



T.C.

ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**MİKROALGLERİN ARITMA ÇAMURLARINDAN BİYOGAZ
ÜRETİMİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NİHAL ŞENOL SAYGILI

TEZ DANIŞMANI

PROF. DR. NİLGÜN AYMAN ÖZ

ÇANAKKALE – 2024



T.C.

ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**MİKROALGLERİN ARITMA ÇAMURLARINDAN BİYOGAZ ÜRETİMİNE
ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NİHAL ŞENOL SAYGILI

TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. NİLGÜN AYMAN ÖZ

ÇANAKKALE – 2024



T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



Nihal ŞENOL SAYGILI tarafından Prof. Dr. Nilgün AYMAN ÖZ yönetiminde hazırlanan ve **30/01/2024** tarihinde aşağıdaki jüri karşısında sunulan “**Mikroalglerin Arıtma Çamurlarından Biyogaz Üretimine Etkisi**” başlıklı çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü **Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı**’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Prof. Dr.Nilgün AYMAN ÖZ
(Danışman)

.....

Doç.Dr. Aliye Suna ERSES YAY

.....

Dr. Öğr. Üyesi Akın ALTEN

.....

Tez No :10631115

Tez Savunma Tarihi : 30/01/2024

.....

Dr. Öğr. Üyesi. İsmail Onur TUNÇ

Enstitü Müdürü V.

./../2024

ETİK BEYAN

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi taahhüt ve beyan ederim.

Nihal ŞENOL SAYGILI

29/03/2024

TEŞEKKÜR

Bu tezin gerçekleştirilmesinde, çalışmam boyunca yardımlarını esirgemeyen saygı değer danışman hocam Prof. Dr. Nilgün AYMAN ÖZ'e, deneysel çalışmalar sırasındaki desteklerinden dolayı İremso KAYAN'a, çalışma süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen sevgili eşim Emre Sedar SAYGILI'ya ve hayatımın her evresinde bana destek olan değerli aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım."

Nihal ŞENOL SAYGILI

Çanakkale, Mart 2024



ÖZET
MİKROALGLERİN ARITMA ÇAMURLARINDAN BİYOGAZ
ÜRETİMİNE ETKİSİ

Nihal ŞENOL SAYGILI

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Nilgün AYMAN ÖZ

30/01/2024, 64

Fosil yakıtların iklim değişikliği başta olmak üzere çevre üzerine olumsuz yönde etkileri, yenilenebilir enerjiye olan talebi artırmıştır. Biyogaz, yenilenebilir enerji kaynakları arasında, hem atık yönetiminde hem de enerji ve fermente gübre üretiminde rol oynadığı için çevre dostu bir alternatif olarak önemli bir yere sahiptir. Biyogaz bitkisel, hayvansal, endüstriyel ve evsel organik atıklar ve bunların oksijensiz bir ortamda işlenmesi sonucunda oluşan bir gazdır. Son yıllarda farklı alg türleri ile de çeşitli organik atıklardan biyogaz eldesi ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır. Mikroalgler, atıksu arıtımında ve biyogaz üretimi için de kullanılan önemli bir biyokütle kaynağıdır. Diğer mikroalglerle karşılaştırıldığında, *Nannochloropsis* çok yüksek lipid içeriği (% 30.5) ile alternatif olarak kullanılabilecek mikroalglerden biridir. Bu çalışmada, yüksek lipid içeriğinden dolayı *Nannochloropsis* ve atıksu arıtma tesisi çamurunun birlikte biyogaz potansiyelinin incelenmesi hedeflenmiştir. Yapılan analizler sonucunda %32, %22, %12' lik mikroalg ilave edilen ve aynı süre çalıştırılan reaktörlerde oluşan biyogaz miktarlarının yüksek olduğu ve birbirine yakın değerlerde olduğu görülmüştür. Mikroalg oranı toplamda %40 oranına ulaştığında biyogaz üretiminin önemli düzeyde azaldığı gözlenmiştir. Ayrıca bu tez kapsamında bibliyometrik ve sistematik derleme de yapılmıştır. Mikroalglerin biyogaz sistemlerinde alternatif bir substrat kaynağı olarak kullanılabileceği ve biyogaz verimi üzerine olumlu etkisi olabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Arıtma Çamuru, Biyogaz Üretimi, Enerji, Mikroalg, Anaerobik Reaktör

ABSTRACT
EFFECT OF MICROALGAE ON BIOGAS PRODUCTION FROM
WASTEWATER SLUDGE

Nihal ŞENOL SAYGILI

Çanakkale Onsekiz Mart University

School of Graduate Studies

Master of Science Thesis in Environmental Engineering

Advisor Prof. Dr. Nilgün AYMAN ÖZ

01/30/2024, 64

The negative effects of fossil fuels on the environment, especially climate change, have increased the demand for renewable energy. Biogas has an important place among renewable energy sources as an environmentally friendly alternative as it plays a role in both waste management and energy and fermented fertilizer production. Biogas is a gas formed as a result of vegetable, animal, industrial and domestic organic wastes and their processing in an oxygen-free environment. In recent years, studies have been carried out to obtain biogas from various organic wastes with different algae species. Microalgae are an important biomass source that is also used in wastewater treatment and biogas production. Compared to other algae, *Nannochloropsis* is one of the microalgae that can be used as an alternative with its very high lipid content (30.5%). In this study, it was aimed to investigate the biogas potential of *Nannochloropsis* and wastewater treatment plant sludge together due to its high lipid content. As a result of the analyses, it was seen that the biogas amounts produced in the reactors where 32%, 22% and 12% microalgae were added and operated for the same period of time had the highest efficiency and were closest to each other. It was observed that biogas production decreased significantly when the proportion of microalgae reached 40% in total. A bibliometric and systematic review was also conducted within the scope of this thesis. It can be concluded that microalgae can be used as an alternative substrate source in biogas systems and may have a positive effect on biogas yield.

Keywords: Sewage Sludge, Biogas Production, Energy, Microalgae, Anaerobic Reactor

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
JÜRİ ONAY SAYFASI.....	i
ETİK BEYAN.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	ix
TABLolar DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

1

1.1. BiyogazınTarihçesi.....	3
1.2. Türkiye’de Biyogazın Gelişimi.....	4

İKİNCİ BÖLÜM

KURAMSAL ÇERÇEVE

10

2.1. Biyogaz.....	10
2.2. Biyogaz Yan Ürünleri ve Kullanım Alanları.....	11
2.2.1. Isıtma Amaçlı Biyogaz Kullanılması.....	11
2.2.2. Enerji Amaçlı Biyogaz Kullanılması.....	12
2.2.3. Biyogazın Motorlarda Kullanımı.....	12
2.2.4. Yan Ürün Değerlendirme İmkânları.....	13
2.3. Biyogazın Üretiminin Önemi.....	13

2.4. Biyogaz Üretimi ve Kullanılan Atıklar.....	14
2.5. Biyogaz Üretimi.....	15
2.5.1. Hidroliz Aşaması	16
2.5.2. Asit Oluşum Aşaması.....	16
2.5.3. Metan Oluşumu.....	17
2.6. Biyogaz Üretimini Etkileyen Faktörler.....	18
2.7. Arıtma Çamurları.....	19
2.8. Mikroalgler.....	19
2.9. Arıtma Çamuru ve Mikroalglerin Birlikte Sindirimi.....	22

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

24

MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Arıtma Çamuru ve Aşı Çamurunun Karakterizasyonu.....	24
3.1.1. Mikroalg Temini.....	24
3.1.2. Biyogaz Reaktör Düzenegi.....	25
3.1.3. Aletler-Araçlar-Gereçler-Cihazlar.....	27
3.2. Analitik Metotlar.....	27
3.3. Bibliyometrik Analiz Metodoloji.....	29
3.4. Sistematik Derleme Çalışması Metodoloji.....	29

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

30

ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Deneysel Çalışma Sonuçları.....	30
4.2. Bibliyometrik Analiz	37
4.2.1. Anahtar Sözcük Analizi.....	38
4.2.2. Yazarların Atıf Yoğunluğu.....	39
4.2.3. Atıf Yapılan Ülkelerin Analizi.....	41
4.2.4. En Çok Kullanılan Anahtar Kelime Bağlantıları.....	42
4.2.5. Yazarlar Arası Bağlantı.....	44
4.3. Sistematik Derleme Çalışması.....	45

BEŞİNCİ BÖLÜM
SONUÇ ve ÖNERİLER

53

5.1. Sonuç ve Öneriler.....	53
KAYNAKÇA	54



SİMGELER VE KISALTMALAR

TKM	Toplam katı Madde
TUKM	Toplam Uçucu Katı Madde
TOC	Toplam Organik Karbon
CaCO ₃	Kalsiyum Karbonat
TN	Toplam Nitrojen
MGC	Miligaz Ölçer
AAT	Atıksu Arıtma Tesisi
mg	Miligram
g	Gram
MW	Megawatt
°C	Derece Santigrat
L	Litre
Rpm	Dakikadaki dönme sayısı
C/N	Karbon Azot Oranı
ml	Mililitre
HAS	Hidrolik Bekletme Süresi

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo No	Tablo Adı	Sayfa No
Tablo 1	2022 yılı biyogaz yekdem listesi	5
Tablo 2	Biyogaz içeriği	10
Tablo 3	1m ³ biyogaza karşılık gelen farklı yakıt türleri	11
Tablo 4	Değişik kaynaklarda biyogaz ve metan verimleri	15
Tablo 5	Farklı mikroalg türlerinde yağ imiktarı ve verimliliği	21
Tablo 6	Anaerobik koşullarda farklı mikroalg ortak sindirimi	22
Tablo 7	Analitik Metotlar	28
Tablo 8	Reaktörlerin günlük gaz oluşturma miktarları	36
Tablo 9	Mikroalg oranlarına bağlı karışım miktarları ve gaz çıkış miktarı	37
Tablo 10	Son beş yılda Web of Science da mikroalg ile ilgili yapılan çalışmalar	46

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Şekil Adı	Sayfa No
Şekil 1	Mikroalg havuzu ve mikroalg türünün mikroskop imajı (40X)	25
Şekil 2	Laboratuvar ortamında hazırlanan reaktörler	26
Şekil 3	Laboratuvar ölçekli reaktörler düzeneği ve MGC (gaz ölçüm cihazı) ile ölçülmesi	26
Şekil 4	Birinci reaktör zamana bağlı gaz oluşum miktarı	30
Şekil 5	İkinci reaktör zamana bağlı gaz oluşum miktarı	31
Şekil 6	Üçüncü reaktör zamana bağlı gaz oluşum miktarı	32
Şekil 7	Dördüncü reaktör zamana bağlı gaz oluşum miktarı	32
Şekil 8	Beşinci reaktör zamana bağlı gaz oluşum miktarı	33
Şekil 9	Altıncı reaktör zamana bağlı gaz oluşum miktarı	34
Şekil 10	Altı reaktörün zamana bağlı gaz oluşum miktarı	35
Şekil 11	Anahtarlar kelimelerin kaplama görselleştirmesi	39
Şekil 12	En çok atıf alan yazar analizi /Çalışmaların atıf ağının kaplama görselleştirmesi	40
Şekil 13	Atıf ağı yoğunluk görselleştirmesi	40
Şekil 14	Atıf yapılan çalışmaların ülkelerinin kaplama görselleştirmesi	41
Şekil 15	Atıf yapılan ülkelerin yoğunluğu	42
Şekil 16	Çalışmaların anahtar kelimelerine göre ağ görselleştirmesi	43
Şekil 17	Anahtar kelimelere göre yoğunluk görselleştirmesi	43
Şekil 18	Yazar ağı	44
Şekil 19	Yıllara göre yapılan yayınlar ve atıf sayısı	45

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

Dünya genelinde artan enerji talebi ve azalan fosil yakıt rezervleri, gelecekte güvenilir ve ekonomik enerji arzı sağlamanın endişesini artırmaktadır. Bu bağlamda, biyokütle, güneş, rüzgar, hidro ve jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynakları önemli rol oynamaktadır. Bu yenilenebilir enerji kaynakları, çevre dostu olmaları ve sürdürülebilir bir enerji geleceği için önemli bir rol oynamaları açısından giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarına yapılan yatırımlar, enerji güvenliğini artırabilir ve iklim değişikliği gibi çevresel sorunlara karşı daha dirençli bir enerji altyapısı oluşturabilir (Cao ve Pawłowski, 2012).

Biyokütle, çeşitli bitkilerden elde edilen, organik madde bakımından zengin ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak tanımlanmaktadır.

Arıtma çamurları, atıksu arıtma tesislerinde çeşitli kademelerden geçerek oluşan katı atıklardır ve biyogaz üretiminde değerlendirilebilen bir atık türüdür (Mateo, 2015). Bu çamurlar, atıksu arıtma tesislerinden önemli miktarda ortaya çıkar ve bu çamurların bertarafı genellikle maliyetlidir. Ancak, arıtma çamurları, başka bir biyogaz kaynağı şeklinde değerlendirilir. Biyogaz, bitkisel, hayvansal, endüstriyel ve evsel atıkların oksijensiz bir ortamda, anaerobik bakteriler tarafından parçalanması sonucu oluşan bir gazdır. Biyogazın ana bileşenleri metan (CH_4) ve karbondioksit (CO_2)'dir. Biyogaz, doğalgaza benzer fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptir ve yakıt olarak kullanılabilir.

Endüstrinin hızlı gelişimi ve kentleşmenin hızlanması, kanalizasyon ve atıksu arıtma tesislerinin sayısını artırmıştır. Bu durum, bu tesislerden kaynaklanan çamur miktarında artışa yol açmaktadır (Hodaei vd., 2021). Atık su arıtma tesisleri (AAT'ler), su alanlarına ve arıtılmış sulara çeşitli patojenler, kimyasallar ve metaller bırakan arıtma tesisleridir. Bu tesisler, çevresel, ekonomik ve toplumsal hedeflere odaklanmak yerine, sorunlar ortaya çıktıkça çözüm odaklı birçok politika ve uygulama ile yönetilmiştir. Biyolojik atık su arıtımının sürdürülebilirliğini sağlamak için mevcut politikaların, arıtma çamuru üretimi, bertarafı ve kaynak kullanımının gözden geçirilmesini gerektirir (Peccia ve Westerhoff, 2015).

Çamurun yeniden kullanımı veya bertarafı için belirlenen katı düzenlemeler, hem kamu hem de özel çamur üreticilerini kendi çamur yönetim stratejilerini oluşturmak ve uygulamak konusunda zorlamıştır.

Bir atıksu arıtma tesisi, enerji tüketimi açısından genel elektrik tüketiminin yaklaşık %1-3'ünü kullanmaktadır (Capodaglio ve Olsson, 2020). Ancak, atıksu arıtma tesisleri, 2015 yılında küresel CO₂ dışı emisyonların %5'inden sorumlu iken, bu oranın 2030 yılında küresel atıksu emisyonlarının (CH₄ ve N₂O) %14'e kadar artması beklenmektedir (US EPA, 2019). Bu nedenle, birçok kamu kuruluşu, atıksu arıtma süreçlerini gözden geçirerek ve biyogaz sistemlerini daha etkin bir şekilde kullanarak karbon ayak izini azaltma hedefleri belirlemektedir (Lam ve van der Hoek, 2020).

Atıksu arıtma tesislerindeki anaerobik çürütme süreci, enerji üretimi sağlayan bir süreçtir. Arıtma çamurunun anaerobik çürütülmesi ile, her bir metreküp atıksu için yaklaşık 0,27 kWh elektrik enerjisi geri kazanılabilir. Bu, bir atıksu arıtma tesisinde geri kazanılan enerjinin toplam enerji tüketiminin %50-60'ını dengeleyebileceğini göstermektedir (Liu vd., 2020).

Bununla birlikte, biyogaz üretimindeki önemli bir sorun düşük verimliliklerdir. Isı ve güç (CHP) motorları kullanılarak metanın sadece %40'ı elektrik olarak geri kazanılabilmektedir (Capodaglio ve Olsson, 2020). Anaerobik çürütmedeki bir diğer zorluk ise atık aktif çamurun dengesiz karbon/azot (C/N) oranıdır (Yang vd., 2019). Bu durum, düşük biyogaz verimini kısıtlayabilir (Li vd., 2020), ayrıca uçucu katıların (VS) giderilmesi ve amonyak birikimi gibi sorunlara neden olabilir (Yang vd., 2019). Bu zorluklar, biyogaz üretim süreçlerinin daha verimli ve sürdürülebilir hale getirilmesi için çeşitli araştırmalara odaklanmayı gerektirmektedir.

Bu bağlamda, biyogaz gibi alternatif enerjiye olan talep artmış ve bu alanlarda çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Biyogaz, organik atıkların anaerobik fermantasyonu yoluyla üretilen ve enerji üretiminde kullanılabilen bir gaz türüdür. Bu çözüm, atık yönetimi ve enerji üretimi arasında sürdürülebilir bir denge kurma potansiyeline sahiptir. Bu nedenle, biyogaz ve benzeri yenilenebilir enerji kaynakları, enerji ihtiyacını karşılarken çevresel etkileri minimize etme açısından önemli bir rol oynayabilir.

Biyogaz üretimi, hem atık yönetiminde hem de enerji üretiminde önemli bir rol oynamaktadır. Atık yönetiminde, biyogaz üretimi atıkların bertaraf edilmesini sağlayarak

çevreye olan olumsuz etkilerini azaltmaktadır. Enerji üretiminde ise, biyogaz fosil yakıtlara alternatif olarak kullanılarak enerji üretiminde verimlilik ve sürdürülebilirlik sağlanmaktadır.

Günümüzde, mikroalglerden biyoetanol, biyodizel, biyogaz, bitkisel biyoyağ ve biyohidrojen gibi birçok biyoyakıt türü üretilmektedir. Bu biyoyakıtlar, geleneksel fosil yakıtların yerine geçerek çevresel etkileri azaltabilir ve enerji ihtiyacını karşılamak için sürdürülebilir bir alternatif sunabilir. Son yıllarda, farklı mikroalg türleri ile farklı atıklardan biyogaz elde edilmesi çalışmaları yapılmaktadır. Bu çalışmalar, biyogaz üretiminin daha verimli ve sürdürülebilir hale getirilmesi açısından önem taşımaktadır. Mikroalgler, fotosentez yoluyla karbondioksiti oksijene dönüştürür ve enerji üretir. Bu özelliğinden dolayı, mikroalglerden biyoyakıt üretimi, sera gazı emisyonlarını azaltmak ve fosil yakıtlara bir alternatif olmak için önemli bir potansiyele sahiptir. Mikroalgler, bitkisel ve hayvansal kökenli organik maddeler ile atıkların tamamından elde edilebilir. Bu da, mikroalglerin biyoenerji üretiminde sürdürülebilir bir kaynak olmasını sağlar.

Mikroalgler, hızlı büyüme oranları ve yüksek yağ içerikleri sayesinde biyoenerji üretimi için ideal bir kaynak olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca, mikroalglerin geniş bir habitat aralığına uyum sağlamaları ve tarım arazilerine ihtiyaç duymamaları da bu yöntemin çevresel etkilerini azaltmaktadır. Mikroalglerden biyoyakıt üretimi, enerji sektöründe sürdürülebilirlik ve çevresel etkilerin azaltılması açısından önemli bir role sahiptir. Bu yenilikçi yaklaşım, gelecekte enerji üretimindeki dönüşüm sürecine katkı sağlayabilir (Sisman-Aydin, 2019).

Çalışmamızda kullanılan mikroalg türü Nannokloropsis sp. dır. Nannokloropsis sp.'nın seçilme sebebi lipit içeriği yüksek olan ve bu sayede biyodizele dönüştürülebilen mikroalg türlerinden biri olmasıdır (Widayat ve Hadiyanto, 2016).

1.1. Biyogazın Tarihçesi

Biyogazın tarihçesi oldukça eskiye dayanmaktadır. Asur'da M.Ö. 10. yüzyılda, biyogazın banyo suyu ısıtma amaçlı kullanıldığına dair belirtiler bulunmaktadır. Ayrıca, antik Çin'de katı atıkların anaerobik çürütülmesinin uygulanmış olabileceği öne sürülmüştür (Bond ve Templeton, 2011). Ancak, biyokütlenin anaerobik şartlar altında parçalanmasından elde edilen enerjiyi insanların kullandığına yönelik belgelenmiş kayıtlar,

Yeni Zelanda ve Hindistan'da 1890'ların ortalarında inşa edilen çürütücüler ile İngiltere'nin Exeter kentinde sokak lambalarını aydınlatmak için kullanılan bir kanalizasyon çamuru çürütücüsüne dayanmaktadır. Bu tarihsel örnekler, biyogazın enerji üretimi ve atık yönetimi için geçmişte nasıl kullanıldığını göstermektedir. Bu erken girişimler, günümüzde biyogazın sürdürülebilir enerji üretimi ve atık geri dönüşümü alanlarında nasıl geliştiğini anlamamıza yardımcı olmaktadır (Bond ve Templeton, 2011).

1.2 Türkiye’de Biyogazın Gelişimi

Türkiye’de biyogaz üretiminin ilk adımları, 1957 yılında Toprak ve Su Araştırma Enstitüsü’nde atılmıştır. Bu çalışmalar kapsamında, biyogaz üretimi için gerekli olan temel bilgiler ve teknikler araştırılmış ve geliştirilmiştir. 1960’lı yıllarda ise, Devlet Üretme Çiftliklerinde pilot tesisler kurularak biyogaz üretiminin pratik uygulamalarına başlanmıştır. Bu gelişmelerin ardından, 1963 yılında Tarım Bakanlığı’nın öncülüğünde başlatılan çalışmalar kapsamında, Eskişehir Toprak Su Araştırma Enstitüsü’nde 5 adet, Eskişehir köylerinde 2 tane, Çorum ‘da deneme istasyonunda 1 tane toplamda 8 biyogaz tesisi kurulmuştur. Ancak, bu tesislerden elde edilen sonuçlar verimlilik açısından farklılık göstermiştir (Gülen vd.,2012).

1980’den sonra UNICEF desteğiyle başlayan çalışmalar Devlet Planlama Teşkilatı (DPT) ile yürütülmüştür. İlk adımlar, Muş-Alparslan Devlet Üretme Çiftliği’nde 35 m³ kapasiteli bir tesisin kurulmasıyla atılmıştır. 1982 de Toprak Su Araştırma Enstitüsü, biyogaz üretimi konusundaki sorumluluğu üstlenmiş ve köylülere sağlanan kredi desteği ile 6 m³, 8 m³, 12 m³ve 50 m³’lük kapasiteli toplamda yaklaşık 1000 adet biyogaz tesisi faaliyete geçirilmiştir.

2000’lerde, üniversitelerin liderliğinde biyogaz çalışmaları devam etmiştir. Bu dönemde, biyogazın enerji üretimi, atık yönetimi ve sürdürülebilir tarım gibi alanlarda daha fazla önem kazandığı gözlemlenmiştir (Şenol vd., 2017).

2022 Yılı Biyogaz YEKDEM Listesi verilerine göre Türkiye de 32 şehirde 95 tesiste, 369,22 MW enerji üretimi gerçekleştirilmiştir. (Tablo 1) Bu tesisler tedarikleri düzenli sağlandığı taktirde ekonomiye ithal girdi olarak 2.953.376.000 KW elektrik sağlayacaklardır (“Biyogaz Tesisleri”, biyogazder).

Tablo 1. 2022 yılı biyogaz yekdem listesi

ŞEHİR	BİYOGAZ TESİSİ	LİSANS GÜCÜ/DEVREYE ALINAN
AFYON	1-Afyon En. ve Güb. A.Ş	4 MW
	2-Afyon Biy. Ür. A.Ş	8 MW
	3-Akıncı Biy. A.Ş	1.4 MW
	4-Armatec Biyogaz LTD.	3.5 MW
	5-Bioden En. A.Ş.	4 MW
	6-Dinar Biy. A.Ş	1.2 MW
	7-İlis Enerji	4 MW
	8-Respect Biyogaz	4.5 MW
AMASYA	1-Ahi Biyogaz	6.5 MW
	2-Sigma Biyogaz	2 MW
	3-Zen Biyogaz	1.5 MW
ANKARA	1-Abrak Enerji	2.4/3 MW
	2-Askoç Enerji	1.6/6 MW
	3-Aslan Enerji	3/6 MW
	4-Büyük Şişmanlar	1.9/4 MW
	5-De 7 solar	3.2 MW
	6-Enerbes	4 MW

Tablo 1. 'in devamı

ŞEHİR	BİYOGAZ TESİSİ	LİSANS GÜCÜ/DEVREYE ALINAN
	7-Hüma	3 MW
	8-Onat Enerji	3.1 MW
	9-Padaş	3 MW
	10-Polres	3 MW
	11-Üregen enerji	1.6/3 MW
	12-Paşa Enerji	1.5/6 MW
	13-2BZ Bes	4 MW
	14-3A Bes	4 MW
ANTALYA	1-Kalemirler En.	0.6 MW
AYDIN	1-Efeler Biy.	4.8 MW
	2-Energrom Enerji	2.1 MW
BALIKESİR	1-Astosan Biyogaz	1 MW
	2-Balıkesir Biyogaz	1.5 MW
	3-Energrom Biyogaz	3.2 MW
	4-Karbio Biyogaz	2.1 MW
	5-Mutlular enerji	6.4/10.5 MW
	6-Toros Gübre	3.6 MW
BOLU	1-Mudurnu Enerji	2.4 MW
BURSA	1-Enfaş	6.4 MW
	2-Karacabey enerji	3 MW

Tablo 1. 'in devamı

ŞEHİR	BİYOĞAZ TESİSİ	LİSANS GÜCÜ/DEVREYE ALINAN
ÇANAKKALE	1-Askoç Enerji	3.2/9.3 MW
ÇANKIRI	1-Bekmezci Biyogaz	1.6/4.6 MW
	2-Zeyn Biyogaz	1.5 MW
ÇORUM	1-Çorum Biyogaz	6 MW
DENİZLİ	1-Denizli Biyogaz	1.5 MW
	2-Gireniz Biyogaz	1.5/3.2 MW
	3-Güney Biyogaz	3.2 MW
DİYARBAKIR	1-Askoç Biy.	4.2 MW
EDİRNE	1-Türkçim En.	1.5/3 MW
ELAZIĞ	1-Elerji Enerji	1.5/6 MW
ESKİŞEHİR	1-Dharma Enerji	1.5/9 MW
	2-Hisar Biyogaz	4.2/6 MW
	3-KD Gübre Enerji	3.2/4.6 MW
	4-Noventek enerji	3.2/4.6 MW
	5-Özgün Enerji	1.5/4.3 MW
GAZİANTEP	1-Gazi Biyogaz	1.5/6 MW
	2-Gazibel	1.1 MW
	3-Nizip Biyogaz	4.5 MW

Tablo 1. 'in devamı

ŞEHİR	BİYOĞAZ TESİSİ	LİSANS GÜCÜ/DEVREYE ALINAN
İZMİR	1-Arf Biyogaz	4.8 MW
	2-Energrom Biyogaz	3.2 MW
	3-Enfaş	4.3 MW
	4-Evb Biyogaz	4.6/6 MW
	5-Tire Biyogaz	4.8 MW
KAYSERİ	1-BYZ global	1.5 MW
	2-Cod enerji	3 MW
	3-Mir global	1.5/13 MW
KIRLARELİ	1-Ağman Biyogaz	4.8 MW
	2-Seleda	4.2 MW
KIRŞEHİR	1-Anka Biyogaz	1.65/5.12 MW
	2-Askoç Enerji	3.12/9.3 MW
	3-Çağlayanlar 2	4.6/9 MW
	4-Emin Biyogaz	3 MW
KONYA	1-Akoda Biyogaz	3.12 MW
	2-Asya Biyogaz	3/6 MW
	3-Beyaz Piramit	3/6 MW
	4-Ceylani Biyogaz	1.5/3 MW
	5-Gözlü Biyogaz	1/3.5 MW
	6-Konya Biyogaz	6/12 MW
	7-Toros Gübre	6 MW

Tablo 1. 'in devamı

ŞEHİR	BİYOGAZ TESİSİ	LİSANS GÜCÜ/DEVREYE ALINAN
KÜTAHYA	1-Yılmazlar Madencilik	1.5 MW
	2-WM enerji	1.5 MW
MALATYA	1-Tohma Biy.	1/12 MW
MANİSA	1-Ege Biy.	1.6/3 MW
	2-Turgutlu biyogaz	3 MW
NİĞDE	1-FlaşBor	1.5/5.3 MW
	2-Mey Biyogaz	1.2 MW
SAMSUN	1-Gzl En.	1.5 MW
SİVAS	1-Sehra En.	1.5/3 MW
ŞANLIURFA	1-Babil Biyogaz	1.6/4.6 MW
	2-Beüaş	1.3/2.6 MW
	3-Doğal Biyogaz	5.2 MW
	4-Şanlı Biyogaz	1.5/6 MW
YOZGAT	1-Çekerek Biyogaz	1.5/3 MW
AKSARAY	1-Enfaş A.Ş	5.3 MW
	2-Yapılcan Tohum	1 MW
	3-Yapılcanlar enerji	1.2 MW
KARAMAN	1-Karaman Enerji	1.5 MW

Yıllar içerisinde yapılan çalışmalar göstermiştir ki ülkemizde de biyogaz ile ilgili çalışmalar gün geçtikçe artmakta ve kurulan tesis sayısında da artışlar olmaktadır.

İKİNCİ BÖLÜM

KURAMSAL ÇERÇEVE

2.1.Biyogaz

Biyogaz, renksiz, yanıcı bir gazdır ve temel bileşenler; metan (CH_4) ve karbondioksit (CO_2) içerir. Ayrıca, az miktarda hidrojen sülfür, azot, oksijen ve karbonmonoksit içerebilir. Organik maddenin %40 ila %60'ı biyogaza dönüştürülür. Biyogaz üretimi sonrası kalan kısım ise; kokusuz olup gübre şeklinde kullanıma uygundur.

Tablo 2, biyogazın içeriğini hacimsel olarak göstermektedir (Gül, 2006). Bu bileşenler, kullanılan materyalin çeşidine bağlı olarak değişiklik gösterebilir.

Tablo 2. Biyogaz içeriği

metan (CH_4)	%65
karbondioksit (CO_2)	%35
azot (N_2)	%0,1-1
oksijen (O_2)	%0,01-0,2
hidrojen sülfür (H_2S)	10-4000 ppm

Biyogazın içinde bulunan metan, karışımın enerji içeriği bakımından temel bir bileşendir. Ayrıca, 1 m³ biyogazın, 0,66 lt motorin, 0,75 lt benzin, 0,25 m³ propana eşdeğer olduğu rapor edilmiştir (Gül, 2006). Biyogaz, genellikle organik atıkların metanojenik arkeler tarafından uygun sıcaklıkta ve pH değerinde oksijensiz koşullarda metan gazına ve karbondioksit gazına dönüşmesidir (Gül, 2006) .Tablo 3’de 1 m³ biyogaza karşılık gelen farklı yakıt türleri verilmiştir (Gül, 2006) .

Tablo 3. 1m³ biyogaza karşılık gelen farklı yakıt türleri

1 m ³ biyogaz	4700-5700 kcal
gaz yağı	0,62 litre
odun kömürü	1,46 kg
odun	3,47 kg
bütan gazı	0,43 kg
tezek	12,3 kg
elektrik enerjisi	4,70 kWh

2.2.Biyogaz Yan Ürünleri ve Kullanım Alanları

Biyogaz; ısıtma, aydınlatma şeklinde kullanılmasının yanı sıra, elektrik enerjisi ve mekanik enerji üretimi amaçlı kullanılabilen çok yönlü bir enerji kaynağıdır. Biyogaz üretim sonucunda oluşan yan ürünler değişik amaçlar için değerlendirilebilmektedir.

- Biyogazın Isı Amaçlı Kullanılması
- Enerji Amaçlı Biyogaz Kullanılması
- Biyogazın Motorlarda Kullanımı
- Yan Ürün Değerlendirme İmkânları

2.2.1.İsıtma Amaçlı Biyogaz Kullanılması

Metan ihtivası dolayısı ile biyogaz yanma özelliğine sahiptir. Biyogazın tam yanma gerçekleşmesi için hava ile 1/7 oranında karışması gereklidir. Bu özellikle ısıtma amacıyla kullanılan gaz yakıtlı fırın ve ocaklarda, termosifonlarda ve şofbenlerde biyogazın kullanılmasını mümkün kılar. Ayrıca, basınç ayarı yapılarak sıvılaştırılmış petrol gazı ile çalışabilen sobalarda biyogaz kullanılabilir. Biyogazın sobada kullanılması durumunda, içeriğindeki hidrojen sülfürün yanma işlemi gerçekleşmeden ortama yayılımını önlemek için baca sistemleri gereklidir. Bu sebeple, sağlıklı ısınma sağlayabilmek için genellikle kaloriferler tercih edilebilmektedir.

2.2.2. Enerji Amaçlı Biyogaz Kullanılması

Biyogaz, aydınlatma için iki şekilde kullanılabilir:

- doğrudan yanma
- elektrik üretimi.

Doğrudan yanma yönteminde; biyogaz, sıvılaştırılmış petrol gazları ile çalışan lambalarda yakılır. Bu lambalarda, amyant gömlek ve cam fanus, aydınlatma alevini artırmak için kullanılır.

Amyant gömlek, alevin etrafında bir hava bariyeri oluşturur ve bu da alevin daha verimli yanmasını sağlar. Cam fanus ise, ışığı sabitleştirmenin yanı sıra çıkan ısıyı geri vererek alevin daha parlak olmasını sağlar.

Elektrik üretimi yönteminde ise, biyogaz, bir gaz türbini veya jeneratör kullanılarak elektrik enerjisine dönüştürülür. Bu elektrik enerjisi, daha sonra aydınlatma için kullanılabilir. Bu yöntem, daha verimli bir aydınlatma sağlarken, daha az hava kirliliğine neden olur.

2.2.3. Biyogazın Motorlarda Kullanımı

Biyogaz, benzinle çalışan motorlarda doğrudan, dizel motorlarda ise belirli oranlarda motorin ile karıştırılarak kullanılabilir.

Benzinli motorlarda, biyogazın içerdiği diğer gazlar, yakıtın ateşlenmesini zorlaştırabilir. Bu nedenle, biyogaz, herhangi bir katkı maddesine ihtiyaç duymadan doğrudan kullanılamaz. Ancak, içerdiği metan gazı saflaştırılarak kullanılabilir. Bu durumda, biyogaz, benzin ile aynı şekilde kullanılabilir.

Dizel motorlarda ise, biyogazın içerdiği metan gazı, dizel yakıttan daha düşük bir enerjiye sahiptir. Bu nedenle, biyogazın dizel ile karıştırılması gerekmektedir. Bu karışımın oranı, motorun özelliklerine göre değişebilir. Genellikle, %18-20 oranında biyogaz ile %80-82 oranında motorin kullanılır.

Biyogazın, benzinli veya dizel motorlarda kullanılması, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmaya ve çevre kirliliğini önlemeye yardımcı olur.

2.2.4.Yan Ürün Değerlendirme İmkânları

Biyogaz üretiminin bir yan ürünü olan fermente organik gübre, sıvı, granül veya doğal kurutulmuş formda kullanılabilir. Anaerobik fermantasyon işlemi sırasında, patojen mikroorganizmalar çoğunlukla yok olur. Bu, oluşan organik gübrenin daha güvenli olmasını sağlar. Dünya nüfusunun artması ve teknolojinin gelişmesiyle birlikte, enerji tüketimi de artmaktadır. Bu durum, çevresel problemlerin ortaya çıkmasına ve doğal kaynakların tükenmesine neden olmaktadır. Bu nedenle, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyaç giderek artmaktadır.

Biyogaz, organik kökenli atık ve artık maddelerden üretilen bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Biyogazın üretimi sırasında, çevreye zararlı olan gazlar açığa çıkmaz. Ayrıca, biyogazın üretimi, organik atıkların bertaraf edilmesine yardımcı olur. Bu nedenle, biyogaz, çevre sorunlarının azaltılmasını ve enerji üretimi konusunda önemli bir potansiyele sahiptir (Gülen ve Çeşmeli, 2012).

2.3.Biyogaz Üretiminin Önemi

Organik madde bakımından zengin atıkların değerlendirilmesi ve çevre açısından kirliliğe neden olmaması ve aynı zamanda temiz enerji üretimine katkı sağlaması önemlidir. Biyogaz üretiminin temel amacı, çevre dostu enerji üretimini gerçekleştirmektir. Ancak, biyogaz üretiminin bir başka önemi de organik atıkları kontrol altında depolanmak, bu atıkların çevreye zarar vermeden bertarafını sağlamak, organik kaynaklı atıkların neden olduğu koku problemini ortadan kaldırmak ve organik gübre kullanımı sağlamaktır. Biyogaz, reaktörlerde belirli koşullar altında üretildiği için azot açısından zengindir. Biyogaz üretim amaçları;

- Üretilen enerji kalitesi bakımından oldukça iyidir.
- Organik atıklarda koku oluşumunu azaltır.
- Gübreden kaynaklı korozyon etkisi azdır ve gübre daha yoğundur.
- Atmosfere salınan amonyak ve metan gazı miktarları azdır.
- Bitkilerin besin kaybı azaltımı, azotun yıkanmasına gerek olmaması, bitkilerin besin yararlanımının artması, bitki sağlığına katkı sağlama gibi avantajları vardır.

- Organik madde dezenfeksiyon, yabancı otların gelişiminin azalması, organik atık sorununa olumlu katkı sağlaması açısından önemlidir (Çanka Kılç, 2011).

2.4.Biyogaz Üretimi ve Kullanılan Atıklar

Biyogaz üretimi esnasında kaynak olarak değişik seçenekler bulunmaktadır, öncelikli olarak nem içeriği yüksek katı formulu organik atıklar tercih edilmektedir. Biyogaz üretimi esnasında tercih edilebilecek organik atık türleri aşağıda listelenmiştir:

- Hayvansal kaynaklı gübreler
- Mezbahannede oluşan atıklar
- Kanalizasyon kaynaklı çamur ve dip çamurları
- Tarımsal kaynaklı atıkları
- Gıda endüstrisinde oluşan atıklar
- Belediye kaynaklı atıklar
- Biyolojik AAT çamurları
- Organik madde konsantrasyonu yüksek atıksular
- Endüstriden gelen organik katılar

Bu organik atıklar, anaerobik çürütme veya diğer biyogaz üretim yöntemleri kullanılarak enerjiye dönüştürülebilirler. Tablo 4.'de değişik kaynakların biyogaz ve metan verimleri görülmektedir (Gülen ve Çeşmeli, 2014).

Tablo 4. Değişik kaynaklarda biyogaz ve metan verimleri

Kaynak	Biyogaz Verim (Litre/kg)	Metan Oran (Hac. %'si)
Atıksu Çamuru	310-800	65-80
Algler	420-500	63
Domuz Gübresi	340-550	65-70
Kanatlı Hayvan Gübresi	310-620	60
Buğday Samanı	200-300	50-60
Sebze Kaynaklı Atıklar	330-360	Değişken
Dökülen Ağaç Yaprakları	210-290	58

2.5. Biyogaz Üretimi

Anaerobik fermentasyon, oksijensiz ortamda organik maddelerin bakteriler tarafından parçalanması ve enerji açığa çıkarması işlemidir. Biyogaz üretiminde kullanılan anaerobik fermentasyon;

1. Hidroliz
2. Asit Oluşumu
3. Metan Oluşumu aşamalarında gerçekleşmektedir.

2.5.1. Hidroliz Aşaması

Biyogaz üretiminin birinci aşamasında, fermentatif ve hidroliz bakterileri görev alır. Bu grup bakteriler karbonhidratlar, yağlar ve proteinleri parçalar. Fermentasyon, oksijen yokluğunda meydana gelen bir biyolojik süreçtir. Bu süreçte, organik madde; asetik asit, karbondioksit (CO₂) ve çözünebilir uçucu organik maddeye dönüşür.

Karmaşık yapılı organik moleküllerin mikroorganizmaların yardımıyla küçük ve basit yapılı moleküllere dönüşüm işlemi genellikle yavaş gerçekleşen bir süreçtir (Mata-Alvarez, 2002).

Hidroliz aşaması ile parçalanmış polimerik bileşikler vasıtasıyla üretilen moleküller çeşitli asit üreten mikroorganizma etkisi ile (glikoz, dekstroz, amino asit, yağ asidi, alkol, vb.) alkol içeren bileşiklere ve organik asitlere (valerik, propiyonik, bütirik) dönüşebilirler.

Hidroliz hızını etkileyen birkaç faktör bulunmaktadır, ancak en önemlileri;

- Çamur yaşı (mikroorganizma alıkoyma süresi)
- Sıcaklık
- pH olarak sıralanabilir.

Özellikle yağlar, hidrolizin oldukça yavaş gerçekleştiği bir süreçtir. Bu sebeple atıkların içerdiği yağ ve hidroliz aşaması yavaş gerçekleşen diğer maddeler, oksijensiz ortamda hidroliz hızını kısıtlayıcı etki gösteren bir faktör olabilir. Bu durum özellikle bazı selülozik atıkların oksijensiz ortamında da hidroliz hızını kısıtlayıcı bir etkisi olabilir (Öztürk, 1999).

2.5.2. Asit Oluşum Aşaması

Bu aşamada, hidroliz ürünleri özellikle asetik aside dönüştürülmekte olup, herhangi bir dış elektron alıcısı veya vericisine ihtiyaç duymadan mikrobiyal bir süreç olan asit üretimi gerçekleşir. Anaerobik fermentasyonun ikinci aşaması asitleşme sürecinde, farklı iki bakteri grubundan söz etmek mümkündür. Bu süreç sırasıyla asidojenez ve asetojenez aşamaları şeklinde adlandırılır.

Asidojenez aşaması, çeşitli asitlerin (propiyonik, bütirik, izobütirik, izovalerik ve valerik asit) üretimi gerçekleşir. Bu uçucu formdaki yağ asitleri, H_2 üreten bakteriler aracılığı ile asetik aside, hidrojen (H_2) ve karbondioksit (CO_2) dönüştürülür. Asidojenezin ardından, asetik asit üretimi gerçekleşir ve asetojenez aşaması gelir. Bu aşamada, iki asetojen bakteri grubu bir arada bulunarak, dominant asetojen bakterileri, asetatı (uçucu yağ asitleri) , CO_2 , H_2 üretir. Hidrojenotrofik Metanojen grup arkeler; CO_2 ve H_2 ile asetat dönüşümü sağlar. Asidojenler aracılığı ile uçucu yağ asitleri (bütirik, propiyonik, valerik elde edilir. Arıtma çamuru (karmaşık organik maddeler) gibi, maddelerin hidrolizden daha hızlı bir şekilde işlenir (Elalami vd., 2019).

2.5.3. Metan Oluşumu

Anaerobik fermantasyonun son aşaması metan üretimidir. Genellikle hız sınırlayıcı aşama olarak kabul edilir ve yavaş bir süreçtir. Bu aşamada, asit oluşum aşamasında oluşan asetik asidin metan arkeleri ile parçalanması veya H_2 ile CO_2 'nin sentezi sonucunda metan üretilir. Asit tüketen metanojenlerin reaksiyon hızları genellikle yavaştır, H_2 ve CO_2 tüketen bakteri türleri daha hızla çoğalırlar. Hızlı çoğalma, sistemdeki H_2 konsantrasyonu azalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, sistemde oluşan diğer reaksiyonlar ve bakteri faaliyetleri normal seyrinde devam ederler (Öztürk, 2007). Bu basamak metanojenez olarak adlandırılır.

Anaerobik fermantasyon sonucunda teorik olarak; metan %70 asetat ve %30 CO_2 ile H_2 'den üretilir. Fang ve ark. (2015) çalışmalarında, asetoklastik ve hidrojenotropik topluluklarda bu oranın 70/30 olabileceğini belirtmiştir. Ancak, esasen tüm bu oranla; çalışma koşullarına, hammaddenin bileşimine ve inhibitörlerin varlığı gibi etkenlere bağlıdır (Appels vd., 2008).

Anaerobik fermantasyon süresi;

- atık su
- atık organik madde türü
- ortam pH'ı
- içeriğindeki iyonlar gibi faktörlere bağlı olarak farklı sıcaklık bölgelerinde etkinlik gösteren mikroorganizmalar topluluğudur.

Metan oluşumu sırasında önemli bir rolü olan anaerobik fermantasyon üçüncü aşamasında etkin olan metan arkeleri, fermantasyonun sıcaklığına bağlı olarak üç farklı grupta incelenmektedir.

Bu aşamada;

1. Bekletme süresi
2. Atık su
3. Atık organik maddelerin türü
4. Ortam pH'ı
5. İçeriğindeki iyonlar gibi çeşitli faktörler, mikroorganizma topluluğunun yapısal ve fonksiyonel özelliklerini belirleyerek farklı sıcaklık bölgelerinde özel adaptasyonları tetikler. Metan arkeleri, bu sıcaklık bölgelerine bağlı olarak aktivitelerini sürdürür ve metan oluşum sürecini etkiler (Gül, 2006)

2.6. Biyogaz Üretimini Etkileyen Faktörler

Biyogaz üretimi, biyolojik bir süreç olup birçok dış etkenin etkisi altındadır. Biyogaz üretiminin en verimli şekilde gerçekleşebilmesi için ortamın uygun koşullarda olması oldukça önemlidir. Bu faktörler şu şekilde sıralanabilir (Gülen ve Çeşmeli, 2014).

Anaerobik çürütme sürecini etkileyen temel faktörler şunlardır:

- Reaktörün sıcaklığı
- Organik yükleme hızı
- pH
- C/N oranı
- Toksik Maddeler
- Karıştırma
- Bekletme süresi
- Basınç

2.7.Arıtma Çamurları

Atıksu arıtma tesislerinde uygulanan işlemlerin sonucunda oluşan arıtma çamuru, nüfus artışına bağlı olarak artma eğilimindedir. Bu durum, çamurun bertarafını atıksu arıtma tesislerinde önemli bir sorun haline getirmektedir. Çünkü bertaraf maliyeti, atıksu arıtma tesislerinin işletme maliyetlerinin önemli bir kısmını, yaklaşık olarak %50'sini oluşturmaktadır (Appels ve Baeyens, 2008). Çamurun anaerobik çürütülmesi işlemi, çamurun kararlı bir ürüne dönüştürülmesini sağlayarak ve aynı zamanda biyogaz üretimi ile enerji geri kazanımını mümkün kılarak bu soruna çözüm sunmaktadır.

Dünya genelindeki enerji krizine çözüm bulmak adına, Atıksu Arıtma Tesislerinden çıkan arıtma çamurlarının biyogaz üretiminde kullanılması, enerji kaynağı olarak değerlendirilebilir. Bu bağlamda; mikroalgler, kısa büyüme döngüleri, yüksek lipid içerikleri biyokütle birimi başına ve biyoteknolojik yöntemlerle kolayca modifiye edilebilme özellikleri nedeniyle kullanılabilir (Nascimento vd., 2013)

2.8.Mikroalgler

Mikroalgler, prokaryotik algler olan siyanobakteriler ile birlikte, ökaryotik algler arasında Chlorophyta, kırmızı algler (Rhodophyta) ve diatomlar (Bacillariophyta) gibi çeşitli türleri içerir.

Algler, 8 ökaryotik bölümden oluşmakta olup boyutlarına göre makroalgler ve mikroalgler olarak sınıflandırılmaktadır. Makroalgler, çıplak gözle görülebilen, büyük boyutlu ve çok hücreli algelerdir. Mikroalgler ise mikroskop altında görülebilen, sucul ekosistemin temel parçası olan mikroskobik tek hücreli alglerdir (Sisman-Aydin, 2019).

Mikroalglerin bileşiminde;

- lipitler %4-55,
- karbonhidratlar %6-57,
- proteinler %10-63 gibi çeşitli bileşenler bulunmaktadır (Elcik ve Çakmacı, 2017).

Bu organizmalar, küresel fotosentezin en az %32'sinden ve atmosferik oksijenin yaklaşık yarısından sorumlu olan fotosentetik mikroorganizmalardır (Safi, 2014; Kumar, 2015).

Mikroalg türlerine göre farklı miktarlarda lipid, hidrokarbon ve diğer kompleks yağlar üretebilirler (Banerjee vd., 2002; Metzger ve Largeau, 2005; Guschina ve Harwood, 2006). Tablo 5.de, çeşitli mikroalg türlerinin yağ içeriği ve verimliliğini göstermektedir (Mata 2010). Mikroalgler, fotosentez hızlarının diğer karasal bitkilere göre daha yüksek olması nedeniyle biyoyakıt üretiminde tercih edilen bir kaynaktır. Karasal bitkilere göre, trigliserit üretiminde 45 ila 220 kat daha fazla verim elde edilebilmektedir. Alglerin içeriği, biyogaz üretimine olumlu katkı sağlaması beklenmektedir.

Mikroalgler, yüksek fotosentetik etkinlik, hızlı biyokütle büyüme oranı, çeşitli kirlilik türlerine direnç ve kullanılamayan arazi yönetimi olasılığı gibi avantajlarla dikkat çekmektedir. Bu özellikler, algleri tipik enerji ürünleriyle rekabetçi kılmaktadır. Şu ana kadar yapılan araştırmaların büyük bir kısmı, alg hücrelerinde biriken lipitlere dayalı biyodizel üretim teknolojilerine odaklanmıştır. Literatürde, farklı özelliklere sahip birçok mikroalg türü bulunmakta olup bu türlerin çeşitli uygulama alanları bulunmaktadır.

Mikroalgler, uygun maliyetli bir hammadde olarak kabul edilen biyoenerji üretimi için potansiyele sahip bir kaynaktır (Kannah vd., 2021). Biyogaz üretimi için mikroalglerin pek çok avantajı bulunmaktadır. Mikroalglerden elde edilen biyoenerji, 1950'lerden bu yana birçok araştırmacının üzerinde çalıştığı bir alan olmuştur. Ancak, bu çalışmalar henüz mikroalg kullanımının biyoenerji ve alternatif ürün üretimi açısından laboratuvar ölçeğinin ötesine geçmemiştir. Mikroalgler, çeşitli biyoyakıtların üretiminde hammadde kaynağı olarak kullanılmaktadır. Mikroalgal biyokütle bozunması sonucunda metan, biyodizel ve biyohidrojen üretilmektedir.

Tablo 5. Farklı mikroalg türlerinde yağ miktarı ve verimliliği

Mikroalg Türü	Yağ içeriği (%kuru ağırlık biyokütle)	Yağ Üretkenliği (mg/Lgün)	Biyokütlenin Hacimsel Üretkenliği (g/Lgün)	Biyokütlenin alansal üretkenliği (g/m²gün)
<i>Chlorella emersonii</i>	25,5-63,0	10,3-50,0	0,036-0,041	0,91-0,97
<i>Chlorella sorokiniana</i>	19,0-22,0	44,7	0,23-1,47	-
<i>Chlorella vurgais</i>	5,0-58,0	11,2-40,0	0,02-0,20	0,57-0,95
<i>Chlorella sp.</i>	10,0-48,0	42,1	0,02-2,5	1,61-16,47/25
<i>Chlorella protothecoides</i>	14,6-57,8	1214	2-7,7	-
<i>Dunaliella salina</i>	6,0-25,0	116	0,22-0,34	1,6-3,5/20-38
<i>Nannochloropsis oculata</i>	22,7-29,7	84,0-142,0	0,37-0,48	-
<i>Nannochloropsis sp.</i>	12,0-53,0	37,6-90,0	0,17-1,43	1,9-5,3
<i>Scenedesmus sp.</i>	19,6-21,1	40,8-53,9	0,03-0,26	2,43-13,52
<i>Tetraselmis suecica</i>	8,5-23,0	27,0-36,4	0,12-0,32	19

2.9.Arıtma Çamuru ve Mikroalglerin Birlikte Sindirimi

Tablo 6’da anaerobik koşullarda farklı mikroalglerin farklı substratlar ile ortak sindirilmesi ve oluşan metan verimi verilmiştir.

Tablo 6. Anaerobik koşullarda farklı mikroalg ortak sindirimi

Mikroalgal Suş	Birlikte Sindirilmiş	Operasyonel Koşul	Verim (mL/gVS)	Referans
<i>Nannochloropsis</i> (lipid ekstrakte edilmiş biyokütle)	sıvı yağ ve gres atığı	Karışım oranı: 50:50 (VS) OLR:2gVS/L d T:37 °C, süre: 40 d	400 (metan)	Park ve Li, 2012
<i>Nannochloropsis gaditana</i>	Selüloz	Karışım oranı: 50:50 (VS) T:37 °C 2L kesikli reaktör süresi: 45 d	268 (metan)	Barontini vd., 2016
<i>Nannochloropsis limnetica</i>	Domuz gübresi	Karışım oranı: 40:60 (VS) T: 53 °C OLR:2 gVS/L	355 (metan)	Tsapekos vd., 2018
<i>Nannochloropsis oculata</i>	İnek gübresi	T:35±2 °C, pH:7.2, süre: 90 gün 550 mL mikroalg+1000g inek gübresi +1000 mL çamur	300 (metan)	Saleem vd., 2020

Tablo 6. 'nın devamı

Mikroalgal Suş	Birlikte Sindirilmiş	Operasyonel Koşul	Verim (mL/gVS)	Referans
<i>Chlorella sp.</i>	atık aktif çamur	Karışım oranı: 41:59 (TS) T:37 °C	468 (metan)	Wang vd., 2013
<i>Chlorella sp</i>	Septik çamur	Karışım oranı:50:50 (VS) T: 35 °C ilk C/N oranları 11:1 ila 27:1 zaman: 30 d	547.3±35 .6 (metan)	Lu ve Zhang, 2016
<i>Selenastrum capricornutum</i>	Aritma çamuru	Karışım oranı: 50:50 (VS), T:33 °C	392 (biyogaz)	Caporgno vd., 2015

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM

Araştırma, 1000 ml hacminde beş kesikli anaerobik şartlarda reaktör kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Anaerobik reaktörlerin pH aralığı, 6.8-7.2, sıcaklık 37 °C ve karıştırma hızı 90 rpm ve 40 gün çalıştırılmıştır. Arıtma çamuru bir arıtma tesisinden temin edilmiş, anaerobik aşı çamuru da bira endüstrisinden, anaerobik reaktörden alınmıştır. Numunelerde TKM (Toplam Katı Madde), TUKM (Toplam Uçucu Katı Madde) deneyleri yapılmıştır.

Reaktörler, arıtma çamuru, alg ve anaerobik aşı çamurunun farklı oranlarda (%40 mikroalg, %32 mikroalg, %22 mikroalg, %12 mikroalg, %0 mikroalg) karıştırılarak kurulmuştur. Katı madde oranı yaklaşık %12 olacak şekilde reaktörler beslenmiştir. Sadece arıtma çamurundan bir farklı reaktör kurulmuştur.

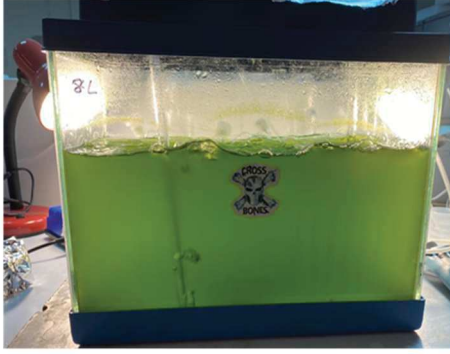
Reaktör kurulumundan sonra anaerobik şartları sağlamak için reaktörlerden azot gazı geçirilmiş, reaktörlerde oluşan biyogaz miktarları yaklaşık olarak 40 gün süre ile izlenmiştir.

3.1.Arıtma Çamuru ve Aşı Çamurunun Karakterizasyonu

Bu çalışmada arıtma çamuru, anaerobik reaktörlerin işletilmesi için Kepez Atıksu Arıtma Tesisi'nden arıtma çamuru ve anaerobik tesisten aşı çamuru alınmış ve laboratuvarda pH, TKM (Toplam Katı Madde), TUKM (Toplam Uçucu Katı Madde) içeriği açısından incelenmiştir.

3.1.1.Mikroalg Temini

Çalışmada kullanılan mikroalg türü olan Nannochloropsis Çevre Mühendisliği Su ve Atıksu Laboratuvarlarında yetiştirilmektedir. Şekil 1. Mikroalg havuzunu ve mikroalg türünün mikroskop imajını göstermektedir. Anaerobik reaktörlerde kullanılacak mikroalg, bu havuzdan temin edilmiştir.

Mikroalg havuzu	
Nannochloropsis mikroskop imajı (40X)	

Şekil 1. Mikroalg havuzu ve mikroalg türünün mikroskop imajı (40X)

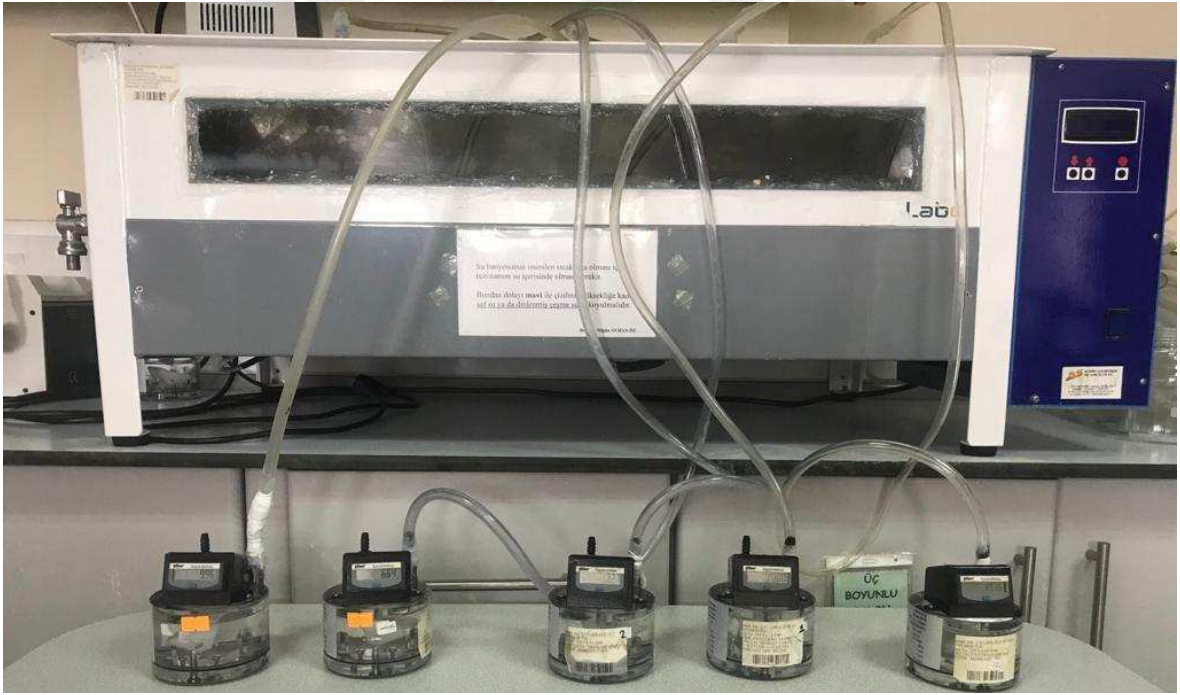
3.1.2.Biyogaz Reaktör Düzeneği

Reaktör düzeneği; karıştırıcılı ve ısıtıcılı su banyosunun içine koyulan 1'er litrelik özel yapım cam reaktörleri içermektedir. Çıkan biyogaz şeffaf bir boru ile bağlı MGC ler yardımı ile takip edilmiştir. Arıtma çamuru ve mikroalg karışımları kullanılarak çeşitli koşullar altında anaerobik ayrışma prosesi uygulanmış ve belirlenen optimum koşullar altında çalıştırılmıştır. Anaerobik reaktörler pH 6.8-7.2 aralığında, sıcaklık 35 ± 2 °C ve karıştırma hızı 90 rpm olacak şekilde çalıştırılmıştır. Başlangıçta reaktörlerde anaerobik şartlar azot gazı geçirilerek sağlanmıştır. Anaerobik reaktörlerde alkalinite 1500-2500 mg CaCO_3/L olacak şekilde sodyum bikarbonat ilavesi ile sağlanmıştır. Proses öncesi ve sonrası reaktörlerden alınan numunelerde; pH, TKM (Toplam Katı Madde) ve TUKM (Toplam Uçucu Katı Madde) parametreleri takip edilmiştir. Reaktörde katı madde oranları %12 olacak şekilde ayarlanmıştır. Eş zamanlı olarak reaktörlerde oluşan biyogaz miktarı izlenmiştir.

Şekil 2. ve Şekil 3. Laboratuvar ortamında kurulan reaktörleri, deney düzeneğini ve MGC (gaz ölçüm cihazı) göstermektedir.



Şekil 2. Laboratuvar ortamında hazırlanan reaktörler



Şekil 3. Laboratuvar ölçekli reaktörler düzeneği ve MGC (gaz ölçüm cihazı) ile ölçülmesi

Reaktörlerin karışım oranları;

Birinci Reaktör; aşı %20, çamur %40, alg %40

İkinci Reaktör; aşı %20, çamur %42, alg %32, su %6

Üçüncü Reaktör; aşı%20, çamur %44, alg %22, su %14

Dördüncü Reaktör; aşı%20, çamur %50, alg %0, su %30

Beşinci Reaktör; aşı %0, çamur %80, alg %0, su %20

Altıncı Reaktör; aşı %20, çamur %48, alg %12, su %20

3.1.3.Aletler-Araçlar-Gereçler-Cihazlar

Deneysel çalışmalarda kullanılan cihazlar aşağıdaki gibidir.

- Çoklu ölçüm cihazı,
- 1'er litrelik cam reaktörler,
- Karıştırıcılı su banyosu,
- Miligas Counter (MGC)
- Silikon tıpa,

3.2.Analitik Metotlar

Aritma çamurunda, işletme sonrasında meydana gelen değişimlerin izlenmesi için pH, TKM (Toplam Katı Madde), TUKM (Toplam Uçucu Katı Madde), parametreleri takip edilmiştir.

Kullanılan Cihaz ve Malzemeler:

- Porselen Kroze
- Filtre
- Kül Fırını
- Etüv
- Desikatör
- Hassas Terazî
- Kroze Maşası

Tablo 7. Analitik Metotlar

PARAMETRE	METOT	ENSTRUMAN
pH	4500-H B Metot Electrometric (APHA, AWWA-WPCF-1992)	ORION SA 520 pH meter
UAKM	Standart Metot-2540 D	Filtre set, etüv, fırın
İletkenlik	2510 B Metot (APHA, AWWA-WPCF-1992)	
Biyogaz	Gaz ölçümü	MGC
Toplam Katı Madde	Standart Metot -2540-B	Etüv
Uçucu Katı Madde	Standart Metot -2540-E	Etüv ve fırın
Mikroskop	Moticam1 1280*720	Motic

3.3. Bibliyometrik Analiz Metodoloji

Araştırma verileri Aralık 2023’de Web of Science veri tabanından elde edilmiştir. Bu veri tabanının seçilmesindeki en büyük sebep dünyanın önde gelen yayınların yayınlandığı bir veri tabanı olmasıdır. Araştırmada seçilen anahtar kelimelere göre toplam 129 adet makaleye ulaşılmıştır. Yapılan analizler en çok atıf alan çalışmalar, en çok hangi yıllarda yayın çıktığı, ülkelere göre yapılan çalışmalar gibi analizler VOSviewer yazılımı ile analiz edilmiştir. Web of Science’da yapılan tarama için microalgae, sludge, biogas ve co-digestin anahtar kelimeleri ile 129 adet makaleye ulaşılmıştır.

3.4. Sistemik Derleme Çalışması Metodoloji

Sistemik analiz çalışması yapılırken Web of Science da dört anahtar kelime, microalgae, sludge, biogas ve co-digestion seçilerek son 5 yıllık makalelerde tarama yapılmıştır. Sonuç olarak 70 adet makaleye ulaşılmıştır. İlgisiz olan makaleler inceleme dışı bırakılmıştır.

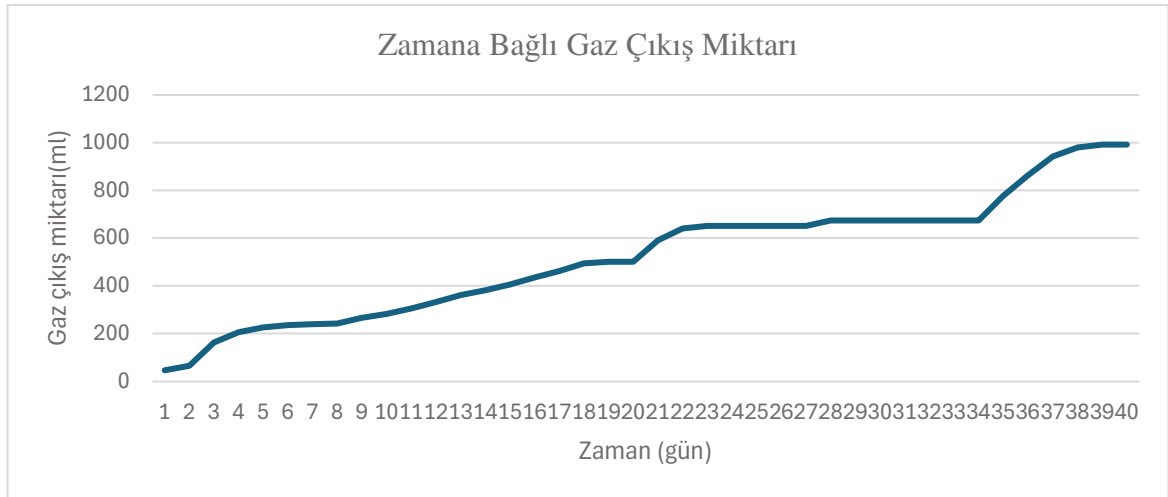
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Deneysel çalışma sonuçları

Deneysel çalışma için altı adet reaktör değişik oranlarda aşı, çamur, alg ve su karışımları ile 37°C de karıştırılarak, pH 6,8-7,2 aralığında olacak şekilde ayarlandı. 2 mg Sodyum bikarbonat ilave edilerek 10-15 sn azot gazı basılarak ısıtıcıya yerleştirildi. Arıtma çamurunun TKM değeri ortalama 22213 mg/L, TUKM değeri ise ortalama 16777 mg/l'dir. Aşı çamurunun ise TKM değeri ortalama 60942 mg/L, TUKM değeri ise ortalama 42397 mg/l'dir. Günlük olarak gaz çıkış miktarlarına bakıldı ve 40 günlük çalışma sonrasında oluşan gaz miktarları ölçüldü. Oluşan gaz miktarları aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir.

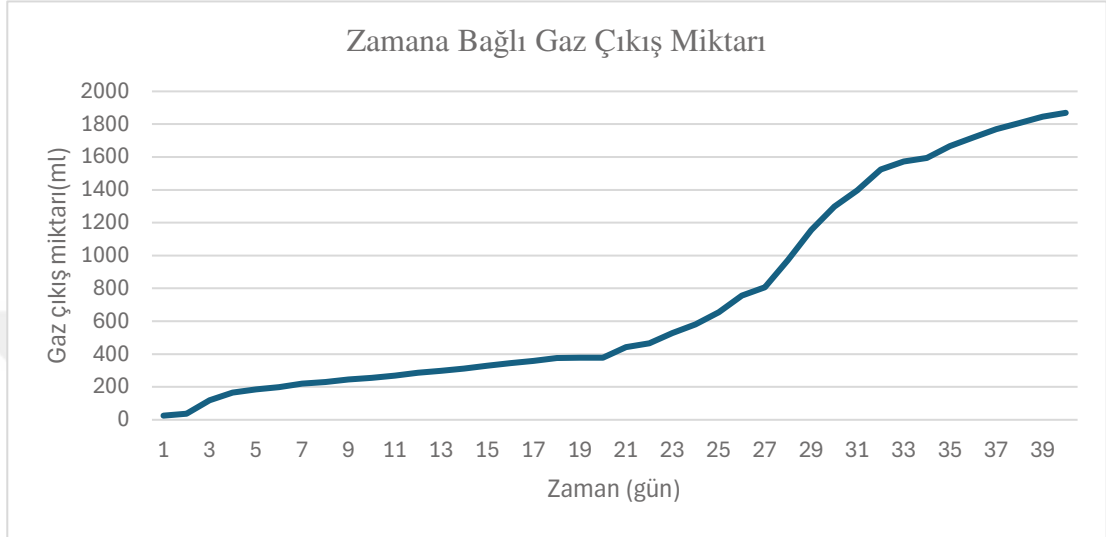
Birinci reaktör, 1000 ml'lik reaktörde yüzdelik olarak %20 aşı, %42 çamur, %40 mikroalg, %0 su olacak şekilde oluşturulmuştur. Başlangıçta reaktörde katı madde oranı %12 olacak şekilde ayarlanmıştır. Şekil 4.de görüldüğü gibi yaklaşık 40 günlük bekleme süresinde oluşan gaz miktarı 992 ml'dir. Zaman bağlı olarak yavaş yavaş bir gaz oluşumu gözlemlenmiştir. Bir süre sonra gaz çıkışı sabitlenmiştir.



Şekil 4. Birinci reaktör zamana bağlı gaz oluşum miktarı

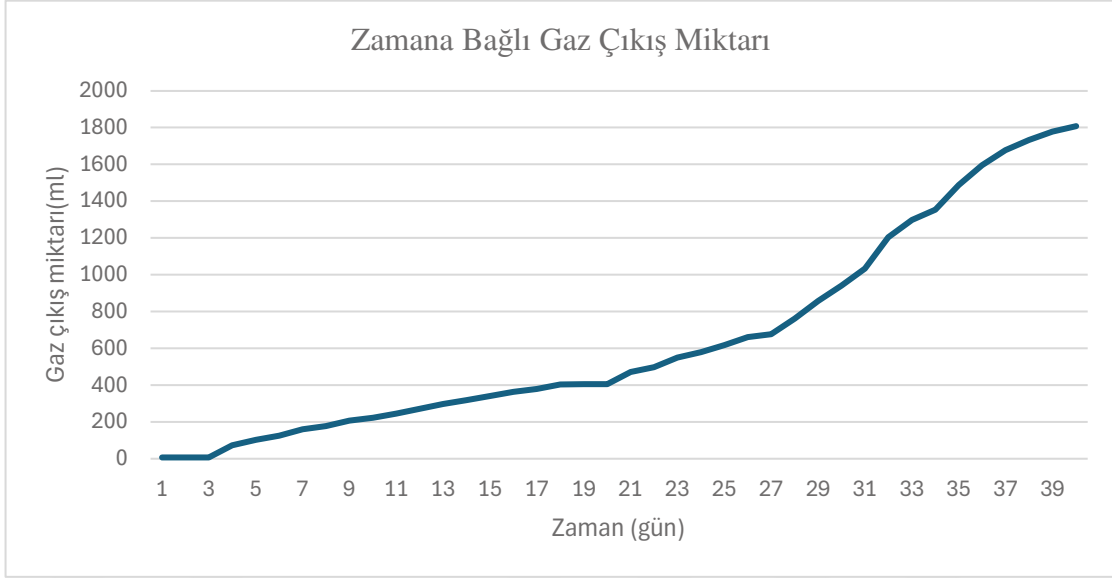
İkinci reaktör, 1000 ml'lik reaktörde yüzde olarak %20 aşı, %42 çamur, %32 mikroalg, %6 su olacak şekilde deney düzeneği oluşturulmuştur. Başlangıçta reaktörde katı madde oranı %12 olacak şekilde ayarlanmıştır. Şekil 5.'de görüldüğü gibi yaklaşık 40

günlük bekletme süresi sonunda 1869 ml’lik gaz çıkışı gözlemlenmiştir. Kurulan 6 adet reaktör içerisinde eşit sürelerde gaz çıkış miktarı en yüksek olan ikinci reaktördür. Şekil 6.da ikinci reaktörün zamana bağlı gaz çıkış miktarı görülmektedir.



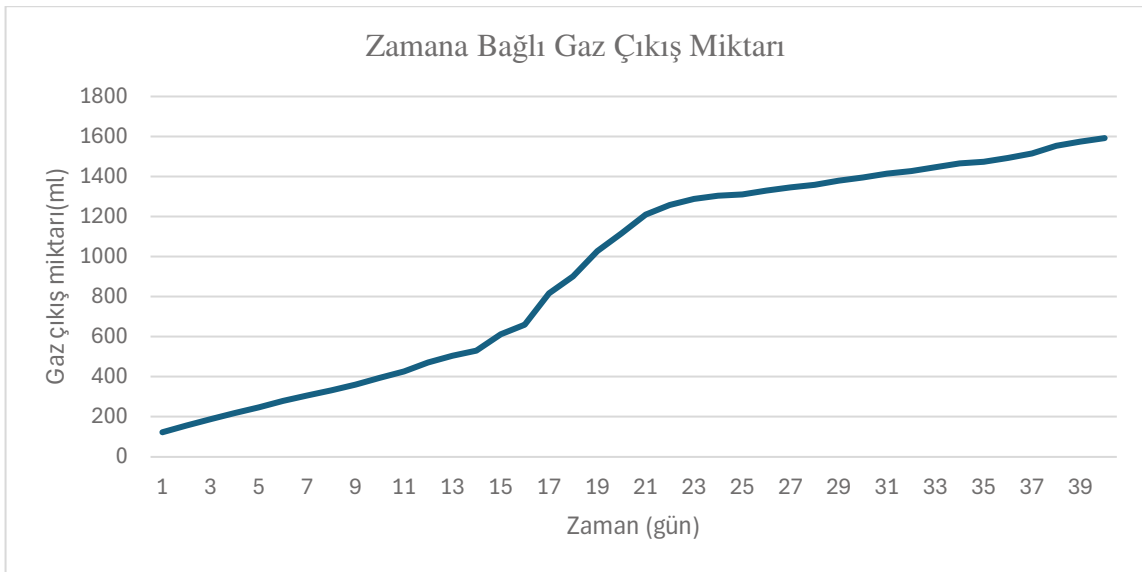
Şekil 5. İkinci reaktör zamana bağlı gaz oluşum miktarı

Üçüncü reaktör, 1000 ml’lik reaktör yüzde olarak %20 aşı, %44 çamur, %22 mikroalg, %14 su olacak şekilde kurulmuş olup 40 günlük bekletme süresinde gözlenen gaz çıkış miktarı 1808 ml olmuştur. Başlangıçta reaktörde katı madde oranı %12 olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu reaktörde oluşan biyogaz miktarı açısından üçüncü en fazla biyogaz üretimini sağlamıştır. Şekil 6.’ da üçüncü reaktörün zamana bağlı olarak artan miktarda sürekli bir gaz çıkışı olduğu görülmektedir.



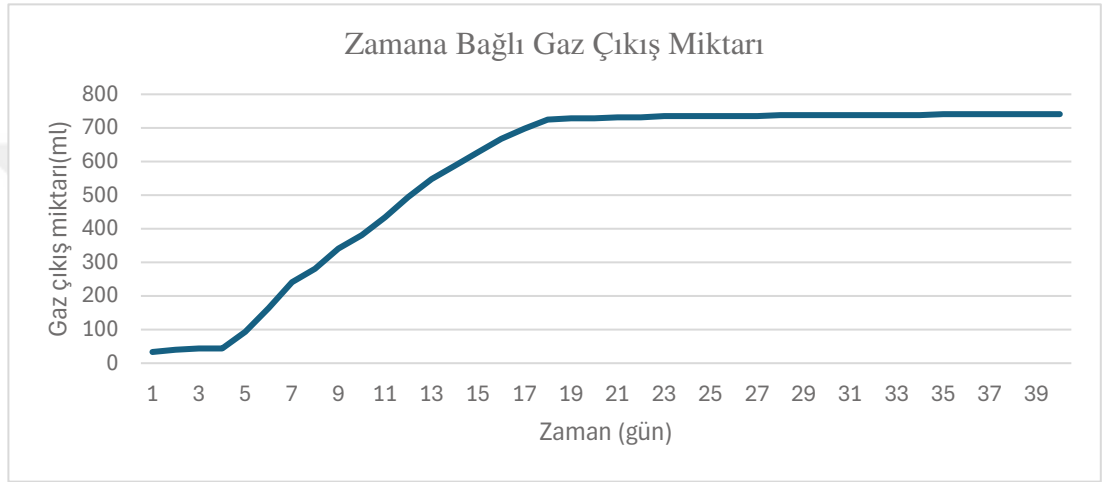
Şekil 6. Üçüncü reaktör zamana bağlı gaz oluşum miktarı

Dördüncü reaktör, 1000 ml'lik reaktörde yüzde olarak %20 aşı, %50 çamur, %0 mikroalg, %30 su olacak şekilde deney düzeneği hazırlanmıştır. 40 günlük bekletme süresi sonunda 1592 ml biyogaz çıkışı ölçülmüştür. Başlangıçta reaktörde katı madde oranı %12 olacak şekilde ayarlanmıştır. Mikroalg eklemesi olmamasına rağmen aşı, çamur ve su karışımı belli bir gaz oluşumunu sağlamıştır. Bu reaktörde üretilen gaz miktarı üretim olarak dördüncü sıradadır. Şekil 7.'de dördüncü reaktörün zamanla gaz çıkış miktarının artışının sürekli olduğu görülmektedir.



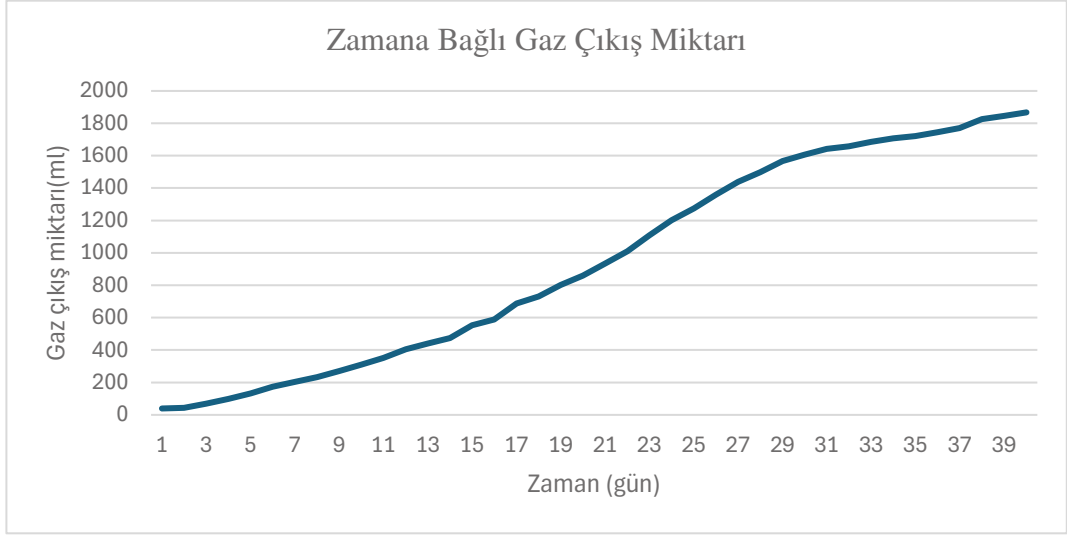
Şekil 7. Dördüncü reaktör zamana bağlı gaz oluşum miktarı

Beşinci reaktörde, 1000 ml'lik reaktör yüzde olarak %0 Aşı, %80 Çamur, %0 Mikroalg, %20 Su olacak şekilde 40 günlük çalışma süresi boyunca gaz çıkış miktarı 741,48 ml olarak ölçülmüştür. Sistemde aşı ve mikroalg varlığının olmaması gaz çıkışı açısından en düşük verimin alınmasına neden olmuştur. Şekil 8.'da beşinci reaktörde gaz çıkışının belli bir artışta olup sonrasında sabit kaldığı görülmektedir.



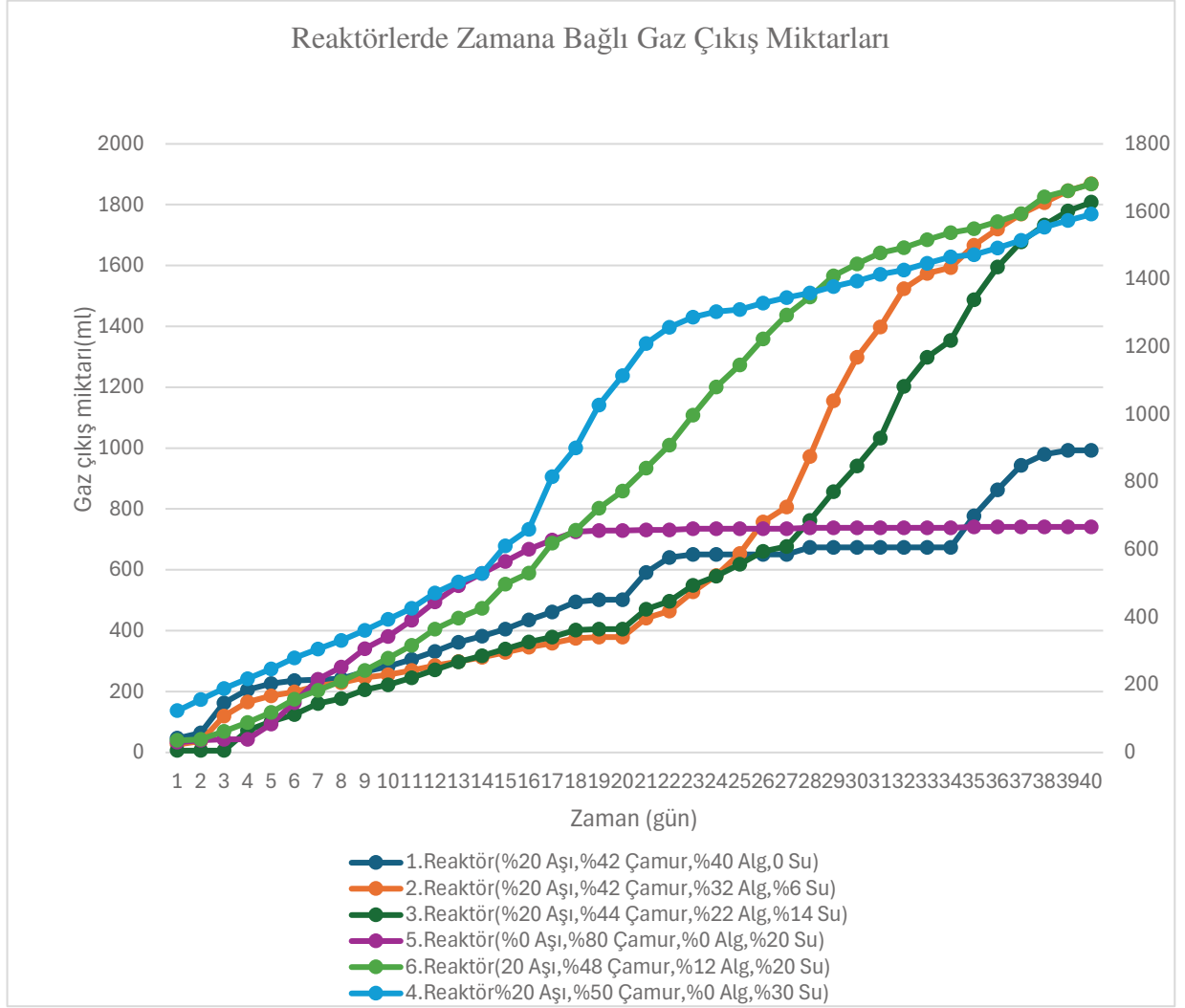
Şekil 8. Beşinci reaktör zamana bağlı gaz oluşum miktarı

Altıncı reaktör, 1000 ml'lik reaktör yüzdelik karışım oranı olarak %20 aşı, %48 çamur, %12 mikroalg, %20 su olacak şekilde deney düzeneği kurulmuş ve 40 günlük gaz çıkışı takip edilmiştir. Bu süre sonunda oluşan gaz miktarı 1868 ml olarak ölçülmüştür. Bu değer ikinci en fazla gaz çıkış değeri olarak kaydedilmiştir. Şekil 9.da altıncı reaktörde zamanla gaz çıkışının düzenli bir şekilde artış gösterdiği görülmektedir.



Şekil 9. Altıncı reaktör zamana bağlı gaz oluşum miktarı

Şekil 10.de altı adet reaktörün 40 günlük süre içerisinde gaz çıkış miktarları görülmektedir. Bu grafikten de anlaşılacağı gibi 2. reaktör, 3. reaktör ve 6.reaktörlerdeki gaz çıkış miktarlarının yaklaşık olarak aynı seviyelerde olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar %32, %22 ve %12 lik mikroalg yüklemesi yapılan reaktörlerdeki gaz çıkış miktarlarının en verimli sonucu vermektedir.



Şekil 10. Altı reaktörün zamana bağlı gaz oluşum miktarı

Aşağıda Tablo 8.'de laboratuvarıda 40 günlük bekletme süresinde hazırlanan altı adet reaktörde oluşan gaz oluşum miktarlarının değişimleri günlük olarak görülmektedir. Birinci ve beşinci reaktörlerde artışlar küçük miktarlarda olmakta ve zaman içerisinde sabit değerler görülmektedir. İki, üç, dört ve altıncı reaktörlerde gaz çıkış miktarları sürekli artış halinde gözlenmektedir.

Tablo 8. Reaktörlerin günlük gaz oluşturma miktarları

1.Reaktör(%20 Aşı,%42 Çamur,%40 Alg,0 Su)	2.Reaktör(%20 Aşı,%42 Çamur,%32 Alg,%6 Su)	3.Reaktör(%20 Aşı,%44 Çamur,%22 Alg,%14 Su)	4.Reaktör%20 Aşı,%50 Çamur,%0 Alg,%30 Su)	5.Reaktör(%0 Aşı,%80 Çamur,%0 Alg,%20 Su)	6.Reaktör(20 Aşı,%48 Çamur,%12 Alg,%20 Su)
46,48	26,56	6,54	123,5	33,4	39,48
64,4	36,52	6,54	156,00	40,08	42,77
162,68	119,52	6,54	188,50	43,42	69,09
205,84	166,00	71,94	217,75	43,42	98,7
225,76	185,92	101,31	247,00	93,52	131,6
235,72	199,2	124,26	279,50	163,66	174,37
239,04	219,12	160,23	305,50	240,48	203,98
242,36	229,08	176,58	331,50	280,56	233,59
265,60	245,68	206,00	360,75	340,68	269,78
282,2	255,64	222,36	393,25	380,76	309,26
305,44	268,92	245,25	425,75	434,20	352,03
332,00	285,52	271,41	471,25	494,32	404,67
361,88	298,8	297,57	503,75	547,76	440,86
381,80	312,08	317,19	529,75	587,84	473,76
405,04	328,68	340,08	611,00	627,92	552,72
434,92	345,28	362,97	659,75	668,00	588,91
461,48	358,56	379,32	815,75	698,06	687,61
494,68	375,16	402,21	900,25	724,78	730,38
501,32	378,48	405,48	1027,00	728,72	802,76
501,32	378,48	405,48	1114,75	728,92	858,69
590,96	441,56	470,88	1209,00	731,46	934,36
640,76	464,8	497,04	1257,79	731,46	1010,03
650,72	527,88	549,36	1287,00	734,80	1108,73
650,72	581,00	578,79	1303,25	734,80	1200,85
650,72	654,04	618,03	1309,75	734,80	1273,23
650,72	756,96	660,54	1329,25	734,80	1358,77
650,72	806,76	676,89	1345,50	734,80	1437,73
673,96	972,76	761,91	1358,50	738,14	1496,95
673,96	1155,36	856,74	1378,00	738,14	1566,04
673,96	1298,12	941,76	1394,25	738,14	1605,52
673,96	1397,72	1033,32	1413,75	738,14	1641,71
673,96	1523,88	1203,36	1426,75	738,14	1658,16
673,96	1573,68	1298,19	1446,25	738,14	1684,48
673,96	1593,60	1353,78	1465,75	738,14	1707,51
776,88	1666,64	1487,85	1472,25	741,48	1720,67
863,20	1719,76	1595,76	1491,75	741,48	1743,7
942,88	1769,56	1677,51	1514,50	741,48	1770,02
979,40	1806,08	1733,1	1553,50	741,48	1825,95
992,68	1845,92	1778,88	1573,00	741,48	1845,69
992,68	1869,16	1808,31	1592,00	741,48	1868

Reaktörlerde katı madde oranı, %12'lik kuru madde miktarına göre kurulmuştur. Kurulan laboratuvar ölçekli altı adet reaktör Tablo 9.'da gösterilen oranlarda mikroalg, çamur, aşı, seyreltme suyu ile 40 günlük bekletme süresi, 37°C sıcaklıkta ve karıştırma işlemi yapılarak gaz çıkış miktarları MGC ile ölçülmüştür.

Tablo 9. Mikroalg oranlarına bağlı karışım miktarları ve gaz çıkış miktarı

40% <i>Nannochloropsis</i> mikroalg	32% <i>Nannochloropsis</i> mikroalg	22% <i>Nannochloropsis</i> mikroalg	12% <i>Nannochloropsis</i> mikroalg	0% <i>Nannochloropsis</i> mikroalg
992 ml gaz miktarı	1869 ml gaz miktarı	1808 ml gaz miktarı	1868 ml gaz miktarı	1592 ml gaz miktarı

Sonuçlar incelediğinde mikroalglerin belirli bir orana kadar arıtma çamurundan biyogaz üretimine olumlu katkı yaptığı görülebilir. Mikroalg oranı toplamda %40 oranına ulaştığında biyogaz üretiminin önemli düzeyde azaldığı gözlenmiştir. Algler genellikle düşük bir C/N oranına sahiptir ve bu nedenle çürüme sonrasında önemli miktarlarda amonyak üretilebilir, bunun da metan verimini azaltabileceği literatürde belirtilmiştir (Markou ve ark. 2013). Bu çalışmada mikroalg oranı %40 oranına arttırıldığında bu nedenle biyogaz üretiminde azalma meydana gelmiş olabilir. Bu nedenle atıkların karışım oranının doğru belirlenmesi önem taşımaktadır.

Çalışma sonuçlarının literatür ile kıyaslanması ve literatürdeki yerinin anlaşılması açısından bibliyometrik ve sistematik analiz yapılmıştır.

4.2. Bibliyometrik Analiz

Bu çalışma kapsamında mikroalglerin arıtma çamurundan biyogaz üretimi ile ilgili yapılan önceki çalışmaların belirlenmesi için bibliyometrik analiz yapılmıştır. Nicel bir araştırma tekniği olan bibliyometrik analizde atıf konusunda incelenen temel parametreler en çok atıf alan çalışma, en çok atıf alan yazar, en çok atıf alan dergi, en çok çalışılan konular, en fazla işbirliği yapılan ülkeler, yazarların birlikte atıf yaptıkları çalışmalar

(Bibliometrik coupling), bir çalışmada birlikte atıf yapılan yazarlar ve yazarların belirli bir konuda öne çıkardıkları kelimeler ve kavramlar gibi başlıkla olarak sıralanabilir.

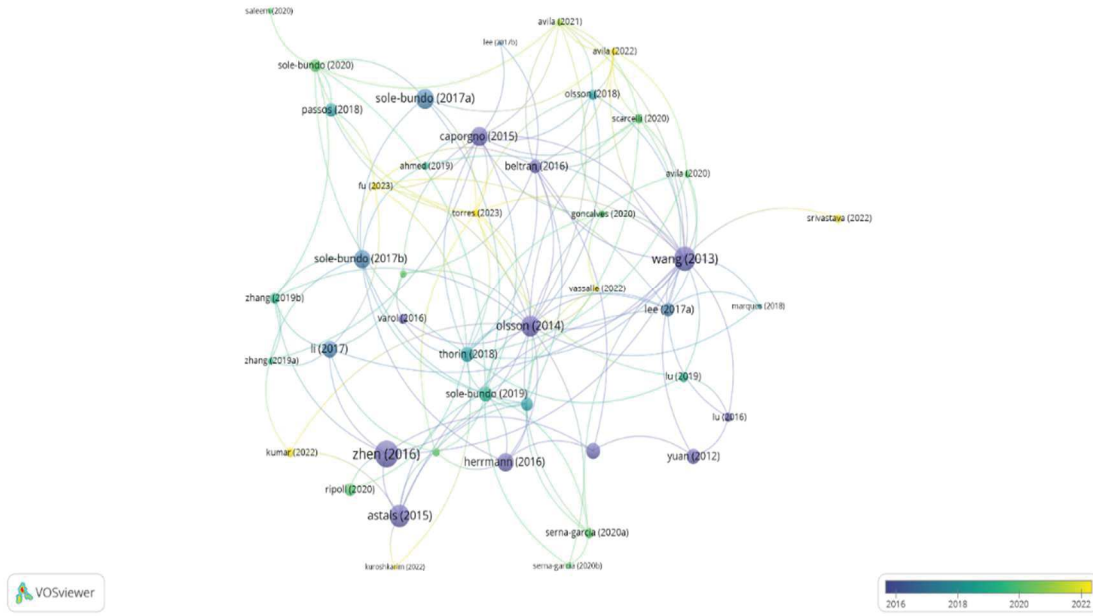
Seçilen anahtar kelimeler ile biyogaz ile ilgili en çok yapılan araştırmaları, en çok yayın yapan yazarları, yazarları ve ülkeleri belirleyebilmek, ülkeleri, organizasyonları, en çok atıf alan çalışmalar, bu alanda yapılan araştırmalarda kullanılan anahtar kelimeleri analiz ederek yıllar içerisindeki gelişimi takip etmek için önemli unsurlardandır. Bibliyometrik analizler sayesinde biyogaz ile ilgili olarak son dönemde yapılan çalışmalar belirlenmekte, uluslararası alanda literatürde yeni çalışmalar takip edilmekte ve bu alanlarda yeni çalışmalar yapmak isteyen araştırmacılara rehberlik niteliğinde çalışmalar ortaya çıkmaktadır.

Mikroalglerin arıtma çamurundan biyogaz üretimine etkisinin araştırıldığı literatür çalışmasında Aralık 2023’de analiz birimi olarak Web of Science veri tabanında tarama yapılmıştır. Web of Science’da Yapılan taramada microalgae, sludge, biogas ve co-digestion anahtar kelimeleri ile 129 adet yayınlanmış makalenin bibliyometrik verisi baz alınmıştır. Yapılan analizler en çok atıf alan çalışmalar, en çok hangi yıllarda yayın çıktığı, ülkelere göre yapılan çalışmalar gibi analizler VOSviewer yazılımı ile analiz edilmiştir. yapılan tarama için microalgae, sludge, biogas ve co-digestion anahtar kelimeleri ile 129 adet makaleye ulaşılmıştır.

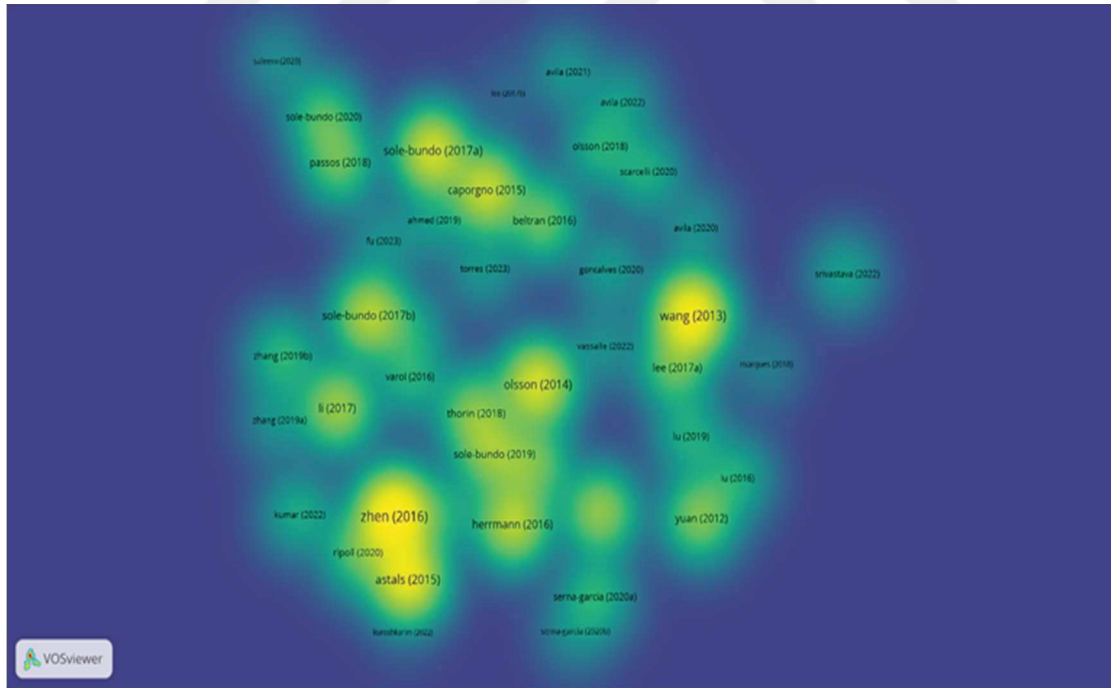
Bu sonuçlarda bize mikroalgler ve biyogaz ile ilgili dünyada yapılmış çalışmalar ile ilgili bir istatistik bilgi sunmaktadır. (WOS, 2023)

4.2.1. Anahtar Sözcük Analizi

Şekil 11.’de analizi yapılan anahtar kelimelerden en çok yayın yapılan kelimelerin gösterilmekte ve diğer kelimelerle olan bağlantıları verilmektedir. Şekil 11.’deki görselde en çok çalışma yapılan kelimelerin microalgae, biomass ve co-digestion ile ilgili çalışmaların 2018-2020 yılları arasında yoğunluklu olarak yapıldığını görmekteyiz. Son yıllarda bu anahtar kelimeler ile ilgili çalışmalarda azalma olduğu görülmektedir.



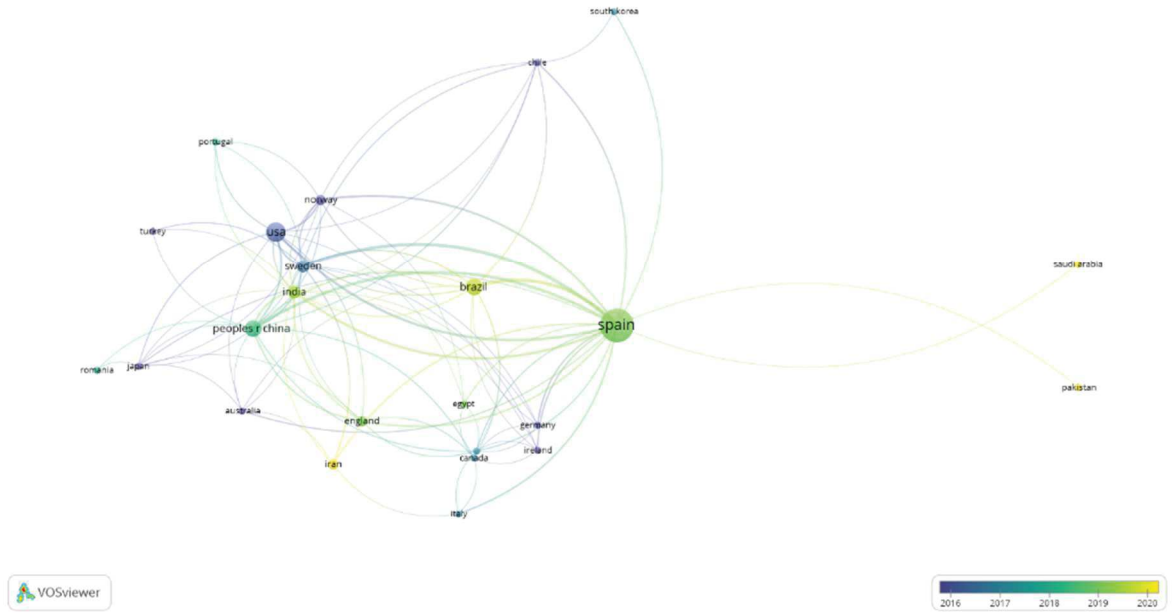
Şekil 12. En çok atıf alan yazar analizi /Çalışmaların atıf ağının kaplama görselleştirilmesi



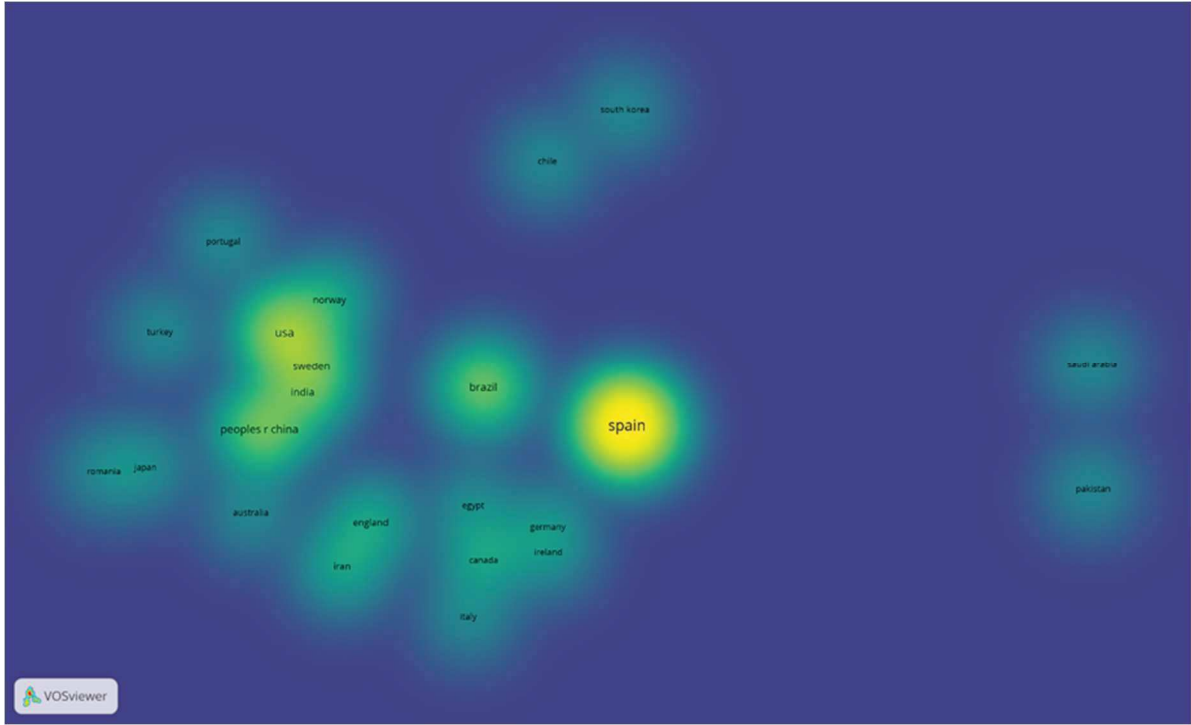
Şekil 13. Atıf ağı yoğunluk görselleştirilmesi

4.2.3. Atıf Yapılan Ülkelerin Analizi

Şekil 14.'de yapılan çalışmaların hangi ülkelerde ağırlıklı olarak çalışıldığını göstermektedir. Grafikten de görüldüğü gibi İspanya yapılan çalışmalarda alınan atıflar ağırlıklı olarak görülmektedir. Şekil 15.'de ülkeler bazında yapılan çalışmaların yoğunlukları gösterilmektedir.



Şekil 14. Atıf yapılan çalışmaların ülkelerinin kaplama görselleştirilmesi

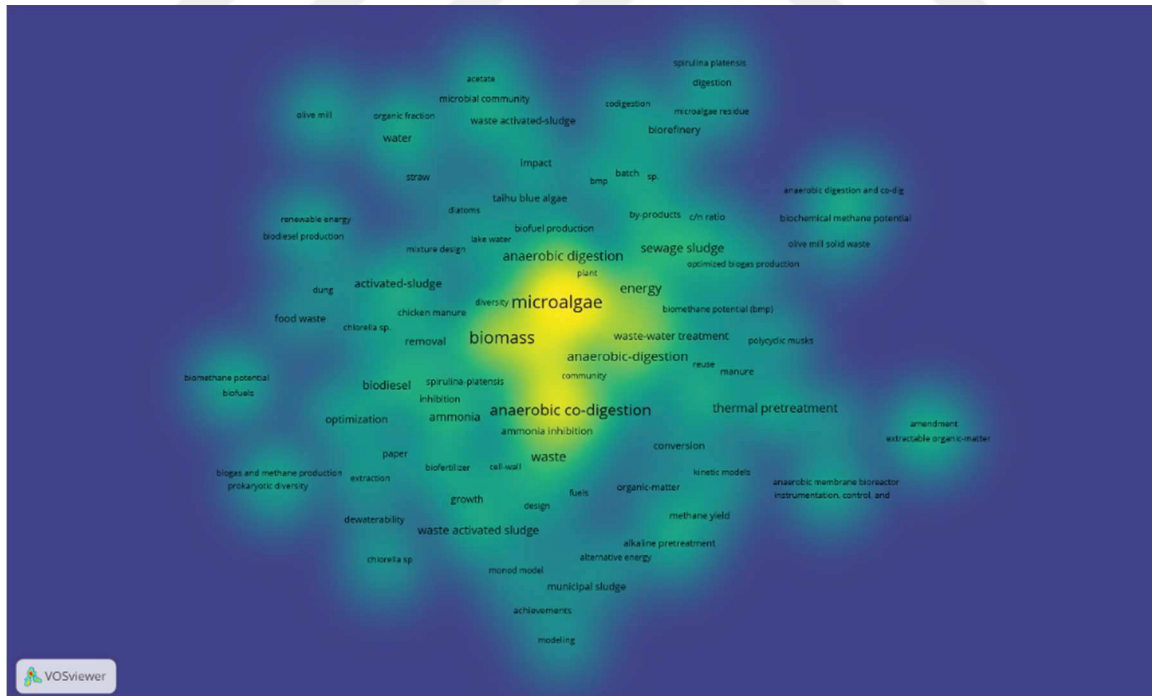
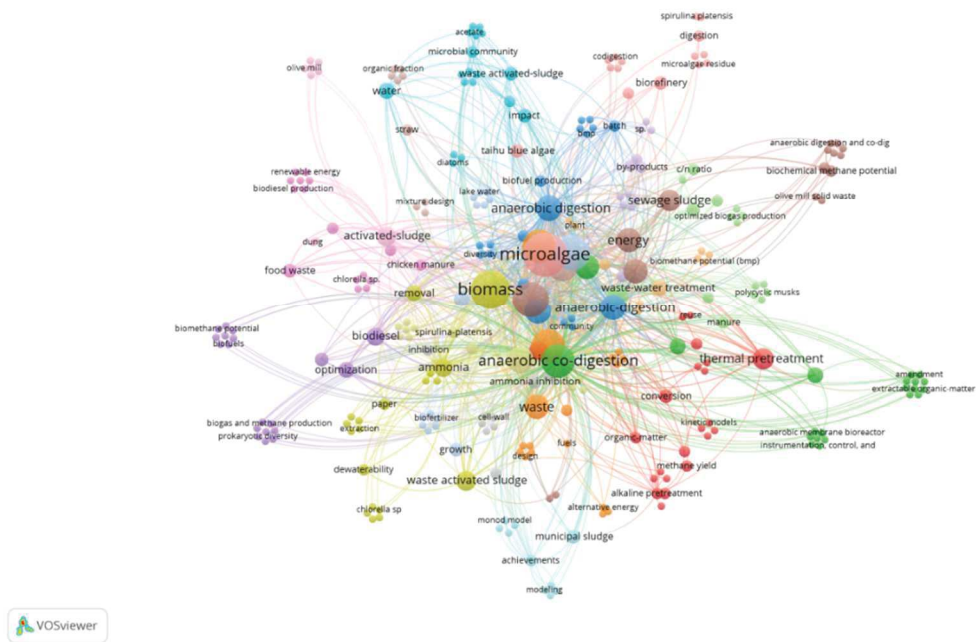


Şekil 15. Atıf yapılan ülkelerin yoğunluğu

4.2.4. En Çok Kullanılan Anahtar Kelime Bağlantıları

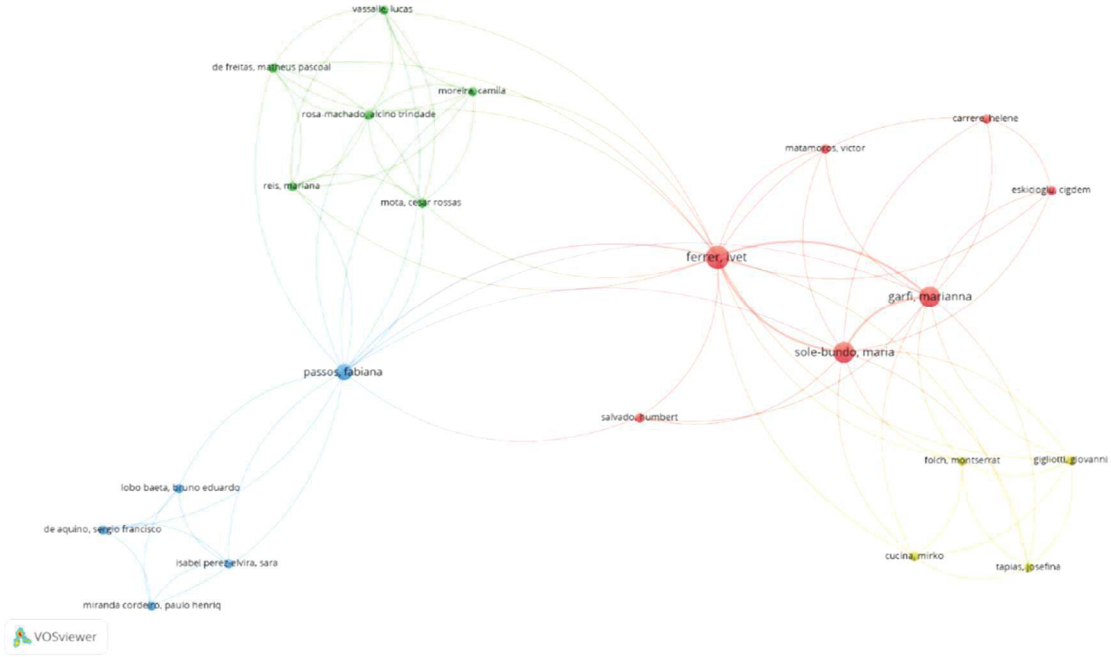
Şekil 16.'de en çok kullanılan anahtar sözcüklere bakıldığında microalgae, biomass, co-digestion olduğu görülmektedir. Bağlantı gücü açısından da bu kelimelerin diğer anahtar kelimeler ile olan bağlantılarının en fazla olduğu görülmektedir.

Şekil 17.' da anahtar kelimelerin yoğunlukları görülmektedir. Microalgae en yoğun bağlantılı kelime olarak görülmektedir.



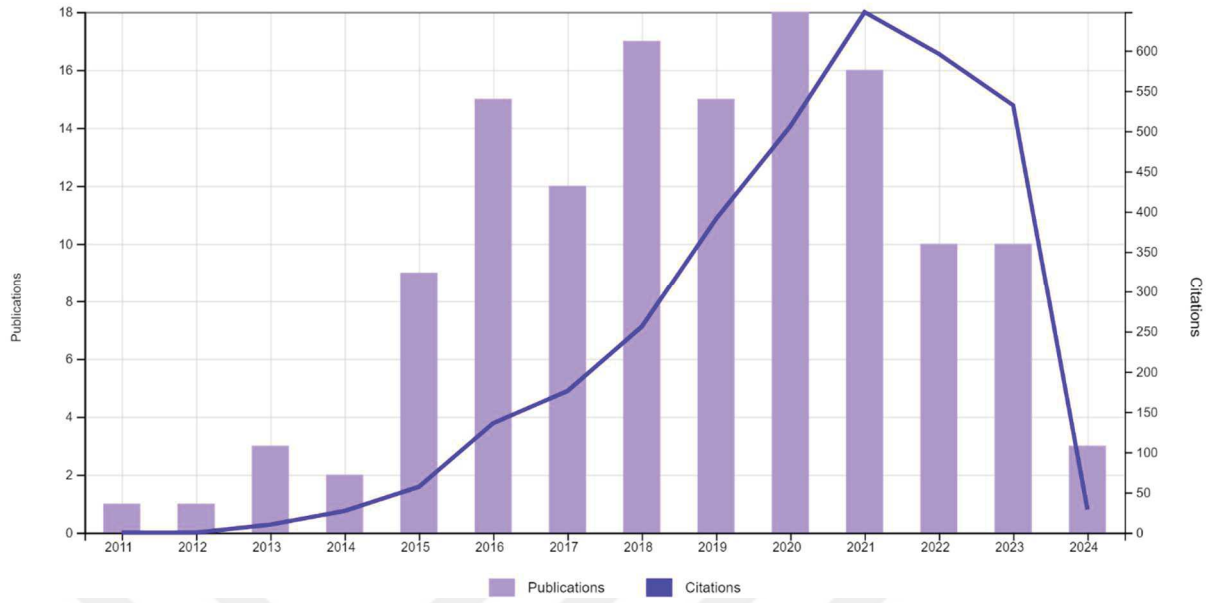
4.2.5. Yazarlar Arası Bağlantı

Şekil 18.'da yazarlar arası bağlantıların gösterildiği bir grafikdir.



Şekil 18. Yazar ağı

Şekil 19.'da 2011 ile 2024 yılları arasında seçilen anahtar kelimelere göre yapılan analizde en fazla yayının 2020 yılında yapıldığı görülmektedir. Bunu daha sonra 2018 ve 2021 yılları takip etmektedir. Atıf açısından bakıldığında ise en fazla atıf 2021 yılında olduğu görülmektedir. Sonraki yıllarda yapılan çalışma sayılarında azalma görülmekle birlikte atıf miktarında da bir azalma söz konusudur. Bu da bize seçilen anahtar kelimeler ile yapılan çalışmalara ilginin diğer yıllara nazaran azalmakta olduğunu göstermektedir.



Şekil 19. Yıllara göre yapılan yayınlar ve atıf sayısı

4.3. Sistematik Derleme Çalışması

Sistematik analiz çalışması yapılırken Web of Science da dört anahtar kelime, microalgae, sludge, biogas ve co-digestin seçilerek son 5 yıllık makalelerde tarama yapılmıştır. (WOS, 2023)

Sonuç olarak 70 adet makaleye ulaşılmış ve bu makaleler üzerinden incelemeler yapılarak Tablo 10.'da özetlenmiştir. 70 adet makale incelenerek mikroalgler ile ilgili olarak 40 adet makaleye ulaşılmıştır. Bu makalelerin hepsinde arıtma çamuru kullanılmamıştır.

Bu tablo incelendiğinde *Chlorella*, *Scenedesmus* mikroalg türlerinin biyogaz çalışmalarında en çok kullanıldığı, genelde biyogaz verimini arttırmak için ön işlemler uygulanması gerektiği yapılan çalışmalarda görülmüştür. Yapılan literatür çalışmalarında mikroalg yüzdesi ile ve *Nannochloropsis* ile ilgili çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir.

Tablo 10. Son beş yılda Web of Science da mikroalg ile ilgili yapılan çalışmalar

	Mikroalg türü	Substrat	Uygulama modu	Ön işlem	Ortak substrat	Mikroalg yüzdesi	Biyogaz üretimi	Metan üretimi	Kaynak
1	Mikroalg (%50 <i>Chlorella</i> ve %50 <i>Scenedesmus</i>)	çamur			Tarım atıkları (talaş, pirinç samanı ve buğday samanı)	%50 <i>Chlorella</i> ve %50 <i>Scenedesmus</i>	Biyogaz verimini talaş için %179, %209, %265 ve %192 oranında arttırdı		(Ahmed, Wagdy, ve Said 2019)
2	<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	çamur		termo-alkalin ön işlemi		1:2, 1:1 ve 2:1 birlikte sindirim oranları		368,94 mL/g VS'lik en yüksek metan verimi	(Fu vd. 2023)
3	<i>Spirulina platensis</i>	çamur		Alkali ön arıtma		mikroalg ve çamurun 0:1, 1:2, 1:1, 2:1 ve 1:0	400 ml/g VS civarında	%60 metan	(Du vd. 2020)
4	<i>Siyonobakteri Spirulina maxima</i> %50	%50 çamur				%50		metan verimi 0,20'den 0,33 m ³ CH ₄ / kg VS'	(Solé-Bundó vd. 2019)
5	mikroalg <i>nannokloropsis oculata</i>	inek gübresi		3 tip ön işlem uygulanmış ıştır ultrasonikasyon, sıcak su ve bunların kombinasyonu	çamur			sonuçlar mikroalglerin ön artırımının biyogaz üretimini %5 ile %30 oranında azalttığını gösterdi	(Saleem vd. 2020)
6	<i>Chlorella</i> sp	atıksu		Mikroalgal stok, 3000 rpm'de 10 dakika santrifüj edilerek ve ardından damıtılmış su ile yıkanarak hazırlandı.		50 15 85		(37,5)327,3 267,5 (31,9) 239,7 (24,1)	(Lu vd. 2019)
7	<i>Tisochrysis lutea</i>	patates atıkları			Varicon Aqua Solutions			328–374 mL CH ₄ / g VS	(Zhang, Caldwell, ve Sallis 2019)

Tablo 10. 'un devamı

	Mikroalg türü	Substrat	Uygulama modu	Ön işlem	Ortak substrat	Mikroalg yüzdesi	Biyogaz üretimi	Metan üretimi	Kaynak
8	mikroalg	arıtma çamuru		termal ön arıtma		0:100 20:80, 40:60, 60:40		338 mL'ye kadar CH ₄ g VS -1	(Scarcelli vd. 2020)
9	<i>Chlorella</i> sp. ve <i>Scenedesmus</i> sp.	çamur		Alkali ön işlem		%93 %7			(Srivastava vd. 2022)
10				Alkali ön işlemi					(Avila vd. 2021)
11	Fotosentetik alg kültürleri <i>Scenedesmus almeriensis</i> ve <i>Chlorella vulgaris</i> türleri	aktif çamur		düşük sıcaklıkta termal ön arıtma		50:1, 25:1 ve 10:1, v:v			(Avila vd. 2020)
12		Kanalizasyon çamuru			Sherry şarabı damıtma tesisi atık suyu	75:25; 50:50; 25:75		225,1 L CH ₄ / kgsv	(Ripoll vd. 2020)
13	<i>Cladophora</i> yeşil alg	Arıtma çamuru				%70-60, B %0-17 ve C %18-30	235,17–296,03 ml/g VS		(Rasouli, Dini, ve Ataeiyan 2022)
14	mikroalg	sığır gübresi							(Kumar vd. 2022)
15	<i>Chlorella</i> spp.	birincil çamur			<i>Coprothermobacter</i> , <i>Fervidobacterium</i> ve <i>Hydrothermae</i> gibi hidrolitik ve fermenter mikrobiyal topluluk	%62 birincil çamur ve %38 VS bazlı mikroalg karışımı	1,5 L·d - 1 metan açısından zengin biyogaz üretti	242 mLCH ₄ ·gCOD	(Serna-García, Borrás, vd. 2020)
16	<i>Chlorella vulgaris</i>	patates prosesi atığı				100:0, 75:25, 50:50, 25:75 ve 0:100		<i>C. vulgaris</i> , metan verimini %22-47 artırır232 ve 340 mL CH ₄ /g VS	(Zhang, Caldwell, Zealand, vd. 2019)

Tablo 10. 'un devamı

	Mikroalg türü	Substrat	Uygulama modu	Ön işlem	Ortak substrat	Mikroalg yüzdesi	Biyogaz üretimi	Metan üretimi	Kaynak
17	<i>Chlorophyta</i> mikroalg ve heterotrofik bakterilerden oluşan karma bir kültür	ham kanalizasyon		Güneş ön arıtma sistemi			331,1 ± 134,0 NL kg -1 VS	210,8 ± 78,1 NLCH 4 kg -1 VS	(Vassalle vd. 2022)
18	<i>Chlorella</i> veya <i>Scenedesmus</i>	birincil çamur					154 mL biyogaz -1 · L -1	215 mLCH 4 · gCOD inf -1	(Serna-García, Mora-Sánchez, vd. 2020)
19	<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>				zeytin değirmeni katı atık	<u>%85-%15,</u> <u>%75-%25,</u> <u>%50-%50</u>		542 ± 4 mL CH4 / g VS	(M.J. Fernández - Rodríguez vd. 2019)
20	<i>Chlorella</i> sp.	boş meyve salkımları , palm yağı değirmeni atığı ve gliserol atıkları				%2 ila %15 TS arasında farklı bir toplam katı içeriğinde		214–577 mL gVS -1	(Jehlee vd. 2019)
21	<i>Chlorella vulgaris</i>	patates işleme atığı ve gliserol							(Zhang vd. 2020)
22	<i>Chlorella</i> sp.%70) ve <i>Scenedesmus</i> sp. (%30)								(Dębowsk i vd. 2022)
23	<i>Opuntia ficus-indica</i> cladodes	inek gübresi				0:100 ila 95:5)		152,7 mL CH 4 g VSfed -1	(Espinosa-Solares vd. 2022)
24		mısır ocağı,tavuk gübresi	Sürekli karıştırma tank reaktörü	üre ile ön işlem					(Yu vd. 2021)
25		Burgos atıksu arıtma tesisi		termal hidroliz çamuru ön arıtma üniteleri	Peynir altı suyu ve artık gliserol		5892 kW'	446 mL CH4 / g VS 561,3 mL CH4/g VS	(García-Cascallana vd. 2021)

Tablo 10. 'un devamı

	Mikroalg türü	Substrat	Uygulama modu	Ön işlem	Ortak substrat	Mikroalg yüzdesi	Biyogaz üretimi	Metan üretimi	Kaynak
26	<i>Scenedesmus quadricauda</i>	Zeytin değirmeni katı atığı			Aşı, Sevilla'da (İspanya) bulunan bira fabrikası atık sularını arıtan endüstriyel yukarı akışlı anaerobik çamur battaniyesi (UASB) reaktöründen elde edildi.			461 mL CH ₄ g ⁻¹ VS	(M. J. Fernández - Rodríguez vd. 2019)
27	<i>Rugulopteryx okamurae</i>	zeytin değirmeni katı atığı			aşı, Heineken fabrikasında (Seville, güney İspanya) bulunan bira fabrikası atık sularını arıtan endüstriyel bir yukarı akışlı anaerobik çamur battaniye reaktöründen toplandı			454 ± 69 mL CH ₄ g ⁻¹ VS	(De La Lama-Calvente vd. 2021)
28	<i>Hydrilla verticillata</i>	Pirinç samanı	Parçacık boyutunun küçültülmesi	kesikli proses	sindirilmiş inek gübresi Maligaon, Guwahati, Hindistan'da bulunan metan bitkisinden toplandı		tüm reaktörün ORP'si +12,98 mV ile +45,09 mV arasında değişti.	C/N-25 ve C/N-30, C/N-15'e kıyasla yaklaşık 2,5 kat daha yüksek metan potansiyeline sahipti	(Kainthola, Kalamdhad, ve Goud 2019)
29	<i>Chlorella sorokiniana</i>	süt atık suyu	anaerobik birlikte sindirim	kirleticilerin uzaklaştırılması için sıralı bir anaerobik sindirim ve fikoremediasyon süreci uygulandı	inek gübresi	%0, %25, %50, %75 ve %100		iCH ₄ içeriği (%65,2) %0 alg biyokütlesinin (saf DW) %66,7 ± 0,5 ile en yüksek metan içeriğini verdiğini, %57,5 ± 1,5 ile en düşük metan içeriğinin %100 alg biyokütlesi ile AD'de elde edildiğini gösterdi	(Kusmaya vd. 2023)

Tablo 10. 'un devamı

	Mikroalg türü	Substrat	Uygulama modu	Ön işlem	Ortak substrat	Mikroalg yüzdesi	Biyogaz üretimi	Metan üretimi	Kaynak
30	<i>Chlorella vulgaris</i>	evsel atık su aktif çamur					5134 mL L ⁻¹ toplam biyogazın üretildi		(Javed ve Aly Hassan 2022)
31	filamentli mikroalglerin (<i>Tribonema sp.</i>) tatlı su sarı-yeşil alglerinin (<i>Xanthophyceae</i>)	domuz gübresi			anaerobik çamur			Metan verimindeki artış %2 ile %27,4	(Hu vd. 2021)
32		evsel atık su arıtma			granüler anaerobik çamur			ortalama 0,25 m ³ CH ₄ kg VS-1 metan verimi	(Carrillo-Reyes vd. 2021)
33	Karışık alg biyokütlesi <i>Chlorella</i> , <i>Merismopedia</i> , <i>Closteriopsis</i> ve <i>Scenedesmus</i>	kanalizasyon çamuru			sığır gübresi			kümülatif biyometan verimidir (mL CH ₄ g ⁻¹ VS beslenen) ve $e = 2,718$.	(Kumar vd. 2019)
34	alg-bakteri biyokütlesi, <i>Chlorella sp.</i> , <i>Scenedesmus quadricauda sp.</i> , <i>Anabaena variabilis sp.</i> , <i>Chlorococcus sp.</i> ve <i>Spirulina sp.</i> olmak üzere beş saf mikroalg türünden oluşmuştur.	belediye atık su arıtma tesisindeki AS sisteminden elde edilen konsantre karışık likörde asılı katı maddeler		Termal ve enzimatik ön işlemler				termal ön işlem yoluyla organik maddenin çözündürülmesi, bozunma oranını (R _m) destekledi ve yaklaşık 32 mL CH ₄ /g VS.d'den yaklaşık 57 mL CH ₄ / gVS.d'ye (%78 artış) önemli ölçüde yükseltti	(Cabeza, Van Lier, ve Van Der Steen 2023)
35	yeşil mikroalglerin (<i>Enteromorpha</i>)		anaerobik sindirim	mikrodalga (MW) ön arıtma koşullarının optimizasyonu, tepki yüzey metodolojisi			biyogaz üretim miktarı 6 dk ön işleme tabi tutulan grupta 244 mL'ye ulaşırken, kontrol grubunda 188 mL'ye ulaştı.	ön arıtmanın mikroalglerin anaerobik sindirimini iyileştirdiğini gösterdi	(Feng vd. 2018)

Tablo 10. 'un devamı

	Mikroalg türü	Substrat	Uygulama modu	Ön işlem	Ortak substrat	Mikroalg yüzdesi	Biyogaz üretimi	Metan üretimi	Kaynak
36	<i>Chlorella vulgaris</i>	atık su arıtma		anaerobik ön işlem				Çalışmada, 2 günlük bir HRT'de, 55 °C'de aerobik ön işlemden, 55 °C'de anaerobik ön işlemden ve 85 °C'de anaerobik ön işlemden %45, %54 ve %36'ya varan maksimum metan verimi artışı gözlemlendi.	(Damtie vd. 2021)
37	<i>Chlorella vulgaris</i>			biyokütlesinin çözünürlüğünü arttırmak için bir termal ve iki enzimatik ön işlem (karbohidrat azlar ve proteazlar) kullanıldı			Ön işleme tabi tutulmuş mikroalglerin kullanımı, mikroalgler gibi sağlam substratları parçalamak için gereken hidrolitik topluluklar yerine asitojenik popülasyonun gelişmesine aracılık etti.		(Llamas vd. 2021)
38	<i>Chlorella sp. and Spirulina sp</i>	Patates İşleme Artığı Chlorella sp Spirulina sp						148,24 mL/g VS 48,65 mL/g VS 1,72 mL/g VS	(Dima vd. 2019)
39	<i>Chlorella vulgaris, Scenedesmus obliquus ve Scenedesmus arvernensis'tir;</i>	Zeytin değirmeni atık suyu ile birlikte atık suda (evsel veya bira endüstrisinden) yetiştirilen alg biyokütlesi	anaerobik olarak çürütülmüş					metan üretiminde %61'lik bir artışla daha iyi bir performansla sonuçlanmıştır.	(Assemany vd. 2020)

Tablo 10. 'un devamı

	Mikroalg türü	Substrat	Uygulama modu	Ön işlem	Ortak substrat	Mikroalg yüzdesi	Biyogaz üretimi	Metan üretimi	Kaynak
40	<i>Methanosaeta</i> sp. and <i>Syntrophomonas</i> sp	çamur		diatomit			Çalışılan seviyelerde (1, 2 ve 5 g/L) diatomit ilavesi, alg anaerobik sindiriminden metan üretimini kontrole kıyasla %22,5, %30,6 ve %32,8 (p = 0,001, 0,0002 ve 0,0002) artırdı		(Zhang vd. 2021)

Mikroalglerden metan üretimindeki mevcut gelişmelere rağmen, ham mikroalg biyokütlesinin inatçılığı, anaerobik çürütme yaklaşımının önündeki kritik tekno-ekonomik engellerden biri olarak kabul edilmektedir. Yapılan çalışmalara bakıldığında, metan üretimini arttırmak için çeşitli ön arıtma işlemlerinin uygulandığı görülmektedir. Bu ön arıtma teknikleri; kimyasal, biyolojik, termal ve enzimatik şeklinde belirtilebilir.

Hidrolik alıkonma süresinin (HRT) değişmesi, hidrolitik aktivitenin ve arkeler gibi diğer yavaş büyüyen mikroorganizmaların artması nedeniyle metan üretimini arttırmak için uygun bir alternatif olarak düşünülebilir.

Algler genellikle düşük bir C/N oranına sahiptir ve sindirildiğinde önemli miktarlarda amonyak üretilir, bu da metan veriminin zayıf olmasına neden olabilir. Karbon oranı artırıldığında bu toksisite azaltılabilir. Ancak karbon açısından zengin atıkların/alt tabakaların hepsi birlikte sindirim için iyi değildir. Dengesiz sindirimi önlemek için her iki substratın çözünürlüğü ve parçalanması senkronize edilmelidir.

Sonuç olarak fosil yakıtların giderek azalması farklı enerji kaynakları arayışını doğurduğundan mikroalgler ile biyogaz üretimi üzerine yapılan çalışmalar da zaman içerisinde daha artış göstermesi beklenmektedir.

BEŞİNCİ BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Sonuç ve Öneriler

Aritma çamuru ve mikroalg karışımları kullanılarak çeşitli koşullar altında anaerobik proesi uygulanmıştır ve belirlenen optimum koşullar altında çalıştırılmıştır. Anaerobik reaktörler pH 6.8-7.2 aralığında, sıcaklığı 35 ± 2 °C ve karıştırma hızı 90 rpm çalıştırılmıştır. Başlangıçta reaktörlerde anaerobik şartlar azot gazı geçirilerek sağlanmıştır. Anaerobik reaktörlerde alkalinite 1500-2500 mg CaCO₃/L olacak şekilde sodyum bikarbonat ilavesi ile sağlanmıştır. Proses öncesi ve sonrası reaktörlerden alınan numunelerde; pH, TKM (Toplam Katı Madde) ve TUKM (Toplam Uçucu Katı Madde) parametreleri takip edilmiştir. Eş zamanlı olarak reaktörlerde oluşan biyogaz miktarı izlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde %32, %22, %12'lik mikroalg beslemelerinde gaz çıkış miktarları en iyi verimi sağlamıştır. Mikroalg eklemesi olmayan reaktördeki gaz çıkışının diğer eklenen reaktörlere göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar bize göstermektedir ki *Nannokloropsis* mikroalg türü belirli oranlarda arıtma çamuru ile fermentasyonu sonucu biyogaz verimini olumlu yönde arttırdığı yapılan laboratuvar ölçekli çalışmada gözlemlenmiştir. %40'lık *Nannokloropsis* mikroalg yüklemesinde biyogaz çıkışının diğer oranlara göre çok daha az olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmada herhangi bir ön arıtma işlemi uygulanmamıştır. Literatürde mikroalg çeşitleri ile yapılan çalışmalarda farklı türler, substratlar ve farklı ön arıtma işlemleri uygulanmıştır. Bu çalışmada belirlenen mikroalg miktarları ve arıtma çamuru için ön arıtma işlemleri uygulanarak biyogaz verimine de bakılabilir. Arıtma çamuru ve *Nannokloropsis* birlikte fermentasyonu sonucunda biyogaz üretimini belirli oranlarda arttırdığı belirlenmiştir.

Bu çalışma, biyogaz sistemlerinde proseslere eklenecek mikroalg oranının belirlenmesinin önem arz ettiğini ve *Nannokloropsis* türünün kullanılabilir alternatif bir substrat olacağını göstermiştir.

KAYNAKÇA

- Ahmed, Dalia, Rabab Wagdy, ve Noha Said. (2019). “Evaluation of biogas production from anaerobic co-digestion of sewage sludge with microalgae and agriculture wastes”. *BioResources* 14(4):8405-12.
- Angelidaki, I. (2018). Energy recovery from wastewater microalgae through anaerobic digestion process: Methane potential, continuous reactor operation and modelling aspects. *Biochemical Engineering Journal*, 139, 1–7.
- Appels, L., Baeyens, J., Degrève, J., and Dewil, R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science* 34 (6), 755-781.
- Arıkan, B. (2008). Organik evsel katı atıklardan anaerobik ortamda biyogaz üretiminin verimliliğinin araştırılması. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 105-127.
- Assemany, Paula, Isabel De Paula Marques, Maria Lúcia Calijuri, ve Alberto Reis. (2020). “Complementarity of Substrates in Anaerobic Digestion of Wastewater Grown Algal Biomass”. *Waste and Biomass Valorization* 11(11):5759-70.
- Avila, Romina, Elvira Carrero, Eudald Crivillés, Mercè Mercader, Teresa Vicent, ve Paqui Blánquez. (2020). “Effects of Low Temperature Thermal Pretreatments in Solubility and Co-Digestion of Waste Activated Sludge and Microalgae Mixtures”. *Algal Research* 50:101965.
- Avila, Romina, Elvira Carrero, Teresa Vicent, ve Paqui Blánquez. (2021). “Integration of Enzymatic Pretreatment and Sludge Co-Digestion in Biogas Production from Microalgae”. *Waste Management* 124:254-63.
- Barontini, F., Biagini, E., Dragoni, F., Corneli, E., Ragaglini, G., Bonari, E. and Nicoletta, C. (2016). Anaerobic digestion and co-digestion of oleaginous microalgae residues for biogas production. *Chemical Engineering Transactions*, 50, 91-96.

- Bayrak, E. H., Yokuş, S. K., ve; Pehlivan, E. (2014). Ülkemizde Evsel Atıksu Arıtma Çamurlarından Biyogaz Üretimi. *Elektronik Mesleki Gelişim Ve Araştırmalar Dergisi*, 2(1), 84–93.
- Biyogaz Tesisleri. (t.y.). *Biyogazder*. Geliş tarihi 19 Aralık (2023), <https://biyogazder.org/biyogaz-tesisleri/>
- Bond, T., and Templeton, M. R. (2011). History and future of domestic biogas plants in the developing world. *Energy for Sustainable Development*, 15(4), 347-354.
- Cabeza, Camila, Jules B. Van Lier, ve Peter Van Der Steen. (2023). “Effects of Thermal and Enzymatic Pre-Treatments on the Solubilisation of Extracellular Polymeric Substances (EPS) and Subsequent Anaerobic Digestion of Microalgae-Bacterial Biomass”. *Algal Research* 72:103130.
- Cao, Y., and Pawłowski, A. (2012). Sewage sludge-to-energy approaches based on anaerobic digestion and pyrolysis: Brief overview and energy efficiency assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1657-1665.
- Caporgno, M. P., Trobajo, R., Caiola, N., Ibáñez, C., Fabregat, A., Bengoa, C. (2015). Biogas production from sewage sludge and microalgae co-digestion under mesophilic and thermophilic conditions. *Renewable Energy*, 75, 374–380.
- Carrillo-Reyes, Julián, Germán Buitrón, Juan Sebastián Arcila, ve Matías Orlando López-Gómez. (2021). “Thermophilic Biogas Production from Microalgae-Bacteria Aggregates: Biogas Yield, Community Variation and Energy Balance”. *Chemosphere* 275:129898.
- Çanka Kılıç, F. (2011). Biyogaz Önemi Genel Durumu ve Türkiye’deki Yeri. *Mühendis ve Makina*, 52(617), 94-106.
- Damtie, Mekdimu Mezemir, Jingyeong Shin, Hyun Min Jang, Hyun Uk Cho, Jinhua Wang, ve Young Mo Kim.(2021). “Effects of Biological Pretreatments of Microalgae on Hydrolysis, Biomethane Potential and Microbial Community”. *Bioresource Technology* 329:124905.
- De La Lama-Calvente, D., M. J. Fernández-Rodríguez, J. Llanos, J. M. Mancilla-Leytón, ve R. Borja. (2021). “Enhancing Methane Production from the Invasive Macroalga *Rugulopteryx Okamurae* through Anaerobic Co-Digestion with Olive Mill Solid

Waste: Process Performance and Kinetic Analysis”. *Journal of Applied Phycology* 33(6):4113-24.

Dębowski, Marcin, Joanna Kazimierowicz, Marcin Zieliński, ve Izabela Bartkowska. (2022). “Co-Fermentation of Microalgae Biomass and Miscanthus × Giganteus Silage—Assessment of the Substrate, Biogas Production and Digestate Characteristics”. *Applied Sciences* 12(14):7291.

Dima, Andreea D., Carmen Mateescu, Oana C. Parvulescu, Eduard M. Lungulescu, ve Nicoleta O. Nicula. (2019). “Theoretical and experimental results on the recovery of potato processing residuals by anaerobic digestion”. *Rev Chim (Bucharest)* 70(7):2524-29.

Du, Xinrui, Yi Tao, Yueling Liu, ve Huan Li. (2020). “Stimulating Methane Production from Microalgae by Alkaline Pretreatment and Co-Digestion with Sludge”. *Environmental Technology* 41(12):1546-53.

Elalami, D., Carrere, H., Monlau, F., Abdelouahdi, K., Oukarroum, A., and Barakat, A. (2019). Pretreatment and co-digestion of wastewater sludge for biogas production: Recent research advances and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114, 109287.

Elcik, H., ve Çakmakçı, M. (2017). Mikroalglerden Yenilenebilir Biyoyakıt Üretimi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(3).

Ertop, H., Atilgan, A., Saltuk, B., ve Aksoy, E. (2022). Büyükbaş Hayvansal Atıklardan Elde Edilebilir Biyogaz ve Elektrik Üretim Potansiyelin Belirlenerek Sayısal Haritaların Oluşturulması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 35, Article 35.

Espinosa-Solares, Teodoro, David Emmanuel Solís-Cruz, José Eleazar Aguilar-Toalá, José Carlos Meneses-Reyes, Clemente Gallegos-Vázquez, ve Guadalupe Hernández-Eugenio. (2022). “Biochemical Methane Potential of Opuntia Ficus-Indica (L.) Mill. Cladodes in Co-Digestion with Cow Manure”. *Journal of Arid Environments* 202:104757.

Feng, RuiZhe, Asad A. Zaidi, Kun Zhang, ve Yue Shi. (2018). “Optimisation of Microwave Pretreatment for Biogas Enhancement through Anaerobic Digestion of Microalgal Biomass”. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering* 63(1):65-72.

- Fernández-Rodríguez, M. J., D. De La Lama-Calvente, A. Jiménez-Rodríguez, R. Borja, ve B. Rincón-Llorente. (2019). “Anaerobic Co-Digestion of Olive Mill Solid Waste and Microalga *Scenedesmus Quadricauda*: Effect of Different Carbon to Nitrogen Ratios on Process Performance and Kinetics”. *Journal of Applied Phycology* 31(6):3583-91.
- Fernández-Rodríguez, M.J., D. De La Lama-Calvente, A. Jiménez-Rodríguez, R. Borja, ve B. Rincón-Llorente. (2019). “Influence of the Cell Wall of *Chlamydomonas Reinhardtii* on Anaerobic Digestion Yield and on Its Anaerobic Co-Digestion with a Carbon-Rich Substrate”. *Process Safety and Environmental Protection* 128:167-75.
- Fu, Jiaqi, Bing Yan, Shuanglin Gui, Yinxuan Fu, ve Song Xia. (2023). “Anaerobic Co-Digestion of Thermo-Alkaline Pretreated Microalgae and Sewage Sludge: Methane Potential and Microbial Community”. *Journal of Environmental Sciences* 127:133-42.
- García-Cascallana, José, Daniela Carrillo-Peña, Antonio Morán, Richard Smith, ve Xiomar Gómez. (2021). “Energy Balance of Turbocharged Engines Operating in a WWTP with Thermal Hydrolysis. Co-Digestion Provides the Full Plant Energy Demand”. *Applied Sciences* 11(23):11103.
- Gökpınar, Ş., Oya, I. Ş. I. K., Göksan, T., Durmaz, Y., Leyla, U. S. L. U., Burcu, A. K.,(2013). Algal Biyoteknoloji Çalışmaları. *Aquaculture Studies*, 2013(4).
- Gül, N. (2006). Tavuk gübresinden biyogaz üretim potansiyelinin araştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Isparta.
- Gülen, J., ve Çeşmeli, Ç. (2012). Biyogaz Hakkında Genel Bilgi ve Yan Ürünlerinin Kullanım Alanları. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 5(1), 65-84.
- Gülen, J., ve Çeşmeli, Ç. (2014). Biyogaz Hakkında Genel Bilgi Ve Yan Ürünlerinin Kullanım Alanları. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 5(1), Article 1.
- Hagos, K., Zong, J., Li, D., Liu, C., and Lu, X. (2017). Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 1485-1496.

- Hande, T., Koçer, N. N., ve Hanay, . K. (2015). Elazığ İli’nde Faaliyet Gsteren Tavuk iftliklerindeki Atıklardan Elde Edilebilecek Enerji Potansiyelinin Değerlendirilmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(1), 1-7.
- Hibberd, D. J. (1981). Notes on the taxonomy and nomenclature of the algal classes Eustigmatophyceae and Tribophyceae (synonym Xanthophyceae). *Botanical journal of the linnean society*, 82(2), 93-119.
- Hodaei, M., Ghasemi, S., Khosravi, A., and Vossoughi, M. (2021). Effect of the ozonation pretreatment on biogas production from waste activated sludge of tehran wastewater treatment plant. *Biomass and Bioenergy*, 152, 106198.
- Hoff F.H. and Snell T.W., (1997). *Plankton Culture Manual*. Florida AquaFarms Inc. Dade City, Florida, 56 s., USA
- Hu, Yuansheng, Manoj Kumar, Zhongzhong Wang, Xinmin Zhan, ve Dagmar B. Stengel. (2021). “Filamentous Microalgae as an Advantageous Co-Substrate for Enhanced Methane Production and Digestate Dewaterability in Anaerobic Co-Digestion of Pig Manure”. *Waste Management* 119:399-407.
- İlkılı, C., ve Deviren, H. (2011). Biyogazın oluşumunu etkileyen fiziksel ve kimyasal parametreler. *6th International Advanced Technologies Symposium*, 16-18. (16-05-2011)
- Javed, Muhammad Asad, ve Ashraf Aly Hassan. (2022). “Photo Fermentative Biohydrogen Production Potential Using Microalgae–Activated Sludge Co-Digestion in a Sequential Flow Batch Reactor (SFBR)”. *RSC Advances* 12(46):29785-92.
- Jehlee, Aminee, Somrak Rodjaroen, Jompob Waewsak, Alissara Reungsang, ve Sompong O-Thong. (2019). “Improvement of Biohythane Production from Chlorella Sp. TISTR 8411 Biomass by Co-Digestion with Organic Wastes in a Two-Stage Fermentation”. *International Journal of Hydrogen Energy* 44(32):17238-47.
- Kainthola, Jyoti, Ajay S. Kalamdhad, ve Vaibhav V. Goud. (2019). “Enhanced Methane Production from Anaerobic Co-Digestion of Rice Straw and Hydrilla Verticillata and Its Kinetic Analysis”. *Biomass and Bioenergy* 125:8-16.

- Kannah, R. Y., Kavitha, S., Karthikeyan, O. P., Rene, E. R., Kumar, G., Banu, J. R. (2021). A review on anaerobic digestion of energy and cost effective microalgae pretreatment for biogas production. *Bioresource Technology*, 125055.
- Kumar, K. S., Dahms, H. U., Won, E. J., Lee, J. S., and Shin, K. H. (2015). Microalgae—a promising tool for heavy metal remediation. *Ecotoxicology and environmental safety*, 113, 329-352.
- Kumar, K., Ghosh, S., Angelidaki, I., Holdt, S. L., Karakashev, D. B., Morales, M. A., and Das, D. (2016). Recent developments on biofuels production from microalgae and macroalgae. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 235-249.
- Kumar, Pushpendar, Arghya Bhattacharya, Sanjeev Kumar Prajapati, Anushree Malik, ve Virendra Kumar Vijay. (2022). “Anaerobic Co-Digestion of Waste Microalgal Biomass with Cattle Dung in a Pilot-Scale Reactor: Effect of Seasonal Variations and Long-Term Stability Assessment”. *Biomass Conversion and Biorefinery* 12(4):1203-15.
- Kumar, Pushpendar, Sanjeev Kumar Prajapati, Anushree Malik, ve Virendra Kumar Vijay. (2019). “Evaluation of Biomethane Potential of Waste Algal Biomass Collected from Eutrophied Lake: Effect of Source of Inocula, Co-Substrate, and VS Loading”. *Journal of Applied Phycology* 31(1):533-45.
- Kusmayadi, Adi, Chi-Yu Huang, Yoong Kit Leong, Po-Han Lu, Hong-Wei Yen, Duu-Jong Lee, ve Jo-Shu Chang. (2023). “Integration of Microalgae Cultivation and Anaerobic Co-Digestion with Dairy Wastewater to Enhance Bioenergy and Biochemicals Production”. *Bioresource Technology* 376:128858.
- Kwietniewska, E., and 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.
- Li, J., Li, X., Yang, Z., & Tang, T. T. (2020). Effects of cellulose on polycyclic aromatic hydrocarbons removal and microbial community structure variation during anaerobic digestion of sewage sludge. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 55(9), 1104-1110.

- Llamas, Mercedes, Jose Antonio Magdalena, Silvia Greses, Elia Tomás-Pejó, ve Cristina González-Fernández. (2021). “Insights on the Microbial Communities Developed during the Anaerobic Fermentation of Raw and Pretreated Microalgae Biomass”. *Chemosphere* 263:127942.
- Lu, D., and; Zhang, X. J. (2016). Biogas production from anaerobic codigestion of microalgae and septic sludge. *Journal of Environmental Engineering*, 142(10), 04016049.
- Lu, Dingnan, Xiao Liu, Onur G. Apul, Lin Zhang, David K. Ryan, ve Xiaoqi Zhang. (2019). “Optimization of Biomethane Production from Anaerobic Co-Digestion of Microalgae and Septic Tank Sludge”. *Biomass and Bioenergy* 127:105266.
- Mata, T. M., Martins, A. A., and Caetano, N. S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(1), 217-232.
- Mata-Alvarez, J. (Ed.). (2002). *Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes*. IWA publishing.
- Mateo-Sagasta, J., Raschid-Sally, L., and Thebo, A. (2015). Global wastewater and sludge production, treatment and use. *In Wastewater* (pp. 15-38). Springer, Dordrecht
- Murakami, R., and Hashimoto, H. (2009). Unusual nuclear division in *Nannochloropsis oculata* (Eustigmatophyceae, Heterokonta) which may ensure faithful transmission of secondary plastids. *Protist*, 160(1), 41-49.
- Nascimento, I. A., Marques, S. S. I., Cabanelas, I. T. D., Pereira, S. A., Druzian, J. I., de Souza, C. O., ... and Nascimento, M. A. (2013). Screening microalgae strains for biodiesel production: lipid productivity and estimation of fuel quality based on fatty acids profiles as selective criteria. *Bioenergy research*, 6(1), 1-13.
- Nascimento, I. A., Marques, S. S. I., Cabanelas, I. T. D., Pereira, S. A., Druzian, J. I., De Souza, C. O., Vich, D. V., De Carvalho, G. C., and Nascimento, M. A. (2013). Screening Microalgae Strains for Biodiesel Production: Lipid Productivity and Estimation of Fuel Quality Based on Fatty Acids Profiles as Selective Criteria. *BioEnergy Research*, 6(1), 1-13.

- Okauchi, M. (1991). The Status of Phytoplankton Production in Japan. In Rotifer, W. Microalgae Culture Systems. Fulks, and; K. L. Main (Eds.), *Proceeding of a US-Asia Workshop* (pp. 247–256).
- Öztürk, Ö. (1999). *Anaerobik Biyoteknoloji ve Atık Arıtımındaki Uygulamaları*. İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları: İstanbul.
- Park, S., and; Li, Y. (2012). Evaluation of methane production and macronutrient degradation in the anaerobic co-digestion of algae biomass residue and lipid waste. *Bioresource Technology*, 111,42–48.
- Peccia, J., and Westerhoff, P. (2015). We Should Expect More out of Our Sewage Sludge. *Environmental Science and Technology*, 49(14), 8271-8276.
- Radakovits, R., Jinkerson, R. E., Fuerstenberg, S. I., Tae, H., Settlage, R. E., Boore, J. L., and Posewitz, M. C. (2012). Draft genome sequence and genetic transformation of the oleaginous alga *Nannochloropsis gaditana*. *Nature communications*
- Rasouli, Majid, Mahdi Dini, ve Behnam Ataeiyan. (2022). “Anaerobic Co-Digestion of Sewage Sludge and Cladophora Green Algae: Investigation of Synergistic Effects and Optimization of Substrate Composition Ratio”. *Environmental Engineering Research* 28(5):220516-0.
- Ripoll, Vanessa, Cristina Agabo-García, Montserrat Perez, ve Rosario Solera. (2020). “Improvement of Biomethane Potential of Sewage Sludge Anaerobic Co-Digestion by Addition of ‘Sherry-Wine’ Distillery Wastewater”. *Journal of Cleaner Production* 251:119667..
- Rodolfi, L., Chini Zittelli, G., Bassi, N., Padovani, G., Biondi, N., Bonini, G., and Tredici, M. R. (2009). Microalgae for oil: Strain selection, induction of lipid synthesis and outdoor mass cultivation in a low-cost photobioreactor. *Biotechnology and bioengineering*, 102(1), 100-112
- Safi, C., Zebib, B., Merah, O., Pontalier, P. Y., and Vaca-Garcia, C. (2014). Morphology, composition, production, processing and applications of *Chlorella vulgaris*: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 35, 265-278.
- Saleem, M., Hanif, M. U., Bahadar, A., Iqbal, H., Capareda, S. C., and; Waqas, A. (2020). The effects of hot water and ultrasonication pretreatment of microalgae

- (*Nannochloropsis oculata*) on biogas production in anaerobic co-digestion with cow manure. *Processes*, 8(12), 1558.
- Saleem, Muhammad, Muhammad Usman Hanif, Ali Bahadar, Hamid Iqbal, Sergio C. Capareda, ve Adeel Waqas. (2020). "The Effects of Hot Water and Ultrasonication Pretreatment of Microalgae (*Nannochloropsis Oculata*) on Biogas Production in Anaerobic Co-Digestion with Cow Manure". *Processes* 8(12):1558.
- Scarcelli, Priscila Guenka, Mayara Leite Serejo, Paula Loureiro Paulo, ve Marc Árpád Boncz. (2020). "Evaluation of Biomethanization during Co-Digestion of Thermally Pretreated Microalgae and Waste Activated Sludge, and Estimation of Its Kinetic Parameters". *Science of The Total Environment* 706:135745
- Serna-García, R., J. F. Mora-Sánchez, P. Sanchis-Perucho, A. Bouzas, ve A. Seco.(2020). "Anaerobic Membrane Bioreactor (AnMBR) Scale-up from Laboratory to Pilot-Scale for Microalgae and Primary Sludge Co-Digestion: Biological and Filtration Assessment". *Bioresource Technology* 316:123930.
- Serna-García, R., L. Borrás, A. Bouzas, ve A. Seco. (2020). "Insights into the Biological Process Performance and Microbial Diversity during Thermophilic Microalgae Co-Digestion in an Anaerobic Membrane Bioreactor (AnMBR)". *Algal Research* 50:101981..
- Sisman-Aydin, G. (2019). Mikroalg teknolojisi ve çevresel kullanımı. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 4(1), 81-92.
- Solé-Bundó, Maria, Marianna Garfí, Víctor Matamoros, ve Ivet Ferrer. (2019). "Co-Digestion of Microalgae and Primary Sludge: Effect on Biogas Production and Microcontaminants Removal". *Science of The Total Environment* 660:974-81.
- Srivastava, Garima, Vikas Kumar, Rahul Tiwari, Ravichandra Patil, Ajay Kalamdhad, ve Vaibhav Goud. (2022). "Anaerobic Co-Digestion of Defatted Microalgae Residue and Rice Straw as an Emerging Trend for Waste Utilization and Sustainable Biorefinery Development". *Biomass Conversion and Biorefinery* 12(4):1193-1202.
- Şenol, H., Elibol, E. A., Açikel, Ü., ve Şenol, M. (2017). Biyogaz Üretimi İçin Ankara'nın Başlıca Organik Atık Kaynakları. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(2)
- Tomar, S. S. (1994). Status of biogas plant in India. *Renewable energy*, 5(5-8), 829-831.

- Vassalle, Lucas, Fabiana Passos, Alcino Trindade Rosa-Machado, Camila Moreira, Mariana Reis, Matheus Pascoal De Freitas, Ivet Ferrer, ve César Rossas Mota. (2022). “The Use of Solar Pre-Treatment as a Strategy to Improve the Anaerobic Biodegradability of Microalgal Biomass in Co-Digestion with Sewage”. *Chemosphere* 286:131929.
- Vieler, A., Wu, G., Tsai, C. H., Bullard, B., Cornish, A. J., Harvey, C., ... and Benning, C. (2012). Genome, functional gene annotation, and nuclear transformation of the heterokont oleaginous alga *Nannochloropsis oceanica* CCMP1779. *PLoS genetics*, 8(11), e1003064.
- Wang, M., Sahu, A. K., Rusten, B., and; Park, C. (2013). Anaerobic co-digestion of microalgae *Chlorella* sp. And waste activated sludge. *Bioresource Technology*, 142, 585–590.
- Web Of Science (2023, 03 Aralık). Erişim adresi: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/summary/a3072145-cd3c-413f-8521-0ededd66da1d-bf082301/relevance/1>
- Widayat, W., and Hadiyanto, H. (2016). Pemanfaatan Limbah Cair Industri Tahu Untuk Produksi Biomassa Mikroalga *Nannochloropsis* Sp Sebagai Bahan Baku Biodiesel. *Reaktor*, 15(4), 253-260.
- Yang, Q., Wu, B., Yao, F., He, L., Chen, F., Ma, Y., ... and Li, X. (2019). Biogas production from anaerobic co-digestion of waste activated sludge: co-substrates and influencing parameters. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 18, 771-793.
- Yu, Qiong, Chen Sun, Ronghou Liu, Dominic Yellezuome, Xianpu Zhu, Ruifeng Bai, Mingquan Liu, ve Mengzeng Sun. (2021). “Anaerobic Co-Digestion of Corn Stover and Chicken Manure Using Continuous Stirred Tank Reactor: The Effect of Biochar Addition and Urea Pretreatment”. *Bioresource Technology* 319:124197
- Zabed, H. M., Qi, X., Yun, J., and Zhang, H. (2019). Anaerobic digestion of microalgae biomass for methane production. In *Microalgae biotechnology for development of biofuel and wastewater treatment* (pp. 397-421). Springer, Singapore

- Zhang, Yanghanzi, Gary S. Caldwell, Andrew M. Zealand, ve Paul J. Sallis. (2019). “Anaerobic Co-Digestion of Microalgae *Chlorella Vulgaris* and Potato Processing Waste: Effect of Mixing Ratio, Waste Type and Substrate to Inoculum Ratio”. *Biochemical Engineering Journal* 143:91-100..
- Zhang, Yanghanzi, Gary S. Caldwell, Philip T. Blythe, Andrew M. Zealand, Shuo Li, Simon Edwards, Jin Xing, Paul Goodman, Paul Whitworth, ve Paul J. Sallis. (2020). “Co-Digestion of Microalgae with Potato Processing Waste and Glycerol: Effect of Glycerol Addition on Methane Production and the Microbial Community”. *RSC Advances* 10(61):37391-408.
- Zhang, Yanghanzi, Gary S. Caldwell, ve Paul J. Sallis. (2019). “Semi-Continuous Anaerobic Co-Digestion of Marine Microalgae with Potato Processing Waste for Methane Production”. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 7(1):102917.
- Zhang, Yu-Ting, Wei Wei, Yun Wang, ve Bing-Jie Ni. (2021). “Enhancing Methane Production from Algae Anaerobic Digestion Using Diatomite”. *Journal of Cleaner Production* 315:128138.