



İSTANBUL MEDENİYET ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE VE ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI

**Tekstil Endüstrisi Atıksularının Arıtımı Amacıyla
Farklı Çamur Yaşlarında İşletilen Aerobik Membran
Biyoreaktörde Oluşan Atık Çamurun Anaerobik
Çürütülmesi İle Biyogaz Üretimi**

Yüksek Lisans Tezi

Ebru Göcen

Ocak 2023



İSTANBUL MEDENİYET ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE VE ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI

**Tekstil Endüstrisi Atıksularının Arıtımı Amacıyla
Farklı Çamur Yaşlarında İşletilen Aerobik Membran
Biyoreaktörde Oluşan Atık Çamurun Anaerobik
Çürütülmesi İle Biyogaz Üretimi**

Yüksek Lisans Tezi

Ebru Göcen

Danışman

Prof. Dr. Erkan Şahinkaya

Ocak 2023

TEZ JÜRİSİ ONAYI

Ebru GÖCEN tarafından hazırlanan “Tekstil Endüstrisi Atıksularının Arıtımı Amacıyla Farklı Çamur Yaşlarında İşletilen Aerobik Membran Biyoreaktörde Oluşan Atık Çamurun Anaerobik Çürütülmesi İle Biyogaz Üretimi” başlıklı bu yüksek lisans tezi, Çevre ve Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında hazırlanmış ve jürimiz tarafından kabul edilmiştir.

JÜRİ ÜYELERİ

İMZA

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Erkan ŞAHİNKAYA

.....

İstanbul Medeniyet Üniversitesi

Üyeler:

Prof. Dr. Erkan ŞAHİNKAYA

.....

İstanbul Medeniyet Üniversitesi

Prof. Dr. Barış ÇALLI

Marmara Üniversitesi

.....

Dr. Öğr. Ü. Gökhan TÜRKER

İstanbul Medeniyet Üniversitesi

.....

Tez Savunma Tarihi: 04 / Ocak / 2023

BEYANLAR

Yazım ve Kaynak Gösterme Kılavuzu Beyanı

Danışmanlığımda yazılan bu tezin APA yazım ve kaynak gösterme kılavuzunda belirtilen kurallara uygun olarak yapılandırıldığı ve bu kılavuzun metin içi kaynak gösterme standartlarının bu tezde tutarlı olarak uygulandığı tarafımdan incelenerek teyit edilmiştir.

İmza

Prof. Dr. ERKAN ŞAHİNKAYA

Etik İlkeler Sadakat Beyanı

Hazırladığım tezin tamamen kendi çalışmam olduğunu, akademik ve etik kuralları gözeterek çalıştığımı ve her alıntıya kaynak gösterdiğimi beyan ederim.

İmza

EBRU GÖCEN

ÖZET

**TEKSTİL ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ ARITIMI AMACIYLA FARKLI
ÇAMUR YAŞLARINDA İŞLETİLEN AEROBİK MEMBRAN
BİYOREAKTÖRDE OLUŞAN ATIK ÇAMURUN ANAEROBİK
ÇÜRÜTÜLMESİ İLE BİYOGAZ ÜRETİMİ**

Göcen, Ebru

Yüksek Lisans Tezi, Çevre ve Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Çevre
ve Enerji Sistemleri Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışman: Prof. Dr. Erkan Şahinkaya

Ocak, 2023. 73 Sayfa.

Dünya nüfusunun olağanüstü bir şekilde artmaya devam etmesi ve sanayinin daha da gelişmesine bağlı olarak insanların süregelen yaşamlarını değiştirerek belirli standartların üstüne çıkarmak istemesi ile yoğun bir enerji ihtiyacı doğmuştur. Dolayısıyla yeni enerji kaynaklarının bulunması artık bir alternatif değil gereklilik haline gelmiştir. Türkiye geliştirmekte olan bir ülkedir. Bu sebeple arz talep ilişkisi doğrultusunda gelişmiş bir ülke seviyesine gelebilmemiz için yeterli miktarda enerjiye sahip olmamız ve sürdürülebilir bir şekilde üretebilmemiz gerekmektedir. Tam olarak bu noktada ülkemizin en çok gelişmiş olduğu sektörlerle odaklanmak doğru bir adımdır.

Tekstil endüstrisi Türkiye’de önde gelen sektörler içerisinde yer almaktadır. Tekstil endüstrisinin faaliyetleri sonucu oldukça toksik bir atıksu meydana gelmektedir. Oluşan bu atıksuyun çevresel standartlara uygun bir şekilde arıtılması da oldukça maliyetlidir.

Bu tez çalışmasında farklı SRT (Çamur Yaşı) değerlerinde işletilen ve gerçek tekstil endüstrisi atıksuyu arıtan bir aerobik membran biyoreaktör (MBR)’den alınan atık

çamurların Biyokimyasal Metan Potansiyeli (BMP) kesikli anaerobik reaktörlerde araştırılmıştır. Amaç, atıksu arıtma tesislerinde biyogaz üretiminin ve kullanımının arttırılarak enerji nötral veya enerji pozitif arıtma tesislerinin geliştirilmesine katkıda bulunmaktır. Ayrıca, iklim değişikliğine karşı dirençliliğin artırılması açısından da sürdürülebilir uygulamaların ve teknolojinin teşvik edilmesini, yaygınlaştırılmasını sağlamaktır.

Bu çalışmanın giriş bölümünde, atıksu arıtma tesislerinde oluşan enerji içeriği yüksek bir yan ürün olan çamurun en verimli şekilde anaerobik koşullarda çürütülmesi üzerinde durulmuştur.

Çalışmanın tartışma ve bulgular bölümünde ise farklı (2 ile 30 gün arası) çamur yaşlarında (SRT) işletilen ve gerçek tekstil endüstrisi atıksuyu arıtan bir MBR'den alınan çamurlarla kurulan BMP testlerinin sonuçları detaylı olarak tartışılmıştır. SRT 2 gün değerinde işletilen MBR çamurundan elde edilen metan potansiyelinin SRT 30 gün değerinde işletilen MBR çamuruna kıyasla önemli derecede yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu artış ortalama %42 civarındadır. SRT değerinin 30 gün'den 2 gün'e düşürülmesiyle metan üretim potansiyelinin 0,17 kWh/m³'ten 0,62 kWh/m³ değerine ulaştığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar neticesinde üretilen enerji miktarının yaklaşık 3,6 kat arttığı görülmüştür. Haliyle, MBR proseslerinin düşük SRT değerlerinde işletilmesiyle hem havalandırma için gerekli enerji azaltılabilecek, hem de üretilen çamur artık atık değil bir ürün olarak kullanılarak daha fazla enerji elde edilebileceği gösterilmiştir. Düşük SRT değerlerinde işletilecek olan MBR proseslerinin enerji nötral veya pozitif olabileceğine dair kanıtlar da elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Biyogaz, Metan, Çamur Yaşı, Membran Biyoreaktör, Biyokimyasal Metan Potansiyeli, İklim Değişikliği

ABSTRACT

BIOGAS PRODUCTION BY ANAEROBIC DIGESTION OF WASTE SLUDGE PRODUCED IN AN AEROBIC MEMBRANE BIOREACTOR OPERATED AT DIFFERENT SLUDGE RETENTION TIMES FOR THE TREATMENT OF TEXTILE INDUSTRY WASTEWATER

Göcen, Ebru

Master Thesis, Department of Environmental and Energy Systems Engineering,
Environmental and Energy Systems Engineering Program

Advisor: Prof. Dr. Erkan Şahinkaya

January, 2023. 73 Pages.

An intense need for energy has arisen as the world's population continues to increase in an extraordinary way and due to the further development of the industry, people's desire to change their ongoing lives and raise them above certain standards. Therefore, finding new energy sources has become a necessity, rather than an alternative. Turkey is a developing country, for this reason, in order to reach the level of a developed country in line with the supply-demand relationship, we need to have enough energy and be able to produce it in a sustainable way. At this point, it is a right step to focus on the sectors in which our country is most developed.

The textile industry is one of the leading sectors in Turkey. As a result of the activities of the textile industry, a highly toxic wastewater is generated. It is also very costly to treat this wastewater in accordance with environmental standards.

In this thesis, the Biochemical Methane Potential (BMP) of waste sludge taken from a membrane bioreactor (MBR) operating at different sludge retention time (SRT) values and treating real textile industry wastewater was investigated in batch anaerobic reactors. The aim is to contribute to the development of energy neutral or energy

positive treatment plants by increasing the production and use of biogas in wastewater treatment plants. In addition, it is to encourage and disseminate sustainable practices and technology in terms of increasing resilience against climate change.

In the introductory part of this study, the most efficient way for anaerobic digestion of sludge, which is a by-product with high energy content in wastewater treatment plants, is emphasized.

In the discussion and findings section of the study, the results of the BMP tests, which were established with sludge from an MBR, operated at different SRTs (2 to 30 days) for the treatment of real textile industry wastewater, were discussed in detail. The methane potential of the sludge obtained at SRT 2 days was found to be significantly higher compared to the sludge obtained from at SRT 30 days. This increase is around 42% on average. It was determined that by reducing the SRT value from 30 days to 2 days, the methane production potential reached from 0.17 kWh/m³ to 0.62 kWh/m³. In the light of these findings, it was observed that the amount of energy production increased approximately 3.6 times. Thus, it has been demonstrated that through operating the MBR processes at low SRT values, the energy required for aeration can be reduced and more energy can be obtained by using the produced sludge as a product, not a waste anymore. It is also proved that MBR processes to be operated at low SRT values can be energy neutral or positive.

Keywords: Biogas, Methane, Sludge Retention Time, Membrane Bioreactor, Biochemical Methane Potential, Climate Change

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimim boyunca bana danışmanlık ederek kıymetli bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşarak bana yol gösteren, yardımlarını esirgemeyen, beraber çalışmaktan ve öğrencisi olmaktan büyük bir mutluluk duyduğum saygıdeğer tez tanışmanım Prof. Dr. Erkan ŞAHİNKAYA'ya şükranlarımı sunmayı bir borç bilirim.

Göstermiş olduğu ilgi ve alakası için değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Senem TEKSOY BAŞARAN'a çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca yardımlarını esirgemeyen ve destekleriyle her daim yanımda olan sevgili çalışma arkadaşlarım Elif CURA ve Emir Kasım DEMİR'e çok teşekkür ederim.

Bugüne kadar atmış olduğum her adımda bana destek olan, benim için her türlü fedakârlığı gösteren, beni cesaretlendiren ve güvenen sevgili annem Özgül GÖCEN'e, aileme, bana eğitim hayatım boyunca her zaman yol gösteren canım teyzem Emine SARI ALTINDAĞ'a ve arkadaşlarıma gönülden teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmayı destekleyen TÜBİTAK (Proje No: 119R031)'a teşekkür ederiz.

İÇİNDEKİLER

TEZ JÜRİSİ ONAYI.....	iii
BEYANLAR	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	xi
TEŞEKKÜR	xv
İÇİNDEKİLER.....	xvi
TABLolar LİSTESİ	xix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xx
KISALTMALAR	xxi
1. GİRİŞ	1
2. TEZİN AMACI VE HEDEFLERİ.....	7
3. LİTERATÜR ÖZETİ.....	8
3.1. BİYOGAZ ENERJİSİ	8
3.2. TEKSTİL ENDÜSTRİSİNDE ATIKSU OLUŞUMU VE KARAKTERİZASYONU	11
3.3. TEKSTİL ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ MBR İLE ARITIMI.....	14
3.3.1. Hızlı MBR Prosesinin Avantajları	19
3.4. BİYOLOJİK PROSESTE ATIK ÇAMUR OLUŞUMU	21
3.5. ÇAMUR YAŞININ ATIK ÇAMUR OLUŞUMUNA ETKİSİ.....	26
3.6. ÇAMUR ÇÜRÜTME	27
3.7. ÇAMUR ÇÜRÜTMİYİ ETKİLEYEN PARAMETRELER.....	31

3.7.1.	HRT.....	32
3.7.2.	pH.....	33
3.7.3.	Sıcaklık.....	33
3.8.	ATIK ÇAMURUN ÜRETİLDİĞİ ÇAMUR YAŞININ ÇÜRÜME PERFORMANSINA ETKİSİ.....	33
3.9.	BMP.....	35
4.	MATERYAL VE YÖNTEM.....	38
4.1.	SRT 30 GÜN'DE İŞLETİLEN MBR'DEN ALINAN ÇAMURUN METAN POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ	39
4.2.	SRT 10 GÜN'DE İŞLETİLEN MBR'DEN ALINAN ÇAMURUN METAN POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ	41
4.3.	SRT 5 GÜN'DE İŞLETİLEN MBR'DEN ALINAN ÇAMURUN METAN POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ	42
4.4.	SRT 3 GÜN'DE İŞLETİLEN MBR'DEN ALINAN ÇAMURUN METAN POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ	43
4.5.	SRT 2 GÜN'DE İŞLETİLEN MBR'DEN ALINAN ÇAMURUN METAN POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ	44
5.	TARTIŞMA VE BULGULAR.....	46
5.1.	SRT 30 GÜN BMP DENEY SETİ İÇİN ELDE EDİLEN SONUÇLAR ...	46
5.2.	SRT 10 GÜN BMP DENEY SETİ İÇİN ELDE EDİLEN SONUÇLAR ...	47
5.3.	SRT 5 GÜN BMP DENEY SETİ İÇİN ELDE EDİLEN SONUÇLAR	51
5.4.	SRT 3 GÜN BMP DENEY SETİ İÇİN ELDE EDİLEN SONUÇLAR	52
5.5.	SRT 2 GÜN BMP DENEY SETİ İÇİN ELDE EDİLEN SONUÇLAR	53
5.6.	FARKLI SRT DEĞERLERİNDE İŞLETİLEN MBR'DE ÜRETİLEN ÇAMURUN METAN POTANSİYELİNİN KIYASLANMASI.....	54
6.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	60
6.1.	SONUÇ	60

6.2. ÖNERİLER	62
KAYNAKÇA	63
ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.



TABLolar LİSTESİ

Tablo 1. En Çok İhracat Yapan 5 Sektör (milyar \$) ((Türkiye İhracatçılar Meclisi, 2022)'den uyarlanmıştır.).....	5
Tablo 2. İhracatını En Çok Artıran 5 Sektör (milyar \$) (((Türkiye İhracatçılar Meclisi, 2022)'den uyarlanmıştır.).....	5
Tablo 3. BMP çalışmalarında kullanılan modifiye edilmiş Vanderlbit medya içeriği ((Kuşçu & Sponza, 2006)'dan uyarlanmıştır.).....	38
Tablo 4. SRT 30 gün BMP deney seti detayları.....	40
Tablo 5. SRT 10 gün BMP deney seti detayları.....	42
Tablo 6. SRT 5 gün BMP deney seti detayları.....	43
Tablo 7. SRT 3 gün BMP deney seti detayları.....	44
Tablo 8. SRT 2 gün BMP deney seti detayları.....	45
Tablo 9. Farklı SRT değerlerinde elde edilen metan üretim potansiyelleri	56
Tablo 10. Farklı SRT ve SRT/HRT değerlerinde İşletilen MBR'da üretilen çamur üzerinde gerçekleştirilen BMP denemeleri için üretilen çamur, metan potansiyeli ve enerji üretiminin hesaplanması*	57
Tablo 11. Farklı SRT değerlerinde çamurda bulunan nitratin metan üretimine etkisi	58
Tablo 12. SRT 30 gün ve SRT 2 gün'de işletilen MBR'de üretilen çamurun çürütülmesi durumunda üretilecek çamur ve enerji geri kazanım miktarlarının 1000 m ³ /gün atıksu debisi için kıyaslanması	59
Tablo 13. Farklı SRT değerlerinde işletilen ve atık çamurun elde edildiği MBR için Yobs değerleri ile hesaplanmış enerji ihtiyaçları (Yılmaz vd. 2023).....	61

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Sektörlere göre sera gazı emisyon dağılımı ((Türkiye İstatistik Kurumu, 2022)'den uyarlanmıştır.).....	2
Şekil 2. Biyogaz Oluşum Prosesi ((Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, 2010)'dan uyarlanmıştır.)	9
Şekil 3. Tekstil Endüstrisi Prosesi (Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, 2016).....	12
Şekil 4. (a) Geleneksel Atık Su Arıtma Prosesinin şeması, (b) Yan Akım MBR (c) Batık MBR (Goswami vd., 2018)	16
Şekil 5. Aktif Çamur Sistemi (Çınar, 2011).....	22
Şekil 6. Biyolojik Proseste Çamur Miktarının Hesaplanması (Kocamemi, 2003).....	24
Şekil 7. Anaerobik Çürütücü Sistemi (Von Sperling & Chernicharo, 2005).....	28
Şekil 8. Laboratuvar Ölçekli Bir BMP Testi.....	36
Şekil 9. BMP deney setini gösteren bir fotoğraf	40
Şekil 10. BMP testlerinde üretilen metan miktarının ölçülmesi için kullanılan düzenek	41
Şekil 11. SRT 30 gün BMP Deney Seti için elde Edilen Sonuçlar	47
Şekil 12. SRT 10 gün BMP Deney Seti için elde Edilen Sonuçlar	48
Şekil 13. SRT 30 gün ve 10 gün denemelerinin yapıldığı deney setleri için 500 mg/L asetat içeren BMP sonuçlarının kıyaslanması	50
Şekil 14. SRT 5 gün BMP Deney Seti için elde Edilen Sonuçlar	51
Şekil 15. SRT 3 gün BMP Deney Seti için elde edilen sonuçlar	53
Şekil 16. SRT 2 gün BMP Deney Seti için elde edilen sonuçlar	54
Şekil 17. Farklı SRT değerlerinde üretilen çamur ile kurulan BMP testlerinde elde edilen sonuçlar.....	55
Şekil 18. Farklı SRT değerlerinde üretilen çamurun metan potansiyeli değişimi	55

KISALTMALAR

AAT: Atıksu Arıtma Tesisi

AB: Avrupa Birliği

AÇS: Aktif Çamur Sistemi

AD: Anaerobic Digestion (Anaerobik Çürütme)

AKM: Askıda Katı Madde

AnMBR: Anaerobik Membran Biyoreaktör

As: Arsenik

BMP: Biyometan Üretim Potansiyeli

BMİDÇS: Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi

BOİ: Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı

CaCO₃: Kalsiyum Karbonat

Cd: Kadmiyum

CH₄: Metan

CH₃COOH: Asetik Asit

CH₂O: Formaldehit

C₁₀H₇OH: Naftol

C_xH_y: Hidrokarbonlar

Cl₂: Klor

CO₂ Karbondioksit

Co: Kobalt

Cr: Krom

Cu: Bakır

ÇHI: Çamur Hacim İndeksi

DOSAB: Demirtaş Organize Sanayi Bölgesi

EGSB: Expanded Granular Sludge Bed - Genişletilmiş Granül Çamur Yatağı

F/M: Food/Microorganism – Besin/Mikroorganizma

g: Gram

GHG: Greenhouse Gas (Sera Gazı)

GWh: Gigawatt hour - Gigawatt saat

H₂: Hidrojen gazı

HCl: Hidroklorik asit

Hg: Civa

HRAS: Yüksek Hızlı Aktif Çamur

HRT: Hidrolik Bekleme Süresi

H₂S: Hidrojen Sülfür

HVAC: Heating, Ventilation, and Climatization - Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme

kg: Kilogram

KOI: Kimyasal Oksijen İhtiyacı

kWh: Kilowatt hour - Kilowatt saat

L: Litre

m: Metre

MBR: Membran Biyoreaktör

mg: Miligram

mL: Mililitre

MLSS: Mixed Liquor Suspended Solid (Askıda Katı Madde Karışımı)

MLVSS: Mixed Liquor Volatile Suspended Solid (Uçucu Askıda Katı Madde Karışımı)

N: Azot

NaCl: Sodyum Klorür

NaHCO₃: Sodyum Bikarbonat

NaOH: Sodyum Hidroksit

Ni: Nikel

nm: Nanometre

NO₃⁻: Nitrat

OLR: Organic Loading Rate (Organik Yükleme Hızı)

P: Fosfor

Pb: Kurşun

PHA: Polihidroksialkanoat

RBBR: Remazol Brilliant Blue R

S: Kükürt

SFMBR: Super Fast Membran Biyoreaktör (yüksek hızlı membran biyoreaktör)

SGP: Spesifik Gaz Üretimi

SMBR: Submerged Membrane Bioreactor (Batık Membran Biyoreaktör)

SRT: Çamur Bekleme Süresi (Çamur Yaşı)

TOC: Total Organic Carbon (Toplam Organik Karbon)

TÜİK: Türkiye İstatistik Kurumu

TWh: Terawatt hour (Terawatt saat)

UAKM: Uçucu Askıda Katı Madde

UKM: Uçucu Organik Katı Madde

UYA: Uçucu Yağ Asitleri

V: Hacim

VFA: Volatile Fatty Acids

VSS: Volatile Suspended Solid (Uçucu Askıda Katı Madde)

Wh: Watt-Hours (Watt-Saat)

WRRF: Water Source Recovery Plant (Su Kaynağı Geri Kazanım Tesisi)

Yobs: Gerçek Dönüşüm Oranı

Zn: Çinko

μm : Mikrometre

Q: Debi

Qw: Atık Çamur Debisi

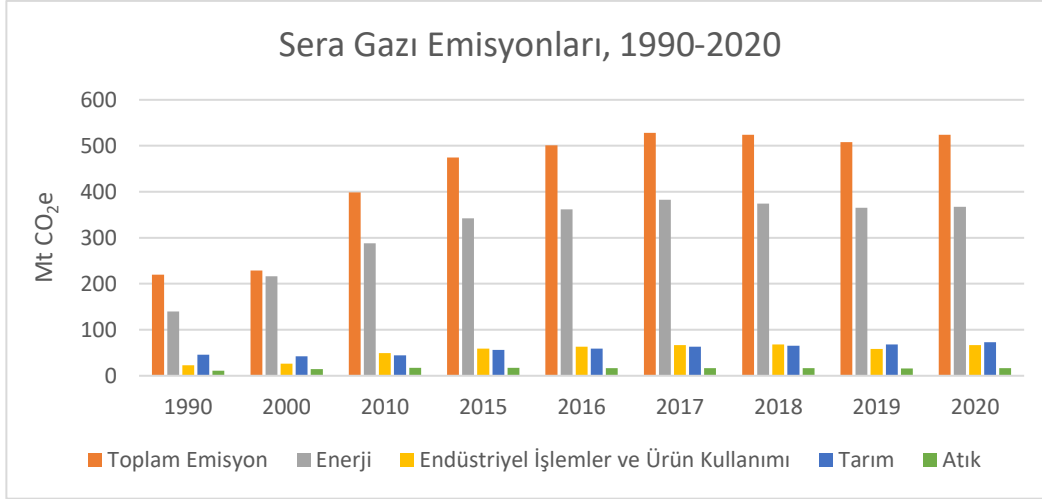
$^{\circ}\text{C}$: Santigrat Derece

1. GİRİŞ

Bilimsel çalışmalara göre iklim değişikliğinin etkileri giderek ve hızlı bir şekilde artmaktadır. İklim değişikliği ile yaşamakta olduğumuz bu değişim süreci dünyayı sosyal, ekonomik ve çevresel anlamda etkilemektedir. Buna bağlı olarak ortaya çıkan sorunlarla mücadele etmek ve gelecekte de geri dönülemez biçimde karşılaşacağımız sorunlara engel olmak için birtakım çözümler üretmek son derece önemlidir. Bunun için çözüm üretirken aynı zamanda da iklim değişikliğinin etkilerini azaltma potansiyelini göz önünde bulundurarak doğa temelli çözümler üretmek gerekmektedir (Kaçmaz, 2021).

Dünya nüfusu sürekli arttığı için enerji ihtiyacı da paralel olarak sürekli artmaya devam etmektedir ve buna bağlı olarak enerji arz/talep dengesi de giderek zorlaşmaktadır. Bu da günümüzde yaygın olarak kullanılmaya devam eden mevcut enerji kaynaklarının yani fosil yakıtların hızlı bir şekilde tükenmesine sebep olmaktadır (Kwietniewska & Tys, 2014). Büyükşehirler, kalabalık bir nüfusa sahip olmaları nedeniyle iklim değişikliğinin etkilerine karşı daha savunmasızdır. Bu sebeple şehirlerde emisyon salınımı açısından birbirleriyle etkileşim içerisinde olan sistemler için iklim değişikliğinin etkilerine karşı uyum sağlayabilmek adına risk ve hassasiyet kapasitelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu kapasitelere göre de gelecekteki varlıklarını sürdürebilmeleri için birtakım önlemler alınmalıdır.

TÜİK verilerine göre Türkiye'nin CO₂ emisyonlarındaki en büyük payını enerji sektörü oluşturmaktadır. Bu emisyonlarda ise en çok payı olanlar metropol şehirlerdir. Enerji sektörü, Şekil 1'de görüldüğü üzere Türkiye'de sera gazı (GHG) emisyonlarının hala en çok olduğu ve yükselmeye devam ettiği tek büyük sektördür (Türkiye İstatistik Kurumu, 2022). Ayrıca enerji sektörüne olan talebin gelecekte de artmaya devam etmesi beklenmektedir. Bu yüzden enerji sektörü için CO₂ emisyonlarının azaltılması yönünde etkili sürdürülebilir yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 1. Sektörlere göre sera gazı emisyon dağılımı ((Türkiye İstatistik Kurumu, 2022)’den uyarlanmıştır.)

Türkiye’nin Paris Anlaşması, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS) kapsamında sadece birkaç yıl içinde CO₂ emisyonlarını belirli ölçüde azaltması gerekmektedir (United Nations, 1992). Fosil yakıtların dünyamıza büyük zararları vardır. Fosil yakıtların günümüzde yoğun bir şekilde kullanılması ozon tabakasının incelmeye, asit yağmurları, solunum yolu hastalıkları, küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi büyük sorunların ortaya çıkmasına sebep olmaktadır (Yokuş, 2011). Ayrıca fosil yakıtlar atmosfere salınan CO₂ miktarını da arttırmaktadır. Fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak ve buna bağlı olarak da iklim değişikliğinin etkilerini en aza indirmek için yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş yapılması gerekmektedir (Kızmaz, 2019). Yenilenebilir enerjinin öneminin gittikçe arttığı da ortadadır.

Bunun en iyi ve en kolay yolu da fosil enerjiyi yenilenebilir enerji ve temiz enerjiyle mümkün mertebe değiştirmektir. Bu da yenilenebilir ve temiz enerji kaynağı için alternatif yakıtlara geçmemizi sağlayacaktır. Yenilenebilir ve temiz enerjiye geçiş sürecinde ekonomik ve çevresel anlamda birtakım engellerle karşılaşılacaktır. Bu engellerin üstesinden gelebilmek için karşımıza çıkabilecek fırsatların değerlendirilmesi, yeni çözümlerin bulunması ve yeni teknolojik araçların tasarlanması gerekmektedir (Takman & Andersson-Sköld, 2021).

Dünyada yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde biyogazın büyük önemi vardır. Çünkü hem çevresel kirliliğin önlenmesi hem de ekolojik dengenin sağlanması için büyük katkılar sunabilmektedir. Biyogaz enerjisinin bileşenlerinden biri olan CO₂ atmosferdeki ile aynı olduğundan ve üretilen enerji sayesinde doğaya salınmadığından dolayı kirlilik oluşumunu da azaltmaktadır. Aynı zamanda sürdürülebilir olduğu için günümüzün önde gelen yenilenebilir enerji kaynaklarındandır. Türkiye bu alanda gerekli kaynaklara sahip olması sebebiyle önemli bir potansiyele sahiptir ve yenilebilir enerji açısından ekonomik olarak dışa bağımlılığı azaltmaya da yardımcı olmaktadır (Yücenur vd., 2020).

Türkiye için sürdürülebilir bir sistem ile yenilebilir enerji olarak biyogaz üretmek pratik ve uygulanabilir seçenektir (Yılmaz, 2009). Ayrıca biyogaz, atıkları enerjiye dönüştürerek iklim değişikliğinin etkilerinin azalmasına potansiyel olarak katkıda bulunabilecek oldukça önemli bir yenilebilir enerji kaynağıdır (Rana vd., 2016).

Enerji kaynağı seçiminde sürdürülebilirlik ve güvenilirlik oldukça önemlidir. Rüzgar, güneş ve hidroelektrik gibi yenilebilir enerji kaynaklarının yanında biyokütleden elde edilen enerji sürekli üretim sağlanabilmesi ve CO₂ emisyonlarını önemli miktarda azalttığı için yenilebilir enerji kaynakları içerisinde biyogazın ayrı bir önemi vardır. Çünkü yenilebilir enerji olarak elde edilmesinin yanı sıra endüstriyel, hayvansal ve bitkisel atıkların bertarafı ile çevresel kirliliğin de önüne geçmemizi sağlamaktadır. Ülkemiz de büyük bir potansiyele sahiptir (Şenol vd., 2017).

Biyogaz, enerji sektörü ile ilgili CO₂ emisyonlarını azaltmak için en alternatif çözüm yöntemlerinden biridir. Yakıtların sera gazı emisyonuna olan etkisi yakıtın hammaddesine de bağlıdır. Bunun dengelenebilmesi için de organik atıklardan biyogaz üretimi yapılmalıdır (Fargione vd., 2008).

Hammaddeye ek olarak yakıtın enerji verimliliği de oldukça önemlidir. Yenilenebilir enerji üretiminde oluşabilecek olumsuz etkilere karşı Avrupa Birliği'nin Yenilenebilir Enerji Direktifi ve bu direktifin hedefleri de dikkate alınmalıdır (European Commission, 2022a).

2018 yılında yeniden düzenlenen Yenilenebilir Enerji Direktifi, 2030 yılına kadar AB için en az %32 yenilenebilir enerji hedefi belirlemiştir. Ayrıca 2023 yılına kadar da bu

oranının arttırılması olasılığına dair yani revizyona yönelik bir madde eklenmiştir. Komisyon, 14 Temmuz 2021 tarihinde Avrupa'nın yeni 2030 iklim hedeflerini sunarak mevcut hedefin en az %40 olmasını hedeflediklerini belirtmiştir. Son olarak komisyon, 2030 hedeflerine hızla ulaşmak ve fosil yakıt hedeflerine olan bağlılığı azaltmak için 18 Mayıs 2022'de REPowerEU planını yayınladı. Bu plan üç ayrı ana konuya dayanmaktadır. Bunlar enerji tasarrufu, temiz enerji üretimi ve AB'nin enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesidir. Ayrıca Komisyon, elektrik üretimi ve yenilenebilir enerji oranının arttırılması için direktifteki hedefin 2030 yılına kadar %45'e çıkarılmasını teklif etmiştir (European Commission, 2022b).

Hızlı sanayileşme artışı ile başta doğal su kaynaklarımız fosil yakıt atıklarıyla kirletilmektedir. Bunu engellemek için atıksu arıtma tesislerinin sayısı da giderek arttırılmaktadır. Atıksu arıtma tesislerinden de yüklü miktarlarda çamur çıkmaktadır. Çamur için ayrı bir bertaraf yöntemi gerekmektedir. Bu da ayrı bir maliyet demektir. Bu maliyeti azaltmak için oluşan çamurdan (biyokütleden) enerjiye geçilerek biyogaz enerjisi elde edilebilmektedir. Bu dönüşümün ise en önemli adımlarından biri organik maddenin anaerobik sindirimidir (Kanat, 2017).

Diğer bir yandan da biyogaz enerjisinin kullanılması sürdürülebilir bir yenilebilir enerji talebi ve enerjinin güvenilirliği açısından da oldukça önemlidir (Atelge, 2021). Bunun enerji sektörüne olan katkısını arttırabilmek için Türkiye'deki en gelişmiş üretim sektörlerinden birinde anaerobik sindirim ile biyogaz üretim teknolojisini hayata geçirmek çok büyük önem teşkil etmektedir.

Türkiye'de en gelişmiş sektörlerden biri tekstil endüstrisidir. Tekstil endüstrisi Tablo 1 ve 2'de görüldüğü gibi Türkiye'de en çok ihracat yapan ve ihracatını en çok arttıran ilk beş sektör içerisinde yer almaktadır (Türkiye İhracatçılar Meclisi, 2022).

Tablo 1. En Çok İhracat Yapan 5 Sektör (milyar \$) ((Türkiye İhracatçılar Meclisi, 2022)’den uyarlanmıştır.)

	Otomotiv	Kimyevi Maddeler	Çelik	<u>Hazır Giyim ve Konfeksiyon</u>	Elektrik Elektronik
2020	25,54	18,26	12,6	17,12	11,05
2021	29,34	25,35	22,35	20,25	14,18
Değişim	%14,9	%38,9	%77,4	%18,3	%28,3

Tablo 2. İhracatını En Çok Artıran 5 Sektör (milyar \$) (((Türkiye İhracatçılar Meclisi, 2022)’den uyarlanmıştır.)

	Mücevher	Çelik	Demir ve Demir Dışı Metaller	Savunma ve Havacılık Sanayi	<u>Tekstil ve Hammaddeleri</u>
2020	3,78	12,6	8,25	2,28	7,28
2021	6,78	22,35	12,36	3,22	10,15
Değişim	%79,5	%77,4	%49,7	%41,5	%39,3

Anaerobik çürütmede üretilen enerji miktarını en üst düzeye çıkarmak için, mümkün olan en yüksek biyokimyasal metan potansiyeline (BMP) sahip atıksu arıtma tesisi çamurunun üretilmesi önemlidir (Chan vd., 2020). Bu yolla enerji nötral atıksu arıtma tesisleri kurma hedeflerine ulaşmak mümkün olabilmektedir.

BMP testi, belirli bir substratın maksimum metan üretimini belirlemek için en yaygın kullanılan basit ve önemli bilgiler üreten bir yöntemdir (Da Silva vd., 2018). Bu yöntem ile en uygun parametreler belirlenerek hem maksimum oranda hem de sürdürülebilir olarak verimli biyogaz üretimi sağlanabilmektedir.

BMP testindeki biyolojik süreçlerin performansı ve stabilitesi SRT ile doğrudan ilişkilidir. Optimum koşulların sağlanması substrat içeriği ile beraber SRT'nin yanında HRT ile de ilgilidir. Buna bağlı olarak da en yüksek metan üretim potansiyeli gerçekleştirilebilmektedir.

Uygun HRT ve SRT değerinin belirlenmesi, proses maliyeti için de oldukça önemlidir. Yüksek HRT ile prosesin işletilmesi daha büyük bir reaktör hacmi ve haliyle daha büyük bir maliyet gerektirmektedir. Bu, dikkate alınması gereken önemli bir husustur. SRT mikroorganizmaların biyoreaktör içerisindeki ortalama kalış süresini belirtmektedir ve büyük bir önem teşkil etmektedir. Aerobik arıtma tesislerinde SRT'nin azaltılması ile atık çamur içerisinde bulunan biyolojik olarak parçalanabilir organik maddenin ve çamur miktarının arttırılması neticesinde, bu çamurun anaerobik çürütülmesiyle biyogaz üretim hızının arttığı literatürdeki çalışmalarda yer almaktadır (Koyuncu & Nas, 2022).

2. TEZİN AMACI VE HEDEFLERİ

Bu çalışmanın temel amacı; gerçek tekstil endüstrisi atıksuyu arıtan bir MBR prosesinden farklı çamur bekleme süreleri (SRT)'nde alınan çamurda biyogaz üretim potansiyelinin araştırılmasıdır. Böylelikle, endüstriyel bir tesiste biyoreaktörün SRT değerine bağlı olarak çamurun metan potansiyelinin nasıl değiştiği net bir şekilde belirlenmiş olacaktır. Gerçekleştirilen çalışma ile tekstil endüstrisi atıksuyunun arıtımı sürecinde farklı SRT değerlerinde işletilen aerobik membran biyoreaktörde oluşan atık çamurun anaerobik çürütülmesi sonucu biyokimyasal metan potansiyeli (BMP) araştırılmıştır. SRT değerinin metan üretimi üzerindeki etkileriyle beraber üretim hızı da gözlemlenmiştir.

Bu çalışma tekstil endüstrisi atıksu arıtma tesislerinin fizibilite çalışmalarına, biyo-atık yönetimine, enerji nötral veya pozitif atıksu arıtımına ve sera gazı emisyonunun azalmasına yönelik teknolojilerin gerçekleştirilmesine yardımcı olacaktır.

Ayrıca bu çalışma, biyogaz üretim performansının iyileştirilmesi ile ilgili gelecekteki çalışmalar için atıksu arıtma tesislerine bir entegrasyon fikri sunmaktadır.

Tekstil endüstrisi Türkiye'de en gelişmiş beş sektörden biri olması ve atıksuyun içeriği sebebiyle atıksuyun arıtımı esnasında biyogaz üretimi yapılabilecek potansiyel bir sektördür. Bu çalışma ile tekstil endüstrisi atık suyundan farklı SRT değerlerinde biyogaz üretim potansiyelini ortaya çıkararak gerek ülke ekonomisine gerek sektörün ilerlemesine katkı sağlanacaktır.

Bu anlamda tekstil endüstrisi atıksularından sürdürülebilir biyogaz enerjisi üretimi sayesinde bu sektörün ön planda kalması, dış ticarete daha da ilerlemesi, sera gazı emisyonunda önemli miktarda gerçekleşmesi öngörülen bir azaltım ve en önemlisi iklim değişikliğine karşı dirençliliğin artması, iklim değişikliği etkilerinin azalmasına katkı sağlanması hedeflenmektedir.

3. LİTERATÜR ÖZETİ

3.1. BİYOGAZ ENERJİSİ

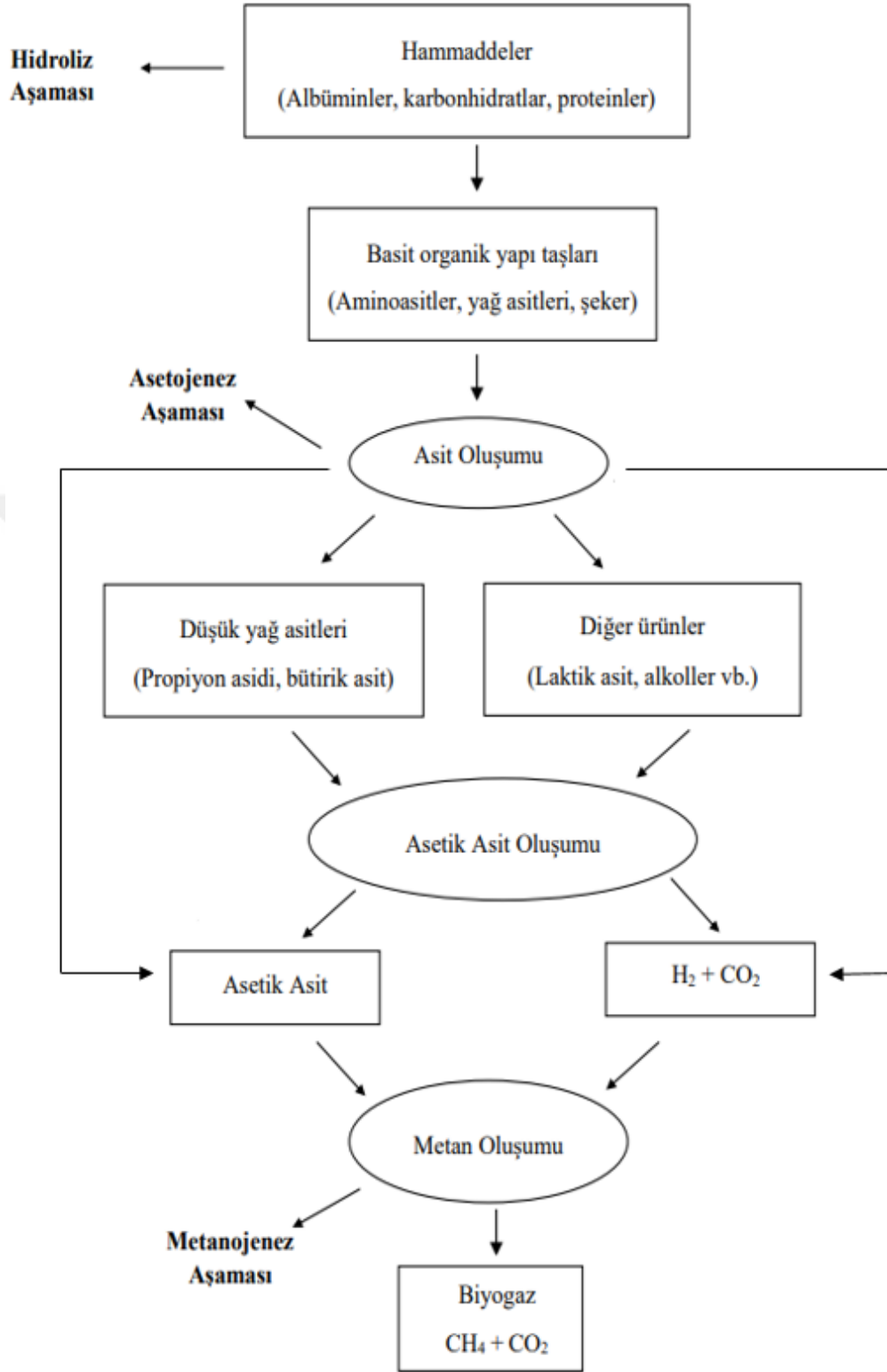
“Biyogaz” gaz biyolojik bir prosesle oluşmaktadır. Oksijensiz bırakılan organik kütleden biyogaz adı verilen bir gaz karışımı ortaya çıkar. Bu proses bataklıklarda, deniz tabanlarında, sıvı gübre çukurlarında ve geviş getiren hayvanların içkembelerinde de gerçekleşir. Belirli miktarlarda enerji (ısı) ve yeni biyokütle oluşur (Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, 2010).

Atıksudan biyogaz üretimi; atıkları düzenli depolama sahalarından uzaklaştıran ve enerjiyi geri kazandıran ve tesislerdeki enerji taleplerini aşağıya çeken etkili bir atık yönetimi stratejisi olarak değerlendirilmektedir (Ge vd., 2017).

Biyogaz, %50 ile %70 metan, %30 ile %40 karbondioksit ve eser miktarlarda diğer gazları içeren enerji açısından zengin bir gazdır (Adinurani vd., 2015).

Anaerobik çürütücülerin uygun koşullarda işletilmesi neticesinde organik atıkların ayrıştırılması ile yaklaşık %50-70 CH₄, %30-50 CO₂ ve eser miktarda diğer gazlardan oluşan biyogaz üretilmektedir. Dolayısıyla, atıkların anaerobik koşullarda ayrıştırılması neticesinde üretilen biyogaz önemli bir yenilenebilir enerji kaynağıdır.

Biyogazın oluşum prosesi çok sayıda aşamada gerçekleşmektedir. Biyogaz oluşumuna ilişkin proses aşamaları Şekil 2’de ayrıntılı olarak gösterilmektedir.



Şekil 2. Biyogaz Oluşum Prosesi ((Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, 2010)’dan uyarlanmıştır.)

Üretilen biyogaz, doğrudan ısı kaynağı olarak ve elektrik enerjisi üretimi için kullanılabilmekte veya yakıtlara ve diğer katma değerli ürünlere dönüştürülebilmektedir (Xu vd., 2018).

Biyogaz üretimi aynı zamanda döngüsel bir ekonomiye yönelik planları da desteklemek için alternatif bir yöntemdir. Biyogaz ulaşım ve endüstriyel uygulamalar için yakıt olarak kullanılabilir. Literatürdeki araştırmalara göre 1960'lı yıllardan beri biyogaz İsveç atıksu arıtma tesislerinde anaerobik çürütme aracılığıyla üretilmektedir ve yaygın bir şekilde de ulaşım yakıtı olarak kullanılmaktadır. İsveç'te 2020 yılında üretilen biyogazın yaklaşık yarısı ($\approx 2,2$ TWh) birlikte sindirme tesislerinden (36 tesis), %33'ü ise kanalizasyon arıtma tesislerinden (134 tesis) elde edilmiştir. Üretilen biyogazın da yaklaşık üçte ikisi iyileştirilerek genellikle ulaşım yakıtı olarak kullanılmıştır (Metson vd., 2022).

Biyogaz enerjisinin başka birçok avantajı daha vardır. Küçük biyogaz üretim alanları aydınlatmaya yarayabilir ya da yemek pişirmede yakıt olarak kullanılabilirken daha büyük biyogaz tesisleri elektrik üretebilir ve bunu ulusal şebeke için verebilirler. Biyogaz enerjisi dünyada birincil enerji kaynağı olarak fosil yakıtların yerini alma potansiyeline sahiptir. Bu da enerji kaynaklarının ömrünü uzatabileceği anlamına gelmektedir. Ayrıca biyogazın kullanılması sera gazı emisyonlarını da oldukça azaltacaktır (Mel vd., 2015). Biyogaz enerjisi sadece sera gazı emisyonlarını azaltmaz aynı zamanda hidrokarbonları, nitrojen oksitleri ve partikülleri de azaltır. Bu sebeple biyogaz enerjisi çevre dostu bir teknolojiyi temsil etmektedir (Tetteh & Rathilal, 2021).

Biyogaz; metan, karbondioksit, sülfür gaz ve amonyak karışımından oluşmaktadır. Bu gazlar arasında en önemlisi metandır. Çünkü yüksek kalorifik değere sahip olması metanı potansiyel bir ısı ya da elektrik enerjisi kaynağı yapmaktadır. Biyogazın oluşması organik maddenin türüne, konsantrasyonuna, ortamın fiziksel ve kimyasal koşullarına (pH, sıcaklık ve alkalinite), nitrat, sülfat gibi diğer parametrelere bağlı olarak değişmektedir (Campello vd., 2021).

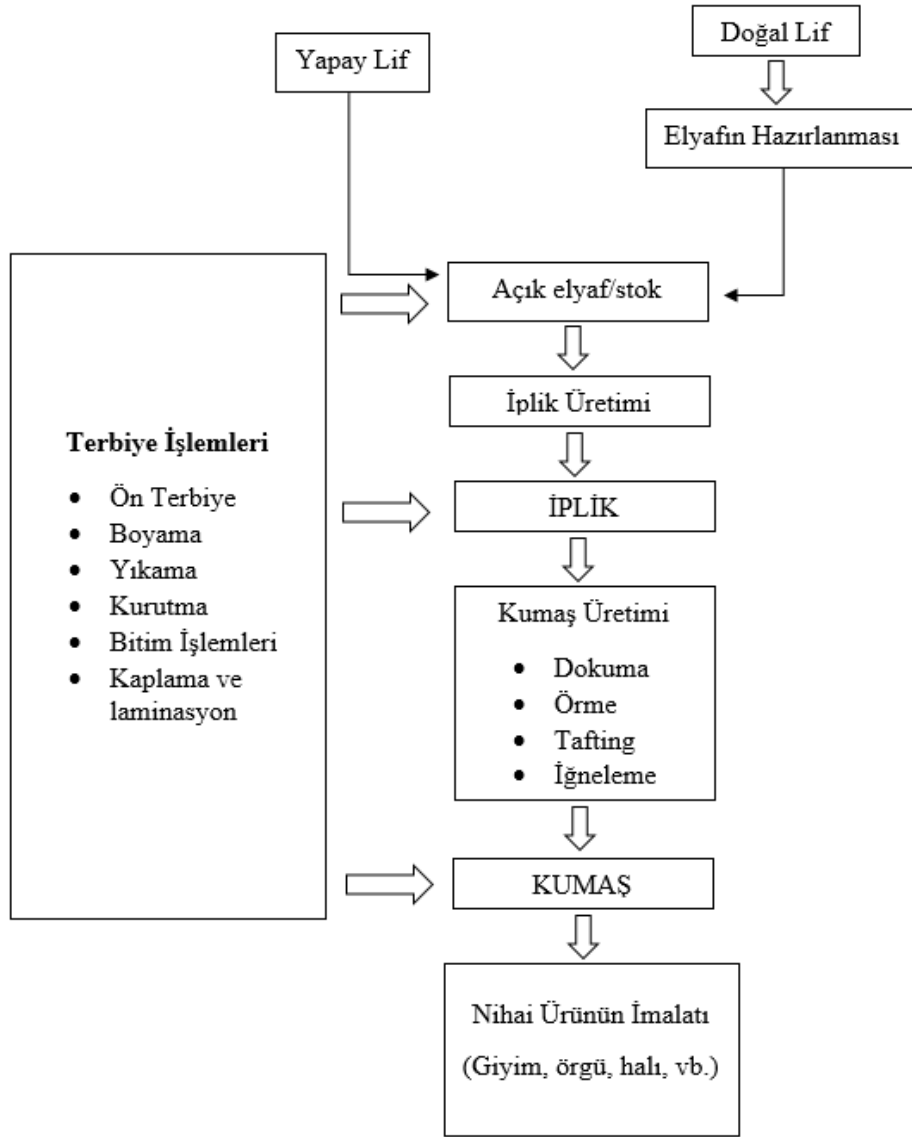
Bu nedenle, AAT'lerde verimli biyogaz üretimi ve kullanımı, AAT'lerin karbon ayak izini önemli ölçüde azaltabilir (Shen vd., 2015).

3.2. TEKSTİL ENDÜSTRİSİNDE ATIKSU OLUŞUMU VE KARAKTERİZASYONU

Tekstil sektörü 1930'lu yılların başında ülkenin ilk kurulan sanayi dalıdır. Ana hammadde olan pamuğun Türkiye'de oldukça yüksek oranda yetiştirilmesi ile bu sektör büyük bir atılım yaparak ilerlemiştir. Tekstil endüstrisi yarattığı istihdam, Gayri Safi Yurtiçi Hasıla'da olan payı, bu alandaki yatırımları ve yüksek orandaki ihracatı ile Türkiye'nin önde gelen sektörlerinden biridir. Türkiye bu sektörde küresel pazarda Çin, Hindistan, Güney Kore, Pakistan ve Vietnam gibi ülkelerle rekabet içerisinde. Ülkemizde İstanbul, Bursa, Tekirdağ, Gaziantep, Kahramanmaraş, Adana, Kayseri, İzmir, Denizli ve Uşak illerinde tekstil sektörü oldukça yaygındır. Bu sektörde lif, iplik, dokuma-örme, kumaş, dokusuz yüzey, boya-baskı, terbiye işlemlerini içeren birçok alt sektör bulunmaktadır. Yapısal olarak üretim faaliyetleri bu alanlarda sürdürülmektedir (Uyanık & Çelikel, 2019).

Literatürdeki bir araştırmanın sonuçlarına göre tekstil sektörünün enerji tüketimini incelediğimizde 15.521 GWh ile imalat sanayi sektörleri içerisinde demir-çelik sektöründen sonra en çok elektrik tüketen sektördür (Sanayi Genel Müdürlüğü, 2017). Enerjinin toplam maliyet içindeki payı %6 ila 14 arasında değişmektedir (Uyanık & Çelikel, 2019).

Enerji, tekstil sektöründe çok tüketilmesi sebebiyle en önemli faktörlerden biridir. Enerji maliyetinin ve enerji tüketiminin gittikçe artması bu sektörde enerjiyi daha verimli kullanmayı gerektirmektedir. Kendi içinde de alt sektörler ayrıl原因an tekstil endüstrisinden çıkan atıksu da oldukça fazla ve toksiktir. Tekstil endüstrisi prosesi ayrıntılı olarak Şekil 3'te gösterilmektedir (Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, 2016). Tekstil endüstrisi atık suyunun arıtılması oldukça yüklü miktarda enerji tüketimine sebep olmaktadır. Bu noktada enerji tüketiminin azaltılması, enerji kayıplarının azaltılması ve tüketilen enerjinin geri kazanılması için elektrik üretim kapasitesinin artırılması gerekmektedir. Bunu karşılayabilmek için Tekstil Endüstrisi atıksuyundan üretilebilecek potansiyel enerji olan biyogaza yönelmek gerekmektedir. Bunu en verimli şekilde yapabilmek için öncelikle tekstil endüstrisi atıksuyunun nasıl oluştuğunu ve karakterizasyonunu bilmek gerekmektedir.



Şekil 3. Tekstil Endüstrisi Prosesi (Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, 2016)

Tekstil ürünlerine karşı olan talebin artmasıyla bu endüstri daha da genişlemiştir. Tekstil endüstrisinden kaynaklanan atıksu miktarları da paralel olarak artmıştır. Tekstil sektörü önemi olduğu kadar maalesef çevreyi en çok kirleten sektörlerden biridir. İstenilen renk görünümünü elde edebilmek için eskiden kullanılan doğal boyalar yerine günümüzde sentetik boyalar tercih edilmeye başlanmıştır. Tekstil atıksuları H_2S ve diğer yardımcı kimyasalları içerebilmekte olup, alıcı ortamlara

önemli zararlar vermektedir. Ayrıca, yüksek renk içeriği nedeniyle su kütlelerinden ışığın geçişi engellenmektedir. Bu çok büyük bir çevresel problemdir (Azanaw vd., 2022).

Tekstil atıksularının çoğu proseste kullanılan kimyasallar ve boya ile kirlenmektedir. Tekstil endüstrisi ürünlerin haşıl sökme, yıkama, ağartma, boyama ve terbiye işlemlerinin uygulanmasından sorumludur. Uygulanan bu işlemler esnasında alkaliler, tuzlar, yüzey aktif maddeler, boyalar ve pigmentler gibi çok sayıda kimyasal kullanılmaktadır (Moyo vd., 2022).

Literatürde bir tekstil fabrikasının günde yaklaşık olarak 8000 kg kumaş ürettiği ve bunun için de yaklaşık 1,6 milyon litre su tükettiği yer almaktadır. Tükettiği suyun ise %24'ünü boyama ve baskı bölümleri oluşturmaktadır (Kant, 2012). Tekstil endüstrisinde boyama ve baskıda kullanılan ürünlerin de %10-15'i sabitlenmeden kalarak su kütlelerine karışmaktadır. Bunun sonucunda ise tekstil endüstrisi atık suyu oluşmaktadır (Rajamohan & Rajasimman, 2013).

Tekstil endüstrisinde 8000'den fazla kimyasal kullanılmaktadır ve toplam endüstri emisyonunun %80'ini oluşturan bu kimyasallar suya karışmaktadır. Yaseen ve Scholz'un yaptığı bir araştırmaya göre tekstil atıksuları yüksek organik içerik, boyalar, boyar maddeler, askıda katı maddeler, ham maddeler, inorganik bileşikler (sodyum hidroksit (NaOH), hidroklorik asit (HCl), sodyum klorür (NaCl), deterjanlar vb.) ve toksik kimyasallardan oluşmaktadır (Yaseen & Scholz, 2018).

Atıksular aynı zamanda kükürt (S), nitratlar (NO_3^-), naftol ($\text{C}_{10}\text{H}_7\text{OH}$), asetik asit (CH_3COOH), sabunlar, klor (Cl_2), krom bileşikleri (Cr) gibi toksik maddeler; çinko (Zn), bakır (Cu), nikel (Ni), arsenik (As), kurşun (Pb), kadmiyum (Cd), civa (Hg), kobalt (Co) gibi ağır metaller; formaldehit (CH_2O) bazlı fiksaj maddeleri ve hidrokarbon (C_xH_y) bazlı yumuşatıcılardan oluşmaktadır (Manzoor & Sharma, 2020).

Tekstil endüstrisi atık sularında genellikle yüksek oranda renklilik, mineral tuzlar, yüzey aktif maddeler, yağlayıcı maddeler ve köpük azaltıcılar gibi kimyasallar da bulunmaktadır (Bruggen vd., 2004). Aslında pamuk çevre dostu bir tekstil ürünüdür. Ama ürünlerin yarısından fazlası reaktif boyalarla boyandığından dolayı tekstil atıksularının içeriği çok karmaşıktır. Bu da tekstil atıksuyunun analizini ve arıtılmasını

oldukça zorlaştırmaktadır. Bu yüzden en uygun arıtma sisteminin seçilmesi için tekstil atıksuyunun bileşimini bilmek önemlidir (Mallinson, 1999).

Tekstil endüstrisi atıksularının artması büyük bir çevre problemi haline gelmiştir ve buna bağlı olarak da halk sağlığı sorunları ortaya çıkmaktadır. Bu yüzden mevcut geleneksel su arıtma tesislerinin iyileştirilmesi gerekmektedir (Mirza vd., 2020). Tekstil atıksuyunun toksik içeriğinden dolayı içeriğine uygun gelişmiş bir arıtma metodolojisi ile arıtılarak kontrol altına alınması zorunlu hale gelmiştir. Tekstil endüstrisi atıksuları içeriğinin yanı sıra oldukça büyük hacimlerde atıksulara da neden olmaktadır (Malik vd., 2014). Bunun için endüstriyel atıksuların çevreye deşarj edilmeden önce arıtılması gerekmektedir. Fiziksel veya kimyasal arıtma metodolojileri gibi mevcut konvansiyonel yöntemler vardır. Fakat bu yöntemler tekstil atık suundaki toksik maddeleri giderecek ve suyu olması gereken standartlara getirebilecek potansiyele sahip değildirler. Ayrıca tekstil atıksuları çok fazla toksik boya içerdiğinden suyun görünümünü ve sucul ortamların da stabilitesini etkilemektedir. Bu da alıcı ortamlarda oksijen seviyelerinin azalmasına yol açmaktadır (Lambert & Davy, 2011).

Tekstil atıksularını aratabilmek için de en iyi atıksu arıtma teknolojilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Tekstil atıksularında membran teknolojileri, ozonlama, adsorpsiyon, koagülasyon-flokülasyon, elektroliz, fenton oksidasyonu gibi fizikokimyasal ve elektrokimyasal arıtma yöntemleri ve biyolojik arıtma yöntemleri vardır (Katheresan vd., 2018).

3.3. TEKSTİL ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ MBR İLE ARITIMI

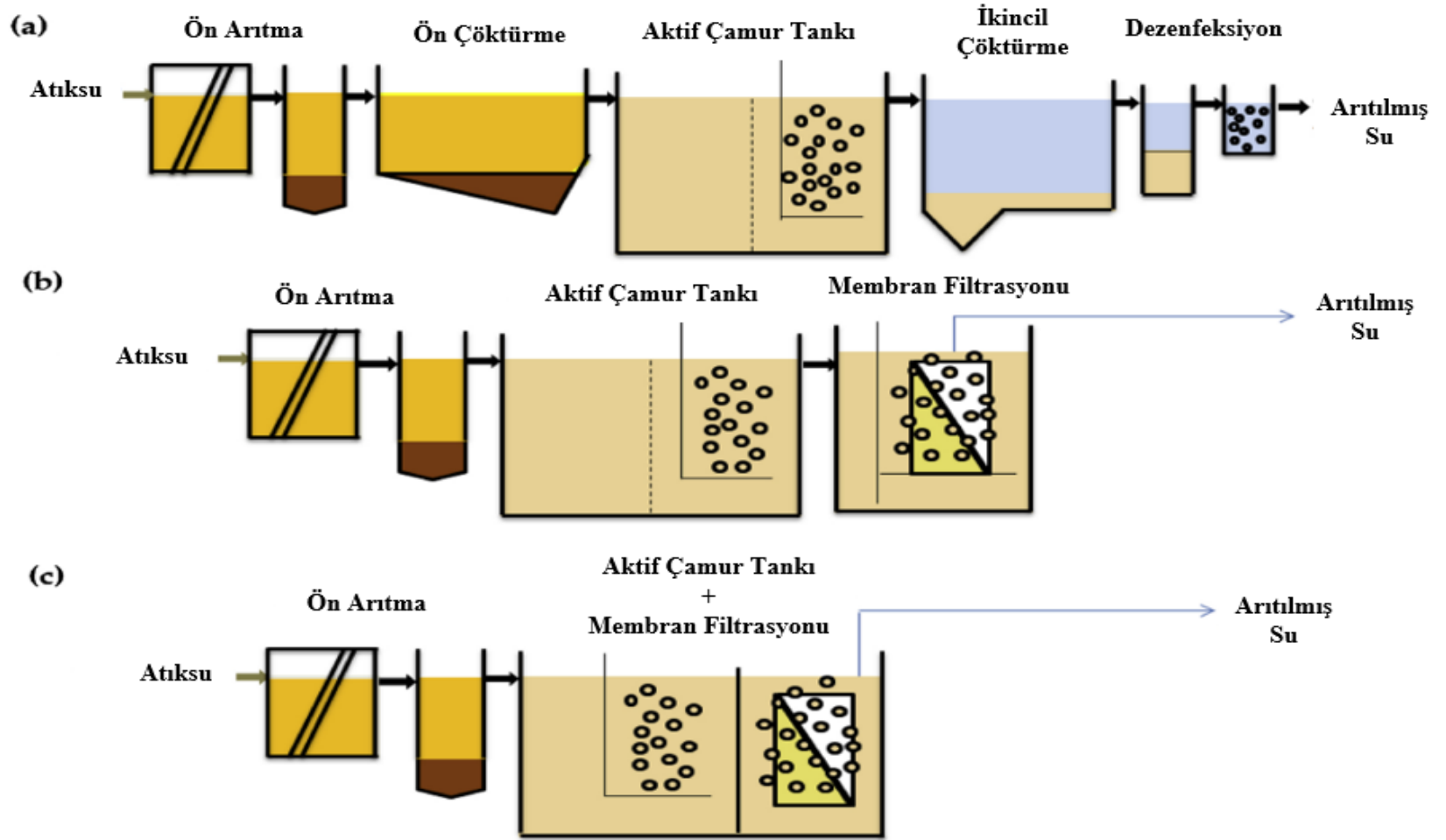
Atıksuların deşarjı ve yeniden kullanımı için yüksek standartlarda arıtılması gerekmektedir. Bunun için günümüzde MBR'ler en iyi seçimlerden biri olarak bilinmektedir. Son çalışmalara göre MBR'lerin atıksuyun yeniden kullanılabilmesi için KOİ, BOİ, N, P, askıda katılar, ağır metaller ve organik mikro kirleticileri etkili bir şekilde giderim kapasitesine sahip olduğu bilinmektedir (Fatone vd., 2005). MBR sisteminin Batık Membran Biyoreaktörü (SMBR) ve Yan Akım Membran

Biyoreaktörü olmak üzere iki farklı konfigürasyonu vardır. Şekil 4'te konvansiyonel bir atık su arıtım prosesi ile MBR sistemine ait arıtım proseslerine dair kısa bir şema gösterilmektedir.

Tekstil atıksuyu içeriğindeki bazı bileşimler (boya, pigment, kimyasal vb.) sebebiyle su ekosistemini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu bileşimler, su ekosisteminde BOİ, KOİ, pH, AKM ve toplam organik karbondaki orantısız artışlara sebebiyet vermektedir. Bu orantısız artış ise suyun ekolojik dengesini bozarak çevreye zarar vermektedir (Lellis vd., 2019).

Çevrenin su aracılığıyla boyalarla kontaminasyonu bakteri çoğalması ve kötü koku oluşumuna neden olmaktadır. Tekstil atıksuyunda boyama ve diğer kontamine kimyasallardan kaynaklanan zararlı bileşenler biyolojik olarak bozunmaya, sıcaklık değişimlerine sebebiyet verirken deterjanların, ağartıcıların ve sabunların da su ekosisteminde kalmasına yol açmaktadır (Bharagava, 2018) Tüm bu zararları önlemek için tekstil atıksularının arıtımında yeni ve etkili arıtma teknolojisinin kullanılarak yaygınlaştırılması gerekmektedir.

Doğal su kaynakları üzerinde çevre açısından oluşabilecek olumsuz etkilerin önüne geçebilmek için de boya içeren tekstil atıksularının çevre dostu teknolojiler ile arıtılması uygun görülmektedir. Literatürde tekstil atıksuyunun arıtımı için hem umut etkili hem de pratik bir yöntem olan Membran Biyoreaktörlerin (MBR) kullanımı önerilmektedir (Samsami vd., 2020).



Şekil 4. (a) Geleneksel Atık Su Arıtma Prosesinin şeması, (b) Yan Akım MBR (c) Batık MBR (Goswami vd., 2018)

MBR, bir biyoreaktör ve membran ayırma proseslerini birleştirerek yüksek performanslı atık su arıtımını gerçekleştiren bir teknolojidir. Yani biyobozunma teknolojisi ile membran teknolojisini birleştirirler. Arıtılmış su ve mikroorganizmaları ayırmak için 0,02 – 0,2 µm arasında değişen gözenek çapları kullanılmaktadır. MBR teknolojisi ile arıtılan su üçüncül atıksu arıtımına eşdeğerdir. Ayrıca MBR proseslerindeki membran filtrasyonu geleneksel AÇS (Aktif Çamur Sistemi) proseslerinden aşağıda sıralanan avantajlara da bağlı olarak daha küçük bir karbon ayak izi ile sonuçlanmaktadır (Park vd., 2015). MBR işlemi sırasında atık çamur üretim miktarı daha azdır (Lee vd., 2002). MBR'ler yüksek KOİ ve düşük F/M oranlarında çalışabilmektedirler. Aynı zamanda MBR'ler AÇS'nden daha yüksek kalitede çamur üretmektedir (Kulil, 2015). Tüm bu anlatılanlardan yola çıkarak MBR'lerin klasik aktif çamur sistemlerine göre avantajları aşağıda özetlenmiştir.

- Yüksek kalitede çıkış suyu
- Çoğu patojen ve bazı virüslerin giderilmesiyle su geri kazanım olasılığı
- Daha küçük hacimde biyoreaktör ihtiyacı
- Daha az çamur üretimi
- Yüksek atık kalitesi
- SRT ayarının kolay olması
- Çamur yaşı (SRT) ve Hidrolik Bekletme Süresi (HRT) üzerinde tam bir kontrol
- Yüksek çamur yaşı ve yüksek MLSS konsantrasyonu
- Çamurun çökelme sonucunda bağımsız yüksek kalitede çıkış suyu
- Çamur kabarma riskinin olmaması
- Yüksek organik yükleme hızı ve küçük ayak izi
- Düşük bakım
- Modüler tasarımın esnek olması
- Yüksek biyokatalizör tutma
- Çok yüksek performansta fiziksel dezenfeksiyon
- Çıkış BOİ ve KOİ konsantrasyonlarının düşük olması
- Son çöktürme havuzuna ihtiyaç duyulmaması (Koyuncu, 2018).

Literatürde tekstil atıksuyunun MBR teknolojisi ile arıtılması konusunda birçok çalışma bulunmaktadır. Berkassa ve ark. Remazol Brilliant Blue R (RBBR) boya atık

suyunu artırırken anaerobik dinamik membran biyoreaktör teknolojisini kullanmışlardır. Arıtma sonucunda reaktör hem rengin hem de KOİ'nin %97'sinden fazlasını giderebilmiştir. Ayrıca toplam askıda katı maddenin de %98,8'inden fazlasını ve yüksek moleküler ağırlığa sahip bileşikleri de iyi giderdiği sonucu elde edilmiştir (Berkessa vd., 2020). Tekstil atıksuyunun arıtımında membran biyoreaktör kullanımı ile KOİ ve TOC giderme verimliliğinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir.

Tekstil atıksuyundan biyogaz üretimi de dikkate alındığında Anaerobik Dinamik Membran Biyoreaktörlerin kullanımı oldukça cazip olmasıyla birlikte yenilikçi bir yaklaşımdır. Gerçekleştirilen bir çalışmada Yurtsever ve arkadaşları, Anaerobik Dinamik Membran Biyoreaktör ile tekstil atıksuyunu arıtmıştır. Çalışmanın çıktılarında düşük AKM konsantrasyonları ($< 10 \text{ mg} - \text{AKM/L}$) ile yüksek KOİ ($> \%95$) ve renk giderimleri ($> \%96$) elde edilmiştir (Yurtsever vd., 2020). Yılmaz ve arkadaşlarının incelediği başka bir çalışmada ise farklı SRT'lerde çalıştırılan iki aerobik MBR'nin gerçek bir tekstil atıksuyunun arıtımı üzerindeki performansı üzerine çalışılmıştır. Çalışma esnasında çok uzun SRT'ler (30 gün, 20 gün) kullanan MBR işlemine göre daha kısa SRT değerinde işletilen MBR'nin daha çevre dostu olduğu, organik karbon giderimi için oldukça etkili ve güvenilir bir artıma seçeneği olduğu sonucuna varılmıştır (Yılmaz vd., 2023). Yine bir diğer çalışmada, Yurtsever ve ark. Anaerobik Membran Biyoreaktörün (AnMBR) gerçek tekstil atıksularının arıtılmasındaki performansı üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma ile yüksek KOİ ve renk giderme verimlilikleri elde edilerek AnMBR'nin tekstil atıksularının arıtılmasında kolaylıkla kullanılabileceği sonucuna varılmıştır (Yurtsever vd., 2020). Şahinkaya ve ark. ise krom içeren sentetik tekstil atıksuyunun arıtımı üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışma sonucunda düşük AKM, yüksek KOİ, renk ve krom giderimi elde edilmiştir (Şahinkaya vd., 2017).

Yukarıda anlatılan çalışmalardan anlaşıldığı üzere geleneksel atıksu arıtma yöntemleri tekstil atıksuyunun arıtılması için verimsiz olduğundan suda kalıcı toksik kirleticileri yok edebilmek için umut verici bir arıtma yöntemi olan MBR teknolojileri yaygın olarak bu sektörde kullanılmaktadır. Tekstil sektöründen kaynaklanan atıksular kendi alanında nadir kirleticileri içerdiğinden arıtım için bu sektöre uygun olan gelişmiş ileri bir teknoloji atıksu arıtım prosesi kurmak zorundadır. Bunun için MBR teknolojisinin kullanımı oldukça önemlidir. Tekstil atıksularının MBR ile arıtımı sonucunda çıkan

su, kentsel geri dönüşüm suyu standartlarının yeniden kullanım kriterlerini karşılamalıdır.

Bu kriterler “Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği Yedinci Bölüm Arıtılmış Atıksuların Geri Kazanımı ve Yeniden Kullanımı” başlığı altında anlatılmaktadır (Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği, 2010).

Literatür çalışmaları incelendiğinde tekstil atıksuyu gibi kompleks ve toksik suların arıtılmasında tercih edilen en uygun ve en verimli biyolojik arıtma prosesinin MBR olduğu görülmektedir.

Bu çalışmada farklı SRT değerinde işletilen ve gerçek bir tekstil endüstrisi atıksuyu ile beslenen laboratuvar ölçekli aerobik bir MBR prosesinde üretilen çamurdan biyogaz üretimi incelenmiştir. Bu çalışma sayesinde farklı SRT değerlerinde işletilen ve tekstil atıksu arıtan bir MBR de çamurun anaerobik çürütülmesiyle enerji nötral veya enerji pozitif bir arıtmanın mümkün olup olmayacağı da ortaya konulmuş olacaktır.

3.3.1. Hızlı MBR Prosesinin Avantajları

Özellikle düşük SRT değerlerinde işletilen ve yüksek hızlı MBR prosesi olarak adlandırılan proses enerji nötral veya enerji pozitif tesis işletimi kapsamında ön plana çıkmaktadır. Nedenleri ise;

1. Yüksek hızlı MBR (düşük SRT) proseslerinde havalandırma için daha az enerji gerekmektedir,
2. Yüksek hızlı MBR prosesinde daha fazla çamur üretilir,
3. Düşük SRT de çalışan bir proseste üretilen çamurda UAKM başına daha yüksek metan üretimi söz konusudur.

Bu tez bir TÜBİTAK projesi (119R031) bünyesinde yürütülmüş olup, yüksek hızlı MBR başka bir tez bünyesinde çalışılmıştır. Bununla birlikte aşağıda kısaca değinilmiştir.

Diğer arıtma yöntemlerine göre MBR teknolojisinin birçok avantajından bir önceki başlık altında bahsedilmiştir. MBR teknolojisinde var olan tüm işletme özellikleri

kullanılarak daha verimli ve yenilikçi bir yaklaşım olan hızlı MBR Prosesi kullanılabilir. Daha önce de bahsedildiği gibi enerji açısından daha verimli yani kendi kendine yetebilen prosesleri uygulamak en önemli kriterdir.

Literatürde MBR teknolojisinin performansını artırmak için optimum çalışma koşullarını bulmak üzerine birçok çalışma bulunmaktadır. Bunlardan biri Ng ve Hermanowicz'in 0,25-5 günlük kısa SRT değerleri arasında değişen ve HRT'nin de 3-6 saat arasında olduğu laboratuvar ölçeğindeki batık MBR teknolojisinin uygulanma çalışmasıdır. Çalışma bulgularında $SRT < 2,5$ gün olduğunda nitrifikasyonun tamamen durduğu ve tam olarak karıştırılmış aktif çamur yumaklarının ise daha kısa SRT değerlerinde oldukça küçük ve zayıf oldukları yer almaktadır. MBR çamurunda topaklaşmayan mikroorganizmaların varlığının azalan SRT ile daha da arttığı belirtilmiştir. Azalan SRT ile hem MBR hem de aktif çamurdaki ekzoselüler polimerik maddelerdeki protein ve karbonhidrat miktarının daha da azaldığı yer almaktadır. Ayrıca bu çalışmada %97,3 ile %98,4 arasında değişen mükemmel KOİ giderme verimliliği gözlemlenmiştir (Ng & Hermanowicz, 2005).

Harper ve arkadaşları laboratuvar ölçekli bir MBR sistemini 0,5 ila 3 gün SRT arasında ardışık kesikli biyoreaktör sistemi ile çalıştırarak biyokütle özelliklerini ve mikrobiyal verimini incelemişlerdir. Bu çalışmadan çıkan sonuçlar ile de Ng ve Hermanowicz'in sonuçlarını doğrulamışlardır (Harper vd., 2006).

Bir diğer çalışmada ise L. Duan ve arkadaşları laboratuvar ölçekli bir membran biyoreaktörünü 3, 5 ve 10 günlük SRT değerlerinde çalıştırarak reaktör performansını ve mikrobiyal topluluk bileşimi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda amonyak gideriminin %87 ve KOİ gideriminin ise %95'in üzerinde olduğu görülmüştür (Duan vd., 2009).

Bu çalışmalardan sonra C. Razbonyalı evsel atıksu giderimi yapan yüksek hızlı membran biyoreaktörlerin proses performansı üzerine araştırma yapmıştır. Araştırma sonucunda 0,5 ila 2,0 günlük SRT değerlerinde ve 8 saatlik HRT'de yüksek hızlı MBR işletmiştir. Kullanılan bu sistem ile evsel atıksu arıtımı sonucunda yüksek kaliteli atıksu üretildiği yer almaktadır (Razbonyalı, 2013).

S. Sözen ve arkadaşlarının yaptığı bir diğer çalışmada da süper hızlı membran biyoreaktör (SFMBR) üzerinde incelemeler yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda SFMBR'nin birçok avantajı ortaya konulmuştur. Bunlar aşağıda sıralanmıştır.

- Süper hızlı MBR ile çözünebilir KOİ bileşenlerinin yüksek oranda giderimi,
- Kek oluşumu (8-13 nm) ile etkin filtrasyon boyutunun iyileştirilmesi,
- Daha hızlı bakterilerin tercih edilmesinden dolayı daha hızlı substrat kullanımının meydana gelmesi,
- Süper hızlı MBR'de düşük çözünür mikrobiyal ürünler oluşması
- %54 ila %77 arasında enerji tasarrufu ve geri kazanımı.

Bu çalışmada SFMBR'nin ana özelliği olarak enerji tasarrufu ve geri kazanımının altı çizilmiştir. Ayrıca bu çalışmada bir diğer ana konu olarak da SFMBR işletim sisteminin kullanılmasının daha avantajlı olması konusunda değinilen nokta atıksuyun yeniden kullanımının sağlanmasında etkili KOİ gideriminin gerçekleşebilecek olmasıdır (Sözen vd., 2017).

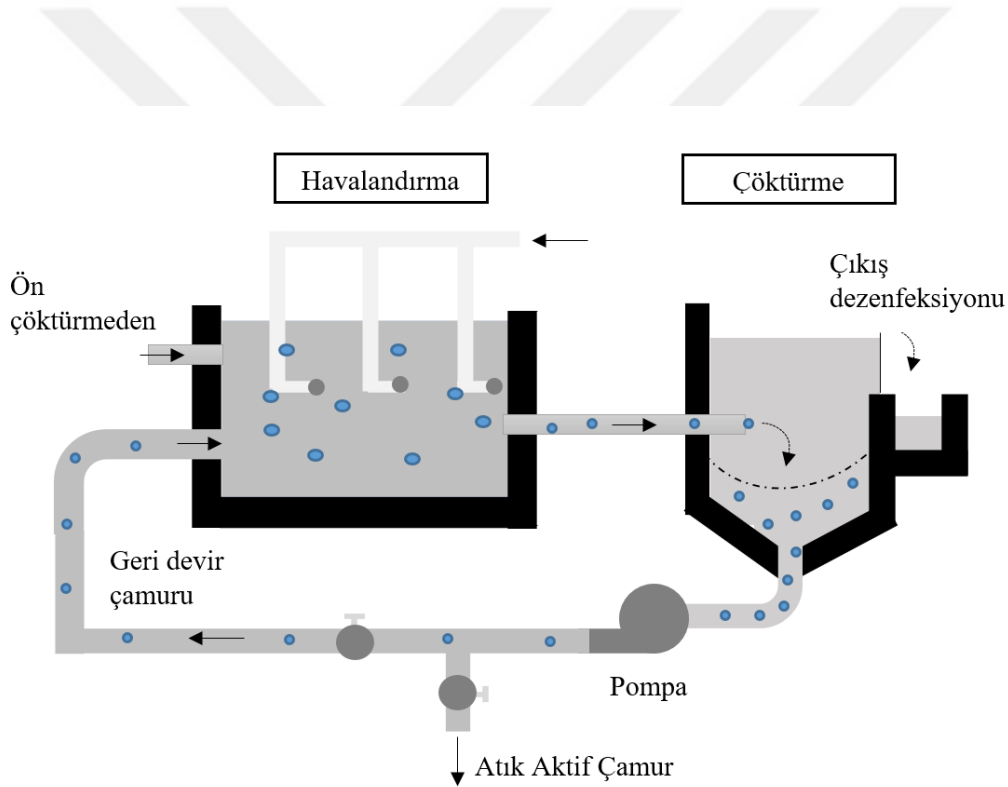
MBR teknolojisiyle yapılan arıtım etkin ayırma, biyokütlenin kontrolü ve çıkan atık kalitesi ile geleneksel aktif çamur sistemleri için büyük bir teknoloji olarak görülmektedir ve önemli avantajlar sunmaktadır. Fakat yüksek SRT değerleri, tasarım parametrelerinin seçimi ve artan biyokütle hızları ile hızlı MBR prosesinin yanında dezavantajlı kalmaktadır. Ayrıca tüm bu araştırmalardan yola çıkarak Yüksek Hızlı MBR işletimi ile üretilen biyokütlenin enerjisinin korunması mümkündür. Bu işletim sayesinde atıksu arıtımı sonucunda çıkan su partiküler madde içermeyen yüksek kalitede bir su olacaktır.

3.4. BİYOLOJİK PROSESTE ATIK ÇAMUR OLUŞUMU

Atıksu arıtma tesislerinde çamur yönetimi hem teknik açıdan hem de çevresel açıdan büyük problemlerin başında gelmektedir. Atıksuların arıtılması aşamasında biyolojik proses oldukça önemlidir. Fakat biyolojik proses sonucu çıkan arıtma çamuru tesislerde istenmeyen ve bir an önce çözülmesi gereken ciddi bir problemdir (Yüksekdağ vd., 2020).

Biyolojik prosesler, atık sudaki biyolojik olarak parçalanabilir çözülmüş veya kolloidal organik maddeleri oksitlemek ve oluşan çamuru da çökebilen biyolojik ve inorganik floklara dönüştürmek için kullanılmaktadırlar (Öztürk vd., 2010).

Biyolojik arıtmanın temel amacı, atıksudaki organik maddeleri stabil hale getirmek, çökemeyen kolloidal maddeleri yumaklaştırmak, çöktürmek ve azot, fosfor gibi nutrientlerin giderimini sağlamaktır (Çetin, 1995). Oluşan çamur genellikle sıvı veya yarı katı formda olmaktadır. Çamurun yapısı ise atıksu arıtımı için kullanılan prosese ve işletme sistemine bağlı olarak değişmektedir. Çamur tüm bunlara bağlı olarak %0,25 ila %12 arasında katı içermektedir (Yeşil, 2011). Şekil 5'te klasik bir aktif çamur sistemi gösterilmektedir.



Şekil 5. Aktif Çamur Sistemi (Çınar, 2011)

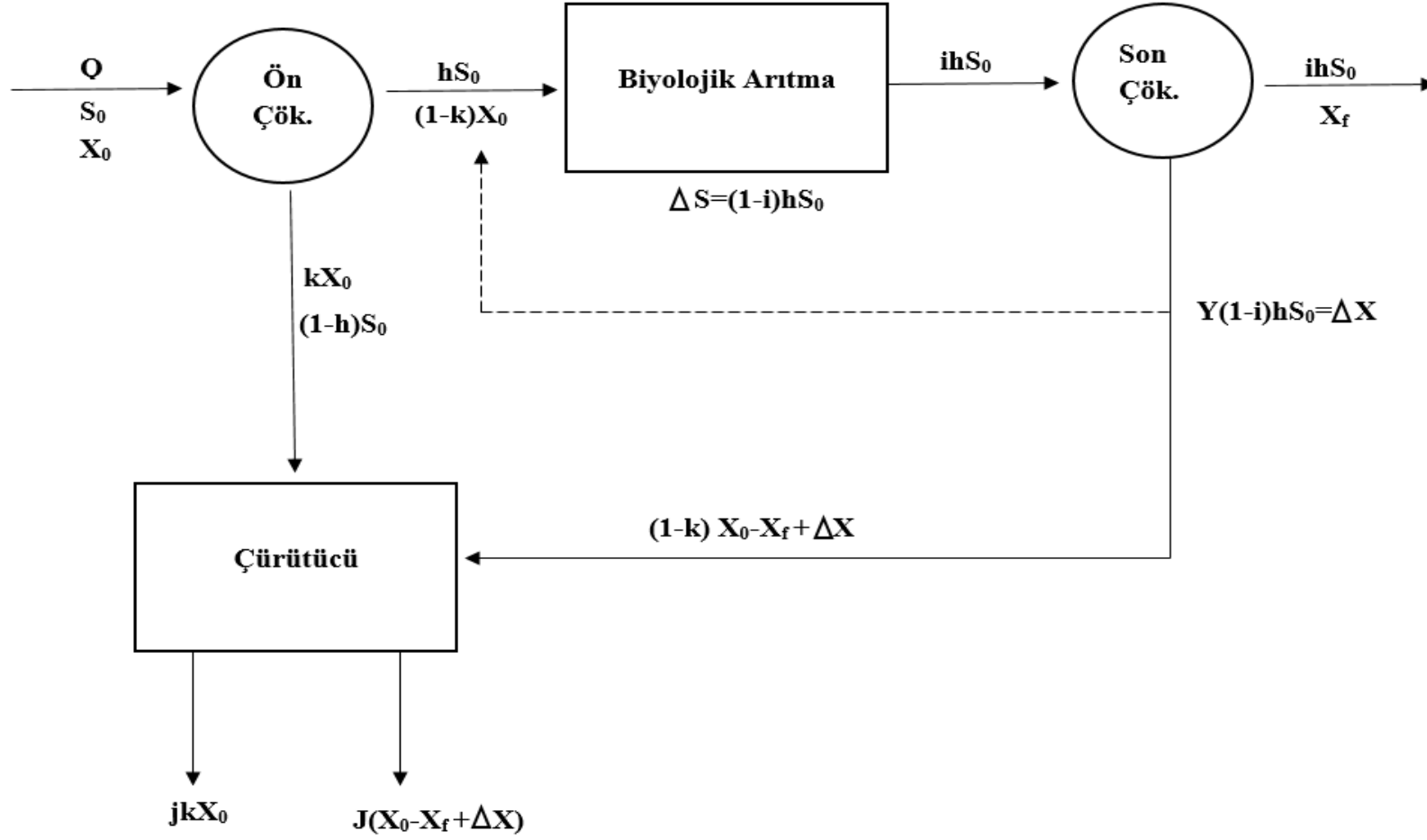
Çamur oluşumunun birçok kaynağı vardır. Bunlardan biri biyolojik arıtmadır. Biyolojik arıtma sonucunda askıda katı madde oluşmaktadır. Bundan dolayı da atıksu arıtma tesislerinde yüklü miktarda çamur meydana gelmektedir. Bu durumda fazla çamuru yoğunlaştırmak gerekmektedir. Çamur işleme ve bertaraf yöntemlerinden biri

olan çamur yoğunlaştırma atıksu içerisinde yer alan katı konsantrasyonunun arttırılmasını sağlayarak çamur hacminin azalmasına yardımcı olan bir işlemdir (Peirce vd., 1998).

Biyolojik proste çamur oluşumu oldukça karmaşık bir süreçtir. Karmaşık olmasının sebebi bertaraf edilmesi gereken bu çamur ham atıksu içerisindeki organik maddelerden farklı bir yapıdadır. Ayrıca bu sebeple bozunma ve kokuşma eğilimindedirler. Bu sebeple çamur bertarafının belirlenmesinde katı maddenin özelliğini ve içeriğini bilmek oldukça önemlidir (Yıldız vd., 2009). Bu oluşan katı atığın kaynağı, sistemdeki çamur yaşı ve proses tipiyle oldukça yakından ilgilidir (Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği Ek 2, 2010).

Atıksu arıtma uygulamaları sonucunda oluşan çamurun biyolojik arıtma sistemleri ile bertaraf edilmesi toplam atıksu arıtma maliyetlerinin yarısını oluşturmaktadır (Yasui vd., 1996).

Biyolojik proses sonucu oluşan çamur miktarının hesaplanması için biyolojik arıtma tesisinin türü, aerobik / anaerobik proses seçimi oldukça önemlidir. Arıtma sistemi için belirlenen F/M oranından oluşacak çamur miktarı hesaplanabilmektedir (Karaaslan & Oğuz, 2013). Biyolojik proste çamur miktarının hesaplanması aşağıda Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 6. Biyolojik Proseste Çamur Miktarının Hesaplanması (Kocamemi, 2003)

S_0 = Giriş BOİ, (kg/gün)

X_0 = Giriş AKM (kg/gün)

h = Ön Çöktürmede Giderilemeyen BOİ (~ 0,7)

i = Biyolojik Arıtmada Giderilemeyen BOİ (A.Ç. $i = 0,1$; D.F. $i = 0,2$)

X_f = Arıtma Tesis Çıkışındaki AKM (kg/gün)

k = Ön Çöktürmede Giderilen AKM

j = Çürüme esnasında bozunamayan katı madde ($j = 0,8$)

ΔX = Biyolojik Faaliyet Sırasında Üretilen Net Katı Madde Miktarı (kg/gün)

Y = Biyolojik Verim Katsayısı ($\Delta X/\Delta S$)

$\Delta S = hS_0 - ihS_0$

$Y = 0,5$ (Aktif Çamur Tesisleri İçin)

$Y = 0,2$ (Damlatmalı Filtre Tesisleri İçin)

Anaerobik prosesler oluşan çamur miktarı açısından daha avantajlıdır. Hücre üretim hızının düşük olmasından dolayı oluşan çamur miktarı da azdır. Aynı zamanda anaerobik çürütme çamur stabilizasyonu için kullanılan en eski proseslerden biridir (Filibeli & Erden, 2010).

Konvansiyonel bir atıksu arıtma tesisinde (AAT), işletme giderlerinin yaklaşık %25-65'i enerji tüketimine atfedilebilir ki bu enerji ihtiyacı da tahminen 0,3 ile 2,1 kWh/m³ arasında değişebilmektedir; AAT'de kullanılan enerjinin neredeyse yarısı aktif çamur ünitesinde suya oksijen transferi için harcanan elektrik enerjisidir. Aynı zamanda atık su arıtma tesisleri yüksek miktarda atık çamur üretir ve üretilen bu çamurun uygun şekilde bertarafı gerekmektedir. Çamurun uygun arıtma ve bertaraf olmadan çevreye verilmesi durumunda, alıcı ortam açısından büyük bir risk oluşturmaktadır. Giderek artan atıksu miktarları ve daha katı çevresel düzenlemeler sebebiyle, gelecekte hem enerji tüketiminin hem de çamur üretiminin artması beklenmektedir (Xiao vd., 2020).

AAT’de aşırı miktarda üretilen çamur, büyük ölçüde organik maddeden oluştuğu için çamurun anaerobik çürütme yoluyla biyogaza dönüştürülmesi neticesinde üretilen enerji tesiste tüketilen elektrik enerjisi ve fosil yakıtların yerini alabilir (Silvestre vd., 2015). Böylece, AAT’nde daha az fosil yakıt tüketimi, daha az enerji tüketimi ve daha az sera gazı emisyonu mümkün olur.

3.5. ÇAMUR YAŞININ ATIK ÇAMUR OLUŞUMUNA ETKİSİ

Çamur yaşı, sistemde bulunan toplam çamur miktarının günlük çekilen fazla çamura oranıdır. Çamur yaşı, arıtılmış atık su sonucunda oluşan fazla çamur dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Gün birimi ile de ifade edilmektedir (Gerardi, 2002).

Çamur yaşı, mikroorganizmaların aktif çamur prosesinde kaldıkları zamanı belirtmektedir. Mikroorganizmaların üreme yerine yaşam fonksiyonlarını tercih etmeleri anlamına gelmektedir. Yüksek çamur yaşlarında mikroorganizmaların besi maddesi azalmaktadır ve korunmaları için kullanılan enerjide artış meydana gelmektedir. Ek olarak kendi hücrelerini sindirmelerinde de (iç solunum) artış meydana gelmektedir. İç solunum sonucunda prosese giren besi maddesi CO₂ ve suya dönüşmektedir. Bu da prosesteki aşırı çamur oluşumunu azaltmaktadır. Çamur yaşı arttıkça prosesteki biyokütle konsantrasyonu artmaktadır (Gürtekin & Şekerdağ, 2006).

Çamur yaşının yüksek olması şişkin çamur oluşumuna sebep olmaktadır ve bunun sonucunda savaklardan çamur taşabilmektedir. Bu da arıtma sonucu çıkan suyu etkilemektedir. İyi bir atıksu arıtma prosesinde çamur çıkışının stabil olması gerekmektedir. Stabil olmadığı durumlarda arıtma tesisinin de verimsiz olduğu söylenilebilmektedir. Çamur yaşı yüksekliği fazla çamurun prostenen uzaklaştırılmasıyla düşürülebilmektedir. Çamur yaşının yüksek olması çamurun havalandırma havuzunda daha fazla kaldığı anlamına gelmektedir. Bu da daha fazla çamurun biyoreaktörde birikmesine ve ölü bakteri oranının artmasına sebebiyet vermektedir. Bunlara bağlı olarak oksijen ihtiyacı artmakta ve F/M oranı azalmaktadır. Havalandırma havuzundaki çamurun çökmesi yapılacak olan Çamur Hacim İndeksi

(ÇHİ) hesaplamaları ile düzenli olarak kontrol edilmelidir. ÇHİ'nin yüksek olması istenmeyen bir durumdur. ÇHİ değeri sürekli kontrol edilerek ortamdan fazla çamurun düzenli bir şekilde uzaklaştırılması sağlanarak çamur yaşı belirlenen seviyede tutulmalıdır (Öz, 2009).

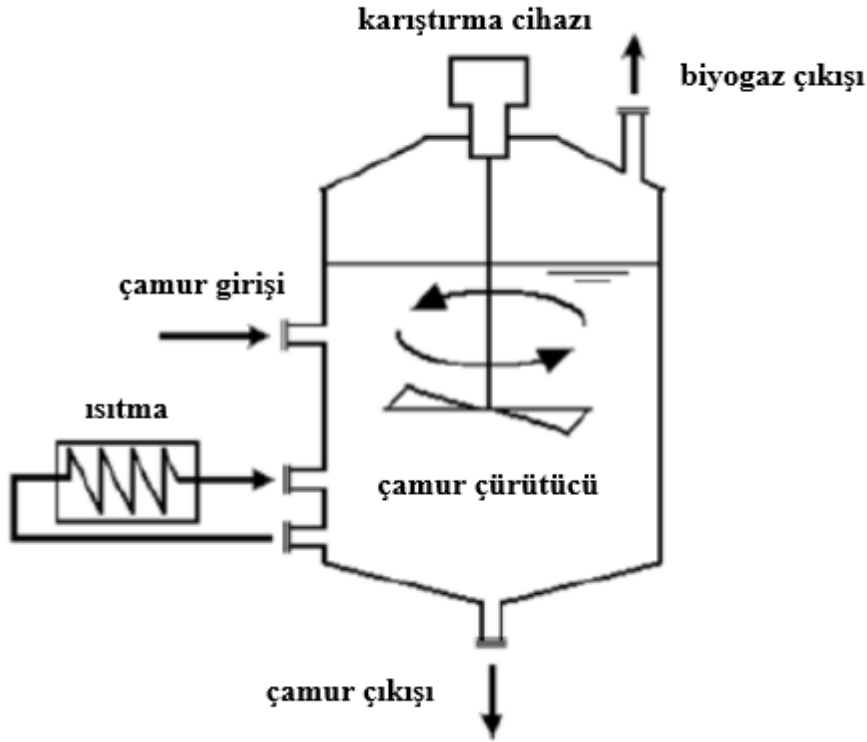
Yukarıda anlatılanlardan yola çıkarak çamur yaşının yüksek olması atık çamuru oluşumunun düşük olması demektir. Bununla birlikte biyoreaktörde artan UAKM konsantrasyonu nedeniyle, havalandırma için gerekli enerji artmakta ve UAKM/AKM oranı da düşmektedir. Ayrıca, köpük ve ipliksi mikroorganizmaların oluşumuna da sebep olabilmektedir. Çamur yaşının düşük (özellikle kritik SRT dikkate alınarak) ya da yüksek olması arıtma verimini olumsuz etkilemektedir. Çamur yaşının stabil olması ile uygun su çıkışı elde edilebilmektedir.

Literatürde çamur yaşının 9 günü geçmesi halinde köpük problemi ile karşılaşılacağı yer almaktadır. Çamur köpürmesini engellemek için genellikle ortamdaki hava miktarı azaltılmaktadır. Fakat bu durum düşük oksijen konsantrasyonuna yol açabilmektedir. Bunun sonucunda da çamur kabarması sorunu ortaya çıkabilmektedir. Tüm bunlara bağlı olarak da atıksu arıtma prosesinin arıtma verimi düşmektedir. Bu durumun önlenmesi için yapılacak yöntem çamur yaşının düşürülmesidir (Akyüz, 2011). Tabi düşülebilecek minimum çamur yaşının belirlenmesinde, atıksuyun özelliği, atıksu sıcaklığı, istenilen organik madde giderim verimi, özellikle azot giderimi yapılacaksa istenilen nitrifikasyon ve denitrifikasyon verimi, tesiste üretilecek çamur için mevcut bertaraf yöntemlerinin hepsi dikkate alınmalıdır.

3.6. ÇAMUR ÇÜRÜTME

Atıkların anaerobik olarak sindirilmesi (AD), farklı hammaddelerden oluşan birden fazla substratın aynı anaerobik çürütücüye beslenmesi olarak tanımlanmaktadır. Bunun uygulanması, biyogaz üretimi açısından oldukça önemlidir. Büyük atıksu arıtma tesisleri (AAT), anaerobik sindirimin uygulanması açısından da avantajlıdır (Donoso-Bravo vd., 2019). Dolayısıyla, tüm dünyada yaygın olarak kullanılan

anaerobik çürütme, yenilenebilir enerji açısından rekabetçi bir biyoprosedir (Da Silva vd., 2018). Klasik bir anaerobik çürütme sistemi Şekil 7’de gösterilmektedir. Anaerobik çürütme yoluyla biyogaz üretimi daha düşük sera gazı ve koku emisyonları açısından çevre dostu bir yöntemdir (Lin vd., 2019). Aynı zamanda ekonomik açıdan uygun ve verimli bir atık yönetim seçeneğidir (Elbeshbishy vd., 2014).



Şekil 7. Anaerobik Çürütücü Sistemi (Von Sperling & Chernicharo, 2005)

Küresel ısınma, iklim değişikliği, atık bertarafı, enerji maliyetlerindeki artışlar, fosil yakıtların azalması, enerji güvenliği ve çevresel olarak sürdürülebilir atık yönetimi ihtiyacının bir sonucu olarak özellikle gelişmekte olan ülkelerde anaerobik çürütme büyük ilgi görmüştür. Biyokütlenin anaerobik parçalanmasından biyogaz üretimi, sürdürülebilir enerji ve çevresel riskleri azaltabilmesi açısından önemli bir teknolojidir (Wang vd., 2012). Sera gazı emisyonlarını dengelemek, temiz enerjide sürdürülebilirliği artırmak ve enerji verimliliğini arttırmak için biyogaz enerjisi tercih edilmelidir (Cimon vd., 2020). Anaerobik çürütme yenilebilir enerji kaynağı olan

biyogazı üretmek, koku problemini azaltmak ve atıkların minimizasyonu için kilit bir teknolojidir (Rahman vd., 2019).

Anaerobik çürütme teknolojisinin entegre edileceği reaktörün kurulumunda meydana gelen gelişmeler (modelleme, kontrol uygulamaları ve moleküler araçlar) biyogaz üretimine daha rekabetçi bir bakış açısı sağlamıştır. Aynı zamanda atıkların azaltılması, enerji tasarrufu ve yenilebilir enerji üretimi açısından da anaerobik çürütmenin uygulanmasının artmasına katkıda bulunmuştur (Stamatelatou vd., 2011).

Günümüzde küresel kaynakların yetersizliği sebebiyle, Paris İklim Anlaşması, su kaynağı geri kazanım tesislerinde (WRRF'ler) enerjinin kendi kendine yeterliliğine odaklanan yeni bir dönemin başlangıcı için harekete geçmiştir. Bu hedefleri gerçekleştirmek ise verimli enerji üretiminin artırılmasını ve daha düşük sera gazı emisyonlarına sahip alternatif enerji kaynaklarının bulunmasını gerekli kılmaktadır. Çamurda bulunan bozulabilir organik maddeleri yani biyokütle enerjisini (biyogaz) geri kazanabilen anaerobik çürütme; çamur azaltma, kaynak kullanımı, faydalı yan ürünlerin üretimi, daha düşük enerji talebi ve stabilizasyon gibi önemli avantajlar sunduğundan çamur bertarafında en popüler teknolojilerden biri olduğu bildirilmiştir (Bahreini vd., 2020).

Yüksek enerji tüketimi olan yerler içerisinde atıksu arıtma tesisleri ayrı olarak değerlendirilmektedir. Bunun sebebi yüksek enerji tüketimi olmasının yanı sıra atıksu çamurunun üretiliyor olmasıdır. Atıksu çamuru anaerobik çürütme ile biyogaz üretimi için potansiyel bir kaynaktır. Atıksu arıtma tesisleri oldukça yüksek seviyelerde enerji tükettiklerinden dolayı bu yöntemi tercih etmeye başlamışlardır (Günel, 2017). Atıksu arıtmanın yanı sıra bundan enerji geri kazanımı, arıtma tesisi özelinde oldukça önemli ve verimlidir.

Konvansiyonel aktif çamur sistemleri kullanılarak gerçekleştirilen atıksu arıtım sistemleri birçok atık su türünde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Fakat çevresel riski, arıtma maliyetlerinin yüksek olması (havalandırma ve çamur yönetimi) yüksek organik madde kayıpları (mineralizasyon nedeniyle) ve geniş alanlar kaplaması gibi dezavantajları sebebiyle oldukça problemli bir sistemdir. Bu mevcut sistemler ile atıksuyun organik bileşenlerinde bulunan potansiyel enerji de geri kazanılamayabilir. Bu enerjiyi geri kazanabilmek için biyogaz enerjisi kullanmak en uygun yollardan

biridir. Bunun için de organik maddenin anaerobik çürümeye yönlendirilmesi gerekmektedir (Zhang vd., 2021).

Geleneksel atıksu arıtım prosesini uygulayan tesislerin havalandırma işlemi için harcanan miktar toplam enerji maliyetinin %45-75'ini oluşturmaktadır. Bu noktada Anaerobik çürütme (AD), biyoenerji geri kazanımı ve düşük çamur veriminin sürdürülebilir ve uygun maliyetli olması ile tercih edilen bir işlemdir. Bu yüzden AD prosesi atıksuların arıtılmasında alternatif bir yöntem olarak düşünülmektedir (Kong vd., 2021). Arıtma süreci boyunca fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçlerin yan ürünü olan oldukça fazla miktarda atık çamur ortaya çıkmaktadır (Guo vd., 2020).

Bu noktada enerji verimli atıksu arıtma yöntemlerinin geliştirilmesi son derece önemlidir. Çünkü çıkan çamurun tesisteki hacmini azaltmak, sağlık ve güvenlik açısından da oluşabilecek sorunlara karşı gereklidir. Hacimleri özellikle nüfusa bağlı olarak artan çamuru azaltmak için ayrı bir arıtma gerekmektedir. Bu da toplam bütçenin %40 ile %60'ına denk gelebilmektedir. Yeni teknolojiler ile bu avantaja dönüştürülebilmektedir ve bunun için en uygun yöntem Anaerobik Çürütme (AD)'dir. Anaerobik çürütme proseslerinin atık su arıtma çamuruna uygulanması hem enerji sorununa hem de çevresel problemlere bir çözümdür. Bu yüzden sürdürülebilir bir arıtma teknolojisi olarak da kabul edilmektedir. Bu teknoloji ile çamur artık atık olarak nitelendirilmemekte ve bir kaynak olarak görülmektedir. Anaerobik Çürütme, oksijensiz ortamda oluşan bir dönüşüm sürecidir (Wang vd., 2020). Bu yöntem arıtma tesislerindeki sürecin sürdürülebilirliğini sağlamak aynı zamanda sosyo-çevresel ve yasal boyutlar için de oldukça önemlidir (Elalami vd., 2019).

Anaerobik çürütme, biyogaz üretimi yoluyla enerjinin geri kazanılması için kilit bir teknoloji olarak kabul edilmektedir ve en yaygın proseslerden biridir. Yaygın olmasının sebebi sürdürülebilir teknolojilerin geliştirilmesine odaklanabilir olmasıdır. Anaerobik çürütücüler mezofilik (30-40°C) veya termofilik (50-60°C) koşullarda çalıştırılabilir. Fakat en verimli ve en yaygın çalıştıkları koşullar mezofilik koşullardır (Dumas vd., 2010). Mezofilik ortamda çalışan reaktörler termofilik ortamda çalışan reaktörlere göre substratta meydana gelebilecek değişikliklere karşı daha kararlıdır, örneğin sıcaklıktaki ya da substratın bileşimindeki değişiklikler. Bununla birlikte reaktördeki metan üretimi sadece çalışılan sıcaklığa değil organik atığın biyolojik

olarak bozunabilirliğine, reaktör pH'ına, substrattaki toksik ya da inhibitör bileşiklerin varlığına da bağlı olabilmektedir (Atilla, 2002). Literatüre göre anaerobik çürütme için optimum pH aralığının 6,8 ile 7,4 olarak verilmektedir (Pekergin, 2019).

Literatürde çeşitli organik materyallerin anaerobik sindirimi için birçok araştırmacı tarafından kinetik modellemeler üzerine çalışılmıştır. Martin ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada titanyum dioksit varlığında ozon ve ozon artı ultraviyole ışık ile ön işleme tabi tutulmuş üzüm asmasının anaerobik sindiriminin karşılaştırmalı bir kinetik çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu işlemlerden sonra atığın metan üretim potansiyeli ve hızının arttığı görülmüştür (Martín vd., 2002). Başka bir çalışmada ise López ve Borzacconi birinci dereceden kinetik bir yaklaşım kullanarak şeker kamışı vinasının artırıldığı bir Genişletilmiş Granül Çamur Yatağı'nın (EGSB) modellenmesini gerçekleştirmişlerdir (López & Borzacconi, 2011). Başka bir çalışmada ise; rakı üretiminden gelen üzüm asması, prina ve anason gibi lignoselülozik atıkların anaerobik sindirimi modellenmiştir (Yılmaz vd., 2021). Ayrıca literatürde üzüm küspesinden biyogaz üretimi ve kinetik modellenmesi üzerine Syaichurrozi ve arkadaşlarının yapmış olduğu birkaç çalışma mevcuttur (Syaichurrozi vd., 2016; Syaichurrozi & Sumardiono, 2013).

3.7. ÇAMUR ÇÜRÜTMİYİ ETKİLEYEN PARAMETRELER

Anaerobik çürütmeyi etkileyen kontrol parametreleri göz önünde bulundurulduğunda, bütün bir sistemin performansı çeşitli parametrelere bağlı olup, bu parametrelerdeki değişim sistem performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Anaerobik proses kısmen kompleks olup, farklı amaçlar için kullanılan birçok mikroorganizma topluluğunu da bir arada bulundurur. Anaerobik biyoproses çok değişkenli bir sistem olup, proses verimi özellikle reaktör hacmi, reaktör türü, atıksu özellikleri, hidrolik tutma süresi (HRT) ve katı madde tutma süresi (SRT), uçucu yağ asitleri (VFA) miktarı, sisteme yapılan yükleme, nütrient miktarı, sıcaklık, pH ve alkalinite gibi parametrelerden etkilenmektedir.

Atıksu arıtma tesislerinde oluşan çamurların organik yükü fazla olduğundan anaerobik çürütme teknolojisi ile biyogaz üretimi yapılabilmektedir. Anaerobik çürütme genellikle 20-40 °C'lik sıcaklık ve 20 günlük çürütme süresi ile gerçekleştirilmektedir. Atıksu arıtma prosesi işletilirken maksimum verimde çalışabilmesi için dikkat edilmesi gereken bazı parametreler vardır. Bunlar; uçucu organik katı madde (UKM), organik yükleme hızı (OLR), uçucu yağ asitleri (UYA), alkalinite, UYA/alkalinite, pH, sıcaklık ve SRT'dir. Bu parametrelerin sürekli olarak izlenmesi ve stabil halde tutulması gerekmektedir.

Genel olarak anaerobik reaktörler, dış etkenlerdeki değişikliklerden etkilenmektedir. Fakat etkilerin şiddeti, ani değişikliklerin cinsine, büyüklüğüne, süresine ve ne sıklıkta olduğuna bağlıdır. Sık karşılaşılan tepkiler arasında performansta azalma, VFA'ların birikmesi, pH ve alkalinite düşüşü, biyogaz üretimi ve bileşimindeki değişiklikler ve çamur yıkanması yer almaktadır (Debik vd., 2008).

3.7.1. HRT

Anaerobik çamur çürütücüler standart ve yüksek hızlı olmak üzere iki şekilde işletilebilmektedir. Standart düşük hızlı anaerobik reaktörlerde karışım ve ısıtma bulunmamaktadır. Standart düşük hızlı sistemlerde hidrolik bekletme süresi genel olarak 30-60 gün arasında olup, hidrolik bekletme süresi ve çamur bekletme süresi birbirine yakındır. Yüksek hızlı anaerobik reaktörler ise, daha iyi performans elde etmek veya daha küçük hacimlerde aynı verimlere ulaşabilmek için karıştırılarak ısıtılırlar. Bu reaktörlerde hidrolik bekletme süreleri ısıtma ile artan mikroorganizma büyüme hızları nedeniyle 20 günün altında tutulabilmektedir. Böylece, reaktörde daha düşük bir hacimde daha yüksek performanslar elde edilebilmektedir (Öztürk, vd., 2010) Çamur çürütülmesinde tam karışım, çöktürme ve geri devri olmayan prosesler genellikle kullanılmaktadır.

Yüksek organik madde içeriğine sahip atıksuların bertaraf edildiği yüksek hızlı anaerobik reaktörlerde ise, özellikle biyofilm proseslerin kullanıldığı biyoreaktörlerde, 1 günden az hidrolik bekleme sürelerinde bile yüksek verimlerle organik madde giderimi mümkün olabilmektedir (Öztürk, vd., 2010)

3.7.2. pH

Biyogazın oluşum hızına pH değeri büyük ölçüde etki etmektedir. Aşırı asidik ($\text{pH} < 3$) veya bazik ($\text{pH} > 12$) koşullar asidojenler için toksik bir ortam oluşturmaktadır (Bahreini vd., 2020). Metan üreten akeler ise çok daha hassas olup, uygun olan pH değeri 6,8–7,2 arasındadır (İlkılıç & Deviren, 2011).

3.7.3. Sıcaklık

Anaerobik sindirim, mezofilik (35-37 °C) ve termofilik (50-60 °C) sıcaklıklar olmak üzere iki farklı sıcaklık aralığında gerçekleşmektedir (Koyuncu, 2014). Sıcaklık, anaerobik sindirim sırasında patojenik mikroorganizmaların inaktivasyon oranını etkileyen en önemli faktördür (Jiang vd., 2015). Mezofilik anaerobik çürütücüler, termofilik anaerobik çürütücülere kıyasla daha çok kullanılmaktadır (Gavala vd., 2003). Anaerobik çürütücüde en çok uygulanan sıcaklık ise 25-40 °C arasındadır (Yüceer, 2006).

3.8. ATIK ÇAMURUN ÜRETİLDİĞİ ÇAMUR YAŞININ ÇÜRÜME PERFORMANSINA ETKİSİ

Prosesin işletilmesinde yatırım ve maliyet açısından önemli parametrelerden biri SRT'dir. Maksimum verim için prosesin optimum SRT'de çalıştırılması gerekmektedir. Atıksu ve atıksudan üretilen çamurun karakterizasyonuna göre bu belirlenmelidir.

Reaktördeki süreci en çok etkileyen kilit parametrenin SRT olduğu da bilinmektedir. Çünkü çamurun biyokimyasal ve fiziksel özelliklerini etkileyebilmektedir (Halalshah vd., 2005).

Aktif çamur ünitesi olan bir atıksu arıtma tesisinin toplam enerji ihtiyacının %25-50'lik kısmı anaerobik çürütme prosesiyle karşılanabilir. Arıtma tesisinde arıtılan suyun karakterizasyonu ve işletme parametrelerine bağlı olarak bu oran daha da arttırılabilir (Erkan vd., 2018). Çamurun üretileceği prosesin SRT değeri gelişmiş anaerobik

çürütme (AD) işleminde kendi kendine yeterli enerjinin sağlanabilmesi için büyük önem taşımaktadır.

Konvansiyonel evsel atıksu arıtma tesislerinde organik maddelerin parçalanması için aerobik prosesler kullanılmaktadır. Klasik aktif çamur prosesinde, bilindiği üzere, atıksular havalandırılarak mikroorganizmaların faaliyetleri için gerekli oksijen sağlanmakta, daha sonra oluşan yumaklar ise çöktürülerek sisteme geri devrettirilmektedir. Sistemde oluşan fazla çamur düzenli olarak sistemden atılmakta ve bu şekilde sistemde istenilen SRT değeri korunmaktadır. Klasik aktif çamur proseslerinde oluşan çamur miktarı tamamen sistemin SRT değerine bağlıdır. SRT değeri arttıkça sistemde çamur üretimi azalmakla birlikte, sisteme verilen hava miktarı ve dolayısıyla da sistemin enerji ihtiyacı artmaktadır. Ayrıca, yüksek çamur yaşlarında işletilen sistemler daha büyük hacimlere ihtiyaç duymaktadır. Klasik aktif çamur proseslerinde üretilen çamur genel olarak anaerobik çürütücüler kullanılarak stabil hale getirilirken sistemde üretilen biyogaz ise farklı amaçlarla kullanılabilir. Yapılan çalışmalar, aerobik prosesin SRT değerine bağlı olarak sistemde oluşan çamurun anaerobik parçalanabilirliğinin arttığını vurgulamışlardır. Son zamanlarda, atıksuların arıtılmasında enerji nötral veya enerji pozitif yaklaşımlar esas alınmakta olup, bu kapsamda detaylı çalışmalar yapılmaktadır.

Atık çamurdan daha yüksek seviyelerde metan üretimi için çamurun üretildiği aktif çamur prosesinin SRT değeri haliyle önemli bir etkidir. Bu konuyla ilgili olarak literatürde düşük SRT'yle işletilen arıtma tesislerinde oluşan çamurun biyogaz üretme potansiyelinin daha fazla olduğu yer almaktadır. Araştırmacılar SRT'nin 20 günden 10 güne düşürülmesiyle gaz üretiminde yaklaşık %25 artış gözlemlemiştir (Bolzonella vd., 2005). Wang ve ark. yaptığı bir diğer çalışmada daha kısa SRT'lerde işletilen sistemlerin, daha yüksek polihidroksialkanoat (PHA) içerikli çamur üretebildiği gözlemlenmiş ve PHA'nın protein ya da karbonhidratlar gibi uçucu askıda katılarda (UAKM) bulunan diğer bileşiklere göre daha yüksek metan üretim potansiyeline sahip olduğu gösterilmiştir (Wang vd., 2015). Chan ve arkadaşlarının yaptığı başka bir çalışmada ise 2, 3 ve 4 günlük SRT'lerde oluşan çamurların parçalanabilirlik derecesinin sırasıyla %85, %73 ve %63 olduğu ve çamurun bozunabilirlik derecesinin SRT'nin artmasıyla azaldığı gösterilmiştir. %85 parçalanabilirliğe sahip çamurun anaerobik çürütme sonucu metan üretimi %63 parçalanabilirliğe sahip çamurla elde

edilenden %17 daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir (Chan vd., 2020). Bolzonella ve arkadaşlarının yapmış olduğu bir çalışmada spesifik gaz üretimi (SGP) ve aktif çamur prosesinde uygulanan SRT arasında bir ilişki bulunmuştur ve bu çalışmada da SRT ne kadar yüksekse SGP'nin o kadar düşük olduğu gözlemlenmiştir (Bolzonella vd., 2005).

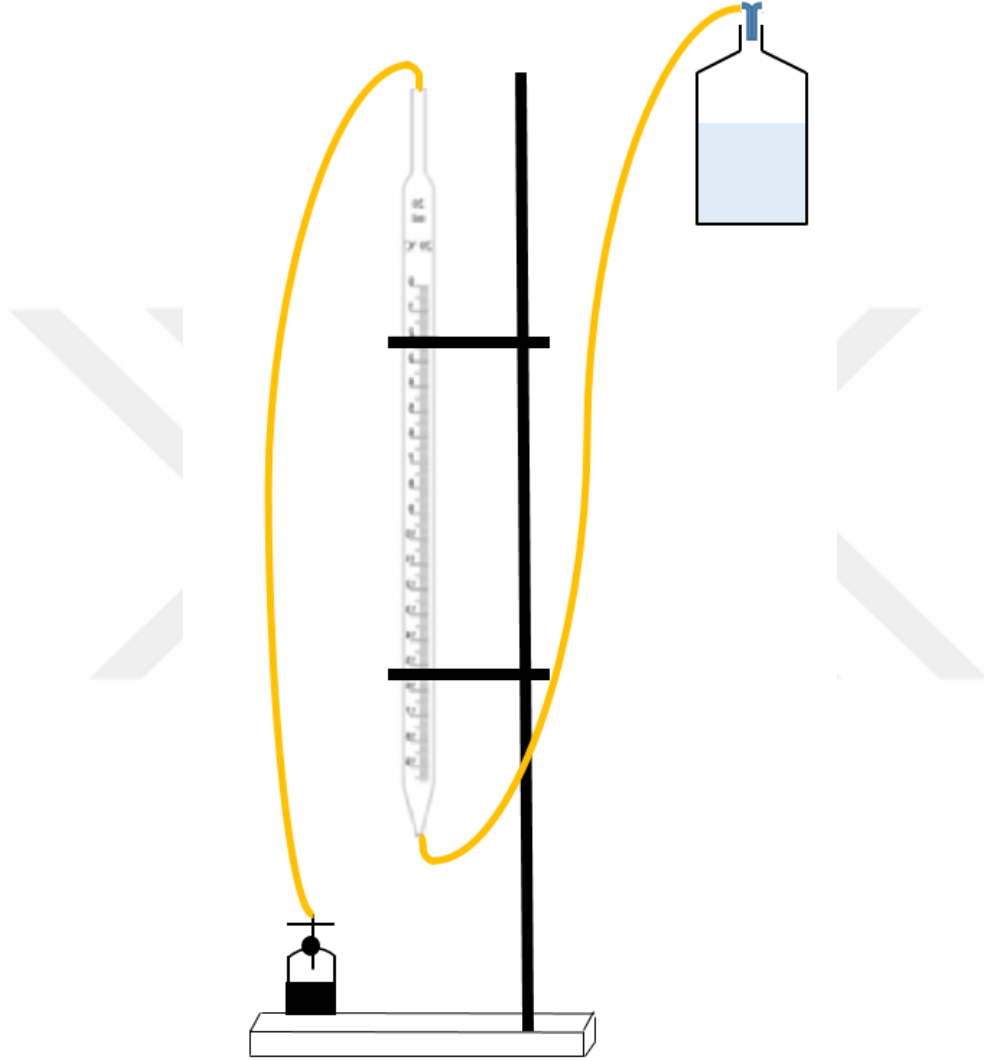
Bu çalışmalara göre; SRT'nin, çamurun biyokimyasal ve fiziksel özelliklerini etkileyen ana parametrelerden biri olduğunu görmekteyiz. SRT, çamur çürütmeyi ve atıksuların anaerobik arıtımını etkilemektedir. Buna bağılı olarak çamurdan enerji geri kazanımı, çamurun üretildiği aerobik prosesin düşük SRT (1 ila 4 gün arasında) değerlerinde işletilmesiyle artacak ve yüksek hızlı aktif çamur (HRAS) sistemleri kullanılması durumunda ise metan üretimi en üst düzeye çıkarılabilecektir (Chan vd., 2020).

3.9. BMP

Metan potansiyeli; biyogaz tesislerinin tasarlanması ve işletilmesi için önem arz etmektedir. Biyogaz tesislerinin ekonomik fizibilitesine karar verebilmek için metan potansiyelinin belirlenmesi anahtar niteliğinde önemli bir parametredir. Fakat metan potansiyelini belirlemek deneysel süre ve altyapı yetersizliğinden dolayı her zaman mümkün değildir. Bu sebeple, metan potansiyelinin doğru tahmini kârlı bir tesis tasarlamada oldukça önemlidir. Anaerobik sindirimde ise organik materyallerin biyolojik bozunma hızı, çeşitli kinetik modeller kullanılarak da tahmin edilebilir (Yılmaz vd., 2021).

BMP testinin temel amacı; birtakım potansiyel substrattan hangilerinin en yüksek biyometan potansiyeline sahip olduğunu ve çalışabileceği en verimli koşulları (biyolojik olarak bozunabilirlik derecesi, optimum SRT süresi vb.) ortaya koyabilmektedir. Bu sebeple de atıksudan enerji üretim sürecinde en tercih edilen yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Ek olarak, birlikte kullanılan substratlar arasındaki optimum oranlar da BMP testi ile tespit edilebilmektedir. BMP testi ile en uygun koşullar belirlenerek metan ölçümü yapılmaktadır. Test süresi önemli bir metan

üretimi gözlemlenmeyene kadar uzatılmalıdır (Elbeshbishy vd., 2012). Şekil 8’de tipik bir laboratuvar ölçekli BMP testi ölçüm düzeneği gösterilmektedir.



Şekil 8. Laboratuvar Ölçekli Bir BMP Testi

Biyokimyasal metan potansiyeli (BMP) testlerinin gerçekleştirilmesi anaerobik çürütücülerin tasarımı açısından ve aynı zamanda da çalışması için büyük önem taşımaktadır. Belirlenen substratların üretebileceği metan verimini belirlemede kolay ve uygulanabilir bir proses olarak kabul edilmektedir (Koch vd., 2015). Çürütme

tesislerinin planlanması aşamasında, substratların metan üretim potansiyellerinin belirlenmesi son derece önemlidir (Koch vd., 2017).

BMP testi genellikle uygun sıcaklıktaki bir kültür şişesinde, gerekli maddelerin ve aşılamanın eklendiği ve artık biyolojik parçalanabilir organik madde kalmayana kadar biyogaz üretiminin günlük olarak kaydedildiği bir yöntemdir. Anaerobik koşullarda BMP testi neticesinde elde edilen sonuçlar ile maksimum metan üretimi ve gaz üretim kinetiğine ilişkin veriler elde edilmektedir (Gao vd., 2021).

Düşük SRT'yle işletilen aerobik atıksu arıtma tesislerinde oluşan çamurun biyogaz üretme potansiyelinin daha fazla olduğu literatürde belirtilmiştir. Bu bağlamda literatürde evsel atıksu arıtma tesislerinde SRT işletme değerlerinin değişmesiyle oluşan çamurun metan üretiminin nasıl etkilendiğine yönelik çalışmalar mevcuttur. Fakat aynı hedef doğrultusunda gerçek bir tekstil endüstrisi atıksuyunun arıtımında kullanılan ve farklı SRT değerlerinde işletilen bir MBR'de oluşan çamurun metan potansiyeline ve bu potansiyelin kinetik modellenmesine yönelik herhangi bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Dolayısıyla, bu çalışmada gerçek bir tekstil sektöründen alınan atıksuyun arıtılmasında kullanılan ve farklı SRT değerlerinde işletilen bir MBR'den alınan atık biyolojik çamurun Biyokimyasal Metan Potansiyeli (BMP) testi ile biyogaz potansiyeline bakılmıştır. Böylece, SRT'nin oluşan çamurun biyobozunurluğuna ve enerji geri kazanımına etkisi incelenmiştir.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada kullanılan çamur örnekleri, farklı SRT değerlerinde işletilen ve gerçek bir tekstil endüstrisinden alınan su ile beslenen laboratuvar ölçekli MBR'lerden alınmıştır. Farklı SRT değerlerinde işletilen MBR'lerin stabil işletme koşullarına erişmesi üzerine (en az 3 SRT işletim neticesinde) reaktörlerden atık çamur alınarak BMP çalışmaları başlatılmıştır.

Deneyler toplam hacmi 150 mL olan kahverengi BMP şişelerinde yapılmıştır. BMP çalışmalarında Ataköy İleri Biyolojik Atıksu Arıtma tesisinden alınan anaerobik çamur, aşı olarak kullanılmıştır. BMP denemelerinde nütrient eksikliğinin giderilmesi için Vanderbilt Media modifiye edilerek kullanılmış olup, içerik Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. BMP çalışmalarında kullanılan modifiye edilmiş Vanderlbit medya içeriği ((Kuşçu & Sponza, 2006)'dan uyarlanmıştır.)

MEDYA BİLEŞENİ	KONSANTRASYON (mg/L)
CuSO ₄ .5H ₂ O	0.9292
MnSO ₄ .H ₂ O	0.6716
NiSO ₄ .6H ₂ O	1.0141
FeSO ₄ .7H ₂ O	87.7349
CoCl ₂ .6H ₂ O	18.3250
ZnCl ₂	0.5000
NH ₄ Cl	400
KCl	400
CaCl ₂ .2H ₂ O	66.2372
KI	10
H ₃ BO ₃	0.5000
K ₂ HPO ₄ .3H ₂ O	138.2623

Aşağıda her bir SRT için kurulan kesikli reaktörlere ait detaylar sunulmuş olmakla birlikte özellikle SRT 30 gün için yapılan kesikli reaktörler daha detaylı verilerek, benzer çalışmaların tekrar verilmesinden kaçınılmıştır.

4.1. SRT 30 GÜN'DE İŞLETİLEN MBR'DEN ALINAN ÇAMURUN METAN POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ

Tablo 4'te SRT 30 gün değerinde işletilen aerobik MBR'den alınan atık çamur ile yapılan çalışmalar ve BMP test şişelerinin içerikleri sunulmuştur. BMP şişelerinin hacmi 100'er mL olacak şekilde hazırlanmıştır. BMP test şişelerinde pH düşüşünü engellemek için 1000 mg/L CaCO_3 alkalinite eşdeğerine sahip NaHCO_3 çözeltisi ilave edilmiştir. İlave edilen aşı çamurunun spesifik metan üretim potansiyelinin belirlenmesi amacıyla kontrol reaktörü kurulmuştur. Aşı çamurunun aktivitesinin belirlenmesi amacıyla, 500 mg/L asetat içeren bir BMP test seti de ayrıca kurulmuştur. Tekstil endüstrisi atıksuyunun anaerobik parçalanabilirliğinin belirlenmesi için atıksu içeren bir başka BMP seti de paralel olarak işletilmiştir.

Aşı olarak kullanılan anaerobik çamur Ataköy İleri Biyolojik Atıksu Arıtma tesisinden alınmış olup, aşı kaynaklı metan miktarı belirlenerek diğer testlerde üretilen toplam metan miktarından çıkartılmak suretiyle tüm hesaplar yapılmıştır. Dolayısıyla, Tablo 4'te sunulduğu gibi toplam dört BMP seti planlanarak her bir set için 3'er paralel reaktör kurulmuştur.

Tablo 4. SRT 30 gün BMP deney seti detayları

REAKTÖR ANA ORGANİK İÇERİĞİ	STOK NÜTRİYENT MEDYA (mL)	ANAEROBİK ÇAMUR (mL)	MBR ÇAMURU (mL)	ATIK SU (mL)	ASETAT (mg/L)	ALKALİNİTE STOK (mg/L CaCO ₃)
MBR Çamuru	2	20	75	0	0	1000
Asetat	2	20	0	0	500	1000
Kontrol	2	20	0	0	0	1000
Atıksu	2	20	0	75	0	1000

BMP şişeleri yaklaşık 35°C’de tutulan inkübatörde işletilmiştir. BMP denemelerinde üretilen metan miktarının ölçülmesi amacıyla, septaya batırılan iğne ile suyun yer değiştirme prensibine göre ölçüm yapılmıştır. Biyogaz içerisindeki CO₂ ve sülfürün alınması için ölçüm sıvısı olarak 1 N NaOH kullanılmıştır.

SRT 30 gün çamuru için kurulan reaktörlere ait görsel Şekil 9’da sunulmuştur. Ölçüm amacıyla kullanılan sisteme ait görsel Şekil 10’da sunulmuştur.



Şekil 9. BMP deney setini gösteren bir fotoğraf



Şekil 10. BMP testlerinde üretilen metan miktarının ölçülmesi için kullanılan düzenek

4.2. SRT 10 GÜN'DE İŞLETİLEN MBR'DEN ALINAN ÇAMURUN METAN POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ

Tablo 5'te SRT 10 gün değerinde işletilen aerobik MBR'den alınan atık çamur ile yapılan çalışmalar ve BMP test şişelerinin içerikleri sunulmuştur. BMP şişelerinin hacmi 100'er mL olacak şekilde hazırlanmıştır. BMP test şişelerinde pH düşüşünü engellemek için 1000 mg/L CaCO_3 alkalinite eşdeğerine sahip NaHCO_3 çözeltisi ilave edilmiştir. İlave edilen aşı çamurunun spesifik metan üretim potansiyelinin belirlenmesi amacıyla önceki çalışmaya benzer olarak kontrol reaktörü kurulmuştur. Aşı çamurunun aktivitesinin belirlenmesi amacıyla, 500 mg/L ve 1500 mg/L asetat içeren BMP test setleri de kurulmuştur. Ayrıca, tekstil endüstrisi atıksuyunun anaerobik parçalanabilirliğinin belirlenmesi için atıksu içeren bir BMP seti de kurulmuştur. Tablo 5'te sunulduğu gibi toplam beş BMP seti kurularak her bir reaktörden 3'er paralel kurulmuştur. SRT 10 gün BMP deney setine ait tüm reaktörler yaklaşık 35 °C'de işletilen inkübatörde gaz üretimi sonlanana kadar tutulmuştur. BMP denemelerinde üretilen metan daha önce açıklandığı şekilde ölçülmüştür.

Tablo 5. SRT 10 gün BMP deney seti detayları

REAKTÖR ANA ORGANİK İÇERİĞİ	STOK NÜTRİYENT MEDYA (mL)	ANAEROBİK ÇAMUR (mL)	MBR ÇAMURU (mL)	ATIK SU (mL)	ASETAT (mg/L)	ALKALİNİTE STOK (mg/L CaCO ₃)
MBR Çamuru	2	20	75	0	0	1000
Asetat	2	20	0	0	500	1000
Kontrol	2	20	0	0	0	1000
Atıksu	2	20	0	75	0	1000
Asetat	2	20	0	0	1500	2000

4.3. SRT 5 GÜN'DE İŞLETİLEN MBR'DEN ALINAN ÇAMURUN METAN POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ

Tablo 6'da SRT 5 gün değerinde işletilen aerobik MBR'den alınan atık çamur ile yapılan çalışmalar ve BMP test şişelerinin içerikleri sunulmuştur. BMP şişelerinin hacmi 100'er mL olacak şekilde hazırlanmıştır. BMP test şişelerinde pH düşüşünü engellemek için 1000 mg/L CaCO₃ alkalinite eşdeğerine sahip NaHCO₃ çözeltisi ilave edilmiştir. İlave edilen aşı çamurunun spesifik metan üretim potansiyelinin belirlenmesi amacıyla önceki çalışmaya benzer olarak kontrol reaktörü kurulmuştur. Aşı çamurunun aktivitesinin belirlenmesi amacıyla, 500 mg/L ve 1500 mg/L asetat içeren BMP test setleri de kurulmuştur. Ayrıca, tekstil endüstrisi atıksuyunun anaerobik parçalanabilirliğinin belirlenmesi için atıksu içeren bir BMP seti de kurulmuştur. Tablo 6'da sunulduğu gibi toplam beş BMP seti kurularak her bir reaktörden 3'er paralel kurulmuştur.

Tablo 6. SRT 5 gün BMP deney seti detayları

REAKTÖR ANA ORGANİK İÇERİĞİ	STOK NÜTRİYENT MEDYA (mL)	ANAEROBİK ÇAMUR (mL)	MBR ÇAMURU (mL)	ATIK SU (mL)	ASETAT (mg/L)	ALKALİNİTE (mg/L CaCO ₃)
MBR Çamuru	2	20	75	0	0	1000
Asetat	2	20	0	0	500	1000
Kontrol	2	20	0	0	0	1000
Atıksu	2	20	0	75	0	1000
Asetat	2	20	0	0	1500	2000

Aşı olarak kullanılan anaerobik çamur Ataköy İleri Biyolojik Atıksu Arıtma tesisinden alınmış olup, aşı kaynaklı metan miktarı belirlenerek diğer testlerde üretilen toplam metan miktarından çıkartılmak suretiyle tüm hesaplar yapılmıştır. BMP şişeleri yaklaşık 35 °C’de tutulan inkübatörde işletilmiştir. BMP denemelerinde üretilen metan miktarının ölçülmesi amacıyla, septaya batırılan iğne ile suyun yer değiştirme prensibine göre ölçüm yapılmıştır. Biyogaz içerisindeki CO₂ ve sülfürün alınması için ölçüm sıvısı olarak 1 N NaOH kullanılmıştır.

4.4. SRT 3 GÜN’DE İŞLETİLEN MBR’DEN ALINAN ÇAMURUN METAN POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ

Tablo 7’de SRT 3 gün değerinde işletilen aerobik MBR’den alınan atık çamur ile yapılan çalışmalar ve BMP test şişelerinin içerikleri sunulmuştur. BMP şişelerinin hacmi 100’er mL olacak şekilde hazırlanmıştır. BMP test şişelerinde pH düşüşünü engellemek için 1000 mg/L CaCO₃ alkalinite eşdeğerine sahip NaHCO₃ çözeltisi ilave edilmiştir. İlave edilen aşı çamurunun spesifik metan üretim potansiyelinin belirlenmesi amacıyla önceki çalışmaya benzer olarak kontrol reaktörü kurulmuştur. Aşı çamurunun aktivitesinin belirlenmesi amacıyla, 500 mg/L ve 1500 mg/L asetate içeren BMP test setleri de kurulmuştur. Ayrıca, tekstil endüstrisi atıksuyunun

anaerobik parçalanabilirliğinin belirlenmesi için atıksu içeren bir BMP seti de kurulmuştur. Tablo 7’de sunulduğu gibi toplam beş BMP seti kurularak her bir reaktörden 3’er paralel kurulmuştur. Deney setine ait tüm reaktörler yaklaşık 35 °C’de işletilen inkübatörde gaz üretimi sonlanana kadar tutulmuştur. BMP denemelerinde üretilen metan daha önce açıklandığı şekilde ölçülmüştür.

Tablo 7. SRT 3 gün BMP deney seti detayları

REAKTÖR ANA ORGANİK İÇERİĞİ	STOK NÜTRİYENT MEDYA (mL)	ANAEROBİK ÇAMUR (mL)	MBR ÇAMURU (mL)	ATIK SU (mL)	ASETAT (mg/L)	ALKALİNİTE (mg/L CaCO ₃)
MBR Çamuru	2	20	75	0	0	1000
Asetat	2	20	0	0	500	1000
Kontrol	2	20	0	0	0	1000
Atıksu	2	20	0	75	0	1000
Asetat	2	20	0	0	1500	2000

4.5. SRT 2 GÜN’DE İŞLETİLEN MBR’DEN ALINAN ÇAMURUN METAN POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ

Tablo 8’de SRT 2 gün değerinde işletilen aerobik MBR’den alınan atık çamur ile yapılan çalışmalar ve BMP test şişelerinin içerikleri sunulmuştur. BMP şişelerinin hacmi 100’er mL olacak şekilde hazırlanmıştır. BMP test şişelerinde pH düşüşünü engellemek için 1000 mg/L CaCO₃ alkalinite eşdeğerine sahip NaHCO₃ çözeltisi ilave edilmiştir. İlave edilen aşı çamurunun spesifik metan üretim potansiyelinin belirlenmesi amacıyla önceki çalışmaya benzer olarak kontrol reaktörü kurulmuştur. Aşı çamurunun aktivitesinin belirlenmesi amacıyla, 500 mg/L ve 1500 mg/L asetat içeren BMP test setleri de kurulmuştur. Ayrıca, tekstil endüstrisi atıksuyunun anaerobik parçalanabilirliğinin belirlenmesi için atıksu içeren bir BMP seti de kurulmuştur. Tablo 8’de sunulduğu gibi toplam beş BMP seti kurularak her bir

reaktörden 2'şer paralel kurulmuştur. Deney setine ait tüm reaktörler yaklaşık 35 °C'de işletilen inkübatörde gaz üretimi sonlanana kadar tutulmuştur. BMP denemelerinde üretilen metan daha önce açıklandığı şekilde ölçülmüştür.

Tablo 8. SRT 2 gün BMP deney seti detayları

REAKTÖR ANA ORGANİK İÇERİĞİ	STOK NÜTRİYENT MEDYA (mL)	ANAEROBİK ÇAMUR (mL)	MBR ÇAMURU (mL)	ATIK SU (mL)	ASETAT (mg/L)	ALKALİNİTE STOK (mg/L CaCO ₃)
MBR Çamuru	2	20	75	0	0	1000
Asetat	2	20	0	0	500	1000
Kontrol	2	20	0	0	0	1000
Atıksu	2	20	0	75	0	1000
Asetat	2	20	0	0	1500	2000

5. TARTIŞMA VE BULGULAR

Yukarıda bahsedildiği üzere bu çalışmanın amacı; farklı SRT değerlerinde işletilen ve gerçek bir tekstil endüstrisi atıksuyu arıtan MBR'lerden elde edilen çamurun metan üretim performanslarının kıyaslanmasıdır. İlave olarak atıksuyun anaerobik biyokimyasal metan potansiyeli de belirlenmiştir. Aşağıda her bir SRT için elde edilen sonuçlar ayrı ayrı sunulmuştur.

5.1. SRT 30 GÜN BMP DENEY SETİ İÇİN ELDE EDİLEN SONUÇLAR

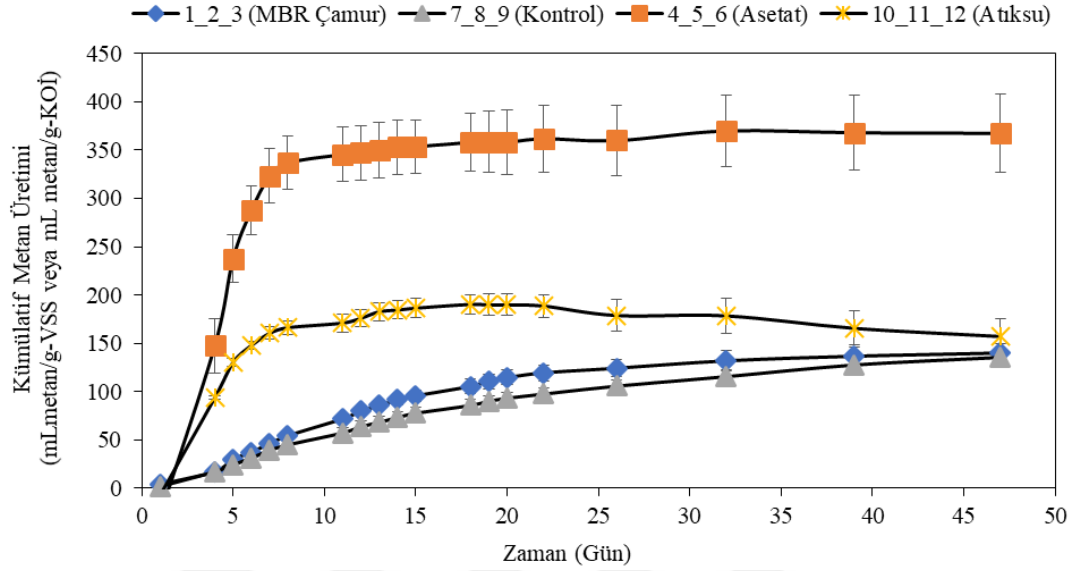
Tablo 4'te verildiği gibi üç adet paralel olarak işletilen toplam dört farklı test için BMP denemeleri yapılmış olup, elde edilen sonuçlar Şekil 11'de verilmiştir. BMP denemeleri yaklaşık 50 gün sürdürülmüş olup, düzenli olarak reaktörlerde üretilen metan gazı hacimleri ölçülmüştür.

Şekilden de görüldüğü gibi, asetat içeren test şişesinde yaklaşık bir hafta içerisinde metan potansiyelinin büyük bir kısmı üretilmiş olup, netice itibarıyla 367 ± 40 mL metan/g-KOİ üretim elde edilmiştir. Torik olarak 1 g KOİ'den 35°C 'de 395 mL metan üretilmekte olup, haliyle teorik değerin %93'ü üretilmiştir. Dolayısıyla, elde edilen verilerin güvenilirliği de ortaya konulmuştur.

Atıksu da KOİ konsantrasyonu yaklaşık 1 g/L olup, buna rağmen üretilen toplam metan miktarı sadece 157 ± 18 mL metan/g-KOİ'dir. Atıksudan üretilebilecek metan miktarı teorik olarak 395 mL metan/g-KOİ olup, haliyle atıksuyun sadece %40 oranında anaerobik olarak parçalanabileceği belirlenmiştir.

SRT 30 gün de işletilen MBR'den elde edilen çamurdan üretilen metan miktarı 140 ± 9 mL metan/g-VSS olarak belirlenmiştir. Literatürde evsel atıksu arıtma tesislerinden elde edilen çamur için bu değer 70-180 mL metan/g-VSS beslenen olarak verilmiş

olup (Bolzonella vd., 2005), elde edilen değerin literatür ile uyumlu olduğu ve nispeten de yüksek olduğu görülmüştür.



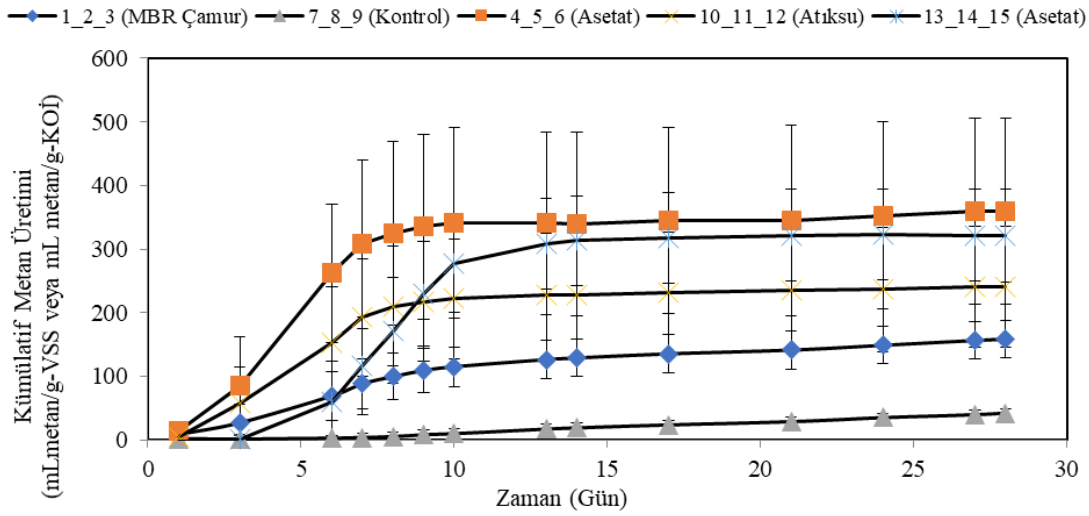
Şekil 11. SRT 30 gün BMP Deney Seti için elde Edilen Sonuçlar

Elde edilen sonuçlarda ilginç bir bulgu ise kontrol reaktöründe üretilen metanın kısmen yüksek olmasıdır. Bunun nedeni ise, atıksu arıtma tesisinden getirilen çamurun aktivitesini kaybetmemesi için hemen kullanılması ve çamurun da muhtemelen oldukça fazla miktarda partikül organik madde ihtiva etmesi nedeniyle yüksek miktarda metan üretmesidir. Bir sonraki çalışma için (SRT 10 gün denemeleri) kontrol reaktöründe daha az gaz üretimi gözlenmesi amacıyla, kullanılan aşının nispeten stabil olması için laboratuvarımızda oda sıcaklığında yaklaşık 60 gün kadar bekletilmiştir.

5.2. SRT 10 GÜN BMP DENEY SETİ İÇİN ELDE EDİLEN SONUÇLAR

MBR'nin SRT 10 gün'de işletilmesi aşamasında da yukarıda SRT 30 gün için sunulanlara benzer şekilde testler gerçekleştirilmiştir. Tablo 5'te bu kapsamda gerçekleştirilen deneylere ait detaylar sunulmuştur. Daha önce de bahsedildiği üzere tüm reaktörler 3'er li paralel olacak şekilde işletilmiş olup, ortalama ve standart sapma

değerleri Şekil 12’de sunulmuştur. Denemeler toplam 28 gün süresince devam ettirilmiş olup, BMP testlerinde daha fazla anlamlı bir metan üretimi gözlenmediğinden denemelere son verilmiştir. SRT 30 gün denemelerine kıyasla, gözlenen standart sapma değerlerinin oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir. Bunun en önemli nedeni ise, SRT 10 gün BMP deney setinde daha stabil bir aşı çamuru kullanılmasının neticesi olarak daha az toplam metan gazı üretimi gerçekleşmiş ve bu nedenle de istenilen hassasiyette ölçümlerin alınamamış olmasıdır.



Şekil 12. SRT 10 gün BMP Deney Seti için elde Edilen Sonuçlar

SRT 30 gün değerinde MBR çamuru için gözlenen metan üretim potansiyeli 140 ± 9 mL-metan/(g-VSS) iken, SRT değerinin 10 gün değerine indirilmesiyle bu değer 159 ± 29 mL-metan/(g-VSS) değerine artmıştır. Dolayısıyla, SRT değerinin 30 günden 10 gün değerine düşürülmesiyle metan potansiyeli yaklaşık %12 oranında artmıştır.

BMP testlerinde kullanılan çamurun aktivitesini belirlemek amacıyla 500 mg/L asetate varlığında gerçekleştirilen BMP de ise metan üretim potansiyeli 360 ± 146 mL-metan/(g-VSS) olarak belirlenmiş olup, bu değer SRT 30 gün için 367 ± 40 mL-metan/(g-VSS) olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla, SRT 30 gün ve SRT 10 gün değerlerinde işletilen MBR den alınan çamurla kurulan denemelerde kullanılmış olan

aşı çamurlarının metan üretim potansiyelleri arasında anlamlı bir fark bulunmamaktadır.

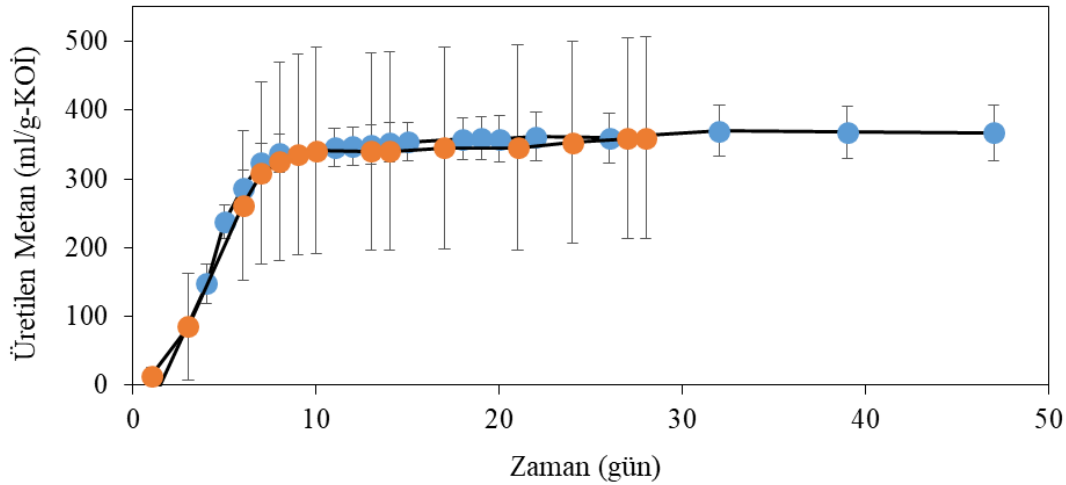
SRT 10 gün için kurulan kontrol reaktörlerinin ortalama ölçümlerine baktığımızda biyogaz üretimi 28 gün boyunca devam etmiştir. Grafikte de görüldüğü üzere ilk 6 gün gaz üretimi gerçekleşmemiştir. SRT 30 gün de işletilen MBR'den alınan çamurlar için kullanılan aşı çamurunun metan üretim potansiyeli 136 ± 6 mL-metan/(g-VSS) iken SRT 10 gün'de işletilen MBR çamurunda kullanılan aşı çamuru için metan üretim potansiyeli sadece 43 ± 7 mL-metan/(g-VSS) olmuştur. Buna rağmen, yukarıda tartışıldığı üzere aşı çamurlarının asetattan metan üretim aktiviteleri benzerdir.

SRT 30 gün deney seti için kullanılan aşının (kontrol reaktörü) daha yüksek metan üretim potansiyeline sahip olmasının nedeni ise, atıksu arıtma tesisinden alınan çamurun kısa süre içerisinde denemelerde kullanılmasıdır. SRT 10 gün deney seti için ise MBR çamuru uzun süre laboratuvarımızda bekletilmiş olduğundan çamur içerisinde bulunan özellikle partikül organik maddeler çürümüş ve aşı çamurunun metan potansiyeli de buna bağlı olarak düşmüştür. SRT 30 gün ve 10 gün deney setlerinde aşı olarak kullanılan çamurun asetattan metan üretim aktiviteleri Şekil 13'te kıyaslamalı olarak ayrıca sunulmuştur. Şekilden de görüldüğü gibi, farklı zamanlarda yapılan denemelerde elde edilen sonuçlar oldukça uyumlu olup, sadece SRT 10 gün denemeleri sırasında işletilen ve asetat içeren BMP'nin standart sapma değerleri, yukarıda bahsedilen nedenlerden dolayı, daha yüksek bulunmuştur. Dolayısıyla, iki farklı deneme için kullanılan aşı çamurunun aktiviteleri benzerdir.

SRT 10 gün deney setinde kıyas amacıyla ayrıca 1.500 mg/L asetat varlığında da BMP deneyi kurulmuş olup, ilginç bir şekilde 3 gün civarında bir lag faz gözlemlendikten sonra metan üretimi başlamıştır. Ayrıca, ilave edilen KOİ başına üretilen metan miktarı da 500 mg/L asetat varlığına göre daha düşük olarak gözlenmiştir. Gözlenen bu düşüşün ve lag fazın nedeni yüksek asetat konsantrasyonunun neden olduğu muhtemel toksik etkidir.

SRT 30 gün ve SRT 10 gün denemeleri sırasında ayrıca DOSAB'dan alınan atıksu ile de BMP denemeleri kurulmuş olup, SRT 30 gün deney setinde atıksu metan üretim potansiyeli 157 ± 18 mL-metan/(g-KOİ) iken SRT 10 gün deney setinde bu değer 241 ± 95 mL-metan/(g-KOİ) olarak belirlenmiştir. Daha yüksek metan potansiyeli

gözlenmesinin nedeni atıksuyun karakterizasyonundaki değişikliklerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Denemelerin yapıldığı sırada atıksu KOİ konsantrasyonu 982 mg/L olup, SRT 30 gün için yapılan denemelerde kullanılan atıksuyun KOİ konsantrasyonu (1.024 mg/L) çok benzerdir. SRT 10 gün denemelerinde kullanılan atıksuyun KOİ içeriği ve elde edilen metan potansiyeli düşünüldüğünde atıksuyun anaerobik arıtılabilirliği %62 olarak belirlenmiştir. Bu değer SRT 30 gün deney seti denemelerinde kullanılan atıksu için %40 olarak belirlenmiştir. SRT 10 gün için atıksu ile kurulan BMP'lerin ortalama ölçümlerine baktığımızda biyogaz miktarının ilk 8 günde çok hızlı bir şekilde yaklaşık 210 mL-metan değerine ulaştığını görmekteyiz. Fakat 8. günden sonra biyogaz üretiminde önemli bir artış olmamıştır.

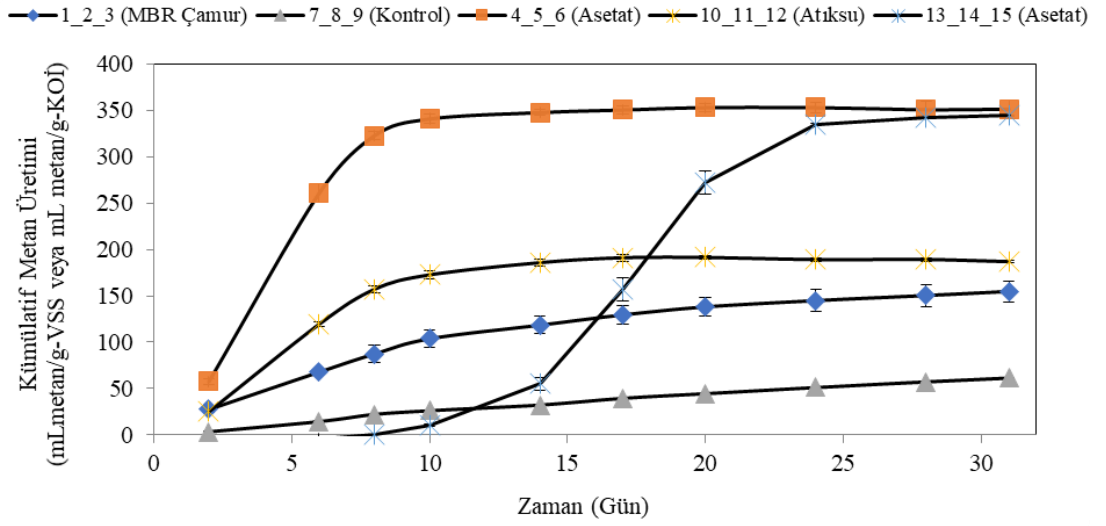


Şekil 13. SRT 30 gün ve 10 gün denemelerinin yapıldığı deney setleri için 500 mg/L asetat içeren BMP sonuçlarının kıyaslanması

Sonuç olarak, SRT değerinin 30 günden 10 gün değerine düşürülmesiyle oluşan çamurun metan üretim potansiyeli atılmıştır. SRT değerinin düşmesiyle birlikte hem kg-VSS başına metan miktarı artmakta hem de üretilen çamur miktarı artmaktadır. Dolayısıyla, bu iki durumun birlikte düşünülerek geri kazanılabilecek enerji miktarının hesaplanması gerekmektedir. İleride bu konu detaylı olarak tartışılacaktır.

5.3. SRT 5 GÜN BMP DENEY SETİ İÇİN ELDE EDİLEN SONUÇLAR

Tablo 6’da verildiği gibi üç adet paralel olarak işletilen toplam beş farklı test için BMP denemeleri yapılmış olup, elde edilen sonuçlar Şekil 14’te sunulmuştur. BMP denemeleri yaklaşık 31 gün sürdürülmüş olup, düzenli olarak reaktörlerde üretilen metan gazı hacimleri ölçülmüştür.



Şekil 14. SRT 5 gün BMP Deney Seti için elde edilen sonuçlar

Şekilden de görüldüğü gibi, 500 mg/L asetat içeren test şişesinde yaklaşık bir hafta içerisinde metan potansiyelinin büyük bir kısmı üretilmiş olup, netice itibariyle 352 ± 10 mL metan/g-KOİ üretim elde edilmiştir. Torik olarak 1 g KOİ'den 35°C'de 395 mL metan üretilmekte olup, haliyle teorik değerin %89'u üretilmiştir. Dolayısıyla, elde edilen verilerin güvenilirliği de ortaya konulmuştur.

Atıksuda KOİ konsantrasyonu yaklaşık 1 g/L olup, buna rağmen üretilen toplam metan miktarı sadece 187 ± 2 mL metan/g-KOİ'dir. Atıksudan üretililecek metan miktarı teorik olarak 395 mL metan/g-KOİ olup, haliyle atıksuyun sadece %47 oranında anaerobik olarak parçalanabileceği belirlenmiştir.

SRT 5 gün de işletilen MBR'den elde edilen çamurdan üretilen metan miktarı 155 ± 11 mL metan/g-VSS olarak belirlenmiştir. Literatürde evsel atıksu arıtma tesislerinden elde edilen çamur için bu değer 70-180 mL metan/g-VSS beslenen olarak verilmiş olup (Bolzonella vd., 2005), elde edilen değer literatür ile uyumlu olduğu ve nispeten de yüksek olduğu görülmüştür. Bu değer ayrıca daha önce konvansiyonel MBR'de SRT 30 gün çamuru ile elde edilen değerden (140 ± 9 mL metan/g-VSS) de yüksek olmuştur.

BMP reaktörlerinin kurulumunda kullanılan aşı çamuru laboratuvarımızda oda sıcaklığında tutulduğundan organik madde içeriği azalmış olup, deney sonuna kadar sadece 61 mL/g-VSS metan üretmiştir.

1500 mg/L asetat içeren BMP reaktöründe yüksek asetat konsantrasyonun sebep olduğu inhibisyon nedeniyle ilk 10 gün neredeyse metan hiç üretilmemiş olup, mikroorganizmaların adaptasyonu neticesinde, metan üretimi hızlanarak deney sonucunda $345 \pm 0,4$ mL metan/g-KOİ değerine ulaşarak teorik değer %87'si üretilmiştir.

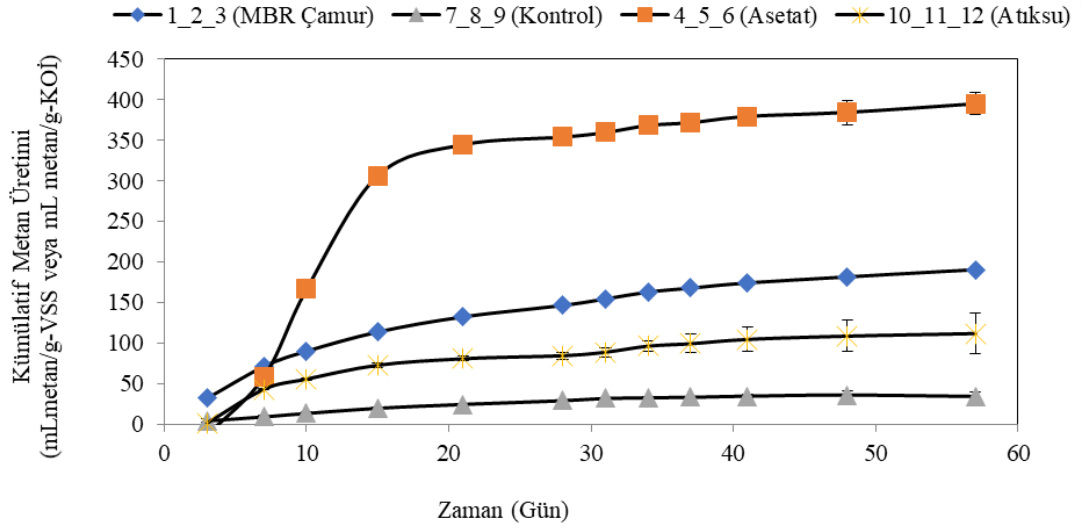
5.4. SRT 3 GÜN BMP DENEY SETİ İÇİN ELDE EDİLEN SONUÇLAR

MBR'nin SRT 3 gün'de işletilmesi aşamasında da yukarıda SRT 5 gün için sunulan BMP testlerine benzer şekilde testler gerçekleştirilmiştir. Tablo 7'de bu kapsamda gerçekleştirilen deneylere ait detaylar sunulmuştur. Daha önce de bahsedildiği üzere tüm reaktörler 3'er li paralel olacak şekilde işletilmiş olup, ortalama ve standart sapma değerleri Şekil 15'te sunulmuştur. BMP reaktörleri 57 gün işletilmiştir. Asetattan metan üretim potansiyeli 395 ± 14 mL/g-KOİ olarak belirlenmiş olup, teorik değer ile birebir aynıdır. Dolayısıyla kullanılan aşı çamuru aktif olup, elde edilen sonuçlar bu bakımdan güvenilirdir.

MBR'de üretilen çamurun metan potansiyeli ise 191 ± 3 mL/g-VSS olarak belirlenmiştir. Bu değer SRT 5 gün için 155 ± 11 mL metan/g-VSS olup, SRT değerinin 5 gün'den 3 gün'e düşürülmesiyle birlikte metan potansiyelinde önemli bir artış görülmektedir. Dolayısıyla, SRT değerinin düşürülmesiyle hem çamur üretim miktarı

önemli ölçüde artmış hem de g-VSS başına üretilen metan miktarı önemli derecede artmıştır. Bu durum ileride daha detaylı olarak tartışılacaktır.

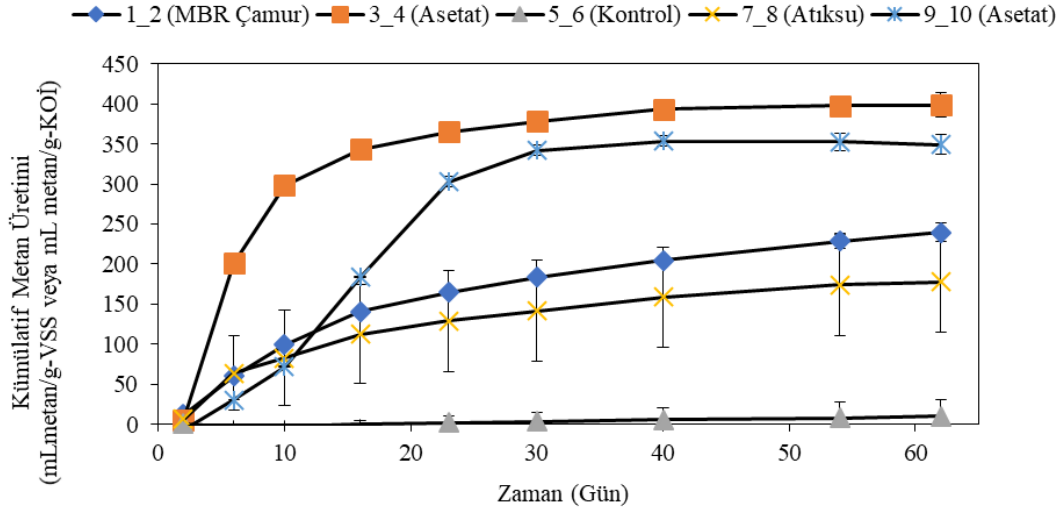
Atıksudan metan üretim potansiyeli ise 112 ± 25 mL/g-KOİ olarak belirlenmiştir. Bilindiği gibi 1 g KOİ'den teorik olarak 395 mL metan gazı üretilmektedir. Dolayısıyla, atıksu içerisinde organik maddenin yaklaşık olarak sadece %28'inin biyolojik olarak parçalanabilir olduğu gözlenmiş olup, bu değer önceki dönem çalışmalarına kıyasla bir hayli düşüktür. Dolayısıyla, bu dönemde tesise gelen atıksuyun karakterizasyonuna bağlı olarak anaerobik parçalanabilirliğinin önemli derecede düştüğü tespit edilmiştir.



Şekil 15. SRT 3 gün BMP Deney Seti için elde edilen sonuçlar

5.5. SRT 2 GÜN BMP DENEY SETİ İÇİN ELDE EDİLEN SONUÇLAR

Benzer olarak SRT değeri 3 gün'den 2 gün'e indirilerek oluşan çamurun metan potansiyeli araştırılmıştır. Aşağıdaki şekilde elde edilen sonuçlar sunulmuştur.



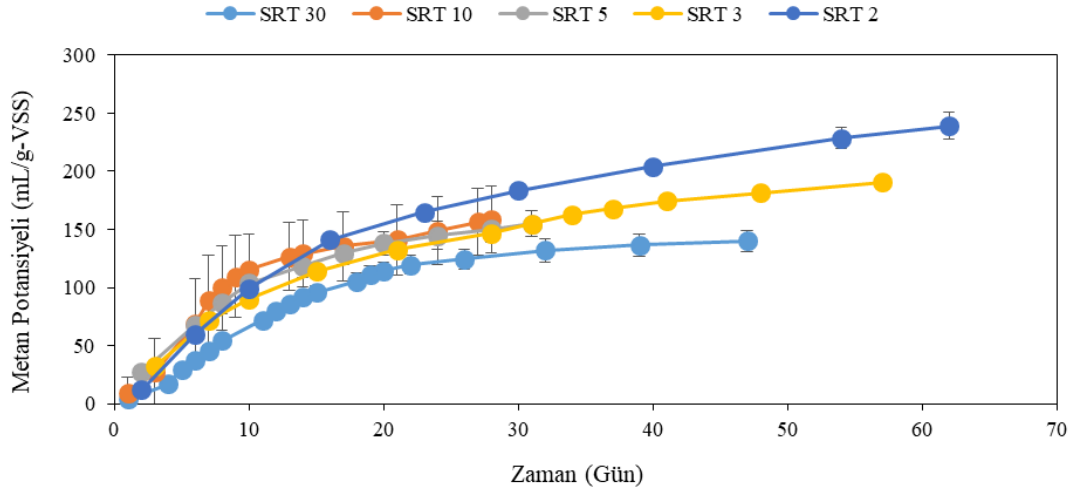
Şekil 16. SRT 2 gün BMP Deney Seti için elde edilen sonuçlar

Şekil 16'dan da görüldüğü gibi 500 mg/L asetat varlığında 399 ± 16 mL-metan /g-KOİ üretilmiş olup (teorik değerin %101'i), biyokütlenin aktif olduğu anlaşılmaktadır. Asetat konsantrasyonunun 1500 mg/L olması durumunda ise üretilen metan 349 ± 13 mL/g-KOİ olarak bulunmuştur. Ham atıksuya ait metan üretim potansiyeli ise 188 ± 63 mL/g-KOİ olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla, ham tekstil atıksuyunun yaklaşık %48'inin anaerobik olarak biyoparçalanır olduğu belirlenmiştir.

Atık çamurdan metan üretim potansiyeli ise 239 ± 12 mL/g-VSS olarak belirlenmiş olup, bu değer SRT 3 gün için 191 ± 3 mL/g-VSS ve SRT 5 gün için 155 ± 11 mL metan/g-VSS olarak elde edilmiştir. Haliyle, SRT değerinin düşürülmesiyle metan potansiyelinde önemli bir artış görülmekte olup, bu durum aşağıda daha detaylı olarak irdelenecektir.

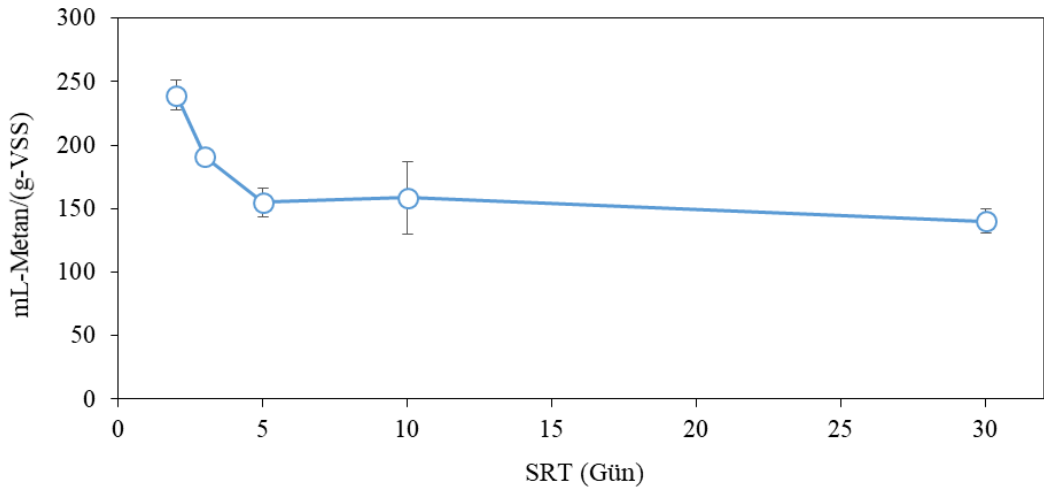
5.6. FARKLI SRT DEĞERLERİNDE İŞLETİLEN MBR'DE ÜRETİLEN ÇAMURUN METAN POTANSİYELİNİN KIYASLANMASI

Yukarıda detaylı olarak açıklandığı üzere SRT değişimiyle birlikte atık çamurun metan üretim potansiyeli de büyük değişiklik göstermektedir. SRT ile çamurun metan üretim potansiyelindeki değişiklik aşağıda Şekil 17'de ve 18'de sunulmuştur.



Şekil 17. Farklı SRT değerlerinde üretilen çamur ile kurulan BMP testlerinde elde edilen sonuçlar

Şekil 17’den de görüldüğü gibi SRT değeri düştükçe metan üretim potansiyeli önemli derecede artmaktadır.



Şekil 18. Farklı SRT değerlerinde üretilen çamurun metan potansiyeli değişimi

Şekilde görüldüğü gibi SRT değerinin 30 günden 5 güne kadar düşürülmesiyle üretilen çamurun metan üretim potansiyeli kısmen artmış olsa da SRT 5 gün'den daha düşük değerlerde metan üretim potansiyeli önemli derecede artmış ve SRT 2 gün'de 239 ± 12 mL/g-VSS değerine ulaşmıştır. Farklı SRT değerlerinde elde edilen metan üretim potansiyeli ayrıca Tablo 9'da sunulmuştur.

Tablo 9. Farklı SRT değerlerinde elde edilen metan üretim potansiyelleri

SRT (gün)	Metan Üretim Potansiyeli (mL/g-VSS)	Standart Sapma
2	239	12
3	191	3
5	155	11
10	159	29
30	140	9

Tablodan da görüldüğü üzere SRT 30 gün değerinde işletilen MBR çamuruna kıyasla SRT 2 gün değerinde işletilen MBR çamurundan elde edilen metan potansiyeli önemli derecede yüksek olup, bu artış ortalama %42 civarındadır. Bu artışa, düşük SRT değerinde artan çamur üretiminin de ilavesiyle önemli derecede enerji geri kazanımı mümkün olacaktır. Bu kapsamda her bir SRT değeri için reaktördeki MLVSS konsantrasyonu, atılan çamur ve üretilebilecek potansiyel enerji aşağıdaki tabloda sunulmuştur. Netice olarak atıksudan mevcut koşullarda, SRT 3 gün değerine kadar ortalama $0,4 \text{ kWh/m}^3$ enerji üretim potansiyeli mevcut olup, SRT değerinin 2 gün'e düşürülmesiyle birlikte organiklerin oksidasyon yerine geri kazanım oranının arttırılması neticesinde metan üretim potansiyeli $0,62 \text{ kWh/m}^3$ değerine ulaşmıştır. Hesaplamalara ilişkin detaylar aşağıda Tablo 10'da sunulmuştur.

Tablo 10. Farklı SRT ve SRT/HRT değerlerinde İşletilen MBR’da üretilen çamur üzerinde gerçekleştirilen BMP denemeleri için üretilen çamur, metan potansiyeli ve enerji üretiminin hesaplanması *

	SRT 30	SRT 10	SRT 5	SRT 3	SRT 2
	gün	gün	gün	gün	gün
SRT/HRT	30	10	10	10	10
SRT (gün)	30	10	5	3	2
HRT (gün)	1	1	0,5	0,3	0,2
Biyokütle konsantrasyonu (mg-VSS/L)	3210	2270	2430	1840	2300
Metan üretimi (L metan/g-VSS)	0,14	0,159	0,155	0,191	0,239
Metan üretimi (L metan/gün)	0,1	0,25	0,53	0,82	1,92
Metan üretimi (L-metan/m ³ -atıksu)	14,29	35,71	37,86	35,14	54,86
Metan Enerji içeriği (kWh/m ³)	11,25	11,25	11,25	11,25	11,25
Toplam Enerji üretim potansiyeli (Wh/gün)	1,13	2,81	5,96	9,23	21,6
Toplam Enerji üretim potansiyeli (kWh/m ³)	0,16	0,4	0,43	0,4	0,62

*Çalışmada çamurun alındığı MBR prosesi mevcut çalışma kapsamı dışında fakat bu çalışmanın da yer aldığı TÜBİTAK projesi (119R031) kapsamında işletilmiştir.

Çalışmada dikkate alınması gereken diğer önemli bir husus ise çamur ile birlikte sisteme giren nitratin sebep olacağı azot gazı üretimidir. Yapılan çalışmada laboratuvarımızda gaz kromatografi cihazı bulunmadığı için biyogazın metan içeriği direkt olarak belirlenememiş ve NaOH dan geçirilen gazın tamamen metan olduğu kabul edilmiştir. Bununla birlikte sisteme çamurla beraber nitrat girmekte olup, nitratin denitrifikasyonu nedeniyle üretilecek azot gazı da metan gibi ölçülecek ve NaOH ile tutulamayacaktır. Bu nedenle sisteme giren toplam nitratin denitrifikasyonla azot gazına dönüştüğü kabul edilerek toplam metan üretimine yapabileceği katkı teorik olarak her bir SRT değeri için hesaplanarak aşağıda sunulmuştur (Tablo 11). Tabloda görülebileceği gibi en yüksek katkı SRT 5 günde meydana gelmiş olup, SRT değerinin 2 gün olduğu dönemde nitrifikasyonun durması nedeniyle katkı sıfıra yakındır.

Bununla birlikte, bilindiği gibi 1 mg N-NO₃ indirgenmesi için ortalama 4-6 mg KOİ tüketilmektedir. Denitrifikasyon için harcanan KOİ'nin anaerobik olarak tüketilmesiyle oluşabilecek metan miktarı dikkate alınırsa, denitrifikasyon nedeniyle oluşabilecek azot gazının g-VSS başına hesaplanan metan üretim potansiyeli üzerine etkisinin dikkate alınmayacak derecede olacağı kabul edilebilir.

Tablo 11. Farklı SRT değerlerinde çamurda bulunan nitratın metan üretimine etkisi

SRT (Gün)	30	10	5	3	2
Toplam BMP Hacmi (mL)	100	100	100	100	100
Eklene çamur numunesi (mL)	75	75	75	75	75
Üretilen net biyogaz (mL)	33.7	27	28.24	26.32	41.27
Nitrat konsantrasyonu (mg-N/L)	37.0	40.1	45.1	29.9	0.5
Eklene atıksu ile gelen nitrat (mg-N)	2.78	3.01	3.38	2.24	0.04
Eklene nitrat nedeniyle üretilecek toplam azot gazı (mL)	2.50	2.71	3.06	2.02	0.03
Azot gazının üretilen toplam gaz içinde oranı (%)	7.43	10.05	10.82	7.69	0.08
UAKM	3210	2270	2430	1840	2300
Metan Üretim Potansiyeli (mL/g-UAKM)	140	159	155	191	239

Örnek olması bakımından debisi 1000 m³/gün bir atıksu arıtma tesisi dikkate alınarak toplam enerji üretimleri iki uç SRT değerleri için (30 gün ve 2 gün) hesaplanarak kıyaslanabilir. Atıksuyun alındığı DOSAB ile yapılan görüşmelerde atıksu sıcaklığının ortalama 33°C civarında olduğu belirtilmiş olup, anaerobik bir çürütmenin kullanılması durumunda ısıtma için gerekli enerjinin de makul kalabileceği düşünülmektedir. SRT değerinin 30 gün olarak alınması durumunda laboratuvar koşullarında olduğu gibi HRT değeri 1 gün olarak alınmıştır. SRT değerinin 2 gün olması durumunda ise laboratuvar çalışmalarına benzer olarak SRT/HRT değerinin 10 olması için HRT değeri 0,2 gün olarak alınmıştır. Bu kapsamda yapılan hesaplara ait sonuçlar Tablo 12'de sunulmuştur. Tabloda görüldüğü gibi SRT değerinin 30 gün'den 2 güne ve SRT/HRT değerinin de 30'dan 10'a düşürülmesiyle birim atıksu hacmi

başına üretilen enerji miktarları, sırasıyla, 0,17 kWh/m³ ve 0,62 kWh/m³ olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla, SRT değerinin düşürülmesiyle birlikte üretilen enerji miktarı yaklaşık 3,6 kat artmıştır.

Tablo 12. SRT 30 gün ve SRT 2 gün’de işletilen MBR’de üretilen çamurun çürütülmesi durumunda üretilecek çamur ve enerji geri kazanım miktarlarının 1000 m³/gün atıksu debisi için kıyaslanması

	SRT 30 gün	SRT 2 gün
Q (m ³ /gün)	1000	1000
SRT/HRT	30	10
SRT (gün)	30	2
HRT (gün)	1	0,2
V (m ³)	1000	200
Qw (m ³ /gün)	33,33	100
Biyokütle konsantrasyonu (mg-VSS/L)	3210	2300
Atık çamur (kg-VSS/gün)	106,99	230
Atık çamur (kg-VSS/m ³ -arıtılan atıksu)	0,11	0,23
Metan üretimi (m ³ metan/kg-VSS)	0,14	0,239
Metan üretimi (m ³ metan/gün)	14,98	54,97
Metan üretimi (L-metan/m ³ -atıksu)	14,98	54,97
Metan Enerji içeriği (kWh/m ³)	11,25	11,25
Toplam Enerji üretim potansiyeli (kWh/gün)	168,53	618,41
Toplam Enerji üretim potansiyeli (kWh/m ³)	0,17	0,62

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. SONUÇ

Bu çalışmada tekstil endüstrisi atıksuyunun farklı SRT değerlerinde arıtıldığı bir MBR'den elde edilen atık çamurun BMP potansiyeli üzerinde bir araştırma yapılmıştır. Tekstil endüstrisi Türkiye'nin önde gelen sektörlerinden biridir ve tekstil endüstrisi atıksularının arıtımı sırasında oldukça yüklü miktarlarda ve arıtılması zor bir çamur oluşmaktadır. Buradan elde edilebilecek biyogaz enerjisi tekstil boyahanelerinde kullanılabileceği gibi biyogazdan elde edilecek elektrik arıtma tesisinin ihtiyacını karşılamada da kullanılabilir. Bu yöntem çevre ve iklim açısından potansiyel bir enerji kaynağı olmakla birlikte oldukça verimlidir. Ayrıca biyogazın enerji ihtiyacını karşılaması için bu yolla kullanım oranının artırılması enerji yelpazesinin de çeşitlendirilmesini sağlayacaktır. Alternatif enerji kaynaklarının yanı sıra yeni ve çevre dostu alternatiflerin olması günümüzde oldukça önemlidir. Biyogaz enerjisi de tüm bunları sağlamaktadır.

Çalışma sonucunda düşük SRT değerlerinde ölçülen BMP sonuçlarının yüksek SRT değerlerine göre oldukça yüksek ve daha verimli olduğu ortaya çıkmıştır. Elde edilen metan miktarından yola çıkarak bu gerçek bir tesise uyarlandığında önemli ölçüde enerji geri kazanımı yapılabileceği ortaya konmuştur. SRT 2 gün'de işletilen reaktörde üretilen çamur SRT 30 gün'de işletilen reaktörden elde edilen çamura göre çok daha yüksek bir enerji potansiyeline sahiptir. SRT 2 gün'de elde edilen çamurdan üretilen metanın enerji potansiyeli SRT 30 gün'e göre 3,6 kat artarak 0,62 kWh/m³ olduğu belirlenmiştir. Bu sonuca göre biyogaz verimi açısından en uygun SRT değerinin 2 olduğu görülmektedir. Metan gazından elde edilecek elektrik enerjisi üretim performansının %45 olduğu kabul edilirse, SRT 2 gün'de üretilen çamurdan elde edilebilecek elektrik enerjisi 0,28 kWh/m³ olacaktır. Bu çalışmanın yapıldığı MBR prosesinden elde edilen sonuçlarla yayımlanan çalışmada farklı SRT değerleri için

hesaplanan MBR prosesi için biyolojik arıtma enerji ihtiyacı aşağıda verilmiştir (Yılmaz vd., 2023).

Tablo 13. Farklı SRT değerlerinde işletilen ve atık çamurun elde edildiği MBR için Yobs değerleri ile hesaplanmış enerji ihtiyaçları (Yılmaz vd. 2023)

SRT	Yobs (mgVSS/mgKOİ)	Havalandırma için elektrik ihtiyacı (kWh/m ³)
30	0,102	0,346
20	0,148	0,319
10	0,270	0,219

Tablo 13’de görüldüğü gibi SRT değeri küçüldükçe biyolojik arıtma için enerji ihtiyacı da düşecek olup, SRT 2 gün’de aerobik biyolojik arıtma için enerji ihtiyacı daha düşük olacaktır. Bununla birlikte, membran havalandırma ve filtrasyon için enerji gereksinimi yaklaşık 0,1 kWh/m³ (Yılmaz vd. 2023) alınır ve yine ön arıtma ve çamur arıtımı için de enerji ihtiyacı 0,15 kWh/m³ kabul edilirse, MBR’da gereken enerji 0,45 kWh/m³ kadar beklenebilir. Haliyle, düşük SRT değerlerinde sadece biyolojik olarak üretilen çamurdan elektrik enerjisi üretimiyle enerji ihtiyacının %60’a kadar karşılanabileceği düşünülmektedir.

Bu tezde anlatılan laboratuvar uygulaması ile güvenilirliği kanıtlanmış arıtma metodolojisi tekstil endüstrisi atıksu arıtma tesislerine entegre edilebilir. Böylece yenilenebilir enerji üretimi ile ekonomik olarak karlılık elde edilebilecektir. Aynı zamanda yenilenebilir enerji üretimi ile alım gücünün artması, sağlık sorunlarının azalması, sanayi gelişimi ve ticaret, enerji arz güvenliği, istihdam gibi yan faydalar kapsamında sosyal açıdan ve çevre açısından büyük faydalar sağlanmış olacaktır. En önemlisi sera gazlarında önemli miktarda düşüş elde edilecektir. Tüm bunlar ile de sürdürülebilir kalkınma hedeflerini gerçekleştirme yolunda ilerleme sağlanmış olacaktır.

Yenilenebilir enerjiye dayalı olan biyogaz sisteminin, fosil yakıtlara dayalı diğer sistemlere göre ekonomik olarak daha uygulanabilir olduğu sonucuna varılmıştır.

İklim değişikliğine karşı dirençliliği sağlamak, daha sürdürülebilir ve yeşil sistemleri teşvik etmek için bu çalışmanın uygulanabilirliğini arttırmak son derece önemlidir. Bu alana müdahale etmek için karar vermeye yardımcı olacak enerji ve çevre açısından pozitif olan bu sistemin konvansiyonel sistemler ile karşılaştırılarak çevresel etkilerinin tam olarak anlaşılmasına ihtiyaç vardır.

6.2. ÖNERİLER

Tekstil yoğun su ve enerji kullanan bir sektördür. Yüksek debi ve farklı karakterizasyonlardaki kirleticilerden dolayı fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma gerektirmektedirler. Çok fazla toksik kimyasal madde kullanmaktadırlar ve teknik eleman ihtiyaçları da oldukça fazladır. Tez çalışması neticesinde elde edilen bulgulara dayanılarak aşağıdaki öneriler sunulmuştur;

- Düşük SRT’lerde işletilecek proseslerde üretilen çamurun çürütülmesi neticesinde üretilen metan gazı boyahanelerde buhar üretimi amacıyla kullanılabilir.
- Üretilen elektrik enerjisi ulusal şebekeye verilebilir ya da arıtma tesisi içinde değerlendirilebilir.
- Enerji tüketimini verimli hale getirmek için yeni teknolojiye sahip tasarruflu ekipmanlar alınabilir. Eski teknoloji ile üretimden kaçınılabilir.
- İleride sürekli işletilen pilot ölçekli bir anaerobik prosesle elde edilen veriler doğrulanmalıdır.
- Gerek düşük SRT’de işletilen MBR ve gerekse anaerobik proses için daha detaylı enerji hesapları yapılarak sistemin enerji nötral olması için alternatifler değerlendirilmelidir.

KAYNAKÇA

- Adinurani, P. G., Hendroko, S. R., Wahono, S. K., Nindita, A., Mairziwan, M., Sasmito, A., Nugroho, Y. A., & Liwang, T. (2015). The Performance of *Jatropha Curcas* Linn. Capsule Husk as Feedstocks Biogas in One Phase Anaerobic Digestion. *Procedia Chemistry*, 14, 316–325. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2015.03.044>
- Akyüz, İ. N. (2011). *Osmanbey Atıksu Arıtma Tesisinin İşletilmesi* (Yayın No. 287002) [Yüksek lisans tezi, Harran Üniversitesi]. Ulusal Tez Merkezi.
- Atelge, M. R. (2021). The potential of biogas production as a biofuel from cattle manure in Turkey and projected impact on the reduction of carbon emissions for 2030 and 2053. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 5(1), 56-64. <https://doi.org/10.46460/ijiea.923792>
- Atilla, B. (2002). *Biyolojik Arıtma Çamurlarının Anaerobik Çürütülmesi ve Üst Suyun MAP Çöktürmesi ile Arıtımı* (Yayın No. 126838) [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. Ulusal Tez Merkezi.
- Azanaw, A., Birlie, B., Teshome, B., & Jemberie, M. (2022). Textile effluent treatment methods and eco-friendly resolution of textile wastewater. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 6(June), 100230. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100230>
- Bahreini, G., Elbeshbishy, E., Jimenez, J., Santoro, D., & Nakhla, G. (2020). Integrated fermentation and anaerobic digestion of primary sludges for simultaneous resource and energy recovery: Impact of volatile fatty acids recovery. *Waste Management*, 118, 341–349. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.08.051>
- Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği Ek 2, Resmi Gazete Sayısı: 27527, Resmi Gazete Tarihi: 20/03/2010, T.C. Resmi Gazete, Ankara, 2010.
- Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği, Resmi Gazete Sayısı: 27527, Resmi Gazete Tarihi: 20/03/2010, T.C. Resmi Gazete, Ankara, 2010.
- Berkessa, Y. W., Yan, B., Li, T., Jegatheesan, V., & Zhang, Y. (2020). Treatment of anthraquinone dye textile wastewater using anaerobic dynamic membrane bioreactor: Performance and microbial dynamics. *Chemosphere*, 238, 124539. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124539>
- Bolzonella, D., Pavan, P., Battistoni, P., & Cecchi, F. (2005). Mesophilic anaerobic digestion of waste activated sludge: Influence of the solid retention time in the wastewater treatment process. *Process Biochemistry*, 40(3–4), 1453–1460. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.06.036>
- Bruggen, B. Van Der, Curcio, E., & Drioli, E. (2004). Process intensification in

the textile industry: the role of membrane technology. *Journal of Environmental Management*, 73, 267–274. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.07.007>

Campello, L. D., Barros, R. M., Tiago Filho, G. L., & dos Santos, I. F. S. (2021). Analysis of the economic viability of the use of biogas produced in wastewater treatment plants to generate electrical energy. *Environment, Development and Sustainability*, 23(2), 2614–2629. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00689-y>

Çetin, S. (1995). *Bir Tekstil Fabrikası Endüstriyel Atıksu Arıtma Tesisinin İncelenmesi* (Yayın No. 47058) [Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi]. Ulusal Tez Merkezi.

Chan, C., Guisasola, A., & Baeza, J. A. (2020). Correlating the biochemical methane potential of bio-P sludge with its polyhydroxyalkanoate content. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118495. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118495>

Cimon, C., Kadota, P., & Eskicioglu, C. (2020). Effect of biochar and wood ash amendment on biochemical methane production of wastewater sludge from a temperature phase anaerobic digestion process. *Bioresource Technology*, 297, 122440. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122440>

Çınar, Ö. (2011). *Aktif Çamur Prosesi I. Bölüm* [Power Point Slaytları]. Yıldız Teknik Üniversitesi. <https://avesis.yildiz.edu.tr/resume/downloadfile/ocinar?key=1eb37a45-0400-462a-9708-c85d77ba4e32>

Da Silva, C., Astals, S., Peces, M., Campos, J. L., & Guerrero, L. (2018). Biochemical methane potential (BMP) tests: Reducing test time by early parameter estimation. *Waste Management*, 71, 19–24. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.009>

European Commission. (2022a). *Renewable energy targets*. https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-targets_en

Donoso-Bravo, A., Ortega, V., Lesty, Y., Vanden Bossche, H., & Olivares, D. (2019). Assessing the stability of anaerobic co-digestion in the context of a WWTP with thermal pre-treatment of sewage sludge. Case study in Chile. *Waste Management*, 100, 240–248. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.09.025>

Duan, L., Moreno-Andrade, I., Huang, C. lin, Xia, S., & Hermanowicz, S. W. (2009). Effects of short solids retention time on microbial community in a membrane bioreactor. *Bioresource Technology*, 100(14), 3489–3496. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.02.056>

Dumas, C., Perez, S., Paul, E., & Lefebvre, X. (2010). Combined thermophilic aerobic process and conventional anaerobic digestion: Effect on sludge biodegradation and methane production. *Bioresource Technology*, 101(8), 2629–2636. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.065>

Elalami, D., Carrere, H., Monlau, F., Abdelouahdi, K., Oukarroum, A., & Barakat, A. (2019). Pretreatment and co-digestion of wastewater sludge for biogas

production: Recent research advances and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114(August), 109287. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109287>

Elbeshbishy, E., Aldin, S., Nakhla, G., Singh, A., & Mullin, B. (2014). Impact of alkaline-hydrolyzed biosolids (Lystek) addition on the anaerobic digestibility of TWAS in lab - And full-scale anaerobic digesters. *Waste Management*, 34(11), 2090–2097. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.07.022>

Elbeshbishy, E., Nakhla, G., & Hafez, H. (2012). Biochemical methane potential (BMP) of food waste and primary sludge: Influence of inoculum pre-incubation and inoculum source. *Bioresource Technology*, 110, 18–25. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.01.025>

Erkan, D., Yilmaz, T., Yücel, A., Yilmaz, A., Tel, A., & Uçar, D. (2018). Atıksu Arıtma Tesislerinde Enerji Kazanımı için Mikro Ölçekte Hidroelektrik Santrallerin Uygulanabilirliği. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 02, 1–6.

European Commission. (2022b). *Renewable energy – directive, targets and rules*. https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules_en

Debik, E., Manav, N., & Coşkun, T. (2008). Biyolojik Temel İşlemler Dersi Ders Notları. *Metcalf & Eddy, Wastewater Engineering Treatment and Reuse., Crites & Tchobanoglous, Small & Decentralized Wastewater Management Systems*. Yıldız Teknik Üniversitesi.

Fargione, J., Hill, J., Tilman, D., Polasky, S., & Hawthorne, P. (2008). Land clearing and the biofuel carbon debt. *Science*, 319(5867), 1235–1238. <https://doi.org/10.1126/science.1152747>

Fatone, F., Bolzonella, D., Battistoni, P., & Cecchi, F. (2005). Removal of nutrients and micropollutants treating low loaded wastewaters in a membrane bioreactor operating the automatic alternate-cycles process. *Desalination*, 183(1–3), 395–405. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.02.055>

Filibeli, A., & Erden, G. (2010). Anaerobik yöntemle stabilize edilen kentsel nitelikli arıtma çamurlarının nihai bertaraf açısından değerlendirilmesi. *itü dergisi/e su kirlenmesi kontrolü*, 20(2), 3–11.

Gao, J., Zhao, X., Chen, S., Dong, B., & Dai, X. (2021). New insights into the evaluation of anaerobic properties of sludge: Biodegradability and stabilization. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 100, 158–166. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.07.021>

Gavala, H. N., Yenal, U., Skiadas, I. V., Westermann, P., & Ahring, B. K. (2003). Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of primary and secondary sludge. Effect of pre-treatment at elevated temperature. *Water Research*, 37(19), 4561–4572. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00401-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00401-9)

Ge, H., Batstone, D. J., Mouiche, M., Hu, S., & Keller, J. (2017). Nutrient removal and energy recovery from high-rate activated sludge processes – Impact of sludge age. *Bioresource Technology*, 245, 1155–1161. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.115>

- Goswami, L., Vinoth Kumar, R., Borah, S. N., Arul Manikandan, N., Pakshirajan, K., & Pugazhenth, G. (2018). Membrane bioreactor and integrated membrane bioreactor systems for micropollutant removal from wastewater: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 26(October), 314–328. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.10.024>
- Günel, A. (2017). *Atıksu Arıtma Tesislerinde Biyogaz ve Hidroelektrik Enerjiden Elektrik Üretimi* (Yayın No. 493661) [Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi]. Ulusal Tez Merkezi.
- Guo, H., van Lier, J. B., & de Kreuk, M. (2020). Digestibility of waste aerobic granular sludge from a full-scale municipal wastewater treatment system. *Water Research*, 173, 115617. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115617>
- Gürtekin, E., & Şekerdağ, N. (2006). Aktif çamur proste aşırı çamur üretimini azaltmak için kullanılan yöntemler. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 11(1), 1–8.
- Halalsheh, M., Koppes, J., den Elzen, J., Zeeman, G., Fayyad, M., & Lettinga, G. (2005). Effect of SRT and temperature on biological conversions and the related scum-forming potential. *Water Research*, 39, 2475–2482. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.12.012>
- Harper, W. F., Bernhardt, M., & Newfield, C. (2006). Membrane bioreactor biomass characteristics and microbial yield at very low mean cell residence time. *Water SA*, 32(2), 193–198. <https://doi.org/10.4314/wsa.v32i2.5259>
- Park, H. D., Chang, I. S., & Lee, K. J. (2015). *Principles of Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment*. CRC Press Taylor & Francis Group.
- İlkiç, C., & Deviren, H. (2011). Biyogazın Oluşumunu Etkileyen Fiziksel ve Kimyasal Parametreler. *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), May*, 123–131.
- Öztürk, İ., Timur, H., & Koşkan, U. (2010). *Atıksu Arıtımının Esasları* [Ders Notları]. İstanbul Teknik Üniversitesi. http://www.hasanege.com/download/hasanege_atiksuaritimiesaslari.pdf
- Peirce, J. J., Weiner, R. F., & Vesilind, P. A. (1998). Sludge treatment, utilization, and disposal. *Environmental Pollution and Control (Fourth Edition)*, 125–135. <https://doi.org/10.1016/B978-075069899-3/50010-9>
- Jiang, X., Chen, Z., & Dharmasena, M. (2015). The role of animal manure in the contamination of fresh food. *Advances in Microbial Food Safety*, 312–350. <https://doi.org/10.1533/9781782421153.3.312>
- Kaçmaz, G. (2021). İklim Değişikliği ile Mücadelede Doğa Temelli Çözümler. *Peyzaj*, 3(2), 82–92. <https://doi.org/10.53784/peyzaj.1022369>
- Kanat, A. İ. (2017). *Atıksu Arıtma Tesislerinde Biyogazdan Elektrik Enerjisi Üretimi ve Uygulanabilirlik Analizi* [Uzmanlık Tezi, İller Bankası Anonim Şirketi]. <https://www.ilbank.gov.tr/userfiles/files/uzmanliktezleri/14675.pdf>
- Kant, R. (2012). Textile dyeing industry an environmental hazard. *Natural*

Science, 4(1), 22–26. <http://dx.doi.org/10.4236/ns.2012.41004>

Katheresan, V., Kansedo, J., & Lau, S. Y. (2018). Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6, 4676–4697. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.06.060>

Kızmaz, A. (2019). *Diyarbakir İli Sebze Meyve Atıklarının Biyogaz Potansiyelinin Araştırılması* (Yayın No. 568117) [Yüksek lisans tezi, Dicle Üniversitesi]. Ulusal Tez Merkezi.

Kocamemi, B. A. (2003). *Environmental Engineering Unit Processes Chapter: 4 Activated Sludge Processes* [Power Point Slaytları]. Marmara Üniversitesi. <https://mimoza.marmara.edu.tr/~bilge.alpaslan/ENVE%20302/Chp-4.pdf>

Koch, K., Bajón Fernández, Y., & Drewes, J. E. (2015). Influence of headspace flushing on methane production in Biochemical Methane Potential (BMP) tests. *Bioresource Technology*, 186(February), 173–178. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.071>

Koch, K., Lippert, T., & Drewes, J. E. (2017). The role of inoculum's origin on the methane yield of different substrates in biochemical methane potential (BMP) tests. *Bioresource Technology*, 243, 457–463. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.142>

Kong, Z., Wu, J., Rong, C., Wang, T., Li, L., Luo, Z., Ji, J., Hanaoka, T., Sakemi, S., Ito, M., Kobayashi, S., Kobayashi, M., Qin, Y., & Li, Y. Y. (2021). Sludge yield and degradation of suspended solids by a large pilot-scale anaerobic membrane bioreactor for the treatment of real municipal wastewater at 25 °C. *Science of the Total Environment*, 759. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143526>

Koyuncu, İ. (2018). *Su/Atıksu Arıtılması ve Geri Kazanılmasında Membran Teknolojileri Uygulamaları Uygulamaları Cilt 2: Evsel ve Endüstriyel Atıksuların Arıtılması ve Geri Kazanılmasında Membran Teknolojileri* (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı). TÜÇEV. <http://www.cevresehirkutuphanesi.com/assets/files/slider/cilt-2.pdf>

Koyuncu, S. (2014). *Konya Atıksu Arıtma Tesisi Anaerobik Çamur Çürütücülerinde Optimum Biyogaz Verimi için İşletme Şartlarının ve Tasarım Kriterlerinin Belirlenmesi* (Yayın No. 357046) [Doktora tezi, Selçuk Üniversitesi]. Ulusal Tez Merkezi.

Koyuncu, S., & Nas, B. (2022). 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. <https://doi.org/10.21923/jesd.928945>

Kulil, B. (2015). *Membran Biyoreaktörde Farklı C/N Oranlarına Sahip Atıksuların Arıtılması* (Yayın No. 409745) [Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi]. Ulusal Tez Merkezi.

Kuşçu, Ö. S., & Sponza, D. T. (2006). Treatment efficiencies of a sequential anaerobic baffled reactor (ABR)/completely stirred tank reactor (CSTR) system at

increasing p-nitrophenol and COD loading rates. *Process Biochemistry*, 41(7), 1484–1492. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2006.02.004>

Kwietniewska, E., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.041>

Lambert, S. J., & Davy, A. J. (2011). Water quality as a threat to aquatic plants: discriminating between the effects of nitrate, phosphate, boron and heavy metals on charophytes. *New Phytologist*, 189, 1051–1059. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03543.x>

Lee, Y., Cho, J., Seo, Y., Lee, J. W., & Ahn, K. H. (2002). Modeling of submerged membrane bioreactor process for wastewater treatment. *Desalination*, 146(1–3), 451–457. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00543-X](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00543-X)

Lellis, B., Fávaro-Polonio, C. Z., Pamphile, J. A., & Polonio, J. C. (2019). Effects of textile dyes on health and the environment and bioremediation potential of living organisms. *Biotechnology Research and Innovation*, 3(2), 275–290. <https://doi.org/10.1016/j.biori.2019.09.001>

Lin, L., Xu, F., Ge, X., & Li, Y. (2019). Biological treatment of organic materials for energy and nutrients production—Anaerobic digestion and composting. *Advances in Bioenergy*, 4, 121–181. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/bs.aibe.2019.04.002>

Malik, A., Akhtar, R., & Grohmann, E. (2014). *Environmental Deterioration and Human Health: Natural and Anthropogenic Determinants*, 55–71. Springer. doi:10.1007/978-94-007-7890-0_4

Mallinson, P. (1999). Application of Surfactants in the Textile Industry. *Industrial Applications of Surfactants IV*, 272–278. <https://doi.org/10.1533/9781845698614.272>

Bharagava, R. N. (2018). *Recent Advances in Environmental Management*. CRC Press Taylor & Francis Group. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781351011259-3/textile-industry-wastewater-sujata-mani-ram-naresh-bharagava>

Martín, M. A., Raposo, F., Borja, R., & Martín, A. (2002). Kinetic study of the anaerobic digestion of vinasse pretreated with ozone, ozone plus ultraviolet light, and ozone plus ultraviolet light in the presence of titanium dioxide. *Process Biochemistry*, 37(7), 699–706. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(01\)00260-6](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(01)00260-6)

Mel, M., Yong, A. S. H., Avicenna, Ihsan, S. I., & Setyobudi, R. H. (2015). Simulation Study for Economic Analysis of Biogas Production from Agricultural Biomass. *Energy Procedia*, 65, 204–214. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.01.026>

Metson, G. S., Feiz, R., Lindegaard, I., Ranggård, T., Quttineh, N. H., & Gunnarsson, E. (2022). Not all sites are created equal – Exploring the impact of constraints to suitable biogas plant locations in Sweden. *Journal of Cleaner*

- Production*, 349(November 2021). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131390>
- Michael H. Gerardi. (2002). *Settleability Problems and Loss of Solids in the Activated Sludge Process*. A John Wiley & Sons, Inc., Publication.
- Moyo, S., Makhanya, B. P., & Zwane, P. E. (2022). Use of bacterial isolates in the treatment of textile dye wastewater: A review. *Heliyon*, 8(October 2021), e09632. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09632>
- Ng, H. Y., & Hermanowicz, S. W. (2005). Membrane bioreactor operation at short solids retention times: Performance and biomass characteristics. *Water Research*, 39(6), 981–992. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.12.014>
- Karaaslan, Y., & Oğuz, T. C. (2013). *Atıksu aritma tesisleri tasarım rehberi*. Orman ve Su İşleri Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü.
- Öz, A. (2009). *Atıksu Arıtma Tesislerinde Verimlilik Kontrolü ve İşletme Sorunları* (Yayın No. 259459) [Yüksek lisans tezi, Kocaeli Üniversitesi]. Ulusal Tez Merkezi.
- Pekergin, Z. B. (2019). *Hayvan Gübresi ve Ko-Ferment Olarak Biyodizel Üretim Atık Karışımının Laboratuvar Ölçekli Anaerobik Reaktörde Biyogaza Dönüştürülebilirlik Koşullarının Araştırılması* (Yayın No. 616859) [Doktora tezi, Konya Teknik Üniversitesi]. Ulusal Tez Merkezi.
- López, I., & Borzacconi, L. (2011). *Water Science and Technology*. IWA Publishing, 64(10), 2080–2088. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.697>
- Mirza, R. N., Huang, R., Du, E., Peng, M., Pan, Z., Ding, H., Shan, G., Ling, L., & Xie, Z. (2020). A review of the textile wastewater treatment technologies with special focus on advanced oxidation processes (AOPs), membrane separation and integrated AOP-membrane processes. *Desalination and Water Treatment*, 206, 83–107. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.26363>
- Rahman, M. A., Saha, C. K., Feng, L., Möller, H. B., & Alam, M. M. (2019). Anaerobic digestion of agro-industrial wastes of Bangladesh: Influence of total solids content. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 12(4), 484–493. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2019.10.002>
- Rajamohan, N., & Rajasimman, M. (2013). Kinetic Modeling of Dye Effluent Biodegradation by *Pseudomonas Stutzeri*. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 3(2), 387–390. <https://doi.org/10.48084/etasr.276>
- Rana, R., Ingrao, C., Lombardi, M., & Tricase, C. (2016). Greenhouse gas emissions of an agro-biogas energy system: Estimation under the Renewable Energy Directive. *Science of the Total Environment*, 550, 1182–1195. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.164>
- Razbonyalı, C. (2013). Determination of the Process Performance of High Rate Membrane Bioreactors Treating Domestic Wastewater (Yayın No. 335933) [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. Ulusal Tez Merkezi.
- Sahinkaya, E., Yurtsever, A., & Çınar, Ö. (2017). Treatment of textile industry wastewater using dynamic membrane bioreactor: Impact of intermittent aeration

on process performance. *Separation and Purification Technology*, 174, 445–454. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.10.049>

Samsami, S., Mohamadi, M., Sarrafzadeh, M. H., Rene, E. R., & Firoozbahr, M. (2020). Recent advances in the treatment of dye-containing wastewater from textile industries: Overview and perspectives. *Process Safety and Environmental Protection*, 143, 138-163. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.05.034>

Yaseen, D. A., & Scholz, M. (2018). Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: a critical review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16, 1193-1226. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-2130-z>

Yüceer, S. (2006). *Anaerobik Filtrelerde Substrat Giderme Kinetiğine Sıcaklığın Etkisinin İncelenmesi* (Yayın No. 183631) [Yüksek lisans tezi, Çukurova Üniversitesi]. Ulusal Tez Merkezi.

Şenol, H., Elibol, E. A., Açikel, Ü., & Şenol, M. (2017). Biyogaz Üretimi İçin Ankara’ nın Başlıca Organik Atık Kaynakları. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 6(2), 15–28.

Manzoor, J., & Sharma, M. (2020). *Impact of Textile Dyes on Human Health and Environment*. April. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-0311-9.ch008>

Shen, Y., Linville, J. L., Urgun-Demirtas, M., Mintz, M. M., & Snyder, S. W. (2015). An overview of biogas production and utilization at full-scale wastewater treatment plants (WWTPs) in the United States: Challenges and opportunities towards energy-neutral WWTPs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 346–362. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.129>

Silvestre, G., Fernández, B., & Bonmatí, A. (2015). Significance of anaerobic digestion as a source of clean energy in wastewater treatment plants. *Energy Conversion and Management*, 101, 255–262. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.05.033>

Sözen, S., Teksoy-Başaran, S., Ergal, İ., Karaca, C., Allı, B., Razbonyalı, C., Ubay-Çokgör, E., & Orhon, D. (2017). A novel process maximizing energy conservation potential of biological treatment: Super fast membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science*, 545, 337–347. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.09.029>

Stamatelatou, K., Antonopoulou, G., & Iyberatos, G. (2011). Production of biogas via anaerobic digestion. *Handbook of Biofuels Production: Processes and Technologies*, 266-304. <https://doi.org/10.1533/9780857090492.2.266>

Syaichurrozi, I., Rusdi, Dwicahyanto, S., & Toron, Y. S. (2016). Biogas Production from Co-Digestion Vinasse Waste and Tofu-Processing Wastewater and Kinetics. *International Journal of Renewable Energy Research*, 6(3), 1057-1070.

Syaichurrozi, I., Budiyono, & Sumardiono, S. (2013). Predicting kinetic model of biogas production and biodegradability organic materials: Biogas production from vinasse at variation of COD/N ratio. *Bioresource Technology*, 149, 390–397. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.09.088>

Sanayi Genel Müdürlüğü. (2017). *Tekstil, hazır giyim ve deri ürünleri sektörleri raporu*. T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Sanayi Genel Müdürlüğü. <https://ramazaninan.com.tr/osto/TekstilHazirgiyimveDeriUrunleriSektorleriRaporu-2017.pdf>

Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü. (2010). *Biyogaz Kılavuzu - Üretimden Kullanıma*. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü. <https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/editordosya/biyogaz%20kılavuzu%20pdf.pdf>

Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü. (2016). *Sektörel Atık Kılavuzları Tekstil ve Hazır Giyim Sektörü*. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü. https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/editordosya/Tekstil_ve_Hazir_Giyim_Sektoru_Kilavuzu.pdf

Takman, J., & Andersson-Sköld, Y. (2021). A framework for barriers, opportunities, and potential solutions for renewable energy diffusion: Exemplified by liquefied biogas for heavy trucks. *Transport Policy*, 110(March 2020), 150–160. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.05.021>

Tetteh, E. K., & Rathilal, S. (2021). Application of biomagnetic nanoparticles for biostimulation of biogas production from wastewater treatment. *Materials Today: Proceedings*, 45, 5214–5220. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.720>

Türkiye İhracatçılar Meclisi. (2022). *Faaliyet Raporu 2021-2022*. https://www.tim.org.tr/files/downloads/Raporlar/TIM_Faaliyet_Raporu_2021-2022.pdf

Türkiye İstatistik Kurumu. (2022). *Sera Gazı Emisyon İstatistikleri, 1990-2020*. TÜİK Veri Portalı. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Greenhouse-Gas-Emissions-Statistics-1990-2020-45862>

United Nations. (1992). United Nations Framework Convention on Climate Change. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>

Uyanık, S., & Çelikel, D. C. (2019). Türk Tekstil Endüstrisi Genel Durumu. *Teknik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 32–41.

Von Sperling, M., & Chernicharo, C. A. D. L. (2005). *Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions* (1. baskı). IWA Publishing. <https://www.iwapublishing.com/sites/default/files/ebooks/9781780402734.pdf>

Wang, D., Zhao, J., Zeng, G., Chen, Y., Bond, P. L., & Li, X. (2015). How does Polyhydroxyalkanoates Affect Methane Production from the Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge?. *Environmental Science & Technology*, 49(20), 12253-12262. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03112>

Wang, P., Peng, H., Adhikari, S., Higgins, B., Roy, P., Dai, W., & Shi, X. (2020). Enhancement of biogas production from wastewater sludge via anaerobic digestion assisted with biochar amendment. *Bioresource Technology*, 309. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123368>

- Wang, X., Yang, G., Feng, Y., Ren, G., & Han, X. (2012). Optimizing feeding composition and carbon-nitrogen ratios for improved methane yield during anaerobic co-digestion of dairy, chicken manure and wheat straw. *Bioresource Technology*, 120, 78–83. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.06.058>
- Xiao, B., Tang, X., Yi, H., Dong, L., Han, Y., & Liu, J. (2020). Comparison of two advanced anaerobic digestions of sewage sludge with high-temperature thermal pretreatment and low-temperature thermal-alkaline pretreatment. *Bioresource Technology*, 304(November 2019), 122979. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122979>
- Xu, F., Khalaf, A., Sheets, J., Ge, X., Keener, H., & Li, Y. (2018). Phosphorus Removal and Recovery From Anaerobic Digestion Residues. *Advances in Bioenergy*, 3, 77-136. <https://doi.org/10.1016/bs.aibe.2018.02.003>
- Yasui, H., Nakamura, K., Sakuma, S., Iwasaki, M., & Sakai, Y. (1996). A full-scale operation of a novel activated sludge process without excess sludge production. *Water Science and Technology*, 34(3-4), 395–404. <https://doi.org/10.2166/wst.1996.0456>
- Yeşil, E. (2011). *Atık Çamur Dezentegrasyonu Yöntemlerinin Çamur Minimizasyonu Açısından Değerlendirilmesi* (Yayın No. 311897) [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. Ulusal Tez Merkezi.
- Yıldız, Ş., Yılmaz, E., & Ölmez, E. (2009). Evsel Nitelikli Arıtma Çamurlarının Stabilizasyonla Bertaraf Alternatifleri: İstanbul Örneği. *Türkiye’de Katı Atık Yönetimi Sempozyumu (TÜRKAY)*, İstanbul, Türkiye, 1-8.
- Yılmaz, F., Ünşar, E. K., Perendeci, N. A., & Sahinkaya, E. (2021). Energy generation from multifarious wastes of alcohol distillery raki production process: Kinetic modeling of methane production. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104838>
- Yılmaz, T., Demir, E. K., Asik, G., & Teksoy Başaran, S., Ubay Çokgör, E., Sözen, S., & Sahinkaya, E. (2023). Effect of sludge retention time on the performance and sludge filtration characteristics of an aerobic membrane bioreactor treating textile wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 51(October 2022). <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103390>
- Yılmaz, V. (2009). Sürdürülebilir Bir Sistemde Biyogazın Yeri. V. *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, Diyarbakır, 203-207.
- Yokuş, İ. (2011). *Sivas İlindeki Hayvansal Atıkların Biyogaz Potansiyeli* (Yayın No. 300791) [Yüksek lisans tezi, Ankara Üniversitesi]. Ulusal Tez Merkezi.
- Yücenur, G. N., Çaylak, Ş., Gönül, G., & Postalcıoğlu, M. (2020). An integrated solution with SWARA&COPRAS methods in renewable energy production: City selection for biogas facility. *Renewable Energy*, 145, 2587–2597. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.011>
- Yüksekdağ, M., Gökpınar, S., & Yelmen, B. (2020). Atıksu Arıtma Tesislerinde Arıtma Çamurları ve Bertaraf Uygulamaları. *European Journal of Science and Technology*, (18), 895–904. <https://doi.org/10.31590/ejosat.699952>

Yurtsever, A., Basaran, E., & Ucar, D. (2020). Process optimization and filtration performance of an anaerobic dynamic membrane bioreactor treating textile wastewaters. *Journal of Environmental Management*, 273(February), 111114. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111114>

Yurtsever, A., Sahinkaya, E., & Çınar, Ö. (2020). Performance and foulant characteristics of an anaerobic membrane bioreactor treating real textile wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 33(August 2019). <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.101088>

Zhang, C., Guisasola, A., & Baeza, J. A. (2021). Achieving simultaneous biological COD and phosphorus removal in a continuous anaerobic/aerobic A-stage system. *Water Research*, 190, 116703. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116703>

