokarbonlar ve diğer karmaşık yağları üretebilirler. Mikroalgal yağın en belirgin ayırt edici özelliği biyokütle verimi ve dolayısıyla biyodizel verimidir. Hızlı büyüyen yapıları, yüksek oranda ki yağ içerikleri sayesinde mikroalgler enerji üretiminde önemli bir yer tutmaktadır. Bunlardan en etkili olanı ise mikroalgal biyokütleden elde edilen yağın biyodizele dönüştürülmesidir. Bazı tahminlere göre, mikroalglerden elde edilen yağ verimi (dönüm başına), en iyi performans gösteren bitkisel yağlardan elde edilen verimin 200 katından fazladır. Uygun koşullar altında bazı mikroalg türleri kuru ağırlık başına %50-70 oranında yağ biriktirebilirler. Bununla birlikte tüm mikroalgal yağlar biyodizel için elverişli değildir. Ancak yaygın olarak kullanıma uygundurlar. Ototrofik mikroalgler özel koşullar sağlanması durumunda CO_2'i karbon kaynağı ve ışığı enerji kaynağı olarak kullanabilirler. Bu özellik *Chlorella vulgaris, Batryococcus braunii, Navicula pelliculosa, Scenedesmus acutus, Crypthecodinium cohnii, Dunaliella primolecta, Monallanthus salina, Neochloris oleoabundans, Phaeodactylum tricornutum* ve *Tetraselmis sueica* gibi çoğu ototrofik mikroalg türlerinde bulunur (M. F. Demirbas, 2011; Pragya et al., 2013; Singh & Dhar, 2011).

Diğer enerji formları ile kıyaslandığında mikroalgal biyoenerji bir takım önemli üstünlüklere sahiptir. Bunlar; yüksek yağ içeriği ve hızlı büyüme, değerli kimyasal madde üretimi, CO_2 yakalama imkanı ve çift enerji perspektifi üretimi ile atıksu arıtımı sağlarlar. Bitkisel kökenli hammaddeler de olduğu gibi mikroalg hammaddelerinden direkt olarak faydalanılabilir veya çeşitli biyokimyasal-termokimyasal dönüşüm yöntemleri ile sıvı yakıt veya gaza dönüştürülebilir. Termokimyasal dönüştürme yöntemleri, gaz veya yağ bazlı biyoyakıtlar üretmek için mikroalgal biyokütlenin gazlaştırılması, pirolizi, hidrojenasyon ve sıvılaştırılmasını içerir. Biyokimyasal dönüştürme yöntemleri mikroalgal biyokütlenin fermentasyon ve anaerobik parçalanması ile ürün olarak etanol veya metan açığa çıkan durumları içerir. Buna ek olarak hidrojen mikroalglerden biyofotoliz olarak elde edilebilir. Son olarak ise lipitler, başta triaçilgliserol hasat

edilen mikroalg türünden ayrılabilir, izole edilebilir ve daha sonra biyodizele dönüştürülebilir. Mikroalgal yağın biyodizele dönüştürülmesi işlemine transesterifikasyon adı verilmektedir (Pittman et al., 2011; Wu et al., 2014). Ekstraksiyon işleminden sonra elde edilen mikroalgal yağ, transesterifikasyon reaksiyonunda trigliseritlerin, metanol veya etanol gibi bir alkol ile ve bir baz katalizör aracılığıyla yağ asidi esterlerine dönüştürülebilir (Dragone et al., 2010).

5. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Y. Li et al. (2011) *Chlorella sp.* ile kentsel atıksuda yaptıkları çalışmada nütrient giderimi, biyokütle ve biyodizel üretim verimini araştırmışlardır. 14 gün süren çalışmada *Chlorella sp.* 'nin NH_4^+, TN, TP ve KOİ giderim verimleri sırasıyla %93,9, 89,1, 80,9 ve 90,8 olarak bulunmuştur. *Chlorella sp.*' nin biyokütle verimi 0,92 g /L gün ve biyodizel verimi ise 0,12 g/L gün olarak tespit edilmiştir.

Kothari et al. (2013) *Chlamydomonas polypyrenoideum* ile süt endüstrisi atıksuyunda yaptıkları çalışmada, atıksu ile BG-11 besi ortamının mikroalgal biyokütledeki değişimlerini izlemişlerdir. Süt endüstrisi atıksuyunda yetiştirilen mikroalg çalışmanın 10. gününde %90 NO_3^-, %74 NO_2^-, %70 PO_4^{-3}-P, %90 NH_4^+ giderim verimi ile BG-11 besi ortamı karşılaştırıldığında biyokütle veriminin ve dolayısıyla lipit veriminin de daha iyi olduğu bildirilmiştir.

Liang et al. (2013) yaptıkları araştırmada, *Chlorella vulgaris* ve *Bacillus licheniformis* mikroalg-bakteri kombine sistemi ile NH_4^+ ve TP giderim verimini karşılaştırmışlardır. Araştırmada NH_4^+ giderimi kombine sistemde %78, yalnızca *Chlorella vulgaris* ile yapılan denemede %29 olarak, *B. licheniformis* ile %1 olarak belirlemişlerdir. TP, kombine sistemde giderim yaklaşık %92, *C. vulgaris* ile %55, *B. licheniformis* ile %78'tir. Çalışmada *B. Licheniformis*'in *C.vulgaris* için büyümeyi destekleyici olduğu ve alg-bakteri kombine sisteminin atıksuda nütrient gideriminde başarılı olduğu rapor edilmiştir.

Gentili (2014) kentsel ve endüstriyel (kağıt ve süt endüstrisi) atıksuları karıştırarak, iki farklı mikroalg türünün nütrient giderim verimlerini karşılaştırmıştır. Denemede kullanılan *Scenedesmus dimorphus* ve *Selenastrum minutum* atıksu karışımında yetiştirilebilmiştir. Türler arasında *Selenastrum minutum,* kuru madde bazında %37 ile en yüksek biyokütle ve lipit verimine sahip olduğu bildirilmiştir.

Komolafe et al. (2014) atıksuların nütrient eklemesi olmaksızın mikroalgler için büyüme ortamı sağlayabileceğini vurguladıkları çalışmada, doğal siyanobakteri-dominant karma kültürler ve *Desmodesmus sp*. ile TN konsantrasyonunun %55,4 ile %89,3 arasında azaldığını ve toplam koliform giderimin %99,8 olduğunu tespit etmişlerdir.

Qin et al. (2014) atıksuların mikroalglerle arıtılarak geri dönüşümün sağlanmasını önerdikleri çalışmalarında, süt endüstrisi atıksuyunda çeşitli konsantrasyonlarda iki ön arıtma yapılarak UV ışınlama ve NaClO yöntemi ile atıksuya muamele yapılmışlardır. *Chlorella vulgaris*'in en yüksek biyokütle ve biyodizel üretim verimliliğine sırasıyla 0.450 g L^{-1} $gün^{-1}$ ve 51 mg L^{-1} $gün^{-1}$ olarak 4. günün sonunda ulaşıldığını rapor etmişlerdir.

Sreekanth, Pooja, Seeta, Himabindu, and Reddy (2014) yaptıkları çalışmada *Chlorella vulgaris, Botryococcus braunii* ve karıştırılmış kültürler ile süt endüstrisi atıksuyunda iç ve dış mekanlarda atıksudan nütrient giderim verimini araştırmışlardır. İç mekan kültürlerinde KOİ *C.vulgaris* ile % 90, *B.braunii* tarafından % 90 ve karışık mikroalg kültürü ile % 85, NH_4^+ *C. vulgaris*,% 92 *B.braunii* ve % 90 karışık mikroalg kültürü ile % 93, NO_3^-, *C. vulgaris* tarafından% 91'e, *B.braunii* ile % 90'a ve% 85'i karışık mikroalg kültürü tarafından ortalama olarak% 80 oranında giderildiği bildirilmiştir. Dış mekan kültürlerinde KOİ, *C. vulgaris* ile % 95, *B.braunii* ile % 90 ve karışık mikroalg kültürü ile % 85, NH_4^+ *C. vulgaris*, % 93 *B.braunii* ve % 92 oranında karışık mikroalg kültürü ile % 95, NO_3^-, *C. vulgaris* tarafından % 96, *B.braunii* tarafından % 94 ve karışık mikroalg kültürü ile % 91 oranlarında giderim verimi sağlandığı rapor edilmiştir. Araştırmada *C.vulgaris*, hem iç hem de dış ortamlarda nütrient gideriminde etkili olduğu ifade edilmiştir.

Beuckels, Smolders, and Muylaert (2015) *Chlorella* ve *Scenedesmus* türleri ile farklı başlangıç konsantrasyonlarında N ve P içeren atıksularda nütrient giderim ve biyokütle verimini araştırdıkları çalışmalarında, P'nin atıksudan uzaklaştırılmasının N konsantrasyonuna bağlı olduğunu belirtmişlerdir. N

konsantrasyonu 40 mg/L'nin üzerinde iken P giderimi yaklaşık 6 mg/L iken, N konsantrasyonu 20 mg/L'nin altında indiğinde P giderim verimini 2 mg/L olarak bulunduğu bildirilmiştir.

Ding et al. (2015) yaptıkları araştırmada süt çiftliği atıksularında mikroalg kültivasyonunu uygulanabilirliğini incelemişlerdir. Çalışmada kullandıkları atıksuyu kültivasyondan önce 5, 10 ve 20 kat seyreltilmişlerdir. 20 kat seyreltilmiş atıksuda NH_4^+ , P ve KOİ giderim verimlerini sırasıyla %99, 90 ve 84, 10 kat seyreltilmiş atıksuda %93, 91 ve 88, 5 kat seyreltilmiş atıksuda ise %83, 92 ve 90 olarak bulunduğunu bildirmişlerdir.

Lu et al. (2015) *Chlorella sp*. için besi yeri olarak bir et işleme tesisinin atıksuları seçtikleri çalışmalarında, besin profilini dengelemek ve düşük maliyetle biyokütle verimini arttırmak için atıksuların karışımına dayanan yenilikçi bir mikroalg yetiştirme modeli geliştirmişlerdir. Çalışmada karışık atıksuların mikroalg gelişimi üzerinde biyokütle veriminin (0.675–1.538 g/L), tek tip atıksuda yetiştirilen mikroalg veriminden çok daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca, yeterli N'a sahip karışık atıksularda, NH_4^+ giderim verimliliği (% 68.75–90.38) ve TN giderimi (% 30.06–50.94) oranlarında iyileştirildiği bildirilmiştir. Atıksuların karıştırılması, mikroalg hücrelerinde protein sentezinin desteklendiği, karışık atıksularda büyüyen mikroalglerin protein içeriği geleneksel protein kaynağından çok daha yüksek olan % 60.87–68.65'e ulaştığı tespit edilmiştir. Araştırmada atıksu karışımına dayalı mikroalg yetiştirme modelinin, biyokütle verimini arttırmak için etkili ve ekonomik bir yol olabileceğini belirtmişlerdir.

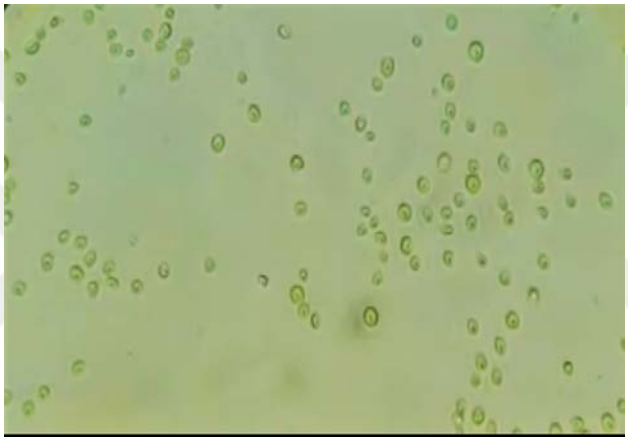
Choi (2016) yaptığı çalışmada *Chlorella vulgaris* ile süt endüstrisi atıksularının arıtılmasını araştırmıştır. 10 gün süren denemenin sonunda giderim verimlerini; BOİ %85,61, KOİ %80,62, AKM %29,10, TN %85,47 ve TP %65,96 olarak bulmuştur. Çalışmada elde edilen verilerin ışığında süt endüstrisi atıksularının mikroalglerle arıtılmasının çevre dostu pratik bir strateji olduğunu rapor etmiştir.

6. MATERYAL VE METOD

6.1. Materyal

6.1.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Mikroalg Türü

Deneysel çalışmada yeşil mikroalg türü olan *Chlorella vulgaris* kullanılmıştır. *Chlorella vulgaris*'e ait mikroskop görüntüsü Şekil 6.1.' de verilmiştir.



Şekil 6.1. *Chlorella vulgaris* mikroskop görüntüsü

6.1.2. Atıksu Temini ve Karakterizasyonu

Deneysel çalışmada kullanılan atıksu, Adana'da süt endüstrisi sektöründe faaliyet gösteren bir firmanın arıtma çıkışından alınmıştır. Atıksu örneği bekletilmeden aynı gün analizleri yapılmış ve denemede kullanılmak üzere hazır hale getirilmiştir. Süt endüstrisi arıtma tesisi çıkış suyundan alınan atıksuyun karakterizasyonu Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Süt Endüstrisi Atıksu Karakterizasyonu

Parametre	Konsantrasyon (mg/L)
TN	55,0
TP	12,3
KOİ	48,0
pH	7,6

6.2. Metod

6.2.1. Mikroalg Kültivasyonu

Deneysel çalışmada aşı olarak kullanılan *Chlorella vulgaris* öncelikli olarak stok kültürden alınarak % 1,5 agarlı besi yerine yayma tekniği ile ekilmiş ve inkübasyon sürecine bırakılmıştır. İnkübasyon sonunda agarlı besi ortamında yalnızca *Chlorella vulgaris* saf kültürünün olduğu, kültürün içerisinde başka bir türün olmadığı gözlemlenerek tespit edilmiştir. Daha sonra Bold Basal Medium (BBM) sıvı besi ortamına alınan *Chlorella vulgaris* denemede aşı olarak kullanılmak üzere çoğaltılmıştır. Tüm bu işlemler sırasında steril cam malzemeler kullanılmış ve ekim işlemleri steril kabinde yapılmıştır.

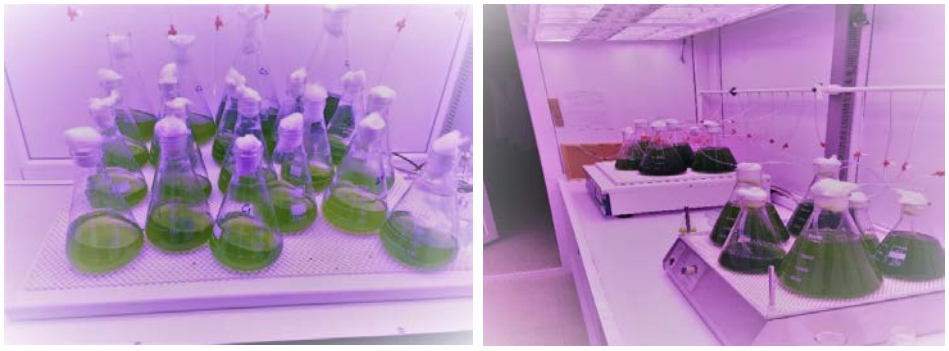
Chlorella vulgaris başlangıç kültürleri 250 mL'lik erlenler kulanılarak çoğaltılma işlemi başlatılmış, daha sonra 1-2 L'lik büyük hacimli erlenlerde ve son olarak yüksek oranlı mikroalg havuzunda üretime devam ettirilmiştir. 1:10 (v/v) oranında alg:besi ortamı konsantrasyonlarında aşılama yapılmıştır. Deneysel çalışma boyunca sıcaklık 25^0C olarak ayarlanmış ve sabit tutulmuştur. Aydınlık/karanlık döngüsü 14/10 saat, aydınlanma düzeyi 250 µmol m^{-2} s^{-2} olarak ayarlanmıştır. Kültürlerin havalandırma işlemi motorlu hava pompası ile sağlanmıştır. Kültürlerin homojenizasyonu için çalkayıcılar kullanılmıştır.

Deneysel çalışmada aşı olarak kullanılmak üzere çoğaltılan *Chlorella vulgaris* kültürlerinin besi ortamı olarak kullanılan BBM içeriği Çizelge 6.2'de verilmiştir.

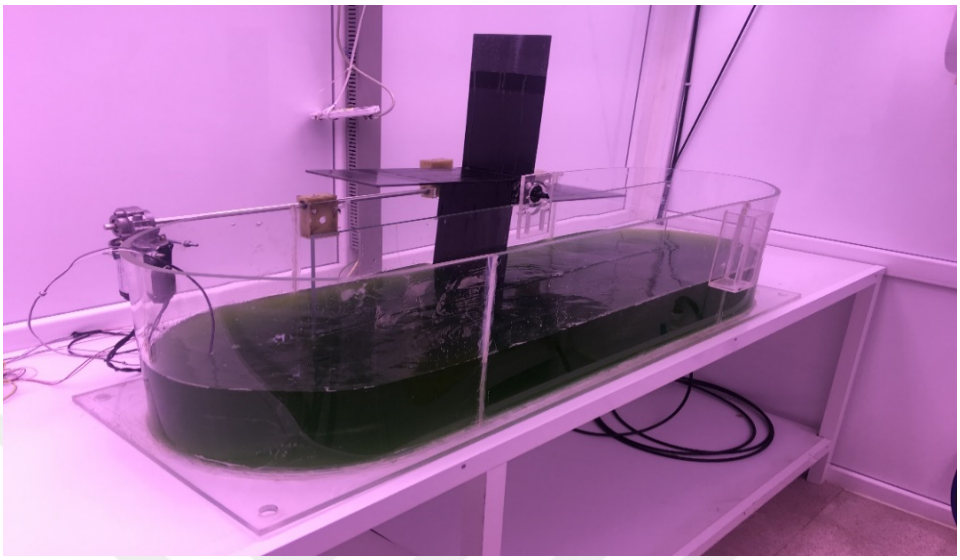
Çizelge 6.2. Bold Basal Besi Ortamı (BBM)

Kimyasal Formül	Ağırlık (g)	Distile su (mL)
$NaNo_3$	6,250	250
$MgSO_4.7H_2O$	1,875	250
NaCl	0,625	250
K_2HPO_4	1,875	250
KH_2PO_4	4,375	250
$CaCl_2.2H_2O$	0,625	250
$ZnSO_4.7H_2O$	0,353	25
$MnCl_2.4H2O$	0,058	25
$Na_2MoO_4.2H_2O$	0,048	25
$CuSO_4.5H_2O$	0,063	25
$Co(NO_3)_2.6H_2O$	0,020	25
H_3BO_3 KOH	1,142 3,100	100
EDTA-Na_4	5,000	100
$FeSO_4.7H2O$ H_2SO_4	0,498 0,1mL	100

Besi yeri hazırlandıktan sonra 121^0C' de 1,5 atm basınç altında 20 dakika süresince otoklavlanmıştır. Besi yeri steriliazasyonunun ardından mikroalg hücreleri bu ortama eklenerek, Çukurova Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü Fito-Biyoremediasyon Laboratuvarında bulunan tam kontrollü mikroalg büyüme odasında yetiştirilmiştir. Mikroalglerin çoğaltılması Şekil 6.2. ve Şekil 6.3'te verilmiştir.



Şekil 6.2. Mikroalglerin Çoğaltılması

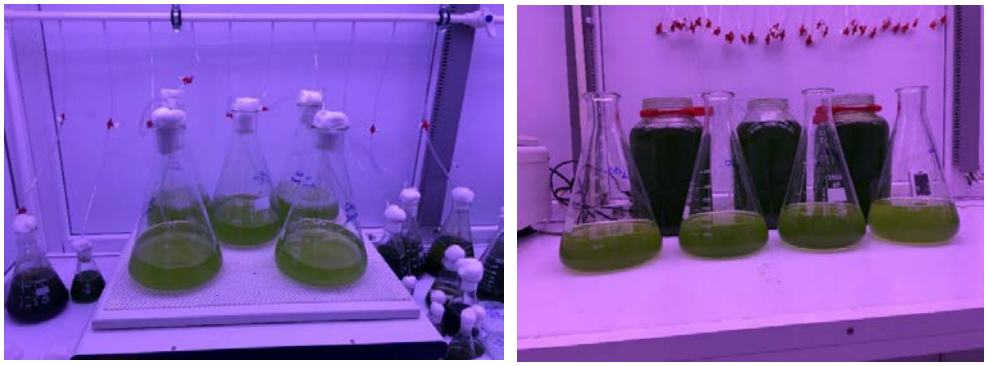


Şekil 6.3. Yüksek Oranlı Mikroalg Havuzunda *Chlorella Vulgaris* Kültivasyonu

6.2.2. Denemenin Kurulması

Deneysel çalışmada kullanılan atıksu Adana'da süt endüstrisi sektöründe faaliyet gösteren bir firmanın arıtma tesisi çıkışından alınmıştır. Arıtma tesisi çıkış atıksuyunun tercih edilme sebebi atıksunun biyolojik arıtmadan sonra mikroalgal ileri arıtma işlemine tabi tutulması ve su kalitesinin iyileştirilmesi amaçlanmış olmasıdır. Burada maksimum düzeyde N ve P giderimi yapılması hedeflenmiştir.

Tesisten alınan atıksu örneği öncelikli olarak filtreden geçirilmiş daha sonra sterilizasyon için 121^0C 1,5 atm basınçta 15 dakika otoklavlama işlemine tabi tutulmuştur. Sterilizasyonu yapılan atıksuya *Chlorella vulgaris* 1:10 (v/v) oranında karıştırılmıştır. Deneysel çalışma 3 tekerrürlü yapılmış olup, sonuçlar ortalama değerler alınarak hesaplanmıştır. Deneysel çalışma süresince yapılan tüm analizler aynı gün aynı saatte tekrarlanmıştır. Deneysel çalışmanın kurulması ile ilgili görseller Şekil 6.3.'te verilmiştir.



Şekil 6.1. Süt Endüstrisi Atıksularında *Chlorella Vulgaris* Kültivasyonu

6.3. Deneme Süresince Yapılan Analizler

6.3.1. Toplam Azot

Deneysel çalışmada kullanılan atıksudaki TN konsantrasyonu, Merck Spectroquant TN hazır test kitleri ile ölçülmüştür. 0,45 µ gözenek çaplı Whattman GF/C filtre kağıdı ile filtrasyon işlemi yapıldıktan sonra atıksu örneği bir pipet yardımı ile hazır test kitine alınmıştır. 120^0C 60 dk'lık termal işlemin ardından tüpün oda sıcaklığına gelmesi beklenmiştir. Test tüpü ölçüm için hazır hale geldikten sonra TN (mg/L) konsantrasyonunu belirlemek için UV/VIS spektrofotometre (Merck Spektroquant Prove 100) ile uygun metod seçilerek ölçüm yapılmıştır.

6.3.2. Toplam Fosfor

Deneysel çalışmada kullanılan atıksudaki TP konsantrasyonu, Merck Spectroquant TP hazır test kitleri ile ölçülmüştür. 0,45 µ gözenek çaplı Whattman GF/C filtre kağıdı ile filtrasyon işlemi yapıldıktan sonra atıksu örneği bir pipet yardımı ile hazır test kitine alınmıştır. 120^0C 30 dk'lık termal işlemin ardından tüpün oda sıcaklığına gelmesi beklenmiştir. Test tüpü ölçüm için hazır hale geldikten sonra TP (mg/L) konsantrasyonunu belirlemek için UV/VIS

spektrofotometre (Merck Spektroquant Prove 100) ile uygun metod seçilerek ölçüm yapılmıştır.

6.3.3. Kimyasal Oksijen İhtiyacı

Deneysel çalışmada kullanılan atıksudaki KOİ parametresi ölçümü, Merck Spectroquant KOİ hazır test kitleri ile ölçülmüştür. 0,45 µ gözenek çaplı Whattman GF/C filtre kağıdı ile filtrasyon işlemi yapıldıktan sonra atıksu örneği bir pipet yardımı ile hazır test kitine alınmıştır. 148^0C 120 dk'lık termal işlemin ardından tüpün oda sıcaklığına gelmesi beklenmiştir. Test tüpü ölçüm için hazır hale geldikten sonra KOİ (mg/L) konsantrasyonunu belirlemek için UV/VIS spektrofotometre (Merck Spektroquant Prove 100) ile uygun metod seçilerek ölçüm yapılmıştır

6.3.4. Optik Yoğunluk

Deneysel çalışma süresince *Chlorella vulgaris*'in yoğunluğu, her 24 saatte bir kültürler homojen hale getirildikten sonra bir pipet yardımıyla 3 ml numune alınarak kuvartz küvetlere konulmuş ve Merck Spektroquant Prove 100 UV/VIS spektrofotometre ile 680 nm dalga boyunda ölçülmüştür (Wang et al., 2010).

6.3.5. Kuru Madde Analizi

Mikroalgal kültürlerin kuru madde analizi süzme düzeneği yardımı ile darası alınan 0,45 µ gözenek çaplı Whattman GF/C filtre kâğıdı ile süzülmüştür. Filtreler petri kapları içerisine yerleştirilmiş ve 85^0C'de 24 saat boyunca etüvde kurutulmuştur. Kurutma işleminin ardından oda sıcaklığına gelene kadar desikatörde soğutulmuş ve hassas terazi ile tartımları yapılmıştır (Park, Jin, Lim, Park, & Lee, 2010).

6.3.6. pH Ölçümü

Deneysel çalışma boyunca pH ölçümleri (WTW pH 3110) günlük olarak aynı saatte yapılmıştır.

6.3.7. Mikroalglerin Hasat Edilmesi

Deneysel çalışmanın sonunda atıksu örneklerinden mikroalgal hücrenin ayrılması için santrifüj ile hasat yöntemi kullanılmıştır. Biyokütlenin hasat edilmesi için 5000 rpm'de 10 dk süre ile santrifüj yapılmıştır. Santrifüj işleminin ardından süpernatant kısmı ayrılmış ve distile su ile yıkama gerçekleştirilmiştir. Geriye kalan mikroalg çamuru cam petrilere konulmuş ve etüvde kurutulmuştur. Elde edilen kuru mikroalg kütlesi tez çalışması kapsamında biyodizel verimliliğinin analiz edilmesi için hazır hale getirilmiştir. *Chlorella vulgaris*'in hasat ve kurutma işlemi Şekil 6.4.'te verilmiştir.



Şekil 6.2. *Chlorella vulgaris*'in Hasat ve Kurutulma İşlemi

6.3.8. Yağ Analizi

Deneysel çalışmanın sonunda *Chlorella vulgaris*'in hasat ve kurutma işleminin ardından elde edilen biyokütlenin yağ verimi analizi, Çukurova Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümünde yapılmıştır.

7. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

7.1. Mikroalgal Büyüme ve Biyokütle Verimi

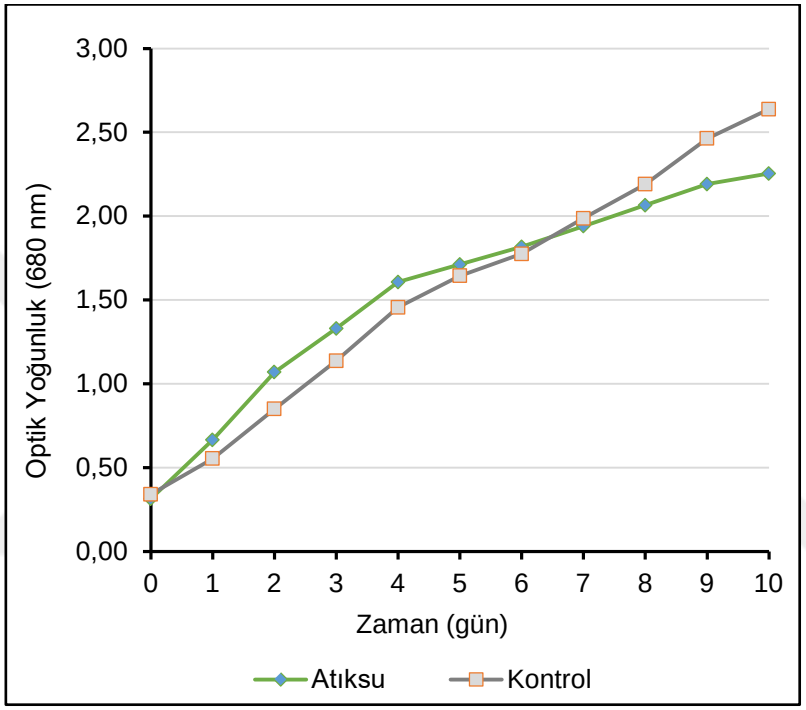
Diğer mikroorganizmalarda olduğu gibi kesikli sistemlerde mikroalgal büyüme hazırlık, hızlanma, duraklama ve ölüm fazı olmak üzere 4 fazdan oluşmaktadır. Ancak kesikli sistemlerde tüm bu büyüme fazlarının özellikle ölüm fazının belirgin olarak görülebilmesi için deneme süresinin 18 günden fazla olması gerekmektedir (Zhu et al., 2013). Bu çalışmada deneysel çalışma süresi 10 gün olarak tutulduğundan ölüm fazı gerçekleşmemiştir. Yine aşı olarak kullanılan mikroalgler atıksuya aşılandığı anda zaten hazırlık aşaması içinde olduklarından çalışmada hazırlık dönemi de net olarak gözlenememiştir (Y. Li et al., 2011). Araştırmada elde edilen mikroalgal büyüme ve biyokütle verimliliği 680 nm dalga boyunda ölçülen Optik Yoğunluk, Kuru Biyokütle Verimi ve Spesifik Büyüme Oranları bulunarak ayrı ayrı analiz edilmiştir.

7.1.1. Optik Yoğunluk

Araştırmada mikroalgal büyüme etkinliği klorofil absorpsiyonun en yüksek olduğu 680 nm dalga boyunda ölçülen optik yoğunluk değerleriyle izlenmiştir. Günlük olarak ölçülen optik yoğunluk değerleri deneysel çalışma süresince mikroalgal büyümenin göstergesi olarak değerlendirilmiş ve optik yoğunluk değerlerinin deneysel çalışma süresince değişimi Şekil 7.1'de verilmiştir.

Deneysel çalışmanın 0-4 günleri arasındaki dönem mikroalgal büyümenin en hızlı olduğu dönem olmuştur. 4. günden sonra mikroalgal büyüme hızının giderek azaldığı, 9. günden sonra duraklama dönemine girildiği gözlenmiştir. Yukarıda değinildiği üzere deneme süresi 10 gün tutulduğundan duraklama ve özellikle ölüm evreleri büyüme eğrisinde izlenememektedir (Şekil 7.1). Elde edilen büyüme eğrisi BBM ortamında aynı koşullarda üretilen ve Kontrol olarak kullanılan seri ile karşılaştırıldığında, deneysel çalışmanın 6. gününe kadar hemen hemen benzer bir büyüme eğilimi gösterdiği açıkça görülmektedir. Dolayısıyla

büyüme eğrisi dikkate alındığında süt endüstrisi atıksularında bulunan nütrientlerin, deneysel çalışmada kullanılan mikroalg türü *Chlorella vulgaris* tarafından kullanılarak değerlendirildiği ve normal bir gelişim göstererek çoğaldığı anlaşılmaktadır.



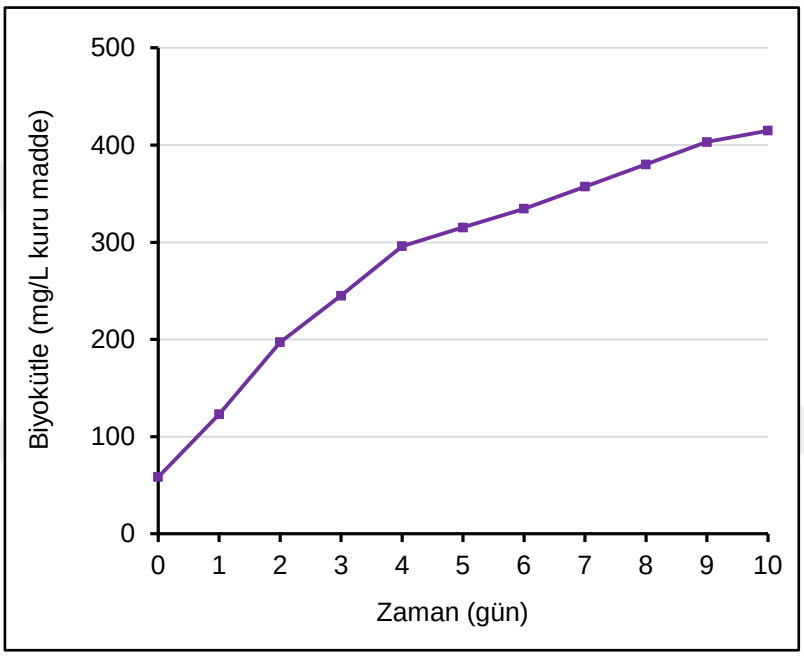
Şekil 7.1**.** Mikroalgal Büyüme ve Deneme Süresince Değişimi

7.1.2. Mikroalgal Biyokütle Verimi

Araştırmada kuru biyokütle günlük olarak ölçülen optik yoğunluk değerleri ile kuru madde miktarları arasında oluşturulan ve aşağıda verilen regresyon denklemi ile hesaplanmış ve kuru biyokütle veriminin deneysel çalışma boyunca günlük değişimi Şekil 7.2'de verilmiştir.

$$Kuru\ ağırlık\ (mg\ L^{-1}) = 183{,}68 * OD_{680} + 0{,}83 \qquad R^2 = 09984$$

Denklemde OD_{680} günlük olarak izlenen optik yoğunluk değeridir. 10 günlük deneysel çalışma süresince kuru ağırlık olarak elde edilen toplam mikroalgal biyokütle verimi 0,414 gr L^{-1} ve 0,036 gr L^{-1} $gün^{-1}$ olmuştur. Maksimum kuru madde miktarı 0,074 gr L^{-1} $gün^{-1}$ ile deneysel çalışmanın 2. gününde elde edilmiştir. Mikroalgal büyümenin en hızlı olduğu faz olan ilk 4 günlük dönemde elde edilen kuru madde miktarı ise 0,059 gr L^{-1} $gün^{-1}$ olarak gerçekleşmiştir.



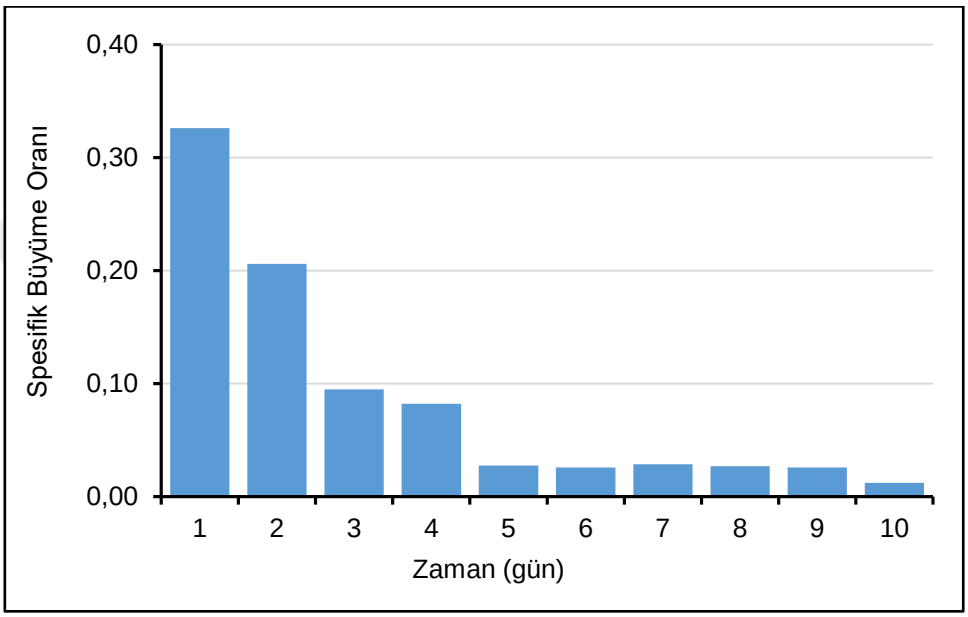
Şekil 7.2. Biyokütle Verimi ve Günlük Değişimi (mg/L kuru madde)

7.1.3. Spesifik Büyüme Oranı

Deneysel çalışma süresince mikroalglerin günlük spesifik büyüme oranı hesaplanmasında aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$\mu = \frac{ln\, X_{t_2} - ln\, X_{t_1}}{t_2 - t_1}$$

Formülde, μ spesifik büyüme oranını, X_{t_2} ve X_{t_1} sırasıyla t_2 ve t_1 zamanlarındaki (gün) biyokütle konsantrasyonun ifade etmektedir. Günlük spesifik büyüme oranları ve deneme süresince değişimleri Şekil 7.3. verilmiştir.



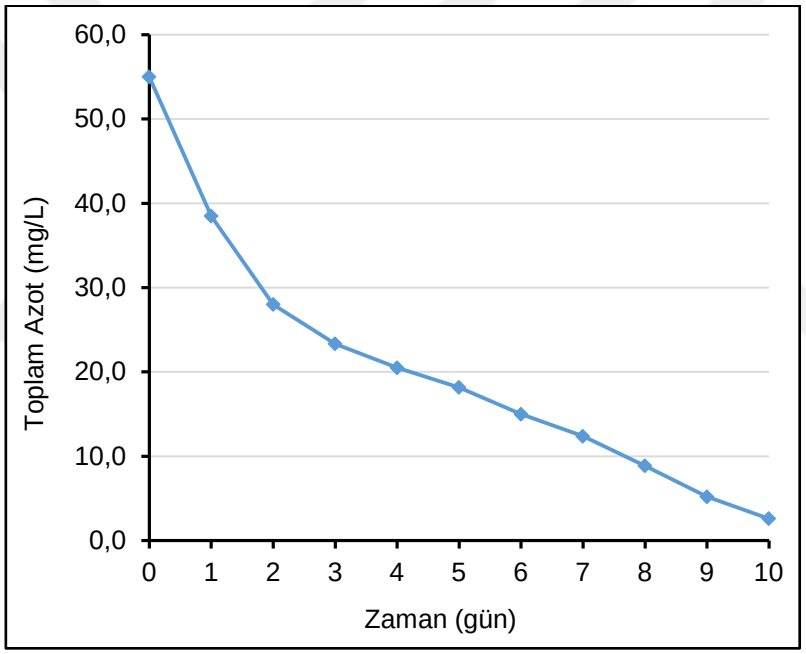
Şekil 7.3. Günlük Spesifik Büyüme Oranı ve Deneme Süresince Değişimi

Deneysel çalışmanın sürdüğü 10 günlük dönemde ortalama günlük büyüme oranı 0,086 gün^{-1} olarak bulunmuştur. Şekil 7.3'ten görüleceği üzere günlük maksimum büyüme oranı (0,326 gün^{-1}) araştırmanın ilk gününde elde edilmiştir. Denemenin ilk 4 gününde ortalama günlük spesifik büyüme oranı 0,177 gün^{-1} olarak gerçekleşmiş olup, söz konusu ilk 4 günlük dönem biyokütle verimliliğinin en yüksek olduğu üretim dönemini göstermektedir. 4. Günden sonra spesifik büyüme oranı sabit kalmış ancak 9. günden sonra azalmaya başlamıştır (Şekil 7.3).

7.2. Nütrient Giderimi

7.2.1. Azot Giderimi

Deneysel çalışma kapsamında süt endüstrisinden alınan ve analizleri yapılan arıtma tesisi çıkış atıksu örneğinde başlangıç TN konsantrasyonu 55 mg/L olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmanın kurulmasının ardından TN konsantrasyonundaki değişim günlük olarak ölçüm yapılarak izlenmiştir. 10 günlük deneysel çalışma süresince *Chlorella vulgaris*, süt endüstrisi atıksuyunda bulunan yüksek N içeriğinden etkili bir şekilde faydalandığı gözlenmiştir.

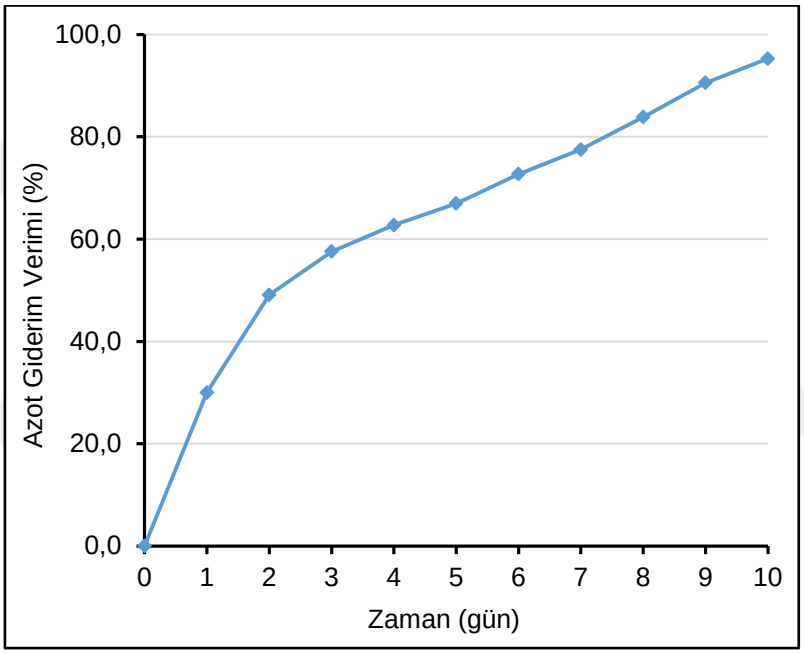


Şekil 7.4. Deneme Süresince TP Miktarının Günlük Değişimi (mg/L)

Çalışma süresince yapılan analizler sonucunda, *Chlorella vulgaris*'in deneysel çalışmanın sona erdiği 10.günün sonunda TN konsantrasyonunu 55,00 mg/L'den 2,60 mg/L'ye düşürdüğü tespit edilmiştir. Mikroalgal büyümenin en hızlı olduğu ilk 4 günde TN konsantrasyonu da hızlı azalarak 20,50 mg/L düşmüştür. Çalışmada elde edilen azot giderim verimi 2,60 – 16,50 mg L^{-1} $gün^{-1}$

arasında değişmiş olup, ortalama 2,54 mg L^{-1} $gün^{-1}$ olarak gerçekleşmiştir. TN konsantrasyonunun zamana göre değişimi Şekil 7.4'te verilmiştir.

Deneysel çalışma süresince yapılan ölçümlerden elde edilen bulgular *Chlorella vulgaris*'in süt endüstrisi arıtma tesisi çıkış atıksuyunda % 95,27 oranında TN giderimi sağladığını göstermiştir. Bu oran denemenin ilk 4 günü sonunda ise % 62,73 olarak gerçekleşmiştir (Şekil 7.5).



Şekil 7.5. Toplam Azot Giderim Verimi (%)

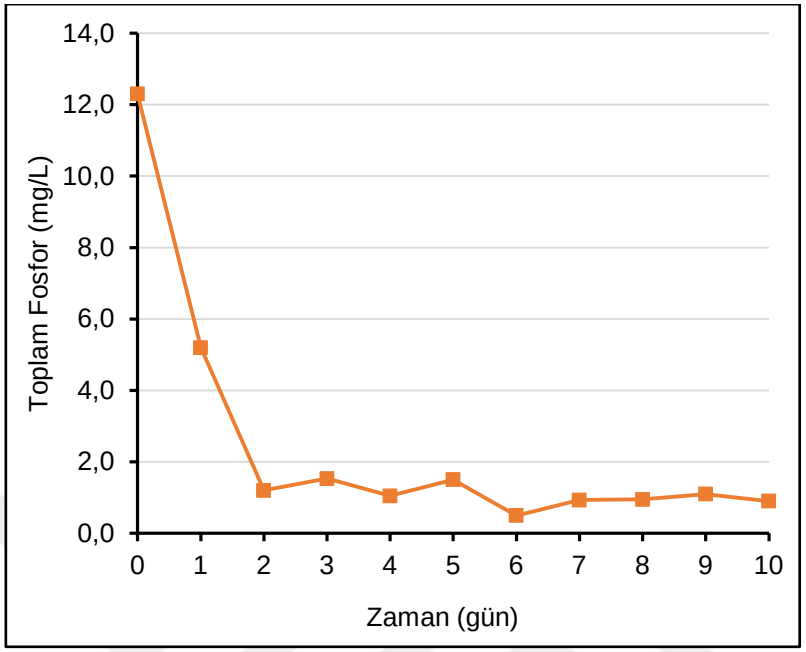
Araştırmadan elde edilen TN giderim verimleri diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında benzer sonuçların elde edildiği görülmüştür (Çizelge 7.1).

Çizelge 7.1. Çeşitli Atıksularda Yetiştirilen Bazı Mikroalg Türlerinin TN Giderim Verimleri

Mikroalg	Kültür ortamı olarak kullanılan atıksu	TN Giderimi (%)	Kaynak
Chlorella vulgaris	Süt endüstrisi	84,53	(Choi & Lee, 2012)
Chlorella sp	Kentsel	89,1	(Y. Li et al., 2011).
Chlorella zofingiensis	Süt endüstrisi	97,5	(Huo et al., 2012)
Chlorella pyrenoidosa	Süt endüstrisi	60-80	(Kothari et al., 2012)
Chlorella vulgaris	Kentsel	90,9-93,6	(C. Li et al., 2013)
Chlamydomonas polypyrenoideum	Süt endüstrisi	74-90	(Kothari et al., 2013)
Chlorella vulgaris	Süt endüstrisi	92 (NH_4)	(Sreekanth et al., 2014)
Botryococcus braunii	Süt endüstrisi	90 (NH_4)	(Sreekanth et al., 2014)
Chlorella vulgaris	Süt endüstrisi	85,47	(Choi, 2016)
Chlorella vulgaris	Süt endüstrisi	95,27	Bu çalışmada

7.2.2. Fosfor Giderimi

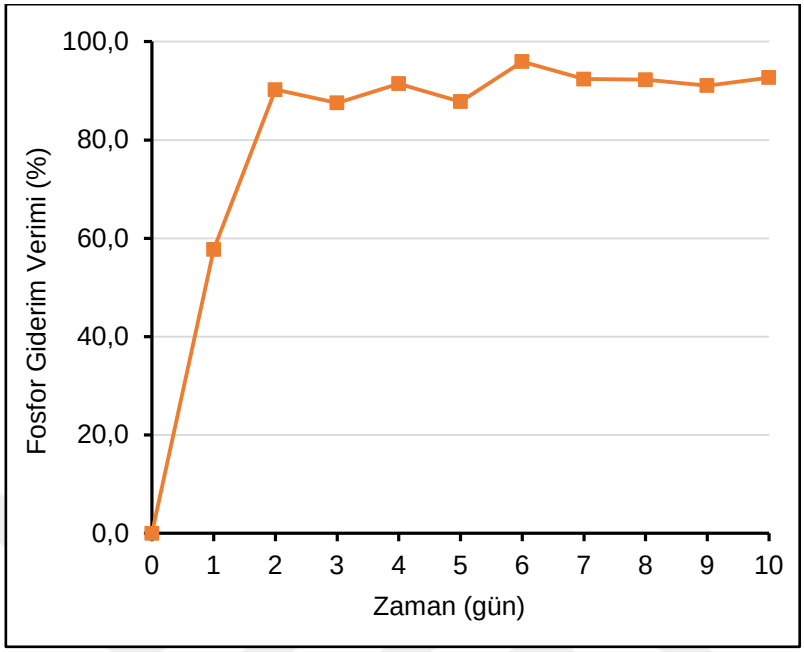
Çalışma kapsamında süt endüstrisinden alınan ve analizleri yapılan atıksu örneğinde TP başlangıç konsantrasyonu 12,3 mg/L olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmanın kurulmasının ardından diğer analizler gibi TP analizleri de günlük olarak aynı saatte yapılmıştır. Deneysel çalışma süresince yapılan öçümler ışığında *Chlorella vulgaris* TP gideriminde başarı sağlamış ve çalışmanın son günü olan 10. günün sonunda yapılan ölçümde TP konsantrasyonu 0,9 mg/L'ye kadar düşmüştür. TP konsantrsayonun zaman göre günlük değişimi Şekil 7.6'da, TP % giderim verimi ise Şekil 7.7'de verilmiştir.



Şekil 7.6. Deneme Süresince TP Miktarının Günlük Değişimi (mg/L)

TP deneysel çalışmanın ilk 2 gününde büyük oranda giderilmiştir. TP giderim verimi ilk 2 gün sonunda % 90,24 olurken, deneysel çalışmanın sonucunda ulaşılan verim ise % 92,68 olmuştur (Şekil.7.7). Çalışmada elde edilen TP giderim verimi ilk 2 günlük dönemde 5,50 mg L^{-1} $gün^{-1}$ iken, 10 günlük deneysel çalışma süresince ortalama 1,14 mg L^{-1} $gün^{-1}$ olarak gerçekleşmiştir.

Araştırmadan elde edilen TP giderim verimleri diğer çalışmalardan elde edilen verilerle karşılaştırıldığında özellikle süt endüstrisi atıksularında yapılan çalışmalara göre daha yüsek olduğu diğer çalışmalarla ise yaklaşık olarak benzer sonuçların elde edildiği görülmüştür (Çizelge 7.2).



Şekil 7.7. Toplam Fosfor Giderim Verimi (%)

Çizelge 7.2 Çeşitli Atıksularda Yetiştirilen Bazı Mikroalg Türlerinin Toplam Fosfor (TP) Giderim Verimleri

Mikroalg	Kültür ortamı olarak kullanılan atıksu	TP Giderimi (%)	Kaynak
Chlorella sp	Kentsel	80,9	(Y. Li et al., 2011).
Chlorella pyrenoidosa	Süt endüstrisi	83 -87	(Kothari et al., 2012)
Chlorella vulgaris	Kentsel	90,9-93,6	(C. Li et al., 2013)
Chlamydomonas polypyrenoideum	Süt endüstrisi	70	(Kothari et al., 2013)
Chlorella vulgaris ve Bacillus licheniformis	Kentsel	92	(Liang et al., 2013)
Chlorella vulgaris	Süt endüstrisi	65,96	(Choi, 2016)
Chlorella vulgaris	Süt endüstrisi	92,68	Bu çalışmada

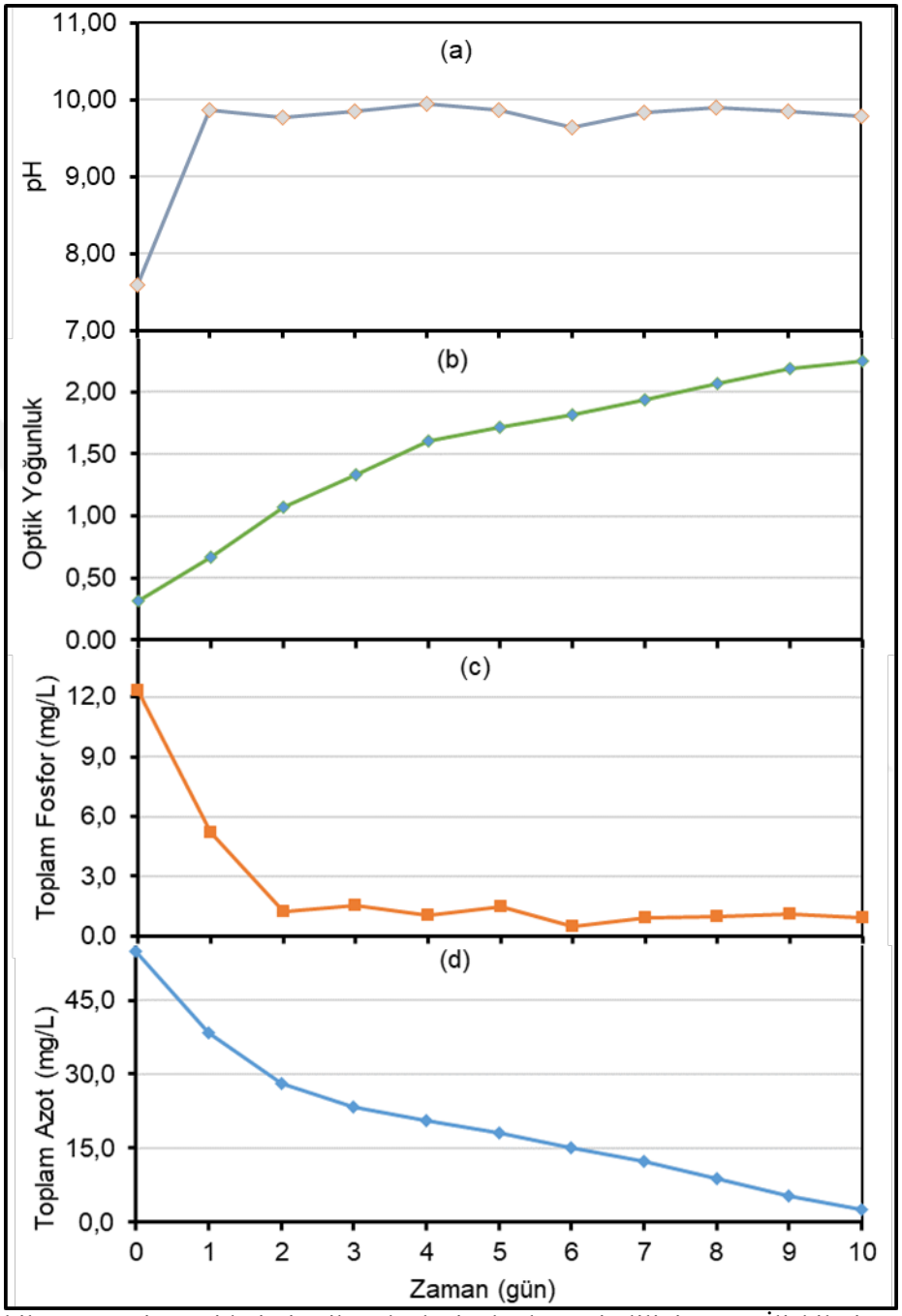
7.3. KOİ Giderim Verimliliği

Deneysel çalışma kapsamında KOİ parametresinin analizleri 48 saatte bir ölçüm yapılmıştır. Araştırmada kullanılan süt endüstrisi arıtma tesisi çıkış atıksuyunun başlangıç KOİ konsantrasyonu 48 mg/L olarak tespit edilmiştir. Çalışmanın 2.gününde KOİ ölçüm değeri 27 mg/L olarak olçülmüştür. Araştırmanın 4. günde yapılan ölçümde ise KOİ konsantrasyonu 20 mg/L'nin altında olduğu için ölçüm aralığının dışında kalmış ve ölçüm değeri elde edilememiştir. Mikroalgal biyokütle artışının hızlı olduğu ilk 4 günde başlangıç konsantrasyonu 48 mg/L olan KOİ değeri 20 mg/L'nin altına düşürülerek önemli bir KOİ giderim verimliliği sağlanmıştır.

7.4. Nütrient Giderimi Mikroalgal Biyokütle Verimliliği ve pH İlişkileri

Mikroalgal büyümenin en önemli fizikokimyasal göstergelerinden birisi olarak kabul edilen büyüme ortamı pH'sı, deneysel çalışma süresince diğer büyüme ve giderim parametreleri ile karşılaştırmak üzere günlük olarak kaydedilerek takip edilmiş ve söz konusu parametrelerle ilişkisi Şekil 7.8'de verilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre büyüme ortamı olarak kullanılan süt endüstrisi arıtma tesisi çıkış atıksuyunda 10 günlük deneme süresince pH değişimi, 7,60 ile 9,95 arasında değişmiştir. Deneysel çalışmanın ilk gününde hızlı mikroalgal büyüme ile birlikte pH hızlıca artmış sonraki dönemde ise önemli bir değişim göstermemiştir. Ancak, genel olarak ortam pH'ın mikroalgal büyümenin hızlı olduğu ilk 4 günde artma, mirkoalgal büyümenin yavaşladığı ve durakladığı dönemde ise azalma eğiliminde olduğu söylenebilir. Daha önce yapılan çalışmalarda da ifade edildiği üzere atıksularda üretilen mikroalgler büyüme süreçlerinde CO_2 ve organik karbonu kullandıklarından dolayı büyüme ortamındaki pH değerini yükseltebilirler (Arbib et al. 2014, Zhao et al. 2016).



Şekil 7.8. Nütrient Giderimi Mikroalgal Biyokütle Verimliliği ve pH İlişkileri

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Deneysel çalışmadan elde edilen veriler sonucunda süt endüstrisi arıtma tesisi çıkış atıksuyunda yetiştirilen *Chlorella vulgaris*'in, deneysel çalışmanın sona erdiği 10.günde TN konsantrasyonunu 55,00 mg/L'den 2,60 mg/L'ye düşürdüğü tespit edilmiştir. Deneysel çalışmadan elde edilen TN giderim verimi 2,60 – 16,50 mg L^{-1} $gün^{-1}$ arasında değişmiş olup, ortalama 2,54 mg L^{-1} $gün^{-1}$ olarak gerçekleşmiştir. TN giderim verimi ise % 95 olarak bulunmuştur. Bu oran denemenin ilk 4 günü sonunda ise % 63 olarak gerçekleşmiştir.

Çalışma kapsamında analizleri yapılan atıksu örneğinde TP başlangıç konsantrasyonu 12,3 mg/L olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışma süresince yapılan ölçümler ışığında, *Chlorella vulgaris* TP gideriminde başarı sağlamış ve son ölçüm gününde TP konsantrasyonu 0,9 mg/L'ye kadar düştüğü belirlenmiştir. TP deneysel çalışmanın ilk 2 gününde büyük oranda giderilmiştir ve TP giderim verimi ilk 2 gün sonunda %90,24 olurken deneysel çalışma sonucunda ulaşılan verim %92,68 olarak bulunmuştur.

Başlangıç konsantrasyonu 48 mg/L olarak tespit edilen KOİ değeri mikroalgal büyümenin logaritmik olarak en hızlı olduğu ilk 4 gününde 20 mg/L'nin altına düşürülmüştür.

10 günlük deneysel çalışma süresince kuru ağırlık olarak elde edilen toplam kuru ağırlık 0,414 gr L^{-1}, mikroalgal biyokütle verimi ise 0,036 gr L^{-1} $gün^{-1}$ olmuştur. Maksimum kuru madde miktarı 0,074 gr L^{-1} $gün^{-1}$ ile denemenin 2. gününde elde edilmiştir. Mikroalgal büyümenin en hızlı olduğu faz olan ilk 4 günde elde edilen kuru madde miktarı ise 0,059 gr L^{-1} $gün^{-1}$ olarak gerçekleşmiştir. 10 günlük dönemde ortalama günlük spesifik büyüme oranı 0,086 $gün^{-1}$ olarak bulunmuştur, günlük maksimum büyüme oranı 0,326 $gün^{-1}$ ile araştırmanın ilk gününde elde edilmiştir. Deneysel çalışmanın ilk 4 gününde ortalama günlük spesifik büyüme oranı 0,177 $gün^{-1}$ olarak gerçekleşmiş olup, söz konusu ilk 4 günlük dönem biyokütle verimliliğinin en yüksek olduğu üretim dönemini

göstermektedir. Deneysel çalışmanın sonunda elde edilen kuru maddenin yağ içeriği ise %20,6 olarak bulunmuştur.

Çalışmadan elde edilen veriler süt endüstrisi atıksularınında mikroalglerin (*Chlorella vulgaris*) verimli bir şekilde çoğalma ve biyokütle üretimi sürecinde atıksuda bulunan nürientleri asimile edilerek ileri atıksu arıtımı gerçekleştirme ve elde edilen mikroalgal biyokütlenin biyoyakıt olarak kullanılma potansiyelinin olduğunu göstermiştir.

Farklı endüstriyel ve evsel atıksular arıtma tesisi giriş ve çıkış atıksuları, değişik oranlarda seyreltme ve karışıma tabi tutularak bölge koşullarına uyum sağlamış mikroalg türleri ile nütrient giderimi ve mikroalgal biyokütle verimliliği çalışmaları yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A., & Ibraheem, I. (2012). Microalgae and wastewater treatment. *Saudi Journal of Biological Sciences, 19*(3), 257-275.

Abinandan, S., & Shanthakumar, S. (2015). Challenges and opportunities in application of microalgae (Chlorophyta) for wastewater treatment: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 52*, 123-132. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.086

Beuckels, A., Smolders, E., & Muylaert, K. (2015). Nitrogen availability influences phosphorus removal in microalgae-based wastewater treatment. *Water research, 77*, 98-106.

Borowitzka, M. A., & Moheimani, N. R. (2013). Sustainable biofuels from algae. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 1-13.

Brennan, L., & 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*(2), 557-577.

Chen, G., Zhao, L., & Qi, Y. (2015). Enhancing the productivity of microalgae cultivated in wastewater toward biofuel production: A critical review. *Applied Energy, 137*, 282-291. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.032

Chisti, Y. (2008). Biodiesel from microalgae beats bioethanol. *Trends Biotechnol, 26*(3), 126-131. doi:10.1016/j.tibtech.2007.12.002

Chiu, S.-Y., Kao, C.-Y., Chen, T.-Y., Chang, Y.-B., Kuo, C.-M., & Lin, C.-S. (2015). Cultivation of microalgal Chlorella for biomass and lipid production using wastewater as nutrient resource. *Bioresource technology, 184*, 179-189.

Choi, H.-J. (2016). Dairy wastewater treatment using microalgae for potential biodiesel application. *Environmental Engineering Research, 21*(4), 393-400.

Choi, H.-J., & Lee, S.-M. (2012). Effects of microalgae on the removal of nutrients from wastewater: various concentrations of Chlorella vulgaris. *Environ Eng Res, 17*(17), S3-S8.

Christenson, L., & Sims, R. (2011). Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment, biofuels, and bioproducts. *Biotechnology Advances, 29*(6), 686-702.

Demirbas, A. (2010). Use of algae as biofuel sources. *Energy conversion and management, 51*(12), 2738-2749.

Demirbas, M. F. (2011). Biofuels from algae for sustainable development. *Applied Energy, 88*(10), 3473-3480.

Ding, J., Zhao, F., Cao, Y., Xing, L., Liu, W., Mei, S., & Li, S. (2015). Cultivation of microalgae in dairy farm wastewater without sterilization. *International journal of phytoremediation, 17*(3), 222-227.

Dragone, G., Fernandes, B. D., Vicente, A. A., & Teixeira, J. A. (2010). Third generation biofuels from microalgae. *Current research, technology and education topics in applied microbiology and microbial biotechnology, 2*, 1355-1366.

Elcik, H., & Çakmakcı, M. (2017). Mikroalg üretimi ve mikroalglerden biyoyakıt eldesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32*(3), 795-820.

Gentili, F. G. (2014). Microalgal biomass and lipid production in mixed municipal, dairy, pulp and paper wastewater together with added flue gases. *Bioresource technology, 169*, 27-32. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.06.061

Huo, S., Wang, Z., Zhu, S., Zhou, W., Dong, R., & Yuan, Z. (2012). Cultivation of Chlorella zofingiensis in bench-scale outdoor ponds by regulation of pH using dairy wastewater in winter, South China. *Bioresource technology, 121*, 76-82.

Junying, Z., Junfeng, R., & Baoning, Z. (2013). Factors in mass cultivation of microalgae for biodiesel. *Chinese Journal of Catalysis, 34*(1), 80-100.

Komolafe, O., Orta, S. B. V., Monje-Ramirez, I., Noguez, I. Y., Harvey, A. P., & Ledesma, M. T. O. (2014). Biodiesel production from indigenous microalgae grown in wastewater. *Bioresource technology, 154*, 297-304.

Kothari, R., Pathak, V. V., Kumar, V., & Singh, D. (2012). Experimental study for growth potential of unicellular alga Chlorella pyrenoidosa on dairy waste water: an integrated approach for treatment and biofuel production. *Bioresource technology, 116*, 466-470.

Kothari, R., Prasad, R., Kumar, V., & Singh, D. (2013). Production of biodiesel from microalgae Chlamydomonas polypyrenoideum grown on dairy industry wastewater. *Bioresource technology, 144*, 499-503.

Kumar, K., Mishra, S. K., Shrivastav, A., Park, M. S., & Yang, J. W. (2015). Recent trends in the mass cultivation of algae in raceway ponds. *Renewable & Sustainable Energy Reviews, 51*, 875-885. doi:10.1016/j.rser.2015.06.033

Li, C., Yang, H., Li, Y., Cheng, L., Zhang, M., Zhang, L., & Wang, W. (2013). Novel bioconversions of municipal effluent and CO2 into protein riched Chlorella vulgaris biomass. *Bioresource technology, 132*, 171-177.

Li, Y., Chen, Y.-F., Chen, P., Min, M., Zhou, W., Martinez, B., . . . Ruan, R. (2011). Characterization of a microalga Chlorella sp. well adapted to highly concentrated municipal wastewater for nutrient removal and biodiesel production. *Bioresource technology, 102*(8), 5138-5144.

Liang, Z., Liu, Y., Ge, F., Xu, Y., Tao, N., Peng, F., & Wong, M. (2013). Efficiency assessment and pH effect in removing nitrogen and phosphorus by algae-bacteria combined system of Chlorella vulgaris and Bacillus licheniformis. *Chemosphere, 92*(10), 1383-1389.

Lu, Q., Zhou, W., Min, M., Ma, X., Chandra, C., Doan, Y. T. T., . . . Ruan, R. (2015). Growing Chlorella sp. on meat processing wastewater for nutrient removal and biomass production. *Bioresource technology, 198*, 189-197. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.133

Maity, J. P., Bundschuh, J., Chen, C.-Y., & Bhattacharya, P. (2014). Microalgae for third generation biofuel production, mitigation of greenhouse gas emissions and wastewater treatment: Present and future perspectives–A mini review. *Energy, 78*, 104-113.

Mata, T. M., Martins, A. A., & Caetano, N. S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14*(1), 217-232.

Mennaa, F. Z., Arbib, Z., & Perales, J. A. (2015). Urban wastewater treatment by seven species of microalgae and an algal bloom: biomass production, N and P removal kinetics and harvestability. *Water research, 83*, 42-51.

Minhas, A. K., Hodgson, P., Barrow, C. J., & Adholeya, A. (2016). A review on the assessment of stress conditions for simultaneous production of microalgal lipids and carotenoids. *Frontiers in microbiology, 7*, 546.

Park, J., Jin, H.-F., Lim, B.-R., Park, K.-Y., & Lee, K. (2010). Ammonia removal from anaerobic digestion effluent of livestock waste using green alga Scenedesmus sp. *Bioresource technology, 101*(22), 8649-8657.

Pittman, J. K., Dean, A. P., & Osundeko, O. (2011). The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources. *Bioresource technology, 102*(1), 17-25.

Pragya, N., Pandey, K. K., & Sahoo, P. (2013). A review on harvesting, oil extraction and biofuels production technologies from microalgae. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 24*, 159-171.

Qin, L., Shu, Q., Wang, Z., Shang, C., Zhu, S., Xu, J., . . . Yuan, Z. (2014). Cultivation of Chlorella vulgaris in dairy wastewater pretreated by UV irradiation and sodium hypochlorite. *Applied biochemistry and biotechnology, 172*(2), 1121-1130.

Rashid, N., Rehman, M. S. U., Sadiq, M., Mahmood, T., & Han, J.-I. (2014). Current status, issues and developments in microalgae derived biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 40*, 760-778.

Richmond, A. (2008). *Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology*: John Wiley & Sons.

Sathasivan, A. (2009). Biological phosphorus removal processes for wastewater treatment. *Water and wastewater treatment technologies. Oxford (UK): Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, 1-23.

Singh, N. K., & Dhar, D. W. (2011). Microalgae as second generation biofuel. A review. *Agronomy for Sustainable Development, 31*(4), 605-629.

Sreekanth, D., Pooja, K., Seeta, Y., Himabindu, V., & Reddy, P. M. (2014). Bioremediation Of Dairy Wastewater Using Microalgae For The Production Of Biodiesel. *IJSEAT, 2*(11), 783-791.

Suali, E., & Sarbatly, R. (2012). Conversion of microalgae to biofuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16*(6), 4316-4342.

Wang, L., Min, M., Li, Y., Chen, P., Chen, Y., Liu, Y., . . . Ruan, R. (2010). Cultivation of green algae Chlorella sp. in different wastewaters from municipal wastewater treatment plant. *Applied biochemistry and biotechnology, 162*(4), 1174-1186.

Wu, Y.-H., Hu, H.-Y., Yu, Y., Zhang, T.-Y., Zhu, S.-F., Zhuang, L.-L., . . . Lu, Y. (2014). Microalgal species for sustainable biomass/lipid production using wastewater as resource: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 33*, 675-688. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.026

Zhao, Y., Ge, Z., Lui, H., & Sun, S. (2016). Ability of different microalgae species in synthetic high-strength wastewater treatment and potential lipid production. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*.

Zhou, W., Chen, P., Min, M., Ma, X., Wang, J., Griffith, R., . . . Ruan, R. (2014). Environment-enhancing algal biofuel production using wastewaters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 36*, 256-269. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.073

Zhu, L. (2015). Biorefinery as a promising approach to promote microalgae industry: An innovative framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 41*(Supplement C), 1376-1384. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.040

Zhu, L., Wang, Z., Shu, Q., Takala, J., Hiltunen, E., Feng, P., & Yuan, Z. (2013). Nutrient removal and biodiesel production by integration of freshwater algae cultivation with piggery wastewater treatment. *Water research, 47*(13), 4294-4302.

ÖZGEÇMİŞ

1991 yılında Gaziantep'te doğan Sevgi YILMAZ, ilkokul, ortaokul ve lise eğitimini Gaziantep'te tamamladı. 2010 yılında Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başladı ve 2015 yılında Çevre Mühendisi olarak mezun oldu. 2015 yılında Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı.