

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**CHLORELLA VULGARİS MİKROALG KÜLTÜRÜNÜN CO₂ TUTMA
VERİMİNİN VE FARKLI BÜYÜME KOŞULLARINDA BİYODİZEL ÜRETİM
POTANSİYELİNİN İNCELENMESİ**

Gamze AKGÜL

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2021

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**CHLORELLA VULGARİS MİKROALG KÜLTÜRÜNÜN CO₂ TUTMA
VERİMİNİN VE FARKLI BÜYÜME KOŞULLARINDA BİYODİZEL ÜRETİM
POTANSİYELİNİN İNCELENMESİ**

Gamze AKGÜL

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2021

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**CHLORELLA VULGARİS MİKROALG KÜLTÜRÜNÜN CO₂ TUTMA
VERİMİNİN VE FARKLI BÜYÜME KOŞULLARINDA BİYODİZEL ÜRETİM
POTANSİYELİNİN İNCELENMESİ**

**Gamze AKGÜL
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Bu tez çalışması, Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon
Birimi tarafından FYL-2019-4865 nolu proje ile desteklenmiştir.**

TEMMUZ 2021

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**CHLORELLA VULGARIS MİKROALG KÜLTÜRÜNÜN CO₂ TUTMA
VERİMİNİN VE FARKLI BÜYÜME KOŞULLARINDA BİYODİZEL ÜRETİM
POTANSİYELİNİN İNCELENMESİ**

Gamze AKGÜL
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 01/07/2021 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Murat VAROL (Danışman)

Doç. Dr. Sema YURDAKUL

Dr. Öğr. Üyesi Firdes YENİLMEZ

ÖZET

CHLORELLA VULGARIS MİKROALG KÜLTÜRÜNÜN CO₂ TUTMA VERİMİNİN VE FARKLI BÜYÜME KOŞULLARINDA BİYODİZEL ÜRETİM POTANSİYELİNİN İNCELENMESİ

Gamze AKGÜL

Yüksek Lisans Tezi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Murat VAROL

Eş Danışman: Doç. Dr. Ayça ERDEM ÜNŞAR

Temmuz 2021; 118 sayfa

Bu çalışmada; dikey bir fotobiyoreaktörde yetiştirilen *Chlorella vulgaris* (*C. vulgaris*) mikroalg kültürünün CO₂ tutma veriminin ve biyodizel potansiyelinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada, 5 cm iç çapa sahip, 100 cm yüksekliğinde pleksiglastan yapılmış fotobiyoreaktör kullanılmıştır. Farklı oranlarda CO₂ içeren gaz karışımları (hacimce 400 ppm, %15 ve %90), *C. vulgaris* kültürünün yetiştirildiği fotobiyoreaktöre verilerek kültürün CO₂ tutma verimi incelenmiştir. Hacimce 400 ppm CO₂ gazı içeren CO₂+N₂+O₂ gaz karışımı havayı temsil etmektedir. Hacimce %15 CO₂ gazı içeren CO₂+N₂+O₂ gaz karışımı kömürle çalışan termik santrallerinden kaynaklanan baca gazı kompozisyonunu temsil etmektedir. Hacimce %90 CO₂ gazı içeren CO₂+O₂ gaz karışımı ise Oksi-Yanma teknolojisi kullanan ve kömürle çalışan termik santrallerinden kaynaklanan baca gazı kompozisyonunu temsil etmektedir. Çalışmada kullanılan diğer değişken parametreler aydınlatma şiddeti (7 000, 11 000 ve 15 000 lux) ve aydınlatma süresidir (12 saat, 16 saat ve 24 saat aydınlık). Deney süresince fotobiyoreaktörden 24 saatte bir numune alınmıştır. Numunelerde kuru ağırlık (g/L), optik yoğunluk (684 nm ve 750 nm), klorofil-a (665 nm), klorofil-b (645 nm), karotenoid (480 nm) ve pH ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm ve analizler neticesinde kültürün adaptasyon süresi (saat), üreme verimliliği (g (kuru ağırlık)/L/gün), maksimum spesifik büyüme oranı, (μ_{max} , 1/gün) ve CO₂ tutma verimi hesaplanmıştır. CO₂ tutma verimi açısından en iyi sonuçları veren değişken parametreler belirlenmiş ve bu parametre şartları altında, mikroalg kültürü fotobiyoreaktörde azot stresine maruz bırakılarak bünyesindeki lipid oranının nasıl değiştiği incelenmiştir.

7000 lux aydınlatma şiddetinde elde edilen kuru ağırlık derişimi (max ~ 2 g/L) 11 000 lux'e göre 2,5 kat, 15 000 lux'e göre ise 3,8 kat daha fazladır. En yüksek biyokütle derişiminin elde edildiği 24 saat aydınlıkta (max ~ 2 g/L) 16 saat aydınlığa göre 1,8 kat, 12 saat aydınlığa göre 1,5 kat daha fazla verim elde edilmiştir. %15 CO₂'de kuru ağırlık değeri (max ~ 1,47 g/L) 400 ppm_v'e göre 5 kat fazla verimle elde edilmiştir. %15 CO₂ içeren gaz karışımı için mikroalg üreme verimliliği ve CO₂ tutma verimi sırasıyla 0,14 g/L/gün ve 0,25 g/L/gün olarak belirlenmiştir. %90 CO₂ derişimi altında mikroalg büyümesi inhibe olmuştur. %15 CO₂ derişimi altında fotobiyoreaktörde %100 azotlu ortamda lipid oranı başlangıçta %10 iken, deney sonunda %3 oranında belirlenmiştir. %15 CO₂ derişimi altında %100 azotsuz deney inhibe olmuş, büyüme gerçekleşmemiştir. Bu nedenle azot stresi deneylerine erlanmayerde 400 ppm_v CO₂ derişimi altında devam

edilmiştir. %75 azotsuz ortamda %100 azotsuz ortama göre 1,3 kat daha iyi büyüme verimi elde edilmiştir. Ayrıca, %75 azotsuz deneyde %100 azotsuz ortama göre 2,5 kat daha yüksek RuBisCO oranı belirlenmiştir. %100 azotsuz deneyde ise %75 azotsuz ortama göre 1,2 kat daha yüksek lipit oranı elde edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: CO₂ Tutma, Mikroalg, Chlorella vulgaris, Baca Gazı, Termik Santraller, Fotobiyoreaktör, Azot Stresi, Lipit, RuBisCO, Biyodizel.

JÜRİ: Dr. Öğr. Üyesi Murat VAROL

Doç. Dr. Sema YURDAKUL

Dr. Öğr. Üyesi Firdes YENİLMEZ



ABSTRACT

INVESTIGATION OF CO₂ RETENTION EFFICIENCY AND BIODIESEL PRODUCTION POTENTIAL IN DIFFERENT GROWTH CONDITIONS OF CHLORELLA VULGARIS MICROALGAE CULTURE

Gamze AKGUL

MSc Thesis in Department of Environmental Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Murat VAROL

Co-Advisor: Assoc. Prof. Dr. Ayça ERDEM UNSAR

June 2021; 118 pages

In this study; it was aimed to determine the CO₂ capture efficiency and biodiesel potential of *Chlorella vulgaris* (*C. vulgaris*) microalgae culture grown in a vertical photobioreactor. In the study, a photobioreactor made of plexiglass with 5 cm inner diameter and 100 cm height was used. CO₂ capture efficiency of the culture was investigated by giving gas mixtures containing different proportions of CO₂ (400 ppm_v, 15% and 90% by volume) to the photobioreactor. The CO₂ + N₂ + O₂ gas mixture, containing 400 ppm_v CO₂, represents the CO₂ concentration in the air. The CO₂ + N₂ + O₂ gas mixture, which contains 15% CO₂, represents the flue gas composition resulting from coal-fired thermal power plants. The CO₂ + O₂ gas mixture, which contains 90% CO₂, represents the flue gas composition resulting from coal-fired thermal power plants using Oxy-Fuel combustion technology. Other variable parameters are illumination duration (7 000, 11 000 and 15 000 lux) and illumination duration (12 hours, 16 hours and 24 hours of illumination). Samples are taken from the photobioreactors every 24 hours. Dry weight (g/L), optical density (684 nm and 750 nm), chlorophyll-a (665 nm), chlorophyll-b (645 nm), carotenoid (480 nm) and pH were measured for each sample. As a result of the analyzes, adaptation period (hours), reproductive efficiency (g (dry weight)/L/day), maximum specific growth rate, (μ_{max} , 1/day) and CO₂ capture efficiency were calculated for each test. Variable parameters that give the best results in terms of CO₂ retention efficiency were determined and under this parameter conditions, microalgae culture was exposed to nitrogen stress and the lipid ratio in its structure was examined.

The dry weight (max ~ 2 g/L) at 7000 lux was 2.5 and 3.8 times higher than those obtained at 11 000 lux and 15 000 lux, respectively. The highest biomass concentration (max ~ 2 g/L) was obtained in 24 hours of illumination. It was 1.8 and 1.5 times higher than 16 hours and 12 hours of illumination, respectively. Dry weight (max ~ 1.47 g/L) at 15% CO₂ was 5 times higher than 400 ppm_v. Reproductive efficiency and CO₂ capture efficiency for the gas mixture containing 15% CO₂ were determined as 0.14 g/L/day and 0.25 g/L/day, respectively. Microalgal growth was inhibited at 90% CO₂. While the lipid content was 10% at the beginning for the test at 15% CO₂, it was decreased to 3% at the end of the test. The growth was inhibited at 15% CO₂ concentration under nitrogen stress in the photobioreactor. Therefore, nitrogen stress tests were conducted in an erlenmeyer flask at 400 ppm_v CO₂. It was determined that there was a better growth under 75%

nitrogen stress (1.3 times higher) compared to 100% nitrogen stress. Moreover, RuBisCO for 75% nitrogen stress was 2.5 times higher than %100 nitrogen stress. However, In the 100% nitrogen stress test, lipid content was 1.2 times higher compared to the 75% nitrogen stress test.

KEYWORDS: CO₂ Capture, Microalgae, Chlorella vulgaris, Flue Gas, Thermal Power Plants, Photobioreactor, Nitrogen Stress, Lipid, RuBisCO, Biodiesel.

COMMITTEE: Asst. Prof. Dr. Murat VAROL

Assoc. Prof. Dr. Sema YURDAKUL

Asst. Prof. Dr. Firdes YENİLMEZ



ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında *C. vulgaris* mikroalginin CO₂ tutma verimi ve biyodizel potansiyeli yönünden verimi incelenmiştir. Mikroalgler günümüzde iklim değişikliğinin başlıca sebebi olarak görülen CO₂ gazının giderilmesinde çevreci ve yenilenebilir biyodizel üretim yöntemi açısından dikkat çekici bir noktaya gelmişlerdir. Özellikle son yıllarda mikroalglerle ilgili çalışmalara olan yönelim açısından bu çalışmanın ülke ekonomisi ve sürdürülebilir bir çevre yönünden devam eden çalışmalar için bir altyapı oluşturmasını dilerim.

Tez çalışmalarım süresince bilgi ve tecrübesiyle beni her daim yönlendiren, cesaretlendiren, çalışmalarımı büyük bir sabır ve özen ile irdelleyen ve yardımlarını esirgemeyen danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Murat VAROL'a sonsuz teşekkürler..

Eş danışmanım Doç. Dr. Ayça ERDEM ÜNŞAR'a, laboratuvar çalışmalarım da her zaman yardımlarını ve manevi desteklerini esirgemeyen Dr. Merve Özkaleli Akçetin'e, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım Dr. Öğr. Üyesi Gönül T. İçemer'e, Dr. Öğr. Üyesi Firdes Yenilmez'e ve laboratuvar çalışmalarımın ilerleyebilmesi yönünden destek veren Doç. Dr. Aslı S. Çılgın'a ve Doç. Dr. Çiğdem Moral'a, Araş. Gör. Kemal AKTAŞ'a, yüksek lisans öğrencisi Tuğba ÇEVİK'e, Duygu GÖKTEPE'ye ve doktora öğrencisi Bihter OLGUN'a desteklerinden ve yardımlarından ötürü teşekkür ederim.

FBG-2019-4865 no'lu proje kapsamında verilen destekleri nedeniyle Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimine teşekkür ederim.

Yüksek lisans dönemim boyunca bana inanan, desteklerini esirgemeyen ve motivasyonumu güçlü tutan arkadaşım Ali Fuat KOÇ'a sonsuz teşekkür ederim.

Her daim yanımda olan, her daim bana inanan ve desteklerini esirgemeyen annem Sultan AKGÜL'e, babam Metin AKGÜL'e ve kardeşlerim Gülelendam AKGÜL, Gözde AKGÜL ve Adnan Musa AKGÜL'e tüm kalbimle ve en içten duygularım ile teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ	v
AKADEMİK BEYAN	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
1 GİRİŞ.....	1
2 KAYNAK TARAMASI.....	5
2.1 Küresel Isınma ve Sera Gazları.....	5
2.2 Türkiye'nin Sera Gazı Envanteri	8
2.3 Türkiye'de Termik Santraller	10
2.3.1 Kömür Yakıtlı Termik Santraller	10
2.3.2 Termik Santrallerde Baca Gazı İçeriği.....	15
2.4 Karbon Tutma ve Depolama Teknolojileri	15
2.4.1 Yanma Öncesi	22
2.4.2 Oksi-Yanma	22
2.4.3 Yanma Sonrası	24
2.5 Mikroalgler ve Mikroalg Yetiştiriciliği	26
2.5.1 Algal Fotosentez.....	26
2.5.2 <i>C. vulgaris</i>	27
2.5.3 Mikroalg Yetiştirme Sistemleri.....	28
2.5.4 Mikroalg Gelişimine Etki Eden Faktörler.....	31
2.6 Baca Gazında Mikroalgal Uygulamalar ve Mikrobiyal Lipitlerden Biyodizel Üretimi.....	37
3 MATERYAL VE METOT	46
3.1 Mikroalg Kültürü ve Yetiştirme Koşulları.....	46
3.1.1 Besiyeri Özellikleri	46
3.1.2 <i>C. vulgaris</i> Mikroalg Kültürünün Çoğaltılması	48
3.1.3 Hücre Sayımı-Optik Yoğunluk Korelasyonu.....	50
3.2 Laboratuvar Ölçekli Fotobiyoreaktör (Lab-FBR) Sistemi.....	51
3.3 Deney Parametreleri ve Deney Listesi.....	55

3.3.1	Aydınlatma Şiddetinin Mikroalgal Biyokütle Büyüme Verimine Etkisi	55
3.3.2	Aydınlatma Süresinin Mikroalgal Biyokütle Büyüme Verimine Etkisi	55
3.3.3	CO ₂ Derişiminin Mikroalgal Biyokütle Büyüme Verimine Etkisi	56
3.3.4	Azot Stresinin Mikroalgal Biyokütle Büyüme Verimine Etkisi	56
3.4	Deney Prosedürü	57
3.5	Analizler ve Hesaplamalar	57
3.5.1	pH ve Sıcaklık	58
3.5.2	Optik Yoğunluk	58
3.5.3	Kuru Ağırlık	58
3.5.4	Fotosentetik Pigment (Klorofil-a ve Klorofil-b) ve Karotenoid Analizi	59
3.5.5	RuBisCO Analizi	61
3.5.6	Lipit Ekstraksiyonu ve Tayini	63
3.5.7	Mikroalg Üreme Verimliliği	64
3.5.8	Maximum Spesifik Büyüme Oranı	64
3.5.9	CO ₂ Tutma Verimi	65
4	BULGULAR VE TARTIŞMA	66
4.1	Aydınlatma Şiddetinin Mikroalgal Biyokütle Büyüme Verimine Etkisi	66
4.2	Aydınlatma Süresinin Mikroalgal Biyokütle Büyüme Verimine Etkisi	74
4.3	CO ₂ Derişiminin Mikroalgal Biyokütle Büyüme Verimine Etkisi	80
4.4	Azot Stresinin Mikroalgal Biyokütle Büyüme Verimine Etkisi	90
5	SONUÇLAR	98
6	KAYNAKLAR	101
	ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Chlorella Vulgaris Mikroalg Kültürünün CO₂ Tutma Veriminin ve Farklı Büyüme Koşullarında Biyodizel Üretim Potansiyelinin İncelenmesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

01/07/2021

Gamze AKGÜL



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

g	: Gram
L	: Litre
s	: Saniye
°C	: Santigrat Derece
cm	: Santimetre
mL	: Mililitre
µm	: Mikrometre
mm	: Milimetre
ppm	: Milyonda kısım
L	: Litre
m	: Metre
mL	: Mililitre
nm	: Nanometre
vd	: Diğerleri
rpm	: Dakikadaki dönme hızı
Abs	: Absorbans
Mtep	: Milyon Ton Eşdeğeri Petrol
eşd.	: Eşdeğeri
dk	: Dakika

Kısaltmalar

BBM	: Bold Basal Medium
pH	: Bir Çözeltinin Asitlik veya Bazlık Derecesinin Ölçü Birimi
GHG	: Sera Gazı
O ₂	: Oksijen
H ₂ O	: Su
CO ₂	: Karbondioksit
TTK	: Türkiye Taşkömürü Kurumu
İHD	: İşletme Hakkı Devri
MTA	: Maden Tetkik Arama
TKİ	: Türkiye Taş Kömürü
EÜAŞ	: Elektrik Üretim Anonim Şirketi
PBR	: Fotobiyoreaktör
PAR	: Fotosentetik Aktif Radyasyon
PFD	: mmol m ⁻² s ⁻¹
PPFD	: µmol m ⁻² s ⁻¹ (400 - 700 nm de fotosentetik foton akı yoğunluğu)
UV	: Ultraviyole
UTEX	Teksas Üniversitesi Organize Araştırma Birimi Kültür Yosunu : Koleksiyonu
TSKB	: Türkiye Sınai Kalkınma Bankası
NETL	Ulusal Enerji Teknolojisi Laboratuvarı (National Energy Technology : Laboratory's)
CCS	: Carbon Capture and Storage
WWF	: Dünya Doğayı Koruma Vakfı
NASA	: Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi
NH ₄ ⁺	: Amonyum

NO_2	: Azot Dioksit
OH^-	: Hidroksit
kWh	: Kilowatt Saat
NO_3^-	: Nitrat
HCO_3^-	: Bikarbonat
Na	: Sodyum
NO_2^-	: Nitrit
NH_4HCO_3	: Amonyum Bikarbonat
$(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$	: Amonyum Karbonat
NaHCO_3	: Sodyum Bikarbonat
NaOH	: Sodyum Hidroksit
KOH	: Potasyum Hidroksit
NOAA	: ABD Ulusal Okyanus ve Atmosfer Kurumu
KTD	: Karbon Tutma ve Depolama
KTK	: Karbon Tutma ve Yakalama
RuBisCO	: Ribuloz-1,5-bifosfat karboksilaz/oksijenaz
MEA	: MonoEtanolAmin

Bu tez kapsamında ondalık ayracı olarak virgöl (.), binlik ayracı olarak boşluk () kullanılmıştır.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Sera etkisinin şematik gösterimi (Nanda 2016).....	6
Şekil 2.2. Enerji kaynakları tüketiminin çevresel etki yönünden sürdürülebilirlik döngüsü (Selici vd. 2006)	8
Şekil 2.3. Türkiye'nin toplam ve kişi başı sera gazı emisyonlarının yıllara göre değişimi (TÜİK 2021).....	9
Şekil 2.4. a) Sera gazı emisyonlarının yüzdelik dağılımı-2019 b) Sera gazı emisyonlarının sektörlere göre dağılımı-2019 (TÜİK 2021).....	10
Şekil 2.5. Kömür yakıtlı termik santral proses şeması (Plant Scherer, Georgia).....	10
Şekil 2.6. Elektrik üretiminin kullanılan kaynaklara göre dağılımı (TKİ 2020)	14
Şekil 2.7. CO ₂ tutma teknolojileri ve proses detayları (IPCC 2005)	19
Şekil 2.8. Küresel CO ₂ emisyonunu azaltma senaryoları (IEA 2017b).....	19
Şekil 2.9. 2000-2040 yılları arası SKS'sine göre enerji üretiminde büyük ölçekli CO ₂ tutma proje senaryosu (IEA 2019)	20
Şekil 2.10. Yanma öncesi KYD genel işlem şeması (Global CCS Institute 2020)	22
Şekil 2.11. Oksi-yanma proses detayı ve nihai ürünleri (Anonim 3)	23
Şekil 2.12. Oksi-yanma uygulanan bir güç santralinin KYD genel işlem şeması (Global CCS Institute 2020).....	23
Şekil 2.13. Yanma sonrası amin bazlı çözücüler ile CO ₂ tutma işlemi (Ishanee Sharma 2020).	24
Şekil 2.14. Bir güç santralinde yanma sonrası soğurma yöntemi ile CO ₂ tutma işlemi şeması (Global CCS Institute 2020).....	25
Şekil 2.15. Fotosentez akış şeması (Anonim 7).....	27
Şekil 2.16. <i>C. vulgaris</i> mikroalginin mitoz bölünme ile çoğalması (Ru vd. 2020)	27
Şekil 2.17. Açık Sistemler (Zerrouki ve Henni 2019)	30
Şekil 2.18. Kapalı Sistemler (Zerrouki ve Henni 2019)	31
Şekil 2.19. Kültür ortamı altında bir alg popülasyonunun büyüme kinetiği (N- kuru ağırlık, 1- adaptasyon, 2- yoğun büyüme, 3- durağan faz, 4- hücre ölümü).....	32
Şekil 2.20. Işık yoğunluğunun fototrofik yetiştirme altında mikroalglerin spesifik büyüme hızı üzerindeki etkisi (Ogbonna ve Tanaka 2000)	33

Şekil 2.21. a) Artan ışınımına karşı tipik fotosentez yanıt eğrisi. b) Potansiyel olarak fotosentez için kullanılabilir soğurulmuş ışık enerjisi. c) Fotosentez hızını azaltan şiddetli fotoinhibisyonun etkisi (Torzillo ve Vonshak 2013)	34
Şekil 2.22. Mikroalgal biyoyakıt üretimi için genel proses akışı (Mata vd. 2010; Singh ve Cu 2010).....	40
Şekil 2.23. Lipit biyosentezi şeması (Schuhmann vd. 2014).....	44
Şekil 3.1. Stok çözeltilerinin ve besiyerinin hazırlanması.....	47
Şekil 3.2. <i>C. vulgaris</i> mikroalg kültürünün yetiştirilmesi ve besiyeri kullanılarak çoğaltılması	48
Şekil 3.3. Agar üzerinde yetiştirilen <i>C. vulgaris</i> mikroalgleri.....	49
Şekil 3.4. Agar üzerinde muhafaza edilen <i>C. vulgaris</i> mikroalginin aktifleştirilmesi....	49
Şekil 3.5. Hücre sayımında kullanılan sayım kamerası	50
Şekil 3.6. <i>C. vulgaris</i> Mikroalgi Görüntüsü.....	50
Şekil 3.7. Hücre sayımı-optik yoğunluk (684 nm ve 750 nm) korelasyonu	51
Şekil 3.8. Lab-FBR sisteminin detaylı gösterimi.....	52
Şekil 3.9. Lab-FBR sisteminin genel görünümü.....	52
Şekil 3.10. Lab-FBR sistemi parçaları (1. Rotametreler, 2. Sıcaklık kontrol sistemi, 3. Işık akısı ayar ünitesi, 4. Gaz girişi ve çözelti deşarj hattı, 5. Sisteme gaz verilen tüp vanaları, 6. Gaz tahliye hattı)	53
Şekil 3.11. Üç ana pigment sınıfının (klorofil, karotenoid ve fikobilin) ışınım soğurma spektrumları (Kendirlioğlu 2012).....	60
Şekil 3.12. RuBisCO standart eğrisi	62
Şekil 3.13. RuBisCO analizi aşamasından bir görünüm.....	63
Şekil 3.14. Lipit analizi sonucunda gerçekleşen faz ayrımı.....	64
Şekil 4.1. Farklı aydınlatma şiddetlerinde fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerinin OD değerlerinin zamanla değişimi (%15 CO ₂ +%3 O ₂ +%82 N ₂ ; 24 saat aydınlık)	67
Şekil 4.2. Farklı aydınlatma şiddetlerinde fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerinin pH değerlerinin zamanla değişimi (%15 CO ₂ +%3 O ₂ +%82 N ₂ ; 24 saat aydınlık)	69

Şekil 4.3. Farklı aydınlatma şiddetlerinde fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerinin kuru ağırlık değerlerinin zamanla değişimi (%15 CO ₂ +%3 O ₂ + %82 N ₂ ; 24 saat aydınlık)	70
Şekil 4.4. Farklı aydınlatma şiddetlerinde fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerinin klorofil a, klorofil b ve karotenoid değerlerinin zamanla değişimi (%15 CO ₂ +%3 O ₂ +%82 N ₂ ; 24 saat aydınlık).....	72
Şekil 4.5. Farklı aydınlatma sürelerinde fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerinin OD değerlerinin zamanla değişimi (%15 CO ₂ +%3 O ₂ +%82 N ₂ ; 7 000 lux)	75
Şekil 4.6. Farklı aydınlatma sürelerinde fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerinin pH değerlerinin zamanla değişimi (%15 CO ₂ +%3 O ₂ +%82 N ₂ ; 7 000 lux)	76
Şekil 4.7. Farklı aydınlatma sürelerinde fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerinin kuru ağırlık değerlerinin zamanla değişimi (%15 CO ₂ +%3 O ₂ + %82 N ₂ ; 7 000 lux).....	77
Şekil 4.8. Farklı aydınlatma sürelerinde fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerinin klorofil-a ve klorofil-b ve karotenoid değerlerinin zamanla değişimi (%15 CO ₂ +%3 O ₂ +%82 N ₂ ; 7 000 lux).....	79
Şekil 4.9. %90 CO ₂ derişiminde inhibe olan mikroalglere ait görsel	81
Şekil 4.10. Farklı CO ₂ derişimleri altında fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerinin OD değerlerinin zamanla değişimi (7 000 lux; 24 saat aydınlık).....	82
Şekil 4.11. Farklı CO ₂ derişimleri altında fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerinin pH değerlerinin zamanla değişimi (7 000 lux; 24 saat aydınlık).....	83
Şekil 4.12. Toplam CO ₂ fraksiyonlarının pH ile ilişkisi (Wetzel 1983).....	84
Şekil 4.13. Farklı CO ₂ derişimleri altında fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerinin kuru ağırlık değerlerinin zamanla değişimi (7 000 lux; 24 saat aydınlık)	85
Şekil 4.14. Farklı CO ₂ derişimleri altında fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerinin klorofil-a, klorofil-b ve karotenoid değerlerinin zamanla değişimi (7 000 lux; 24 saat aydınlık).....	86
Şekil 4.15. Fosfat tamponunun pH dengesi (Anonim 1)	89
Şekil 4.16. %15 CO ₂ derişiminde %100 azotlu ve %100 azotsuz ortamda fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerin OD değerlerinin zamanla değişimi (%15 CO ₂ +%3 O ₂ +%82 N ₂)	90

Şekil 4.17. %15 CO ₂ derişiminde %100 azotlu ve %100 azotsuz ortamda fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerin kuru ağırlık değerlerinin zamanla değişimi (%15 CO ₂ +%3 O ₂ +%82 N ₂)	91
Şekil 4.18. %15 CO ₂ derişiminde %100 azotlu ve %100 azotsuz ortamda fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerin pH değerlerinin zamanla değişimi (%15 CO ₂ +%3 O ₂ +%82 N ₂)	92
Şekil 4.19. %15 CO ₂ derişiminde %100 azotlu ve %100 azotsuz ortamda fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerin klorofil-a, klorofil-b ve karotenoid değerlerinin zamanla değişimi (%15 CO ₂ +%3 O ₂ +%82 N ₂).....	93
Şekil 4.20. %15 CO ₂ derişiminde %100 azotlu ortamda fotobiyoreaktörde geręekleřtirilen deney öncesinde ve sonrasında <i>C. vulgaris</i> mikroalg kùltürüne ait lipit oranları.....	94
Şekil 4.21. 400 ppm _v CO ₂ derişimi altında erlanmayer içerisinde farklı azot stresi ortamlarında yetiştirilen mikroalglerin optik yoğunluk değerlerinin zamanla değişimi	95
Şekil 4.22. 400 ppm _v CO ₂ derişimi altında erlanmayer içerisinde farklı azot stresi ortamlarında yetiştirilen mikroalglerin lipit oranları.....	96
Şekil 4.23. Farklı azot kaynaklarında RuBisCO enzim miktarındaki değişimler.....	97

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Sera gazları ve bu gazları sera gazı etkisindeki oranları (Anonim 4).....	7
Çizelge 2.2. Türkiye’de yerli kömüre dayalı büyük ölçekli termik santraller (TKİ 2018)	13
Çizelge 2.3. Mart 2020 döneminde lisanslı elektrik üretiminin kaynak bazında dağılımı ve 2019 yılı mart ayı değeriyle karşılaştırılması (MWh-%) (EPDK 2020).....	14
Çizelge 2.4. Küresel ölçekte KTD teknolojilerinin uygulama yöntemlerine göre dağılımı (NETL 2021).....	17
Çizelge 2.5. CO ₂ tutma teknolojilerinin özeti (Nanda 2016).....	21
Çizelge 2.6. Farklı mikroalg yetiştirme sistemlerinin özelliklerinin karşılaştırılması (Yen vd. 2014)	29
Çizelge 3.1. Alg kültürü için hazırlanan Bolds Basal Besiyeri (1 L) içeriği (Bogless 2014)	46
Çizelge 3.2. SET-I kapsamında yapılan deneyler ve deney şartları	55
Çizelge 3.3. SET-II kapsamında yapılan deneyler ve deney şartları	55
Çizelge 3.4. SET-III kapsamında yapılan deneyler ve deney şartları.....	56
Çizelge 3.5. SET-IV kapsamında yapılan deneyler ve deney şartları.....	57
Çizelge 4.1. Farklı aydınlatma şiddetlerinde <i>C. vulgaris</i> mikroalg kültürü için belirlenen kinetik parametreler (%15 CO ₂ +%3 O ₂ +%82 N ₂ ; 24 saat aydınlık)	73
Çizelge 4.2. Farklı aydınlatma sürelerinde <i>C. vulgaris</i> mikroalg kültürü için belirlenen kinetik parametreler (%15 CO ₂ +%3 O ₂ +%82 N ₂ ; 7 000 lux).....	80
Çizelge 4.3. Farklı CO ₂ derişimleri altında <i>C. vulgaris</i> mikroalg kültürü için belirlenen kinetik parametreler (7 000 lux; 24 saat aydınlık)	87
Çizelge 4.4. Mikroalg aşılama derişimleri	88
Çizelge 4.5. %15 CO ₂ derişiminde %100 azotlu ve %100 azotsuz ortamda <i>C. vulgaris</i> mikroalg kültürü için belirlenen kinetik parametreler (%15 CO ₂ +%3 O ₂ +%82 N ₂ ; 7 000 lux; 24 saat aydınlık).....	93

1. GİRİŞ

Türkiye gelişmekte olan bir ekonomiye sahiptir. 2003-2020 döneminde Türkiye ekonomisinde yıllık ortalama %5,1 oranında büyüme kaydedilmiştir. Türkiye ekonomisi 2021 yılının ilk çeyreğinde geçen yılın aynı dönemine göre %7,0 oranında büyüme göstermiştir (T.C. Ticaret Bakanlığı 2021). 2000 yılında 27,3 Giga Watt (GW) olan Türkiye elektrik kurulu gücü, 2020 Eylül ayı itibarıyla 93,2 GW'a ulaşmıştır (T.C. TSKB 2020). Bu büyüme oranlarının devamlılığı için artan enerji talebini karşılamak gerekmektedir. Türkiye'nin 2018 yılında birincil enerji arzı 144 Milyon ton eşdeğer petrol (Mtep) olmuştur (Yılankıran ve Doğan 2020). Artan bu enerji ihtiyacı ile birlikte, ülkenin karbondioksit (CO₂) emisyonları da sürekli olarak artmaktadır.

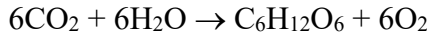
Dünya enerji ihtiyacının çok büyük bir kısmı fosil yakıtlardan sağlanmakta ve bunun sonucunda atmosfere başta CO₂ olmak üzere birçok kirletici gaz salınmaktadır. Sera gazları arasında CO₂, atmosferdeki derişimi insan faaliyetleri sonucu en çok artan gazdır. 1980 yılında 340 ppm düzeyinde olan atmosferdeki küresel CO₂ derişimi, Haziran 2021 itibarıyla 419,05 ppm seviyelerine çıkmıştır (NOAA 2021). Dünya genelinde fosil yakıtların yakılmasından kaynaklanan CO₂ emisyonları 1973 yılında 15,5 Giga ton (Gt) iken 46 yıllık bir zaman diliminde %100'ün üzerinde bir artışla 2018 yılında 35 Gt'a ulaşmıştır (IEA 2017a). Türkiye'nin toplam sera gazı emisyonları (CO₂ eşdeğeri-2019 yılı) 506,1 Milyon ton'dur (TÜİK 2021). Bu emisyonların %72'si enerji sektöründen kaynaklanmakta, CO₂ ise toplam sera gazı emisyonlarının %78,9'unu oluşturmaktadır (TÜİK 2021). Ülke özelinde olmakla birlikte küresel anlamda da, gelecek nesillere sağlıklı ve yaşanabilir bir dünya bırakmak adına içinde yaşadığımız yüzyılın en önemli konusu atmosfere verilen başta CO₂ olmak üzere küresel ısınmaya neden olan sera gazlarıdır. Gerek nüfus artışı gerekse refah düzeyindeki artış özellikle ülkemiz gibi gelişmekte olan ülkelerin enerji ihtiyacını arttırmaktadır. Enerji talebindeki artışa rağmen sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik stratejilerin ve teknolojilerin geliştirilmesi küresel ısınma ile mücadelede hayati bir önem taşımaktadır. CO₂ emisyonlarının azaltılması küresel ısınmanın etkilerinin asgari düzeyde tutulması için oldukça önemlidir. Bu durum, mevcut tesislerden kaynaklanan ya da yeni kurulacak tesislerden kaynaklanacak olan CO₂ emisyonlarını azaltmak için gelecek vadeden teknolojilerin kullanılmasını zaruri kılmaktadır.

Atmofere verilen CO₂ emisyonlarının azaltılması için 3 temel seçenek mevcuttur. Bunlardan ilki enerjinin verimli kullanılması, ikincisi enerji üretiminde fosil yakıtlar yerine alternatif ve yenilenebilir kaynakların tercih edilmesi, üçüncü seçenek ise baca gazında CO₂ gazını tutacak ve ayrıştırarak teknolojilerin geliştirilmesidir (Yang vd., 2008). Baca gazındaki CO₂ emisyonlarının azaltılmasını amaçlayan stratejilerden birisi Karbon Tutma ve Depolama (KTD) teknolojisinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılmasıdır (Míguez vd. 2018). KTD teknolojileri, güç santralleri ve endüstriyel tesisler gibi noktasal kaynaklardan kaynaklanan CO₂ emisyonlarının azaltılmasında önemli bir rol oynayabilir. CO₂ gazının baca gazından ayrıştırılması; soğurma (absorption), bir yüzey üzerinde tutma (adsorption), membrane filtre ile ayırma (membrane separation), kriyojenik damıtma (cryogenic distillation) ve biyolojik olarak tutma (mikroalglerin kullanımı) gibi uygulamaları içermektedir (Míguez vd. 2018).

Biyolojik olarak baca gazındaki CO₂ gazını tutma uygulamalarında mikroalglerin kullanılması biyoyakıt üretimi yönünden yeni bir yöntemdir. Özellikle biyodizel ve

biyoetanol gibi biyoyakıtların üretiminde, diğer kaynaklara kıyasla mikroalgler daha dikkat çekici bir konumdadır. Günümüzde kullanılan biyoyakıt üretim yöntemlerinin, yüksek miktarda arazi alanlarına ihtiyaç duymasının yanısıra tarımsal yönden kullanılmayan arazilerde bile alg üretim tesislerinin kurulma imkanının olması ve tarımsal üretimin engellenmemesi mikroalgleri bu konuda benzersiz bir alternatif olarak öne çıkarmaktadır (Ullah vd. 2014). Mikroalgler, doğal su kaynaklarında ya da tuzlu sularda yaşayabilen tek hücreli ve klorofil içeren canlılardır. Kökleri, gövdeleri ve yaprakları yoktur. Mikroalgler, fotoototrof beslenme yoluyla atmosferdeki CO₂ gazını enerji kaynağı olarak kullanırlar. Fotosentez, klorofil içeren organizmaların besin ihtiyaçlarını karşılamak için güneş ışığını kullanarak CO₂ ve su (H₂O) gibi inorganik bileşiklerden organik bileşiklerin üretilmesi olayıdır (Tepkime 1). Fotosentez yoluyla organizmalar güneş enerjisini kimyasal enerjiye dönüştürürken, CO₂ gazını da bünyelerine dahil ederek atmosferden uzaklaştırırlar. Bu prensipten yola çıkarak, baca gazının doğrudan klorofil içeren organizmalara verilmesiyle baca gazındaki CO₂ gazının uzaklaştırılması mümkündür. Fakat karasal bitkiler tarafından gerçekleştirilen fotosentez yoluyla CO₂ gazının bacadan uzaklaştırılması işlemi oldukça yavaştır, çünkü karasal bitkilerin fotosentez için güneş enerjisini kullanabilme verimliliği sadece %0,2 civarındadır (Nakamura vd. 2003). Mikroalgler ve fotosentez yapabilen bakteriler (cyanobacteria) yüksek büyüme hızları nedeniyle karasal bitkilere oranla atmosferdeki karbonu bünyelerine daha hızlı alabilmektedirler (Goli vd. 2016). Birçok mikroalg bünyesinde karbonik anhidraz enzimi barındırır. Bu enzim, yavaş bir tepkime olan CO₂ gazının bikarbonata (HCO₃⁻) dönüşümü tepkimesini hızlandırır (Míguez vd. 2018). Güneş enerjisini kullanabilme verimliliği dış ortamda bulunan bazı mikroalgler için %5'lere kadar çıkabilmektedir (Nakamura vd. 2003).

Klorofil



(Tepkime 1)

Besin ihtiyacının ve ışık gereksiniminin kapalı sistemlerde sağlandığı kontrollü şartlarda (fotobiyoreaktörlerde) mikroalglerin CO₂ gazını tutma oranının bir ağaca göre 10 kat daha fazla olduğu belirtilmektedir (Usui ve Ikenouchi 1997). Mikroalg kütlesinin yaklaşık olarak %50'si (kuru bazda) karbondur. Mikroalg kütlesindeki karbonun tamamı atmosfer kaynaklı olmak üzere CO₂ gazından gelmektedir. 100 kg mikroalg üretimi esnasında atmosferden yaklaşık 183 kg CO₂ gazı uzaklaştırılabilmektedir (Chisti 2007).

Ticari amaçlı olarak mikroalg üretimi için yaygın olarak büyük hacimli yosun havuzları (açık sistemler) kullanılmaktadır (Chisti 2007). Yosun havuzları genellikle 0,3 m derinliğe sahip kanallardan oluşmaktadır. Havuzda suyun dolaşımı ve mikroalglerin karışımı su çarklarıyla kontrol edilir. CO₂ gazını bacadan mikroalgler vasıtasıyla tutmak için büyük hacimli yosun havuzları kullanılabildiği gibi boru tipi fotobiyoreaktörler (kapalı sistemler) de kullanılabilmektedir. Yosun havuzlarında yaşanan derinlikle birlikte ışık geçirgenliğindeki azalmanın fotobiyoreaktörlerde yaşanmaması, fotobiyoreaktörlerin yosun havuzlarına göre en önemli avantajıdır (Goli vd. 2016). Yosun havuzlarında sıcaklık gün içinde ve mevsimsel olarak değiştiği için sıcaklık kontrolü zordur. Havuzlardaki suyun buharlaşmadan dolayı kaybı söz konusudur. Havuza verilen CO₂ gazı kolaylıkla atmosfere kaçabildiği için yosun havuzlarında CO₂ gazı fotobiyoreaktörlere göre daha az verimle tutulur (Chisti 2007). Fotobiyoreaktör camdan ya da plastikten (plexiglass) yapılmış saydam borulardan oluşur. Boruların etrafında fotosentezin gerçekleşebilmesi için gerekli olan ışığın sağlandığı bir ışık kaynağı mevcuttur (büyük

üretim oranları için genellikle gün ışığı kullanılır). Boru içinde mikroalg derişimi arttıkça ışık geçirgenliği de azaldığı için boruların çapları 0,1 m veya daha az olarak tasarlanmaktadır (Chisti 2007). Fotobiyoreaktörde mikroalgler su içerisinde askıda dururken, reaktörün alt bölümünden sulu çözeltiye baca gazı verilmektedir. Baca gazındaki CO₂ mikroalgler tarafından karbon kaynağı olarak kullanılmakta ve böylece baca gazındaki CO₂ uzaklaştırılmaktadır (Goli vd. 2016).

Mikroalgler konvansiyonel ürünlerle karşılaştırıldığında çok yüksek büyüme hızına ve biyokütle üretmek için yüksek fotosentetik aktiviteye sahiptir. Özellikle sahip olduğu yüksek lipid içeriğinden dolayı biyodizel üretiminde alternatif kaynaklar arasında gösterilmektedir (Ahmad vd. 2011; Chen vd. 2011, Mata vd. 2010). Mikroalglerden biyodizel eldesi, diğer yakıt türlerine göre daha küçük alanlarda daha yüksek verimle mümkündür (Chisti 2007). Kaynaklarının tükenebilme potansiyelinin olması ve sera gazı emisyonlarına ciddi oranda katkı sağlamaları sebebiyle, günümüzde birincil enerji kaynakları olan fosil yakıtların yerine sürdürülebilir ve çevre dostu olan biyodizel üretimine karşı bir eğilim oluşmuştur. Doğada %99,5 gibi oldukça yüksek bir oranda parçalanabilen bir yakıt özelliği taşıması ve çevreye zarar verecek çıktılar oluşturmaması biyodizel üretiminin en önemli avantajları arasında öne çıkmaktadır (Özdemir ve Mutlubaş 2016). Fotosentez boyunca karbon döngüsünde CO₂ gazının kullanılmasını hızlandırması ve sera etkisi oluşturmaması da önemini bir kat daha arttırmaktadır. Biyodizelin alevlenme seviyesinin dizel yakıtlara göre 110 °C'den daha yüksek sıcaklarda gerçekleşmesi ise depolanmasını ve taşınmasını daha güvenilir kılmaktadır (Chattopadhyay ve Sen 2013).

1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Baca gazından CO₂ gazının mikroalg kullanılarak, biyolojik olarak uzaklaştırılmasında elde edilecek verim; kullanılan mikroalg kültürü, reaktör tipi (açık havuz, fotobiyoreaktör), CO₂ gazı derişimi, gaz akış hızı, aydınlatma şiddeti, pH, sıcaklık, besiyeri gibi farklı parametrelere bağlıdır (Sadeghizadeh vd. 2017). Baca gazından CO₂ gazının uzaklaştırılması için farklı alg türleri kullanılmıştır. Alg türleri arasında *Chlorella vulgaris* (*C. vulgaris*) yüksek CO₂ derişimlerini tolere edebilme ve yüksek büyüme hızı gibi özellikleri nedeniyle CO₂ tutmak için kullanılabilecek iyi bir tür olarak görülmektedir (Sadeghizadeh vd. 2017). *C. vulgaris*, *Chlorella* türleri (*C. vulgaris* sp. H84, *C. vulgaris* sp. A2, *C. vulgaris* sorokiniana UTEX 1230, *C. vulgaris* ve *Pyrenoidosa*) arasında en yüksek büyüme oranı göstermiştir (Jeong vd. 2003). *C. vulgaris* mikroalginin sadece klorofil-a ve klorofil-b içermesi, fotosentez sonucunda yapısında çoklu doymuş lipid asitlerini biriktirmesini sağlamaktadır. Biyodizel üretiminde doymamış yağlar, yağlanma ortamına ilave edilerek ortamın polimerizasyonu arttırdığı için motoru tahrip edip, viskoziteyi artırıcı etki yaratmaktadır (Yusuf vd. 2011). Bu durumun önlenmesi açısından ise doymamış yağların doymuş hale getirilmesi gerekir, ki bu da oldukça maliyetli bir işlemdir. Bu nedenlerden dolayı *C. vulgaris*'ten elde edilen doymuş lipid asitleri hem maliyet hem de verim açısından avantajlı bir biyodizel kaynağı olarak ön plana çıkmaktadır. Bu nedenlerden dolayı, çalışmada mikroalg olarak *C. vulgaris* kullanılmasına karar verilmiştir.

Çalışmada dikey bir fotobiyoreaktörde yetiştirilen *C. vulgaris* mikroalg kültürünün CO₂ tutma veriminin ve farklı büyüme koşullarında biyodizel üretim potansiyelinin belirlenmesi amaçlanmaktadır.

Çalışma kapsamında değişken parametreler olarak-;

1. Aydınlatma şiddetinin (7000, 11 000 ve 15 000 lux),
2. Aydınlatma süresinin (12, 16 ve 24 saat aydınlık) ve
3. CO₂ gazı derişiminin (hacimce 400 ppm, %15 ve %90)

C. vulgaris mikroalg kültürünün büyüme verimine etkisinin incelenmesi ve kültürün büyüme verimi bakımından en iyi parametre değerlerinin belirlenmesi hedeflenmektedir.

Büyüme verimi bakımından en iyi sonuçları veren değişken parametre şartlarında *C. vulgaris* mikroalg kültürü azot stresine maruz bırakılarak azot stresinin lipit üretimine etkisinin incelenmesi ve böylece kültürün biyodizel potansiyelinin ortaya konulması da çalışmanın bir diğer hedefidir.

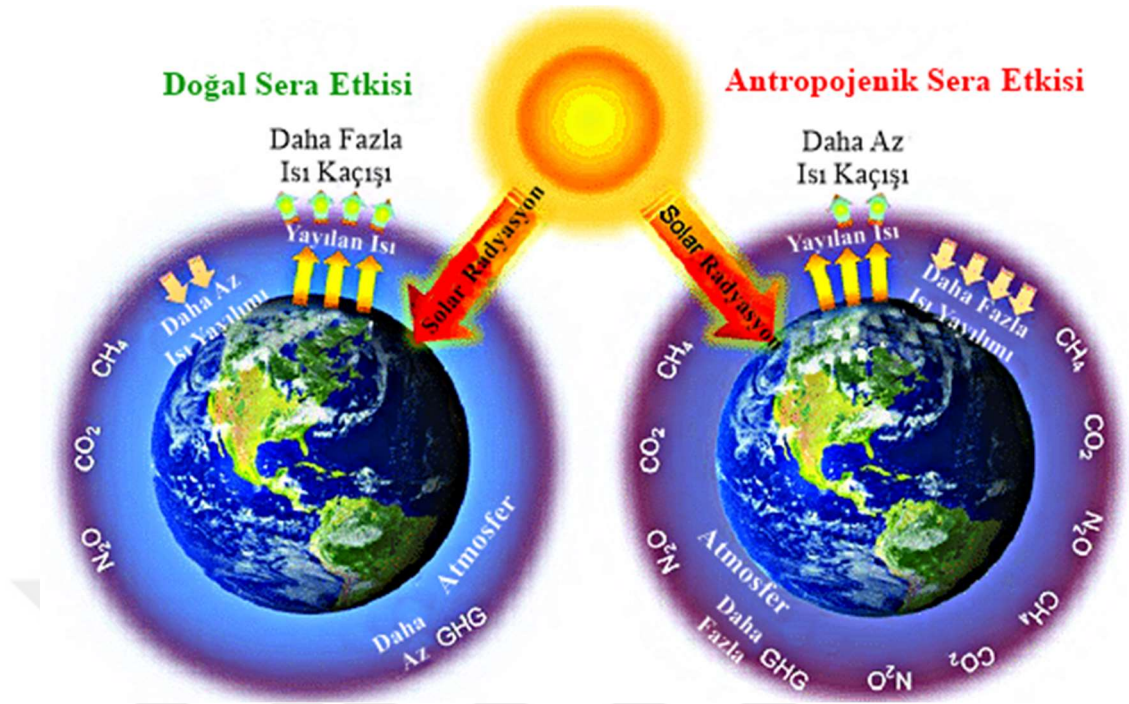
Bu kapsamda, her bir deney için fotobiyoreaktörden 24 saatte bir numune alınmıştır. Alınan numunelerde pH, sıcaklık, optik yoğunluk, kuru ağırlık (g/L), klorofil-a, klorofil-b ve karotenoid ölçümleri yapılmıştır. Yapılan analizler neticesinde her bir deney için mikroalg üreme verimliliği (P_t , g (kuru ağırlık)/L/gün), maksimum spesifik büyüme oranı, (μ_{max} , 1/gün) ve CO₂ tutma verimi (R_{CO_2} , g CO₂/L/gün) hesaplanmıştır.

2. KAYNAK TARAMASI

2.1. Küresel Isınma ve Sera Gazları

Küresel ısınma, sanayi öncesi dönemden (1850 ile 1900 arasında) günümüze başta fosil yakıt kullanımı olmak üzere insani faaliyetler nedeniyle atmosferde sera gazlarının artması neticesinde Dünya iklim sisteminde gözlemlenen uzun süreli ısınma olarak tanımlanmaktadır. Dünya'nın küresel yüzey sıcaklığındaki ortalama artış olarak ifade edilmektedir (NASA 2021).

Dünya, enerjisini Güneş'ten almakta ve aldığı kadar enerjiyi de tekrar kızılötesi ışıınım şeklinde uzaya yaymaktadır. Bu nedenle, Dünya ısı olarak kararlı bir haldedir. Bu kararlı hal ve ısı denge durumunda, atmosferin olmadığı düşünülürken, Dünya ortalama yüzey sıcaklığının -18°C olması gerekmektedir. Atmosfer başlıca iki gazdan oluşmaktadır, atmosferin yaklaşık olarak hacimce %78'i azot gazı (N_2) ve %21'i ise oksijen gazıdır (O_2). Bu iki gaz, güneş ışınlarına ve dünyadan salınan kızılötesi ışınlarla karşı geçirengindir. Bu ışınları ne soğururlar ne de yayarlar. Fakat, atmosferde, kızılötesi ışınları tutabilen bazı gazlar vardır. Bu gazlar, sera gazları olarak tanımlanır. Güneş'ten gelen görünür ışık atmosferden geçer ve yeryüzüne ulaşır. Yaklaşık olarak güneş ışığının %51'i yeryüzünde kara, su ve bitki örtüsü tarafından soğurulur. Bu enerjinin bir kısmı kızılötesi ışıınım şeklinde yeryüzünden atmosfere tekrar salınır. Bu mekanizma, Güneş'ten gelen enerjinin yanı sıra yeryüzü için ikinci bir enerji kaynağını meydana getirir. Atmosferdeki sera gazları yeryüzünden yayılan kızılötesi ışığı soğurur. Sera gazları, soğurdukları ışıınımı tekrar kızılötesi ışık şeklinde yayarlar. Bu sayede, yeryüzü ortalama sıcaklığı 15°C olmaktadır. Sera etkisi doğal bir olaydır ve sera etkisi nedeniyle yeryüzü ortalama 33°C ($15^{\circ}\text{C} - (-18^{\circ}\text{C})$) daha sıcaktır. Bu durum, yeryüzünün canlılar için yaşanabilir bir yer olmasına olanak sağlamaktadır. Ancak özellikle sanayi devrimi sonrasında insan kaynaklı faaliyetler neticesinde (antropojenik) sera gazlarının atmosferdeki derişimlerinde gerçekleşen aşırı artış, atmosferde tutulan ısı miktarını arttırmakta, yeryüzü ortalama yüzey sıcaklığının daha fazla artmasına neden olmaktadır. Şekil 2.1'de doğal sera etkisi ve atmosferde sera gazlarının derişimlerinin artması neticesinde meydana gelen antropojenik sera etkisi karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir (Nanda 2016).



Şekil 2.1. Sera etkisinin şematik gösterimi (Nanda 2016)

Küresel yüzey sıcaklığının belirlenmesi, Dünya'nın yüzey sıcaklığında farklı zamanlarda meydana gelen değişimlerin tespiti açısından oldukça büyük bir öneme sahiptir. Küresel çapta bu sıcaklık değerleri; İngiltere Ulusal Meteoroloji Merkezi (Met Office) ve Doğu Anglia Üniversitesi tarafından HadCRUT analiz metodu, NASA Goddard Uzay Araştırmaları Merkezi tarafından NASA GLISS analiz metodu ve ABD Ulusal Okyanus ve Atmosfer Kurumu (NOAA) tarafından NOAA NCDC analiz metodu kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu sıcaklık tespitleri yapılırken kara ve deniz sıcaklıklarına ait verilerin birleştirilmesi söz konusu olmaktadır. Fakat belirlenen sonuçlar mutlak sıcaklık verisi olarak değil sıcaklık anormali olarak tanımlanmaktadır. Mutlak sıcaklıktan ziyade anormalliklerle çalışılmasının temelinde, mutlak sıcaklığın kısa mesafelerde belirgin şekilde değişmesi, aylık veya yıllık sıcaklık anormalliklerinin ise çok daha geniş bir bölgeyi temsil etmesi yatmaktadır (GISS NASA 2021). 1901-2000 yılları arasında geçen sürede küresel ortalama yüzey sıcaklığı 0,6 °C'lik bir yükseliş yaşarken, bu yükseliş değerinin 1906-2005 yılları arasında 0,74 °C olduğu kayıtlara geçmiştir (IPCC 2007). NOAA 2020 yılı için yaptığı küresel analizde; 2020 yılında küresel kara ve okyanus yüzey sıcaklıklarının ortalama değerden + 0,98 °C'den saparak, 141 yıllık sürede en sıcak ikinci yıl olma özelliğini taşıdığını belirtmiştir (NOAA 2020).

Yüzeye yakın atmosferdeki sıcaklık artışından kaynaklanan ısınmanın etkisiyle, iklim sisteminde depolanan fazla enerjinin 1970 yılından itibaren okyanuslara doğru yönelmesinin buzulların erimesine, kıtalar ve atmosferin ısınmasına yol açtığı belirtilmektedir. Bu artan sıcaklık etkilerinden dolayı meydana gelen iklim değişikliklerinin, yeryüzündeki yaşam için geri dönülemez sonuçlarının oluşmaması ise, ortalama yüzey sıcaklıklarında meydana gelen artışın 1,5 °C 'den daha az olmasına bağlı olduğu ifade edilmektedir. Sera gazı emisyonlarının azaltılmaması durumunda 2065 yılına kadar geçen süreçte küresel ortalama yüzey sıcaklıklarında 2,6 °C civarında bir artış olması tahmin edilmektedir (WWF 2018).

Dünya iklim sistemini etkileyen başlıca sera gazları; H_2O , CO_2 , CH_4 , diazotmonoksit (N_2O), ozon (O_3) ve halokarbonlardır. Atmosferde sera gazlarının derişimlerinin artması, zaman içerisinde iklim sisteminin değişmesine neden olmaktadır. İnsani faaliyetler sonucu atmosfere verilen birincil sera gazı CO_2 'dir. CO_2 ; renksiz, kokusuz ve yanmayan bir gazdır. Karbon çevriminin önemli bir bileşeni olarak, atmosferde doğal olarak bulunmaktadır. Doğal olarak oluşan bir gaz olmasına rağmen, aynı zamanda atmosfere fosil yakıtların yanması sonucu son ürün olarak salınmaktadır. Endüstriyel süreçler, arazi kullanım değişiklikleri ve biyokütle de CO_2 salınımına sebep olmaktadır (Ekin 2018).

H_2O dışındaki sera gazları arasında CO_2 gazının küresel ısınmadaki payı %50'nin üzerindedir (Türkeş 2001; Morcalı 2018). 1998 yılında atmosferde 368 ppm_v CO_2 derişiminin 21. yüzyılın bitişinde 500 ppm'e ulaşacağı öngörülmektedir (IPCC 1996). 2021'in ilk yarısında CO_2 derişiminin 419,05 ppm'e (NOAA 2021) ulaşması çok kritik bir durumun varlığını göz önüne koymaktadır. Atmosfer bileşiminde yer alan sera gazlarının derişimlerinin artmasında en etkili sera gazları ve bu gazların etki oranları Çizelge 2.1'de gösterilmiştir (Anonim 4).

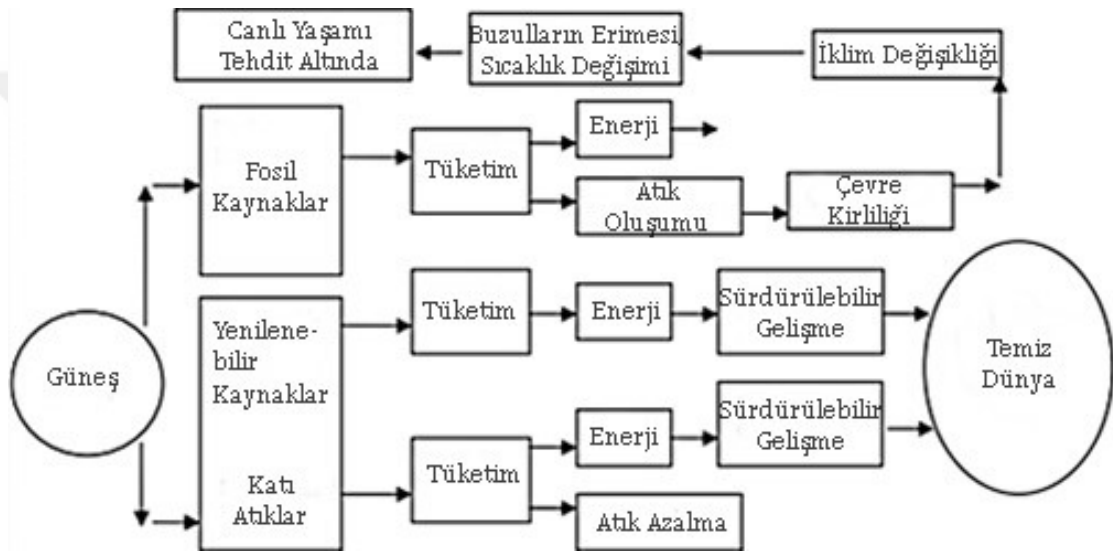
Çizelge 2.1. Sera gazları ve bu gazları sera gazı etkisindeki oranları (Anonim 4)

Sera Gazı	Sera Gazları İçindeki Payı
CO_2	%72
Metan (CH_4)	%19
N_2O	%6
Florlu Gazlar - Hidro-floro-karbonlar (HFCs) - Perfloro-karbonlar (PFCs) - Sülfür hegza florür (SF_6)	%3

Sera gazı oranındaki artışların etkisiyle yer ve atmosfer sisteminin ısınım dengesi bozulmakta ve atmosferdeki sıcaklık oranında tehlikeli boyutlara varan artışlar söz konusu olmaktadır. Bu nedenle; temelde H_2O , CO_2 , CH_4 , N_2O ve O_3 etkisiyle yaşamsal döngü için gerekli olan doğal sera etkisi artış göstermekte, ekolojik dengeyi olumsuz etkileyen bir durum olan antropojenik sera etkisi olarak adlandırılan tehlikeli boyutlara ulaşmaya devam etmektedir. Antropojenik sera etkisi sonucunda ortaya çıkabilecek bir küresel ısınmanın boyutu, sera gazlarının artış hızına, miktarına, ısınımsal özelliklerine, atmosferde tutunma zamanlarına bağlıdır (Türkeş 2001).

Günümüzde sera gazlarının derişimlerindeki artış durdurulsa dahi, bu gazlardan kaynaklı meydana gelen sera etkisi gazların atmosferik ömürleri nedeniyle uzun yıllar devam edecektir. CH_4 , N_2O ve O_3 tabakasına ciddi zarar veren kloroflorokarbon türlerinden CF_4 'ün atmosferik ömürleri sırasıyla 12-15 yıl, 120 yıl ve 50 000 yıl olduğu

belirlenmektedir (UNFCCC 2021a). Sera gazlarını meydana getiren bu gazların miktarlarını enerji üretimi ve kullanımıyla ilgili bir takım değişikliklerle azaltmaya yönelik çalışmalar 21. yüzyılın odak noktası haline gelmiştir. Şekil 2.2’de bu çalışmaların etkisiyle daha temiz bir dünyanın oluşumuna katkı sağlayabilecek işlevler şematik olarak gösterilmektedir. Bu bağlamda, enerjinin, çevre ve sürdürülebilir kalkınma ile yakın bir ilişki içerisinde olduğu görülmektedir. Sürdürülebilir yönden kalkınmayı hedefleyen ülkelerin çevreyi tahrip eden emisyonları yaymayan enerji kaynaklarına yönelmeleri gerekmektedir. Mevcut tüm enerji kaynakları çevresel yönden etkiler oluştururlar. Önemli olan nokta; enerji verimliliğini maksimum seviyeye çıkarmak ve çevreyi tahrip etme oranlarını oldukça önemli miktarlarda azaltabilmektir. İşte bu sebeple; enerji verimliliği ve çevreye etkileri arasında ciddi bir ilişki durumu vardır. Eşit oranda enerji üretmek amacıyla kaynak kullanımının azaltılması, kirlilik ve enerji verimliliğinin bağlantısıyla açıklanabilmektedir (Selici vd. 2006).



Şekil 2.2. Enerji kaynakları tüketiminin çevresel etki yönünden sürdürülebilirlik döngüsü (Selici vd. 2006)

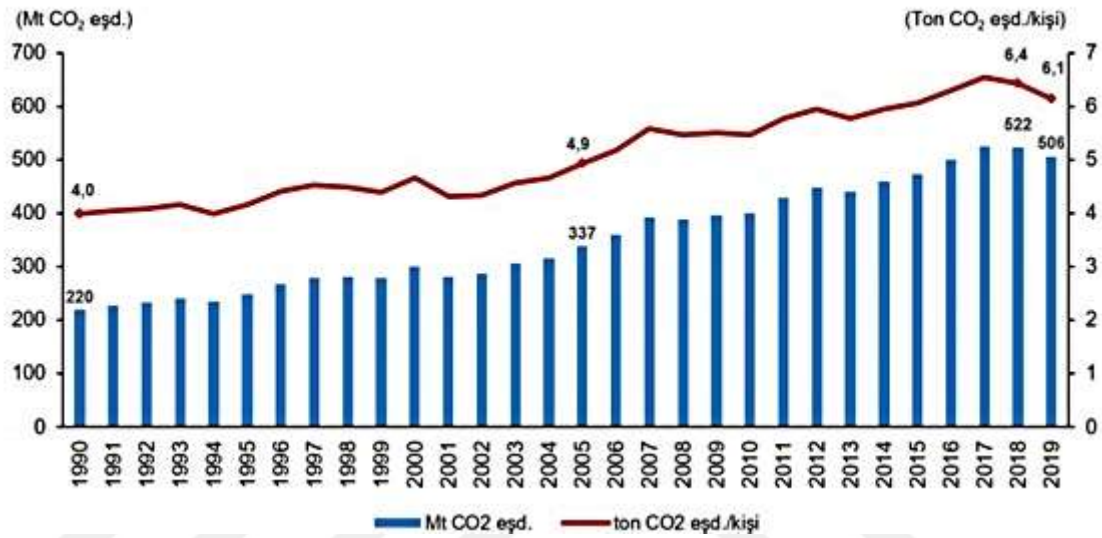
2.2. Türkiye’nin Sera Gazı Envanteri

Türkiye’nin toplam sera gazı emisyonlarının yıllara göre değişimi Şekil 2.3’te verilmiştir. Dünya’da 2019 yılında toplam sera gazı emisyonu 33 giga ton (Gt¹) CO₂ eşdeğeri (eşd.) iken (IEA 2020a), Türkiye’de 506,1 milyon ton (Mt) CO₂ eşd. (TÜİK 2021) olarak belirlenmiştir (Şekil 2.3). CO₂ salınımı, küresel boyutta enerji üretiminden kaynaklı olarak, 2018 yılında bir önceki yıla göre %1,7 oranında artış göstermiş ve 33,2 Gt seviyesine ulaşmıştır. Kömür yakıtlı enerji üretiminden kaynaklı olarak 10,1 Gt CO₂, kömürün diğer kullanım alanlarından kaynaklı olarak 4,5 Gt CO₂ ve diğer fosil yakıtlardan kaynaklı olarak ise 18,6 Gt CO₂ atmosfere salınmıştır (IEA 2019). Türkiye’de ise sera gazı salınımlarının büyük ölçekli kaynağı kömür kullanımıdır. Türkiye’de 2019

¹ Gt = 10³ Mt

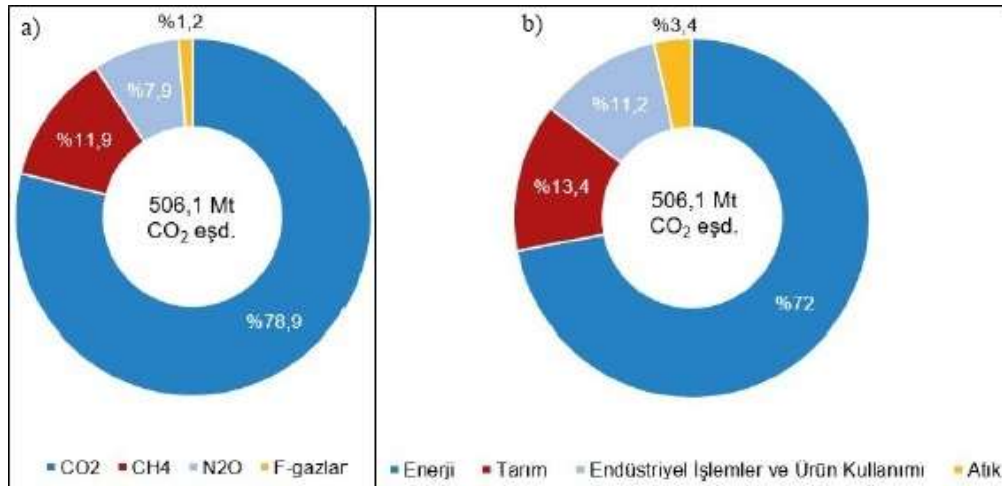
yılında kömür kullanımı kaynaklı yaklaşık 154 Mt CO₂ eşd. sera gazı salınımı gerçekleşmiştir (UNFCCC 2021b). Yine 2019 yılında, kömür yakılan termik santrallerden kaynaklı CO₂ salınımı ise 114 Mt olmuştur (UNFCCC 2021c). Dünya’da 2018 yılında kişi başı sera gazı emisyonu (CO₂ eşd.) 4.9 ton iken, bu değer Türkiye’de 1990, 2017 2018 ve 2019 yıllarında sırasıyla 4 ton, 6,4 ton ve 6,1 ton olarak hesaplanmıştır (TÜİK 2021). Türkiye 2016 yılında sera etkisi yaratan küresel emisyon salımında %1’lik payla 17. sırada yer almıştır (TÜİK 2020). İlerleyen süreçlerde ise bu oranın artacağı öngörülmektedir.

Toplam ve kişi başı sera gazı emisyonu, 1990-2019



Şekil 2.3. Türkiye’nin toplam ve kişi başı sera gazı emisyonlarının yıllara göre değişimi (TÜİK 2021)

Şekil 2.4’te Türkiye’deki sera gazı emisyonlarının yüzdelik dağılımları (a) ve sera gazı emisyonlarının sektörlere göre dağılımları (b) verilmektedir. Türkiye’nin 2019 yılı sera gazı salınımı toplam CO₂ eşd. olarak 506,1 Mt’dur (Şekil 2.4a). Toplam sera gazı emisyonlarının %78,9’u CO₂, %11,9’u CH₄ ve %7,9’u N₂O olarak atmosfere salınmıştır. 2019 yılı sera gazı emisyonlarında en büyük payı %72 ile enerji kaynaklı emisyonlar alırken, bunu sırasıyla %13,4 ile tarımsal faaliyetler, %11,2 ile endüstriyel işlemler, ürün kullanımı ve %3,4 ile atıklar takip etmiştir (Şekil 2.4b). Enerji sektörü emisyonları 2019 yılında, 1990 yılına göre %161 artmış ve 364,4 Mt CO₂ eşd. olarak hesaplanmıştır. Endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı emisyonları 2019 yılında, 1990 yılı emisyonlarına göre %147,1 oranında artış gösterirken, 2018 yılı emisyonlarına göre %14,3 azalarak 56,4 Mt CO₂ eşd. olarak hesaplanmıştır. Tarım sektörü emisyonları 1990 yılı emisyonlarına göre 2019 yılında %47,7 artış gösterirken, 2018 yılına göre %4,1 artış göstermiştir. 68 Mt CO₂ eşd. atık emisyonları ise 1990 yılına göre 2019 yılında %55,7 artarken, 2018 yılına göre %5 azalarak 17,2 Mt CO₂ eşd. olarak hesaplanmıştır (TÜİK 2021).

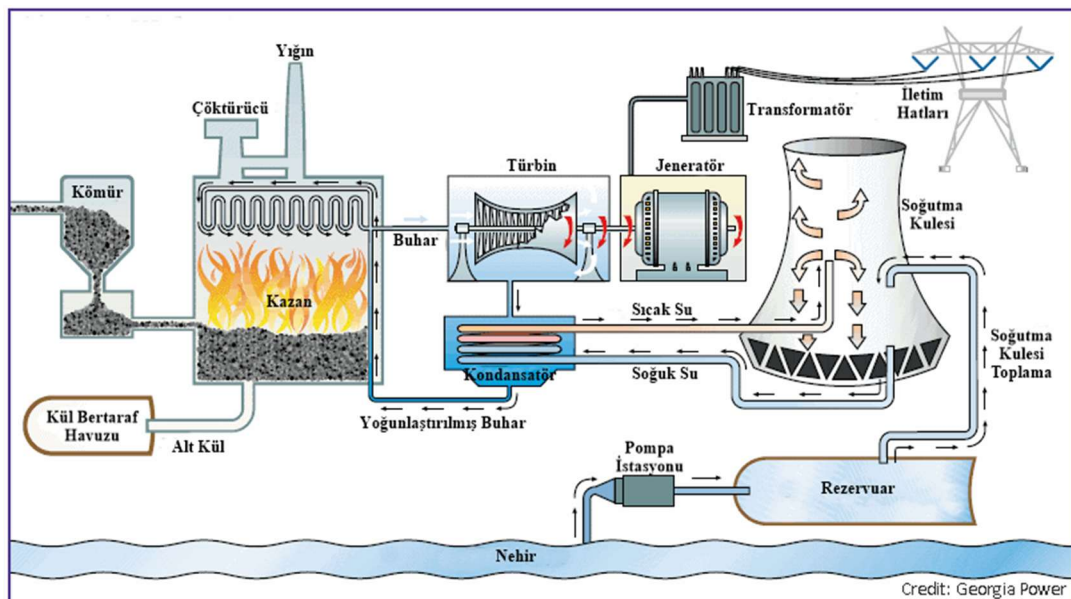


Şekil 2.4. a) Sera gazı emisyonlarının yüzdelik dağılımı-2019 b) Sera gazı emisyonlarının sektörlere göre dağılımı-2019 (TÜİK 2021)

2.3. Türkiye’de Termik Santraller

2.3.1. Kömür Yakıtlı Termik Santraller

Termik santral; genellikle kömür, doğalgaz, akaryakıt, vb. fosil yakıtlarını kullanarak, bu yakıtların yanmasıyla oluşan kimyasal formdaki enerjiyi ısı enerjisine, ısı enerjisini daha sonra mekanik enerji formuna ve mekanik enerjiyi de elektrik enerjisine çevirmeyi sağlayan sistemler olarak ifade edilebilir. Birçok kömürlü termik santral çeşitleri bulunmakta olup, temelde kazan teknolojilerine bakıldığında pulverize kazanlar ve akışkan yataklı kazanlar en çok kullanılan kazan tipleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Türkiye’de yaygın olarak pulverize kazan sistemi kullanılmaktadır. Bu sistemlerde kömür mikron boyutlarında öğütülerek yanma odasında yakılmaktadır. Şekil 2.5’te pulverize kazan sistemi ile çalışan termik santral proses şeması verilmektedir.



Şekil 2.5. Kömür yakıtlı termik santral proses şeması (Plant Scherer, Georgia)

Pulverize kömür santrallerinde, kömür öğütülerek toplam yüzey alanı arttırılır. Yüzey alanını arttırılması her bir kömür tanesinin yanma odasında O₂ molekülü ile bir araya gelme olasılığını da arttırır. Böylece kömür bünyesindeki C, O₂ ile daha verimli olarak tepkimeye girer. Tepkime 2’de C için yanma tepkimesi verilmiştir. 1 mol C, 1 mol O₂ ile tepkimeye girer ve 1 mol CO₂ gazı oluşur. Tepkime ekzotermiktir ve 1 mol C yanması neticesinde 97 kcal ısı açığa çıkar. Ortamda C elementinin tamamının yanmasını sağlayacak kadar O₂ bulunmadığı takdirde tam yanma gerçekleşemeyeceği için karbonmonoksit (CO) gazı açığa çıkar ki bu gazın salınımı çevre kirliliği ve enerji üretimi açısından istenmeyen bir durumdur (MMO 2017).



(Tepkime 2)

Kömür yakıtlı termik santrallerde seçilen kömür türüne göre yanma kazanındaki sıcaklıklar 900 °C ile 1 400 °C arasında değişiklik gösterir (Akar 2009). Öğütülüp, mikron boyutlara getirelerek verimin arttırılması amaçlanan kömürün tam yanabilmesi için yanma kazanına ayrıca bir miktar fuel-oil püskürtülür. Yanma işleminin gerçekleşebilmesi için ihtiyaç duyulan O₂ kazan dairesi dışından emilip, 540 °C’de ön ısıtmaya maruz bırakıldıktan sonra reaktöre verilir. Bu sayede kömürün yanma olayı gerçekleştirilir. Tam yanmanın gerçekleştiği ortamda kömürün yapısında yer alan C tamamen CO₂ gazına, hidrojen (H) ise H₂O gazına dönüşür. Ayrıca kömürün yapısında az miktarda bulunan kükürt (S) ve azotun (N) yükseltgenme tepkimeleri de bu aşamada olmaktadır (İnal ve Aydın 2019).

Termik santrallerde elektrik üretimindeki temel gaye, fosil yakıttaki kimyasal enerji potansiyelinin ısı vasıtasıyla suyu kızgın buhara çevirmek için kullanılmasıdır. Termik santraller suyu buhara dönüştürmek için ihtiyaç duyulan ısıyı ürettiği tesislerdir. Buhar türbinin kullanıldığı santrallerde, yüksek sıcaklık ve basınçtaki kızgın buhar, basıncının kademeli olarak düşürülmesi amacıyla bir türbine gönderilir. Basıncı ve dolayısıyla sıcaklığı düşürülen buhar, türbin çıkışında bir yoğunlaştırıcıya aktarılır ve soğutulur tekrar sıvı faza dönmesi sağlanır. Yoğunlaştırıcıdan çıkan su, ardından tekrar kazan içindeki ısı değiştiricilere pompalanır. Böylece suyun çevrimi tamamlanmış olur. Bu çevrim sayesinde iş (mekanik iş) üretilir. Üretilen iş türbin ve elektrik jeneratörü vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürülür. Türbine giren kızgın buhar, rotora monte edilmiş kanatlara hızla çarparak kanatların ve beraberinde rotorun dönmesini sağlar. Bu genişleme işi nedeniyle buharın basıncı düştüğü gibi sıcaklığı da azalır. Türbin rotoru aynı zamanda elektrik jeneratörü rotoruna bağlıdır. Türbin rotorundaki dönüş, jeneratör rotorunun da dönmesine neden olur. Elektrik jeneratörü rotoru, elektrik jeneratöründe oluşturulan manyetik alan içerisinde dönerek elektrik akım oluşturur ve elektrik enerjisi elde edilir (Tunçkaya 2015).

Yoğunlaştırıcıda soğutma işlemi için büyük hacimlerde soğutuculara ihtiyaç vardır. Bu nedenle termik santraller genellikle deniz, göl veya büyük debisi bir nehir kenarında kurulur. Termik santral konum olarak deniz, göl veya büyük debili bir nehir kıyısında yer almıyorsa soğutma kulelerinin kullanımı gerekir (MMO 2017). Soğutma kuleleri, termik santrallerde devasa bacalar şeklinde görünen yapılardır. Soğutma küllerinde su buharının yoğunlaşması için yapılması gereken soğutma işlemi hava ile yapılır. Bu nedenle soğutma amacıyla kullanılan havanın sıcaklığı artmaktadır. Isınan hava soğutma kulesi boyunca yükselir. Yükselme esnasında daha soğuk bir hava kütleyle karşılaşır ve soğumaya başlar. Soğuma neticesinde soğutma havasının bağıl nemi %100’e ulaşır, hava su buharı

bakımından doygunluğa ulaşır ve hava bünyesindeki su buharı yoğunlaşır. Bu olay atmosferdeki bulut oluşumuna benzer. Havadaki su buharı yoğunlaşarak su damlacıklarına dönüşür ve görünür hale gelir. Soğutma küllerinin üzerinden atmosfere salınan beyaz renkli duman bir kirlletici değil aslında yoğunlaşmış ve görünür hale gelmiş su damlacıklarıdır.

Birçok ülkede olduğu gibi ülkemizde de elektrik üretiminin büyük bir oranı kömürden sağlanmaktadır. Dünya toplam kömür rezervinin %2,1'lik kısmı Türkiye'de bulunmaktadır. Türkiye'de bünyesinde çok az bir oranda antrasit (taş kömürü) içeren kömür yatağı bulunmakta olup, Türkiye kömür rezervinin büyük bir oranını düşük ısı değeri ve yüksek S içeriğine sahip olan düşük kaliteli linyit oluşturmaktadır. Ülkedeki toplam rezervin %92'lik kısmını oluşturan linyit-alt bitümlü kömürler ülkemizde önemli bir paya sahip olmakla birlikte (TKİ 2018), üretilen linyitler -düşük ısı değerleri (%79'unun ısı değeri 2 500 kcal/kg değerinin altındadır) nedeniyle -büyük bir oranda termik santrallerde kullanılmaktadır (TKİ 2020).

Türkiye'deki linyit rezervlerinin çok, ulaşım ve dağıtımının kolay olmasının yanı sıra ekonomik de olmaları sebebiyle 1970'li yıllarda termik santrallerde düşük kaliteli linyit kullanımına geçilmiş ve zaman içerisinde linyit kullanımına yönelik ciddi talep artışı olmuştur. Fakat elektrik üretiminde linyit kullanımı sonucunda yanma sonucu açığa çıkan SO₂, NO_x CO, CO₂, hidrokarbonlar ve partikül madde (PM) gibi kirlleticiler hava kirliliği, sürdürülebilir enerji ve iklim değişikliği açısından tehlike arz etmektedir. Bu olumsuz etkilerin azaltılması adına kirlilik giderme işlemlerinin devreye sokulması gerekmektedir.

Türkiye'nin linyit rezervi 2005 yılı öncesinde 8,3 milyar ton olarak kayıtlara geçmiştir. MTA (Maden Tetkik ve Arama) tarafından yapılan yeni rezerv bulma çalışmaları neticesinde ülkenin linyit rezervi 10,82 milyar ton artararak 2019 yılı sonu itibariyle 19,32 milyar tona ulaşmıştır. 2019 yılı itibariyle 8,3 milyar ton olan linyit rezervinde %130'luk bir artış gerçekleşmiştir. 2019 yılı içerisinde üretilen elektrik üretiminin %37,2'si yakıt olarak kömür kullanılan güç santrallerinden sağlanmıştır (TKİ 2020).

Keşfedilen yeni linyit sahaları dahilinde Türkiye'de bulunan linyit kaynaklarının %27'si Afşin-Elbistan havzasında, %9,5'i Konya-Karapınar, %7,9'u Tekirdağ-Malkara, %7,5'i Eskişehir-Alpu, %5,7'si İstanbul-Silivri, %4,9'u Afyon-Dinar, %4,5'i Manisa-Soma ve %3,9'u Muğla-Milas'ta yer almaktadır (TKİ 2020).

Türkiye genelinde 38 tane yerli kömür kullanan termik santrali işletmededir. 100 MW'ın üzerinde kurulu kapasiteye sahip olan 19 tane santral vardır. Bir adedi taş kömürü, bir adedi asfaltit kullanan santrallerin haricindeki santraller linyiti kaynak olarak kullanılmaktadırlar (TKİ 2018). Ayrıca, 4 adet 3 245 MW büyüklüğünde bir kurulu güç inşaat halindedir (TKİ 2018). Türkiye'deki yerli kömürle çalışan büyük ölçekli termik santrallerin listesi Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Türkiye’de yerli kömüre dayalı büyük ölçekli termik santraller (TKİ 2018)

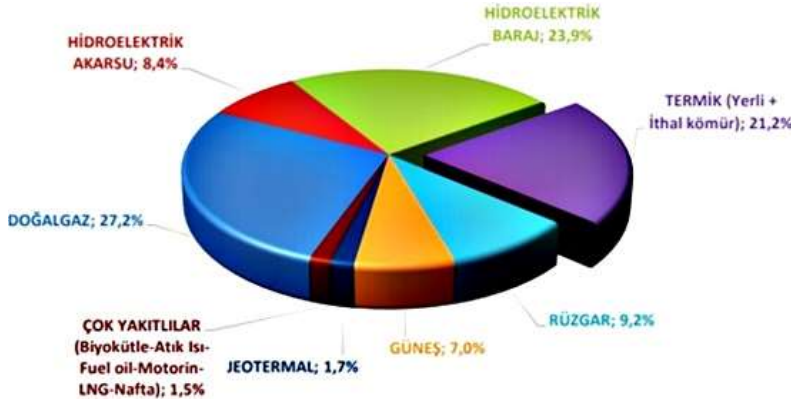
Santralin Adı	Mülkiyeti	Kömür Sahası	Yakıt	Kurulu Güç (MW)
Çanakkale Çan	EÜAŞ	TKİ	Linyit	320
Çanakkale Çan 2	ODAŞ	TKİ	Linyit	330
Orhaneli	Çelikler	Çelikler (İHD)	Linyit	210
Soma	Konya Şeker	TKİ	Linyit	990
Seyitömer	Çelikler	Çelikler (İHD)	Linyit	600
Tunçbilek	Çelikler	TKİ	Linyit	365
Yatağan	Bereket Elsan	Bereket Elsan (İHD)	Linyit	630
Yeniköy	İC İçtaş	İC İçtaş (İHD)	Linyit	420
Kemerköy	İC İçtaş	İC İçtaş (İHD)	Linyit	630
Afşin- Elbistan A ¹	Çelikler	EÜAŞ	Linyit	1 355
Afşin- Elbistan B	EÜAŞ	EÜAŞ	Linyit	1 440
Kangal	Konya Şeker	Konya Şeker (İHD)	Linyit	457
Çayırhan	Park (İHD)	EÜAŞ	Linyit	620
Bolu Göynük	AKSA	TKİ	Linyit	270
Adana Tufanbeyli	Enerjisa	Enerjisa	Linyit	450
Çatalağzı ²	Bereket Elsan	TTK	Taş Kömürü	300
Silopi	Silopi Elk. (Ciner)	TKİ	Asfaltit	405
Soma	Kolin	İHD	Linyit	510 MW
Yunusemre TES ³	TMSF		Linyit	290
Diğer Küçük Santraller Toplamı				536
GENEL TOPLAM				10 618

¹ EÜAŞ’a ait Afşin Elbistan A santrali, 2019 yılında Çelikler firmasına devredilmiştir.

² Çatalağzı Santrali, ithal kömür lisansına sahip olmakla beraber, Zonguldak Havzası’ndaki yerli taşkömürünü de kullanmaktadır. Bununla birlikte, yerli kömür kullanımı her geçen yıl daha da gerileyen santralin önümüzdeki yıllarda ithal kömür santralleri içinde değerlendirilmesi daha uygun olacaktır.

³ Yunusemre TES ilk ünitesi(145 MW) faaliyete geçmiş, 2.ünite inşa halindeyken santral TMSF’ye devredilmiştir.

Ülkemizde elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı Şekil 2.6’da verilmiştir. 2019 yılı içerisinde elektrik üretiminde ilk sırada %37,2’lik pay ve 113,1 milyar kWh üretimle kömürle çalışan termik santraller olmuştur (TKİ 2020).



Şekil 2.6. Elektrik üretiminin kullanılan kaynaklara göre dağılımı (TKİ 2020)

Çizelge 2.3'te görüldüğü üzere Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) Mart 2020 verilerine bakıldığında Türkiye'de 2020'nin ilk yarısı içerisinde elektrik üretiminin yaklaşık %34'ü kömür (ithal kömür, linyit, asfaltit ve taş kömürü) dir. Buna, doğalgaz da eklendiğinde üretilen elektriğin neredeyse %45'inin fosil yakıtlardan karşılandığı görülmektedir. Dünya genelinde kömür kullanımının azaltılma protokollerine karşılık ülkemizde kömüre olan talep gün geçtikçe artış göstermekte olup, halen aktif hale getirilmek istenen termik santral projeleri bulunmaktadır. Ülkenin enerji ihtiyacının karşılanmasında -dışa bağımlılığın azaltılması ve enerji arz güvenliği bakımından- linyit gibi yerli kaynakların kullanılması bir zorunluluktur. Bununla birlikte, atmosfere salınan başta CO₂ olmak üzere sera gazlarının en önemli kaynağının da fosil yakıtların elektrik üretiminde kullanıldığı termik santraller olduğu bir gerçektir. Küresel iklim değişikliğinin temel sebebi olarak bilinen sera gazı emisyonlarının ve hava kirliliğine neden olan diğer kirlenici emisyonlarının azaltılması için, baca gazı artırımlarına yönelik yatırımların artırılması oldukça önemli bir konu haline gelmiştir.

Çizelge 2.3. Mart 2020 döneminde lisanslı elektrik üretiminin kaynak bazında dağılımı ve 2019 yılı mart ayı değeriyle karşılaştırılması (MWh-%) (EPDK 2020)

Kaynak Türü	2019 Mart		2020 Mart		Değişim
	Üretim (MWh)	Oran (%)	Üretim (MWh)	Oran (%)	(%)
Hidrolik	7 733 138,88	32,22	9 634 223,75	40,43	24,58
İthal Kömür	4 421 576,30	18,42	4 837 643,38	20,3	9,41
Linyit	3 755 509,52	15,64	2 975 157,91	12,49	-20,78
Doğal Gaz	4 374 578,52	18,22	2 483 709,75	10,42	-43,22
Rüzgar	2 077 280,09	8,65	2 154 684,68	9,04	3,73
Jeotermal	770 570,79	3,21	879 165,86	3,69	14,09
Biyokütle	355 881,82	1,48	395 349,95	1,66	11,09
Asfaltit	132 135,55	0,55	214 938,79	0,9	62,67
Taş Kömürü	292 340,69	1,22	202 233,89	0,85	-30,82
Fuel Oil	78 839,70	0,33	25 346,21	0,11	-67,85
Güneş	12 908,02	0,05	25 808,64	0,11	99,94
Genel Toplam	24 004 759,88	100	23 828 262,81	100	-0,74

2.3.2. Termik Santrallerde Baca Gazı İçeriği

Kömür, içeriğinde yüksek oranda tekil ya da bileşik formda C içeren, katı formda bulunan organik temelli bir tür kayaç olarak ifade edilmektedir. Kömürün kullanımından önce bileşiklerinin ve ergime derecesinin iyi bir şekilde tespit edilip, incelenmesi yanma verimliliği açısından önemlidir (Akar 2009). Külün ergime sıcaklığının düşük olduğu durumlarda düşük sıcaklıktaki akışkan yataklı kazan kullanımının tercih edilmesi, yüksek sıcaklıktaki pulverize kazana göre cüruf oluşumunun engellenmesini sağlamaktadır (Başaran 2013). Kömürün yapısında organik olarak bağ kuran C, H, O ve N elementleri yanı sıra yapısında yer alan S elementi haricinde sahip olduğu diğer elementler mineral madde olarak adlandırılmaktadır. Kömürde mineral maddelerin varlığı ne kadar az ise, kömürün kalitesi de o kadar iyi olmaktadır. Çünkü; kömürün içerdiği mineral maddeler kömürün yakılmasıyla yapılarında meydana gelen değişikliklerden ötürü cüruf, korozyon ve kurum gibi istenmeyen sonuçların oluşmasına sebep olmaktadır. Bu nedenlerden dolayı, kömür zenginleştirme olarak ifade edilen mineral maddelerin varlığını azaltmaya yönelik yanma öncesinde işlemler yapılmaktadır (Akar 2009).

Kömür kullanılan termik santrallerinde normal koşullarda kömürün yanması sonucunda reaktör sıcaklığı 880-1 100 °C civarına yükselmektedir. Bu sıcaklık koşullarında kömür bünyesindeki C, H, S ve N, O₂ ile tepkimeye girerek gaz fazında bacadan atmosfere salınırlar. Yanma havayla gerçekleştiriliyorsa baca gazı başlıca N₂, O₂, H₂O ve CO₂ gazlarından oluşur. Tam yanma şartlarının oluşturulamaması durumunda baca gazında CO ve çeşitli hidrokarbon emisyonları da görünür. Kömür bünyesindeki N, başta azotmonoksit (NO) olmak üzere NO₂, N₂O ve benzeri diğer NO_x'lere dönüşebilir. Bünyedeki S yükseltgen ortamda SO₂ gazı olarak baca gazında belirir. SO₃ gibi diğer kükürtlü bileşiklerin de görülme olasılığı mevcuttur. Sisteme verilen hava içindeki N₂ düşük sıcaklıklarda (<1 000 °C) tepkimeye girmez ve sistemi girdiği gibi terk eder. Bu nedenle hava ile yapılan yanma işlemi neticesinde baca gazının hacimce ve kuru bazda büyük bir yüzdesi (%75-85) N₂'den oluşur. Baca gazındaki O₂ ve CO₂ yüzdesi sırasıyla %2-4 ve %15-18 aralığındadır. Eğer ortam sıcaklığı 1 200 °C'nin üzerine çıkarsa, sisteme verilen hava içerisindeki N₂ ve O₂ atomlarına ayrılır ve bir dizi tepkimelere dahil olarak NO oluşumunu hızlandırır (termal NO) (Goncaloğlu 2000). Ayrıca uçucu organik bileşikler, dioksinler, furanlar ve hidroklorik asitler de termik santrallerin baca gazı içeriklerinde zararlı bileşikler olarak bulunabilmektedirler. Fakat bütün bu zararlı baca gazı bileşiklerinden iklim değişikliği üzerinde en çok olumsuz etki yaratanı CO₂ gazıdır. Çünkü diğer kirletici gazlara kıyasla, daha fazla derişimde CO₂'nin birçok kaynaktan atmosfere salınımı gerçekleşmektedir (Şekil 2.4).

2.4. Karbon Tutma ve Depolama Teknolojileri

Karbon Tutma ve Depolama (KTD) teknolojileri; özellikle elektrik üretim santrallerinde ve endüstriyel tesislerde fosil yakıt kullanımı sonucu nokta kaynaklı yayılan ve önemli bir sera gazı olan CO₂ gazının baca gazından uzaklaştırılması amacıyla kullanılan yeni nesil bir teknolojidir. CO₂ emisyonlarının %40'ı fosil yakıt yakan enerji santrallerinden kaynaklanmaktadır (IPCC 2005) ve bu santraller CO₂ tutumu için iyi bir hedef olarak görülmektedir. Bununla birlikte, fosil yakıt yakan enerji santrallerinde baca gazında CO₂ gazının tutulması çeşitli tasarım zorlukları barındırmaktadır. Bu zorluklardan en dikkat çeken ikisi; baca gazında CO₂ dışındaki safsızlıkların ve fosil yakıtın yanması sırasında oluşan büyük miktarlarda CO₂ gazının nasıl ele alınacağı

konularıdır. Baca gazında karşılaşılan yaygın safsızlıklar arasında NO_x , SO_x ve PM yer almaktadır. Üretilen safsızlıkların miktarı, yakılan yakıt kaynağına bağlı olarak değişmektedir. Safsızlıkların iyi bir verimle giderilebilmesi için, fosil yakıtın yanması sırasında CO_2 ve safsızlık oluşumunun arkasındaki temel mekanizmaları bilmek ve bu mekanizmalara göre bu safsızlıkların giderimine yönelik tekniklerin oluşturulması günümüzde önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir (Spigarelli 2013).

Küresel ortalama sıcaklığın 2050 yılına kadar 2°C yükselmesini sınırlandırmak amacıyla CO_2 emisyonlarının en az %50 oranında azaltılması gerekliliği öngörülmektedir (IEA 2020a). CO_2 artışına bağlı iklim değişikliğini azaltmak için bu yönde etkili olabilecek KTD uygulamaları da dahil olmak üzere farklı seçenekler üzerinde küresel çapta yoğun bir araştırmaya yönelim söz konusu olmuştur. Uluslararası Enerji Ajansı, KTD olmadan küresel emisyonları azaltmanın maliyetinin 2050 yılına kadar %40 daha yüksek olacağını öngörmekte ve bu konunun önemini belirtmektedir (IEA 2020b).

CO_2 emisyonlarının atmosfere salınıp, sera gazı etkisini artırıcı etki göstererek küresel ısınmayı tetiklemesine sebep olmak yerine, bu emisyonların kimyasallar ve yakıtlar gibi değerli ürünlere dönüştürülerek, iklim değişikliğini azaltıcı yönde kullanılması büyük önem arz etmektedir. Günümüzde KTD teknolojisine ek olarak Karbon Tutma ve Kullanma (KTK) teknolojisi de küresel ısınmayı azaltıcı alternatifler arasında yer almaktadır.

KTD, yatırım maliyeti yüksek bir işlemdir. CO_2 tutma ve basınçlandırma işlemleri birincil enerji kullanımını arttırdığı için yüksek maliyetlidir. İşlemin sonunda CO_2 azaltımına katkısı vardır fakat mali yönden dezavantaja sahip bir teknolojinin uzun vadede uygulanmasında sorunlar ortaya çıkabilir. KTK ise, işlem sonucunda üretilen ürünlerin satılabilmesi açısından daha avantajlı ve temiz bir teknoloji olarak görülmektedir. Ayrıca; CO_2 geleneksel olarak tüketilen petrokimya hammaddelerine kıyasla (çeşitli endüstriyel faaliyetler tarafından yayılmaya devam ettiği sürece) maliyeti düşük ve toksik olmayan “yenilenebilir” bir kaynak olarak kullanılabilme avantajına sahiptir. Termodinamik kararlılığından dolayı CO_2 'nin farklı ürünlere dönüştürülme aşamasında yoğun enerjiye gerek duyulsa da, fosil yakıt fiyatlarının artması ile doğru orantılı olarak kimyasallar ve yakıtların güvenli bir şekilde elde edilebilmesi potansiyelinden dolayı KTK'ya yönelim daha cazip görülmektedir (IPCC 2005).

KTD ve KTK teknolojilerinin birbirlerinden farkı; yakalanan CO_2 'nin nihai halidir. KTD'de yakalanan CO_2 emisyonları uzun süreli depolama amacıyla uygun bir yere aktarılırken, KTK'de ise yakalanan CO_2 emisyonları ticari ürünlere dönüştürülmektedir. Dünya genelinde CO_2 emisyonlarının %40'dan fazlası fosil yakıtlı güç santrallerinden kaynaklanmaktadır (IPCC 2005). Bu nedenle, bu kaynaklar KTD ve KTK'lerin potansiyel uygulamaları açısından temel yerler olarak görülmektedir. CO_2 tutma sistemleri, CO_2 emisyonlarını üreten endüstriyel işlemlerin çeşitliliği nedeniyle farklı sistem tasarımlarını içermektedir. CO_2 tutma; sürecin hangi aşamasında CO_2 gazının uzaklaştırıldığına bağlı olarak, yanma öncesi tutma, yanma sonrası tutma ve oksijen yanma olarak üç ana yöntemle gerçekleştirilmektedir. CO_2 gazının biyolojik olarak tutulması yanma sonrası tutma yöntemi olarak diğer yöntemler arasında bir adım öne çıkmaktadır. Bunun nedeni; CO_2 gazının biyolojik olarak tutulmasının fiziksel veya kimyasal yöntemlerle tutulmasına kıyasla daha düşük maliyetli olmasıdır. Bu amaçla; günümüzde biyolojik olarak tutma ile biyoyakıt üretiminde mikroalglerin kullanılması

üzerinde yoğun çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Mikroalglerin biyoyakıt üretimi amacıyla kullanılması bir KTD modelinden ziyade KTK modeli olarak karşımıza çıkmaktadır. Çünkü; mikroalgler sadece CO₂ gazını tuttukları için değil, CO₂ gazını kullanılabilecek bir forma dönüştürdükleri için de tercih edilmektedir. Mikroalglerden biyodizel üretim işlemi sonucunda atık olarak alg kütlesi elde edilmektedir. Bu atık alg kütlesinden, anaerobik bozunma ile CH₄ gazı üretmek ve üretilen CH₄ gazını enerji eldesinde kullanmak mümkündür. Bu nedenle, mikroalgler ile sıfır karbon emisyonuna ulaşmanın teorik olarak gerçekleştirilebileceği öngörülmektedir (Demirer 2015).

KTD teknolojilerinde işlemler; CO₂ gazının tutulmasını, taşınmasını ve yeraltındaki tükenmiş petrol ve gaz alanlarında veya derin tuzlu akifer oluşumlarında güvenli bir şekilde depolanmasını içeren 3 aşama ile gerçekleştirilmektedir. NETL (National Energy Technology Laboratory) veritabanına göre; 2018 Nisan ayı itibarıyla dünyadaki KTD proje sayısının 305 olduğu ve bunların 299'unun sahalarının belli olduğu belirtilmektedir. 299 proje kapsamında; 6 kıtada 30'dan fazla ülkede tutma ve depolama amacıyla yapılan tesislerin 76'sı tutma, 76'sı depolama ve 147'si KTD sistemlerini içermektedirler. CO₂ gazının tutulduğu ve/veya yeraltındaki bir sahaya verildiği aktif proje sayısı 37'dir (NETL 2021). KTD teknolojilerinin uygulama yöntemlerine göre dağılımı Çizelge 2.4'te belirtilmiştir. Dünya'da KTD teknolojileri kullanan tesisler incelendiğinde, 110 tesisin yanma sonrası, 62 tesisin yanma öncesi ve 11 tesisin oksiyana teknolojilerini kullanarak CO₂ tutma ya da ayırma işlemi gerçekleştirdikleri görülmektedir (NETL 2021).

Çizelge 2.4. Küresel ölçekte KTD teknolojilerinin uygulama yöntemlerine göre dağılımı (NETL 2021)

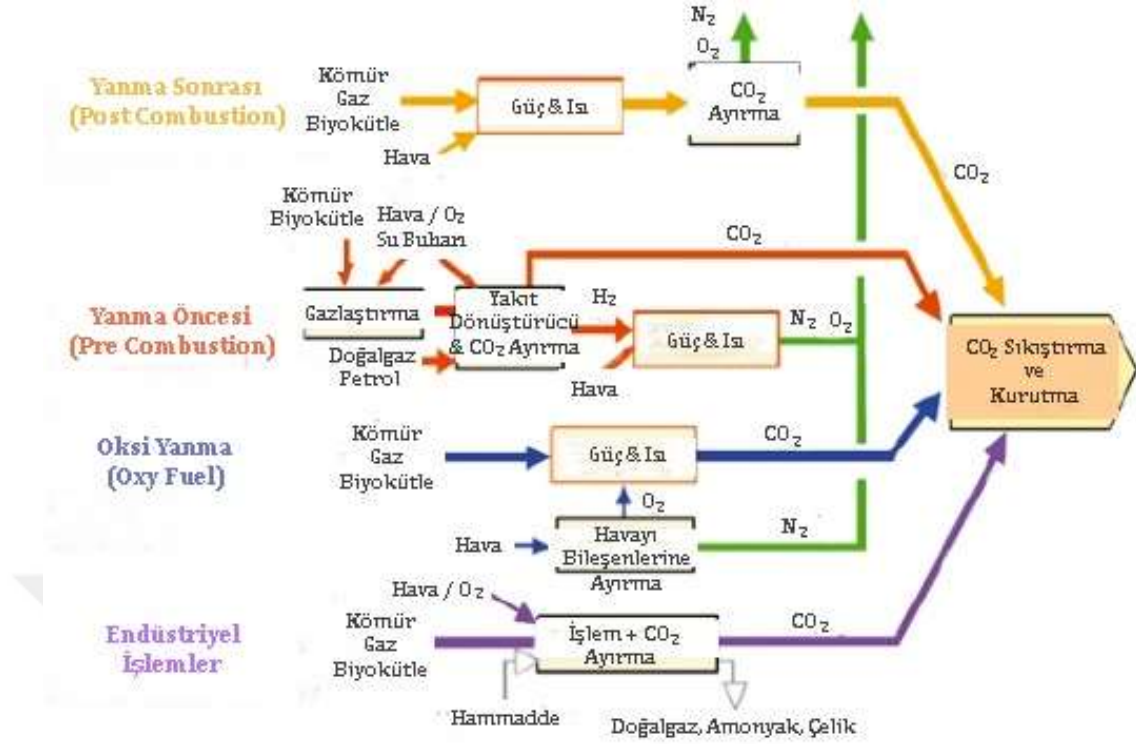
Yanma Sonrası	110 adet
Tanımlanamayan	86 adet
Yanma Öncesi	62 adet
Ayırma	22 adet
Oksi-Yanma	11 adet
Sanayi	10 adet

Güç santrallerinin işlem ve uygulamalarına bağlı olarak; birincil fosil yakıtların (kömür, doğalgaz ve petrol), biyokütleinin ya da bu yakıtların karışımlarının yakılması sonucu ortaya çıkan CO₂ gazını tutmak amacıyla temelde yanma öncesi, yanma sonrası ve oksiyana sistemleri olarak üç yaklaşım mevcuttur. Yanma sonrası sistemlerinin çalışma prensibinde, temel bileşenin N₂ (havadan) olduğu baca gazında düşük derişimlerdeki CO₂ gazını (tipik olarak %3-15) tutmak hedeflenmektedir. Bu amaçla, birincil fosil yakıtların yakılması sonucunda üretilen CO₂ gazını tutmak ve baca gazından ayırmak için genellikle Monoetanolamin (MEA) adlı organik sıvı çözücüsü kullanılmaktadır. Yanma öncesi sistemlerde ise; yüksek sıcaklık ve basınçta bir hidrokarbonu parçalayarak H₂ ve CO içeren bir gaz karışımı (sentez gazı) elde etmek amacıyla, birincil yakıtın, su buharı ve hava veya oksijen içeren bir reaktörde işlenmesi gerçekleştirilir. CO'nun su buharıyla ikinci bir reaktörde (yakıt dönüştürücü reaktörde) reaksiyona girmesiyle CO₂ ile H₂ üretimi sağlanır. Üretilen H₂ ve CO₂ karışımından H₂ gazı ayrıştırılır ve CO₂ gazı depolanmak üzere muhafaza edilir. Yanma öncesi sistemlerde

yakıt dönüşüm adımları, yanma sonrası sistemlere kıyasla daha maliyetlidir. Fakat, yakıt dönüştürücü reaktörde üretilen yüksek CO₂ derişimleri (genellikle kuru bazda hacimce %15-60) ve bu uygulamalarda çoğunlukla karşılaşılan yüksek basınçlar, CO₂ ayrımı için daha uygun görülmektedir. Oksi yanma sistemlerinde ise temelde, su buharı ve CO₂ içeren bir baca gazı üretmek amacıyla birincil yakıtın yanması için hava yerine oksijen kullanımı söz konusudur. Oksijenle yanma sonucunda yüksek CO₂ derişimine sahip (hacimce %80'den fazla) bir baca gazı üretilir. Bu üretim sonrasında su buharı, baca gazının soğutulması ve sıkıştırılmasıyla sistemden uzaklaştırılır. Bununla birlikte, SO₂ ve NO_x gibi kirleticilerin giderilmesi için ilave gaz arıtma sistemleri ile, yakalanan CO₂ seviyesini %90'ın biraz üzerine çıkarabilir.

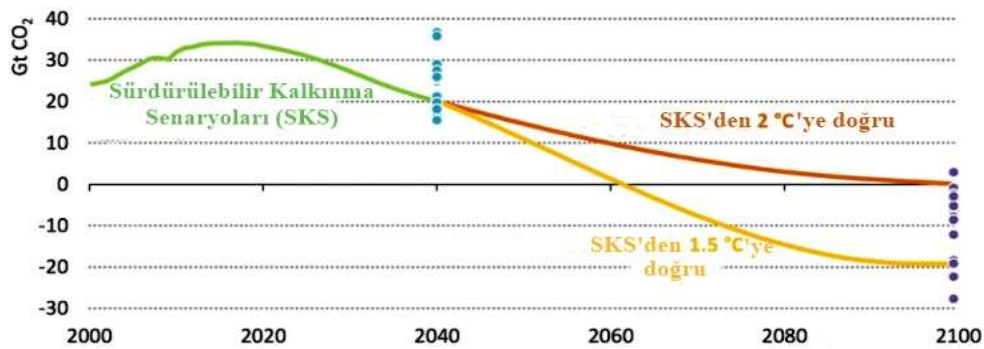
Endüstriyel işlemler sonrasında üretilen CO₂ gazını tutmak açısından en önemli kaynakların başında çimento üretimi gelmektedir. Çimento üretimi, aslında dünyadaki en büyük endüstriyel CO₂ kaynaklarından birine sebep olmaktadır. Çimento, kalsiyum (Ca) ve O₂ içeren doğal minerallerden oluşan kireçtaşıdan üretilmektedir. Çimento üretebilmek için, karbon CO₂ olarak salınana kadar, kireçtaşının ısıtılmasını içeren bir işlem gerekir. Bu işlemde oksijenin bir kısmı ve karbonun çoğunluğu sistemden çıkarılır. Çimento üretimi sonrası üretilen büyük miktardaki CO₂ derişimini önleyebilmek için ya çimento üretimine son verilmeli ya da CO₂ gazının tutulup, depolanmasına yönelik yöntemler hayata geçirilmelidir. Çimento üretimine son verilme çözümü bir seçenek olarak görülemeyeceği için CO₂ gazının tutulup, depolanmasına yönelik uygulamalara daha çok önem verilmesi ihtiyacı doğmaktadır. Çimento üretimi dışında bir diğer endüstriyel işlemler sonucu CO₂ gazının yoğun olarak açığa çıktığı alan ise çelik üretimidir. Ek olarak; amonyak üretimi, doğal gazın saflaştırılması işlemi, alkollerin ve sentetik sıvı yakıtların üretimi için H₂ içeren sentez gazının üretilmesi, vb. endüstriyel işlemlerin gerçekleştirilmesi ile önemli miktarda CO₂ gazı atmosfere salınmaktadır (Anonim 5).

Oksi yanma, yanma öncesi, yanma sonrası ve endüstriyel CO₂ kaynakları (doğal gaz işleme tesisleri ile çelik ve çimento üretimi dahil) için yakıtlar ve ürünlerin CO₂ tutma teknolojileri ve prosesleri Şekil 2.7'de şematik olarak gösterilmektedir (IPCC 2005).



Şekil 2.7. CO₂ tutma teknolojileri ve proses detayları (IPCC 2005)

Küresel ısınmanın ana etkeni olan CO₂ gazının azaltılmasına yönelik gelecek senaryolarında yenilenebilir enerji kavramı önemli bir paya sahiptir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından, uzun vadeli iklim hedeflerinde bir çözüm üretebilmek ve 2040 yılına kadarki süreçte küresel ısınmayı azaltma yörüngesini belirleyebilmek amacıyla Sürdürülebilir Kalkınma Senaryosu (SKS) modellenmesi yapılmıştır (Şekil 2.8). Bu senaryo kapsamında; 2040 yılına kadarki süreçte, sürdürülebilir çevre politikalarının uygulanmasının artması sonucunda, enerji verimliliğinde %44 artış gerçekleşmesi mümkün görülmektedir. Ayrıca; yenilenebilir enerji kaynaklarından %36, KTD teknolojilerinden %9, nükleer enerjiden %6, diğer kaynaklardan %2 oranında CO₂ tasarrufunun yapılabilmesi öngörülmektedir. SKS'deki toplam CO₂ emisyon tasarruflarının %80'inin bu senaryoya göre, enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji kaynakları ile sağlanabileceği belirtilmektedir (IEA 2017b).

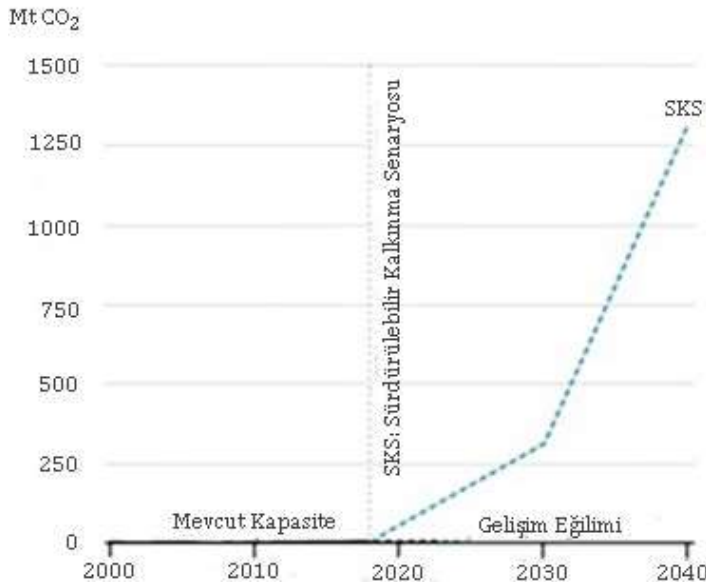


Küresel sıcaklık artışını yaklaşık 1,7-1,8 °C öngören son senaryolardan kaynaklanan emisyonlar ● 2040 ● 2100

Şekil 2.8. Küresel CO₂ emisyonunu azaltma senaryoları (IEA 2017b)

Uzun vadeli planlarla nihai sıcaklık sonucunu belirlemek, senaryolar açısından büyük önem arz etmektedir. Bu senaryo kapsamında, küresel sıcaklık artışının yaklaşık olarak 1,7-1,8 °C civarında dengede tutulması planlanmaktadır. SKS, yüzyılın ikinci yarısında ne olacağına, özellikle de önemli negatif emisyon teknolojilerinin ortaya çıkıp çıkmadığına bağlı olan bu uzun vadeli hedefleri ortaya koyarak, emisyon azaltımlarına yönelik uygulamaların hayata geçirilmesi, teşviklerin sunulması ve doğru yönde ilerlenmesi açısından hükümetlerarası bir rota oluşturmaktadır (Şekil 2.8).

IEA 2019 verilerine göre hazırlanan SKS’de ise, 2018 sonunda yalnızca iki büyük ölçekli KTD ve kullanım gücü projesinin faaliyete geçtiği belirtilmektedir. Bununla birlikte IEA tarafından hazırlanan SKS’ye göre, proje sayısının 2040 yılına kadar önemli ölçüde artacağı öngörülmektedir. SKS’ler, iklim değişikliğini tetikleyen için CO₂ emisyonlarını azaltmayı hedef alırken, aynı zamanda hava kirliliğiyle mücadele ederek, küresel ölçekte enerji erişimine de olanak sağlamaktadır. Bu amaca ulaşmak için, sahada büyük yeniliklerin gerçekleştirilmesi ve maliyeti düşürmeye yönelik faaliyetlerin öne çıkması gerekmektedir. Bu faaliyetler kapsamında başta enerji verimliliğinin sağlanması gelmektedir. Senaryoya göre, enerji verimliliği önlemlerinin hızlı ve önemli bir şekilde yaygınlaştırılması olmadan hiçbir karbonsuzlaştırma yolu elde edilemeyecektir. CO₂ emisyonlarını azaltmak için ikinci anahtar seçeneğin, yenilenebilir kaynakların yaygınlaştırılması olduğu belirtilmektedir. Bu kapsamda, KTD teknolojileri ile SKS’lerin hayata geçirilmesi mümkün görülmektedir. Çünkü, KTD teknolojileri, CO₂ emisyonunu azaltma yönünden birçok katkı sağlamaktadır. Örneğin, çimento kaynaklı emisyonları azaltma yönünden KTD teknolojileri küresel çapta tek çözüm olarak görülmektedir. Yine, demir-çelik ve kimyasal üretimindeki emisyonları azaltmak için birçok bölgede en uygun maliyetli yaklaşım olarak belirtilmektedir. Ayrıca, gelecekte uygun maliyetli ve erişimi kolay enerji kaynağı açısından, düşük karbonlu H₂ üretimi için uygun maliyetli bir teknoloji olarak görülmektedir. CO₂ tutma projelerinin faaliyete geçirilmesi ile 2040 yılına kadar yol alınacak gelişim aşamaları Şekil 2.9’da grafik üzerinde gösterilmiştir (IEA 2019).



Şekil 2.9. 2000-2040 yılları arası SKS’ine göre enerji üretiminde büyük ölçekli CO₂ tutma tutma senaryosu (IEA 2019)

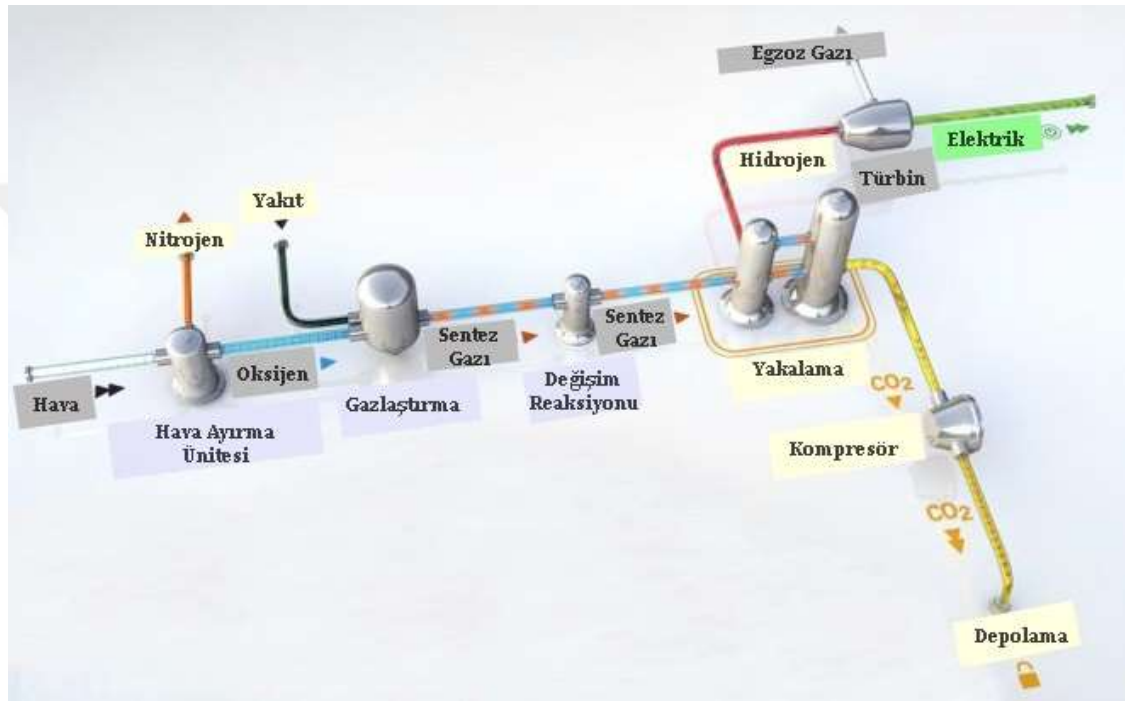
Senaryoların temelinde; doğrudan önlenemeyen veya azaltılamayan emisyonlar için KTD teknolojilerinin, karbonu ortadan kaldırmak ve net sıfır enerji sistemi sağlamak açısından önemli bir teknolojik yaklaşımı desteklediği ifade edilmektedir. Yeni enerji santrallerinde KTD teknolojilerinin 2030 yılına kadar ekonomik hale gelebileceği ve 2040 yılına yönelik senaryoların hayata geçirilebileceği öngörülmektedir (Anonim 2). Çizelge 2.5'te KTD teknolojileri ve bu teknolojilerin uygulamalarına yönelik özellikleri belirtilmektedir.

Çizelge 2.5. CO₂ tutma teknolojilerinin özeti (Nanda 2016)

Parametre	Yanma Öncesi	Yanma Sonrası	Oksi-yanma
CO ₂ derişimi	Hacimce %15-40	Hacimce %4-14	Hacimce %75-80
Asidik gazlar	Kükürt bileşiklerinin uzaklaştırılması gerekir.	NO _x , SO _x , Karbonil sülfid (COS) ve H ₂ S içerir.	NO _x oluşmaz. Kömür kullanıldığında baca gazından SO ₂ gazının uzaklaştırılması gereklidir.
Yanma ortamı	Gazlaştırma için su buharı/hava gereklidir.	Hava kullanılır.	Yanma için yüksek saflıkta O ₂ gereklidir.
Ekipman boyutu	Orta boy ekipman yeterlidir.	Yüksek yatırımla büyük boyutlu ekipman gereklidir.	Düşük boyutlu ekipman yeterlidir.
Sıcaklık ve basınç	Düşük sıcaklık ve yüksek basınç (kullanılan işleme bağlıdır).	Baca gazının soğutulması gerekir ve basınç CO ₂ tutma işlemine bağlıdır.	Havadan O ₂ gazını ayırmak için kriyojenik sıcaklıktan yararlanılır. Oksi-yanmadayüksek sıcaklıklar elde edilir. Bu nedenle baca gazı, ortam sıcaklığını düşürmek için geri beslenir.
Potansiyel	Entegre gazlaştırma kombine çevrim ve H ₂ açısından zengin sentez gazlarını etkin bir şekilde kullanabilen türbinler tercih edilir.	Mevcut kömür yakma tesislerine uygulanabilir.	Entegre gazlaştırma kombine çevrimi ile birlikte yeni çevrimler kullanılmıştır.
Avantajlar	Yanma sonrası süreçlerden daha düşük enerji gerektirir. Rejenerasyon, basınç ve sıcaklık değiştirilerek elde edilebilir.	CO ₂ tutma işlemi düşük CO ₂ derişimlerinde gerçekleştirilir.	CO ₂ tutma verimi % 100'e ulaşır. NO _x oluşumu yoktur.
Dezavantajlar	Sentez gazının, CO ₂ tutma öncesinde, kurutulması ve ön işleme tabi tutulması. Yüksek yatırım maliyeti.	Yüksek işletme ve rejenerasyon maliyeti. Yüksek çözücü/çözültü kayıpları.	Yüksek yatırım ve işletme maliyeti. Mevcut tesislere ilave etmek zordur.
Gelişme derecesi	Teknolojini kullanıldığı entegre gazlaştırma kombine çevrim ve amonyak (NH ₃) üretim tesisleri mevcuttur.	Amin yıkama tesisleri (monoetanolamin ile tepkime) pratikte bulunmaktadır. Teknoloji, güç santralleri tarafından kullanılmaktadır.	<u>Yüksek verimde CO₂ tutma.</u>

2.4.1. Yanma Öncesi

Yanma öncesi KYD sisteminin genel işlem şeması Şekil 2.10'da gösterilmektedir. Bu sistemlerde; kömür, doğalgaz, vb. fosil yakıtlar, gazlaştırmaya veya yakıt dönüştürmeye (reforming) tabi tutulurlar (Rubin vd. 2012). Bu işlemler neticesinde H_2 ve CO içeren bir gaz karışımı (sentez gazı) elde edilir. İkinci bir reaktörde (shift reaktör) sıcak su buharı ile muamele edilen sentez gazından CO_2 ile H_2 üretimi sağlanır. Üretilen gaz karışımından H_2 gazı ayrılır. Yüksek CO_2 derişimine sahip gaz, ayırma işleminin işletme maliyetinin azalmasını sağlamaktadır. (Nanda 2016). Yüksek CO_2 içeren gaz, daha sonra depolama amacıyla tutulmaktadır.



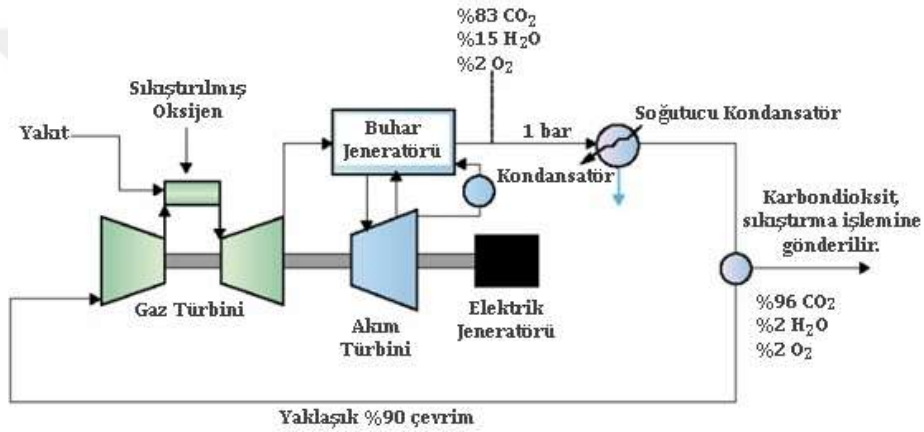
Şekil 2.10. Yanma öncesi KYD genel işlem şeması (Global CCS Institute 2020)

2.4.2. Oksi-Yanma

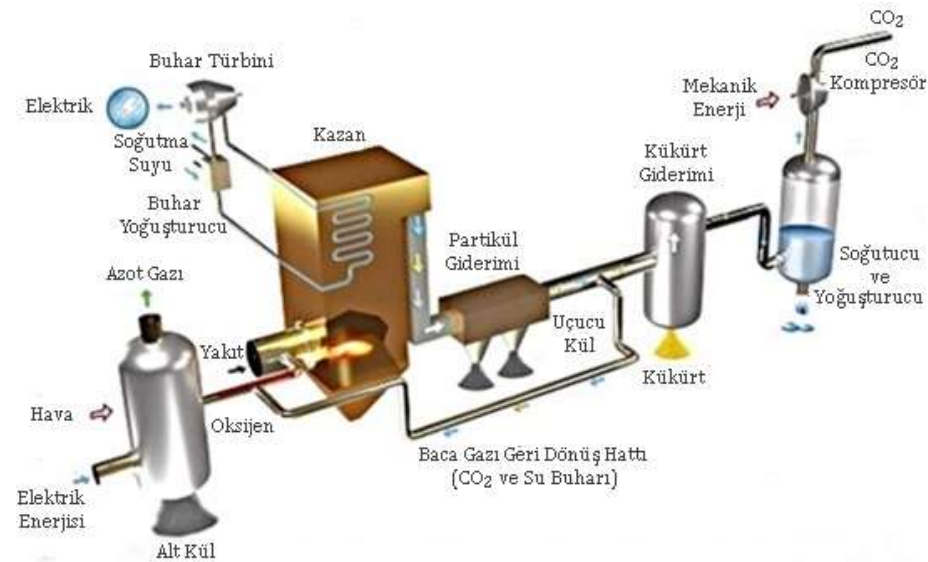
Oksi-yanma kısaca; hava yerine O_2 kullanılarak gerçekleştirilen bir yakma işlemi olarak ifade edilebilir. İşlemin temel amacı, depolama ya da başka ürün elde etme amacıyla CO_2 bakımından zengin bir baca gazı elde etmektir. Yanmanın gerçekleştiği ortama N_2 verilmediği için ısıtılması gereken gaz hacmi geleneksel sistemlere kıyasla daha azdır. Bu da yakıt tüketimini azaltır ve daha yüksek alev sıcaklıklarında yanma olayının gerçekleşmesini mümkün kılar. Baca gazı hacminin düşük olması, baca gazında daha az ısı kaybedilmesi avantajını da beraberinde getirir. Yanmanın sağlanması için ihtiyaç duyulan O_2 , havanın kriyojenik olarak damıtılmasıyla elde edilir. Yanma odasına sadece O_2 verilir. Yanma odasına N_2 girmediği için baca gazında da N_2 yoktur. Yanma esnasında sisteme N_2 beslenmediği için geleneksel sistemlerde meydana gelen N_2 'nin baca gazını seyreltme dezavantajı oksi-yanmada ortadan kalkmaktadır. Oksi-yanmada, hava ile yanmaya kıyasla yaklaşık olarak %75 daha az baca gazı üretilmektedir. Hacimsel azalma maliyet açısından yarar sağlamaktadır. Saf O_2 ile yanma yüksek alev sıcaklığına neden olduğu için sıcaklığı baskılamak adına baca gazının bir kısmı geri döndürülerek

sisteme beslenir. Oksi-yanma sonucu baca gazı çok yüksek derişimde (hacimce %80'in üzerinde) CO_2 içerir. Yakıt bünyesindeki hidrojene miktarına bağı olarak baca gazında derişimi yüksek olan bir diğ er gaz H_2O 'dur. Yakıt bünyesindeki N, S gibi safsızlıklardan kaynaklanan NO_x , SO_2 gibi gazlar dikkate alınmadığında baca gazı çok büyük oranda sadece CO_2 ve H_2O gazlarından oluşur (Global CCS Institute 2020).

Yoğuşma ısısının baca gazında kaybedilmek yerine yakalanabilir ve tekrar kullanılabilir olması, oksi-yanma teknolojisinin önemli bir diğ er avantajı olarak ortaya çıkmaktadır. Yanma odasına N_2 beslenmediğı için termal NO_x oluşma ihtimali de ortadan kalkmaktadır. Oksi-yanma teknolojisiyle atmosfere verilen kirleticilerin büyük oranda azaltılması da yine önemli bir avantaj olarak karşımıza çıkmaktadır (Global CCS Institute 2020). Şekil 2.11'de oksi-yanma teknolojisi şematik bir diyagramda gösterilmiştir (Ishanee Sharma 2020). Şekil 2.12'de ise oksi-yanma uygulanan bir güç santralinin KYD genel işlem şemasına yer verilmektedir (Global CCS Institute 2020).



Şekil 2.11. Oksi-yanma proses detayı ve nihai ürünleri (Anonim 3)

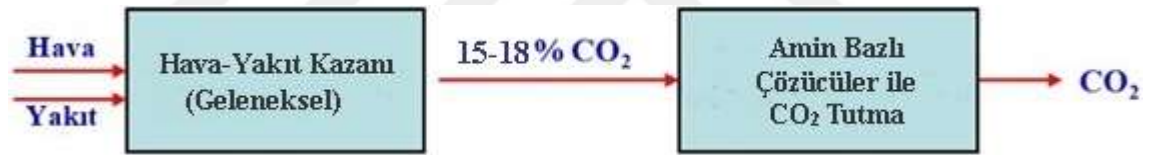


Şekil 2.12. Oksi-yanma uygulanan bir güç santralinin KYD genel işlem şeması (Global CCS Institute 2020)

2.4.3. Yanma Sonrası

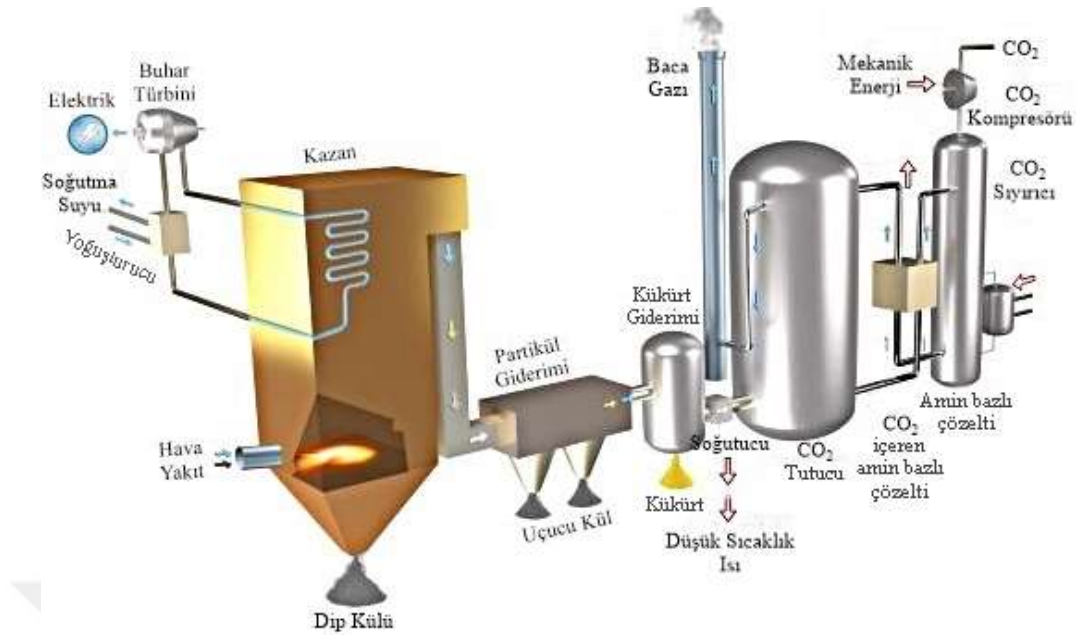
Sera gazı azaltımına yönelik karbon tutma teknolojileri arasında yanma sonrası CO₂ tutmada kullanılabilecek iki temel yöntem bulunmaktadır; fizikokimyasal ve biyolojik yöntemler. Fizikokimyasal yöntemler kapsamında, CO₂ gazının baca gazından uzaklaştırılması soğurma (absorption), bir yüzey üzerinde tutma (adsorption), membrane filtre ile ayırma (membrane separation) ve kriyojenik damıtma (cryogenic distillation) yöntemleri ile gerçekleştirilir (Nanda 2016). Biyolojik yöntemde ise; CO₂ gazının algler/mikroalgler kullanılarak, baza gazından uzaklaştırılması işlemi söz konusudur. Bu yöntem “2.6 Baca Gazında Mikroalgal Uygulamalar ve Mikrobiyal Lipitlerden Biyodizel Eldesi” bölümünde detaylı olarak ele alınmıştır.

Termik santrallerin baca gazındaki CO₂ derişimleri genellikle hacimce % 15-18 mertebesinde olduğundan, CO₂ gazını CO₂ açısından seyreltik bu tür bir gaz karışımından ayırmak için dolaylı çalışma modu (istenilen bileşeni tutmak için yeni bir bileşenin kullanılması) kullanılmaktadır (IPCC 2005). Bu kadar düşük CO₂ derişimlerinde, soğurma gibi kimyasal işlemler daha etkili sonuçlar vermektedir. Fizikokimyasal yöntemlerden soğurma, baca gazından CO₂ gazının amin bazlı bir çözücü (absorber) ile tutulması prensibine dayanmaktadır (Şekil 2.13). Amin bazlı CO₂ tutma teknolojileri ticari olarak kanıtlanmıştır. Bu tür sistemlerin mevcut bir tesis için kullanılması durumunda, tesiste sistemin kurulabileceği uygun bir alanın olması gerekmektedir (Ishanee Sharma 2020).



Şekil 2.13. Yanma sonrası amin bazlı çözücüler ile CO₂ tutma işlemi (Ishanee Sharma 2020).

Bir güç santralinde yanma sonrası soğurma yöntemi ile CO₂ tutma işlemi şematik olarak Şekil 2.14’te verilmiştir. Amin bazlı çözücülerin kullanıldığı CO₂ tutma işleminde, baca gazı, “CO₂ soğurucu” adı verilen baca gazının amin bazlı bir çözeltiyle yıkandığı bir yıkayıcı üniteden geçer. Yıkama esnasında baca gazındaki CO₂ gazı, amin bazlı çözücü ile tepkimeye girerek amonyum karbonat ((NH₄)₂CO₃) formunda baca gazından uzaklaştırılır. Yıkama işlemi sonunda CO₂ bakımından zengin bir çözelti elde edilir. Oluşan bu çözelti ayırma kulesi olarak bilinen Şekil 2.14’te “CO₂ sıyrıcı” ile gösterilen başka bir üniteye aktarılır. Çözelti burada ısıtılarak hem CO₂ gazının çözeltiden ayrılması hem de CO₂ tutmak için kullanılan amin bazlı çözücünün yeniden kullanıma hazır hale getirilmesi (rejenerasyonu) sağlanır (ZERO 2016).



Şekil 2.14. Bir güç santralinde yanma sonrası soğurma yöntemi ile CO₂ tutma işlemi şeması (Global CCS Institute 2020)

Baca gazındaki CO₂ gazının %85'ten fazlasını amin bazlı çözeltilerle tutumak mümkündür (ZERO 2016; Morcalı 2018). Fakat bu teknolojiye en büyük dezavantaj, amin bazlı çözücünün rejenerasyonu ve baca gazının soğutulması için duyulan yüksek enerji ihtiyacıdır (Zheng 2011). Genellikle yaklaşık 80-100 °C'de olan baca gazı, amin bazlı CO₂ tutma işleminden önce 40 °C'ye kadar soğutulmaktadır (ZERO 2016). Rejenerasyon işleminin 150-350 °C civarında bir sıcaklığa ihtiyaç duyması da enerji maliyetini artırmaktadır (Morcalı 2018). Ayrıca, amin bazlı çözücülerin kullanımını en aza indirmek için baca gazından SO_x, NO_x ve uçucu kül içeriklerinin uzaklaştırılması gereklidir (Zheng 2011). CO₂ tutma işleminde en uygun amin seçilimi oldukça önem arz etmektedir. Bu noktada baca gazından CO₂ giderimi için en uygun görülen ve en çok kullanılan amin bileşiği monoetanolamindir (MEA). Basıncın çok yükselmesi durumlarında CO₂ gazını tutabilmek için genellikle metildietanolamin (MDEA) bileşiği kullanılmaktadır (ZERO 2016).

Tutma işleminde amin bazlı çözücülere alternatif olarak NH_3 bazlı çözücüler de kullanılmaktadır. CO_2 tutma işleminde NH_3 kullanımı, amin ile tutma işlemine benzemektedir. NH_3 kullanmanın temel avantajı, rejenerasyon işleminin daha az enerji gerektirmesidir. NH_3 kullanımındaki dezavantaj ise, amonyağın oldukça uçucu olması ve kolayca buharlaşmasıdır. Bu nedenle baca gazının, ayırma işlemi öncesinde $10\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar soğutulması gerekmektedir. Soğutulmuş baca gazı, amonyum (NH_4^+) içeren NH_3 bazlı sulu çözeltinin bulunduğu CO_2 tutucu ünitesine gönderilir (ZERO 2016). Baca gazının sulu çözeltiyle yıkanması esnasında baca gazındaki CO_2 , NH_4^+ ile tepkimeye girer ve $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ ve/veya amonyum bikarbonat (NH_4HCO_3) formunda baca gazından uzaklaştırılır (Morcalı 2018). NH_4HCO_3 ve $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ bileşiklerini içeren sulu çözelti ısıtılarak hem CO_2 gazının çözeltiden ayrışması hem de çözücünün rejenerasyonu sağlanır. Baca gazı ise, baca gazındaki bakiye amonyağın tutulması ve yeniden kullanılması için yıkama işleminden geçirilir. (Anonim 6).

2.5. Mikroalgler ve Mikroalg Yetiştiriciliği

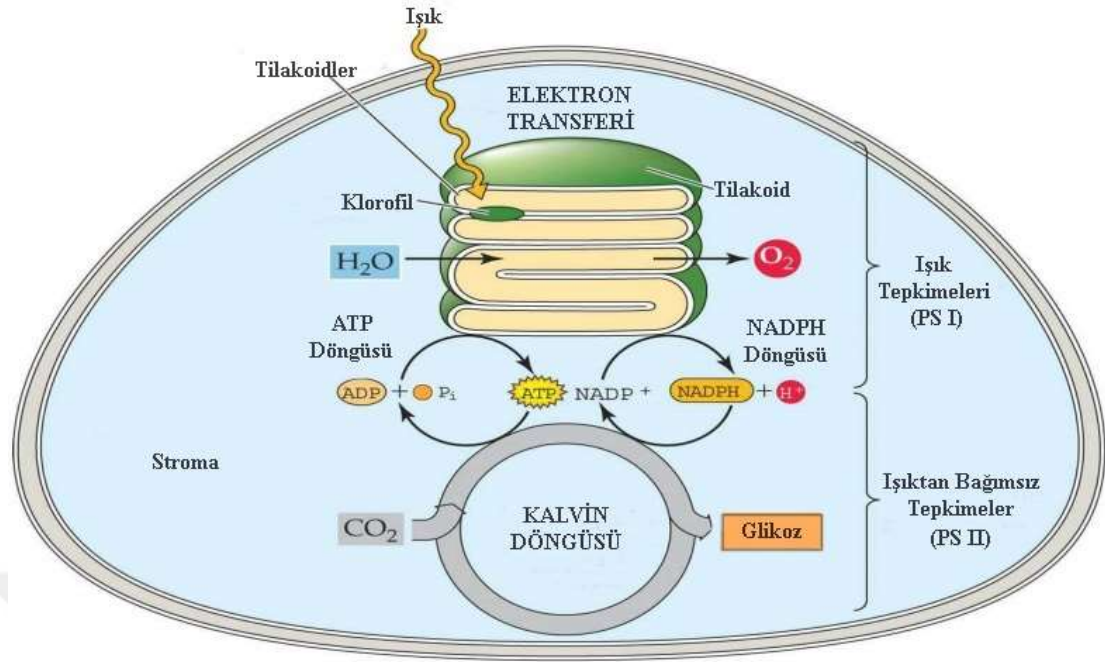
2.5.1. Algal Fotosentez

Fotosentez, ışık enerjisinin bir organizma tarafından yakalandığı ve depolandığı bir süreçtir. Yakalanan ve depolanan bu enerji, enerji gerektiren hücresel süreçleri yürütmek için kullanılır. Temelde fotosentez; ışıkla sentez anlamına gelen bir süreç olarak da tanımlanabilir (Blankenship 2014).

Mikroalg; fiziksel, kimyasal ve biyolojik parametrelere göre çoğunlukla fotosentetik olan ve ağırlıklı olarak suda yaşayan organizmalar için kullanılan genel bir terimdir. Algler temel olarak; Cyanophyta, Chlorophyta, Charophyta, Euglenophyta, Heterokontophyta, Cryptophyta, Dinophyta ve Prymnesiophyta alt şubeleri altında sınıflandırılmaktadır (Guschina ve Hardwood 2006; Bicudo ve Menezes 2006). Ökaryotik ototrofik (fotosentetik) mikroorganizmalar genellikle ışık toplayan fotosentetik pigmentlerine göre *Rhodophyta* (kırmızı algler), *Chrysophyceae* (altın sarısı algler), *Phaeophyceae* (kahverengi algler) ve *Chlorophyta* (yeşil algler) olarak gruplandırılmaktadırlar (Richmond ve Hu 2013).

Fotosentez işlemi, kloroplast organelinde gerçekleşir. Kloroplast organelinin stromasında yer alan tilakoid adı verilen kısımlarda, ışığı soğuran klorofil ve karotenoid pigmentleri yer alır. Tilakoidler, bitkilerin güneş ışığını alıp karbonhidratlara dönüştürülmesinde gerekli olan biyokimyasal reaksiyonların gerçekleştiği kısımdır. Fotosentez süresince, bu pigmentler tarafından soğurulan ışık enerjisi ile, CO₂ ve H₂O moleküllerinin depo ürünlere (glikoz, nişasta, lipit, vb.) ve O₂ gazına dönüştürülmesi sağlanır. Bu dönüşüm; ışığa bağımlı tepkimeler (PS I) ve ışıktan bağımsız tepkimeler (PS II) olarak iki kısımdan oluşur (Şekil 2.15). PS I 680 nm ve PS II 700 nm dalga boyunda maksimum oranda ışığı soğurur. PS I'deki temel hedef, mikroalgin CO₂ gazını bünyesine alması (karbon fiksasyonu) için gerekli olan nikotinamid adenin dinükleotit fosfat hidrojen (NADPH) ve adenozin trifosfatın (ATP) üretilmesidir. PS II'de, karbon fiksasyonu için 2 molekül NADPH ve 3 molekül ATP kullanılmaktadır (Richmond 2004). PS II için ihtiyaç duyulan enerji, PS I ile sağlanmaktadır.

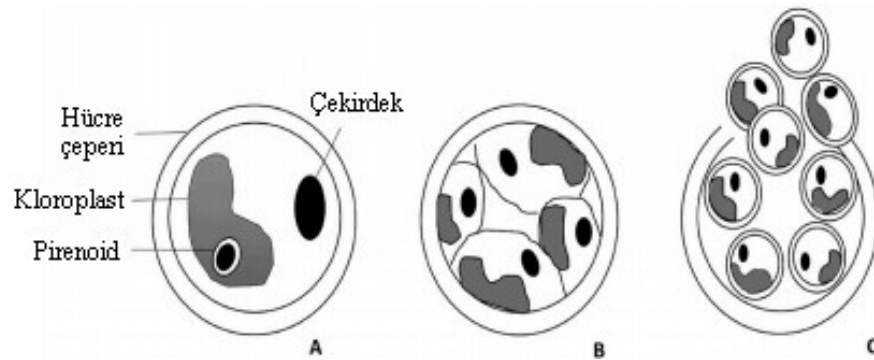
PS II, enzimatik tepkimelerin gerçekleştiği kısımdır. Bu nedenle ısı, pH, vb. parametrelere karşı oldukça hassastır. Ayrıca CO₂ ilk olarak PS II'de RuBisCO tarafından absorbe edilir. Burada, 1 mol CO₂ için 2 molekül NADPH ve 3 molekül ATP kullanılıp, gliseraldehid (PGAL) üretimi gerçekleşir. Üretilen PGAL'ın bir miktarı Calvin döngüsünün tamamlanabilmesi için 5 karbonlu Ribuloz-bi-fosfat (RuBP) adlı bileşiği oluşturur. Döngünün tamamlanmasıyla birlikte ilk elde edilen ürün karbonhidrat olmasına rağmen, organik asitler, aminoasitler ve yağ asitleri de fotosentez tepkimesinin ışıktan bağımsız tepkimelerinin gerçekleştiği Calvin döngüsünde üretilebilmektedir (Richmond 2004).



Şekil 2.15. Fotosentez akış şeması (Anonim 7)

2.5.2. *C. vulgaris*

C. vulgaris mikroalgi Chlorophyta şubesinde yer alan hareketsiz bir mikroalg türüdür. *C. vulgaris* mikroalgleri ana hücrenin 2–32 otopspor veya yavru hücreye bölünmesiyle eşeysiz otopspor üretimi (mitoz bölünme) yoluyla çoğalmaktadır. Ana hücre çeperi, otopsporların olgunlaşması sonucu patlamakta ve temel hücre kalıntısı, yavru hücreler için besin kaynağı olarak kullanılmaktadır (Şekil 2.16).



Şekil 2.16. *C. vulgaris* mikroalginin mitoz bölünme ile çoğalması (Ru vd. 2020)

C. vulgaris, bilinen canlılar arasında en yüksek büyüme hızına sahip olan (yaklaşık 16 - 20 saatlik süre içerisinde tek bir hücresi dört parçaya bölünür), 2-12 µm çapında tek hücreli, küre/elips şeklinde yeşil rengi olan bir tür mikroalg bir diğer deyişle bir tür tatlı su yosunudur. Klorofil içeriği yönünden en zengin bitki olarak kabul edilir. Bu sebepten dolayı "*C. vulgaris*" adı da içerdiği klorofil oranını temsilen verilmiştir. "*C. vulgaris*" latince "küçük, taze yeşil" anlamına gelmektedir. *C. vulgaris*'in oluşumunun yaklaşık 2,5 milyar yıl öncesinde başladığı belirtilmektedir. Ayrıca; çekirdeğinin tam

olarak gelişmiş olduğu bilinen ilk canlı olma özelliğini yıllarca koruması, yapısının genetik yönden ne kadar sağlam olduğunu ve mutasyonlara karşı ne kadar direnç sağladığını göstermektedir (Ötles 1999).

Mikroalgler genel olarak hem organik hem de inorganik karbon kaynaklarını kullanabilmekte iken, *C. vulgaris* mikroalgi sadece inorganik karbonu kullanabilmektedir. Algin inorganik karbon kaynaklarını kullanım önceliği $\text{CO}_2 > \text{HCO}_3^- > \text{CO}_3^{2-}$ olarak sıralanmaktadır (Elcik ve Çakmakçı 2017).

İlk unialgal (tek bir alg türü içeren) ekimi, bitkilerin fizyolojisini incelemek isteyen 1890'da Hollandalı M.W. Beijerinck tarafından *C. vulgaris* ile gerçekleştirilmiştir (Borowitzka 1999). *C. vulgaris* mikroalginin protein kaynağı açısından endüstriyel üretimi ise 1946'da küçük bir işletme içerisinde gerçekleştirilmiştir. Kuick, 1948'de *C. vulgaris* mikroalgi üzerinde ilk bilimsel kökenli araştırmalarını sonuçlandırabilmiştir. Aynı yıl içerisinde "Standford Araştırma Merkezi" tarafından *C. vulgaris*'in büyük ölçekte üretiminin ve hasatının yapılabilmesi amacıyla ilk pilot tesisleri inşa edilmiştir. Bu gelişmeyi takiben 1951 senesinde Cambridge'de endüstriyel ölçekte *C. vulgaris* üretimi yapan bir işletme faaliyete geçmiştir. Japonlar ise dünyada *C. vulgaris* mikroalgini yüzyıllardır kullanmalarına rağmen, *C. vulgaris* üzerine ilk bilimsel çalışmalara ancak 1951'de Kokugawa Araştırma Merkezi'nde Hiroshi Tamiya'nın çalışmaları ile başlanılmıştır. Bu çalışmalar, *C. vulgaris*'in endüstriyel üretimi, hasadı, tüketim yönünden son halini verimli hale getirmede ekonomik ve teknolojik metotlar açısından öncülük etmiştir. 1967'de, bu çalışmalara paralel olarak Çekoslovakya ve Rusya'da da faaliyetler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, II. Dünya Savaşı sonrasında Amerika ve Rusya arasındaki uzaya insan gönderimine yönelik rekabette *C. vulgaris* mikroalginin kullanımı üzerine oldukça ciddi çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Ötles 1999). Sanayinin ilerlemesiyle birlikte, Washington'da bulunan Carnegie Enstitüsü'nde gerçekleştirilen çalışmalar doğrultusunda CO_2 gazının biyolojik olarak tutulması amacıyla yosun kültürlerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar ışığında 1970 yılında Doğu Avrupa, İsrail ve Japonya'da sağlıklı gıdalar üretmek için açık havuzlarda alg yetiştiriciliği yapılmaya başlanmıştır (Ugwu vd. 2008).

Atmosferdeki O_2 miktarının yaklaşık %95'i tatlı sularda ve denizde bulunan alglerin yaptığı fotosentez sonucunda üretilir. Bu nedenle, *C. vulgaris* mikroalginin özellikle uzay çalışmalarında O_2 kaynağı olarak kullanılmasına yönelik çalışmalara eğilim olmuştur. Ayrıca, küçük hacimde, besleyici ve sağlıklı bir gıda, EPA (Eicosapentaenoik asit) ve yakıt üretim kaynağı olarak da *C. vulgaris* kullanımı önem kazanmıştır (Ötles 1999).

2.5.3. Mikroalg Yetiştirme Sistemleri

Mikroalgler sucul ortamlardaki kritik role sahip temel üreticiler olup, yüksek fotosentetik verime sahiplerdir. Ekosistem üzerinde biyolojik olarak CO_2 & O_2 dengesinin sağlanmasında aktif rol oynarlar. Mikroalg yetiştirme sistemleri, açık sistemler ve kapalı sistemler (fotobiyoreaktörler) olarak iki ana grupta sınıflandırılmaktadır. Açık sistemler günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan açık sistemler kanal tipi veya dairesel açık havuzlardır (Moreno-Garcia vd. 2017). Kapalı sistemlerde mikroalgler kolon, panel ya da boru tipi fotobiyoreaktörlerde büyütülmektedir (Pandey vd. 2014).

Çizelge 2.6. Farklı mikroalg yetiştirme sistemlerinin özelliklerinin karşılaştırılması (Yen vd. 2014)

Kültür sistemleri		Avantajları	Dezavantajları
Açık Sistemler	Havuzlar	Düşük maliyetli, kolay temizlenme, geniş çapta mikroalg yetiştirme olanağı	Düşük verim, dış ortamda kültür koşullarının kontrol edilememe durumu ve kirlilik, düşük üretkenlik, geniş alan işgal etme, uzun süreli alg yetiştirememe
	Kanallar	Sürekli olarak çalıştırılabilme	Yüksek alan/hacim oranına ve yosun çökmesini önlemek için yüksek çark kanadı gücüne ihtiyaç duyulması
Kapalı Sistemler	Dikey kolon fotobiyoreaktörler	Yüksek oranda kütle transfer imkanı, iyi bir karışım sağlanabilmesi, düşük enerji tüketimi, sterilizasyonun kolay olması, düzenli maksimum ışığın olması	Aydınlatma yüzey alanının küçülmesi, sofistike malzemelere ihtiyaç duyulması ile artan maliyet, yoğun ışığın alg kültürleri için stres oluşturabilmesi, ölçek büyütmede aydınlatma yüzey alanının azalması
	Panel fotobiyoreaktörler	Dış mekan kültürleri için uygun geniş aydınlatma yüzey alanı, alglerin hasat edilmesi için uygun, iyi bir ışık yolu, verimli biyokütle üretkenliği, nispeten ucuz, temizlenmesi kolay, düşük O ₂ birikimi	Ölçek büyütme birçok bölme ve destek malzemesi gerektirir. Kültür sıcaklığını kontrol etmede zorluk, bir dereceye kadar fotobiyoreaktör çeperinde kültürün birikmesi-verimsiz ışık geçirimi-bazı alg türlerine karşı hidrodinamik stres olasılığı
	Yatay borulu fotobiyoreaktörler	Dış mekan kültürlerine uygun geniş aydınlatma yüzey alanı, oldukça iyi biyokütle üretkenliği, nispeten ucuz	Tüpler boyunca pH değerinde, çözünmüş O ₂ ve CO ₂ derişimlerinde farklılıkların oluşması, kirlenme, bir dereceye kadar duvar büyümesi, geniş alanı gerektirmesi

Bir fotobiyoreaktörün verimliliği, CO₂ gazının fotosentez yoluyla mikroalg tarafından tutulmasının, hücre içinde taşınmasının, dağıtılmasının ve kullanımının entegrasyonuna bağlıdır (Zijffers vd. 2008). Gazın eşit olarak dağıtılması ve mikroalgler tarafından tutulabilmesinde en etkili parametre ışıktır. Fotobiyoreaktörde mikroalg hücrelerinin eşit olarak ışığa maruz kalmasını etkileyen temel faktör ise reaktörün yüzey/hacim oranının iyi belirlenmesidir. Işığın kültür ortamında eşit dağılımı için fotobiyoreaktör çapı 0,1 m ya da daha küçük olmalıdır (Chisti 2007; Rawat vd. 2013). Fotobiyoreaktörlerin yapımında kullanılan bazı malzemeler cam, fiberglas, pleksiglas, polivinil klorür (PVC), akrilik-PVC ve polietilendir (Wang vd. 2012). Açık ve kapalı kültür sistemlerinin birbirilerine kıyasla avantajları ve dezavantajları Çizelge 2.6'da verilmektedir.

2.5.3.1. Açık Sistemler

Açık sistemlerde tanklar, kanal havuzları, dairesel havuzlar, karıştırılmayan geniş havuzlar ve doğal göller ön plana çıkmaktadırlar (Sukatar 2002). Açık havuzlar, büyük ölçekli açık mikroalg yetiştiriciliği için en yaygın ortamlardır. Alglerin büyük

ticari üretimi bugün kapalı fotobiyoreaktörlere kıyasla daha ucuz ve yapımı ve işletilmesi daha kolay olan açık kanallara dayanmaktadır (Borowitzka 2013b; Tredici ve Materassi 1992). Ek olarak, mikroalglerin büyümesi açık alanda kapalı yetiştirme sistemlerinden daha az zorlayıcıdır; bununla birlikte, sadece birkaç mikroalg türü (örn. *C. vulgaris*, *D. salina*, *Spirulina. sp.*, *C. vulgaris sp.* ve *P. carterae*) açık havuzlarda başarıyla yetiştirilmiştir (Moheimani ve Borowitzka 2006; Tredici ve Materassi 1992). Mikroalgal kültürlerin büyük ölçekli açık sistemlerde yetiştirilmesi son altmış yılda düzenli olarak olarak geliştirilmiştir (Borowitzka ve Moheimani 2013a).

İki ana tip büyük ölçekli açık sistem geliştirilmiş ve ticari olarak kullanılmıştır. Bunlar;

(a) Karıştırılmamış Havuzlar ve

(b) Karıştırılmış Havuzlar (Dairesel ve Kanal) (Borowitzka 1992a, b; Borowitzka ve Moheimani 2013b).

Mikroalg yetiştiriciliğinde kullanılan en yaygın sistemler kanal tipi havuzlardır (Rawat vd. 2013, Zerrouki ve Henni 2019). Nispeten düşük inşaat ve işletme maliyeti, açık havuzlarda alg yetiştiriciliğinin tercih edilmesinde öne çıkan etkenlerdir. Bununla birlikte, esas olarak zayıf karıştırma rejimi ve hafif penetrasyonun (hücre yüzeyine tutunmuş olan zararlı mikroorganizmaların hücre içine girmesi) neden olduğu yüksek kirlenme riskleri ve düşük verimlilik, açık sistemlerin ana dezavantajlarıdır (Tredici ve Materassi 1992). Şekil 2.7’de açık sistemlere ait görseller yer almaktadır.



Şekil 2.17. Açık Sistemler (Zerrouki ve Henni 2019)

2.5.3.2. Kapalı Sistemler (Fotobiyoreaktörler)

Açık havuzlara kıyasla, kapalı sistemlerin kontrollü bir şekilde işletilmesi fotobiyoreaktörlerde fotosentetik verimliliği arttırmakta ve daha yüksek biyokütle üretimi sağlamaktadır (Wang vd. 2012). Panel tipi, dikey kolon, boru tipi, dairesel, plastik torbalar ve mekanik olarak veya hava ile karıştırılarak işletilen çeşitli reaktör formları bulunmaktadır (Costa ve de Morais 2014). Şekil 2.18’de panel tipi, dikey kolon, dairesel ve boru tipi reaktörler şematik olarak gösterilmiştir. Dikey kolon reaktörlere gaz reaktörün alt kısımdan verilmektedir. Dairesel reaktörde iç kısımda dikey kolon şeklinde bulunan difüzör vasıtasıyla gaz tüm yüzeye eşit olarak dağıtılmaktadır.

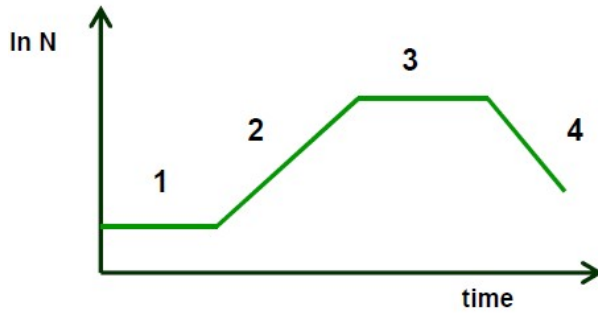
Fotobiyoreaktörler, esas olarak ortamın daha iyi homojenliği ve kütle transferi nedeniyle CO₂ gazının biyolojik olarak tutulmasında oldukça etkili olmaktadır. Bununla birlikte, bu reaktörler üretilen aşırı O₂ -deşarj edilememesi durumunda büyümeyi sınırlayıcı etki yaratabilmektedir (Ho vd. 2011). Fotobiyoreaktörlerin buharlaşmayı önleme gibi belirgin bir avantajları vardır (Moheimani vd. 2011). Bu tür sistemlerin; kontaminasyon risklerini azaltma, CO₂ kayıplarını sınırlama, tekrarlanabilir yetiştirme koşulları oluşturma ve teknik tasarımda esneklik gibi ek faydalara sahiptir. Fotobiyoreaktörlerde temel dezavantaj açık sistemlere göre maliyetinin yüksek olmasıdır (Borowitzka 1996; Moheimani vd. 2013; Moheimani vd. 2013c). Kapalı sistemlerde pH, sıcaklık, ışık, CO₂ derişimi ve benzeri koşullar üzerinde daha iyi kontrol sağlanabilmektedir. Bu avantajlardan dolayı, fotobiyoreaktörler yüksek hücre derişimlerinin elde edilmesine olanak sağlamaktadırlar (Costa ve de Morais 2014).



Şekil 2.18. Kapalı Sistemler (Zerrouki ve Henni 2019)

2.5.4. Mikroalg Gelişimine Etki Eden Faktörler

Mikroalg popülasyon hücre yoğunluğu, kısıtlayıcı etki yaratan bazı faktörlerin tükenmesine kadar sürekli artış gösterirken, kültür ortamının diğer besin bileşenlerinin tüketilmesi nedeniyle bu bileşenlerin oranlarında zamanla azalış görülmektedir. Büyüme esnasında mikroalg hücreleri tarafından sentezlenen herhangi bir ürün, kültür ortamındaki konsantrasyonda da miktar olarak artış göstermektedir. Hücreler tarafından kullanıldıkça tükenen kaynaklardan sonra, yeni bir ortam sağlanmadığı sürece kültürlerde ölüm gerçekleşmektedir (Şekil 2.19). Alg yetiştirmesinin sürdürülebilir olarak uygulanması (alt kültürleme) ile mevcut kültürün küçük bir hacminin düzenli aralıklarla büyük bir hacimdeki taze kültür ortamına aktarılmasıyla yapılmaktadır. Bu yöntemde, alg hücrelerinin kapalı bir kap içinde büyümesine ve çoğalmasına izin verilmektedir (Barsanti ve Gualtieri 2014).



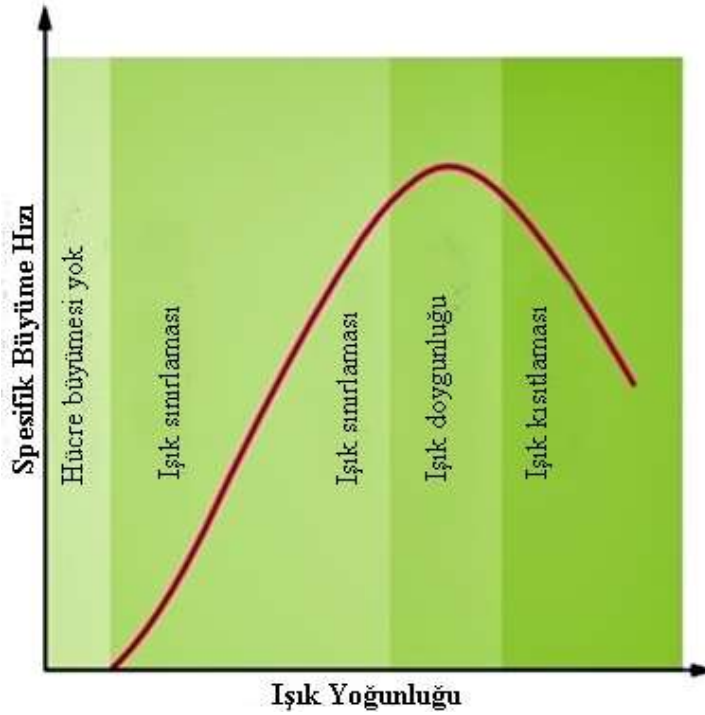
Şekil 2.19. Kültür ortamı altında bir alg popülasyonunun büyüme kinetiği (N- kuru ağırlık, 1- adaptasyon, 2- yoğun büyüme, 3- durağan faz, 4- hücre ölümü)

2.5.4.1. Işık

Işık mikroalglerin büyümesi üzerinde en önemli etkenlerden biridir. Işık koşulları (ışık yoğunluğu ve aydınlatma süresi), mikroalglerin büyümesini ve fotosentez yapmasını doğrudan etkilemektedir. Mikroalglerin çoğu, optimum verimde fotosentez yapabilmek amacıyla bir aydınlık/karanlık döngüsüne ve bir ışık kaynağına ihtiyaç duymaktadırlar. Işık, protonları (H^+) ve elektronları (e^-) su moleküllerinden nikotinamid adenin dinükleotit fosfata ($NADP^+$) aktarmak, $NADPH$ ve ATP oluşturmak için enerji sağlamaktadır (Miranda vd. 2015). Mikroalgler fotosentez yapabilmek için ışık kaynağına ihtiyaç duyarlar. Işık, fotosentetik enerji dönüşüm reaksiyonu için birincil substrat görevi görse de, fazla ışık miktarı, fotoinhibisyon etkisiyle büyümeyi azaltabilmekte ya da PS II reaksiyon merkezindeki polipeptitlere zarar vererek hücre ölümünü hızlandırabilmektedir (Miranda vd. 2015).

Güneş enerjisinin yaklaşık %48,7'si (400 ile 700 nm arasındaki bölge) fotosentetik aktif radyasyon (PAR) olarak kabul edilmektedir (Zhu vd. 2008). Bitkiler, dünyadaki tüm organizmaları harekete geçiren tüm kimyasal, mekanik ve elektrik enerjisinden sorumlu olan güneş enerjisinin %1'inden daha azını dönüştürür, kullanır ve depolar. Oksijenik fotosentetik organizmalar, 400-700 nm dalga boyuna sahip görünür ışık kullanırken, oksijensiz fotosentetik organizmalar, 700 nm'den büyük dalga boylarında kızılötesi bölgede daha az enerjili dalga boylarını kullanabilirler. (Satish ve Manju 2018). Mikroalgler de fotosentez için PAR bölgesindeki ışığı kullanırlar (Elcik ve Çakmakçı 2017; Blair vd. 2014; Kim vd. 2013). Işık kaynağı tipinin, esas olarak dalga boyu aralığının kapsamındaki farktan dolayı mikroalg büyümesini etkileyen kritik bir faktör olduğu bilinmektedir (Terry 1986). Işık kaynağının türüne ek olarak, ışık yoğunluğu mikroalg büyümesi için de çok önemlidir (Grobbelaar vd. 1996; Sanchez vd. 2008; Ugwu vd. 2008; Yoon vd. 2008). Genel olarak, ışık yoğunluğunun mikroalglerin fotoototrofik büyümesi üzerindeki etkisi; ışık sınırlaması, ışık doygunluğu ve ışık kısıtlaması gibi çeşitli fazlara ayrılabilir (Şekil 2.20). Hücrelerin karıştırılmasını geliştirmek, fotobiyoreaktörün farklı bölgelerinde ışık gölgeleme veya fotoinhibisyonun etkilerini azaltabilir. Biyokütle verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için, doymuş ışık yoğunluğunun tüm mikroalg yetiştirme sistemi boyunca dağıtılması gerekir. Işık yoğunluğundaki ve yetiştirilen mikroalg sayısındaki artış, ışık süresindeki artışla doğrusal bir etki gösterir. Artan ışık yoğunluğunun ve ışık süresinin, artan doymuş yağ asitleri (SFA), azalan tekli doymamış yağ asitleri (MUFA) ve çoklu doymamış yağ asitleri (PUFA) ile yakın ilişkisi bulunmaktadır (Cheirsilp ve Torpee 2012).

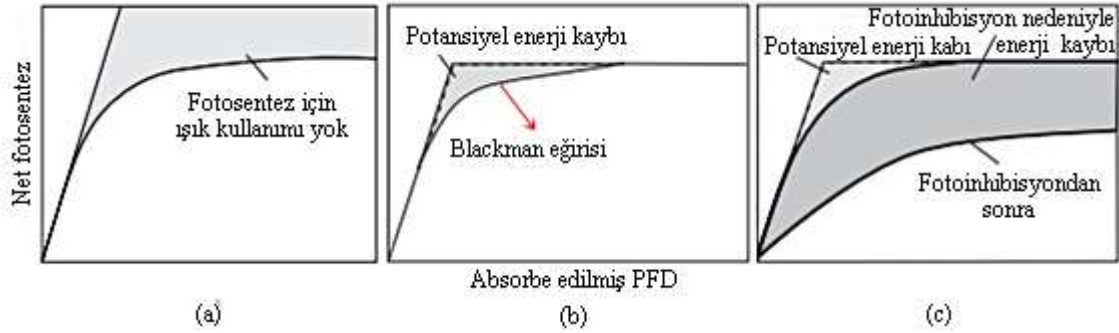
Işık kullanımının verimliliğini artırmak ve yapay aydınlatma ile sistem maliyetlerini azaltmak için çeşitli çalışmalar geliştirilmiştir. Mikroalg kültürlerini bir laboratuvar da yetiştirmenin avantajı, floresan tüplerin kullanılmasıdır. Yüksek miktarda enerji tüketmelerine rağmen, LED kullanımı ile ışık kaynaklı enerji kullanım oranı %50'den fazla azaltılabilmektedir. Birçok kültür, maliyeti olmayan bir ışık kaynağı olarak sadece güneş enerjisini kullanır. Bununla birlikte, dış mekan sistemlerinin performansı iç mekanlardan daha düşüktür ve geniş alanlara ihtiyaç duyarlar (Chen vd. 2011). Açık ve dış ortam sistemlerinde mikroalgleri yetiştirmek için güneş ışığı doğrudan kültür ortamına geldiğinde sistem içerisinde, ışık yoğunluğunun uygun miktarda ve eşit olarak dağılamamasından ötürü ışık sınırlaması olmaktadır. Bu durumda büyüme üzerinde de paralel olarak kısıtlama ve yavaşlama ortaya çıkmaktadır. Kapalı sistemlerdeki fotobioreaktörlerde ise, ışık yoğunluğunu daha iyi bir şekilde ortama yayan floresan lambaların tercih edilmesiyle, mikroalg büyümesinde çok daha iyi bir verim sağlanabilmektedir. Bu sayede daha yoğun ışık altında, daha yüksek verimde hücre büyümesi sağlanabilmektedir (Töre ve Işık 2020). Işık yoğunluğunun doygunluk derecesini geçecek şekilde fazla olduğu ortamlarda fotoinhibisyon sebebiyle mikroalg büyümesinde yavaşlamalar hatta ölümler olabilmektedir



Şekil 2.20. Işık yoğunluğunun fototrofik yetiştirme altında mikroalglerin spesifik büyüme hızı üzerindeki etkisi (Ogbonna ve Tanaka 2000)

Şekil 2.21'de fotoinhibisyona etki eden etmenlerin gösterimi detaylı olarak ifade edilmektedir. Işığın mikroalg tarafından soğurulmasının ardından fotosentez doğrusal olarak artış göstermeye başlamaktadır. Eğrinin eğiminin başladığı kısım soğurulan en fazla ışınımı temsil etmektedir. Şekil 2.21 (a)'da artan ışımaya karşı oluşan tipik fotosentez tepki eğrisi görülmektedir. Işık tepki eğrisinin üzerindeki gölgeli alan, fotosentez için soğurulan fakat kullanılmayan fazla ışık miktarını göstermektedir. Şekil 2.21 (b)'de alt kısımda yer alan Blackman eğrisi ile etkin ışık tepkisi eğrisi arasında kalan

gölgeli alan, potansiyel olarak fotosentez için kullanılabilecek, ancak soğuralamayan ve dağılan ışık enerjisini göstermektedir. Şekil 2.21 (c)'de ise şiddetli fotoinhibisyonun etkisi gösterilmektedir. Normal ve fotoinhibisyon eğrisi arasındaki gölgeli alan, kültürün fotoinhibisyonu nedeniyle fotosentezde kaybedilen soğurulmuş ışık enerjisini temsil etmektedir. Bu durumun temel etkileri arasında fotosentez hızındaki azalma sayılabilmektedir (Torzillo ve Vonkshak 2013).



Şekil 2.21. a) Artan ışınlama karşı tipik fotosentez yanıt eğrisi. **b)** Potansiyel olarak fotosentez için kullanılabilecek soğurulmuş ışık enerjisi. **c)** Fotosentez hızını azaltan şiddetli fotoinhibisyonun etkisi (Torzillo ve Vonshak 2013)

2.5.4.2. Sıcaklık

Sıcaklık, hücre morfolojisi ve fizyolojisini ve ayrıca mikroalgal biyokütlenin yan ürünlerini düzenleyen ana faktörlerden biridir. Yüksek sıcaklık genellikle mikroalg metabolizmasını hızlandırır ve düşük sıcaklık büyümeyi inhibe edebilir (Munoz ve Guieysse 2006). Büyüme için optimum sıcaklık mikroalg türleri arasında değişir (Ono ve Cuello 2003). Gün boyunca yüksek sıcaklıkların fotosentez nedeniyle büyüme oranları üzerinde olumlu bir etkisi vardır. Sıcaklık ayrıca, suyun iyonik dengesi, pH ve O_2 ve CO_2 'nin çözünürlüğü gibi ekim için önemli olan diğer faktörleri de etkiler. Farklı mikroalg türleri farklı düzeylerdeki sıcaklıklardan etkilenir (Park vd. 2011). O_2 ve CO_2 gazlarının çözünürlüğü artan sıcaklıkla birlikte azalır. Ortamda yüksek derişimde O_2 olması durumunda, artan sıcaklık O_2 gazının Ribuloz-1,5-bisfosfat karboksilaz-oksijenaz (RuBisCO) ile sabitlenmesiyle sonuçlanır. Böylece RuBisCO'nun CO_2 tutma eğilimi artan sıcaklıkla azalır (Kumar vd. 2011). Çünkü, sıcaklık arttıkça çözünürlüğü azalan CO_2 'nin hücre içine alınıp, kullanılma ihtimali de azalmaktadır. RuBisCO oksijenaz ile O_2 'yi tutma eğilimine, karboksilaz ile CO_2 'yi tutma eğilimine sahip bir enzimdir. Fakat, RuBisCO genel olarak O_2 'yi tutma eğilimine daha yatkındır. Şayet, ortamda CO_2 daha fazla derişime sahipse CO_2 'yi tutar ve kullanır. Sıcaklığın artışıyla CO_2 'nin çözünürlüğünün yavaşlaması ile ortamda CO_2 gazının derişiminde artış yavaş olur. Bu durumda RuBisCO enzimi O_2 'yi tutma eğilimi gösterir ki bu fotosentez verimliliği açısından istenmeyen bir durumdur.

2.5.4.3. pH

pH, kültür ortamında mikroalglerin büyümesini etkileyen önemli bir faktördür. Genellikle, asidik ortam (pH 5-7), tatlı su ökaryotik alglerinin büyümesi için elverişlidir; alkali ortam (pH 7-9) ise siyanobakterilerin (mavi-yeşil algler) büyümesi için faydalıdır (Razzak vd. 2017; Razzak vd. 2013). Genel olarak, çoğu alg türünün canlılığını

sürdürmek ve diğer istilacı organizmaların büyümesini azaltmak için pH değerinin 8 ile 9 arasında daha elverişli olduğu bildirilmiştir (Behera vd. 2019; Bartley vd. 2014). Bazı mikroalg türleri için pH'nın 10 ile 11 arasında bir değerde olması yüksek üreme verimliliğine neden olmaktadır. Yüksek pH değerinde, açık fotobiyoreaktör sistemlerinde alg yetiştiriciliğinde patojenik mikroorganizmaların ve diğer mikroalg türlerinin etkisiz hale getirilmesi söz konusu olabilmektedir (Kumar vd.2010).

pH'nın 9-10 civarına çıkması sonucunda fosfor çökelmeye başlamakta ve büyüme optimum verim sağlayamamaktadır. Çünkü; CO₂ ve güneş ışığının yanı sıra, mikroalgal büyüme katkıda bulunan temelde su, azot ve fosfor olarak üç ana girdinin ortamda yeterli oranda bulunması gerekmektedir. Mikroalgal biyokütlenin yaklaşık %10-20'sine azot ve fosfor gibi büyük besin maddeleri katkıda bulunmaktadır (Zhu 2015b).

pH'nın 10-11'in üzerine çıkması durumunda, mikroalglerin gelişimi inhibe olmaktadır. Mikroalglerin büyüme işlemi sırasında pH genellikle, karbonat (CO₃²⁻) / (HCO₃⁻) dengesiyle kontrol edilmektedir. Büyük ölçekte pH kontrolü, CO₃²⁻ tamponlarının hücre dışı pH ve hücre içi pH'nın izole edilmiş etkilerinin detaylı bir analizini gerektirmektedir (Behera vd. 2019; Ying vd. 2013). Mikroalgler fotosentez yaparak CO₂ gazını kullanırlar ve pH yükselir (Elcik ve Çakmacı 2017; Zhu vd.2013). Yükselen pH'nın kontrol edilmesinde genellikle hidroklorik asit veya asetik asit kullanılmaktadır. pH, yüksek pH'da amonyağın uçması ve ortofosfatın çökmesi nedeniyle azot ve fosfor giderimini etkilemektedir (Munoz ve Guieysse 2006; Töre ve Işık 2020).

Uygun pH değerlerinde, pH'nın CO₂ gazını verimli bir şekilde sabitleyebileceği ortaya koyulmuştur (Goli vd. 2016). Mikroalg yetiştirme sistemlerinde CO₂ gazı derişimi, kültürün pH değerini belirleyecek baskın faktör olabilmektedir. Böyle bir durumda CO₂ gazının mikroalg hücresine alınıp kullanılma verimliliği, CO₂ gazının sıvıya transferi ve hücreler tarafından CO₂ tüketimi arasındaki dengeden kaynaklanmaktadır (Wang vd. 2012).

2.5.4.4. Karıştırma

Alglerin çökelmelerini engellemek, tüm alg hücrelerinin eşit oranda ışığa maruz kalmasını ve eşit miktarda besin maddesine ulaşmasını sağlamak, kültür ortamı ile hava arasındaki gaz alışverişini iyileştirmek açısından karıştırma oldukça önem arz etmektedir. Mikroalg kültürlerinin karıştırılması yoğun kültürlerde gerçekleşecek hücre çoğalmasına bağlı olarak besin sınırlamalarını önlemek ve gaz difüzyonunu artırma yönünden önemlidir. Alg kültürü test tüplerinde veya erlenmayerde yetiştiriliyorsa karıştırma, günlük olarak elle ve test tüpü/erlenmayer tıplarının birkaç kez açılıp havalandırılması ile yapılmaktadır (Barsanti ve Gualtieri 2014). Daha büyük sistemlerde karıştırma, gaz enjeksiyonu, pompalama veya mekanik karıştırma ile gerçekleştirilebilmektedir. Karıştırma ekipmanının dikkatli seçilmesi ise biyokütle verimliliğini %75'e kadar yükseltebilmektedir (Rashid vd. 2014; Töre ve Işık 2020).

2.5.4.5. CO₂ Gaz Derişimi ve O₂ Giderimi

Mikroalgal biyokütle yaklaşık %45-50 karbon içerir (Zhu 2015a). Mikroalglerin karbon kaynağı, atmosferden alınan CO₂ ve çözünür karbonatlardır (Jankowska vd.

2017). CO₂, mikroalgal büyüme için en önemli besin maddelerinden biridir ve CO₂ derişim miktarı ve kullanımı ile gerçekleşen tepkimeler, fotosentetik verimlilik, besin alımı, asimilasyon, hücre büyümesi ve lipid üretimi ile yakından ilişkilidir (Miranda vd. 2015). Mikroalgler hem organik hem de inorganik karbon kaynaklarını kullanabilmektedir (Elcik ve Çakmakcı 2017; Rashid vd. 2014). Mikroalgler, kültür sadece 330 ppm_v CO₂ içeren hava ile beslenirse büyüme sınırlaması yaşayabilir. Uygulamada, ekstra CO₂ hava ile karıştırılabilir ve gaz karışımı hava taşları/difüzörler vasıtasıyla mikroalg kültürünün bulunduğu ortama verilebilir. CO₂ açısından zengin endüstriyel atık gazları mikroalg kültürü için ekstra karbon kaynağı olarak kullanılabilir (Zhu 2015a). Bir kg algin (kuru hücre ağırlığı) büyüme sürecinde yaklaşık 1,83 kg CO₂ tutabildiği rapor edilmektedir (Chisti 2007). Kanal tipi havuzlarda biyokütle üretim miktarı (kuru hücre ağırlığı) yıllık hektar başına 30-37 tondur ve bu üretim miktarı ile yılda hektar başına yaklaşık 54,9 – 67,7 ton CO₂ gazını tutmak mümkün görünmektedir (Brennan ve Owende 2010). Karıştırmanın yeterli olmaması ya da mikroalg kültürünün bulunduğu ortama verilen gaz karışımındaki CO₂ gazı derişiminin düşük olması durumlarında, CO₂ mikroalg yetiştiriciliğinde sınırlayıcı besin olabilir. Bununla birlikte, yüksek CO₂ derişimi ortam pH'sını düşürerek bazı mikroalglerin büyümesini inhibe edebilir (Wang vd. 2012).

Açık sistemler, CO₂'nin suda düşük çözünürlüğünden dolayı sınırlı bir karbon kaynağına sahip olur. Bu nedenle, açık sistemlerde mikroalg yetiştirme dönemi boyunca optimum seviyede CO₂ derişimini sağlayabilmek için, sürekli olarak CO₂ gazının sisteme verilmesi gerekir. Bu gereksinim, CO₂ içeren baca gazının (güç santrallerden, çimento veya petrokimya fabrikalarından kaynaklanan) doğrudan mikroalg kültürünün olduğu ortama verilerek, kültürün bulunduğu sulu çözeltide yüksek bir serbest CO₂ derişimi sağlanarak karşılanabilir. (Elcik ve Çakmakcı 2017; Rashid vd. 2014). CO₂ doğrudan sisteme verildiğinde, suda çözünerek pH'ı azaltabilir. Bu durumu önlemek amacıyla CO₂ gazının tamamının mikroalgler tarafından kullanılması gerekir. CO₂'nin biyolojik olarak sabitlenmesinin artması için pH değerinin alkali koşullarda (pH 8-10) olması gerekir. Gazın emiliminde hızlanmayı arttırıcı etki gösteren alkali pH değeri, iki temel reaksiyon sonucunda elde edilir (Amaro vd. 2011). Bunlar:

- 1) HCO₃⁻ oluşturmak için CO₂ hidrasyonu
- 2) HCO₃⁻ oluşturmak üzere CO₂'nin OH⁻ ile doğrudan reaksiyonu

Fotobiyoreaktörlerde CO₂ gazının biyolojik olarak tutulması, CO₂ gazının fotobiyoreaktör boyunca yönlendirilmesi ve ayrıca küçük kabarcıklar oluşturan, gaz ve sıvı arasındaki temas yüzeyini arttıran difüzör tipi ekipmanların kullanılmasıyla arttırılır. Mikroalglerle CO₂ tutma; biyoyakıt üretimi, sera gazı emisyonlarının azaltılması ve atık suların arıtımı bakımından dikkat çeken bir uygulamadır (Kumar vd. 2010). Mikroalglerle CO₂ tutmanın sınırlayıcı faktörü genellikle CO₂ gazının gazdan sıvıya geçişindeki kütle transferidir. Gaz karışımındaki CO₂ derişimindeki artış kütle transferinde de artışa yol açmaktadır. Bununla birlikte, kültür ortamlarına yüksek seviyelerde CO₂ sağlanması asitleşmeye yol açarken, mikroalglerin fotosentez yoluyla CO₂ gazını tüketiyor olmaları ortam pH'sının artmasına neden olur ve sonuçta meydana gelen değişiklikler bazı mikroalg türlerinin büyüme oranlarını etkileyebilmektedir. pH'ın düşmesi, hücre dışı karbonik anhidraz aktivitesinin azalmasına neden olmaktadır (Anjos 2013). Buna bağlı

olarak fotosentez sırasında karbonik anhidraz enzimi tarafından hücre dışına taşınan hidroksit iyonlarının da azalmasıyla meydana gelen pH azalması, aktivitesi önemli ölçüde pH'a bağlı olan ve daha yüksek pH seviyelerinde artan ribuloz 1,5-bifosfat karboksilaz enziminin aktivitesini sınırlayıcı etki göstermektedir. Bu nedenle, kültür ortamına yüksek CO₂ sağlanması mikroalgler tarafından optimum CO₂ alımı ile eşleştirilmelidir. Bir başka ifadeyle, mikroalgin optimum seviyede büyüyebileceği pH değerini oluşturacak maksimum CO₂ derişiminin belirlenmesi gerekmektedir.

Fotosentez sırasında CO₂ tüketilirken, O₂ üretilmektedir. Eğer mikroalg üretiminin yapıldığı bir fotobiyoreaktörde üretilen O₂ fotobiyoreaktörden uzaklaştırılmazsa ve fotobiyoreaktör içerisinde derişimi giderek artarsa, bu durum fotosentezin durmasına neden olabilir. Böylece biyokütle verimliliğinde bir azalma meydana gelir. Bunu engellemek için fotobiyoreaktörde O₂ derişimi belirli bir seviyede tutulmalıdır. Fotobiyoreaktör gibi kapalı sistemlerde, fotosentez sırasında üretilen O₂ gazının atmosfere salınmasına yardımcı olmak için gaz eşanjörleri gibi ek ekipmanlar gerekmektedir (Zhu 2015a).

2.6. Baca Gazında Mikroalgal Uygulamalar ve Mikrobiyal Lipitlerden Biyodizel Üretimi

Günümüzde baca gazı arıtımına yönelik uygulamaların temelinde, verimliliği arttırmanın dışında en önemli etken sera gazı emisyonlarını azaltmaktır. Bu konuda sera gazı emisyonlarını azaltacak ve fosil yakıtların yerine geçebilecek en önemli kaynaklardan biri biyoyakıtlardır. Sanayileşmedeki gelişimin giderek artması ve buna paralel olarak nüfusun hızlı bir şekilde artış göstermesi, enerjiye olan ihtiyacı günden güne arttırmaktadır. Bu enerji ihtiyacının karşılanabilmesi için kullanılan temel kaynaklar, çevre kirliliğine ve CO₂ salınımına ciddi oranda sebep olan petrol, doğalgaz, kömür, vb. fosil yakıtlardır. Bu yakıtlara ve ürettikleri kirliliklere kıyasla mikroalglerin kullanım tipine göre birden fazla yenilenebilir ve çevresel kirlilik yönünden çok daha az etkisi olan yakıt üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Bunlar; algal biyokütlenin anaerobik parçalanmasıyla CH₄ üretimi, mikroalgal yağlardan (lipitlerden) biyodizel üretimi, nişastadan biyoetanol üretimi ve fotobiyolojik olarak biyohidrojen üretimi şeklinde sıralanabilmektedir (Hossain vd. 2008).

Mikroalgler biyoyakıt üretiminde kullanılmalarına rağmen, üretimde karşılaşılan en büyük sorun üretim maliyetinin yüksek olmasıdır. Termik santrallerden kaynaklanan baca gazının kullanılmasıyla elde edilebilecek yüksek CO₂ derişiminin üretim ve tüketim aşamasındaki maliyetleri (CO₂ ayrımı, transferi ve kullanımına yönelik teknolojik işlemleri) büyük bir oranda düşürebileceği çeşitli araştırmacılar tarafından önerilmiştir (Benemann 1997; Haiduc vd. 2009). Buna bir örnek İsrail Elektrik A.Ş. tarafından gerçekleştirilmiştir ve %0,04 CO₂ derişiminde üretim yapıldığında 17 USD/kg'a çıkan üretim maliyetinin, baca gazı kullanımıyla 0,34 USD/kg'a kadar düştüğü tespit edilmiştir (Ben-Amotz 2008).

Mikroalg yetiştiriciliği uzun yıllar boyunca geniş bir çapta incelenmiştir (Lee 2001). Yetiştirme ortamı ve süreçlerinin iyileştirilmesine yönelik çabalar olmasına rağmen, büyük ölçekte yetiştiriciliğin yapılabilmesi için uygun maliyetli ve yüksek verimli yetiştirme sistemlerinin geliştirilmesi önemli ölçüde iyileştirilmelidir (Wang vd. 2012; Wang ve Lan 2011). Mikroalgal biyoteknoloji, biyokütleden geliştirilebilecek

büyük ürün çeşitliliği araştırmaları aracılığıyla ortaya çıkmıştır. Mikroalg biyokütlesinin, diyet takviyeleri, lipitler, biyokütle, biyopolimerler, pigmentler, biyo-gübreler ve biyoyakıtlar gibi alanlar açısından kaynak olarak endüstriyel ölçekte üretiminin yapılması oldukça önemli hale gelmiştir. Bu bileşikler elde etmek için mikroalgler, CO₂ ve endüstriyel atıklar kullanılarak üretilmektedir.

Literatürde farklı CO₂ derişimine sahip gaz karışımlarının kullanıldığı mikroalg kültürleri kullanılarak gerçekleştirilen CO₂ giderimi çalışmaları mevcuttur. Morais vd. (2007) bir güç santralının atık havuzundan izole ettikleri iki mikroalg türünün (*Scenedesmus obliquus* ve *C. vulgaris* kessleri) farklı CO₂ derişimindeki (%6, 12 ve 18) büyüme davranışlarını araştırmışlardır. Chiu vd. (2011) bir çelik fabrikasının baca gazı (%25 CO₂ içeren) ile yüksek sıcaklığa ve yüksek CO₂ gazına toleransı fazla olan bir *C. vulgaris* türü (*C. vulgaris* sp. MTF-7) yetiştirmişler, türün CO₂, kükürtdioksit (SO₂) ve NO giderimini incelemişlerdir. Taştan vd. (2012) çalışmalarında *Synechococcus* sp. siyanobakterinin ve *C. vulgaris* sp. mikroalginin SO₂ ve azot dioksit (NO₂) toleranslarının triacontanol (TRIA) ve sodyum bikarbonat (NaHCO₃) kimyasalları ilavesiyle arttırmasını incelemişlerdir. Taştan vd. (2013) çalışmalarında bir siyanobakteri (*Phormidium* sp.) ve bir mikroalg (*C. vulgaris* sp.) kültürlerinin egzoz emisyonuna maruz bırakıldığında, TRIA ve salisilik asit kimyasallarının kültürlerin büyüme oranlarına nasıl etki ettiğini incelenmiştir. Taştan vd. (2016a) *C. vulgaris* sp. kültürünün TRIA ve NaHCO₃ kullanılarak büyüme veriminin iyileştirilmesi üzerine bir inceleme yapmışlardır. Çalışmada, mikroalg kültürü kömürün yakılmasıyla elde edilen baca gazına maruz bırakılmıştır. Taştan vd. (2016b) çalışmalarında baca gazına maruz bırakılan IAA (3-Indoleasetik asit) ve VO (*Viburnum opulus*) kimyasalları ile uyarılan *Scenedesmus* sp. mikroalg kültüründen “yeşil kömür” diye tabir edilen bir kömür katkı maddesi üretmişlerdir. Aslam vd. (2017) kömür yakan bir termik santralin %11 CO₂ içeren baca gazını doğrudan karışık bir mikroalg kültürüne vererek, kültürün adaptasyonunu incelemişlerdir. Sadeghizadeh vd. (2017) bir fotobiyoreaktörde yetiştirilen *C. vulgaris* mikroalg kültürünün farklı gaz hızlarında havadan CO₂ tutması üzerine bir araştırma yapmışlardır.

Dukarte vd. (2017), mikroalg *Chlorella fusca* LEB 111 ve siyanobakteri *Spirulina* sp. LEB 18'i kömür termik santrali kaynaklı baca gazından elde edilen CO₂ altında yetiştirmişlerdir. 1,8 L çalışma hacminde, 0,20 g L⁻¹ başlangıç konsantrasyonu ile deneyler yapılmıştır. Çalışılan baca gazı içeriği, %10-12 CO₂ derişimi, 400 ppm NO_x, 5000 ppm SO_x ve 650 ppm kül olarak belirlenmiştir. Sistemde gaz akış hızı (sisteme verilen toplam gaz debisinin çözelti hacmine oranı) 0,05 vvm (vvm: gas volumetric flow rate of gas mixture per unit volume of culture medium) olarak ayarlanmıştır. Kömür baca gazı biyofiksasyonundan elde edilen maksimum günlük CO₂, *Chlorella fusca* LEB 111 için 360,12±0,27 mg L⁻¹ gün⁻¹, spesifik büyüme oranı da 0,17 ±0,01 gün⁻¹ olarak hesaplanmıştır. *Spirulina* sp. LEB 18 için günlük CO₂ fiksasyonu 135,01±11,50 mg L⁻¹ gün⁻¹ ve 0,14±0,04 gün⁻¹lik bir spesifik büyüme oranı elde edilmiştir. Çalışma sonucunda *Chlorella fusca* LEB 111 mikroalgi için daha yüksek orandan CO₂ fiksasyonu sağlanmış olsa da, her iki suşun enerji üretiminde ve kömür termik santrallerinden kaynaklanan baca gazını azaltmada biyoteknolojik uygulama açısından alternatif olduklarını belirtmişlerdir.

García-Cubero vd. (2017), çalışmalarında *C. vulgaris* UAM 9-88 suşunu, %12 CO₂, %0,06 SO₂, %0,08 NO₂, %5 O₂ ve geri kalanı N₂ olan baca gazı derişimleri altında yetiştirmişlerdir. 33 L çalışma hacmindeki kabarcık kolonlu fotobiyoreaktörde, baca

gazının sisteme direkt olarak verildiği koşullarda pH 7,5 değerinde ve sıcaklık 20 °C’de sabit tutularak deney yapılmıştır. pH kontrolü olmayan deneylerde ise, saf baca gazı %1, 3, 6, 8, 10 ve 12 CO₂ derişimlerine seyreltilerek sisteme verilmiştir. Fotobiyoreaktör yüzeyindeki aydınlatma şiddeti maksimum 3000 µmol m⁻² s⁻¹ (222 000 lux) olarak ölçülmüş ve 12 saat aydınlık/12 saat karanlık aydınlatma süresinde deneyler gerçekleştirilmiştir. pH’ın sabitlenmediği %1 ile %10 CO₂ derişimlerinin tümünde kararlı bir duruma ulaşılmış ve kültürlerden 0,4-0,5 g L⁻¹ gün⁻¹ aralığında biyokütle değerleri elde edilmiştir. Sonuçta 0,8-1 g L⁻¹ gün⁻¹ CO₂ fiksasyonu sağlandığı belirlenmiştir. Fakat, %12 CO₂ derişimlerinde yapılan deneylerde büyüme inhibe olmuştur. %1 ile %10 CO₂ derişimlerinden elde edilen biyokütleden ≥%40 oranlarında protein ve ≥%25 oranında lipid bileşimleri elde edilmiştir. Karbonhidratlar ve nişasta içerikleri sırasıyla yaklaşık %20 ve %5 olarak tüm koşullarda sabit bir değerde elde edilmiştir.

Doouskova vd. (2008), *C. vulgaris* P12 suşu için kontrol amaçlı %11 CO₂ (normal hava ve CO₂ karışımı) derişiminde ve %10-13 CO₂ derişimlerinde soğutulmuş baca gazı koşullarında, dış mekan ince tabakalı güneş fotobiyoreaktöründe çalışmışlardır. *C. vulgaris* P12 suşunun %11 CO₂ derişimindeki soğutulmuş baca gazında kontrol amaçlı % 11 CO₂ derişimine kıyasla maksimum büyüme verimi sağladığı ve 9,4 g L⁻¹ gün⁻¹ oranında CO₂ tutma hızına sahip olduğu belirlenmiştir. Literatürde incelenen çalışmalarda ortam havası (400 ppmv CO₂) ya da geleneksel baca gazı (%10-15 CO₂ içeren baca gazı) başta olmak üzere %0,04-25 aralığında CO₂ içeren gaz karışımlarının araştırıldığı görülmüştür. Ancak, yüksek oranda CO₂ içeren Oksi-Yanma şartlarının (%90 CO₂ içeren baca gazı) denendiği bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır.

Literatürde yer alan bazı çalışmalar doğrultusunda baca gazından CO₂ derişimini azaltmak amacıyla kullanılan Chlorella mikroalginin biyokütle üretiminin, sisteme verilen baca gazında bulunan NO_x ve SO_x gibi diğer bileşiklerden etkilemediği bulunmuştur (Cheah vd. 2015; Pires vd. 2012; Singh vd. 2014). Bu durum termik santrallerde yanma sonrası baca gazının ekstra ayrıştırılma işlemine gerek kalmadan mikroalg yetiştirilmesinde avantaj sağlayabilir. Ayrıca yanma sonrası baca gazından CO₂ ayırma yönelik maliyeti de ortadan kaldırabilir.

Mikroalgler konvansiyonel ürünlerle karşılaştırıldığında çok yüksek büyüme hızına ve biyokütle üretmek için yüksek fotosentetik aktivitelere sahiptir. Özellikle sahip olduğu yüksek lipid içeriğinden dolayı biyodizel üretiminde alternatif kaynaklar arasında gösterilmektedir (Ahmad vd. 2011; Chen vd. 2011, Mata vd. 2010). Mikroalglerin ürettikleri lipidlerin kimyasal yapıları bitkisel yağların kimyasal yapılarına benzemektedir. Bu benzerlik biyodizel yönünden alternatif bir kaynak olarak görülmektedir. Trigliseridler, mikroalg kaynaklı elde edilen lipidlerin kolay bir şekilde biyodizel üretilmesi açısından en avantajlı temel yapılarından bir tanesidir. Üretilen biyodizel, motorun yapısında önemli farklı uygulamalara gerek kalmadan normal dizel motorlarda belirli miktarlarda karıştırılarak kullanılabilir (Pulz 1994).

Günümüzde kullanılan dizel motorlar, NO_x’ların oluşma potansiyelini atırcı etki yaratan yüksek miktarda hava ile çalışmakta, düşük yanma oranına sahip oldukları için yanma odasına gelen yakıt-hava karışımı homojen olarak yanmamaktadır. Dizel yakıtların yanması sonucunda; CO₂, H₂O ve SO₂ gazları ortaya çıkmaktadır. Yanmanın iyi bir şekilde gerçekleşmediği ve tam yanmanın olmadığı durumlarda ise; CO, PM, hidrokarbonlar, NO_x gibi yan ürünler de oluşmaktadır (Akbulut 2018).

Sera gazı etkisini arttırarak, küresel ısınmayı olumsuz yönde en çok etkileyen ve biyodizelin yanması sonucunda da meydana gelen CO₂, yine biyodizelin elde edildiği mikroalgler tarafından tekrar kullanılma avantajına sahiptir. Bu önemli avantajın etkisiyle, atık oluşumunda ciddi oranda azalma olmakta ve üretilen biyodizelin sürdürülebilir enerji kaynağı yönünden çevre dostu ve alternatif bir enerji kaynağı olduğu ortaya çıkmaktadır (Öğüt ve Oğuz 2006). İklim değişikliği ve atmosferik CO₂ derişimindeki artış, günümüzde kullanılmakta olan enerji kaynaklarına kıyasla çevresel yönden çok daha az etkiye sahip alternatif kaynakların kullanımını zorunlu kılmaktadır. Mikroalg kaynaklı lipitlerden biyodizel üretimi, gelecekte, petrol kaynaklı yakıtlara sürdürülebilir bir alternatif oluşturduğu için enerji üretiminde önemli bir yer tutabileceği yönünde düşünceler önem kazanmaktadır. Bazı mikroalg türleri, biyokütle birimi başına önemli oranlarda lipit üretmektedir. Biyodizel üretimi için kullanılan yağ asidi ve mikroalglerdeki enerji rezervlerinin ana kaynağı triasilgliseroldür (TAG). Literatürde yer alan çalışmalara bakıldığında, besin sınırlamalarının farklı mikroalg türlerinin gelişim sürecinde TAG birikimine yol açabileceği gösterilmektedir (Miranda vd. 2015).

Mikroalglerin ürettiği yağ asitleri, yenilenebilir, biyolojik olarak parçalanabilir, toksik olmayan ve çevre dostu bir yakıt olan biyodizele dönüştürülebilmektedir. Biyodizel, dizel bir yakıtla göre, yandığında %78 daha az CO₂, %98 daha az SO₂ ve %50 daha az PM emisyonları oluşmaktadır (Brown ve Zeiler 1993). Mikroalg türlerinde lipit içeriği %1-70 arasında değişirken, belirli şartlar altında bazı türlerde bu değer %90'lara ulaşabilir (Amano vd. 2011). Şekil 2.22'de mikroalglerden biyoyakıt elde etme aşamalarına yönelik şemada aşama aşama biyoyakıt üretimine yer verilmektedir (Mata vd. 2010; Singh ve Cu 2010).



Şekil 2.22. Mikroalgal biyoyakıt üretimi için genel proses akışı (Mata vd. 2010; Singh ve Cu 2010)

Mikroalgler tarafından üretilen lipitin büyük kısmı, biyodizel üretimi için doğru lipit olan ve maliyet yönünden avantaj sağlayan triasilgliseroller formunda olduğu için, mikroalgler biyoyakıt alanında önemli bir odak noktası olmaktadır (Wen 2009). Mikroalglerden lipit eldesi, günümüzde kullanımı en yoğun olan palm yağının çıkarılmasından yaklaşık 3 kat daha hızlıdır (Chisti Y. 2007). Ayrıca; mikroalglerin biyodizel üretimine yönelik sağladıkları diğer avantajlar şunlardır:

- Mikroalgler, karasal fotosentetik bitkilere kıyasla çok daha hızlı bir şekilde büyüme oranlarına sahiptir.
- Alglerden elde edilen yağın birim alan başına veriminin 20 000 ve 80 000 L/dönüm/yıl olması, en verimli karasal kökenli biyoyakıt ürünü olan hurma yağına kıyasla 7 ile 31 kat daha fazla olduğunu göstermektedir.
- Mikroalglerden elde edilen yağ, karasal bitkilerden elde edilen yağ kadar kolay bir şekilde biyodizele dönüştürülebilme potansiyeline sahiptir.
- Çorak bir arazide yer alan 1 hektarlık bir alg çiftliği, bilinen diğer herhangi bir yağ mahsulü kaynağına kıyasla 10 ila 100 kat daha fazla petrol üretebilme potansiyelinde olmakta ve her mevsim tutarlı bir şekilde verim elde edilebilme imkanı önemli bir avantaj olarak görülmektedir.
- Normalde bir ürünün üretim döngüsü 3 aydan 3 yıla kadar bir zaman diliminde gerçekleşebilirken, mikroalgler 3 ila 5 gün içinde yağ üretmeye başlayabilmekte ve üretimin başlamasıyla birlikte günlük olarak yağ toplanabilmektedir.
- Mikroalglerin belki de en önemli avantajlarından biri, deniz suyu ve içilemez su kullanılmasıyla başka hiçbir şeyin yetişmediği çorak arazilerde yetiştirilebilme özelliklerini taşıyabilmeleri olmaktadır (Demirbaş ve Demirbaş 2010).
- Mikroalgal biyodizel üretiminin maliyetinin, biyorafineriyi temel alan üretim stratejisiyle kurularak, mikroalglerden maksimum verimde üretim elde edebilmek amacıyla genetik mühendisliği yoluyla iyileştirme yapılarak ve fotobiyoreaktör mühendisliğindeki gelişen teknolojik yöntemleri kullanılarak önemli ölçüde azaltılabilme durumu vardır (Chisti 2007).
- Mikroalglerin mısır veya soya fasulyesi gibi ayrı ekim ve hasat zamanları söz konusu olmadığı için her zaman ürün elde edilebilmektedir (Chisti 2007).

Mikroalglerin sağladığı bu avantajlar (Chisti 2007; Demirbaş ve Demirbaş 2010; Wen 2009), biyoyakıt üretimi için geçerliliği olan potansiyel bir hammadde olarak tanımlanmalarını sağlamaktadır. Mikroalg biyokütlesindeki lipitin, biyodizel üretimi açısından değerli bir bileşen olarak görülmesinin yanısıra, diğer biyoyakıt türlerinin elde edilmesinde de mikroalg kaynaklı protein ve karbonhidrat içeriklerinin kullanılabilme olanaklarının olması da büyük bir önem taşımaktadır. Biyoyakıt üretim prosesinin ekonomisi için algal biyokütlelerin tüm kimyasal kompozisyonunun belirlenmesi gerekmektedir (Templeton vd. 2012).

Yüksek fotosentetik organizma yapılarıyla mikroalgler, güneş enerjisini soğurarak lipitler gibi organik yapı formlarında biyokütle üretimini gerçekleştirebilmek için su ve havayı kullanabilmektedirler (Zhu vd. 2015b). Mikroalg gelişimi açısından

azot, karbondan sonra biyokütle üretimini arttırma yönünden en önemli ikinci besin kaynağı olarak görülmektedir. Biyokütlenin yaklaşık olarak %10'undan fazlası azottan oluşabilmektedir. Mikroalglerde lipit birikimi genellikle mikroalgler stres koşulları altında (örneğin azot stresi, besin eksikliği, pH varyasyonları, vb.) yetiştirildiğinde meydana gelir. Bu stres koşulları arasında azot stresi, mikroalglerde lipit birikimini arttırmak için en etkili ve yaygın olarak kullanılan bir stratejidir. Bunun yanı sıra; azot eksikliği ile oluşan stres koşullarında, klorofil miktarında gerçekleşen azalmaya paralel olarak karotenoidler, polisakaritler ve bazı lipitler gibi organik karbon içeren bileşiklerin birikmesinde artış görülebilmektedir (Edberg 2010; Richmond 2004).

Azotun mikroalgler tarafından kullanılan mevcut inorganik formları (NH_4^+ , NO_2^- ve NO_3^-) mikroalg kültür ortamında en çok kullanılan formlar olarak karşımıza çıkmaktadır. NO_3^- ortamın pH değerinde çok az bir değişim yaratması sebebiyle NH_4^+ tuzlarına kıyasla mikroalg yetiştiriciliğinde daha sık kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra; 25 μM 'den fazla miktardaki NH_4^+ derişiminin mikroalgler üzerinde toksik etki yaratması söz konusudur. Bu yüzden NO_3^- mikroalg yetiştirilmesinde azot kaynağı olarak daha yaygın kullanılmaktadır. Bununla birlikte, kültür ortamında oluşturulan azot sınırlaması/azot açlığı/azot azlığı (azot stresi) nedeniyle biyokütle üretiminde azalma olurken, lipit üretiminde artış gerçekleşmektedir (Yaakob vd. 2021).

Azot ve fosfor gibi besinlerin eksikliği ile oluşan stres nedeniyle, mikroalglerin lipit üretiminde artış söz konusu olabilmektedir (Illman vd. 2000; Rodolfi vd. 2009). Stres ortamında bu artışın temel sebebi; çoğunlukla mikroalg hücrelerinde depolama molekülleri olarak görev yapan TAG birikiminin gerçekleşmesidir. TAG birikimine paralel olarak, yağ asidi doygunluğunun derecesi, doymuş ve tekli doymamış yağ asitleri bileşimine doğru eğilim göstermeye başlamaktadır. Mikroalglerden biyodizel üretimine yönelik çalışıldığında, nihai durumda oluşan bu bileşim biyodizel gereksinimlerine daha yakın hale gelmektedir (Griffiths vd. 2011).

Kültür ortamında oluşturulan azot stresi, tilakoid membran içeriğinde bir azalmayı, yağ oluşumunu sağlayan triaçilgliserol açıl hidrolaz enziminin aktivasyonunu ve fosfolipit hidrolizinin (gliserol ve yağ asitlerine dönüşümü) uyarılmasını teşvik etmektedir. Diğer taraftan, nitrojen derişimlerinin sınırlandırılması, mikroalglerde açıl-CoA'yı trigliseride dönüştüren diaçilgliserol açıltransferazın aktivasyonunu destekler. Bu, nitrojen bakımından zengin bileşiklerin hücre içi depolarının kullanılmasının, triasilgliserollerin biyosentezi için enerji ve karbon sağladığını göstermektedir ve lipit üretimini arttırıcı etki yaratmaktadır (Miranda vd. 2015).

Siaut vd. (2011) yaptıkları çalışma kapsamında; mikroalglerin büyüme aşamalarında, nişastanın önce enerji depolamak amaçlı üretildiği, daha sonra ise uzun süreli çevresel stres (azot eksikliği, vb.) durumunda lipitin uzun vadeli bir depolama mekanizması olarak üretildiği sonucuna varmışlardır. Azot stresine bağlı olarak lipit üretimindeki artışa paralel olarak biyokütle üretiminde azalış görülmektedir. Çünkü, azot stresinin mikroalg büyümesi üzerinde yarattığı besin açlığı büyümenin önünde engel teşkil etmektedir.

C. vulgaris mikroalg olduğu kadar yüksek oranda klorofil pigmenti içermektedir. Her bir klorofil molekülünün yapısında 4 azot atomu içeren, azot yönünden zengin bir bileşik bulunmaktadır. Kültür ortamında azot tükendiğinde ya da alg yetiştirme öncesinde

besiyerindeki azot kaynağı azaltıldığında, alg kültüründe azot stresi meydana gelir. Alg hücreleri, hücre bölünmelerini sağlayabilmeleri için azota ihtiyaç duyarlar. Azot stresi yaşanan ortamda büyüebilmek için, mikroalgler yapılarında bulunan azot havuzunu (her bir klorofil molekülü 4 mol N içerir) tüketmeye başlarlar. Yapılarındaki azotu kullandıkça, fotosentez sonucunda protein yerine lipid üretimi gerçekleşir. Bu strese uyum gösterme özellikleri, lipid üretiminin temel işlevini oluşturmaktadır (Li vd. 2008). *C. vulgaris* mikroalginin azot stresi altında lipid üretimindeki artışının nedeni, hücresel karbonun protein sentezinden %20 ile %40 oranlarında lipid sentezine uyarılmasının gerçekleşmesidir (Chavez-Fuentes vd. 2018). Hu vd. (2008), çeşitli lipid içeriği verilerini topladıkları bir literatür araştırmasında normal büyüme ve stres koşulları altında mikroalg ve siyanobakteri türlerinin, stres koşulları altında yetiştirilen yeşil mikroalglerin, diatomların ve diğer bazı mikroalg türlerinin lipid içeriğinin normal koşullardan %10-20 daha yüksek olduğunu göstermektedir.

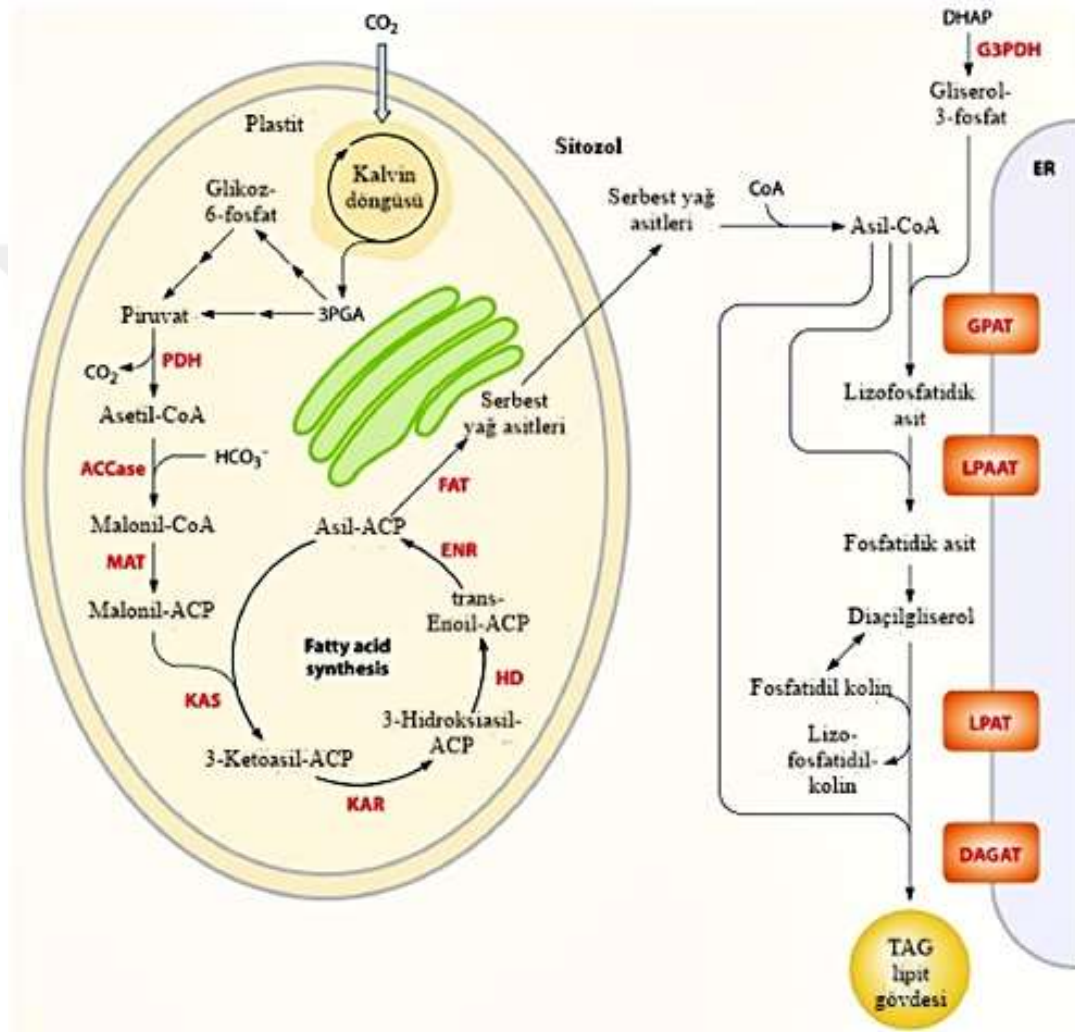
Fotosentez esnasında gerçekleşen olaylar zincirinde nötr yapıdaki lipidler mikroalgal hücrelerde TAG yapısına dönüştürülerek biriktirilirler (Vitova vd. 2015). Transesterifikasyon yoluyla, TAG'ler ayrıca biyodizel için oldukça önemli bileşimleri içeren çeşitli lipid asidi metil esterlerine aktarılabilmektedirler (Zhu vd. 2016). Mikroalgler fotosentez işlemi için inorganik karbon kullanırlar ve glikoz, nişasta, vb. şeker bileşikler üretirler. Mikroalgal lipid üretimi ise, inorganik karbon kaynaklarının ya da doğrudan organik karbon kaynaklarının (glikoz ve asetat gibi) kullanımı ile gerçekleşir. Mikroalglerin yapısında yer alan lipidler, 12-22 karbon zinciriyle esterlenmiş, doymuş veya doymamış, temelde polar lipidler ve nötr lipidler olarak sınıflandırılan gliserol, şeker veya baz bileşikleridir. Polar lipidler, fosfolipitleri, galaktolipitleri, vb. lipidleri içermektedirler. Nötr lipidler, yağ asidi zincirinde bulunan esterifikasyonların sayısı ile birlikte monoasilgliserol, diaçilgliserol ve triasilgliserol olarak üçe ayrılmaktadır. Yağ asitleri, toplam lipidlerin %25-%60'ı arasında en büyük lipid fraksiyonunu oluşturmaktadırlar. Nötr lipidler arasında triasilgliseroller biyodizel üretimi için önem arz etmektedir (Miranda vd. 2015). Fotosentetik organizmaların çoğunluğunda olduğu gibi, mikroalglerden yağ asitlerinin biyosentezi üç ana aşamada gerçekleşmektedir:

- 1) Sitozolde asetil koenzim A (Asetil CoA) sentezi;
- 2) 16-18 karbonlu doymuş yağ asitleri sentezi
- 3) Asil gliserol (Trigliserid) sentezi.

Lipitler, hücre döngüsü boyunca üretilmekte ve döngünün başlangıcındaki üretim, temel metabolizma için yapısal lipidler oluşturmaya ve ardından triasilgliserol oluşumuna yönlendirilmektedir. TAG, mikroalglerde depolanan ana enerji biçimidir ve bu yağ asidi sınıfının bileşimi, sadece türlerin genetiği ile değil, aynı zamanda mikroalglerin gönderildiği çevresel koşullar ve hücresel stres ile de ilişkili görünmektedir (Miranda vd. 2015).

Mikroalglerden biyodizel üretiminin temelinde, biyodizele dönüşümü daha az maliyetli olan TAG'ların üretilmesi büyük önem taşımaktadır. Lipid asitleri ve TAG'lar, fotosentezin Calvin döngüsünde gerçekleşen karbon fiksasyonu sonucunda üretilmektedir. Üretilcek lipid asidinin sentezi, asetil CoA (asetil koenzim-A)'nın

karboksilasyon reaksiyonuyla başlamaktadır. Malonil CoA (malonil koenzim-A)'nın üretilmesi için bir molekül ATP hidrolize olmakta ve Malonil CoA taşıyıcı bir açıl proteini ile birleştirilmekte ve bu reaksiyon açıl protein zinciri uzayana kadar devam etmektedir. Kloroplasttaki uygun kısımdan uzaklaşarak, endoplazmik retikulumla yönelmektedir ve burada yağ asitlerinin ya elde edilmek istenilen lipid moleküllerine dönüşümü ya da diğer lipitlere dönüştürülmek amacıyla endoplazmik retikulumda depolanması sağlanmaktadır Üretilen TAG'lar hücre tarafından biriktirilmekte ve ihtiyaç olduğunda kullanılabilmektedirler (Şekil 2.23) (Schuhmann vd. 2014).



Şekil 2.23. Lipit biyosentezi şeması (Schuhmann vd. 2014)

Mikroalgler üstel büyüme aşamasında yüksek miktarda protein üretme eğilimine sahipken, sabit fazda mikroalg hücreleri proteinler yerine yüksek miktarda lipid ve karbonhidrat biriktirmektedirler (Rashid vd. 2014). Yağ asidi molekülleri kloroplast tarafından üretilirken, TAG molekülleri endoplazmik retikulumda ve kloroplast tilakoidlerinde üretilmektedir. Mikroalg gelişimi ve TAG üretimi arasında bir denge olmaktadır. Optimum koşullar altında, mikroalg hücreleri daha fazla oranda biyokütle üretmeye yatkındır ve biyokütle, hücre içi zarın bileşenleri olarak yağ asitlerini ya da polar lipitleri içermektedir. Fakat; stres koşulları altında mikroalg hücreleri, genellikle TAG formunda olan nötr lipitleri depolamak amacıyla metabolik yollarını

değiştirmektedirler. Azot stresi koşullarında protein üretiminde ne kadar azalma olursa, buna paralel olarak lipid üretiminde de o kadar artış gerçekleşir. Bu bilgiler doğrultusunda, çalışma kapsamında azot stresinin *C. vulgaris* mikroalginin büyümesine ve lipid üretimine etkisi ve değişimleri de incelenmiştir.



3. MATERYAL VE METOT

3.1. Mikroalg Kültürü ve Yetiştirme Koşulları

Projede kullanılan *C. vulgaris* alg kültürleri, Çukurova Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümünden temin edilmiştir. Çukurova Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü alg kültürünü, Texas Üniversitesi Alg Kültür Koleksiyonundan (UTEX) satın almaktadır.

C. vulgaris kültürü AB'nin önerdiği alg üretim yöntemi esas alınarak üretilmiştir (OECD 2002). Temin edildiği halde algler önce hiçbir işleme maruz kalmadan 1 gece boyunca geldiği kabın içerisinde alg üretiminde kullanılacak ışık panelleri önünde ve altında (ışık akısı: toplam 7500 lux, ışık rengi: 4300 K) ve 28 ± 1 °C sıcaklıkta bekletilerek, inkübe edilmeye hazır hale getirilmiştir. Daha sonra başlangıç popülasyonu yaklaşık 10^6 alg/mL içeren stok kültürden alınan algler 500 mL'lik erlenmayerler içerisinde son hacimleri 100 mL olacak şekilde ayarlanıp sürekli ışık altında (ışık akısı: toplam 7500 lux, ışık rengi: 4300 K) ve 28 ± 1 °C sıcaklıkta, orbital çalkalayıcıda sürekli çalkalama (100 rpm) yöntemi ile inkübe edilmiştir. Ortalama 4 gün sonunda istenilen popülasyon yoğunluğuna ulaşıldıktan sonra deneylere başlanmıştır.

3.1.1. Besiyeri Özellikleri

Mikroalg kültürünü yetiştirmek için içeriği Çizelge 3.1'de verilen besiyeri kullanılmıştır (Bogless 2014). Bu besiyeri, Bold's Basal Medium (BBM) olarak adlandırılmaktadır ve ilk olarak 1963 yılında Bischoff ve Bold tarafından oluşturulmuştur. Besiyeri tatlı su algleri için yaygın olarak kullanılmaktadır. Besiyeri, *C. vulgaris* türü için UTEX tarafından da kullanılmaktadır (Bogless 2014). BBM içeriği hassas terazi (Pioneer Ohaus PA214C; Okunabilirlik: 0,0001g) ile tartım yapılarak hazırlanmıştır.

Çizelge 3.1. Alg kültürü için hazırlanan Bolds Basal Besiyeri (1 L) içeriği (Bogless 2014)

Stok 1: (20 mL)	Stok 2: (2 mL)	Stok 3: (2 mL)	Stok 4: (2 mL)	Stok 5: (2 mL)
25 g/L NaNO ₃	50 g/L EDTA anhidro	4,98 g/L FeSO ₄ .7H ₂ O	11,42 g/L H ₃ BO ₃	8,82 g/L ZnSO ₄ .H ₂ O
2,5 g/L CaCl ₂ .2H ₂ O	31 g/L KOH	1,0 mL H ₂ SO ₄		1,44 g/L MnCl ₂ .4H ₂ O
7,5 g/L MgSO ₄ .7H ₂ O				0,71 g/L MoO ₃
7,5 g/L K ₂ HPO ₄				1,57 g/L CuSO ₄ .5H ₂ O
17,5 g/L KH ₂ PO ₄				0,49 g/L Co(NO ₃) ₂ .6H ₂ O
2,5 g/L NaCl				

** 1 nolu stok çözeltisinden 20 mL; 2, 3, 4 ve 5 nolu stok çözeltilerinin her birinden 2 mL alınarak toplam hacim 1 L'ye distile su ile tamamlanır.

Mikroalglerin gelişiminde temel besin maddeleri karbon, azot ve fosfor içeren maddelerdir. Bunların yanısıra mikroalgler; silisyum (Si), kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), potasyum (K), demir (Fe), mangan (Mn), S, çinko (Zn), bakır (Cu), kobalt (Co), vb. içeren mikro besin maddelerine de ihtiyaç duymaktadırlar (Elcik ve Çakmakcı 2017). Mikroalg biyokütlesinin kuru ağırlık miktarının neredeyse yarısı karbondan oluşmaktadır.

Besiyeri içerisinde kullanılan nutrientler “makro (litre başına miligram düzeyinde)” ve “mikro (litre başına nanogram veya mikrogram düzeyinde)” olarak ayrılırlar. Hücreler tarafından büyüme için kullanılan karbon, hidrojen ve oksijen içeren organik maddeler makro nutrientler olarak isimlendirilir. Mikro nutrientler ise; azot, fosfor, S, K, Na, Ca, Mg, Fe, Mn, Co, Cu ve Zn gibi yapılardan oluşmaktadır (Elcik ve Çakmakcı 2017; Miranda vd. 2015). Bunlar arasında azot ve fosfor mikroalgler için hayati önem taşımaktadır. Çünkü, tüm proteinlerin yapısında ve nükleik asit ile benzeri diğer maddelerin yapılarında azot yer almaktadır. Bu nedenle azot, değerli bir hücresel yapı elemanıdır. Hücre içerisinde; nitrifikasyon esnasında elektron verici, denitrifikasyon esnasında ise elektron alıcı olarak kullanılmaktadır. Fosfor ise, nükleik asitler ve ATP, enzimatik fosforilasyon ve fosfolipidlerin bileşimi gibi hayati süreçlerde yer alan molekülleri içermektedir (Miranda 2015).

BBM besiyeri hazırlamak için 1 nolu stok çözeltisinden 10 mL; 2, 3, 4 ve 5 nolu stok çözeltilerinin her birinden 1 mL alınır ve toplam hacim 1 L'ye distile su ile tamamlanır (Bogless 2014). Besiyeri bu oranlarda hazırlandığında alg büyümesinin yavaş olduğu görülmüştür. Bu nedenle, 1 L besiyeri hazırlamak için stok çözeltilerden alınan miktarlar 2 katına çıkarılmıştır. 1 nolu stok çözeltisinden 20 ml, 2, 3, 4 ve 5 nolu stok çözeltilerinin her birinden 2 mL alınmış ve toplam hacim 1 L'ye distile su ile tamamlanarak besiyeri hazırlanmıştır (Şekil 3.1). İyi netice alındığı görülmüş ve bu oranlarla alg üretimine devam edilmiştir.



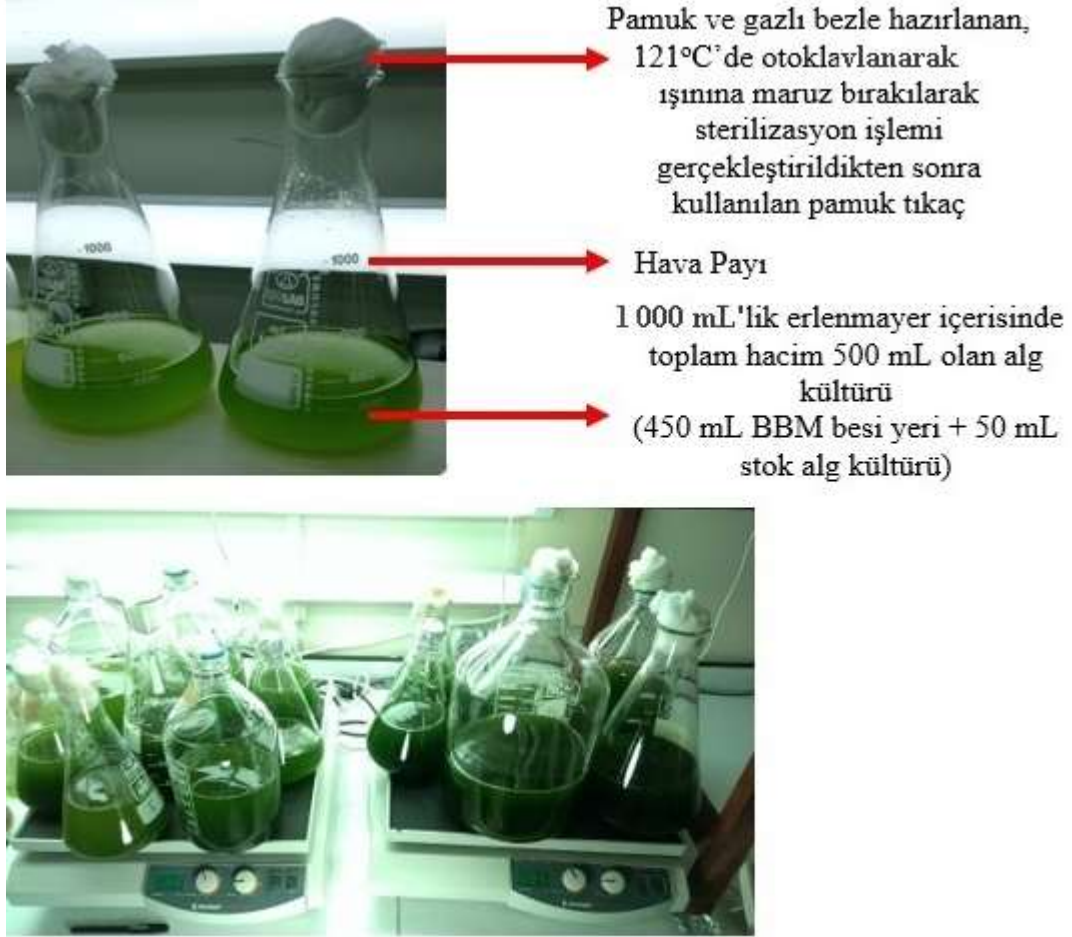
Şekil 3.1. Stok çözeltilerinin ve besiyerinin hazırlanması

Hazırlanan sıvı besiyeri, 1 L'lik şişelerin yarısı kadar (yaklaşık 500 mL) doldurularak, ağızları kapakla kapatılmadan sadece alüminyum folyo ile kapatılıp, 1 atmosfer basınçta, 121 °C'de sterilizasyon işlemi için otoklava (Hirayama Hv50-L) konur. Otoklavlama sonrasında 1 gün boyunca besiyeri soğumaya bırakılıp, sterilizasyonu tamamlanan besiyeri kullanım için karanlık ortamda oda sıcaklığında

muhafaza edilmek üzere, kapalı bir dolap içersine ağzına otoklavlanmış kapak kapatılarak kullanıma hazır halde bekletilir.

3.1.2. *C. vulgaris* Mikroalg Kültürünün Çoğaltılması

C. vulgaris alg kültürleri 1 000 mL'lik erlenmayerlere son hacimleri, büyümelerinde en önemli parametre olan hava almalarını sağlamak amacıyla, 500 mL olacak şekilde (50 mL alg kültürü ve 450 mL besiyeri) aktarılıp, 24 saat aydınlık (aydınlatma şiddeti: yaklaşık 7 500 lux, ışık rengi: 4 300 K) ortamda erlenmayerlerin ağzı daha önceden otoklavda sterilizasyonu yapılan pamuk tıkaçlarla kapatılarak, 27 ± 1 °C sıcaklıkta orbital çalkalayıcı üzerinde sürekli olarak 80 rpm'de karıştırılarak inkübe edilmiştir (Şekil 3.2). Gün içerisinde orbital çalkalayıcı haricinde 2-3 defa elle çalkalama yapılması alg üretimini hızlandırmada etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca, gün içinde 2-3 defa pamuk tıkaçlar açılıp kapatılarak alglerin hava alması sağlanmıştır. Ortalama 4 gün sonunda istenilen popülasyon yoğunluğuna (yaklaşık 10^4 hücre/mL) ulaşıldıktan sonra fotobiyoreaktöre aktarılmış ve CO₂ gazı tutma çalışmaları başlatılmıştır.

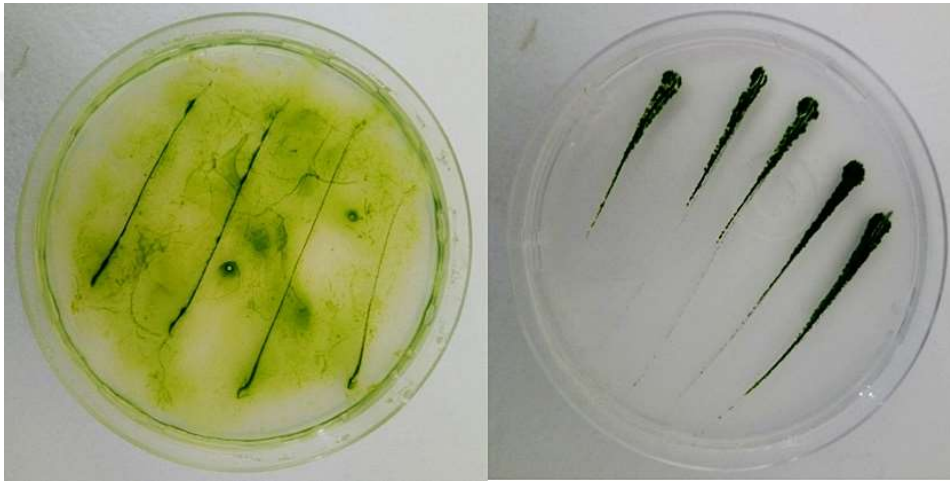


Şekil 3.2. *C. vulgaris* mikroalg kültürünün yetiştirilmesi ve besiyeri kullanılarak çoğaltılması

Proje süresi içerisinde pandemi döneminde eğitime ara verilmesi sebebiyle *C. vulgaris* kültürünü belli aralıklarla beslemeden, karıştırmadan ve hasat etmeden muhafaza

edebilmek amacıyla agar üzerine besleme yapılarak, alg kültürünün kullanılmadığı dönemde uzun süre muhafaza edilmesi sağlanmıştır. Mikroalg kültürünün agar üzerinde çoğaltılması ve muhafaza edilmesi aşağıda anlatıldığı şekilde yapılır:

Toz halinde olan Sabouraud 2% Dextrose Agar (SDA) 9 g/L derişimde olacak şekilde distile su içinde ısıtılıp çözündürülür. Otoklavda 121 °C’de 20 dakika sterilize edilir. Daha önce steril edilen petri kaplarına yaklaşık 20-25 mL olacak şekilde dökülür ve yatık bir şekilde soğumaya bırakılan besiyerleri üzerine alg ekimleri yapılır. Ortalama 2 haftalık inkübasyon sonunda petri kaplarında büyüme takip edilir. Büyüme gözlenen petri kaplarındaki yoğunlaşmadan kaynaklı damlacıklar, sterilizasyonu korumak amacıyla petri kapağının birkaç kez sallanıp akıtılması ile uzaklaştırılır (Şekil 3.3). Daha sonra petri kapları parafilm yardımıyla hava almayacak şekilde sarılarak kapak kısmı altta kalacak şekilde kullanım gününe kadar +4 °C’de buzdolabında muhafaza edilir.



Şekil 3.3. Agar üzerinde yetiştirilen *C. vulgaris* mikroalgleri

Yaklaşık üç ay boyunca +4 °C’de buzdolabında muhafaza edilen alg kültürleri oda sıcaklığında yarım saat bekletildikten sonra besiyerine inkübe edilmiştir. İnkübasyonun 10. gününde Şekil 3.4’te görüldüğü gibi büyüme gerçekleşmiştir. Agara beslenen ve buzdolabında muhafaza edilmeye devam eden alg kültürlerinin 1 yıl sonra buzdolabından çıkarılıp, besiyerine ekleme yapılması sonucunda tekrar büyüme olduğu görülmüştür.

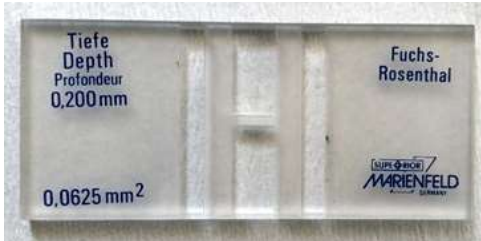


Şekil 3.4. Agar üzerinde muhafaza edilen *C. vulgaris* mikroalginin aktifleştirilmesi

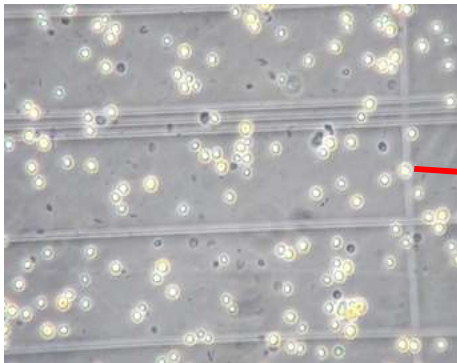
Alg üretiminin sürekliliği, 2 günde bir spektrofotometrede (HACH Lange DR 6000 UV-Vis Spectrophotometer) yapılan optik yoğunluk (OD) okumalarına göre 684 nm (Rodrigues vd. 2011) ve 750 nm (Griffiths vd. 2011) dalga boyunda elde edilen veriler ile takip edilmiş, ölüm fazına geçişin başladığı OD değeri tespit edildiğinde erlenmayer içerisindeki hava payı azaltılmayacak şekilde besiyeri eklenip, tazeleme yapılarak büyüme fazında alg yetiştirmeye devam edilmiştir. Belli bir noktadan sonra besiyeri eklendikçe erlenmayer içerisinde hacim daraldığı için önce 2 L'lik (max. 1 L alg kültürü) daha sonra 4 L'lik şişelere (max. 2 L alg kültürü) alg kültürleri alınarak alg üretiminin sürdürülebilirliği sağlanmıştır. Yoğun alg üretimi olduğunda hacmi daha fazla büyütmemek adına fazla alg kültürü dökülerek, dökülen miktar kadar besiyeri eklenmiş ve alglerin ölüm fazından tekrar büyüme fazına geçişi sağlanıp, alg üretimi sürekliliği korunarak devam ettirilmiştir.

3.1.3. Hücre Sayımı-Optik Yoğunluk Korelasyonu

Proje kapsamındaki tüm deneyler öncesinde, her bir deney için ayrı ayrı hücre sayımı gerçekleştirmek amacıyla, tek bir alg kaynağı belirlenip, gelişim evresinde iken 5 gün ard arda alınan mikroalg kültürlerine ait OD değerleri ölçülmüş ve hücre sayımı yapılmıştır. 0,1 mm derinliğinde, her bir karesi 1 mm kenar uzunluğuna sahip Fuchs Rosenthal Lamı (Şekil 3.5) kullanılarak mikroalg kültürünün 1 mL'deki canlı hücre sayısı belirlenip, toplam hücre yoğunluğu hesaplanmıştır. Hücre sayımı öncesi 1 mL alg numunesi, 9 mL saf su ile karıştırılarak 1/10 oranında seyreltme yapılmıştır. Yapılan hücre sayımı ve ölçülen OD değerleri ile optik yoğunluk-hücre sayımı korelasyon eğrisi oluşturulmuştur (Şekil 3.7). Korelasyon eğrisinin oluşturulması ile deney setlerinde her gün hücre sayımına gerek kalmadan hücre yoğunluğu belirlenmiş ve analizler gerçekleştirilmiştir. Sayım yapılan *C. vulgaris* hücrelerine ait görüntü Şekil 3.6'da verilmiştir.



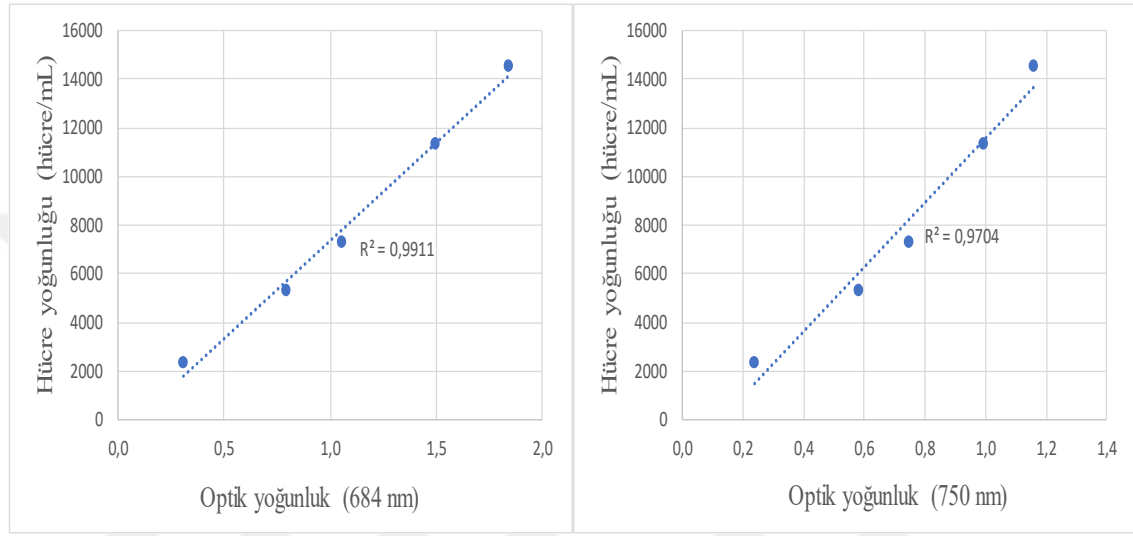
Şekil 3.5. Hücre sayımında kullanılan sayım kamerası



Sayımı
yapılan
canlı
hücre

Şekil 3.6. *C. vulgaris* Mikroalgi Görüntüsü

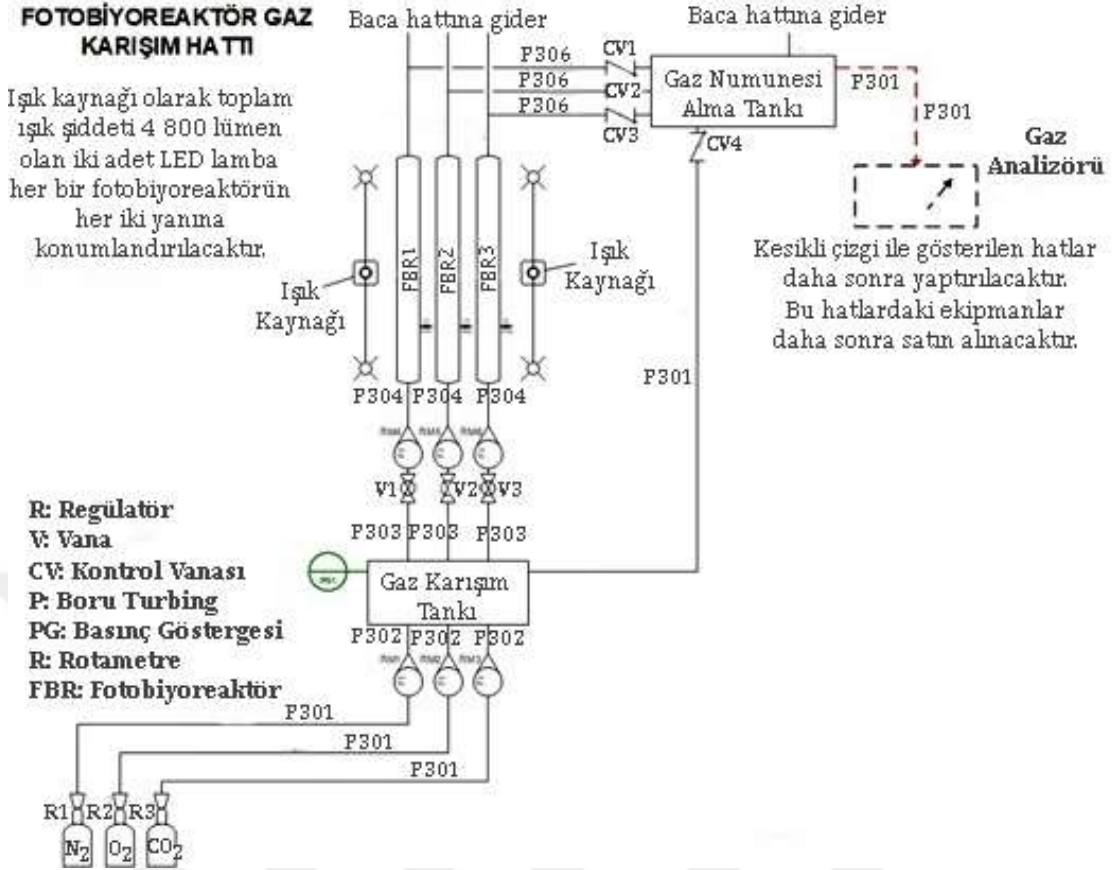
Şekil 3.7’de verilen hücre sayımı-optik yoğunluk korelasyon eğrileri incelendiğinde artan OD ölçümüne paralel olarak hücre yoğunluğunda da artış olduğu görülmektedir. Fakat, 750 nm’de daha düşük R^2 değerinin olduğu görülmektedir. Tüm deney setleri kapsamında 684 nm ve 750 nm dalga boyunda ölçülen OD değerlerine bakıldığında, 750 nm dalga boyunda ölçülen OD değerlerinin daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bunun temel sebebinin, mikroalglerin 400-700 nm dalga boyunda daha yüksek verimde fotosentez yapmaları ve bunun sonucunda 684 nm’de 750 nm’ye kıyasla daha fazla ışığın soğurulması ile iyi bir hücre büyümesine bağlı olarak hücre yoğunluğunun arttığı düşünülmektedir.



Şekil 3.7. Hücre sayımı-optik yoğunluk (684 nm ve 750 nm) korelasyonu

3.2. Laboratuvar Ölçekli Fotobiyoreaktör (Lab-FBR) Sistemi

Proje kapsamında yapılan deneyler laboratuvar ölçekli fotobiyoreaktör (Lab-FBR) sisteminde gerçekleştirilmiştir. Lab-FBR sistemi, iç hacmi 2 L olan 3 adet fotobiyoreaktörden oluşmaktadır. 2 L’lik hacmin 1,5 L’sinde mikroalg kültürünün olacağı sulu çözelti bulunmaktadır (çalışma hacmi 1,5 L). Bu tasarım için, 5 cm iç çapa sahip 101,9 cm yüksekliğinde pleksiglastan yapılmış fotobiyoreaktör kullanılmıştır. Lab-FBR sisteminin Borulama ve Enstrümantasyon Şeması (P&ID) Şekil 3.8’de, genel görünümü ise Şekil 3.9’da verilmiştir.

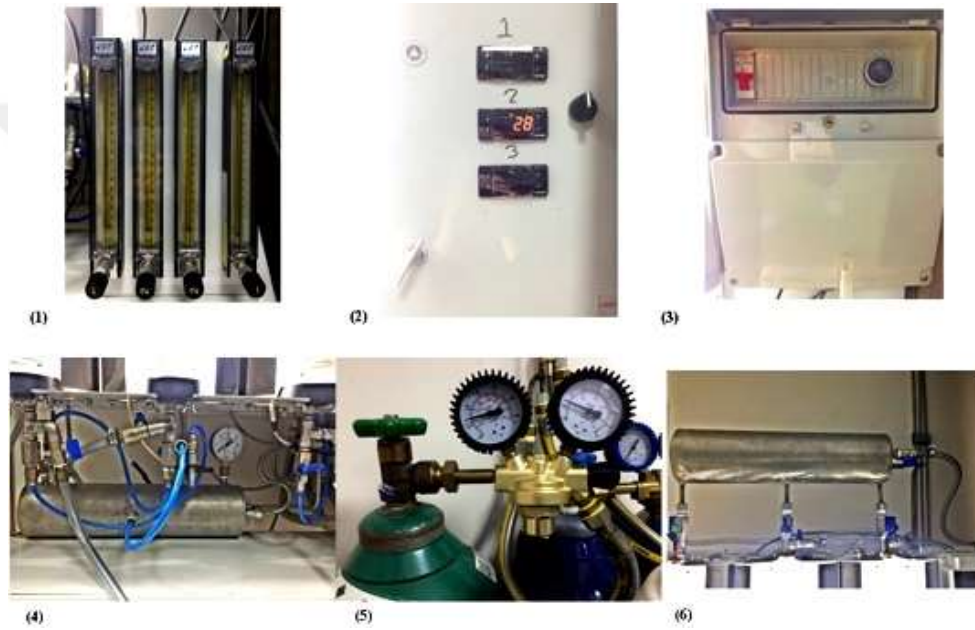


Şekil 3.8. Lab-FBR sisteminin detaylı gösterimi



Şekil 3.9. Lab-FBR sisteminin genel görünümü

Lab-FBR sisteminde gaz karışımını sağlamak için kullanılan 4 adet rotametre, sıcaklık kontrol sistemi ve ışık akısı ayarlama ünitesi bulunmaktadır. Sıcaklık kontrol sistemi, sıcaklık kontrol paneli, ısı kabloları ve sıcaklık ölçerlerden oluşmaktadır. Sıcaklık ölçer kolonun üst tarafına monte edilmiştir. Sıcaklık ölçer kolonun üstünden sarkıtılarak deney esnasında her zaman mikroalg kültürünün olduğu besiyeri içinde olacak şekilde ayarlanmıştır. Kolon içindeki sulu çözeltiyi istenilen sıcaklıkta tutmak için kolonun dışına ısı kabloları sarılmıştır. Önce kolonun, ardından kolon içindeki sulu çözeltinin ısıtılması, mikroalglerin doğrudan ısı kaynağına maruz kalmaması için yapılmıştır. Sıcaklık ölçer, sulu çözelti sıcaklığını ölçmektedir. Sulu çözelti istenilen sıcaklığa gelene kadar ısı kabloları sistemi ısıtmaktadır. İstenilen sıcaklığa gelindiğinde ısı kablolarına verilen güç kesilmektedir. Bu işlemi yapan sıcaklık kontrol devreleri de kontrol panelinin içinde bulunmaktadır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Lab-FBR sistemi parçaları (1. Rotametreler, 2. Sıcaklık kontrol sistemi, 3. Işık akısı ayar ünitesi, 4. Gaz girişi ve çözelti deşarj hattı, 5. Sisteme gaz verilen tüp vanaları, 6. Gaz tahliye hattı)

Lab-FBR sisteminde kullanılan ekipmanlara ait görseller Şekil 3.10'de yer almaktadır. Lab-FBR sisteminin yanında CO₂, O₂, N₂ ve 400 ppm_v CO₂ içeren kuru hava tüpleri sisteme bağlı bir şekilde yer almaktadır. Sistemin sağ alt kısmında bulunan rotametreler aracılığıyla sisteme verilen gaz karışımı ve gaz debisi ayarlanabilmektedir. Sistemin sağ üst kısmında ışık akısını istenilen yoğunlukta ayarlamaya yarayan bölüm bulunmaktadır. Her bir fotobiyoreaktörün her iki yanında toplam ışık akısı 5 800 lm olan iki adet LED lamba kullanılmıştır. Lab-FBR sistemi otomatik aydınlatma sistemine sahiptir. Işık akısı istenilen değerde ayarlanabilmektedir. Lab-FBR sistemindeki mikroalg kültürü günün farklı zaman dilimlerinde aydınlık ve karanlık evrelerde olmaktadır. Bunu sağlamak için sisteme aydınlatmayı otomatik açıp kapayabilen zaman ayarlı mekanik bir ekipman temin edilmiştir. Doğrudan prize takılabilen bu ekipman ile sistemin kaç saat ışığa maruz kalacağı ve kaç saat karanlıkta kalacağı otomatik olarak ayarlanabilmektedir. Aydınlık/karanlık döngülerinde aydınlatma süreleri bu ekipman mekanik zaman saati ile ayarlanarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan deneylerde farklı

aydınlatma süreleri denenmektedir. Bazı durumlarda gündüz vaktinde mikroalglerin karanlık bir ortamda olmaları gerekmektedir. Bu karanlık ortamı sağlamak için Lab-FBR sistemi etrafına siyah, kalın kumaştan bir perde temin edilmiştir. Perde kapandığında sistem ortam ışığından tamamen arındırılmış olmaktadır.

Alg kültürü, büyüme için ihtiyaç duyduğu karbonu fotobiyoreaktöre verilen CO₂ gazından temin etmektedir. CO₂ gazının algler tarafından kullanılabilmesi için öncelikle CO₂ gazının suda çözünmesi gerekmektedir. CO₂ gazının gaz fazından sıvı faza transferinde gaz debisi, gazın fotobiyoreaktörde geçirdiği süre, gaz karışımındaki CO₂ derişimi ve sulu çözelti sıcaklığı gibi parametrelerin oldukça önemi vardır. Transferi mümkün kılabilmek adına gazın fotobiyoreaktörde geçirdiği süreyi uzun tutmak için gaz debisi 100 mL/dak olarak belirlenmiştir. Daha yüksek bir gaz debisi, gaz moleküllerinin fotobiyoreaktördeki alıkonma sürelerini kısaltacak, bu da gazdan sıvıya transferi azaltacaktır. Gazdan sıvıya transferi etkileyen bir diğer parametre de sıcaklıktır. *C. vulgaris* mikroalg kültürü ile ilgili laboratuvarında edinilen tecrübe bu alg kültürünün en iyi büyüme ortalama 28 °C sıcaklıkta sağladığını göstermektedir. Her ne kadar daha soğuk çözeltilerde gazdan sıvıya geçiş daha kolay olsa da alglerin büyüme şartlarının optimum düzeyde tutulması için fotobiyoreaktör içindeki sulu çözelti sıcaklığı kablolu ısıtıcı vasıtasıyla sürekli 28 °C sıcaklıkta tutulmuştur.

Çalışma hacmi için belirlenen mikroalg aşılama derişimi minimum 0,16 g (kuru ağırlık)/L'dir. Mikroalglerin CO₂ gazı tutma verimlerini belirlemek amacıyla fotobiyoreaktörlere üç farklı derişimde CO₂ gaz karışımı (400 ppm CO₂, %15 CO₂ gazı içeren CO₂+N₂+O₂ gaz karışımı ve %90 CO₂ gazı içeren CO₂+O₂ gaz karışımı) verilmiştir. 400 ppm CO₂ içeren gaz karışımı havayı temsil etmektedir. Bu gaz karışımı ile yapılacak olan deneyler (havadan CO₂ tutma/air capture) referans deneyler olarak değerlendirilecektir. Hacimce %15 CO₂ gazı içeren CO₂+N₂+O₂ gaz karışımı kömürle çalışan termik santrallerinden kaynaklanan baca gazı kompozisyonunu temsil etmektedir, karışımındaki O₂ gazı yüzdesi hacimce %3 olacaktır. Hacimce %90 CO₂ gazı içeren CO₂+O₂ gaz karışımı Oksi-Yanma teknolojisi kullanan ve kömürle çalışan termik santrallerinden kaynaklanan baca gazı kompozisyonunu temsil etmektedir. Gaz karışımı fotobiyoreaktörlerin alt kısmından verilmektedir. Her bir fotobiyoreaktöre verilecek gazı debisi 100 mL/dk olarak belirlenmiştir. Bu debi miktarı fotobiyoreaktör içinde hem karışımı sağlayacak hem de mikroalglerin fotobiyoreaktör tabanına çökmesini engelleyecektir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilecek deneyler, istatistiki olarak değerlendirilebilmesi adına, üç paralel olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu amaçla; proje kapsamındaki deneylere 3 reaktör kullanarak başlangıç yapılmıştır. Fakat sisteme verilen toplam 300 mL/dk'lık debinin 3 reaktöre de eşit dağılmadığı gözlemlenmiştir. Deney başlangıcından itibaren gaz akışı her saat başı kontrol edilmiş fakat sadece ortadaki fotobiyoreaktöre gaz girdisinin olduğu, diğer iki tarafta yer alan fotobioreaktörlerde gazın tamamen kesildiği ve bu nedenle alglerin ilk iki gün içerisinde inhibe olup, yaşayamadıkları gözlemlenmiştir. Bu yüzden 300 mL/dk'lık toplam debinin 3 reaktöre dağıtılması yerine 100 mL/dk'lık debiyi tek bir reaktöre besleyerek deneylerin yapılmasına karar verilmiştir. Tek bir fotobiyoreaktörde yapılan deneylerin istatistiki olarak değerlendirilebilmesi açısından, fotobiyoreaktörden 5'er dakika arayla alınan 2 ayrı alg numunesinin sonuçlarının ortalaması alınarak deney parametreleri hesaplanmıştır. Bir önceki deneyde kullanılan hava taşının gözeneklerinde oluşabilecek tıkanmaların sisteme verilen gaz debilerini olumsuz etkilememesi adına her deney

başlangıcında, yeni bir hava taşı kullanılarak çalışmalara devam edilmiştir. Yapılan düzenlemeler doğrultusunda, fotobiyoreaktör sisteminde gerçekleştirilen deneylere düzenli bir şekilde, sorun olmadan devam edilebilmiştir.

3.3. Deney Parametreleri ve Deney Listesi

3.3.1. Aydınlatma Şiddetinin Mikroalgal Biyokütle Büyüme Verimine Etkisi

Alg yetiştirme koşullarının inhibisyon analizi için alg yetiştirme koşullarını gösteren teste göre; 40- 60 $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (4 500 ile ~ 8 500 lux) aralığındaki soğuk ışık (cold light) ya da gün ışığını (day light) temsilen seçilen floresanların kullanımı tavsiye edilmektedir. Floresanlar; soğuk ışık ya da gün ışığı özelliklerinde 5 000-6 000 lux, 6 000-7 000 lux ve 5 000-8 000 lux aralığında olacak şekilde satılmaktadır. Belirtilen test değerlerine göre, üç ayrı aydınlatma şiddeti aralığına sahip lambalar alg yetiştirme koşullarına uygun aralıkta yer almaktadırlar. Bu değerlerde kritik olan nokta, lambaların (Kelvin cinsinden) sıcaklık değerleridir. Genellikle 3 600 K ile 4 300 K aralığında ışık sıcaklığının alg büyümesinde uygun olduğu belirtilmektedir (European Union 2016). Bu bilgiler doğrultusunda, *C. vulgaris* mikroalginin gelişiminde en iyi verim sağlayan aydınlatma şiddetinin tespiti açısından ışık sıcaklığı 4 300 K ve minimum aydınlatma şiddeti 7 000 lux olarak tercih edilmiştir. Bu kapsamda üç farklı aydınlatma şiddetinde altında (7 000 lux, 11 000 lux ve 15 000 lux) deneyler gerçekleştirilmiştir (SET-I). Deneylerde fotobiyoreaktöre %15 CO₂ içeren gaz karışımı (%15 CO₂+ %3 O₂+ %82 N₂) verilmiştir. Gaz debisi 100 mL/dk olarak belirlenmiştir. SET-I kapsamında yapılan deneyler ve deney şartları Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. SET-I kapsamında yapılan deneyler ve deney şartları

SET-I	Aydınlatma Şiddeti (lux)	Aydınlatma Süresi (saat)	% CO ₂
1.1	7 000	24	15
1.2	11 000	24	15
1.3	15 000	24	15

3.3.2. Aydınlatma Süresinin Mikroalgal Biyokütle Büyüme Verimine Etkisi

SET-I sonunda, en iyi CO₂ giderim verimine sahip aydınlatma şiddeti belirlenmiş, SET-II deneyleri bu aydınlatma şiddetinde gerçekleştirilmiştir. SET-II deneylerinde aydınlatma süresinin mikroalg kültürünün büyümesi üzerine etkisi incelenmiştir. Deneylerde fotobiyoreaktöre %15 CO₂ içeren gaz karışımı (%15 CO₂+ %3 O₂+ %82 N₂) 7 000 lux aydınlatma şiddeti altında sisteme verilmiştir. Gaz debisi 100 mL/dk olarak belirlenmiş olup, SET-II kapsamında yapılan deneyler ve deney şartları Çizelge 3.3’te gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. SET-II kapsamında yapılan deneyler ve deney şartları

SET-II	Aydınlatma Şiddeti (lux)	Aydınlatma Süresi (saat)	% CO ₂
2.1	7 000	12	15
2.2	7 000	16	15
2.3	7 000	24	15

3.3.3. CO₂ Derişiminin Mikroalgal Biyokütle Büyüme Verimine Etkisi

SET-II sonunda, en iyi CO₂ giderim verimine sahip aydınlatma süresi belirlenmiştir. SET-III deneyleri bu aydınlatma süresinde gerçekleştirilmiştir. SET-III deneyleri süresince fotobiyoreaktöre 100 mL/dk debide gaz karışımı verilmiştir. Deneyler 7 000 lux aydınlatma şiddetinde, 24 saatlik aydınlatma süresinde yapılmıştır. SET-III kapsamında yapılan deneyler ve deney şartları Çizelge 3.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.4. SET-III kapsamında yapılan deneyler ve deney şartları

SET-III	Aydınlatma şiddeti (lux)	Aydınlatma Süresi (saat)	% CO ₂
3.1	7 000	24	0,04*
3.2	7 000	24	15
3.3	7 000	24	90

* 400 ppm_v

3.3.4. Azot Stresinin Mikroalgal Biyokütle Büyüme Verimine Etkisi

SET-IV deneyleri, en iyi CO₂ giderim veriminin elde edildiği %15 CO₂ derişimi, 7 000 lux aydınlatma şiddeti ve 24 saat aydınlatma süresi altında hem azot stresi olmayan koşulda hem de %100 azot stresi olan koşulda gerçekleştirilmiştir. %100 azot stresi koşulunda mikroalgler inhibe olup büyüyemedikleri için 2. günde deney sonlandırılmıştır. Bunun üzerine %100 azot stresi deneyi 400 ppm_v CO₂ derişiminde tekrarlanmıştır. Bu deneyin sonunda da mikroalgler inhibe olmuş ve 2. günde deney sonlandırılmıştır. Azot stresi olmayan koşullarda yapılan deneylerde iyi bir büyüme sağlayan mikroalglerin, aynı koşullarla azot stresi altında büyüyememelerinin temel sebebinin; sistemdeki gaz akışının fazla olması ve büyüme olumsuz etkilemesi düşünülmüştür. Bu görüşün doğruluğunu teyit etmek amacıyla, fotobiyoreaktör sisteminin dışında deneylerin yapılmasına karar verilmiştir. Ayrıca, kıyas yapabilmek adına, %75 azot stresi deneyi de yapılacak deneyler arasına dahil edilmiş ve toplamda üç deney gerçekleştirilmiştir. 28 °C sabit sıcaklığın olduğu steril bir odada, 400 ppm_v CO₂ derişiminde ve 7 000 lux aydınlatma şiddetinde sürekli aydınlatma şiddetinde azot stresi olmayan, %75 azot stresi ve %100 azot stresi içeren koşullarda deneyler gerçekleştirilmiştir. Her bir deney ortamında, mikroalgler yaklaşık olarak 12 gün iyi bir büyüme sergilemişlerdir. %100 azot stresi için besiyerinden azot içeren tüm bileşenler (NaNO₃, EDTA ve Co(NO₃)₂.6H₂O) çıkarılmıştır. Üçüncü deney de ise %75 azot stresi uygulanmıştır. Bunun için besiyerinden EDTA ve Co(NO₃)₂.6H₂O bileşenleri çıkarılmış, azot kaynağı olarak besiyerinde sadece NaNO₃ kullanılmıştır. Mikroalg kültüründe %75 azot stresi oluşturacak besiyerinin hazırlanmasında NaNO₃'ın Stok 1 çözeltisindeki derişimi 4,505 g/L olarak belirlenmiştir. SET-IV kapsamında yapılan deneyler ve deney şartları Çizelge 3.5'te gösterilmiştir. Deneyler sonunda toplanan/hasat edilen mikroalg biyokütlesinde RuBisCO ve lipit analizleri yapılmıştır.

Çizelge 3.5. SET-IV kapsamında yapılan deneyler ve deney şartları

SET-IV	Aydınlatma Şiddeti (lux)	Aydınlatma Süresi (saat)	%CO ₂ *	Azot Stresi
4.1	7 000	24	400 ppm _v	-
4.2	7 000	24	400 ppm _v	%100
4.3	7 000	24	400 ppm _v	%75

* Deneyler erlenmayerde hava atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Havadaki CO₂ derişiminin kuru bazda 400 ppm_v olduğu kabul edilmiştir.

3.4. Deney Prosedürü

Fotobiyoreaktöre aktarılmak üzere yetiştirilen mikroalg kültüründen 25 mL numune alınır. 684 nm ve 750 nm’de OD değerleri okunur. Not edilir. Bu alınan numune başlangıç analizleri için ayrı bir kabta tutulur. OD’si bilinen alg kültüründen 50 mL alınır ve 2 L’lik bir balon jojeye aktarılır. Balon jojeye 1 450 mL besiyeri eklenir ve toplam hacim 1 500 mL olur. Alg kültürü ve besiyeri balon joje içerisinde karıştırılır. Bu arada fotobiyoreaktöre her deney öncesinde yeni bir hava taşı konulur. Toplam hacmi 1,5 L olan alg kültürü fotobiyoreaktöre aktarılır. Fotobiyoreaktöre verilecek gaz derişimi belirlenir ve gaz debileri belirlenen derişime göre rotametrelerle ayarlanır. Burada ilk aşamada, N₂ gazı fazla verilerek hava taşının gözeneklerinin açılması ve gaz akışının gözeneklerden eşit bir şekilde dağılması beklenir. Dağılım istenildiği gibi gözlemlendiğinde deney için gerekli gaz derişimleri rotametreler üzerinden ayarlanır. Gaz akışının eşit bir şekilde dağılımından hemen sonra 25 mL’lik ilk numune alınır. pH’sı, sıcaklığı ve OD değeri ölçülür. 5 dk sonrasında 25 mL’lik bir numune daha alınarak, pH’sı, sıcaklığı ve OD değeri ölçülür. Ölçümler sonrasında 25 mL’lik numunelerin 10’ar mL’si ile kuru ağırlık tayini yapılır. Daha sonra kalan 15’şer mL’lik numunelerden 10’ar mL alınır ve numuneler de klorofil-a, klorofil-b ve karotenoid ölçümleri yapılır. Bu numuneler 0. Gün (başlangıç) numuneleri olarak adlandırılır. Deney süresince her 24 saatte bir numune alma işlemi gerçekleştirilir ve yukarıda anlatılan aynı işlemler tekrarlanır. Hergün alınan numunelerin grafiksel incelemesi yapılır ve kültürün ölüm fazına geçtiği tespit edildiğinde deney sonlandırılır. Azot stresinin mikroalg kültürünün büyümesine ve lipid üretimine etkisinin incelendiği Set-IV deneyleri sonunda alg kültürü hasat edilir ve RuBisCO ve lipid analizleri için hazırlanır. Fotobiyoreaktör %50 etil alkol- %50 H₂O karışımı ile temizlenir. En son saf su eklenip, deşarj edilerek yeni deney setine sistem hazır hale getirilir.

Deney süresince fotobiyoreaktörden her gün 5 dakika arayla iki numune alınmıştır. Bu numunelerin ölçüm sonuçlarının ortalama değerleri (standart sapma deperleriyle birlikte) “4 BULGULAR VE TARTIŞMA” bölümünde sunulan şekillerin oluşturulmasında kullanılmıştır. Genel olarak deney prosedüründe gerçekleşen analizlerin detayları “3.5 Analizler ve Hesaplamalar” bölümünde verilmektedir.

3.5. Analizler ve Hesaplamalar

Her bir deney için fotobiyoreaktörden 24 saatte bir numune alınmıştır. Alınan numunelerde pH, sıcaklık, optik yoğunluk, kuru ağırlık (g/L), klorofil-a, klorofil-b ve karotenoid ölçümleri yapılmıştır. Yapılan analizler neticesinde her bir deney için

mikroalg üreme verimliliği (P_t , g (kuru ağırlık)/L/gün), maksimum spesifik büyüme oranı, (μ_{max} , 1/gün) ve CO₂ tutma verimi (R_{CO_2} , g CO₂/L/gün) hesaplanmıştır.

3.5.1. pH ve Sıcaklık

Çalışmada kullanılan *C. vulgaris* mikroalginin optimum büyüme sıcaklığı 28 °C olarak belirlenmiştir. Deneyler esnasında fotobiyoreaktörün iç sıcaklığı 28 °C’de sabit olacak şekilde ayarlanmıştır. Her deneyde, fotobiyoreaktörden 24 saatte bir alınan numunelerde sıcaklık ve pH ölçümü Hanna Instruments HI 2210 pH metre kullanılarak yapılmıştır. pH ölçüm değerlerine göre, mikroalg büyümesi üzerinde olumlu ve olumsuz yönde etkileyen parametrelerin ve optimum pH değerinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

3.5.2. Optik Yoğunluk

Kültürün hücre yoğunluğunun arttığına bir delil olması bakımından alg kültüründen alınan numunede ışık soğurma (optik yoğunluk) ölçümü yapılmıştır. Optik yoğunluk, soğurmaya ilave olarak ışığın dağılması ya da yansımaları olaylarını da kapsar. Her ne kadar soğurma, ışığın dağılması ve yansımaları olaylarını dikkate almıyor olsa da optik yoğunluk hakkında fikir verir. Bu nedenle, bu noktadan itibaren soğurma, “optik yoğunluk” terimi ile ifade edilecektir. Mikroalg gibi renk veren hücrelere sahip biyokütlelerin bir sulu çözeltideki derişimi dolaylı olarak optik yoğunluk tespiti ile yapılmaktadır. Fakat mikroalg kültürün yaşına ve büyüme şartlarına göre renk veren/boyar madde içeriği değişiklik gösterdiği için optik yoğunluk ölçümleri ciddi hatalara neden olabilmektedir. Hatayı en düşük seviyede tutabilmek için optik yoğunluk ölçümü renk veren/boyar maddenin soğurabileceği dalga boyu aralığının dışındaki bir dalga boyunda yapılmalıdır. Rodrigues vd. (2011) yaptıkları çalışmada *C. vulgaris* mikroalg kültürü için optik yoğunluk ölçümünün 684 nm dalga boyunda, Griffiths vd. (2011) 750 nm dalga boyunda yapılmasını önermektedirler. Buradan hareketle, deneyler süresince mikroalg kültürü numunesinin hem 684 nm hem de 750 nm dalga boylarındaki optik yoğunluğu spektrofotometre (Hach Lange DR 6000) kullanılarak belirlenmiştir.

3.5.3. Kuru Ağırlık

Kuru ağırlık için; filtre kağıdı (selüloz asetat membran filtre 0,45 µm) 105 °C’de 2 saat boyunca fırınında bekletip kurutulur. Kurutulan filtre kağıdı desikatörde soğutulduktan sonra hassas terazi (Pioneer Ohaus PA214C; Okunabilirlik: 0,0001g) ile darası (m_1) alınır. Mikroalg kültüründen alınan 10 mL örnek, filtre kağıdından geçirilerek süzülür. Örneğin süzüldüğü filtre kağıdı 3 saat boyunca etüvde 105 °C’de kurutulur. Kurutulan filtre kağıdı desikatörde ortam sıcaklığına getirildikten sonra yapılan tartım sonuçlarıyla (m_2) litredeki kuru ağırlık gram cinsinden tespit edilir (3.1).

$$X = \frac{\Delta m}{V} \quad (3.1)$$

X; g (kuru ağırlık)/L cinsinden mikroalg derişimini vermektedir. Δm , $m_2 - m_1$ kuru ağırlığını g cinsinden, V ise toplam numune hacmini mL cinsinden ifade etmektedir.

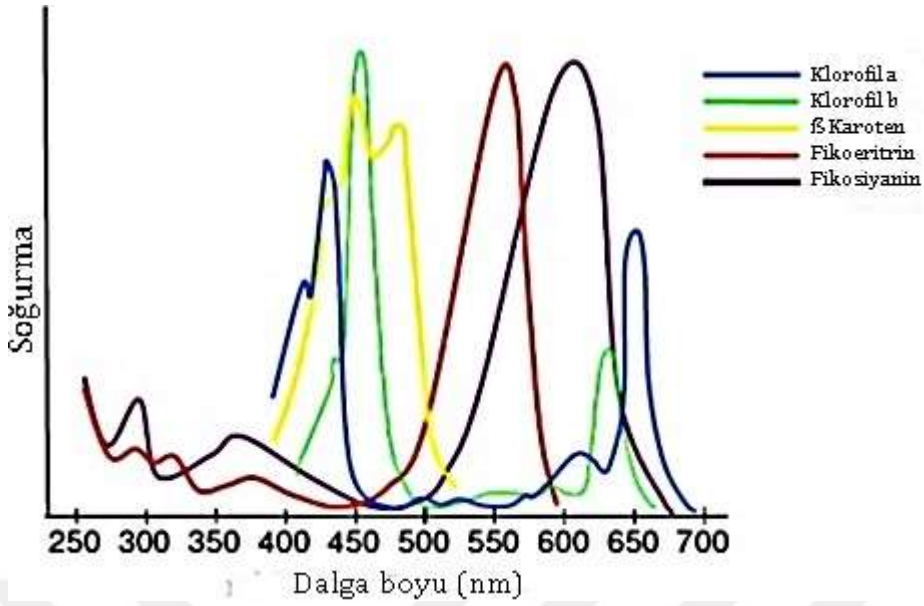
3.5.4. Fotosentetik Pigment (Klorofil-a ve Klorofil-b) ve Karotenoid Analizi

Tüm fotosentetik organizmalarda ışık enerjisini toplamak amacıyla bulunan organik pigmentler temelde klorofiller, karotenoidler ve fikobilinler olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadır: Pigmentler, fotosentezde görünür ışığın belli aralıktaki dalga boylarının soğurulması ve yansımada görev alan renkli bileşiklerdir. Klorofiller (yeşil pigmentler) ve karotenoidler (sarı veya turuncu pigmentler) lipofiliktir (lipit içerisinde çözünebilen). Fikobilin olarak bilinen pigment maddesi ile proteinlerin oluşturdukları fikobiliproteinler ise hidrofilitir (suda çözünebilen). Fikobiliproteinler, alglerin kloroplastlarındaki tilakoidlerin iç kısmına veya yüzeyine yerleşmiş mavi ya da kırmızı pigmentler olarak bulunurlar.

Birçok farklı klorofil türü vardır. Klorofil-a mikroalglerde fotosentezi mümkün kılması nedeniyle klorofil türleri arasında en önemlisidir. Bir diğer tür ise klorofil-b'dir. Klorofil-a tüm bitkilerde, yosunlarda ve fotosentez yapabilen bakterilerde bulunmaktadır. Klorofil-b ise sadece bitkilerde ve yeşil yosunlarda bulunmaktadır. Klorofil molekülleri merkezi bir magnezyum atomu içeren bir tetrapireol halkasından ve bir uzun zincirli terpenoid alkolden (klorofil-c hariç) oluşmaktadır. Klorofil-a, çekirdek ve reaksiyon merkezi pigment-protein komplekslerinin bir parçası olarak tüm oksijenik fotoototroflarda² bulunmaktadır. Klorofil b, c ve d pigmentleri ise ışık emilim aralığını genişletmek amacıyla fotosentetik bitki türlerine göre klorofil-a yanında görev yapmaktadırlar (Brennan ve Owende 2010).

Mikroalgler, yüksek değerli pigmentler olarak; karotenoidler, klorofiller ve fikobilinler gibi biyoaktif bileşikler üretmeleri açısından iyi bilinmektedirler. *C. vulgaris* mikroalgi, klorofil pigmentini kuru ağırlığının %1-2'sine kadar ulaşabilen oranlarda üretebilme potansiyeline sahiptir (Safi vd. 2014). Yapısında klorofil-a ve klorofil-b pigmenti bulunmaktadır. Bu iki pigment sayesinde 400 ve 700 nm dalga boyu aralığında ışığın soğurulmasını ve fotosentezin optimum verimde gerçekleşebilmesini sağlamaktadırlar. *C. vulgaris*, klorofil-c pigmenti içermediği için fotosentez sonunda lipit üretimi gerçekleştirebilmektedir. *C. vulgaris* ayrıca kuru ağırlığının yaklaşık %0,4'üne kadar karotenoid pigmentleri (astaksantin, lutein, p-karoten, likopen ve kantaksantin) içermektedir (Gouveia vd. 2002). Şekil 3.11'de üç ana pigment sınıfının (klorofil, karotenoid ve fikobilin) ışınım soğurma spektrumları yer almaktadır (Kendirlioglu 2012).

² **Oksijenik fotoototrof:** Foton yakalayan fototrofin (fotosentetik türün), fotosentez sonucunda oksijen üretmesini ifade eden bir terimdir. Su ve karbondioksitin tepkimeye girmesini ve oksijen üretilmesini sağlar. Oksijenik fotosentetik organizmalar, foton yakalamak ve suyu okside etmek için klorofil kullanır ve suyu oksitleyerek moleküler oksijene böler. Burada suyun parçalanması fotoliz olayıdır.



Şekil 3.11. Üç ana pigment sınıfının (klorofil, karotenoid ve fikobilin) ışınım soğurma spektrumları (Kendirlioğlu 2012)

Klorofil fotosentez sürecinin bir göstergesi olduğundan dolayı, mikroalg kültüründe fotosentezin gerçekleşip gerçekleşmediğini belirlemek ve biyokütle artışını tayin etmek için kültürden alınan numunelerde klorofil-a, klorofil-b ve karotenoid tayini yapılmıştır. Fotobiyoreaktörden alınan 10 mL alg numunesi 0,45 µm gözenek çaplı selüloz asetat filtre kağıdından süzölmüştür. Süzölme işleminin son aşamasında ortamının pH'sının asidik koşullara gelmemesi (ortam pH'sının 7-7,5 civarında tutulması), klorofil pigmentlerinin zarar görmemesi için filtre kağıdına son aşamada 200 µL MgCO₃ ilave edilerek beraber süzdürölmüştür. Filtre kağıdı santrifüj tüpüne yerleştirilerek, üzerine 5 mL %90'lık aseton eklenmiştir. Filtre kağıdı çözünene kadar yaklaşık bir dakika boyunca vortekslenmiş ve 4 °C'de 24 saat süreyle buzdolabında alüminyum folyoya sarılarak, karanlık ortamda bekletilmiştir. 24 saatin sonunda örnekler daha konsantre bir numune eldesi için 6 000 rpm'de 15 dakika süreyle santrifüjlenmiştir. Santrifüj sonunda elde edilen üst sıvının 480, 630, 645 ve 665 nm dalga boylarında OD ölçümleri yapılmış ve (3.2), (3.3) ve (3.4) eşitlikleri kullanılarak örneklerin klorofil ve karotenoid içerikleri tespit edilmiştir (Parsons ve Strickland 1972). Şekil 3.11'da pigmentlerin 400-700 nm dalga boyu aralığında ışığı soğurabildikleri eğriler verilmektedir. Burada göröldüğü üzere; 480 nm dalga boyunda karoten, 645 nm'de klorofil-b ve 665 nm'de ise klorofil-a pigmenti ışığı en yüksek seviyede soğurabilmektedir. Hem klorofil-a hem de klorofil-b 630 nm dalga boyundaki ışığı düşük bir seviyede soğurabildikleri için 630 nm'deki ölçümler, hesaplamalarda düzeltme faktörü olarak kullanılmaktadır.

$$\text{Klorofil-a } (\mu\text{g}/10 \text{ mL}) = (11,6 \cdot E_{665} - 1,31 \cdot E_{645} - 0,14 \cdot E_{630}) \cdot \left(\frac{V}{L}\right) \quad (3.2)$$

$$\text{Klorofil-b } (\mu\text{g}/10 \text{ mL}) = (20,7 \cdot E_{645} - 4,34 \cdot E_{665} - 4,42 \cdot E_{630}) \cdot \left(\frac{V}{L}\right) \quad (3.3)$$

$$\text{Karotenoid } (\mu\text{g}/10 \text{ mL}) = 4,0 \cdot E_{480} \quad (3.4)$$

E: Her bir dalga boyunda okunan OD değeri

V: Kullanılan aseton miktarı, mL

L: Işığın aldığı yolu (küvet genişliği), cm

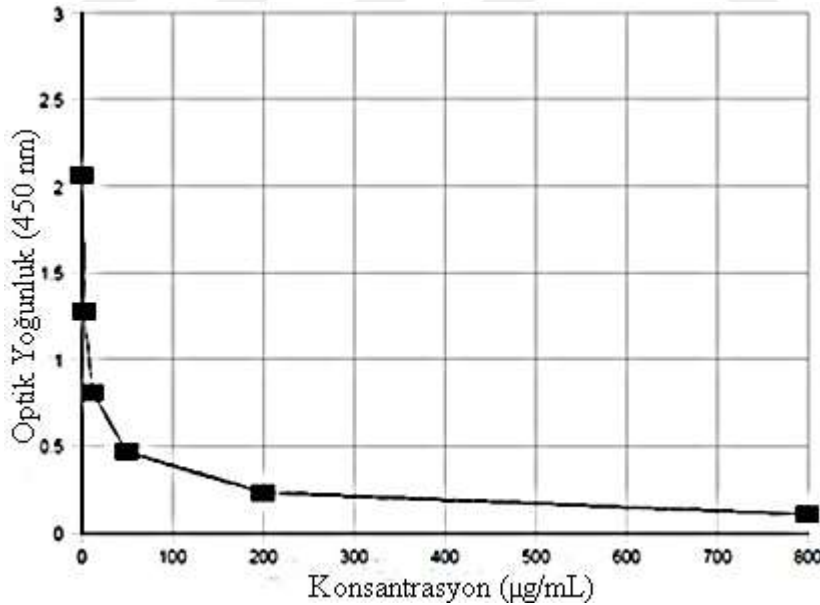
3.5.5. RuBisCO Analizi

Mikroalg numunelerinin RuBisCO analizine başlamadan önce, RuBisCO test kitinde bulunan standart çözeltiler kullanılarak bir kalibrasyon eğrisi oluşturulmuştur (Şekil 3.12). Kullanılan kitin içeriğinde yer alan kalibrasyon eğrisi verileri ile ölçülen veriler arasındaki hata payının çok düşük olduğu görülmüş ve güvenli bir şekilde temel deneylere başlanılmıştır. Mikroalg kültürünün RuBisCO oranını belirlemek ve deneyler sonrasındaki RuBisCO oranı ile kıyas yapabilmek adına deney setlerine başlamadan önce kültürde RuBisCO analizi yapılmıştır. Daha sonra Set-IV kapsamındaki deneyler sonrasında hasat edilen mikroalg kültüründe RuBisCO analizi yapılmış ve RuBisCO enzim aktivitesinin azot stresi koşullarına göre nasıl değiştiği ve mikroalg kültürünün CO₂ tutma verimini nasıl etkilediği tespit edilmiştir. RuBisCO analizi aşağıda belirtilen yöntemle gerçekleştirilmiştir:

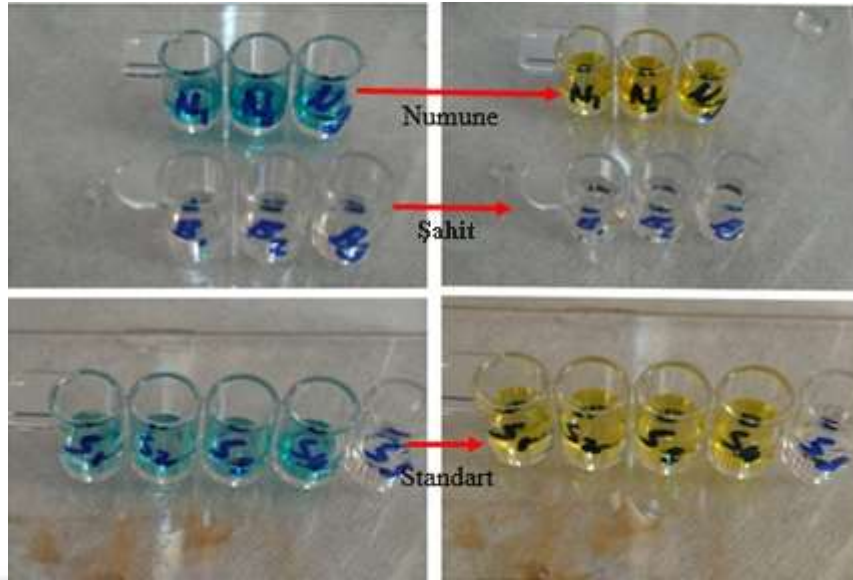
- Deney sonunda fotobiyoreaktördeki sulu çözelti (mikroalg kültürünün de içinde olduğu) toplanmış ve 5 dk boyunca 5 000 rpm’de santrifüjlenmiştir. Santrifüj sonrası üstte kalan sıvı faz (süpernant) alındıktan sonra kalan mikroalg biyokütlesinin (alg keki) yaklaşık 1 mL’si pastör pipeti ile alınmış ve RuBisCO analizi için ayrılmıştır. Geriye kalan alg kekinin tümü lipit analizi için muhafaza edilmiştir.
- 1 L saf suda ham enzim ekstraksiyon çözeltisi (50 mM Tris-HCl (pH 8,0), 1 mM EDTA, 50 mM NaHCO₃, 2 mM DTT ve 10 mM MgCl₂) hazırlanmıştır. RuBisCO analizi için ayrılan 1 mL alg keki üzerine ham enzim ekstraksiyon çözeltisinden 1 mL eklenmiş ve alg keki 3 dakika boyunca 160 W’lık ultrasonik prob³ altında parçalanmıştır.
- Parçalanmış hücre süspansiyonu tekrar 5 dakika boyunca 3 000 rpm’de santrifüj edilmiş ve süpernant RuBisCO aktivitesinin belirlenmesi için toplanmıştır (Huang vd. 2016).

³ 160 W’lık ultrasonik prob altında mikroalg kültürünün hücre çeperinin parçalanması sağlanır. Bu parçalanma sonucunda, uygulanan analiz aşamaları ile enzimin elde edilmesi sağlanır. 160 W önemli bir değerdir. RuBisCO test kitinde kullanılan tür için günümüze kadar yapılmış çalışmalar ışığında belirtilen bir değerdir. 160 W’dan düşük olan ultrasonik parçalanma işleminde, hücre çeperi iyi parçalanamayabilir ve mevcut enzimden daha azı ortaya çıkabilir, buna bağlı olarak RuBisCO değeri düşük ölçülebilir. 160 W’dan yüksek olan ultrasonik parçalanma işleminde ise, nihai enzim ölçümünde yetersiz verim elde edilebilir. Çünkü, hücre çeperinin fazla parçalanmaya maruz kalması sonucunda eklenen kimyasallar hücre yapısında farklı reaksiyonlar verebilir. Bu durumda ya enzim yetersiz ölçülmüş olur (ki bunu farkedemeyiz ve doğru kabul ederiz) ya da enzim yapısı zarar gördüğü için RuBisCO analizi sonucunda iyi bir işlem akışı sağlanmazsa Şekil 3.13’teki sarı renk yerine yeşilimsi renk elde edilir. Bu renk ya enzim kitinde sorun olduğunu (tarihi geçmişse, kullanılamaz derecedeysen, muhafaza edilmesi yanlışsa, oda sıcaklığına denk gelmeden analiz yapılmışsa, vb.) ya da analizin iyi yapılmadığını gösterir. Hücre kaybını önlemek ve iyi bir ultrasonik parçalanma sağlayabilmek için cam kap yerine plastik numune kabının tercih edilmesi de iyi bir analiz için önem arz eder.

RuBisCO aktivitesi, RuBisCO test kiti kullanılarak mikrolaka absorbands okuyucuda 450 nm’de yapılan okuma ile belirlenmiştir. Analiz, RuBisCO seviyesini belirlemek için çift antikorlu sandviç yöntemine dayanmaktadır (Huang vd. 2016). RuBisCO test kitinde bulunan mikrotitre plakası RuBisCO antijeni ile önceden kaplanmıştır. Standart/numune RuBisCO’ya özgü antikor ile birlikte uygun mikrotitre plaka oyuklarına eklenmiş, 37 °C’de 60 dakika boyunca inkübe edilmiştir. Yıkama çözeltisi ile 5 kez yıkandıktan sonra, antikor-antijen etiketli enzim kompleksi oluşturmak için HRP (Horseradish peroksidaz) etiketli RuBisCO antikor çözeltisi standarda/numuneye ilave edilmiş, standart (Şekil 3.12)/numune 37 °C’de 60 dakika boyunca tekrar inkübe edilmiştir. Standart/numune yıkama çözeltisi ile 5 kez daha yıkanmıştır. Ardından standarda/numuneye tetrametil benzidin (TMB) ilavesi yapılmıştır. TMB enzimatik bir tepkimenin gerçekleşmesini sağlar. Böylece mavi renkli bir ürün elde edilir. HRP tarafından katalize edilen raportör substrat tetrametil benzidin (TMB) ilavesiyle bir enzimatik reaksiyon gerçekleşmiştir. TMB eklendiğinde, analiz aşamaları hassas bir şekilde uygulanmışsa eğer, nihai rengin maviye dönüşümü gerçekleşir. Yeşil bir renk elde edilirse, analiz aşamalarının uygulanmasında sorun var anlamına gelmektedir. TMB ilavesinin ardından standart/numune 37 °C’de 20 dakika boyunca inkübe edilmiştir. İnkübasyon sonunda çözelti mavi renk almıştır. Enzimatik aktiviteyi etkisiz hale getirmek için 50 µL durdurma tamponu ilave edilmiş, mavi rengin sarıya dönmesi gözlenmiştir (Şekil 3.13). Sarı renklenme yoğunluğu, 5 dakika içinde mikrolaka absorbands okuyucusu tarafından 450 nm’de absorbands okunarak ölçülmüştür. Ölçüm değeri, numunede tutulan HRP-Konjuge RuBisCO miktarı ile nicel olarak doğru, numune veya standart içinde bulunan RuBisCO miktarı ile ise ters orantılı olmaktadır (Aviva Systems Biology 2005).



Şekil 3.12. RuBisCO standart eğrisi



Şekil 3.13. RuBisCO analizi aşamasından bir görünüm

3.5.6. Lipit Ekstraksiyonu ve Tayini

Mikroalg numunelerinde lipit ekstraksiyonu, kloroform/metanol ($\text{CHCl}_3/\text{CH}_3\text{OH}$) kullanımı içeren ve gravimetrik tanımlamaya dayanan Bligh ve Dyer metoduna (Bligh ve Dyer 1959) göre yapılmıştır. Bu metot ile %80 sıvı içeriğine sahip biyolojik materyallerden, $\text{CHCl}_3/\text{CH}_3\text{OH}/\text{su}$ (1:1:0,5 v/v) içeren ekstraksiyon çözeltisi (çözücü) kullanılarak lipit ekstraksiyonu sağlanmaktadır. Set-IV kapsamındaki deneyler sonrasında hasat edilen ve kurutulan mikroalg biyokütlesi üzerinde lipit ekstraksiyonu için aşağıda belirtilen deney yöntemleri uygulanmıştır.

Mikroalg biyokütlesinin lipit ekstraksiyonu öncesi biyokütle kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Yoğun biyokütlenin 40 °C etüvde 2 gün süre ile kurutulması ve desikatörde sabit tartıma getirilmesinin ardından, Bligh ve Dyer (1959) Yöntemi'nden yararlanılarak lipit ekstraksiyonu gerçekleştirilmiştir. Lipit ekstraksiyonu için uygulanan prosedür şu şekilde gerçekleşmiştir:

- 25 mg kuru biyokütle 50 mL'lik falkon tüpüne alınmış ve üzerine $\text{CHCl}_3/\text{CH}_3\text{OH}/\text{su}$ (1:1:0,5 v/v) çözücüsü toplam hacim 25 mL olacak şekilde birkaç adımda eklenmiştir.
- Her çözücü ilavesinden sonra biyokütle-çözücü karışımı 1 dk hızlıca vorteks cihazında karıştırılmış ve ardından su banyosunda 75 °C sıcaklıkta 5 dk bekletilmiştir.
- Biyokütle-çözücü karışımı 6 000 rpm'de 10 dk santrifüj edilerek faz ayrımı sağlanmıştır (Şekil 3.14).
- Alttaki faz (kloroform-lipit karışımı) pastör pipeti ile dikkatlice çekilmiş ve darası alınan numune şişesine konulmuştur.

- 80 °C’de çözücüsü uçurulan numunenin son tartımı alınmıştır.
- İlk ve son tartım arasındaki fark, kuru ağırlık bazında % lipit içeriğini vermiştir.



Şekil 3.14. Lipit analizi sonucunda gerçekleşen faz ayrımı

3.5.7. Mikroalg Üreme Verimliliği

Mikroalg üreme verimliliği (3.5) eşitliğine göre hesaplanmıştır (Aslam vd. 2017).

$$P_t = \frac{(X_t - X_0)}{(t_t - t_0)} \quad (3.5)$$

P_t , deneyin başlamasıyla t süresi arasında mikroalg üreme verimliliğini g (kuru ağırlık)/L/gün cinsinden vermektedir. X_t ve X_0 sırasıyla t_t ve t_0 zamanlarındaki fotobiyoreaktördeki mikroalg derişimlerini (g (kuru ağırlık)/L cinsinden) ifade etmektedir. t_0 aşılamanın yapıldığı ilk günü, t_t ise aşılama sonrası herhangi bir zamanı temsil etmektedir.

3.5.8. Maximum Spesifik Büyüme Oranı

Maksimum spesifik büyüme oranı (μ_{max}) 1/gün cinsinden (3.6) eşitliğine göre hesaplanmıştır (Taştan vd. 2016a).

$$\mu_{max} = \frac{\ln X_2 - \ln X_1}{t_2 - t_1} \quad (3.6)$$

X_2 ve X_1 sırasıyla t_2 ve t_1 zamanlarındaki fotobiyoreaktördeki mikroalg derişimlerini (g (kuru ağırlık)/L cinsinden) ifade etmektedir. t_1 mikroalg kültüründe

görülen büyümenin en fazla olduğu zaman diliminin başlangıcını, t_2 ise bu zaman diliminin sonunu temsil etmektedir.

3.5.9. CO₂ Tutma Verimi

CO₂ tutma verimi (3.7) eşitliğine göre hesaplanmıştır (Tang vd. 2011).

$$R_{CO_2} = C_c * P_{MAX} * \frac{(MA_{CO_2})}{(MA_C)} \quad (3.7)$$

Formüldeki R_{CO_2} , CO₂ tutma verimini g CO₂/L/gün cinsinden vermektedir. C_c mikroalg kuru ağırlığının C içeriğini (kütlece %; g C/ g (kuru ağırlık)), P_{max} maksimum mikroalg üreme verimliliğini (g (kuru ağırlık)/L/gün) temsil etmektedir. MA_{CO_2} (g/mol) ve MA_C (g/mol), sırasıyla, CO₂ gazının ve C elementinin moleküler ağırlıklarını göstermektedir. C_c , her numunenin değil sadece hasat sonrası toplanan mikroalg kültüründen alınan numunenin kuru ağırlığının C içeriğidir. Bu çalışmada C_c 0,5 olarak kabul edilmiştir (Pegallapati ve Nirmalakhandan 2013).

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Aydınlatma Şiddetinin Mikroalg Biyokütle Büyüme Verimine Etkisi

Mikroalglerin ototrofik beslenme metabolizmasında inorganik karbon kaynağı olarak CO₂ gazını ve ışığı kullanabildikleri bilinmektedir (Brennan vd. 2010; Demirbaş A. 2011; Mata vd. 2010; Perez-Garcia vd. 2011). Fotosentetik bitkilerin büyüme ve gelişimlerini devam ettirilebilmeleri açısından ışık önemli bir faktördür. Aydınlatma şiddetinin artmasına paralel olarak fotosentezde gerçekleşen artış, belirli bir aydınlatma şiddetinin üzerinde sabit kalır veya azalır. Aydınlatma şiddetinin en uygun sınır değeri, fotosentetik bitki türlerine göre değişim göstermektedir. Bir bitkinin maksimum seviyede gelişebilmesini sağlayan ışık miktarına o bitki türünün “ışık optimumu” veya “optimum aydınlatma şiddeti” denilmektedir (Kendirlioglu 2012).

Işık yoğunluğu, hücre stromasında pH, Mg⁺² ve NADPH değerlerini değiştirerek lipit asidi sentez sürecindeki anahtar enzimlerin aktivitesini etkileyebilmektedir (Lv vd. 2010). Daha yüksek ışık yoğunluğu, anahtar enzimlerin aktivitesine katalizör etkisi yaparak daha yüksek lipit üretimini sağlayabilecek olumlu bir etki yaratmaktadır. Bu nedenle mikroalg türüne göre optimum büyümeyi sağlayacak aydınlatma şiddetinin belirlenmesi mikroalg yetiştiriciliğinde oldukça önemli olmaktadır.

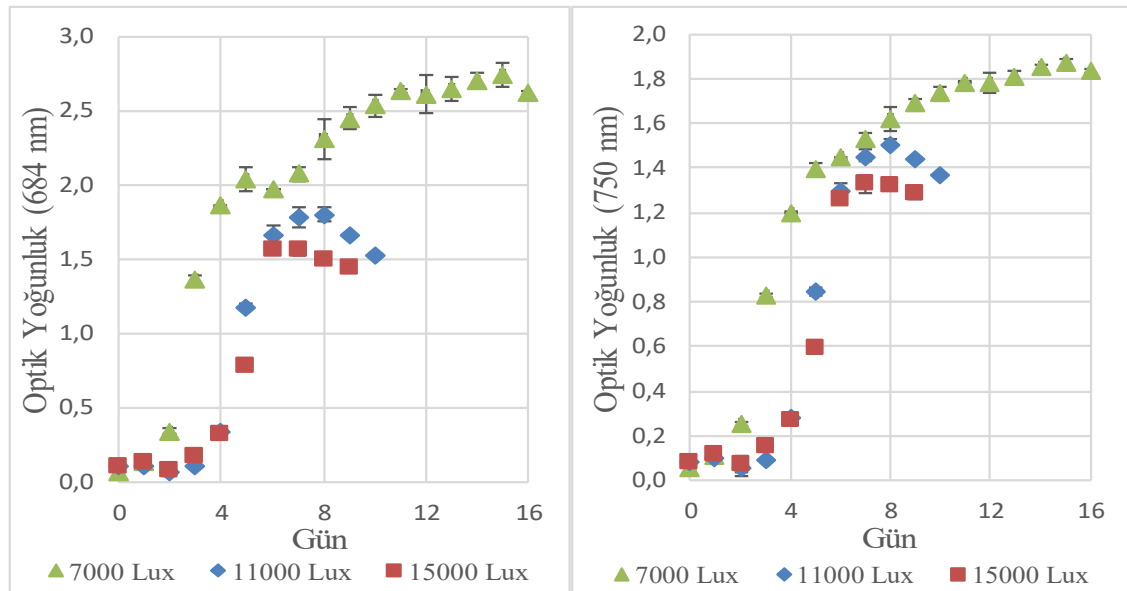
Bu çalışma kapsamında kullanılan *C. vulgaris* mikroalg kültürünün büyümesine aydınlatma şiddetinin etkisini belirlemek için mikroalg kültürü 7 000, 11 000 ve 15 000 lux aydınlatma şiddetinde Lab-FBR sisteminde 24 saat boyunca sürekli ışık altında yetiştirilmiştir. Mikroalg kültürüne deney süresince %15 CO₂ içeren gaz karışımı verilmiştir. Deneyler süresince fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerinin (24 saatte bir, 5 dakika arayla iki numune) optik yoğunluk (OD) değerleri ölçülmüş ve kültürün büyümesi takip edilmiştir. Mikroalg numunelerinin OD değerlerinin zamanla değişimi Şekil 4.1’de verilmiştir. Şekil 4.1’de görüldüğü üzere 7 000 lux (94,6 µmol m⁻² s⁻¹), 11 000 lux (148,6 µmol m⁻² s⁻¹) ve 15 000 lux (202,7 µmol m⁻² s⁻¹) aydınlatma şiddetlerinde yapılan deneyler sonucunda 684 nm dalga boyunda ölçülen en yüksek OD değerleri sırasıyla 2 738, 1 794 ve 1 566; 750 nm dalga boyunda ölçülen en yüksek OD değerleri sırasıyla 1 871, 1 505 ve 1 328 olmuştur. Deney sonuçlarına göre 24 saat sürekli aydınlatma ile en iyi büyümenin 7 000 lux aydınlatma şiddeti altında olduğu tespit edilmiştir. Benzer bir sonuç Han vd. (2015) tarafından %0,04 CO₂ derişiminde yapılan bir çalışmada elde edilmiştir. Çalışma kapsamında; 2 000, 4 000, 6 000, 8 000 ve 10 000 lux aydınlatma şiddetlerinde gerçekleştirilen deneylerde 6 000 ve 8 000 lux değerleri arasında daha yüksek büyüme oranının elde edildiği tespit edilmiştir. Ayrıca, (Wahidin vd. 2013), mikroalg üzerine genel olarak yaptıkları çalışmaya göre, 6 000 lux aydınlatma şiddetinin 10 000 lux aydınlatma şiddetine kıyasla, biyokütlenin keskin bir şekilde azalmasına neden olan fotosentetik reseptör sistemine zarar verebilecek yüksek aydınlatma kaynaklı fotoinhibisyon riskini azaltabileceği belirtmişlerdir. 7 000 lux aydınlatma şiddetinde elde edilen yüksek büyüme verimi bu bilgiyi desteklemektedir.

Sutherland vd. (2012) aydınlatma şiddetinin 8 880 lux’ten (120 µmol m⁻² s⁻¹) az olduğu yetiştirme koşullarında mikroalglerin kendi kendilerine gölgeleme etkisi yaratarak ışık sınırlaması etkisi yaratabilecekleri ve bu nedenle klorofilin elektron transferi yapmasının sınırlanması ile mikroalglerin CO₂ tutabilme özelliklerinin azalabileceği belirtilmiştir. Aşırı ışık altında mikroalg yetiştirme durumunda ise,

fotonların fotosistem I'ye (PS I) girişinde engel oluşabileceği ve mikroalg hücreleri içindeki PS I'den PS II tepkime merkezlerine elektron transfer verimliliğinin azalmasının söz konusu olabileceği belirtilmiştir (Sutherland vd. 2013). Sutherland vd. (2012)'ın çalışmasında belirttiği 8 880 lux ve daha yüksek aydınlatma şiddeti altında iyi bir büyüme elde edilmesine kıyasla 7 000 lux aydınlatma şiddetinde daha iyi büyüme verimi elde edilmiştir.

Chávez-Fuentes vd. (2018) çalışmalarında azot sınırlaması olan kültürlerde $70 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($5\,180 \text{ lux}$) ile $140 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($10\,360 \text{ lux}$) aydınlatma şiddeti ve farklı ışık kalitesi (beyaz, mavi, sarı ve mor) altında *C. vulgaris* mikroalginin yağ asidi profilini ve mikroalgden elde edilen biyodizelin kalitesini incelemişlerdir. Mor ve sarı ışık kaynaklarına kıyasla beyaz ($0,69 \text{ g/L}$) ve mavi ışık ($0,65 \text{ g/L}$) altında $10\,360 \text{ lux}$ aydınlatma şiddetinde maksimum hücre ve biyokütle derişimi gözlemlemişlerdir. Nihai durumda; aydınlatma şiddetinin $5\,180 \text{ lux}$ 'ten, $10\,360 \text{ lux}$ 'e yükselmesinin büyüme hızında bir artışa neden olduğu belirlenmiştir. En yüksek lipit içeriği mor ışık ve $10\,360 \text{ lux}$ aydınlatma şiddeti altında kuru ağırlığın %83,87'si oranında elde edilmiştir. En iyi verimin elde edildiği $10\,360 \text{ lux}$ aydınlatma şiddeti, $7\,000 \text{ lux}$ aydınlatma şiddetine göre daha yüksek seviyededir. Fakat elde ettikleri biyokütle derişimi ($0,69 \text{ g/L}$) çalışma sonucunda elde edilen biyokütle oranına ($1,99 \text{ g/L}$) göre yaklaşık 2,5 kat daha azdır. Bu sonuç, en iyi büyüme verimi elde ettiğimiz $7\,000 \text{ lux}$ aydınlatma şiddetinin daha iyi verim sağladığını ortaya koymaktadır.

Chen vd. (2011), *C. vulgaris sp.* için en iyi büyüme performansının $6\,068 \text{ lux}$ ($82 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) – $43\,660 \text{ lux}$ ($590 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) aydınlatma şiddeti aralığında elde edildiğini belirtmişlerdir. En iyi verim sağlanan $7\,000 \text{ lux}$ aydınlatma şiddetinin belirtilen aralıkta yer aldığı çalışma sonucunda belirlenmiştir.



Şekil 4.1. Farklı aydınlatma şiddetlerinde fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerinin OD değerlerinin zamanla değişimi (%15 CO₂+%3 O₂+%82 N₂; 24 saat aydınlık)

Fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerinin pH değerlerinin zamanla değişimi Şekil 4.2’de verilmiştir. %15 CO₂ derişiminde ve 24 saat aydınlatma süresi boyunca; 7 000 lux aydınlatma şiddetinde ölçülen pH değerleri 4,38-6,04 aralığında, 11 000 lux aydınlatma şiddeti altında ölçülen pH değerleri 6,16-6,86 aralığında ve 15 000 lux aydınlatma şiddeti altında ölçülen pH değerleri ise 5,28-6,90 aralığında değişim göstermiştir.

Farklı CO₂ derişimleri altında yetiştirilen *C. vulgaris* mikroalg kültürü için pH değerleri yaklaşık olarak %12 CO₂ için 5,7-7 arası, %4 CO₂ için 5,8-7,5 arası ve %0,04 CO₂ için 6,4-10,5 arasında olduğu belirtilmiştir (Hulat ve Thomas 2011). Çalışmanın sonuçları ile kıyaslandığında, *C. vulgaris* mikroalginin Hulat ve Thomas (2011)’ın %12 CO₂ derişiminde belirledikleri pH (5,7-7) aralığında, 11 000 lux aydınlatma şiddetindeki verilerin %15 CO₂ derişiminde belirlenen pH (6,16 – 6,86) değerleri ile yakın oldukları görülmektedir. Her iki veride yüksek CO₂ derişimlerinden dolayı pH’ın 5-7 aralığında olduğu görülmektedir.

Khalili vd. (2015) 5 920 lux aydınlatma şiddeti altında, *C. vulgaris*’in geniş bir pH aralığında (4-10) büyüebileceğini ve biyokütle verimliliğinin çoğunun alkali ortamda (pH 9 ve 10) elde edildiğini bildirmiştir. 5 920 lux aydınlatma şiddeti, 7 000 lux değerine yakın olduğundan ölçülen 4,38- 6,04 pH aralığının belirtilen aralıkta yer almaktadır.

Yeh vd. (2010) tarafından *C. vulgaris* ESP-31 suşu ile farklı karbon kaynağı derişimlerinde (NaHCO₃: 100- 1 600 mg/L) ve farklı aydınlatma şiddetleri altında (370 lux-2 960 lux) 5-10 pH aralığında türün önemli ölçüde inhibe olmadığı ve geniş pH tolerans aralığının (özellikle alkali pH toleransı için), *C. vulgaris* ESP-31 yetiştiriciliğinde iyi bir durum olduğu belirlenmiştir. Fakat çalıştıkları aydınlatma şiddetleri 7 000 lux aydınlatma şiddetine göre oldukça düşük seviyede kalmaktadır.

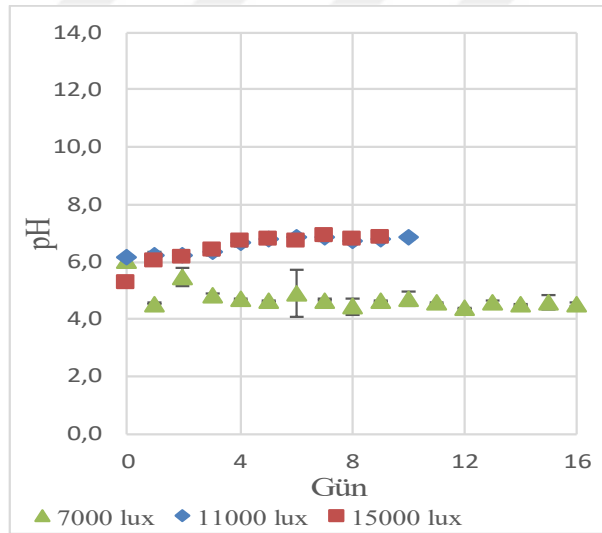
Goli vd. (2014), %0,04 CO₂ derişiminde farklı pH değerlerinde (7, 8, 9 ve 10) ve farklı aydınlatma şiddetlerinde (3 960 lux, 7 920 lux ve 11 920 lux) *C. vulgaris* mikroalginin büyümesini incelemişlerdir. Çalışma iki ayrı pH ortamında yapılmıştır. İlkinde pH kontrolü yapılmış, ikincisinde ise kademe kademe pH 10 değerine gelecek şekilde kontrol sağlanmıştır. pH kontrolünün olmadığı koşullarda 3 960 lux aydınlatma şiddetinde en iyi büyüme gözlenirken, pH kontrolünde 7 920 lux aydınlatma şiddetinde, pH değeri 10 iken maksimum verim elde edilmiştir. Bununla birlikte, biyodizel üretimi açısından uygun mikroalg türlerinin, yüksek lipit verimi içermesinin yanı sıra, yetiştirme döngüsü boyunca olabilecek pH değişikliklerine dayanabilmesi gerekliliğine değinmişlerdir. 7 000 lux aydınlatma şiddetinde belirlenen 4,38- 6,04 pH değer aralığı ile belirlenen pH değerinin örtüşmediği görülmektedir. 7 920 lux’te sağlanan en iyi verimin pH kontrolü ile sağlandığı, çalışmada asidik koşullara yakın pH değerindeki büyümenin, düşük pH değerine paralel olarak daha az elde edildiği düşünülmektedir.

Kong vd. (2010) genel olarak mikraolglarin yetiştirilme koşullarını inceledikleri çalışmada, sürekli olarak kültür ortamına yüksek derişimde CO₂ verildiğinde, mikroalg büyümesinin olumsuz etkilenmesi durumunda pH’ın büyük ölçüde düşebileceğini belirtmişlerdir. Yüksek (%15) CO₂ derişiminde çalışılması sonucunda en iyi verimin elde edildiği 7 000 lux aydınlatma şiddeti için belirlenen 4,38- 6,04 pH aralığı bu bilgiyi

doğrular niteliktedir. Fakat çalışmamızda bu pH değerlerinde büyüme üzerinde olumsuz bir etki yarattığı gözlenmemiştir.

Ruiz vd. (2010), *S. obliquus* ve *C. vulgaris* ile 9 990 lux aydınlatma şiddetinde $25\pm1^{\circ}\text{C}$ 'de ve 2,5 L çalışma hacminde (toplam hacim 3 L biyoreaktör) yaptıkları çalışmalarında, mikroalgler tarafından hızlı tüketim sonrasında inorganik karbon kıtlığına bağlı olarak fotobiyoreaktörde 9-9,5 gibi yüksek pH değerleri elde edildiğini bildirmişlerdir. Çalışmalarındaki sıcaklık değeri 28°C 'ye kıyasla daha düşüktür. Ayrıca yaklaşık 2,5 kat daha fazla mikroalg kültürü altında deney yapılmıştır. Hem fazla mikroalg derişimi hemde düşük sıcaklıkta deney yapılması ($<28^{\circ}\text{C}$) çözünen CO_2 gazının bir mikroalgler tarafından daha yoğun kullanılmalarını sağlamıştır. Bunun sonucunda pH değerinin alkali seviyelere ulaştığı düşünülmektedir. %15 CO_2 derişiminde ve 1,2 L'lik çalışma hacminde pH'ın asidik koşullarda olması bu bilgiyi doğrular niteliktedir.

Yerel bir deniz *C. vulgaris sp-* suşunun (*Chlorella MFD-1*) üretimi ve büyümesi 200 L kapasiteli alg tüpleri kullanılarak 6-8,5 arasında değişen farklı pH seviyeleri altında incelenmiştir (James vd. 1988). Sonuçlar, 6,5'lik bir pH'nın, sürekli bir kanal sisteminde *C. vulgaris sp-* suşunun üretilmesi için en uygun değer olduğunu göstermektedir. Ayrıca; toplam lipit asidi içeriği düşük pH seviyelerinde yükselmiş ve pH 8,5'ten 6,5'e düşürüldüğünde lipit asidi miktarında artış görülmüştür. Yapılan araştırma; sürekli kültür sisteminde yetiştirilen alglerin üretkenliğinin, mevcut diğer kültür sistemlerine (yığın kültürler (batch culture), yarı sürekli sistemler (semi-continuous culture, vb.) kıyasla daha yüksek olduğunu göstermiştir (James vd. 1988). Çalışma kapsamında elde edilen pH bilgilerinin bu çalışmada en iyi verimin elde edildiği pH aralıklarına göre daha yüksek olduğu görülmektedir.



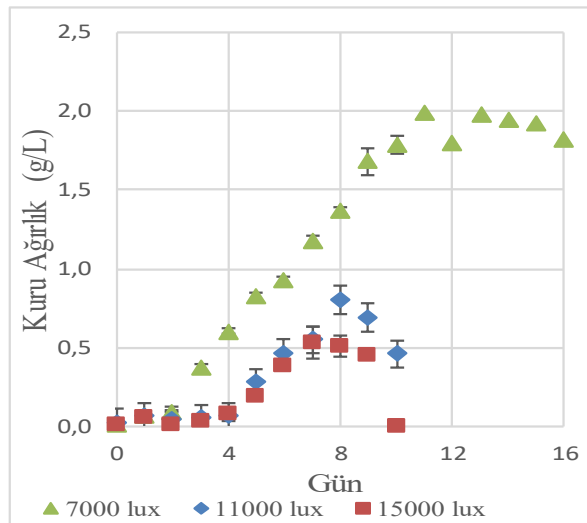
Şekil 4.2. Farklı aydınlatma şiddetlerinde fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerinin pH değerlerinin zamanla değişimi (%15 CO_2 +%3 O_2 +%82 N_2 ; 24 saat aydınlık)

%15 CO_2 içeren gaz karışımının kullanıldığı, 7 000, 11 000 ve 15 000 lux aydınlatma şiddetlerinin test edildiği SET-I deneyleri için fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerinin kuru ağırlık değerlerinin zamanla değişimi Şekil 4.3'te

verilmiştir. 7 000, 11 000 ve 15 000 lux aydınlatma şiddetleri için en yüksek kuru ağırlık değerleri sırasıyla 1,99 g/L, 1,61 g/L ve 0,45 g/L olduğu hesaplanmıştır. Mikroalg kültürünün 7 000 lux aydınlatma şiddeti altında daha iyi bir büyüme gösterdiği Şekil 4.3'te gözlemlenmektedir. 11 000 ve 15 000 lux aydınlatma şiddetleri altında *C. vulgaris* mikroalginde hızlı bir büyüme ve ölüm fazına daha kısa sürede geçiş olmuştur. Bu kısa süreden dolayı biyokütle oluşumundaki artış durmuştur. 7 000 lux aydınlatma şiddetinde yavaş bir büyüme gerçekleşmiş ve daha uzun sürede büyüme devam ettiği için biyokütle oranında artış olmuştur.

Montoya vd. (2014), *C. vulgaris* kültürünü %8 CO₂ derişiminde ototrofik tübüler bir fotobiyoreaktörde yetiştirerek maksimum mikroalg derişimini 6,8 g/L olarak elde etmişlerdir. %8 CO₂ derişiminde 6,8 g/L olarak elde ettikleri maksimum kuru ağırlık değerinin, %15 CO₂ derişiminde elde edilen 1,99 g/L oranına göre oldukça yüksek olması, yüksek CO₂ derişiminin büyüme oranını azaltıcı etki yaratması ile açıklanabilir.

Farklı bir çalışma kapsamında; farklı aydınlatma şiddetlerinde ($37,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} = 2\,775 \text{ lux}$, $62,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} = 4\,625 \text{ lux}$ ve $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} = 7\,400 \text{ lux}$) ve farklı aydınlatma sürelerinde (8:16 saat, 12:12 saat ve 16:8 saat aydınlık: karanlık) yetiştirilen *C. vulgaris*'in 2 775 lux ve 4 625 lux aydınlatma şiddetlerinde biyokütlerde artış olduğu, ancak 7 400 lux aydınlatma şiddeti altında yetiştirildiğinde biyokütlesinde azalma olduğu belirlenmiştir. Maksimum biyokütlenin 4 625 lux ve 16:8 aydınlatma süresinde $2,05 \pm 0,1 \text{ g/L}$ ve minimum biyokütlenin 2 775 lux'te ve 8:16 lik aydınlatma süresinde $0,6 \pm 0,07 \text{ g/L}$ olduğu belirtilmiştir (Khoeyi vd. 2012). 7 000 lux aydınlatma şiddetinde elde edilen 1,99 g/L biyokütle oranının Khoeyi vd. (2012) çalışma sonuçlarına göre daha az elde edilmesinin, aydınlatma sürelerindeki farklılıktan ve düşük (<7 000 lux) aydınlatma şiddetinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü 8 saatlik karanlık döngüde mikroalgler solunum reaksiyonları için fazla fotonlarını enerji kaynağı olarak kullanmaktadırlar. Bunun sonucunda 16 saat aydınlatma şiddetinde yeni baştan foton soğurmaları büyümeyi olumlu yönde etkilemekte ve büyümede artış gerçekleşebilmektedir.



Şekil 4.3. Farklı aydınlatma şiddetlerinde fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerinin kuru ağırlık değerlerinin zamanla değişimi (%15 CO₂+%3 O₂+%82 N₂; 24 saat aydınlık)

C. vulgaris mikroalginin yapısında bulunan klorofil a ve klorofil b pigmentleri fotosentez süresince görev almaktadırlar. Klorofil a mavimsi yeşil renkte iken, klorofil b sarımsı yeşil renkte olup, klorofil-a fotosentezin ışık reaksiyonunu başlatırken, klorofil b fotosentezde yardımcı pigment olarak rol almaktadır. Zayıf asidik ortamlarda, klorofilin yapısında yer alan Mg ayrılarak yerine hidrojenin gelmesiyle feofitinler⁴ oluşmakta ve klorofilin yeşil rengi bu noktada sarı-kirli yeşil renge dönüşmektedir. Bu nedenle; pH düşüklüğüne bağlı olarak klorofil değerlerinde de düşüş gözlemlenmektedir.

Fotosentetik hücrelerde soğurulan ışık miktarı optimum doygunluk seviyesini aştığı zaman adaptasyon işlemi bu noktada kritik bir hal alabilmektedir. Fotosentez süresince hücrelerde devam eden enerji akışını düşürmek amacıyla klorofil ve karotenoid gibi hücresel pigmentlerin içerik ve bileşimlerinde değişimler meydana gelmektedir. Karotenoidler, fotosentez esnasında fotonların yakalanması ve ışığın zararlı etkilerinden hücrenin korunması yönünden iki temel fonksiyona sahiptir (Kendirlioğlu 2012). Karotenoidler ayrıca, klorofiller gibi ışığın soğurularak klorofil a'ya aktarılması ve ışık ve O₂ karşısında klorofillerin parçalanmasının (fotooksidasyon) önlenmesinde önemli etki sağlamaktadır. Bunu yanında azot stresi altında karotenoidler kloroplast yüzeyinde birikim yapıp, alge turuncu-kırmızı rengini vererek, azot yetersizliğinin fiziksel yönde etkisinin bilinmesine yardımcı olmaktadır (Kendirlioğlu 2012). Bu nedenle ortamdaki büyümenin iyi olduğu koşullarda klorofil a ve klorofil b pigmentlerine göre karotenoidlerde paralel olarak değişim göstermektedir. Farklı aydınlatma şiddetlerinde fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerinin klorofil a, klorofil b ve karotenoid değerlerinin zamanla değişimi Şekil 4.4'te verilmiştir. Şekilden de 7 000 lux aydınlatma şiddetinde elde edilen en yüksek klorofil a, klorofil b ve karotenoid değerleri sırasıyla 98 µg/10 mL, 42 µg/10 mL ve 3,8 µg/10 mL olduğu görülmektedir.

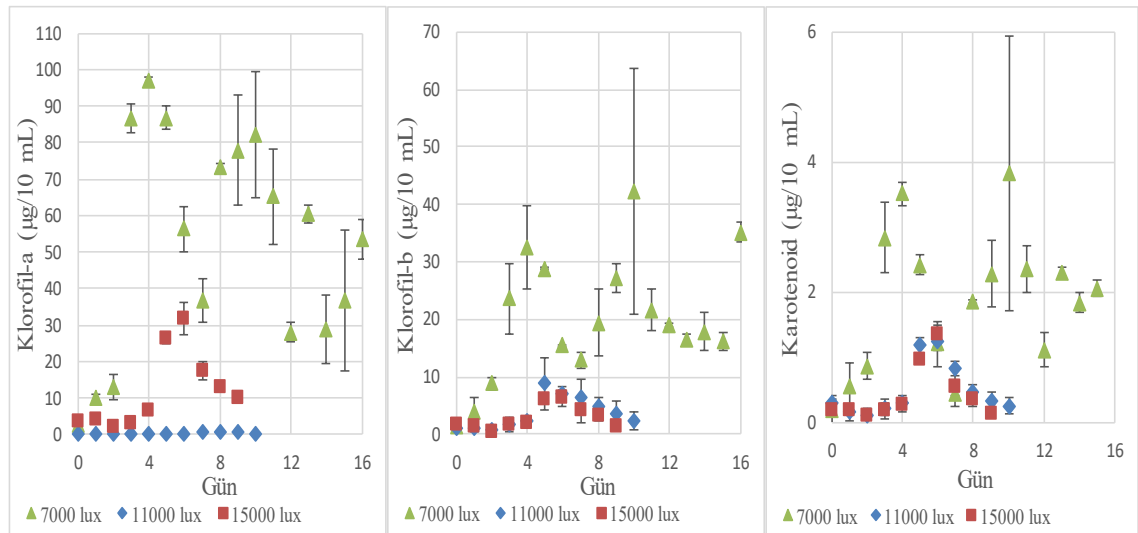
Kendirlioğlu vd. (2015) farklı aydınlatma sürelerinin (16:8, 17:7, 18:6, 19:5 ve 20:4 saat aydınlık:karanlık) *C. vulgaris* mikroalginin 2 000 lux aydınlatma şiddeti altındaki büyüme sürecinde hücre sayısı, klorofil ve protein miktarları üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sonuçlar, farklı aydınlık/karanlık periyotlarında kültürde önemli değişimler olduğunu göstermiştir. Buna göre; maksimum büyüme oranı 16:8 saat aydınlatma süresinde elde edilmiştir. Maksimum toplam klorofil (klorofil a ve klorofil b) ve protein miktarları ise sırasıyla 235, 53 ve 386, 5 µg/mL olarak 20:4 saatlik aydınlatma süresinde elde edilmiştir. Elde edilen maksimum toplam klorofil-a ve klorofil-b değerinin (235,53 µg/mL), çalışmada belirlenen toplam klorofil a ve klorofil b değerinden (140 µg/10 mL) yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak, yüksek CO₂ derişiminin ve yüksek aydınlatma şiddetinin pigment değerlerinin azalmasında olumsuz etki yarattığı düşünülmektedir.

Cirik vd. (2011), tek hücreli yeşil bir mikroalg türü olan *Dunaliella bardawil*'in, laboratuvar koşullarında farklı ışık uzunluklarına sahip cam panel fotobiyoreaktörlerde yetiştirmişlerdir. 1 700-1 800 lux aydınlatma şiddetinde, 1 cm, 3 cm ve 5 cm ışık yolu uzunluğuna sahip cam panel fotobiyoreaktörlerde deneyler yapılmıştır. Deneyler

⁴ Feofitin: Mg⁺²'nin parçalanması ile oluşan Mg⁺² içermeyen klorofil a ve b yapılarıdır. Bu nedenle klorofil analizi yapılırken eklenen MgCO₃ ilavesi ile pH'ın dengede kalması ve bu oluşumun önlenmesi sağlanır.

sonucunda en yüksek hücre sayısı ve en yüksek toplam karotenoid 1 cm ışık yolu uzunluğundaki fotobiyoreaktörde ulaşılmış ve karotenoid değeri 1,57 $\mu\text{g/mL}$ olarak belirlenmiştir. 3 ve 5 cm ışık yolu uzunluğuna sahip fotobiyoreaktörlerde ise toplam karotenoid değerlerinin sırasıyla 0,67 $\mu\text{g/mL}$ ve 0,77 $\mu\text{g/mL}$ olduğu belirlenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen karotenoid değeri (1,57 $\mu\text{g/mL}$), 7 000 lux aydınlatma şiddetinde elde edilen (3,8 $\mu\text{g/10mL}$) değere göre yüksektir. Düşük aydınlatma şiddetine kıyasla ışık yolunun azaltılması ile optimum ışık doygunluğunun sağlandığı ve klorofil a, klorofil b ve karotenoid gibi yüksek hassasiyete sahip pigmentlerin, düşük ışıktan dolayı yoğun foton enerjisine maruz kalmadıkları için daha yüksek pigment verimin elde edilebildiği düşünülmektedir. Fakat Şekil 4.4'teki grafikler incelendiğinde en iyi büyüme verimleri sağlanan 7 000 lux aydınlatma şiddetine kıyasla 15 000 lux altında daha iyi pigment değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Çünkü, sabit oranda yüksek CO_2 derişimi altında (%15), 15 000 lux gibi yüksek aydınlatma şiddetinde çalışılması, ışık doygunluğu ve optimum büyümeyi sağlayarak inhibe etkisi yaratmamıştır. 7 000 lux aydınlatma şiddetindeki deneylerde daha yüksek olan pigment değerlerinde görülen ölçüm farklılıklarının ise, değişen oranlarda fazla foton enerjisine karşı oldukça hassas yapıda olmaları ile açıklanabilir.

Kendirlioğlu vd. (2017), *C. vulgaris* türü ile 16: aydınlatma süresi altında, 23 ± 1 °C sıcaklıkta kırmızı, mavi, beyaz ve yeşil ışık altında çalışmışlardır. Deney sonunda en yüksek klorofil a ve klorofil b değerleri sırasıyla 0,241 mg/mL (241 $\mu\text{g/mL}$) ve 0,187 mg/mL (187 $\mu\text{g/mL}$) olarak yeşil ışık altında büyüyen alglerden elde edilmiştir. Beyaz, mavi ve kırmızı ışıktaki yetiştirilen kültürden elde edilen klorofil a ve klorofil b değerleri ise sırasıyla 0,164 mg/mL (164 $\mu\text{g/mL}$), 0,118 mg/mL (118 $\mu\text{g/mL}$) ve 0,092 (92 $\mu\text{g/mL}$) mg/mL olarak belirlenmiştir. Belirlenen klorofil a ve b değerleri, çalışmada elde edilen değerlere göre daha yüksektir. Yeşil ışığın mikroalg büyümesi üzerinde daha iyi klorofil değerleri elde edilmesinde etkili olduğuna dair çalışmalar mevcuttur (Mohsenpour vd. 2012).



Şekil 4.4. Farklı aydınlatma şiddetlerinde fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerinin klorofil a, klorofil b ve karotenoid değerlerinin zamanla değişimi (%15 CO_2 +%3 O_2 +%82 N_2 ; 24 saat aydınlık)

24 saatlik aydınlatma süresinde 7 000 lux aydınlatma şiddeti altında yetiştirilen *C. vulgaris* mikroalgine ait maksimum spesifik büyüme oranı ($\mu_{\max}$); maksimum mikroalg derişimi ($X_{\max}$) ve maksimum mikroalg üreme verimliliği ($P_{\max}$) olarak hesaplanan büyüme parametreleri Çizelge 4.1’te verilmiştir.

Çizelge 4.1. Farklı aydınlatma şiddetlerinde *C. vulgaris* mikroalg kültürü için belirlenen kinetik parametreler (%15 CO₂+%3 O₂+%82 N₂; 24 saat aydınlık)

Aydınlatma Şiddeti, lux	$\mu_{\max}$, 1/gün	$X_{\max}^*$, g/L	$P_{\max}$, g/L/gün	R_{CO_2} , g/L/gün
7 000	0,33	3,98	0,37	11,96
11 000	0,36	1,61	0,19	5,57
15 000	0,45	1,06	0,15	4,84

* $X_{\max}$: maksimum biyokütle derişimi, g (kuru ağırlık)/L

Morais ve Costa (2007) farklı fotobiyoreaktörlerde, 12 saat aydınlatma süresinde ve 3 200 lux aydınlatma şiddetinde, %0,038, %6, %12 ve %18 CO₂ derişimlerinde *Scenedesmus obliquus* (*S. obliquus*) and *Chlorella kessleri* ile deney yapmışlardır. Çalışmada *S. obliquus* için en iyi büyüme parametreleri %6 CO₂ derişiminde elde edilmiştir. Bu derişimde elde edilen maksimum spesifik büyüme oranı $0,261 \pm 0,020 \text{ gün}^{-1}$, maksimum mikroalg üreme verimliliği $0,085 \pm 0,002 \text{ g/L/gün}$ ve maksimum biyokütle derişimi $1,10 \pm 0,01 \text{ g/L}$ olarak belirlenmiştir. *Chlorella kessleri* için en iyi büyüme parametreleri %6 CO₂ derişiminde elde edilmiştir. Bu derişimde elde edilen maksimum spesifik büyüme oranı $0,267 \pm 0,013 \text{ gün}^{-1}$, maksimum mikroalg üreme verimliliği $0,98 \pm 0,01 \text{ g/L/gün}$ ve maksimum biyokütle derişimi $0,087 \pm 0,001 \text{ g/L}$ olarak belirlenmiştir. *Chlorella kessleri* için %6 CO₂ derişiminde elde edilen maksimum büyüme verimleri, %12 CO₂ derişiminde elde edilen verilerle oldukça yakın sonuçlarda bulunmuştur. Bu sonuçlar neticesinde yüksek CO₂ derişiminde mikroalg yetiştiriciliğinde *Chlorella kessleri* ‘nin kullanılması mümkün görülmektedir. SET-I deneyleri sonucunda 24 saat aydınlatma süresi ve 7 000 lux aydınlatma şiddeti altında maksimum spesifik büyüme oranı $0,33 \text{ gün}^{-1}$, maksimum mikroalg derişimi $3,98 \text{ g/L/gün}$ ve maksimum mikroalg üreme verimliliği $0,37 \text{ g/L/gün}$ olarak belirlenmiştir. Belirlenen değerlerin, Morais ve Costa (2007)’in çalışmalarında *Chlorella kessleri*nde, %6 CO₂ derişiminde elde ettikleri maksimum kinetik parametre değerlerine kıyasla daha yüksektir. Bunun sebebi olarak, 12 saatlik aydınlatma süresine göre yüksek (%6) CO₂ derişiminin büyümeyi azaltıcı etki yarattığı düşünülmektedir.

Lam ve Lee (2012) tarafından *C. vulgaris* mikroalginin kültür ortamındaki başlangıç pH’sının etkisini göstermek amacıyla yapılan bir çalışmada; pH 4 ($0,27 \text{ gün}^{-1}$), pH 5 ($0,27 \text{ gün}^{-1}$) ve pH 8’de ($0,26 \text{ gün}^{-1}$), nötr koşulda (pH 7) ($0,23 \text{ gün}^{-1}$) kültür büyümesine kıyasla daha yüksek spesifik büyüme hızına ulaşıldığı tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, *C. vulgaris*’in büyümesinin pH 6, 7 ve 9’da iyi bir gelişme göstermesine rağmen, 1. günden 4. güne kadar bir gecikme fazı gözlemlenmiş ve maksimum $0,33 \text{ g/L}$ biyokütle derişimi elde edilerek 9. günden 12. güne kadar büyümenin hemen hemen durgun bir seyirde devam ettiği belirtilmiştir. Lam ve Lee (2012) tarafından pH 6, 7 ve 9’da elde edilen $0,33 \text{ g/L}$ maksimum biyokütle derişimine göre, pH 4,38-6,04 aralığında elde edilen $3,98 \text{ g/L}$ maksimum biyokütle derişiminin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. pH 4 ve pH 5 değerlerinde elde edilen $0,27 \text{ gün}^{-1}$ maksimum spesifik

büyüme hızına göre, çalışmada belirlenen $0,37 \text{ gün}^{-1}$ değerinde yüksek olduğu görülmektedir. Burada pH değerlerindeki farklılığın büyüme verimini nasıl etkilediği görülmektedir.

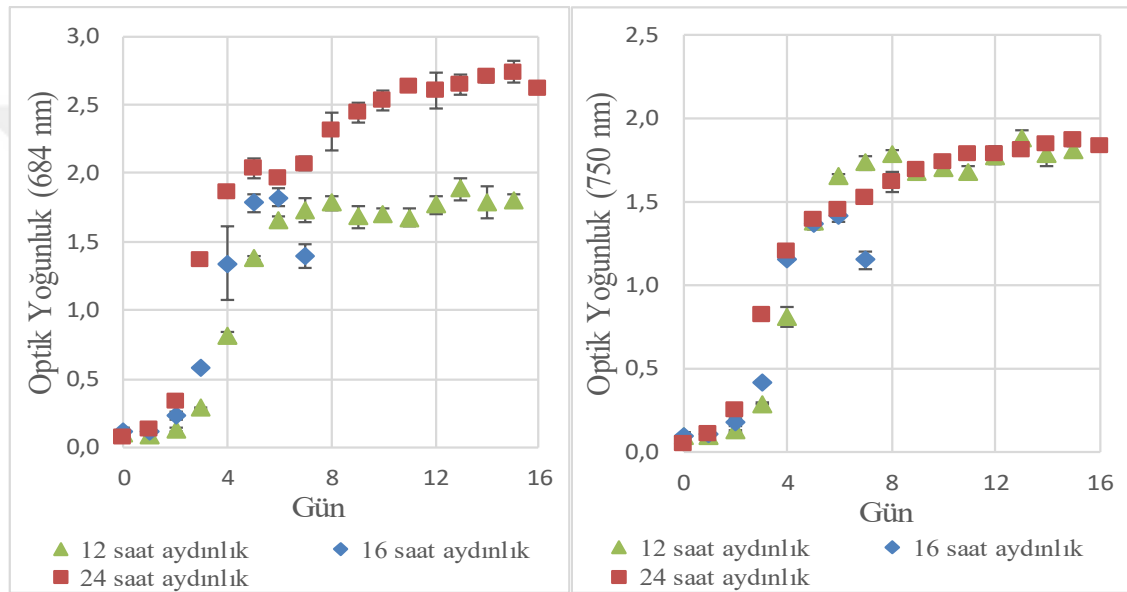
Hu vd. (2016) on ayrı *C. vulgaris* suşu ile %10 CO₂ derişimi altında yaptıkları çalışmada en yüksek biyokütle konsantrasyonunun $0,81 \text{ g/L}$ ile *C. vulgaris* ESP-6 suşunda elde edildiğini ve en az verimli *C. vulgaris* saccharophila FACHB-4 suşundan %44 daha yüksek biyokütle konsantrasyonu elde edildiğini göstermiştir. On *C. vulgaris* suşu arasında dört suş *C. vulgaris* ESP-6 ($0,81 \text{ g/L}$), FACHB-752 ($0,75 \text{ g/L}$), FACHB-729 ($0,71 \text{ g/L}$) ve FACHB-484 ($0,70 \text{ g/L}$) den elde edilen biyokütle konsantrasyonları diğer türlerden önemli ölçüde daha yüksek verimde sağlanmıştır (Hu vd. 2016). Hu vd. (2016), %10 CO₂ derişiminde $0,81 \text{ g/L}$ oranında maksimum biyokütle derişimi elde etmişlerdir. Elde edilen verinin yüksek CO₂ (>%10 CO₂) derişiminde ($3,98 \text{ g/L}$) biyokütle derişimine kıyasla daha az olduğu değerde görülmektedir.

4.2. Aydınlatma Süresinin Mikroalg Biyokütle Büyüme Verimine Etkisi

SET-II deneyleri kapsamında fotobiyoreaktöre %15 CO₂ içeren gaz karışımı (%15 CO₂+ %3 O₂+ %82 N₂) 7 000 lux ışık akısı altında sisteme verilmiş ve 12 saat, 16 saat ve 24 saat aydınlatma sürelerinin mikroalg kültürünün büyümesi üzerine etkisi incelenmiştir. %15 CO₂ içeren gaz karışımının kullanıldığı, 12 saat, 16 saat ve 24 saat aydınlatma sürelerinin test edildiği deneyler için fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerinin OD değerlerinin zamanla değişimi Şekil 4.5’de verilmiştir. Kültürün başlangıç OD değerleri 684 nm dalga boyunda 12 saat, 16 saat ve 24 saat aydınlatma süreleri için sırasıyla 0,10, 0,12 ve 0,10 olarak ölçülmüş ve 2 gün boyunca kültürün OD değerlerinde ciddi bir artış görülmemiştir. Bu süre mikroalg kültürü için %15 CO₂ içeren gaz karışımına adaptasyon süresi olarak değerlendirilmiştir. İki günlük adaptasyon süresinin ardından mikroalg kültürü popülasyonu artmaya başlamıştır. En yüksek OD değerlerine 12 saat, 16 saat ve 24 saat aydınlatma süreleri için sırasıyla 13., 6. ve 15. günde ulaşılmıştır. 12 saat, 16 saat ve 24 saat aydınlatma süreleri için 684 nm dalga boyunda ölçülen en yüksek OD değerleri sırasıyla 1 885, 1 819 ve 2 738, 750 nm dalga boyunda ölçülen en yüksek OD değerleri ise sırasıyla 1 566, 1 416 ve 1 871 olmuştur. Deney sonuçlarına göre 7 000 lux aydınlatma şiddeti altında en iyi büyümenin 24 saat sürekli aydınlatma süresinde gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Nautiya vd. (2014), normal hava ortamında 2 000 lux aydınlatma şiddetinde ve $25 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ’de *Spirulina*, *Chlorella* ve havuz suyu algi ile yaptıkları çalışma sonucunda elde ettikleri maksimum biyokütle oranlarının sırasıyla *Chlorella* için $1,35 \text{ g/L}$, *Spirulina* için $0,94 \text{ g/L}$ ve havuz suyu algi için $0,82 \text{ g/L}$ olduğu belirtmişlerdir. Nautiya vd. (2014) çalışma sonuçlarına göre maksimum biyokütle veriminin ($1,35 \text{ g/L}$) sağlandığı aydınlatma şiddeti ile çalışmada belirlenen maksimum biyokütle veriminin ($1,99 \text{ g/L}$) arasında ciddi bir fark gözlenmemiştir. Nautiya vd. (2014) hem düşük aydınlatma şiddeti hemde düşük CO₂ derişiminde çalıştıkları için optimum büyüme sağlandıkları düşünülmektedir. Aynı şekilde, yapılan çalışmalar sonucunda yüksek aydınlatma şiddetine paralel olarak (7 000 lux) yüksek CO₂ derişiminde (%15) çalışılmasıyla optimum büyüme veriminin sağlandığı, inhibe etkisinin azaltıldığı ve yakın biyokütle değerlerinin elde edildiği tahmin edilmektedir.

Wong vd. (2016), farklı tür fotobiyoreaktörlerde (kabarcıklanma, hava kaldırma, gözenekli hava kaldırma) kullanılarak *C. vulgaris* mikroalgini, biyokütle ekimi ve lipit üretimini incelemek için 9 000 lux aydınlatma şiddetinde ve normal hava koşulları altında 16:8 aydınlatma süresinde yetiştirmişlerdir. Yetiştirme sonuçlarına göre elde edilen Kabarcıklı PBR'deki maksimum biyokütle konsantrasyonu 0,78 g/L iken, hava kaldırmalı PBR'nin değeri 0,09 g/L olarak belirlenmiştir. Wong vd. (2016), çalıştıkları yüksek aydınlatma şiddetine kıyasla oldukça düşük CO₂ derişiminde çalışmalarında, 16 saatlik aydınlatma süresinin optimum ışık yoğunluğunun elde edilememesinden dolayı büyüme üzerinde olumsuz etki yarattığı ve buna bağlı olarak belirlenen maksimum biyokütle değerinin de oldukça düşük olduğu görülmektedir. 7 000 lux altında iyi bir büyüme sağlanması ile elde edilen 1,99 g/L maksimum biyokütle oranının çok daha fazla olduğu görülmektedir.

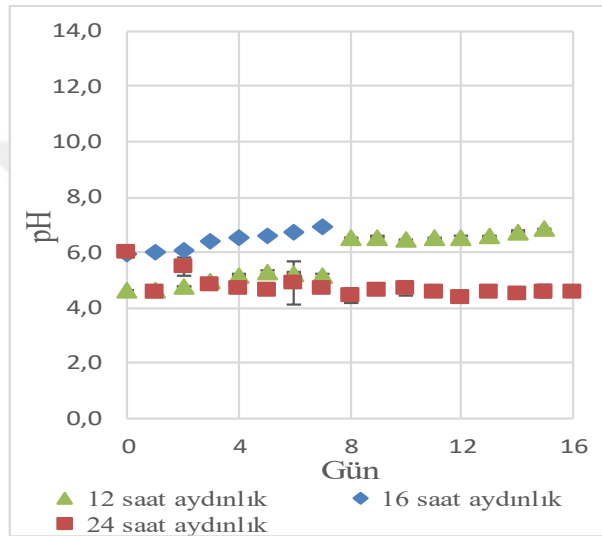


Şekil 4.5. Farklı aydınlatma sürelerinde fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerinin OD değerlerinin zamanla değişimi (%15 CO₂+%3 O₂+%82 N₂; 7 000 lux)

Şekil 4.6'de görüldüğü üzere; %15 CO₂ derişimi ve farklı aydınlatma süreleri altında (12:12, 16:8 ve 24:0 aydınlık/karanlık) yapılan deneyler süresince ölçülen pH değerleri; 12 saat aydınlıkta 4,62– 6,83, 16 saat aydınlıkta 5,97– 6,90 ve 24 saat aydınlıkta 6,04– 4,54 aralığında değişim göstermiştir.

Daliry vd. (2017) *C. vulgaris*'ten biyoyakıt elde etmek amacıyla yaptıkları çalışmada biyokütle ve lipit açısından en iyi verimi sağlayan yetiştirme parametrelerini incelemişlerdir. pH 9-10 aralığında, 16 saat aydınlatma süresinde, 5 000 ile 7 000 lux aydınlatma şiddeti ve 200 mL/dk havalandırma debisinde en iyi fiziksel koşulların sağlandığını belirlemişlerdir. Daliry vd (2017), en iyi büyümenin pH 9-10 aralığında olduğunu bildirmiş, fakat çalışmada en iyi büyümenin pH 6,04– 4,54 aralığında olduğu belirlenmiştir. Çalışmaya göre farklı aydınlatma sürelerinin ve gaz akış oranlarının pH seviyelerinde farklılık yarattıkları ve bu yüzden verilerde uyuma sağlanmadığı düşünülmektedir.

Khalil vd. (2010), *Dunaliella bardawil* and *Chlorella ellipsoidea* türlerinin büyümeleri üzerinde pH'ın etkisini incelemek amacıyla normal hava derişiminde ve 5 772 lux aydınlatma şiddeti altında çalışmışlardır. Çalışma sonucunda *Dunaliella bardawil* 'in pH 4-9 ve *Chlorella ellipsoidea* 'nın pH 4-10 olarak geniş bir aralıkta büyüebildikleri görülmüştür. Fakat *Dunaliella bardawil* 'in en yüksek kuru ağırlık değeri pH 7.5'te, *Chlorella ellipsoidea* 'nın maksimum kuru ağırlık değeri ise alkali pH değerlerinde (10-10,5) elde edilmiştir. Khalil vd. (2010), çalışmaları sonucunda elde edilen pH değerlerinin 7-10 aralığında olduğu bilgisi ile en iyi verim sağlanan pH aralığının uyuşmadığı görülmektedir. Düşük CO₂ derişimi ve düşük aydınlatma şiddetinde (<7 000 lux) iyi bir büyüme sonucunda ortamdaki çözünmüş karbon oranının azalmasıyla pH değerinin alkali seviyelere çıktığı düşünülmektedir.



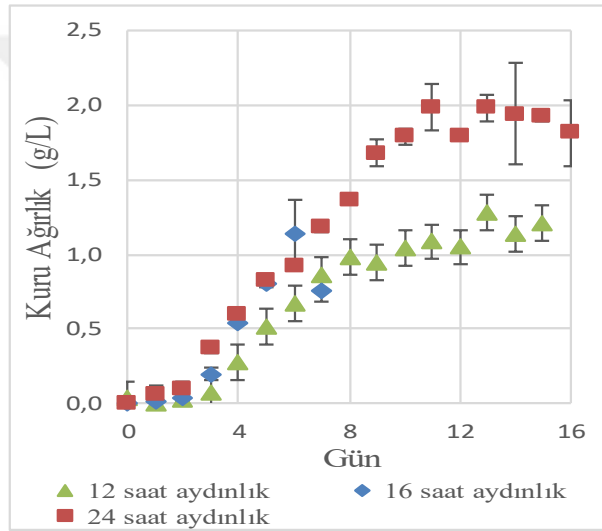
Şekil 4.6. Farklı aydınlatma sürelerinde fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerinin pH değerlerinin zamanla değişimi (%15 CO₂+%3 O₂+%82 N₂; 7 000 lux)

%15 CO₂ içeren gaz karışımının kullanıldığı, 12 saat, 16 saat ve 24 saat aydınlatma sürelerinin test edildiği deneyler için fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerinin kuru ağırlık değerlerinin zamanla değişimi Şekil 4.7'de verilmiştir. 12 saat, 16 saat ve 24 saat aydınlatma süreleri için başlangıç kuru ağırlık değeri 0,01 g/L'dir. 12 saat aydınlatma süresinde 13. günün sonunda alg kültürü derişimi yaklaşık 130 kat artarak en yüksek seviyesine (1,28 g/L) ulaşmıştır. 16 saat aydınlatma süresinde ise en yüksek derişim (1,14 g/L) 6. günün sonunda elde edilmiştir. Bu değer 24 saat aydınlatma süresinde 11. günde 1,99 g/L (başlangıç kuru ağırlık değerine oranla yaklaşık 200 kat artışla) olarak belirlenmiştir.

12 saat aydınlatma süresi boyunca 13 468 lux (182 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) aydınlatma şiddetinde yetiştirilen *C. vulgaris* mikroalginin kuru ağırlık değeri 0,27 g/L olarak hesaplanmıştır (Scarsella vd. 2010). Scarsella vd. 2010, 12 saatlik aydınlatma süresinde 13 468 lux altında 0,27 g/L kuru ağırlık oranı elde etmişlerdir. En iyi verim sağlanan 24 saat sürekli aydınlatmada ve 7 000 lux aydınlatma şiddetinde belirlenen 1,99 g/L değerine göre düşük olduğu görülmektedir. 12 saatlik aydınlatma periyoduna göre aydınlatma şiddetinin yüksek olması, aydınlatma süresinin kısa olması ile foton enerjisinin düşük

seviyede kalmasının fotosentetik gelişimi inhibe ettiği ve biyokütle verimini azalttığı düşünülmektedir.

Rendon vd. (2013), *C. vulgaris*'in beyaz, mavi, kırmızı ve kırmızı-mavi ışıklar altında %0,04 CO₂ derişimi ile başlayıp, %8,5'e yükselen CO₂ derişimleri altında ve 7 622 lux aydınlatma şiddetinde büyümesini incelemişlerdir. Tüm ışık kaynakları altında artan CO₂ derişimine paralel olarak biyokütle üretiminde de artış görülmüştür. Maksimum biyokütle üretimi (1,59 g/L) %8.5 CO₂ derişiminde beyaz ışık altında elde edilmiştir. Sırasıyla , kırmızı ve kırmızı+mavi ışık altında biyokütle üretimi sırasıyla 1,53 /L, 0,45 g/L ve 1,27 g/L olarak belirlenmiştir. Rendon vd. (2013), çalışmalarında elde ettikleri 1,59 g/L oranındaki biyokütle değerinin 1,99 g/L değerinden düşük olduğu görülmektedir. Birbirine yakın aydınlatma şiddetlerine rağmen, benzer aydınlatma şiddetlerine kıyasla çalışmada yüksek CO₂ derişiminin (>%8,5) olduğu ortamda daha iyi bir büyüme verimi sağlandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.7. Farklı aydınlatma sürelerinde fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerinin kuru ağırlık değerlerinin zamanla değişimi (%15 CO₂+%3 O₂+%82 N₂; 7 000 lux)

Sung vd. (1998) *C. vulgaris* KR-1 türünü %10 ile %70 arasında değişen farklı derişim oranlarında CO₂ ile 25 °C' de, 24 saat aydınlatma süresinde 14 800 lux (200 µmol m⁻² s⁻¹) aydınlatma şiddetinde çalışmışlardır. Maksimum büyüme oranı %10 CO₂ içeren kültürde bulunmuş, ancak yüksek büyüme oranları ve hücre konsantrasyonları %30 ve %50 CO₂ derişimlerinde de devam etmiştir. Ayrıca, mikroalg büyümesinde adaptasyon süresinin daha yüksek CO₂ derişimleri altında daha uzun sürdüğü gözlemlenmiştir. %70 CO₂ derişiminde büyüme oranının çok az olmasına rağmen, büyümenin devam ettiği ve 6. günün sonunda 0,71 g /L' ye ulaştığı; bu değer başlangıç hücre biyokütlesine göre yedi kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlardan yola çıkarak; *C. vulgaris* KR-1'in yüksek CO₂ derişimlerine karşı oldukça dayanıklı bir yapıya sahip olduğu gösterilmiştir. %10 CO₂ ile kültürlen KR-1'in doğrusal büyüme oranı yaklaşık 1,15 g/L/gün den 6 günlük kültivasyonun sonunda 5,7 g/L'ye ulaşması da *C. vulgaris* sp'nin yüksek yoğunluklu kültür için uygun olduğunu ortaya koymuştur. Sung vd. (1998) sonuçlarının 6. günün sonunda %10 CO₂ derişimi için 5,7 g/L seviyesine çıkması,

deneyler sonucunda elde edilen büyüme değerlerinin üstündedir. Bu duruma sebep olan etkenin *C. vulgaris* KR-1 türünün laboratuvar ortamında izole edilmesi olabilir.

%15 CO₂ içeren gaz karışımının kullanıldığı, 12 saat, 16 saat ve 24 saat aydınlatma sürelerinin test edildiği deneyler için fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerinin klorofil değerlerinin zamanla değişimi Şekil 4.8’de verilmiştir. Pigment tarafından soğurma, ışık spektrumunun belirli kısımlarında daha yoğun olmaktadır. Pigmentin maksimum absorbans aralığı içinde bir dalga boyunun seçilmesinde, en büyük sinyali vermesi beklenir, ancak aynı zamanda hücrelerin pigment içeriği değiştiğinde en büyük hatayı da yine seçilen bu dalga boyu aralığında vermektedir. Healey (1975), yaptığı bir çalışma kapsamında; klorofil-a’nın kuru ağırlığa oranlarının tür kompozisyonundaki, sıcaklıktaki, besleyicideki ve ışık mevcudiyetindeki değişikliklerle 30 kattan fazla değiştiğini bildirmiştir. Deneylerimizde elde ettiğimiz pigment verileri bu görüşü doğrular niteliktedir. Büyüme parametrelerinde mikroalg gelişim fazlarına göre elde edilen veriler, klorofil a, klorofil b ve karotenoid değerlerinde görülememiştir. Fotobiyoreaktörde sıcaklık ayarı olmasına rağmen ısı değişimi olabilmekte ve gaz derişimleri değişim gösterebilmektedir. Bunların etkisiyle hassas olan pigmentlerin yapısında olan değişikliklerin, diğer parametrelere kıyasla daha çok etkilendiği ve değişim gösterdiği düşünülmektedir.

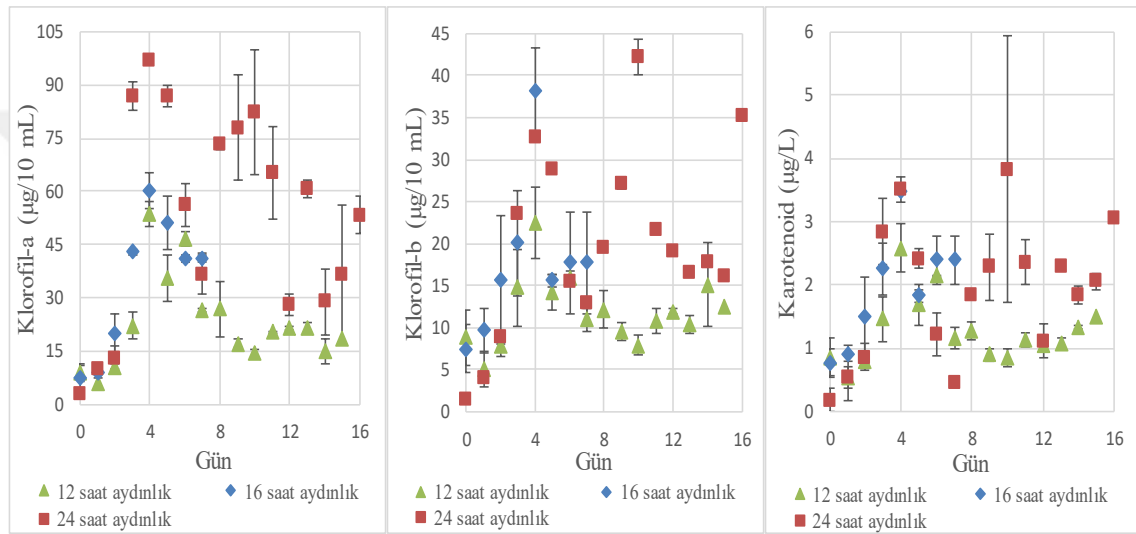
%15 CO₂ derişimi, farklı aydınlatma süreleri altında (12:12, 16:8 ve 24:0 aydınlık/karanlık) ve 7 000 lux aydınlatma şiddetinde yapılan deneyler süresince ölçülen maksimum klorofil a ve klorofil b ve karotenoid değerleri Şekil 4.4’teki verilerle aynı ölçüm değerlerinde oldukları (sırasıyla 96,8 µg/10mL (9,68 mg/L), 42,2 µg/10mL (4,22 mg/L) ve 3,8 µg/10 mL (0,38 mg/L)) gözlenmiştir (Şekil 4.8).

Ak vd. (2019) çalışmalarında temel hedef olarak tasarladıkları FBR sisteminde yetiştirdikleri *C. vulgaris* sp. mikroalginin hücre büyümesi ve pigment miktarını belirlemek amacıyla %0,04 CO₂ derişiminde üç ayrı grupta deneyler yapmışlardır. Çalışmada sisteme verilen hava ile daha küçük kabarcıklar oluşturmak için borunun çıkışında çapı küçülen L şeklinde cam borularla havalandırma yapılmıştır. Aydınlatma süresinin *C. vulgaris* sp.’nin büyümesine olan etkisini görmek amacıyla; 24 saat aydınlatma süresinde birinci grup deneylerinde difüzörlü, ikinci grup deneylerinde difüzör olmadan ve üçüncü grup deneylerde ise difüzörlü olarak 12 saat aydınlık-12 saat karanlıkta alg yetiştirilmiştir. 1, 2 ve 3. grup deneylerin kuru ağırlıkları sırasıyla; 3751,2 mg/L, 4360,8 mg/L ve 4002,85 mg/L olarak belirlenmiştir. Birinci grup deneylerinde klorofil-a değeri 3,96 mg/L, klorofil-b değeri 0,87 mg/L ve karotenoid değeri 5,48 mg/L olarak; ikinci grup deneylerinde klorofil-a değeri 8,67 mg/L, klorofil-b değeri 2,10 mg/L ve karotenoid değeri 3,30 mg/L olarak; üçüncü grup deneylerinde ise klorofil-a değeri 15,90 mg/L, klorofil-b değeri 2,80 mg/L ve karotenoid değeri 6,40 mg/L olarak belirlenmiştir. Yine birinci, ikinci ve üçüncü deneyler sonucunda spesifik büyüme hızları sırasıyla; 0,01 s⁻¹, 0,01 s⁻¹ ve 0,01 s⁻¹ olarak belirlenmiştir. En yüksek pigment kapasitesi (mg/L) ve kuru ağırlık değerleri (mg/L) üçüncü deney sonuçlarında ulaşılmıştır.

Hu vd. (2016) %10 CO₂ altında, pH 7,8 değerinde ve 4 070 lux aydınlatma şiddetinde, 12:12 aydınlatma süresinde yetiştirilen on farklı *C. vulgaris* suşlarına ait klorofil-a verileri içerisinde en yüksek derişimin *FACHB-729* (*C. vulgaris regularis* var.*minima*), *FACHB-484* (*C. vulgaris* sp.), *FACHB-752* (*C. vulgaris* 64.01) ve *ESP-6* (*C. vulgaris*) kültürleri için sırasıyla 6,67 mg/L, 5,42 mg/L, 4,20 mg/L ve 4,05 mg/L

olduğunu belirlemişlerdir. Hu vd. (2016) çalışmalarında elde edilen pigment değerlerinin daha fazla olmasının sebebinin, yüksek CO₂ derişimine kıyasla (%10) pH'ın 7,8 seviyesinde olması ve büyümeyi inhibe etmemesi düşünülmektedir.

Ak vd. (2019) çalışmaları sonucu elde edilen maksimum klorofil a, klorofil b ve karotenoid değerlerinin (sırasıyla 15,90 mg/L, 2,80 mg/L ve 6,40 mg/L), çalışma kapsamında belirlenen değerlere göre (sırasıyla 9,68 mg/L, 4,22 mg/L ve 0,38 mg/L) oldukça yüksek oldukları görülmektedir. 12:12 aydınlatma süresinde ve normal hava koşullarında daha iyi verimde pigment elde edilmesinde küçük çaplı kabarcıkların optimum büyümeyi sağladığı düşünülmektedir. Çalışmada %15 CO₂ derişimine bağlı olarak düşük seviyede değişen pH aralıklarından dolayı oldukça hassas yapıda olan pigment değerlerinde analizlerin değişkenlik gösterdiği düşünülmektedir.



Şekil 4.8. Farklı aydınlatma sürelerinde fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerinin klorofil-a ve klorofil-b ve karotenoid değerlerinin zamanla değişimi (%15 CO₂+%3 O₂+%82 N₂; 7 000 lux)

SET-II kapsamında yapılan deney sonuçlarına ait büyüme parametreleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. En iyi verim sağlayan 24 saat aydınlatma süresinde elde edilen maksimum spesifik büyüme oranı (μ_{max}) 0,45 gün⁻¹ değeri, maksimum biyokütle derişimi 3,98 g/L ve maksimum biyokütle üremem verimliliği 0,19 g/L/gün olarak elde edilmiştir.

Pires vd. (2013) *C. vulgaris* ve *P. subcapitata* kültürleri için maksimum spesifik büyüme oranı (μ_{max}); maksimum biyokütle derişimi (X_{max} , g (kuru ağırlık)/L) ve maksimum mikroalg üreme verimliliği (P_{max} , g (kuru ağırlık)/L/gün) gibi ana kinetik parametrelerini, farklı aydınlatma şiddetleri (2 664 lux (36 $\mu E m^{-2} s^{-1}$)⁵, 5 328 lux (72 $\mu E m^{-2} s^{-1}$), 7 104 lux (96 $\mu E m^{-2} s^{-1}$) ve 9 324 lux (126 $\mu E m^{-2} s^{-1}$) ve farklı aydınlatma sürelerinde 10:14, 14:10, and 24:0 (aydınlık/karanlık), %0,04 CO₂ derişimi altında incelemişlerdir. Maksimum spesifik büyüme oranına, 7 104 lux aydınlatma şiddeti ve 24

⁵ 1 $\mu E m^{-2} s^{-1}$ = 54 lux (Gün ışığı varlığında), 1 $\mu E m^{-2} s^{-1}$ = 74 lux (Beyaz floresan ışık varlığında)

1 $\mu E m^{-2} s^{-1}$ = 1 $\mu mol m^{-2} s^{-1}$ (Anonim 8)

saat aydınlatma süresinde $0,74 \text{ gün}^{-1}$ değeriyle *C. vulgaris* ile ulaşılmıştır. *P. Subcapitata* için ise, maksimum biyokütle derişimi 14 saat aydınlatma süresi ve $7\,104 \text{ lux}$ aydınlatma şiddeti için $0,82 \text{ g/L}$ (kültürün başlangıç derişiminin 10 kat fazlası) olarak tespit edilmiştir (Pires vd. 2013). Pires vd. (2013) sonuçlarına göre elde edilen maksimum biyokütle derişiminin daha düşük olduğu görülmektedir. Benzer aydınlatma şiddeti ve aydınlatma süresine rağmen oldukça yüksek farktaki CO_2 derişimlerine göre kıyas yapıldığında, yüksek CO_2 derişiminin (%15) *C. vulgaris* için iyi bir büyüme sağladığı görülmektedir.

Kao vd. (2014) çalışmalarında bir çelik fabrikasında bir kok fırınından, sıcak ocaktan ve elektrik santralinden çıkan baca gazları kullanarak açık ve kapalı sistemlerde mikroalg yetiştirme parametreleri incelenmiştir. Kapalı fotobiyoreaktörlerde *Chlorella sp. MTF-15* suşu yetiştirip, algal biyokütle ve lipit verimliliğini incelemişlerdir. Fotobiyoreaktörde aydınlatma şiddeti $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ($22\,200 \text{ lux}$) beyaz ışıktaki, $26 \pm 1^\circ\text{C}$ 'de deneyler gerçekleştirilmiştir. %3, 6, 12,5 ve 25 CO_2 derişimleri altında yapılan deneylerde, kültürünün başlangıç biyokütle konsantrasyonu yaklaşık olarak 0.3 g L^{-1} olarak belirlenmiş ve her 24 saatte bir örnekleme yapılmıştır. Gaz, fotobiyoreaktörün altından 0.2 vvm 'lik bir havalandırma hızıyla sağlanmıştır. Açık sistemlerde ise, %04 ve %25 CO_2 derişiminde *Chlorella sp. MTF-15* yetiştirilmiştir. Toplam çalışma hacmi (24 fotobiyoreaktör) 1200 L , her bir fotobiyoreaktör hacmi 50 L olarak belirlenmiştir. Açık sistemlerde %04 ve %25 CO_2 derişiminde maksimum biyokütle verimi sırasıyla $0,938$ ve $1\,458 \text{ g L}^{-1}$ olmuştur. Kapalı sistemlerde ise maksimum biyokütle verimi sırasıyla $2\,523$, $1\,680$ ve $1\,872 \text{ g L}^{-1}$ olmuştur. Ayrıca maksimum %25 CO_2 ile havalandırılan kültürde büyüme hızı ve spesifik büyüme hızı sırasıyla $0,26 \text{ g L}^{-1}\text{gün}^{-1}$ ve $0,49 \text{ gün}^{-1}$, hava ile havalandırılan kültürde $0,13 \text{ g L}^{-1} \text{ gün}^{-1}$ ve $0,24 \text{ gün}^{-1}$ olarak belirlenmiştir. Deneyler sonucunda, aynı tür ile farklı baca gazları altında, açık sistemlere kıyasla kapalı sistemlerde daha yüksek büyüme verimleri elde edilmiştir. Kao vd. (2014), yüksek çalışma hacimleri, yüksek aydınlatma şiddeti ve yüksek CO_2 derişimleri altında elde ettikleri verilerin genel olarak olması gereken yüksek verimlilik sağladıkları yönünde net bir yorum yapılamamaktadır. Çünkü $7\,000 \text{ lux}$ ve %15 CO_2 derişiminde yapılan çalışmaya göre (Çizelge 4.2) daha yüksek değerlerde spesifik büyüme hızının elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 4.2. Farklı aydınlatma sürelerinde *C. vulgaris* mikroalg kültürü için belirlenen kinetik parametreler (%15 CO_2 +%3 O_2 +%82 N_2 ; $7\,000 \text{ lux}$)

Aydınlatma Süresi, saat	$\mu_{\text{max}},$ 1/gün	$X_{\text{max}},$ g/L	$P_{\text{max}},$ g/L/gün	$R_{\text{CO}_2},$ g/L/gün
12	0,29	1,28	0,12	3,95
16	0,45	1,14	0,19	5,90
24	0,45	3,98	0,19	10,26

4.3. CO_2 Derişiminin Mikroalgal Biyokütle Büyüme Verimine Etkisi

Fototrofik mikroalgler (ki en iyi örneklerden biri olarak *C. vulgaris* mikroalg verilebilir), fotosentez prosesinin gerçekleşebilmesi için karbon kaynağının tedarikini ve biyokimyasal olarak bir nihai ürün oluşumunu sağlamaktadırlar. Bu noktada optimum gelişim göstermeleri ise, ortamda yeterli miktarda çözünmüş madde bulunmasına bağlıdır. Çözünmüş madde miktarının optimal seviyeye yükselmesiyle birlikte,

mikroalglerin gelişebilmeleri ve buna bağlı olarak lipit üretme kapasitelerinde artış oranı da yükselmektedir. Sisteme verilen gazın ortamda sağladığı türbülans etkisi ortamdaki mikroalglerin çözünmüş maddeleri, verilen gazları ve ışığı eşit alabilmelerine imkan sağladığı için gelişmeyi olumlu yönde etkileyici unsur olarak ortaya çıkmaktadır. Fakat ortamdaki gaz miktarının yüksek seviyelere çıkması büyümeyi inhibe edici bir etki yaratmaktadır. Bunun nedeni olarak, kültür içerisinde kullanılmayan CO₂'nin karbonik aside (H₂CO₃) dönüşmesi ve buna bağlı olarak kültürün pH değerinin düşmesi öne sürülebilir (Zhu vd. 2016; Sibi vd. 2016). Bu nedenle, en iyi verim alınacak şekilde gelişmiş biyokütle ve lipit üretiminin elde edilebilmesi için optimum seviyelerde CO₂ ve çözünmüş madde miktarının sağlanabilmesi gerekmektedir.

SET-III kapsamında yapılan deneylerde 7 000 lux aydınlatma şiddetinde, sürekli aydınlatma ile en iyi verimi sağlayan CO₂ derişiminin tespitine yönelik hacimce 400 ppm, %15 ve %90 CO₂ içeren gaz karışımları altında deneyler gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.10). Literatür çalışmalarında belirtilen optimum CO₂ derişimlerinin (Hu vd., 2016; Kitaya vd. 2005; Morais ve Costa 2007; Sung vd. 1998) oldukça üst sınırında olan %90 CO₂ derişiminin büyümeyi inhibe edici bir etki yarattığı görülmüştür. %90 CO₂ derişiminde 3 gün boyunca deneye devam edilmiş, fakat hücreler sağlıklı bir yeşil renge dönüşmek yerine OD değerlerinin 0,08 seviyelerinde kalması nedeniyle büyümenin inhibe olmasından dolayı saf suya yakın bir renge dönüşmüş ve bu durumda deneye son verilmiştir. Şekil 4.9'da %90 CO₂ derişimini altındaki mikroalgin fotobiyoreaktördeki son durumuna ait görseli verilmektedir. SET-III kapsamında yapılan 3 deney arasında en iyi büyüme verimi %15 CO₂ derişiminde elde edilmiştir.



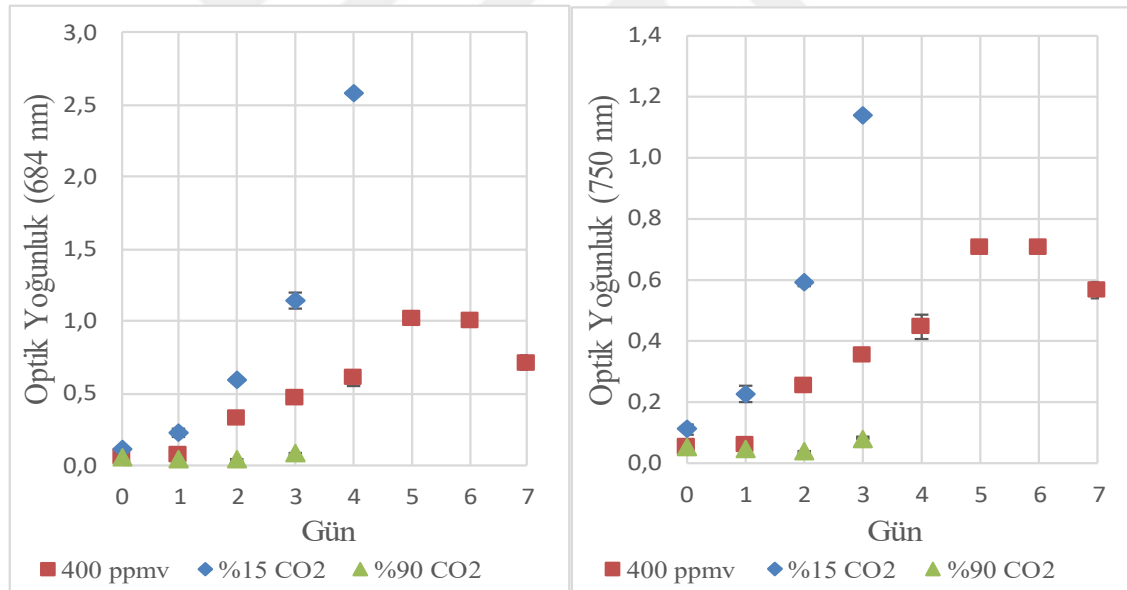
Şekil 4.9. %90 CO₂ derişiminde inhibe olan mikroalglere ait görsel

Kitaya vd. (2005), sıcaklığın etkilerini araştırdıkları çalışmaları kapsamında mikroalglerin hücresel çoğalmasında CO₂/O₂ derişimleri ve aydınlatma şiddetini incelemişlerdir. Mikroalgleri, 25°C ile 33°C arasında beş sıcaklık seviyesi, %10 ile %30 arasında üç seviye CO₂ derişimi ve 20 µ mol m⁻² s⁻¹ (1 480 lux) ile 200 µ mol m⁻² s⁻¹ (14 800 lux) aydınlatma şiddetlerinde kültürlenmişlerdir. Sonuçlar, mikroalg hücrelerinin en

yüksek çoğalma oranının 27-31°C sıcaklıkta, %4 CO₂ derişiminde, %20 O₂ derişiminde ve yaklaşık 7 400 lux (100 µ mol m⁻² s⁻¹) aydınlatma şiddetinde olduğunu göstermiştir.

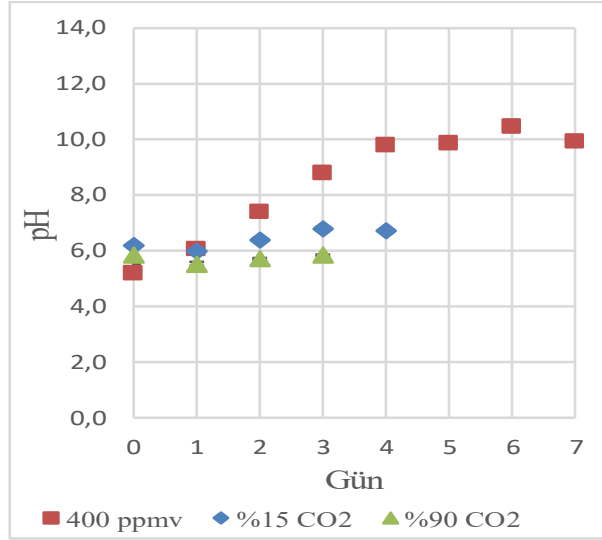
Anjos vd (2013), *C. vulgaris* ile %2, %6 ve %10 CO₂ derişimlerinde ve 5 180 lux (70 µmol m⁻² s⁻¹) aydınlatma şiddeti altında deneyler gerçekleştirmişlerdir. En iyi büyümenin %6 CO₂ derişiminde olduğunu belirlemişlerdir. Anjos vd. (2013), 5 180 lux aydınlatma şiddetinde en iyi verimi elde etmişlerdir. Fakat %6 CO₂ derişimi altında bu verimi elde etmişlerdir. %15 CO₂ ve 7 000 lux aydınlatma şiddeti altında yapılan deneylerden elde ettiğimiz verilerle net bir şekilde kıyas yapılamamaktadır. Çünkü %15 CO₂ derişiminde 5 180 lux aydınlatma şiddeti altında yapılan bir çalışmada ışık kaynağının yeterli olmayabileceği ya da inhibe etkisi yaratabileceği düşünülmektedir.

Ryu vd. (2009), *Chlorella sp. AG10002* suşu ile %0,5 CO₂ - %5 CO₂ derişim aralığında CO₂ derişimini kademeli arttırarak, 2 960 lux aydınlatma şiddeti altında çalışmışlardır. Çalışmalarının sonucunda maksimum üreme verimliliği (0,34 g/L/gün), maksimum kuru ağırlık (2,02 g/L) ve maksimum CO₂ fiksasyon oranının (0,35 g CO₂/gün), %5 CO₂ derişimde sağlandığı belirlenmiştir. Ryu vd. (2009) 'nin çalıştıkları 2 960 lux aydınlatma şiddetinde elde edilen biyokütle oranının (2,02 g/L), çalışmada elde edilen 1,99 g/L ile çok yakın değerlerde oldukları görülmektedir. Benzer oranlarının elde edilmesinin sebebi olarak, seçilen aydınlatma süreleri ve aydınlatma şiddetlerinin optimum büyümeyi sağladıkları düşünülmektedir.



Şekil 4.10. Farklı CO₂ derişimleri altında fotobioreaktörden alınan mikroalg numunelerinin OD değerlerinin zamanla değişimi (7 000 lux; 24 saat aydınlık)

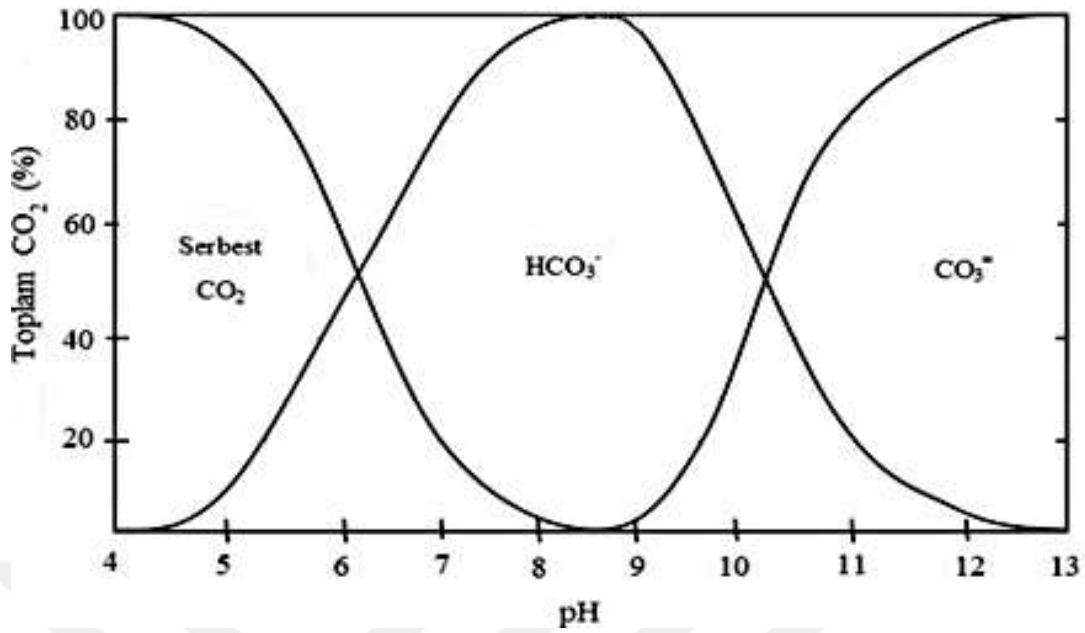
400 ppm_v CO₂ derişiminde ölçülen pH değerleri 5,18 ile 10,46 aralığında; %15 CO₂ derişiminde ölçülen pH değerleri 6,02 ile 6,83 aralığında ve %90 CO₂ derişiminde ölçülen pH değerleri 5,55 ile 5,88 aralığında değişim göstermiştir (Şekil 4.11).



Şekil 4.11. Farklı CO₂ derişimleri altında fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerinin pH değerlerinin zamanla değişimi (7 000 lux; 24 saat aydınlık)

Çalışılan CO₂ derişimlerine göre ölçülen pH aralıklarının; Kong vd. (2010), Hulat ve Thomas (2011), Khalili vd. (2015) ve Yeh vd. (2010) tarafından elde edilen bulgular ile paralellik göstermektedir. Ortam havasını temsilen 400 ppm_v CO₂ derişimi deneylerinde ölçülen pH değerleri ve %15 CO₂ ile %90 CO₂ derişimlerinde (>%5 CO₂) yapılan deneylerde ölçülen pH değerlerinin çalışmada belirtilen pH aralıklarına oldukça yakın oldukları görülmektedir. Elbette ki; pH'ın uygun aralıkta ölçülmesi büyümeyi doğrudan olumlu etkileyecek bir parametre sayılmamaktadır. Uygun pH aralığında %15 CO₂ derişiminde en iyi giderim verimleri elde edilmiş olup, mikroalglerin yaşam döngüleri açısından %90 gibi çok yüksek CO₂ derişiminde yapılan deney koşullarında oldukça yoğun miktarda CO₂ oranının, mikroalgin yapısına alınması ve fotosentezin verimli bir şekilde gerçekleşmesi durumu biyokimyasal süreçten ötürü sağlanamadığı için büyüme olumsuz yönde etkilenmiş ve verimli bir büyüme sağlanamamıştır.

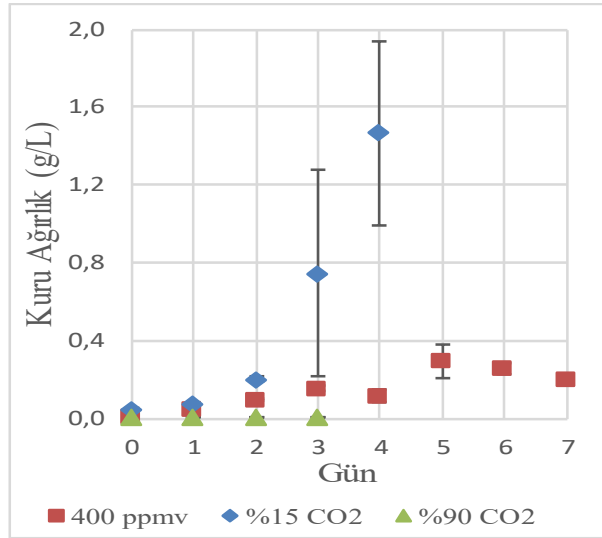
OD değerinin 4. günde 0,04'den 0,08 civarına artış olduğunun belirlenmesini mikroalglerin büyümesi ile nitelendirememekteyiz. Bu noktada pH etkilerine bağlı olarak, ortamda serbest CO₂, HCO₃⁻ ve CO₃²⁻ miktarlarında gerçekleşen derişimlerin pH ve OD açısından etkili olmuş olabileceği tahmin edilmektedir. Şekil 4.12'te pH aralığına bağlı olarak gerçekleşebilecek CO₂ fraksiyonları gösterilmiştir (Wetzel 1983).



Şekil 4.12. Toplam CO₂ fraksiyonlarının pH ile ilişkisi (Wetzel 1983)

Şekil 4.13'te verilen kuru ağırlık deney sonuçlarına bakıldığında en iyi kuru ağırlık değerinin önemli bir farkla %15 CO₂ derişimi altında elde edildiği görülmektedir. Maksimum kuru ağırlık değerleri 400 ppm_v derişiminde, %15 CO₂ derişiminde ve %90 CO₂ derişiminde sırasıyla; 0,3 g/L, 1,5 g/L ve 0,12 g/L olarak hesaplanmıştır.

Vishwakarma vd. (2019), e 28 ± 2 °C'de, 7 030 lux aydınlatma şiddetinde ve 16: aydınlatma periyodunda, normal hava ortamında yaptıkları çalışmada, *Botryococcus sp.* ve *C. vulgaris sp.* türlerinin BG-11, BBM ve TAP olarak üç ayrı besiyeri ortamında yetiştirildiklerinde ortalama biyokütle üretkenlikleri sırasıyla; *Botryococcus sp.* and *C. vulgaris sp.* için BG-11 ortamında 3,46 mg/L/gün ve 4,97 mg/L/gün, BBM ortamında 6,14 mg/L/gün ve 2,59 mg/L/gün ve TAP ortamında ise 2,71 mg/L / gün ve 3,5 mg/L/gün olarak belirlemişlerdir. *Botryococcus sp.* için kuru ağırlık değerlerinin ise; BG-11 ortamında 429,5 mg/L, BBM ortamında 330,3 mg/L ve TAP ortamında 404,1 mg/L olduğunu, *C. vulgaris sp.* için kuru ağırlık değerlerinin BG-11 ortamında 409,7 mg/L, TAP ortamında 363,4 mg/L ve BBM ortamında 263,7 mg/L olduğunu göstermişlerdir. Ortalama biyokütle üretkenliği, BBM ortamında *Botryococcus sp.* için 6,14 mg/L/gün ve *C. vulgaris sp.* için BG-11 ortamında 4,97 mg/L/gün olarak maksimum seviyede elde edilmiştir. Ortalama kuru ağırlık değerlerinde ise; BG-11 ortamında *Botryococcus sp.* için 429,5 mg/L/gün ve *C. vulgaris sp.* için BG-11 ortamında 407,7 mg/L/gün olarak maksimum seviyede elde edilmiştir. Vishwakarma vd. (2019) kuru ağırlık verilerine göre oldukça yüksek kuru ağırlık değerleri elde edilmiştir. Yüksek sıcaklık ve aydınlatma şiddeti altında, oldukça CO₂ derişiminde (%0,04) çalışılmasının büyümeyi yavaşlattığı düşünülmektedir. Yüksek sıcaklık altında zaten düşük derişimde olan CO₂'nin ayrıca çözünürlüğünün azalması, hücrelerin büyümeleri için gerekli olan karbon kaynağına ulaşma olanaklarını azaltabilmekte ve biyokütle eldesinin düşük verimde olmasına yol açabilmektedir.



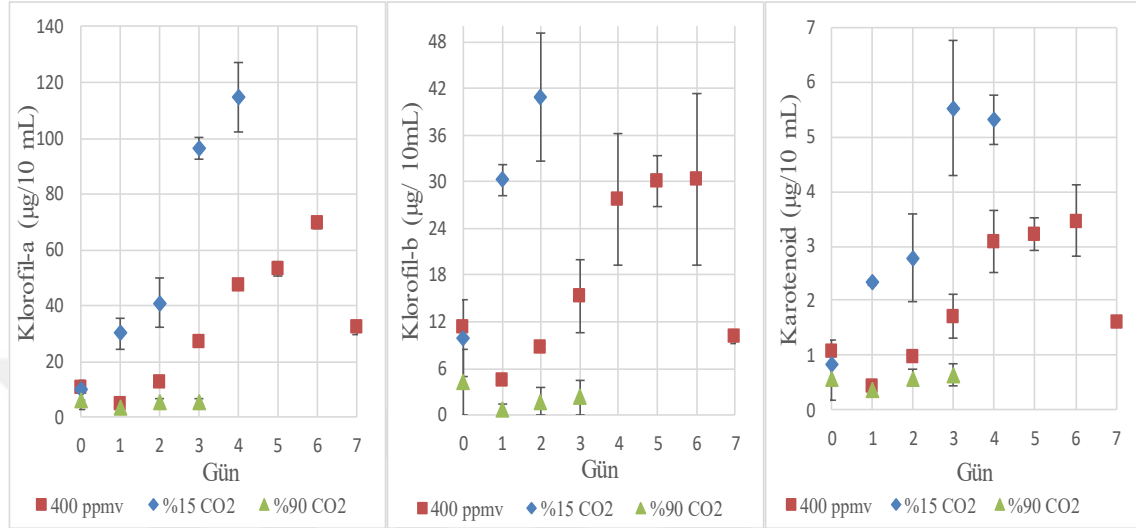
Şekil 4.13. Farklı CO₂ derişimleri altında fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerinin kuru ağırlık değerlerinin zamanla değışimi (7 000 lux; 24 saat aydınlık)

Şekil 4.14 incelendiğinde 400 ppm_v, %15 ve %90 CO₂ deneylerinde maksimum klorofil-a değerlerinin sırasıyla 69,5 µg/10mL (6,95 mg/L), 115,0 µg/10mL (11,5 mg/L) ve 6,3 µg/10mL (0,63 mg/L) olarak; maksimum klorofil-b değerlerinin sırasıyla 30,1 µg/10mL (3,01 mg/L), 38,3 µg/10mL (3,83 mg/L) ve 2,3 µg/10mL (0,23 mg/L) ve maksimum karotenoid değerlerinin sırasıyla 3,5 µg/10mL (0,35 mg/L), 5,5 µg/10mL (0,55 mg/L) ve 2,0 µg/10mL (0,20 mg/L) olduğu görülmektedir.

Nautiyal vd. (2014), %0,04 CO₂ derişiminde, 12 saatlik aydınlatma süresinde ve 2 000 lux aydınlatma şiddeti altında, 25 ± 1 °C'de *Spirulina*, *Chlorella* ve havuz suyu algi ile yaptıkları çalışmada, en yüksek klorofil a içeriğine *Chlorella'nın* (3.88 µg/mL) sahip olduğu ve sırasıyla *Spirulina* (2.56 µg/mL) ve havuz suyu alginin (1.84 µg/mL) sahip olduğu belirlenmiştir. Nautiyal vd. (2014) tarafında elde edilen klorofil a değerlerinin, çalışmada elde edilenlere kıyasla daha yüksek olmaların da yüksek aydınlatma şiddetine göre seçilen düşük CO₂ derişiminin daha iyi çözünürlük sağladığı ve yüksek foton enerjisini bünyesine alan mikroalglerin 12 saatlik karanlık sürede solunuma geçerek inhibe etkisini azaltıldığı tahmin edilmektedir.

Chinnasamy vd. (2009) *C. vulgaris* mikroalgi ile %0,036 ile %20 arasında değışen CO₂ derişimlerinde ve 30, 40 ve 50 °C de farklı sıcaklık koşulları altında çalışmışlardır. 3 778 lux (47 µmol m⁻² s⁻¹) aydınlatma süresinde, %6 CO₂ seviyesindeki maksimum klorofil ve biyokütle değerlerinin, diğer CO₂ derişimleri ile yaklaşık oranlarda aynı olduğunu, ancak CO₂ derişiminin artmasına paralel olarak her iki değerde de düşüş gerçekleştiğini tespit etmişlerdir. 30 °C'nin üzerindeki sıcaklıkların büyümede yarattığı azalış etkisine rağmen, yüksek CO₂ derişimlerinde yüksek sıcaklık seviyesinde NaH₄CO₃ ilavesi ile karbonik anhidraz aktivitesinin artmasıyla birlikte, *C. vulgaris'in*, daha yüksek sıcaklıklarda daha düşük verimlilikle, 30 °C'de yüksek CO₂ seviyesinde daha iyi büyüdüğü sonucuna ulaşmışlardır. Çalışmanın sonucunda ise; 30 °C sıcaklık altında en yüksek klorofil konsantrasyonunun 11 µg/mL (11 mg/L) ve biyokütle miktarının 210 µg/mL (210 mg/L) ile %6 CO₂ derişiminde olduğu belirlenmiştir. 40 °C'de de büyüme gerçekleşmiş fakat yetiştirme parametlerinde verimsiz sonuçlar elde edilmiştir ve 50

°C’de büyüme gerçekleşmemiştir (Chinnasamy vd. 2009). Chinnasamy vd. (2009) tarafından elde edilen klorofil değeri çalışma sonuçlarına göre daha yüksek oranda elde edilmiştir. Hem CO₂ derişiminin hemde aydınlatma şiddetinin çalışmaya kıyasla daha düşük oranlarda olmasının büyümei arttırdığı, buna bağlı olarak da klorofil miktarının daha yüksek oranda elde edildiği düşünülmektedir.



Şekil 4.14. Farklı CO₂ derişimleri altında fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerinin klorofil-a, klorofil-b ve karotenoid değerlerinin zamanla değişimi (7 000 lux; 24 saat aydınlık)

SET-III kapsamında en iyi verim eldesi 24 saat aydınlatma süresinde, %15 CO₂ derişiminde ve 7 000 lux aydınlatma şiddetinde gözlenmiştir. Deney sonuçlarına göre belirlenen büyüme parametreleri Çizelge 4.3’te verilmektedir.

Chiu vd. (2009) çalışmalarında, *C. vulgaris* sp. NCTU-2 ile 300 µmol m⁻² s⁻¹ (22 000 lux) aydınlatma şiddeti altında, %10 CO₂ derişiminde ve yaklaşık 27 °C sıcaklıkta 4 L çalışma hacminde biyokütle üretim oranını ve CO₂ giderim verimini değerlendirmek amacıyla; iç kolonsuz, merkez borulu kolonu olan ve gözenekli merkezli tüp kolonu olan üç farklı fotobiyoreaktör tasarlamış ve her birinde aynı türü yetiştirmiştir. *C. vulgaris* sp. NCTU-2 için maksimum biyokütle konsantrasyonları ve spesifik büyüme oranlarını (µmax) iç kolonsuz, merkez borulu kolonu olan ve gözenekli merkezli tüp kolonu olan fotobiyoreaktör için sırasıyla 2,37 g /L, 2,54 g /L ve 3,47 g /L ile 0,19 gün⁻¹, 0,23 gün⁻¹ ve 0,25 gün⁻¹ olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, gözenekli merkezli tüp kolonu olan fotobiyoreaktörün büyüme üzerinde daha iyi bir verim sağladığını ortaya konulmuştur. Chiu vd. (2009), çalışmada elde edilen sonuçlara kıyasla yüksek büyüme değerleri elde etmişlerdir. Çok yüksek aydınlatma şiddetinde (22 000 lux) çalışılmasına rağmen büyüme verimlerinin artmasında çalışma hacminin yüksek olduğu ve kademeli olarak artırılan CO₂ derişiminin pH’ı düşürücü etkisinin azaltılması ile sağlandığı düşünülmektedir.

Barahoei vd. (2020), yaptıkları çalışmada, mikroalg yetiştirme ve CO₂ tutma için modifiye edilmiş bir gaz beslemeli kabarcık kolon fotobiyoreaktörü kullanılarak *C. vulgaris* ile CO₂ fiksasyon hızı, pH, aydınlatma şiddeti, aydınlık-karanlık döngü, havalandırma hızı ve sıcaklıktan oluşan beş parametre ile deneyler gerçekleştirmişlerdir.

%7 CO₂ derişimi altına kabarcık boyutlarının küçük olduğu koşullarda mikroalglerin CO₂ tutma hızı, biyokütle üretim verimliliği ve biyokütle derişimi için maksimum değerler sırasıyla; 633,73 mg/L/gün, 337 mg/L/gün ve 4 244 mg/L olarak elde edilmiştir. Daha küçük kabarcıklar CO₂ kullanım verimliliği %35 oranında arttırıcı etki sağladığı gözlemlenmiştir. Çalışmada en yüksek kuru ağırlık değerleri; pH değerinin 8 olduğu, 2 745 lux aydınlatma şiddetinde, 16:8 saat aydınlık-karanlık döngüsünde, 25 °C sıcaklık ve 0.5 L/dk havalandırma akışında *C. vulgaris* yetiştirme parametreleri olarak belirlenmiştir. Büyüme parametreleri açısından kabarcık kolon fotobiyoreaktöründe maksimum oranlar elde edilmiştir ve büyüme hızı üzerinde sırasıyla havalandırma hızı ve aydınlatma şiddetinin en fazla ve en az etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Deneyler boyunca %3 CO₂ derişiminden %7 CO₂ derişimine çıkarılmasıyla CO₂ fiksasyon oranlarında sırasıyla %57 ve %56 verimlilik artışı olduğu tespit edilmiştir. %7 CO₂ derişimi altında, küçük kabarcıklı gaz akışında maksimum biyokütle üverimliliği ve CO₂ fiksasyon oranları sırasıyla 337 mg L⁻¹ gün⁻¹ ve 633,7 mg L⁻¹ gün⁻¹ olarak elde edilmesi; %7 CO₂ derişiminde küçük kabarcıklar için *C. vulgaris*'in kuru ağırlığı, büyük kabarcık boyutuyla elde edilenden yaklaşık %34 daha fazla olduğunu ortaya koymuştur. Barahoei vd. (2020) çalışmalarında alkali pH koşulunda ve 16:8 aydınlatma süresinde, küçük gaz kabarcıkları ve yüksek olmayan aydınlatma şiddeti ile daha iyi verim elde etmişlerdir. Çalışmanın yüksek CO₂ (%15) ve yüksek aydınlatma şiddetinde (7 000 lux) deneylerin yapılması ve gaz kabarcık boyutlarının net olarak bilinmemesi sebebiyle Barahoei vd. (2020) çalışmalarıyla net olarak kıyas yapılamamaktadır. Çünkü bu çalışmada ve literatür çalışmaları kapsamında farklı aydınlatma süreleri, farklı aydınlatma şiddetleri, farklı CO₂ derişimleri ve farklı akış hızlarının mikroalg büyüme parametreleri verimleri yüksek değişkenlik gösterebilmektedir.

Çizelge 4.3. Farklı CO₂ derişimleri altında *C. vulgaris* mikroalg kültürü için belirlenen kinetik parametreler (7 000 lux; 24 saat aydınlık)

CO ₂ derişimi, %	μ _{max} , 1/gün	X _{max} , g/L	P _{max} , g/L/gün	R _{CO2} , g/L/gün
0,04*	0,39	0,29	0,06	10,63
15	0,31	1,46	0,35	53,72
90	2E-14	0,01	0,00	0,37

*400 ppm_v

Chiu vd. (2008), %2, %5, %10 ve %15 CO₂ derişimlerinde, 800 mL çalışma hacminde, 26 ± 1 °C ve 22 200 lux (300 μmol m⁻² s⁻¹) aydınlatma şiddetinde, 200 mL/dk akış hızıyla, başlangıç hücre yoğunluğunun ve CO₂ derişiminin *C. vulgaris* sp. nin gelişimi üzerine etkilerini incelemişlerdir. Yarı sürekli ortamda kapalı fotobiyoreaktörlerde yetiştirdikleri kültüre ait 8 günlük bir zaman diliminde spesifik büyüme oranlarını ve biyokütle değerlerini sırasıyla 0,58–0,66 gün⁻¹ ve 0,76–0,87 g/L olarak belirlemişlerdir. Ayrıca %2, %5, %10 ve %15 CO₂ derişimlerinde, CO₂ giderim oranları sırasıyla; 0,26, 0,32, 0,47 ve 0,57 g s⁻¹ ve CO₂ gideriminin etkinliği %58, %27, %20 ve %16 olarak belirlenmiştir. Deneylerde tekli kullanılan fotobiyoreaktöre kıyasla altı paralel fotobiyoreaktörün kullanımı ile biyokütle eldesi ve lipit üretimi altı kat daha fazla verimle elde edilmiştir. Düşük hücre yoğunluğunda (8x10⁵ hücre/mL) hava koşullarında, %2 CO₂, %5 CO₂, %10 CO₂ ve %15 CO₂ derişimlerindeki kuru ağırlık (g/L) ve spesifik büyüme oranları (μ/gün) sırasıyla; 0,54 g/L-0,23 μ/gün, 1,21 g/L- 0,49 μ/gün,

0,06 g/L-0,13 µ/gün, 0,01 g/L- 0 µ/gün ve 0,01 g/L- 0 µ/gün olarak belirlenmiştir. Yüksek hücre yoğunluğunda (8×10^6 hücre/mL) hava koşullarında, %2 CO₂, %5 CO₂, %10 CO₂ ve %15 CO₂ derişimlerdeki kuru ağırlık (g/L) ve spesifik büyüme oranları (µ/gün) sırasıyla; 0,68 g/L- 0,25 µ/gün, 1,45 g/L- 0,61 µ/gün, 0,90 g/L- 0,34 µ/gün, 0,11 g/L- 0 µ/gün ve 0,10 g/L- 0 µ/gün olarak belirlenmiştir. Deneyler boyunca paralel olarak altı fotobiyoreaktörden yetiştirilen CO₂ giderim oranı ve biyokütle üretimi eldesinin tekli fotobiyoreaktördekinden altı kat daha fazla olması ile yüksek CO₂ (%10-15) derişimleri altında kültürlenene mikroalgal büyüme inhibisyonunun, %2 CO₂'ye uyarlanmış yüksek yoğunluklu bir mikroalgal inokulum kültürü ile aşılabileceği sonucunu doğurmuştur. Bunun nedeninin mikroalg hücrelerinin inokulum konsantrasyonundaki farklılıkları olabileceği tahmin edilmektedir. Mikroalglerin yüksek derişimlerdeki CO₂ için tolerans kapasitesi, başlangıçta aşılınmış olan hücre konsantrasyonundaki bir artışla yükseltilebilmektedir (Ge vd. 2011). Bu bilgiler ışığında karşılaştırma yapabilmek adına SET-I, SET-II ve SET-III kapsamında yapılan deneylere ait her deney başlangıcında belirlenen mikroalg aşılama derişimleri Çizelge 4.4'te gösterilmiştir.

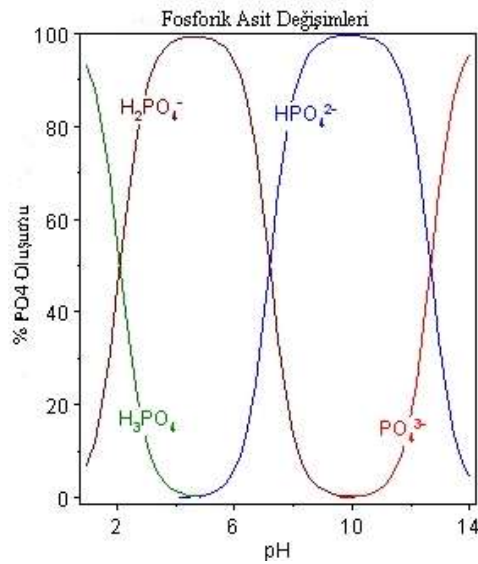
Çizelge 4.4. Mikroalg aşılama derişimleri

SET-I	7 000 lux	11 000 lux	15 000 lux
OD ₆₈₄	1 293	2 329	2 334
OD ₇₅₀	851	1 326	1 341
Aşılama Derişimi (g/L)	0,32	0,59	0,53
SET-II	12 saat Aydınlık	16 saat Aydınlık	24 saat Aydınlık
OD ₆₈₄	1 770	1 821	1 293
OD ₇₅₀	1 113	1 122	851
Aşılama Derişimi (g/L)	0,63	0,66	0,16
SET-III	400 ppm _v	%15 CO ₂	%90 CO ₂
OD ₆₈₄	1 481	2 127	1 397
OD ₇₅₀	1 005	1 255	943
Aşılama Derişimi (g/L)	0,60	0,87	0,94

SET-III kapsamında en iyi verimler %15 CO₂ derişimi altında yetiştirilen mikroalglerden elde edilmiştir (Çizelge 4.3). SET-I'de belirlenen en iyi aydınlatma şiddeti 7 000 lux (aşılama derişimi 0,16 g/L), SET-II'de belirlenen en iyi aydınlatma süresi 24 saat (aşılama derişimi 0,16 g/L) ve SET-III'de belirlenen en iyi CO₂ derişimi %15 CO₂ (aşılama derişimi 0,87 g/L) olarak hesaplanmıştır. Chiu vd. (2008) yaptığı deney sonuçlarında en iyi aşılama verimi ve en yüksek hücre yoğunluğu çalışmalarında %2 CO₂ derişiminde elde edilen veriler ve yüksek (%10-15) CO₂ derişimleri düşük verimle elde edilen verilere nazaran, kademeli olmadan ve aşılama derişimlerinin düşük olduğu koşullar dahil, yapılan tekli fotobiyoreaktör deneyleri kapsamında belirlenen veriler daha iyi sonuçlar elde edildiğini göstermiştir.

SET-I sonucunda en iyi CO₂ giderim verimine sahip aydınlatma şiddeti 7 000 lux ve SET-II deneyleri sonucunda en iyi aydınlatma süresi 24 saat aydınlık olarak

belirlenmiştir. SET-III deneyleri sonucunda ise; SET-I ve SET-II de belirlenen 24 saatlik süre boyunca 7 000 lux aydınlatma şiddeti altında en iyi CO₂ giderim verimine sahip %CO₂ değerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda 400 ppmv, %15 CO₂ ve %90 CO₂ derişimlerinde yapılan deneyler sonucunda en iyi verimin %15 CO₂ derişiminde elde edildiği sonucuna varılmıştır. Proje *C. vulgaris* mikroalginin Oksi-Yanma şartlarındaki baca gazını temsil eden %90 CO₂ içeren gaz karışımında yetiştirilmesini amaçlamaktadır. Yüksek CO₂ koşullarında oluşabilecek düşük pH inhibisyonuna karşı pH dengelemesi yapılarak mikroalgin yetiştirilmesi hedeflenmiştir. Bu nedenle %25 CO₂ derişiminde bir deneme yapılmıştır. Fakat deneme 2. günün sonunda gerçekleşen alg ölümü nedeniyle sonlandırılmıştır. Elde edilen bu sonuçtan ötürü daha sonra %25 CO₂ derişiminde başlatılan deneye yüksek karbondioksitin verilmesi sonucunda, algler için inhibe edici etki yaratmaması amacıyla kültür pH'sında asitliğin artmasını önlemeye yönelik potasyum fosfat tamponu (Aslam vd. 2017) eklenerek büyüme ve biyokütle verimi açısından iyi bir sonuç elde edileceği yönünde netlik kazanılmıştır (Aslam vd. 2017; Goli vd. 2016; Tang vd. 2011; Tsai vd. 2012). Hücrelerin inhibe etkisi yaratacak olumsuz koşullara (düşük pH dahil) daha fazla adapte edilebilmesi ve olumsuz etkilerin (örneğin tamponlama ve/veya baca gazı filtreleme yoluyla) yönetilmesi için uygun yöntemlerin kültürün yetiştirilmesi aşamasında uygulanması yönünde bir gereklilik söz konusu olmaktadır. Bu bilgiler doğrultusunda projenin temel hedefi olan Oksi-Yanma kaynaklı %90 CO₂ derişiminde *C. vulgaris* mikroalginin biyodizel verimini inceleme yönünden bakıldığında, yüksek CO₂ koşullarına yönelik mikroalgin düşük pH inhibisyonuna karşı, pH dengeleme ile yetiştirmenin denenmesine karar verilmiştir. Şekil 4.15'de fosfat tamponunun pH'ı dengeleme aşamasında gerçekleşen biyokimyasal değişim türleri grafik üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Fosfat tamponunun pH dengesi (Anonim 1)

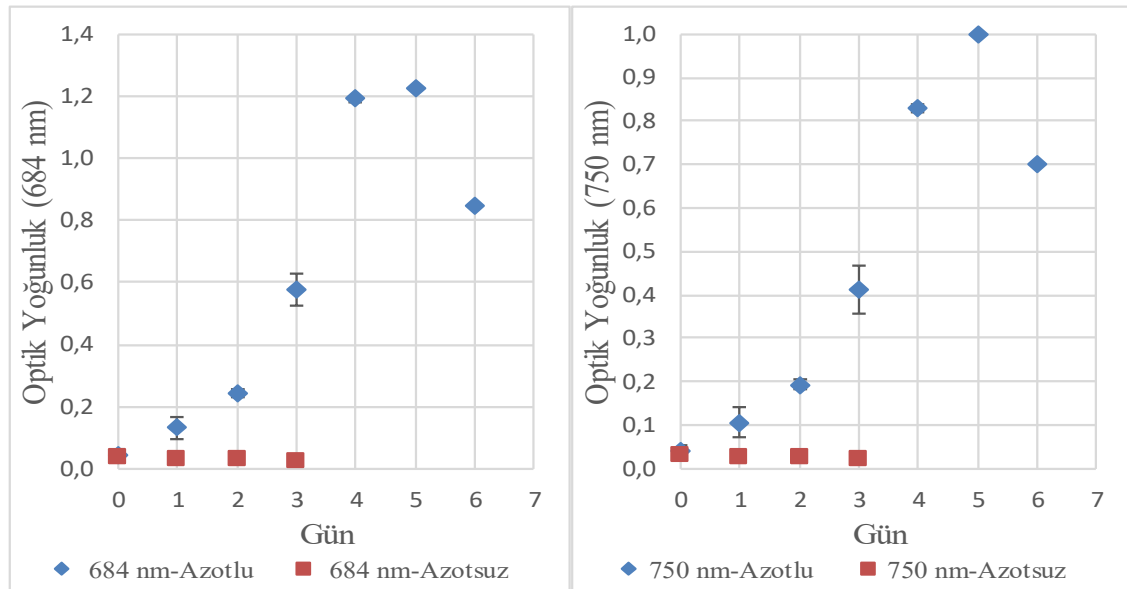
%25 CO₂ derişiminde pH 5,86'da başlatılan deneyden 2 saat sonra alınan numunenin pH değerinin kısa bir süre içerisinde 5,77' ye düştüğünün belirlenmesi ile fotobiyoreaktöre bazik pH değerlerine kademeli yükselme olmasını sağlayacak oranlarda, asidik koşulların mikroalgi inhibe etmesini önlemek için ilk olarak 1 M'lık K₂HPO₄' ten 83,4 mL ve 1 M'lık KH₂PO₄' ten 16,6 mL olmak üzere pH'ı 7,5 civarında dengelemek

amacıyla toplam 100 mL' lik fosfat tampon çözeltisi eklenilmiştir. Üçüncü güne kadar büyümede artış görülmüş, üçüncü günün sonunda pH'ı 8 civarına çıkarabilmek için 1 M'lık 4 mL NaOH çözeltisi ilave edilmiştir. Fakat başta eklenen fosfat tamponun baskın gelmesinden ötürü pH 7,07 civarında kalmıştır. Bunun üzerine; pH'ı 8 civarına getirip, dengede tutmak amacıyla 1 M'lık K_2HPO_4 ' ten 94 mL ve 1 M'lık KH_2PO_4 ' ten 6 mL alınarak fotobiyoreaktördeki alg kültürüne enjekte edilmiştir. Eklenen bileşiklere rağmen pH 7,4 civarında sabitlenmiş, bu aşamada ise OD değerlerinde azalış görülmüştür. Büyümenin sağlanamaması sebebiyle %90 CO_2 derişimine yönelik deneylere bu noktada son verilmiştir.

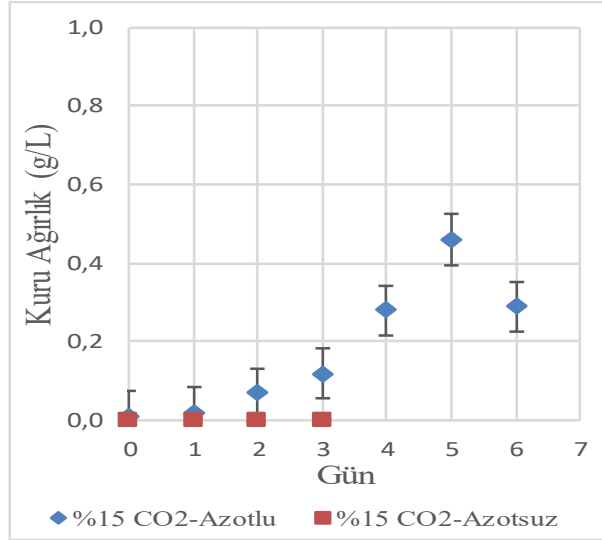
4.4. Azot Stresinin Mikroalgal Biyokütle Büyüme Verimine Etkisi

SET-I, SET-II ve SET-III deneyleri sonucunda elde edilen en iyi CO_2 giderim parametreleri (7 000 lux aydınlatma şiddeti, 24 saat süre aydınlatma şiddeti ve %15 CO_2 oranı) ile SET-IV deneyleri gerçekleştirilmiştir. “SET-IV: Azot Stresi” kapsamında ilk aşamada, %100 azotlu (BBM besiyeri ile) ve %100 azotsuz (besiyerindeki tüm azot içeren bileşenler ($NaNO_3$, EDTA ve $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) çıkarılmıştır) ortamlarda mikroalg yetiştirme deneyleri tamamlanmış olup, deneyler sonunda alınan numunelerde RuBisCO ve lipit ölçümleri yapılmıştır.

Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de verilen OD ve kuru ağırlık (biyokütle) değerleri incelendiğinde %15 CO_2 derişimi altında %100 azotlu ortamda mikroalglerde normal bir büyüme eğrisinin olduğu görülürken, %100 azotsuz (%100 azot stresi) ortamda yetiştirilen mikroalglerin inhibe olup, büyüemedikleri gözlemlenmiştir. Biyokütle derişimi, artan azot miktarı ile doğru orantılı bir ilişki içerisinde (Markou vd. 2017, Yodsuan vd. 2017). Azotsuz ortam deneyinde azalan azot miktarına karşılık olarak OD değerlerinde ve biyokütle derişiminde azalma gerçekleşmesi stres ortamındaki yetiştirme sonucunda beklenen bir durumdur.

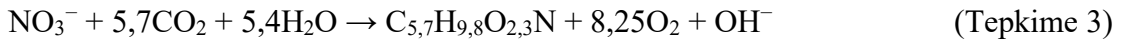


Şekil 4.16. %15 CO_2 derişiminde %100 azotlu ve %100 azotsuz ortamda fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerin OD değerlerinin zamanla derişimi (%15 CO_2 +%3 O_2 +%82 N_2)



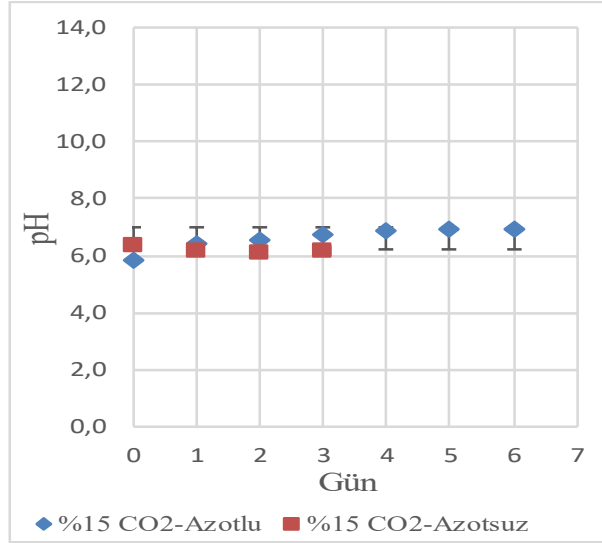
Şekil 4.17. %15 CO₂ derişiminde %100 azotlu ve %100 azotsuz ortamda fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerin kuru ağırlık değerlerinin zamanla değişimi (%15 CO₂+%3 O₂+%82 N₂)

NO₃⁻ kullanımı ile kültür ortamının pH değeri ve mikroalg büyümesi arasında doğrusal bir ilişki vardır. Fotosentez aşamasında alglerin NO₃⁻ü bünyelerine alıp kullanmaları sonucunda ortam pH'ında artış gözlenmektedir (Markou vd. 2017). Teorik olarak bir mol NO₃⁻ kullanımı karşılığında, 1 mol hidroksil (OH⁻) üretimi gerçekleşmektedir (Rashid vd. 2014; Song vd. 2011). Gerçekleşen tepkime Tepkime 3'de gösterilmektedir.



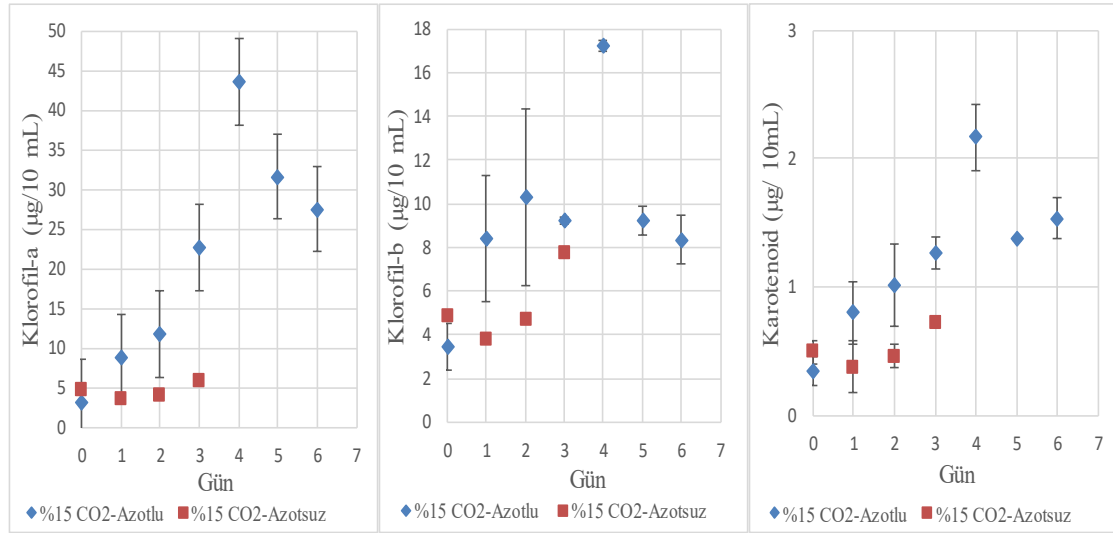
Fazla NO₃⁻ kullanımı sonucunda fazla hidroksil iyonunun üretilmesi ile pH değeri 10'un üzerine çıkabilmektedir. pH 10'un üzerinde alglerin büyümelerini inhibe edici etki gösterebilmektedir. Bunun yanısıra NO₃⁻ eksikliğine bağlı olarak da pH değerinde düşüş gerçekleşmektedir. NO₃⁻ miktarına bağlı olarak, optimum değerlerde büyümeyi sağlayabilmek için pH dengelenmesi daha iyi bir verim eldesi sağlayabilmektedir (Elcik ve Çakmaccı 2017).

%15 CO₂ derişimi altında yapılan %100 azotlu ve %100 azotsuz deneylerde ölçülen pH değerlerine ait grafik Şekil 4.18'de verilmiştir. Yukarıda açıklanan verilere göre incelendiğinde, azotsuz ortamın pH değerlerinin optimum alg büyümesini sağlayacak değerlere ulaşmadığı ve tam tersine bir düşüş gerçekleştiği ve alglerin büyüyemediği görülmektedir.



Şekil 4.18. %15 CO₂ derişiminde %100 azotlu ve %100 azotsuz ortamda fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerin pH değerlerinin zamanla değişimi (%15 CO₂+%3 O₂+%82 N₂)

Şekil 4.19’da, verilen klorofil-a, klorofil-b ve karotenoid değerlerinin Şekil 4.16’da verilen OD değerleri ile paralellik gösterdikleri net bir şekilde görülmektedir. İyi bir büyüme, iyi bir OD ve iyi bir klorofil değeri eldesi demektir. SET-IV deneylerinin ilk aşaması olan %15 CO₂ derişimi altında %100 azotlu ortamda hızlı bir büyüme ve hızlı bir ölüm ile deney sonuçlandırılırken, azotsuz ortamda alglerin inhibe olması nedeniyle deney kısa sürede sonlandırılmıştır. Azotsuz ortamda algler büyütüldüklerinde; protein, karotenoid ve klorofiller gibi azot bakımından zengin biyomoleküllerin üretiminde azalma meydana gelmektedir. Tam tersi olarak da, karbonhidrat ve lipitler gibi karbon bakımından zengin biyomoleküllerin birikiminde stres ortamında artış gerçekleşmektedir. Fakat azot stresi ortamında istenilen (örneğin lipit) bileşiğin miktarında artış gerçekleşse de biyokütle oranında azalma olması yapılan çalışmalar neticesinde ortaya konulmuştur (Morkou vd. 2017; Münkel vd. 2013; Stephenson vd. 2010). SET-IV kapsamında yapılan azotlu ve azotsuz ortamda yetiştirilen alglerden elde edilen OD, kuru ağırlık (biyokütle), klorofil ve lipit değerleri bu verileri doğrulamaktadır.



Şekil 4.19. %15 CO₂ derişiminde %100 azotlu ve %100 azotsuz ortamda fotobiyoreaktörden alınan mikroalg numunelerin klorofil-a, klorofil-b ve karotenoid değerlerinin zamanla değişimi (%15 CO₂+%3 O₂+%82 N₂)

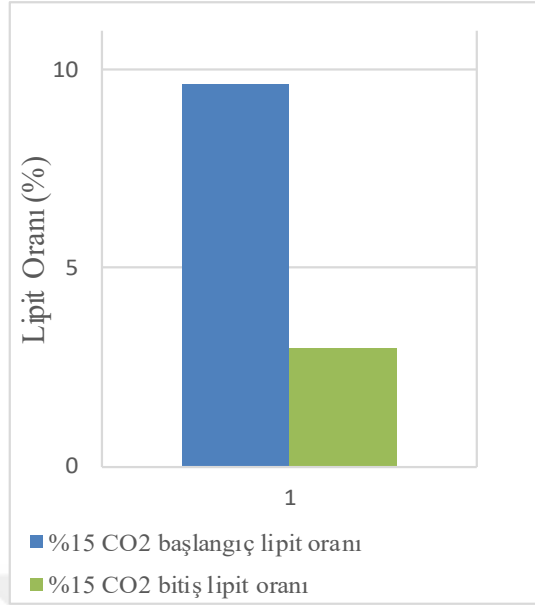
Çizelge 4.5'te %15 CO₂ derişimi altında yapılan deney sonucunda normal koşullar ve %100 stres koşulunda elde edilen kinetik parametrelere yer verilmektedir.

Çizelge 4.5. %15 CO₂ derişiminde %100 azotlu ve %100 azotsuz ortamda *C. vulgaris* mikroalg kültürü için belirlenen kinetik parametreler (%15 CO₂+%3 O₂+%82 N₂; 7 000 lux; 24 saat aydınlık)

Azot içeriği	μ_{max} , 1/gün	X_{max} , g/L	P_{max} , g/L/gün	R_{CO_2} , g/L/gün
%15 CO ₂ -%100 azotlu	0,63	0,46	0,07	16,87
%15 CO ₂ -%100 azotsuz	0,00	0,00	0,00	0,00

Mikroalg hücreleri, özellikle azot stresi koşullarında yetiştirildikten sonra, önemli oranlarda depolama lipidleri biriktirmeye başlamaktaadırlar (Hu vd. 2008). Bunların yanısıra azot stresi koşullarında yetiştirilen mikroalglerin hücre çoğalmasında gerçekteşen yavaşlama nedeniyle, biyokütle eldesinde lipid artışına ters orantılı olarak azalma meydana geldiği görölmektedir (Pandey vd. 2014).

C. vulgaris mikroalgi yapısındaki lipid oranı, alg kültürü fotobiyoreaktöre aktarılmadan önce ve fotobiyoreaktörde %15 CO₂ derişiminde ve %100 azotlu ortamda yetiştirildikten sonra ayrı ayrı belirlenmiştir. Sonuçlar Şekil 4.20'de verilmiştir. Göröldüğü üzere; %15 CO₂ derişimindeki gelişim sonucunda mikroalg kültürünün lipid içeriğinde düşüş gerçekteşmiştir. Bunun temel sebebini yukarıda belirttiğimiz bilgiler ışığında değerlendirirsek, biyokütle artışına ters orantılı olarak, kültürün lipid üretiminde azalma meydana gelmiştir (Stephenson vd. 2010).



Şekil 4.20. %15 CO₂ derişiminde %100 azotlu ortamda fotobiyoreaktörde gerçekleştirilen deney öncesinde ve sonrasında *C. vulgaris* mikroalg kültürüne ait lipit oranları

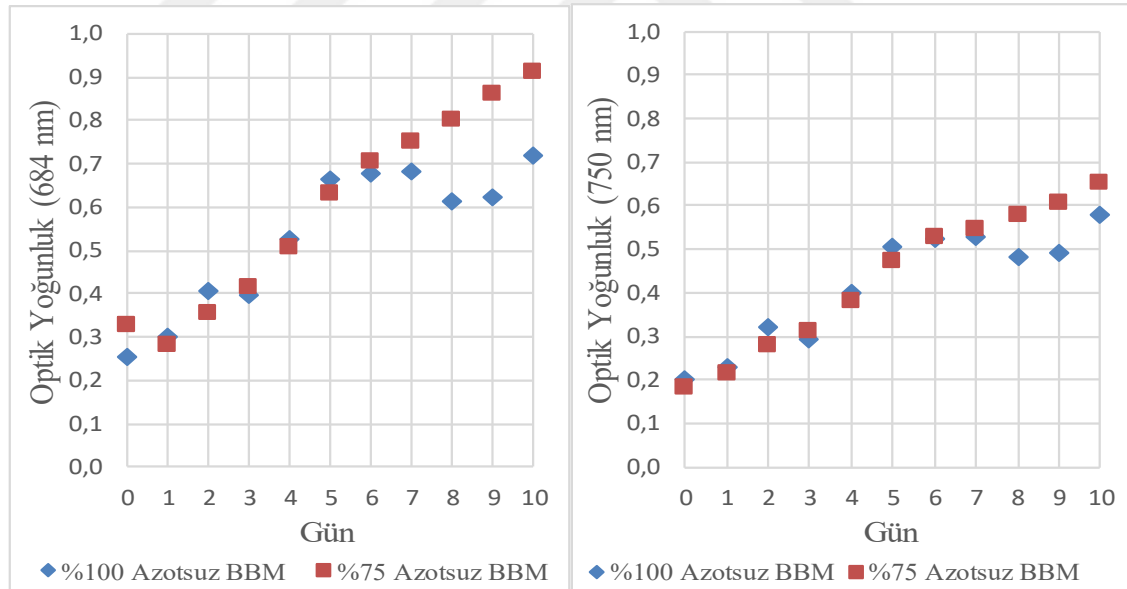
%15 CO₂ derişiminde, azot stresi altında yapılan deneylerde algler büyümemiş ve deneyler sonlandırılmıştır. Bu duruma, mikroalg kültürüne yüksek derişimde CO₂ verildiğinde mikroalg büyümesini etkileyen ağırlıklı olarak iki faktörün neden olduğu düşünülmektedir:

- 1) Mikroalglerin CO₂ alım kapasitesi (hücreye karbon tedariki) ve
- 2) pH

Yüksek gaz akışının sistemde yüksek bir oranda hızlı karışma sebep olması neticesinde, CO₂ gazının fotosentez için hücre içine alınmasını engellediğine dair literatür çalışmaları bu bilgiyi doğrulamaktadır (Chisti 2007; Münkel vd. 2013; Stephenson vd. 2010). Azot stresi koşullarında mevcut besin yetersizliğinin yanısıra 100 ml/dk gaz akış oranında fotobiyoreaktöre yüksek CO₂ (%15) içeren gaz karışımının verilmesi büyüme üzerinde inhibe edici etki yaratabilmektedir. Bu koşullar, büyüme ortamının tipik olarak algler tarafından tolere edilemeyen asitleşmesine yol açabilmektedir. Ortamın pH değerinin düşmesi hücre dışı karbonik anhidrazın aktivitesini azaltmakta ve hücre büyümesini engellemektedir (Aslam vd. 2017; Tang vd. 2011) ve birçok mikroalg türü ortamda CO₂'nin çözünmesiyle oluşan karbonik asitten kaynaklanan asidik koşullara dayanamamakta ve besin yetersizliğinin de etkisiyle büyüme gerçekleştirememektedir (Lam ve Lee 2011; Tang vd. 2011).

%15 CO₂ derişiminde %100 azot stresi şartlarında *C. vulgaris* mikroalg kültürünün fotobiyoreaktörde büyümemesi üzerine gaz karışımındaki CO₂ yüzdesinin büyümenin önünde bir engel oluşturup oluşturmadığını görmek amacıyla gaz karışımındaki CO₂ yüzdesi düşürülerek (400 ppm_v) deney tekrarlanmıştır. Fakat ikinci günden itibaren OD değerlerinde tekrar düşüş görülmüş ve bu durumu takiben büyüme inhibe olmuş ve sistem kapatılarak, deneye son verilmiştir. Kültürün bu şartlarda da

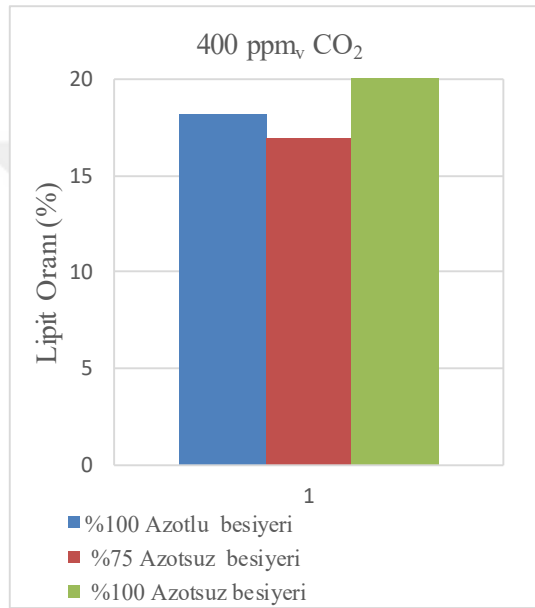
büyümemesi üzerine kültürün erlenmayerlerde üretilmesi aşamasına geçilmiştir. SET-IV deneylerinde ikinci aşama olarak, erlenmayerler içerisinde 400 ppm_v CO₂ derişimi altında %100 azotsuz ve %75 azotsuz (sadece 4,505 g/L NaNO₃ var) ortamda mikroalg yetiştirme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonunda alınan numunelerde RuBisCO ve lipit ölçümleri yapılmıştır. Yaklaşık 10 gün boyunca alg büyümesi ve alg kültürünün lipit üretim potansiyeli gözlemlenebilmiştir. Şekil 4.21’de 400 ppm_v CO₂ derişimi altında erlenmayer içerisinde farklı azot stresi ortamlarında yetiştirilen mikroalgler için ölçülen OD değerlerine yer verilmiştir. %100 azotsuz ortamda 8. günün sonunda OD değerinde net bir düşüş gözlemlenmiştir. Fakat 9. günden itibaren OD değerinde tekrardan küçük miktarlarda artışlar ölçülmeye devam edilmiştir. İyi bir biyokütle eldesinde mikroalgin koyu yeşil renge ulaştığı yapılan deneyler kapsamında kazanılan bir deneyim olmuştur. %100 azot stresi ortamında yetişen mikroalgin yapısında artan lipit etkisiyle biyokütle oranında azalma meydana gelmiş ve mikroalgin rengi sarı-yeşil tonunda bulanık ve partiküllü bir görüntüye ulaşmıştır. Bu sebeple; mikroalgin yapısında biriken lipit artışı ile OD değeri ölçümünde karanlık nokta oluştuğu ve yanıltıcı bir OD değeri ölçüldüğü düşünülmektedir. %75 azot stresi deneyin de ise, istikrarlı ve yavaş bir şekilde yaklaşık on iki günlük bir büyüme gerçekleşmiş ve mikroalgin rengi %100 azotsuz ortamda yetişen mikroalgin rengine göre daha koyu bir yeşile dönüşmüştür. %75 azot stresinin (%75 azotsuz) uygulandığı deneyde %100 azot stresinin (%100 azotsuz) uygulandığı deneye kıyasla 6. günden itibaren daha yüksek OD değerleri elde edilmiştir. OD değerlerine paralel olarak %100 azotsuz ortamda elde edilen biyokütle oranı, %75 azot stresi ortamında yetiştirilen mikroalglerin biyokütle eldesine oranla daha düşük olmuştur.



Şekil 4.21. 400 ppm_v CO₂ derişimi altında erlenmayer içerisinde farklı azot stresi ortamlarında yetiştirilen mikroalglerin optik yoğunluk değerlerinin zamanla değişimi

%100 azotsuz ortamda lipit yüzdesinin normal BBM besiyerinde ve %75 azotsuz ortamda büyüyen alglerden elde edilen lipit yüzdesinden daha fazla olduğu Şekil 4.22’de görülmektedir. Düşük CO₂ oranlarında daha iyi lipit eldesi sağlandığına dair çalışmalar mevcuttur (El-Sheekh vd. 2019, Miranda vd. 2015). Azot stresi, fotosentez prosesinde hücrel karbonun işlevinin protein üretiminden %20 ile %40 arasında değişen değerlerde lipit üretimine doğru yönelimi noktasında uyarıcı bir etki yapmaktadır. Bu durumda alg

hücreleri klorofillerini hücre içi azot kaynağı olarak kullanarak daha fazla lipid üretimi gerçekleştirmektedir (Liu vd. 2008; Markou vd. 2017). Benzer sonuçlar içeren bir çalışmada (Miranda vd. 2016); mikroalglerin lipid üretimi için en uygun N, P ve tuz oranlarını belirlemek amaçlanmıştır. Çalışma sonucunda en iyi lipid üretimi sağlayan değerlerin 0,04 g/L NO_3^- (%75 azot stresi), 0,01 g/L P (%75 fosfor stresi) ve 5,0 g/L sodyum klorür (NaCl) olduğu tespit edilmiştir. Bu optimal koşulları karşılayan değerlerde *Ankistrodesmus sp.* ve *Chlamydomonas sp.* ile gerçekleştirilen deney sonuçlarına göre lipid asitleri verimi sırasıyla 2,1 ve 2,4 kat oranında artış göstermiştir. Ayrıca lipid üretim oranında gerçekleşen artışa ters olarak besin sınırlaması sebebiyle biyokütle eldesinde azalış görülmesi de daha önce yapılan literatür çalışmalarıyla desteklenmektedir (Li vd. 2008; Markou vd. 2017; Stephenson vd. 2010).

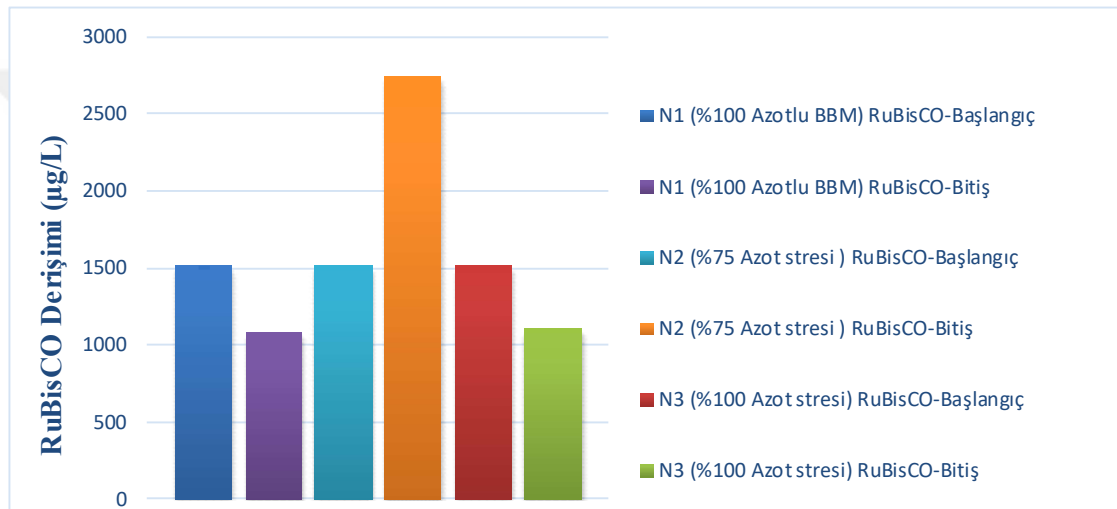


Şekil 4.22. 400 ppm_v CO₂ derişimi altında erlanmayer içerisinde farklı azot stresi ortamlarında yetiştirilen mikroalglerin lipid oranları

Şekil 4.23’de erlanmayerler içerisinde farklı azot stresi koşullarında yapılan deneylerin başlangıç ve bitiş aşamalarında gerçekleştirilen RuBisCO analiz sonuçları verilmektedir. %100 azotlu ortamda yetiştirilen alglerin fotobiyoreaktöre aşılardan önce ve büyümeleri tamamlandıktan sonra yapılan RuBisCO ölçüm analiz sonuçlarına bakıldığında, enzim miktarında büyük bir oranda düşüş olduğu görülmektedir. Aynı deney kapsamında OD değerlerinin değişimi incelendiğinde kısa sürede hızlı bir büyüme sonrasında ölüm fazına geçiş olduğu ve yapılan tüm deney setlerinin sonuçları ile kıyaslandığında düşük bir biyokütle eldesinin mevcudiyeti tespit edilmiştir. İyi bir fotosentetik verim, iyi bir RuBisCO enzimi-CO₂ fiksasyon oranı ve buna bağlı olarak iyi bir biyokütle eldesi demektir. Düşük biyokütle oranına paralel olarak düşük RuBisCO miktarı elde etmek beklenen bir durum olarak değerlendirilmektedir. Protein üretimi yerine lipid üretiminde gerçekleşen artışla beraber RuBisCO miktarında azalış söz konusu olmaktadır.

Erlanmayerde 400 ppm_v CO₂ derişimi altında %75 azot stresi ortamında yetiştirilen alglerin başlangıç RuBisCO miktarına (~1500 µg/L)) göre deney sonunda

ölçülen RuBisCO miktarında ~1,8 kat artış görülmüştür. %75 azotsuz ortamda büyüme %100 azotsuz ortama göre daha uzun süre devam etmiş ve biyokütlede artış olmuştur. Buna bağlı olarak RuBisCO oranında artış elde edilmiştir. Benzer artışın %100 azotlu ortamda da elde edilmesi beklenmiş, fakat %100 azotlu ortamda 5 günlük hızlı büyüme süresi ve 6. günde ani bir düşüşle kısa sürede ölüm fazına geçilmesi sebebiyle RuBisCO oranının beklenenden daha düşük seviyede ölçüldüğü tahmin edilmektedir. Deney kapsamındaki OD değerleri incelendiğinde yavaş oranlarda artan OD değerleri ile yavaş bir büyüme gerçekleştiği ve buna bağlı olarak biyokütlede bir artış olduğu belirlenmiştir. 400 ppm_v CO₂ derişimi altında %100 azotsuz ortamda yetiştirilen alglerin RuBisCO enzimlerine bakıldığında, %100 azotlu ortamda yetiştirilme öncesi ve sonrasındaki gibi enzim miktarında büyük bir düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, OD değerlerinde iyi bir artış olmaması, iyi bir büyümenin gerçekleşmemesi ve buna bağlı olarak iyi bir biyokütle verimi elde edilememesidir.



Şekil 4.23. Farklı azot kaynaklarında RuBisCO enzim miktarındaki değişimler

pH arttıkça karbonik anhidraz enziminin aktivitesinin artışıyla beraber aslında ribulaz 1,5 bifosfat karboksilaz enziminin aktivitesi artmaktadır. Fotosentetik bitkilerin hücrelerinde bulunan ve CO₂ gazının fotosentetik asimilasyonundaki anahtar reaksiyonu katalize eden RuBisCO enzim aktivitesi, Kalvin döngüsünde mikrobiyal CO₂ fiksasyon potansiyelinin bir göstergesidir (Xiong vd. 2010). Ortam pH'sının artmasıyla birlikte alg bünyesindeki lipit oranı da artmaktadır. Bu da, algden elde edilecek biyodizel miktarını arttırmaktadır (Huang vd. 2010; Spolaore vd. 2006; Chisti 2007; Brennan ve Owende 2010; Williams ve Laurens 2010). Fotosentezin karanlık evre döngüsündeki RuBisCO aktivitesi arttığı için fotosentez verimli bir şekilde gerçekleşmekte, daha yüksek oranda CO₂ fiksasyonu olmakta ve buna bağlı olarak daha iyi bir biyokütle verimi elde edilmektedir. pH'nın düşmesi ise, enzim aktivitesini sınırladığı için büyümeyi ya doğrudan inhibe etmekte ya da çok az da olsa büyüme sağlasa dahi nihai durumda biyokütle hasadını çok verimsiz kılmaktadır (Anjos vd. 2013; Aslam vd. 2017; Tang vd. 2011). CO₂'nin fotosentez prosesi boyunca mikroalgler tarafından kullanılabilmesi sonucunda ise, ortamda bulunan karbonun azalmasıyla birlikte kültür ortamının pH değerinde yükselme olmaktadır (Suh 2003). Bu nedenle iyi bir biyokütle verimi için pH'ın 9-10 aralığına ulaşması, optimum büyüme ile iyi bir ürün eldesi sağlamaktadır (Daliry vd. 2017; Goli vd. 2016; Ihnken vd. 2014; Tsai vd. 2012).

5. SONUÇLAR

Aydınlatma şiddetinin *C. vulgaris* mikroalg büyüme verimine etkisinin incelendiği deneylerde (%15 CO₂; 24 saat aydınlık) en yüksek biyokütle derişimine 7 000 lux aydınlatma şiddetinde ulaşılmıştır. 7 000 lux aydınlatma şiddetinde elde edilen kuru ağırlık derişimi (max ~2 g/L) 11 000 lux'e göre 2,5 kat, 15 000 lux'e göre ise 3,8 kat daha fazla olmuştur. 7 000 lux'te elde edilen CO₂ tutma veriminin (11,96 g/L/gün) 11 000 lux'e göre 2 kat, 15 000 lux'e göre ise 2,5 kat daha fazla olduğu görülmüştür.

7 000 lux sabit aydınlatma şiddeti ve %15 CO₂ gazı derişiminde yapılan deneylerde ise en yüksek biyokütle derişimi 24 saat ışık altında elde edilmiştir. 24 saat aydınlıkta (max 2 g/L) 16 saat aydınlığa göre 1,8 kat, 12 saat aydınlığa göre 1,5 kat daha fazla verim elde edilmiştir. 24 saat aydınlıkta elde edilen CO₂ tutma verimi (10,26 g/L/gün) 16 saate göre 1,7 kat, 12 saate göre 2,6 kat daha fazladır.

CO₂ derişiminin *C. vulgaris* mikroalg büyüme verimine etkisini incelemek amacıyla hacimce 400 ppm, %15 ve %90 CO₂ içeren gaz karışımları altında deneyler gerçekleştirilmiştir (7 000 lux; 24 saat aydınlık). 400 ppm_v CO₂ içeren gaz karışımı altında *C. vulgaris* mikroalg kültürünün başlangıç kuru ağırlık değeri 0,01 g/L'dir. 5. günün sonunda kuru ağırlık derişimi 29 kat artarak yaklaşık 0,3 g/L olmuştur. 7. gün sonunda 5. gün OD değerine göre bir düşüş gerçekleşmiş ve kültür ölüm fazına geçmiştir. 7. günün sonunda elde edilen kuru ağırlık derişimi 0,2 g/L olarak belirlenmiştir. Deneye pH 5,2 civarında başlanılmış ve deney sonuna kadar pH değeri 10,5 (alkali) seviyesine doğru yükselmiştir. pH koşullarının iyi olmasına rağmen fotobiyoreaktöre verilen 400 ppm_v CO₂ derişimi yüksek mikroalg üretimi için yeterli olmamıştır. %15 CO₂ içeren gaz karışımı altında *C. vulgaris* mikroalg kültürü iyi bir büyüme eğrisi yakalamıştır. %15 CO₂'de kuru ağırlık değeri (max 1,47 g/L) 400 ppm_v'e göre 5 kat fazla verimle elde edilmiştir. %15 CO₂ içeren gaz karışımı için mikroalg üreme verimliliği ve CO₂ tutma verimi sırasıyla 0,14 g/L/gün ve 0,25 g/L/gün olarak belirlenmiştir. Mikroalg numunelerinde yapılan klorofil ölçümlerinin gerek kuru ağırlık gerekse optik yoğunluk değerleriyle örtüşmediği görülmektedir. 4. günün sonuna kadar ortamdaki artan hücre yoğunluğu mikroalg hücreleri bünyesindeki klorofil miktarını da arttırmıştır. 4. günden sonra ortamdaki hücre yoğunluğunun zamanla artması, mikroalg hücrelerinin tümünün ışığa erişimini engellemiş olabilir. Bu da, mikroalg hücrelerinin birbirlerini gölgelemelerine, hücredeki klorofil miktarının azalmasına neden olmuş olabilir. Fotobiyoreaktöre verilen gaz karışımındaki CO₂ oranı %90'a çıkarıldığında ortam pH'sının 6'nın altına düştüğü, 2. günün sonunda alg hücrelerinin topaklaşmaya başladığı ve fotobiyoreaktörün dibine çöktüğü gözlemlenmiştir. Bu durum, fotobiyoreaktöre verilen yüksek oranda CO₂ gazının mikroalgler tarafından kullanılamadığını göstermektedir. Suda çözünen CO₂ gazı karbonik aside dönüşerek ortam pH'sını düşürmüş, düşük pH nedeniyle de asidik ortam mikroalg kültürünün inhibe olmasına neden olmuş olabilir. Yüksek oranda CO₂ içeren gaz karışımlarının fotobiyoreaktöre verildiği deneylerde ortamın tamponlanması ve mikroalg hücrelerinin daha fazla çözünmüş CO₂ gazını bünyelerine alıp kullanabilmeleri için optimum pH değerinde bir ortamın sağlanması gerekmektedir. Mikroalg kültürünü doğrudan yüksek düzeyde CO₂ içeren gaz karışımına maruz bırakmanın büyümeyi engellediği görülmüştür. Bu durumun alg kültürüne verilen gaz karışımındaki CO₂ gazının kademeli olarak arttırılması ile önlenilebileceği düşünülmektedir.

Azot stresi kapsamında, ilk aşamada; fotobiyoreaktöre aşılanan *C. vulgaris* mikroalgi, %15 CO₂ derişimi altında ve %100 azotlu ortamda büyüme bırakılmıştır. Başlangıç kuru ağırlık değeri 0,01 g/L iken 5. gün sonunda alg kültürü derişimi 46 kat artarak 0,46 g/L olmuştur. %100 azotlu ortamda lipit oranı başlangıçta %10 iken, deney sonunda %3 oranında belirlenmiştir. Deneye pH 6 civarında başlanılmış ve deney sonuna kadar pH değeri nötr değere doğru yükselmiştir. İyi bir kuru ağırlık eldesinde pH'nın artışına bağlı olarak gerçekleşen optimum büyüme koşulları etken olmuş olabilir. Klorofil-a, klorofil-b ve karotenoid değerlerinde ise adaptasyon süresi sonrasında OD değerinde ciddi oranda artışın gerçekleştiği 4. günde maximum değerler elde edilmiş ve sonraki günden itibaren bu değerlerde büyük oranda düşüşler gerçekleşmiştir. Populasyonda gerçekleşen hızlı artışın etkisiyle; ortamının gaz karışım hızı, CO₂ alım kapasitesi ve ışık etkinliği yönünden eşitliğin sağlanamaması sebebiyle klorofil ve karotenoid değerlerinde kısa sürede bir değişim olduğu düşünülmektedir. Fotobiyoreaktör içerisinde %15 CO₂ derişimi altında ve %100 azotlu ortamda büyüme gerçekleşirken, %100 azotsuz ortamda üç gün boyunca yapılan OD değerlerinde hiçbir artış gerçekleşmemiş, büyüme inhibe olmuştur. %100 azotsuz ortamda fotobiyoreaktöre verilen CO₂ derişiminin yüksek olması ve ortamdaki besin yetersizliği büyümeyi engellemiş olabilir.

%15 CO₂ derişimi altında azot stresi ortamında iyi bir büyüme verimi elde edilememesi üzerine, *C. vulgaris* mikroalgi bir erlanmayer içerisinde 400 ppm_v CO₂ derişiminde %75 ve %100 azot stresi şartlarında büyüme bırakılmıştır. Yaklaşık on iki gün boyunca büyüme takip edilmiştir. %100 azotsuz ortamda 8. günün sonunda OD değerinde net bir düşüş gözlemlenmiştir. %100 azotsuz ortamda yetişen mikroalgin yapısında artan lipit etkisiyle biyokütle oranında azalma meydana gelmiştir. %75 azot stresi deneyinde ise, istikralı ve yavaş bir şekilde yaklaşık on iki günlük bir büyüme gerçekleşmiştir. Deney boyunca ölçülen OD değerlerinde %100 azotsuz ortama kıyasla daha iyi artış olduğu belirlenmiştir. %75 azotsuz ortamda %100 azotsuz ortama göre 1,3 kat daha iyi büyüme verimi elde edilmiştir. Ayrıca, %75 azotsuz deneyde %100 azotsuz ortama göre 2,5 kat daha yüksek RuBisCO oranı belirlenmiştir. %100 azotsuz deneyde ise %75 azotsuz ortama göre 1,2 kat daha yüksek lipit oranı elde edilmiştir.

Çalışma sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, kömürle çalışan termik santrallerin baca gazını temsil eden gaz karışımında (%15 CO₂ içeren CO₂+N₂+O₂ karışımı) fotobiyoreaktörde yetiştirilen mikroalglerde 7 000 lux aydınlatma şiddetinde ve 24 saat aydınlatma süresince azot stresinin uygulanmadığı durumda iyi bir büyüme verimi elde edilmiştir. Azot stresi deneylerinde ise, yüksek CO₂ derişimine (%15) kıyasla düşük CO₂ derişimi (400 ppm_v) altında lipit üretim veriminde artış elde edilmiştir. 400 ppm_v CO₂ derişiminde biyokütle ve klorofil oranında kademeli bir azalma söz konusuysa, lipit üretiminde bir artış meydana gelmiştir. Lipit verimindeki artışa paralel olarak RuBisCO enziminde düşüş gerçekleşmiştir. Bu bilgiler, azot stresi ile elde edilecek lipit oranını arttırmak için RuBisCO aktivitesini azaltıcı koşulların oluşturulmasına yönelik çalışmalara bir alt yapı niteliği taşımaktadır.

Sonuçlar doğrultusunda devamındaki çalışmalara yön vermek amacıyla sunulan öneriler şunlardır:

- Yüksek CO₂ derişiminin karbon metabolizmasındaki karbonik anhidraz ve RuBisCO gibi birkaç anahtar enzimi etkilediği bilinmektedir. Artan CO₂ derişiminin etkisiyle pH değerinin azalmasına bağlı olarak karboksilasyon aktivitesi azalır ve RuBisCO'nun CO₂'yi tutması baskılanır, bu da fotosentez veriminde azalma ile sonuçlanır. Yüksek CO₂ derişimlerinde farklı tamponlama metotları denenerek en iyi pH dengeleyici metot belirlenebilir ve mikroalglerin büyümeye adapte edilmesine yönelik çalışmalara yön verilebilir. Bu sayede yüksek CO₂ derişimlerinde ve azot stresi koşulları altında daha iyi bir lipit ve biyokütle verimi sağlanabilir, biyodizel oranında artış elde edilebilir.
- Yüksek CO₂ derişimlerinde (>15 CO₂) mikroalg yetiştirilme aşamalarında kademeli olarak sıcaklık arttırılabilir. Bu sayede gazların çözünürlüğündeki azalma sebebiyle ortam pH'sı asidik değerlere inmez ve mikroalg hücrelerinin karbon fiksasyonu yapabilme kabiliyetlerinde artış gerçekleşebilir. Bu adaptasyonun sağlandığı en iyi parametreler doğrultusunda %100 azotsuz ortamda mikroalg yetiştirilebilmesi yapılabilir, çalışma kapsamında elde edilen lipit oranlarından (>%20) daha fazla oranda lipit elde edilebilir.
- Hücre sayısının durağan faza geldiğinde maksimum seviyeye ulaşması ile mikroalg hücrelerinin fotonları soğurma oranları azalır. Yeterli sayıda fotona ulaşamaması sonucunda enerji üretiminde azalma olur ve RuBisCO enziminin CO₂ fiksasyonu yapabilmesi için gerekli olan enerji azaldığı için düşük verimde büyüme gerçekleşir. Işık şiddetinin (>7 000 lux) büyüme fazında arttırılıp, durağan faza geçince azaltılması ile RuBisCO enziminin daha fazla CO₂ fiksasyonu yapabilmesi ve buna bağlı olarak büyüme parametrelerinde daha iyi sonuçlar elde edilmesi sağlanabilir.
- Işık şiddeti (>7 000 lux) arttırılıp, sürekli aydınlatma şiddeti yerine 16:8 saatlik aydınlık:karanlık döngüsünde azot stresi çalışmalarına ağırlık verilerek hücrelerin yapısındaki lipit oranlarında artış elde edilebilir. Çünkü, 8 saatlik karanlık evrede mikroalg hücrelerindeki fazla enerji solunum faaliyetlerine harcanır ve sürekli aydınlatmadaki yüksek foton sayısının büyümeyi azaltması önlenerek, daha fazla büyüme ve lipit verimi sağlanabilir.

6. KAYNAKLAR

- Ahmad, A.L., Yasin N.H., Mat C.J.C. and Derek Lim, J.K. 2011. Microalgae as a sustainable energy source for biodiesel production: A review. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 15: 584-593.
- Ak, B., Atak, E., Köse, M.D. and Bayraktar, O. 2019. Production of *Chlorella sp.* in a Designed Photobioreactor. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 15 (4): 377-383.
- Akar, G. 2009. Kömür Mineral Madde İçeriğinin Yanma Prosesindeki Etkilerinin İncelenmesi. Doktora tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 194 s.
- Akbulut, F. 2018. Fındık kabuğundan pirolitik yakıt üretiminin optimizasyonu. Yüksek lisans tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, 53 s.
- Anjos, M., Fernandes, B.D., Vicente, A.A., Teixeira, J.A. and Dragone, G. 2013. Optimization of CO₂ bio-mitigation by *Chlorella Vulgaris*. *Bioresource Technology*, 139: 149-154.
- Anonim 1: https://openwetware.org/wiki/Lidstrom:Buffers#phosphate_buffer_basics, [Son erişim tarihi: 31.12.2020].
- Anonim 2: <https://www.greencarcongress.com/2008/09/mckinsey-report.html>. [Son erişim tarihi: 03.06.2021].
- Anonim 3: <https://www.co2.earth/global-co2-emissions>. [Son erişim tarihi: 02.06.2021].
- Anonim 4: <https://mgm.gov.tr/FILES/iklim/iklim-degisikligi-projeksiyon2015.pdf>. [Son erişim tarihi: 06.06.2021].
- Anonim 5: <http://www.zeroco2.no/introduction/why-ccs>. [Son erişim tarihi: 07.06.2021].
- Anonim 6: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_chapter3-1.pdf. [Son erişim tarihi: 13.06.2021].
- Anonim7: https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/20574/mod_resource/content/0/BF%209.%20HAFTA.pdf. [Son erişim tarihi: 16.06.2021].
- Anonim 8: <https://www.apogeeinstruments.com/conversion-ppfd-to-lux/>. [Son erişim tarihi: 20.06.2021].
- Amaro, H.M., Guedes, A.C. and Malcata, F.X. 2011. Advances and perspectives in using microalgae to produce biodiesel. *Appl Energy*, 88: 3402-3410.
- Aslam, A., Thomas-Hall S.R., Mughal, T.A. and Schenk, P.M. 2017. Selection and adaptation of microalgae to growth in 100% unfiltered coal-fired flue gas. *Bioresource Technology*, 233: 271-283.
- Aviva Systems Biology 2005. RuBisCo ELISA Kit (Plant) (OKCA00374) Instructions for use. <https://www.avivasysbio.com/pub/media/pdf/products/OKCA00374.pdf>. [Son erişim tarihi: 19.04.2021].
- Barahoei, M., Hatamipour and M.S., Afsharzadeh, S. 2020. CO₂ capturing by *C. vulgaris* in a bubble column photo-bioreactor; Effect of bubble size on CO₂ removal and growth rate. *J. CO₂ Util*, 37: 9-19.

- Barsanti, L. and Gualtieri, P. 2014. *Algae Anatomy, Biochemistry, and Biotechnology- Second Education. Italy, CRC Press.*
- Bartley, M.L., Boeing W.J., Dungan B.N., Holguin F.O. and Schaub T. 2014. pH effects on growth and lipid accumulation of the biofuel microalgae *Nannochloropsis salina* and invading organisms, *Journal of Applied phycology*, 26 (3): 1431-1437.
- Başaran, M. 2013. Türkiye’de Kömürlü Termik Santraller, ODTÜ Mezunlar Derneği, Enerji Grubu Cumartesi Söyleşileri. 23.02.2013. ODTÜ Vişnelik Tesisleri, Ankara.
- Behera, B., Acharya, A., Gargey, I.A., Aly, N. and Balasubramanian, P. 2019. Bioprocess engineering principles of microalgal cultivation for sustainable biofuel production. *Bioresource Technology Reports*, 5: 297-316.
- Ben-Amotz, A. 2008. Bio-Fuel and CO₂ Capture by Marine Microalgae. (slide presentation) Paper presented at the *Algal Biomass Summit*, November 14-16, San Fransisco.
- Benemann, J. 1997. CO₂ mitigation with microalgae systems. *Energy Convers Manage* 38: 475-479.
- Bicudo, C.E. and Menezes, M. 2006. Gêneros de algas de águas continentais do Brasil. Chave para identificação e descrições. Editora Rima, Brazil.
- Bischoff, H.W. and Bold, H.C. 1963. Phycological studies IV. Some soil algae from Enchanted Rock and related algal species. *Phycol. Stud. (University of Texas)* 4 (6318): (1)-95.
- Blair, M.F., Kokabian, B. ve Gude, V.G. 2014. Light and growth medium effect on *C. vulgaris* biomass production. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2 (1): 665-674.
- Blankenship, R.E. 2014. Molecular mechanisms of photosynthesis- Second education. Chapter 1. The basic principles of photosynthetic energy storage. pp 1-9.
- Bligh, E.G. and Dyer, W.J. 1959. A Rapid Method of Total Lipid Extraction and Purification. *Canadian Journal of Biochemistry and Physiology*, 37: 911-917.
- Bogless, C.D. 2014. Optimization of Growth Parameters for Algal Regrowth Potential Experiments. M.Sc. Thesis, California Polytechnic State University, San Luis Obispo/CA-USA.
- Boldrin, A., Andersen, J.K., Møller, J., Christensen, T.H. and Favoino, E. 2009. Composting and compost utilization: accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Manage Res*; 27: 800-812.
- Borowitzka, M.A. 1992a. Algal biotechnology products and processes: Matching science and economics. *f. Appl. Phycol.*, 4: 267-279.
- Borowitzka, M.A. 1992b. Comparing carotenogenesis in *Dunaliella* and *Haematococcus*: Implications for commercial production strategies. IN "Profiles on Biotechnology" edited by Villa, T.G., & Abalde, J. (Universidade de Santiago de Compostela: Santiago de Compostela), 301-310.
- Borowitzka, M.A. 1996. Closed algal photobioreactors: design considerations for large-scale systems. *J. mar. Biotechnol*, 4: 185-191.

- Borowitzka, M.A. 1999. Commercial production of microalgae: ponds, tanks, and fermenters. *Progress in Industrial Microbiology*, 35: 313-321.
- Borowitzka, M.A. and Moheimani N.R. 2013a. Open pond culture systems. In *Algae for Biofuels and Energy* (Borowitzka, M.A. & Moheimani, N.R., editors), 133-152. Springer, Dordrecht.
- Borowitzka, M.A. and Moheimani, N.R. 2013b. Sustainable biofuels from algae. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 18: 13-25.
- Brennan, L. and 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.
- Brown, M.L. and Zeiler, K.G. 1993. Aquatic biomass and carbon dioxide trapping. *Energy Convers. Manage*, 34: 1005-1013.
- Chae, S., Hwang, E. and Shin, H. 2006. Single cell protein production of *Euglena gracilis* and carbon dioxide fixation in an innovative photo-bioreactor. *Bioresour. Technol.*, 97 (2006): 322-329.
- Chattopadhyay, S. and Sen, R. 2013. Fuel properties, Engine performance and environmental benefits of biodiesel produced by a green process. *Appl. Energy*, 105: 319-326.
- Chávez-Fuentes, P., Ruiz-Marin, A. and Canedo-López, Y. 2018. Biodiesel synthesis from *C. vulgaris* under effect of nitrogen limitation, intensity and quality light: estimation on the based fatty acids profiles. *Mol Biol Rep*, 45, 1145-1154.
- Chen, C.Y., Yeh, K.L., Aisyah, R., Lee, D.J. and Chang, J.S. 2011. Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: a critical review. *Bioresource technology*, 102: 1, 71-81.
- Cheirsilp, B. and Torpee, S. 2012. Enhanced growth and lipid production of microalgae under mixotrophic culture condition: Effect of light intensity, glucose concentration and fed-batch cultivation, *Bioresource Technology*, 110, 510-516.
- Chinnasamy, S., Ramakrishnan, B., Bhatnagar A.C. and Das, K. 2009. Biomass Production Potential of a Wastewater Alga *Chlorella Vulgaris* ARC 1 under Elevated Levels of CO₂ and Temperature. *Int. J. Mol. Sci.*, 10: 518-532.
- Chiu, S.Y., Kao, C.Y., Chen, C.H., Kuan, T.C., Ong, S.C. and Lin, C.S. 2008. Reduction of CO₂ by a high-density culture of *Chlorella* sp. In a semicontinuous photobioreactor. *Bioresource Technology*, 99, 3389-3396.
- Chiu, S.Y., Tsai, M.T., Kao, C.Y., Ong, S.C. and Lin, C.S. 2009. The air-lift photobioreactors with flow patterning for high-density cultures of microalgae and carbon dioxide removal. *Engineering in Life Sciences*, 9(3): 254-260.
- Chiu, S.Y., Kao, C.Y., Huang, T.T., Lin, C.J., Ong, S.C., Chen, C.D., Chang, J.S. and Lin, C.S. 2011. Microalgal biomass production and on-site bioremediation of carbon dioxide, nitrogen oxide and sulfur dioxide from flue gas using *Chlorella* sp. Cultures. *Bioresource Technology*, 102: 9135-9142.
- Chisti, Y. 2007. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25 (3): 294-306.

- Choi, Y.Y., Patel, A.K., Hong, M.E., Chang W.S. and Sim, S.J. 2019. Microalgae Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS): An emerging sustainable bioprocess for reduced CO₂ emission and biofuel production. *Bioresource Technology Reports* 7: 100270.
- Chojnacka, K. and Marquez-Rocha, F.J. 2004. Kinetic Stoichiometric relationships of the energy and carbon metabolism in the culture of microalgae *Biotechnology*, 3 (1): 21-34.
- Christenson, L.B. and Sims, R.C. 2012. Rotating algal biofilm reactor and spool harvester for wastewater treatment with biofuels by-products. *Biotechnol Bioeng.*, 109:1674–84.
- Converti, A., Casazza, A.A., Ortiz, E.Y., Perego, P. and Del Borghi, M. 2009. Effect of temperature and nitrogen concentration on the growth and lipid content of *Nannochloropsis oculata* and *C. vulgaris* for biodiesel production. *Chemical Engineering and Processing*, 48: 1146-1151.
- Costa, J.A.V. and de Morais, M.G. 2014. An Open Pond System for Microalgal Cultivation. *Biofuels from Algae*, 1-22.
- Craggs, R. 2005. Advanced integrated wastewater ponds. In: Shilton, A. (Ed.), *Pond Treatent Technology. IWA Scientific and Technical Report Series*, IWA, London, U.K., 282-310.
- Crang, R., Lyons-Sobaski, L. and Wise, R. 2019. Plant Anatomy/ A Concept-Based Approach to the Structure of Seed Plants. *Springer* Nature Switzerland, 739 s.
- Daliry, S., Hallajisani, A., Mohammadi, Roshandeh, J., Nouri, H. and Golzary, A. 2017. Investigation of optimal condition for *C. vulgaris* microalgae growth. *Global J. Environ. Sci. Manage.*, 3 (2): 217-230.
- Demirbas, A. and Demirbas, F.M. 2010. *Algae Energy*. Springer, 139-154.
- Demirbas, A. and Demirbas, F.M. 2011. Importance of algae oil as a source of biodiesel. *Energy Convers Manage*; 52: 163-170.
- Demirer, G. N., Demirer, S.U., Kaya, D., Ergüder-Bayramoğlu, T.H. ve Kaymak, B. 2015. Mikroalgal ve Anaerobik Mikrobiyel Kültürlerin Kullanımı ile Entegre Besiyeri Besiyeri Madde Giderimi, Sera Gazı Mitigasyonu ve Biyo-Yakıt ve Biyo-Ürün Eldesi. Ortadoğu Teknik Üniversitesi. Proje No: 111Y205. <https://open.metu.edu.tr/bitstream/handle/11511/49418/TVRVeU16RXg.pdf>.
- De Pauw, N., Morales, J. and Persoone G. 1984. Mass culture of microalgae in aquaculture systems: progress and constraints *Hydrobiologia*, 116 (117): 121-134.
- Douskova, I., Doucha, J., Livansky, K., Machat, J., Novak, P., Umysova, D. and Vitova, M. 2008. Simultaneous flue gas bioremediation and reduction of microalgal biomass production costs. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 82(1), 179–185.
- Dukarte, J.H., de Morais, E.G., Radmann, E.M. and Costa, J.A.V. 2017. Biological CO₂ mitigation from coal power plant by *Chlorella fusca* and *Spirulina sp.* *Bioresource Technology*, 234, 472–475.

- Düzol, B.E. 2019. Alglerle Karbondioksitin Biyolojik Olarak Tutulması. Doktora tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara. 121 s.
- Edberg, A. 2010. Growth of *Chlorella Vulgaris* at high carbon dioxide levels in Swedish light conditions. Laboratory testing and development of methods. Master of Science Thesis in Energy Engineering. Umeå Institute of Technology.
- Ekin, T. 2018. Linyit Yakıtlı Pilot Termik Santral için Baca Gazı Emisyon Azaltma Seçeneklerinin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi. Yüksek Lisans Tezi. Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 125 s.
- Elcik, H. ve Çakmakçı, M. 2017. Mikroalglerden Yenilenebilir Biyoyakıt Üretimi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32 (3).
- El-Sheekh, M.M., Gheda, S.F., El-Sayed, A.E.K.B., Abo Shady, A.M., El-Sheikh, M.E. and Schagerl, M. 2019. Outdoor cultivation of the green microalga *C. vulgaris* under stress conditions as a feedstock for biofuel. *Environmental Science and Pollution Research*, 26 (18): 18520-18532.
- EPDK 2019. 2018 Faaliyet Raporu. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/5-5846/2018-yili-kurum-faaliyet-raporu-yayinlanmistir>. [Son Erişim Tarihi: 11.05.2021].
- EPDK 2020. 2020 Yılı Elektrik Piyasası Mart Ayı Sektör Raporu. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı.
- European Union 2016. Regulations. Official Journal of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016R0266&rid=1>. [Son Erişim Tarihi: 16.07.2021].
- Ge, Y., Liu, J. and Tian, G. 2011. Growth characteristics of *Botryococcus braunii* 765 under high CO₂ concentration in photobioreactor. *Bioresource Technology*, 102 (1): 130-134.
- GISS NASA 2021. Goddard Institute for Space Studies, National Aeronautics and Space Administration. <https://www.giss.nasa.gov/research/news/20210114/> (Son erişim tarihi: 15.02.2021).
- Global CCS Institute 2020. <https://www.globalccsinstitute.com/about/what-is-ccs/capture/>. [Son erişim tarihi: 06.07.2020].
- Goli, A., Shamiri, A., Talaiekhosravi, A., Eshtiaghi, N., Aghamohammadi, N. and Aroua, M.K. 2016. An overview of biological processes and their potential for CO₂ capture. *Journal of Environmental Management*, 183: 41-58.
- Goncaloğlu, B.İ., Ertürk F. ve Erdal A. 2000. Termik Santrallerle Nükleer Santrallerin Çevresel Etki Değerlendirmesi Açısından Karşılaştırılması. *Ekoloji Çevre Dergisi*, Sayı: 34, Ocak-Şubat-Mart.
- García-Cubero, R., Moreno-Fernández, J. and García-González, M. 2017. Potential of *Chlorella vulgaris* to Abate Flue Gas. *Waste and Biomass Valorization*. DOI 10.1007/s12649-017-9987-9.
- Gouveia, L., Choubert, G., Gomes, E., Pereira, N., Santinha, J. and Empis, J. 2002. Pigmentation of gilthead seabream, *Sparus aurata* (Lin 1875), using *C. vulgaris* (*Chlorophyta*, *Volvocales*) microalga. *Aquaculture Research*, 33: 987-993.

- Griffiths, M.J., Garcin, C., Hille, R.P. and Harrison, S.T.L. 2011. Interference by pigment in the estimation of microalgal biomass concentration by optical density. *Journal of Microbiological Methods*, 85: 119-123.
- Grobbelaar, J.U., Nedbal, L. and Tichy, V. 1996. Influence of high frequency light/dark fluctuations on photosynthetic characteristics of microalgae photoacclimated to different light intensities and implications for mass algal cultivation. *Journal of Applied Phycology*, 8: 335-343.
- Gross, M., Henry, W., Michael, C. and Wen, Z. 2013. Development of a rotating algal biofilm growth system for attached microalgae growth with in situ biomass harvest. *Bioresour Technol*, 150:195–201.
- Guschina, I.A. and Harwood, J.L. 2006. Lipids and Lipid Metabolism in Eukaryotic Algae. *Progress in Lipid Research*, 45: 160-186.
- Haiduc, A.G., Stucki, S., Vogel, F., Ludwig, C. and Brandenberger, M. 2009. Catalytic gasification of algae in supercritical water for biofuel production and carbon capture. *Energy & Environmental Science*, 2: 535-541.
- Healey, F.P. 1975. Physiological indicators of nutrient deficiency in algae. Tech. Rep. 585. Department of the Environment, Fisheries and Marine Service Research and Development Directorate, Winnipeg, Man.
- Han, F., Pei, H., Hu, W., Song, M., Ma, G. and Pei, R. 2015. Optimization and lipid production enhancement of microalgae culture by efficiently changing the conditions along with the growth-state. *Energy Conversion and Management*, 90: 315-322.
- Ho, S.H., Chen, C.Y. and Chang, J.S. 2011. Effect of light intensity and nitrogen starvation on CO₂ fixation and lipid/carbohydrate production of an indigenous microalga *Scenedesmus obliquus* CNW-N. *Bioresour Technology*. 113: 244-252.
- Ho, S.H., Chen, C.Y., Chang, J.S. and Lee D.J. 2011. Perspectives on microalgal CO₂-emission mitigation systems: A review. *Biotechnology Advances*, 29: 189-198.
- Hossain, A.B.M.S., Boyce, A.S.A.N., Chowdhury, P. and Naquiuddin, M. 2008. Biodiesel fuel production from algae as renewable energy. *American Journal of Biochemistry and Biotechnology*, 4 (3): 250254.
- Hu, Q., Sommerfeld, M., Jarvis, E., Ghirardi, M., Posewitz, M., Seibert, M. and Darzins, A. 2008. Microalgal triacylglycerols as feed- stocks for biofuel production: perspectives and advances. *The Plant Journal*, 54: 621-639.
- Hu, X., Zhou, J., Liu, G. and Gui, B. 2016. Selection of microalgae for high CO₂ fixation efficiency and lipid accumulation from ten *C. vulgaris* strains using municipal wastewater, *Journal of Environmental Sciences*, 46: 83-91.
- Huang, G., Wang, J., Kuang, Y. and He, H. 2016. Effects of SO₂ and NO₂ in Flue Gas on CO₂ Sequestration and Intracellular Microstructures Analysis of *Chlorella sp.* Research & Reviews: *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 5 (3): 60-67.
- Huang, G.H., Chen, F., Wei, D., Zhang, X.W. and Chen, G. 2010. Biodiesel Production by Microalgal Biotechnology. *Applied Energy*, 87 (1): 38-46.

- Hulatt, C.J. and Thomas, D.N. 2011. Productivity, carbon dioxide uptake and net energy return of microalgal bubble column photobioreactors. *Bioresource Technology*, 102 (10): 5775-5787.
- IEA 2017a. Key World Energy Statistics. Sayfa 54. Paris: OECD/IEA.
- IEA 2017b. A world in transformation: World Energy Outlook 2017. 14 November 2017.
- IEA 2019. Exploring Clean Energy pathways - The role of CO₂ storage, Paris: IEA.
- IEA 2020a. Global CO₂ emissions in 2019. Article- 11 February 2020 <https://www.iea.org/articles/global-co2-emissions-in-2019>. [Son erişim tarihi: 25.04.2021].
- IEA 2020b. World Energy Outlook Flagship report- October 2020. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>. [Son erişim tarihi 11 .05.2021].
- Ihnken, S., Kromkamp, J.C. and Silsbe, G.M. 2014. Light acclimation and pH perturbations affect photosynthetic performance in *Chlorella* mass culture. *Aquatic Biology*, 22: 95-110.
- İnal, S. ve Aydın, K. 2019. Kömürün Kendiliğinden Yanması Ve Etkileyen Faktörler (Derleme). Bilimsel Madencilik Dergisi, 58 (2): 145-165.
- IPCC 1996. Climate Change 1995, The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Houghton J, T., et al., eds., WMO/UNEP. Cambridge University Press, New York.
- IPCC 2005. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (eds.)]. *Cambridge University Press*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 pp.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007: The Scientific Basic. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policy Makers.
- Ishaneer Sharma 2020. <https://ishaneesharma.blogspot.com/2019/04/carbon-capture-technologies.html?spref=pi>. [Son erişim tarihi: 06.07.2020].
- Jankowska, E., Sahu, A.K. and Oleskowicz-Popiel, P. 2017. Biogas from microalgae: Review on microalgae's cultivation, harvesting and pretreatment for anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75: 692-709.
- James, C.M., Al-Khars, A.M. and Chorbani, P. 1988. Ph Dependent Growth of *Chlorella* in a Continuous Culture System. *Journal of the World Aquaculture Society*, 19 (2): 27-35.
- Jeong, M.J., Gillis, J.M. and Hwang, J.Y. 2003. Carbon dioxide mitigation by microalgal photosynthesis. *Bulletin- Korean Chemical Society*, 24: 1763-1766.
- Kao, C.Y., Chen, T.Y., Chang, Y.B., Chiu, T.W., Lin, H.Y., Chen, C.D., and Lin, C.S. 2014. Utilization of carbon dioxide in industrial flue gases for the cultivation of microalga *Chlorella* sp. *Bioresource Technology*, 166, 485-493.

- Kendirlioğlu, G. 2012. *Chlorella Vulgaris*'in Hücre Sayısı, Klorofil Miktarı ve Büyüme Hızına Aydınlanma Süresinin Etkisi. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.
- Kendirlioğlu, G., Ağırman, N. and Cetin, A.K. 2015. The effects of photoperiod on the growth, protein amount and pigment content of *Chlorella Vulgaris*. *Turkish Journal of Science & Technology*, 10 (2): 7-10.
- Khalil, Z.I., Asker, M.M., El-Sayed, S. and Kobbia, I.A. 2010. Effect of pH on growth and biochemical of *Donaliella* and *Chlorella*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 26: 1225-1231.
- Khalili, A., Najafpour, G.D., Amini, G. and Samkhaniyani, F. 2015. Influence of nutrients and LED light intensities on biomass production of microalgae *Chlorella Vulgaris*. *Biotechnology Bioprocess Engineering*, 20: 284-290.
- Kim, T.H., Lee, Y., Han, S.H. and Hwang, S.J. 2013. The effects of wavelength and wavelength mixing ratios on microalgae growth and nitrogen, phosphorus removal using *Scenedesmus sp.* for wastewater treatment. *Bioresource technology*, 130: 75-80.
- Kim, J.K., Kottuparambil, S., Moh, S.H., Lee, T.K., Kim, Y.J., Rhee, J.S. and Han, T. 2014. Potential applications of nuisance microalgae blooms. *Journal of Applied Phycology*, 27 (3): 1223-1234.
- Kitaya, Y., Azuma, H. and Kiyota, M. 2005. Effects of temperature, CO₂/O₂ concentrations and light intensity on cellular multiplication of microalgae, *Euglena gracilis*. *Advances in Space Research*, 35 (9): 1584-1588.
- Khoeyi, Z.A., Seyfabadi J. and Ramezanpour, Z. 2012. Effect of light intensity and photoperiod on biomass and fatty acid composition of the microalgae, *Chlorella Vulgaris*. *Aquacult. Int.*, 20 (1): 41-49.
- Koçak, M.S. and Utlu, Z. 2008. The effect of biodiesel fuel obtained from waste frying oil on direct injection diesel engine performance and exhaust emissions. *Renewable Energy*, 33 (8): 1936-1941.
- Kong, Q.X., Li, L., Martinez, B, Chen, P. and Ruan, R. 2010. Culture of microalgae *Chlamydomonas reinhardtii* in wastewater for biomass feedstock production. *Appl Biochem Biotechnol*, 160: 9-18.
- Konuralp, A.E., Kılıçkan, A. ve Avcıoğlu, A.O. 2009. Mikroalglerden Biyodizel Üretimi. 25. *Tarımsal Mekanizasyon Kongresi*, s. 101-107, 1-3 Ekim 2009, Isparta-TÜRKİYE.
- Kumar, A., Ergas, S., Yuan, X., Sahu, A., Zhang, Q., Dewulf, J. and van Langenhove H. 2010. Enhanced CO₂ fixation and biofuel production via microalgae: recent developments and future directions. *Trends in Biotechnology*, 28 (7): 371-380.
- Kumar, K., Dasgupt, C.N., Nayak, B., Lindblad, P. and Das, D. 2011. Development of suitable photobioreactors for CO₂ sequestration addressing global warming using green algae and cyanobacteria. *Bioresour. Technol.* 102: 4945-4953.
- Kumar, K. and Das, D. 2013. CO₂ sequestration and hydrogen production using cyanobacteria and green algae. *Natural and Artificial Photosynthesis*, 173-215.

- Kurhan, Ş. 2012. Fulvik ve humik asidin *Chlorella Vulgaris* ve *Spirulina Platensis* gelişimine etkisinin belirlenmesi. Yüksek lisans tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara, 78 s.
- Lam, M.K., Lee, K.T. and Mohamed, A.R. 2010. Homogeneous, heterogeneous and enzymatic catalysis for transesterification of high free fatty acid oil (waste cooking oil) to biodiesel: a review. *Biotechnology Advances*, 28: 500-518.
- Lam, M.K. and Lee, K.T. 2011. Renewable and sustainable bioenergies production from palm oil mill effluent (POME): win-win strategies toward better environmental protection. *Biotechnology Advances*, 29: 124-141.
- Lam, M.K. and Lee, K.T. 2012. Microalgae biofuels: a critical review of issues, problems and the way forward. *Biotechnology Advances*, 30 (3): 673-690.
- Lee, Y. 2001. Microalgal mass culture systems and methods: Their limitation and potential. *Journal of Applied Phycology*, 13: 307-315.
- Li, Y., Horsman, M., Wang, B., Wu, N. and Lan, C.Q. 2008. Effects of nitrogen sources on cell growth and lipid accumulation of green alga *Neochloris oleoabundans*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 81 (4): 629-636.
- Liu, Z., Wang, G. and Zhou, B., 2008. Effect of iron on growth and lipid accumulation in *Chlorella Vulgaris*. *Bioresour Technol*, 99: 4717-4722.
- Lv, JM, Cheng, L.H., Xu, X.H., Zhang, L. and Chen. H.L. 2010. Enhanced lipid production of *Chlorella Vulgaris* by adjustment of cultivation conditions. *Bioresour Technol*, 101: 6797-6804.
- Mandal, S. and Mallick, N. 2009. Microalga *Scenedesmus obliquus* as a potential source for biodiesel production. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 84: 281-291.
- Mauna Loa 2021. Recent Daily Average CO₂. Earth System Research Laboratories Global Monitoring Laboratory. <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/monthly.html>. Son erişim Tarihi: 23.04.2021.
- Markou, G., Dao, L.H.T., Muylaert, K. and Beardall, J. 2017. Influence of different degrees of N limitation on photosystem II performance and heterogeneity of *Chlorella Vulgaris*. *Algal Research*, 26: 84-92.
- Mata, T.M., Martins, A.A. and Caetano, N.S. 2010. Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14: 217-232.
- McGinn, P.J., Dickinson, K.E., Bhatti, S., Frigon, J.C., Guiot, S.R. and O'Leary, S.J. 2011. Integration of microalgae cultivation with industrial waste remediation for biofuel and bioenergy production: opportunities and limitations. *Photosynthesis Research*, 109 (1-3): 231-247.
- Melis, A. 1999. Photosystem-II damage and repair cycle in chloroplast: what modulates the rate of photodamage? *Trends Plant Science*, 4: 130-135.
- Michel, H. and Deisenhofer, J. 1988. Relevance of the photosynthetic reaction center from purple bacteria to the structure of photosystem II. *Biochemistry*, 27 (1): 1-7.

- Míguez, J.L., Porteiro, J., Pérez-Orozco, R., Patiño, D. and Rodríguez, S. 2018. Evolution of CO₂ capture technology between 2007 and 2017 through the study of patent activity. *Applied Energy*. 211: 1282-1296.
- Miranda, C.T., Pinto, R.F., Lima, D.V.N., Viegas, C.V., Costa S.M. and Azevedo, S.M.F.O. 2015. Microalgae Lipid and Biodiesel Production: A Brazilian Challenge. *American Journal of Plant Sciences*, 6: 2522-2533.
- Miranda, C.T., Lima, D.V.N., Atella, G.C., Aguiar, P.F. and Azevedo, S.M.F.O. 2016. Optimization of Nitrogen, Phosphorus and Salt for Lipid Accumulation of Microalgae: Towards the Viability of Microalgae Biodiesel. *Natural Science*. 8: 557-573.
- Moheimani, N.R. and Borowitzka, M.A. 2006. The long-term culture of the *Coccolithophore Pleurochrysis carterae* (Haptophyta) in outdoor raceway ponds. *Journal of Applied Phycology*, 18 (6): 703-712.
- Moheimani, N.R., Isdepsky, A., Lisec, J., Raes, E. and Borowitzka, M.A. 2011. *Coccolithophorid* algae culture in closed photobioreactors. *Biotechnology and Bioengineering*, 108 (9): 2078-2087.
- Moheimani, N., McHenry, M. and de Boer, K. 2013. The Forefront of Low-cost and High-volume Open Microalgae Biofuel Production. *Applications of Microbial Engineering*, 426-449.
- Montoya, O., Casazza, A.A., Aliakbarian, B., Perego, P., Converti, A. and de Carvalho, J.C.M. 2014. Production of *Chlorella Vulgaris* as a source of essential fatty acids in a tubular photobioreactor continuously fed with air enriched with CO₂ at different concentrations. *Biotechnology Progress*, 30 (4): 916-922.
- Morais, M.G. and Costa, J.A.V. 2007. Isolation and selection of microalgae from coal fired thermoelectric power plant for biofixation of carbon dioxide. *Energy Conversion and Management*, 48: 2169-2173.
- Morais, M.G. and Costa, J.A.V. 2014. An Open Pond System for Microalgal Cultivation. Editors: Pandey A., Lee D.J., Chisti, Y., Soccol, C.R. *Biofuels from Algae*, 1-22, Oxford, UK, Elsevier.
- Morcalı, M.H., Yozcu, E. ve Taşdemir, N. 2018. Alkali çözelti ile CO₂ tutma verimi üzerine alkil aminlerin etkisinin araştırılması. *DergiPark Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*. 7 (2): 20-219.
- Moreno-Garcia, L., Adjallé, K., Barnabé, S. and Raghavan, G. 2017. Microalgae biomass production for a biorefinery system: recent advances and the way towards sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76: 493-506.
- Mohsenpour, S.F., Richards, B. And Willoughby, N. 2012. Spectral conversion of light for enhanced microalgae growth rates and photosynthetic pigment production. *Bioresource Technology*, 125, 75–81.
- Munoz, R. and Guieysse, B. 2006. Algal–bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: A review, *Water Research*, 40 (15): 2799-2815.
- Münkel, R., Schmid-Staiger, U., Werner, A. and Hirth, T. 2013. Optimization of outdoor cultivation in flat panel airlift reactors for lipid production by *Chlorella Vulgaris*. *Biotechnology and Bioengineering*, 110 (11): 2882-2893.

- Nakamura, C.E. and Whited, G.M. 2003. Metabolic engineering for the microbial production of 1,3-propanediol. *Current Opinion in Biotechnology*, 14 (5): 454-459.
- Nanda, S., Reddy S.N, Mitra, S.K. and Kozinski, J.A. 2016. Review: The progressive routes for carbon capture and sequestration. *Energy Science & Engineering*, 4 (2): 99-122.
- NASA 2021. Overview: Weather, Global Warming and Climate Change. National Aeronautics and Space Administration. <https://climate.nasa.gov/resources/global-warming-vs-climate-change/>. Son erişim tarihi: 11.02.2021.
- Nautiyal, P., Subramanian, K.A. and Dastidar, M.G. 2014. Production and characterization of biodiesel from algae. *Fuel Processing Technology*, 120, 79–88.
- Nayak, B.K. and Das, D. 2013. Improvement of carbon dioxide biofixation in a photobioreactor using *Anabaena sp.* PCC 7120. *Process Biochem.*, 48: 1126-1132.
- NETL 2021. Carbon Capture and Storage (CCS) Database. U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory. <https://www.netl.doe.gov/coal/carbon-storage/worldwide-ccs-database>. [Son erişim tarihi: 11.05.2021].
- NOAA 2020. Global Climate Report – Annual 2020. National Oceanic and Atmospheric Administration <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/202013>. [Son erişim tarihi: 18.04.2021].
- NOAA 2021. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide, Monthly Average Mauna Loa CO₂. National Oceanic and Atmospheric Administration. <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>. [Son erişim tarihi: 05.06.2021].
- OECD 2002. 92/69EEC, C3. Algal Inhibition Test Official journal of European Commission, : 1-8.
- Ogbonna, J.C. and Tanaka, H. 2000. Light requirement and photosynthetic cell cultivation– Development of processes for efficient light utilization in photobioreactors. *Journal of Applied Phycology*, 12: 207-218.
- Ono, E. and Cuello, J.L. 2003. Selection of optimal microalgae species for CO₂ sequestration. In: Proceedings of Second Annual Conference on Carbon Sequestration. Alexandria, VA, USA.
- Öğüt, H. ve Oğuz, H. 2006. Üçüncü Milenyum Yakıtı Biyodizel, *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara, 190 s.
- Özdemir, Z.Ö. ve Mutlubaş, H. 2016. Biyodizel Üretim Yöntemleri ve Çevresel Etkileri. Kırklareli University. *Journal of Engineering and Science*, 2: 129-143.
- Ötleş, S. 1999. *Chlorella*/ Günümüzün Besleyici ve Sağlıklı Gıdası. Star ajans Matbaacılık, Ankara, 1-69.
- Park, J., Craggs, R. and Shilto, A. 2011. Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. *Bioresour. Technol.*, 102: 35.
- Parsons, T.R. and Strickland, J.D.H. 1972. A practical handbook of seawaters analysis. *Bull Fish Res Bd Can*, 167: 1-20.

- Pandey, A., Lee, D.J., Chisti, Y. and Soccol, C.R. 2014. Biofuels from Algae. 1-22, Oxford, UK, Elsevier.
- Pegallapati, A.K. and Nirmalakhandan, N. 2013. Internally illuminated photobioreactor for algal cultivation under carbon dioxide-supplementation: Performance evaluation. *Renewable Energy*, 56: 129-135.
- Perez-Garcia, O., Escalante, F.M., de-Bashan, L.E. and Bashan, Y. 2011. Heterotrophic cultures of microalgae: metabolism and potential products. *Water Res.*, 45: 11-36.
- Pires, J. C., Gonçalves, A.L. and Simões, M. 2013. Lipid production of *Chlorella vulgaris* and *Pseudokirchneriella subcapitata*. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 4(1), 14.
- Plant Scherer, Georgia. A coal-fired thermoelectric power plant. https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/a-coal-fired-thermoelectric-power-plant?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects. [Son erişim tarihi: 26.04.2021].
- Posten, C. and Schaub, G. 2009. Microalgae and terrestrial biomass as source for fuels – a process view. *Journal of Biotechnology*, 142 (1): 64-69.
- Pulz, O. 1994. Open-air and semi-closed cultivation systems for the mass cultivation of microalgae. Editors: Phang SM, Lee YK, Borowitzka MA, Whitton BA. *Algal Biotechnology in the Asia-Pacific Region*, 113-117, University of Malaya, Kuala Lumpur.
- Rashid, N., Rehman, M.S.U., Sadiq, M., Mahmood, T. and Han, J.I. 2014. Current status, issues and developments in microalgae derived biodiesel production. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 40: 760-778.
- Rawat, I., Ranjith Kumar, R., Mutanda, T. and Bux, F. 2013. Biodiesel from microalgae: A critical evaluation from laboratory to large scale production. *Applied Energy*, 103: 444–467.
- Razzak, S.A., Hossain, M.M., Lucky, R.A., Bassi, A.S. and De Lasa, H. 2013. Integrated CO₂ capture, wastewater treatment and biofuel production by microalgae culturing—A review. *Renewable and Sustainable Energy Rev.*, 27: 622-653.
- Razzak, S.A., Ali, S.A.M., Hossain, M.M. and De Lasa, H. 2017. Biological CO₂ fixation with production of microalgae in wastewater—a review. *Renewable and Sustainable Energy Rev.s*, 76: 79- 390.
- Rendon, S.M., Roldan, G.CJ.C. ve Paul Voroney, R. 2013. Effect of carbon dioxide concentration on the growth response of *Chlorella vulgaris* under four different led illumination. *International Journal of Biotechnology for Wellness Industries*, 2013, 2, 125-131.
- Richmond, A., Boussiba, S., Vonshak, A., and Kopel, R. 1993. A new tubular reactor for mass production of microalgal outdoors. *J. appl. Phycol.*, 5: 327-332.
- Richmond, A. 2004. Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology. *Blackwell Science Ltd*.
- Richmond, A. and Hu, Q. 2013. Chapter 2: Photosynthesis in Microalgae. In: Handbook of Microalgal Mass Culture (ed. A. Richmond), pp. 21-64.

- Rodolfi, L., Zittelli, G.C., Bassi, N., Padovani, G., Biondi, N., Bonini, G., et al. 2009. Microalgae for oil: strain selection, induction of lipid synthesis and outdoor mass cultivation in a low-cost photobioreactor. *Biotechnology and Bioengineering*, 102 (1): 100-112.
- Rodrigues, L.H.R., Arenzon, A., Raya-Rodriguez, M.T. and Fontoura, N.F. 2011. Algal density assessed by spectrophotometry: A calibration curve for the unicellular algae *Pseudokirchneriella subcapitata*. *Journal of Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 3 (8): 225-228.
- Ru, I.T.K., Sung, Y.Y., Jusoh, M., Wahid, M.E.A. and Nagappan, T. 2020. *Chlorella Vulgaris*: a perspective on its potential for combining high biomass with high value bioproducts. *Applied Phycology*, 1: 1, 2-11.
- Rubin, E.S., Mantripragada, H., Marks, A., Versteeg, P. and Kitchin, J. 2012. The outlook for improved carbon capture technology. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38 (5): 630-671.
- Ruiz-Marin, A., Mendoza-Espinosa, L.G. and Stephenson, T. 2010. Growth and nutrient removal in free and immobilized green algae in batch and semi-continuous cultures treating real wastewater. *Bioresour Technol.*, 101: 58-64.
- Ryu, H.J., Oh, K.K. and Kim, Y.S. 2009. Optimization of the influential factors for the improvement of CO₂ utilization efficiency and CO₂ mass transfer rate. *J. Ind. Eng. Chem.*, 15: 471-475.
- Sadeghizadeh, A., Farhad, F., Moghaddasi, L. and Rahimi, R. 2017. CO₂ capture from air by *Chlorella Vulgaris* microalgae in an airlift photobioreactor. *Bioresour Technol.*, 243: 441-447.
- Safi, C., Zebib, B., Merah, O., Pontalier, P.Y. and Vaca-Garcia, C. 2014. Morphology, composition, production, processing and applications of *Chlorella Vulgaris*: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 35: 265-278.
- Sanchez, J.F., Fernandez-Sevilla, J.M., Acien, F.G., Ceron, M.C., Perez-Parra, J. and Molina Grima, E. 2008. Biomass and lutein productivity of *Scenedesmus salmeriensis*: influence of irradiance, dilution rate and temperature. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 79: 719-729.
- Satish, C.B. and Manju, A.L. 2018. Plant Physiology, Development and Metabolism Book Chapter 6: Photosynthesis Publication. Springer. Page:161.
- Scarsella, M., Belotti, G., De Filippis, P. and Bravi, M. 2010. Study on the optimal growing conditions of *Chlorella Vulgaris* in bubble column photobioreactors. *Chemical Engineering Transactions*, 20: 85-90.
- Schuhmann, H., Lim, D.K.Y. and Shenk, P.M. 2014. Perspectives on metabolic engineering for increased lipid contents in microalgae. *Biofuels*, 3: 71-76.
- Selici, T. 2006. Enerji Kullanımının Çevresel Etkileri ve Sürdürülebilir Gelişme: Balıkesir Örneği. Yüksek Lisans tezi, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, 156 s.
- Seo, J.Y., Lee, K., Lee, S.Y., Jeon, S.G., Na, J.G., Oh, Y.K., et al. 2014. Effect of barium ferrite particle size on detachment efficiency in magnetophoretic harvesting of oleaginous *Chlorella sp.* *Bioresour Technol.*, 152:562-6.

- Siaut, M., Cuine, S., Cagnon, C., Fessler, B., Nguyen, M., Carrier, P., et al. 2011. Oil accumulation in the model green alga *Chlamydomonas reinhardtii*: characterization, variability between common laboratory strains and relationship with starch reserves. *BMC Biotechnol.*, 11.
- Sibi, G., Shetty, V. and Mokashi, K. 2016. Enhanced lipid productivity approaches in microalgae as an alternate for fossil fuels – A review. *Journal of the Energy Institute*, 89 (3): 330-334.
- Singh, J. and Dhar, D.W. 2019. Overview of Carbon Capture Technology: Microalgal Biorefinery Concept and State-of-the-Art. *Frontiers in Marine Science*, 6.
- Soares, F.R., Martins, G. and Seo, E.S.M. 2013. An assessment of the economic aspects of CO₂ sequestration in a route for biodiesel production from microalgae. *Environmental Technology*, 34 (13-14): 1777-1781.
- Song, W., Rashid, N., Choi, W. and Lee, K. 2011. Biohydrogen production by immobilized *Chlorella sp.* using cycles of oxygenic photosynthesis and anaerobiosis, *Bioresour. Technol.*, 102 (18): 8676-8681.
- Spangle, D. 2016. Photosynthesis Can Be Optimized to Feed and Fuel the World: Evolutionary Challenges and Engineering Possibilities.
- Spolaore, P., Joannis-Cassan, C., Duran, E. and Isambert, A. 2006. Commercial Applications of Microalgae. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 101: 87-96.
- Stephenson, A.L., Dennis, J.S., Howe, C. J., Scott, S.A. and Smith, A.G. 2010. Influence of nitrogen-limitation regime on the production by *Chlorella Vulgaris* of lipids for biodiesel feedstocks. *Biofuels*, 1 (1): 47-58.
- Sukatar, A. 2002. Alg Kültür Yöntemleri. Ege Üniversitesi Fen Fakültesi Serisi No: 184: 168 s.
- Sung, K.D., Lee, J.S., Shin, C.S. and Park, S.C. 1998. Enhanced cell growth of *sp. KR-1* by the addition of iron and EDTA. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 8: 409-411.
- Sutherland, D., Craggs, R. and Campbell, H. 2012. Hectare-scale demonstration of high rate algal ponds for enhanced wastewater treatment and biofuel production, *J. Appl. Phycol.*, 24: 329-337.
- Sutherland, D.L., Howard-Williams, C., Turnbull, M.H., Broady, P.A. and Craggs, R.J. 2013. Seasonal variation in light utilisation, biomass production and nutrient removal by wastewater microalgae in a full-scale high-rate algal pond. *J. Appl. Phycol.*, 26: 1317-1329.
- Sydney, E.B., Sturm, W., de Carvalho J.C., Thomaz-Soccol, V., Larroche, C., Pandey, A. and Soccol, C.R. 2010. Potential carbon dioxide fixation by industrially important microalgae. *Bioresour Technol.*, 101 (15): 5892-6.
- Tang, D., Han, W., Li, P., Miao, X. and Zhong, J. 2011. CO₂ biofixation and fatty acid composition of *Scenedesmus obliquus* and *Chlorella pyrenoidosa* in response to different CO₂ levels. *Bioresource Technology*, 102 (3): 3071-3076.

- Taştan, B.E., Duygu, E., Atakol, O. and Dönmez, G. 2012. SO₂ and NO₂ tolerance of microalgae with the help of some growth stimulators. *Energy Conversion and Management*, 64: 28-34.
- Taştan, B.E., Duygu, E., İlbaş, M. and Dönmez, G. 2013. Utilization of LPG and gasoline engine exhaust emissions by microalgae. *Journal of Hazardous Materials*, 246-247: 173-180.
- Taştan, B.E., Duygu, E., İlbaş, M. and Dönmez, G. 2016a. Enhancement of microalgal biomass production and dissolved inorganic C fixation from actual coal flue gas by exogenous salicylic acid and 1-triacontanol growth promoters. *Energy*, 103: 598-604.
- Taştan, B.E. and Tekinay, T. 2016b. A novel coal additive from microalgae produced from thermal power plant flue gas. *Journal of Cleaner Production*, 133: 1086-1094.
- T.C. Ticaret Bakanlığı 2021. Ekonomik Görünüm, Mayıs 2021, Ankara. https://ticaret.gov.tr/data/5e18288613b8761dced355ce/Ekonomik%20G%C3%B6r%C3%BCn%C3%BCm%20May%C4%B1s_2_%202021.pdf. [Son erişim tarihi: 14.07.2021].
- T.C. TSKB (Türkiye Sınai Kalkınma Bankası) 2020. Enerji Görünümü 2020, Ankara. <https://www.tskb.com.tr/i/assets/document/pdf/enerji-sektor-gorunumu-2020.pdf>. [Son erişim tarihi: 14.07.2021].
- Terry, K.L. 1986. Photosynthesis in modulated light—quantitative dependence of photosynthetic enhancement on flashing rate. *Biotechnol. Bioeng.*, 28: 988-995.
- TKİ 2018. 2018 Yılı Kömür (Linyit) Sektör Raporu. Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu.
- TKİ 2020. 2020 Yılı Faaliyet Raporu. Türkiye Kömür İşletmeleri Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Strateji Geliştirme Müdürlüğü, Nisan 2021.
- Torzillo, G. and Vonshak, A. 2013. Environmental Stress Physiology with Reference to Mass Cultures. Handbook of Microalgal Culture. *Applied Phycology and Biotechnology, Second Edition*, 90-113.
- Töre, A.K. ve Işık, M. 2020. Mikroalglerle Biyogaz Çamurunun Arıtımı- Derleme Makale. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 3 (1): 34-42.
- Tredici, M.R. and Materassi, R. 1992. From open ponds to vertical alveolar panels: the Italian experience in the development of reactors for the mass cultivation of phototrophic microorganisms. *Journal of Applied Phycology*, 4 (3): 221-231.
- Tsai, D.D.W., Ramaraj, R. and Chen, P.H. 2012. Growth condition study of algae function in ecosystem for CO₂ bio-fixation. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 107: 27-34.
- Tunçkaya, Y. 2015. Yüksek Fırın ve Termik Santrallerde Proses Parametrelerinin Kestirimine Yönelik Karşılaştırmalı Uygulamalar. Doktora tezi. Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 144 s.
- Türkeş, M. 2001. Hava, İklim, Şiddetli Hava Olayları ve Küresel Isınma. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü 2000 Yılı Seminerleri, Teknik Sunumlar, Seminerler Dizisi: 1: 187-205, Ankara.

- TÜİK 2020. Sera Gazı Emisyon İstatistikleri 1990-2018. Türkiye İstatistik Kurumu. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2018-33624> [Son erişim tarihi: 15.07.2021].
- TÜİK 2021. Sera Gazı Emisyon İstatistikleri 1990-2019. Türkiye İstatistik Kurumu. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2019-37196> [Son erişim tarihi: 14.06.2021].
- UNFCCC 2021a. Global Warming Potentials (IPCC Second Assessment Report). United Nations Framework Convention on Climate Change. <https://unfccc.int/process/transparency-and-reporting/greenhouse-gas-data/greenhouse-gas-data-unfccc/global-warming-potentials> [Son erişim tarihi: 11.06.2021].
- UNFCCC 2021b. Turkish Greenhouse Gas Inventory 1990–2018. National Inventory Report for submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change April, page 56.
- UNFCCC 2021c. Turkey 2021 National Inventory Report (NIR) <https://unfccc.int/documents/271544> [Son erişim tarihi: 02.06.2021].
- Ugwu, C.U. and Aoyagi, H. 2008. Influence of shading inclined tubular photobioreactor surfaces on biomass productivity of *C. Sorokiniana*. *Photosynthetica* 46 (2): 283-285.
- Ullah, K., Ahmad, M., Sharma, V.K., Lu, P., Harvey, A., Zafar, M., Sultana, S. and Anyanwu, C.N. 2014. Algal biomass as a global source of transport fuels: Overview and development perspectives. *Progress in Natural Science: Materials International*, 24: 329-339.
- Uslu, L., Kayaalp, G.T., Işık, O., Çimen, B.A. and Güney, M.Ç. 2018. *Isochrysis affinis galbana* ve *Phaeodactylum tricornutum* Kültürlerinde Kuru Madde Tahminlerinin Karşılaştırılması. *Türk Tarım – Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6 (8): 1088-1091.
- Usui, N. and Ikenouchi, M. 1997. The biological CO₂ fixation and utilization project by RITE (1) Highly-effective photobioreactor system. *Energy Convers. Manag.* 38, S487-S492.
- Utex 2019. Culture Collection of Algae at the University of Texas at Austin. <https://utex.org/>. [Son erişim tarihi: 25.12.2019].
- Vishwakarma, R., Dhar, D.W. and Saxena, S. 2019. Influence of nutrient formulations on growth, lipid yield, carbon partitioning and biodiesel quality potential of *Botryococcus sp.* And *Chlorella sp.* *Environmental Science and Pollution Research*, 26: 7589-7600.
- Vooren, G.V, Grand, F.L., Legrand, J., Cui  , S., Peltier, G. and Pruvost, J. 2012. Investigation of fatty acids accumulation in *Nannochloropsis oculata* for biodiesel application. *Bioresour. Technol.*, 124: 421-432.
- Wahidin, S., Idris, A. and Shaleh, S.R. 2013. The influence of light intensity and photoperiod on the growth and lipid content of microalgae *Nannochloropsis sp.* *Bioresour Technol.*, 129: 7-11.
- Wang, B., Lan, C.Q. and Horsman, M. 2012. Closed photobioreactors for production of microalgal biomasses. *Biotechnology Advances*, 30 (4): 904-912.

- Wang, T., Yang, W.L., Hong, Yç. and Hou, Y.L. 2016. Magnetic nanoparticles grafted with aminoriched dendrimer as magnetic flocculant for efficient harvesting of oleaginous microalgae. *Chem Eng J*, 297:304–14.
- Wong, Y.K., Ho, K.C., Tsang, Y.F., Wang, L. and Yung, K.K.L. 2016. Cultivation of *Chlorella vulgaris* in column photobioreactor for biomass production and lipid accumulation. *Water Environment Research*, 88 (1), 40–46.
- Westerhoff, P., Hu, Q., Wsparza-Soto, M. and Vermaas, W. 2010. Growth parameters of microalgae tolerant to high levels of carbon dioxide in batch and continuous-flow photobioreactors. *Environ. Technol.*, 31, 523-532.
- Wetzel, R., et al. 1983. Periphyton of freshwater ecosystems. *Develop. Hydrobiol.* 17. *Limnology and Oceanography*, 30 (4): 917-917.
- Williams, P.J.L.B. and Laurens, L.M.L. 2010. Microalgae as biodiesel and biomass feedstocks: Review and analysis of the biochemistry, energetics and economics. *Energy and Environmental Science*, 3 (5): 554-590.
- WWF 2018. Climate change: nature is our ally. <https://wwf.panda.org/?320731/Climate-change-nature-is-our-ally>. [Son erişim tarihi: 18.04.2021].
- Xu, N., Zhang, X., Fan, X., Han, L. and Zeng, C. 2001. Effects of nitrogen source and concentration on growth rate and fatty acid composition of *Ellipsoidion sp.* (*Eustigmatophyta*). *J. Appl. Phycol.*, 13: 463-469.
- Xu, H., Miao, X. and Wu, Q. 2006. High quality biodiesel production from a microalga *Chlorella protothecoides* by heterotrophic growth in fermenters. *J. Biotechnol.*, 126, 499-507.
- Yeh, K.L., Chang, J.S. and Chen, W. 2010. Effect of light supply and carbon source on cell growth and cellular composition of a newly isolated microalga *Chlorella Vulgaris* ESP-31. *Engineering in Life Sciences*, 10 (3): 201-208.
- Yen, H.W., Hu, I.C., Chen, C.Y. and Chang, J.S. 2014. Design of Photobioreactors for Algal Cultivation. *Biofuels from Algae*, 23–45.
- Ying, K., Zimmerman, W.B. and Gilmour, D.J. 2013. Effects of CO and pH on growth of the microalga *Dunaliella salina*. *Journal of Microbial and Biochemical Technology*, 6 (3): 167-173.
- Yoon, J.H., Shin, J.H., Ahn, E.K. and Park, T.H. 2008. High cell density culture of *Anabaena variabilis* with controlled light intensity and nutrient supply. *J. Microbiol. Biotechnol.*, 18: 918-925.
- Yusuf, N.N.A.N., Kamarudin, S.K., and Yaakub, Z. 2011. Overview on the current trends in biodiesel production. *Energy Conversion and Management*, 52 (7): 2741- 2751.
- Yaakob, M.A., Mohamed, R.M.S.R., Al-Gheethi, A., Aswathnarayana Gokare, R. and Ambati, R.R. 2021. Influence of Nitrogen and Phosphorus on Microalgal Growth, Biomass, Lipid, and Fatty Acid Production: An Overview. *Cells*, 10, 393.
- Yılankıran, N. ve Doğan, H. 2020. Türkiye'nin Enerji Görünümü ve 2023 Yılı Birincil Enerji Arz Projeksiyonu. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 10 (2): 77-92.

- Yodsuwan, N., Sawayama, S. and Sirisansaneeyakul, S. 2017. Effect of nitrogen concentration on growth, lipid production and fatty acid profiles of the marine diatom *Phaeodactylum tricornutum*. *Agriculture and Natural Resources*, 51 (3): 190-197.
- Zeng, X., Danquah, M.K., Chen, X.D. and Lu, Y. 2011. Microalgae Bioengineering: From CO₂ Fixation to Biofuel Production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (6): 3252-3260.
- ZERO 2016. <https://zero.no/wp-content/uploads/2016/06/carbon-capture-and-storage.pdf>. [Son erişim tarihi: 08.06.2021].
- Zerrouki, D. and Henni, A. 2019. Outdoor Microalgae Cultivation for Wastewater Treatment. In book: Application of Microalgae in Wastewater Treatment, Springer, pp.81-99.
- Zhu, X.G., Long, S.P. and Ort, D.R. 2008. What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass? *Curr Opin Biotechnol.*, 19 (2): 153-159.
- Zhu, J., Rong, J. and Zong, B. 2013. Factors in mass cultivation of microalgae for biodiesel. *Chinese Journal of Catalysis*, 34 (1): 80-100.
- Zhu, L. 2015a. Biorefinery as a promising approach to promote microalgae industry: An innovative framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41: 1376-1384.
- Zhu, L. 2015b. Microalgal culture strategies for biofuel production: A review. *Biofuels, Bioprod. Bioref.*, 9 : 801-814.
- Zhu, L.D., Li, Z.H. and Hiltunen, E. 2016. Strategies for Lipid Production Improvement in Microalgae as a Biodiesel Feedstock. *BioMed Research International*, 1-8.
- Zijffers, J.W.F., Schippers, K.J., Zheng, K., Janssen, M., Tramper, J. and Wijffels, R.H. 2010. Maximum Photosynthetic Yield of Green Microalgae in Photobioreactors. *Marine Biotechnology*, 12 (6): 708-718.

ÖZGEÇMİŞ

Gamze AKGÜL

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2017-2021	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Bölümü, Antalya
Lisans 2014-2017	Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Antalya
Lisans 2013-2014	Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Aksaray
Ön Lisans 2009-2011	Mersin Üniversitesi TBMYO, Harita & Kadastro Bölümü, Mersin