

D. SEL LEVENT, 2024



T.C.

NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

EVSEL ARITMA ÇAMURUNDAN BİYOGAZ VE BİYOMETAN ÜRETİMİNE
KARBON KUMAŞ VE MAGNETİT İLAVESİNİN ETKİSİ

DUYGU SEL LEVENT

OCAK 2024

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

EVSEL ARITMA ÇAMURUNDAN BİYOGAZ VE BİYOMETAN ÜRETİMİNE
KARBON KUMAŞ VE MAGNETİT İLAVESİNİN ETKİSİ

DUYGU SEL LEVENT

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Hamdi MURATÇOBANOĞLU

OCAK 2024

Duygu SEL LEVENT tarafından **Dr. Öğr. Üyesi Hamdi MURATÇOBANOĞLU** danışmanlığında hazırlanan “**Evsel Arıtma Çamurundan Biyogaz ve Biyometan Üretimine Karbon Kumaş ve Magnetit İlavesinin Etkisi**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Çevre Mühendisliği** Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Yalçın ŞEVKİ YILDIZ, Erciyes Üniversitesi

Üye : Prof. Dr. Fehiman ÇİNER, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Hamdi MURATÇOBANOĞLU, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

ONAY:

Bu tez Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/...../20.... Tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun/...../20.... tarih ve Sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20.....

Prof. Dr. Mustafa KARATEPE
MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Duygu SEL LEVENT



ÖZET

EVSEL ARITMA ÇAMURUNDAN BİYOGAZ VE BİYOMETAN ÜRETİMİNE KARBON KUMAŞ VE MAGNETİT İLAVESİNİN ETKİSİ

SEL LEVENT, Duygu
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Hamdi MURATÇOBANOĞLU

Ocak 2024, 50 sayfa

Bu tez çalışmasında, kesikli reaktörler kullanılarak arıtma çamuruna farklı konsantrasyonlarda karbon kumaş ve magnetit (Fe_3O_4) ilavesinin biyogaz ve biyometan üretiminin artırılması amaçlanmıştır. En yüksek S/I oranını belirlemek için 1, 2, 3 ve 4 gUK/gUK oranlarında yükleme yapılmıştır. Elde edilen en iyi verim S/I 1 gUK/gUK reaktörü olmuştur. S/I 1 gUK/gUK yükleme oranı kullanılarak çeşitli konsantrasyonlarda karbon kumaş ve magnetit (Fe_3O_4) ilave edilmiştir. En yüksek biyogaz ve biyometan üretimleri 2,5 g/L karbon kumaş konsantrasyonunda sırasıyla 447 ml biyogaz/gUK ve 345 ml CH_4 /gUK, 2 g/L magnetit konsantrasyonunda sırasıyla 452 ml biyogaz/gUK ve 356 ml CH_4 /gUK, ve (10+2) g/L karbon kumaş +magnetit konsantrasyonunda sırasıyla 445 ml biyogaz/gUK ve 355 ml CH_4 /gUK olarak belirlenmiştir. En yüksek biyogaz ve biyometan üretimlerinde artış 2,5 g/L karbon kumaş konsantrasyonunda sırasıyla %8.2 ve %17.1, 2 g/L magnetit konsantrasyonunda sırasıyla % 9.4 ve % 20.8 ve (10+2) g/L karbon kumaş + magnetit konsantrasyonunda sırasıyla % 7.7 ve % 20.5 olarak belirlenmiştir. Biyogaz ve biyometan üretimi açısından en yüksek verimliliğe sahip karbon kumaş ve Fe_3O_4 (magnetit) ilavesinde en iyi sonuç alınan reaktörlerden biyofilm örneği alınmış ve mikrobiyal dağılımları incelenmesi sonucunda *W5*, *Blvii28* ve *Treponema* en baskın türler olarak belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Arıtma çamuru, karbon kumaş, magnetit (Fe_3O_4), biyogaz üretimi, biyometan üretimi

SUMMARY

EFFECT OF CARBON FABRIC AND MAGNETITE ADDITION ON BIOGAS AND BIOMETHANE PRODUCTION FROM SEWAGE SLUDGE

SEL LEVENT, Duygu

Nigde Omer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Environmental Engineering

Supervisor : Dr. Öğr. Üyesi Hamdi MURATÇOBANOĞLU

January 2024, 50 pages

In this thesis study, the effect of adding different concentrations of carbon fabric and magnetite (Fe_3O_4) to sewage sludge in batch reactors was investigated to increase biogas and biomethane production. The best yield was obtained with the S/I 1 gUK/gUK reactor. Various concentrations of carbon fabric and magnetite (Fe_3O_4) were added using the S/I 1 gUK/gUK loading rate. The highest biogas and biomethane productions were determined to be 447 mL biogas/gUK and 345 mL CH_4 /gUK, respectively, at a carbon fabric concentration of 2.5 g/L, 452 mL biogas/gUK and 356 mL CH_4 /gUK, respectively, at a magnetite concentration of 2 g/L, and 445 mL biogas/gUK and 355 mL CH_4 /gUK, respectively, at a carbon fabric + magnetite concentration of (10+2) g/L. The increase in the highest biogas and biomethane productions was determined to be 8.2% and 17.1%, respectively, at a carbon fabric concentration of 2.5 g/L, 9.4% and 20.8%, respectively, at a magnetite concentration of 2 g/L, and 7.7% and 20.5%, respectively, at a carbon fabric + magnetite concentration of (10+2) g/L. Biofilm samples were taken from the reactors with the best results in the addition of carbon fabric and Fe_3O_4 (magnetite) with the highest efficiency in terms of biogas and biomethane production, and as a result of the examination of their microbial distributions, W5, Blvii28, and Treponema were determined to be the dominant species.

Key Words: Sewage sludge, carbon fabric, magnetite (Fe_3O_4), biogas production, biomethane production

ÖN SÖZ

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, arıtma tesislerinde karşılaşılan en büyük sorunların başında yer alan arıtma çamurlarının bertarafına ve yenilenebilir enerji kaynağı olarak kullanımına yönelik biyogaz ve biyometan veriminin artırılması için iletken malzemeler kullanılması tercih edilmiştir.

Çalışmalarım süresi boyunca beni yönlendiren, bilgisini ve yardımını esirgemeyen, her konuda destek olan her şeyden önce danışmanlığımı kabul ederek bana fırsat veren Dr. Öğr. Üyesi Hamdi MURATÇOBANOĞLU'na en içten teşekkürlerimi sunar minnettarlığımı belirtmek isterim. Çalışmalarımın her aşamasında yardımını, bilgisini ve desteğini esirgemeyen Doç. Dr. Öznur Begüm GÖKÇEK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez süresi boyunca tüm deneylerimi yapmamda bana yardımcı olan Yüksek Kimyager Fatih Mehmet ERENLER'e ve Ruhullah Ali MERT'e de teşekkür ederim.

Bu tezi tüm hayatım boyunca bu günlere gelmemde destek ve yardımları ile her zaman yanımda olan aileme, beni sürekli olarak teşvik eden babam Sedat SEL'e ve annem Gülsen SEL'e bu yolda desteğini hiçbir zaman esirgemeyen eşim Hasan Kıvanç LEVENT'e ve bana varlığıyla güç veren canım kızım Nisa LEVENT'e ithaf ediyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ	xi
SİMGE VE KISALTMALAR	xii
BÖLÜM I.....	1
GİRİŞ	1
1.1 Arıtma Çamuru	3
1.1.1 Ülkemizde arıtma çamurlarının durumu.....	4
1.1.2 Arıtma çamurları bertaraf yöntemleri.....	5
1.2 Biyogazın Tanımı	6
1.2.1 Biyogaz üretiminde kullanılan atıklar ve karakteristikleri	6
1.3 Biyogaz Oluşum Aşamaları	7
1.3.1 Aşama (hidroliz)	9
1.3.2 Aşama (asit oluşumu)	9
1.3.3 Aşama (metan oluşumu).....	10
1.4 Biyogaz Üretimine Etki Eden Parametreler.....	10
1.4.1 Sıcaklık	10
1.4.2 pH	12
1.4.3 C / N oranı	12
1.4.4 Karıştırma	14
1.4.5 Organik madde yükleme hızı.....	14
1.4.6 Fermantasyon süreci	14
1.4.7 Toksik maddeler	15
1.5 Anaerobik Çürütmede Elektron Transfer Mekanizması.....	15
1.5.1 Biyogaz üretiminde kullanılan iletken malzemeler	16
1.5.1.1 Karbon kumaş	17
1.5.1.2 Karbon nanotüpler	18

1.5.1.3 Biyokömür (BIOCHAR).....	19
1.5.1.4 Grafen.....	20
1.5.1.5 Magnetit	21
BÖLÜM II	22
LİTERATÜR TARAMASI	22
BÖLÜM III.....	25
MATERYAL VE METOD.....	25
3.1 Arıtma Çamuru ve Aşı Temini	25
3.2 Reaktörlerin Hazırlanması ve İşletme Koşulları.....	25
3.3 Analitik Metodlar.....	27
3.3.1 pH ORP ölçümleri	27
3.3.2 Toplam katı madde ve uçucu katı madde tayini	28
3.3.3 TOK-TA tayini	28
BÖLÜM IV	30
BULGULAR VE TARTIŞMA	30
4.1 Aşı ve Atık Karakterizasyonu.....	30
4.2 Farklı S/I Oranlarının Biyogaz ve Biyometan Üretimi Üzerindeki Etkisi.....	30
4.3 Farklı Konsantrasyonlardaki Magnetit ve Karbon Kumaş İlavesinin Biyogaz ve Biyometan Üretimi Üzerindeki Etkisi	32
4.4. Farklı S/I Oranlarında TKM ve UKM Giderimi Üzerindeki Etkisi.....	34
4.5 Farklı Konsantrasyonlardaki Magnetit ve Karbon Kumaş İlavesinin TKM ve UKM Giderimi Üzerindeki Etkisi.....	35
4.6 Farklı S/I Oranlarında TOK ve TA Konsantrasyonları	36
4.7 Farklı Konsantrasyonlardaki Magnetit ve Karbon Kumaş İlavesinin TOK ve TA Konsantrasyonları	37
4.8 Mikrobiyal Dağılım	38
BÖLÜM V	40
SONUÇLAR	40
KAYNAKLAR	42
ÖZ GEÇMİŞ	50

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Biyogaz bileşimi	6
Çizelge 1.2. Çeşitli kaynaklardan elde edilecek biyogaz verimleri ve biyogazdaki metan miktarları	7
Çizelge 1.3. Organik maddelerin C/N oranları	13
Çizelge 3.1. Reaktörlere ilave edilen iletken malzeme konsantrasyonları	27
Çizelge 4.1. Aşı ve arıtma çamuru karakterizasyonu	30
Çizelge 4.2. Farklı iletken malzemelerin metan üretimine etkisinin kıyaslanması	33

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Anaerobik süreç oluşum aşamaları.....	8
Şekil 1.2. Kompleks organik maddelerin basit organik maddelere dönüşmesi.	9
Şekil 1.3. Anaerobik ayrışma basamaklarının genel gösterimi	10
Şekil 1.4. Anaerobik işlemde sıcaklık aralıkları	11
Şekil 1.5. Reaksiyon hızının pH ile ilişkisi.....	12
Şekil 1.6. a) Biyolojik DIET , b) İletken malzemelerin kullanımı ile oluşan DIET.....	15
Şekil 1.7. Karbon kumaş.....	18
Şekil 1.8. Tek duvarlı ve çok duvarlı karbon nanotüpler.....	19
Şekil 1.9. Biyokömür	20
Şekil 1.10. Grafen	20
Şekil 1.11. Magnetit.....	21
Şekil 4.1. Farklı yükleme oranlarındaki kümülatif biyogaz üretimleri.....	31
Şekil 4.2. Farklı yükleme oranlarındaki kümülatif metan üretimleri	31
Şekil 4.3. Farklı konsantrasyonlardaki magnetit ve karbon kumaş ilavesinin kümülatif biyogaz üretimleri	34
Şekil 4.4. Farklı konsantrasyonlardaki magnetit ve karbon kumaş ilavesinin kümülatif metan üretimleri	34
Şekil 4.5. Farklı S/I oranlarında TKM ve UKM giderim verimleri.....	35
Şekil 4.6. Farklı konsantrasyonlardaki magnetit ve karbon kumaş ilavesinin TKM ve UKM giderim verimleri	36
Şekil 4.7. Farklı S/I yükleme oranlarında TOK ve TA konsantrasyonları	36
Şekil 4.8. Farklı konsantrasyonlardaki magnetit ve karbon kumaş ilavesinin TOK ve TA konsantrasyonları.....	37
Şekil 4.9. Reaktörlerinden alınan biyofilm örneğinde mikrobiyal dağılım	39

FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Fotoğraf 3.1. Reaktör kurulumu 1	26
Fotoğraf 3.2. Reaktör kurulumu 2	26
Fotoğraf 3.3. TOK-TA analizi	29



SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler

C/N	Karbon azot oranı
KM	Katı madde
S/I	Besin/aşı
TA	Toplam azot
TF	Toplam fosfor
TKM	Toplam katı madde
UKM	Uçucu katı madde

Kısaltmalar

CH ₄	Metan
Fe ₃ O ₄	Magnetit
TOK	Toplam Organik Karbon

BÖLÜM I

GİRİŞ

Dünya nüfus yoğunluğunun hızla artması, tüketim alışkanlıklarının değişmesi, sürekli gelişen teknoloji ve sanayi faaliyetleri ile birlikte kişi başına düşen enerji kaynaklarının tüketimi de artmaktadır. İnsanlığın temel ihtiyaçlarını karşılamak için ihtiyaç duyduğu enerji, büyük miktarlarda atık üretimini de beraberinde getirmektedir. Bu atıkların bertarafı, insan hayatına, eko sisteme ve çevreye zarar vermeden gerçekleştirilmelidir. Atık üretiminin azaltılması ve atıkların geri dönüştürülmesi, çevresel sorunları azaltmak ve sürdürülebilir bir gelecek için atılması gereken önemli adımlardır.

Enerji ihtiyacının sürekli artması fosil yakıt kaynaklarının kısıtlı oluşu, çevre üzerindeki olumsuz etkileri, enerji kaynakları sağlanmasındaki zorluklar, enerji sürekliliğini sağlamak ve sürdürülebilir bir çevre yönetimi yenilenebilir enerji kaynaklarına erişimini zorunlu hale getirmiştir. Fosil enerji kaynakları, sınırlı ve kısıtlı rezervlere sahip olduğu için enerji üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarına doğru bir geçiş yaşanmaktadır.

Günümüzde, atık malzemelerin geri dönüşümü ve biyogaz üretimi konusundaki çalışmalar hızla artmaktadır. Bu durum enerji üretimi açısından büyük bir potansiyel yaratmaktadır. Atık yönetimi stratejileri, ekonomik ve çevresel açılardan sürdürülebilirlik sağlamak amacıyla artık atıkların biyogaz üretimi için kullanılmasını teşvik etmektedir. Biyogazdan elektrik üretiminin artırılması, temiz enerji kaynaklarının kullanımını teşvik etmek ve karbondioksit salınımını azaltmak amacıyla önemli bir adımdır. Atıkların kullanılmasıyla biyogaz üretimi, enerji üretimi alanında hızla gelişen bir sektör olup, gelecek için umut verici bir potansiyele sahiptir.

Ülkemizde oluşturulacak olan biyogaz tesisleri, Türkiye'nin enerji açısından dışa bağımlılığını azaltmak ve ekonomiye katkı sağlamak için önemli bir adımdır. Ayrıca bu tesisler, temiz enerji üretimi için de oldukça önemlidir. Bu nedenle, biyogaz tesisleri, Türkiye'nin enerji ihtiyacını karşılamak için önemli bir kaynaktır ve ülkemizin enerji bağımlılığını azaltarak ekonomimize katkı sağlayacaktır. Biyogaz üretiminin gelecekte de artacağı eğiliminin açıkça görülüyor olması biyogaz üretiminin verimini artıracak uygulamaların araştırılması ülkemiz için önem arz etmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının başında güneş, rüzgâr, jeotermal, dalga, biyogaz biyokütle kaynaklı enerji üretim teknolojileri gelmektedir. Ülkemizde ve dünyada atıklardan üretilen yenilenebilir enerji, gelecekteki alternatif enerji kaynaklarından biri olarak kabul edilmektedir. Yenilebilir enerji alanında büyük bir öneme sahip olan biyogaz, çeşitli kullanım alanlarıyla doğa dostu olarak tanımlanmaktadır. Biyogaz, çevreye duyarlı ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak, enerji krizi ve iklim değişikliği gibi küresel sorunlara çözüm sunma potansiyeline sahiptir.

Yenilenebilir enerji kaynağı olarak kullanılacak biyokütleden birisi de atıksu arıtma tesisinde arıtma sonrası oluşan arıtma çamurlarıdır. Ülkemizde ve tüm dünyada artan nüfus, tüketim alışkanlıklarının değişmesi, su tüketim oranının artması, atık su ile arıtma çamuru miktarındaki artışa da neden olmuştur. Nihai olarak da güvenilir arıtma ve bertaraf teknolojilerine yönelik gittikçe önem kazanmaktadır. Arıtma çamuru, içerdiği organik madde, enerji ve besin maddeleri bakımından zengin bir atık malzemedir. Bu nedenle, ekonomik, çevresel ve sosyal açılardan büyük bir değere sahiptir. Atıksu arıtma tesislerinde her gün üretilen tonlarca arıtma çamuru, yönetilmesi çevre mühendisliği açısından önemli sorunlar doğuran bir biyokütle kaynağıdır.

Arıtma çamuru, hacim ve hijyen bakımından stabilizasyon gerektiren, önemli miktarda metan üretim potansiyeli bulunan bir kirlilik kaynağıdır. Bu nedenle, çevresel sürdürülebilirlik ve enerji kazanımı açısından en uygun yönetim anaerobik parçalanma prosesi olarak değerlendirilmektedir. Günümüzde, modern atıksu arıtma tesislerinde, arıtma çamurlarının anaerobik çürütülmesi giderek daha yaygın hale gelmektedir. Özellikle büyük kapasiteli tesislerde, anaerobik çürütme sistemleri, arıtma tesislerinin önemli bir parçası haline gelmeye başlamıştır (Kökdemir Ünşar,2013).

Anaerobik çürütme, arıtma çamurunun yönetilebilmesi için ihtiyaç duyulan stabilizasyonu sağlayan ve en önemlisi bunu sağlarken kıymetli bir enerji kaynağı olan metan gazı üreten bir prosestir. Bu süreçte, arıtma çamuru içindeki organik maddeler, oksijensiz ortamlarda ve uygun ısı koşullarında bakteriler yardımıyla parçalanarak CO₂, CH₄, H₂S, NH₃ gibi ara ürünlere dönüştürülür. Son yıllarda, bilim insanları, anaerobik çürütme işleminde iletken malzemeler kullanarak, bakteri ve arkeler arasındaki “direkt türler arası elektron transferinin” (DIET) arttırmak yönünde çalışmalar yapmaktadır. Bu çalışmalar, metan gazı üretimini arttırmayı amaçlamaktadır.

Tez çalışması ile mezofilik şartlarda evsel arıtma çamurlarından biyogaz ve biyometan üretimine iletken malzeme olarak karbon kumaş (karbon bazlı) ve magnetit (metal bazlı) ilavesinin etkisi ve iletken malzeme eklenmesinin mikrobiyal biyokütle üzerindeki değişikliğinin araştırılması hedeflenmektedir. Yapılan bu çalışma ile Atıksu Arıtma Tesislerinde sorun haline gelen her gün tonlarca ortaya çıkan arıtma çamurunun yönetilmesi ve bertarafına katkı sağlanması hedeflenmektedir.

1.1 Arıtma Çamuru

Arıtma çamuru; atık su arıtma tesislerinin fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma sürecinde oluşan atık maddelerdir. Atık su içerisinde flokleştirilerek uzaklaştırılan, biyolojik arıtma sonucunda çözünmüş haldeki katıların mikroorganizma bünyesine geçirilmesi ile sistemden uzaklaştırılması sonucu açığa çıkan sıvı veya yarı katı halde bulunurlar. Kompleks bir atık olarak da tanımlanan arıtma çamurları, %95-99,5 su ihtiva eden akışkan yapıdadırlar (Flytli ve Zabaniotou 2008).

02.04.2015 tarihli ve 29314 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan Atık Yönetimi Yönetmeliği’nde açıklandığı üzere “Atık üretiminin kaçınılmaz olduğu durumlarda atıkların; yeniden kullanımı, geri dönüşümü ve ikincil hammadde elde etme amaçlı diğer işlemler ile geri kazanılması, enerji kaynağı olarak kullanılması veya bertaraf edilmesi esastır...” hükmü yer almaktadır. Bertaraf edilecek arıtma çamurunu toprakta kullanımına yönelik geri kazanım faaliyetlerde kullanılması, kullanılmıyorsa enerji amaçlı geri kazanımının değerlendirilmesi bu işleminde uygun olmaması halinde yakılarak veya düzenli depolanarak bertarafının sağlanması uygun görülmektedir.

18.05.2005 tarih ve 25819 sayılı Resmi gazetede yayımlanan “ Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun” da İthal edilmemek kaydıyla; belediye atıklarının (çöp gazı dâhil) yanı sıra bitkisel yağ atıkları, gıda ve yem değeri olmayan tarımsal atıkları, endüstriyel odun dışındaki orman ürünleri ile atık lastiklerin işlenmesi sonucu ortaya çıkan yan ürünlerden elde edilen kaynakları ve sanayi atık çamurları ile arıtma çamurları Biyokütle olarak tanımlanmıştır.

Arıtma çamurları, enerji açısından zengin bir biyokütle kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Bu çamurlar, farklı yöntemlerle atıktan enerji üretimine katkı

sağlamaktadır. Yakma prosesleri, piroliz, biyodizel yakıt üretimi, anaerobik prosesler gibi atıktan enerji üreten, atığı enerjiye dönüştüren sistemlerde yenilenebilir enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır (Milbrant vd., 2018).

Türkiye’de, arıtma çamuru bertarafı ve geri kazanımı gittikçe artan bir sorun haline gelmiştir. Atıksu Arıtma Tesislerinin sayısının her geçen gün artması ülke genelinde çamur oluşumunu da sürekli olarak arttırmaktadır. Bununla birlikte, çamur standartları, uygun çamur bertaraf seçeneklerini düzenleyen mevzuatlar sebebi ile daha zorlayıcı bir hale gelmiştir.

1.1.1 Ülkemizde arıtma çamurlarının durumu

Arıtılan atık su miktarı hakkında yeterli bilgiye sahip olunmasına rağmen, arıtma son ürünü olan arıtma çamurları miktarı hakkında yeterli bilgi bulunmamaktadır. Bu nedenle, arıtma çamuru miktarının belirlenmesi ve yönetimi, atık su arıtımı sürecinde önemli bir konudur.

2002 yılına yönelik yapılan bir çalışmada, Türkiye genelinde 145 adet evsel nitelikli atık su arıtma tesisi olduğu belirtilmiştir (Ersoy,2023). Bu sayı Türkiye İstatistik Kurumu’nun yaptığı 2020 yılı Atıksu Arıtma Tesisi Göstergeleri anketinde ise toplam 4276 olarak raporlanmıştır. (TÜİK, 2023).

Türkiye İstatistik Kurumu’nun 2020 ve 2022 yıllarına yönelik yaptığı Belediye Atıksu Arıtma Çamuru İstatistikleri anketine göre ise, evsel nitelikli arıtma çamurları, 2020 yılında yaklaşık 314.325 ton, 2022 yılında ise yaklaşık 348.037 ton olarak raporlanmıştır. (TÜİK, 2023).

Arıtma çamurların yönetimi, her geçen yıl artan miktarı nedeniyle kamu ve özel sektör için zorlaşmaktadır. Ancak, sadece yüzde 10-12’si enerjiye dönüştürülerek ekonomiye kazandırılmaktadır. Bertaraf maliyetlerinin yüksekliği nedeniyle, bu çamurların taşınması ve yönetimi kurumlar için önemli bir zorluk oluşturmaktadır. Bu konu, çevre ve insan sağlığı açısından da büyük önem taşımaktadır (URL 2).

1.1.2 Arıtma çamurları bertaraf yöntemleri

Arıtma çamurları, günümüzde sadece bir atık olarak değil, aynı zamanda geri dönüşümü mümkün olan bir hammadde olarak da değerlendirilmektedir (Pietzsch vd., 2017).

Son yıllarda, teknolojinin gelişmesi ve yapılan araştırmalar, üretilen atıkların çevreye verdiği zararı azaltmak amacıyla atık yönetim stratejilerini değiştirmiştir. Bu değişim, atıkların yönetiminde atık minimizasyonu, geri dönüşüm ve yeniden kullanım politikalarının uygulanmasını içermektedir (Minelgaite ve Liobikiene 2019).

Arıtma çamurlarının bertarafı, getirilen yasal sınırlamalar nedeniyle yeni yöntemler ve teknolojilerin uygulanmasını zorunlu hale gelmiştir. Bu yöntemlerden bazıları;

- Arıtma Çamurunun Gazlaştırılması
- Arıtma Çamuru Anaerobik (havasız) Çürütme
- Arıtma Çamuru Aerobik (havalı) Çürütme
- Arıtma Çamuru Pirolizi
- Arıtma Çamuru Kurutma
- Arıtma Çamurunun Arazide Kullanılması, Gübre ve Besin Değeri
- Arıtma Çamuru Düzenli Depolama
- Arıtma Çamuru Termal Bertarafı (Erkekardaş,2014).

Arıtma çamurunun enerji olarak geri kazanılması için, yakma, anaerobik çürütme, gazlaştırma ve piroliz gibi işlemler kullanılabilir. Bu işlemlerden elde edilen proses gazı, uygun yöntemle yakılarak buhar türbini, gaz türbini ve/veya gaz motoru ile elektrik enerjisine çevrilebilir. Ancak enerji üretimi ile geri kazanım yöntemi yukarıda belirtilen pek çok çamur arıtım yönteminin bir arada ve/veya ardı ardına kullanımı ile mümkün olmaktadır.

Arıtma çamurları, genel olarak, susuzlaştırma ve kurutma işleminden sonra yakılır. Kurutma işlemi çok maliyetlidir ve kuru çamur bu hali ile yine bir problem olarak elimizde kalmaktadır. Özellikle pahalı bir enerji olan doğal gaz ile kurutma işlemi gerçekleştirmek ise kurumlara büyük mali zorunluluklar ortaya çıkarmaktadır. Çamur yakmada ise en önemli kriterler, çamur içindeki nem oranı, çamurun kalorifik değeri ve

yanma sonucu oluşan bakiye kül oranıdır. %20-30 katı madde (%70-80 nem) içeriğine sahip bir çamuru yakmak için ilave yakıtı ihtiyaç duyulur. Arıtma çamurlarının yakılması, baca gazının arıtılmaması durumunda hava kirliliğinin oluşması, oluşan külün çöp depolama alanlarında depolanmasının uygun olmaması gibi riskler barındırırken ciddi yatırım ve işletme maliyetleri gerektirir.

1.2 Biyogazın Tanımı

Biyogaz, organik atıkların fermantasyonu sonucu oluşan, bileşiminde %60-70 metan, %30-40 karbondioksit ile az miktarda hidrojen sülfür, hidrojen, karbon monoksit ve azot içeren renksiz ve yanıcı bir gaz karışımıdır. Bu gaz, oksijensiz ortamlarda, organik atıkların mikroorganizmalar tarafından parçalanması sonucu oluşur (Aslanlı, 2009). Genel olarak biyogazın bileşenleri Çizelge 1.1’de görülmektedir.

Çizelge 1.1. Biyogaz bileşimi (Sabuncu, 2010)

Bileşenler	Miktar (%)
Metan (CH ₄)	55-75
Karbondioksit (CO ₂)	30-45
Hidrojen Sülfür (H ₂ S)	1-2
Azot (N ₂)	0-1
Hidrojen (H ₂)	0-1
Karbonmonoksit (CO)	Eser Miktarda
Oksijen (O ₂)	Eser Miktarda

1.2.1 Biyogaz üretiminde kullanılan atıklar ve karakteristikleri

Biyogaz üretimi için, nemi yüksek, katı organik atıklar sıkça kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, organik madde yoğunluğu yüksek olan atık sularda da, çeşitli yöntemlerle biyogaz üretimi amaçlanmaktadır. Bu yöntemler, arıtma çamuru, hayvan gübresi, bitkisel atıklar, gıda atıkları ve endüstriyel atıklar gibi farklı kaynaklardan elde edilen organik atıkların kullanımını içerir. Biyogaz üretimi, organik atıkların çevreye zarar vermeden bertaraf edilmesini sağlar ve aynı zamanda yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alır (Ardıç, 2003).

Biyogaz üretimi için organik içerikli maddeler kullanılmaktadır.

- Orman endüstri ve Zirai atıkları
- Deri ve tekstil endüstri atıkları
- Kâğıt endüstri atıkları
- Gıda endüstrisi atıkları (çikolata, maya, süt, içecek üretimi) ve Yemek atıkları
- Sebze, meyve, tahıl ve yağ endüstri atıklar
- Hayvan gübrelere büyükbaş hayvancılık, küçükbaş hayvancılık, tavukçuluk vb.
- Evsel katı atıklar
- Arıtma çamurları (Karaosmanoğlu,2004).

Çizelge 1.2. Çeşitli kaynaklardan elde edilecek biyogaz verimleri ve biyogazdaki metan miktarları (Buğutekin, 2007)

Kaynak	Biyogaz Verimi (litre/kg)	Metan Oranı (Hacim, %)
Sığır Gübresi	90-310	65
Kanatlı Gübresi	310-620	60
Domuz Gübresi	340-550	65-70
Buğday Samanı	200-300	59
Çavdar Samanı	200-300	59
Arpa Samanı	290-310	59
Mısır Sapları ve Artıkları	280-460	59
Keten & Kenevir	360	59
Çimen	280-550	70
Sebze Artıkları	330-360	Değişken
Ziraat Artıkları	310-430	60-70
Yerfıstığı Kabuğu	365	-
Dökülmüş Ağaç Yaprakları	210-290	58
Algler	420-500	63
Atık Su Çamuru	310-800	65-80

1.3 Biyogaz Oluşum Aşamaları

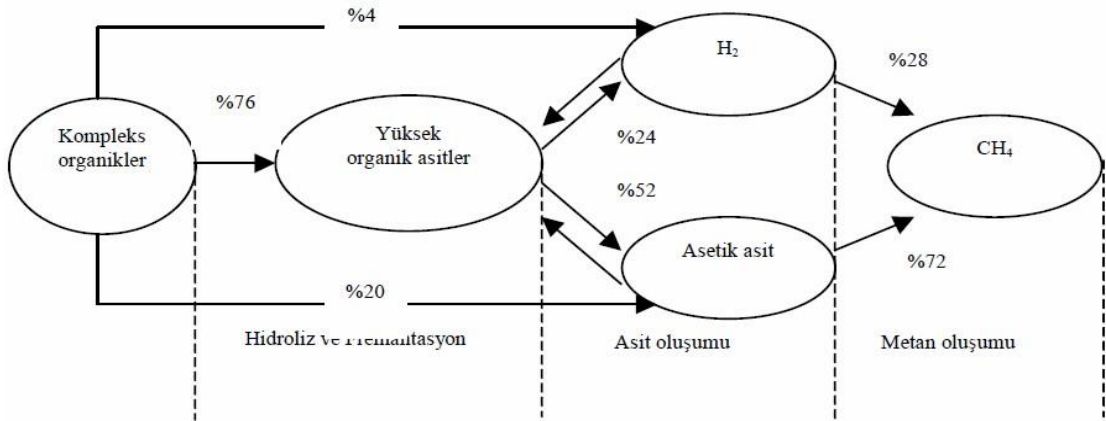
Anaerobik fermantasyon, karışık bakteri grupları tarafından organik maddenin oksijensiz ortamda ayrışması temeline dayanan, aşamalı biyokimyasal tepkimelerden oluşan biyolojik bir süreçtir. Bu sürecin sonucunda, ağırlıklı olarak metan ve karbondioksit olmak üzere hidrojen, hidrojen sülfür ve azot içeren bir gaz karışımı oluşmaktadır (Filibeli vd., 2000).

Anaerobik işlem, organik maddelerin oksijensiz ortamlarda ve uygun ısı koşullarında bakteriler yardımıyla parçalanarak CO₂, CH₄, H₂S, NH₃ gibi ara ürünlere

dönüştürüldüğü bir süreçtir. Anaerobik işlem, mikroorganizmaların birbirine bağımlı olarak çalıştığı bir süreçtir. Bu süreçte, hidroliz bakterileri, karmaşık yapılı organik maddeleri daha küçük moleküllere ayırır. Ardından, asit oluşturan bakteriler, bu küçük molekülleri asitlere dönüştürür. Son olarak, metan üreten bakteriler, asitleri metana dönüştürür. Bu süreçte, her mikroorganizma grubu, kendisinden önceki grubun ürettiği maddeleri besin olarak kullanır ve bunları başka gruplara dönüştürür. Ancak, basit yapılı bir organik madde, tek başına metana dönüştürülemez. Bu nedenle, farklı türden mikroorganizmaların bir arada bulunması gereklidir (Ardıç, 2003).

Anaerobik arıtım, organik maddelerin anaerobik şartlarda mikroorganizmalar yardımıyla biyokimyasal fermantasyona uğraması sonucu 3 aşamadan oluşmaktadır.

1. Aşama (Hidroliz),
2. Aşama (Asit oluşumu),
3. Aşama (Metan oluşumu)

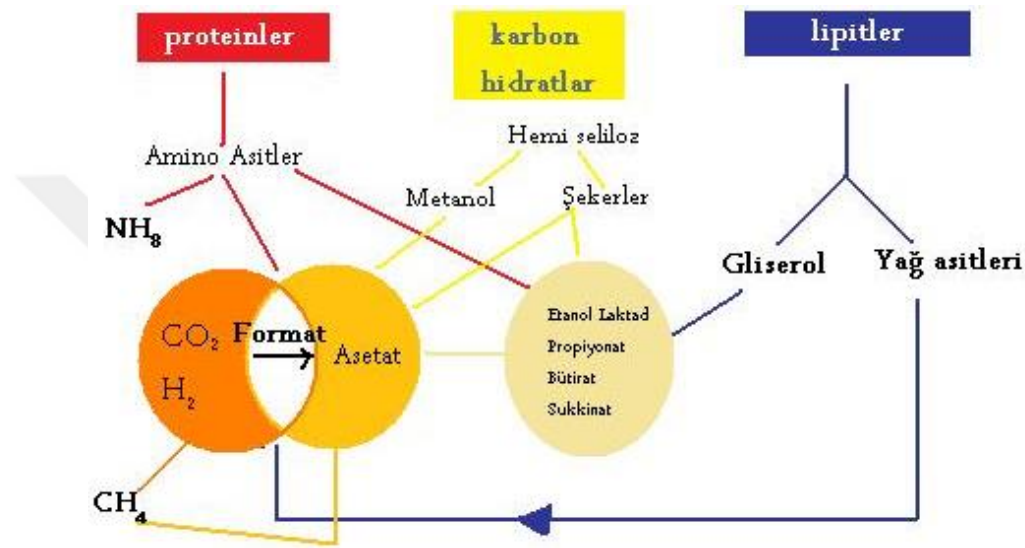


Şekil 1.1. Anaerobik süreç oluşum aşamaları (Gül, 2014)

- Hidroliz ve fermantasyon aşamasında karmaşık yapıdaki organik maddeler parçalanmakta,
- Asetik asit oluşumu aşamasında yapıtaşlarına ayrılan organik maddeler asetik asit ve H₂ 'e dönüştürülmekte,
- Metan oluşumu aşamasında ise asetik asit, H₂ ve CO₂ 'den CH₄ üretimi gerçekleştirilmektedir (Gül, 2014).

1.3.1.Aşama (hidroliz)

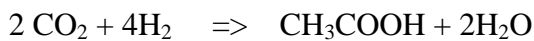
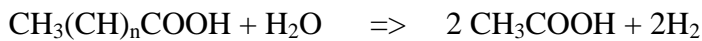
Karbonhidrat, protein ve yağdan oluşan uzun zincirli moleküller, hidrolitik bakteriler tarafından salgılanan enzimler vasıtasıyla daha küçük ve basit yapıdaki kısa zincirli moleküllere ayrılır. Bu işlem sonucunda proteinler aminoasitlere, karbonhidratlar ise glikoza dönüşür ve uçucu özelliği olan asetik asitler de meydana gelir. Bu nedenle, bu devreye uçucu yağ asitlerinin oluşum devresi de denir (Öçal, 2013).



Şekil 1.2. Kompleks organik maddelerin basit organik maddelere dönüşmesi (URL 9)

1.3.2 Aşama (asit oluşumu)

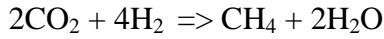
Uçucu asetik asitler, hidroliz aşamasında asetogenik bakteriler tarafından hammadde olarak kullanılmaktadır. Asetogenik bakterileri, uçucu yağ asitlerini asetik aside dönüştürmek için iki farklı yöntem kullanır. İlk olarak bu bakterilerin büyük bir bölümü uçucu yağ asitlerini kullanarak asetik asit ve hidrojene dönüştürür.



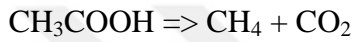
Diğer bölümü ise karbondioksit ve hidrojeni hammadde olarak kullanarak asetik asit üretirler (Kanat, 2017).

1.3.3 Aşama (metan oluşumu)

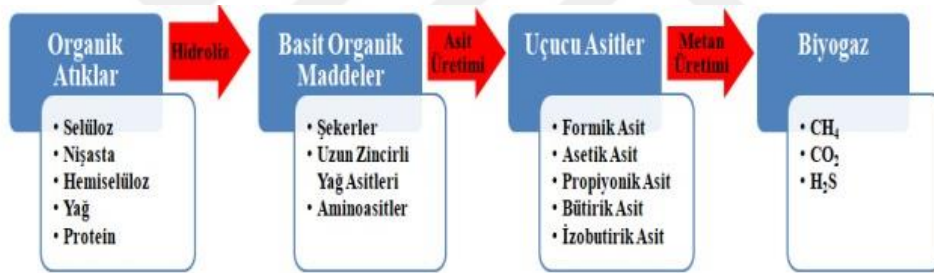
Biyogaz üretiminin son aşaması metan oluşumudur. Bu aşamada bulunan metanojen bakterileri çevre şartlarına oldukça hassastırlar. Bu aşamada, iki farklı yolla metan üretilir. Bu aşamada bulunan bakterilerin bir bölümü, H₂ ve CO₂'i kullanarak CH₄ ve H₂O üretmektedir.



İkinci aşamada ise diğer bakteri grupları oluşan asetik asitten CH₄ üretmektedir.



Üretilen metan miktarı ikinci yolla üretilende daha fazladır (Kanat, 2017).



Şekil 1.3. Anaerobik ayrışma basamaklarının genel gösterimi (Deviren vd., 2017)

1.4 Biyogaz Üretimine Etki Eden Parametreler

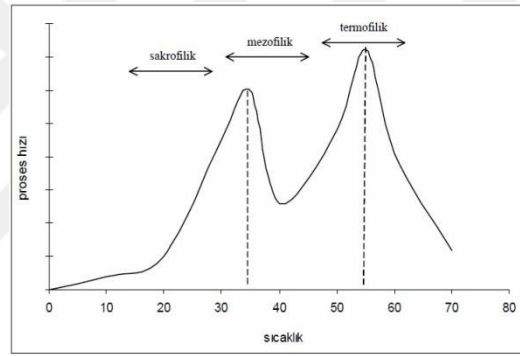
1.4.1 Sıcaklık

Sıcaklık parametresi anaerobik fermantasyonun verimli olmasını sağlayan etkenlerin başında gelmektedir. Sıcaklık değerleri bakterilerin üreyip gelişmeleri üzerinde doğrudan etkilidir. Biyogaz üretiminde kullanılan bakterilerin yaşayabilecekleri sıcaklık aralığı türler arasında farklılık gösterse de her bakteri grubunun optimal bir sıcaklık aralığı bulunmaktadır. Şekil 1.4.'de verilen bu sıcaklık aralığının alt ve üst limit değerlerine yaklaşıldıkça bakterilerin üreme hızı azalır ve belirli bir sıcaklık değerini geçtiklerinde tamamen durur. Hatta bazı durumlarda, bu sıcaklık değerleri bakterilerin

ölümüne neden olabilir. Bu nedenle, biyogaz üretiminde ortam sıcaklığı önemli bir faktördür (Gül, 2014).

Değişik ortam sıcaklıklarında yaşayan bakteriler 3 gruba ayrılır. Bunlar; 5-25 °C sıcaklık aralığında yaşayan bakteriler sakrofilik bakteriler, 25-38 °C sıcaklık aralığında yaşayan mezofilik bakteriler ve 50-60 °C sıcaklık aralığında yaşayan termofilik bakterilerdir.

Biyogaz üretiminde kullanılan bakterilerin sıcaklık ihtiyaçları, biyogaz üretiminin verimini ve verimliliğini doğrudan etkiler. Optimal sıcaklık aralığında çalışan bakteriler, daha hızlı ve daha verimli bir şekilde biyogaz üretirler. Bu nedenle, biyogaz üretim tesislerinde ortam sıcaklığının kontrol edilmesi önemlidir.



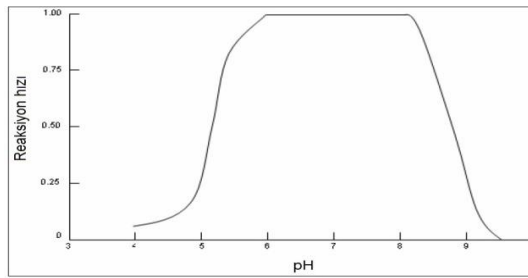
Şekil 1.4. Anaerobik işlemden sıcaklık aralıkları (Arda, 2011)

Sakrofilik bakteriler, -5 °C ile 20 °C arasında soğuk ortamlarda aktif olan enzimlerine sahip oldukları için deniz ve göl gibi serin ortamlarda kolayca üreyip yaşayabilirler. Ancak, biyogaz üretiminde tercih edilmezler, çünkü düşük sıcaklıkta biyogaz üretimi miktarı azalır ve hidrolik alıkonma süresi artar. Bu da reaktör hacminin büyümesine ve ek maliyetlere yol açar. Sıcağı seven termofilik bakterilerde ise sıcaklık artışından dolayı reaksiyon süresi kısalmış ve bu da üretim hızını artırır. Ancak, reaktörün bu koşullarda verimli çalışabilmesi için ek enerji maliyeti gerektirir, bu nedenle bu bakteriler tercih edilmez. Sonuç olarak mezofilik bakteriler, biyogaz üretimi için ara sıcaklıkta en uygun olan bakteri türleri olarak tercih edilmektedir.

1.4.2 pH

Bakterilerin bulunduğu ortamın pH değeri, enzimlerin faaliyetini etkileyerek biyogaz üretim sisteminin verimini belirleyen önemli bir faktördür. Çünkü her enzim belli bir pH aralığında etkili olabilir ve pH düzeyi, bakterilerin üzerinde büyük etkiye sahiptir. Biyogaz üretim sürecinin üç aşamasında farklı bakteri grupları görev aldığından dolayı, her aşamada optimal performans için farklı pH düzeylerinin sağlanması gerekmektedir. Uygun pH aralığı asetojenler için 5,5 - 6,5 iken, uygun pH aralığı metanojenler için 6,5- 8 dir. Ortam pH 'ı asetojenler ve metanojenler birlikte çalıştıkları için her iki bakteri grubu için de uygun olmalıdır. Ortam pH'ı hızlı ve verimli metan üretimi için 6,5 – 7,5 aralığında olmalıdır. pH değerlerinin yükselmesi durumunda ise metan üretim miktarı önemli ölçüde azalmaktadır.

Asetik asit oluşum aşamasında ortamda yüksek miktarda organik madde bulunmasından dolayı ortamın pH seviyesi düşer. Aynı şekilde, metan üreten bakterilere kıyasla asit üreten bakterilerin daha hızlı çoğalması, pH seviyesini düşürür. Bu nedenle, pH seviyesini düşük değerlerden yükseltmek için, sodyum bikarbonat, kalsiyum hidroksit gibi kimyasallar ortama eklenerek, sistemde pH seviyesi sürekli kontrol altında tutulur. Anaerobik işlemlerde reaksiyon hızının pH'a bağlı değişimi Şekil 1.5.'de gösterilmektedir (URL 10).



Şekil 1.5. Reaksiyon hızının pH ile ilişkisi

1.4.3 C / N oranı

Bakteri grupları, biyogaz oluşum aşamasında hayatta kalabilmek ve çoğalmak için temel besin maddelerine ihtiyaç duyarlar, açıkçası bu durum tüm canlılar için geçerlidir. Temel besin maddeleri olarak azot ve karbon kaynakları en önemli olanlardır. Enerji

kaynağı olarak karbon biyogaz üretiminde kullanılırken, bakteri gruplarının üreme ve çoğalması için azot kullanılmaktadır. Bu nedenle hem karbon hem de azot biyogaz üretimi için hayati unsurlardır. Dolayısıyla bu iki element biyogaz üretiminde olmazsa olmaz faktörlerdir.

C/N oranı, organik maddelerdeki karbon ve azot elementleri arasındaki ilişkidir. Çizelge 1.3’de gösterildiği gibi organik maddelerin yapılarına bağlı olarak C/N oranı farklılık gösterir ve bu oran, karbon ve azot elementleri arasındaki ilişkiyi belirtir. Karbonhidratlar, organik maddelerdeki karbonun ana kaynağı olarak görev yaparken, protein ve amonyak azotun ana kaynağıdır. Bu nedenle, çim ve saman gibi organik maddelerde karbon miktarı yüksektir, ancak azot miktarı canlı dışıklarında daha fazladır (URL 11).

Çizelge 1.3. Organik maddelerin C/N oranları (URL 11)

Yüksek karbon İçerikli Materyaller	C/N
Yapraklar	30-80:1
Saman	40-100:1
Ağaç Kırıntıları ve Talaş	100-500:1
Karışık Kağıt	150-00:1
Gazete veya Oluklu Mukavva	560:1
Yüksek Nitrojen İçerikli Materyaller	C/N
Sebze Parçaları	15-20:1
Kahve Artıkları	20:1
Çim	15-25:1
Gübre	5-25:1

Biyogaz üretilirken anaerobik reaktörlerde C/N oranının belirli değerlerde olması gerekir. C/N oranının yüksek olması durumunda, nitrojenin hızla tükenmesi nedeniyle biyogaz üretimi azalmaktadır. C/N oranının düşük olması durumunda ise ortamdaki amonyak miktarı artarak ortam pH’nın artmasına neden olur. Bu durum toksik etki yaratır ve metanojen bakteriler üzerinde olumsuz etkiler meydana gelir. Bu sebeple, C/N oranı uygun aralıkta (20-30) tutulmalıdır, aksi halde biyogaz üretimi olumsuz etkilenebilir.

1.4.4 Karıştırma

Reaktörde gaz birikimini kolaylaştırmak ve yeni organik maddelerin bakteri gruplarıyla daha etkili bir şekilde etkileşime girmelerini sağlamak için karıştırma işlemi kullanılır. Karıştırma, verim artışı sağlar ve biyogaz tahliyesini kolaylaştırırken çökelti oluşumunu engeller. Ek olarak, karıştırma işlemi sayesinde yüzey gerilimi ortadan kalkar ve ısı dağılımı daha homojen olur, böylece bakteri dağılımı da dengelenir. Ancak, aşırı karıştırma pH dengesini bozabilir ve sistemi kararsız hale getirebilir, bu yüzden karıştırma işleminin ölçülü yapılması önemlidir (Arda, 2011).

1.4.5 Organik madde yükleme hızı

Biyogaz reaktörlerinde, organik madde yükleme hızı günlük ilave edilen organik madde miktarıdır. Bu faktör, fermantasyon sürecinde görev yapan bakteri gruplarını doğrudan etkilediği için, üretilen biyogaz miktarını da etkiler.

Biyogaz reaktörü içinde yüksek organik madde yükleme hızı biriken asit miktarını artırarak pH seviyesinin düşmesine neden olur. Bu durum, metanojenik bakterileri olumsuz etkiler ve biyogaz üretim miktarını azaltıp hatta durma noktasına getirebilir. Aynı şekilde, organik madde yükleme hızının düşük olması da üretilen gaz miktarını azaltır. Bu nedenle, organik madde yükleme hızının belirli bir aralıkta olması gerekmektedir (URL 11).

1.4.6 Fermantasyon süreci

Fermantasyon süresi, organik maddelerin bakteriler tarafından parçalanması için gereken süre olarak da bilinir. Bu süre, çevredeki faktörlere bağlı olarak değişiklik gösterir. Örneğin, sıcaklık ile fermantasyon süresi arasında ters bir ilişki vardır. Fermantasyon süresi sıcaklık arttıkça azalır. Ayrıca, ortamdaki katı miktarı da fermantasyon süresini etkiler. Katı miktarı arttıkça su yoğunluğu azalır ve bu da fermantasyon süresinin uzamasına neden olur. Organik madde içeriği de fermantasyon süresini etkileyen bir faktördür. Bozunma hızı arttıkça hidrolik alıkonma süresi azalır (Bayrak, 2014).

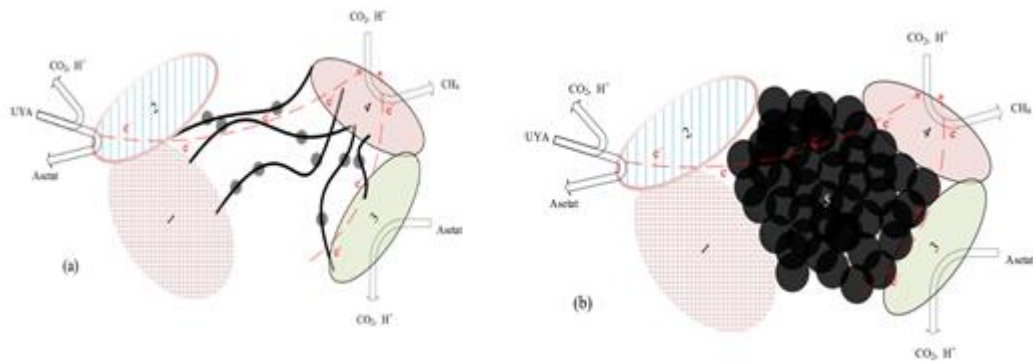
1.4.7 Toksik maddeler

Biyogaz oluşum aşamasında, farklı konsantrasyonlarda asit ve oksijen gibi maddelerin bulunması, bakterilerin üremesini engelleyebilir ve toksik etkilere neden olabilir. Aynı şekilde, bakır, kurşun ve çinko gibi ağır metallerin de düşük miktarlarda bulunması biyolojik aktiviteyi artırabilir, ancak yüksek miktarlarda bulunması bakteriler üzerinde toksik etkilere neden olabilir. Dolayısıyla, tüm maddelerin uygun konsantrasyonlarda bulunması gerekmektedir (Bayrak, 2014).

1.5 Anaerobik Çürütmede Elektron Transfer Mekanizması

Anaerobik Çürütme, organik maddelerin doğal olarak oluşan biyokimyasal reaksiyonlarla ayrıştırıldığı bir süreçtir. Bu süreç, hidroliz, asidojeniz (asetojenez) ve metanojeniz adı verilen üç aşamadan oluşur. Bu aşamalarda, çeşitli mikroorganizma türleri görev alır. Süreç içerisinde işlev gören mikroorganizmalar; hidrolitik bakteriler, asidojenler, hidrojen üreten asetojenler, homo-asetojenler ve metanojenlerdir (Zhang vd., 2018).

Metanojenler ve fermentatif bakteriler, organik bozunma ve metan üretimi için birlikte çalışırlar. Bu süreçte, bakteriler arasında türler arası elektron transferi gerçekleşir. Bu faaliyet, türler arası elektron transferi olarak da adlandırılabilir (Stams vd., 2009).



Şekil 1.6. a) Biyolojik DIET, b) İletken malzemelerin kullanımı ile oluşan DIET (Muratçobanoğlu vd., 2019)

Türler arası elektron transferi esas olarak iki yoldandır (Şekil 1.6.): (a) biyoelektrik bağlantılar (yani, iletken pili (e-pili)); (b) iletken abiyotik malzemeler aracılığıyla.

Biyoelektrik bağlantı, doğrudan türler arası elektron alışverişi için iletken pili biyolojik bileşiklerin kullanılması veya dış hücre yüzeyinde sıkı bir bağlantı oluşturulması ile gerçekleştirilir. İletken pili (e-pili), aromatik amino asitlerin üst üste binen π orbitalleri nedeniyle metal benzeri iletkenlik sergileyen, bakteri yüzeyinde büyüyen saç benzeri iletken uzantılardır (Tremblay vd., 2017).

Son yıllarda, anaerobik proseslerde elektron transferini arttırmak için iletken malzemeler kullanılarak, bakteri ve arkeler arasında doğrudan türler arası elektron transferi (DIET) üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Mikroorganizmalar, kendi iletken yapısının yanı sıra biyolojik olmayan iletken malzemeleri de elektron transferi için kullanabilirler. Hem karbon bazlı hem de metal bazlı iletkenler, e-pilin alternatifi olarak DIET'e aracılık etmek için kullanılabilirler.

Şekil 1.6. a'da verilen DIET proseslerde, nanoteller, hücre dışı pili veya elektron taşıyıcı protein yapıları vasıtasıyla elektron veren ve alan mikroorganizmalar arasındaki transfer doğal olarak gerçekleşir. Şekil 6b'de ise mikroorganizmalar doğrudan elektron transferini ortamda iletken malzemelerin bulunması durumunda biyolojik olmayan iletken malzemeleri kullanarak gerçekleştirebilirler.

Farklı iletken malzemeler, anaerobik çürütme sürecinde kullanılarak uzun lag fazı, yavaş metan üretimi ve olumsuz koşullara dirençsizlik gibi dezavantajlara pratik bir çözüm sunmaktadır. İletken malzeme kullanımı, elektron taşınımını hızlandırmaktadır (Muratçobanoğlu vd.,2019).

1.5.1 Biyogaz üretiminde kullanılan iletken malzemeler

Anaerobik çürütmede biyogaz üretimini arttırmak için kullanılacak iletken malzemeler iki farklı kategoride gruplandırılabilir. Bunlar, karbon bazlı ve karbon bazlı olmayan iletken malzemelerdir. Son zamanlarda anaerobik prosesleri iyileştirmek için biyokömür, aktif karbon, karbon nanotüpler, grafit, karbon giydirme, grafen ve bunların kompozit türlerini içeren karbon bazlı malzemeler kullanılabilirler.

Biyometan potansiyelini arttırmak için, karbon olmayan magnetit, hematit, sıfır değerlikli demir gibi metalik birçok iletken malzemeler de kullanılmaktadır. Bu

malzemeler, karbon bazlı iletken malzemelere benzer şekilde, DIET metabolizmasını tetiklemekte ve anaerobik prosesi iyileştirmektedir.

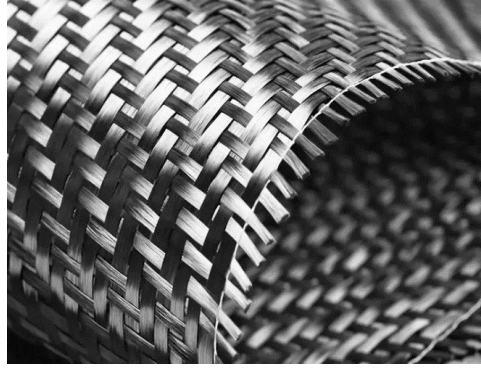
1.5.1.1 Karbon kumaş

Karbon elyaf ya da karbon fiber, günümüz koşullarında pek çok sektörde kullanılan malzemelerden biridir. En dikkat çeken özelliğiyle çelikten 3 kat daha dayanıklı olmasına rağmen 4,5 kat daha hafif olmasıdır. Aynı zamanda esnek dokusuyla da ön plana çıkar. Enerji sektöründe de karşılaşılan karbon elyaflar ipeksi yapısına rağmen çelikten çok daha güçlü bir malzemedir.

Aktif karbon, karbondan oluşan maddelerin kimyasal veya fiziksel olarak aktive edilmesiyle elde edilir. Bu işlem sonucunda, iç yüzey alanı ve gözenek hacmi artırılmış bir madde elde edilir. Aktif Karbon (AC), birçok endüstride farklı amaçlar için kullanılır (Baytar, 2015).

Aktif karbon, gaz veya katı fazında iç yüzeyinde çok çeşitli molekülleri adsorplayabildiğinden çeşitli maddelerin adsorpsiyonunda kullanılır. Aktif karbon, metal sanayisinde karbon katkısında, karışımların ayrıştırılmasında, savunma sanayisinde koruyucu giysi yapımında, atık su arıtımında, sağlık sektöründe, gazların saflaştırılmasında, silah sanayisinde patlayıcı yapımında, gıda endüstrisinde saflaştırma işlemlerinde, içme suyu arıtılmasında ve elektronik sistemleri susturmak için bomba yapımında kullanılır (Küçükgül, 2004).

Karbon elyaf, dünya genelinde 40 bin tondan fazla üretilmektedir ve pek çok ülkede kullanılmaktadır. Karbon fiber üretimi yalnızca 8 ülkede gerçekleştirilmektedir: ABD, Macaristan, Fransa, Japonya, Almanya, İngiltere, İran ve Tayvan. Dünyada sadece iki firma karbon fiber üretmektedir ve bunlar Japon ve Amerikalıdır. Dolayısıyla sadece Japonya ve ABD karbon fiber üretim teknolojisine sahiptir. Türkiye, karbon fiber üretimini kendisi yapabilen üçüncü ülkedir ve karbon fiber üretim miktarında dünyada sekizinci sıradadır (URL 3).



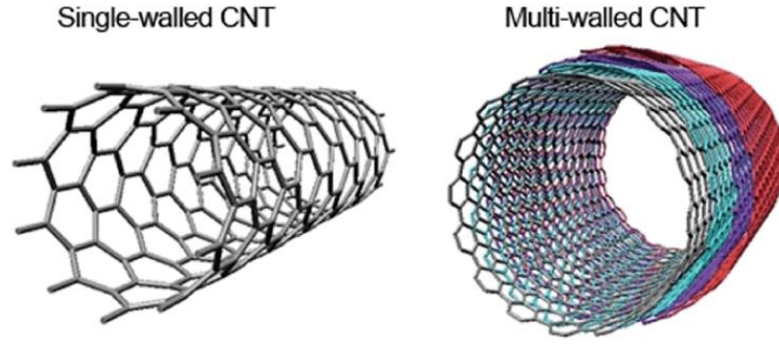
Şekil 1.7. Karbon kumaş (URL 1)

1.5.1.2 Karbon nanotüpler

Karbon, canlıların temel taşıdır ve nano yapı hali ile nano teknoloji çağını başlatmadan önce doğal olarak bulunduğu gibi laboratuvar şartlarında da üretilebilir. Karbon, sonlu boyutlarda nanometre boyutunda sağlam yapılara sahip olduğu için ayrıcalıklı bir elementtir. Periyodik tablodaki elementler arasında sıfır boyuttan üç boyuta kadar izomerleri bulunan tek elementtir.

Karbonun genel yapıları arasında grafit, sıvı karbon, elmas, karbon nano fiberler, fulleren (C₆₀), camsı karbon, karbolitler, siyah karbon, amorf karbon, karbin ve karbon nanotüpler yer alır.

Elektron mikroskopisi gözlemleri ile 1991 yılında keşfedilen karbon nanotüplerin yapısı; C₆₀ molekülünün iki eşit parçaya bölünüp aralarına grafit silindir yerleştirilmesi ve “moleküler karbon fiberlerin” her iki ucundan başlıkla kapatılmış haline benzetilebilir. İç içe geçmiş tüp sayılarına göre karbon nanotüpler, tek duvarlı, çift duvarlı, çok duvarlı vb. şekilde isimlendirilir. Üretim yöntemlerine göre ve çapları uzunlukları değişmekle birlikte, çap uzunluk oranı 100 ile 1000 nm arasında değişir.



Şekil 1.8. Tek duvarlı ve çok duvarlı karbon nanotüpler

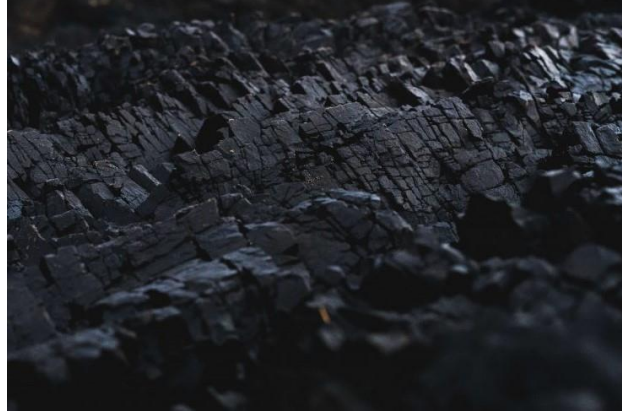
Karbon nanotüpler, karbon nanoparçacıklarının açık veya kapalı uçlu, bir veya iki duvarlı, düz veya spiral şeklindeki değişik biçimlerde dizilmesiyle oluşan yapılar olarak tanımlanabilir. Süper iletkenlik, yarı iletkenlik veya yalıtkanlık gibi çok değişik elektronik özellikler ile karbon nanotüplere dayanıklılık, sertlik veya elastikiyet açısından farklı davranış şekilleri verilebilir. Yüksek sıcaklıklarda bile karbon nanotüplerin kararlı yapısının devam ettiği, elektrik iletkenliği özelliğinin korunduğu ve bakır tellerden bin kat daha iletken olduğu tespit edilmiştir.

1.5.1.3 Biyokömür (BIOCHAR)

Biyokömür, biyokütlenin oksijensiz ortamda ısıl olarak parçalanması sonucunda oluşan, karbon bakımından zengin bir katı yakıttır (Günel, 2018).

Biyokömüre kıyasla modern biyokömür sanayi yeni olsa da doğada oluşumu yüzyıllar boyunca devam etmektedir. Biyokömür, doğada yüzyıllardır oluşan, karbon bakımından zengin bir yakıttır. Bitkisel atıklar toprak altında biriktiğinde, oksijensiz ortamda ısıl olarak parçalanarak biyokömür haline gelir. Biyokömür, oksijen ve hidrojen gibi diğer elementleri de içeren organik moleküllerin bir karışımıdır. Biyokömürün yüzey alanı büyüktür ($\sim 500 \text{ m}^2/\text{g}$), gözenekli yapıdadır, katyon değişim ve su tutma kapasiteleri yüksektir (Akgül,2017).

Biyokömür genel olarak toprakta karbon depolanması, toprak iyileştirilmesi, iklim değişikliğinin azaltılması (CO_2 ve CH_4 salınımlarının azaltılması), bitki gübresi olarak, enerji üretiminde ve atıkların bertarafında gibi çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır (Lorenz vd., 2014).



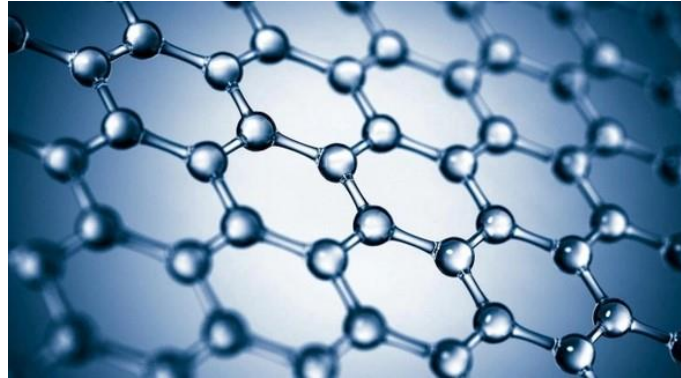
Şekil 1.9. Biyokömür (URL 4)

1.5.1.4 Grafen

Grafen, karbon atomlarının bal peteği şeklinde dizildiği, iki boyutlu bir yapıya sahip, çelikten 200 kat daha güçlü ve en iletken malzemesidir. Esnek ve hafif olmasıyla da öne çıkan grafen, nanoteknolojinin en önemli yapı taşlarından biridir (URL 5).

Grafen, termal iletkenliği, yüksek esnekliği, yüksek elektrik iletkenliği, mekanik mukavemeti ve şeffaf oluşu gibi özellikleriyle dikkat çekmektedir. Bu özellikleri sayesinde, grafen, birçok endüstride kullanılmaktadır (Tiyek, 2016).

Grafen, sensörler, elektronik cihazlar, yarı iletkenler, transistörler, havacılık, enerji üretimi, elektrokimya, sağlık ürünleri, bataryalar, yapı malzemeleri, otomotiv sanayi, kaplama ve kompozitler gibi çok farklı sanayi alanlarında kullanılabilir (URL 6).



Şekil 1.10. Grafen (URL 7)

1.5.1.5 Magnetit

Magnetit, demir atomlarının ferrimanyetik bir yapıda dizildiği, siyah veya kahverengimsi siyah renkli, metalik parlaklığa sahip bir demir mineralidir. Fe_3O_4 kimyasal formülü ile gösterilen magnetit, ana demir cevherlerinden birini oluşturmaktadır. Hemen hemen tüm magmatik ve metamorfik kayalarda küçük magnetit taneleri oluşmaktadır (URL 8).



Şekil 1.11. Magnetit (URL 8)

BÖLÜM II

LİTERATÜR TARAMASI

Biyoçar, anaerobik parçalanma sürecinde mikrobiyal üremeyi arttırarak metabolizmayı iyileştirme potansiyeli sağlamaktadır. Son çalışmalar, biyoçarın türler arası elektron transferi yoluyla anaerobik mikroorganizmaların metabolizmasını destekleme potansiyeli sunduğunu ortaya koymuştur. (Cai vd., 2016; De Vrieze vd., 2016; Lü vd.,2016). Yapılan bu çalışmaya göre Anaerobik parçalanma prosesine Çam Ağacından Üretilen Biyoçar'ın ilavesinin asidojenesis ve asit tamponlama kapasitesi üzerine etkilerini incelendiğinde (Qiu vd., 2019) arıtma çamurunda metanın hacimsel yüzdesini %47,80 arttırdığı belirtilmiştir (Güneç., vd. 2023).

Li Li ve diğ. (2015) yaptığı çalışmada anaerobik granüler çamurda anaerobik çürütme sürecinde tek duvarlı karbon nanotüp (SWCNT) kullanılarak metan üretim etkisi incelenmiştir. Laboratuvarda yukarı akışlı bir anaerobik çamur (UASB) reaktörü kullanılarak çalışmalar yapılmıştır. Anaerobik çamur granüllerinin 1000 mg / L'lik bir konsantrasyonda SWCNT maruziyetine tepkisi araştırılmıştır. Daha hızlı substrat kullanımı ve CH₄ oluşumu gözlenmiştir. SWCNT'lere maruz kalan metanojenik çamurun, elektriksel olarak daha iletken olduğu, bunda SWCNT'lere maruz kalmanın, kompakt granül yapılarında anaerobik fermentatif bakteriler ve metanojenler arasında doğrudan türler arası elektron transferini artırabileceği belirtilmiştir. Bu sonuçların olası reaktör hacmi küçülmelerine ve ilk yatırım ve işletme maliyetlerinde olası düşüşe sebep olabileceği belirtilmiştir.

Karbon bazlı malzeme takviyesiyle metan veriminin ve metan üretim hızının arttırılması hakkında yapılan çalışmalarda; iletken malzeme olarak karbon kumaşın kullanıldığı 10 g/L konsantrasyonla hazırlanan kesikli reaktörlerde kontrole kıyasla metan veriminin 10 kat arttığı belirtilmiştir. (Chen vd.,2014) Karbon bazlı iletken malzemeler, biyokömür, aktif karbon ve karbon kumaş, metanojenezin termodinamik olarak geliştirilmesinde önemli roller oynamıştır. Arıtma çamurunda, biyokömür ve karbon kumaş, kinetik olarak metan üretim oranının arttırılmasında daha iyi performans sergilediği, iletken malzemelerin anaerobik çürüme sürecini geliştirebileceği ve daha yüksek elektron

yakalama kapasitesi ve daha hızlı reaksiyon hızı elde etmek amacıyla daha verimli sentrofik metabolizma için DIET'i tetikleyebileceği belirtilmiştir (Yu Wu vd.,2020).

Propiyonat bozunmasını iyileştirmek için iletken karbon kumaş (FC) üzerine desteklenen bir çalışmada Fe_2O_3 hazırlanmış ve anaerobik parçalama reaktörlerine eklenmiştir. FC destekli reaktörlerde kümülatif metan üretimi ve propiyonat bozunması, kontrole kıyasla sırasıyla %15,4 ve %19,67 arttı görülmüştür. Bu sonuçlar, performansı artırmak için FC reaktörlerinde doğrudan türler arası elektron transferinin (DIET) kurulduğunu göstermiştir. Mikrobiyal topluluklar üzerinde yapılan analiz, FC reaktörlerindeki mikroorganizmalarla ilişkili DIET bolluğunun kontroldekinden daha yüksek olduğunu doğruladığı tespit edilmiştir (Yanguang Xu vd.,2020).

Jialin Liang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada üç iletken malzemenin (Fe_0 , Fe_3O_4 ve biyokömür), arıtma çamuru ve gıda atıklarının anaerobik birlikte sindirim performansını ve stabilitesi üzerindeki etkilerini araştırılmış ve karşılaştırılmıştır. Bu amaçla 400 ml hacimde reaktörlere S/I 0,6 konsantrasyonunda her iletken malzeme 10 g/L ilave edilerek çalışılmıştır. Kontrol grubuyla karşılaştırıldığında Fe_0 , Fe_3O_4 ve biyokömür gruplarının CH_4 üretimi sırasıyla %44,5, %16,1 ve %23,1 oranında arttığı, bunun da iletken malzemelerin anaerobik birlikte sindirim süreci sırasında CH_4 üretiminin iyileştirdiği belirtilmiştir. Bu durum ayrıca iletken malzemelerin varlığıyla fermentatif bakteriler ve metanojenik arkeler arasındaki teşvik edilen elektron transferiyle ilişkilendirilmiştir. Ek olarak, VS giderme verimliliği, CH_4 üretiminin sonucuyla benzer bir eğilim göstermiştir. Kontrol, Fe_0 , Fe_3O_4 ve biyokömür gruplarının VS giderme etkinliği sırasıyla $48,4 \pm 3,5$, $60,0 \pm 2,1$, $56,8 \pm 3,2$ ve $58,9 \pm 1,9$ olduğu belirtilmiştir (Jialin Liang vd.,2020).

Chao Pan ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada gözenekli iletken malzeme PAC (toz aktif karbon), kuru anaerobik çürütme sistemindeki arıtma çamurunun ve biyolojik olarak parçalanabilirliğini önemli ölçüde optimize edildiği, PAC %50 reaktöründe metan üretimini, kontrol reaktörüne kıyasla %49,9'a kadar artırıldı belirtilmiştir. PAC ilavesinin, hidrolizasyon ve biyolojik bozunma sürecini önemli ölçüde arttırdı; TS ve VS azalma oranının kontrole göre sırasıyla %36,4 ve %34,1 oranında artmasıyla kanıtlandığı belirtilmiştir. İletken malzeme PG (toz grafit) ilaveli reaktörlerin kümülatif metan üretiminde kontrole kıyasla sınırlı bir artış (%1,3 ila %7,8) olduğundan bununda

DAD (Arıtma çamurunun kuru anaerobik çürütülmesi) sürecini önemli ölçüde desteklemediği belirtilmiştir. Ayrıca inhibitör substrat adsorpsiyon deneyleri, PAC'ın VFA'lar için önemli bir adsorpsiyona sahip olduğunu, PG'nin ise neredeyse hiç adsorpsiyon göstermediğini göstermiştir (Chao Pan vd.,2019).



BÖLÜM III

MATERYAL VE METOD

3.1 Arıtma Çamuru ve Aşı Temini

Çalışmalarda kullanılacak olan arıtma çamuru Sivas Belediyesi Atıksu Arıtma Tesisi geri devir çamur hattından temin edilmiştir. Deneylede kullanılacak olan aşı çamuru ise Kayseri İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi Çürütücü ünitesinden alınmıştır. Arıtma çamuru ve aşı çamurunda Toplam Katı Madde (TKM), Uçucu Katı Madde (UKM), pH ölçümleri yapılmıştır.

3.2 Reaktörlerin Hazırlanması ve İşletme Koşulları

Yapılan deneylerde kesikli reaktörler kullanılmıştır. Kesikli reaktörler için 500 ml hacmindeki serum şişeleri kullanılmıştır. Çalışma hacmi ise 300 ml olarak belirlenmiştir. Öncelikle en iyi substrat/aşı (S/I) oranını belirlemek için farklı S/I değerleri (1,2,3,4) kullanılarak 2 paralel olacak şekilde reaktörler kurulmuştur. Reaktörler hazırlanırken ilk önce, pH değerleri ölçülmüştür. pH değerleri kaydedildikten sonra 5 dk boyunca azot gazından geçirilerek içerisindeki oksijenin sıyırılması sağlanmıştır. Anaerobik koşulların oluşması sağlandıktan sonra ağzı sızdırmaz kapaklar ile hava almayacak şekilde kapatılmıştır. Kurulan reaktörler 37°C'de 50 gün boyunca etüvde bekletilmiştir. Bu süreç içerisinde her gün 100 mL kapasiteli şırınga ile gaz ölçümleri yapılmıştır. Ölçülen gaz miktarları kayıt altına alınmıştır. Belirli günlerde reaktörlerden biyogaz numuneleri alınarak CH₄ analizleri yapılmıştır.



Fotoğraf 3.1. Reaktör kurulumu 1

Optimum biyogaz ve metan üretim değerlerine göre en iyi (S/I) değerine karar verilmiştir. İletken malzemelerin biyogaz ve metan üretim değerlerine etkisini incelemek amacıyla karbon kumaş ve magnetit kullanılmıştır. İletken malzemenin etkisinin belirlenebilmesi için farklı konsantrasyonlarda karbon kumaş ve magnetit ilave edilerek 3 paralel olacak şekilde yeni reaktörler hazırlanmıştır (Çizelge 3.1.).



Fotoğraf 3.2. Reaktör kurulumu 2

Çizelge 3.1. Reaktörlere ilave edilen iletken malzeme konsantrasyonları

Deney No	Konsantrasyon	Paralel Reaktör Adedi	Karbon Kumaş (gr)	Magnetit (Fe ₃ O ₄) (gr)
1	(0,5 g/L)	3	-	0,15
2	(2 g/L)	3	-	0,6
3	(10 g/L)	3	-	3
4	(2,5 g/L)	3	0,75	-
5	(10 g/L)	3	3	-
6	(50 g/L)	3	15	-
7	(50+0,5) g/L	3	15	0,15
8	(2,5+10) g/L	3	0,75	3
9	(10+2) g/L	3	3	0,6
10	(Aşısı)	3	-	-
11	(Aritma Çamuru)	3	-	-

Kurulan reaktörler 37°C'de 41 gün boyunca etüvde bekletilmiştir. Bu süreç içerisinde her gün 100 mL kapasiteli şırınga ile gaz ölçümleri yapılmıştır. Ölçülen gaz miktarları kayıt altına alınmıştır. Belirli günlerde reaktörlerden biyogaz numuneleri alınarak CH₄ analizleri yapılmıştır. Reaktörler açıldıktan sonra pH, ORP, TOK-TA, TKM, UKM, analizleri yapılmıştır.

3.3 Analitik Metodlar

Deneyde kullanılan her bir ürün için toplam katı madde (TKM) ve uçucu katı madde (UKM) değerleri hesaplanmıştır. Reaktörlerin bitişinde ise her reaktör için pH, ORP, toplam organik karbon-toplam azot TOK-TA, TKM, UKM, analizleri yapılmıştır.

3.3.1 pH ORP ölçümleri

Kurulan reaktörlerde biyogaz üretimi sonlandığında reaktörler açılarak ölçümleri elektrometrik yöntem ile gerçekleştirilmiştir. Reaktörler açıldıktan sonra anlık olarak Hach Lange Sension 2 marka pH metre ile ölçülmüştür. Reaktör içerisine önce pH probu daldırılıp pH sabitlenene kadar beklenmiştir. Daha sonra aynı işlem aynı reaktöre ORP probu daldırılarak gerçekleştirilmiştir. ORP ölçümleri Hach Lange HQ 30 D cihazla gerçekleştirilmiştir.

3.3.2 Toplam katı madde ve uçucu katı madde tayini

Çalışmalar sonunda (reaktörler açıldığında) aşu çamuru ve kurulan her bir reaktör için ayrı ayrı TKM ve UKM deneyleri yapılmıştır. TKM analizleri Standart Metot 2540-C'ye göre yapılmıştır. Belirli hacimde alınan örnek, sabit tartıma getirilmiş kroze içinde 103-105°C'de etüvde kurutulmuş ve desikatörde soğutulmuştur. Sabit tartıma gelince hassas terazide tartılmıştır.

Aşağıdaki şekilde hesaplama yapılmıştır. (APHA/AWWA, 2005).

$$\text{TKM, mg/L} = (A-B) \times 1000 / \text{ml, örnek hacmi} \quad (3.1)$$

A: Kroze + örnek ağırlığı, (mg)

B: Krozenin darası, (mg)

UKM, TKM'nin organik kısmını temsil etmektedir. UKM analizi Standart Metot 2540-C'ye göre yapılmıştır. UKM, TKM içeriği bilinen numunenin 550°C'de fırında yakılması ve sabit tartıma getirilmesi sonucu gözlenen ağırlık kaybının belirlenmesi ile ölçülmüştür (APHA, 2005).

3.3.3 TOK-TA tayini

Reaktörler açıldıktan sonra santrifüj işlemi için her reaktörden 15 mL numune alınmıştır. Alınan numuneler santrifüj cihazında 5000 rpm hızda 15 dakika işleme tabi tutulmuştur. Yapılan işlem sonrasında 0.45µm'lik filtre kullanılarak süzdürme yapılmıştır. Süzdürülen kısım 200 kat seyreltilerek numuneler viallere alınarak TOK-TA analizleri TOK analizörü (Shimadzu TOC analyzer-SSM) ile gerçekleştirilmiştir.



Fotoğraf 3.3. TOK-TA analizi



BÖLÜM IV

BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Aş1 ve Atık Karakterizasyonu

Kesikli reaktörlerde kullanılan aş1 ve arıtma çamuruna ait karakterizasyon değerleri Çizelge 4.1.'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Aş1 ve arıtma çamuru karakterizasyonu

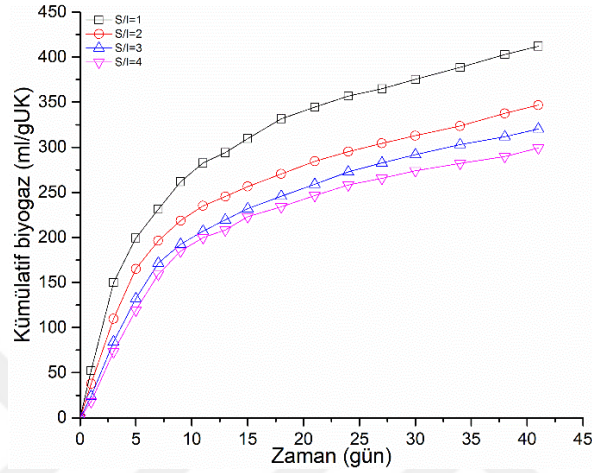
	Aş1	Arıtma Çamuru
TKM (mg/L)	24.637	10.790
UKM (mg/L)	13.300	7.837
TA (mg/L)	-	525
TF (mg/L)	-	215
TOK (%)	23,32 (Mert, 2023)	-
pH	7,15	6,63

4.2 Farklı S/I Oranlarının Biyogaz ve Biyometan Üretimi Üzerindeki Etkisi

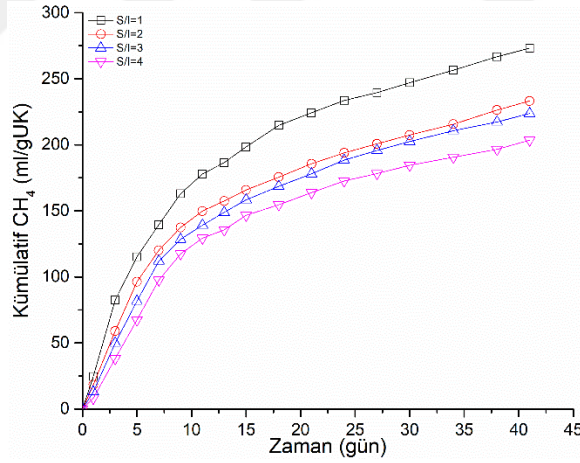
Farklı S/I oranlarında işletilen kesikli reaktörlere ait kümülatif biyogaz üretimi Şekil 4.1'de verilmiştir. S/I 1, 2, 3 ve 4 gUK/gUK yükleme oranlarındaki kümülatif biyogaz üretimleri sırasıyla 438, 412, 388 ve 352 mL biyogaz/gUK olarak belirlenmiştir. S/I=1 gUK/gUK yükleme oranında kümülatif biyogaz üretim miktarı yüksekken S/I oranı 2, 3 ve 4 gUK/gUK arttığında biyogaz üretiminde azalma gözlemlenmektedir.

Kesikli reaktörlerde S/I oranının artması, reaktörde birim mikroorganizma başına düşen besin miktarında artışa neden olurken, yüksek besin miktarları mikroorganizmaların faaliyetlerinde baskılanmaya neden olabileceği için birim biyogaz üretiminde düşüşlerin gözlemlenmesine neden olabilmektedir. Yüksek yükleme oranlarında gaz üretiminde meydana gelen düşüşler literatürde de gözlemlenmektedir. Latifi vd. arıtma çamurunu substrat olarak kullandıkları çalışmada üç farklı S/I oranı kesikli sistemler işletmişler ve S/I 1 reaktöründe en yüksek biyogaz üretim miktarını elde etmişlerdir. 20 L hacminde reaktör kullanılan çalışmada S/I 1,2 ve 4 gUK/gUK koşullarında biyogaz üretimleri sırasıyla 11950, 5350 ve 3365 ml seviyesindedir (Latifi vd.,2019).

Farklı S/I oranları için kümülatif biyometan üretimleri Şekil 4.2’de verilmiştir. S/I 1, 2, 3 ve 4 gUK/gUK yükleme oranında sırası ile 298, 281, 274 ve 244 mlCH₄/gUK olarak belirlenmiştir. Biyogaz üretimine benzer şekilde biyometan üretiminde de S/I=1 gUK/gUK yükleme oranında en yüksek biyometan üretimi gerçekleşirken S/I oranı 2,3 ve 4 gUK/gUK arttığında biyometan üretiminde azalma gözlemlenmektedir.



Şekil 4.1. Farklı yüklem oranlarındaki kümülatif biyogaz üretimleri



Şekil 4.2. Farklı yüklem oranlarındaki kümülatif metan üretimleri

Ayrıca biyogaz ve metan üretimini araştırmak için yapılan çalışmada arıtma çamuru üç tarımsal atık olan buğday samanı, pirinç samanı ve soya fasulyesi samanı ile birlikte kullanımında sırasıyla 223, 218 ve 197 ml/g VS'lik daha yüksek kümülatif spesifik metan üretimi sağladığını ve bunun da arıtma çamurunun tek başına kullanılması ile kıyaslandığında sırasıyla 2,57, 2,52 ve 2,27 kat daha yüksek metan verimi ürettiğini ortaya koymaktadır. (Rasika vd.,2017)

4.3 Farklı Konsantrasyonlardaki Karbon Kumaş ve Magnetit İlavesinin Biyogaz ve Biyometan Üretimi Üzerindeki Etkisi

Farklı S/I = 1, 2, 3 ve 4 gUK/gUK değerleri için çalışma yapılmış ve elde edilen en yüksek verim S/I= 1 gUK/gUK reaktörü olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar neticesinde en yüksek verimin elde edildiği S/I= 1 gUK/gUK reaktöründe iletken malzemenin etkisini incelemek amacıyla farklı konsantrasyonlarda karbon kumaş (2,5, 10 ve 50 g/L) farklı konsantrasyonlarda magnetit (0,5, 2 ve 10, g/L) ve farklı konsantrasyonlarda karbon kumaş + magnetit ((50+0,5), (2,5+10) ve (10+2) g/L) malzemesinin biyogaz ve biyometan üretimine etkisi incelenmiştir.

Farklı karbon kumaş ve magnetit konsantrasyonlarında işletilen kesikli reaktörlere ait kümülatif biyogaz üretimi Şekil 4.3'de verilmiştir. Farklı konsantrasyonlarda karbon kumaş ilavesinin (2,5, 10 ve 50 g/L), kümülatif biyogaz üretimleri sırasıyla 447, 414 ve 432 ml/gUK, farklı konsantrasyonlarda magnetit ilavesinin (0,5, 2 ve 10, g/L), kümülatif biyogaz üretimleri sırasıyla 440, 452 ve 440 ml/gUK, ve farklı konsantrasyonlarda karbon kumaş + magnetit ilavesinin ((50+0,5), (2,5+10) ve (10+2) g/L), kümülatif biyogaz üretimleri sırasıyla 436, 440 ve 445 ml/gUK olarak belirlenmiştir.

Farklı karbon kumaş konsantrasyonlarında en yüksek biyogaz üretimi 2,5 g/L ilave edilen reaktörde belirlenmiştir. Farklı konsantrasyonlarda magnetit ilave edilen reaktörlerde biyogaz üretiminde belirgin bir artış gözlenmemiştir. En yüksek biyogaz üretimi 2 g/L magnetit ilave edilen reaktörde belirlenmiştir. Farklı konsantrasyonlarda en yüksek biyogaz üretimi karbon kumaş + magnetit (2,5+10) g/L ilave edilen reaktörlerde belirlenmiştir.

Farklı karbon kumaş ve magnetit konsantrasyonlarında işletilen kesikli reaktörlere ait kümülatif metan üretimi Şekil 4.4'de verilmiştir. Farklı konsantrasyonlarda karbon kumaş ilavesinin (2,5, 10 ve 50 g/L), kümülatif metan üretimleri sırasıyla 345, 316 ve 331 ml/gUK , farklı konsantrasyonlarda magnetit ilavesinin (0,5, 2 ve 10, g/L), kümülatif metan üretimleri sırasıyla 346, 356 ve 344 ml/gUK ve farklı konsantrasyonlarda karbon kumaş + magnetit ilavesinin ((50+0,5), (2,5+10) ve (10+2)

g/L), kümülatif metan üretimleri sırasıyla 333, 341 ve 355 ml/gUK olarak belirlenmiştir.

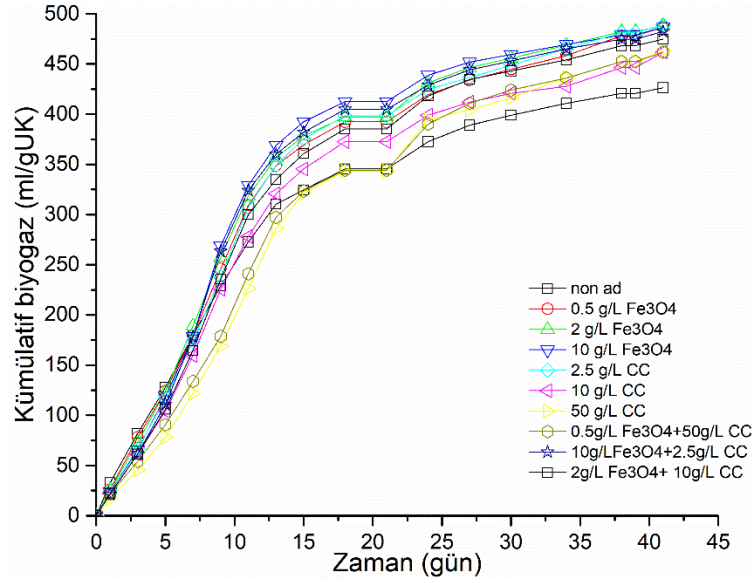
Farklı karbon kumaş konsantrasyonlarında en yüksek metan üretimi 2,5 g/L ilave edilen reaktörde belirlenmiştir. Farklı konsantrasyonlarda magnetit ilave edilen reaktörlerde en yüksek metan üretimi 2 g/L ilave edilen reaktörde belirlenmiştir. Farklı konsantrasyonlarda karbon kumaş + magnetit ilave edilen reaktörlerde en yüksek metan üretimi (10+ 2) g/L reaktöründe belirlenmiştir.

Karbon bazlı malzeme takviyesiyle metan veriminin ve metan üretim hızının artırılması hakkında yapılan çalışmalarda; iletken malzeme olarak karbon kumaşın kullanıldığı 10 g/L konsantrasyonla hazırlanan kesikli reaktörlerde kontrole kıyasla metan veriminin 10 kat arttığı belirtilmiştir. (Chen vd.,2014) Benzer şekilde karışık organik karbonun substrat olarak kullanıldığı bir çalışmada magnetit ilavesinin metan üretimini %15,4 arttırdığı ve gecikme fazını %13,9 kısalttığı belirtilmiştir. (Qidong Yin vd.,2017)

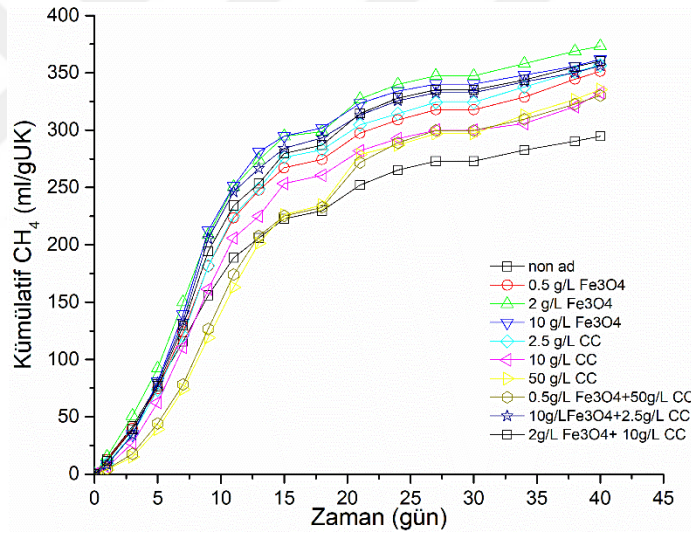
Çizelge 4.2. Farklı iletken malzemelerin metan üretimine etkisinin kıyaslanması

İletken malzeme	Substrat	Metan üretimindeki verim artışı (%)	Referans
Biyokömür	Glikoz	86.6	LUO vd.,2015
Granüler karbon	Aritma çamuru	17.4	YANG vd.,2017
Granüler karbon	Etanol	12.8	LIN vd.,2018
Karbon giydirme	Butanol	59	ZHAO vd.,2017
Magnetit	Aritma çamuru	20.8	Bu çalışma
Karbon kumaş	Aritma çamuru	17.1	Bu çalışma

Benzer çalışmalar, iletken malzeme ilavesinin metan üretimini artırdığını ancak bu artışın substrat ve kullanılan iletken malzeme özelliklerine bağlı olarak farklı oranlarda gerçekleşebileceğini ortaya koymaktadır.



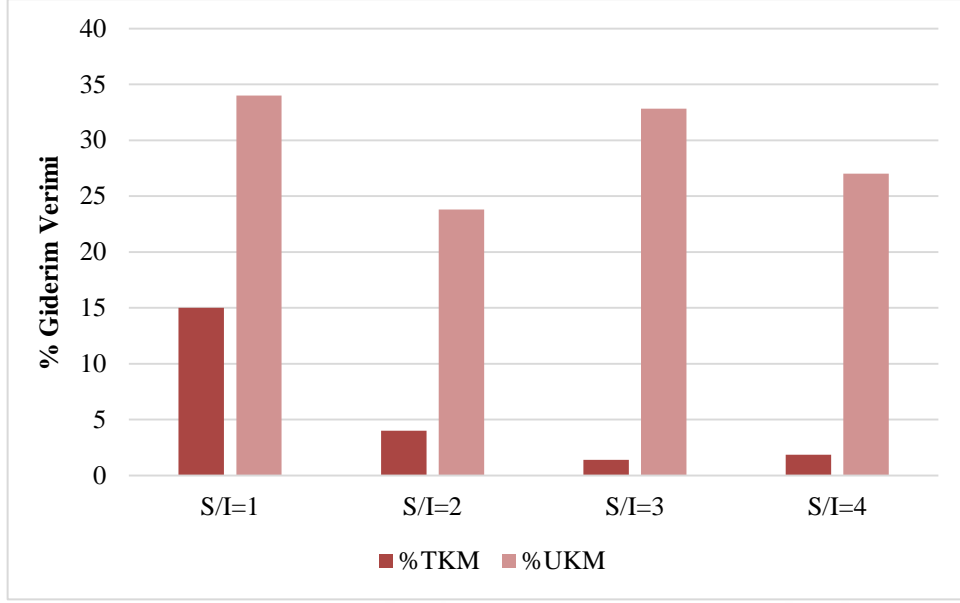
Şekil 4.3. Farklı konsantrasyonlardaki karbon kumaş ve magnetit ilavesinin kümülatif biyogaz üretimleri



Şekil 4.4. Farklı konsantrasyonlardaki karbon kumaş ve magnetit ilavesinin kümülatif metan üretimleri

4.4 Farklı S/I Oranlarında TKM ve UKM Giderimi Üzerindeki Etkisi

TKM ve UKM giderim verimleri incelendiğinde, en yüksek giderim verimleri S/I=1 grUK/gUK reaktöründe sırasıyla %15 TKM giderimi %34 UKM giderimi elde edilmiştir.

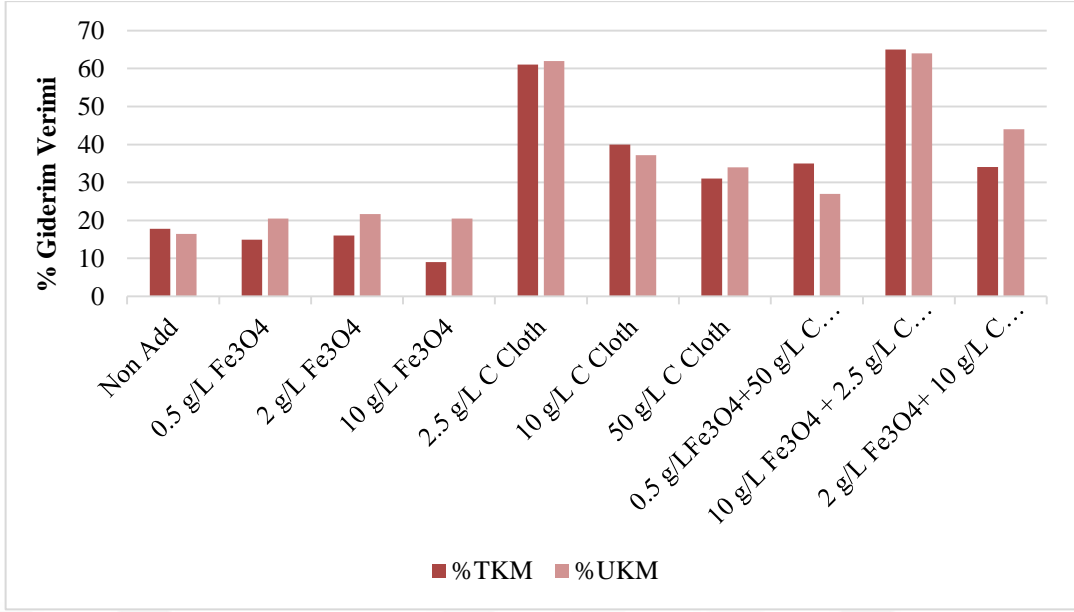


Şekil 4.5. Farklı S/I oranlarında TKM ve UKM giderim verimleri

4.5 Farklı Konsantrasyonlardaki Karbon Kumaş ve Magnetit İlavesinin TKM ve UKM Giderimi Üzerindeki Etkisi

Farklı karbon kumaş ve magnetit konsantrasyonlarında işletilen kesikli reaktörlere ait giriş ve çıkış TKM ve UKM değerlerine göre giderim verimleri Şekil 4.6’de verilmiştir. TKM ve UKM giderim verimleri incelendiğinde, en yüksek giderim verimleri sırasıyla 2,5 g/L karbon kumaş ilave edilen reaktörde %61 TKM giderimi %62 UKM giderimi, 2 g/L magnetit ilave edilen reaktörde %16 TKM giderimi %22 UKM giderimi, (2,5+10) g/L (karbon kumaş + magnetit) ilave edilen reaktörde %65 TKM giderimi %64 UKM giderimi elde edilmiştir.

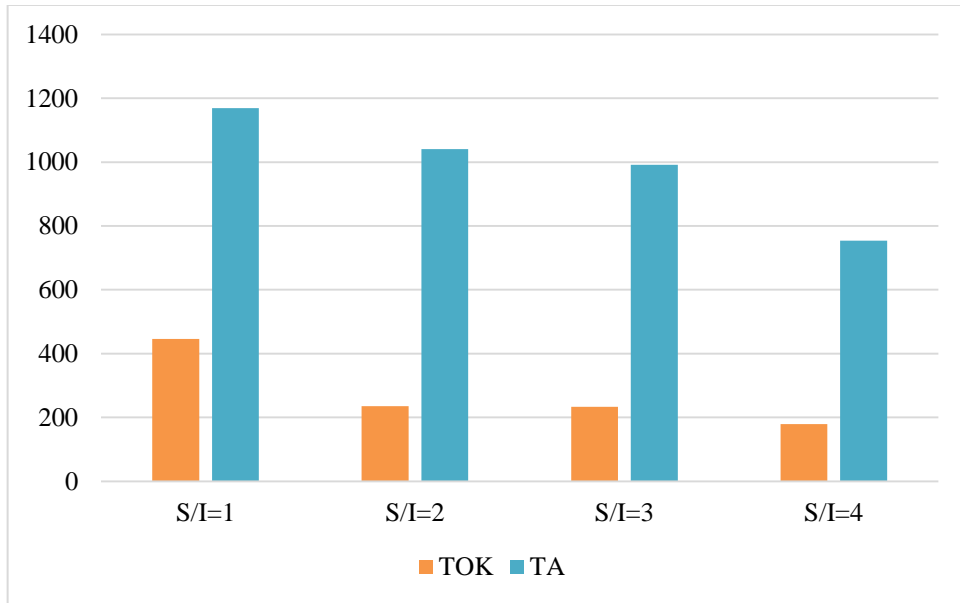
İletken malzemeler anaerobik çürütme sistemindeki arıtma çamurunun metanojenезini ve biyolojik olarak parçalanabilirliğini önemli ölçüde optimize etmektedir. İletken malzeme ilavesinin, hidrolizasyon ve biyolojik bozunma sürecini önemli ölçüde arttırdığı; TKM ve UKM azalma oranının kontrole göre sırasıyla %36,4 ve %34,1 oranında artmasıyla kanıtlandığı belirtilmiştir (Chao Pan vd.,2019).



Şekil 4.6. Farklı konsantrasyonlardaki karbon kumaş ve magnetit ilavesinin TKM ve UKM giderim verimleri

4.6 Farklı S/I Oranlarında TOK ve TA Konsantrasyonları

Şekil 4.7’de farklı S/I yükleme oranlarındaki TOK ve TA değerleri verilmektedir. S/I 1, 2, 3 ve 4 gUK/gUK yükleme oranlarında çıkış TOK konsantrasyonları sırası ile 446, 235, 233 ve 179 mg/L, çıkış TA konsantrasyonları sırası ile 1169, 1041, 992, ve 754 mg/L olarak belirlenmiştir.

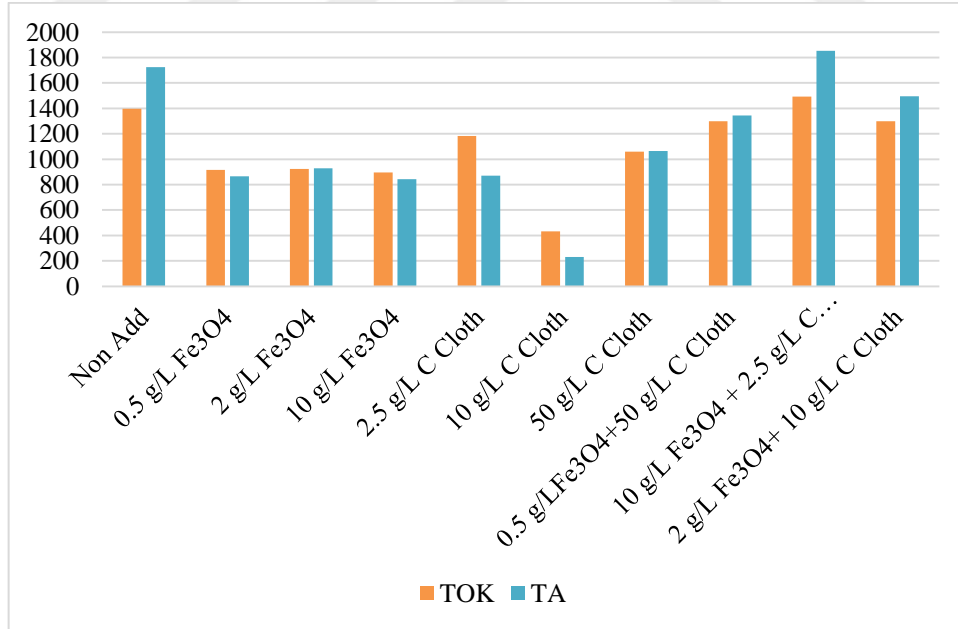


Şekil 4.7. Farklı S/I yükleme oranlarında TOK ve TA konsantrasyonları

4.7 Farklı Konsantrasyonlardaki Karbon Kumaş ve Magnetit İlavesinin TOK ve TA Konsantrasyonları

Şekil 4.8'de farklı konsantrasyonlarda karbon kumaş ve magnetit ilavesinin TOK ve TA üzerine etkileri incelenmiştir. TOK konsantrasyonları 2,5, 10 ve 50 g/L karbon kumaş konsantrasyonlarında sırasıyla 1184, 433 ve 1060 mg/L iken TA için sırasıyla 872, 231 ve 1064 mg/L olarak belirlenmiştir. TOK konsantrasyonları 0,5, 2 ve 10, g/L magnetit konsantrasyonlarında sırasıyla 915, 924 ve 896 mg/L iken TA için sırasıyla 865, 927 ve 843 mg/L olarak belirlenmiştir. TOK konsantrasyonları ((50+0,5), (2,5+10) ve (10+2) g/L), karbon kumaş + magnetit konsantrasyonlarında sırasıyla 1298, 1492 ve 1299 mg/L iken TA için sırasıyla 1345, 1854 ve 1496 mg/L olarak belirlenmiştir.

İletken malzeme eklenmeyen ve farklı konsantrasyonlarda magnetit ve karbon kumaş ilavesinin eklendiği reaktörlerde TOK ve TA konsantrasyonlarında anlamlı bir fark gözlenmemiştir. İletken malzeme ilavesinin enzimatik aktiviteyi, elektron transferini desteklemesine rağmen yeni biyokütle oluşumunu desteklemediği düşünülebilir.



Şekil 4.8. Farklı konsantrasyonlardaki karbon kumaş ve magnetit ilavesinin TOK ve TA konsantrasyonları

4.8 Mikrobiyal Dağılım

Analizi yapılan örneklerde en yüksek biyogaz ve biyometan üretiminin gerçekleştiği 2,5 g/L karbon kumaş konsantrasyonu, en yüksek biyometan üretiminin gerçekleştiği (10+ 2) g/L karbon kumaş + magnetit konsantrasyonu ve iletkeniz S/I=1 gUK/gUK konsantrasyonunda reaktörlerden alınan biyofilm örneğine ait mikrobiyal dağılım grafiği Şekil 4.9’da belirtilmektedir.

Mikrobiyal dağılım sonuçları incelendiğinde *W5*, *Blvii28*, ve *Treponema*, türlerinin en baskın türler olduğu görülmektedir. İletken malzemelerin ilavesinin en yüksek görece bulunma oranı bulunan ilk 3 mikroorganizmada değişikliğe yol açmadığı gözlemlenmiştir. Bunu yanı sıra biyometan üretiminin en yüksek olduğu 2 g/L Fe₃O₄ ilave edilen örnekte, *Coprothermobacter* görece bulunmasını yaklaşık 2 kat artırdığı gözlemlenmiştir. *Coprothermobacter* fermantasyon sürecinde rol oynayan ve hidrojenotrofik metanojenlerle ilişkisi bilinen mikroorganizmadır (Aleksiyev vd, 2014). Bu sebeple Fe₃O₄ ilavesindeki artışın hidrojenotrofik metan üretim yolu ile ilişkilendirilebileceği düşünülmektedir.

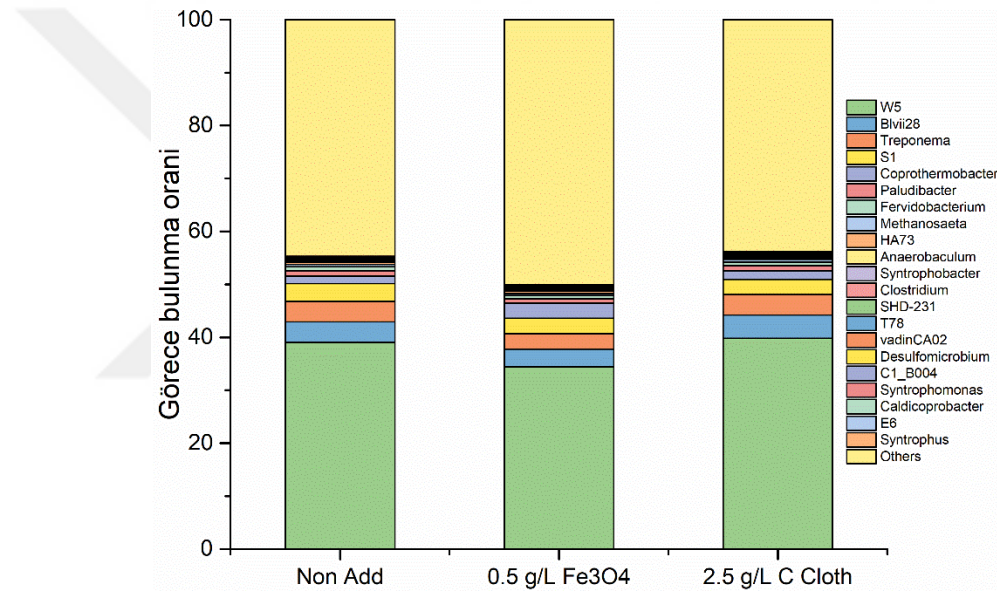
W5, 35 °C’de anaerobik fermantasyon süreçlerinde varlığını devam ettiren mikroorganizmadır. Bunların en belirgin rollerinin kompleks organik materyallerin hidrojen üretimi ile birlikte uçucu yağ asitlerine fermantasyonu olduğu bilinmektedir (Qing Yu vd., 2021). Ancak daha yüksek veya daha düşük sıcaklıklarda bakteri üremesi engellenebilir. Bunun nedeni, düşük sıcaklığın hücre zarındaki taşıma sistemini, enzim aktivitesini ve biyolojik metabolizma oranlarını etkilemesi ve hücrelerin büyümesini yavaşlatması olabilir (Narayani vd., 2013). Yüksek sıcaklık ise, metabolizmayla ilgili proteinleri etkisiz hale getirebilir ve hücre zarı yapısını tahrip ederek hücre ölümüne yol açabilir (Kathiravan vd., 2011).

Blvii28’in, hidrojenotrofik metanojenlerle sentrofik ilişkiler de oluşturabilen, hidrojen üreten bir fermentör olduğu tespit edilmiştir (Su vd., 2014).

Şekil 4.9’da da varlığı tespit edilen *Methanosaeta* türleri ise anaerobik süreçte en bol ve metabolik olarak bulunan aktif metanojenlerdir. *Geobacter* ve *Methanosaeta* türlerinin doğrudan türler arası elektron transferi (DIET) yoluyla elektron alışverişinde

bulunduğu düşünölmektedir. *Methanosaeta* türlerinin DİET yapabildiğinin tespit edilmesi, yalnızca anaerobik çürütücülerin işleyişi için değil, aynı zamanda küresel metan üretimi için de önemli çıkarımlara sahiptir. (Rotaru vd., 2014)

Literatürde başarılı DİET gelişiminin, *Geobacter* türleri, *Geobacter* ve *Methanosarcina* bakterisi (Rotaru vd., 2014) ve *Methanosaeta harundinacea* (Rotaru vd., 2014) dahil olmak üzere iletken kültürün varlığıyla ilişkili olduğu gösterilmiştir. Sonuç olarak, bu elektro-iletken mikroorganizmalar sıklıkla “DİET gösterge mikroorganizmaları” olarak kabul edilmektedir (Barua vd., 2018; Lee vd., 2016; Lei vd., 2016; Mei vd., 2018; Tian vd., 2018).



Şekil 4.9. Reaktörlerinden alınan biyofilm örneğinde mikrobiyal dağılım

BÖLÜM V

SONUÇLAR

Yapılan çalışmalar neticesinde farklı S/I yükleme oranlarında (1, 2, 3 ve 4 gUK/gUK) elde edilen en yüksek biyogaz ve biyometan üretimi S/I =1 gUK/gUK reaktöründe sırasıyla 438 ml/gr UK ve 298 ml/gr UK elde edilmiştir. Bu sonuçlar neticesinde en yüksek verimin elde edildiği S/I= 1 gUK/gUK reaktöründe iletken malzemenin etkisini incelemek amacıyla farklı konsantrasyonlarda karbon kumaş ilavesinin (2,5, 10 ve 50 g/L), farklı konsantrasyonlarda magnetit ilavesinin (0,5, 2 ve 10, g/L), ve farklı konsantrasyonlarda karbon kumaş + magnetit ilavesinin ((50+0,5), (2,5+10) ve (10+2) g/L), biyogaz ve biyometan üretimine etkisi incelenmiştir.

En yüksek biyogaz ve biyometan üretimleri 2,5 g/L karbon kumaş konsantrasyonunda sırasıyla 447 ml biyogaz/gUK ve 345 mlCH₄/gUK, 2 g/L magnetit konsantrasyonunda sırasıyla 452 ml biyogaz/gUK ve 356 mlCH₄/gUK, olmuştur. Karışım konsantrasyonlarında en yüksek biyogaz ve biyometan üretimleri (10+2) g/L karbon kumaş + magnetit konsantrasyonunda 445 ml biyogaz/gUK ve 355 mlCH₄/gUK, olarak belirlenmiştir. En yüksek biyogaz ve biyometan üretimlerinde artış 2,5 g/L karbon kumaş konsantrasyonunda sırasıyla %8,2 ve %17,1, 2 g/L magnetit konsantrasyonunda sırasıyla %9,4 ve %20,8 olarak belirlenmiştir. Karışım konsantrasyonlarında (10+2) g/L karbon kumaş + magnetit konsantrasyonunda biyogaz ve biyometan üretiminde artış %7,7 ve %20,5 olarak belirlenmiştir.

Farklı S/I yükleme oranlarındaki TOK ve TA değerlerine bakıldığında 1, 2, 3 ve 4 gUK/gUK yükleme oranlarında çıkış TOK konsantrasyonları sırası ile 446, 235, 233 ve 179 mg/L, çıkış TA konsantrasyonları sırası ile 1169, 1041, 992, ve 754 mg/L olarak belirlenmiştir. Farklı karbon kumaş ve magnetit konsantrasyonlarının TOK ve TA üzerine etkileri incelendiğinde, TOK konsantrasyonları 2,5, 10 ve 50 g/L karbon kumaş konsantrasyonlarında sırasıyla 1184, 433 ve 1060 mg/L iken TA için sırasıyla 872, 231 ve 1064 mg/L olarak belirlenmiştir. TOK konsantrasyonları 0,5, 2 ve 10, g/L magnetit konsantrasyonlarında sırasıyla 915, 924 ve 896 mg/L iken TA için sırasıyla 865, 927 ve 843 mg/L olarak belirlenmiştir. TOK konsantrasyonları ((50+0,5), (2,5+10) ve (10+2)

g/L), karbon kumaş +magnetit konsantrasyonlarında sırasıyla 1298, 1492 ve 1299 mg/L iken TA için sırasıyla 1345, 1854 ve 1496 mg/L olarak belirlenmiştir.

Farklı S/I yükleme oranlarında giriş ve çıkış TKM ve UKM değerlerine göre giderim verimlerine bakıldığında, en yüksek giderim verimleri S/I=1 grUK/gUK reaktöründe sırasıyla %15 TKM giderimi %34 UKM giderimi elde edilmiştir. Farklı karbon kumaş ve magnetit konsantrasyonlarında TKM ve UKM giderim verimleri incelendiğinde, en yüksek giderim verimleri sırasıyla 2,5 g/L karbon kumaş ilave edilen reaktörde %61 TKM giderimi %62 UKM giderimi, 2 g/L magnetit ilave edilen reaktörde %16 TKM giderimi %22 UKM giderimi, (10+2,5) g/L (karbon kumaş +magnetit) ilave edilen reaktörde %65 TKM giderimi %64 UKM giderimi elde edilmiştir.

Mikrobiyal dağılım sonuçları incelendiğinde *W5*, *Blvii28*, ve *Treponema*, türlerinin en baskın türler olduğu görülmektedir.

Yapılan bu tez çalışması ile iletken malzeme olarak magnetit ve karbon kumaş kullanımının biyogaz ve biyometan veriminde artırıcı bir katalizör olarak kullanılabileceği ve arıtma çamurunda biyogaz ve biyometan verimliliğini artırabileceği düşünülmektedir. Bu tez çalışması ülkede Atıksu Arıtma Tesislerinde sorun haline gelen her gün tonlarca arıtma son ürünü olarak ortaya çıkan ve bertarafı ciddi çevresel sorunlara neden olan arıtma çamurlarının değerlendirilmesine yönelik bir yöntem ortaya koymaktadır.

KAYNAKLAR

Akgül, G., Biyokömür: üretimi ve kullanım alanları, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik Bilim ve Teknik Dergisi* 5 (4), 485-499, 2017.

Arda, M., Temel Mikrobiyoloji, *Nadir Kitap*, Ankara, 94-106, 2011.

Ardıç, İ., Termal, kimyasal ve termokimyasal önışlemlerin tavuk gübresinden biyogaz üretim verimine etkilerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Mersin, 2003.

Aslanlı, Ş., Hayvansal atıklardan biyogaz üretimi üzerine çeşitli bor bileşiklerinin etkinliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Şanlıurfa, 2009.

Bayrak, E.H., Kentsel ve/veya meyve suyu atıksu arıtma tesisi sulu çamurlarının biyogaza dönüşümünde ön işlem etkisinin araştırılması, Doktora Tezi, *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sivas, 2014.

Bişgin, T., Sivas atıksu arıtma tesisi arıtma çamurlarının farklı ek besi maddeleri kullanılarak anaerobik birlikte çürütülmesinin (codigestion) araştırılması, Doktora Tezi, *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sivas, 2019.

Buğutekin, A., Atıklardan biyogaz üretiminin incelenmesi, Doktora Tezi, *Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2007.

Cai, J., He, P., Wang, Y., Shao, L. and Lü, F., Effects and optimization of the use of biochar in anaerobic digestion of food wastes, *Waste Management and Research*, 34(5), 409–416, 2016.

Chao P., Xindi F., Wenjing L., Rong Y., Hanwen G., Hongtao W. and Aleksandr C., Effects of conductive carbon materials on dry anaerobic digestion of sewage sludge: Process and mechanism *Journal of Hazardous Materials* 384, 121339, 2020.

Chen, S., Rotaru, A., Liu, F., Philips, J., Woodard, T.L., Nevin, K.P. and Lovley, D.R., Carbon cloth stimulates direct interspecies electron transfer in syntrophic co-cultures, *Bioresource Technol*, 173, 82–86, 2014.

Çelen, E., Pastörizasyon ön işleminin biyogaz üretim verimine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2018.

De Vrieze, J., Devooght, A., Walraedt, D. and Boon, N., Enrichment of Methanosaetaceae on carbon felt and biochar during anaerobic digestion of a potassium-rich molasses stream, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100 (11), 5177–5187, 2016.

Demir, Ö., Manyetik nanopartiküllerin anaerobik çürütücüde biyogaz üretimi üzerine etkileri, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(2), 283-296, 2021.

Deviren, H., İlkılıç, C. ve Aydın, S., biyogaz üretiminde kullanılabilen materyaller ve biyogazın kullanım alanları, *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 7(2/2), 79-89, 2017.

Erkekkaardeş, E., Susuzlaştırılmış arıtma çamurlarının enerjisinden faydalanabilirliğinin araştırılması ve nihai bertarafı, Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 2014.

Ersoy, Ö. ve Özbay, M., Marmara Bölgesinde bulunan organize sanayi bölgelerinin atık su arıtma tesislerinde oluşan arıtma çamurlarının enerji kaynağı olarak kullanımının değerlendirilmesi, *Bilim Armoni Dergisi*, 6 (1), 64-81, 2023.

Filibeli, A., Büyükkamacı, N. ve Ayol, A., Anaerobik arıtma esasları. anaerobik arıtma, *DEÜ. Mühendislik Fakültesi Yayınları*, İzmir, 2000.

Fytili, D. and Zabaniotou, A., Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods – A review, *Renewable and sustainable energy reviews, Science Direct* 12, 116-140, 2008.

Gül, A., Sebze ve meyve atıklarının biyogaz üretim potansiyelinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 2014.

Günel, E. ve Erdem, H., Biyokömür; tanımı, kullanımı ve tarım topraklarındaki etkileri, *Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi* 15 (2), 87-93, 2018.

Güneç, C., Teker, C., Kobak, Z., Yılmaz, F. ve Perendeci, N.A., Anaerobik parçalanma prosesinin zenginleştirilmesinde katkı maddesi olarak biyoçar, *Journal of Environmental and Natural Studies* 5 (1), 1-27, 2023.

Halisdemir, B., Aktif çamur ve portakal posasının biyogaz üretim verimleri ve bazı önışlemlerin biyogaz üretim verimine etkilerinin araştırılması, Doktora Tezi, *Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Mersin, 2009.

Jialin L., Liwen L., Dongyi L., Sunita V., Yunjie X. and J. W.C. Wong., Promoting anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste with different types of conductive materials: Performance, stability, and underlying mechanism *Bioresource Technology* 337, 125384, 2021.

Kanat, A.İ., Atıksu arıtma tesislerinde biyogazdan elektrik enerjisi üretimi ve uygulanabilirlik analizi, Uzmanlık Tezi, *İller Bankası Anonim Şirketi*, Ankara, 2017.

Karaosmanoğlu, F., Biyogaz nedir?, *İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü*, İstanbul, 2004.

Koyuncu, S., Anaerobik çamur çürütücülerde farklı katı madde alıkonma sürelerinde uçucu yağ asitleri ve alkalinitenin biyogaz üretim verimine etkileri, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 10(1), 103-109, 2022.

Kökdemir Ünşar, E., Nanopartüküllerin evsel arıtma çamurlarının anaerobik parçalanabilirliği üzerine etkilerinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, **Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Antalya, 2013.

Li, L.-L., Tong, Z.-H., Fang, C.-Y., Chu, J. and Yu, H.-Q., Response of anaerobic granular sludge to single-wall carbon nanotube exposure, **Water Res.**, 70, 1–8, 2015.

Lin, R., Cheng, J., Ding, L. and Murphy, J. D., Improved efficiency of anaerobic digestion through direct interspecies electron transfer at mesophilic and thermophilic temperature ranges, **Chem. Eng. J.**, 350, 681–691, 2018.

Luo, C., Lu, F., Shao, L. and He, P., Application of eco-compatible biochar in anaerobic digestion to relieve acid stress and promote the selective colonization of functional microbes, **Water Res.**, 68, 710-718, 2015.

Lü, F., Luo, C., Shao, L. and He, P., Biochar alleviates combined stress of ammonium and acids by firstly enriching Methanosaeta and then Methanosarcina, **Water Research**, 90, 34–43, 2016.

Milbrandt, A., Seiple T., Heimiller, D., Skaggs, R. and Coleman, A., Wet waste-to-energy resources in the United States, **Resources, Conservation & Recycling**, 137, 32–47, 2018.

Minelgaite, A. and Liobikiene, G., Waste problem in European Union and its influence on waste management behaviours, **Science of The Total Environment**, 667, 86-93, 2019.

Muratçobanoğlu, H., Gökçek, Ö. B. ve Demirel, S., İletken malzemelerin katı organik atıklardan biyogaz üretimine etkisi, **Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi** 8(2), 712-720, 2019.

Mut, B., Arıtma Çamurundan biyogaz üretim verimine pektin-nanokompozit ve aktif karbonun (AC) etkisinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, **Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kahramanmaraş, 2017.

Ocak Araz, Ş., Aktif karbon katkılı kumaş/gümüş nanopartikül kompozitin hazırlanması, *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi* 13 (2),, 2021.

Öçal, F., Biyogaz enerjisi üretimi ve eskişehir ili için uygulama, Yüksek Lisans Tezi, *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 2013.

Özbaşer, F.T., Biyogaz üretimi ve kullanımı, *Lalahan Hay. Araşt. Enst. Derg.*, 53 (2) 115-124, 2013.

Pallavi G., Banafsha A., Satya Brat T., Nabin A., Anwar K., A.A. Kazmi. and Vinay Kumar T., Conductive material engineered direct interspecies electron transfer (DIET) in anaerobic digestion: Mechanism and application, *Environmental Technology & Innovation*, 20, 101056, 2020.

Pietzsch, N., Ribeiro, J.L.D. and De Medeiros, J.F., Benefits, challenges and critical factors of success for Zero Waste: A systematic literature review, *Waste Management*, 67, 324- 353, 2017.

Pooria L., Mohsen K. and Shahnaz D., Anaerobic co-digestion of poultry slaughterhouse wastes with sewage sludge in batch-mode bioreactors (effect of inoculum-substrate ratio and total solids), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107, 288–2, 2019.

Qing Y., Yafei Y., Mingwei W., Yahui Z., Cheng S., Yaobin Z. and Zhiqiang Z., Enhancing anaerobic digestion of kitchen wastes via combining ethanol-type fermentation with magnetite: Potential for stimulating secretion of extracellular polymeric substances, *Waste Management*, 127, 10-17, 2021.

Qiu, L., Deng, Y. F., Wang, F., Davaritouchaee, M. and Yao, Y. Q., A review on biochar-mediated anaerobic digestion with enhanced methane recovery, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115, 109373, 2019.

Rasika, M., Potdukhe., Nidhi S., Atya K. and Rakesh K., Co-digestion of waste activated sludge and agricultural straw waste for enhanced biogas production, *Bioresource Technology Reports*, 15, 100769, 2021.

Sabuncu, Ö.C., Biyogaz üretiminin teknik, ekonomik ve çevresel analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 12010.

Saygılı, G., Türkiye’de arıtma çamuru yönetimi ve toprakta kullanım, *Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanımı Sempozyumu*, Sakarya, 2019.

Tiyek, İ., Dönmez, U., Yıldırım, B., Alma, M.H., Ersoy, M.S., Karataş, Ş. ve Yazıcı, M., Kimyasal yöntem ile indirgenmiş grafen oksit sentezi ve karakterizasyonu, *SAÜ Fen Bil Der*, 20 (2), 349-357, 2016.

Tolay, M., Arıtma çamurlarının gazlaştırılması ile enerji üretimi, *VIII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu*, UTES’2010, Bursa, 2010.

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), Atıksu Arıtma Tesisi Göstergeleri, 2020, <https://data.tuik.gov.tr/>, 2023.

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), Belediye Atıksu Arıtma Çamuru İstatistikleri, 2020-2022”, <https://data.tuik.gov.tr/>, 2023.

URL 1: <https://afzir.com/tr/products/carbon-wrap-pcw/>, 2023.

URL 2: <https://supolitikalaridernegi.org/2023/05/13/spd-atiksu-aritma-camurlari-ekonomiye-kazandirilmali/>, 2023.

URL 3: https://tr.wikipedia.org/wiki/Karbon_elyaf%C4%B1, 2023.

URL 4: <https://www.ekolojika.com/yenilenebilir-enerji-kaynagi-olarak-biyokomur>, 2023.

URL 5: <https://bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/grafen-cok-saglam-bir-malzeme-olmas-ina-ragmen-neden-grafit-cok-kirilgandir>, 2023.

URL 6: <https://malzemebilimi.net/grafen-uretimi-ve-kullanim-alanlari.html>, 2023.

URL 7: <https://www.superhaber.com/grafen-nedir-grafen-nerede-kullanilir-haber-332111>, 2023.

URL 8: <https://tr.wikipedia.org/wiki/Manyetit>, 2023.

URL 9: <https://tr.wikipedia.org/wiki/Biyogaz>, 2023.

URL 10: <http://mebig.marmara.edu.tr/Presentations/BiyogazUretimi.pdf>, 2023

URL 11: http://web.deu.edu.tr/erdin/tr/ders/kati_atik/ders_not/kompost.pdf, 2023

Yang, Y., Zhang, Y., Li, Z., Zhao, Z., Quan, X. and Zhao, Z., Adding granular activated carbon into anaerobic sludge digestion to promote methane production and sludge decomposition, *J. Clean. Prod.*, 149, 1101–1108, 2017.

Yanguang X., Mingwei W., Qilin Y. and Yaobin Z., Enhancing methanogenesis from anaerobic digestion of propionate with addition of Fe oxides supported on conductive carbon cloth, *Bioresour. Technology*, 302, 122796, 2020.

Yin, Q., Miao, J., Li, B. and Wu, G., Enhancing electron transfer by ferrous oxide during the anaerobic treatment of synthetic wastewater with mixed organic carbon, *Int. Biodeterior. Biodegradation*, 119, 104–110, 2017.

Yokuş, İ., Sivas ilindeki hayvansal atıkların biyogaz potansiyeli, Yüksek Lisans Tezi, *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 2009.

Yu, W., Shu, W., Danhui, L. and Nan L., Conductive materials in anaerobic digestion: From mechanism to application, *Bioresour. Technology*, 298, 122403, 2020.

Yüksekdağ, M., Atıksu arıtma tesislerinde arıtma çamurları ve bertaraf uygulamaları, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 18, 895-904, 2020.

Zhao, Z. Zhang, Y., Li, Y., Dang, Y., Zhu, T. and Quan, X., Potentially shifting from interspecies hydrogen transfer to direct interspecies electron transfer for syntrophic metabolism to resist acidic impact with conductive carbon cloth, *Chem. Eng. J.*, 313, 10–18, 2017.



ÖZ GEÇMİŞ

Duygu Sel Levent tarihinde 'nde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini 'nde tamamladı. yılında girdiği 'nden 'da mezun oldu. yılından bu yana Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümünde Yüksek Lisans çalışmalarını sürdürmektedir.



