

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SÜT ENDÜSTRİSİ ATIKSUYU İLE BESLENEN MEMBRAN BİYOREAKTÖRDE
ÇAMUR KARAKTERİ VE ARITMA VERİMİNİN İZLENMESİ**

MERVE SARAL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. GÜLEDA ENGİN**

İSTANBUL, 2018

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SÜT ENDÜSTRİSİ ATIKSUYU İLE BESLENEN MEMBRAN BİYOREAKTÖRDE
ÇAMUR KARAKTERİ VE ARITMA VERRİMİNİN İZLENMESİ**

Merve SARAL tarafından hazırlanan tez çalışması 05.06.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Güleda ENGİN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Güleda ENGİN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet Sinan BİLGİLİ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Neşe TÜFEKÇİ
İstanbul Üniversitesi



Bu alışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 115Y576 numaralı projesi ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

ÖNSÖZ

Bu Yüksek Lisans Tezi Yıldız Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü'nün su ve atıksu arıtımı laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Her şeyden önce, tez danışmanım ve proje yürütücüsü Prof. Dr. Güleda ENGİN'e şükranlarımı sunarım. Tezimin hazırlanması aşamasındaki değerli yönlendirmeleri, yardımları ve desteği için minnettarım. Ayrıca tez komitesine: Prof. Dr. Mehmet Sinan BİLGİLİ'ye ve Prof. Dr. Neşe TÜFEKÇİ'ye çok değerli yorumları için teşekkürlerimi sunarım.

Araştırma görevlisi Hanife SARI ERKAN'a laboratuvar çalışmam boyunca yardımları ve çalışmalarına ışık tutan tavsiyeleri için teşekkürlerimi sunarım.

Okuldaki tüm çalışma arkadaşlarıma manevi destekleri, yardımları, tavsiyeleri için içten teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman yanımda olan aileme, tezimi yazarken destek aldığım kardeşim Hamdi SARAL'a, bilhassa sevgili annem Gülay SARAL'a sabrı, anlayışı ve sonsuz desteği için en derin minnetimi sunarım.

Haziran, 2018

Merve SARAL

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	2
1.3 Hipotez	2
BÖLÜM 2	
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2.1 Süt ve Süt Ürünleri Endüstrisi.....	3
2.2 Süt ve Süt Ürünleri Endüstrisi Atıksuyu	3
2.3 Süt ve Süt Ürünleri Endüstrisi Atıksuyu Arıtma Yöntemleri	5
2.4 Membran Prosesler	7
2.5 Membran Sistemlerinde Akım Türleri	9
2.5.1 Klasik (Dead-end) Filtrasyon	9
2.5.2 Çapraz Akış Filtrasyon	10
2.6 Membran Teknolojileri	10
2.6.1 Mikrofiltrasyon (MF).....	11
2.6.2 Ultrafiltrasyon (UF)	12
2.6.3 Nanofiltrasyon (NF)	12
2.6.4 Ters Osmoz (RO)	13
2.7 Alternatif Bir Arıtma Teknolojisi Olarak MBR.....	14
2.7.1 MBR'ların Gelişimi	17

2.7.2	MBR Sistemlerin Klasik Aktif Çamur Sistemlere Göre Avantajları.....	18
2.7.3	MBR Sistemlerin Dezavantajları	19
2.7.4	Membran Tıkanması	19
BÖLÜM 3		
MATERYAL VE METOT		22
3.1	Kullanılan Atıksu	23
3.2	Deney Sistemi ve İşletme Şartları	23
3.3	Inoculum	24
3.4	Kullanılan Membran ve Hazırlanışı	24
3.5	Analitik Yöntemler	25
3.5.1	Karakterizasyon	25
3.5.2	İzleme Analizleri	25
BÖLÜM 4		
SONUÇLAR.....		34
4.1	Atıksu Karakterizasyonu	34
4.2	Besleme Yapılan Atıksular ile Süzüntü Suyunun Fiziksel Olarak Karşılaştırılması.....	35
4.3	MBR Performansının Takibi	36
4.3.1	Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) Giderimi	36
4.3.2	MLSS/MLVSS Değişimlerinin Etkisi	37
4.3.3	Amonyak (NH ₃) ve Nitrat (NO ₃) Giderimleri	39
4.3.4	Ortofosfat (PO ₄ -P) Giderimi	40
4.3.5	Sıcaklık, Çözünmüş Oksijen ve İletkenlik	41
4.3.6	pH ve Alkalinite	43
4.4	Membranın Tıkanmasını Etkileyen Parametreler	43
4.4.1	Kapiler Emme Süresi (CST).....	43
4.4.2	Göreceli Hidrofobisite ile P/C Oranı İlişkisi.....	44
4.4.3	Çamur Hacim İndeksi (SVI)	45
4.4.4	Ekstraselüler Polimerik Maddeler (EPS) – Çözünmüş Mikrobiyal Ürünler (SMP)	46
4.5	Kritik Akı.....	48
4.6	SEM	49
4.7	ZETA Potansiyeli ve Partikül Boyut Dağılımı	50
BÖLÜM 5		
DEĞERLENDİRME		53
5.1	Genel Değerlendirme	53
5.2	Gelecek Çalışmalar	54
KAYNAKLAR.....		55
ÖZGEÇMİŞ.....		61

SİMGE LİSTESİ

ΔC	Konsantrasyon Farkı
ΔP	Basınç Farkı
ΔT	Sıcaklık Farkı
ΔE	Elektriksel Potansiyel Farkı
μs	MikroSiemens
μ	Mikron
μm	Mikrometre
μL	Mikrolitre
$CaCO_3$	Karbonat Kalsiyum
Cl^-	Klorür
H_2SO_4	Sülfürik Asit
L_{org}	Organik Yükleme
nm	Nanometre
Na^+	Sodyum
$NaOH$	Sodyum Hidroksit
NH_3	Amonyak
NH_4^+-N	Amonyum-Azot
NH_4^+	Amonyum
NO_3^-	Nitrat
PO_4-P	Fosfat Fosforu
P	Fosfor
T	Sıcaklık
TN	Toplam Azot
TP	Toplam Fosfor

KISALTMA LİSTESİ

AWWA	American Water Works Association
AKM	Askıda Katı Madde
BOİ	Biyolojik Oksijen İhtiyacı
CST	Kapiler Emme Süresi
ÇO	Çözünmüş Oksijen
DAS	Demir Amonyum Sülfat
EPA	Environmental Protection Agency
EPS	Ekstraselüler Polimerik Maddeler
HRT	Hidrolik Alıkonma Süresi
KOİ	Kimyasal Oksijen İhtiyacı
MBR	Membran Biyoreaktör
MF	Mikrofiltrasyon
MLSS	Mixed Liquor Suspended Solid
MLVSS	Mixed Liquor Volatile Suspended Solid
NF	Nanofiltrasyon
PVDF	Polyvinylidene Difluoride (Polivinilden florür) Membran
RO	Ters Ozmos
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SMP	Çözünmüş Mikrobiyal Ürünler
SRT	Çamur Alıkonma Süresi
SVI	Çamur Hacim İndeksi
TSS	Toplam Askıda Katı Madde
TKM	Toplam Katı Madde
TUKM	Toplam Uçucu Katı Madde
TMP	Trans Membran Basıncı
UF	Ultrafiltrasyon
UV	Ultraviyole

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1	Membran ayırma mekanizmasının şematik gösterimi 8
Şekil 2. 2	Membran akım türleri şematik gösterimi 10
Şekil 2. 3	Gözenek çapı, süzülen madde, molekül ağırlığı ve membran prosesleri arasındaki ilişki 11
Şekil 2. 4	Ozmotik basınç ve ters osmoz çalışma prensibi 13
Şekil 2. 5	Aktif çamur prosesinin şematik görünümü 15
Şekil 2. 6	(a) Harici MBR, geri devirli ve biyoreaktörden ayrı konumlandırılmış filtrasyon ünitesi (b) Batık MBR, biyoreaktörün içine entegre edilmiş filtrasyon ünitesi 16
Şekil 2. 7	Membran tıkanmasını etkileyen faktörler 21
Şekil 3. 1	Laboratuvar ölçekli MBR sisteminin görünümü 22
Şekil 3. 2	MBR ünitesinin akım şeması 24
Şekil 3. 3	Hollow fiber membran modülü yapım aşamasından görüntüler 25
Şekil 3. 4	Thermo Scientific Orion 5 Star multiparametre cihazı 28
Şekil 3. 5	Spektroquant Nova 60 kolorimetre 29
Şekil 3. 6	CST cihazı 29
Şekil 3. 7	Hidrofobisite analizinde kullanılan santrifüj cihazı 30
Şekil 3. 8	Flat sheet membran ve deney için hazırlanmış membran modülü 33
Şekil 4. 1	MBR’de kullanılan ilk besleme atıksuyu (sol), ikinci besleme atıksuyu (orta) ve elde edilen süzüntünün (sağ) fiziksel olarak karşılaştırılması 36
Şekil 4. 2	MBR sisteminde elde edilen KOİ çıkış konsantrasyonları ve KOİ giderim verimleri 37
Şekil 4. 3	MBR sistemi işletimi boyunca takip edilen MLSS ve MLVSS değerleri 39
Şekil 4. 4	MBR sisteminde elde edilen NH ₃ çıkış konsantrasyonları ve NH ₃ giderim verimleri 40
Şekil 4. 5	MBR sisteminde elde edilen PO ₄ -P çıkış konsantrasyonları ve PO ₄ -P giderim verimleri 41
Şekil 4. 6	MBR sisteminde elde edilen CST değişimleri 44
Şekil 4. 7	MBR sisteminde aktif çamurun göreceli hidrofobisitesi ile EPS P/C oranının ilişkisi 45
Şekil 4. 8	MBR sisteminde akı ve TMP değerlerinin zamana göre değişimi 49
Şekil 4. 9	İşletilen MBR sisteminde kullanılan temiz hollow fiber membran SEM görüntüleri 49

Şekil 4. 10	İşletilen MBR sisteminde kullanılan kirli hollow fiber membran SEM görüntüleri	50
Şekil 4. 11	MBR sisteminde aktif çamura ait zeta potansiyeli grafiği	51
Şekil 4. 12	MBR sisteminde aktif çamura ait partikül boyutu dağılımı grafiği	52



ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2. 1 Gıda ve içecek endüstrisi sektörlerindeki atıksu miktarları	5
Çizelge 2. 2 Süt endüstrisi atıksuyunun içeriği	5
Çizelge 2. 3 Süt ve süt ürünleri alıcı ortama deşarj standartları	6
Çizelge 2. 4 Bazı membran proseslerin sürücü kuvvetleri	8
Çizelge 2. 5 Dahili/batık ve harici MBR karşılaştırılması	17
Çizelge 2. 6 Tasarım kriterlerine göre MBR'ların gelişimi	17
Çizelge 4. 1 Atıksu karakterizasyon kapsamında belirlenen parametreler	35
Çizelge 4. 2 MBR sistemi işletimi boyunca elde edilen EPS ve SMP konsantrasyonları	47
Çizelge 4. 3 MBR sistemi işletimi boyunca elde edilen EPS VE SMP'deki P/C oranları	48

SÜT ENDÜSTRİSİ ATIKSUYU İLE BESLENEN MEMBRAN BİYOREAKTÖRDE ÇAMUR KARAKTERİ VE ARITMA VERİMİNİN İZLENMESİ

Merve SARAL

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Güleda ENGİN

Doğaya kontrolsüz bir şekilde bırakılan atıksular çevreyi ve insan sağlığını olumsuz yönde etkilemektedir. Endüstriyel faaliyetlerden kaynaklı birçok çeşit atıksu ortaya çıkmaktadır. Bu tez kapsamında süt endüstrisi atıksuyunun membran biyoreaktörde arıtılması üzerine çalışılmıştır.

Hollow fiber membran kullanılarak kurulan MBR sisteminde günlük olarak çözünmüş oksijen, membran basıncı, arıtılmış su miktarı, sıcaklık, pH takip edilmiştir. Çamur karakterindeki değişikliklerin izlenebilmesi için MLSS, MLVSS, SVI, CST, Hidrofobisite, EPS, SMP analizleri yapılmıştır. Belirli aralıklarla yapılan KOİ, NH₃, PO₄-P analizleri ile arıtma verimi izlenmiştir. Sırasıyla %99, % 82,78 ve %76,5 giderim verimleri elde edilmiştir.

Sonuç olarak, membran biyoreaktörde kirlilik yükü yüksek olan süt endüstrisi atıksuyunun arıtma veriminin yüksek olduğu tespit edilmiştir. MBR kaliteli çıkış suyu, yüksek MLSS ve düşük HRT şartlarında işletme, daha az alan gereksinimi, son çökeltim havuzu ihtiyacının ortadan kaldırılması gibi özellikleriyle klasik aktif çamur sistemlerine kıyasla avantajlı bir proses olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Membran biyoreaktör, süt atıksuyu, atıksu arıtma, Çözünmüş Mikrobiyal Ürünler (SMP), Ekzopolimerik Maddeler (EPS)



ABSTRACT

SLUDGE CHARACTERISTICS AND TREATMENT EFFICIENCY MONITORING IN A MEMBRANE BIOREACTOR TREATING DAIRY WASTEWATER

Merve SARAL

Department of Environmental Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Güleda ENGİN

The wastewater which is left uncontrollably to nature, affects the environment and human health negatively. Many types of wastewater arise from industrial activities. In this thesis, the treatment of the wastewater originated from dairy industry using a membrane bioreactor was studied.

The dissolved oxygen, membrane pressure, amount of treated water, temperature and pH were monitored daily in the MBR system set-up by using hollow fiber membrane. MLSS, MLVSS, SVI, CST, hydrophobicity, EPS, SMP analyses were performed for monitoring the changes in the sludge character. Treatment efficiencies were monitored with COD, NH_3 , $\text{PO}_4\text{-P}$ analyses carried out at certain intervals. Removal efficiencies of 99%, 82,78% and 76.5% were obtained, respectively.

Consequently, it was found out that the treatment efficiency of the wastewater of dairy industry with high pollution load in the membrane bioreactor is high. Therefore, MBR is an advantageous process compared to conventional activated sludge process with features such as high quality effluent, operation in high MLSS and low HRT conditions, less space requirement, removing the need for a final settling tank.

Keywords: Membrane bioreactor, dairy wastewater, wastewater treatment, Soluble Microbial Products (SMP), Extracellular Polymeric Substances (EPS)



1.1 Literatür Özeti

Farklı endüstri kollarına bağlı olarak farklı çevresel sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bu faaliyetler sonucunda hava, su, toprak ve canlılar doğrudan ve dolaylı olarak olumsuz yönde etkilenmektedir. Nüfus artışıyla birlikte farklı ihtiyaçlar da artmaktadır. Bu ihtiyaçlar doğrultusunda sanayileşmeye bağlı olarak ciddi bir atıksu sorunu da ortaya çıkmıştır. Atıksuların çevreye bilinçsizce deşarj edilmesi önemli çevre sorunlarına neden olmaktadır. Sürdürülebilir bir çevre için her türlü atıksuyun uygun bir teknolojiyle arıtılması ve bu suların doğa ile hiç zarar vermeyecek şekilde ya da en az zararla buluşturulması sağlanmalıdır. Az su tüketimi, atıksuyun arıtılarak uygun yerlerde yeniden kullanımı sağlanmalı ve doğal su kaynaklarının korunması temel prensip olmalıdır.

Gıda endüstrisi içinde süt ve süt ürünleri endüstrisi, atıksu üretimi bakımından önemli bir kaynaktır. Hızlı nüfus artışı ile birlikte ihtiyaçların karşılanması bakımından entegre tesisler, orta ve küçük ölçekli mandıraların sayısı da artmıştır. İşletme sayısının artışıyla birlikte atıksu miktarı da artmaktadır. Sonuç olarak çevreye verilebilecek zarar su kirlenmesi bakımından riskleri kontrol edilmesi gereken seviyelere çekmiştir.

Süt ve süt ürünleri işleme endüstrisi atıksularının karakteri üretim prosesi ve üretim çeşitliliğine göre farklılık göstermektedir. Organik içeriği yüksek olması nedeniyle deşarj ortamında mikroorganizmaların çoğalmasında rol oynayarak kirliliğe sebep olmaktadır. Alıcı ortamlara verilmeden önce deşarj standartlarını sağlayacak şekilde uygun teknolojiyle arıtımı sağlanmalıdır.

1.2 Tezin Amacı

Çevresel açıdan üzerinde en çok düşünülmesi gereken konulardan biri doğrudan ya da dolaylı yollardan çevreye bırakılan atıksuların yönetilmesidir. Atıksu arıtımı için kullanılan birçok yöntem bulunmaktadır. Deşarj standartlarına uygunluk kapsamında arıtılabilirlik, enerji sarfiyatı, işletme ve yatırım maliyetleri, atıksu karakteri gibi çeşitli konularda değerlendirmeler yapıp uygun arıtma sistemi seçimi gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada gıda endüstrisinin önemli bir kolu olan ve oldukça yüksek kirlilik içeren süt endüstrisinin atıksuyu, atıksu arıtma yöntemlerinden biri olan membran biyoreaktörde besleme suyu olarak kullanılacaktır. Düşük KOİ ve nütrient çıkışı hedeflenmiş olup EPS-SMP, hidrofobisite, CST, akı, zeta potansiyeli ve partikül boyutu gibi verilerin membran kirlenmesine etkisi incelenmesi tezin ana amacını oluşturmaktadır.

1.3 Hipotez

Atıksuların yönetimi konusunda yapılan pek çok çalışmaya ek olarak yapılan bu çalışmada; süt işleme fabrikasından çıkan yüksek organik kirletici içeren atıksuların membran biyoreaktör sisteminde arıtılabilirliğini ve membranın kirlenmesini etkileyen parametreleri inceleyerek somut örnekler ortaya koymak ve daha sonra yapılacak olan çalışmalara ışık tutmak hedeflenmiştir.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Süt ve Süt Ürünleri Endüstrisi

Süt ve süt ürünleri endüstrisinde, çiğ sütün işlenerek peynir, yoğurt, tereyağı, ayran, süt tozu, konsantre süt gibi ürünler elde edilmektedir. Gıda endüstrisinde üretim miktarı en çok olan endüstri koludur. Entegre süt işleme tesisleri ve küçük işletmeler olan mandıralarda üretim gerçekleştirilmektedir. Üretim mevsimlere göre değişkenlik göstermektedir. Yaz aylarında üretim artmakta ve diğer aylarda ürünlerin satışı yapılmaktadır.

Ülkemizde süt işleme tesislerinin pek çoğu küçük işletmeler şeklinde yurdun çeşitli yerlerinde faaliyet göstermektedir. Sütün doğrudan tüketilmesinin yanında işlenmesiyle de çeşitli ürünler elde edilmektedir. Bu ürünleri elde ederken farklı proseslerden farklı atıklar da ortaya çıkmaktadır ve sütteki besin maddelerinin önemli bir kısmı da bu atıksulara geçmektedir.

2.2 Süt ve Süt Ürünleri Endüstrisi Atıksuyu

Son yıllarda Dünya’da ve ülkemizde, evsel ve endüstriyel kaynaklı atıksuların artması ile su kıtlığı ciddi bir problem haline gelmektedir. Özellikle kimyasal endüstrilerden ve gıda endüstrilerinden gelen atıksuların deşarj edilmeden arıtılması gerekmektedir [1].

Gıda endüstrisi atıksuyu diğer sanayi faaliyetlerinden çok farklılık göstermektedir. Gıda endüstrileri arasında en çok sorun teşkil eden süt endüstrisi için, önemli miktarlarda temiz su kullanılmakta ve fazla miktarda atıksu üretimi gerçekleşmektedir. Bu fazla

miktarda oluşan atıksu, süt işleme üniteleri, sterilizasyon, temizlik ve yüzey yıkama sularından kaynaklanmaktadır. Süt endüstrisinde, 1 L süt işlenmesi için ortalama 2,5 L atıksu üretilmektedir. Yüksek laktoz içeriği, çözünmüş ve askıda katılar, yağlar ve bunların yanında amonyak ve fosfat formunda nütrientler içermektedir [2].

Süt endüstrisinde genellikle zararlı ve toksik kirleticiler kullanılmamasına rağmen yüksek seviyelerdeki oluşumu farklı kirletici çeşitleri çevreye zarar verebilmektedir. Özellikle süt atıksuyu çok yüksek miktarda toplam askıda katı madde (TSS), kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) ve biyolojik oksijen ihtiyacı (BOİ) içermektedir. Çok yüksek miktarda organik maddeler çok sayıda sorunlara neden olmaktadır. İdeal olarak çevresel deşarj standartlarını karşılamak için KOİ değeri 200 mg/L'ye düşürülmesi gerekmektedir. [1],[3].

Süt endüstrileri genellikle yüksek kirlilik içeren atıksular oluşturmaktadır. Yüksek organik içerikli atıksular birçok ekolojik problemlere neden olmaktadır. Hem flora hem de fauna üzerinde olumsuz etkiler göstermektedir. Toprağın fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirerek mahsul üretim verimini azaltmaktadır. Ötrofikasyona sebep olarak sucul yaşamı etkilemekte ve suları içmek için elverişsiz yapmaktadır. Bu nedenle bu atıksuların güvenli bir şekilde bertarafı göz ardı edilemez bir konu oluşturmaktadır. Çevreciler ve hükümetler atıksu arıtımı ve yeniden kullanımı için ucuz, verimli ve uzun soluklu çözümler aramaktadır [4],[5],[6].

Süt işleme tesislerinin atıksuları ciddi problem teşkil etmektedir. Bu atıksuların çevre kirliliğine neden olmayacak düzeyde kirlilik değerlerinin azaltılması gerekmektedir. Mikroorganizmaların çoğalması için gerekli olan besin maddelerini barındırmaktadır. Aynı zamanda diğer canlı türleri olan sinekler, böcekler, kemiriciler için de uygun besin kaynağıdır. Önemli miktarda organik ve inorganik maddeler içermesi, toksik bir ortamın oluşmasına da zemin oluşturmaktadır. İçeriğindeki patojen organizmalar nedeniyle hem insan sağlığı hem de diğer canlılar açısından önemli tehlike oluşturduğundan bu atıksuların uygun sistemlerle arıtılması sağlanmalıdır [7].

Çizelge 2.1'de çeşitli endüstrilerden kaynaklanan atıksu miktarları verilmiştir. Bunların içinde süt ürünlerinden kaynaklanan atıksuyun miktarı oldukça fazladır.

Çizelge 2. 1 Gıda ve içecek endüstrisi sektörlerindeki atıksu miktarları [8].

Sektör	
Süt ürünleri	0,9-60 m ³ /ton
Balık ürünleri	2-40 m ³ /ton
Bitkisel sıvı ve katı yağ	0,2-35 m ³ /ton
Et ürünleri	10-25 m ³ /ton
Meyve ve sebze	11-23 m ³ /ton
İçecek	0,8-3,6 m ³ /m ³
Nişasta	1,4-2 m ³ /ton
Bira üretimi	0,24-0,9 m ³ /L-saat

2.3 Süt ve Süt Ürünleri Endüstrisi Atıksuyu Arıtma Yöntemleri

Süt endüstrisi atıksuları yüksek miktarda organik madde içermektedir. Bünyesindeki azot ve fosfor, alıcı ortamlardaki biyolojik yaşama besin kaynağı olmaktadır. Çevresel açıdan bu atıksuların arıtılarak alıcı ortamlara bırakılması ciddi problemleri beraberinde getirebilmektedir. Çizelge 2.2’de Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı’na (EPA) göre süt endüstrisi atıksuyunun kompozisyonu verilmektedir.

Çizelge 2. 2 Süt endüstrisi atıksuyunun içeriği [9]

İçerik	Oran (mg/L)	Ortalama (mg/L)
AKM	24-5,700	-
BOİ ₅	450-4,790	1,885
Nitrojen	15-180	76
Fosfor	11-160	50
Sodyum	60-807	-
Klorür	48-469	276
Kalsiyum	57-112	-
Magnezyum	25-49	-
Potasyum	11-160	67
pH	4-12	7,1

25687 sayılı Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'nde Gıda Sanayi Atık Sularının Alıcı Ortama Deşarj Standartlarına ait Tablo 5.3'e göre deşarj kriterleri sağladıktan sonra deşarj edilebilmektedir. Çizelge 2.3'te Süt ve süt ürünlerinin deşarj kriterleri verilmiştir.

Çizelge 2. 3 Süt ve süt ürünleri alıcı ortama deşarj standartları [10]

PARAMETRE	BİRİM	KOMPOZİT NUMUNE 2 SAATLİK	KOMPOZİT NUMUNE 24 SAATLİK
KİMYASAL OKSİJEN İHTİYACI (KOİ)	(mg/L)	170	160
YAĞ VE GRES	(mg/L)	60	30
pH		6-9	6-9

Yeniden kullanım ve geri dönüşüm, tesisi işletmek için gereken şebeke suyunun hacmini önemli ölçüde azaltmaktadır. Buna ek olarak atıksu bertarafının maliyetini de azaltmaktadır [9].

Yüksek organik madde, Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) ve Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı (BOİ) konsantrasyonları içeren atıksular fizikokimyasal ve biyolojik arıtma gibi geleneksel yöntemlerle arıtılmaktadır.

Fizikokimyasal yöntemler arasında koagülasyon/flokülasyon ve oksidasyon prosesleri bulunmaktadır. Fizikokimyasal proseslerde kullanılan kimyasal madde maliyetlerinin yüksekliği ve çözünmüş KOİ gideriminin düşük olması, biyolojik proseslerin tercih edilmesine sebep olmuştur [11].

Süt ve süt ürünleri endüstrisinin atıksularının arıtımı için aerobik ve anaerobik biyolojik arıtma sistemleri sık kullanılan teknolojiler arasındadır. Yüksek miktarda organik madde içermesi sebebiyle biyolojik arıtılabilirliği diğer yöntemlere göre daha verimlidir. Ortamdaki oksijen varlığına göre havalı (aerobik) ve havasız (anaerobik) olarak sınıflandırılan sistemler beraber de kullanılabilmektedir [11], [12].

Birçok çalışmada süt endüstrisi atıksuyunun aerobik koşullarda arıtılması gerçekleştirilmiş ve aktif çamurun başlıca kirletici maddelerin yüksek oranda giderilmesini sağladığı kanıtlanmıştır [13], [14].

Anaerobik sistemler süt endüstrisi atıksuyunun arıtımında doğrudan kullanılmaktadır. Diğer arıtma sistemlerine göre uygun maliyetlidir. Düzgün çalıştırılırlarsa kötü kokular

üretilmesi engellenebilmektedir [15]. Anaerobik sistemlerdeki en büyük problemler, uzun işletmeye alma süresi, biyokütlenin adaptasyon güçlüğü, hızlı pH düşüşleri olabilmektedir [16], [17].

Biyolojik sistemlerle arıtılan suların yeniden kullanımı mümkün olmadığından atıksuyun yeniden kullanımına imkan veren arıtma alternatifleri üzerinde çalışılmaktadır. Böylece su kaynaklarının tüketimi azaltılmış ve deşarj edilen alıcı ortamlar korunmuş olacaktır. Yeniden kullanım için membran filtrasyon ve ters osmoz gibi ileri arıtma teknolojileri geliştirilmiştir [9].

2.4 Membran Prosesler

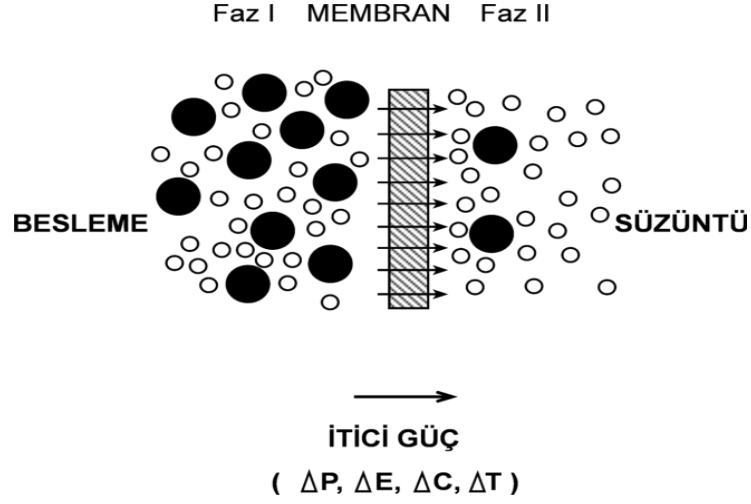
Membran teknolojisi yeni gelişen teknolojilerden olup multidisipliner karakteri sayesinde büyük çaplı ayırma proseslerinde kullanılabilir. Bununla birlikte farklı ayırma prosesleri ile birlikte mukayese etmek zordur. Membran teknolojilerinin yararları aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- ayırma sürekli bir şekilde uygulanabilir,
- enerji sarfiyatı genellikle düşüktür,
- membran prosesler kolaylıkla diğer ayırma prosesleriyle birleştirilebilir,
- ayırma yavaş koşullar altında yürütülebilir,
- membran özellikleri değişkenlik gösterir ve ayarlanabilir,
- ilave sistem gerektirmez.

Aşağıdaki dezavantajlara değinilmelidir:

- konsantrasyon polarizasyonu/membran kirlenmesi,
- düşük membran ömrü,
- genellikle düşük seçicilik.

Membran, bütün membran proseslerin merkezindedir. İki fazı ayıran bariyer olarak düşünülmektedir. Membran ayırma mekanizması Şekil 2.1'de şematik olarak gösterilmektedir [18].



Şekil 2. 1 Membran ayırma mekanizmasının şematik gösterimi [18].

Şekil 2.1’de görüldüğü gibi Faz I besleme fazı, Faz II ise süzüntü fazı olarak belirtilmiştir. Süzüntü suyu içeriğindeki çözünmüş maddelerden ve diğer bileşenlerden ayrılarak membrandan geçmektedir. Membranlarda itici güç olarak basınç değişimi (ΔP), elektriksel potansiyel değişimi (ΔE), konsantrasyon değişimi (ΔC) ve sıcaklık değişimi (ΔT) sistemi etkilemektedir. Çizelge 2.4’de bazı membran proseslerin sürücü kuvvetleri gösterilmektedir.

Çizelge 2. 4 Bazı membran proseslerin sürücü kuvvetleri [18].

Membran Proses	Faz Ayrımı	Sürücü Kuvvetler
Mikrofiltrasyon	S-S	Basınç
Ultrafiltrasyon	S-S	Basınç
Nanofiltrasyon	S-S	Basınç
Ters Osmoz	S-S	Basınç
Elektrodiyaliz	S-S	Elektriksel Potansiyel
Pervaporasyon	S-G	Basınç
İleri Osmoz	S-S	Osmoz
Diyaliz	S-S	Konsantrasyon
Membran Distilasyon	S-S	Buhar basıncı

Sürücü kuvvetlerin dışında, membranın kendisi seçiciliğin ve akının belirlenmesinde temel faktördür. Mikroskobik partiküllerin ayırımından özdeş boyut ve şekillerdeki moleküllerin ayırımını membranın yapısı ve malzemesi belirlemektedir.

Membran performansı ya da verimi;

- akı miktarı,
- membranın seçiciliği,
- alıkonma,

özelliklerine bağlıdır. Birim zamanda birim alandan geçen debi miktarı akı olarak tanımlanmakta ve birimi $L/m^2.sa$ olarak ifade edilmektedir. Membran seçiciliği, membrandan geçenlerin bir ölçüsüdür. Seçiciliğin yüksek olması istenir. Alıkonma ise membran tarafından tutulan kısmı ifade etmektedir [18].

2.5 Membran Sistemlerinde Akım Türleri

Membranlarda partikül maddelerin membran üzerinde tutulmasıyla oluşan kek tabakası süzüntü akısını düşürür. Ayrıca kek tabakasından basınç ile geçmekte olan süzüntünün de karakterini zamanla değiştirir. Bu sebeple membranın değiştirilmesi ya da yıkanması gerekir.

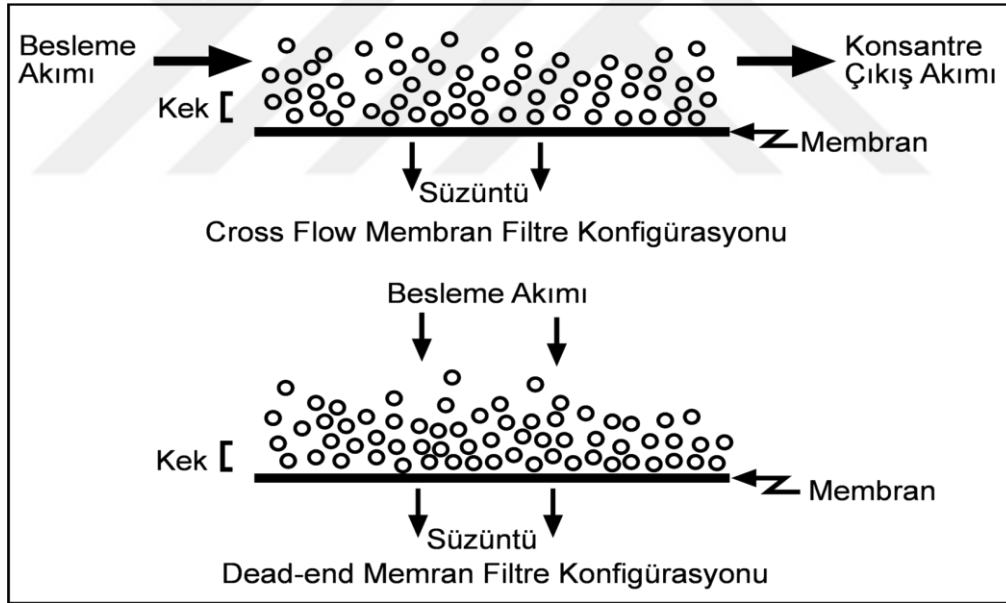
2.5.1 Klasik (Dead-end) Filtrasyon

Klasik filtrasyon sistemlerde akım membrana dik bir şekilde hareket etmektedir. Bu hareket sırasında partiküller veya askıda katı maddeler membran üzerinde tutunur ve birikirler. Bu birikme membran yüzeyinde ve gözeneklerde olmaktadır. Zamanla membran gözenekleri tıkanarak akının düşmesine neden olur. Bu şartlarda membranın değiştirilmesi ya da temizlenmesi gerekir. Membran gözenek boyutunun ve besleme çözeltisindeki maddelerin boyutlarının farklı olması, partiküllerin bir kısmının membran yüzeyinde tutulmasına engel olduğu için basıncın da etkisiyle gözeneklerde birikme olmaktadır. Filtrasyon verimi daha çok partikül boyutuna bağlıdır. 0,1-10 μm boyut aralığındaki sıvı ve gazların ayırımında kullanılan klasik filtrasyon, genellikle mikrofiltrasyonda tercih edilir. Klasik filtrasyon genellikle saflaştırma, berraklaştırma ve sterilizasyon için kullanılmaktadır [19].

2.5.2 Çapraz Akış Filtrasyon

Membranların büyük ölçeklerde ve daha uzun ömürlü kullanılabilmesi amacıyla tıkanma problemlerini azaltacak çapraz akışlı akım türünün kullanılması avantaj sağlamaktadır. Bu amaçla “cross flow” süzme işlemi olan metotta membran yüzeyine paralel olarak akan besleme akısı bulunmaktadır. Membrandan teğet olarak geçen besinin bir kısmı süzülürken diğer kısmı da sürekli akış sayesinde membran üzerinden uzaklaştırılacaktır. Böylece membran yüzeyinde sürekli bir akış olacağından membran yüzeyinde birikmeyi azaltacaktır [20].

Çapraz akıştan dolayı filtrasyon verimi membranın efektif yüzey özelliklerine göre değişmektedir. Çeşitli partikül boyutlarına sahip sıvıların ve değişen konsantrasyonların filtrasyonunda verimi yüksektir. Bu akış türünde saflaştırma ve katı minimizasyonunda daha iyi sonuçlar elde edilmektedir [21]. Şekil 2.2’de farklı membran süzme işlemleri gösterilmiştir.



Şekil 2. 2 Membran akım türleri şematik gösterimi [20]

2.6 Membran Teknolojileri

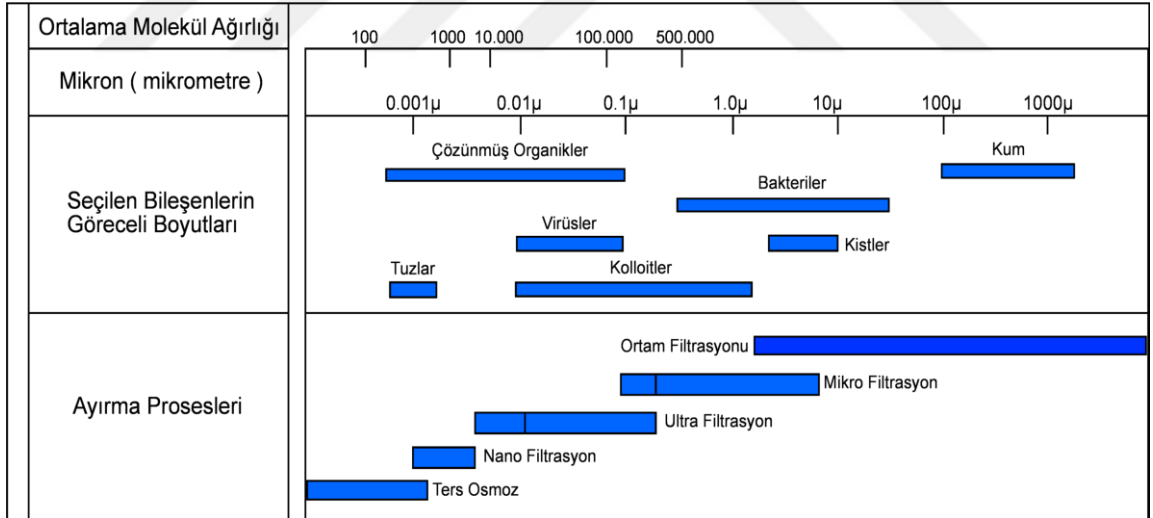
Membran, özelliğine göre bir bariyer olarak seçici geçirgenliği sayesinde faz ayrımı yapmaktadır. Sıvı içerisinde bulunan bileşenlerin bir kısmı membrandan geçerken bir kısmı da membran yüzeyinde tutulmaktadır. Bu geçiş itici kuvvetler ile sağlanır. İtici kuvvet olarak basıncı kullanan membran prosesler aşağıdaki gibidir [20].

- Mikrofiltrasyon (MF)
- Ultrafiltrasyon (UF)
- Nanofiltrasyon (NF)
- Ters Osmoz (RO)

Membranların seçiciliği membranın por boyutuna bağlıdır. En kaba membran mikrofiltrasyon (MF) partikül maddeleri geri çevirir. En seçici membran ise ters osmoz (RO), sodyum (Na^+) ve klorür (Cl^-) gibi yüklü iyonları tek başına tutabilmektedir. Bu iyonların çapları 1nm'den küçüktür [22].

Düşük basınçta çalışan MF ve UF daha çok partiküller ve mikrobiyal ürünlerin giderilmesi için; NF ve RO ise organik ve inorganik çözünmüş maddeler barındıran içme sularında kullanılır [20].

Şekil 2.3'te farklı gözenek boyutlarına göre sıvı içerisindeki farklı yapıda ve farklı molekül ağırlığında olan bileşenlerin RO, NF, UF ve MF membran ayırma sistemlerindeki yerleri gösterilmektedir.



Şekil 2. 3 Gözenek çapı, süzülen madde, molekül ağırlığı ve membran prosesleri arasındaki ilişki [20]

2.6.1 Mikrofiltrasyon (MF)

Basınç kuvvetiyle çalışan membranlar arasında en düşük verimle çalışan mikrofiltrasyon membranlardır. NF ve RO membranlar öncesinde ön arıtma olarak da

kullanılmaktadır. MF ve UF sistemlerin çalışma prensipleri aynıdır ancak membran gözenek boyutları nedeniyle tutulan maddelerin boyutları farklıdır. MF sistemlerin transmembran basıncı 0,7 bar'dır. 0,1-1 mikron arasında partikül boyutu olan maddeler uzaklaştırılır. Askıda katı maddeler, bakteriler ve büyük kolloidler membranda tutulurken makro moleküller ve çözünmüş maddeler membrandan geçmektedir. Ayrıca MF membranlarda tıkanma problemlerinin önüne geçme ve basınç kayıplarına karşı önlem açısından çapraz akışlı MF membranların kullanılması avantaj sağlamaktadır [20].

MF membranlar endüstride sterilizasyon, şarap ve bira hammaddelerinin ayrımı, saf su üretimi, yağ-su arıtımı için kullanılmaktadır [23].

2.6.2 Ultrafiltrasyon (UF)

UF membran MF membrana göre daha düşük por çapına sahip olduğu için daha yüksek basınçta çalıştırılır. UF membran 1-7 bar işletme basıncında çalıştırılabilir. UF membran ters osmoz ve NF membranlar için ön arıtma olarak kullanılabilir.

UF membran yardımıyla kolloidler, proteinler, büyük organik moleküller, mikrobiyolojik kontaminantlar uzaklaştırılabilen maddelerdir. Bütün çözünmüş tuzlar ve makromoleküller membrandan geçmektedir.

Tekstilde boyar maddelerin geri kazanımı, kağıt endüstrisinde ağartma atıksularının konsantre edilmesi, metal endüstrisinde yağ emülsiyonlarının konsantre edilmesi, tuzluluk giderimi gibi kullanım alanları mevcuttur [20], [23].

2.6.3 Nanofiltrasyon (NF)

Yüksek basınçta işletilen NF membranlar, sulardan 1 nm boyutundaki partikülleri uzaklaştırabilir. Nanofiltrasyonda molekül ağırlığı 200-400'den büyük olan moleküller ve çözünmüş tuzların %20-98'i sulardan uzaklaştırılabilir. Filtrasyon kalitesi RO ve UF arasında yer alır. Daha az geçirgen olan membran tabakasının göstermiş olduğu direnç sebebiyle MF ve UF membranlardan daha yüksek basınçta işletilir. Transmembran basıncı 3,5-16 bar'dır. NF ile tek değerlikli iyonlar, çok değerlikli iyonlar, yüzey sularında

renk ve toplam organik karbon, kuyu suyundan sertlik, gıda atıksularında organik kısmı uzaklaştırılabilir [20].

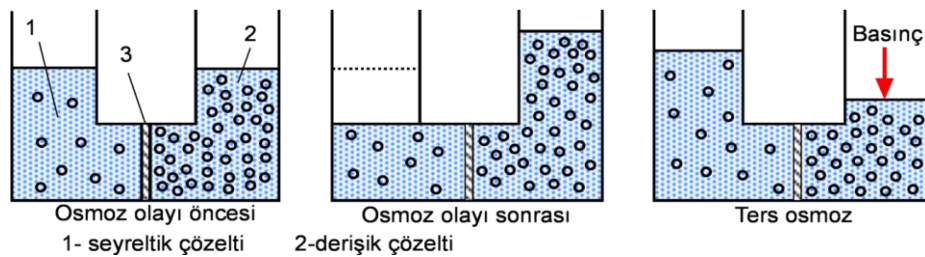
Koyuncu vd. [24] NF membran ile yaptıkları çalışmada KOİ, renk ve iletkenlik gideriminde % 97'nin üzerinde sonuçlara ulaşılmıştır.

Kullanım alanları genelde, kullanma ve içme sularının yumuşatılması, organik bileşiklerin tutulması, RO sistemler için bir ön arıtma olarak kullanımı, içme suyu arıtımı, peyniraltı suyundan laktoz ve proteinlerin ayrılması, tekstil ve kağıt endüstrisinin atık sularında renk giderimi, atıksulardaki tuz giderimi olarak sayılabilir [20], [24].

2.6.4 Ters Osmoz (RO)

İleri filtrasyon yöntemi olarak bilinen ters ozmos ile en yüksek seviyede süzme işlemi gerçekleştirilir. Özellikle koku, tat, renk, çözünmüş madde giderimi ve sertlik gideriminde yoğun olarak kullanılmaktadır. Elde edilen süzöntü diğer arıtmalara göre yüksek kalitededir. Sistemin çalışma prensibinin temelini osmoz oluşturur. Suyun saflaştırılması işleminde ozmotik dengenin tersine işleyebilmesi için ozmotik basınçtan yüksek basınca gerek duyulur [20].

Osmoz, suyun az yoğun ortamdan çok yoğun ortama geçmesidir. Ters osmoz ile bu işlem basınç yardımıyla tersine işletilerek suyun derişik olan çok yoğun ortamdan seyretilik olan az yoğun ortama geçmesi sağlanır. Yüksek basınç pompaları kullanılarak suyun membranlardan geçirilerek saflaştırılması sağlanır. Diğer taraftan tuz bakımından zengin olan kısım atıksu olarak atılır. Şekil 2.4'de ozmotik basınç ve ters osmoz çalışma prensibi gösterilmiştir.



Şekil 2. 4 Ozmotik basınç ve ters osmoz çalışma prensibi [17]

Ters osmoz sistemleri;

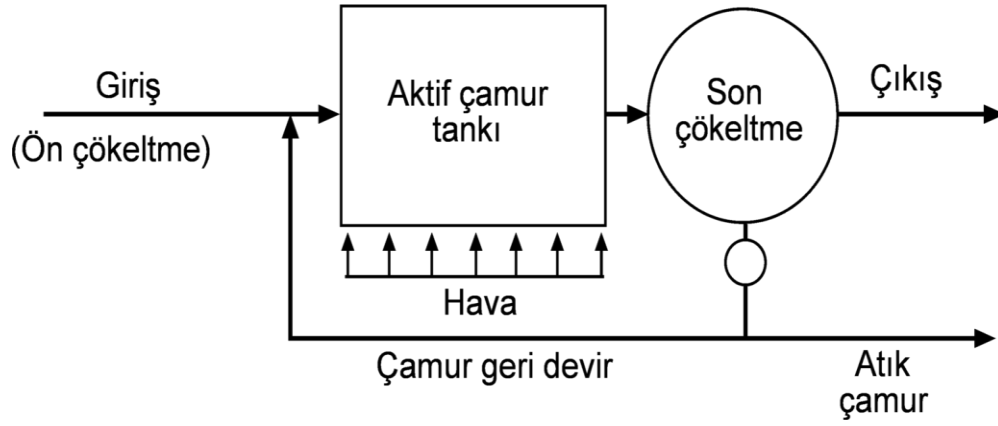
- Tuzlu deniz suyundan içme suyun eldesinde,
 - Endüstriyel işletmelerde çözünmüş tuz geri kazanımında,
 - Sanayide ve içme suyunda kaliteli su eldesinde,
 - Buhar kazanlarında kazan taşı oluşumunu önlemede,
 - Sulardaki sertliği gidermede,
 - Çok kirli atık suları arıtmada,
 - Konsantre meyve suyu ve salca eldesinde,
 - Toksin maddeleri ve mikroorganizmaları bertaraf etmede,
 - Ultra saf su eldesinde,
 - Laboratuvar/medikal sektörlerinde daha kaliteli su ihtiyacında,
- kullanılmaktadır [20].

2.7 Alternatif Bir Arıtma Teknolojisi Olarak MBR

MBR teknolojileri atıksu arıtımında giderek daha önemli bir yer tutmaktadır. Klasik aktif çamur proseslerine alternatif olan MBR sistemleri, arıtılmış su kalitesi, işletme kolaylığı ve güvenilirliği bakımından öne çıkmaktadır. Aktif çamur prosesleri genellikle endüstriyel atıksuların arıtımında kullanılmaktadır.

Polimer üretimi ve bununla birlikte membran teknolojisinin gelişmesiyle maliyetler azalmakta ve membran teknolojilerin kullanımına imkan sağlamaktadır. Hem içme suyu hem de atıksu arıtımı alanında tercih edilen arıtma teknolojilerinden olmaktadır. MBR sistemlerinin gelişen teknolojisi ile birlikte önemli adımlarla ilerleyeceği beklenmektedir [22], [26], [27], [28].

Klasik aktif çamur proseslerinde biyokimyasal oksidasyon iki ayrı tankta gerçekleşmektedir. Su/biyokütle ayrımı havalandırma tankında, sedimentasyon çöktürme tankı gerçekleşmektedir [1]. Şekil 2.5'te klasik aktif çamur prosesinin şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 2. 5 Aktif çamur prosesinin şematik görünümü [29]

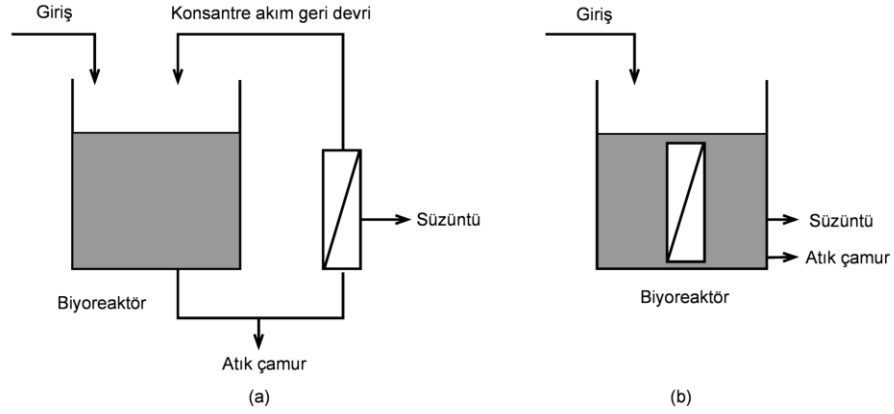
Membran biyoreaktör, klasik biyolojik atıksu arıtımı ile membran filtrasyonun kombinasyonundan oluşmaktadır. Aktif çamur ile arıtılan atıksunun ayrılmasının dışında MBR, konsept olarak klasik atıksu arıtma sistemlerine benzemektedir. Ayırma işlemi sedimantasyon yerine membran filtrasyon yardımıyla yapılmaktadır. Teknolojik ve biyolojik olarak MBR sistemleri ve klasik sistemler büyük farklılıklar göstermektedir [27].

MBR’da biyokimyasal oksidasyon tek bir tankta gerçekleştirilmektedir. Havalandırma difüzör yardımı ile yapılmakta ve aktif çamurun oluşumu sağlanmaktadır. Suyun içinde bulunan membranların gözeneklerinden vakum uygulanarak su çekme işlemi yapılmaktadır. Bunun sonucunda biyokütle ile arıtılmış su membran yardımıyla ayrılmaktadır.

Aerobik MBR’larda kozmetik, ilaç, metal fabrikaları, tekstil, mezbaha, süt, gıda, meşrubat, kağıt ve selüloz, kimyasal imalat gibi çeşitli endüstrilerin atıksularının arıtımında başarılı sonuçlara ulaşılmaktadır. Yüksek kalitede arıtılmış çıkış suyu veren MBR sistemlerinin karakteristik özelliklerinin içinde, katı giderimi, dezenfeksiyon, yüksek verimde organik ve nütrient giderimi de bulunmaktadır. Arıtılmış suyun kalitesi, yüksek oranda geri dönüşüm ve yeniden kullanım sağlamaktadır [26].

MBR’da biyokütle/sıvı ayrımı batık ve harici olarak gerçekleşmektedir. Ultrafiltrasyon (UF) ve mikrofiltrasyon (MF) membranlar çoğunlukla katıları ve mikroorganizmaları membran yüzeyinde tutarak diğer su ve çözünen türlerden ayırmaktadır. MBR sistemleri, klasik aktif çamur prosesine göre daha az yer kaplamaktadır ve bunun

yanında çamur üretimini de azaltmaktadır. Şekil 2.6'da harici ve batık MBR gösterilmektedir.



Şekil 2. 6 (a) Harici MBR, geri devirli ve biyoreaktörden ayrı konumlandırılmış filtrasyon ünitesi (b) Batık MBR, biyoreaktörün içine entegre edilmiş filtrasyon ünitesi [30]

Harici MBR sistemlerde membran havalandırma tankının dışında bulunmaktadır. Bu tip reaktörlerde karışık sıvı pompa yardımıyla membran modülüne pompalanmaktadır. Sıvı/katı ayrımı yapan membrandan geçemeyen biyokütlenin sisteme geri döndürülmesi suretiyle reaktör işletilmektedir.

Batık MBR sistemlerinde membran reaktörün içine yerleştirilmektedir. Bu tip reaktörlerde hollow fiber (ipliksi) ya da flatsheet (düz tabaka) membranlar kullanılmaktadır. Havalandırma ve arıtma aynı tankın içinde bulunmaktadır. Reaktörün içindeki membrandan arıtılmış su, pompa yardımıyla vakumlanarak çekilmektedir.

Batık membranlarda reaktörün tabanında bulunan difüzör yardımıyla kaba hava kabarcıkları verilerek biyokütlenin oksijen ihtiyacı karşılanmaktadır. Bununla birlikte membran yüzeyine ince hava kabarcıkları gönderilerek membran yüzeyinde biyokütlenin birikmesinin önüne geçebilmeye ve akının düşmesini engellemeye çalışılmaktadır [20].

Batık MBR'lar düşük akı ile çalıştırıldığından daha fazla membran yüzey alanı gerektirmektedir. Buna rağmen orta ve büyük ölçekli kentsel atıksu arıtımı için tercih edilmektedir [31]. Çizelge 2.5'te dahili/batık ve harici MBR sistemlerin karşılaştırılması gösterilmiştir.

Çizelge 2. 5 Dahili/batık ve harici MBR karşılaştırılması [20]

Dahili/Batık MBR	Harici MBR
Yüksek havalandırma masrafı	Düşük havalandırma masrafı
Düşük pompaj masrafı	Yüksek pompaj masrafı
Düşük akı (büyük alan gereksinimi)	Yüksek akı (küçük alan gereksinimi)
Daha nadir temizleme ihtiyacı	Daha sık temizleme ihtiyacı
Düşük işletme maliyeti	Yüksek işletme maliyeti
Yüksek ilk yatırım maliyeti	Düşük ilk yatırım maliyeti

Harici MBR’lerde bulunan geri dönüşüm aşamasından dolayı batık MBR’lere göre daha yüksek enerji maliyeti gerektirmektedir. Batık MBR’ler ise hem enerji hem de temizleme ihtiyaçları bakımından daha verimli bir şekilde çalışma imkanı sunmaktadır [30].

2.7.1 MBR’ların Gelişimi

MBR sistemler klasik aktif çamur sistemlerin gelişmiş halidir. Uzun zamandır kullanılmakta olan bu sistemin 3 temel nesli ortaya çıkmıştır. 1. nesil MBR’ler daha çok küçük debiler için kullanılmıştır. İşletme kolaydır ve yüksek SRT sayesinde biyolojik olarak kararlı bir sistemdir. Yüksek kalitede çıkış suyu, seyrek çamur atımı ve az değişken çıkış suyu sistemin avantajlarından [32]. Çizelge 2.6’da MBR’lerin tasarım kriterlerine göre gelişimi gösterilmiştir.

Çizelge 2. 6 Tasarım kriterlerine göre MBR’lerin gelişimi [32]

Parametre	1. nesil	2. nesil	3. nesil
SRT (gün)	50+	20+	< 10 - 15
MLSS (mg/L)	20000+	20000	10000
NH ₃ giderimi	Var	Var	Var
Toplam azot giderimi	Yok	Var	Var
Fosfor giderimi	Yok	Var	Var

2. nesil MBR'lerde azot ve fosfor gideriminin eklenmiştir. Yüksek MLSS değerlerinin olumsuz etkilerini azaltabilmek için SRT azaltılmıştır. Çıkış fosfat konsantrasyonlarında 0,1 mg/L'den düşük sonuçlar elde edilmiştir. 3. nesil MBR'lerde membran akısını, sistem verimini arttırmak, daha düşük SRT ve MLSS değerlerinde işletebilmek hedeflenmiştir [32].

Günümüzde sistem kapasitelerinin arttırılması, büyük debilerde çalışabilmek, membran kirlenme problemlerinin önüne geçebilmek, işletme maliyetlerinin düşürülmesi temel hedefler arasındadır. Önemli bir konu olan atık çamur yönetimi ise çamur stabilizasyonu, susuzlaştırma ya da araziye serpme ile sonuçlandırılmaktadır. Klasik sistemlere göre az da olsa MBR sistemlerinde çamur atımı söz konusu olduğundan bu çamurun yönetilmesi de yeni nesil sistemlerde araştırma konusudur.

2.7.2 MBR Sistemlerin Klasik Aktif Çamur Sistemlere Göre Avantajları

MBR'lerin klasik aktif çamur sistemlere göre bazı avantajları vardır. Bunların arasında güvenilirlik, etkin çalışma ve en önemlisi yüksek kalitede arıtılmış su eldesi bulunmaktadır. Su içerisindeki atıklar, yağlar, kumlar, organik ve inorganik maddeler, fosfor içeren amonyak bileşiklerinin giderilmesi ve çamurun yeterince yönetilmesini sağlamaktadır. MBR'lerin en önemli avantajlarından biri de su/biyokütle ayrımı yapılırken biyokütlenin çökebilme özelliğinden bağımsız çalışmasıdır. Böylece klasik aktif çamur sistemlerindeki son çökeltme havuzlarında büyük sorun teşkil eden çökelmeyen çamur problemlerinden ve bunun sebep olacağı diğer olumsuz durumlardan uzak çalışılmaktadır [33].

Yüksek biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ) giderimi, ıslah edilmesi zor atıklara uygulanabilirliği, düşük çamur üretimi, üstün atıksu dezenfeksiyonu, yüksek yükleme hızı, yüksek nütrient giderim kararlılığı ve daha az kirli çamur üretimi avantajları sunmaktadır. Bu avantajlar ekonomik ve membran kirlenme problemleri açısından önem taşımaktadır [34].

MBR'larda biyolojik askıda katı madde (MLSS) konsantrasyonları çok yüksek değerlere ulaşabildiği için arıtma için gereken hidrolik bekleme süresi (HRT) klasik aktif çamur sistemlerine göre düşüktür. Düşük HRT gereksinimi ile tasarlanacak havalandırma

havuzunun hacmi azalmakta ve bununla birlikte ilk yatırım maliyeti azalmaktadır. Bu şartlarda sistemi işletme daha elverişli olmaktadır [22], [28].

Klasik aktif çamur sistemlerindeki gibi son çökeltme tankına ihtiyaç olmadığından daha az yer gereksinimi MBR'larda maliyetlerin düşmesi adına avantaj sağlamaktadır. Fazla çamur yaşında işletme imkanı sunmaktadır. Yüksek SRT değerlerinde nitrifikasyon ve toksik organik maddelerin biyolojik ayrışması daha etkin bir şekilde olmaktadır. MBR sistemlerin yüksek MLSS değerlerinde çalışması fazla ve ani organik yüklemelere karşı tolere edebilmesini sağlamaktadır [20]. Ayrıca klasik sistemlerde biyokütlenin çeşitli sebeplerden dolayı iyi çökmemesiyle son çökeltme tanklarında savaklardan AKM kaçma ihtimali bulunmaktadır ancak MBR'larda böyle bir problem oluşmamaktadır.

2.7.3 MBR Sistemlerin Dezavantajları

Membran biyoreaktör arıtma sistemleri tek bir tank içinde gerçekleştiği için karmaşık bir yapıda olup kontrol edilmesi klasik aktif çamur sistemlerine göre daha zor olmaktadır. Ancak %100 otomasyon sistemi ile işletme kolaylaşmaktadır. Zamanla membran gözenekleri tıkanmakta ve arıtılmış su miktarı (akı) azalmaktadır. Tıkanmayı önlemek için belirli aralıklarla hava, su ve kimyasallarla (sitrik asit, sodyum hipoklorit gibi) temizleme işlemi yapılmaktadır [31].

MBR sistemlerde işletme maliyetleri ve yüksek membran yenileme maliyetleri ve havalandırma için yüksek enerji gereksinimi oluşmaktadır [34]. Membran tıkanmalarının önüne geçmek ve membranları uzun vadede kullanabilmek için membran teknolojisinin gelişimi üzerindeki çalışmalar bu olumsuz durumları ortadan kaldırmaktadır.

2.7.4 Membran Tıkanması

Arıtma teknolojilerinin geliştirilmesiyle birlikte en çok araştırılan konulardan biri de membran kirlenme problemleri olmaktadır. MBR sistemlerin diğer arıtma yöntemlerine göre birçok avantajının yanında işletme sırasında en önemli sorunlardan biri olarak membran tıkanması ile karşılaşılmaktadır. Membran, çok küçük partiküllerin membran yüzeyinde jel/kek tabakası oluşturması ve porlarında birikmesiyle işlevsiz hale

gelmektedir. Membran tıkanmasının en temel belirtileri ise akı değerinin düşmesi yani temiz su üretiminin azalması ve basınç (TMP) değerlerinin yükselmesi olmaktadır.

Membran tıkanmasının farklı nedenleri bulunmaktadır. Beslemenin akış hızı ve yönü, sıvı içerisindeki konsantrasyon miktarına bağlı olarak değişmektedir [20]. Çeşitli MBR'ların performansları, kirlenme eğilimlerine, organik madde ve mikroorganizmaların giderimine bakılarak değerlendirilmektedir [30].

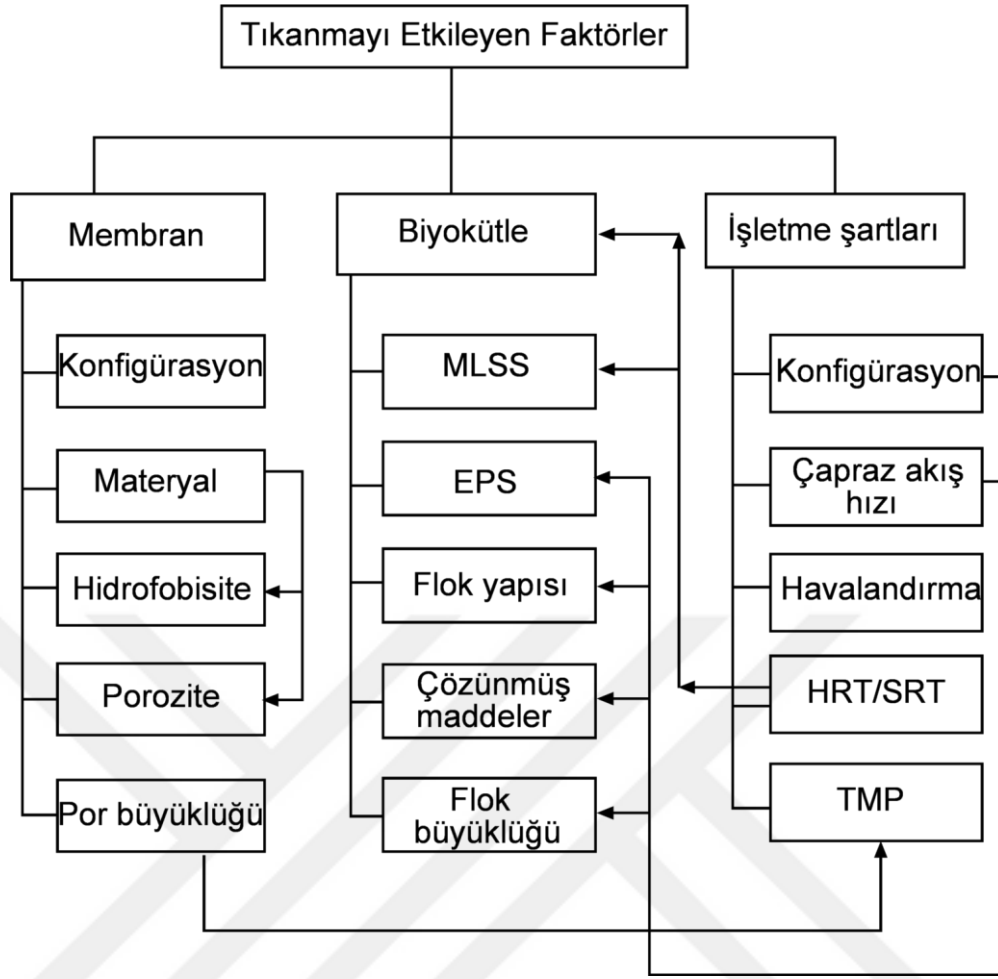
Kirlenmeyi etkileyen birçok faktör vardır. Bunların arasında dört temel sebep şunlardır;

- membran materyalinin özellikleri,
- biyokütle karakteri,
- beslenen atıksuyun karakteri,
- işletme koşulları

Bunlar arasından aktif çamur karakteri ve hidrodinamik koşullar direkt olarak, işletme koşulları (SRT, HRT, F/M vs.) ve beslenen atıksuyun karakteri ise dolaylı olarak aktif çamur karakterini değiştirerek kirlenmeye etki etmektedir [35],[36].

MBR'lar KOİ ve BOİ konsantrasyonları yüksek olan atıksuların arıtımında oldukça başarılı olmakla birlikte diğer membranlarda olduğu gibi tıkanma problemleri ile karşılaşmakta bu da performans düşüşlerine sebep olmaktadır. Kirlenme, membranın hidrolik dayanıklılığının artmasından sorumlu tutulmaktadır. Kirlenmeyi azaltmak için türbülanslı koşulları sağlamak ve sürdürmek, kritik akının altında işletmek ya da kirlenmeye dayanıklı membran seçmek gibi çözümler uygulanmaktadır [30], [37].

Kritik akı değeri, membran karakterine (por çapı, porozite, materyal cinsi), süspansiyonun özelliklerine (partikül boyut dağılımı, konsantrasyon), hidrodinamik sirkülasyona filtrasyon koşullarına bağlıdır [38]. Orginer vd. tarafından yapılan çalışmada filtrasyon koşulları kritik akının altında seçilmesine rağmen membranda kademeli olarak kirlenme görülmüştür. Kirlenmenin biyolojik kültürün koşullarına, membran materyalinin karakterine ya da trans-membran basıncının değişikliklerine bağlı olabileceği düşünülmektedir. Şekil 2.7'de membran tıkanmasını etkileyen faktörler verilmiştir.



Şekil 2. 7 Membran tıkanmasını etkileyen faktörler [28], [37]

Kirlenmenin önüne geçebilmek için kirlenmeye etki eden faktörleri tespit edip, hangi şartlarda ve ne ölçüde etki ettiklerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Membranın por boyutu, porozitesi, yüzey yükü, pürüzlülüğü ve hidrofobisitesi gibi karakteristik özellikleri membran kirlenmesi konusunda MBR performansı kapsamında araştırılan ve geliştirilen konulardan olmaktadır [35].

Son yıllarda literatürde de belirtildiği gibi kirlenme üzerine etkisi olduğu düşünülen ekzopoliperik maddeler (EPS) ve çözülmüş mikrobiyal ürünler (SMP) üzerindeki çalışmalar artmaktadır. Birçok araştırma gösteriyorki EPS, membran kirlenmesinde büyük rol oynamaktadır. SMP'nin karbonhidrat fraksiyonu ise kirlenmenin ana faktörü olarak bilinmektedir [36].

BÖLÜM 3

MATERYAL VE METOT

Süt endüstrisi atıksularının batık membran sisteminde arıtılabilirliği bu tez kapsamında incelenmiştir. Çalışmada kullanılan laboratuvar ölçekli batık membran biyoreaktör (MBR) sistemi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü Çevre Laboratuvarında kurulmuştur. Yüksek KOİ yüküne sahip süt endüstrisi atıksularının etkin bir şekilde arıtılabilirliğinin incelenebilmesi maksadıyla İstanbul'da bulunan bir süt işleme endüstrisinden alınan gerçek atıksu ile deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda çeşitli kirlilik parametrelerinin giriş ve çıkış değerleri izlenmiştir. Laboratuvar ölçekli deney düzeneği Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3. 1 Laboratuvar ölçekli MBR sisteminin görünümü

Kurulan MBR sisteminde aktif çamurdaki çözünmüş oksijen, sıcaklık, pH günlük olarak izlenmiştir. Arıtılmış su miktarı sürekli takip edilmiş, gerektiğinde membran yıkanarak veya pompa hızı değiştirilerek sistemin sabit akıda çalışması sağlanmıştır. Belirli aralıklarla alınan arıtılmış su numuneleri KO_2 , NH_3 , NO_3^- , PO_4-P , analizleri ve belirli aralıklarla alınan aktif çamur numuneleri MLSS, MLVSS, SVI, CST, hidrofobisite, EPS-SMP analizlerine tabi tutulmuştur.

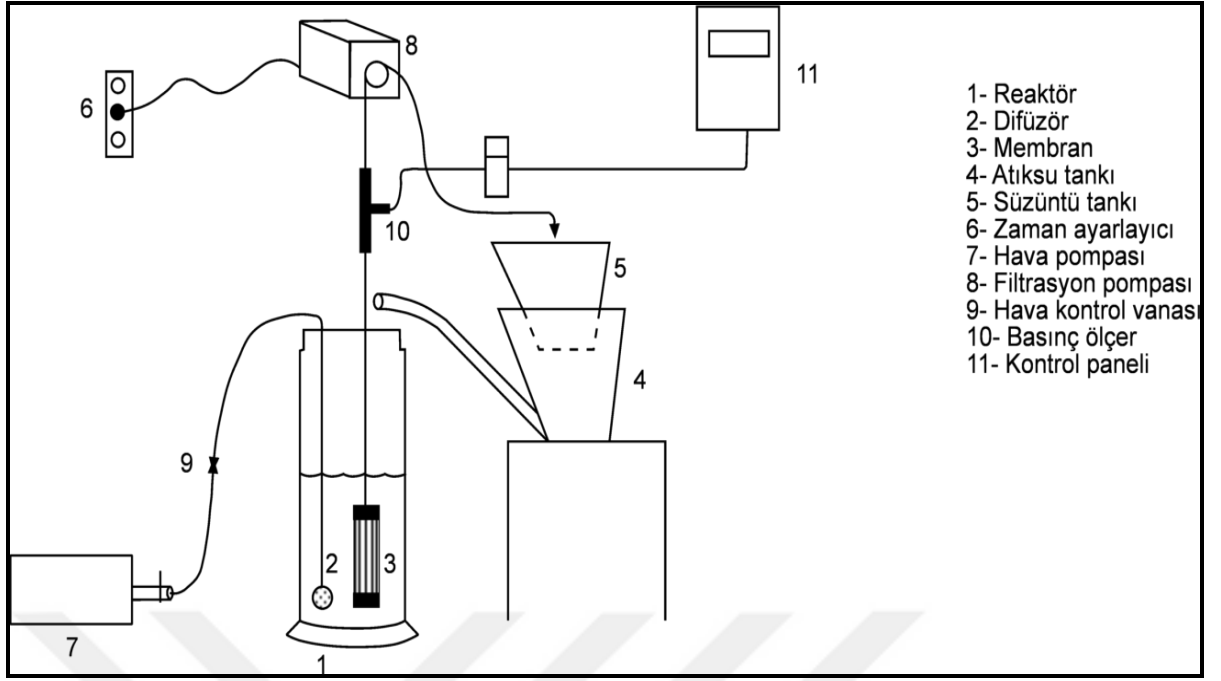
3.1 Kullanılan Atıksu

Çalışmalarda atıksu olarak İstanbul'da bulunan, yoğurt ve ayran üretimi yapan bir fabrikanın atıksuları kullanılmıştır. Çalışma boyunca fabrikadan iki farklı zamanda atıksu temin edilmiştir. Atıksu alındıktan sonra laboratuvara getirilerek 4°C'de muhafaza edilmiştir. Atıksu laboratuvara getirildikten sonra karakterizasyon çalışmaları kapsamında KO_2 , TKM, TUKM, NH_3 , PO_4-P , NO_3^- , alkalinite, iletkenlik, renk, pH değerleri ölçülmüştür. Kurulan MBR sistemi sürekli olarak bu atıksu ile beslenmiştir.

3.2 Deney Sistemi ve İşletme Şartları

Laboratuvar ölçekli sistem (Şekil 3.2) hacmi 2L olan silindirik reaktör, havalandırmanın reaktör içinde homojen dağılımını sağlamak için bir difüzör, bir membran, 4L besleme tankı, 4L süzüntü tankı, sistemin oksijen ihtiyacı için bir hava pompası, reaktörden membran yardımıyla su çeken peristaltik pompa, otomasyona bağlı bir basınç ölçer sensör ve bağlantı ekipmanlarından teşkil edilmiştir.

MBR sisteminde çözünmüş oksijen, pH, sıcaklık, arıtılmış su miktarı, membran basıncı, membran akısı sürekli kontrol edilen parametreler olarak belirlenmiştir. Sistemde sürekli olarak ölçülen çözünmüş oksijen değeri 1,1-5,7 mg/L, sıcaklık 19,1-28,1°C aralığında, pH 8,52-8,82 aralığında ve süzüntü akı değeri ise 3 L/m²sa değerinde tutulmuştur. Sistem, zaman ayarlayıcı priz kullanılarak 30 dk/sa (15dk + 15dk) şeklinde çalıştırılmıştır. Organik yükleme (L_{ORG}) 3,5 kg/m³gün olacak şekilde ayarlanmıştır. Sistem sonsuz SRT ve 33,33 sa HRT ile çalıştırılmıştır. Membran basıncı da günlük olarak takip edilmiştir. Reaktörün boyutlarının küçük olmasından ve bakteri popülasyonunun hızlı artışından dolayı membran tıkanmasının gerçekleştiği durumlarda membran yıkama işlemleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. 2 MBR ünitesinin akım şeması

3.3 Inoculum

Bu çalışmada laboratuvarda bulunan sentetik atıksu ile beslenen başka bir MBR sisteminden alınan aktif çamur kullanılmıştır. 25 gün süt atıksuyu ile beslenen mikroorganizmaların yeni atıksuya alışması beklenmiştir. Mikroorganizmaların kısa sürede süt atıksuyuna adapte oldukları MLSS değerlerinden anlaşılmıştır.

3.4 Kullanılan Membran ve Hazırlanışı

Reaktörde $0,01 \text{ m}^2$ yüzey alanına sahip $0,4 \mu\text{m}$ gözenek boyutlu silindirik güçlendirilmiş hollow fiber mikrofiltrasyon membran kullanılmıştır. Membran, hidrofilik PVDF malzemeden yapılmış olup 2 mm dış çapa ve 1 mm iç çapa sahiptir (Şekil 3.3).

Etkin filtre edebilir kısmı 70 mm uzunluğunda 23 adet membran kesilerek hazırlanmıştır. Silikon yardımıyla bir tarafı kapalı diğer tarafı açık tutulmak suretiyle membranlar birbirlerine tutturulmuştur.

Reaktör içinde batık halde olan hollow-fiber membranın iç kısmından emiş suretiyle süzme işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. 3 Hollow fiber membran modülü yapım aşaması

3.5 Analitik Yöntemler

3.5.1 Karakterizasyon

Süt ve yoğurt üretimi gerçekleştiren fabrikadan farklı zamanlarda alınan atıksuyun karakterizasyon analizleri APHA tarafından önerilen Standart Metotlara göre yapılmıştır [39]. Karakterizasyon kapsamında KOİ, NH₃, NO₃⁻, PO₄-P, TKM, TUKM, pH, iletkenlik, alkalinite ve renk parametrelerine bakılmıştır.

3.5.2 İzleme Analizleri

KOİ (Kimyasal Oksijen İhtiyacı) Analizi

Karakterizasyon ve arıtılabilirlik kapsamında KOİ analizi titrimetrik metoda göre (Standart Metot 5520C) tayin edilmiştir [39]. İlgili hesaplama denklemi Denklem 3.1'de sunulmuştur.

$$KOİ \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(A - B) \times 8000 \times M_{DAS}}{ml \text{ numune hacmi}} \quad (3.1)$$

A: Şahit için DAS sarfiyatı (ml)

B: Numune için DAS sarfiyatı (ml)

M_{DAS}: Standart demir amonyum sülfat (DAS) çözeltisinin molaritesi

MLSS Analizi

MLSS analizinde kullanılan filtre kağıtları alüminyum tartım kaplarına konularak önceden 105 °C'ye getirilen etüvde, ardından 30 dk desikatörde bekletilir. Buradan alınan filtre kağıtları tartılır ve ilk tartım değeri (m_1) olarak kaydedilir. Reaktörün içinden alınan ve manyetik karıştırıcıda homojenlik sağlamak için karıştırılan aktif çamur numunesinden pipet yardımıyla 5 mL alınarak filtre kağıdını süzme mekanizması üzerine yerleştirilen 0,45 µm'lik filtre kağıdının üzerine boşaltılarak süzme işlemi gerçekleştirilir. Tekrar alüminyum kaplar üzerine alınarak 1 saat boyunca 105 °C'de ve ardından 30 dk desikatörde bekletilir. Desikatörden alınan filtre kağıtları tekrar tartılır ve ikinci tartım (m_2) olarak kaydedilir [39]. Denklem 3.2'ye göre hesaplama yapılır.

$$MLSS \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(m_2 - m_1)}{mL \text{ numune hacmi}} \times 10^6 \quad (3.2)$$

MLVSS Analizi

MLSS analizinde son tartımı yapılan filtre kağıtları kül fırınında 550 °C'de 30 dk yakılan filtre kağıtları 30 dk desikatörde bekletildikten sonra tartılır ve değer üçüncü tartım (m_3) olarak kaydedilir. Böylece MLVSS değeri gravimetrik olarak belirlenmiş olur [39]. Denklem 3.3'e göre hesaplama yapılır.

$$MLVSS \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(m_3 - m_2)}{mL \text{ numune hacmi}} \times 10^6 \quad (3.3)$$

SVI (Çamur Hacim İndeksi)

Çamur hacim indeksi hesaplamak için reaktörden alınan 100 ml çamur mezüre doldurulur. 30 dk beklenir ve çöken çamur hacmi kaydedilir ve Denklem 3.4'e göre hesaplama yapılır.

$$SVI \left(\frac{mL}{g} \right) = \frac{\text{Çöken çamur hacmi (mL/L)}}{MLSS(g/L)} \quad (3.4)$$

Amonyak Analizi

Standart Metot 4500-NH₃ Distilasyon yöntemi ile numunedeki amonyak azotu borik asidin içinde amonyum iyonu olarak hapsedilir. Amonyak 0,02 N H₂SO₄ kullanılarak titrimetrik olarak tespit edilir [39].

$$[NH_3] = \frac{S}{mL \text{ numune hacmi}} \times 280 \quad (3.5)$$

S: Sülfürik asit sarfiyatı

Ortofosfat Tayini

Ortofosfat kolorimetrik olarak amonyum molibdat kullanılarak Standart Metod 4500-P C'ye göre analiz edilmiştir. Okumalar Varian Cary marka 50 UV-Vis Spektrofotometre ile gerçekleştirilmiştir [39].

Nitrat Tayini

Merck marka Nova 60 spektrofotometresinde uygun Nitrat kiti kullanılarak yapılmıştır.

Sıcaklık, Çözünmüş Oksijen, pH, İletkenlik

Karakterizasyon çalışmaları ve reaktörün işletilmesi kapsamında pH; elektrometrik metoda (Standart Metot 4500-H+) göre WTW-PH/COD 340i model pH metre ile ölçülmüştür [39].

Çözünmüş oksijen ve sıcaklık değerleri membran elektrot metoduna (Standart Metot 4500-O) göre WTW marka Oxi 3205 model oksimetre probunun numuneye daldırılması ile numunedeki çözünmüş oksijen ve sıcaklık miktarı belirlenmiştir [39].

İletkenlik Thermo Scientific marka ORION 5 STAR model cihaz ile ölçülmüştür (Şekil 3.4).



Şekil 3. 4 Thermo Scientific Orion 5 Star multiparametre cihazı

Toplam Katı Madde

Atıksu numunesi içinde çökebilen ve çökemeyen maddeler toplam katı madde miktarını verir. Önceden 1 saat 105°C’de bekletilen krezeler 30 dk desikatörde bekletilir. Sonra ilk tartımları (m_1) alınır. 50 mL iyice karıştırılmış atıksu numunesi krezelere koyulur. Sıvı kısmı buharlaşana kadar su banyosunda 95°C’de bekletilir. Tekrar 1 saat etüvde bekleme alınır, ardından 30 dk desikatörde bekletilir ve ikinci okuma (m_2) gerçekleştirilir.

$$TKM \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(m_2 - m_1)}{mL \text{ numune hacmi}} \times 10^6 \quad (3.6)$$

Toplam Uçucu Katı Madde

TKM analizinde ikinci tartımı yapılan krezeler 550°C’de kül fırınında 30 dk yakılarak ardından 30 dk desikatörde bekletilir ve üçüncü tartım (m_3) alınır.

$$TUKM \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(m_3 - m_2)}{mL \text{ numune hacmi}} \times 10^6 \quad (3.7)$$

Alkalinite

Standart Metot 2320 B’ye göre, volumetrik olarak 0,02 N H₂SO₄ çözeltisi ile titre ederek ölçülmüştür [39]. Karıştırılarak alınan 20 mL atıksuya 50 mL ultra saf su eklenerek karışımın pH değeri 4,5’in altına düşene kadar titre edilir. Hesaplama Denklem 3.8’e göre yapılır.

$$Alkalinite \left(mg \text{ CaCO}_3 / L \right) = \frac{A \times N \times 50000}{mL \text{ numune hacmi}} \quad (3.8)$$

A: ml H₂SO₄ sarfiyat (mL)

N: standart asidin normalitesi

Renk Analizi

Hazen Pt-Co (Standart Metot 2120) renk ölçüm yöntemi ile Şekil 3.5'te verilen Merck marka Nova 60 spektrofotometre cihazında ölçüm yapılmıştır [39].



Şekil 3. 5 Spektroquant Nova 60 kolorimetre

Kapiler Emme Süresi (CST)

Bu analiz Şekil 3.6'da verilen Triton marka (CST) TYPE 304 M Capillary Suction Timer cihazı ile ölçülmüştür. Reaktörden alınan aktif çamur numunesi manyetik karıştırıcıda karıştırılırken pipet yardımıyla 6,4 mL alınarak cihazın haznesine boşaltılır. Cihazda okunan değer kaydedilir.



Şekil 3. 6 CST cihazı

Hidrofobisite

MATH (Microbial Adhesion to Hydrocarbons) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde mikroorganizmaların yüzey hidrofobisitesi n-hekzadekan ile tespit edilmiştir. Bakteri süspansiyonu elektrostatik etkenli hataları azaltmak için Tris-HCL tamponu (pH=7,1) ile birkaç kez yıkanmaktadır [40]. Karıştırılarak alınan 2 mL aktif çamur, önceden nitrik asitte (% 0,3) bekletilen ve saf su ile yıkanıp kurutulan falkon tüplerine aktararak üzerine 18 mL Tris-HCL tamponu eklenip 3000 rpm’de 20 dk santrifüj edilir. Bu yöntemde Hettich marka Rotofix 32A cihazı kullanılmıştır. İlk santrifüj sonunda falkon tüpünde yüzeyde kalan sulu kısımdan 18 mL atılır ve yerine 18 mL Tris-HCL eklenir. Çamur çekmemek için dikkat edilir. İkinci kez 3000 rpm’de 20 dk santrifüj yapılır. Daha sonra tüpte 6 mL bakteri süspansiyonu bırakacak şekilde yüzeydeki süpernatant kısmından 14 mL atılarak okuma işlemine geçilir. Karıştırılarak hücreye alınan 3 mL numune 600 nm dalgaboyunda okunur ve ilk okuma (X_{ilk}) olarak kaydedilir. Hücredeki numune falkon tüpe tekrar aktarılır. Falkon tüpe 0,6 mL n-hekzadekan eklenerek karışım 2 dk karıştırılır. Bu işlem Nuve NM 110 marka vortex cihazı ile yapılır. Numunenin son hali 15 dk bekletilerek n- hekzadekan ile oluşan faz ayrımından yararlanılarak tüpün dibinde kalan çamur kısmından 3 mL hücreye aktararak ikinci okuma (X_{son}) gerçekleştirilir ve değer kaydedilir. Okumalar Şekil 3.7’de verilen Varian Cary marka 50 UV-Vis Spektrofotometre ile gerçekleştirilmiştir. Analiz hesabı Denklem 3.9’daki formül ile yapılmıştır.

$$\text{Hidrofobisite (\%)} = 100 \times \left(1 - \frac{X_{son}}{X_{ilk}}\right) \quad (3.9)$$



Şekil 3. 7 Hidrofobisite analizinde kullanılan santrifüj cihazı

Ekstraselüler Polimerik Maddeler (EPS) – Çözünmüş Mikrobiyal Ürünler (SMP)

EPS analizi için standart bir metot bulunmaktadır. En çok kullanılan formaldehit ekstraksiyon metodu ile analizler yapılmıştır [41]. Bu analizde karıştırılarak alınan numunede aktif çamurun, santrifüj yardımıyla çöktürülerek süpernatant kısmının ayrıştırılması sağlanmıştır. Daha sonra elde edilen süpernatantlar protein ve karbonhidrat analizlerinde kullanılmıştır. Önceden nitrik asitte (% 0,3) bekletilen ve saf su ile yıkanıp kurutulan ardından otoklavda 2 saat bekletilen 24 adet ependorf tüpüne 1'er mL karıştırılan aktif çamur numunesinden doldurulur. 4000 rpm 4°C'de 10 dk santrifüjlenir. Üst fazdan alınan sıvı başka ependorf tüplerine aktarılır. Alt fazdaki aktif çamurdan almamaya dikkat edilir. Üst fazlar 13200 rpm 4°C'de 20 dk santrifüjlenir. Bu işlem sonrasında tüplerin üst fazından toplanan, temiz ve kuru falkon tüplere konulan bu sıvı SMP'dir. Bu yöntemde Hettich marka Universal 12R santrifüj cihazı kullanılmıştır. İlk santrifüj sonunda ependorf tüplerinin dibinde kalan aktif çamur üzerine 1 mL saf su ve 1,2 µL %37'lik formaldehit eklenerek çalkalanır ve 1 saat dolapta soğutulur. Dolaptan alınan tüplere 100 µL 1 N NaOH eklenerek çalkalanır ve 3 saat dolapta bekletilir. 3 saat sonra dolaptan alınan numuneler 13200 rpm 4°C'de 20 dk santrifüjlenir. İşlem sonrasında tüplerin üst fazından toplanan, temiz ve kuru falkon tüplere konulan bu sıvı ise EPS'dir. Elde edilen EPS ve SMP sıvıları protein ve karbonhidrat analizi için soğuk odada bekletilir.

Protein Analizi (Lowry Metodu)

Lowry metoduna göre gerçekleştirilen deneyde kullanılan 50 mL'lik erlenler önceden nitrik asitte (% 0,3) bekletilir ve saf su ile yıkanıp kurutulur. EPS-SMP analizinin yapıldığı günün çıkış süzöntü numunesi kullanılır. 3'er mL numulardan erlenlere aktarılıp üzerine 4,2 mL Lowry çözeltisi eklenerek karıştırılır. Oda sıcaklığında ve karanlıkta 20 dk bekletilir. Daha sonra 0,6 mL folin eklenerek karıştırılır. Oda sıcaklığında ve karanlıkta 30 dk bekletilir. 660 nm dalgaboyunda spektrofotometrede okuma işlemi yapılır.

Numuneler iki tekrarlı olarak hazırlanır ve şahit numune için ultra saf su kullanılır. EPS ve SMP sıvıları ham halde, 2 ve 5 kat seyrelterek ayrı ayrı ölçüm yapılır.

Lowry çözeltisi: Protein A/B/C 100/1/1 ml oranında bir balon jode karıştırılır. Bu çözelti analizin yapılacağı aynı gün hazırlanmalıdır.

Protein A: 2,86 gram NaOH ve 14,31 gram Na_2CO_3 saf suda çözülerek 500 mL'ye tamamlanır.

Protein B: 1,42 gram $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 100 mL saf suda çözülür.

Protein C: 2,85 gram Na_2 Tartarat $2\text{H}_2\text{O}$ 100 mL saf suda çözülür.

Karbonhidrat Analizi

Fenol-sülfirik asit metoduna göre gerçekleştirilen bu deney yapılırken önceden nitrik asitte (% 0,3) bekletilen ve saf su ile yıkanıp 103-105°C'de etüvde kurutulan KOİ tüpleri kullanılır. EPS-SMP analizinin yapıldığı günün çıkış süzöntü numunesi kullanılır. 2'şer mL tüplere konularak üzerine %80'lik 50 μL fenol ilave edilir. Son olarak 5 mL sülfirik asit eklenerek 30°C'de 15 dk su banyosunda bekletilir. Numuneler oda sıcaklığına gelince 490 nm dalgaboyunda spektrofotometrede okuma işlemi yapılır [42].

Kritik Akı

Kritik akı, modül efektif alanı 0,00176 m^2 olan PVDF malzemeden yapılmış olan 0,2 μm gözenek boyutuna sahip düz tabaka (flat sheet) membran modülü reaktöre daldırılarak adım metoduna göre gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.6). Flat sheet membran, reaktörden su çeken iletim hattı ile birleştirilir ve reaktörün içine daldırılır (Şekil 3.8). Tamamen suda batık halde olduğundan ve reaktörün içinden peristaltik pompa yardımıyla su çekilen iletim hattının tamamen boş olduğundan emin olduktan sonra 30 dakikalık periyotlarla çekilen ve mezürde biriktirilen suyun miktarı kaydedilir. Çekilen su tekrar reaktöre boşaltılır ve membran saf su ile yıkanarak tekrar iletim hattına bağlanır. Pompa hızı 1 rpm'de başlatılıp her 30 dk sonra arttırılır. Böylece farklı akı ($\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{sa}$) değerleri denenir. İlerleyen her dakikada membran basıncının en yüksek değeri otomasyon sisteminden okunarak bilgisayara kaydedilir. Bu sırada zamana bağlı TMP – akı aynı grafik üzerinden takip edilir. Bu işlem TMP değerinin aynı akıda, ani sıçramalarını gözlemleyene kadar devam eder. Ani sıçramanın olduğu akı değerinin altında kritik akı seçimi yapılır.



Şekil 3. 8 Flat sheet membran ve deney için hazırlanmış membran modülü

SEM

Membran yüzeyindeki yapıları gözlemlemek amacıyla Zeiss marka EVO LS 10 model taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. YTÜ Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde yapılan analizlerde membranlar altın ile kaplanmıştır.

Partikül Boyutu Dağılımı (Master Sizer)

YTÜ Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde Malvern marka Master Sizer Hydro 2000MU model $0.02\mu\text{m}$ ile $2000\mu\text{m}$ ölçüm aralığında cihaz ile tespit edilmiştir.

Zeta Potansiyeli

YTÜ Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde Malvern marka Nano ZS model cihaz ile tespit edilmiştir.

SONUÇLAR

Bu çalışmada yüksek KOİ içerikli süt endüstrisi atıksuyunun MBR sisteminde arıtılabilirliği aktif çamur karakterinin membran tıkanmasına etkisi araştırılmıştır. Çalışma boyunca laboratuvar ölçekli aerobik olarak işletilen reaktörün deneysel sonuçları bu bölümde sunulmuştur.

MBR sistemleri büyük oranda hidrolik ve arıtma performansına göre karakterize edilirler. Arıtma BOİ ve/veya KOİ, TKM, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, nütrientler (nitrojen ve fosfor) ve mikroorganizmalar ile belirlenmektedir. Hidrolik karakter daha çok akı ($\text{L/m}^2\text{h}$), fiziksel ve kimyasal temizleme periyotları ile değerlendirilmektedir [22].

4.1 Atıksu Karakterizasyonu

Laboratuvarda $+4^\circ\text{C}$ 'de muhafaza edilen atıksuya yapılan analizler sonucunda atıksuyun karakteri belirlenmiştir. Fabrikadan farklı iki zamanda alınan atıksu karakterleri birbirinden farklı olduğundan yapılan tüm analizlerin (3 tekrarlı) ortalama değerleri verilmiştir. Çizelge 4.1'de kullanılan süt endüstrisi atıksuyuna yapılan karakterizasyon çalışması verilmiştir.

Yapılan karakterizasyon çalışmalarında kirlilik parametrelerinin konsantrasyonlarında salınımlar olduğu tespit edilmiştir. Ancak kurulan MBR sisteminde işletme sırasında bu salınımların tolere edildiği gözlemlenmiştir.

Süt işleme endüstrisindeki üretim prosesi boyunca atıksular farklı debi ve özellikler göstermektedir. Ayrıca, üretilen ürün çeşidine ve işletme metotlarına bağlı olarak atıksu karakteri fabrikadan fabrikaya değişiklik göstermektedir [43]. Buna ilave olarak,

elde edilen ürünlere, coğrafi bölgeye, üretim mevsimine, hayvanların bireysel özelliklerine göre atıksu içerisindeki protein, yağ, üre, toplam katı madde ve farklı minerallerde değişim göstermektedir [44].

Çizelge 4. 1 Atıksu karakterizasyon kapsamında belirlenen parametreler

Parametre	Aralık	Ortalama Değer
KOI, mg/L	4802-6500	5020
NH ₃ , mg/L	17,17-40,97	36,84
Ortofosfat, mg/L	6,63-10,25	8,80
NO ₃ ⁻ , mg/L	1,6-4,8	3,3
TKM, mg/L	6060-7658	7030
TUKM, mg/L	3922-5580	4722
Alkalinite, mg CaCO ₃ /L	257-362	309
İletkenlik, mS/cm	1,87-3,65	2,76
Renk, Pt/Co	769-991	929,25
pH	4,86-5,06	4,98

4.2 Besleme Yapılan Atıksular ile Süzüntü Suyunun Fiziksel Olarak Karşılaştırılması

Temin edilen ham atıksu sarı renkli ve kötü kokuludur. MBR’de gerçekleştirilen arıtma neticesinde elde edilen süzüntü suyu ise renksiz ve kokusuzdur. Fabrikadan farklı zamanlarda alınan atıksuların fiziksel ve kimyasal özellikleri farklıdır. Ancak arıtma performanslarına ve mikroorganizma çoğalmasına etkileri bakımından ciddi etkilerin olmadığı görülmüştür. Aktif çamur yeni atıksuya hızlı bir şekilde uyum sağladığı analizler sonucunda ortaya konulmuştur. Böylece MBR sistemlerinin, kirlilik parametrelerindeki salınımları tolere ederek sistemin dengeli çalışmasına olanak sağladığını göstermektedir. MBR’de 0,4 µm gözenek boyutlu hollow fiber membran kullanılarak arıtma işlemi yapılmıştır. Günlük olarak alınan süzüntüler numune

kaplarına koyularak +4°C'de muhafaza edilmiştir. Şekil 4.1'de farklı atıksuların ve süzüntü suyunun fiziksel olarak karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 4. 1 MBR'de kullanılan ilk besleme atıksuyu (sol), ikinci besleme atıksuyu (orta) ve elde edilen süzüntünün (sağ) fiziksel olarak karşılaştırılması

4.3 MBR Performansının Takibi

4.3.1 Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) Giderimi

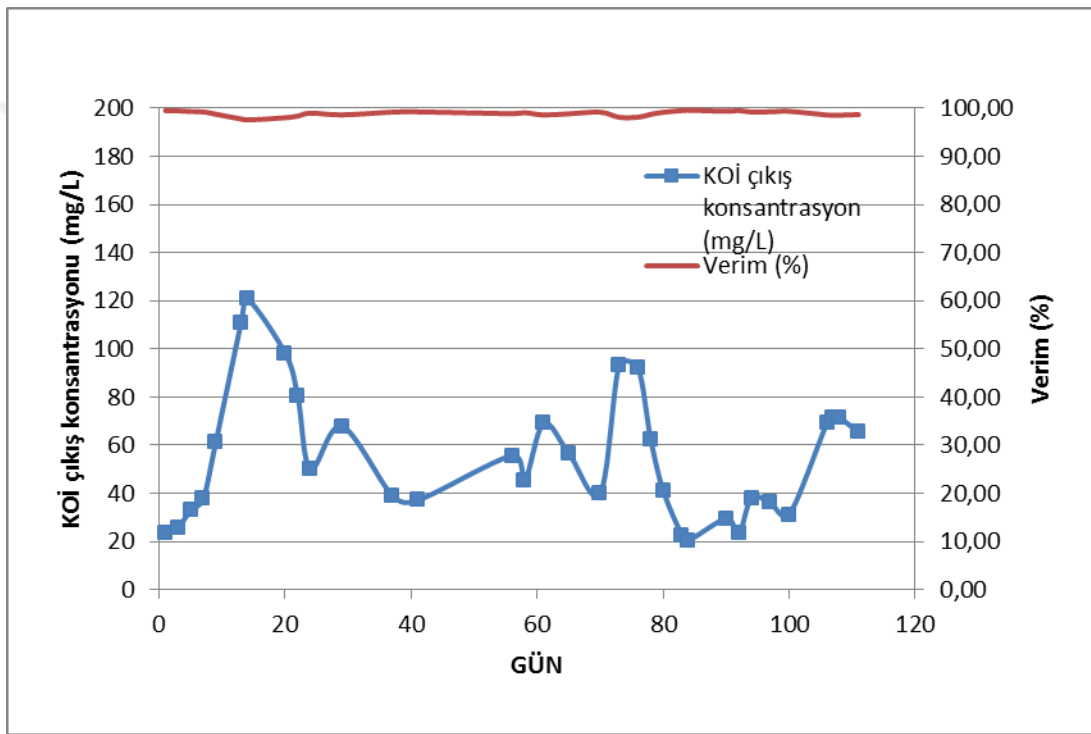
Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ), atıksuların deşarj standartlarına uygunluğunda takip edilmesi gereken önemli bir parametredir. KOİ kimyasal olarak oksitlenebilen organik maddelerin oksijen ihtiyacıdır. Kuvvetli bir oksitleyici olan potasyum dikromat vasıtasıyla ölçülür. Kimyasal olarak oksitlenebilir bileşikler, biyolojik olarak oksitlenebilir olanlardan daha yüksek olduğundan kimyasal oksijen ihtiyacı, biyolojik oksijen ihtiyacından büyüktür [37].

Şekil 4.2'de MBR sisteminde KOİ çıkış konsantrasyonları ve KOİ giderim verimlerinin zamana karşı grafiği verilmiştir. Ortalama giriş konsantrasyonu 5020 mg/L iken işletilen reaktörde KOİ çıkış konsantrasyonu 20,51 ile 120,86 mg/L arasında değişmiştir ve ortalama 55,16 mg/L olarak belirlenmiştir. KOİ giderim verimi %97,59 ile %99,59 arasında değişmiştir ve ortalama %99 olarak belirlenmiştir. İşletme boyunca değişen atıksu karakteri ve değişen aktif çamur şartlarında KOİ giderim veriminin etkilenmediği ve sonuçların oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Yüksek KOİ değeri, aktif çamur çıkışlarına, membran tıkanmasına, membran tıkanma sorunuyla birlikte gelişen

besleme dengesizliklerine, çözünmüş oksijen yetersiz kaldığı zamanlara rağmen mikroorganizma popülasyonundaki artış üzerinde ciddi olumlu etki yapmıştır.

Turan Bayram ve Nuhoğlu [45] tarafından yapılan çalışmada ön arıtma yapılmış ve giriş KOİ değeri 1000 ile 2000 mg/L arasında olan süt endüstrisinin atıksuyu kullanılarak MBR’de %95 KOİ giderim verimi elde edilmiştir.

Andrade vd. [46] tarafından yapılan çalışmada ise ortalama 3000 mg/L KOİ içeren ham süt atıksuyuna yapılan MBR’de arıtma sonucu %98 oranında giderim verimine ulaşılmıştır.



Şekil 4. 2 MBR sisteminde elde edilen KOİ çıkış konsantrasyonları ve KOİ giderim verimleri

4.3.2 MLSS/MLVSS Değişimlerinin Etkisi

Biyokütlenin kontrolü için MLSS ve MLVSS değerlerinin ölçülmesi gerekmektedir. MBR sistemlerinde katı/sıvı faz ayırma işlemi için klasik aktif çamur sistemlerindeki ikinci çöktürme tankı yerine membran kullanılmaktadır.

MBR sisteminin işletildiği süre boyunca reaktör içerisindeki MLSS ve MLVSS konsantrasyonları değişimi Şekil 4.3'te gösterilmiştir. 5165 mg/L MLSS ve 4430 mg/L MLVSS değerleri ile işletilmeye alınan MBR sisteminde mikroorganizmaların zamanla

değişimi verilmiştir. Genel olarak mikroorganizma popülasyonunda artış gözlemlenmiştir. Konsantrasyonların düşüş yaptığı tüm günlerde reaktörden analizler için aktif çamur çıkışı olmuştur. Süt işleme fabrikasından alınan atıksu ile beslenen reaktörde aktif çamur çıkışlarına rağmen mikroorganizmalar hızlı bir şekilde çoğalma göstermiştir. En yüksek MLSS ve MLVSS değerleri sırasıyla 18060 mg/L ve 13430 mg/L olarak belirlenmiştir.

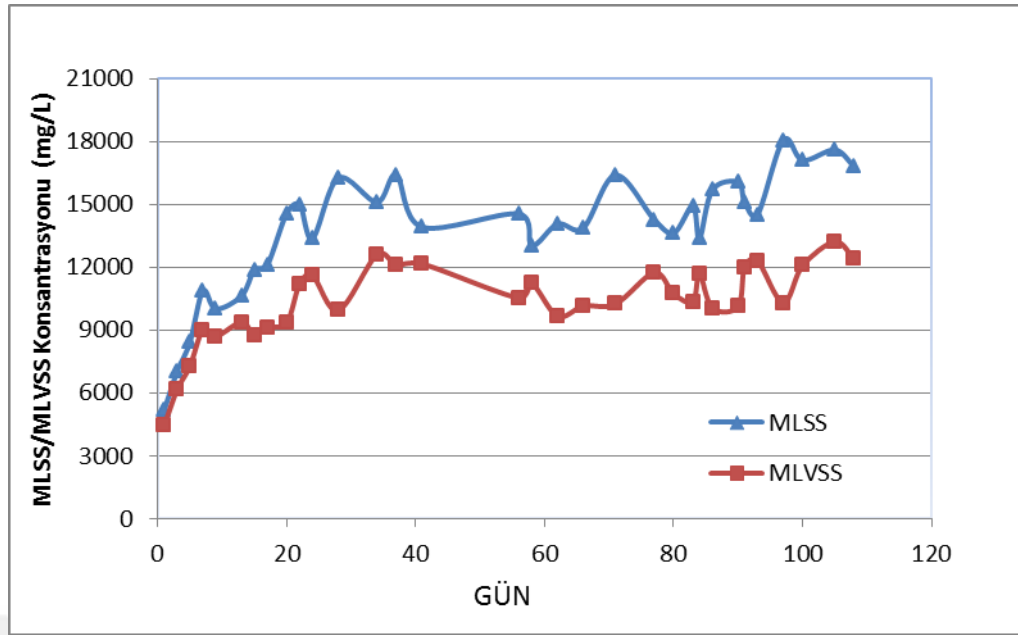
Yapılan çalışmalara göre MBR tanklarında işletme sırasında MLSS değeri 7-18 g/L arasında olmalıdır. Membran biyoreaktör teknolojisi bir takım doğal avantajlara sahiptir. Sistem katıları uzaklaştırmak için flokların oluşmasını gerektirmez ve bu nedenle biyokütle, genellikle 12000 - 18000 mg/L, hatta 22000 mg/L gibi yüksek MLSS seviyelerinde çalışabilir [47],[48].

Bu çalışmada MBR sisteminin yüksek MLSS değerlerinde çalışabilirliği ve arıtma verimlerinde olumsuz sonuç oluşturmadığı desteklenmiştir.

Yüksek MLSS konsantrasyonu, düşük tank hacmi ve uzun bir çamur yaşı sağlamaktadır, bu da çamur üretimini büyük ölçüde azaltmaktadır. Ayrıca faz ayırma işlemini membran yaptığı için çöktürme tankına gerek bulunmamaktadır. Dolayısıyla, batık membran biyoreaktörler klasik aktif çamur tesislerine göre 5 kat daha küçük olabilmektedir [47].

Andrade vd. [49] tarafından yapılan çalışmada MBR'da 17251 ve 22371 mg/L MLVSS ile yürütülen çalışmada KOİ giderim verimleri % 99 ve nütrient giderimleri, TP ve TN olarak sırasıyla %53, %98, %86, %89 olarak tespit edilmiştir.

Zinadini vd. [43] üç farklı MLSS konsantrasyonlarında çalışmış ve artan MLSS ile birlikte giderim verimlerinin de arttığını tespit etmiştir. Giriş KOİ değeri 2131 mg/L olan süt atıksuyunun MBR ile arıtımında 6000 mg/L, 10000mg/L, 14000 mg/L MLSS değerlerindeki KOİ, TN, TP giderim verimleri incelendiğinde sırasıyla 6000 mg/L MLSS değerinde %91 %28, %38; 10000 mg/L değerinde %94, %55, %58; 14000 mg/L değerinde %95, %66, %76 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4. 3 MBR sistemi işletimi boyunca takip edilen MLSS ve MLVSS değerleri

4.3.3 Amonyak (NH₃) ve Nitrat (NO₃) Giderimleri

Azot, mikroorganizmalar için besin kaynağıdır. Atıksularda azot pH'a göre değişkenlik göstermektedir. Suda amonyum iyonu (NH₄⁺) ya da amonyak (NH₃) halinde bulunur. Amonyakın amonyuma dönüşme denklemi aşağıda verilmiştir.



Bu denklikte pH ≤ 7 ise denge sağa doğru, pH ≥ 7 ise denge sola doğru kaymaktadır. Sudaki amonyak ve amonyum oksijen varlığında önce nitrit sonra nitrata dönüşmesi (nitrifikasyon) gerçekleşir. Nitrit kararsızdır ve kolayca nitrata dönüşür. Nitrifikasyon işlemi pH'ı ve nihayetinde alkaliniteyi düşürür. Atıksularda nitrit 1 mg/L ve nitrat 0-20 mg/L aralığında bulunur.

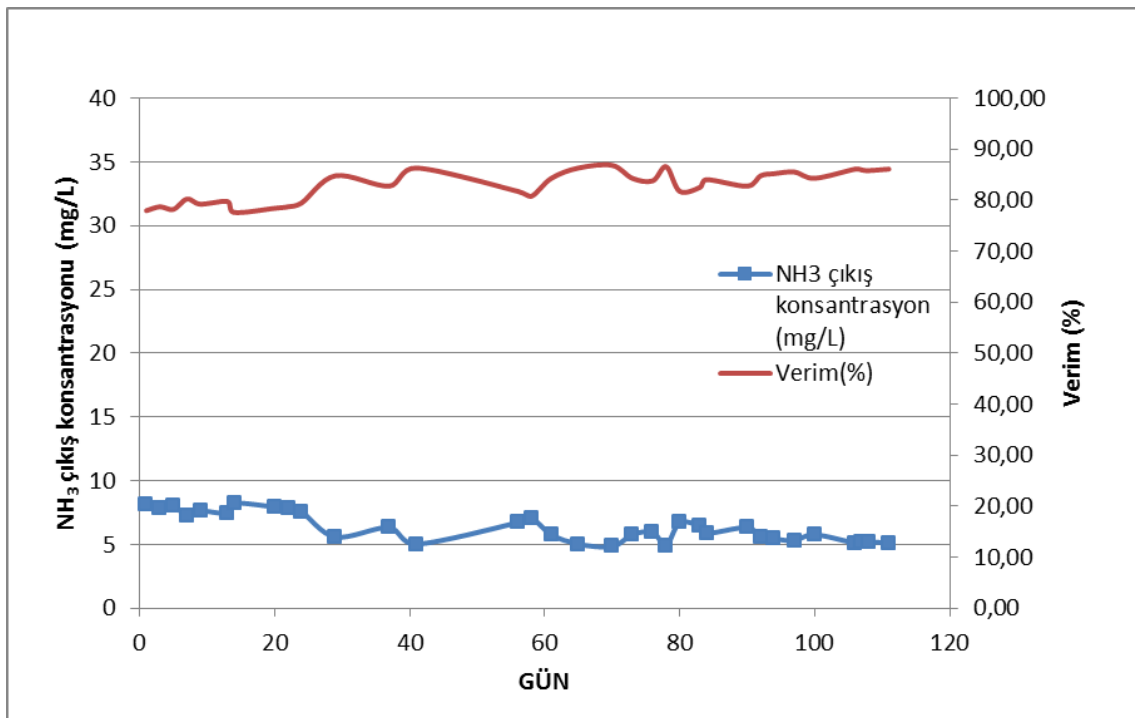
Azot sularda ötrofikasyona neden olarak sucul yaşamı etkilediği bilinmektedir. Yüksek konsantrasyonlarda suda fazla besin zenginleşmesine, sudaki yaşam üzerinde dolaylı etkilere ve sudaki canlılarda doğrudan toksik etkilere neden olur. pH ve sıcaklık gibi faktörler de amonyak toksisitesini etkileyebilir [51].

Başlangıçta atıksuyun amonyak ve nitrat değerleri sırasıyla 36,84 ve 3,32 mg/L'dir. MBR işletme boyunca elde edilen çıkış amonyak değeri 4,85 ile 8,12 mg/L arasında değişmiştir ve ortalama 6,34 mg/L olarak belirlenmiştir. Giderim verimi ise %77,61 ile

%86,57 arasında değişmiştir ve ortalama %82,78 olarak belirlenmiştir. Nitrat değerleri ise 0,6 ile 41,2 mg/L arasında değişmiştir ve ortalama 15,45 mg/L olarak belirlenmiştir.

Amonyak giderim veriminin zamanla arttığı tespit edilmiştir. Temmuz ayında işletmeye alınan reaktörün sıcaklığı, hava şartlarına göre değişmiştir. Yüksek sıcaklıklarda daha düşük verim elde edilirken, zamanla hava sıcaklığının düşmesi amonyak giderim verimini arttırmıştır.

Şekil 4.4’de MBR sisteminin yaklaşık 4 aylık işletimi boyunca NH_3 çıkış konsantrasyonları ve NH_3 giderim verimlerinin zamana karşı grafiği verilmiştir.



Şekil 4. 4 MBR sisteminde elde edilen NH_3 çıkış konsantrasyonları ve NH_3 giderim verimleri

4.3.4 Ortofosfat ($\text{PO}_4\text{-P}$) Giderimi

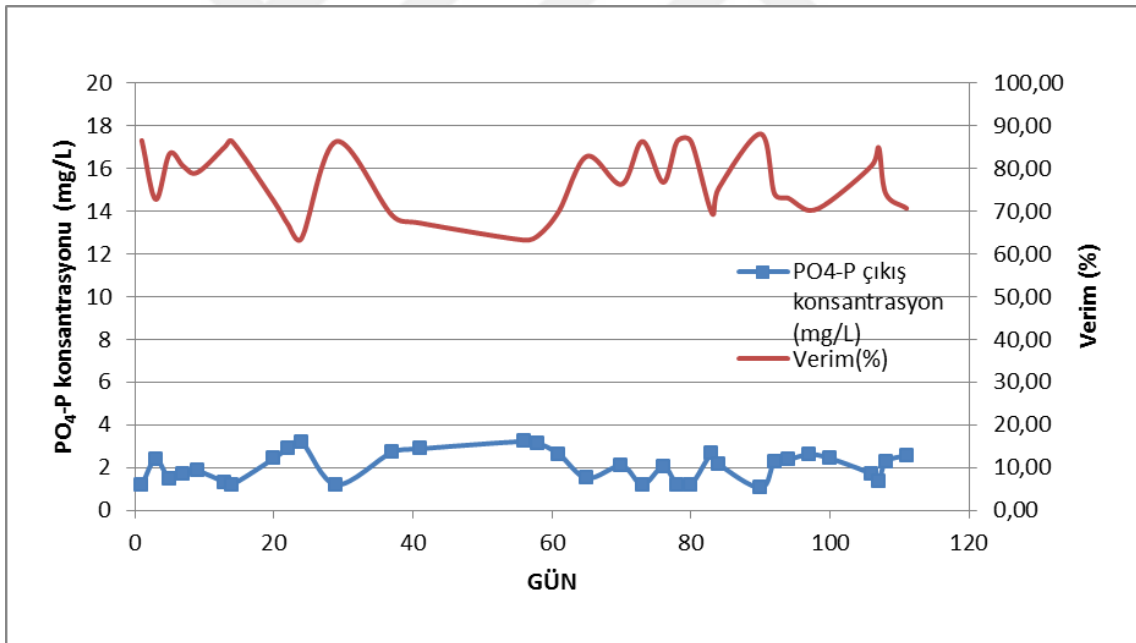
Fosfor bileşikleri atıksularda ortofosfat, polifosfat ve organik fosfor şeklinde bulunmaktadır.

Membran filtrasyon sistemlerinde fosforun giderimi oldukça iyidir ve mikrobiyolojik kalite açısından sürekli deşarj sınırlarını karşılamaktadır. Klasik aktif çamur proseslerine göre, nitrifikasyon bakterilerinin uzun süre tutulması nitrifikasyonu daha etkin biçimde gerçekleştirmesini sağlamaktadır [52].

MBR sisteminin işletildiği süre boyunca reaktör içerisindeki ortofosfat çıkış konsantrasyonları ve giderim verimleri Şekil 4.5'te gösterilmiştir. $\text{PO}_4\text{-P}$ giriş konsantrasyonu 8,79 mg/L olup çıkış konsantrasyonu 1 ile 3,2 mg/L arasında değişmiştir ve ortalama 2,06 mg/L olarak belirlenmiştir. $\text{PO}_4\text{-P}$ giderim verimi ise %63,24 ile %88,11 arasında değişiklik göstermiş ve ortalama %76,5 olarak belirlenmiştir.

Ortofosfat çıkış değerlerinin değişkenliği çeşitli nedenlerden kaynaklanmış olduğu düşünülmektedir. Bunlardan bazıları: atıksuyun farklı zamanlarda alınması, hızlı çoğalan mikroorganizmaların membranı tıkeyip sistem beslemesinin dengesini bozması ve atıksu tankında zamanla çökelme olmasıdır.

Andrade vd. [53] süt endüstrisi atıksuyu kullanarak MBR'da farklı SRT'lerde arıtma gerçekleştirmiştir. 80, 60 ve 25 günlük SRT'lerde sırasıyla %60, %84 ve %56 giderim verimine ulaşılmıştır.



Şekil 4. 5 MBR sisteminde elde edilen $\text{PO}_4\text{-P}$ çıkış konsantrasyonları ve $\text{PO}_4\text{-P}$ giderim verimleri

4.3.5 Sıcaklık, Çözünmüş Oksijen ve İletkenlik

Sıcaklık, mikrobiyal büyümeyi ve dolayısıyla biyolojik sistemleri etkileyen en önemli çevresel faktörlerden biridir. Sıcaklık, hem enzimlere hem de substrat difüzyon

oranlarına tesir ederek, biyolojik reaksiyonları etkileyebilir. Mikroorganizmaların çoğunluğunun belirli sıcaklık aralıklarında aktif olabileceği bilinmektedir [54]. Bu çalışmada reaktörün sıcaklığı 19,1 ile 28,1°C arasında değişmiştir ve ortalama 23,89°C ölçülmüştür. Reaktörün sıcaklığı hava sıcaklığına göre değişmiştir.

Çözünmüş oksijen ve sıcaklık elektrot yardımıyla ölçülmüştür. Su içerisindeki biyolojik ve kimyasal prosesi etkileyen önemli parametrelerdir. Bir aerobik sistemde çözünmüş oksijen (ÇO) konsantrasyonu 1 mg/L altına düşmemelidir [55].

Yüksek ÇO değerinin daha iyi filtrasyon ve düşük membran kirlenme oranı sağladığı, düşük ÇO değerlerinde membranın tıkanmaya meyilli olduğu bilinmektedir. ÇO miktarının, membran kirlenmesinde SMP değerleri, biyofilm yapısındaki değişiklikler ve flok boyutu gibi çeşitli konularda etkileri bulunmaktadır [36].

Bu çalışmada ÇO değerleri günlük olarak ölçülmüştür. Reaktörün ÇO değeri 1,1 ile 5,7 mg/L arasında değişmiştir ve ortalama 3,43 mg/L ölçülmüştür. ÇO miktarı MLSS miktarının artışı ile birlikte azalmış, reaktörden aktif çamur çıkışı olduğu zamanlarda ise ÇO artmıştır. Zamanla organik yükü fazla olan süt endüstrisi atıksuyu ile beslenen reaktörün ÇO değerinin hızlı düşüşlerini dengelemek için sisteme takviye hava verilmiştir. Hızlı MLSS artışından kaynaklanan difüzör tıkanması işletim problemlerinin arasında yer almaktadır. Farklı bir kanaldan verilen takviye hava aynı zamanda reaktörün içinde oksijenin eşit dağılmasını sağlamıştır. Böylece suda anaerobik kısımlar oluşmaması temin edilmiştir.

İletkenlik, suyun elektrik akımını iletebilme kabiliyetinin sayısal bir ölçüsüdür. Bilindiği üzere, çözünmüş tuzlar ve diğer organik kimyasallar elektrik akımını iletir ve tuzlulukla birlikte iletkenlik artar. Su sıcaklığının artışıyla birlikte iletkenlik de artış göstermektedir. İletkenlik suyun kalitesini belirlemede yararlı bir parametredir. İletkenlikteki önemli değişiklikler sucul ortama deşarj ya da diğer kirlilik kaynağından giriş olduğunu göstergesi olabilir [56]. Bu çalışmada atıksuyun iletkenlik değeri 1,87 mS/cm ve 3,65 mS/cm arasında değişmektedir.

4.3.6 pH ve Alkalinite

pH sudaki H^+ iyonu konsantrasyonunun bir ifadesidir. Spesifik olarak, pH, sulu bir solüsyondaki hidrojen iyonu (H^+) konsantrasyonunun negatif logaritmasıdır (mol / L) [57]. pH, biyolojik bir sistemi çalıştırırken önemli bir parametredir. pH seviyelerinde ani artışlar veya düşmeler reaktörün dengesizliğinin göstergesi olabilir. Bir çamur örneğinin aerobik sistemlerdeki pH değeri tipik olarak 5,5 ila 8,5 arasındadır. Bu değerler atıksuya ve kirleticilere bağlı olarak değişir. Her mikroorganizma türü metabolik süreçlerinde ideal pH ortamları farklı olan farklı enzimler kullanır bu yüzden ideal bir işletme pH değeri yoktur [58], [59]. Bu çalışmada atıksuyun ortalama pH değeri 4,96 olarak tespit edilmiştir, işletilen reaktörün pH değerleri ise 8,52-8,82 arasında değişmiş ve biyolojik aktiviteyi etkilemediği ortaya konmuştur.

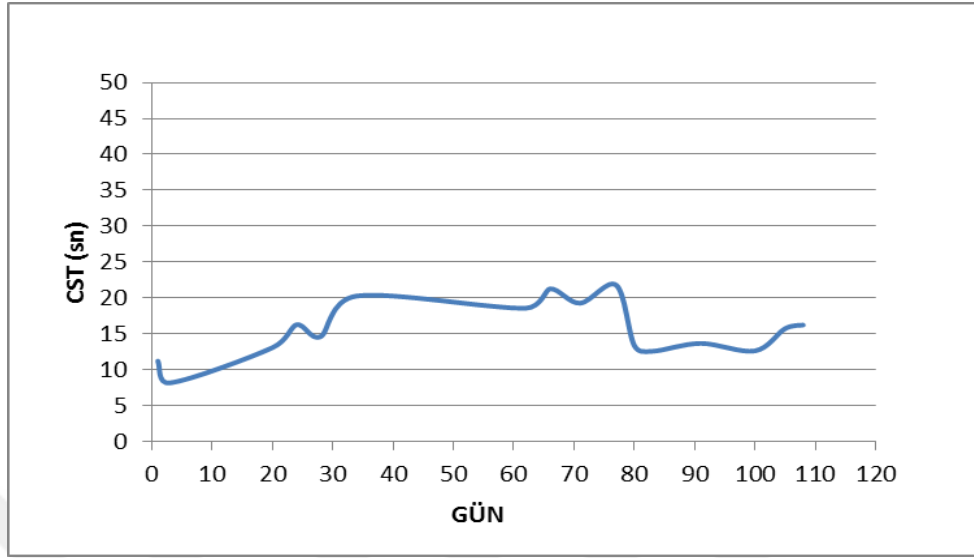
Alkalinite suyun asitleri nötralize etme kapasitesidir. Bilindiği gibi alkalinite, doğal olarak suda bulunur ve mikroorganizmalar tarafından üretilen asitler için bir tampon görevi görür. Yeterli alkalinite varsa, pH, aerobik bakterilerin büyümesi için arzulanan aralıkta kalır. Atıksuyun alkalinite değerleri 257-362,5 mg $CaCO_3/L$ arasında ölçülmüştür.

4.4 Membranın Tıkanmasını Etkileyen Parametreler

4.4.1 Kapiler Emme Süresi (CST)

Kapiler emme süresi (CST) aktif çamurun filtre edilebilirliğinin bir ölçüsüdür. Filtre edilebilirlik aktif çamurun fiziksel bir özelliğidir ve arıtma sisteminin türüne ve kullanılan atıksuya bağlıdır. Parçalanma, partikül boyutunun azalmasıyla, filtre edilebilirliğe zarar vermektedir [60]. CST aparatının üzerindeki dijital zamanlayıcı aktif çamurun bir filtre kağıdının içinden akışını saniye cinsinden ölçer. CST analizi aktif çamurun konsantrasyonuna ve kullanılan cihaza bağlıdır. Viskozite üzerindeki etkisiyle sıcaklık da bu testi etkiler [61]. CST analizleri ortalama haftada bir kez gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.6'da gösterilmiştir. En düşük ve en yüksek CST değerleri sırasıyla 8,2 sn ve 16,3 sn olarak belirlenmiştir. Yüksek CST değerleri aktif çamurun suyunu bırakmadaki dayanıklılığını göstermektedir. Aksine

suyunu bırakma eğilimindeki çamurlar düşük CST sonuçları verir. Genel olarak aktif çamurun yoğunluğu ile birlikte CST değerleri de artış göstermiştir.



Şekil 4. 6 MBR sisteminde elde edilen CST değişimleri

4.4.2 Göreceli Hidrofobisite ile P/C Oranı İlişkisi

MBR sistemlerde kullanılan membranlardaki polimerlerin yüzeyleri hidrofilik olacak şekilde tasarlanmaktadır. Hidrofilik yüzeylerde sulu çözeltilerin taşınımı yüksek olur ve yüksek su akısına sahiptirler. Hidrofobik maddeler membrana yapışma eğilimindedir. Bu özellik hidrofobik maddelerin membran yüzeyinde tutunmasını engelleyerek birikme ve tıkanma problemleri azaltacaktır [62].

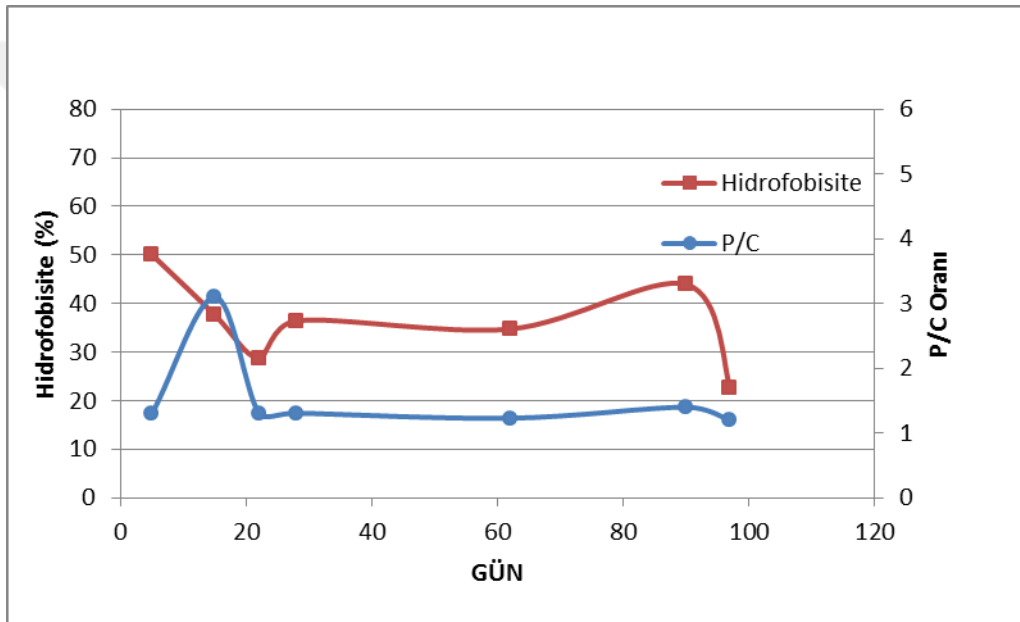
Hücre duvarı üzerindeki farklı yapılar elektrostatik veya hidrofobik özelliklerden sorumludur [63]. Ekstraselüler polimerik maddelerin (EPS) yüzey yükü ve hidrofobisite aktif çamurun biyoflokülasyonunda önemli rol oynamaktadır [64]. Yüzey yükünün büyüklüğü, aktif çamurun içindeki polimer bileşiminin yüzeyine ve mikroorganizmaların fizyolojik koşullarına bağlıdır [65].

İşletme boyunca reaktörden alınan aktif çamur numunelerine yapılan analizlerde hidrofobisite değerleri %22,75 ile %50,04 aralığında değişiklik göstermiş ve ortalama %37,04 olarak belirlenmiştir.

Şekil 4.7'de göreceli hidrofobisite ile EPS'nin P/C oranı arasındaki ilişki verilmiştir. EPS'nin P/C oranının azalması hidrofobisitenin azalmasına, EPS'nin P/C oranının

artması hidrofobisitenin artmasına sebep olmaktadır. Hidrofobisite EPSp ile pozitif bir korelasyon verirken EPSc ile negatif bir korelasyon vermektedir. Özellikle 15. günden sonra EPS'nin P/C oranı ile hidrofobisite arasında pozitif bir korelasyon olduğu görülmektedir.

Hidrofobik fraksiyon proteinlerden oluşur ve ağırlıklı olarak amino asitler EPS yapısında hidrofobikliğe katkıda bulunur. Glisin, alanin ve lösin, hidrofobik özelliklere sahip hücre dışı proteinlerin en önemli amino asitleridir, bu nedenle bunların hidrofobik etkileşimlere karışması muhtemeldir [66].



Şekil 4. 7 MBR sisteminde aktif çamurun göreceli hidrofobisitesi ile EPS P/C oranının ilişkisi

4.4.3 Çamur Hacim İndeksi (SVI)

MBR işletimi boyunca sürekli olarak takip edilen parametrelerden biri de çamur hacim indeksidir. SVI, aktif çamurun çökebilirliğini belirler. 30 dakikada aktif çamurun hacmi ile MLSS konsantrasyonu arasındaki oranı belirler. SVI, aktif çamurun flokülasyon durumu hakkında bilgi verir. En yüksek 110,35 mL/g ve en düşük 56,25 mL/g olarak ölçülen SVI değerlerinin yaklaşık 4 aylık işletme süresince ortalaması 76,69 mL/g'dır. MLSS artışı ile birlikte aktif çamurun çöken kısmı da artmıştır. Bu artış çamur hacim indeksini azaltmıştır. Çamur stabilizasyonunda SVI değeri 75-120 mL/g arasında uygun

olduğu literatürde bildirilmektedir [67]. Dolayısıyla, çalıştırılan MBR'deki aktif çamurun iyi kalitede çökebilir özelliği olduğu anlaşılmaktadır.

4.4.4 Ekstraselüler Polimerik Maddeler (EPS) – Çözünmüş Mikrobiyal Ürünler (SMP)

Ekstraselüler polimerik maddeler (EPS) aktif çamurun yapısının ve biyoflokülasyonun önemli bir bileşenidir. Araştırmalar EPS'nin ağırlıklı olarak proteinler, karbonhidratlar, nükleik asitler, lipitler ve humik maddelerden oluştuğunu göstermektedir [68], [69] [70], [71].

Membran kirlenmesi araştırmacıların MBR'larda üzerinde durdukları konularından bir tanesidir. En çok dikkat çeken ise bağlı ya da çözünebilir/kolloidal (SMP) formlarda bulunan EPS'dir. Ancak, işletme mekanizması ve analitik metotlardaki çeşitli farklılıklar sonuçların karşılaştırılabilirliğini sınırlandırmaktadır.

Genel olarak mikroorganizmalar tarafından üretilen çözünmüş ya da kolloidal halde bulunan EPS membranda hem iç hem dış yüzeyi kaplayarak tıkanmalara neden olmaktadır [72], [73]. Yapılan analiz sonuçlarına göre 4 aylık işletme boyunca elde edilen EPS ve SMP bileşenlerinin protein ve karbonhidrat içerikleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. SMP (protein ve karbonhidrat açısından) konsantrasyonlarının, süzüntüde elde edilen değerlere göre süpernatantta daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu da membran üzerinde SMP'nin biriktiğini ve zamanla artan basıncın da etkisiyle süzüntüye geçtiğini göstermektedir. Genel olarak EPS'nin protein içeriğinin karbonhidrat içeriğinden daha fazla olduğu yapılan analiz sonuçlarında elde edilmiştir. Bununla birlikte protein ve karbonhidratın EPS'deki değerleri SMP'deki değerlerine göre daha yüksektir.

Çizelge 4. 2 MBR sistemi işletimi boyunca elde edilen EPS ve SMP konsantrasyonları

	PROTEİN			KARBONHİDRAT		
	Min	Max	Ort	Min	Max	Ort
EPS (mg/g MLSS)	202,04	237,46	219,75	132,25	162,17	147,22
SMP (mg/L) Reaktörde	22,5	35,02	28,76	33,45	41,66	37,55
SMP (mg/L) Süzöntüde	11,18	12,03	11,6	12,38	13,52	12,95

Reaktörün işletilmesi boyunca aktif çamur numunelerinden elde edilen süpernatant ve süzöntü sularına protein ve karbonhidrat analizleri yapılmıştır. Yapılan analizlerde MLSS değerinin yüksek olduğu zamanlarda EPS ve SMP ekstraksiyon işlemleri sırasında katı ve sıvı faz ayrımı tam anlamıyla gerçekleşmediği gözlemlenmiştir. Bu sebepten özellikle süpernatant ile yapılan protein ve karbonhidrat analizlerinde bir miktar hata içerme ihtimali bulunmaktadır. Elde edilen değerlerin minimum, maximum ve ortalama değerleri belirlenmiştir. EPS, SMP reaktörde ve SMP süzöntüde P/C oranları ortalama değerleri sırasıyla 1,55 mg/g MLSS, 1,04 mg/L ve 1,44 mg/L'dir. Çizelge 4.3'te EPS ve SMP bileşenlerinin protein/karbonhidrat (P/C) oranları görülmektedir.

Drews vd. [74] tarafından MBR'da yapılan çalışmada genel olarak SMP'nin membran kirlenmesinde rolü olmadığı ancak, düşük çamur yaşı ve büyük gözenek boyutu gibi belirgin şartlarda kirlenmeye neden olduğu belirlenmiştir.

Membran kirlenmesi ile ilişkilendirilen karbonhidrat ve protein değerleri bazı çalışmalarda C/P olarak değerlendirilmiştir. Andrade vd. [53] tarafından süt atıksuyunun MBR'da arıtımı için yapılan çalışmada karbonhidrat/protein (C/P) oranları 80, 60 ve 25 günlük SRT'lerde EPS için sırasıyla 0,43 0,72 ve 0,73 iken, SMP için 1,15 1,06 ve 2,77 olarak belirlenmiştir.

Arabi ve Nakhla [75] giriş P/C oranlarının 2/1, 4/1 ve 8/1 olarak işletilen MBR'da membran kirlenmesi üzerine yaptıkları çalışmada P/C oranının artışıyla birlikte membranın kirlendiğini tespit etmiştir. Yüksek P/C oranlarında, yüksek SMP

konsantrasyonunun ve artan göreceli hidrofobisite değerlerinin gözenek tıkanma direncini arttırdığı belirlenmiştir. Yine artan P/C oranı ile birlikte aktif çamurdaki flok boyutunun azaldığı, bununla beraber azalan EPS konsantrasyonunun artan kek direncine ve kirlenme oranına neden olduğu elde edilmiştir. Membran yüzeyinde yüksek hidrofobik EPS_p'nin bağlanması ve membran geçirgenliğinin azalmasına neden olduğu sonuçlarına ulaşmıştır.

Çizelge 4. 3 MBR sistemi işletimi boyunca elde edilen EPS VE SMP'deki P/C oranları

	P/C		
	Min	Max	Ort
EPS (mg/g MLSS)	1,23	3,10	1,55
SMP (mg/L) Reaktörde	0,60	1,44	1,04
SMP (mg/L) Süzüntüde	0,45	2,96	1,44

4.5 Kritik Akı

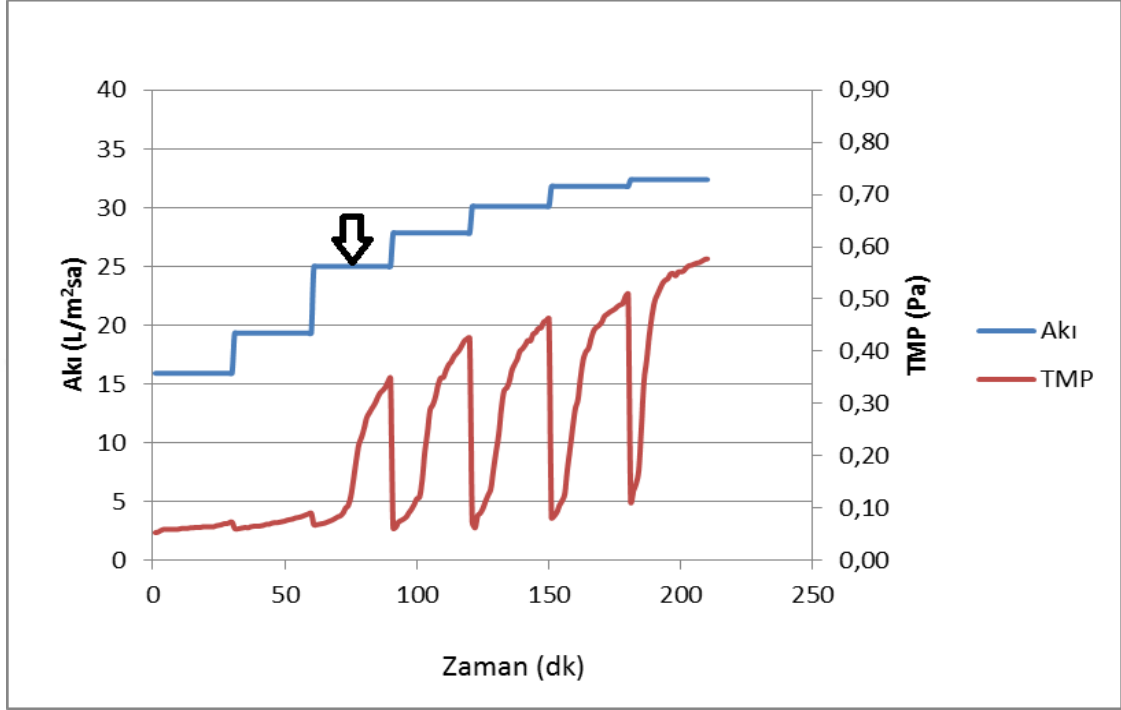
MBR'lerde tasarım akışını belirlemek için kabul gören kritik akı kavramı, partikül ve kolloidlerin membran yüzeyinde tutulduğu akı seviyesi olarak düşünülmektedir. Sabit bir kirlenme oranı olarak varsayılan, sıkıştırılmaz kek tabakası oluşumu mekanizmasına bağlı olan bu yaklaşım kritik akı olarak kabul edilmektedir [76], [77].

Kritik akı membran geçirgenliğindeki işletme limitini belirlemektedir. Kritik akının üzerindeki durumlarda TMP yükseleceğinden çok sık geri yıkama ya da fiziksel temizleme gerektirecektir [36].

İşletme akısı kritik akının üzerinde olduğunda membran tıkanmasına sebep olur. Bu çalışmada işletme akısı kritik akının altında kaldığı için membran tıkanmasına neden olduğu söylenemez.

Filtrasyon süresince farklı TMP profilleri gözlemlenmiştir. Membran basıncının artmasıyla akı değerleri de artmıştır. İşletilen MBR sisteminde yapılan kritik akı analizinde 15,9 ile 32,38 L/m²sa arasında akı değerleri tespit edilmiştir. Bu aralıkta

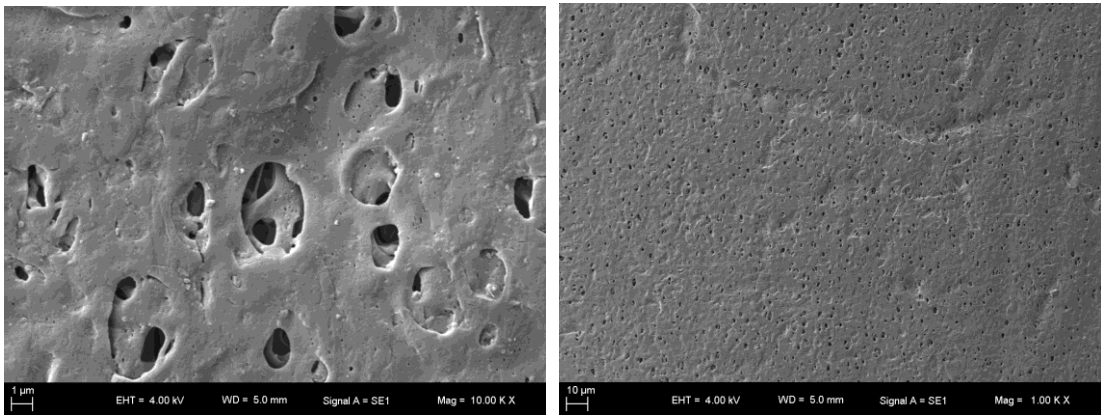
düşük ve keskin TMP sıçramasının olduğu bölgede 25 L/m²sa akı değeri kritik akı olarak seçilmiştir. Filtrasyon esnasında 0,2 µm gözenek boyutlu flat sheet membran üzerinde oldukça hızlı biriken çamur keki tabakası gözlemlenmiştir. Şekil 4.8’de kritik akı ve TMP değerlerinin zamana göre değişimleri verilmiştir.



Şekil 4. 8 MBR sisteminde akı ve TMP değerlerinin zamana göre değişimi

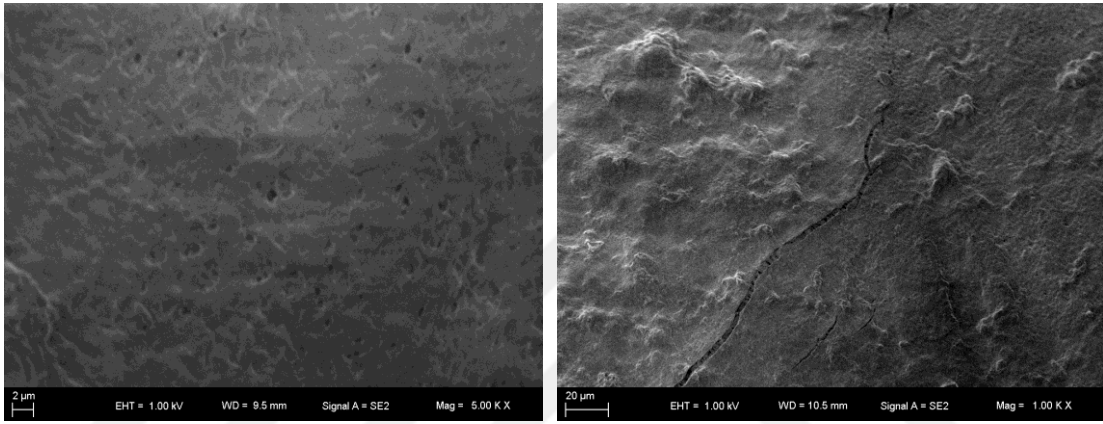
4.6 SEM

MBR sisteminde kullanılan temiz hollow fiber membranın 1 mikron ve 10 mikron ölçeklerde altın kaplama yapılmış SEM görüntüleri Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4. 9 İşletilen MBR sisteminde kullanılan temiz hollow fiber membran SEM görüntüleri

2 mikron ve 20 mikron ölçekli SEM görüntüleri incelendiğinde membranda aktif çamur floklarının bazı bölgelerde biriktiğini ve membran gözeneklerini tıkadığını göstermektedir. Aynı zamanda akı değerinin de düşmesi membranın üzerinde çamur keki tabakasının oluştuğunun bir diğer göstergesidir. Yaklaşık 4 ay süresince işletilen reaktörde ikinci ayda membran yenilenmiştir. Çok yüksek MLSS değerlerine ulaşıldığında akı değerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Sabit akıda çalıştırmak için pompa hızı değiştirilerek kontrol edilmeye çalışılmıştır ve gerekli durumlarda membrana fiziksel yıkama yapılmıştır. MBR sisteminde kullanılan kirli hollow fiber membranın altın kaplama yapılmamış halde farklı ölçeklerde SEM görüntüleri Şekil 4.10'da verilmiştir.



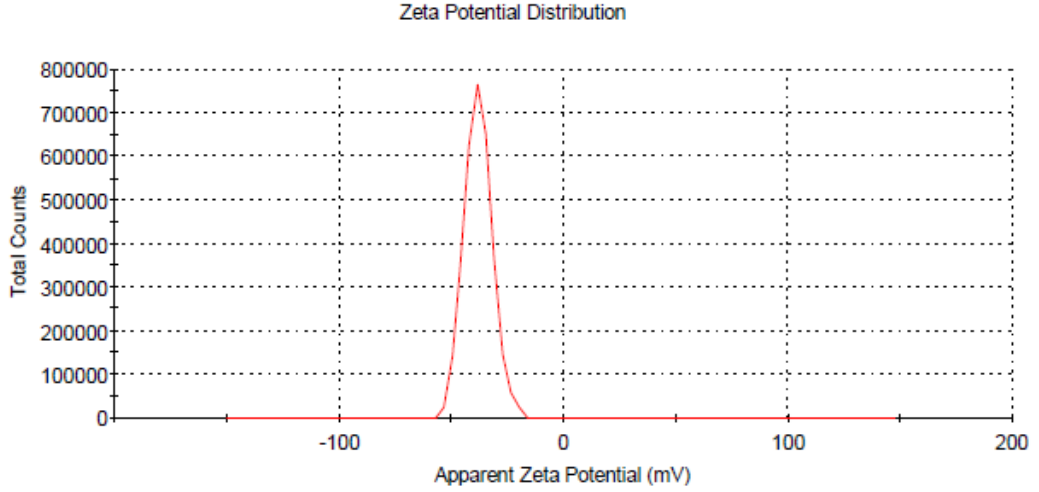
Şekil 4. 10 İşletilen MBR sisteminde kullanılan kirli hollow fiber membran SEM görüntüleri

4.7 ZETA Potansiyeli ve Partikül Boyut Dağılımı

Zeta potansiyeli, parçacık ile içinde bulunduğu sıvı arasında oluşmakta ve ölçümü aktif çamurun elektrostatik dağılma mekanizması ile ilgili önemli bilgiler vermektedir.

Zeta potansiyeli, parçacığa tutunan iyonların sabit tabakasını çevreleyen yüzeyde ölçülen potansiyele karşılık gelir [78].

Mikkelsen and Keiding [79] çalışmalarına göre aktif çamurun zeta potansiyeli $-29,6 \pm 8,5$ mV aralığında olmalıdır. Bu çalışmada zeta potansiyeli -37,6 mV olarak ölçülmüştür. Yüksek pH'da çalışan reaktörün zeta potansiyeli negatif yönde artış göstermiştir. Süt endüstrisi atıksuyu ile işletilen MBR'de aktif çamurun zeta potansiyeli grafiği Şekil 4.11'de görülmektedir.



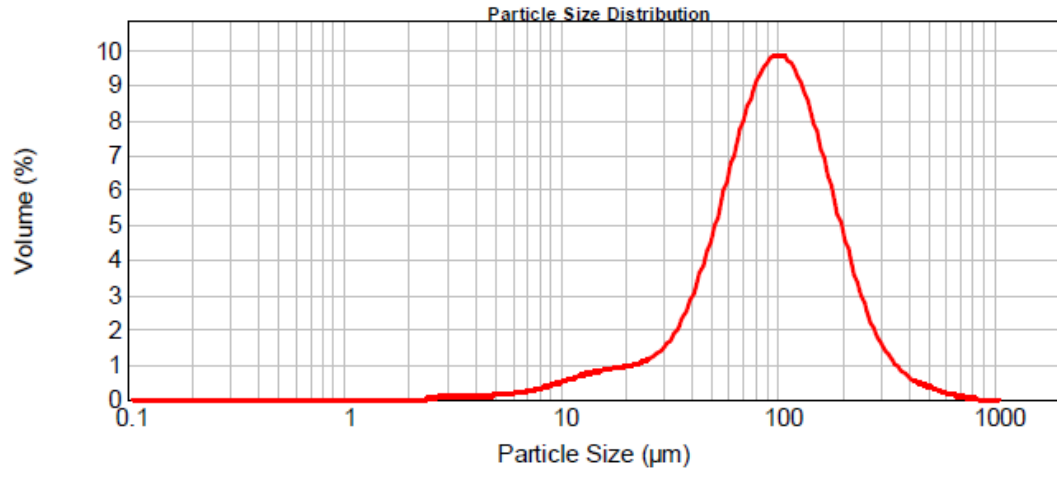
Şekil 4. 11 MBR sisteminde aktif çamura ait zeta potansiyeli grafiği

Partikül boyutu, aktif çamur süspansiyonlarının çökmesi ve katı/sıvı ayrımı kapsamında kritik bir faktördür. Aktif çamur ünitelerinin biyoflokülasyon mekanizmasının tanımlanmasında belirleyicidir [80].

Partikül boyutu, membran tıkanmasında etkili olduğu bilinmektedir. Partikül boyutu küçüldükçe membran gözeneklerinden geçebilen partiküller porların içerisine yerleşerek etkin membran alanını azaltmakta ve süzme işlemini engellemektedir. Membran gözeneklerinin tıkanmasıyla birlikte TMP artmakta ve akı miktarı azalmaktadır [36], [81].

Partikül boyutu membran por boyutundan küçükse su geçirgenliğinin bloke edilmesi beklenen bir durumdur. Partikül boyutu arttıkça membran geçirgenliğinin de artması beklenmektedir [36].

Süt endüstrisi atıksuyu ile işletilen MBR’de aktif çamurun partikül boyut dağılımı grafiği Şekil 4.12’de görülmektedir. Yapılan analiz sonucunda aktif çamur içerisindeki partikül boyutlarının 2 μm ile 830 μm arasında değişiklik gösterdiği, yoğun olarak 40 μm ile 240 μm arasında bulunduğu ve ortalama partikül boyutunun ise 96,368 μm olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4. 12 MBR sisteminde aktif çamura ait partikül boyutu dağılımı grafiği

DEĞERLENDİRME

5.1 Genel Değerlendirme

Yüksek kirlilik yükü içeren süt atıksuyunun MBR sistemde arıtımı başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Arıtma performansının yüksek olduğu MBR sistemde deşarj standartlarına uygun çıkış suyu elde edilmiştir. Düşük organik madde ve nütrient çıkış değerleri arıtılmış suyun kalitesinin yüksek olduğunu göstermektedir.

Arıtma veriminin izlenmesi için yapılan KOİ, NH₃, PO₄-P analizlerinde sırasıyla %99, %82,78 ve %76,5 giderim verimleri elde edilmiştir. Ortalama 18060 mg/L MLSS ve 13430 mg/L MLVSS değerlerinde çalıştırılan MBR, 22000 mg/L gibi yüksek MLSS seviyelerinde de çalıştırılabilirliği ve arıtma veriminin düşmemesi arıtmanın kararlı olduğunu göstermektedir.

Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'nde gıda sanayii (süt ve süt ürünleri) atıksularının alıcı ortama deşarj standardı Tablo 5.3'e göre 24 saatlik kompozit numunedeki KOİ değeri 160 mg/L iken işletilen MBR'de ortalama KOİ çıkış değeri 55,16 mg/L olarak belirlenmiştir.

DeneySEL çalışmanın yapıldığı reaktörün çok küçük hacimde olmasından ve besleme atıksuyu ile bağlantılı olarak yüksek bakteri yoğunluğundan kaynaklı membran ve difüzör tıkanma problemine sebep olmuştur. Akabinde aktif çamurun homojenliğinin sağlanamaması gibi optimize edilemeyen durumlara rağmen sistem devamlılık sağlamış ve arıtma verimi olumsuz etkilenmemiştir.

Değişen işletme koşullarına rağmen bakteri popülasyonu artarak ilerlemiştir. Bakteri kaybı, aktif çamur çıkışının yapıldığı zamanların dışında yaşanmamıştır. Aktif çamur çıkışı sonrasında ise bakteri popülasyonu sürekli artan bir grafik çizmiştir.

MBR sistemi, pompa ve difüzör kaynaklı havalandırma problemleri, sistemden aktif çamur çıkışı, ani (şok) besleme, sıcaklık değişimleri gibi değişen koşulları tolere edebilmiş ve çok kısa sürelerde mevcut duruma adapte olmuştur.

Kritik akının altında çalışılmış olmasına rağmen membran kirlenmesi meydana gelmiştir. Ancak membran tıkanmasının arıtılmış su değerlerine etkisinin olmadığı, aynı performansın sürdüğü tespitler arasındadır.

Arıtılmış suyun kalitesi, esnek işletme şartları, az yer kaplaması, düşük çamur üretimi, dezenfeksiyon ve koku yönetimi bakımından membran biyoreaktörler süt endüstrisi atıksularının arıtımı için tercih edilmesi önerilen bir prosestir.

5.2 Gelecek Çalışmalar

Gelecekte yapılacak olan çalışmalarda daha etkin çalışan membran geliştirilmesi ya da membran kirlenmesinin önlenmesi için yöntemler geliştirilmelidir. Böylece çıkış suyu kalitesinin yüksek olduğu MBR sistemlerinin yüksek kirlilik içeren atıksuların arıtımında kullanılma oranı arttırılmış olacaktır.

Kirlenmeye karşı mukavemeti daha yüksek olan membran seçimi yapmak, doğru havalandırma koşullarını sağlamak, kirlenmeyi etkileyecek bakteriyel faaliyetler üzerinde çalışmak gibi membran yüzeyinde çamur birikmesini engelleyecek tüm fiziksel, kimyasal ya da biyolojik uygulamalar MBR sistemin daha verimli çalışmasına katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Madaeni, S. S. ve Mansourpanah, Y., (2006). "Screening membranes for COD removal from dilute wastewater", *Desalination*, 197 (1): 23-32.
- [2] Al-Shammari, S.S., Bou-Hamad, S., Al-Saffar, A., Salman, M. ve Al-Sairafi, A., (2015). "Treatment of dairy processing wastewater using integrated submerged membrane microfiltration system", *J. Environ. Anal. Toxicol.*, 5 (4): 1-6.
- [3] Madaeni, S. S. ve Mansourpanah, Y., (2003). "COD removal from concentrated wastewater using membranes", *Filtration & separation*, 40 (6): 40-46.
- [4] Manu, K. J., Mohana, V. S. ve Ganeshaiah, K. N., (2011). "Effluent generation by the dairy units: Characterization and amelioration for irrigation", *Int J Res Chem Environ*, 1: 82.
- [5] Gaikar, R. B., Uphade, B. K., Gadhane, A. G. ve Kuchekar, S. R., (2010). "Effect of dairy effluent on seed germination and early seedling growth of soyabeans", *Rasayan journal of chemistry*, 3 (1): 137-139.
- [6] Dhanam, S., (2009). "Effect of dairy effluent on seed germination, seedling growth and biochemical parameter in Paddy", *Bot. Res. Int.*, 2 (2): 61-63.
- [7] Metin, M. ve Öztürk, F.G., (2003). *Süt İşletmelerinde Sanitasyon*, No:17, E.Ü. E.M.Y.O. Yayınları, İzmir.
- [8] European Commission (EC), Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) Reference Document on Best Available Techniques in the Food, http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/fdm_bref_0806.pdf , 20 Ekim 2017.
- [9] Environment Protection Agency (EPA), Environmental guidelines for the dairy processing industry, www.epa.vic.gov.au/~media/Publications/570.pdf, 18 Ekim 2017.
- [10] T.C. Resmi Gazete, Gıda sanayi atık sularının alıcı ortama deşarj standartları, Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, (25687), 31.12.2004, 25.
- [11] Demirel, B., Yenigün, O. ve Onay, T.T., (2005). "Anaerobik treatment of dairy wastewaters: a review", *Process Biochemistry*, 40: 2583- 2595.

- [12] İNCE, O., (1998). "Performance of Two-Phase Anerobic Digestion System When Treating Dairy Wastewater", *Water Research*, 32: 2707-2713.
- [13] Rivas, J., Prazeres, A.R. ve Carvalho, F., (2011). "Aerobic biodegradation of precoagulated cheese whey wastewater", *Agricultural Food Chemistry*, 59 (6): 2511-7.
- [14] Fang, H.H.P., (1991). "Treatment of Wastewater from a Whey Processing Plant Using Activated Sludge and Anaerobic Processes", *Journal of Dairy Science*, 74 (6): 2015-2019.
- [15] Britz, T. J., van Schalkwyk, C. ve Hung, Y. T. (2006). "Treatment of dairy processing wastewaters", *Waste treatment in the food processing industry*, 1: 28.
- [16] Prazeres, A.R., Carvalho, F. ve Rivas, J., (2012). "Cheese whey management: a review", *Journal of Environmental Management*, 110: 48-68.
- [17] Doble, M.ve Kumar, A., (2005). "Treatment of waste from food and dairy industries. In: Biotreatment of industrial effluents". Burlington, VT, USA: Elsevier Butterworth-Heinemann, 183: 5.
- [18] Mulder, M., (1996). *Basic Principles of Menbrane Technolog*, 2nd Ed., Kluwer Academic Publishers, The NetherLands.
- [19] Scott, K., (2006). *Handbook of Industrial Membranes*, 2nd Ed., Elsevier Advanced Technology, England.
- [20] Su ve Atıksu Arıtımında İleri Arıtma Teknolojileri-Aritılmış Atıksuların Geri Kullanımı Ders Notu, <https://xzenon34.files.wordpress.com/2012/03/5-ileri-aritma-teknolojileri-ders-notu-cevre-gorevlisi-egitimi-aralik-09-m-kitis.pdf>, 25 Ekim 2017.
- [21] Ramesh, R. B., Edited by Vogel, H. C. ve Todaro, C. L., (1997). *Fermentation and biochemical engineering handbook: principles, process design, and equipment*, 1st Ed., Noyes Publications, UK.
- [22] Judd S.J., (2006). *The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment*, 1st Ed., Elsevier, Oxford.
- [23] Zaidi, A., Simms, K. ve Kok, S., (1992). "The use of micro/ultrafiltration for the removal of oil and suspended solids from oilfield brines", *Water Science and Technology*, 25 (10): 163-176.
- [24] Koyuncu, I., Kural, E. ve Topacik, D., (2001). "Pilot scale nanofiltration membrane separation for waste management in textile industry", *Water Science and Technology*, 43(10): 233-240.
- [25] Baker, R. W., (2004). *Membrane technology and applications*, 2nd Ed., John Wiley and Sons Ltd., England.
- [26] Stephenson, T., Brindle, K., Judd, S. ve Jefferson, B., (2000). *Membrane bioreactors for wastewater treatment*, 1st Ed., IWA publishing, London.

- [27] Van der Roest, H. F., Lawrence, D. P. ve Van Bentem, A. G. N., (2002). *Membrane bioreactors for municipal wastewater treatment*, 1st Ed., IWA Publishing, London.
- [28] Judd, S. J., (2004). "A review of fouling of membrane bioreactors in sewage treatment", *Water Science and Technology*, 49 (2): 229-235.
- [29] Gunder, B., (2000). *The Membrane-Coupled Activated Sludge Process in Municipal Wastewater Treatment*, 1st Ed., Technomic Publishing, Lancaster.
- [30] Gander, M., Jefferson, B. ve Judd, S. (2000). "Aerobic MBRs for domestic wastewater treatment: a review with cost considerations", *Separation and purification Technology*, 18 (2): 119-130.
- [31] Judd, S. J., (2004). "A review of fouling of membrane bioreactors in sewage treatment", *Water Science & Technology*, 49 (2): 229-35.
- [32] Crawford, G., Thompson, D., Lozier, J., Daigger, G. ve Fleischer, E., (2000). "Membrane bioreactors-a designer's perspective, *Proceedings of the Water Environment Federation*", 2000 (9): 311-319.
- [33] Ortiz, M., Raluy, R. G. ve Serra, L., (2007). "Life cycle assessment of water treatment technologies: wastewater and water-reuse in a small town", *Desalination*, 204 (1): 121-131.
- [34] Çınar, Ö., Hasar, H. ve Kinaci, C., (2006). "Modeling of submerged membrane bioreactor treating cheese whey wastewater by artificial neural network", *Journal of biotechnology*, 123 (2): 204-209.
- [35] Meng, F., Chae, S. R., Drews, A., Kraume, M., Shin, H. S. ve Yang, F., (2009). "Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): membrane fouling and membrane material", *Water research*, 43 (6): 489-1512.
- [36] Le-Clech, P., Chen, V. ve Fane, T. A., (2006). "Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment", *Journal of membrane science*, 284 (1-2): 17-53.
- [37] Chang, I. S., Le Clech, P., Jefferson, B. ve Judd, S., (2002). "Membrane fouling in membrane bioreactors for wastewater treatment", *Journal of environmental engineering*, 128 (11): 1018-1029.
- [38] Ognier, S., Wisniewski, C. ve Grasmick, A., (2004). "Membrane bioreactor fouling in sub-critical filtration conditions: a local critical flux concept", *Journal of Membrane Science*, 229 (1): 171-177.
- [39] APHA, AWWA, WEF, (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, 21st Edition, Washington.
- [40] Bura, R., Cheung, M., Liao, B., Finlayson, J., Lee, B. C., Droppo, I. G., Leppard G.G. ve Liss, S. N., (1998). "Composition of extracellular polymeric substances in the activated sludge floc matrix", *Water Science and Technology*, 37 (4): 325-333.

- [41] Li, T., Bai, R. ve Liu, J., (2008). "Distribution and composition of extracellular polymeric substances in membrane-aerated biofilm", *Journal of biotechnology*, 135 (1): 52-57.
- [42] Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. T. ve Smith, F., (1956). "Colorimetric method for determination of sugars and related substances", *Analytical chemistry*, 28 (3): 350-356.
- [43] Vidal, G., Carvalho, A., Mendez, R. ve Lema, J. M., (2000). "Influence of the content in fats and proteins on the anaerobic biodegradability of dairy wastewaters". *Bioresource Technology*, 74 (3): 231-239.
- [44] Johansen, A. G., Vegarud, G. E. ve Skeie, S., (2002). "Seasonal and regional variation in the composition of whey from Norwegian Cheddar-type and Dutch-type cheeses", *International Dairy Journal*, 12 (7): 621-629.
- [45] Turan Bayram, T. ve Nuhoglu, A., (2013). "Süt Endüstrisi Atıksularının Biyolojik Arıtımında Mikroorganizma Konsantrasyonu ile Akı Profilinin Değişimi ve Kullanılan Membranın Temizlenmesi", *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2 (2): 9-20.
- [46] Andrade, L. H., Mendes, F. D. S., Espindola, J. C. ve Amaral, M. C. S., (2014). "Nanofiltration as tertiary treatment for the reuse of dairy wastewater treated by membrane bioreactor", *Separation and Purification Technology*, 126: 21-29.
- [47] Coppen, J., (2004). Advanced wastewater treatment system, <https://eprints.usq.edu.au/17/1/JohnCOPPEN-2004.pdf> , 20 Ekim 2017.
- [48] AMTA, Membrane Bio-Reactors (MBR), American membrane technology association, <http://www.amta.org.com> , 15 Kasım 2017.
- [49] Andrade, L. H., Motta, G. E. ve Amaral, M. C. S., (2013). "Treatment of dairy wastewater with a membrane bioreactor", *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 30 (4): 759-770.
- [50] Zinadini, S., Vatanpour, V., Zinatizadeh, A. A., Rahimi, M., Rahimi, Z. ve Kian, M., (2015). "Preparation and characterization of antifouling graphene oxide/polyethersulfone ultrafiltration membrane: application in MBR for dairy wastewater treatment", *Journal of Water Process Engineering*, 7: 280-294.
- [51] United Environmental protection Agency (EPA), Aquatic Life Criteria – Ammonia, <https://www.epa.gov/wqc/aquatic-life-criteria-ammonia>, 08 Aralık 2017.
- [52] Galil, N. I., Sheindorf, C., Stahl, N., Tenenbaum, A., ve Levinsky, Y., (2003). "Membrane bioreactors for final treatment of wastewater", *Water Science and Technology*, 48 (8): 103-110.
- [53] Andrade, L. H., Danielle de Souza Mendes, F., Cerqueira, N., Cawetierre Espindola, J. ve Cristina Santos Amaral, M., (2016). "Fouling evaluation in a MBR for dairy effluent treatment", *Desalination and Water Treatment*, 57 (26): 11919-11930.

- [54] Zavala, M. A. L., Funamizu, N. ve Takakuwa, T., (2004). "Temperature effect on aerobic biodegradation of feces using sawdust as a matrix", Water Research, 38 (9): 2406-2416.
- [55] Tchobanoglous G., Burton F.L. ve Stensel, H.D., (2003). Wastewater Engineering: Treatment and Reuse, 4th Edition, McGraw-Hill, New York.
- [56] United Environmental protection Agency (EPA), Indicators: Conductivity, <https://www.epa.gov/national-aquatic-resource-surveys/indicators-conductivity>, 12 Aralık 2017.
- [57] United Environmental protection Agency (EPA), Volunteer Estuary Monitoring: A Methods Manual, <http://www.epa.gov/owow/estuaries/monitor/>, 12 Aralık 2017.
- [58] Burgess, J. E. ve Pletschke, B. I., (2008). "Hydrolytic enzymes in sewage sludge treatment: a mini-review". Water Sa., 34 (3): 343-350.
- [59] Oviedo, M. D. C., López-Ramírez, J. A., Márquez, D. S. ve Alonso, J. M. Q., (2003). "Evolution of an activated sludge system under starvation conditions", Chemical Engineering Journal, 94 (2): 139-146.
- [60] Bougrier, C., Albasi, C., Delgenès, J. P. ve Carrère, H., (2006). "Effect of ultrasonic, thermal and ozone pre-treatments on waste activated sludge solubilisation and anaerobic biodegradability", Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 45 (8): 711-718.
- [61] Vesilind, P. A., (1988). "Capillary suction time as a fundamental measure of sludge dewaterability", Journal (Water Pollution Control Federation), 1: 215-220.
- [62] Tansel, B., Sager, J., Garland, J., Xu, S., Levine, L. ve Bisbee, P., (2006). "Deposition of extracellular polymeric substances (EPS) and microtopographical changes on membrane surfaces during intermittent filtration conditions", Journal of Membrane Science, 285 (1): 225-231.
- [63] Busch, P. L. ve Stumm, W., (1968). "Chemical interactions in the aggregation of bacteria bioflocculation in waste treatment", Environmental Science & Technology, 2 (1): 49-53.
- [64] Wilen, B. M., Jin, B. ve Lant, P., (2003). "The influence of key chemical constituents in activated sludge on surface and flocculating properties", Water research, 37 (9): 2127-2139.
- [65] Liao, B. Q., Allen, D. G., Droppo, I. G., Leppard, G. G. ve Liss, S. N., (2001). "Surface properties of sludge and their role in bioflocculation and settleability", Water research, 35 (2): 339-350.
- [66] Durmaz, B. ve Sanin, F. D., (2003). "Effect of carbon to nitrogen ratio on the physical and chemical properties of activated sludge", Environmental technology, 24 (11): 1331-1340.

- [67] ATV-DVWK, 131E, (2000). Dimensioning of single-stage activated sludge plants, GFA Publishing Company of ATVDVWK Water, Wastewater and Waste, Hennef.
- [68] Friedman, B. A., Dugan, P. R., Pfister, R. M. ve Remsen, C. C., (1969). "Structure of exocellular polymers and their relationship to bacterial flocculation", *Journal of Bacteriology*, 98 (3): 1328-1334.
- [69] Pavoni, J. L., Tenney, M. W. ve Echelberger Jr, W. F., (1972). "Bacterial exocellular polymers and biological flocculation", *Water Pollution Control Federation*, 1: 414-431.
- [70] Horan, N. J. ve Eccles, C. R., (1986). "Purification and characterization of extracellular polysaccharide from activated sludges", *Water Research*, 20 (11): 1427-1432.
- [71] Urbain, V., Block, J. C. ve Manem, J., (1993). "Bioflocculation in activated sludge: an analytic approach", *Water research*, 27 (5): 829-838.
- [72] Drews, A., Lee, C. H. ve Kraume, M., (2006). "Membrane fouling-a review on the role of EPS", *Desalination*, 200 (1): 186-188.
- [73] Cicek, N., Dionysiou, D., Suidan, M. T., Ginestet, P. ve Audic, J. M., (1999). "Performance deterioration and structural changes of a ceramic membrane bioreactor due to inorganic abrasion", *Journal of membrane Science*, 163 (1): 19-28.
- [74] Drews, A., Vocks, M., Bracklow, U., Iversen, V. ve Kraume, M., (2008). "Does fouling in MBRs depend on SMP? ", *Desalination*, 231 (1): 141-149.
- [75] Arabi, S. ve Nakhla, G., (2008). "Impact of protein/carbohydrate ratio in the feed wastewater on the membrane fouling in membrane bioreactors", *Journal of Membrane Science*, 324 (1): 142-150.
- [76] Bacchin, P., Aimar, P. ve Field, R. W., (2006). "Critical and sustainable fluxes: theory, experiments and applications", *Journal of membrane science*, 281 (1): 42-69.
- [77] Le Clech, P., Jefferson, B., Chang, I. S. ve Judd, S. J. (2003). "Critical flux determination by the flux-step method in a submerged membrane bioreactor", *Journal of membrane science*, 227 (1): 81-93.
- [78] Tchobanoglous, G., ve Burton, F. L., (1991). Wastewater engineering treatment, disposal and reuse., In: *Wastewater engineering treatment, disposal and reuse*, Fifth Edition, McGraw-Hill, New York.
- [79] Mikkelsen, L. H. ve Keiding, K., (2002). "Physico-chemical characteristics of full scale sewage sludges with implications to dewatering", *Water research*, 36(10): 2451-2462.
- [80] Karr, P. R. ve Keinath, T. M., (1978). "Influence of particle size on sludge dewaterability", *Water Pollution Control Federation*, 1: 1911-1930.
- [81] Judd, S., (2002). "Submerged membrane bioreactors: flat plate or hollow fibre? ", *Filtration & separation*, 39 (5): 30-31.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Merve SARAL
Doğum Tarihi ve Yeri : 26.02.1989 Trabzon
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : merve.srl@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Çevre Mühendisliği	Ondokuz Mayıs Üniversitesi	2014
Lise	Fen	Fatih Sultan Mehmet Anadolu Lisesi	2006

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2016	Yıldız Teknik Üniversitesi/TÜBİTAK	Proje Asistanı
2017	TGS Yer Hizmetleri A.Ş.	Yönetim Sistemleri Memuru

YAYINLARI

Proje

1-Membran Biyoreaktörde Mikroorganizmaların Sinyal İletimi Mekanizmasının İnhibisyonu 115Y576 numaralı TÜBİTAK Projesi

