



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

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SENTETİK BİYOGAZ ÇAMURUNDA ALGAL BİYOKÜTLE
ÜRETİMİ VE NÜTRİYENT GİDERİMİNDE SICAKLIĞIN ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Aydın Kaan TÖRE

**DANIŞMAN
Prof. Dr. Mustafa IŞIK**

AKSARAY, 2020

Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 172301001 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi, **Aydın Kaan TÖRE** tarafından hazırlanan "**SENTETİK BİYOGAZ ÇAMURUNDA ALGAL BİYOKÜTLE ÜRETİMİ VE NÜTRİYENT GİDERİMİNDE SICAKLIĞIN ETKİSİ**" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Mustafa IŞIK

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Üye: Prof. Dr. Bilal TUNÇSİPER

Niğde Ömer Halis Demir Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Üye: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet KILIÇ

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Tez Savunma Tarihi: 06/01/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

Doç. Dr. Mehmet Ali HİNİS

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, çalışmamda kullandığım verilerin orijinallliğini ve her türlü intihalden uzak olduğunu beyan ederim.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.



Aydın Kaan TÖRE

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans ve tez çalışmalarım süresince her türlü ilgi, bilgi ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Mustafa IŞIK'a, yüksek lisans tezimle ilgili tüm süreçlerde büyük katkı sağlayıp desteğini ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Öğr. Gör. Tolga BAHADIR'a, Aksaray Üniversitesi Çevre Mühendisliği bölümü çalışanlarına teşekkür ederim.

Hayatım boyunca bana her türlü desteği veren ve hep yanımda olan sevgili aileme en derin teşekkürlerimi sunarım.

Aydın Kaan TÖRE

AKSARAY, 2020

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	4
2.1 Mikroalgler ve Mikroalg Yetiştirme Sistemleri	4
2.2 Atık Yönetimine Çözüm Olarak Anaerobik Çürütme	8
2.3 Mikroalg Üretimi İçin Besin Kaynağı Olarak Biyogaz Çamuru	8
2.4 Mikroalglerin Büyümesini Etkileyen Çevresel Faktörler	9
2.4.1 Işık	9
2.4.2 Sıcaklık	10
2.4.3 Besin elementleri	17
2.4.4 pH	18
2.4.5 Karıştırma	18
2.5 Biyogaz Çamurunun Mikroalglerle Arıtımıyla İlgili Literatürde Yapılmış Çalışmalar	19
3. MATERYAL VE METOT	32
3.1 Sentetik Biyogaz Çamuru ve Aşı kültür	32
3.2 Örnekleme	33
3.3 Analitik Yöntemler	34
3.3.1 Klorofil a ölçümü	34
3.3.2 OY, AKM ve klorofil a ilişkisinin belirlenmesi	34
3.3.3 Işık şiddeti ölçümü	36
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	38
4.1 Sıcaklığın Biyokütle Üretimi ve Nutrient Giderimi Üzerindeki Etkileri	38
4.1.1 15°C’de sıcaklığın etkisi	38
4.1.2 25°C’de sıcaklığın etkisi	42
4.1.3 35°C’de sıcaklığın etkisi	45
4.1.4 Sıcaklık etkilerinin karşılaştırılması	49
4.2 Farklı Sıcaklıklarda Biyokinetik Katsayıların Bulunması	55
4.3 Biyokinetik katsayıların üzerinde sıcaklık etkilerinin karşılaştırılması ve sıcaklık etkisinin modellenmesi	65
5. SONUÇLAR	67
KAYNAKLAR	69
ÖZGEÇMİŞ	80

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SENTETİK BİYOGAZ ÇAMURUNDA ALGAL BİYOKÜTLE ÜRETİMİ VE NÜTRİENT GİDERİMİNDE SICAKLIĞIN ETKİSİ

Aydın Kaan TÖRE

Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mustafa IŞIK

ÖZET

Günümüzde yaygınlaşan anaerobik reaktörlerin çıkış suları (biyogaz çamuru) önemli oranda besi maddesi içermektedir. Biyogaz çamuru bileşiminde bulunan C, N ve P bileşikleri alıcı ortamda istenmediği durumlarda giderilmeleri gerekmektedir. Sularda azot giderimi için bilinen biyolojik yöntemlerin işletimi oldukça pahalı ve karışıktır. Enerji ihtiyacı daha az ve işletimleri daha kolay olduğu düşünülen biyolojik reaktörlerden algal reaktörlerin besi elementi gideriminde kullanımı için araştırmalar gün geçtikçe artmaktadır. Bu çalışma sentetik biyogaz çamurunda karışık kültür alg gelişimi ve nütrient giderimi üzerindeki sıcaklık etkisini araştırmak için gerçekleştirilmiştir. Çalışma laboratuvar koşullarında, üçlü paralel reaktörlerde, beyaz ışık (12 saat aydınlık / 12 saat karanlık, ışık şiddeti: $37,1 \pm 5,2 \mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}^{-1}$), 15°C, 25°C ve 35°C şartlarında kesikli olarak sürdürülmüştür. Karışık kültür alglerle aşılana kesikli reaktörlerde biyokütle üretimi devam edinceye kadar çalışmalar sürdürülmüştür. Her üç sıcaklık için biyogaz çamurunda giderilen KOİ, NH₄-N ve PO₄-P miktarları ve gelişen algal biyokütle değerleri oldukça yakın olmakla birlikte, 15, 25 ve 35°C'lik sıcaklıklar için inkübasyon süreleri 131 gün, 78 gün ve 38 gün olarak belirlenmiştir. Kinetik çalışmalarında KOİ, NH₄-N, PO₄-P azalımı ve biyokütle derişimi artış hızlarının daha çok 0. dereceye uygun olduğu tespit edilmiştir. Sıcaklığın kinetik katsayılar üzerindeki etkisi de belirlenmiştir. Sıcaklık düzeltme katsayısı (Θ) KOİ, NH₄-N, PO₄-P ve biyokütle için sırasıyla 1,065, 1,048, 1,056 ve 1,067 olarak bulunmuştur. Çalışma ortamda N ve P giderimi yanında önemli miktarda KOİ'nin de giderildiğini göstermiştir. Sonuç olarak biyogaz çamurundan karışık kültür algler ile nütrient gideriminde sıcaklığın önemli bir faktör olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alg, Biyogaz çamuru, Kinetik, Nütrient, Sıcaklık.

Ocak, 2020; 80 sayfa

M.Sc. THESIS

EFFECT OF TEMPERATURE ON ALGAL BIOMASS PRODUCTION AND NUTRIENT REMOVAL IN SYNTHETIC BIOGAS SLURRY

Aydın Kaan TÖRE

**Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Environmental Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Mustafa IŞIK

ABSTRACT

The effluent of anaerobic reactors (biogas slurry), which is widespread today, contains a significant amount of nutrients. The compounds C, N and P in the biogas sludge composition should be removed because they are not desired in the receiving environment. The known biological processes for nitrogen removal in waters is very expensive and complicated. Investigations are increasing day by day for the use of algal reactors which are thought to be less energy and easier to operation. This study was conducted to investigate the effect of temperature on nutrient removal and the growth of mixed culture algae in synthetic biogas sludge. The study was carried out in triplicated parallel reactor at white light (12 hour light / 12 hour dark, light intensity: $37.1 \pm 5.2 \mu\text{mol/m}^2.\text{s}^{-1}$) and 15°C, 25°C and 35°C of temperature under laboratory conditions. Studies continued until biomass production continued in batch reactors inoculated with mixed culture algae. Although the amount of COD, NH₄-N and PO₄-P removal and algal biomass productivity in the biogas slurry for all three temperatures were very close, the incubation times for temperatures of 15°C, 25°C and 35°C were determined as 131 days, 78 days and 38 days. In kinetic studies, COD, NH₄-N, PO₄-P removal and biomass concentration increase rates were found to be more appropriate to 0th degree. The effect of temperature on kinetic coefficients was also determined. The temperature correction coefficient (Θ) was found to be 1.065, 1.048, 1.056 and 1.067 for COD, NH₄-N, PO₄-P and biomass growth, respectively. The study showed that significant COD was also removed in addition to N and P removal from biogas slurry. As a result, it was determined that temperature is an important factor in nutrient removal with mixed culture algae from biogas slurry.

Keywords: Algae, Biogas slurry, Kinetic, Nutrient, Temperature.

January, 2020; 80 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Algal teknoloji ürünleri.	6
Şekil 2.2. Enerji kaynakları, besin maddeleri ve diğer faktörler de dahil olmak üzere mikroalg büyüme parametrelerinin şematik diyagramı.	9
Şekil 3.1. Biyogaz çamuru ortamında gelişen mikroalg kültürlerinde AKM ile OY ilişkisi.....	35
Şekil 3.2. Klorofil a ile OY değişimi.	35
Şekil 3.3. AKM ile klorofil a değişimi.	36
Şekil 4.1. 15°C'deki sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmada zamana bağlı olarak klorofil a artışı.	39
Şekil 4.2. 15°C'deki sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmada zamana bağlı olarak optik yoğunluk değişimi.	39
Şekil 4.3. 15°C'deki sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmada KOİ değişimi ve giderimi.....	40
Şekil 4.4. 15°C'deki sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmada NH ₄ -N değişimi ve giderimi.....	40
Şekil 4.5. 15°C'deki sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmada PO ₄ -P değişimi ve giderimi.....	41
Şekil 4.6. 15°C'deki sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmanın mikroskop görüntüleri..	41
Şekil 4.7. 25°C'deki sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmada zamana bağlı olarak klorofil a artışı.	42
Şekil 4.8. 25°C'deki sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmada zamana bağlı olarak optik yoğunluk değişimi.	43
Şekil 4.9. 25°C'deki sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmada KOİ değişimi ve giderimi.....	43
Şekil 4.10. 25°C'deki sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmada NH ₄ -N değişimi ve giderimi.....	44
Şekil 4.11. 25°C'deki sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmada PO ₄ -P değişimi ve giderimi.....	44
Şekil 4.12. 25°C'deki sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmanın mikroskop görüntüleri.....	45
Şekil 4.13. 35°C'deki sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmada zamana bağlı olarak klorofil a artışı.....	46
Şekil 4.14. 35°C'deki sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmada zamana bağlı olarak optik yoğunluk değişimi.	46
Şekil 4.15. 35°C'deki sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmada KOİ değişimi ve giderimi.....	47
Şekil 4.16. 35°C'deki sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmada NH ₄ -N değişimi ve giderimi.....	47
Şekil 4.17. 35°C'deki sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmada PO ₄ -P değişimi ve giderimi.....	48
Şekil 4.18. 35°C'deki sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmanın mikroskop görüntüleri.....	49
Şekil 4.19. 15, 25, 35°C'deki sıcaklıklarda gerçekleştirilen çalışmaların pH değerlerinin karşılaştırılması.	51
Şekil 4.20. 15, 25, 35°C'deki sıcaklıklarda gerçekleştirilen çalışmaların klorofil a değerlerinin karşılaştırılması.	51

Şekil 4.21.	15, 25, 35°C'deki sıcaklıklarda gerçekleştirilen çalışmaların KOİ değerlerinin karşılaştırılması.	52
Şekil 4.22.	15, 25, 35°C'deki sıcaklıklarda gerçekleştirilen çalışmaların NH ₄ -N değerlerinin karşılaştırılması.	54
Şekil 4.23.	15, 25, 35°C'deki sıcaklıklarda gerçekleştirilen çalışmaların PO ₄ -P değerlerinin karşılaştırılması.	55
Şekil 4.24.	15, 25, 35°C'deki sıcaklıklarda gerçekleştirilen çalışmaların UAKM değerlerinin karşılaştırılması.	55
Şekil 4.25.	35°C'de KOİ gideriminde Y ve b katsayısı bulunması.	60
Şekil 4.26.	35°C'de KOİ azalımı için k ve K _s katsayılarının bulunması.	60
Şekil 4.27.	Kesikli Monod denklemi k ve K _s katsayısı bulma.	61
Şekil 4.28.	Substrat azalımı 0. derece hız kinetiği.	61
Şekil 4.29.	Substrat azalımı 1. derece hız kinetiği.	62
Şekil 4.30.	Substrat azalımı 2. derece hız kinetiği.	62
Şekil 4.31.	KOİ giderimi yalancı 0. derece hız kinetiği.	63
Şekil 4.32.	KOİ giderimi yalancı 1. derece hız kinetiği.	63

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Mikroalg üretimine etki eden parametreler için genelleştirilmiş değerler.....	5
Çizelge 2.2. Farklı mikroalg yetiştirme sistemlerinin özelliklerinin karşılaştırılması.	7
Çizelge 3.1. Sentetik olarak hazırlanmış biyogaz çamuru bileşimi.	32
Çizelge 4.1. Farklı sıcaklıklarda inkübasyon başlangıcı ve sonundaki değerler.	50
Çizelge 4.2. Farklı sıcaklıklarda farklı substrat giderim ve biyokütle artış hızı modelleri ve ilgili katsayılar.....	64
Çizelge 4.3. Dereceye göre hesaplanmış sıcaklık düzeltme katsayıları (Θ).	66



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AKM	Askıda katı madde
C	Karbon
CH₄	Metan
CO₂	Karbondioksit
H₂	Hidrojen
H₂S	Hidrojen sülfür
KOİ	Kimyasal oksijen ihtiyacı
LED	Beyaz ışık yayan diyot
NH₄-N	Amonyum azotu
OY	Optik yoğunluk
PO₄-P	Fosfat fosforu
TN	Toplam azot
TP	Toplam fosfor
UAKM	Uçucu askıda katı madde
Θ	Sıcaklık düzeltme katsayısı
k₀	0. derece hız sabiti
k₁	1. derece hız sabiti
k₂	2. derece hız sabiti

1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun giderek artması, insanoğlunun temel ihtiyaçlarının yeterli ve istenilen düzeyde üretilmesi zorunluluğuna sebep olmaktadır. Hızla gelişen teknoloji insanoğlunun yaşam standartlarını iyileştirip, yaşamasını kolaylaştırırken kişi başına düşen enerji tüketimi de artmaktadır. Bu durum doğal olarak dünyada enerji üretiminin artmasına neden olmaktadır. Enerji tüketimindeki bu artış Dünya’da çevreyi kirleten ve zarar veren faaliyetlerin daha fazla ortaya çıkmasına sebep olmaya başlamıştır. Antropojenik bu faaliyetler sonucunda günümüz küresel çevre problemlerinden en önemlisi küresel ısınma ve iklim değişikliği problemi ortaya çıkmıştır. Dünyadaki giderek artan küresel ısınma ve tahrip edilen doğal dengenin dünya üzerinde başta iklimler ve sıcaklık değişiklikleri olarak kendini göstermesi ve fosil kökenli enerji kaynaklarının yakın bir gelecekte tükenecek duruma gelmesi sebebiyle bilim adamlarını fosil kökenli enerji kaynaklarının daha verimli olarak kullanılması konusundaki çalışmalara yöneltmiştir. Bu nedenle ülkeler temiz enerji üretme yollarını aramaya başlamışlardır. Küresel ısınmayı engellemek veya azaltmak için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması giderek yaygınlaşmaktadır. Bu alternatif enerji kaynakları olarak kabul edilen yenilenebilir enerji kaynakları sırasıyla güneş, rüzgâr, doğal gaz, jeotermal, hidroelektrik ve biyogazdır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından bir tanesi günümüzde kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşan biyogaz enerjisidir.

Biyogaz renksiz, kokusuz, temiz ve ısı değeri yüksek, bileşimde % 60-65 oranında CH_4 (metan), % 35-40 oranında CO_2 (karbondioksit), % 5-10 oranında H_2O (su), % 0-1 oranında O_2 (oksijen) ve % 0,0005-2 oranında H_2S (hidrojen sülfür) yer alır (Ryckebosch vd., 2011; Yan vd., 2014; Ying vd., 2014). Biyogaz enerjisi hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerde dikkat çeken en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir (Yan vd., 2016). Biyogaz ve digestat, organik atıkların anaerobik çürütülmesinden elde edilen ana yan ürünlerdir (Franco-Morgado vd., 2017). Mikroalgler, gıda, biyoyakıt üretimi, atık su arıtımı, enerji ve bitki örtüsü dâhil olmak üzere çeşitli endüstrilerde mevcut ve potansiyel uygulamalara sahiptir (Pittman vd., 2011; Sydney vd., 2011; Wang vd., 2016). Alternatif ve yenilenebilir biyokütle hammaddesi olarak mikroalgler, tarım arazileri için rekabet etmeme, birim alandaki verimlilik, hızlı büyüme ve santral gibi bir noktadan salınan atık CO_2 ’yi azaltma

yeteneği gibi birçok avantaj sağlar. Mikroalgler, yıl boyunca yeterli güneş ışığı alan bölgelerde biyogaz çamuru arıtımı için düşük maliyetli yeni bir teknoloji olarak kullanılabilir (Zhao vd., 2015).

Anaerobik çürütme sadece biyogaz üretmez aynı zamanda biyogaz çamuru (Biogas slurry or digestate) da üretir. Anaerobik çürütme sonucu oluşan biyogaz çamuru önemli miktarlarda azot ve fosfor yükleri içermektedir. Bu bileşikler kirletici kaynağı olarak görülen biyogaz çamurunun içerisinde yer aldığından algler için temel besin kaynağı oluşturmaktadır. Bu nedenle, biyogaz çamuru ortamına adapte olabilen ve yerel koşullarda sağlam bir büyüme gösterebilen en uygun mikroalg türlerini taramak önemlidir (Zhu vd., 2016). Bu çıktıların toprağa uygulanması ya da deşarj edilmesi sonucu potansiyel yüzeysel akış ve ötrofikasyonun önüne geçilebilmesi için mikroalgler kullanarak biyogaz çamurunu arıtımı son yıllarda literatüre girmiş, bu konu ile ilgili çalışma sayısı oldukça fazladır (Zhu vd., 2016). Biyogaz çamurunun besin kaynağı olarak kullanılması, biyogaz çamurundaki besin maddelerini gidererek hem besi maddelerinin çevresel etkilerini azaltır hem de ekonomik mikroalgal biyokütle elde edilmesini sağlayabilir (Bhatnagar vd., 2010; Uggetti vd., 2014; Yang vd., 2008; Zhao vd., 2015). Mikroalgal biyokütle, biyodizel, biyohidrojen, biyometan, biyo-yağ, biyo-ham petrol gibi çeşitli termal ve biyokimyasal dönüşüm yolları ile işlenebilen lipidlerin, karbonhidratların ve proteinlerin çeşitlendirilmiş biyokimyasal içeriğı ile gelecek vadede bir hammadde olarak önerilmektedir (Behera vd., 2019; Singh ve Olsen, 2011).

Mikroalg hücreleri ile azot ve fosforun alg gelişimi esnasında biyokütle asimilasyonu N ve P giderimi olarak çok iyi bilinmekte ve çalışılmaktadır (Kobayashi vd., 2013; Liu ve Vyverman, 2015; Solmaz ve Işık, 2017). Biyogaz çamurunun tarımsal uygulamalarda anaerobik rekatörün çıkışındaki biyogaz çamurunda mevcut kullanılabilir önemli miktarlarda nütrient olması nedeniyle organik gübre veya toprak iyileştirici/şartlandırıcı olarak kullanımı oldukça iyi bilinen ve tavsiye edilen uygulamalardan bir tanesidir (Astals vd., 2012). Değişik ölkelerde bu uygulama yaygın olarak yapılmakta ve teşvik edilmektedir (Juárez vd., 2013). Topraęa uygulama bazı ölkelerde yeraltı suyu kirliliğine neden olması nedeni ile sınırlandırılmış bir uygulama olduğundan biyogaz çamurunda anaerobik çürüme işlemi sonucu içerdiği

kimyasal bileşimi nedeni ile daha ileri arıtma ihtiyacı bulunmaktadır. Biyogaz çamurunun elemental bileşimi mikroalg kültürlerinin nütrient ihtiyacını karşılayabildiği için mikroalg üretimi için nütrientce zengin bir besin kaynağı olarak hizmet edebilir (Zhu vd., 2016). Mikroalgler fotosentez sistemlerinde CO₂ karbon kaynağı olarak kullanılır, biyogaz çamuru da, yüksek konsantrasyonlarda gerekli besin maddelerini (azot ve fosfor) içeren fotosentetik mikroalgal büyüme için ucuz bir besiyer olarak kullanılır (Zhang vd., 2017).

Mikroalglerle gerçekleştirilen arıtım çalışmaları son yıllarda önem kazanmıştır. Bu konuda literatürde bildirilen çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Ancak biyogaz çamurunun mikroalglerle arıtımıyla ilgili yapılmış çalışmalar literatürde sınırlı sayıda bulunmaktadır. Yapılmış olan çalışmaların genelinde spesifik mikroalg türleri kullanılmıştır. Çalışmalarda her mikroalg türünün kendine özgü veriminin yanı sıra elde edilen biyokütledeki yağ, protein ve biyoyakıt gibi özellikleri bildirilmiştir. Bu tez çalışmasında karışık kültür mikroalgler kullanılarak kesikli şartlarda, sentetik olarak hazırlanmış biyogaz çamurundan nütrient giderimi ve biyokütle üretimi potansiyeli 15, 25, 35°C'deki sıcaklıklarda araştırılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1 Mikroalgler ve Mikroalg Yetiştirme Sistemleri

Algler, her yerde var olan fotosentetik bir organizmadır. Doğada birçok alg türü bulunur; bunlar sırasıyla Chlorophyta, Rhodophyta ve Phaeophyta grubuna ait yeşil, kırmızı ve kahverengi alglerdir. Mikroalgler, güneş ışığını daha verimli kullanabilen ve hücresel karmaşıklığı karada yaşayan bitkilere kıyasla daha az ve verimli karbon tutumu nedeniyle güneş ışığına dayalı daha hızlı bir büyüme hızına sahip hücrelerdir (Behera vd., 2019; Chisti, 2007; Sharma ve Singh, 2017). 40,000'den fazla farklı mikroalg türü tespit edilmiştir (Zhu, 2015). Prokaryotik ve ökaryotik yapılarda bulunabilen mikroalgler, çok hızlı bir şekilde çoğalabilirler. Prokaryot ile ökaryot olanların arasındaki temel fark, prokaryot halde bulunanların çekirdeğinin, kloroplastının ve mitokondrisinin olmamasıdır. Mikroalglerin kimyasal formülü bazı kaynaklarda $CO_{0.48}H_{1.83}N_{0.11}P_{0.01}$ (Medeiros vd., 2015; Singh vd., 2011) olarak, başka kaynaklarda ise $C_{106}H_{181}O_{45}N_{16}P_1$ olarak ifade edilmektedir (Elcik ve Çakmakçı, 2017; Xu vd., 2014).

Mikroalgler, genel olarak ototrofik olarak yaşamlarını sürdürürler ve yapısında bulunan pigmentleri sayesinde fotosentez yaparlar. Fotosentez yapmaları sebebiyle, karbondioksiti (CO_2), su (H_2O) ve güneş ışığını biyokütleye çevirirler. Fakat mikroalgler türlerinin özelliklerine göre ototrofik yapı haricinde heterotrofik ve miksotrofik olarak da gelişebilmektedirler. Heterotrofik kültürde, mikroalg organik karbon maddesini hem bir enerji kaynağı hem de karbon kaynağı olarak kullanır (Razzak vd., 2017). Bu sebepten dolayı hücre büyümesi için ışık kaynağına ihtiyaç yoktur. Miksotrofik kültürde, mikroalg ışığın kullanılabilirliğine ve karbon kaynağı konsantrasyonuna bağlı olarak ototrofik veya heterotrofik olarak büyüyebilir (Mata vd., 2010). Ototrofik mikroalgler, inorganik karbonu kullanması sonucunda hidroksil ürettiği için pH'ın yükselmesine sebep olurlar. Heterotrofik mikroalgler ise, organik karbonu kullanmaları sırasında CO_2 üreterek pH'ın düşmesine neden olurlar. Miksotrofik mikroalgler, aynı anda organik ve inorganik karbonu kullanması sebebiyle pH değeri değişkenlik gösterebilmektedir. Mikroalgal büyüme verimini kontrol altında tutan temel parametreler (besin kalitesi ve miktarı, ışık, pH, karıştırma, tuzluluk, sıcaklık, hava-karbondioksit) bir araya getirilmiş ve Çizelge 2.1'de

özetlenmiştir (Borowitzka, 1999; Mirón vd., 2002; Ramanna vd., 2014; Solmaz, 2018; Spolaore vd., 2006).

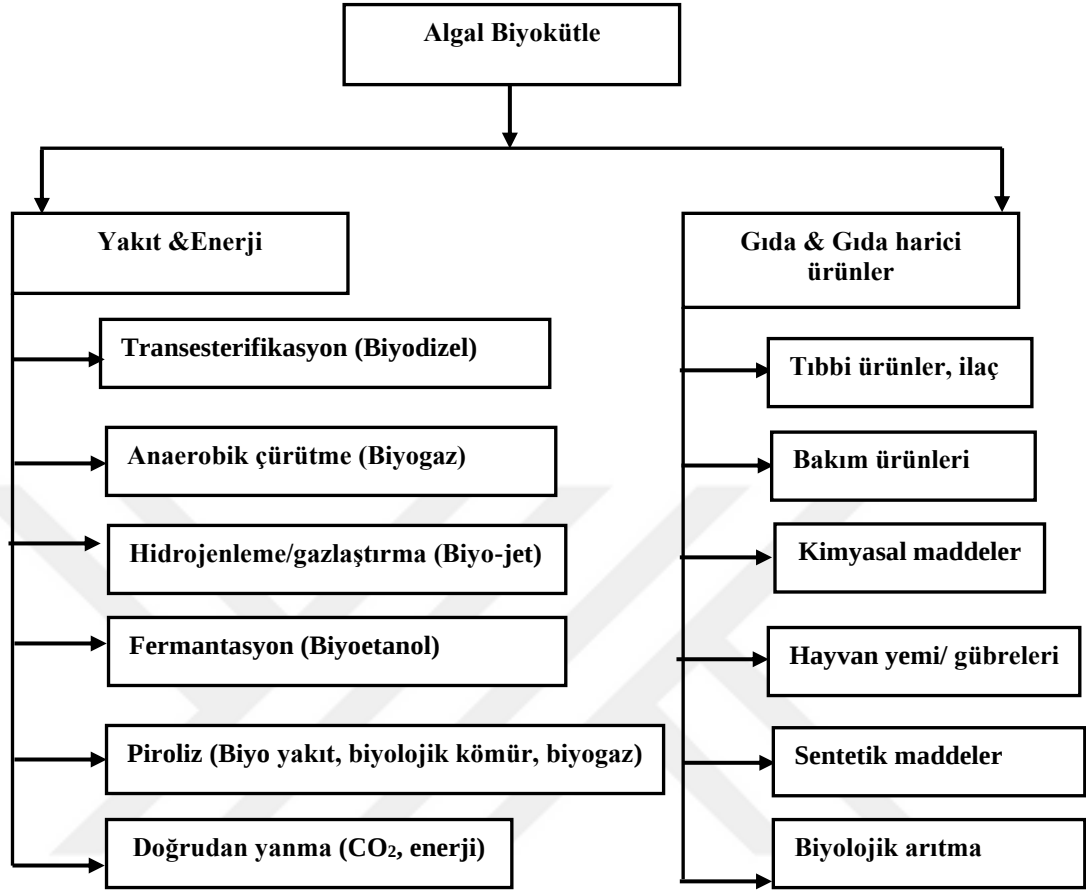
Çizelge 2.1. Mikroalg üretimine etki eden parametreler için genelleştirilmiş değerler.

Parametreler	Aralık
Sıcaklık (°C)	16-27
Tuzluluk (mS/cm)	12-40
Işık Yoğunluğu (lux)	1000-10000
Fotoperiyod (aydınlık/karanlık-sa/sa)	0-24
pH	6,0-9,5

Işık kaynağının ve organik karbonun yeterli miktarda bulunduğu ortamda (sentetik veya gerçek ortamlar) büyüme faaliyetlerini gösteren mikroalgler için temel nütrientlerin ortamda yer alması gerekir. Yaşamsal faaliyetlerin ana kaynakları makro nütrientler ve yardımcı kaynaklarda mikro nütrientler olarak tanımlanır. Ortamda makro nütrientlerin (C,N,P) ve mikro nütrientlerin (iz elementler) bulunması büyümenin tamamlanmasına yardımcı olmaktadır.

Farklı çevresel ortamlarda yer alan mikroalgler günümüzde çeşitli yöntemlerle yapay veya gerçek ortamlar kullanarak kültür haline getirilmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken hususlar ortam şartlarını hiçbir şekilde bozmadan mikroalg kültürlerinin canlı kalmasına dikkat etmek ve hazırlanan ortamlarda o ortam şartlarında yaşayabilecek doğru mikroalg kültürlerini seçmektir.

Genel olarak alglere dayalı teknoloji ile bu kaynak henüz tam olarak kullanılmamaktadır. Karasal bitkilere kıyasla miktarları oldukça fazla olduğu için küresel ekonomiye gelecekte oldukça katkı sağlayabilir (Adeniyi vd., 2018; Suganya vd., 2016). Algal teknolojilerin kullanım potansiyelleri gıda & gıda harici ürünler ve yakıt & enerji başlıkları altında aşağıdaki Şekil 2.1’de gösterilmektedir (Adeniyi vd., 2018).



Şekil 2.1. Algal teknoloji ürünleri.

Mikroalg yetiştirme sisteminin seçimi, verimli besin giderimine ve etkili biyokütle üretimine bağlıdır. Genel olarak, algal reaktörler açık sistemler veya kapalı sistemler (fotobiyoreaktör) olarak sınıflandırılır (McGinn vd., 2011; Razzak vd., 2017). Açık sistemler mikroalg kültürünü yetiştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Aynı zamanda, açık bir sistemde kullanılmak üzere farklı olası kurulumlar vardır; en yaygın kullanılan sistem, kanal tipi ve dairesel açık havuzlardır (Moreno-Garcia vd., 2017). Kapalı sistemlerdeki mikroalgler tübüler, düz plaka, fermentör ve içten aydınlatmalı fotobiyoreaktörlerde büyürler (Elcik ve Çakmakçı, 2017; Suali ve Sarbatly, 2012). Bu kültür sistemlerinin her birinin aşağıda Çizelge 2.2’de verildiği gibi avantajlar ve dezavantajlar vardır (Moreno-Garcia vd., 2017).

Çizelge 2.2. Farklı mikroalg yetiştirme sistemlerinin özelliklerinin karşılaştırılması.

Yetiştirme Sistemleri	Açıklama	Avantajları	Dezavantajları	Referanslar
Açık sistemler	Palet çarklı bir karıştırıcı ile karıştırılan açık tank	Kapalı sistemlere göre daha düşük başlangıç yatırımı, daha ucuz bakım ve daha kolay kurulum.	Düşük verimlilik, olası kültür ortamı kirliliği ve buharlaşma kayıpları. Büyük miktarda su gerekli.	(Slegers vd., 2013)
Kapalı sistemler. Fotobioreaktörler (PBR)	Sıcaklık, aydınlatma ve besin kaynağı kontrolü	Yüksek kütle transferi ve verimliliği; açık sistemlere göre daha az kirlenme ve daha kontrollü koşullar.	Açık sistemlere göre daha yüksek maliyetli ve daha zor kurulum.	(Suali ve Sarbatly, 2012)
Sütun PBR	Genellikle 0,2 m'ye kadar yarıçapa ve yüksekliği 4 m'ye kadar olan silindirik reaktörlerdir	Düşük kesme kuvvetleri, duvar büyümesinin olmaması, yüksek CO ₂ kullanım verimliliği ve güneş ışığını kullanma yeteneği	Yeterli aydınlatma ve karıştırma sağlanmak için yüksek enerji gereksinimi	(Suali ve Sarbatly, 2012)
Tübüler PBR	Yatay, eğimli veya dikey bir şekilde yerleştirilmiş ve güneş ışığına doğru yönlendirilmiş tüplerden oluşan sistem	Yüksek ışık dönüştürme verimliliği.	Fotosentetik verimlilikte azalma. Kabarcık sütun ve düz plaka PBRs ile karşılaştırıldığında çok yüksek enerji tüketimi.	(Singh ve Sharma, 2012)
Düz Plaka PBR	Yüksek yüzey / hacim oranına sahip olan kübik şekilli cam reaktör; Hava kabarcıklı veya mekanik rotasyonla sağlanan çalkalama.	Kütle transferi, karıştırma ve ısı transferi kapasitesi tübüler fotobiyoreaktörlerden daha az güç kaynağı gerektirir	Havalandırma ile ilgili potansiyel kısıtlama	(Singh ve Sharma, 2012)
Membran PBR	Ortam içinden geçerken bir membranın mikroalg hücrelerini tuttuğu bir süzme tankına bağlı silindirik PBR	Düşük derişimlerde biyokütlenin hasadına imkân verir	Algojenik organik madde birikimi neticesinde membranların tıkanması	(Bilad vd., 2014)
Bağlı(biyofilm) büyüme	Bir destek materyali üzerinde büyüyen alg sistemleri	Diğer sistemlere kıyasla daha yüksek verimlilik, su ve enerji tasarrufu.	Foto inhibisyon oluşabilir	(Chen vd., 2013); (Zhang vd., 2014); (Wan vd., 2014); (Liu vd., 2013)

2.2 Atık Yönetimine Çözüm Olarak Anaerobik Çürütme

Anaerobik çürütme, çeşitli anaerobik mikroorganizmaların, oksijen yokluğunda metan (CH_4) ve / veya hidrojen (H_2) üretmek için substratlar olarak organik maddeleri kullandığı kontrol edilebilir, biyolojik bir işlemdir (Jain vd., 2015; Zhu vd., 2016). Anaerobik çürütme, organik atıkların yönetimi için etkili bir önlem olarak kabul edilir, çünkü depolama alanını ve dolayısıyla koku, patojenler ve sera gazı emisyonlarını azalttığından, besin maddelerini geri kazanır ve biyoenerjiyi biyometan şeklinde üretir (Stowe vd., 2015; Zhu vd., 2016). Organik maddelerin anaerobik çürütülmesi dört adımda meydana gelir; hidroliz, asidogenez; asetogenez ve metanogenez olarak adlandırılır (Kothari vd., 2014). Hidroliz aşamasında, karbonhidratlar, proteinler ve lipitler gibi kompleks organik maddeler, çeşitli bakteriler tarafından salgılanan hücre dışı enzimler yardımı ile çözülebilir türevlere ayrılırlar. Bir sonraki aşamada ise, şekerler ve amino asitleri içeren hidrolize moleküller, asidojen bakteriler tarafından CO_2 , H_2 , $\text{NH}_4\text{-N}$ 'e ve organik asitlere dönüştürülür. Daha sonra, ortaya çıkan organik asitler sürekli olarak ek $\text{NH}_4\text{-N}$, H_2 ve CO_2 ile birlikte asetik aside dönüştürülür. Son aşamada, metanojenik bakteriler, önceki aşamaların ara ürünlerini kullanarak bunları CO_2 , H_2O ve CH_4 'e dönüştürürler. Bu teknoloji, mutfak atıkları, tarımsal atıklar ve atık su çamurlarının bertaraf edilmesinde yaygın olarak uygulanmaktadır (Kwietniewska ve Tys, 2014). Uygulamada, biyogaz çamuru yaygın olarak, fosil yakıt tüketimini, CO_2 emisyonlarını ve dolayısıyla maliyetleri düşürerek, tarımsal, silvikültürel veya bahçecilik amaçlı olarak mineral gübrelerin besin yerine kullanılır (Rigby vd., 2016; Vaneckhaute vd., 2013; Zhu vd., 2016).

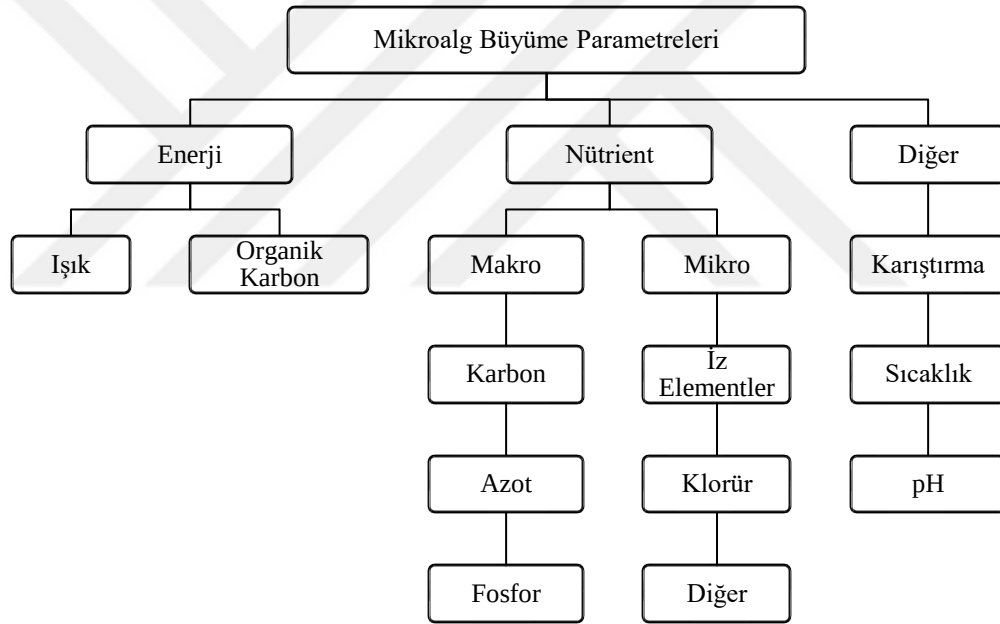
2.3 Mikroalg Üretimi İçin Besin Kaynağı Olarak Biyogaz Çamuru

Anaerobik çürütme prosesi çıkışında CO_2 , CH_4 ve H_2 üretmesinin yanı sıra, digestat adı verilen biyogaz çamurunu da üretir. Biyogaz çamurunun organik bir gübre olarak uygulanması ya da tarımsal üretime yapılan toprağın değiştirilmesi, artık digestatta kolayca bulunabilen önemli miktarda besin maddesi nedeniyle en iyi seçenek gibi görünmektedir (Astals vd., 2012). Bu uygulamanın, besin maddelerini geri dönüştürdüğü ve organik maddelerin eklenmesiyle toprak yapısını geliştirdiği için avantajlı olduğu düşünülmektedir (Nkoa, 2014). Biyogaz çamuru N, P, potasyum (K),

kükürt (S), kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg) ve demirin (Fe) yanı sıra, mangan (Mn), çinko (Zn) ve bakır (Cu) gibi önemli mikro besin maddelerininide içerir. Mikroalgal hücreler tarafından absorbe edilebilen azot kaynakları arasında $\text{NH}_4\text{-N}$, nitrit, nitrat ve amino asitler gibi basit organik azot bulunur; mikroalgal hücreler $\text{NH}_4\text{-N}$ 'yi tercih eder ve hızla bünyesine katabilirler (Kumar vd., 2010). Buna karşılık, fosfor alımı kompleks değildir ve fosfor, fosfat şeklinde mikroalgal hücreler tarafından verimli bir şekilde absorbe edilebilir (Zhu vd., 2016).

2.4 Mikroalglerin Büyümesini Etkileyen Çevresel Faktörler

Mikroalglerin gelişimini etkileyen çevresel faktörler Şekil 2.2'de şematik olarak gösterilmiştir (Razzak vd., 2017).



Şekil 2.2. Enerji kaynakları, besin maddeleri ve diğer faktörler de dahil olmak üzere mikroalg büyüme parametrelerinin şematik diyagramı.

2.4.1 Işık

Işık mikroalglerin büyümesi üzerinde en önemli etkenlerden biridir. Mikroalgler fotosentez yapabilmesi için ışık kaynağına ihtiyaç duyarlar. Mikroalgler fotosentez için genellikle, 400-700 nm dalga boyundaki ışığı kullanırlar (Blair vd., 2014; Elcik

ve akmakc, 2017; Kim vd., 2013). Açık ve dış ortam sistemlerinde mikroalgleri yetiştirmek için güneş ışığı doğrudan kültür ortamına gelmektedir. Bu sebepten dolayı, açık ve dış ortam sistemlerinde, ışık radyasyonunun düşük ve eşit olarak dağılmaması nedeniyle büyümede sınırlamalar meydana gelmektedir. Diğer taraftan kapalı sistemlerde fotobioreaktrler, floresan lambalar kullanarak çok daha yüksek bir mikroalg büyüme hızı elde edilebilmektedir.

2.4.2 Sıcaklık

Mikroalglerin büyümesinde etkili olan sıcaklık, mikroalg büyüme ve biyokütle üretimi üzerinde gözle görülür etkilere sahiptir, çünkü metabolik süreci ve biyolojik reaksiyon hızını etkilemektedir (Chinnasamy vd., 2009; McGinn vd., 2011; Razzak vd., 2017). Mikroalgler, 5-35°C gibi geniş sıcaklık değerlerinde gelişebilmektedir (Elcik ve akmakc, 2017; Rashid vd., 2014). Ancak birçok mikroalg türü için optimum büyüme sıcaklığı 20-30°C arasındadır (Chisti, 2007; Elcik ve akmakc, 2017; Wang vd., 2008). Mevsimsel ve günlük hava koşullarındaki değişimler sebebiyle, dış ortamda mikroalg yetiştirmek için sıcaklığı belirli bir aralıktaki tutmaya çalışmak çok zor bir durumdur. Havanın soğuk ve sıcaklığın düşük olduğu günlerde mikroalg büyümesi yavaş gerçekleşmektedir. Kapalı sistemlerde, sıcaklık istenilen seviyelere ayarlanmaktadır. Bu nedenle kapalı sistemlerde ve kontrollü sıcaklık ortamlarında mikroalg büyümesi istenilen seviyelerde gerçekleşebilmektedir. Bu sebepten dolayı kapalı sistemlerde sıcaklık kontrolü açık ve dış ortam sistemlerine göre daha avantajlıdır.

Mikroalglerin gelişmesinde besin ve ışığın ardından, sıcaklık en önemli rolü oynamaktadır (Bernard ve Rmond, 2012). Sıcaklığın büyüme hızına etkisini anlamak için birçok çalışma yapılmış ve çeşitli şekillerde birçok model önerilmiştir. Model şeklindeki bu çeşitlilik, büyüme ve sıcaklık arasındaki ilişkinin karmaşık yapısını ortaya koymaktadır.

Sıcaklığın mikroalg büyümesi üzerindeki etkisine yönelik modellerin çoğu, bakteriyel veya diğer mikrobiyal büyüme modellerinden ilham alınmaktadır. Dolayısıyla, herkesin benzer eğilimleri takip ettiği görünmektedir.

İlk modellerden biri, bakteri üremesi için Arrhenius yasası kullanılarak elde edilen ve daha sonra mikroalg büyümesi için kullanılan Hinshelwood modeli olarak bilinmiştir (Rosso vd., 1993):

$$\mu = k_1 e^{-\frac{E_1}{T}} - k_2 e^{-\frac{E_2}{T}} \quad (2.1)$$

T mutlak sıcaklık ise ve k_1 , k_2 , E_1 ve E_2 model parametreleridir. E_1 ve E_2 , Arrhenius kanununun orijinal haliyle aktivasyon enerjisini gaz sabiti (E_a/R) olarak değiştirilmiştir ve k_1 ve k_2 , üssel öncesi faktörlerdir. Termodinamik olarak bu denklemde birinci terim üretim (büyüme) oranı olarak yorumlanmıştır ve ikinci terim, yüksek sıcaklık nedeniyle bakterilerin tüketim (ölüm) oranı olarak kabul edilmiştir. Bununla birlikte, bu modelde sıcaklık azaldıkça, spesifik büyüme hızı düşmektedir, ancak mutlak sıfırın sıcaklığı haricinde asla sıfıra ulaşmamıştır. Bu, modeli düşük sıcaklıklarda gerçekçi kılmıştır.

Ratkowsky vd., (1982) Van't Hoff ve Arrhenius ilişkilerinin, büyüme hızının sıcaklık bağımlılığına iyi bir yaklaşım sağlayamadığını açıklamışlardır. Büyüme hızının mutlak sıcaklığın karşılığına karşı logaritmasını çizmişlerdir ve büyüme hızının karekökünü kullanan aşağıdaki modeli önermişlerdir:

$$\sqrt{\mu} = b(T - T_{min}) \quad (2.2)$$

Buradaki T_{min} , büyümenin gerçekleşmediği sıcaklık ve b model sabitidir.

Bununla birlikte, bu denklem, asgari sıcaklıktan optimum sıcaklığa, büyüme oranının maksimum değerde olduğu yerlerde, ancak daha yüksek sıcaklıklar için bu denklem geçerli değildir. Sıcaklık optimum değerine üzerine çıkarıldığında büyüme oranı düşmeye başlar, bu denklem bu etkiyi öngörmemiştir. Bu açığı kapatmak için, bu modelin bir uzantısı önerilmiştir (Ratkowsky vd., 1983). Yeni modelde, daha yüksek sıcaklıklar için önceki denklemi düzeltmek üzere üstel bir terim eklenmiştir:

$$\sqrt{\mu} = b(T - T_{min})(1 - e^{c(T - T_{maks})}) \quad (2.3)$$

Buradaki T_{maks} , büyüme için maksimum sıcaklık sınırıdır ve c, bir model sabitidir. Bu modeli çeşitli bakteriler için 30 veri setine uygulamışlardır ve bu modeli oldukça doğru bulmuşlardır.

Sharpe ve DeMichele, (1977) ve Sharpe vd., (1977) üç enerji durumunu dikkate alan bir model önermişlerdir: (1) düşük sıcaklık nedeniyle inaktivasyon, (2) yüksek sıcaklık nedeniyle inaktivasyon ve (3) aktif (gelişen) durum. Evreler arasındaki geçişi modellemişlerdir ve büyüme hızındaki sıcaklık değişimlerini tanımlamak için kinetik oranlar için farklı bir denklem kullanmışlardır:

$$\mu = \frac{T \exp\left(\frac{\left(\phi - \frac{\Delta H_A}{T}\right)}{R}\right)}{1 + \exp\left(\frac{\left(\Delta S_L - \frac{\Delta H_L}{T}\right)}{R}\right) + \exp\left(\frac{\left(\Delta S_H - \frac{\Delta H_H}{T}\right)}{R}\right)} \quad (2.4)$$

Bu denklemde R, evrensel gaz sabitidir ve parametrelerin geri kalanı şu şekilde tanımlanmıştır:

- ΔH_A : Büyümenin aktivasyonu için entalpi
- ΔS_L : Düşük sıcaklık inaktivasyon entropi değişimi
- ΔH_L : Düşük sıcaklık inaktivasyonunun entalpi değişimi
- ΔS_H : Yüksek sıcaklık inaktivasyon entropi değişimi
- ΔH_H : Yüksek sıcaklık inaktivasyonunun entalpi değişimi
- ϕ : Model sabittir.

Schoolfield vd., (1981) parametrelerin yüksek ilişkisinden dolayı geri döndüğü için bu formülasyonun uygun olmadığını belirtmiştir. Modelin karmaşıklığının parametre tahminini bazen imkânsız hale getirdiğini açıklamışlardır. Bu nedenle, geri dönüşüm sürecini kolaylaştırmak için işlevi yeniden düzenlemişlerdir.

$$\mu = \frac{\mu_{25} \frac{T}{298} \exp\left(\frac{\Delta H_A}{R} \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{T}\right)\right)}{1 + \exp\left(\frac{\Delta H_L}{R} \left(\frac{1}{T_L} - \frac{1}{T}\right)\right) + \exp\left(\frac{\Delta H_H}{R} \left(\frac{1}{T_H} - \frac{1}{T}\right)\right)} \quad (2.5)$$

Schoolfield vd., (1981) referans sıcaklık olarak 25°C (298 K) kullanmışlardır ve modeldeki parametrelerden biri olarak bu sıcaklıkta μ_{25} spesifik büyüme oranlarını dahil etmişlerdir. Referans sıcaklık olarak 25°C seçiminin nedeni, esas olarak, bu sıcaklık etrafındaki çoğu mikroalg için gözlenen yüksek aktivitedir. Denk. (2.5) T_L ve T_H sırasıyla düşük ve yüksek sıcaklıklarda yarı inaktivasyon sıcaklıklarıdır.

Zwietering vd., (1991) genişletilmiş Ratkowsky modelini değiştirmiştir, büyüme oranının ilk terimin karesi ile ilişkili olduğunu, ancak üstel terimle ilgili olmadığını ifade etmiştir.

$$\mu = (b(T - T_{min}))^2 (1 - e^{c(T - T_{maks})}) \quad (2.6)$$

Daha sonra, değiştirilmiş modeli, enzim büyümesi için Schoolfield vd., (1981) ve Ratkowsky vd., (1982) ve Ratkowsky vd., (1983) modelleri dahil olmak üzere diğer birkaç modelle karşılaştırmışlardır ve sadece dört parametreye rağmen, modellerinin deneysel verilerden Schoolfield'inki gibi daha karmaşık modellerden daha az sapma olduğunu bildirmişlerdir.

Lobry vd., (1991) üç önemli sıcaklık (T_{min} , T_{opt} ve T_{maks}) kullanan yeni bir ampirik model önermişlerdir. Büyümenin, sıcaklık T_{min} ve T_{maks} arasındayken gerçekleşeceğini, bu nedenle, bu aralık dışında pozitif bir büyümenin yok olduğunu ve T_{opt} 'ta spesifik büyüme hızının, maksimum değerine ulaştığı sonucuna varmışlardır. Bu üç sıcaklıkta, her bir türün özelliklerinin bir parçası olduğunu ve bu değerlere dayalı bir modele sahip olmanın, modelin uygulanmasını kolaylaştırdığını ifade etmişlerdir.

$$\mu = \mu_{maks} \frac{(T_{maks} - T)(T - T_{min})}{(T - T_{opt})^2 + (T_{maks} - T)(T - T_{min})} \quad (2.7)$$

Bu model, sıcaklık ile büyümenin en alt eğrisini tahmin edememiştir, bu yüzden değiştirilmiştir ve çarpma ile ana sıcaklık modeli tanıtılmıştır (CTMI):

$$\mu = \mu_{maks} \frac{(T - T_{maks})(T - T_{min})^2}{(T_{opt} - T_{min})[(T_{opt} - T_{min})(T - T_{opt}) - (T_{opt} - T_{maks})(T_{opt} + T_{min} - 2T)]} \quad (2.8)$$

Rosso vd., (1993) yeni bakteri modelini Ratkowsky vd., (1983) ve Zwietering vd., (1991) modeli ile çeşitli bakteri türlerinin 47 veri seti için karşılaştırmışlardır. Karşılaştırmada, CTMI'nin 47 setin 21'ine daha iyi uyduğunu göstermişlerdir, Ratkowsky modelinin 47 setten 20'sine daha iyi performans gösterdiğini ve kalan altı sette Zwietering modelinin en düşük sapmaya sahip olduğunu elde etmişlerdir. Bu modelin performansının, Ratkowsky modelinin performansına çok yakın olduğunu, ancak kullanım kolaylığı ve anlamlı parametrelerinden CTMI'yi daha sonra Bernard ve ark. mikroalgal kültürleri için kullanmışlardır (Bernard ve Rémond, 2012). Bernard ve Rémond, (2012) CTMI'yi çeşitli alg türleri için kullanmışlardır ve deneysel verilere uygun olduğunu göstermişlerdir. Bununla birlikte, CTMI'nin uygulanabilirliği açısından bazı sınırlamaları olduğunu belirtmişlerdir. Geçerli aralıktaki μ için pozitif değerlere sahip olmak için, T_{min} ve T_{maks} 'ın ortalaması T_{opt} 'tan daha az olması gerektiğine, diğer bir deyişle T_{opt} 'un T_{maks} 'a T_{min} 'den daha yakın olması gerektiğine, aksi takdirde modelin büyüme için negatif sayılar üreteceğini elde etmişlerdir (Bernard ve Rémond, 2012).

Yan ve Hunt, (1999) yaptıkları çalışmada daha önce bitkilerin gelişimi için Yin vd., (1995) ve Gao vd., (1992) tarafından geliştirilen modelleri modifiye ederek bitkilerin fotosentetik büyüme hızının sıcaklıkla değişimini tahmin etmek için bir model geliştirmiş ve büyüme hızını sıcaklığa bağlı olarak aşağıdaki gibi bulmuştur.

$$\mu = \mu_{maks} \frac{T_{maks}-T}{T_{maks}-T_{opt}} \left(\frac{T-T_{min}}{T_{opt}-T_{min}} \right)^{\frac{T_{opt}-T_{min}}{T_{maks}-T_{opt}}} \quad (2.9)$$

Bu durumda, model T_{min} 'in sıfır olduğunu varsayarak daha da basitleştirmişlerdir, bu da aşağıdaki eşitliği sağlamıştır:

$$\mu = \mu_{maks} \frac{T_{maks}-T}{T_{maks}-T_{opt}} \left(\frac{T}{T_{opt}} \right)^{\frac{T_{opt}}{T_{maks}-T_{opt}}} \quad (2.10)$$

Blanchard vd., (1996) tarafından sıcaklık ile hareketli bentik diatomların büyümesindeki değişim için başka bir model önerilmiştir. Modelin, deneysel verilere kabul edilebilir bir şekilde uyduğunun görünmesiyle birlikte, düşük sıcaklıklarda modelin deneylere kıyasla daha uyumlu olduğunu gözlemlemişlerdir.

Bazı çalışmalarda sıcaklığın etkisini tahmin etmek için normal bir dağılım modeli (Gauss eğrisi) kullanılmıştır (James ve Boriah, 2010; Jayaraman ve Rhinehart, 2015). Bu modelde, T_{opt} 'un etrafında büyümenin maksimum olduğunu ve sıcaklık azaldıkça veya arttıkça, büyümenin bir Gauss çan şekli biçiminde değişeceği ifade edilmiştir. Bir çalışmada, Franz vd., (2012) Gauss eğrisini sıcaklığın etkisini açıklamak için kullanmışlardır ve mikroalgal türlerin yerel iklime adapte olduğunu ve bu nedenle kendi coğrafi konumlarının ortalama sıcaklıklarında en iyi performansa sahip olduklarını varsaymışlardır. İki denklem önermişlerdir: birincisinde T_{opt} 'un, çalışılan tüm yerler için ortalama sıcaklık olduğunu varsaydığını:

$$\mu = \mu_{maks} \exp\left(-\left(\frac{T-T_{opt}}{s}\right)^2\right) \quad (2.11)$$

ve ikinci denklemde, T_{ort} her bir rotasyondaki ortalama sıcaklıktır.

$$\left\{ \mu = \mu_{maks} \exp\left(-\left(\frac{T-T_{günlük\ ort.}}{s}\right)^2\right); T \leq T_{günlük\ ort.} \right. \quad (2.12)$$

$$\left. \mu = \mu_{maks}; T_{günlük\ ort.} < T \leq T_{günlük\ ort.} + 8 \right\} \quad (2.13)$$

$$\left\{ \mu = \mu_{maks} \exp\left(-\left(\frac{T-T_{günlük\ ort.}+8}{s}\right)^2\right); T_{günlük\ ort.} + 8 < T \right\} \quad (2.14)$$

Görülebileceği gibi, ikinci modelde, büyüme hızı, ışık yoğunluğu düşük olduğunda, sıcaklığın büyüme hızı üzerinde daha az etkili olduğu hipotezi nedeniyle, 8°C'lik bir sıcaklık aralığı için maksimum değerde kalmıştır (Franz vd., 2012) ve sonuçta model uygulamasını çok sınırlı kılmıştır. Dahası, sıcaklıktaki değişim deneysel verilere dayanarak büyümedeki değişimle simetrik olmadığı için bir Gauss dağılımına tam olarak uymamıştır. Dauta vd., (1990) modelleri için de aynı temeli kullanmışlardır, ancak asimetriyi model şeklinde elde etmek için fonksiyonlara eğrilik eklemiştir.

Eppley, (1972) yaklaşık 200 veri noktasını kullanarak denizdeki çeşitli fitoplankton türlerinin büyümesi için çok basit bir model önermiştir.

$$\mu = 0,851 \times 1,066^T \quad (2.15)$$

Burada T santigrat derece cinsinden sıcaklıktır. Bu modelin şaşırtıcı bir şekilde basit ve kullanımının kolay olduğunu ve diğer birçok araştırmacı modeller için temel olarak kullanılmıştır (Haario vd., 2009; Ketheesan ve Nirmalakhandan, 2013; Lee ve Zhang, 2016; Pegallapati ve Nirmalakhandan, 2012). Bununla birlikte, bu modelin sadece çeşitli türler için bir dış kabuk olarak ya da başka bir deyişle yazarın, denklemin “fotosentetik bir tek hücreli algler için beklenebilecek maksimum μ ’in genelleştirilmesi için faydalı olduğunu” söylediği gibi bir dış kabuk olarak gerçekleştirmiştir (Eppley, 1972).

Şimdiye kadar tartışılan tüm modellerde sıcaklığın etkisinin, diğer sınırlayıcı faktörlerin etkisiyle birleştirilebilecek bağımsız ve ayrı bir işlevinin olduğu bildirilmiştir. Ancak, sıcaklığın ışık gibi diğer fonksiyonlardaki etkisini içeren çalışmalar vardır (Butterwick vd., 2005). Örneğin , Dermoun vd., (1992) ve Talbot vd., (1991), Peeters ve Eilers, (1978) ve Eilers ve Peeters, (1988) modelini ışık için kullanmışlardır, ancak sabitlerin sıcaklığa bağlı olduğunu düşünmüşlerdir. Grobbelaar vd., (1990) aynı prensibi kullanmışlardır ancak Baly, (1935) modeline uygulamışlardır.

$$\mu = a_1 a_2 \theta \frac{K_s a_3 \theta I}{I + K_s a_3 \theta} \quad (2.16)$$

Bu denklemde a_1 , a_2 ve a_3 model sabitleridir, K_s ışık doygunluk sabitidir ve θ aşağıdaki denklemle hesaplanan sıcaklık faktörüdür: buradaki T, °C cinsinden sıcaklıktır.

$$\theta = \frac{T-10}{10} \quad (2.17)$$

Görülebileceği gibi, sıcaklığın mikroalglerin gelişimi üzerindeki etkisinin modellenmesi zor olabileceğinin ve çeşitli şekillerde çok sayıda denklemi elde etmek bunun için bir kanıt olmuştur (Darvehei vd., 2018). Burada incelenmiş çalışmaların çoğunda, bu etkiyi açıklamak için ışığın işlevi ile birleştirildiği birkaç durumla ilgili bağımsız bir işlevi kullanılmıştır. Fotosentezin sıcaklığın bir fonksiyonu olarak tanımlandığı ve daha sonra doğrusal bir ilişkileri olduğunu farz ederek spesifik büyüme hızını veya verimliliği hesaplamak için kullanıldığı çalışmalar da vardır

(Darvehei vd., 2018; Geider vd., 1997; Geider vd., 1998; Sukenik vd., 1987; Sukenik vd., 1991) :

$$P = P_{ref} \exp(-E_0(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}})) \quad (2.18)$$

P_{ref} , T_{ref} 'te fotosentez hızıdır. Denk. (2.18), kimyasal bir reaksiyonda sıcaklık ile denge sabiti değişimini açıklamak için başlangıçta türetilmiş Van't Hoff denkleminde ilham alınmıştır (Darvehei vd., 2018).

2.4.3 Besin elementleri

Besin kaynağı olarak genellikle karbon, azot ve fosfor tüm mikroorganizmalar tarafından kullanılır. Bu canlı yaşamın sürdürülebilirliği için gereklidir. Bu nedenle, mikroalgler bu tür besin maddeleri kullanılarak büyüyebilirler. Mikroalglerin karbon kaynağı, atmosferden alınan CO₂, endüstriyel egzoz gazları ve çözünür karbonatlardır (Jankowska vd., 2017). Mikroalgler hem organik hem de inorganik karbon kaynaklarını kullanabilmektedir (Elcik ve Çakmakçı, 2017; Rashid vd., 2014). Mikroalg kültürlerine verilen karbondioksit genellikle atmosferden sağlanmaktadır. CO₂'nin sudaki çözünürlüğü nispeten düşük olduğundan ve atmosferden normal difüzyon ile kazanımı algal tüketim hızından daha yavaş olduğundan, bir hava pompası gibi suni kaynaklarla sürekli beslemek gerekmektedir (Elcik ve Çakmakçı, 2017; Rashid vd., 2014). CO₂ direkt olarak sisteme verildiğinde, su ile reaksiyon vererek pH'ı azaltabilir. Bunu durumu önlemek amacıyla CO₂'nin tamamının mikroalgler tarafından kullanılması gerekir. Mikroalg beslenmesi için gerekli olan bir diğer önemli substrat azottur (Becker, 1994; Jankowska vd., 2017). Hızlı büyüme oranına sahip mikroalg türleri birincil kaynak olarak amonyuma gerek duymaktadır (Green ve Durnford, 2002) ancak, büyüme ortamında nitrat dışında başka bir azot kaynağı olmadığında, aralıklı nitrat beslemesi mikroalg büyümesini artırabilmektedir (Jankowska vd., 2017; Jin vd., 2006). Özellikle, mikroalg hücreleri tarafından amonyum tercih edilmektedir (Cai vd., 2013; Larsdotter, 2006; Razzak vd., 2017). Yüksek derişimlerde amonyum mikroalglere toksik etki yapabilir. Ayrıca, amonyak doğrudan atmosfere verildiğinde, çevreye zararlı etkilere de olabilir. Bu nedenle, mikroalg büyümesi için uygun bir azot kaynağı seçilmesi gereklidir (Razzak vd., 2017;

Wang vd., 2008). Mikroalglerin büyümesi için diğer önemli besin maddesi fosfordur. Mikroalg hücreleri fazla miktarda fosforu polifosfat tanecikleri olarak depolama eğilimindedir (Razzak vd., 2017). Böylece, bu tür hücre büyümesi için fosfat besin yetersizliği koşulları sırasında mikroalgler tarafından kullanılabilir (Larsdotter, 2006; Razzak vd., 2017). Mikroalglerin yetiştirilmesinde, temel besin maddeleri (karbon, azot, fosfor)'nin dışında eser miktarda silika, kalsiyum, magnezyum, potasyum, demir, bakır, çinko gibi mikro besin maddelerine de ihtiyaç vardır (Elcik ve Çakmakçı, 2017).

2.4.4 pH

pH kültür ortamında mikroalglerin büyümesini etkileyen diğer bir önemli 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 8 ile 9 arasında daha elverişli olduğu bildirilmiştir (Bartley vd., 2014; Behera vd., 2019). pH'ın 10-11'in üzerine çıkması durumunda, mikroalglerin gelişimi inhibe olmaktadır. Mikroalglerin büyüme işlemi sırasında pH genellikle, karbonat/bikarbonat dengesiyle kontrol edilmektedir. Büyük ölçekte pH kontrolü, karbonat tamponlarının (hücre dışı pH) ve hücre içi pH'ın izole edilmiş etkilerinin detaylı bir analizini gerektirmektedir (Behera vd., 2019; Ying vd., 2014). Mikroalgler fotosentez yaparak CO₂'yi kullanırlar ve pH yükselir (Elcik ve Çakmakçı, 2017; Zhu vd., 2013). Yükselen pH'ın kontrol edilmesinde genellikle hidroklorik asit veya asetik asit kullanılmaktadır. pH, amonyağın uçması ve yüksek pH'da ortofosfatın çökmesi nedeniyle azot ve fosfat giderimini etkilemektedir (Munoz ve Guieysse, 2006).

2.4.5 Karıştırma

Mikroalglerin büyümesi için karıştırma, diğer önemli bir parametredir. Karıştırma, gaz enjeksiyonu, pompalama veya mekanik karıştırma ile gerçekleştirilebilir (Rashid vd., 2014). Bunların içinden mekanik karıştırmanın etkisi fazladır fakat diğerlerinden daha yüksek hidrodinamik basınca sebep olur. Yavaş karıştırma, mikroalg süspansiyonunda koyu durgun bölge oluşturabilmektedir (Rashid vd., 2014). Yavaş karıştırma, büyüme

üzerinde zararlı etki yaratan anaerobik bölgelere neden olmaktadır. Buna karşılık, yüksek karıştırma hızı, büyük bir enerji girişi gerektirmesinin yanı sıra hücrelerde hasara neden olabilmektedir (Carlsson vd., 2007; Kumar vd., 2010). Karıştırma ekipmanının dikkatli seçilmesi biyokütle verimliliğini %75'e kadar yükseltebilmektedir (Rashid vd., 2014).

2.5 Biyogaz Çamurunun Mikroalglerle Arıtımıyla İlgili Literatürde Yapılmış Çalışmalar

Biyogaz çamurunun mikroalglerle arıtımı ile ilgili özellikle son yıllarda yapılmış değişik çalışmalar bulunmaktadır.

Yan vd., (2013) tarafından yapılan bir çalışmada *Chlorella vulgaris* (*C. vulgaris*) tarafından anaerobik çürütme işleminden elde edilen çamurun saflaştırılması için çeşitli LED ışık özelliklerinde ve ışık yoğunluğundaki besleme stratejilerinin etkisi araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan *C. vulgaris*, biyogaz çamurunu optimum ışık kalitesi ve ışık yoğunluğuyla besleme stratejisi altında etkin bir şekilde saflaştırabilmektedir. Çalışmada kullanılan *C. vulgaris* (FACHB-31) türünü, bir Enstitü'den temin etmişlerdir. Biyogaz çamurunu bir domuz çiftliğinden temin etmişlerdir. Fotobiyoreaktör olarak ise bir LED ışık kaynağı ile yeniden düzenlenmiş olan aydınlatıcı bir inkübatör kullanmışlardır. Aydınlatıcı inkübatörün yetiştirme koşullarını $25 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$, 12 aydınlık / 12 karanlık döngüsü altında ve yapay aralıklı olarak her 12 saatte bir karıştırarak şekilde ayarlamışlardır. Çalışmada ışık yoğunluğu değerlerini ilk olarak mikroalg üremesinin yanı sıra besin giderimi etkinliği için ışık kalitesinin optimizasyonu için, $2000 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 'de sabit yoğunluk stratejisi altında farklı ışık (kırmızı, beyaz, sarı, mor, mavi, yeşil) nitelikleriyle aydınlatmışlardır. İkinci olarak ise, artımlı yoğunluk stratejisini 400, 800, 1200, 1600 ve $2000 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 'de elde etmek için ilk adımda belirlenen optimum ışık kalitesiyle aydınlatmışlardır. Optimum ışık yoğunluğuyla besleme stratejileri sırasıyla: Faz 1, 0-48 s, $800 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; Faz 2, 48-96 saat ile $1200 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ve Faz 3, 96-144 saat, $1600 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ dir. Kesikli beslemeli olarak çalışmada deney periyodu 10 gün (240 saat) sürmüştür. $2000 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ sabit ışık yoğunluğu ile çeşitli ışık kalitelerinde (kırmızı, beyaz, sarı, mor, mavi, yeşil) biyogaz çamurundan besin giderimlerini (KOİ, TN, TP) en

yüksek kırmızı ışıktaki KOİ %89,14 ± 3,77, TN %85,08 ± 3,65, TP %82,06 ± 3,29 değerlerini elde etmişlerdir. Ayrıca, çalışmalarında, çeşitli ışık şiddetiyle besleme stratejileri altında besinlerin giderilmesinde ekonomik etkinliği analiz eden ilk çalışma olduğunu ve mikroalg kültürü için kullanılan en uygun ışık şiddetiyle besleme stratejisinin, ışık enerjisi israfını ve foto inhibisyonunu önlemek için sürekli yoğunluk stratejisinden ziyade artan yoğunluk stratejisi olması gerektiğini ortaya koymuşlardır.

Zhao vd., (2013) tarafından yapılan bir çalışmada Çeşitli LED ışık dalga boyları ve yoğunluklarının mikroalge dayalı eşzamanlı biyogaz iyileştirme ve digestattaki besin giderme işlemine etkisi araştırılmıştır. Mikroalg türü olarak *Chlorella sp.* laboratuvar ortamlarında bulunan stok kültürlerinden elde etmişlerdir. Biyogaz çamurunu ve digestatı bir anaerobik bir çürütücüden temin edilmiştir. Mikroalgler için fotobiyoreaktörü şeffaf bir polietilen torba kullanmışlardır. Kültür koşullarını beyaz floresan ışık kullanarak (ışık yoğunluğunu 300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), 25 ± 0,5°C sıcaklığında, 12 saat aydınlık / 12 saat, karanlık fotoperiyod aralığında BG-11 ortamını kullanarak sağlamışlardır. Kesikli beslemeli olarak çalışmada deney periyodu 7 gün (168 saat) sürmüştür. Biyogazdan verimli CO₂ giderimini, digestattaki besin giderimini ve mikroalg büyümesi için optimum ışık dalga boyları, torba fotobiyoreaktörde çeşitli ışık yoğunlukları altında (400, 800, 1200, 1600, 2000 ve 2400 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) ve ışık dalga boylarına (kırmızı, beyaz, sarı ve mavi) maruz bırakılmasıyla belirlemişlerdir. Digestatın ön arıtmadan önce ve sonra özelliklerini incelemişlerdir. Digestatın ön arıtmadan önce pH, KOİ, TN, TP değerleri sırasıyla; 6,55 ± 0,05, 1227,61 ± 54,98, 492,02 ± 21,53, 53,28 ± 2,74 mg/L'dir. Ön arıtmadan sonra pH, KOİ, TN, TP değerleri sırasıyla; 6,50 ± 0,05, 1203,61 ± 49,58, 481,37 ± 16,42, 51,34 ± 1,85 mg/L olarak elde etmişlerdir. Kırmızı ışığı, mikroalg büyümesi, biyogaz iyileştirmesi ve digestattaki besin giderimi için en uygun ışık dalgası ile belirlenmişlerdir. Orta ışık yoğunluğu aralığında (yani, 800, 1200, 1600 ve 2000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), daha yüksek ışık yoğunluğunda (2400 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), daha yüksek biyogaz iyileştirme ve digestattan daha büyük besin giderimi sonucuna ulaşmışlardır. Metan içeriğinin, % 92,74 ± 3,56 (h / h) en yüksek değerine ulaştığı sonucuna varmışlardır. Digestatın en yüksek KOİ, TN ve TP giderme verimliliğini sırasıyla %85,35 ± 1,04, %77,98 ± 1,84 ve %73,03 ± 2,14 elde etmişlerdir. Çalışmalarında kullandıkları mikroalg bazlı torba fotobiyoreaktörü, biyogazın etkili bir şekilde iyileştirmesini sağlayacağını ve aynı

zamanda digestattaki besin içeriğini de giderebileceği sonucunu elde etmişlerdir. Ayrıca, biyogazın ve digestattaki besin maddesinin karbondioksit içeriğinin ve biyogaz iyileştirme standardının azaltılması ve ekonomik verimleri göz önüne alındığında, optimum ışık yoğunluğu aralığının 1200 ile 1600 $\mu\text{mol}/\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir.

Yan vd., (2014) tarafından yapılan bir çalışmada *Chlorella sp.* kültürleri ile aşıl原因an reaktörlerde biyogaz saflaştırma ve biyogaz çamuru arıtımında biyogaz içerisindeki metanın miktarı ve değişik LED ışık dalga boylarının etkisi araştırılmıştır. Biyogaz çamuru işleyen bir anaerobik bir çürütücüden temin edilmiştir. Mikroalgler için fotobiyoreaktörü şeffaf bir polietilen torba kullanmışlardır. Kesikli beslemeli olarak çalışmada deney periyodu 5 gün (120 saat) sürmüştür. Işık kaynağını sırasıyla tek ışık kırmızı, mavi, beyaz; karışık ışık kırmızı: mavi 3 ışık dalga boyunu kullanmışlardır. Hem biyogaz saflaştırma hem de biyogaz çamuru nütrient giderimi için en uygun LED ışık karışım oranı kırmızı: mavi 5:5 olarak bulunmuştur. 5 günlük deney periyodu sonunda CO₂ kaynağı olarak kullanılan biyogazın metan yüzdesi $92,60 \pm 2,24\%$ yükseltilmiştir. Kimyasal oksijen ihtiyacı, toplam azot ve toplam fosforun giderim verimliliğini ise sırasıyla $85,73 \pm 4,26\%$, $73,21 \pm 2,51\%$, $73,89 \pm 4,82\%$ olarak elde edilmiştir. Başlangıçta *Chlorella sp.*'nin kuru ağırlığı $214,36 \pm 15,82$ mg/L'dir. Deneylerin sonunda mikroalg büyümesinin kuru ağırlığını $614,28 \pm 16,81$ mg/L olarak hesaplamışlardır.

Zhao vd., (2015) tarafından yapılan bir çalışmada *C. vulgaris*, *Scenedesmus obliquus*, ve *Neochloris oleoabundans* mikroalgal kültürleri ile torba tip fotobiyoreaktörlerde biyogaz çamurunun farklı ışık karışımları kullanarak arıtımı çalışılmıştır. CO₂ kaynağı olarak biyogaz kullanılmış ve biyogazdan CO₂ giderimi de araştırılmıştır. Kırmızı: mavi ışık 5:5 oranında *S. obliquus* ve *C. Vulgaris* kültürleri KOİ ve toplam fosforu daha iyi giderirken, kırmızı mavi oranı 7:3'te *S. Obliquus* çok daha yüksek N giderimi sağlamıştır. Aynı kültürler *C. vulgaris* ve *N. Oleoabundans* ile kıyaslandığında özellikle kırmızı mavi ışık oranlarının 5:5, 7:3 ve 3:7 olduğunda nütrient giderimlerinin hepsinde daha başarılı olmuştur. $61,32 \pm 5,74\%$ olan biyogazın metan içeriği çalışmaların hepsinde 75% 'in üstüne çıkartılmıştır.

Ouyang vd., (2015) tarafından yapılan bir çalışmada eş zamanlı olarak biyogazın kapasitesinin iyileştirilmesi ve biyogaz çamurundaki besin giderimi için ışık yoğunluğunun farklı mikroalg türlerine etkisi araştırılmıştır. Üç yeşil alg türü olarak, *Chlorella sp.*, *S. obliquus* ve *Selenastrum bibraianum* mikroalg türlerini seçmişlerdir. Reaktör tipi olarak fotobiyoreaktör torbalar kullanmışlardır. Kültür koşullarını beyaz floresan ışık kullanarak (ışık yoğunluğunu $150-170 \mu\text{mol}/\text{m}^2.\text{s}^{-1}$), $25 \pm 0,5^\circ\text{C}$ sıcaklığında, 12 saat aydınlık / 12 saat karanlık fotoperiyod aralığında BG-11 ortamını kullanarak sağlamışlardır. Biyogaz çamurunu bir anaerobik çürütücüden temin etmişlerdir. Çalışmada biyogaz çamuru için sıcaklık $25,0 \pm 0,5^\circ\text{C}$ değerinde tutulmuş, ışık kaynağı düşük şiddette ($80-100 \mu\text{mol}/\text{m}^2.\text{s}^{-1}$), orta şiddette ($150-170 \mu\text{mol}/\text{m}^2.\text{s}^{-1}$) ve yüksek şiddette ($220-240 \mu\text{mol}/\text{m}^2.\text{s}^{-1}$) ayarlanmış ve 12 saat aydınlık: 12 saat karanlık zaman periyodu kullanılmıştır. Biyogaz çamuru için pH $7,14 \pm 1,86$ olarak ölçülmüştür. Deney periyodu kesikli beslemeli olarak gerçekleştirilen çalışmada 7 gün (168 saat) sürmüştür. Stoklu kültürlerde *S. obliquus*, *Chlorella sp.* ve *S. bibraianum* sırasıyla başlangıç kuru ağırlıkları $69,28 \pm 4,66$, $62,58 \pm 5,19$ ve $73,56 \pm 6,23 \text{ mg/L}$ 'dir. *S. Bibraianum*'u, *S. obliquus* ve *Chlorella sp* ile karşılaştırdıklarında daha iyi kombine sonuç gösterdiğini ve eş zamanlı biyogazın iyileştirilmesi ve biyogazdan atık besin giderimi için daha uygun bulmuşlardır. Her bir mikroalg için büyüme hızı ve CO_2 giderimini incelenmişlerdir. Biyogaz çamurundaki besin giderimi, CO_2 giderimi ve yükseltme etkileri için en iyi sonuçları, *S. obliquus* için orta ışık yoğunluğu ($150-170 \mu\text{mol}/\text{m}^2.\text{s}^{-1}$) işleminden elde etmişlerdir. Her bir mikroalg için kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), toplam azot (TN) ve toplam fosfor (TP) giderim kapasitesini araştırmışlardır. KOİ, TN, TP en yüksek giderim verimleri sırasıyla $\% 93,08 \pm 4,62$, $\% 84,12 \pm 4,37$, $\% 86,76 \pm 4,58$ elde edilmiştir. Çalışma sonunda en yüksek mikroalg kuru ağırlık miktarı $465,31 \pm 19,44 \text{ mg/L}$ olarak elde etmişler ve CH_4 konsantrasyonu ise $94,41 \pm 3,16 \text{ (h/h)}$ olarak bulmuşlardır.

Wang vd., (2016) tarafından yapılan bir çalışmada çeşitli fotoperiyodlar altında eşzamanlı biyogazın iyileştirilmesi ve biyogaz çamurundan besin giderimi için mikroalg seçimi araştırılmıştır. Yüksek biyogaz toleransı ve hızlı büyüme ile karakterize beş mikroalg türü eşzamanlı besin giderme ve biyogaz iyileştirme yeteneğine sahip türleri tanımlamak için biyogaz çamurunda kültürlenmiştir. Tüm bu türleri, bir enstitüden elde etmişlerdir. Deneylerden önce, mikroalgleri koruyarak ve

özelliklerini stabilize etmek için BG-11 ortamında, $150 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ışık yoğunluğunda beyaz ışık yayan (LED) kullanarak, sıcaklık $25 \pm 0,5^\circ\text{C}$ 'de ve 12 saat aydınlık / 12 saat karanlık bir zaman fotoperiyodunda yetiştirmişlerdir. Bu alglerin bu süreçlere potansiyel katkısı farklı fotoperiyodlar için değerlendirilmiştir. Ham biyogazı ve biyogaz çamurunu bir anaerobik çürütücüden elde etmişlerdir. Biyogaz çamurunun ön arıtmadan önceki pH, KOİ, TN ve TP değerleri sırasıyla; $6,97 \pm 0,15$, $793,46 \pm 22,59$, $205,75 \pm 3,21$ ve $16,37 \pm 2,46 \text{ mg/L}$ 'dir. Ön arıtmadan sonraki, pH, KOİ, TN ve TP değerlerini sırasıyla $6,99 \pm 0,11$, $789,13 \pm 19,88$, $198,15 \pm 9,29$ ve $15,53 \pm 1,38 \text{ mg/L}$ olarak elde etmişlerdir. Reaktör tipi olarak bir fotobiyoreaktör torba kullanmışlardır. Bu fotobiyoreaktör torbada, mikroalglerin gelişimi, biyogazı iyileştirmesini ve biyogaz çamurunda besinlerin giderilmesi için en uygun ışık fotoperiyodunu belirlemek amacıyla uzun (16 saat aydınlık / 8 saat karanlık), orta (14 saat aydınlık / 10 saat karanlık) ve kısa (12 saat aydınlık / 12 saat karanlık) fotoperiyodları kullanmışlardır. Kesikli beslemeli çalışmada deney periyodu 7 gün sürmüştür. Mikroalglerin büyüme oranlarını, başlangıçtaki konsantrasyonlarıyla ters orantılı olduğunu tespit etmişlerdir. *S. obliquus* (FACHB-31), *C. vulgaris* (FACHB-416) ve *Nitzschia palea* (FACHB-211) büyüme oranları orta derecede bir fotoperiyod altında (14 saat aydınlık / 10 saat karanlık) *Selenastrum capricornutum* (FACHB-271) ve *Anabaena spiroidlerin* (FACHB-498) kinden daha yüksek olduğunu elde etmişlerdir. Bu durumda %61,38 (h/h) bir başlangıç CH_4 konsantrasyonu altında, ham biyogazın nihai konsantrasyonları sırasıyla *S. obliquus*, *C. vulgaris* ve *N. palea* için %84,28, %84,21 ve %83,46'dır. Biyogaz çamurundaki besin maddelerini orta dereceli fotoperiyod altında en uygun şekilde azaltmışlardır. Biyogaz çamurunun ve ham biyogazın arıtımı için uygun mikroalg türlerinin seçilmesinin, optimal besin giderimi ve biyogaz iyileştirmesi için çok önemli olduğu sonucuna varmışlardır.

Sun vd., (2016) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada mikroalg türlerinin yetiştirilmesini aktif çamur ile bütünleştirerek besin giderimi ve biyogazın saflaştırması üzerine CO_2 konsantrasyonlarının performansını araştırmışlardır. Çalışmalarında biyogazı verimli bir şekilde saflaştıran, aynı anda biyogaz çamurundaki besin maddesini gideren ve yüksek biyokütle üretkenliği gösteren ortak bir alg-bakteri sistemi geliştirmişlerdir. Üç mikroalg türünü $100 \pm 8 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ışık yoğunluğunda, $25 \pm 0,5^\circ\text{C}$ sıcaklığında, beyaz LED ışığı kullanarak, 16 saat aydınlık

/ 8 saat karanlık periyodlar altında ve günde üç kez aralıklı çalkalamayla BG-11 ortamında yetiştirmişlerdir. Biyogaz çamurunu ise bir anaerobik çürütücünden temin etmişlerdir. Ayrıca biyogazın saflaştırılması için tipik bir simüle edilmiş biyogaz bileşimine göre dört sentetik biyogaz karışımı (BM1, BM2, BM3, BM4) kullanmışlardır. Biyogaz çamurunun ön arıtmadan önce pH, KOİ, TN, TP değerleri sırasıyla; $7,43 \pm 0,11$, $998,58 \pm 37,66$, $256,91 \pm 16,79$, $14,06 \pm 2,08$ mg/L'dir. Ön arıtmadan sonra pH, KOİ, TN, TP değerleri sırasıyla; $7,37 \pm 0,18$, $979,22 \pm 29,45$, $245,38 \pm 12,17$ ve $12,19 \pm 1,84$ mg/L'dir. Fotobiyoreaktör tipi olarak şeffaf bir polietilen torba (80 cm $\times$ 60 cm $\times$ 20 cm) kullanmışlardır. Kesikli beslemeli gerçekleştirilen çalışmayı 150 ± 10 $\mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ışık yoğunluğunda, $25 \pm 0,5^\circ\text{C}$ sıcaklığında, 30 flüoresan ampul ve 15 flüoresan lamba kullanarak, 16 saat aydınlık / 8 saat karanlık periyodlar altında 10 günde tamamlamışlardır. Besiyer maddesi olarak aktif çamurla karıştırılmış biyogaz çamurunu kullanarak üç mikroalgal tür (*C. vulgaris*, *S. obliquus* ve *Neochloris oleoabundans*) ile biyogazdan H₂S ve CO₂'yi gidermişlerdir. %45'lik bir CO₂ konsantrasyonunu sırasıyla %74,11-%80,57 ve %99,04-%99,42 CO₂ ve H₂S giderimlerini desteklemesi için optimum kabul etmişlerdir. %45-%55'lik CO₂ konsantrasyonunda, *S. obliquus* ve *C. vulgaris* içeren karışık kültürlerin, sırasıyla KOİ'yi (kimyasal oksijen ihtiyacı) ve TP'yi (toplam fosfor) etkin şekilde gidereceği sonucuna varmışlardır. *S. obliquus* içeren karma kültürün, %45'lik CO₂ konsantrasyonunda yüksek N giderme etkinliği gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Biyokütle verimliliğini, belirli bir aralıkta artan CO₂ konsantrasyonunda *S. obliquus* içeren karışık kültür için %45'lik CO₂ konsantrasyonunda maksimum 0,177 g /L-g ile arttığını, C, N ve P biyokütle içeriğinin sırasıyla %46,73- %52,31, %7,59- %9,08 ve %0,91- %1,08 oranlarında sabit kaldığını tespit etmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda alg ve bakteri karışımının, algal-bakteriyel proseslerde besin giderimi ve biyogazın iyileştirilmesinde bir arıtım yöntemi olarak kullanılabilme potansiyeli olduğuna kanaat getirmişlerdir.

Yine aynı çalışma gurubunun yapmış olduğu bir çalışmada Yan vd., (2016) tarafından yapılan bir çalışmada, biyogaz saflaştırma ve biyogaz çamurundan nütrient gidermek için *Chlorella sp* ile aşılana torba tip reaktörler kullanılmıştır. Mikroalg kültürlerinin gelişiminde değişik ışık şiddeti ve ışık kaynaklarının etkisi araştırılmıştır. Ham biyogaz çamuru yerel bir çiftlikte anaerobik fermentasyon çıkışından temin

etmişlerdir. Mikroalgler için fotobiyoreaktörü şeffaf bir polietilen torba kullanmışlardır. Kesikli beslemeli olarak çalışmada deney periyodu 6 gün (144 saat) sürmüştür. Işık kaynağını sırasıyla tek ışık kırmızı, mavi, beyaz; karışık ışık kırmızı:mavi 3 ışık dalga boyunu kullanmışlardır. En uygun ışık dalga boyunu, karışık LED kırmızı:mavi = 5:5 olarak bulmuşlardır. 6 günlük deney periyodu sonunda CO₂ kaynağı olarak kullanılan biyogazın CO₂ giderme verimini $85,46 \pm 6,25$ olarak elde etmişlerdir. Kimyasal oksijen ihtiyacı, toplam azot ve toplam fosforun giderim verimliliğini ise sırasıyla $85,23 \pm 8,32$, $87,10 \pm 7,55$ ve $92,40 \pm 3,05$ olarak sonuca varmışlardır. Başlangıçta *Chlorella sp*'nin kuru ağırlığı $180,55 \pm 20,30$ mg/L'dir. Deneylerin sonunda mikroalg büyümesinin kuru ağırlığını $582,40 \pm 43,12$ mg/L olarak hesaplamışlardır.

Tan vd., (2016) tarafından yapılan bir çalışmada biyogaz çamurunda yetiştirilen beş mikroalg kültürü tarafından karbonhidrat üretimi ile birlikte azot ve fosfor giderimi araştırılmıştır. Çalışmalarında *C. sorokiniana* FACHB-275, *C. vulgaris*, *S. dimorphus* FACHB-1266, *C. vulgaris* ESP-6 ve *Desmodesmus sp.* F51 mikroalg türlerini kullanmışlardır. *C. sorokiniana* FACHB-275, *C. vulgaris*, *S. dimorphus* FACHB-1266 mikroalg türlerini bir enstitüden almışlardır. *C. vulgaris* ESP-6 ve *Desmodesmus sp.* F51 mikroalg türlerini ise bir üniversiteden temin etmişlerdir. Beş mikroalg türünü, biyogaz çamurunda yaşamlarını sürdürme, azot kaynaklarını uzaklaştırma ve karbonhidrat biriktirme kabiliyetleri nedeniyle kültürlemişlerdir. Mikroalg kültürlerini, $27 \pm 1^{\circ}\text{C}$ 'de 1 L Modifiye Kalın Bazal 3N ortamında (Modifiye BBM) önceden kültürlemişlerdir. Sonra mikroalg türlerini, uzun süre saklamak için BG-11 ortamında tutmuşlardır. Reaktör tipi olarak, kauçuk tıpa ile kapatılmış 1000 ml'lik cam şişe ve her iki tarafı flüoresan lambalar tarafından aydınlatılan kesikli fotobiyoreaktör kullanmışlardır. Fotobiyoreaktörde mikroalg türlerinin yetiştirilmesi için Modifiye Kalın Bazal 3N ortamı (Modifiye BBM), seyreltilmiş biyogaz çamuru ve modifiye seyreltilmiş biyogaz çamuru olarak üç farklı ortam kullanmışlardır. Biyogaz çamurunu, domuz atığıyla yarı sürekli beslenen bir anaerobik çürütücünün çıkışından temin etmişlerdir. Biyogaz çamurunun başlangıç TN, TP, NH₄-N, PO₄-P, KOİ ve pH değerlerini sırasıyla $146,64 \pm 8,12$, 2,18, $135,5 \sim 143$, $2,01 \pm 0,04$, $120,77 \pm 15,09$, 7,91 mg/L olarak elde etmişlerdir. Kesikli beslemeli reaktörde deneysel çalışmaları 6 günde tamamlamışlardır. Çalışma sonunda Modifiye BBM'de beş tür arasında *C. vulgaris*

ESP-6 biyokütlesinin $757,59 \pm 61,86$ mg/L olarak en fazla olduğunu gözlemlemiştir. Seyreltilmiş biyogaz çamurunda ise beş tür arasında *C. vulgaris* ESP-6 biyokütlesinin $643,60 \pm 89,39$ mg/L olarak en fazla olduğu sonucuna varmışlardır. Biyogaz çamurunda amonyak inhibisyonu olmaksızın iyi uyarlanmış beş mikroalg türün olduğu kanıtlanmışlardır. Bu beş tür arasında *C. vulgaris* ESP-6, karbonhidrat birikiminde en iyi performansı gösterdiğini, bunun sonucunda da biyogaz çamurunda karbonhidrat içeriğini en yüksek % 61,5 olduğunu ve en yüksek amonyak giderim verimi oranının % 96,3 olarak gerçekleştiğini tespit etmişler ve $91,7$ mg/L-g biyogaz çamuruna fosfor ve magnezyum eklemişlerdir. Biyokütle birikimi için olumsuz olabilecek fosfor ve magnezyumun bulunmadığını, karbonhidrat birikiminin daha erken zamanda sonuçlandığını ve magnezyumun ilk önce karbonhidrat birikimi için etki faktörü olarak kabul edildiğini kanıtlamışlardır. Biyogaz çamurunda kültürlenmiş mikroalglerle, hücrede daha fazla karbonhidrat biriktiğini, bu sayede biyogaz çamurunun karbonhidrat içeriğinin geliştirilmesi için daha uygun bir ortam haline geldiğini, böylece karbonhidrat biriktirmek için yeni bir strateji olarak kabul edilebileceği sonucuna varmışlardır.

Yan vd., (2016) tarafından yapılan bir çalışmada *Chlorella sp.* kültürü ile aşıl原因an polietilen şeffaf torba fotobiyoreaktörde biyogaz çamurundan nütrient giderimi ve biyogaz saflaştırma verimi üzerinde ışık dalga boyları, ışık yoğunlukları ve ışıklandırma periyotlarının etkisi araştırılmıştır. Optimum ışık dalga boyu kırmızı:mavi karışımı 5:5 bulunmuştur. Işıklandırma periyodu optimum olarak düşük ışık yoğunluğunda ($300 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) 16 saat aydınlık / 8 saat karanlık, orta ışık yoğunluğunda ($600 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) 14 saat aydınlık / 10 saat karanlık ve yüksek ışık yoğunluğunda ($900 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) 12 saat aydınlık / 12 saat karanlık bulunmuştur. Biyogaz içerisindeki CO_2 giderim verimi % $85,46 \pm 6,25$, biyogaz çamuru nütrient giderim verimleri sırasıyla KOİ, TN ve TP için sırasıyla % $85,23 \pm 8,32$, % $87,10 \pm 7,55$ ve % $92,40 \pm 3,05$ olarak bulunmuştur.

Wang vd., (2017) tarafından biyogaz çamuru ve farklı kültürlerle yapılan bir çalışmada biyogazın saflaştırılmasında CO_2 'nin etkisi araştırılmıştır. Çalışmada *C. vulgaris* mono kültürü ve *Ganoderma lucidum* (*G. Lucidum*)-*C. vulgaris* ve aktif çamur-*C. vulgaris* co-kültürleri kullanılmıştır. Bunların yanında nütrient giderimi ve biyogaz

saflaştırma üzerinde kırmızı mavi ışık oranlarının etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar optimum biyogaz çamuru nütrient gideriminin *G. lucidum*-*C. vulgaris* karışık kültürleri ile olduğunu göstermiştir. Nütrient giderimi ve biyogaz saflaştırma için optimum kırmızı: mavi ışık oranının 5:5 olduğunu kimyasal oksijen ihtiyacı, toplam azot ve toplam fosforun giderim yüzdeleri için sırasıyla $86,08 \pm 6,27$, $85,69 \pm 6,34$, $86,17 \pm 6,13$ değerlerle bulunmuştur. Biyogaz içerisindeki CO_2 $79,11 \pm 6,13$ azaltılarak biyogaz iyileştirilmiştir.

Zhang vd., (2017) tarafından yapılan bir çalışmada farklı mikroalgal bazlı arıtım teknolojileri ile besin giderimi ve biyogazın iyileştirilmesinde karışık LED ışık dalga boylarının performansı araştırılmıştır. Çalışmada *C. vulgaris* mono kültürü ve *G. lucidum*- *C. vulgaris* ve aktif çamur- *C. vulgaris* co-kültürlerini kapsayan üç arıtma teknolojisi kullanılmıştır. Mikroalg türü olarak *C. vulgaris* kullanmışlardır. *C. vulgaris* mono kültürünü, $25 \pm 0,5^\circ C$ 'de, 16 saat aydınlık/ 8 saat karanlık döngüsü olan $200 \mu mol/m^2.s^{-1}$ ışık yoğunluğunda, beyaz LED ışık altında BG-11 ortamı kullanarak yetiştirmişlerdir. Mantar türü olarak ise *G. lucidum*'u seçmişlerdir. *G. lucidum* kültürlerini 500 ml'lik sentetik büyüme ortamında 96 saat boyunca $28 \pm 0,5^\circ C$ 'de yetiştirmişlerdir. Reaktör tipi olarak birbirine bağlı iki adet 16,8 L cam silindir bloğuna sahip fotobiyoreaktör kullanmışlardır. Kesikli beslemeli olarak çalışılan deney periyodunu 10 günde tamamlamışlardır. Çalışmalarında ışık kaynakları olarak 9:1; 7:3; 5:5; 3:7, 1:9 olmak üzere beş kırmızı: mavi ışık oranlarını test etmişlerdir. Biyogaz çamurunu ise bir anaerobik çürütücüden temin etmişlerdir. Biyogaz çamurunun ön arıtmadan önce pH, KOİ, TN, TP değerleri sırasıyla; $6,63 \pm 0,15$, $1277,31 \pm 26,35$, $265,19 \pm 21,36$, $15,33 \pm 2,06$ mg/L'dir. Ön arıtmadan sonra pH, KOİ, TN, TP değerleri sırasıyla; $6,95 \pm 0,16$, $1213,03 \pm 32,77$, $239,27 \pm 16,98$, $13,42 \pm 1,83$ mg/L olarak elde etmişlerdir. Başlangıçta *C. vulgaris*'in kültürünün kuru ağırlığı $114,69 \pm 9,07$ mg/L'dir. Mantar-mikroalg karışımının kuru ağırlığı $117,06 \pm 8,23$ mg/L ve aktif çamur-mikroalg karışımının kuru ağırlığı ise $113,69 \pm 9,18$ mg/L'dir. Kırmızı: mavi LED 7:3 ve 5:5 oranını, mikroalgleri mantar ya da aktif çamurla birlikte yetiştirmek için KOİ ve TP'nin sırasıyla %65,57-%74,29 ve %70,83-%76,69 oranında giderimini desteklemek için en uygun kabul etmişlerdir. Birlikte yetiştirilen mikroalg ve aktif çamurlu sistemde, 5:5 kırmızı: mavi LED oranında yüksek N giderim verimliliğini görmüşlerdir. Biyogazın iyileştirilmesi için en etkili ışık karışım oranlarının kırmızı:

mavi = 7:3 ve 5:5 olduğunu ve mantar sistemiyle birlikte yetiştirilen mikroalglerin en yüksek performansa sahip olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca mikroalglerin mantar sistemi ile birlikte yetiştirilmesi için hem biyogaz çamurundan besin uzaklaştırılması hem de biyogazın iyileştirilmesi için optimum kırmızı: mavi oranı 5:5 olarak tespit etmişlerdir. Mono-kültür mikroalg, mantar-mikroalg karışımı ve aktif çamur-mikroalg karışımı için en uygun yetiştirme sürelerini sırasıyla 7 gün, 9 gün ve 8 gün olarak bulmuşlardır. Sonuçlarında, besin gideriminde ve biyogazın iyileştirilmesinde karışık tür sistemlerin yüksek potansiyele sahip olduğunu ve algal-fungal simbiyotik sistemlerin önemli bir umut göstereceğini ifade etmişlerdir.

Cao vd., (2017) tarafından yapılan bir çalışmada eş zamanlı olarak, çeşitli karışık ışık dalga boyu ve fotoperiyodlar altında *C. vulgaris* ve üç farklı mantarın birlikte yetiştirilmesini kullanarak biyogazın saflaştırılması ve biyogaz çamurunun arıtımı araştırılmıştır. Üç farklı mantar, *Pleurotus geesteranus* (*P. geesteranus*), *Ganoderma lucidum* (*G. lucidum*) ve *Pleurotus ostreatus* (*P. ostreatus*) biyogaz çamurunu ve biyogazı aynı anda saflaştırmak için *C. vulgaris* ile peletlenmiştir. Biyogaz çamurunun arıtılması ve biyogazın saflaştırılması için *C. vulgaris*'i (FACHB-31), laboratuvarlarında BG-11 ortamında muhafaza etmişlerdir. *C. vulgaris*'i yetiştirmek için $25 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ 'de, 12 saat aydınlık / 12 saat karanlık ortamda, $200 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ışık yoğunluğuna sahip beyaz LED ışık kullanmışlardır. Mantar kültürlerinden *G. lucidum* ve *P. Ostreatus*'yu mikrobiyolojik kültür toplama merkezinden temin etmişlerdir. *P. geesteranus*'u laboratuvarlarından temin edip korumuşlardır. Kuru ağırlığı yaklaşık $113,56 \pm 4,09 \text{ mg/L}$ olan 100 mL *C. vulgaris* süspansiyonları hazırlamışlardır ve her süspansiyonu 5 mL hazırlanmış *P. geesteranus*, *G. lucidum* ve *P. ostreatus* pelet süspansiyonları ($73,26 \pm 3,95 \text{ mg/L}$ kuru ağırlık) ile karıştırmışlardır. Mantar hücreleri ile birlikte yetiştirilen mikroalgin başlangıç yoğunluğu yaklaşık $113,21 \pm 5,38 \text{ mg/L}$ olarak hesaplamışlardır. Rektör tipi olarak birbirine bağlı iki adet 16,8 L cam silindir bloğuna sahip fotobiyoreaktör kullanmışlardır. Kırmızı ve mavi ışıkları, fotobiyoreaktörlerin etrafına eşit şekilde yerleştirmişlerdir. Çalışmada ışık kaynakları olarak iki monokromatik ışık (kırmızı ve mavi) ve üç karışık ışık (kırmızı: mavi = 3:7, 5:5 ve 7:3) kullanmışlardır. Mikroalg-mantar büyümesi için seçilen karışık ışığa dayanarak, topaklanmış mantarlar-*C. vulgaris* farklı fotoperiyodlarda (12 saat / 12 saat, 14 saat / 10 saat ve 16 saat / 8 saat) kültürlenmiştir. Kesikli beslemeli olarak

çalışmada deney periyodu 10 gün sürmüştür. Bu çalışmadaki biyogaz çamurunun karakteristik özellikleri ön artımdan önce pH, KOİ, TN, TP değerleri sırasıyla $6,78 \pm 0,18$, $1521,75 \pm 47,19$, $289,78 \pm 29,37$, $29,82 \pm 3,26$ mg/L'dir. Ön arıtmadan sonra biyogaz çamurunun pH, KOİ, TN, TP değerleri sırasıyla $6,97 \pm 0,17$, $1495,62 \pm 59,94$, $278,46 \pm 30,13$, $27,98 \pm 2,87$ mg/L'dir. Karışık ışık dalga boyu kırmızı: mavi 5:5 ve 14 saat aydınlık / 10 saat karanlık fotoperiyodunda KOİ, TN, TP ve CO₂'nin maksimum giderim verimleri sırasıyla % 78,09, % 86,24, % 86,74 ve % 75,61'dir. Sonuçlarında, kırmızı: mavi için en uygun ışık dalga boyu oranının, bu üç farklı mantar destekli *C. vulgaris* için 5:5 olduğunu elde etmişlerdir. Bu durumun, diğer oranlarla karşılaştırıldığında, daha yüksek özellikli büyüme hızı ile besin ve CO₂ giderme verimi ile sonuçlandığını görmüşlerdir. *G. lucidum*/*C. vulgaris* karışımını, 14 saat aydınlık / 10 saat karanlık oranıyla enerji tüketimlerinin ekonomik verimlilik analizini teyit ederlerken, biyogaz çamurunun arıtımı ve biyogazın saflaştırılması için en iyi mantar-mikroalg olarak tespit etmişlerdir. Mikroalg kullanarak büyük ölçekli biyogaz çamurunu arıtma ve biyogazı saflaştırma için teorik bir temel sağlayacağı yönünde tahminde bulunmuşlardır.

Luo vd., (2019) tarafından yapılan lab ölçekli sürekli beslemeli düz plakalı açık bir fotobiyoreaktörde domuz çiftliği atıklarını arıtan anaerobik çürütücüden açığa çıkan biyogaz çamuru arıtılmıştır. 2 günlük optimum hidrolik alıkonma süresinde azot ve fosfor giderim hızı sırasıyla 30 mg/L-gün ve 7 mg/L-gün ve biyokütle üretim hızı 0,47 g/L-gün bulunmuştur. Çalışmada üretilen biyokütlenin ekonomik getirisi de hesaplanmış, 1 ton biyogaz çamurunun arıtılması ile 7,08 \$ elde edileceği tahmin edilmiştir.

Pizzera vd., (2019) tarafından yapılan bir çalışmada domuz çiftliği atıkları, enerji bitkileri ve tarımsal atıkları arıtan bir anaerobik çürütücüden elde edilen digestat pilot ölçekli biri açık havuz diğer kabarcıklı kolon fotobiyoreaktörde karışık alg-bakteri kültürleri ile arıtılmıştır. Ortalama biyokütle üretim hızı açık havuz reaktörde $32,4 \pm 33,1$ mg AKM/L-gün olurken kolon reaktörde $25,6 \pm 26,8$ mg AKM/L-gün olarak elde edilmiştir. Her iki reaktörde sırasıyla ortalama azot giderim verimi %20 (açık havuz) ve %22 (kolon) gözlenmiştir.

Zhao vd., (2019) tarafından yapılan bir çalışmada etkili besin maddesi arıtımı ve biyogaz saflaştırması elde etmek için mikroalg ve mantar kültürlerinin aynı ortamda yetiştirilmesi araştırılmıştır. Mikroalg türü olarak *C. vulgaris* (FACHB-31) kültürünü bir araştırma akademisinden temin etmişlerdir. Mikroalg türünü, BG-11 ortamında kültürlenmiş ve korumuşlardır. *C. vulgaris* $25 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ sıcaklığında, $200 \mu\text{mol}/\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ışık yoğunluğunda 12 saat aydınlık / 12 saat karanlık fotoperiyodunda optimum fotoperiyodu sağlamak için günde en az beş kez yapay aralıklı karıştırma ile yetiştirilmiştir. Mantar kültürünü ise, *G. lucidum* kültürü şeklinde, mikrobiyolojik kültür toplama merkezinden almışlardır. Önceden kültürlenmiş *G. lucidum* ve *C. vulgaris*'i, bir birlikte yetiştirme koşullarına adapte etmek için 250 mL'lik Erlenmeyer şişesinde 100 mL'lik hacim olacak şekilde dört farklı mantar-mikroalg oranlarında (1:1, 1:5, 1:10 ve 1:20) karışımını sağlamışlardır. Mantar ve alg karışımları daha sonra 28°C 'de optimum fotoperiyodu altında ve 160 rpm'lik çalkalama hızında yetiştirilmesini gerçekleştirmişlerdir. Rektör tipi olarak birbirine bağlı iki adet 16,8 L cam silindir bloğuna sahip fotobiyoreaktör kullanmışlardır. Çalışmada kullanılan biyogaz çamurunu domuz çiftliğindeki bir hayvancılık atıksu arıtma tesisinde bulunan bir anaerobik çürütme reaktöründen sağlamışlardır. Ayrıca *G. lucidum* ve *C. vulgaris*'i birlikte yetiştirmek için simüle edilmiş biyogaz çamuru hazırlamışlardır. Kesikli beslemeli olarak çalışılan deney periyodunu, $200 \mu\text{mol}/\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ışık yoğunluğunda 12 saat aydınlık/ 12 saat karanlık zaman aralığında 10 günde tamamlamışlardır. Çalışmalarında ışık kaynakları olarak 2:8, 5:5 ve 8:2 olmak üzere üç kırmızı: mavi ışık oranlarını test etmişlerdir. Ön arıtmadan önce biyogaz çamurunun pH, KOİ, TN, TP değerleri sırasıyla $6,74 \pm 0,11$, $1106,53 \pm 21,92$, $213,56 \pm 14,27$, $20,08 \pm 2,15$ mg/L'dir. Ön arıtmadan sonra biyogaz çamurunun pH, KOİ, TN, TP değerleri sırasıyla $6,86 \pm 0,14$, $1061,51 \pm 26,23$, $182,64 \pm 11,68$, $17,96 \pm 1,93$ mg/L olarak elde etmişlerdir. Ayrıca ön arıtmada bilinmeyen CO_2 miktarını, ön arıtmadan sonra $36,17 \pm 1,97$ olarak bulmuşlardır. KOİ, TN, TP ve CO_2 'nin en yüksek uzaklaştırma verimliliği sırasıyla $\%92,17 \pm 5,28$, $\%89,83 \pm 4,36$, $\%90,31 \pm 4,69$ ve $\%74,26 \pm 3,14$ olarak elde etmişlerdir. Sonuçlarında, peletler için optimize edilmiş kültür koşullarının 160 rpm'lik çalkalama hızında, mikroalgal hücreler için $1,0 \times 10^6$ spor L başlangıç aşırı konsantrasyonunda, mantar/alg oranının 1:10, karışık orta/ simüle edilmiş biyogaz çamuru oranının 3:7 $200 \mu\text{mol}/\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ışık yoğunluğunda inkübe olduğunu

bulmuşlardır. Ayrıca, biyogaz çamurunun iyileştirilmesi ve biyogazın saflaştırılması, mantar destekli mikroalg topaklarının kırmızı ışık dalga boyunda kırmızı: mavi 5:5 oranında birlikte yetiştirilmesiyle başarılı sonuca ulaşmışlardır. Bu sonuçlara bakarak, mantar destekli mikroalg topakları kullanarak büyük ölçekli biyogaz çamurunun saflaştırılması ve biyogazın iyileştirilmesi için teorik bir temel sağlayacağına kanaat getirmişlerdir.

.



3. MATERYAL VE METOT

3.1 Sentetik Biyogaz Çamuru ve Aşı kültür

Çalışmada karışık mikroalg kültürlerinin biyogaz çamurunda bulunan besi maddelerini (Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), N, P) giderim potansiyeli ve gelişim hızını tespit edebilmek için içeriği bilinen, karakteristiği değişmeyen ve biyogaz çamurunu sadece besi elementleri açısından temsil edebilen bir besi ortamı olması nedeniyle sentetik biyogaz çamuru ile çalışılmıştır. Biyogaz tesisleri beslemeleri ve işletme şartları nedeni ile değişik karakteristiklerde çıkış sularına (biyogaz çamuru) sahiptir. Bu nedenle çalışmaya başlamada önce biyogaz çamuru karakterizasyonu yapılan çalışmalar derlenerek ön arıtımı yapılmış biyogaz çamuru için KOİ, N ve P açısından ortalama bir karakteristik belirlenmiştir (Ouyang vd., 2015; Wang vd., 2017; Wang vd., 2016; Yan vd., 2014; Zhao vd., 2013). Tespit edilen bu karakteristiğe uygun olarak sentetik atıksu KOİ, N ve P saf kimyasalların çeşme suyuna eklenmesi ile hazırlanmıştır. Çalışılan biyogaz çamuru karakterizasyonu aşağıda Çizelge 3.1’de verilmektedir.

Çizelge 3.1. Sentetik olarak hazırlanmış biyogaz çamuru bileşimi.

Parametre	Temel kaynak	Teorik	Ölçüm		
			X _{ort}	S.S	n
KOİ, mg/L	İlave Glikoz (C ₆ H ₁₂ O ₆ .H ₂ O)	1065	1069	7,64	3
Toplam Organik Karbon	İlave Glikoz (C ₆ H ₁₂ O ₆ .H ₂ O)	400	-	-	-
Amonyum Azotu (NH ₄ -N), mg/L	İlave NH ₄ Cl	348	350	4,51	3
Fosfat Fosforu (PO ₄ -P), mg/L	İlave KH ₂ PO ₄ .3H ₂ O	24	26,3	2,00	3
pH	Çeşme suyu	-	7,26	0,06	3
İletkenlik, µS/cm	İlaveler	-	4057	30,6	3
Florür	Çeşme suyu	-	1,32	0,07	3
Klorür	İlave NH ₄ Cl	881	881	4,36	3
Bromür	Çeşme suyu	-	4,54	0,26	3
Nitrat	Çeşme suyu	-	10,2	1,44	3
Fosfat	İlave KH ₂ PO ₄ .3H ₂ O	73,6	80,7	6,16	3
Sülfat	Çeşme suyu	-	28,9	5,27	3
Kalsiyum	Çeşme suyu	-	61,6	1,35	3
Potasyum	İlave KH ₂ PO ₄ .3H ₂ O	30,3	49,6	4,39	3
Magnezyum	Çeşme suyu	-	31,7	1,38	3
Sodyum	Çeşme suyu	-	59,0	3,52	3

X_{ort}: Ortalama, S.S: Standart sapma, n: Ölçüm sayısı

Çalışma için kullanılan karışık mikroalg kültürü aşıları, tatlı çeşme suyunda güneş ışığı altında kendiliğinden üreyen alglerin BG-11 ortamı bileşiminde bulunan N ve P bileşiklerinin çeşme suyuna ilavesi ile elde edilen besi ortamında çoğaltılması ile sağlanmıştır. Aşı için kullanılan kültür 10 günlük çamur yaşımda kesikli olarak işletilerek sürekliliği sağlanmıştır. 15°C'deki çalışma için çoğaltılan kültürden 150 mL etkin hacim 1;7 L olacak şekilde 2 L'lik erlenmayere aktarılmıştır. 25°C'deki çalışma için çoğaltılan kültürden 50 mL etkin hacim 1;7 L olacak şekilde 2 L'lik erlenmayere aktarılmıştır. 35°C'deki çalışma için çoğaltılan kültürden 100 mL etkin hacim 1;7 olacak şekilde 2 L'lik erlenmayere aktarılmıştır. Çalışma 12 saat karanlık / 12 saat aydınlık ve suni ışık ortamında, 15, 25, 35°C'de bir orbital çalkalayıcı içinde de çalkalama hızı 60-65 rpm olacak şekilde ve hava pompası ile erlenmayere hava verilerek üç adet reaktörde paralel olarak gerçekleştirilmiştir. Her bir çalışma algal büyüme hızının durduğu süreye kadar devam ettirilmiştir.

3.2 Örneklem

Kesikli çalışmada besi elementi değişim hızına bağlı olarak haftada 5, 3 veya 2 kez KOİ, NH₄-N, PO₄-P ölçümleri yapılmıştır. Optik yoğunluk değerleri 660 nm'de spektrofotometrede ölçülmüştür. pH ölçümleri günde iki defa tüm örneklerde yapılmıştır. Klorofil a ölçümleri ise haftanın belirli günlerinde yapılmıştır. KOİ, NH₄-N, PO₄-P ölçümleri paralel çalışan her bir reaktörden alınan örneklerde en az iki kez, klorofil a ve optik yoğunluk ölçümleri her bir reaktörden alınan örneklerde bir kez ölçülmüştür. Deney periyodunun sonunda ise askıda katı madde (AKM) testi her bir reaktörden alınan örnek için üç tekrarlı gerçekleştirilmiştir. 15°C'nin etkisinin çalışıldığı periyodun sonunda üç paralel reaktörden alınan örneklerde AKM ve UAKM testi yapılarak UAKM/AKM oranı tespit edilmiş ve hesaplamalarda bu değer kullanılmıştır. Kesikli periyodun sonunda biyokütle, OY ve klorofil a arasındaki ilişkiyi göstermek için bir reaktörden alınan örnekler dört, altı, sekiz, on ve on iki kat seyreltilerek her bir seyreltilen örnekte iki tekrarlı AKM, OY ve klorofil a ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

3.3 Analitik Yöntemler

KOİ (5220-C), askıda katı madde (AKM) (2540-B) ve uçucu askıda katı madde (UAKM) (2540-E) , pH (4500-B), katyon (3030-F Perkin Elmer Optima 2100 DV ICP-OES), ve anyon (4110-B Dionex IC 1000) ölçümleri standart metotlara (APHA/AWWA/WEF, 2017). PO₄-P (Merck 1.14848.0001) ve NH₄-N (Merck 1.14752.0001) hazır kitleri ile bir spektrofotometre (AQUAMATE Thermospectronic) yardımıyla ölçülmüştür. Çalışmalarda zaman zaman özellikle alg varlığı ve türlerin tespiti için mikroskobik gözlemler (Nikon ECLIPSE- E100) de gerçekleştirilmiştir. Karışık kültür alg gelişimi spektrofotometrede (T80 UV/VIS Spectrometer PG Instruments Ltd.) 660 nm’de absorbans ölçümleri yaparak da izlenmiştir.

3.3.1 Klorofil a ölçümü

Klorofil a analizi örneklerden 10 ml çekilerek, 3000 rpm’de 3-5 dakika santrüflüjenip üst faz suyu alındıktan sonra 5 mL %90’lık metanol ilavesi yapıp ağzı kapalı şekilde 5-10 dakika 65°C’de bekletildikten sonra üst fazdan (ya da santrüflülenerek) alınan solüsyonun absorbansı 665 ve 650 nm’de ölçülerek, ölçüm sonuçları aşağıdaki formülde yerine yazılarak hesap edilmiştir (Becker, 1994).

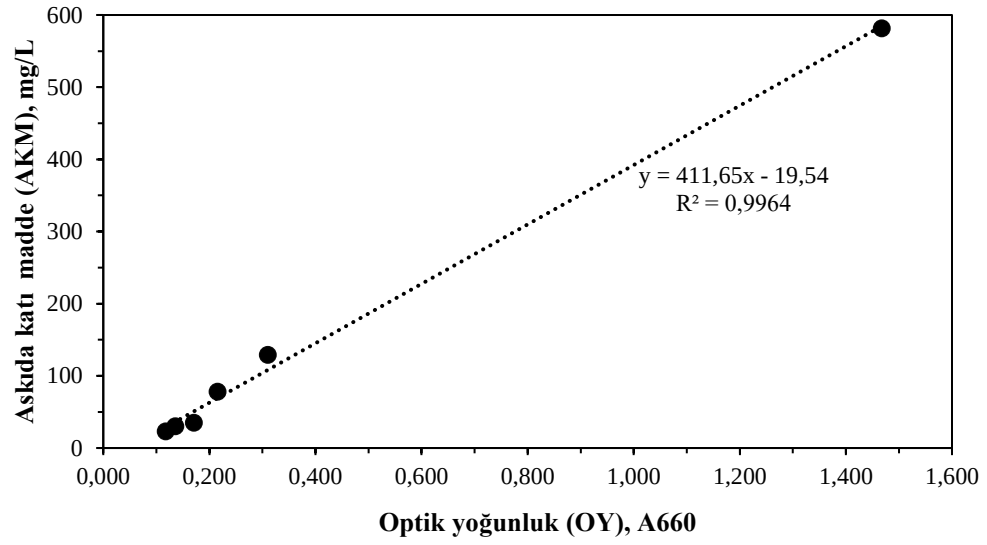
$$\text{Klorofil-a (mg/L)} = (16,5 \times A_{665}) - (8,3 \times A_{650}) \quad (3.1)$$

A₆₆₅, A₆₅₀: sırasıyla 665 ve 650 nm’de okunan absorbans değerleri.

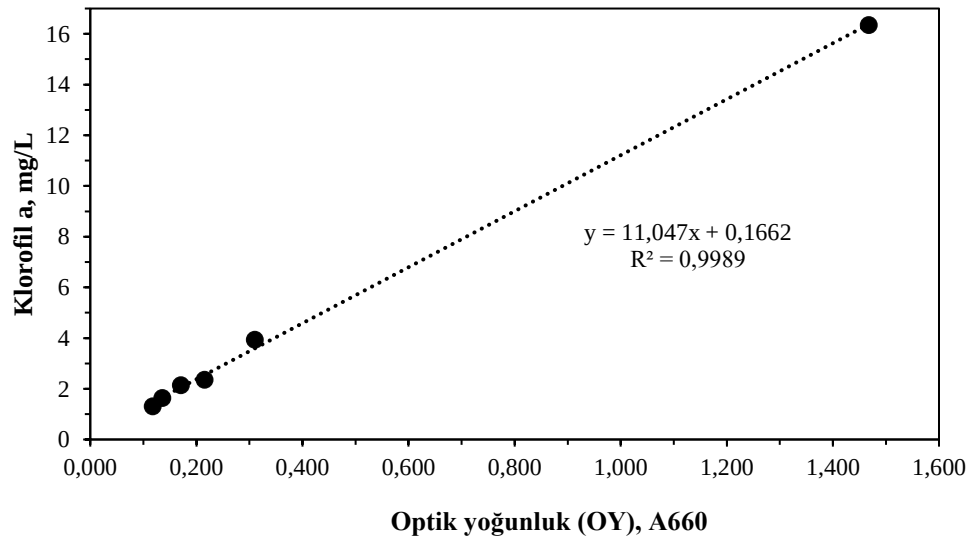
3.3.2 OY, AKM ve klorofil a ilişkisinin belirlenmesi

15°C’lik ortamda biyogaz çamuru ortamında gerçekleştirilen çalışmalarda geliştirilen karışık mikroalg kültürlerinin bulunduğu ortamdan alınan örnek ve 4, 6, 8, 10 ve 12 kat seyreltilmiş örneklerinde OY, AKM ve klorofil a, ölçümleri yapılmıştır. Şekil 3.1’de gösterildiği gibi yaygın biyokütle artışı izleme yöntemi olan optik yoğunluk (OY) için 660 nm’de ölçümler yapılmış ve AKM ile ilişkisi tespit edilmiştir. Aynı örneklerde paralel olarak yapılan klorofil a, testleri ile de OY ve AKM arasındaki ilişkiler sırasıyla Şekil 3.2 ve 3.3’de gösterilmektedir. Bu ilişkilerin tespit edilmesi ile

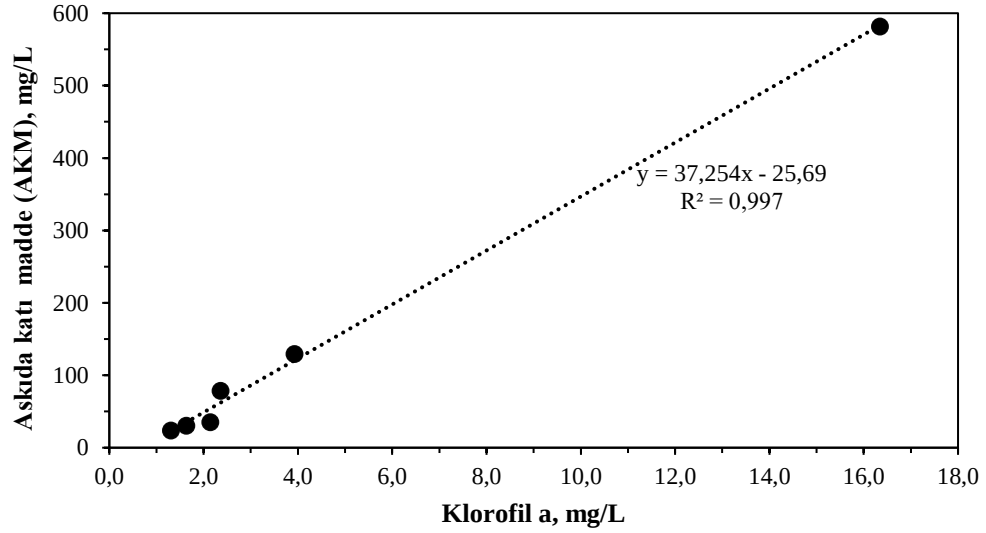
klorofil a daki artışlar mikroalg kültürünün çoğalmasına, AKM deki artış ise toplam biyokütlenin çoğalmasına bağlanmıştır.



Şekil 3.1. Biyogaz çamuru ortamında gelişen mikroalg kültürlerinde AKM ile OY ilişkisi.



Şekil 3.2. Klorofil a ile OY değişimi.



Şekil 3.3. AKM ile klorofil a değişimi.

Çevre mühendisliği uygulamalarında pratik olması açısından biyokütle derişimleri genellikle AKM analizleri ile izlense de, tasarım işlemlerinde biyokinetik katsayıların ifadesinde biyokütle derişimi UAKM ile ifade edilmektedir. Tipik koşullarda UAKM/AKM oranı tespit edilip kinetik katsayılar UAKM cinsinden hesaplanmaktadır. Çalışmada 15°C’de çalışılan örneklerde 3 tekrarlı yapılan AKM ve UAKM analizlerinde $AKM = 580 \pm 7,07$, $UAKM = 403 \pm 14,1$ mg/L ve $\%UAKM/AKM = \%70 \pm 1,58$ olarak bulunmuş, kinetik katsayı ifadelerinde AKM değerleri bu değer dikkate alınarak UAKM’ye çevrilmiştir.

3.3.3 Işık şiddeti ölçümü

Algler ve bitkiler fotosentetik olarak aktif bölge olan fotosentetik aktif radyasyon (PAR) olarak bilinen 400-700 nm arasındaki dalga boylarına sahip ışık enerjisini kullanır. Fotosentetik canlıların gelişiminde PAR bölgesindeki ışık miktarı kuantum akı birimleri ile ifade edilir. Ortamdaki foton akışı saniyede metrekare başına düşen mikromol foton birimi ($\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) ile ölçülür. Fotosentetik canlıların fotosentezde ortamda ne kadar enerji kullanıldığını gösteren pratik bir ölçüm yöntemidir. Bununla birlikte ışık lambası üreticileri insanlara görünür spektrumda ışık miktarını tipik olarak lümen ile gösterirler. Ayrıca, aydınlatma mühendisleri ve ışık ölçüm cihazlarının çoğu ise lüks yani metrekare başına lümen cinsinden aydınlatma seviyesini ölçmektedirler. Bitkilerin ve insanların spektral duyarlılıkları oldukça farklı olduğu için, belirli bir ışık

kaynağı için tüm spektral karakteristikleri değerlendirmeden birimleri dönüştürmenin doğrudan bir yöntemi yoktur. Farklı lamba tipleri veya farklı 400-700 nm arası radyasyon için yaklaşık dönüşüm değerlerini kullanır. Bizim ölçümlerimizde soğuk beyaz floresan lamba kullanılmış ve lüks cinsinden ölçüm sonuçları elde edilmiştir. Bu ölçüm sonuçları 0,0135 ile kuantum birimi olan foton akı yoğunluğuna çevrilmiştir (Langhans ve Tibbitts, 1997; Thimijan ve Heins, 1983).

Ortam ışık yoğunluğu lüks cinsinden Lx1010BS marka/model dijital lüksmetre ile ölçülmüştür. Ortamdaki reaktörler etrafında yapılan 8 ölçümün ortalaması alınmıştır. Işık şiddeti= 2746 ± 384 lüks (n=8) bulunmuştur. Beyaz ışık için çarpan 0,0135 ile diğer ışık şiddeti birimine $37,1 \pm 5,2 \mu\text{mol/m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (n=8) dönüştürülmüştür.

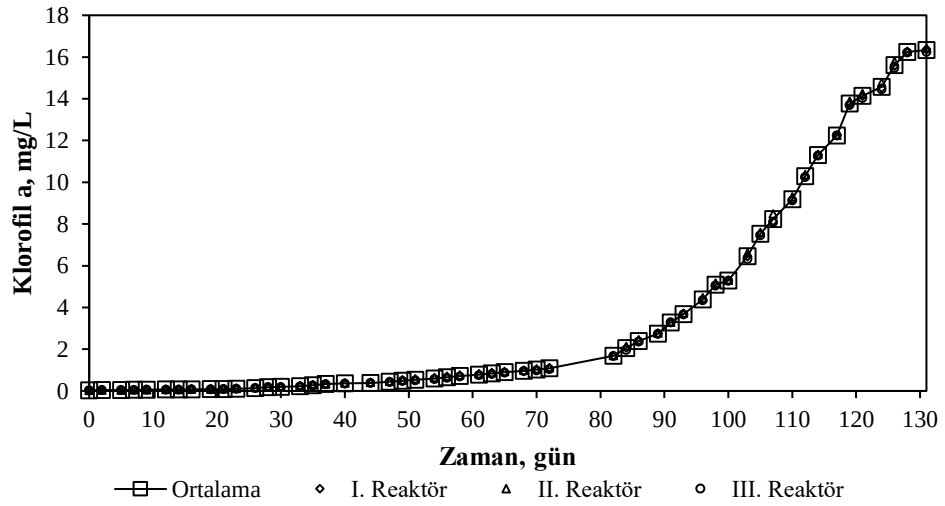
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Sıcaklığın Biyokütle Üretimi ve Nütrient Giderimi Üzerindeki Etkileri

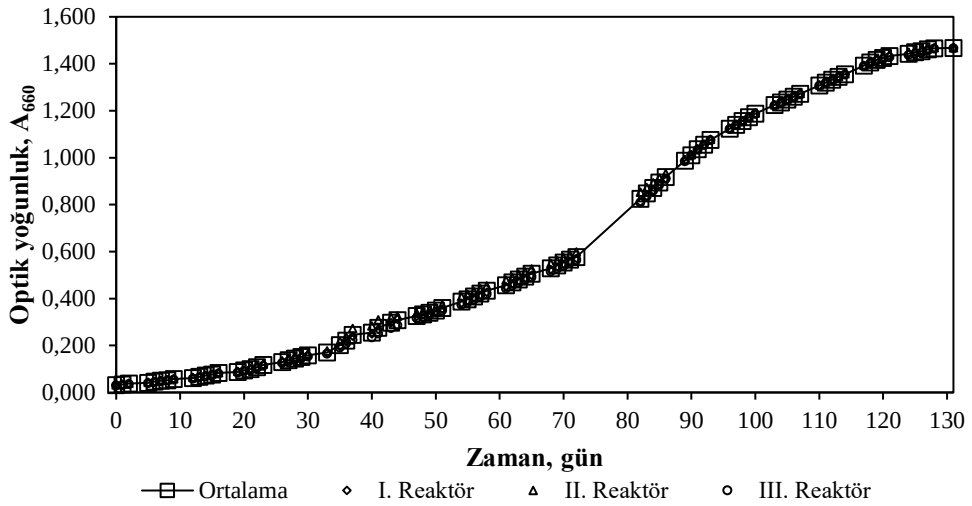
Karışık kültür mikroalglerin sentetik biyogaz çamuru içerisinde artışı ve bu artışa bağlı olarak azot ve fosfor giderimleri düşük, orta ve yüksek sıcaklıkları temsilen sırasıyla 15, 25, 35°C'deki sıcaklıklarda izlenmiştir. Algler genel olarak ototrofik canlılar olarak bilinse de heterotrofik algler ve bakterilerin de ortamda gelişerek organik maddeyi kullanacağı bilinmektedir. Dolayısıyla organik madde içeriği yüksek biyogaz çamuru gibi atıksularda algal gelişim hızı ve biyokütle artış hızları ve buna bağlı olarak ortamda bulunan organik maddelerin, N ve P'un giderimi seçilen üç farklı sıcaklık için izlenmiştir.

4.1.1 15°C'de sıcaklığın etkisi

15°C'deki çalışmanın deneysel periyodu algal artış hızı duruncaya kadar yani yaklaşık 131 gün boyunca gerçekleştirilmiştir. Klorofil a algal ototrofik biyokütlenin bir bileşeni olduğu için klorofil a'daki artışlar ototrofik mikroalglerin artışı göstermektedir. Aşağıdaki şekilde inkübasyon süresince klorofil a artışı gösterilmektedir (Şekil 4.1). Optik yoğunluktaki artış genel olarak biyokütle artışı temsil etmektedir. İki artışın paralel olmayışı ortamda sadece mikroalg kültürlerinin değil bakteri gibi diğer canlı türlerinde geliştiğini göstermektedir. Şekil 4.3'de ortamdaki KOİ giderimi gösterilmektedir. Ortamda KOİ'nin azalması heterotrof mikroorganizma kültürlerinin de bulunduğunu, biyokütle artışından bu türlerinde sorumlu olduğunu göstermektedir. Ortamdaki KOİ inkübasyon süresi sonunda 107 mg/L seviyelerine düşmüştür. Bu sonuçlar 15°C sıcaklıkta kesikli şartlarda ortamdaki KOİ'nin %90'lar mertebesinde giderilebileceğini göstermektedir.



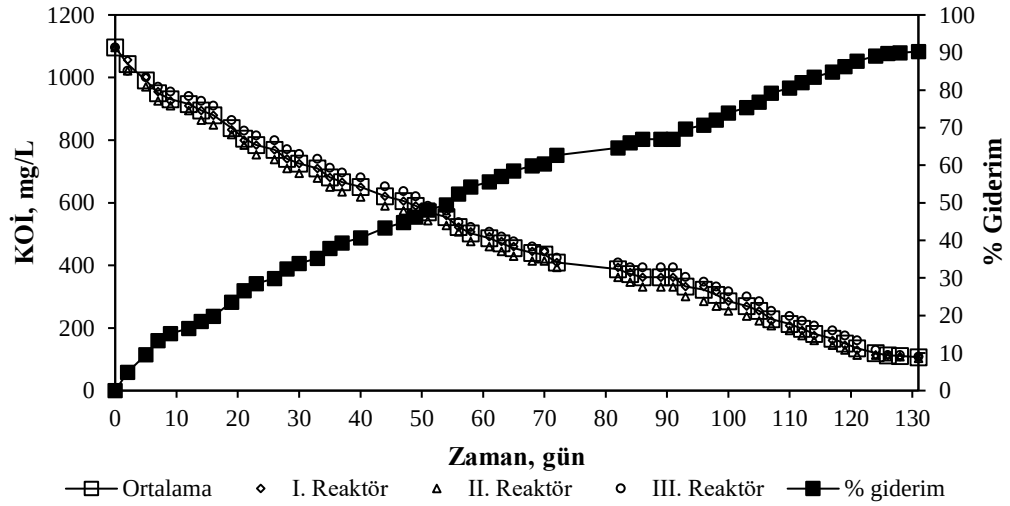
Şekil 4.1. 15°C'deki sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmada zamana bağlı olarak klorofil a artışı.



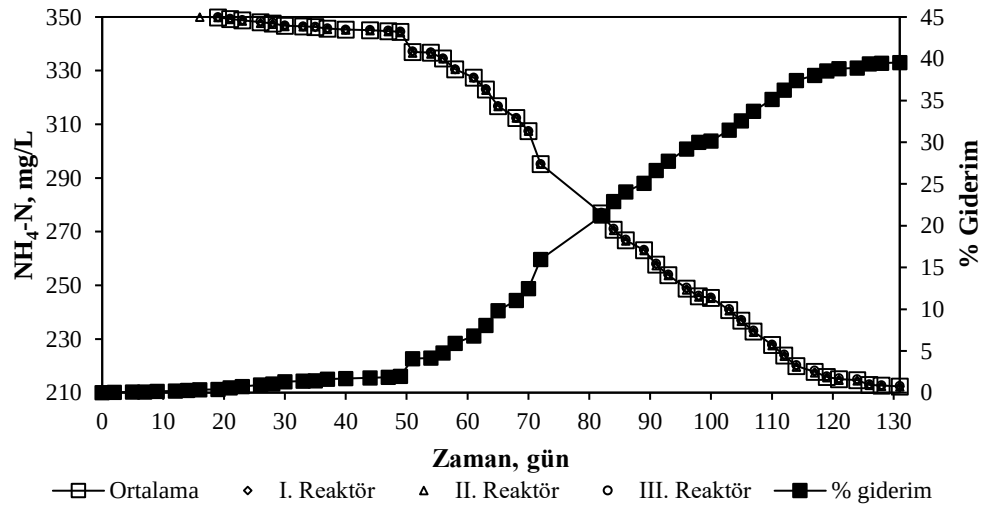
Şekil 4.2. 15°C'deki sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmada zamana bağlı olarak optik yoğunluk değişimi.

Ortamdaki besi elementleri N ve P giderimi de izlenmiştir (Şekil 4.4, 4.5). N ve P mikroorganizmaların hücre sentezinde esas olarak kullanılmaktadır. Ototrof veya heterotrof tüm canlılar hücrelerinde N ve P belli oranda bulunmaktadır. $\text{NH}_4\text{-N}$ ve $\text{PO}_4\text{-P}$ gideriminin başkaca mekanizmaları olsa da esas olarak asimilasyonla ortamdan uzaklaşmaktadır. $\text{NH}_4\text{-N}$ uçarak (özellikle yüksek pH'larda) ve nitrifikasyonla (amonyum nitrit ve nitrate dönüşerek) ve $\text{PO}_4\text{-P}$ ise çökerek (özellikle yüksek pH'larda) ortamdan uzaklaştığı bilinmektedir. Bizim çalışmamız ve diğer birçok

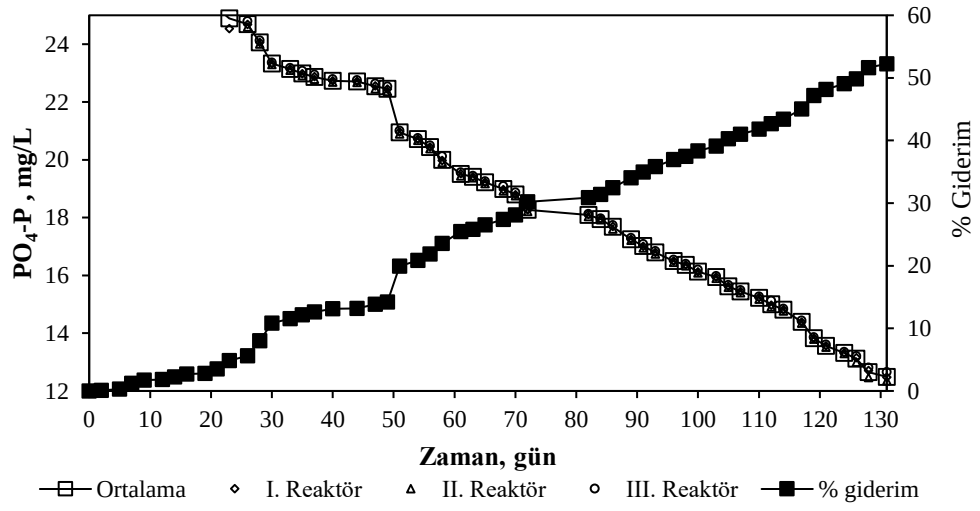
çalışma bulguları daha çok bu şartlarda biyokütle içerisinde asimilasyon mekanizması ile $\text{NH}_4\text{-N}$ ve $\text{PO}_4\text{-P}$ gideriminin gerçekleştiğini göstermektedir. Amonyum azotu yaklaşık 351 mg/L'den 212 mg/L'ye %39,6'lık bir giderimle düşerken, fosfat fosforu 26,2 mg/L'den 12,5 mg/L'ye %52,3'lük giderim göstermiştir. Bu sonuçlar 15°C sıcaklıkta karışık kültürlerle hem N, P hem de organik karbon gideriminin etkin şekilde yapılabileceğini göstermektedir.



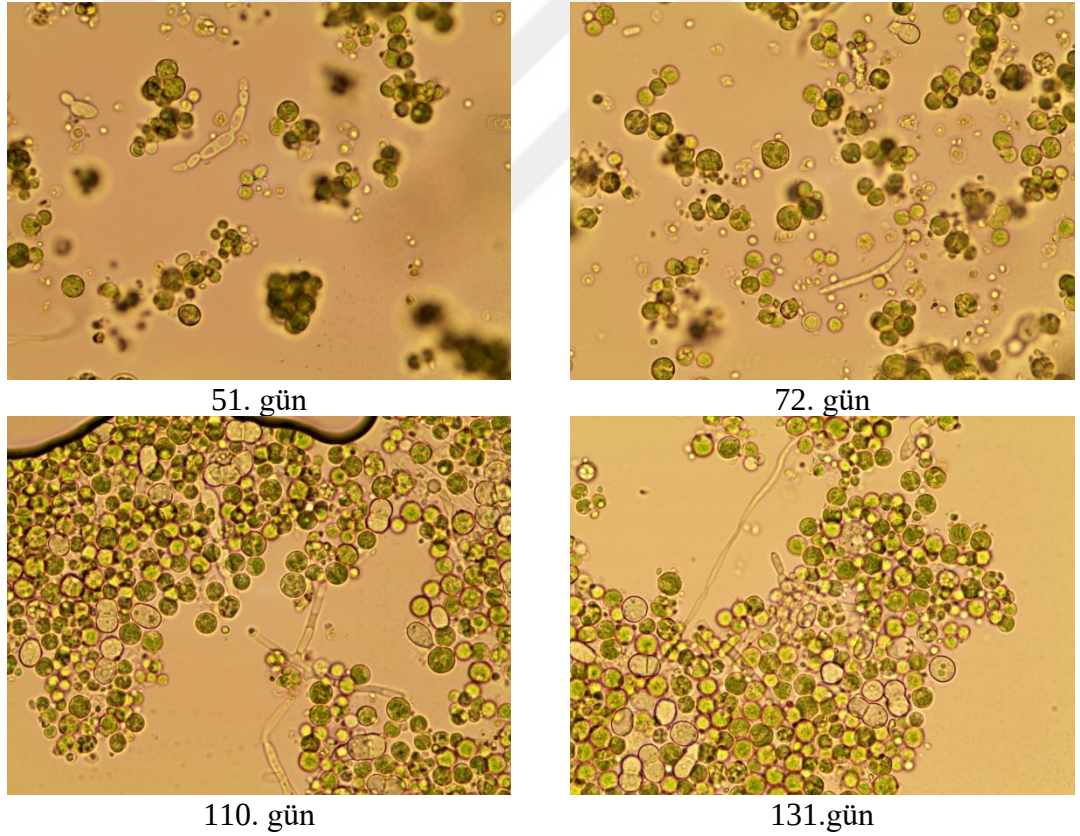
Şekil 4.3. 15°C'deki sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmada KOİ değişimi ve giderimi.



Şekil 4.4. 15°C'deki sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmada $\text{NH}_4\text{-N}$ değişimi ve giderimi.



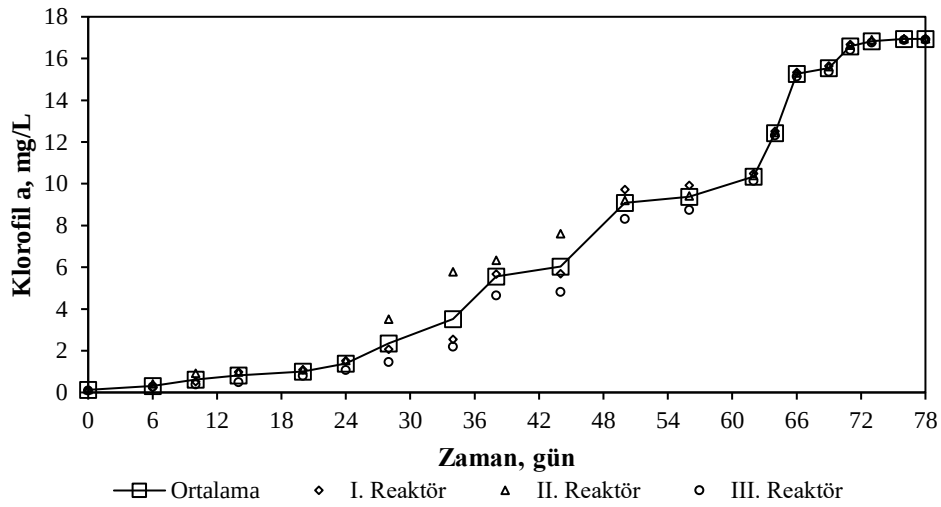
Şekil 4.5. 15°C'deki sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmada PO₄-P değişimi ve giderimi.



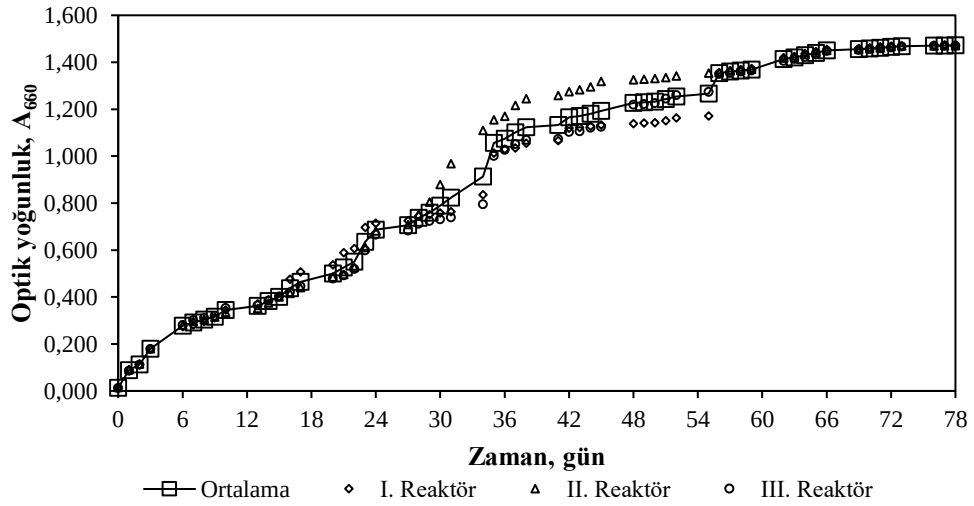
Şekil 4.6. 15°C'deki sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmanın mikroskop görüntüleri.

4.1.2 25°C’de sıcaklığın etkisi

25°C’deki çalışmanın deneysel periyodu algal artış hızı duruncaya kadar yani yaklaşık 78 gün boyunca gerçekleştirilmiştir. Klorofil a algal ototrofik biyokütlenin bir bileşeni olduğu için klorofil a’daki artışlar ototrofik mikroalglerin artışını göstermektedir. Aşağıdaki şekilde inkübasyon süresince klorofil a artışı gösterilmektedir (Şekil 4.7). Optik yoğunluktaki artış genel olarak biyokütle artışını temsil etmektedir. İki artışın paralel olmayışı ortamda sadece mikroalg kültürlerinin değil bakteri gibi diğer türlerinde geliştiğini göstermektedir. Şekil 4.9’de ortamdaki KOİ giderimi gösterilmektedir. Ortamda KOİ’nin azalması heterotrof mikroorganizma kültürlerinin de bulunduğunu, biyokütle artışından bu türlerinde sorumlu olduğunu göstermektedir. Ortamdaki KOİ inkübasyon süresi sonunda 125 mg/L seviyelerine düşmüştür. Bu sonuçlar 25°C sıcaklıkta kesikli şartlarda ortamdaki KOİ’nin %90’lar mertebesinde giderilebileceğini göstermektedir.

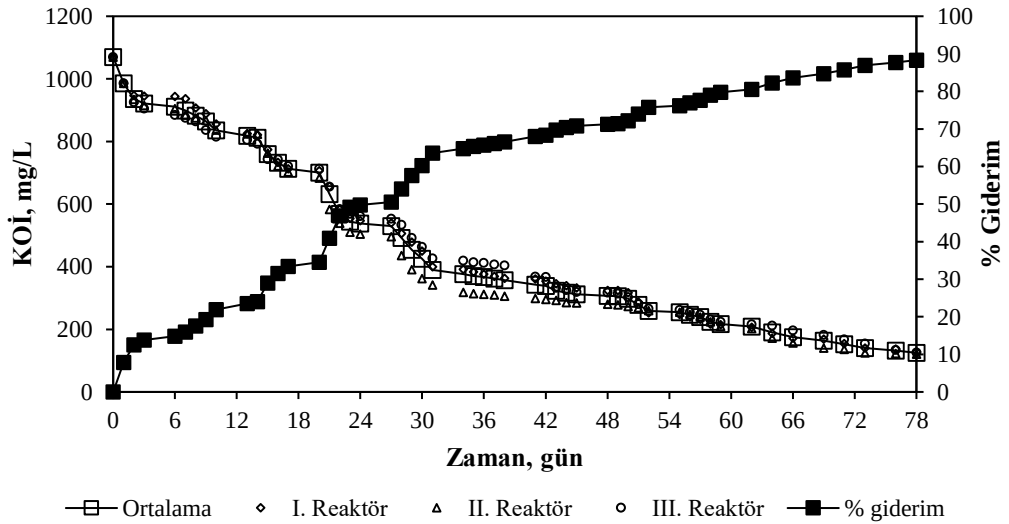


Şekil 4.7. 25°C’deki sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmada zamana bağlı olarak klorofil a artışı.

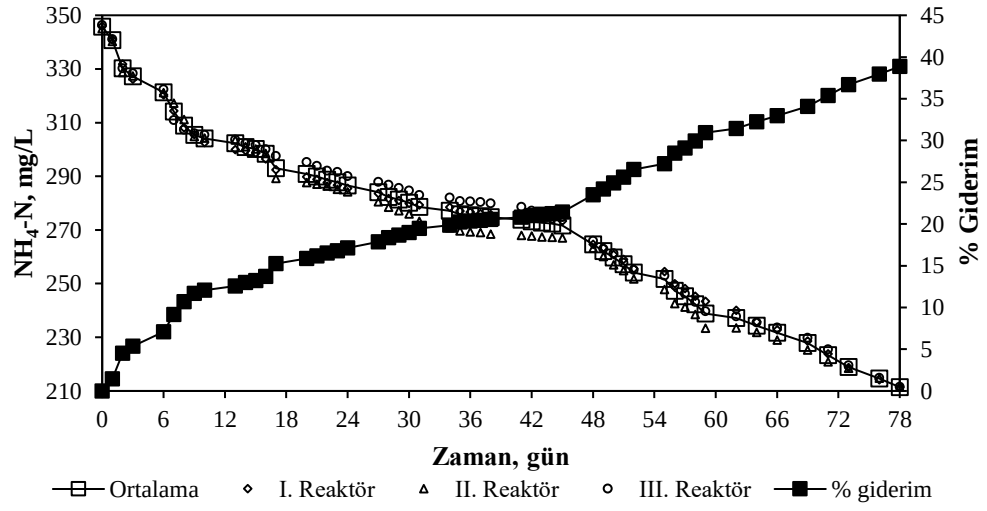


Şekil 4.8. 25°C'deki sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmada zamana bağlı olarak optik yoğunluk değişimi.

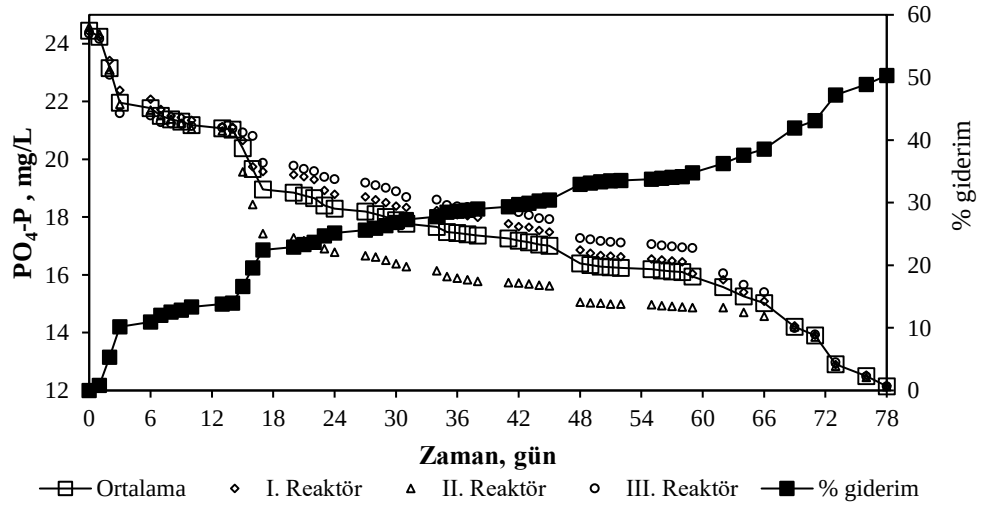
Ortamdaki besi elementleri N ve P giderimi de izlenmiştir (Şekil 4.10, 4.11). Amonyum azotu yaklaşık 346 mg/L'den 212 mg/L'ye %39'luk bir giderimle düşerken, fosfat fosforu 24,4 mg/L'den 12,1 mg/L'ye %50,3'lük giderim göstermiştir. Bu sonuçlar 25°C sıcaklıkta karışık kültürlerle hem N, P hem de organik karbon gideriminin etkin şekilde yapılabileceğini göstermektedir.



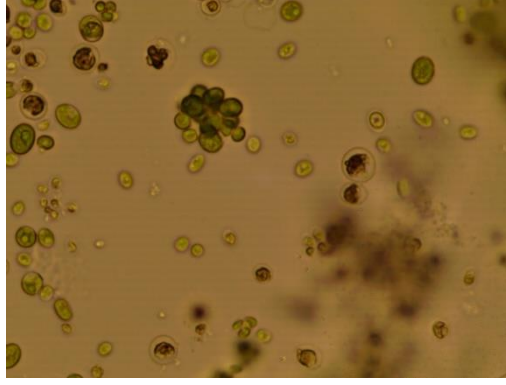
Şekil 4.9. 25°C'deki sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmada KOİ değişimi ve giderimi.



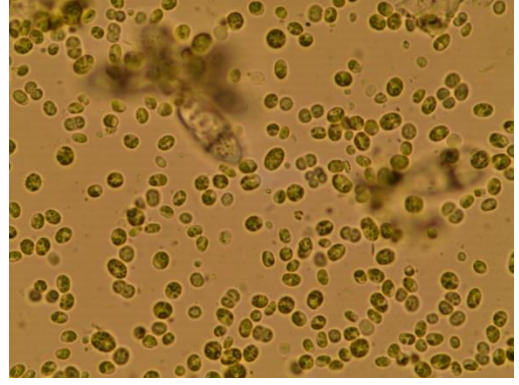
Şekil 4.10. 25°C'deki sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmada $\text{NH}_4\text{-N}$ değişimi ve giderimi.



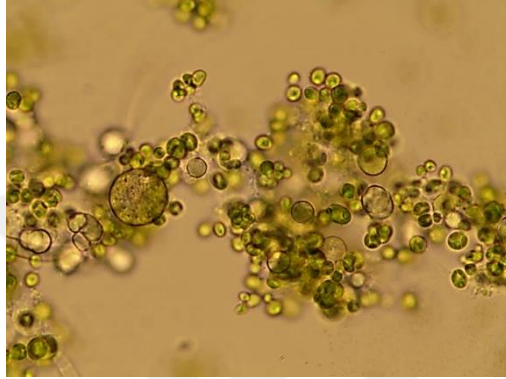
Şekil 4.11. 25°C'deki sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmada $\text{PO}_4\text{-P}$ değişimi ve giderimi.



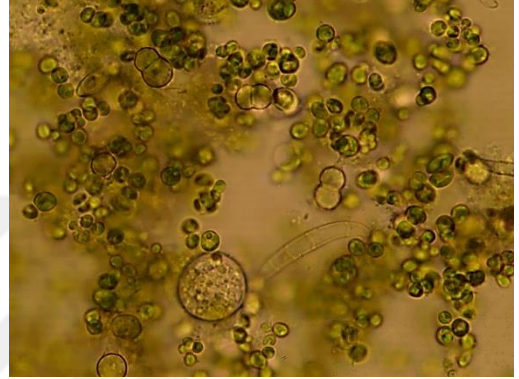
14. gün



28. gün



50. gün

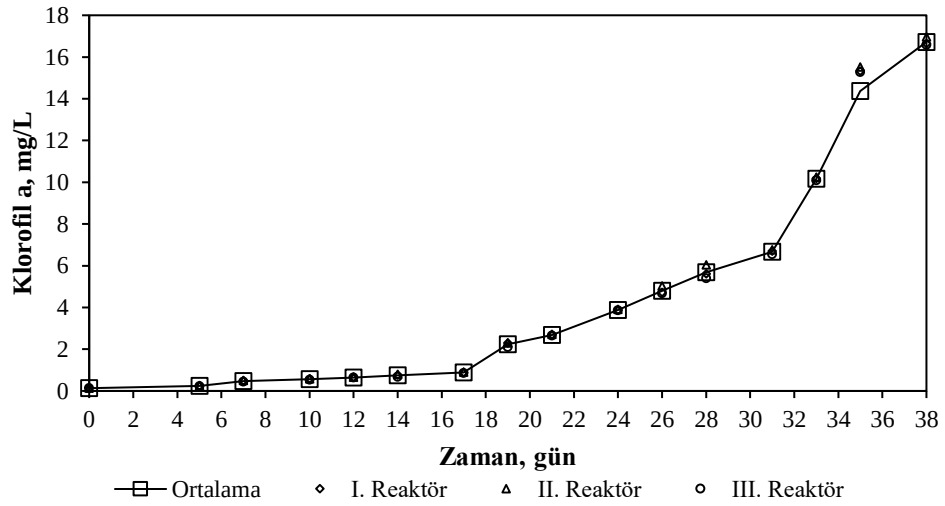


78.gün

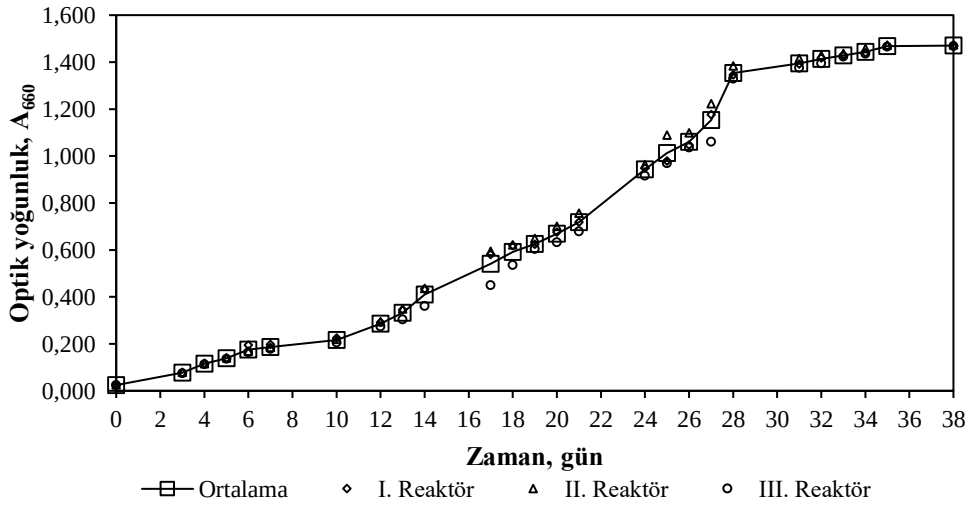
Şekil 4.12. 25°C'deki sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmanın mikroskop görüntüleri.

4.1.3 35°C'de sıcaklığın etkisi

35°C'deki çalışmanın deneysel periyodu algal artış hızı duruncaya kadar yani yaklaşık 38 gün boyunca gerçekleştirilmiştir. Klorofil a algal ototrofik biyokütle'nin bir bileşeni olduğu için klorofil a'daki artışlar ototrofik mikroalglerin artışı göstermektedir. Aşağıdaki şekilde inkübasyon süresince klorofil a artışı gösterilmektedir (Şekil 4.13). Optik yoğunluktaki artış genel olarak biyokütle artışı temsil etmektedir. İki artışın paralel olmayışı ortamda sadece mikroalg kültürlerinin değil bakteri gibi diğer türlerinde geliştiğini göstermektedir. Şekil 4.15'de ortamdaki KOİ giderimi gösterilmektedir. Ortamda KOİ'nin azalması heterotrof mikroorganizma kültürlerinin de bulunduğunu, biyokütle artışından bu türlerinde sorumlu olduğunu göstermektedir. Ortamdaki KOİ inkübasyon süresi sonunda 130 mg/L seviyelerine düşmüştür. Bu sonuçlar 35°C sıcaklıkta kesikli şartlarda ortamdaki KOİ'nin %90'lar mertebesinde giderilebileceğini göstermektedir.

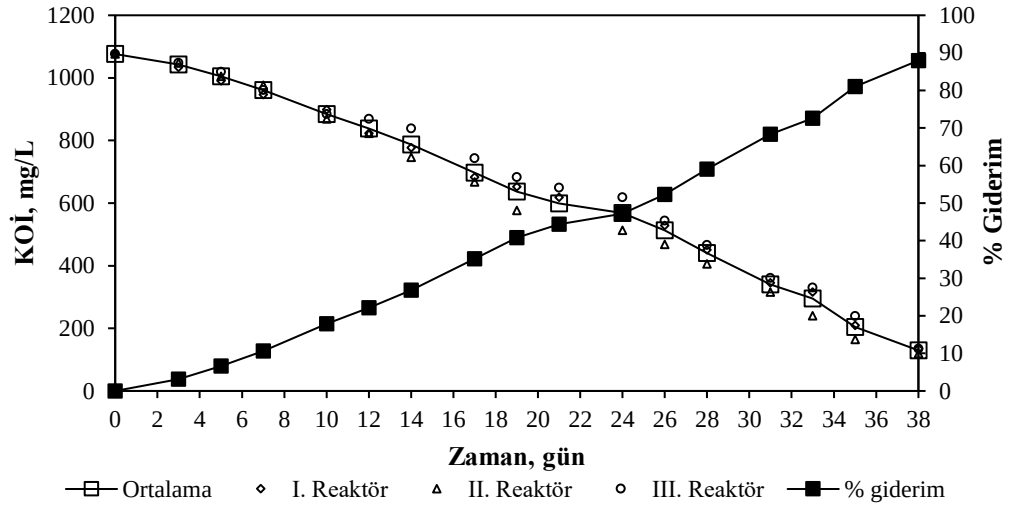


Şekil 4.13. 35°C'deki sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmada zamana bağlı olarak klorofil a artışı.

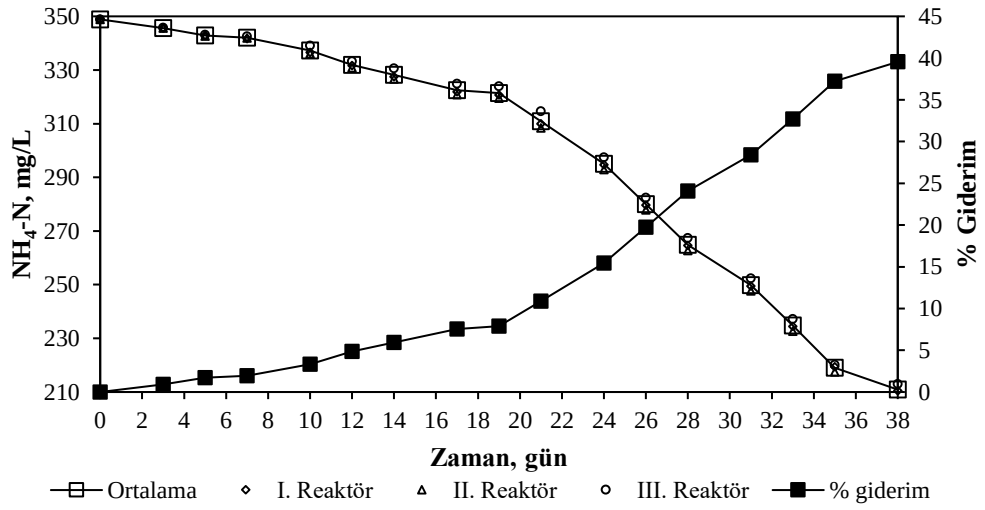


Şekil 4.14. 35°C'deki sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmada zamana bağlı olarak optik yoğunluk değişimi.

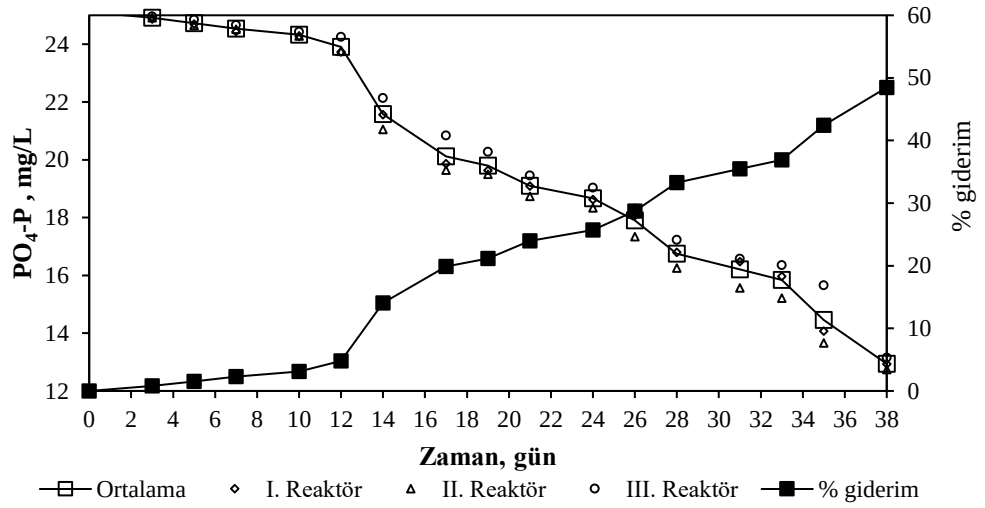
Ortamdaki besi elementleri N ve P giderimi de izlenmiştir (Şekil 4.16, 4.17). Amonyum azotu yaklaşık 349 mg/L'den 211 mg/L'ye %39,5'lik bir giderimle düşerken, fosfat fosforu 25,1 mg/L'den 12,9 mg/L'ye %48,5'lik giderim göstermiştir. Bu sonuçlar 35°C sıcaklıkta karışık kültürlerle hem N, P hem de organik karbon gideriminin etkin şekilde yapılabileceğini göstermektedir.



Şekil 4.15. 35°C'deki sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmada KOİ değişimi ve giderimi.

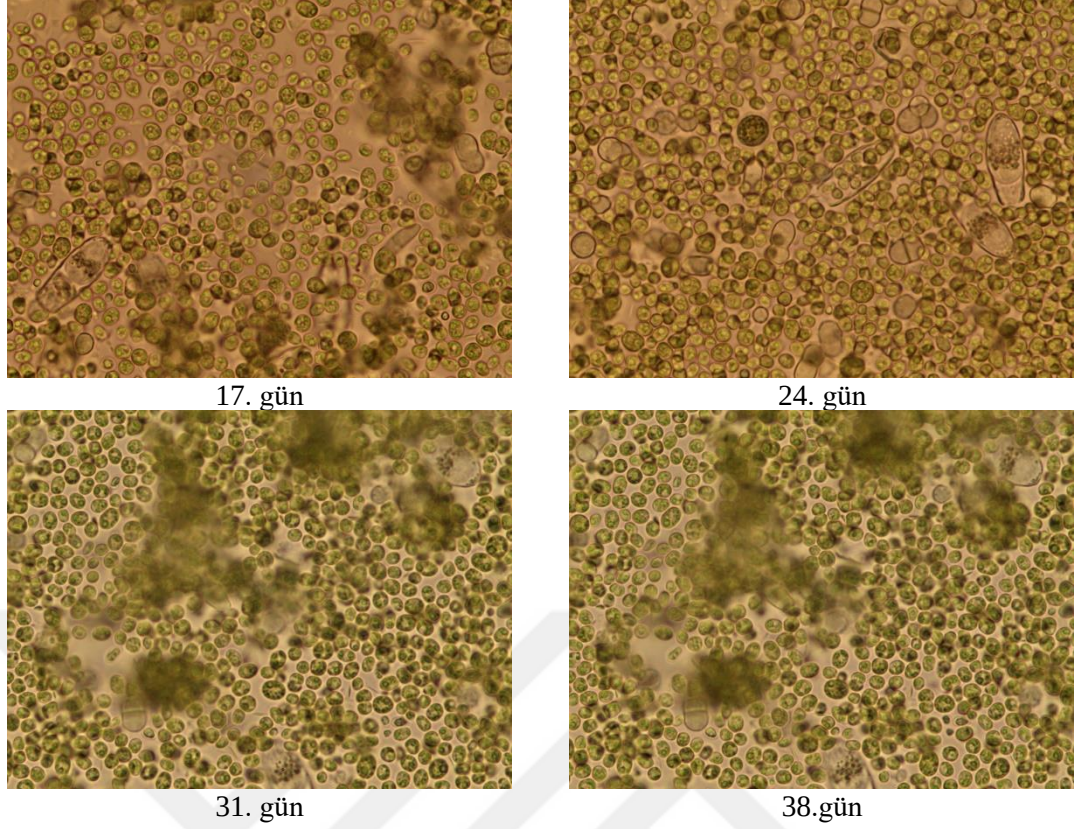


Şekil 4.16. 35°C'deki sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmada NH₄-N değişimi ve giderimi.



Şekil 4.17. 35°C’deki sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmada PO₄-P değişimi ve giderimi.

Kesikli büyüme ortamında inkübasyon süresince zaman zaman ortamdaki mikroalg varlığı ve türleri mikroskopik gözlemlerle izlenmiştir. İnkübasyon sonunda 38. gününde mikroskop görüntüleri (40 X objektif büyültme) Şekil 4.18’de verilmiştir. Yapılan mikroskopik gözlemlerde yaklaşık olarak *Chlorella* türünün %90 oranında olduğu, geri kalan diğer türlerin yaklaşık %10’luk kısmı kapsadığı tespit edilmiştir. Ayrıca karışık kültür ortamında bakteri, protozoa ve nematod gibi canlı türlerine de rastlanmıştır.



Şekil 4.18. 35°C’deki sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmanın mikroskop görüntüleri.

4.1.4 Sıcaklık etkilerinin karşılaştırılması

Yapılan çalışmada farklı sıcaklıklarda inkübasyon başlangıcı ve sonunda elde edilen bazı parametrelerin ölçüm sonuçları aşağıdaki tabloda verilmektedir. Çizelge 4.1’de genel olarak görüldüğü üzere inkübasyon sıcaklıkları ve buna bağlı olarak nihai biyokütle derişimlerine ulaşmak çalışılan inkübasyon süreleri farklı olmakla birlikte, oluşan biyokütle derişimleri, giderilen KOİ, N ve P değerleri yaklaşık olarak aynı değerler olarak elde edilmiştir.

Ortamda bulunan $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ ve KOİ nin temel giderim biyokütle artışına bağlanmakla ortam şartlarında karışık kültür mikroorganizma grupları ve türlerine bağlı olarak farklı giderim mekanizmalarından kaynaklanmış olabilir. Ortamda bulunan $\text{NH}_4\text{-N}$ ve $\text{PO}_4\text{-P}$ için tek giderim mekanizması asimilasyon ile açıklanamamaktadır. Her mikroorganizma hücre sentezinde belli oranlarda N ve P kullanılmaktadır. Literatür incelendiğinde bakteri kültürleri için UAKM esasına göre oluşan kütle içerisinde %12 N ve %2,0 P Metcalf&Eddy (2014) , alg kültürleri için

$C_{106}H_{181}O_{45}N_{16}P$ bileşiminde alg kütlesi için %N=9,22 %P=1,27 Xu vd., (2014), $CO_{0,48}H_{1,83}N_{0,11}P_{0,01}$ bileşiminde alg kütlesi için %N=6,59, %P=1,32 Chisti, (2007); Medeiros vd., (2015); Singh vd., (2011) olmaktadır. Aşağıdaki Çizelge 4.1 incelendiğinde özellikle amonyum azotu için bu oranların üzerinde giderim olduğu görülmektedir. Bu durum asimilasyondan farklı mekanizma ile amonyumun giderildiği anlamına gelmektedir. Özellikle inkübasyonun belli sürelerinden sonra ortamdan amonyumun bakteri artış hızından daha hızlı bir şekilde düştüğü görülmektedir. Bu ortamda gelişen ototrofik nitrifikasyon bakterilerin gerçekleştirmiş olduğu nitrifikasyon olayı ile açıklanabilmektedir. Nitrifikasyon bakterileri C kaynağı olarak inorganik karbonu kullanırken enerjiyi ise amonyumun nitrite, nitritinde nitrate oksidasyonu neticesinde elde edilen enerjiden sağlamaktadırlar (WEF, 2005).

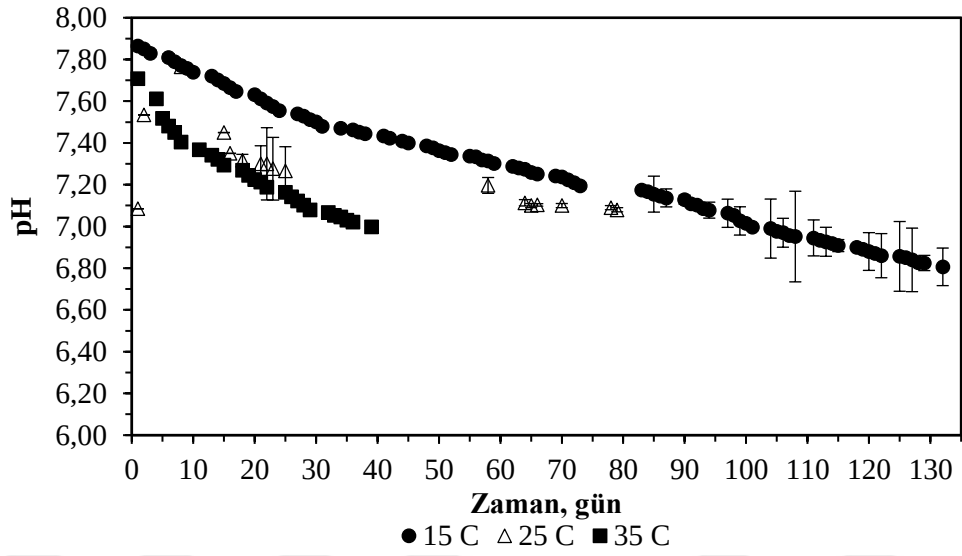
Çizelge 4.1. Farklı sıcaklıklarda inkübasyon başlangıcı ve sonundaki değerler.

Parametre	Sıcaklıklar		
	15°C	25°C	35°C
İnkübasyon süresi, gün	131	78	38
KOİ_{baş}, mg/L	1097	1070	1076
NH₄-N_{baş}, mg/L	351	346	349
PO₄-P_{baş}, mg/L	26,2	24,4	25,1
KOİ_{son}, mg/L	107	125	130
NH₄-N_{son}, mg/L	212	211	211
PO₄-P_{son}, mg/L	12,5	12,2	12,9
UAKM_{son}, mg/L	391	397	394
KOİ_{gid}	990	945	947
NH₄-N_{gid}, mg/L	139	134	138
PO₄-P_{gid}, mg/L	13,7	12,3	12,2
UAKM_{son}, mg/L	391	397	394
% UAKM	100	100	100
% NH₄-N	35,5	33,8	35,0
% PO₄-P	3,50	3,10	3,09

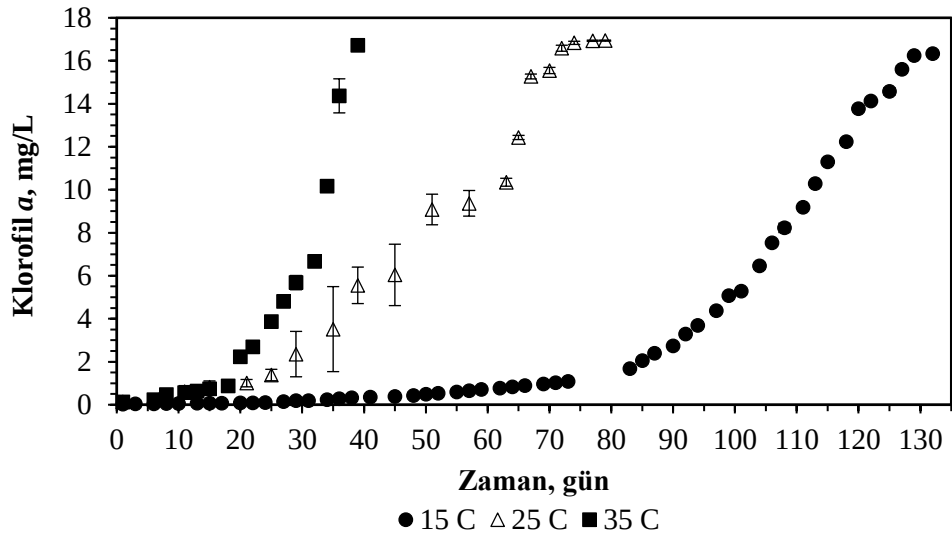
Kesikli beslemeli gerçekleştirilen çalışmalarımızda 15, 25, 35°C'deki üç farklı sıcaklıklarda karışık kültürde gelişimleri gözlenen mikroalglerin karşılaştırmalı sonuçları pH, klorofil a, KOİ, NH₄-N ve PO₄-P cinsinden grafiklerde (Şekil 4.19, Şekil 4.20, Şekil 4.21, Şekil 4.22, Şekil 4.23) gösterilmiştir. Ayrıca üç farklı sıcaklıkta

gerçekleştirilmiş çalışmaların UAKM değerlerinin karşılaştırmalı sonuçlarında grafikte (Şekil 4.24’de) gösterilmiştir.

Şekil 4.19’a bakıldığında ortamdaki pH değerleri her üç sıcaklıkta azaldığı görülmektedir. İnkübasyonların başında ortamdaki $\text{NH}_4\text{-N}$ değerleri oldukça yüksektir. N karışık kültür mikroorganizmaların gelişiminde temel yapı taşlarından birisidir. Oluşan biyokütle içinde belli oranlarda azot ve fosfor bulunmaktadır.

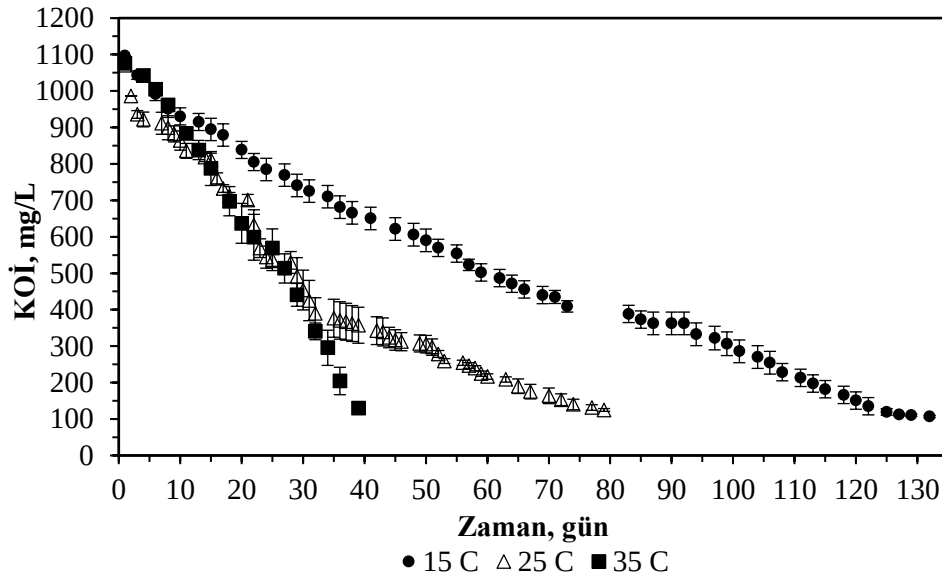


Şekil 4.19. 15, 25, 35°C’deki sıcaklıklarda gerçekleştirilen çalışmaların pH değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 4.20. 15, 25, 35°C’deki sıcaklıklarda gerçekleştirilen çalışmaların klorofil a değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.20’de görüldüğü üzere ortamdaki klorofil a değerleri her üç sıcaklıkta farklı inkübasyon günlerinde artış göstermiş ve belli süreler sonunda mikroalglerin çoğalması durmuştur. Klorofil a değerleri 15°C’de mikroalgler ilk başta yavaş bir artış gösterirken 80.günden sonra hızlı bir şekilde artış gösterip inkübasyon süresinin sonu olan 131.günde artış durmuştur. Yine aynı şekilde 25°C’de mikroalgler ilk başta yavaş bir artış gösterirken 50.günden sonra giderek hızlı bir artış gösterip inkübasyon süresinin sonu olan 78.günde artış durmuştur. 35°C’de mikroalgler ise ilk başta yavaş bir artış gösterirken 20.günden sonra hızlı bir şekilde artış gösterip inkübasyon süresinin sonu olan 38.günde artış durmuştur. Her üç sıcaklıkta görüleceği gibi klorofil a değerlerine bakıldığında karışık kültür mikroalglerin farklı sıcaklıklarda farklı inkübasyon sürelerinde gelişme gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.



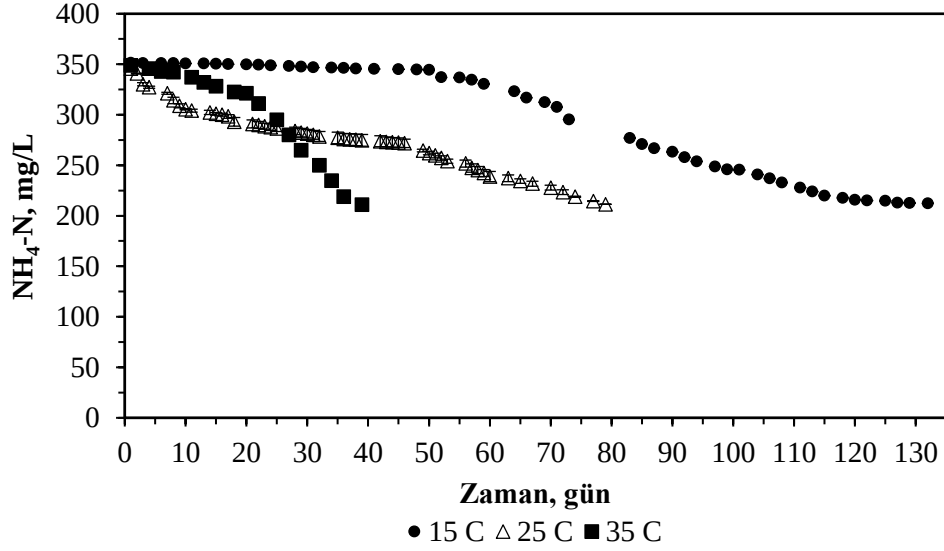
Şekil 4.21. 15, 25, 35°C’deki sıcaklıklarda gerçekleştirilen çalışmaların KOİ değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.21’de ortamdaki KOİ değerlerinin her üç sıcaklıkta azaldığı görülmektedir. KOİ değerlerinin azalışı karışık kültür ortamda mikroalglerin yanı sıra bakteri vb. diğer mikroorganizmaların var olduğunu işaret etmektedir. Mikroskopla çekilen görüntüler de ortamda sadece mikroalglerin değil diğer mikroorganizmalarında olduğunu göstermektedir. KOİ değerleri her üç sıcaklık için farklı başlangıç konsantrasyonlarında ve farklı inkübasyon sürelerinin sonlarında azalış gösterip durmuştur. Pizzera vd., (2019) tarafından yapılmış çalışmada ise aerobik heterotrofik

bakterilerin bozulması veya miksotrofik alg metabolizmasının KOİ giderilmesinde rol oynadığı tahmininde bulunmuşlardır. Ancak, mevcut verilerden bu iki potansiyel kaynakların hangi oranda KOİ giderimine katkı verdiği tespit edilememektedir.

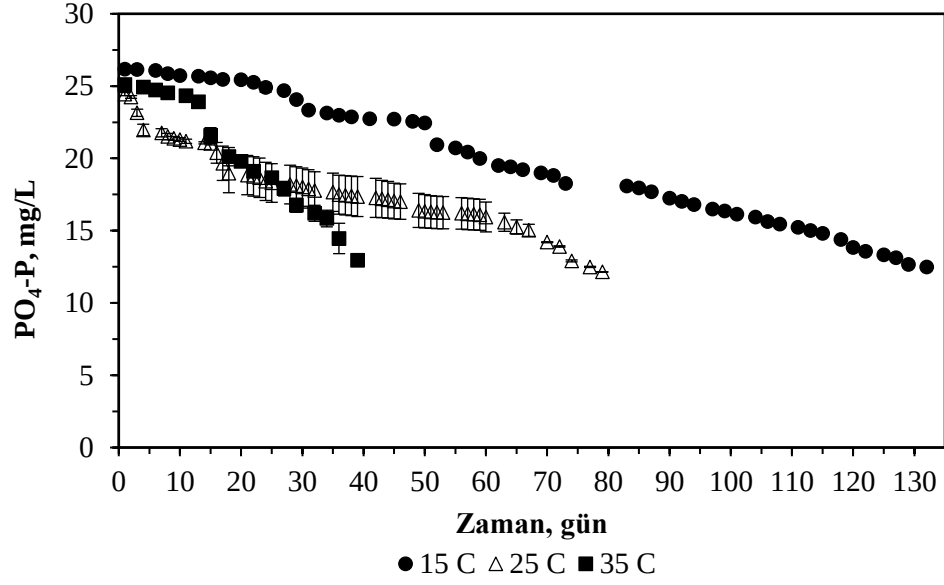
Çanta tip *Chlorella* aşılı çanta tip bir fotobiyoreaktörde yapılan biyogaz çamuru arıtımı ve biyogaz saflaştırma işleminde ışık kaynaklarının etkisi ve ışıklandırma stratejilerin belirlenmesi amacıyla yapılan bir çalışmada Yan vd., (2016) KOİ, TN ve TP'si sırasıyla 972, 263 ve 51 mg/L olan ön arıtımı yapılmış biyogaz çamurundan 180 mg/L *Chlorella* aşısıyla optimum ışık ve ışıklandırma stratejisiyle biyogaz çamurundan %85,2 KOİ, %87,1 TN ve %92,4 TP ve biyogaz bileşimindeki CO₂ %85,5 oranında giderilmiştir.

Yine yapılan bir çalışmada Wang vd., (2017) silindirik 16,8 L hacimli fotobiyoreaktörde KOİ, TN, ve TP değerleri sırasıyla 1065, 313 ve 15 mg/L olan biyogaz çamuru %25, 35 ve 45 CO₂ içerikli biyogaz beslemesiyle *C. vulgaris* mono kültür, *G. lucidum*- *C. vulgaris* co kültürleri ve aktif çamur- *C. vulgaris* karışık kültür aşılıları kullanılarak biyogaz saflaştırma ve nütrient giderimi araştırılmıştır. 120 mg/L biyokütle derişimi ile 7 günlük inkübasyon süresinde maksimum KOİ, TN, TP ve CO₂ giderimleri sırasıyla %86,1, 85,7, 86,2 ve 79,1 maksimum ortalama giderim oranları bulunmuştur. Çalışma ayrıca karışık kültürlerin giderim performanslarının daha iyi olduğunu göstermiştir.

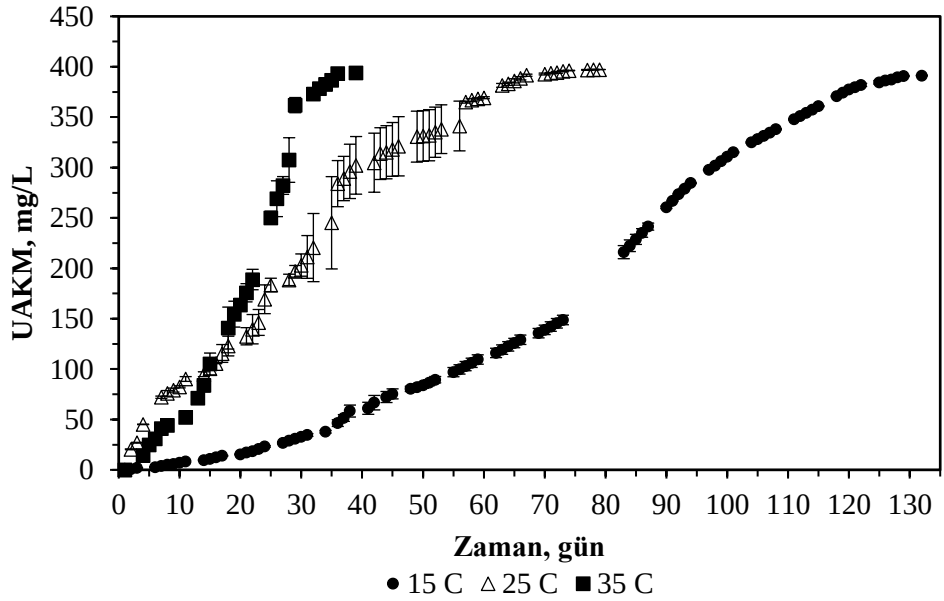


Şekil 4.22. 15, 25, 35°C'deki sıcaklıklarda gerçekleştirilen çalışmaların $\text{NH}_4\text{-N}$ değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'de ortamdaki $\text{NH}_4\text{-N}$ ve $\text{PO}_4\text{-P}$ değerleri her üç sıcaklık değerleri içinde azalma göstermiştir. Karışık kültür ortamında yer alan mikroalgler gelişimleri için N ve P elementlerine ihtiyaç duyarlar. Başlangıçta farklı konsantrasyonlarda ortamda her üç sıcaklık için mikroalglerin gelişmesini sağlayacak $\text{NH}_4\text{-N}$ ve $\text{PO}_4\text{-P}$ bulunmaktadır. 15°C'de $\text{NH}_4\text{-N}$ ve $\text{PO}_4\text{-P}$ ilk başta yavaş bir şekilde azalma gösterirken 80.günden sonra mikroalglerin hızlı bir şekilde artış göstermesiyle inkübasyon süresinin sonu olan 131.günde ortamdaki giderilmesi durmuştur. 25°C'de $\text{NH}_4\text{-N}$ ve $\text{PO}_4\text{-P}$ ilk başta yavaş bir şekilde azalma gösterirken 50.günden sonra mikroalglerin giderek hızlı bir artış göstermesi sebebiyle inkübasyon süresinin sonu olan 78.günde ortamdaki giderilmesi durmuştur. 35°C'de $\text{NH}_4\text{-N}$ ve $\text{PO}_4\text{-P}$ ilk başta yavaş bir şekilde azalma gösterirken 20.günden sonra mikroalglerin hızlı bir şekilde artış göstermesiyle inkübasyon süresinin sonu olan 38.günde ortamdaki giderilmesi durmuştur. Her üç sıcaklık içinde mikroalg konsantrasyonlarının ortamdaki yoğunluğu sebebiyle ışık geçirgenliğini azaltmış ve ortamdaki $\text{NH}_4\text{-N}$ ve $\text{PO}_4\text{-P}$ değerlerinin inkübasyon sürelerinde giderildiğinden daha fazla miktarda giderilmesine engel olmuştur. Her üç sıcaklık değerinde elde edilen sonuçlar, sentetik biyogaz çamurunda karışık kültür içerisinde yetiştirilen mikroalglerin ortamdaki $\text{NH}_4\text{-N}$ ve $\text{PO}_4\text{-P}$ 'leri ortamda mikroalglerin gelişebileceği maksimum derişimdeki asimilasyon oranlarına paralel olarak giderebileceğine işaret etmektedir.



Şekil 4.23. 15, 25, 35°C'deki sıcaklıklarda gerçekleştirilen çalışmaların PO₄-P değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 4.24. 15, 25, 35°C'deki sıcaklıklarda gerçekleştirilen çalışmaların UAKM değerlerinin karşılaştırılması.

4.2 Farklı Sıcaklıklarda Biyokinetik Katsayıların Bulunması

Farklı sıcaklıklarda besin maddelerinin giderimi ve biyokütle artışı biyokimyasal reaksiyonlar için Monod kinetiği ile modellenmektedir. Karışık mikroalg kültürleri ile aşılınmış kesikli reaktörlerde zamanla alglerden başka mikroorganizmalar da ortamda

oluştduğundan Monod kinetiği yanında 0. derece, 1. derece ve 2. derece hız kinetiği uygulanmıştır. Substrat azalımı ve biyokütle artışı için biyokinetik katsayı tespiti için Monod kinetiği modeline uygun olarak her bir sıcaklık için ilgili grafikler çizilmiş ancak ilişki tespit edilememiştir. 35°C derece için uygulanan modeller ile ilgili hız kinetiği modeli ve katsayı tespiti için ilgili grafikler aşağıda verilmektedir. Her bir sıcaklık için besin maddelerinin giderimi ve mikroorganizma artışı hız kinetiği modeli reaksiyon hızı katsayıları ve regresyon katsayıları çizelgede verilmektedir.

Substrat azalımı ve biyokütle artışı hızı Monod hız denkleminde uygun olarak gerçekleşiyorsa ilgili katsayılar aşağıdaki gibi bulunabilir.

Eğer kesikli bir reaktörde substrat azalımı ve mikroorganizma artışı Monod kinetiğine uygun olarak değişiyorsa kesikli bir reaktörde aşağıdaki gibi bir substrat kütle denklığı kurulabilir.

$$[Substrat\ değişim\ hızı] = [substrat\ kullanım\ hızı]$$

$$V \frac{dS}{dt} = V r_{substrat} \quad (4.1)$$

Monod kinetiğine uygun olarak ifade edilen mikroorganizma artış hızının Y verim katsayısına bölünmesi ile substrat değişimi (azalım hızı) aşağıdaki denklemle bulunabilir.

$$r_{substrat} = - \frac{\mu_{maks} \cdot S \cdot X}{Y (K_S + S)} \quad (4.2)$$

$$\frac{dS}{dt} = - \frac{\mu_{maks} \cdot S \cdot X}{Y (K_S + S)} \quad (4.3)$$

μ_{maks} : Maksimum spesifik mikroorganizma büyüme hızı katsayısı, mg X/mg X.gün

Y: Verim katsayısı, mg X/mg S

X: Biyokütle derişimi, mg/L

S: Substrat derişimi, mg/L

K_S : Yarı doyunluk katsayısı, mg/L

İki biyokinetik katsayı tek katsayı ile ifade edilirse k ile ifade edilmektedir.

$$k = \frac{\mu_{maks}}{Y} \quad (4.4)$$

k : maksimum spesifik substrat giderim hız katsayısı, mg S/mg X.gün

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{k.S.X}{K_S+S} \quad (4.5)$$

Kesikli reaktörde biyokütle değişimi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[Biyokütle \text{ değişim hızı}] = [Biyokütle \text{ artış hızı}]$$

$$V \frac{dX}{dt} = V r_{mik} \quad (4.6)$$

Monod kinetiğine uygun olarak ifade edilen net mikroorganizma artış hızı aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$r_{mik} = \frac{\mu_{maks}.S.X}{K_S+S} - b \quad (4.7)$$

b :ölüm hızı katsayısı, $\text{gX}_{ölen}/\text{gX.gün}$

$$\frac{dX}{dt} = \frac{\mu_{maks}.S.X}{K_S+S} - b \quad (4.8)$$

$\mu_{maks} = Y.k$ olduğundan denklem aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{dX}{dt} = \frac{Y.k.S.X}{K_S+S} - bX \quad (4.9)$$

Denklem düzenlenirse

$$\frac{dX}{dt} = Y \left(-\frac{dS}{dt} \right) - bX \quad (4.10)$$

ya da

$$\frac{1}{X} \frac{dX}{dt} = Y \left(-\frac{1}{X} \frac{dS}{dt} \right) - b \quad (4.11)$$

Kesikli reaktörden belirli zaman aralıklarında alınan örneklerde zamanın başı ve sonundaki S ve X değerleri için yukarıdaki diferansiyel zaman aralığındaki denklem deney şartlarındaki daha büyük zaman aralıkları için aşağıdaki gibide yazılabilir.

$$\frac{1}{\bar{X}} \frac{\Delta X}{\Delta t} = Y \left(-\frac{1}{\bar{X}} \frac{\Delta S}{\Delta t} \right) - b \quad (4.12)$$

$\frac{1}{\bar{X}} \frac{\Delta X}{\Delta t}$ terimi y eksenine yazılır. Bu terim belli zaman aralığında birim biyokütle başına spesifik biyokütle üreme hızı, $gX/gX.gün$ 'dür. Burada $\bar{X}$ spesifik zaman aralığında ortalama biyokütle derişimidir. $-\frac{1}{\bar{X}} \frac{\Delta S}{\Delta t}$ terimi belli zaman aralığında birim biyokütle başına spesifik substrat tüketim hızı, $gS/gX.gün$ 'dür. Verilen denklem aşağıdaki lineer denkleme benzetildiğinde,

$$y = aX + b \quad (4.13)$$

y ekseninin – kısmında kestiği nokta b katsayısını, eğim ise Y verim katsayısını verecektir.

Benzer şekilde aşağıdaki denklem düzenlenirse,

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{k.S.X}{K_S+S} \quad (4.14)$$

$$-\frac{1}{X} \frac{dS}{dt} = \frac{k.S}{K_S+S} \quad (4.15)$$

$$-X \frac{dt}{dS} = \frac{K_S+S}{k.S} \quad (4.16)$$

$$-\frac{X}{dS/dt} = \frac{K_S}{k} \frac{1}{S} + \frac{1}{k} \quad (4.17)$$

Kesikli reaktörden alınan veriler için,

$$-\frac{\bar{X}}{\Delta S/\Delta t} = \frac{K_S}{k} \frac{1}{S} + \frac{1}{k} \quad (4.18)$$

y ekseninin + kısmında kestiği nokta $1/k$ katsayısını, eğim ise K_S/k terimini verecektir. spesifik substrat giderim hız katsayısı (k) katsayısı bulunduğundan sonra, eğimle çarpıldığında yarı doygunluk katsayısı (K_S) bulunabilir.

Zaman aralıklarındaki S ve t sınır değerlerini kullanarak substrattaki diferansiyel değişim hızının integrasyonu ile lineerize edilen denklemden K_S ve k katsayıları bulunabilir.

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{kS}{K_S+S} \bar{X} \quad (4.19)$$

$$\frac{(K_S+S)}{S} dS = k \bar{X} dt \quad (4.20)$$

$$(K_S \frac{1}{S} + 1) dS = k \bar{X} dt \quad (4.21)$$

$$-K_S \int_{S_0}^{S_t} \frac{1}{S} dS - \int_{S_0}^{S_t} dS = k \bar{X} \int_0^t dt \quad (4.22)$$

$$-K_S \ln (S_t/S_0) - (S_t - S_0) = k \bar{X} t \quad (4.23)$$

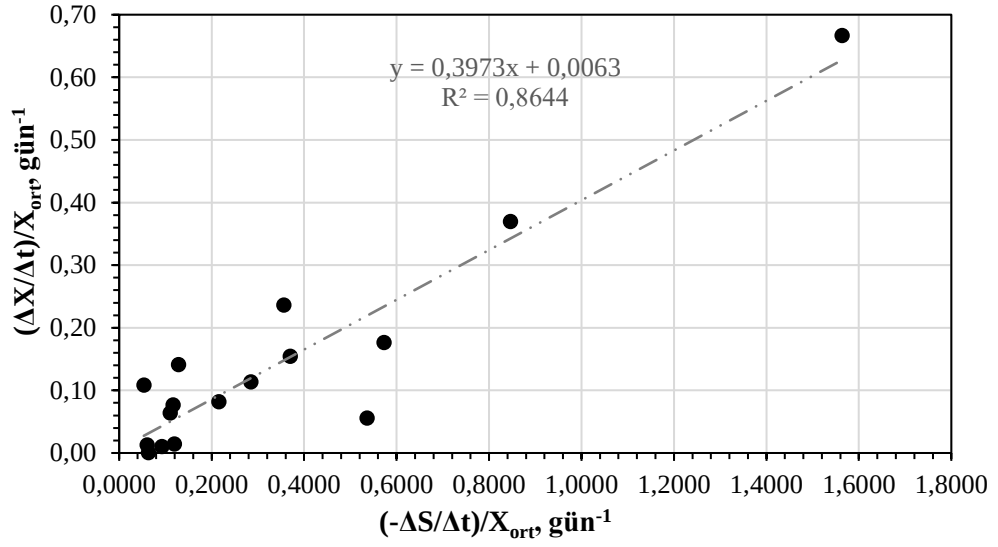
$$K_S \ln (S_0/S_t) + (S_0 - S_t) = k \bar{X} t \quad (4.24)$$

$$K_S \frac{\ln (S_0/S_t)}{\bar{X} t} + \frac{(S_0-S_t)}{\bar{X} t} = k \quad (4.25)$$

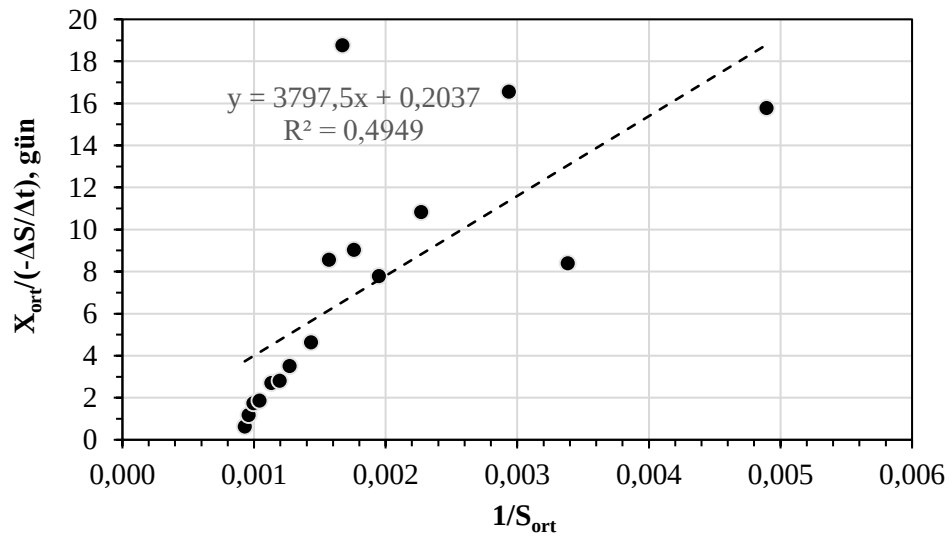
$$\frac{(S_0-S_t)}{\bar{X} t} = k - K_S \frac{\ln (S_0/S_t)}{\bar{X} t} \quad (4.26)$$

Yukarıdaki denklemde $\frac{\ln (S_0/S_t)}{\bar{X} t}$ x değerlerine karşı hesaplanan $\frac{(S_0-S_t)}{\bar{X} t}$ y değerleri grafiğe geçirildiğinde y eksenini kesen pozitif değer k katsayısını, eğim ise $-K_S$ değerini vermektedir.

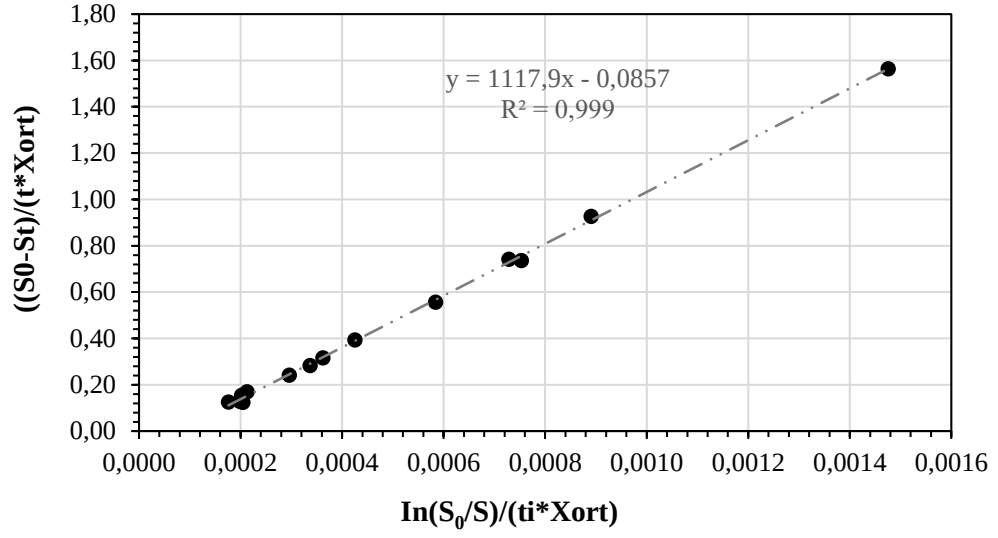
Aşağıdaki grafikler ve diğer sıcaklıklar için çizilen grafiklerde Y eksenini kesme yeri ve R^2 'ler dikkate alındığında Monod kinetiğine uygun bir substrat giderimi ve biyokütle artışı tespit edilememiştir.



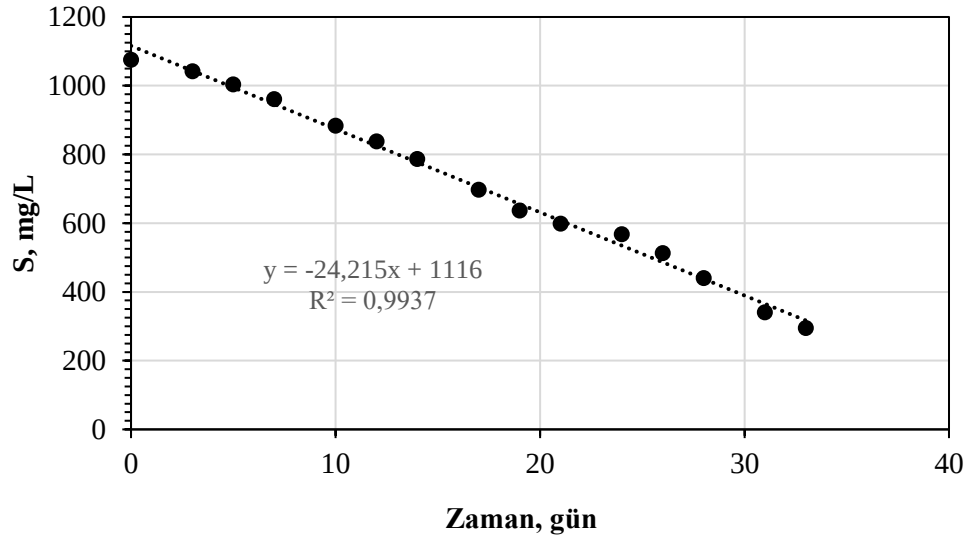
Şekil 4.25. 35°C’de KOİ gideriminde Y ve b katsayısı bulunması.



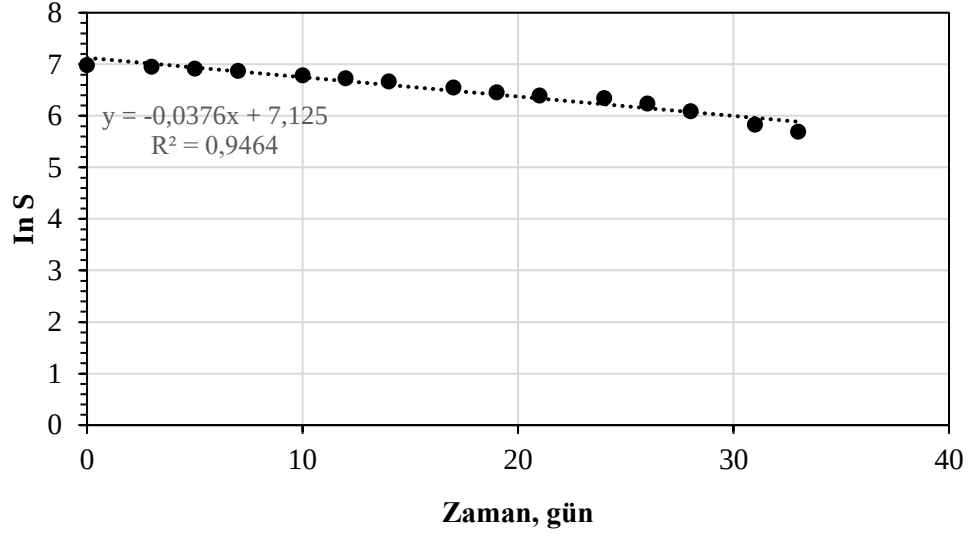
Şekil 4.26. 35°C’de KOİ azalımı için k ve K_s katsayılarının bulunması.



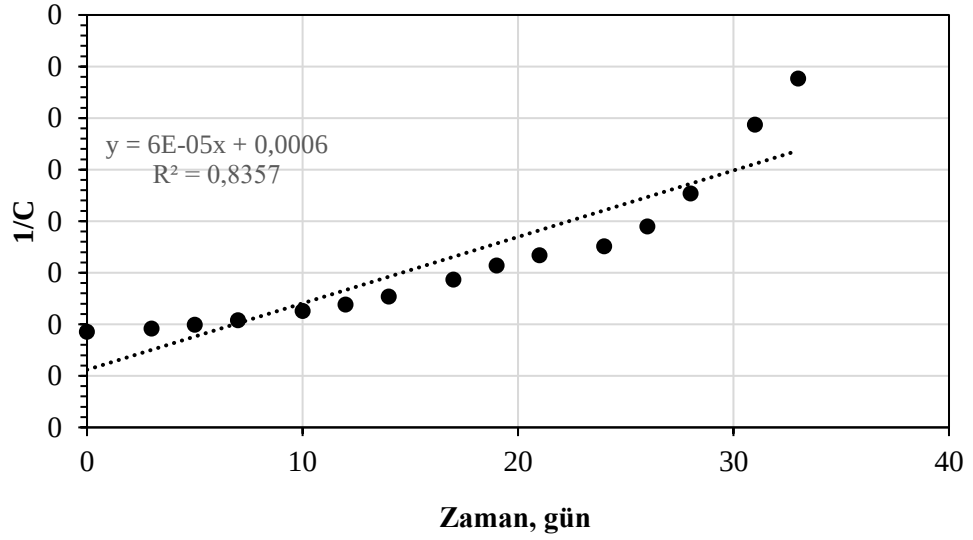
Şekil 4.27. Kesikli Monod denklemi k ve K_S katsayısı bulma.



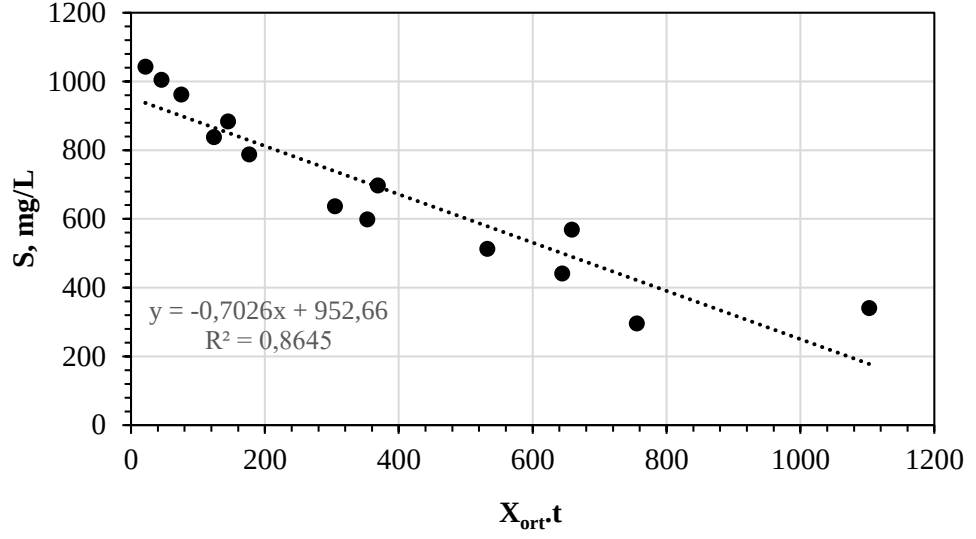
Şekil 4.28. Substrat azalımı 0. derece hız kinetiği.



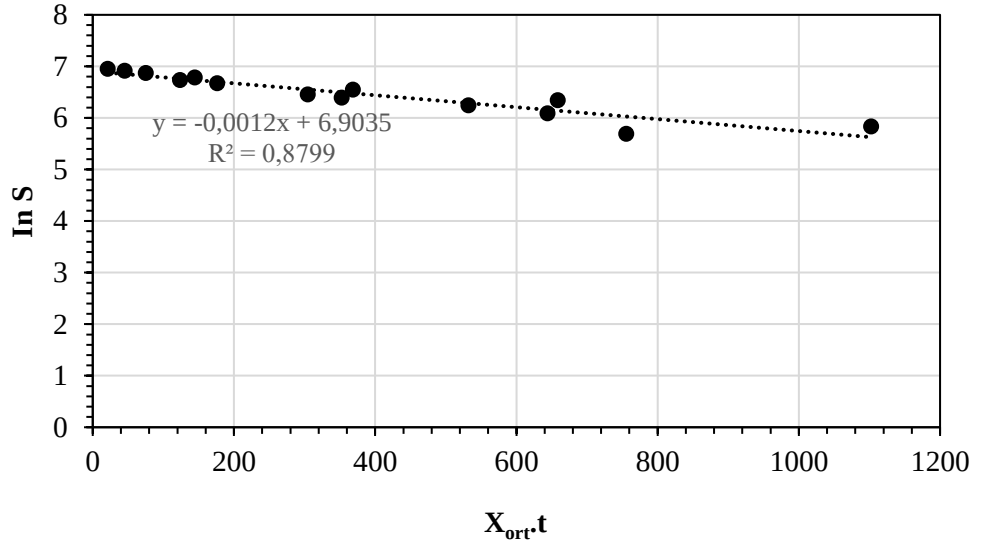
Şekil 4.29. Substrat azalımı 1. derece hız kinetiği.



Şekil 4.30. Substrat azalımı 2. derece hız kinetiği.



Şekil 4.31. KOİ giderimi yalancı 0. derece hız kinetiği.



Şekil 4.32. KOİ giderimi yalancı 1. derece hız kinetiği.

Benzer şekilde KOİ, $\text{NH}_4\text{-N}$ ve $\text{PO}_4\text{-P}$ giderim ve biyokütle artış hızları için farklı sıcaklıklar için değişik modellerden elde edilen hız katsayıları ve model uyumunu gösteren regresyon katsayıları aşağıdaki Çizelge 4.2’de verilmektedir.

Çizelge 4.2. Farklı sıcaklıklarda farklı substrat giderim ve biyokütle artış hızı modelleri ve ilgili katsayılar.

Sıcaklık	Parametre	Sıfırcı derece		1.derece		2.derece		Yalancı 0. derece		Yalancı 1. derece		Yalancı 2. derece	
		k_0 , mg/L.gün	R^2	k_1 , mg/L.gün	R^2	k_2 , mg/L.gün	R^2	k_0 , mg/L.gün	R^2	k_1 , mg/L.gün	R^2	k_2 , mg/L.gün	R^2
15°C	KOİ	6,89	0,980	0,016	0,949	0,00005	0,743	0,542	0,658	0,0013	0,655	0,0000042	0,522
	NH ₄ -N	1,31	0,922	0,0046	0,910	0,000017	0,893	0,114	0,704	0,00040	0,693	0,0000014	0,677
	PO ₄ -P	0,109	0,991	0,0057	0,984	0,000304	0,956	0,0089	0,682	0,00047	0,684	0,0000253	0,671
	Biyokütle	3,51	0,964	0,034	0,876	0,0013	0,299						
25°C	KOİ	11,82	0,918	0,027	0,990	0,000079	0,909	0,571	0,503	0,0014	0,597	0,0000044	0,615
	NH ₄ -N	1,42	0,965	0,005	0,966	0,000020	0,956	0,073	0,594	0,003	0,801	0,00025	0,425
	PO ₄ -P	0,121	0,929	0,0068	0,940	0,000392	0,924	0,0061	0,570	0,00035	0,594	0,00025	0,425
	Biyokütle	5,49	0,951	0,030	0,801	0,00025	0,425						
35°C	KOİ	24,21	0,994	0,038	0,946	0,000064	0,836	0,703	0,865	0,0012	0,880	0,0000021	0,827
	NH ₄ -N	3,34	0,891	0,011	0,863	0,000038	0,832	0,107	0,867	0,00036	0,851	0,0000013	0,831
	PO ₄ -P	0,323	0,959	0,016	0,959	0,000781	0,951	0,010	0,839	0,00048	0,859	0,000024	0,874
	Biyokütle	12,70	0,954	0,103	0,943	0,0015	0,597						

4.3 Biyokinetik katsayıların üzerinde sıcaklık etkilerinin karşılaştırılması ve sıcaklık etkisinin modellenmesi

Biyokimyasal reaksiyon hızları sıcaklıkla önemli derecede etkilenmektedir. Sıcaklığın reaksiyon hızları üzerindeki etkisi Van't Hoff –Arrhenius ilişkisinin modifikasyonu olan aşağıdaki denklemle ifade edilmektedir (Qasim ve Zhu, 2017).

$$k_T = Ae^{-E/RT} \quad (4.27)$$

A: Van't Hoff –Arrhenius katsayısı, gün⁻¹

k_T: reaksiyon hızı katsayısı (değişen birim)

E: Aktivasyon enerjisi, J/mol

R: üniversal gaz sabiti, 8,314 J/mol.K

T: Sıcaklık, K

Farklı sıcaklıklar T₁ ve T₂ için reaksiyon hızının değişimi aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$\frac{k_{T_2}}{k_{T_1}} = \frac{Ae^{-E/RT_2}}{Ae^{-E/RT_1}} \quad (4.28)$$

$$\frac{k_{T_2}}{k_{T_1}} = e^{\left(\frac{E}{RT_1} - \frac{E}{RT_2}\right)} = e^{\left(\frac{E}{RT_1 T_2} (T_2 - T_1)\right)} \quad (4.29)$$

$$k_{T_2} = k_{T_1} e^{\left(\frac{E}{RT_1 T_2} (T_2 - T_1)\right)} \quad (4.30)$$

$e^{\frac{E}{RT_1 T_2}}$ değeri 0-35°C arasında yaklaşık sabit bir değer (Θ) kabul edildiğinde denklem daha basit olarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$k_{T_2} = k_{T_1} \theta^{(T_2 - T_1)} \quad (4.31)$$

Θ: Sıcaklık düzeltme katsayısı (boyutsuz). Bu değer sıcaklıkla çok az değişmektedir. Kimyasal ve biyokimyasal reaksiyonların genellikle eğer deneysel olarak elde

edilmemişse, 4-20°C arasında 1,135, 20-35°C arasında 1,047 alınmaktadır (Qasim ve Zhu, 2017).

Eğer k katsayıları deneysel olarak farklı sıcaklıklar için tespit edilmişse aşağıdaki gibi θ sıcaklık düzeltme katsayısı bulunabilir.

$$k_{T_2} = k_{T_1} \theta^{(T_2 - T_1)} \quad (4.32)$$

$$\ln k_{T_2} = \ln k_{T_1} + (T_2 - T_1) \ln \theta \quad (4.33)$$

$$\ln \theta = \frac{\ln k_{T_2} - \ln k_{T_1}}{(T_2 - T_1)} \quad (4.34)$$

$$\theta = e^{\frac{\ln k_{T_2} - \ln k_{T_1}}{(T_2 - T_1)}} \quad (4.35)$$

Bu eşitliğe göre hesaplanmış sıcaklık düzeltme katsayıları aşağıdaki Çizelge 4.3’de görüldüğü gibi hakim denklem derecesi olan 0. dereceye göre hesaplanmıştır.

Çizelge 4.3. Dereceye göre hesaplanmış sıcaklık düzeltme katsayıları (θ).

Sıcaklık	KOİ	NH ₄ -N	PO ₄ -P	Biyokütle
35°C-25°C	1,074	1,089	1,103	1,087
35°C-15°C	1,065	1,048	1,056	1,066
25°C-15°C	1,055	1,008	1,010	1,046
Ortalama	1,065	1,048	1,056	1,067
S Sapma	0,009	0,041	0,046	0,021

5. SONUÇLAR

Biyogaz çamurunda mikroalg kültürleri ile biyokütle üretimi ve alıcı ortam için istenmeyen nütrientlerin yönetimi sağlanabilir. Algal kültürler ile besin maddelerinin verimli bir şekilde giderilebileceği yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlardan bir tanesidir. Üstelik bu arıtım işlemi yapılırken elde edilen algal biyokütlenin yakıt hammaddesi olarak kullanılma potansiyeli bulunmaktadır. Mikroalgler, C, N ve P elementlerini önemli miktarda giderebilir ve elde edilen biyokütle, biyogaz ve biyodizel üretiminde kullanılabilir. Mikroalgler sayesinde biyogaz çamurundaki kirletici maddelerin önemli bir kısmı giderilmiş olmakla beraber, arıtılmış yüksek verimli çamurun doğaya verilmesi imkânını sağlayabilir. Bu durum çamurun daha iyi bir şekilde kullanımını sağlar. Bu tez çalışmasında laboratuvar şartlarında karışık kültür algler ile aşılana sentetik biyogaz çamuru ortamında KOİ, N ve P giderimi ve biyokütle artışı izlenmiştir. Üç farklı sıcaklık olan 15, 25, 35°C’de sırasıyla 131, 78, 38 günlük izleme sonuçları ortamda karışık kültürün gelişiminin birlikte olduğunu, algal biyokütle artışının gözlemlendiğini ve aynı zamanda bakteriler ile KOİ gideriminin gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Üç farklı sıcaklıkta sentetik biyogaz çamurunun içerisinde yer alan karışık mikroalg kültürleri ile aşılana kesikli reaktörlerde zamanla mikroalglerden başka mikroorganizmalar da ortamda olduğundan Monod kinetiği yanında 0. derece, 1. derece ve 2. derece hız kinetiği uygulanmıştır. Üç sıcaklık içinde kinetik katsayılar elde edilmiştir. Kinetik modeller içerisinde üç farklı sıcaklık dikkate alındığında KOİ, N, P giderim ve biyokütle üretim hızı için en iyi ilişki ($R^2 > 0,9$) 0. derece için bulunmuştur. 15°C’deki çalışmada k_0 katsayısı KOİ, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ ve biyokütle için sırasıyla 6,89, 1,31, 0,109, 3,51 mg/L.gün değerleri bulunmuştur ve 35°C’deki çalışmada ise k_0 katsayısı KOİ, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ ve biyokütle için sırasıyla 24,21, 3,54, 0,323, 12,7 mg/L.gün değerleri bulunmuştur. Ayrıca üç sıcaklık dikkate alınarak 15-35°C sıcaklıklara arasında uygulanabilecek k_0 katsayılarının tespiti için sıcaklık düzeltme katsayıları (Θ) hakim denklem derecesi olan 0. dereceye göre hesaplanmıştır. Üç sıcaklık için Θ değerleri KOİ, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ ve biyokütle için sırasıyla 1,065, 1,048, 1,056 ve 1,067 olarak bulunmuştur.

Tez çalışmasında elde edilen sonuçlar sentetik biyogaz çamurunun karışık kültür mikroalg kültürleri ile arıtımının ve algal biyokütle eldesinin mümkün olduğunu göstermektedir. Yaygınlaşması düşünülen bu proseslerde algal reaktörlerin tasarlanmasında sıcaklık etkisi mutlaka dikkate alınmalıdır. Çalışmamızda tespit ettiğimiz kinetik katsayılar ve sıcaklık düzeltme katsayıları karışık kültür mikroalg kültürleri ile biyogaz çamuru arıtım sistemlerinin tasarımında kullanılabilir. Bu çalışma ile karışık kültürlü algal-bakteriyal sistemler aracılığı ile atıksulardan/atıklardan besin elementlerinin (N, P, organik madde) kolay ve ekonomik olarak giderimi potansiyeli ortaya konmuştur. Aynı zamanda bu sistemler sayesinde küresel iklim değişikliği ile mücadele edilmesinde temiz enerji kaynağı olan biyokütle enerjisi üretilmesinde hammaddenin ekonomik olarak temin edilmesine bir alternatif bir yol sağlanmış olacaktır.

KAYNAKLAR

- Adeniyi, O.M., Azimov, U.ve Burluka, A. 2018. Algae biofuel: Current status and future applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 316-335.
- Astals, S., Nolla-Ardèvol, V.ve Mata-Alvarez, J. 2012. Anaerobic co-digestion of pig manure and crude glycerol at mesophilic conditions: Biogas and digestate. *Bioresource Technology*, 110, 63-70.
- Baly, E.C.C. 1935. The kinetics of photosynthesis. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B-Biological Sciences*, 117, 804, 218-239.
- Bartley, M.L., Boeing, W.J., Dungan, B.N., Holguin, F.O.ve 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.
- Becker, E.W. 1994. *Microalgae: biotechnology and microbiology*. Cambridge University Press.
- Behera, B., Acharya, A., Gargey, I.A., Aly, N.ve Balasubramanian, P. 2019. Bioprocess engineering principles of microalgal cultivation for sustainable biofuel production. *Bioresource Technology Reports*, 5, 296-316.
- Bernard, O.ve Rémond, B. 2012. Validation of a simple model accounting for light and temperature effect on microalgal growth. *Bioresource Technology*, 123, 520-527.
- Bhatnagar, A., Bhatnagar, M., Chinnasamy, S.ve Das, K. 2010. *Chlorella minutissima*—a promising fuel alga for cultivation in municipal wastewaters. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 161, 1-8, 523-536.
- Bilad, M., Discart, V., Vandamme, D., Foubert, I., Muylaert, K.ve Vankelecom, I.F. 2014. Coupled cultivation and pre-harvesting of microalgae in a membrane photobioreactor (MPBR). *Bioresource Technology*, 155, 410-417.
- Blair, M.F., Kokabian, B.ve Gude, V.G. 2014. Light and growth medium effect on *Chlorella vulgaris* biomass production. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2, 1, 665-674.
- Blanchard, G., Guarini, J., Richard, P., Ph, G.ve Mornet, F. 1996. Quantifying the short-term temperature effect on light-saturated photosynthesis of intertidal microphytobenthos. *Marine Ecology Progress Series*, 134, 309-313.
- Borowitzka, M.A. 1999. Commercial production of microalgae: ponds, tanks, and fermenters. *Progress in Industrial Microbiology*, Vol. 35, Elsevier, pp. 313-321.

- Butterwick, C., Heaney, S. ve Talling, J. 2005. Diversity in the influence of temperature on the growth rates of freshwater algae, and its ecological relevance. *Freshwater Biology*, 50, 2, 291-300.
- Cai, T., Park, S.Y. ve Li, Y. 2013. Nutrient recovery from wastewater streams by microalgae: status and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 360-369.
- Cao, W., Wang, X., Sun, S., Hu, C. ve Zhao, Y. 2017. Simultaneously upgrading biogas and purifying biogas slurry using cocultivation of *Chlorella vulgaris* and three different fungi under various mixed light wavelength and photoperiods. *Bioresource Technology*, 241, 701-709.
- Carlsson, A., van Beilen, J., Möller, R., Clayton, D. ve Bowles, D. 2007. Micro-and macro-algae: utility for industrial applications, outputs from the EPOBIO project, University of York, CPL Press, Newbury (UK), (2007 September).
- Chen, C.-Y., Zhao, X.-Q., Yen, H.-W., Ho, S.-H., Cheng, C.-L., Lee, D.-J., Bai, F.-W. ve Chang, J.-S. 2013. Microalgae-based carbohydrates for biofuel production. *Biochemical Engineering Journal*, 78, 1-10.
- Chinnasamy, S., Ramakrishnan, B., Bhatnagar, A. ve Das, K. 2009. Biomass production potential of a wastewater alga *Chlorella vulgaris* ARC 1 under elevated levels of CO₂ and temperature. *International Journal of Molecular Sciences*, 10, 2, 518-532.
- Chisti, Y. 2007. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25, 3, 294-306.
- Darvehei, P., Bahri, P.A. ve Moheimani, N.R. 2018. Model development for the growth of microalgae: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 97, 233-258.
- Dauta, A., Devaux, J., Piquemal, F. ve Boumnick, L. 1990. Growth rate of four freshwater algae in relation to light and temperature. *Hydrobiologia*, 207, 1, 221-226.
- Dermoun, D., Chaumont, D., Thebault, J.-M. ve Dauta, A. 1992. Modelling of growth of *Porphyridium cruentum* in connection with two interdependent factors: light and temperature. *Bioresource Technology*, 42, 2, 113-117.
- Eilers, P. ve Peeters, J. 1988. A model for the relationship between light intensity and the rate of photosynthesis in phytoplankton. *Ecological Modelling*, 42, 3-4, 199-215.
- Elcik, H. ve Çakmakçı, M. 2017. Mikroalglerden Yenilenebilir Biyoyakıt Üretimi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32, 3.

- Eppley, R.W. 1972. Temperature and phytoplankton growth in the sea. *Fish. Bull.* 70, 4, 1063-1085.
- Franco-Morgado, M., Alcántara, C., Noyola, A., Muñoz, R.ve González-Sánchez, A. 2017. A study of photosynthetic biogas upgrading based on a high rate algal pond under alkaline conditions: influence of the illumination regime. *Science of the Total Environment*, 592, 419-425.
- Franz, A., Lehr, F., Posten, C.ve Schaub, G. 2012. Modeling microalgae cultivation productivities in different geographic locations—estimation method for idealized photobioreactors. *Biotechnology Journal*, 7, 4, 546-557.
- Gao, L., Jin, Z., Huang, Y.ve Zhang, L. 1992. Rice clock model—a computer model to simulate rice development. *Agricultural and Forest Meteorology*, 60, 1-2, 1-16.
- Geider, R., MacIntyre, H.ve Kana, T. 1997. Dynamic model of phytoplankton growth and acclimation: responses of the balanced growth rate and the chlorophyll a: carbon ratio to light, nutrient-limitation and temperature. *Marine Ecology Progress Series*, 148, 187-200.
- Geider, R.J., MacIntyre, H.L.ve Kana, T.M. 1998. A dynamic regulatory model of phytoplanktonic acclimation to light, nutrients, and temperature. *Limnology and Oceanography*, 43, 4, 679-694.
- Green, B.R.ve Durnford, D.G. 2002. The chlorophyll-carotenoid proteins of oxygenic photosynthesis. *Annual Review of Plant Biology*, 47, 1, 685-714.
- Grobbelaar, J.U., Soeder, C.J.ve Stengel, E. 1990. Modeling algal productivity in large outdoor cultures and waste treatment systems. *Biomass*, 21, 4, 297-314.
- Haario, H., Kalachev, L.ve Laine, M. 2009. Reduced models of algae growth. *Bulletin of Mathematical Biology*, 71, 7, 1626-1648.
- Jain, S., Jain, S., Wolf, I.T., Lee, J.ve Tong, Y.W. 2015. A comprehensive review on operating parameters and different pretreatment methodologies for anaerobic digestion of municipal solid waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 142-154.
- James, S.C.ve Boriah, V. 2010. Modeling algae growth in an open-channel raceway. *Journal of Computational Biology*, 17, 7, 895-906.
- Jankowska, E., Sahu, A.K.ve Oleskiewicz-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.
- Jayaraman, S.K.ve Rhinehart, R.R. 2015. Modeling and optimization of algae growth. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 54, 33, 8063-8071.

- Jin, H.-F., Lim, B.-R.ve Lee, K. 2006. Influence of nitrate feeding on carbon dioxide fixation by microalgae. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 41, 12, 2813-2824.
- Juárez, M.F.-D., Waldhuber, S., Knapp, A., Partl, C., Gómez-Brandón, M.ve Insam, H. 2013. Wood ash effects on chemical and microbiological properties of digestate-and manure-amended soils. *Biology and Fertility of Soils*, 49, 5, 575-585.
- Ketheesan, B.ve Nirmalakhandan, N. 2013. Modeling microalgal growth in an airlift-driven raceway reactor. *Bioresource Technology*, 136, 689-696.
- Kim, S., Park, J.-E., Cho, Y.-B.ve Hwang, S.-J. 2013. Growth rate, organic carbon and nutrient removal rates of *Chlorella sorokiniana* in autotrophic, heterotrophic and mixotrophic conditions. *Bioresource Technology*, 144, 8-13.
- Kobayashi, N., Noel, E.A., Barnes, A., Watson, A., Rosenberg, J.N., Erickson, G.ve Oyler, G.A. 2013. Characterization of three *Chlorella sorokiniana* strains in anaerobic digested effluent from cattle manure. *Bioresource Technology*, 150, 377-386.
- Kothari, R., Pandey, A., Kumar, S., Tyagi, V.ve Tyagi, S. 2014. Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 174-195.
- Kumar, A., Ergas, S., Yuan, X., Sahu, A., Zhang, Q., Dewulf, J., Malcata, F.X.ve Van Langenhove, H. 2010. Enhanced CO₂ fixation and biofuel production via microalgae: recent developments and future directions. *Trends in Biotechnology*, 28, 7, 371-380.
- Kwietniewska, E.ve Tys, J. 2014. Process characteristics, inhibition factors and methane yields of anaerobic digestion process, with particular focus on microalgal biomass fermentation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 491-500.
- Langhans, R.W.ve Tibbitts, T. 1997. *Plant growth chamber handbook*.
- Larsdotter, K. 2006. Wastewater treatment with microalgae-a literature review. *Vatten*, 62, 1, 31.
- Lee, E.ve Zhang, Q. 2016. Integrated co-limitation kinetic model for microalgae growth in anaerobically digested municipal sludge centrate. *Algal Research*, 18, 15-24.
- Liu, J.ve Vyverman, W. 2015. Differences in nutrient uptake capacity of the benthic filamentous algae *Cladophora* sp., *Klebsormidium* sp. and *Pseudanabaena* sp. under varying N/P conditions. *Bioresource Technology*, 179, 234-242.

- Liu, T., Wang, J., Hu, Q., Cheng, P., Ji, B., Liu, J., Chen, Y., Zhang, W., Chen, X.ve Chen, L. 2013. Attached cultivation technology of microalgae for efficient biomass feedstock production. *Bioresource Technology*, 127, 216-222.
- Lobry, J., Rosso, L.ve Flandrois, J.-P. 1991. A FORTRAN subroutine for the determination of parameter confidence limits in non-linear models. *Binary*, 3, 86-93, 25.
- Luo, L., Lin, X., Zeng, F., Luo, S., Chen, Z.ve Tian, G. 2019. Performance of a novel photobioreactor for nutrient removal from piggery biogas slurry: Operation parameters, microbial diversity and nutrient recovery potential. *Bioresource Technology*, 272, 421-432.
- Mata, T.M., Martins, A.A.ve Caetano, N.S. 2010. Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 1, 217-232.
- McGinn, P.J., Dickinson, K.E., Bhatti, S., Frigon, J.-C., Guiot, S.R.ve 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.
- Medeiros, D.L., Sales, E.A.ve Kiperstok, A. 2015. Energy production from microalgae biomass: carbon footprint and energy balance. *Journal of Cleaner Production*, 96, 493-500.
- Metcalf&Eddy. 2014. Wastewater engineering treatment and resource recovery. Fifth ed. McGraw-Hill Education.
- Mirón, A.S., Garcia, M.-C.C., Camacho, F.G., Grima, E.M.ve Chisti, Y. 2002. Growth and biochemical characterization of microalgal biomass produced in bubble column and airlift photobioreactors: studies in fed-batch culture. *Enzyme and Microbial Technology*, 31, 7, 1015-1023.
- Moreno-Garcia, L., Adjallé, K., Barnabé, S.ve 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.
- Munoz, R.ve Guieysse, B. 2006. Algal–bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: a review. *Water Research*, 40, 15, 2799-2815.
- Nkoa, R. 2014. Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34, 2, 473-492.
- Ouyang, Y., Zhao, Y., Sun, S., Hu, C.ve Ping, L. 2015. Effect of light intensity on the capability of different microalgae species for simultaneous biogas upgrading and

- biogas slurry nutrient reduction. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 104, 157-163.
- Peeters, J.ve Eilers, P. 1978. The relationship between light intensity and photosynthesis—a simple mathematical model. *Hydrobiological Bulletin*, 12, 2, 134-136.
- Pegallapati, A.K.ve Nirmalakhandan, N. 2012. Modeling algal growth in bubble columns under sparging with CO₂-enriched air. *Bioresource Technology*, 124, 137-145.
- Pittman, J.K., Dean, A.P.ve Osundeko, O. 2011. The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources. *Bioresource Technology*, 102, 1, 17-25.
- Pizzera, A., Scaglione, D., Bellucci, M., Marazzi, F., Mezzanotte, V., Parati, K.ve Ficara, E. 2019. Digestate treatment with algae-bacteria consortia: A field pilot-scale experimentation in a sub-optimal climate area. *Bioresource Technology*, 274, 232-243.
- Qasim, S.R.ve Zhu, G. 2017. *Wastewater Treatment and Reuse, Theory and Design Examples, Volume 1: Principles and Basic Treatment*. CRC Press.
- Ramanna, L., Guldhe, A., Rawat, I.ve Bux, F. 2014. The optimization of biomass and lipid yields of *Chlorella sorokiniana* when using wastewater supplemented with different nitrogen sources. *Bioresource Technology*, 168, 127-135.
- Rashid, N., Rehman, M.S.U., Sadiq, M., Mahmood, T.ve Han, J.-I. 2014. Current status, issues and developments in microalgae derived biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 760-778.
- Ratkowsky, D., Lowry, R., McMeekin, T., Stokes, A.ve Chandler, R. 1983. Model for bacterial culture growth rate throughout the entire biokinetic temperature range. *Journal of Bacteriology*, 154, 3, 1222-1226.
- Ratkowsky, D., Olley, J., McMeekin, T.ve Ball, A. 1982. Relationship between temperature and growth rate of bacterial cultures. *Journal of Bacteriology*, 149, 1, 1-5.
- Razzak, S.A., Ali, S.A.M., Hossain, M.M.ve De Lasa, H. 2017. Biological CO₂ fixation with production of microalgae in wastewater—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 379-390.
- Razzak, S.A., Hossain, M.M., Lucky, R.A., Bassi, A.S.ve De Lasa, H. 2013. Integrated CO₂ capture, wastewater treatment and biofuel production by microalgae culturing—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 622-653.

- Rigby, H., Clarke, B.O., Pritchard, D.L., Meehan, B., Beshah, F., Smith, S.R. ve Porter, N.A. 2016. A critical review of nitrogen mineralization in biosolids-amended soil, the associated fertilizer value for crop production and potential for emissions to the environment. *Science of the Total Environment*, 541, 1310-1338.
- Rosso, L., Lobry, J. ve Flandrois, J.-P. 1993. An unexpected correlation between cardinal temperatures of microbial growth highlighted by a new model. *Journal of Theoretical Biology*, 162, 4, 447-463.
- Ryckebosch, E., Drouillon, M. ve Veruaeren, H. 2011. Techniques for transformation of biogas to biomethane. *Biomass & Bioenergy*, 35, 5, 1633-1645.
- Schoolfield, R., Sharpe, P. ve Magnuson, C. 1981. Non-linear regression of biological temperature-dependent rate models based on absolute reaction-rate theory. *Journal of Theoretical Biology*, 88, 4, 719-731.
- Sharma, Y.C. ve Singh, V. 2017. Microalgal biodiesel: a possible solution for India's energy security. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 72-88.
- Sharpe, P.J., Curry, G.L., DeMichele, D.W. ve Cole, C.L. 1977. Distribution model of organism development times. *Journal of Theoretical Biology*, 66, 1, 21-38.
- Sharpe, P.J. ve DeMichele, D.W. 1977. Reaction kinetics of poikilotherm development. *Journal of Theoretical Biology*, 64, 4, 649-670.
- Singh, A., Nigam, P.S. ve Murphy, J.D. 2011. Mechanism and challenges in commercialisation of algal biofuels. *Bioresource Technology*, 102, 1, 26-34.
- Singh, A. ve Olsen, S.I. 2011. A critical review of biochemical conversion, sustainability and life cycle assessment of algal biofuels. *Applied Energy*, 88, 10, 3548-3555.
- Singh, R. ve Sharma, S. 2012. Development of suitable photobioreactor for algae production—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 4, 2347-2353.
- Slegers, P., Lösing, M., Wijffels, R., Van Straten, G. ve Van Boxtel, A. 2013. Scenario evaluation of open pond microalgae production. *Algal Research*, 2, 4, 358-368.
- Solmaz, A. 2018. Mikroalgal batık membran fotobiyoreaktör ile biyokütle üretimi ve nütriye giderimi, Doktora Tezi, ASÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
- Solmaz, A. ve Işık, M. 2017. Microalgae production with microalgal submerged membrane photo bioreactor (msmpbr) and examining the nutrient removal yield. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences-Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*.

- Spolaore, P., Joannis-Cassan, C., Duran, E.ve Isambert, A. 2006. Commercial applications of microalgae. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 101, 2, 87-96.
- Stowe, E.J., Coats, E.R.ve Brinkman, C.K. 2015. Dairy manure resource recovery utilizing two-stage anaerobic digestion–Implications of solids fractionation. *Bioresource Technology*, 198, 237-245.
- Suali, E.ve Sarbatly, R. 2012. Conversion of microalgae to biofuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 6, 4316-4342.
- Suganya, T., Varman, M., Masjuki, H.ve Renganathan, S. 2016. Macroalgae and microalgae as a potential source for commercial applications along with biofuels production: a biorefinery approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 909-941.
- Sukenik, A., Falkowski, P.ve Bennett, J. 1987. Potential enhancement of photosynthetic energy conversion in algal mass culture. *Biotechnology and Bioengineering*, 30, 8, 970-977.
- Sukenik, A., Levy, R., Levy, Y., Falkowski, P.ve Dubinsky, Z. 1991. Optimizing algal biomass production in an outdoor pond: a simulation model. *Journal of Applied Phycology*, 3, 3, 191-201.
- Sun, S., Ge, Z., Zhao, Y., Hu, C., Zhang, H.ve Ping, L. 2016. Performance of CO₂ concentrations on nutrient removal and biogas upgrading by integrating microalgal strains cultivation with activated sludge. *Energy*, 97, 229-237.
- Sydney, E.B., da Silva, T.E., Tokarski, A., Novak, A.C., de Carvalho, J.C., Woiciechowski, A.L., Larroche, C.ve Soccol, C.R. 2011. Screening of microalgae with potential for biodiesel production and nutrient removal from treated domestic sewage. *Applied Energy*, 88, 10, 3291-3294.
- Talbot, P., Thébault, J.-M., Dauta, A.ve De la Noüe, J. 1991. A comparative study and mathematical modeling of temperature, light and growth of three microalgae potentially useful for wastewater treatment. *Water Research*, 25, 4, 465-472.
- Tan, F., Wang, Z., Zhouyang, S., Li, H., Xie, Y., Wang, Y., Zheng, Y.ve Li, Q. 2016. Nitrogen and phosphorus removal coupled with carbohydrate production by five microalgae cultures cultivated in biogas slurry. *Bioresource Technology*, 221, 385-393.
- Thimijan, R.W.ve Heins, R.D. 1983. Photometric, radiometric, and quantum light units of measure: a review of procedures for interconversion. *HortScience*, 18, 6, 818-822.

- Uggetti, E., Sialve, B., Latrille, E.ve Steyer, J.P. 2014. Anaerobic digestate as substrate for microalgae culture: the role of ammonium concentration on the microalgae productivity. *Bioresource Technology*, 152, 437-443.
- Vaneeckhaute, C., Meers, E., Michels, E., Buysse, J.ve Tack, F. 2013. Ecological and economic benefits of the application of bio-based mineral fertilizers in modern agriculture. *Biomass and Bioenergy*, 49, 239-248.
- Wan, M., Hou, D., Li, Y., Fan, J., Huang, J., Liang, S., Wang, W., Pan, R., Wang, J.ve Li, S. 2014. The effective photoinduction of *Haematococcus pluvialis* for accumulating astaxanthin with attached cultivation. *Bioresource Technology*, 163, 26-32.
- Wang, B., Li, Y., Wu, N.ve Lan, C.Q. 2008. CO₂ bio-mitigation using microalgae. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 79, 5, 707-718.
- Wang, X., Gao, S., Zhang, Y., Zhao, Y.ve Cao, W. 2017. Performance of different microalgae-based technologies in biogas slurry nutrient removal and biogas upgrading in response to various initial CO₂ concentration and mixed light-emitting diode light wavelength treatments. *Journal of Cleaner Production*, 166, 408-416.
- Wang, Z.W., Zhao, Y.J., Ge, Z.G., Zhang, H.ve Sun, S.Q. 2016. Selection of microalgae for simultaneous biogas upgrading and biogas slurry nutrient reduction under various photoperiods. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 91, 7, 1982-1989.
- WEF. 2005. Biological Nutrient Removal (BNR) Operation in Wastewater Treatment Plants: WEF Manual of Practice No. 30: WEF Manual of Practice. McGraw-Hill Professional.
- Xu, M., Bernards, M.ve Hu, Z. 2014. Algae-facilitated chemical phosphorus removal during high-density *Chlorella emersonii* cultivation in a membrane bioreactor. *Bioresource Technology*, 153, 383-387.
- Yan, C., Luo, X.ve Zheng, Z. 2013. Effects of various LED light qualities and light intensity supply strategies on purification of slurry from anaerobic digestion process by *Chlorella vulgaris*. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 79, 81-87.
- Yan, C., Zhang, L., Luo, X.ve Zheng, Z. 2014. Influence of influent methane concentration on biogas upgrading and biogas slurry purification under various LED (light-emitting diode) light wavelengths using *Chlorella* sp. *Energy*, 69, 419-426.
- Yan, C., Zhu, L.D.ve Wang, Y.X. 2016. Photosynthetic CO₂ uptake by microalgae for biogas upgrading and simultaneously biogas slurry decontamination by using of

- microalgae photobioreactor under various light wavelengths, light intensities, and photoperiods. *Applied Energy*, 178, 9-18.
- Yan, W.ve Hunt, L. 1999. An equation for modelling the temperature response of plants using only the cardinal temperatures. *Annals of Botany*, 84, 5, 607-614.
- Yang, C.-F., Ding, Z.-Y.ve Zhang, K.-C. 2008. Growth of *Chlorella pyrenoidosa* in wastewater from cassava ethanol fermentation. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 24, 12, 2919-2925.
- Yin, X., Kropff, M.J., McLaren, G.ve Visperas, R.M. 1995. A nonlinear model for crop development as a function of temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77, 1-2, 1-16.
- Ying, K., Zimmerman, W.ve Gilmour, D. 2014. Effects of CO and pH on growth of the microalga *Dunaliella salina*. *Journal of Microbial and Biochemical Technology*, 6, 3, 167-173.
- Zhang, W., Wang, J., Wang, J.ve Liu, T. 2014. Attached cultivation of *Haematococcus pluvialis* for astaxanthin production. *Bioresource Technology*, 158, 329-335.
- Zhang, Y., Bao, K., Wang, J., Zhao, Y.ve Hu, C. 2017. Performance of mixed LED light wavelengths on nutrient removal and biogas upgrading by different microalgal-based treatment technologies. *Energy*, 130, 392-401.
- Zhao, Y., Guo, G., Sun, S., Hu, C.ve Liu, J. 2019. Co-pelletization of microalgae and fungi for efficient nutrient purification and biogas upgrading. *Bioresource Technology*, 121656.
- Zhao, Y., Sun, S., Hu, C., Zhang, H., Xu, J.ve Ping, L. 2015. Performance of three microalgal strains in biogas slurry purification and biogas upgrade in response to various mixed light-emitting diode light wavelengths. *Bioresource technology*, 187, 338-345.
- Zhao, Y., Wang, J., Zhang, H., Yan, C.ve Zhang, Y. 2013. Effects of various LED light wavelengths and intensities on microalgae-based simultaneous biogas upgrading and digestate nutrient reduction process. *Bioresource Technology*, 136, 461-468.
- Zhu, J., Rong, J.ve Zong, B. 2013. Factors in mass cultivation of microalgae for biodiesel. *Chinese Journal of Catalysis*, 34, 1, 80-100.
- Zhu, L. 2015. Microalgal culture strategies for biofuel production: a review. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 9, 6, 801-814.
- Zhu, L., Yan, C.ve Li, Z. 2016. Microalgal cultivation with biogas slurry for biofuel production. *Bioresource Technology*, 220, 629-636.

Zwietering, M., De Koos, J., Hasenack, B., De Witt, J.ve Van't Riet, K. 1991.
Modeling of bacterial growth as a function of temperature. Appl. Environ.
Microbiol., 57, 4, 1094-1101.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Aydın Kaan TÖRE

Adres : Şehitlik Mah. Karacabey Cad. Gülşah Sitesi B Blok No:2

Polatlı/ANKARA

Telefon : 0 543 577 51 79

E-posta : kaan1905subat@gmail.com

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : Aksaray Üniversitesi, 2010-2015

Yüksek Lisans : Aksaray Üniversitesi, 2017-2020

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

1.

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayınlanan Makaleler

1.

2.

Kongrelerde Sunulan Makaleler

1. Töre A.K., Isik M. “Treatment of Biogas Slurry By Microalgae” International Symposium for Environmental Science and Engineering Research (ISESER2019) 25-27 May 2019 Konya-TURKEY, Proceeding Book, p.231. 2019 (Sözlü sunum).

2. Töre A.K., Isik M. “Microalgal Treatment of Biogas Slurry Under Batch Conditions” Ist International Conference Environment, Technology, and Management (ICETEM), 27-29 June 2019 Niğde-TURKEY Proceeding Book 195-203 (2019) (Sözlü sunum).