ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

# Evsel Atıksuların Dinamik Membran Biyoreaktörü ile Arıtımının Laboratuvar Ölçeğinde İncelenmesi

**Ağah Oktay ACAROĞLU**

*Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı*

Ocak, 2026

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# YÜKSEK LİSANS TEZ ONAYI

## Evsel Atıksuların Dinamik Membran Biyoreaktörü ile Arıtımının Laboratuvar Ölçeğinde İncelenmesi

**Ağah Oktay ACAROĞLU**

***Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı***

Bu Yüksek Lisans Tezi 20/01/2026 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından Değerlendirilmiş ve Oy Birliği / ~~Oy Çokluğu~~ ile Kabul Edilmiştir.

Jüri : Doç. Dr. Fatma Elçin ERKURT (Danışman) ……

: Prof. Dr. Behzat BALCI ……

: Doç. Dr. Rozelin AYDIN ……

**Bu Tez Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında Hazırlanmıştır.**
**Tez No:**

**Prof. Dr. Sadık DİNÇER**
**Enstitü Müdürü**

**Not:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

**İÇİNDEKİLER**

ÖZ ..... I
ABSTRACT ..... II
TEŞEKKÜR ..... III
ÇİZELGELER DİZİNİ ..... IV
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... V
SİMGELER VE KISALTMALAR ..... VI
1. GİRİŞ ..... 1
1.1. Atıksular ve Evsel Atıksuların Karakteristikleri ..... 3
1.2. Atıksu Arıtımında Membran Teknolojileri ..... 3
1.2.1. Mikrofiltrasyon (MF) ..... 5
1.2.2. Ultrafiltrasyon (UF) ..... 6
1.2.3. Nanofiltrasyon (NF) ..... 7
1.2.4. Ters osmoz (RO) ..... 8
1.2.5. Dinamik Membran (DM) Teknolojileri ..... 9
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR ..... 14
3. MATERYAL VE METOT ..... 21
3.1. Kullanılan Aktif Çamurun Hazırlanması ve Karakterizasyonu ..... 21
3.2. Reaktörlerin Tanımı ve İşletme Koşulları ..... 24
3.2.1. Destek Tabakası ..... 27
3.2.2. Ölçülen Parametreler ..... 28
4. BULGULAR VE TARTIŞMA ..... 33
4.1. Dinamik membran oluşumu ve sistemin başlangıç davranışı ..... 33
4.1.1. 4000 mg/L MLSS işletme koşulları ..... 34
4.1.2. 3000 mg/L MLSS işletme koşulları ..... 40
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER ..... 47
5.1. Sonuçlar ..... 47
5.2. Öneriler ..... 48
KAYNAKLAR ..... 51
ÖZGEÇMİŞ ..... 57

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

# Evsel Atıksuların Dinamik Membran Biyoreaktörü ile Arıtımının Laboratuvar Ölçeğinde İncelenmesi

**Ağah Oktay ACAROĞLU**

***Danışman: Doç. Dr. Fatma Elçin ERKURT***

***Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı***

## ÖZ

Bu tez çalışmasında, evsel atıksuların arıtımında dinamik membran (DM) teknolojisinin uygulanabilirliği laboratuvar ölçekli bir dinamik membran biyoreaktör (DMBR) sistemi kullanılarak araştırılmıştır. Çalışmada laboratuvar şartlarında hazırlanmış sentetik evsel atıksu kullanılmış ve sistem performansı kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), askıda katı madde (AKM), filtrasyon akısı ve transmembran basınç (TMB) parametreleri üzerinden değerlendirilmiştir.

Deneysel çalışmalar sonucunda kontrol reaktöründe 3000 MLSS konsantrasyonunda %83–94 ve 4000 MLSS konsantrasyonunda %85–91 KOİ giderim verimleri elde edilmiştir. DMBR sisteminde ise 3000 MLSS konsantrasyonunda %82–99, 4000 MLSS konsantrasyonunda %91–98 KOİ giderim verimleri elde edilmiştir. AKM giderim verimleri %95'in üzerinde elde edilmiştir. DM tabakası oluşumundan sonra reaktörün çıkış suyu bulanıklık gideriminin kontrol reaktörüne göre daha iyi olduğu görülmüştür. Proses işletiminde, 3000 MLSS'de 13–23 L/m²·h aralığında 4000 MLSS'de ise 9–23 L/m²·h aralığında akı değerleri ölçülmüştür. TMB değerlerinin işletme süresi boyunca kademeli olarak arttığı, ani fouling davranışının gözlenmediği tespit edilmiştir. Artan MLSS konsantrasyonlarının dinamik membran oluşumunu hızlandırdığı, ancak yüksek MLSS seviyelerinde TMB artış hızının yükseldiği belirlenmiştir.

Elde edilen bulgular, dinamik membran teknolojisinin evsel atıksu arıtımında yüksek arıtma verimi, kontrol edilebilir filtrasyon davranışı ve düşük işletme maliyeti potansiyeli sunduğunu göstermektedir. Bu yönüyle DMBR sistemleri, konvansiyonel membran biyoreaktörlere ve klasik biyolojik arıtma sistemlerine ekonomik ve sürdürülebilir bir alternatif olarak değerlendirilmektedir.

**Anahtar Kelimeler**: Dinamik membran, DMBR, evsel atıksu, KOİ, AKM

**CUKUROVA UNIVERSITY**
**INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

**MSc THESIS**

# Laboratory-Scale Investigation of Domestic Wastewater Treatment Using a Dynamic Membrane Bioreactor

**Ağah Oktay ACAROĞLU**

***Advisor: Assoc. Prof. Fatma Elçin ERKURT***

***Department of Environmental Engineering***

## ABSTRACT

In this study, the applicability of dynamic membrane (DM) technology in the treatment of domestic wastewater was investigated using a laboratory-scale dynamic membrane bioreactor (DMBR) system. In the study, synthetic domestic wastewater prepared under laboratory conditions was used, and system performance was evaluated based on chemical oxygen demand (COD), suspended solids (SS), filtration flux, and transmembrane pressure (TMP) parameters.

As a result of the experimental studies, COD removal efficiencies of 83–94% at an MLSS concentration of 3000 mg/L and 85–91% at 4000 mg/L were achieved in the control reactor. In the DMBR system, COD removal efficiencies of 82–99% at 3000 mg/L MLSS and 91–98% at 4000 mg/L MLSS were obtained. Suspended solids removal efficiencies exceeded 95%. After the formation of the dynamic membrane layer, the effluent turbidity removal of the reactor was observed to be better than that of the control reactor. During process operation, flux values ranged between 13–23 L/m²·h at 3000 mg/L MLSS and 9–23 L/m²·h at 4000 mg/L MLSS. It was determined that TMP values increased gradually throughout the operation period, and no sudden fouling behavior was observed. Increasing MLSS concentrations were found to accelerate dynamic membrane formation; however, at higher MLSS levels, the rate of TMP increase also rose.

The obtained findings indicate that dynamic membrane technology offers high treatment efficiency, controllable filtration behavior, and potential for low operational costs in domestic wastewater treatment. In this respect, DMBR systems are considered an economical and sustainable alternative to conventional membrane bioreactors and classical biological treatment systems.

**Keywords**: Dynamic membrane, DMBR, domestic wastewater, COD, TSS

## TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans çalışmamı yapmam konusunda laboratuvar, çeşitli ekipman ve malzemeleri kullanmama imkan sağlayan değerli Çukurova Üniversitesi ve Çevre Mühendisliği Bölümü yetkililerine teşekkür ederim.

Tez çalışmamın hayata geçmesinde, yürütülmesinde bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, benimle birlikte tüm süreç boyunca emek veren değerli danışmanım Doç. Dr. Fatma Elçin ERKURT' a teşekkürlerimi sunarım.

Akademik kariyerimin başlangıç noktasını oluşturan bu çalışmanın temellerini atmamda öngörü ve desteklerini esirgemeyen, çalışmalarıma yön veren değerli tüm akademisyenlere teşekkür ederim.

Tez çalışmamın hazırlık ve test çalışmaları boyunca düzeneklerin kurulması, onarım ve geliştirilmesi konularında destek veren AAG Arıtma Çev. Tek. Ltd. Şti. ailesine teşekkür ederim.

Bu tez çalışmam ve tüm hayatım boyunca bana her daim tam destek veren, kıymetli Anne, Babam ve değerli eşime minnetlerimi sunarım.

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Evsel atıksuların tipik karakteristikleri ..... 3
Çizelge 1.2. Farklı membran sistemlerinin işletme şartlarının karşılaştırılması ..... 4
Çizelge 3.1. Sentetik Atıksuyun Reçetesi (Ham Aktif Çamur için)..... 23
Çizelge 3.2. Aktif Çamur Hazırlama Prosesi Başlangıç Tasarım Verileri..... 24
Çizelge 4.1. DM farklı destek malzemelerinin işletme parametreleri..... 45

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. DM kek tabakasının şematik gösterimi ..... 10
Şekil 3.1. Laboratuvar Ölçekli Aktif Çamur Tankı ..... 21
Şekil 3.2. Sentetik Atıksuyun Hazırlanması ..... 22
Şekil 3.3. Aktif Çamur Hazırlama Prosesi ..... 23
Şekil 3.4. Geçiçi SBR Reaktörleri ..... 24
Şekil 3.5. Reaktörlerin Sentetik Atıksuyunun Hazırlanması ..... 25
Şekil 3.6. Reaktör Tasarımı ..... 26
Şekil 3.7. DMBR membran kaseti ..... 27
Şekil 3.8. DMBR destek tabaka malzemesi ..... 27
Şekil 3.9. KOİ deney düzeneği ..... 28
Şekil 3.10. AKM deney düzeneği ..... 29
Şekil 3.11. Oksijenmetre ..... 30
Şekil 3.12. TMB ölçüm düzeneği ..... 30
Şekil 4.1. Destek malzemesi üzerinde oluşan dinamik membran kek tabakası ..... 34
Şekil 4.2. 4000 mg/L MLSS'de DMBR zamana bağlı TMB değişim grafiği ..... 35
Şekil 4.3. 4000 mg/L MLSS'de DMBR zaman bağlı akı değişimi ..... 36
Şekil 4.4. 4000 mg/L MLSS'de DMBR zamana bağlı akı ve TMB değişimi ..... 37
Şekil 4.5. 4000 mg/L MLSS'de Kontrol SBR KOİ giderimleri ..... 38
Şekil 4.6. 4000 mg/L MLSS'de DMBR KOİ giderimleri ..... 39
Şekil 4.7. 4000 mg/L MLSS'de Kontrol SBR ve DMBR'nin KOİ giderimleri ..... 40
Şekil 4. 8. 3000 mg/L MLSS'de DMBR zamana bağlı TMB değişim grafiği ..... 40
Şekil 4.9. 3000 mg/L MLSS'de DMBR zaman bağlı akı değişimi ..... 41
Şekil 4.10. 3000 mg/L MLSS'de DMBR zamana bağlı akı ve TMB değişimi ..... 42
Şekil 4. 11. 3000 mg/L MLSS'de Kontrol SBR KOİ giderimleri ..... 43
Şekil 4.12. 3000 mg/L MLSS'de DMBR KOİ giderimleri ..... 43
Şekil 4.13. 3000 mg/L MLSS'de Kontrol SBR ve DMBR'nin KOİ giderimleri ..... 44
Şekil 4.14. 4000 - 3000 mg/L MLSS'de DMBR'lerinin KOİ giderimleri ..... 44

**SİMGELER VE KISALTMALAR**

AKM : Askıda Katı Madde
AnDMBR : Anaerobik Dinamik Membran Reaktörü
CAS : Klasik Aktif Çamur Sistemi
CFV : Çapraz Akış Hızı
DMBR : Dinamik Membran Reaktörü
EDS : Enerji Dağılımlı X- Işını Spektroskopisi
EPS : Hücre Dışı Polimerik Maddeler
Flux : Akı
Fouling : Membran Tıkanması
FTIR : Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
HRAS : Yüksek Hızlı Aktif Çamur Sistemi
HRT : Hidrolik Alıkonma Süresi
KOİ : Kimyasal Oksijen İhtiyacı
MBR : Membran Biyoreaktör
MF : Mikrofiltrasyon
MLSS : Mixed Liquor Suspended Solids
MWCO : Molekül Ağırlığı Kesme Sınırı
NF : Nanofiltrasyon
RO : Ters Osmoz
SBR : Ardışık Kesikli Reaktör
SEM : Taramalı Elektron Mikroskopu
SFDM : Kendiliğinden Oluşan Dinamik Membran
SMP : Çözünmüş Mikrobiyal Ürünler
SRT : Çamur Yaşı
TDS : Toplam Çözünmüş Katı Maddeler
TMB : Transmembran Basıncı
UF : Ultrafiltrasyon
XRD : X- Işını Kırınımı

# 1. GİRİŞ

Küresel ölçekte artan nüfus, sanayileşme ve kentleşme süreçleri, su kaynakları üzerindeki baskıyı giderek artırmaktadır. Dünya genelinde su talebi son 50 yılda yaklaşık üç kat artmış olup, 2012 yılına kıyasla 2050 yılına kadar bu talebin %55 oranında yükseleceği öngörülmektedir (Smith ve ark., 2024). Dünya Sağlık Örgütü'nün verilerine göre yaklaşık 2 milyar insan güvenli içme suyuna erişememekte ve yeterli su sanitasyon hizmetinden yoksun yaşamaktadır (WHO&UNICEF, 2022). Bu yalnızca suyun miktarının değil, kalitesinin korunmasının da küresel ölçekte önceliklendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Suyun döngüsel ekonomiye entegre edilmesi ve atıksuların yeniden kullanımı, sürdürülebilir su yönetiminin temel stratejilerinden biri haline gelmiştir.

Türkiye, yarı kurak iklim kuşağında yer almakta olup kişi başına düşen yıllık kullanılabilir tatlı su miktarı yaklaşık 1.322 $m^3$'tür (DSİ, 2023). TÜİK' in 2024 yılı istatistiklerine göre, kanalizasyon şebekesinden deşarj edilen 5,8 milyar $m^3$ atıksuyun 4,9 milyar $m^3$'ü atıksu arıtma tesislerinde arıtıldı. Arıtılan atıksuyun %53,8'ine gelişmiş, %24,5'ine biyolojik, %21,4'üne fiziksel ve %0,3'üne doğal arıtma uygulandı. Belediyeler tarafından arıtılan atıksuyun %1,3'ü sanayi, tarımsal sulama vb. alanlarda yeniden kullanıldı. Atıksu arıtma tesisi ile hizmet verilen belediye nüfusunun toplam belediye nüfusuna oranı %76,9 olarak belirlendi (TÜİK, 2025). Bu durum, özellikle kentleşmenin ve sanayileşmenin yoğun olduğu bölgelerde yüzeysel ve yeraltı suyu kalitesini olumsuz etkilemektedir.

Adana ili özelinde, Seyhan ve Yüreğir bölgelerinde yoğunlaşan nüfus, gelişen sanayi faaliyetleri ve tarımsal üretim, kişi başına düşen su tüketimini artırmakta ve yüksek hacimde evsel nitelikli atıksu oluşumuna neden olmaktadır. Adana Su ve Kanalizasyon İdaresi'nin (ASKİ) 2024 yılı faaliyet raporuna göre, il genelinde günlük yaklaşık 420.000 $m^3$ evsel atıksu toplanmakta ve bunun 200.000 $m^3$/gün ortalama kapasitedeki miktarı Seyhan Atıksu Arıtma Tesisi'nde arıtılmaktadır (ASKİ, 2024). Ancak artan debi ve değişken atıksu karakterizasyonu, mevcut biyolojik sistemlerin stabil çalışmasını zaman zaman güçleştirmektedir. Bu nedenle, hem yüksek arıtma verimi sağlayan hem de enerji ve bakım maliyetleri açısından ekonomik alternatif teknolojilerin araştırılması gereklidir.

Evsel atıksuların bileşimi yüksek organik madde (KOİ), askıda katı madde (AKM), azot ve fosfor gibi besin elementlerinin yanı sıra çeşitli patojen mikroorganizmaları içermektedir. Bu bileşenlerin arıtılmadan alıcı ortamlara ulaşması, ötrofikasyon, çözünmüş oksijen azalması, balık ölümleri ve halk sağlığı üzerinde ciddi etkiler oluşturabilmektedir. Bu nedenle, arıtma sistemlerinin etkinliği yalnızca organik madde giderimiyle değil, aynı zamanda çözünmüş oksijen (ÇO) dengesi ve sistemin hidrodinamik stabilitesiyle de ilişkilidir. Günümüzde klasik aktif çamur sistemleri yaygın olarak kullanılmakla birlikte, bu sistemler yüksek enerji gereksinimi, fazla çamur üretimi gibi problemler nedeniyle alternatif yaklaşımlara ihtiyaç duymaktadır.

Bu bağlamda, membran tabanlı arıtma sistemleri son yıllarda öne çıkan ileri arıtma yöntemleri arasında yer almaktadır. Mikrofiltrasyon, ultrafiltrasyon, nanofiltrasyon ve ters ozmoz gibi konvansiyonel membran teknolojileri yüksek verimlilik ve kompakt tasarım avantajı sunmaktadır. Ancak yüksek yatırım ve işletme maliyetleri ile membran tıkanması (fouling) problemleri, bu sistemlerin yaygınlaşmasını sınırlamaktadır (Judd, 2010). Bu nedenlerle, daha düşük maliyetli ve operasyonel olarak esnek sistemlerin geliştirilmesi ihtiyacı doğmuştur. Dinamik membran teknolojisi (DM), bu bağlamda umut vadeden yenilikçi bir çözüm olarak öne çıkmaktadır.

Dinamik membranlar, düşük maliyetli gözenekli bir destek malzemesi üzerinde, atıksu içerisindeki partiküller ve mikroorganizmaların birikimi sonucu in-situ olarak oluşan geçirgen bir tabaka sayesinde filtrasyon işlevi görür. Bu tabaka zamanla stabil bir "biyolojik membran" yapısına dönüşür ve sistemin arıtma performansını artırır (Mohan & Nagalakshmi, 2020). Dinamik membran sistemleri, düşük transmembran basıncı (TMB) altında çalışabilmesi, yüksek AKM giderim verimi ve düşük enerji tüketimi gibi avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, tabaka kendiliğinden yenilenebildiği için klasik membran sistemlerine kıyasla bakım ve temizlik maliyetleri de düşüktür (Zhang ve ark., 2019).

Bu tez çalışmasında, evsel atıksuların arıtımında DM teknolojisinin uygulanabilirliği laboratuvar ölçekli bir reaktörde araştırılmıştır. Çalışmada farklı işletme koşullarında (MLSS konsantrasyonu) dinamik membran performansı değerlendirilmiştir. Arıtma verimi, kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) ve askıda katı madde (AKM) parametreleri üzerinden analiz edilmiştir. Ayrıca, sistemin akı ve transmembran basıncının (TMB) zamanla değişimi incelenmiştir. Deneysel çalışmalar, sentetik evsel atıksu kullanılarak kontrollü laboratuvar koşullarında yürütülmüştür.

Bu çalışmanın DM teknolojisinin laboratuvar ölçeğinde, evsel atıksular ile test edilmesi bakımından sınırlı olan çalışmalara katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Elde edilen sonuçlar, konvansiyonel biyolojik arıtma sistemleriyle karşılaştırıldığında dinamik membranın arıtma verimi ve operasyonel stabilite açısından avantajlarını ortaya koymayı hedeflemektedir. Bu amaçla kontrol reaktörü de eşzamanlı işletilmiştir. Ayrıca çalışma, DM sistemlerinin pilot ölçeğe taşınabilirliğini değerlendirmek için bilimsel bir temel oluşturacaktır. Bu yönüyle, yerel yönetimlerin su geri kazanımı ve sürdürülebilir arıtma teknolojileri konusundaki stratejilerine katkı sağlayacak niteliktedir.

Sonuç olarak, bu tezin amacı, evsel atıksuların arıtımında DM teknolojisinin performansını laboratuvar ölçeğinde belirlemek ve bu teknolojinin düşük maliyetli, enerji verimli ve sürdürülebilir bir alternatif arıtma yöntemi olarak uygulanabilirliğini ortaya koymaktır. Çalışma sonuçlarının, hem akademik araştırmalara hem de yerel arıtma uygulamalarına yol gösterici olması beklenmektedir.

## 1.1. Atıksular ve Evsel Atıksuların Karakteristikleri

Atıksular, suyun kullanımı sonucu fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri değişen ve alıcı ortamlara deşarj edilmeden önce arıtılması gereken sulardır (Metcalf & Eddy, 2014). Kaynaklarına göre atıksular; evsel, endüstriyel ve tarımsal olmak üzere üç ana grupta sınıflandırılmaktadır.

Evsel atıksular, konutlardan, okullardan, ofislerden ve ticari alanlardan kaynaklanan; organik madde, besin elementleri (azot, fosfor), deterjan, yağ, sabun ve mikro kirleticiler gibi bileşenleri içeren kompleks bir karışımdır (Metcalf & Eddy, 2014). Evsel atıksuların tipik karakteristikleri Çizelge 1.1.'de özetlenmiştir.

Çizelge 1.1. Evsel atıksuların tipik karakteristikleri (Metcalf & Eddy, 2014)

| Parametre | Aralık (mg/L) |
|---|---|
| **KOİ** | 250–800 |
| **$BOİ_5$** | 200–400 |
| **AKM** | 200–400 |
| **Toplam Azot** | 20–85 |
| **Toplam Fosfor** | 4–15 |

Evsel atıksuların arıtımı; çevresel koruma, halk sağlığı ve yeniden kullanım açısından büyük önem taşımaktadır. Ancak, klasik arıtma sistemleri özellikle mikro kirleticiler ve besin elementlerinin uzaklaştırılmasında yetersiz kalabilmektedir.

## 1.2. Atıksu Arıtımında Membran Teknolojileri

Membran teknolojileri, atıksu arıtımında yüksek arıtma verimi sağlaması, kompakt tasarım avantajı ve farklı kirletici türlerine karşı seçici ayırma yapabilmesi nedeniyle son yıllarda yaygın olarak kullanılan ileri arıtma yöntemleri arasında yer almaktadır. Membran prosesleri, yarı geçirgen bir bariyer aracılığıyla çözünmüş veya askıda bulunan kirleticilerin fiziksel, kimyasal veya elektrokimyasal etkileşimler sonucu sudan ayrılması esasına dayanmaktadır (Bera ve ark., 2022).

Atıksu arıtımında kullanılan membranlar, ayırma mekanizmasına ve gözenek boyutlarına bağlı olarak mikrofiltrasyon (MF), ultrafiltrasyon (UF), nanofiltrasyon (NF) ve ters osmoz (RO) olmak üzere dört ana grupta sınıflandırılmaktadır. Mikrofiltrasyon ve ultrafiltrasyon membranları genellikle askıda katı maddelerin, kolloidal partiküllerin ve mikroorganizmaların gideriminde kullanılırken; nanofiltrasyon ve ters osmoz membranları çözünmüş tuzlar, organik mikrokirleticiler ve düşük molekül ağırlıklı bileşiklerin gideriminde etkili olmaktadır (Judd, 2010). Farklı membran sistemlerinin özelliklerinin karşılaştırılması Çizelge 1.2'de verilmiştir.

Çizelge 1.2. Farklı membran sistemlerinin işletme şartlarının karşılaştırılması (Gray, 2014)

| ***Proses*** | ***Partikül giderim aralığı*** *(μm)* | ***Giderilen Başlıca Bileşenler*** | ***İşletim Basıncı (bar)*** | ***Akış hızı (L/m²h)*** | ***Atıksu Arıtımındaki Rolü*** |
|---|---|---|---|---|---|
| *MF* | 0,1–10 | AKM, kolloidler, bakteriler | 0,5–2 | 100-1000 | Ön arıtma, MBR |
| *UF* | 0,005-0,2 | AKM, kolloidler, virüsler, biyopolimerler | 1–5 | 50-200 | MBR, ileri arıtma |
| *NF* | 0,001-0,005 | NOM, renk, çok değerlikli iyonlar | 5–20 | 20-50 | İleri arıtma, yeniden kullanım |
| *RO* | 0,0001-0,001 | TDS, tuzlar, mikrokirleticiler | 20–80 | 10-50 | Yeniden kullanım, ZLD |

Membran teknolojilerinin biyolojik arıtma sistemleriyle entegrasyonu sonucu geliştirilen membran biyoreaktör (MBR) sistemleri, konvansiyonel aktif çamur proseslerine kıyasla daha yüksek çıkış suyu kalitesi sağlamaktadır. MBR sistemlerinde çöktürme ünitesine ihtiyaç duyulmamakta ve yüksek çamur yaşları (SRT) altında işletme mümkün olmaktadır. Bu durum özellikle azot giderimi ve yavaş büyüyen mikroorganizmaların sistemde tutulması açısından önemli avantajlar sunmaktadır (Le-Clech ve ark., 2006).

Bununla birlikte, membran teknolojilerinin atıksu arıtımında karşılaşılan en önemli sınırlayıcı faktörlerinden biri membran kirlenmesi (fouling) problemidir. Membran yüzeyinde ve gözeneklerinde biriken partiküller, biyolojik ürünler ve çözünmüş organik maddeler zamanla akı kaybına ve transmembran basıncının artmasına neden olmaktadır. Bu durum işletme maliyetlerini artırmakta ve sistemin sürdürülebilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir (Van der Bruggen ve ark., 2003).

Son yıllarda, klasik membran sistemlerine alternatif olarak geliştirilen dinamik membran (DM) teknolojileri, membran kirlenmesini yönetilebilir bir avantaja dönüştürmesi nedeniyle dikkat çekmektedir. Dinamik membran sistemlerinde, gözenekli bir destek malzemesi üzerinde oluşan ikincil filtrasyon tabakası ayırma işlemini gerçekleştirmekte; bu sayede pahalı membran malzemelerine olan ihtiyaç azalmakta ve işletme maliyetleri düşürülebilmektedir. Dinamik membranlar, özellikle evsel atıksu arıtımı ve düşük-orta kirlilik yüküne sahip atıksular için umut vadeden bir alternatif olarak değerlendirilmektedir (Chu ve ark., 2014; Li ve ark., 2018).

Son yıllarda artan küresel su kıtlığı, iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki baskısı ve suyun yeniden kullanımına yönelik artan gereksinimler, atıksu arıtımında ileri teknolojilerin geliştirilmesini zorunlu hâle getirmiştir. Membran teknolojileri, yüksek çıkış suyu kalitesi sağlamaları nedeniyle bu süreçte kilit bir rol üstlenmekle birlikte; enerji tüketimi, membran kirlenmesi ve işletme maliyetleri gibi sınırlayıcı faktörler, klasik membran sistemlerinin sürdürülebilirliğini tartışmalı hâle getirmektedir. Bu nedenle, mevcut membran proseslerinin avantajlarını korurken çevresel ve ekonomik dezavantajlarını azaltmayı hedefleyen yenilikçi membran yaklaşımları, sürdürülebilir su yönetimi ve atıksu yeniden kullanım stratejilerinin merkezinde yer almaktadır (Elimelech & Phillip, 2011; Majamaa ve ark., 2010; CSGB, 2017).

Bu bağlamda, pahalı membran malzemelerine olan bağımlılığı azaltan, düşük basınç altında çalışabilen ve membran kirlenmesini ayırma mekanizmasının doğal bir parçası hâline getiren dinamik membran teknolojileri, klasik membran sistemlerine alternatif ve yenilikçi bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır.

### 1.2.1. Mikrofiltrasyon (MF)

Mikrofiltrasyon (MF), gözenek çapı genellikle 0,1–10 µm aralığında olan membranların kullanıldığı, basınca dayalı bir ayırma prosesidir ve özellikle askıda katı maddelerin, kolloidal partiküllerin ve bazı mikroorganizmaların sudan uzaklaştırılmasında etkin bir teknolojidir. Atıksu arıtımında mikrofiltrasyon, çoğunlukla ileri arıtım veya yeniden kullanım uygulamalarında, konvansiyonel biyolojik arıtma süreçlerini takiben bir fiziksel bariyer olarak kullanılmaktadır (Mulder, 1996; El Batouti ve ark., 2021).

Mikrofiltrasyon membranları; polimerik (PVDF, PES, PP, PE) veya seramik malzemelerden üretilebilmekte ve düz levha, içten/dıştan akışlı fiber veya tübüler modüller halinde tasarlanabilmektedir. İşletme genellikle düşük transmembran basınçlarında (0,1–2 bar) gerçekleştirilir ve bu durum mikrofiltrasyonu, enerji tüketimi açısından ultrafiltrasyon ve ters ozmoz gibi daha sıkı membran proseslerine kıyasla avantajlı kılar. Bununla birlikte MF membranları, çözünmüş organik maddeler ve düşük molekül ağırlıklı kirleticiler için doğrudan bir giderim sağlamaz; bu nedenle biyolojik arıtım süreçleriyle birlikte kullanımı yaygındır (Judd, 2010).

Atıksu arıtımında mikrofiltrasyonun en önemli uygulama alanlarından biri, membran biyoreaktör (MBR) sistemleridir. MBR proseslerinde mikrofiltrasyon membranları, biyolojik reaktördeki aktif çamurun sistemde tutulmasını sağlayarak yüksek çamur yaşı (SRT) ve düşük çıkış suyu bulanıklığı elde edilmesine olanak tanır. Bu sayede, klasik aktif çamur sistemlerine kıyasla daha kompakt tasarımlar ve daha yüksek çıkış suyu kalitesi mümkün olmaktadır (Le-Clech ve ark., 2006). Mikrofiltrasyon tabanlı MBR sistemleri, özellikle azot ve fosfor gideriminin hedeflendiği ileri biyolojik arıtma uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir.

Bununla birlikte, mikrofiltrasyon proseslerinin performansını sınırlayan temel sorun membran kirlenmesi (fouling) olup; partikül birikimi, biyolojik fouling ve çözünmüş organik maddelerin membran yüzeyinde veya gözeneklerinde tutulması sonucu akı düşüşü meydana gelmektedir. Bu nedenle atıksu mikrofiltrasyon sistemlerinde ön arıtma, havalandırma ile yüzey temizliği, periyodik geri yıkama ve kimyasal temizlik stratejileri kritik öneme sahiptir (Brindle & Stephenson, 1996). Son yıllarda geliştirilen dinamik membran ve hibrit sistemler, mikrofiltrasyonun fouling eğilimini azaltmaya yönelik alternatif yaklaşımlar olarak literatürde giderek daha fazla yer bulmaktadır.

### 1.2.2. Ultrafiltrasyon (UF)

Ultrafiltrasyon (UF), gözenek çapı yaklaşık 0,005–0,2 µm aralığında veya molekül ağırlığı kesme değeri (MWCO) 1–100 kDa arasında değişen yarı geçirgen membranlar kullanılarak gerçekleştirilen basınca dayalı bir ayırma prosesidir. UF, askıda katı maddeler, kolloidal partiküller, bakteriler, protozoalar ve yüksek molekül ağırlıklı organik maddelerin sudan uzaklaştırılmasında etkili olup, mikrofiltrasyona kıyasla daha sıkı bir fiziksel bariyer sunar. Atıksu arıtımında ultrafiltrasyon, ileri arıtım ve suyun yeniden kullanımına yönelik uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir (Fane ve ark., 2010).

Ultrafiltrasyon membranları çoğunlukla polimerik malzemelerden (PVDF, PES, PS, PAN) üretilmekte olup, düz levha, hollow fiber veya tübüler modül konfigürasyonlarında tasarlanabilmektedir. İşletme basınçları genellikle 0,5–5 bar aralığındadır ve bu değerler, ters ozmoz gibi daha ileri membran proseslerine göre daha düşük enerji gereksinimi anlamına gelmektedir. UF membranları çözünmüş inorganik iyonları tutamazken, yüksek molekül ağırlıklı çözünmüş organik maddelerin ve biyopolimerlerin önemli bir kısmını giderebilmektedir (Judd, 2010).

Atıksu arıtımında ultrafiltrasyonun en yaygın kullanım alanlarından biri, membran biyoreaktör (MBR) sistemleridir. UF tabanlı MBR'lerde membranlar, biyolojik reaktördeki aktif çamurun tamamen tutulmasını sağlayarak çıkış suyunda çok düşük bulanıklık ve askıda katı madde konsantrasyonu elde edilmesine olanak tanır. Bu durum, klasik aktif çamur sistemlerine kıyasla daha yüksek çamur yaşı (SRT), daha iyi biyolojik bozunma ve kompakt tesis tasarımı gibi önemli avantajlar sağlamaktadır (Le-Clech ve ark., 2006). Bu nedenle ultrafiltrasyon, özellikle azot ve fosfor gideriminin hedeflendiği ileri biyolojik arıtma uygulamalarında kritik bir rol oynamaktadır.

Bununla birlikte, ultrafiltrasyon proseslerinin en önemli sınırlayıcı faktörü membran kirlenmesi (fouling) olup; çözünmüş organik maddeler, hücre dışı polimerik maddeler (EPS), çözünmüş mikrobiyal ürünler (SMP) ve kolloidal partiküllerin membran yüzeyinde veya gözenek içinde birikmesiyle akı kayıpları meydana gelmektedir. Bu durum, mikrofiltrasyona kıyasla UF membranlarında daha belirgin olabilmektedir. Bu nedenle UF sistemlerinde ön arıtma, hidrodinamik kontrol, geri yıkama, hava ile yüzey temizliği ve kimyasal temizlik stratejileri işletme performansı açısından büyük önem taşımaktadır (Meng ve ark., 2009).

Son yıllarda yapılan çalışmalar, ultrafiltrasyonun dinamik membran, hibrit MBR ve ön arıtma–UF kombinasyonları ile birlikte kullanılması durumunda hem fouling eğiliminin azaltılabildiğini hem de sistemin uzun dönemli kararlılığının artırılabildiğini göstermektedir. Bu bağlamda ultrafiltrasyon, atıksu arıtımında yalnızca bir ayırma prosesi değil, biyolojik ve fiziksel süreçlerle entegre edilebilen çok yönlü bir ileri arıtım teknolojisi olarak değerlendirilmektedir (Judd, 2010).

### 1.2.3. Nanofiltrasyon (NF)

Nanofiltrasyon (NF), mikrofiltrasyon ve ultrafiltrasyon ile ters ozmoz arasında yer alan, gözenek çapı yaklaşık 0,001–0,005 µm aralığında olan veya molekül ağırlığı kesme değeri (MWCO) genellikle 200–1000 Da arasında değişen yarı geçirgen membranlar kullanılarak gerçekleştirilen basınca dayalı bir ayırma prosesidir. NF membranları; çok değerli iyonlar, yüksek molekül ağırlıklı çözünmüş organik maddeler ve doğal organik maddelerin (NOM) gideriminde etkili olup, tek değerli iyonlara karşı ise sınırlı geçirgenlik göstermektedir. Bu özellikleri sayesinde nanofiltrasyon, atıksu arıtımında ileri arıtım ve yeniden kullanım uygulamalarında önemli bir rol oynamaktadır (Mulder, 1996).

Nanofiltrasyon membranları çoğunlukla poliamid esaslı ince film kompozit (TFC) yapıya sahip olup, genellikle spiral sarımlı modüller şeklinde tasarlanmaktadır. İşletme basınçları ultrafiltrasyona kıyasla daha yüksek olup, genellikle 3–20 bar aralığında değişmektedir. NF prosesinde ayırma mekanizması yalnızca gözenek boyutuna bağlı değildir; aynı zamanda membran yüzeyinin elektriksel yükü nedeniyle Donnan dışlama etkisi de önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle nanofiltrasyon, özellikle iki ve daha yüksek değerlikli iyonların ($Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$, $SO_4^{2-}$) gideriminde ters ozmoza yakın performans gösterebilmektedir (Van der Bruggen ve ark., 2003).

Atıksu arıtımında nanofiltrasyonun başlıca kullanım alanları; renk giderimi, mikrokirleticilerin uzaklaştırılması, sertlik azaltma, endüstriyel atıksuların yeniden kullanımı ve içme suyu kaynaklarının korunması şeklinde sıralanabilir. Özellikle tekstil, kâğıt, gıda ve ilaç endüstrilerinden kaynaklanan atıksularda, boyar maddelerin ve aromatik organik bileşiklerin yüksek oranda giderilebildiği birçok çalışmada rapor edilmiştir (Schaep ve ark., 1998). Bununla birlikte NF, ters ozmoza kıyasla daha düşük enerji tüketimi ve daha yüksek akı değerleri sağlaması nedeniyle ekonomik açıdan da avantajlı bir alternatif olarak değerlendirilmektedir (Alhussaini ve ark., 2024).

Nanofiltrasyon sistemlerinde karşılaşılan temel işletme problemi membran kirlenmesi (fouling) ve konsantrasyon polarizasyonu olup; özellikle çözünmüş organik maddeler, biyolojik bileşenler ve inorganik tuzların birikimi, sistem performansını olumsuz yönde etkilemektedir (Liu ve ark., 2024). Bu nedenle nanofiltrasyon proseslerinde etkin bir ön arıtma (koagülasyon, UF/NF entegrasyonu), uygun hidrolik tasarım ve düzenli kimyasal temizlik uygulamaları büyük önem taşımaktadır (Fritzmann ve ark., 2007). Literatürde, ultrafiltrasyon veya mikrofiltrasyonun ön arıtma olarak kullanıldığı hibrit sistemlerin, NF membranlarının fouling eğilimini belirgin şekilde azalttığı ve sistemin uzun dönemli kararlılığını artırdığı vurgulanmaktadır (Xie ve ark., 2025).

Son yıllarda yapılan çalışmalar, nanofiltrasyonun mikrokirleticiler, endokrin bozucu bileşikler ve farmasötik kalıntılar gibi çevresel açıdan kritik parametrelerin gideriminde etkili olduğunu ortaya koymuştur. Bu bağlamda NF, klasik arıtma prosesleriyle giderimi zor olan kirleticiler için önemli bir ileri arıtım teknolojisi olarak öne çıkmakta ve sürdürülebilir su yönetimi kapsamında stratejik bir konuma yerleşmektedir (Bellona ve ark., 2004).

### 1.2.4. Ters osmoz (RO)

Ters ozmoz (RO), yarı geçirgen membranlar aracılığıyla suyun, ozmotik basıncın üzerinde uygulanan hidrolik basınç yardımıyla membrandan geçirilmesi esasına dayanan en ileri basınca dayalı ayırma proseslerinden biridir. RO membranları, gözenekli bir yapıdan ziyade moleküler ölçekte ayırma gerçekleştirmekte olup, çözünmüş tuzlar, çok ve tek değerli iyonlar, düşük molekül ağırlıklı organik maddeler, mikroorganizmalar ve mikrokirleticiler dâhil olmak üzere geniş bir kirletici spektrumunun yüksek oranda giderimini sağlamaktadır. Bu özelliği sayesinde ters ozmoz, atıksu arıtımında özellikle ileri arıtım ve yeniden kullanım uygulamalarının temel teknolojilerinden biri haline gelmiştir (Mulder, 1996).

Ters ozmoz membranları çoğunlukla poliamid esaslı ince film kompozit yapıdadır ve genellikle spiral sarımlı modüller halinde kullanılmaktadır. RO sistemlerinde işletme basınçları, besleme suyunun tuzluluğuna bağlı olarak 10–80 bar aralığında değişmekte olup, bu değerler mikrofiltrasyon, ultrafiltrasyon ve nanofiltrasyona kıyasla daha yüksek enerji tüketimi anlamına gelmektedir. Ancak RO'nun sağladığı yüksek ayırma verimi, özellikle suyun yeniden kullanımının veya yüksek kalitede ürün suyunun hedeflendiği uygulamalarda bu dezavantajı tolere edilebilir kılmaktadır (Fritzmann ve ark., 2007).

Atıksu arıtımında ters ozmoz; endüstriyel atıksuların geri kazanımı, deniz suyu ve orta–yüksek tuzlulukta yeraltı sularının arıtımı, mikrokirleticilerin giderimi, iletkenlik ve toplam çözünmüş madde (TDS) azaltımı gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle tekstil, enerji ve kimya endüstrilerinde RO, proses suyunun geri kazanılması ve sıfır sıvı deşarj (ZLD) yaklaşımlarının uygulanmasında kritik bir rol üstlenmektedir. Literatürde, RO'nun farmasötik kalıntılar, pestisitler ve endokrin bozucu bileşikler gibi düşük molekül ağırlıklı kirleticiler üzerinde %90'ın üzerinde giderim sağladığı rapor edilmiştir (Bellona ve ark., 2004).

Bununla birlikte, ters ozmoz sistemlerinin en önemli işletme sorunları membran kirlenmesi (organik, biyolojik ve inorganik fouling) ve konsantrasyon polarizasyonu olup, bu durumlar hem akı kaybına hem de enerji tüketiminin artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle RO sistemlerinde etkin bir ön arıtma (koagülasyon, kum filtrasyonu, UF/NF entegrasyonu), uygun hidrolik tasarım ve düzenli kimyasal temizlik (CIP) stratejileri zorunlu hâle gelmektedir. Literatürde, ultrafiltrasyon veya nanofiltrasyonun RO öncesi kullanıldığı entegre sistemlerin, membran ömrünü uzattığı ve işletme kararlılığını önemli ölçüde artırdığı vurgulanmaktadır (Shannon ve ark., 2008).

Son yıllarda yapılan çalışmalar, ters ozmozun su–enerji–çevre ilişkisi bağlamında değerlendirilmesi gerektiğini ve enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik membran malzemesi geliştirme, enerji geri kazanım sistemleri ve hibrit proseslerin önem kazandığını ortaya koymaktadır. Bu çerçevede ters ozmoz, yüksek ayırma verimi sayesinde sürdürülebilir su yönetimi stratejilerinin vazgeçilmez bir bileşeni olmaya devam etmektedir (Elimelech & Phillip, 2011).

### 1.2.5. Dinamik Membran (DM) Teknolojileri

Dinamik membran (DM) teknolojisi, atıksu arıtımında filtrasyon işleminin, klasik membran sistemlerinden farklı olarak sabit ve pahalı bir membran yüzeyi yerine, makro gözenekli bir destek malzemesi üzerinde oluşan ikincil filtrasyon tabakası aracılığıyla gerçekleştirildiği yenilikçi bir ayırma yaklaşımıdır. Bu sistemlerde esas ayırma mekanizması, işletme sırasında destek yüzeyinde biriken askıda katı maddeler, kolloidal partiküller ve biyolojik floklardan oluşan dinamik tabaka tarafından sağlanmaktadır.

DM sistemlerinde kullanılan destek malzemeleri genellikle dokuma veya dokumasız tekstil kumaşlar, polimerik ağ yapılar (mesh), filtre bezleri veya sentetik torba filtreler gibi büyük gözenekli ve düşük maliyetli materyallerden oluşmaktadır. Bu desteklerin gözenek çapları, klasik mikrofiltrasyon veya ultrafiltrasyon membranlarına kıyasla oldukça büyük olmasına rağmen, kısa sürede oluşan dinamik tabaka sayesinde yüksek partikül ve bulanıklık giderimi sağlanabilmektedir (Li ve ark., 2018).

DM teknolojisinin temel farkı, klasik membran proseslerinde önemli bir problem olarak değerlendirilen membran kirlenmesinin, bu sistemlerde ayırma performansını artıran işlevsel bir unsur hâline gelmesidir. Dinamik tabakanın kontrollü bir şekilde oluşması, filtrasyon verimini yükseltirken; tabakanın mekanik olarak kolayca uzaklaştırılabilmesi, kimyasal temizlik ihtiyacını ve membran yenileme maliyetlerini önemli ölçüde azaltmaktadır (Kiso ve ark., 2010).

Literatürde yapılan çalışmalar, dinamik membranların özellikle evsel atıksu arıtımı, aktif çamur sistemleriyle entegrasyon ve dinamik membran biyoreaktör (DMBR) uygulamalarında başarılı sonuçlar verdiğini ortaya koymaktadır. Chu ve ark. (2014), dinamik membran biyoreaktör sistemlerinde kritik akı kavramını incelemiş ve dinamik tabakanın filtrasyon davranışı üzerindeki belirleyici rolünü detaylı şekilde açıklamıştır

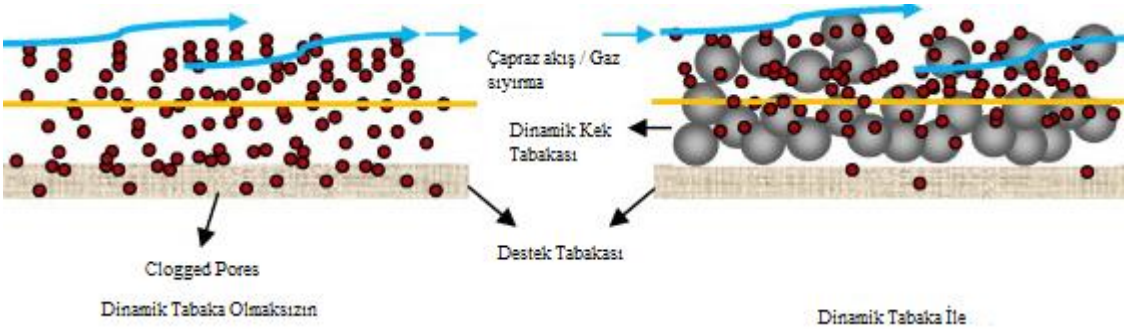
Dinamik membranların performansı; atıksuyun askıda katı madde içeriği, hidrolik yükleme hızı, destek malzemesinin gözenek yapısı ve işletme koşulları gibi parametrelere bağlı olarak değişmektedir. Özellikle dinamik tabakanın oluşum süresi ve yapısal stabilitesi, sistemin başlangıç işletme döneminde çıkış suyu kalitesini doğrudan etkilemektedir (Li ve ark., 2018).

Bu özellikleriyle DM teknolojisi, klasik membran sistemlerinin yüksek arıtma verimi avantajını korurken; enerji tüketimi, maliyet ve membran kirlenmesi gibi temel sınırlılıklarını azaltmayı hedefleyen sürdürülebilir bir alternatif olarak değerlendirilmektedir.

#### *DM Prosesi Temel Prensipleri*

DM teknolojisinin temel prensipleri, geleneksel membran sistemlerinin (MF/UF) aksine, filtrasyonun membran materyalinin kendisi tarafından değil, destek tabakası üzerinde biriken ikincil bir "kek" tabakası tarafından gerçekleştirilmesine dayanır. Bu kek tabakasının şematik gösterimi Şekil1.1'de gösterilmiştir. DM teknolojisi, atık su arıtımında kirlenmeyi (fouling) bir dezavantajdan

avantaja dönüştüren yenilikçi bir yaklaşımdır. Özellikle gelişmekte olan ülkeler ve küçük ölçekli tesisler için geleneksel MBR sistemlerine kıyasla çok daha ekonomik bir alternatif sunmaktadır.




Şekil 1.1. DM kek tabakasının şematik gösterimi

***DM Prosesi Destek Malzemeleri ve Gözenek Yapısı***

Dinamik membran (DM) sistemlerinde "asıl ayırıcı tabaka" destek malzemesinin kendisi değil, destek üzerinde işletme sırasında oluşan kek/jel benzeri birikim tabakasıdır. Bu nedenle destek malzemesinin temel görevi; bu tabakanın hızlı ve kararlı biçimde oluşmasına izin veren, aynı zamanda düşük maliyetli ve temizlenebilir bir taşıyıcı yüzey sağlamaktır. Literatürde DM destek malzemeleri çoğunlukla nylon (poliamid) ağ/mesh, paslanmaz çelik mesh, polyester kumaş/filtre bezi ve bazı uygulamalarda non-woven (dokumasız) tekstil gibi görece "kaba gözenekli" materyallerdir. Bu materyallerin seçimi, DM'nin oluşum hızı, ilk dönem çıkış suyu kalitesi (bulanıklık/AKM), akı düşüşü ve temizlik sıklığını doğrudan etkiler (Ersahin ve ark., 2012).

Gözenek boyutu (mesh açıklığı) özellikle DM'nin oluşum başlangıcında kritik bir parametredir. Destek gözenekleri çok büyük olduğunda, ilk fazda ince partiküller ve biyokütlenin bir kısmı geçiş yapabildiğinden çıkış bulanıklığı yükselir ve kararlı tabaka oluşumu gecikebilir; çok küçük seçildiğinde ise destek gözenekleri hızla tıkanarak daha hızlı akı düşüşü/erken fouling görülebilir. Bu dengeyi deneysel olarak inceleyen çalışmalar, daha küçük gözeneklerin (ör. 10–25 µm) başlangıçta daha iyi bulanıklık kontrolü ve daha hızlı DM oluşumu sağlayabildiğini; ancak tıkanma eğilimi nedeniyle hidrodinamik koşullar (havalandırma, kesme gerilmesi, geri yıkama vb.) iyi yönetilmezse akı kaybının hızlanabileceğini göstermektedir (Cai ve ark., 2018).

Destek malzemesi seçimi yalnızca gözenek boyutuna indirgenmemelidir; malzemenin yüzey özellikleri ve tekstil/mesh yapısı da DM tabakasının tutunmasını ve stabilitesini belirler. Örneğin yüzey pürüzlülüğü ve lif/filament yapısı, flokların "tutunma noktalarını" artırarak dinamik tabakanın daha kısa sürede oluşmasına yardımcı olabilir; buna karşılık çok sıkı/kalın yapılar, "destek direncini" artırıp sistemin toplam filtrasyon direncini yükseltebilir. Bu bakış açısı, destek malzemesinin gözenek yapısı ile birlikte malzeme dokusu ve filament tipinin dinamik membran performansını nasıl etkilediğini ortaya koyan çalışmalarda tartışılmıştır (Erşahin ve ark., 2013).

***DM Prosesi ile Arıtılan Arıtma Çamuru Türleri***

Atıksu arıtma tesislerinde uygulanan fiziksel, kimyasal ve biyolojik prosesler sonucunda farklı özelliklere sahip arıtma çamurları oluşmaktadır. Bu çamurlar; oluşum aşamasına, içeriklerine ve arıtma prosesine göre sınıflandırılmaktadır. Dinamik membran sistemlerinde çamurun yapısı, partikül boyutu dağılımı ve organik içeriği, membran tabakasının oluşumu ve filtrasyon performansı üzerinde doğrudan etkilidir (Liang ve ark., 2013; Zhang ve ark., 2011).

Birincil (Fiziksel) Arıtma Çamuru, ön çöktürme ünitelerinde askıda katı maddelerin yerçekimi etkisiyle çökelmesi sonucu oluşur. Genellikle yüksek oranda inert katı madde, yağ ve gres içerir. Nem oranı yüksek (%95–97) olup, biyolojik olarak parçalanabilirliği sınırlıdır. Dinamik membran sistemleri açısından birincil çamur, iri partiküller içermesi nedeniyle başlangıçta destek malzemesi üzerinde hızlı bir fiziksel süzme etkisi oluşturabilir; ancak tek başına stabil ve geçirgen bir dinamik membran tabakası oluşumu için yeterli değildir (Hu ve ark., 2016).

İkincil (Biyolojik) Arıtma Çamuru, biyolojik arıtma proseslerinde mikroorganizmaların çoğalması ve flok oluşumu sonucu meydana gelir. Aktif çamur sistemlerinden çıkan bu çamur, yüksek oranda biyolojik olarak parçalanabilir organik madde içerir ve özgül yüzey alanı yüksektir. Dinamik membran teknolojisinde esas rol oynayan çamur türü ikincil çamurdur. Mikroorganizma flokları ve hücre dışı polimerik maddeler (EPS), destek malzemesi üzerinde geçirgen ancak tutucu bir dinamik membran tabakasının oluşmasını sağlar. Bu tabaka, klasik membranlara kıyasla daha düşük maliyetle etkin bir katı-sıvı ayırımı sunar (Lin ve ark. 2014; Yu ve ark. 2019).

Kimyasal Arıtma Çamuru, koagülasyon ve flokülasyon proseslerinde metal tuzları (örneğin alüminyum veya demir bazlı koagülantlar) kullanılması sonucu oluşur. Bu çamur türü yüksek yoğunluklu, düşük organik içerikli ve genellikle düşük biyolojik stabiliteye sahiptir. Dinamik membran sistemlerinde kimyasal çamurun varlığı, membran tabakasının hidrolik direncini artırabilir ve filtrasyon performansını olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle DM uygulamalarında kimyasal çamur oluşumu genellikle istenmeyen bir durumdur (Saleem ve ark., 2018).

Karışık Çamur, birincil ve ikincil çamurun birlikte arıtılması sonucu oluşan karışık çamur, hem inert hem de biyolojik olarak aktif bileşenler içerir. Bu çamur türü, dinamik membran oluşumu açısından orta düzeyde bir performans sergiler. İkincil çamurun biyolojik özellikleri membran tabakasının oluşumunu desteklerken, birincil çamurun iri partikülleri kek tabakasının daha hızlı kalınlaşmasına neden olabilir.

Dinamik membran teknolojilerinde en uygun çamur tipi, flok yapısı gelişmiş ve EPS içeriği yeterli olan ikincil biyolojik çamurdur. Bu çamur türü, destek malzemesi üzerinde kısa sürede dengeli bir dinamik membran tabakası oluşturarak yüksek süzüntü kalitesi ve sürdürülebilir işletme koşulları

sağlar. Çamur karakterizasyonu (MLSS, MLVSS, partikül boyutu dağılımı ve EPS içeriği), DM sistem tasarımında ve işletme stratejilerinin belirlenmesinde kritik öneme sahiptir (Segredo-Morales ve ark., 2025).

***DM Prosesinde Yaşanan Bazı Operasyonel Sorunlar***

Dinamik membran (DM) sistemleri, klasik mikrofiltrasyon ve ultrafiltrasyon membranlarına kıyasla daha düşük maliyetli ve esnek bir katı-sıvı ayırımı sağlamakla birlikte, işletme sürecinde çeşitli operasyonel sorunlarla karşılaşılabilmektedir. Bu sorunlar; dinamik membran tabakasının oluşumu, sürekliliği, hidrolik performansı ve arıtma verimi üzerinde doğrudan etkilidir.

Dinamik Membran Tabakasının Kararsız Oluşumu, DM sistemlerinde filtrasyon esas olarak destek malzemesi üzerinde oluşan ikincil kek tabakası tarafından sağlandığından, bu tabakanın kararlı ve homojen şekilde oluşması kritik öneme sahiptir. Düşük askıda katı madde konsantrasyonları, yetersiz biyokütle miktarı veya zayıf flok yapısı, dinamik membran tabakasının geç oluşmasına ya da işletme süresince parçalanmasına neden olabilir. Bu durum, özellikle sistemin başlangıç safhasında süzüntü kalitesinde dalgalanmalara yol açmaktadır (Isik ve ark., 2021).

Transmembran Basınç (TMB) Artışı, Dinamik membran sistemlerinde en sık karşılaşılan operasyonel sorunlardan biri, zamanla artan transmembran basınçtır. Aşırı kek tabakası birikimi, ince partiküllerin gözenekleri tıkaması ve EPS birikimi, filtrasyon direncinin artmasına neden olur. TMB artışı, sistemin enerji ihtiyacını yükseltirken, filtrasyon akısının düşmesine ve işletme stabilitesinin bozulmasına yol açabilir. Özellikle yüksek MLSS konsantrasyonlarında bu etki daha belirgin hale gelmektedir (Hu ve ark., 2016).

Filtrasyon Akısında (Flux) Dalgalanmalar, DM sistemlerinde filtrasyon akısı, dinamik membran tabakasının kalınlığı ve geçirgenliği ile doğrudan ilişkilidir. Tabakanın aşırı kalınlaşması veya hidrolik yükleme koşullarındaki ani değişimler, akı değerlerinde önemli dalgalanmalara neden olabilir. Bu durum, sistem performansının öngörülebilirliğini azaltmakta ve sürekli işletmeyi zorlaştırmaktadır (Poostchi ve ark., 2015).

Tıkanma ve Aşırı Kek Tabakası Oluşumu, Dinamik membran teknolojisi, kontrollü bir kek tabakasını avantaj olarak kullanmasına rağmen, bu tabakanın kontrolsüz büyümesi durumunda klasik fouling benzeri problemlere yol açabilmektedir. İnorganik maddeler, kolloidal partiküller ve biyolojik kökenli polimerler, destek malzemesi üzerinde sıkı ve düşük geçirgenlikte bir tabaka oluşturabilir. Bu durum, periyodik fiziksel temizlik veya hidrolik geri yıkama gereksinimini artırmaktadır (Liang ve ark., 2024).

Temizlik ve Bakım Gereksinimleri, DM sistemlerinde klasik membran sistemlerine kıyasla kimyasal temizlik ihtiyacı daha düşük olmakla birlikte, fiziksel temizlik uygulamaları (hidrolik yıkama, hava ile sıyırma veya mekanik temizleme) önemli bir operasyonel gerekliliktir. Uygun temizlik sıklığının belirlenememesi, ya gereksiz işletme kesintilerine ya da uzun vadede performans kaybına neden olabilmektedir (Xiao ve ark., 2023).

Çamur Özelliklerindeki Değişkenlik, Besleme atıksuyunun karakteristiği ve biyolojik çamurun özelliklerindeki değişimler (MLSS, MLVSS, flok boyutu ve EPS içeriği), dinamik membran performansını doğrudan etkilemektedir. Özellikle ani organik yük değişimleri, çamur yapısında bozulmalara ve dinamik membran tabakasının geçirgenliğinde azalmaya yol açabilmektedir (Liang ve ark., 2013).

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Hatice Elbir'in (2025) çalışmasında, atıksu arıtma tesisi çamurlarının farklı gözenek çaplarına sahip destek tabakaları üzerinde DM oluşturmaya uygunluğu kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir. Ham, aktif ve karışık çamur türleri kullanılarak 75–300 µm aralığındaki elekler üzerinde hem vakum destekli hem de yerçekimi kontrollü dinamik membran biyoreaktörlerinde filtrasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Son çöktürme çamuru ile ham çamurun birlikte kullanılmasının, tek tip çamura kıyasla daha kararlı bir kek tabakası oluşumu sağladığı ve daha yüksek akı değerlerine ulaşılmasına katkı sunduğu belirlenmiştir. Ayrıca, destek tabakasının gözenek çapının kek tabakası oluşumu üzerindeki etkisinin sınırlı olduğu, 200–300 µm gibi geniş gözenek çaplarında dahi yaklaşık 200 LMH akı altında çıkış bulanıklığının 1 NTU'nun altına indirilebildiği gösterilmiştir. Bu bulgu, dinamik membran literatüründe önemli bir yenilik niteliği taşımaktadır. Farklı gözenek çapları için kek oluşum hızları hesaplanmış; yüksek kalitede çıkış suyu elde edilirken 300–2000 LMH aralığında akı değerlerine ulaşılabildiği ortaya konmuştur. SEM analizleri, çamur yapısındaki lifsi bileşenlerin kararlı DM tabakasının gelişimine destek olduğunu göstermiştir. Genel olarak çalışma, arıtma çamurlarının dinamik membran oluşumunda düşük maliyetli ve uygulanabilir bir kaplama malzemesi olabileceğini ve DM teknolojisinin atıksu geri kazanımında sürdürülebilir bir seçenek sunduğunu ortaya koymaktadır (Elbir, 2025).

MBR farklı aşı çamurlarının sistem performansı üzerindeki etkilerini inceleyen araştırmalar, özellikle DM ve ultrafiltrasyon (UF) membranlarının karşılaştırılmasına odaklanmaktadır. Cengiz (2022) tarafından yürütülen kapsamlı çalışmada, evsel atıksu arıtımında CAS ve HRAS sistemlerinden elde edilen çamurların MBR performansına etkileri değerlendirilmiştir. Araştırmada DM ve UF modülleri aynı reaktörde eş zamanlı olarak işletilmiş; arıtma verimi, filtrasyon davranışı, çamurun fiziksel ve kimyasal özellikleri ile membran tıkanma eğilimleri detaylı biçimde analiz edilmiştir. Bulgular, her iki membranın da yüksek KOİ giderimi ve düşük permeat bulanıklığı sağladığını, ancak DM modülünün çamur karakteristiklerindeki değişimlere daha duyarlı bir performans sergilediğini göstermiştir. Özellikle HRAS çamurunun kullanıldığı koşullarda DM'nin daha düşük transmembran basınç (TMB) gereksinimiyle daha kararlı bir işletme sağladığı belirlenmiştir. Çalışma, dinamik membranların düşük maliyetli destek malzemeleri ile konvansiyonel MBR sistemlerine alternatif oluşturma potansiyeline sahip olduğunu; ancak DM tabakasının oluşum süreci, çamur özellikleri ve filtrasyon direnci gibi parametrelerin sistem performansını doğrudan etkileyen kritik faktörler olduğunu ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, MBR tasarımında aşı çamurunun belirleyici bir unsur olduğunu ve DM uygulamalarında biyolojik çamur karakterizasyonunun süreç verimliliği açısından büyük önem taşıdığını göstermektedir (Cengiz, 2022).

DMBR kentsel atıksu arıtımındaki uygulanabilirliğini inceleyen çalışmalar, özellikle DM oluşumunun mekanizmaları, destek malzemesi özelliklerinin filtrasyon performansı üzerindeki

etkileri ve aerobik koşullarda işletme kararlılığına odaklanmaktadır. Bu kapsamda Işık (2021) tarafından yürütülen tez çalışması, polyester hollow fiber destek malzemeleri üzerinde DM oluşumunu ayrıntılı bir deneysel tasarımla değerlendirmiştir. Araştırmada DM ve ticari UF membranlarının filtrasyon davranışları karşılaştırılmış; farklı destek malzemelerinin performansa etkisi, çamur derişiminin kritik akı ve tıkanma eğilimleri üzerindeki rolü ile mikrokirletici ve ağır metal giderimine ilişkin sistem davranışları incelenmiştir. Çalışmada tüm deneysel koşullarda yüksek KOİ ve askıda katı madde giderimi sağlanmış; DM sisteminin arıtma veriminin UF membranına yakın olduğu, ancak DM tabakasının fiziksel özelliklerine bağlı olarak daha yüksek transmembran basınç değerlerine ulaşabildiği belirlenmiştir. Bulgular, düşük maliyetli destek malzemeleriyle çalışabilen DM teknolojisinin konvansiyonel MBR sistemlerine alternatif oluşturabileceğini, ancak tabaka homojenliği, çamur karakteristikleri, destek malzemesi seçimi ve işletme parametrelerinin sistem performansı üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir. Bu yönleriyle söz konusu tez çalışması, DMBR sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonuna yönelik literatürde önemli bir başvuru kaynağı niteliği taşımaktadır (Işık, 2021).

DMBR teknolojisi, konvansiyonel membran biyoreaktörlerde karşılaşılan yüksek membran maliyetleri ve tıkanma eğilimleri gibi sınırlamaları azaltmaya yönelik bir yaklaşım olarak son yıllarda dikkat çekmiştir. Bu kapsamda Demiral (2021) tarafından yürütülen çalışmada, hem sentetik hem de belediye atıksularının tekstil esaslı destek malzemeleri kullanılarak DMBR sistemi ile arıtılabilirliği kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir. Araştırmada, polimerik membran kullanılmaksızın destek malzemesi üzerinde oluşan dinamik tabakanın katı-sıvı ayırma performansına etkisi incelenmiş ve sistemin yüksek giderim verimlerine ulaşabildiği gösterilmiştir. Ayrıca elde edilen süzüntü sularının sulama suyu kriterlerine uygunluğu analiz edilmiş; düşük güçlü evsel atıksuların arıtımında iyi ve orta kalitede sulama suyu sağlanabildiği, ancak yüksek güçlü atıksularda iyon gideriminin yetersiz kalması nedeniyle su kalitesinin düştüğü belirlenmiştir. Çalışmanın dikkate değer bulgularından biri, tekstil tabanlı destek malzemeleri üzerinde oluşan dinamik tabakanın yüksek arıtma performansı sağlayarak membran maliyetlerini önemli ölçüde azaltabilmesidir. Bu sonuçlar, DMBR sistemlerinin yeniden kullanım odaklı atıksu arıtımında ekonomik ve uygulanabilir bir seçenek olabileceğini göstermekte ve literatürde teknolojiye yönelik önemli katkılar sunmaktadır (Demiral, 2021).

Süt endüstrisi atıksularının arıtımında AnDMBR uygulanabilirliğini inceleyen çalışmalar, özellikle yüksek organik yüklü atıksuların arıtım performansı ve dinamik membran oluşum süreçlerine odaklanmaktadır. Bu kapsamda Paçal (2021) tarafından yürütülen çalışma, laboratuvar ölçekli bir AnDMBR sistemi kullanılarak sentetik süt endüstrisi atıksuyu ve peynir altı suyunun arıtılmasını çok yönlü olarak değerlendirmiştir. Araştırmada 10–70 μm aralığında gözenek çaplarına sahip farklı destek malzemeleri kullanılmış; dinamik membran tabakasının oluşum süresi, filtrasyon davranışı, kirlenme eğilimleri ve askıda katı madde giderimi ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir. Bulgular, küçük gözenekli destek malzemelerinde dinamik membranın daha hızlı oluştuğunu ve

filtrasyon veriminin arttığını, membran tabakası oluştuktan sonra ise destek malzemesinin gözenek özelliklerinin etkisinin büyük ölçüde azaldığını göstermiştir. Ayrıca çalışma, çapraz akış hızının (CFV) artmasıyla dinamik membran kalınlığının azaldığını ve oluşum süresinin uzadığını ortaya koymuştur. Uzun süreli işletme boyunca düşük çıkış askıda katı madde konsantrasyonlarına ulaşılmış, dinamik membranın organik ve inorganik bileşenlerden oluşan yoğun bir yapı sergilediği SEM-EDX, FTIR ve XRD analizleri ile doğrulanmıştır. Bu kapsamlı çalışma, yüksek organik yüklü endüstriyel atıksuların arıtımında AnDMBR sistemlerinin etkili bir alternatif sunduğunu ve dinamik membran oluşum dinamiklerinin sistem performansında belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir (Paçal, 2021).

Tekstil endüstrisi atıksularında boya giderimine yönelik araştırmalar, özellikle DMBR performansına odaklanarak son yıllarda önemli bir ivme kazanmıştır. Bu alanda yürütülen çalışmalardan biri olan Başaran (2020), farklı gözenek boyutlarına sahip destek tabakalarının anaerobik DMBR koşullarında membran oluşumu ve arıtım verimi üzerindeki etkilerini kapsamlı olarak incelemiştir. Araştırmada 20, 53 ve 100 µm gözenekli destek malzemeleri karşılaştırılmış; kısa ve uzun dönem işletmelerde kritik akı davranışı, kek tabakası gelişimi, transmembran basınç değişimleri ve membran kirletici özellikleri detaylı biçimde analiz edilmiştir. Çalışma bulguları, özellikle 20 µm gözenekli destek tabakasının daha kararlı bir dinamik membran oluşumu sağladığını ve yüksek çıkış suyu kalitesi elde edildiğini göstermiştir. Renk gideriminin %97'nin üzerinde gerçekleşmesi ve uzun dönem işletmede askıda katı madde konsantrasyonlarının 10 mg/L'nin altına düşmesi, sistemin yüksek organik yüklü tekstil atıksularında etkin bir arıtım sağlayabildiğini ortaya koymuştur. Ayrıca anaerobik ortamın azo boyaların indirgenmesi ve biyogaz üretimi açısından avantaj sağladığı, dinamik membran yüzeyinde oluşan yoğun kek tabakasının filtrasyon davranışını belirgin biçimde etkilediği SEM ve EDS analizleri ile gösterilmiştir. Bu yönleriyle çalışma, DMBR sistemlerinin tekstil atıksuyu arıtımında düşük maliyetli, yüksek verimli ve sürdürülebilir bir alternatif sunabileceğini ortaya koyan önemli literatür katkılarından biridir (Başaran, 2020).

Evsel atıksuların arıtımında dinamik membran teknolojisinin uygulanabilirliğine yönelik araştırmalar arasında Yıldız'ın (2019) çalışması önemli bir yere sahiptir. Bu tezde, farklı gözenek boyutlarına sahip tekstil tabanlı destek malzemeleri kullanılarak dinamik membran oluşumu, filtrasyon performansı ve biyolojik arıtım davranışı ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir. Hem 140 µm hem de 200 µm gözenek açıklığında üretilen destek tabakalarının yüksek askıda katı madde derişimlerinde kararlı bir işletme sağlayabildiği; KOİ giderim verimlerinin %79–84 aralığında gerçekleştiği ve dinamik membranın oluşmasının ardından nitrifikasyon performansında belirgin bir artış görüldüğü rapor edilmiştir. Çalışmada ayrıca üç boyutlu yazıcı ile üretilen destek tabakalarının ultrafiltrasyon membranlarıyla karşılaştırılması yapılmış ve 3D modüllerin kısa sürede stabil bir dinamik membran tabakası geliştirdiği, bunun sonucunda KOİ ve bulanıklık gideriminde %99'a ulaşan yüksek verimler elde edildiği belirtilmiştir. Elde edilen bulgular, düşük maliyetli tekstil esaslı veya additif üretim yöntemiyle hazırlanmış destek malzemelerinin, konvansiyonel MF ve UF

membranlara uygulanabilir bir alternatif oluşturabileceğini ve evsel atıksu arıtımında biyokütle tutulumunu artırarak sistem performansını iyileştirebileceğini göstermektedir (Yıldız, 2019).

Hudayarizka (2019) tarafından yürütülen çalışma, dinamik membran biyoreaktörlerde destek malzemesi türünün sistem performansı üzerindeki etkilerini ayrıntılı biçimde incelemiştir. Araştırmada, iki aşamalı deneysel tasarım kapsamında polyester esaslı hollow-fiber destek tabakasının yüksek akı koşullarındaki davranışı değerlendirilmiş ve dinamik membran oluşum süreci karakterize edilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise aynı gözenek çapına sahip polyester (DM-1) ve cam elyafı (DM-2) destek tabakaları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, her iki destek malzemesinin de %95'in üzerinde KOİ ve çözünmüş KOİ giderimi ile %99'un üzerinde askıda katı madde giderim verimine ulaşabildiğini göstermektedir. Bununla birlikte, DM-2'nin hidrofobik yapısı ve daha yoğun filament morfolojisi nedeniyle transmembran basıncının daha yüksek seyrettiği; DM-1'in ise daha homojen bir kek tabakası oluşturarak daha düşük ve kararlı TMB değerleri sağladığı belirlenmiştir. Bu bulgular, destek tabakasının yüzey özelliklerinin dinamik membran oluşumu ve filtrasyon davranışı üzerinde belirleyici olduğunu, polyester tabanlı desteklerin ise DMBR uygulamaları için daha uygun bir seçenek sunduğunu ortaya koymaktadır (Hudayarizka, 2019).

Abdelrahman (2018) tarafından yürütülen çalışma, belediye atıksularının arıtımında UF ve kendiliğinden oluşan dinamik membran (Self-Forming Dynamic Membrane, SFDM) sistemlerinin performansını karşılaştırmalı olarak değerlendirmiştir. Araştırmada, içi boş fiber polyester destek malzemesi kullanılarak oluşturulan SFDM tabakası ile ticari PVDF UF membran aynı reaktörde paralel biçimde işletilmiş ve her iki membranın arıtım verimleri, filtrasyon davranışları ve tıkanma eğilimleri ayrıntılı şekilde analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, her iki membranın da yüksek KOİ ve askıda katı madde giderimi sağladığını, ancak SFDM sisteminde kek tabakası gelişimine bağlı olarak daha yüksek transmembran basınç değerlerinin ortaya çıktığını göstermiştir. Morfolojik karakterizasyon çalışmaları (FTIR, ESEM-EDX), dinamik membran yüzeyinin organik ve inorganik bileşenlerden oluşan yoğun bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymuş ve filtrasyon kalitesinin büyük ölçüde bu tabakanın özelliklerine bağlı olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar, düşük maliyetli destek malzemeleri ile işletilebilen SFDM sistemlerinin, konvansiyonel UF membranlara ekonomik ve uygulanabilir bir alternatif oluşturma potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Abdelrahman, 2018).

Membran biyoreaktör teknolojileri üzerine yapılan araştırmalarda, klasik MBR sistemleri ile DMBR performanslarını karşılaştıran çalışmalar önemli bir yer tutmaktadır. Veral (2018) tarafından yürütülen çalışma, aynı reaktör koşulları altında farklı membran yapılarına sahip iki sistemin arıtım verimi, işletme davranışı ve kirlenme eğilimlerini detaylı biçimde incelemiştir. Araştırmada sentetik atıksu kullanılarak hem ticari bir mikrofiltrasyon membranının hem de dokumasız tabanlı bir dinamik membranın filtrasyon performansı değerlendirilmiş; membran tipinin akı, transmembran basıncı, tıkanma karakteri ve çamur–membran etkileşimleri üzerindeki belirleyici rolü ortaya konmuştur. Çalışma ayrıca dinamik membran oluşum süreci, kek tabakası özellikleri ve membran

yüzeyinde biriken organik ve inorganik bileşenlerin yapısal analizlerine odaklanarak, düşük maliyetli destek malzemeleriyle işletilebilen DMBR sistemlerinin konvansiyonel MBR'lere potansiyel bir alternatif oluşturabileceğini göstermiştir. Bu yönüyle çalışma, dinamik membranların işletme koşullarına duyarlılığı, yeniden oluşabilir tabaka yapısı ve kirlenme davranışı açısından literatürde önemli bir referans niteliği taşımaktadır (Veral, 2018).

AnDMBR, yüksek organik yüklü atıksuların arıtımında geleneksel membran biyoreaktörlere alternatif oluşturan önemli bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Erşahin (2015) tarafından gerçekleştirilen doktora çalışması, dinamik membranların farklı konfigürasyonlar, destek malzemeleri ve işletme parametreleri altında anaerobik koşullarda nasıl davranış sergilediğini kapsamlı biçimde incelemiştir. Çalışmada monofilament, multifilament ve staple tipinde üç farklı filtre malzemesi değerlendirilmiş; dinamik membran oluşumu ve filtrasyon performansı açısından monofilament destek malzemesinin en uygun seçenek olduğu belirlenmiştir. Araştırma ayrıca çamur yaşı (SRT), gaz sıyırma hızı, hidrolik bekletme süresi (HRT) ve batık–harici modüller gibi işletme değişkenlerinin, arıtma verimi ve dinamik membran tabakasının gelişimi üzerindeki etkilerini ayrıntılı olarak ortaya koymuştur. Bulgular, AnDMBR sistemlerinin %99'un üzerinde organik madde giderimi sağlayabildiğini ve oluşan dinamik membran tabakasının çözünmüş organik maddelerin uzaklaştırılmasında da belirleyici olduğunu göstermektedir. Bunun yanı sıra morfolojik ve mikrobiyolojik incelemeler, dinamik membranın organik ve inorganik bileşenlerden oluşan özgün bir yapıya sahip olduğunu ve mikrobiyal çeşitliliğin reaktör çamurundan farklı özellikler sergilediğini ortaya koymuştur. Bu çalışma, dinamik membran teknolojisinin yüksek güçlü atıksuların arıtımında teknik uygulanabilirliğini, ekonomik potansiyelini ve uzun dönemli işletme kararlılığını destekleyen önemli bulgular sunarak literatüre değerli katkılar sağlamaktadır (Erşahin, 2015).

Zhang ve ark. (2014), dinamik membran (DM) filtrasyonunun yapı özellikleri, oluşum mekanizmaları, işletme parametreleri ve maliyet değerlendirmesine odaklanan kapsamlı bir derleme sunarak DM teknolojisinin geleneksel membran sistemlerine düşük maliyetli bir alternatif olarak gelişimini ortaya koymaktadır. Çalışmada 1960'lardan günümüze dinamik membranların tarihsel gelişimi ele alınmış, kimyasal, inorganik, biyolojik ve partikül bazlı DM türlerinin oluşum süreçleri, destek malzemesi özelliklerinin (gözenek yapısı, yüzey pürüzlülüğü, malzeme tipi) membran performansını nasıl şekillendirdiği açıklanmıştır. Ayrıca DM oluşumunda çamur özellikleri, partikül boyut dağılımı, EPS/SMP birikimi ve hidrodinamik koşulların belirleyici olduğu vurgulanmakta; tıkanma davranışı, kritik akı kavramı, çökelme ve kek tabakası gelişimi gibi kavramlar incelenmiştir. Çalışma, DM yapısının SEM gibi tekniklerle karakterizasyonuna, filtrasyon direncinin zamanla değişimine ve farklı DM konfigürasyonlarının operasyonel avantajlarına da yer verirken, DM'nin düşük basınç gereksinimi, kolay temizlenebilirliği ve ekonomik destek malzemeleri sayesinde enerji ve yatırım maliyetlerini önemli ölçüde azaltabileceğini belirtmektedir. Son olarak, belediye ve endüstriyel atıksularda DM uygulamalarının evrimi ve geleceğe yönelik araştırma ihtiyaçları

değerlendirilerek DM teknolojisinin MBR sistemlerine entegre edildiğinde yüksek verimli ve maliyet açısından avantajlı bir seçenek sunabileceği ifade edilmektedir.

Millanar-Marfa ve ark. (2022), tarafından sunulan bu kapsamlı derleme, self-forming dynamic membrane (SFDM) teknolojisinin hem aerobik hem de anaerobik biyoreaktörlerdeki gelişimini, oluşum mekanizmalarını ve performans belirleyicilerini sistematik biçimde değerlendirerek dinamik membran kavramını bütüncül bir çerçevede ele almaktadır. Çalışma, 1960'lardan günümüze DM oluşumunun tarihsel gelişimini sunmakta, biyolojik askıda katılar ve biyokütlenin ucuz ve gözenekli bir destek malzemesi üzerinde birikmesiyle kendi kendine oluşan filtrasyon tabakasının işlevsel yapısını açıklamaktadır. Destek malzemesinin gözenek boyutu, yüzey özellikleri ve hidrodinamik koşulların DM oluşum süresi, kek tabakasının kararlılığı ve filtrasyon direnci üzerindeki etkileri detaylandırılırken, EPS ve SMP gibi biyopolimerlerin DM yapısına katkısı da tartışılmaktadır. Ayrıca farklı reaktör konfigürasyonları, tasarım parametreleri, işletme koşulları (havalandırma, çamur yaşı, karışım özellikleri) ve DM yapısının SEM gibi tekniklerle karakterizasyonu değerlendirilerek tıkanma mekanizmaları, kritik akı davranışı ve DM tabakasının biyolojik arıtıma katkısı açıklanmaktadır. Yazarlar, SFDM'nin düşük maliyetli destek malzemeleri, daha kolay fouling yönetimi ve yüksek çıkış suyu kalitesi gibi avantajlar sunduğunu, ancak DM oluşum süresinin kontrolü, destek malzemesi optimizasyonu ve uzun dönem kararlılık gibi alanlarda araştırma ihtiyacının sürdüğünü vurgulayarak teknolojinin gelecekte MBR sistemlerine ekonomik ve etkili bir alternatif olarak önemli potansiyel taşıdığını belirtmektedir.

Cai ve ark. (2018), dinamik membran biyoreaktör (DMBR) sistemlerinde destek malzemesi gözenek çapının filtrasyon davranışı üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada 1, 5, 10, 25 ve 50 μm gözenek çapına sahip mesh filtreler karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Deneyler, 3 g/L MLSS konsantrasyonunda işletilmiş ve çamur yaşı (SRT) 40 gün olacak şekilde günlük biyokütle uzaklaştırmasıyla kontrol edilmiştir. Ön eleme testleri sonucunda, 50 μm gözenek çapına sahip mesh filtrenin başlangıç permeat bulanıklığının yüksek olması, 1 μm gözenek çapına sahip filtrenin ise çok düşük akı değerleri göstermesi nedeniyle uygun olmadığı belirlenmiştir. Bu nedenle, çalışmanın devamında 5, 10 ve 25 μm gözenek çapına sahip mesh filtreler seçilmiştir. Araştırma sonuçları, destek malzemesinin gözenek çapının dinamik membran oluşumu, başlangıç filtrasyon performansı ve permeat kalitesi üzerinde belirleyici bir rol oynadığını ve uygun gözenek çapı seçiminde akı–bulanıklık dengesinin kritik olduğunu ortaya koymuştur.

Li ve ark. (2018) dinamik membranların mikro-parçacıkların giderimi üzerindeki performansını ve bunu etkileyen faktörleri incelemiştir. Çalışmada 90 μm gözenek çapına sahip destek mesh kullanılarak, sentetik atıksu üzerinden filtreleme yapılmıştır. Başlangıçta yaklaşık 195 NTU olan bulanıklık değerinin 20 dakika filtrasyon sonunda 1 NTU'nun altına düştüğü gözlemlenmiş ve bu sonuç dinamik membranın mikro-parçacıkları etkili şekilde tutabildiğini göstermiştir. Araştırmada ayrıca girişteki parçacık konsantrasyonunun dinamik membran tabakasının oluşum süresini kısalttığı ve daha yüksek başlangıç parçacık yükü ile daha hızlı membran

tabakası geliştiği, ancak bir kez tabaka oluştuktan sonra çıkış bulanıklığının giriş parçacık konsantrasyonundan bağımsız olarak benzer seviyelerde kaldığı raporlanmıştır. Bu bulgular, dinamik membran teknolojisinin düşük yoğunluklu ve mikro boyutlu parçacıkların atıksudan etkin bir şekilde tutulmasında potansiyel bir yöntem olduğunu göstermiştir.

# 3. MATERYAL VE METOT

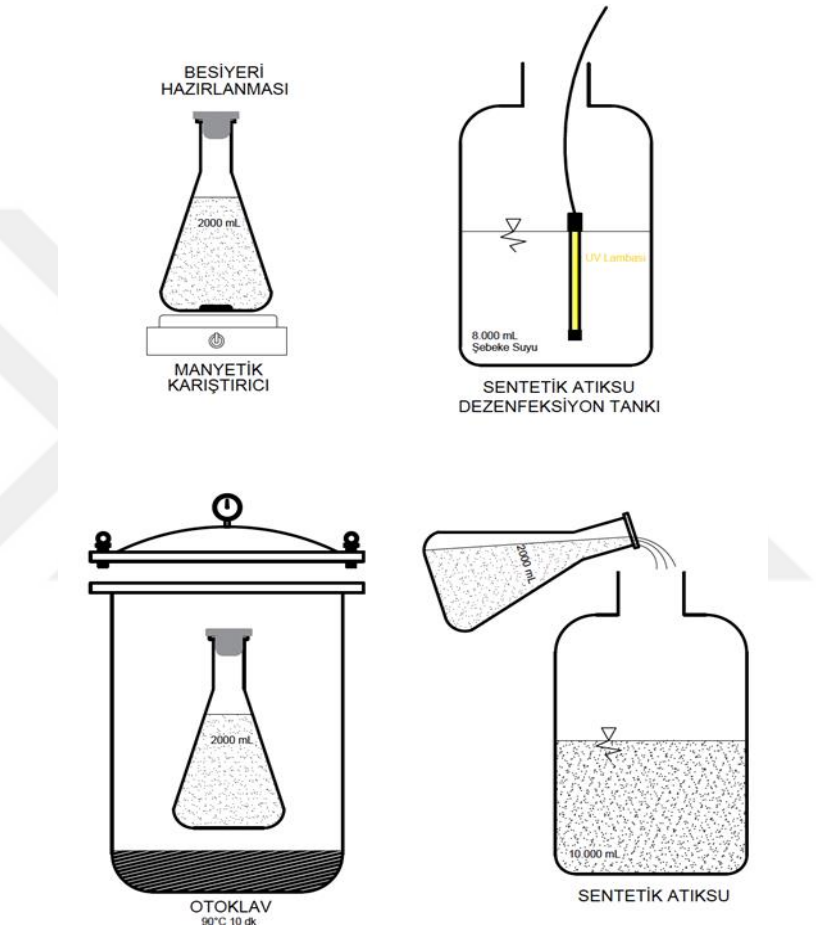
Arıtılabilirlik üzerinde yapılan pek çok araştırmada, atıksu arıtımında uygulanan biyolojik metotlarda bazı değişiklikler yapılarak arıtma verimi arttırılmaya çalışılmıştır. Bu değişikliklerden biri de dinamik membran üniteleridir. Suya batırılan filtre destek tabakası üzerinde oluşan dinamik membran tabakası arıtma verimini arttırmaktadır. Bu tez çalışmasında bu proses üzerinde denemeler yapılmış, işletme verileri toplanmış ve değerlendirilmiştir. İlk etapta sistemde ihtiyaç duyulan aktif çamur, işletimi devam eden bir evsel atıksu arıtma tesisinden alınarak, laboratuvara getirilmiştir. Bir süre stabilize edilen bu çamur DMBR testleri ve işletilmesi için reaktöre alınmıştır. Eş zamanlı olarak paralel işletimle Kontrol reaktörü işletilmiştir. Hem DMBR hem de Kontrol SBR reaktörleri önce 4.000 mg/l MLSS, ardından da 3.000 mg/lt MLSS koşullarında işletilmiştir. Sırası ile aktif çamurun alınmasından başlanarak test sürecinin tamamı aşağıda maddeler halinde rapor edilmiştir.

## 3.1. Kullanılan Aktif Çamurun Hazırlanması ve Karakterizasyonu

Bu çalışmada kullanılan aktif çamur, yaklaşık 5000 nüfusa hizmet veren TOKİ (Toplu Konut İdaresi Başkanlığı)' nin Adana Sarıçam ilçesi Göztepe Mahallesi Konut Projesinde var olan atıksu arıtma tesisi biyolojik arıtım ünitesinden temin edilmiştir. Alınan aktif çamur, laboratuvarda 20 L hacmindeki tankta (Şekil 3.1.) deneysel çalışmalara başlamadan önce kontrollü koşullar altında stabilize edilmiştir. Başlangıç aşamasında çamur üst suyu sistemden atılarak çamur içerisindeki kirlilikten arındırılmıştır ve bu işlem 5 kez tekrarlanmıştır.

Şekil 3.1. Laboratuvar Ölçekli Aktif Çamur Tankı

Aktif çamur, günlük 10000 mL sentetik atıksu ile beslenerek ve sürekli havalandırma sağlanarak yaklaşık 30 gün süreyle kesikli olarak işletilmiştir. Sentetik atıksuyun reçetesi Çizelge 3.1. de verilmiştir. Ayrıca sentetik atıksuyun hazırlanma süreci akım şeması ve laboratuvar ortamındaki görseli Şekil 3.2.'de verilmiştir. 2000 mL erlende stok şeklinde hazırlanan besiyeri otoklavda 90°C'de 10 dk dezenfekte edilip, 8.000 ml UV lamba daldırılarak dezenfekte edilmiş seyrelteme suyu ile karıştırılarak sentetik atıksu hazırlanmıştır.



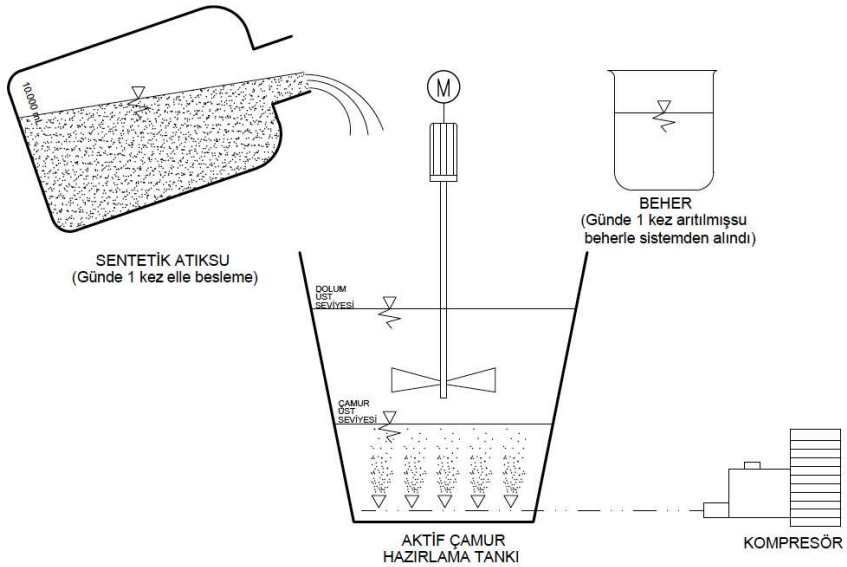

Şekil 3.2. Sentetik Atıksuyun Hazırlanması

Çizelge 3.1. Sentetik Atıksuyun Reçetesi (Ham Aktif Çamur için)

| **Kimyasal Adı** | **Formülü** | **Miktar** | **Birim** |
|---|---|---|---|
| Glukoz | $C_6H_{12}O_6.H_2O$ | 2,5 | gr |
| Sodyum Asetat | $CH_3COONa$ | 2,5 | gr |
| Sodyum Klorid | NaCI | 0,6 | gr |
| Dipotasyum Hidrojen Fosfat | $K_2HPO_4$ | 0,16 | gr |
| Demir3Klorür | $FeCl_3$. $6H_2O$ | 0,4 | gr |
| Sodyum Hidrojen Karbonat | $NaHCO_3$ | 2,94 | g |
| Amonyum Klorid | $NH_4CI$ | 0,23 | gr |
| Sodyum Hidrojen Fosfat | $NaH_2PO_4.H_2O$ | 0,32 | gr |
| İz Elementler | - | 10 | mL |

Stabilizasyon süreci boyunca sistemin biyolojik aktivitesinin dengelenmesi ve giriş atıksuyunun karakteristiklerinin kararlı hale gelmesi amaçlanmıştır. Stabilizasyon aşamasında reaktörde düzenli olarak askıda katı madde (AKM) analizleri gerçekleştirilmiş, ölçüm sonuçları zamana bağlı olarak izlenmiştir..

Stabilizasyon aşamasında gün boyunca zaman ayarlı prizlerle kontrollü şekilde havalandırılan ve karıştırılan aktif çamur deposu dengede tutulmuştur. Ardından kompresör ve karıştırıcı durdurulup çökelme işlemi başlatılmıştır. Çökme işlemi sonrası depoda kalan üst duru su bir beher yardımıyla elle boşaltılmıştır. 30 gün süreyle bu işlem devam ettirilmiş çamur stabilize edilmiştir. Şekil 3.3.'de bu süreç detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Ayrıca aktif çamur hazırlama prosesine ait başlangıç tasarım verileri Çizelge 3.2.' de verilmiştir.




Şekil 3.3. Aktif Çamur Hazırlama Prosesi

Çizelge 3.2. Aktif Çamur Hazırlama Prosesi Başlangıç Tasarım Verileri

| **Parametre** | **Miktar** | **Birim** |
|---|---|---|
| Q (Debi) | 10.000 | mL/gün |
| X (Biyokütle Konsantrasyonu) | 3.000 | mg/L |
| $C_{o,KOİ}$ | 500 | mg/L |
| SRT (Çamur Yaşı) | 40 | gün |
| F/M | 0,05 | kgBOI/kgMLVSS.gün |
| $L_{organik}$ | 0,11 | kgBOI/$m^3$.gün |
| $Q_{hava}$ (Hava Debisi) | 0,0337 | $m^3$/saat |
| $V_{reaktör}$ | 20.000 | ml |

Stabilize edilen aktif çamur, teze konu olan denemelerin yapılacağı 2 ayrı reaktör tankına alınmıştır (Şekil 3.4.). Bu reaktörlerde 5 gün süreyle geçici işletim yapılarak MLSS konsantrasyonu 4.000 mg/L' ye ayarlanmıştır.

Şekil 3.4. Geçiçi SBR Reaktörleri

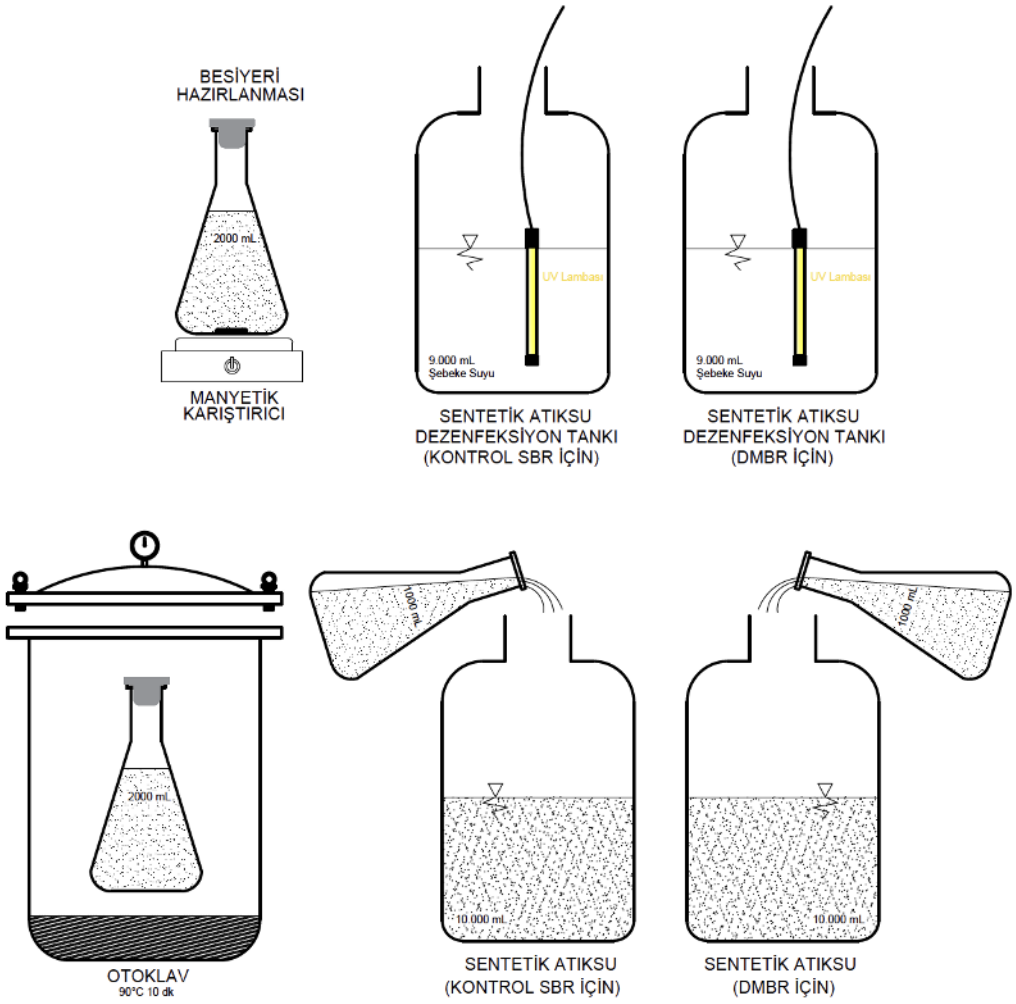
### 3.2. Reaktörlerin Tanımı ve İşletme Koşulları

Bu çalışma kapsamında, evsel atıksu arıtımında dinamik membran sisteminin performansını değerlendirmek amacıyla laboratuvar ölçeğinde iki farklı biyolojik reaktör kurulmuş ve işletilmiştir. Bunlardan ilki doldur–boşalt esasına göre işletilen kontrol reaktörü (SBR), diğeri ise düz levha şeklinde (flat-sheet), dinamik membranın daldırıldığı (batık, submerged) sürekli akışlı dinamik membran biyo-reaktörüdür (DMBR). Her iki reaktör de aynı besleme karakteristikleri altında işletilerek, dinamik membran sisteminin evsel atıksu arıtımındaki performansı kontrol sistemi ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Kontrol reaktörü, doldur–boşalt (sequencing batch reactor, SBR) prensibine göre işletilmiş olup, biyolojik arıtım performansının karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi amacıyla kullanılmıştır. Reaktör, sentetik atıksu ile beslenmiş ve havalandırma koşulları altında çalıştırılmıştır. Her çevrimde belirli bir hacimde atıksu reaktöre alınmış, reaksiyon süresi tamamlandıktan sonra arıtılmış su boşaltılmıştır. Bu reaktörde herhangi bir membran veya ayırıcı ünite kullanılmamıştır.

Dinamik membran reaktörü ise sürekli akışlı ve havalandırmalı bir sistem olarak tasarlanmıştır. Reaktör içerisine, dinamik membran oluşumuna olanak sağlayacak şekilde daldırılmış destek materyali yerleştirilmiştir. İşletme sırasında, atıksu reaktöre sürekli olarak beslenmiş ve biyolojik arıtım süreci ile birlikte destek materyali üzerinde dinamik membran tabakasının oluşması sağlanmıştır. Dinamik membran, biyokütle ve partiküler maddelerin tutulmasında aktif rol oynamış ve sistemin katı-sıvı ayırma performansı bu mekanizma üzerinden değerlendirilmiştir.

Her iki reaktör de yaklaşık 15 L hacminde olup, aynı karakteristikte sentetik atıksu ile beslenmiş, deneysel çalışmalar boyunca benzer çevresel ve işletme koşulları altında işletilmiştir. Bu aşamada sentetik atıksuyun hazırlanması Şekil 3.5.' de ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

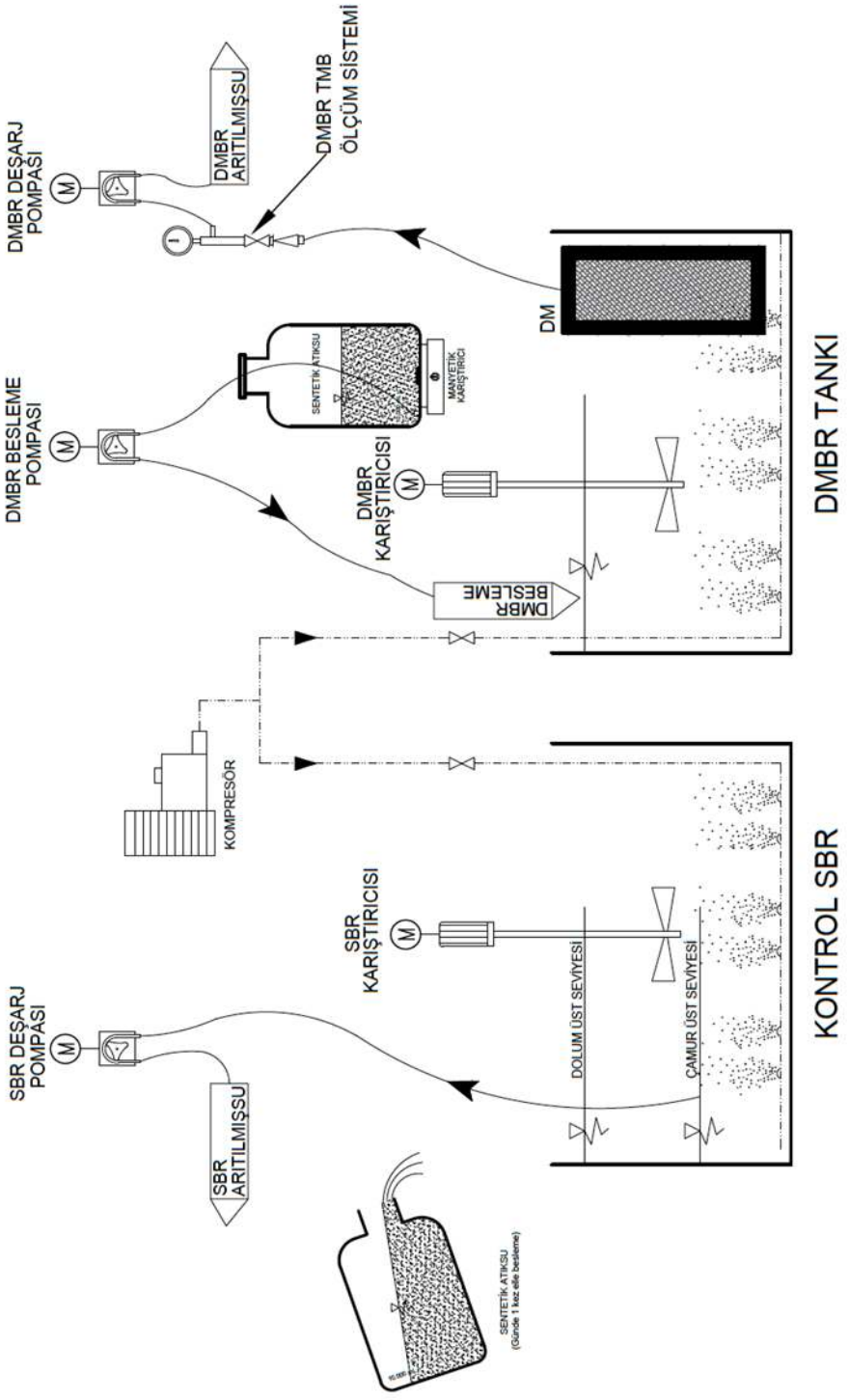



Şekil 3.5. Reaktörlerin Sentetik Atıksuyunun Hazırlanması

Deney düzeneğinde tüm işletme kontrolleri, her ekipman için birer adet olmak üzere, zaman ayarlı prizlerle yapılmıştır. İşletme süreçleri için ayrı işletme prosedürleri hazırlanmıştır. İşletme esnasında reaktörlerden Kontrol SBR sistemi elle manuel beslenmiş, otomatik işletilmiş ve otomatik şekilde deşarj edilmiştir. DMBR sistemi ise tam otomatik beslenmiş, işletilmiş ve deşarj edilmiştir. DMBR sistemi sürekli atıksu giriş ve çıkışının sağlandığı sürekli reaktör işletiminde işletilirken,

Kontrol SBR kesikli işletimle işletilmeye devam edilmiştir. Söz konusu reaktör tasarımı Şekil 3.6.' da ayrıntılı şekilde gösterilmiştir.

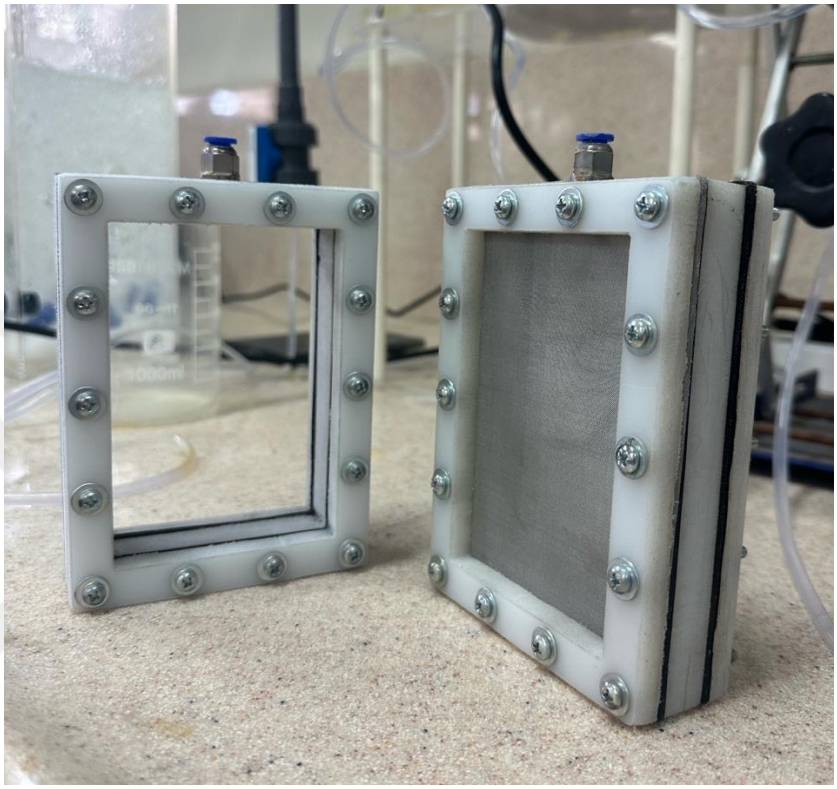
İşletme debileri 10.000 ml/gün olacak şekilde otomatik atıksu beslemesi peristaltik pompa kullanılarak, ~454 ml/saat kapasite ile, DMBR reaktörü beslenmiştir. Eş zamanlı olarak yine ~454 ml/saat kapasiteye ayarlanmış bir peristaltik pompa ile membran kaseti içinden geçirilen arıtılmış su olarak deşarj edilmiştir.




Şekil 3.6. Reaktör Tasarımı

### 3.2.1. Destek Tabakası

Çalışmada DMBR reaktörüne, destek tabakası olarak 8,00 x 12,00 cm ölçülerinde çift filtrasyon yüzeyine sahip membran kaseti daldırılmıştır. Membran kasetinin boş ve malzeme ile kaplanmış görseli Şekil 3.7.'de verilmiştir. Membran malzemesi olarak 50 mikron geçirgenliğe sahip PP malzemeden imal edilmiş torba filtre malzemesi kullanılmıştır. Görseli Şekil 3.8.'de verilmiştir.



Şekil 3.7. DMBR membran kaseti

Şekil 3.8. DMBR destek tabaka malzemesi

4.000 mg/L AKM ile işletilen Kontrol SBR ve DMBR reaktörleri günlük reaktör içi AKM ve deşarj KOI ölçümleri yapılmış aynı zamanda günlük Akı hesaplamaları yapılmış ve TM basınçları takip edilmiş, not alınmıştır. Emiş hattı üzerinde sürekli şekilde TM basıncı düzenli olarak okunmuştur.

### 3.2.2. Ölçülen Parametreler

***Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)***

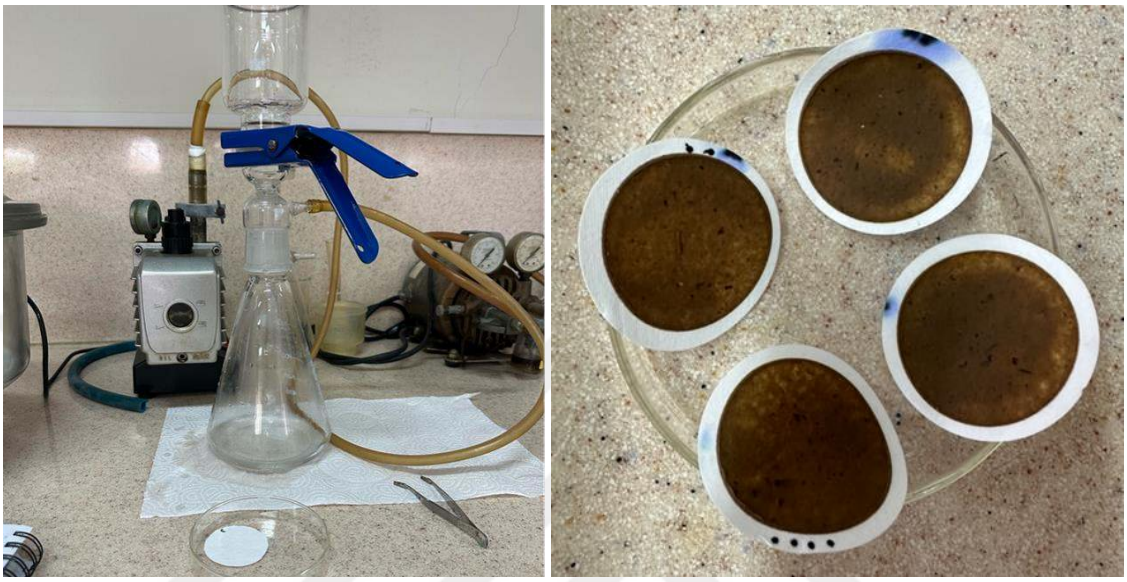
KOİ deneyi Standard Methods 5220 C'ye göre Kapalı Reflu yöntemi (Closed Reflux, Titrimetric Method) ile yapılmıştır. Proses işletiminde kontrol SBR ve DMBR reaktörlerinin işletimi sırasında deşarj numunelerinde filtre KOİ ölçümleri yapılmıştır. Otomasyona bağlı şekilde gün içinde kontrol SBR reaktörün deşarj anında kontrol reaktöründen ve DMBR deşarj hattından eş zamanlı olarak deşarj numuneleri alınmıştır. Filtre KOİ ölçümü için deşarj numuneleri santrifüjlenerek üst fazdan KOİ bakılmıştır. Her analiz bir şahit ve her reaktörden ikişer numune olacak şekilde yapılmıştır. 2'şer ml olarak alınan numuneler metoda göre 10 ml deney tüplerinde hazırlanmıştır ve girişim önleyici olarak bir miktar Cıva(II) sülfat ($HgSO_4$) eklenerek termoreaktöre konmuştur. 2 saat süreyle 148 °C'de bekletilen deney tüpleri soğumaya bırakılmıştır. Soğuyan numuneler DAS ile titre edilerek sarfiyatlar üzerinden nihai KOİ sonuçları hesaplanmıştır. KOİ deney düzeneği Şekil 3.9'da gösterilmiştir.

Şekil 3.9. KOİ deney düzeneği

***Askıda Katı Madde Miktarı (AKM)***

Askıda Katı Madde Tayini Standard Methods 2540 D (Total Suspended Solids Dried at 103–105 °C)'a göre Gravimetrik yöntemle yapılmıştır. Otomasyonla gerçekleştirilen kontrol reaktöründeki son karıştırma periyodunda reaktör içinden otomatik pipetle 10ml iki numune ve eş zamanlı olarak DMBR reaktörünün içinden hava ile karışım esnasında yine otomatik pipetle 10 ml

iki adet AKM numuneleri alınmıştır. Alınan bu numuneler AKM vakum düzeneğinde önceden darası alınmış filtre kağıdından (Whatman GFC, 1.2 µm gözenek çaplı) geçirilmiştir. Filtre kağıtları etüvde 103-105 C'de 1 saat bekletildikten sonra desikatöre alınarak 1 saat soğumaya bırakılmıştır. Soğuyan filtre kağıtları hassas terazide tartılarak numune hacmine göre hesaplamalar yapılıp AKM ölçümleri işlenmiştir. AKM deney düzeneği ve filtre kağıtları Şekil 3.10.'da görülmektedir.



Şekil 3.10. AKM deney düzeneği

***Çözünmüş Oksijen (ÇO)***

Reaktörlerin işletimleri esnasında hava ile karıştırma, karıştırıcı ile karıştırma esnalarında Hach-Lange marka (HQ4300) el tipi optik sensörlü çözünmüş oksijenmetre ile ölçümler yapılmıştır. Yapılan ölçümler göz önünde bulundurularak reaktör havalandırma ve karıştırma süreleri ayarlanmıştır. Oksijenmetre cihazı Şekil 3.11.'de gösterilmiştir.

Şekil 3.11. Oksijenmetre

***Transmembran Basıncı (TMB)***

DMBR deşarj pompası ile membran kaseti arasına transmembran basıncının (TMB) ölçülmesi amacıyla basınç ölçüm düzeneği yerleştirilmiştir. Günlük düzenli olarak bu düzenekteki manometreden negatif basınç ölçümü yapılmıştır. Ölçümler her gün aynı saatte olacak şekilde işlenmesine özen gösterilmiştir. TMB ölçüm düzeneği Şekil 3.12.'de görüldüğü gibidir.

Şekil 3.12. TMB ölçüm düzeneği

### 3.2.2.5. Akı

Akı ölçümleri için DMBR reaktörünün deşarj hattından her gün aynı saatte mezüre 100-200 ml doldurularak, dolum süresi üzerinden debi hesabı yapılmıştır. Hesaplamalar filtre yüzey alanı göz önüne alınarak yapılmıştır. Akı hesabı için kullanılan denklem aşağıdaki gibidir;

$$\boldsymbol{AKI\ (LMH)} = \frac{\boldsymbol{Pompa\ debisi\ (L/h)}}{\boldsymbol{Filtre\ y\ddot{u}zey\ alanı\ (m^2)}}$$

# 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Dinamik membran biyoreaktör (DMBR) prosesinin arıtma performansını değerlendirmek amacıyla, deneysel çalışmalar süresince DMBR sistemi ile paralel olarak işletilen kontrol reaktörü de eş zamanlı olarak izlenmiştir. Her iki reaktörde işletme boyunca arıtılmış su deşarjına ait kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) ve askıda katı madde (AKM) konsantrasyonları düzenli olarak ölçülmüş; buna ek olarak reaktör içi AKM değerleri takip edilmiştir. DMBR sisteminde filtrasyon performansının değerlendirilmesi amacıyla akı ve transmembran basıncı (TMB) sürekli olarak izlenmiş, işletme koşullarının kontrolü için ise belirli aralıklarla çözünmüş oksijen (ÇO) ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu ölçümler ile birlikte işletme süresince elde edilen gözlem ve tespitler, sistemin davranışını ortaya koymak amacıyla bu bölümde sunulmuş ve tartışılmıştır.

## 4.1. Dinamik Membran Oluşumu ve Sistemin Başlangıç Davranışı

Dinamik membran biyoreaktör (DMBR) sisteminin işletimi sırasında, destek malzemesi yüzeyinde askıda katı maddeler ve biyolojik flokların birikimiyle kısa sürede bir dinamik membran tabakası oluştuğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.1.'de verilen görseller, destek yüzeyinin işletmenin ilerleyen günlerinde daha homojen ve yoğun bir tabaka ile kaplandığını göstermektedir. Bu görsel bulgular, sistemde gerçekleşen filtrasyonun sabit bir membran yüzeyi yerine, işletme koşulları altında kendiliğinden oluşan ikincil bir tabaka tarafından sağlandığını doğrulamaktadır.

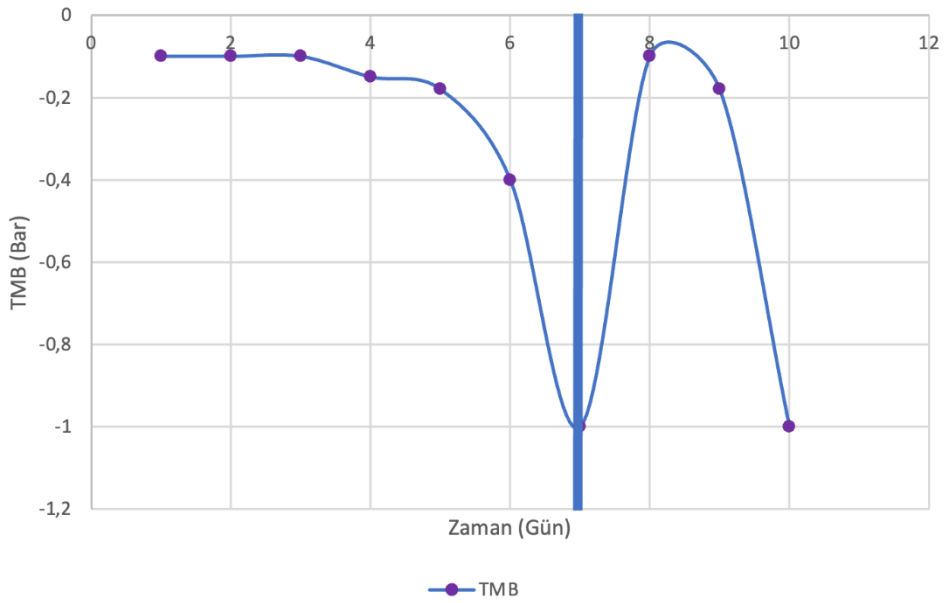
Dinamik membran oluşumu, aynı zamanda transmembran basıncı (TMB) ve akı profilleri ile de desteklenmektedir. İşletmenin başlangıç döneminde TMB değerlerinde gözlenen artış ve eş zamanlı akı düşüşü, destek yüzeyinde kek tabakasının hızla geliştiğini göstermektedir. Literatürde, bu davranış dinamik membran sistemleri için tipik bir başlangıç rejimi olarak tanımlanmakta ve kararlı filtrasyon koşullarına geçişin bir göstergesi olarak kabul edilmektedir (Fan ve ark., 2002; Erşahin, 2015).

Şekil 4.1. Destek malzemesi üzerinde oluşan dinamik membran kek tabakası

### 4.1.1. 4000 mg/L MLSS İşletme Koşulları

4.000 mg/L MLSS konsantrasyonunda her iki reaktörün paralel olarak işletildiği deneysel çalışmalarda, DMBR reaktöründe filtrasyon davranışının izlenmesi amacıyla transmembran basıncı (TMB) temel kontrol parametresi olarak değerlendirilmiştir. İşletme süreci boyunca destek malzemesi yüzeyinde dinamik membran tabakasının oluşumuna ve zamanla gelişen kek tabakasına bağlı olarak TMB değerlerinde belirgin bir düşüş gözlenmiş ve bu değerler bazı işletme periyotlarında –1,00 bar seviyelerine kadar ulaşmıştır. TMB'nin bu seviyelere düşmesi, destek tabakasında artan filtrasyon direnci ve kısmi tıkanmaların bir göstergesi olarak değerlendirilmiştir. Bu durumda, membran kaseti reaktörden çıkarılarak fiziksel sıyırma yöntemiyle temizlenmiş ve ardından yeniden işletmede olan reaktöre yerleştirilmiştir. Bu uygulama ile dinamik membran tabakasının kontrollü şekilde uzaklaştırılması ve sistemin filtrasyon performansının yeniden kazanılması sağlanmıştır.

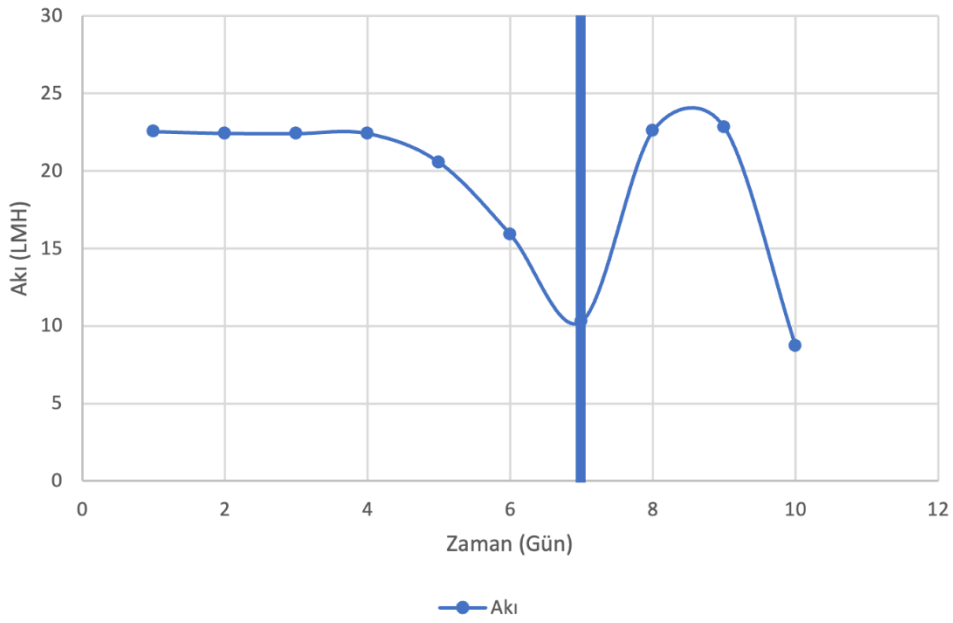
İşletmenin ilerleyen aşamalarında transmembran basıncı (TMB) değerlerinin yeniden –1,00 bar seviyelerine düşmesi üzerine, membran yüzeyine ikinci kez fiziksel sıyırma işlemi uygulanmış ve sistem işletimine devam edilmiştir. Ancak iki ardışık sıyırma işlemi sonrasında TMB değerlerinde belirgin ve kalıcı bir iyileşme sağlanamaması nedeniyle, dinamik membran tabakasında artan filtrasyon direncinin sistem performansını sınırlandırdığı değerlendirilmiş ve bu doğrultuda 4.000 mg/L MLSS koşullarındaki deneysel çalışmalar sonlandırılmıştır. 4000 mg/L MLSS konsantrasyonu işletme koşullarında 10 gün boyunca işletilen DMBR'nin TMB değişimini gösteren grafik Şekil 4.2.'de verilmiştir.




Şekil 4.2. 4000 mg/L MLSS'de DMBR zamana bağlı TMB değişim grafiği

DM işletiminde kritik öneme sahip olan TMB izlenmiş ve basınç göstergesi -1,00 bar değerine düştüğünde membran yüzeyinde sıyırma işlemi ile temizlik yapılmıştır. Membran kaseti daha sonra tekrar reaktöre daldırılarak işletmeye alınmıştır. Sıyırma işlemi işletmenin 7. gününde TMB -1,00 bara ulaştığında yapılmıştır. Bu aşamada temizlik işleminden sonra kısa süreliğine TMB yükselmiş ancak kek tabakası yıkandığı için tekrar oluşuncaya kadar giderim verimi düşük seyretmiştir. Kek tabakası oluşumu başladıktan sonra TMB'nin yeniden düşüşe geçtiği ve giderim verimlerinin yükseldiği gözlenmiştir.

TMB değeri düşüş gösterdiğinde reaktörün akı değerinin de orantılı olarak düştüğü gözlemlenmiş, doğru orantı tespit edilmiştir. Reaktörün zamana bağlı akı değişim grafiği Şekil 4.3.'de gösterilmiştir.

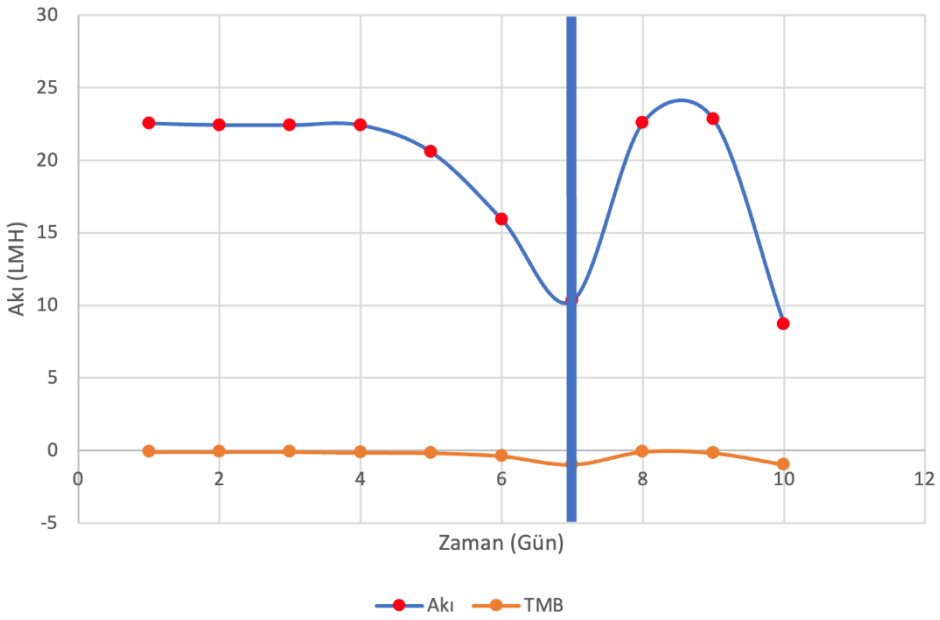



Şekil 4.3. 4000 mg/L MLSS'de DMBR zaman bağlı akı değişimi

4000 mg/L MLSS koşullarında DMBR sisteminde akı ve transmembran basıncının (TMB) birlikte zamana bağlı değişimi Şekil 4.4.'de gösterilmektedir. İşletme boyunca akı değerlerinin 9–23 LMH seviyelerinde olduğu görülmektedir. Bu durum, destek malzemesi yüzeyinde henüz belirgin bir dinamik membran tabakasının oluşmadığını ve filtrasyon direncinin düşük olduğunu göstermektedir.

İşletmenin ilerleyen günlerinde akı değerlerinde belirgin bir düşüş gözlenirken, TMB değerlerinin eş zamanlı olarak negatife yönelmesi, destek yüzeyinde dinamik membran ve buna bağlı kek tabakasının hızla geliştiğini ortaya koymaktadır. Bu süreçte filtrasyon direncinin artması, akı kaybının temel nedeni olarak değerlendirilmiştir. Söz konusu davranış, dinamik membran sistemlerinde literatürde tanımlanan tipik başlangıç ve geçiş rejimi ile uyumludur.

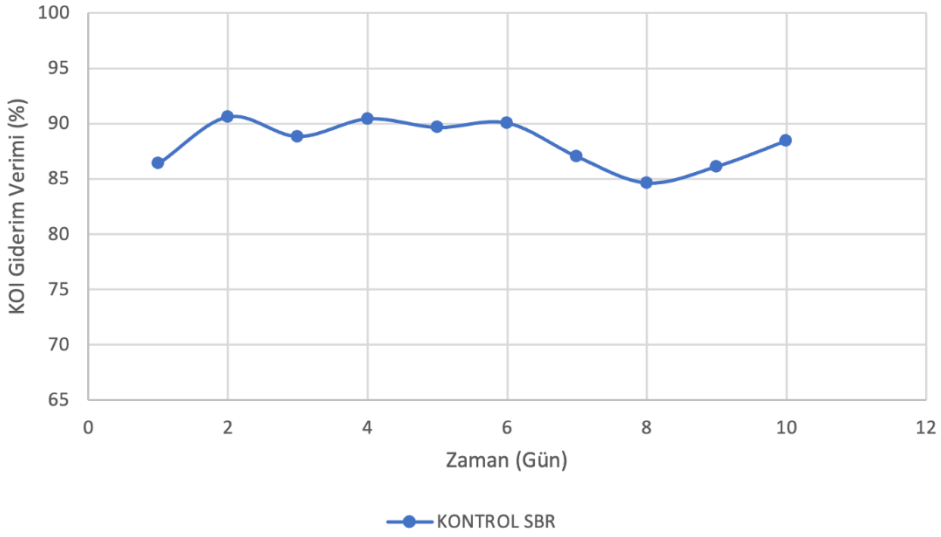
TMB değerlerinin kritik seviyelere ulaşması üzerine uygulanan fiziksel sıyırma işlemi sonrasında, akı değerlerinde belirgin bir iyileşme gözlenmiş ve filtrasyon performansı geçici olarak yeniden kazanılmıştır. Ancak işletmenin devamında akı değerlerinin tekrar düşmesi ve TMB'nin yeniden negatife yönelmesi, 4000 mg/L MLSS koşullarında dinamik membran tabakasının kısa sürede yeniden oluştuğunu ve filtrasyon direncinin hızla arttığını göstermektedir. Bu durum, yüksek MLSS konsantrasyonlarının DMBR sistemlerinde kısa vadede yüksek arıtma performansı sağlamakla birlikte, uzun dönem işletmede filtrasyon kararlılığını sınırlandırabileceğini ortaya koymaktadır.




Şekil 4.4. 4000 mg/L MLSS'de DMBR zamana bağlı akı ve TMB değişimi

Kontrol SBR reaktöründe 4000 mg/L MLSS koşullarında KOİ gideriminin zamana bağlı değişimi Şekil 4.5.'te sunulmuştur. İşletme süresi boyunca kontrol reaktöründe KOİ giderim verimlerinin yaklaşık %85–91 aralığında değiştiği ve genel olarak kararlı bir seyir izlediği görülmektedir. Bu durum, sistemde biyolojik arıtma prosesinin stabil çalıştığını ve organik madde gideriminin ağırlıklı olarak biyokimyasal mekanizmalarla gerçekleştiğini göstermektedir.

İşletmenin belirli günlerinde gözlenen sınırlı dalgalanmalar, aktif çamur sistemlerinde tipik olarak karşılaşılan biyokütle adaptasyonu, giriş atıksu karakterindeki değişimler ve işletme koşullarına bağlı doğal varyasyonlar ile ilişkilendirilmiştir. Bununla birlikte, kontrol reaktöründe ilave bir fiziksel ayırma mekanizmasının bulunmaması nedeniyle, KOİ giderim performansının biyolojik arıtım kapasitesi ile sınırlı kaldığı değerlendirilmiştir.



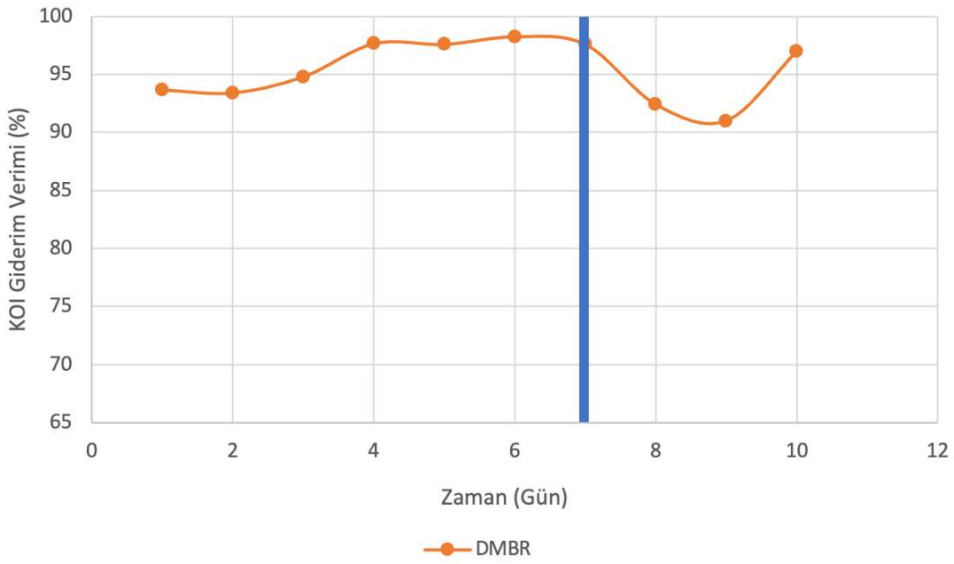

Şekil 4.5. 4000 mg/L MLSS'de Kontrol SBR KOİ giderimleri

4000 mg/L MLSS konsantrasyonunda işletilen DMBR sisteminde KOİ giderim verimlerinin zamana bağlı değişimi Şekil 4.6.'da sunulmuştur. İşletme süresi boyunca DMBR sisteminde KOİ giderim verimlerinin genel olarak %91–98 aralığında seyrettiği ve yüksek bir arıtma performansının sağlandığı görülmektedir. Özellikle işletmenin ilk günlerinden itibaren elde edilen yüksek KOİ giderim verimleri, dinamik membran tabakasının kısa sürede oluşarak biyolojik arıtma prosesine ilave bir fiziksel ayırma mekanizması sağladığını göstermektedir.

İşletmenin yaklaşık 4.–6. günleri arasında KOİ giderim verimlerinin %97–98 seviyelerine ulaştığı ve sistemin bu dönemde kararlı bir arıtma rejimine geçtiği belirlenmiştir. Bu durum, destek malzemesi yüzeyinde gelişen dinamik membran tabakasının partiküler ve kolloidal organik maddelerin tutulmasında etkin rol oynadığını ve biyolojik arıtma ile sinerjik bir etki oluşturduğunu ortaya koymaktadır.

Grafikte dikey çizgi ile gösterilen fiziksel sıyırma müdahalesi sonrasında KOİ giderim verimlerinde kısa süreli bir düşüş gözlenmiş, ancak işletmenin devamında sistemin hızla toparlanarak yüksek KOİ giderim performansını yeniden kazandığı görülmüştür. Bu geçici düşüş, dinamik membran tabakasının uzaklaştırılmasıyla fiziksel ayırma katkısının kısa süreli olarak azalmasına bağlanmıştır. Bununla birlikte, yüksek MLSS konsantrasyonu nedeniyle dinamik membran tabakasının kısa sürede yeniden oluşması, KOİ giderim verimlerinin tekrar yükselmesini sağlamıştır.

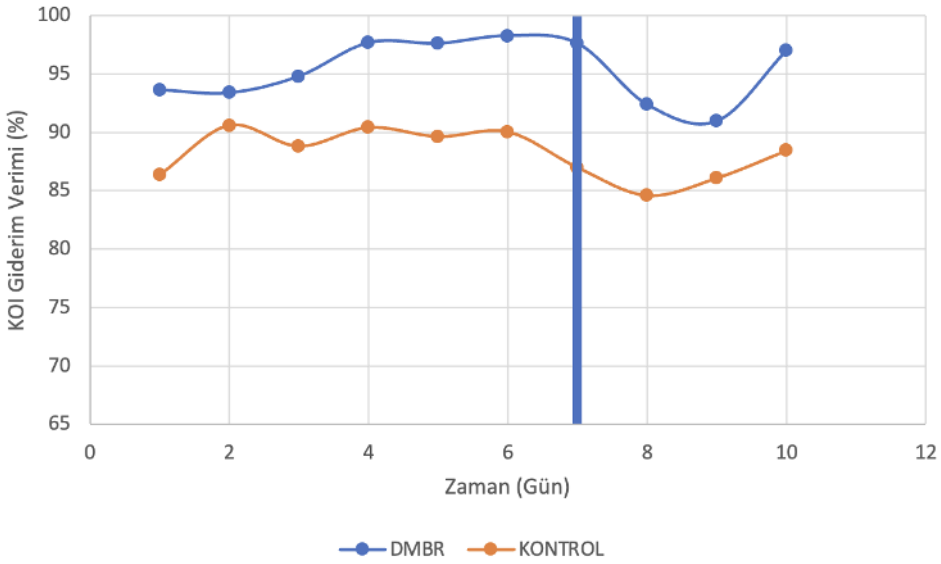
Ancak ilerleyen işletme günlerinde, dinamik membran tabakasının hızla kalınlaşmasına bağlı olarak filtrasyon direncinin artması ve sistemin hidrolik açıdan zorlanması, KOİ giderim verimlerinde sınırlı dalgalanmalara neden olmuştur. Bu durum, 4000 mg/L MLSS koşullarının DMBR sisteminde kısa vadede yüksek arıtma performansı sağlamakla birlikte, uzun dönem işletmede filtrasyon kararlılığı açısından sınırlayıcı olabileceğini göstermektedir.




Şekil 4.6. 4000 mg/L MLSS'de DMBR KOİ giderimleri

İşletme süresi boyunca her iki sistemde de KOİ giderimi sağlanmış olmakla birlikte, DMBR sisteminin kontrol SBR'ye kıyasla daha yüksek ve daha kararlı KOİ giderim verimleri elde ettiği açıkça görülmektedir. Kontrol SBR sisteminde KOİ giderim verimlerinin yaklaşık %85–91 aralığında seyrettiği ve giderimin esas olarak biyolojik mekanizmalarla sınırlı kaldığı belirlenmiştir. Buna karşılık, DMBR sisteminde KOİ giderim verimlerinin çoğunlukla %91–98 aralığında gerçekleştiği ve işletmenin büyük bölümünde kontrol reaktörüne göre daha üstün bir performans sergilediği gözlenmiştir. Bu fark, dinamik membran tabakasının partiküler ve kolloidal organik maddelerin tutulmasına katkı sağlaması ve biyolojik arıtmayı destekleyen ilave bir fiziksel ayırma mekanizması oluşturması ile açıklanmaktadır.

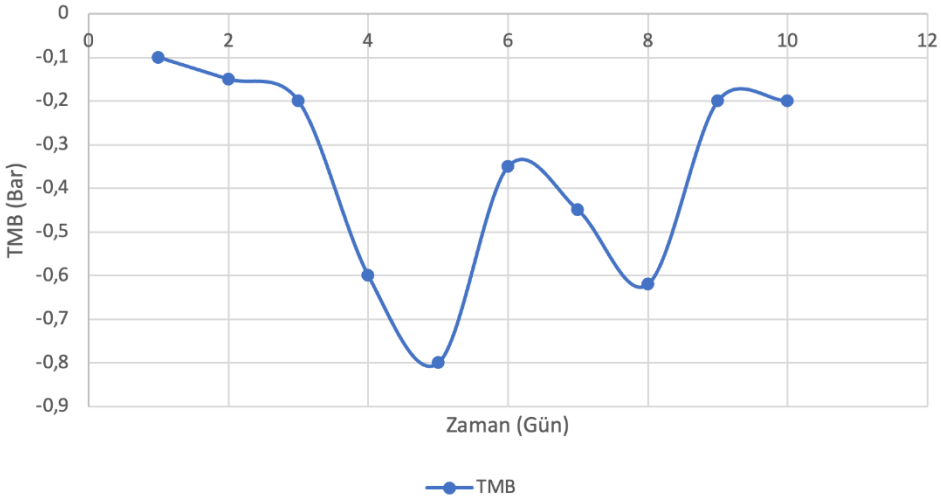
Şekil 4.7.'de verilen grafikle beraber iki reaktörün işletme verimleri arasındaki kıyaslamanın daha rahat yapılabileceği görülmüştür.




Şekil 4.7. 4000 mg/L MLSS'de Kontrol SBR ve DMBR'nin KOİ giderimleri

### 4.1.2. 3000 mg/L MLSS işletme koşulları

4000 mg/L MLSS işletme koşullarında olduğu gibi, 3000 mg/L MLSS konsantrasyonunda da paralel olarak işletilen kontrol SBR ve DMBR sistemlerinin performansları analiz edilmiş ve izlenmiştir. Bunun için temel parametre yine TMB olup, zamana bağlı grafiği Şekil 4.8.'de verilmiştir. Bu işletme şartlarında TMB değerlerinin çok düşse dahi yüksek basınç değerlerine tekrar geri döndüğü görülmüştür. İşletim sırasında havalandırma ile karıştırma esnasında zayıf kek tabakasının parçalanmasının buna sebebiyet verdiği değerlendirilmiştir.



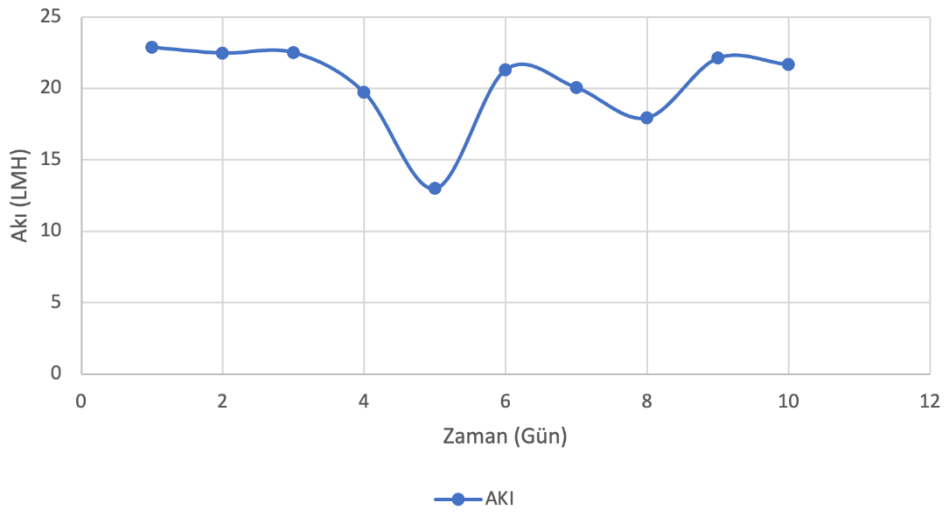

Şekil 4. 8.3000 mg/L MLSS'de DMBR zamana bağlı TMB değişim grafiği

3000 mg/L MLSS konsantrasyonunda işletilen DMBR sistemine ait akı değerlerinin zamana bağlı değişimi Şekil 4.9.'da gösterilmektedir. İşletme süresi boyunca akı değerlerinin genel olarak 13–23 LMH aralığında seyrettiği ve yüksek MLSS koşullarına kıyasla daha kararlı bir filtrasyon davranışı sergilediği görülmektedir. İşletmenin başlangıç döneminde akı değerlerinde sınırlı bir azalma gözlenmekle birlikte, bu düşüşün ardından akının nispeten sabit bir bantta devam ettiği belirlenmiştir.

Akı değerlerinde 3.-5. günler civarında gözlenen kademeli azalma, destek malzemesi yüzeyinde dinamik membran tabakasının oluşması ve filtrasyon direncinin artması ile ilişkilendirilmiştir. Ancak bu süreçte akıdaki düşüşün ani veya keskin olmaması, 3000 mg/L MLSS koşullarında dinamik membran tabakasının daha kontrollü ve dengeli bir şekilde geliştiğini göstermektedir. Bu durum, kek tabakasının kalınlığının ve yeniden oluşum hızının yüksek MLSS koşullarına kıyasla daha düşük olmasına bağlanmaktadır.

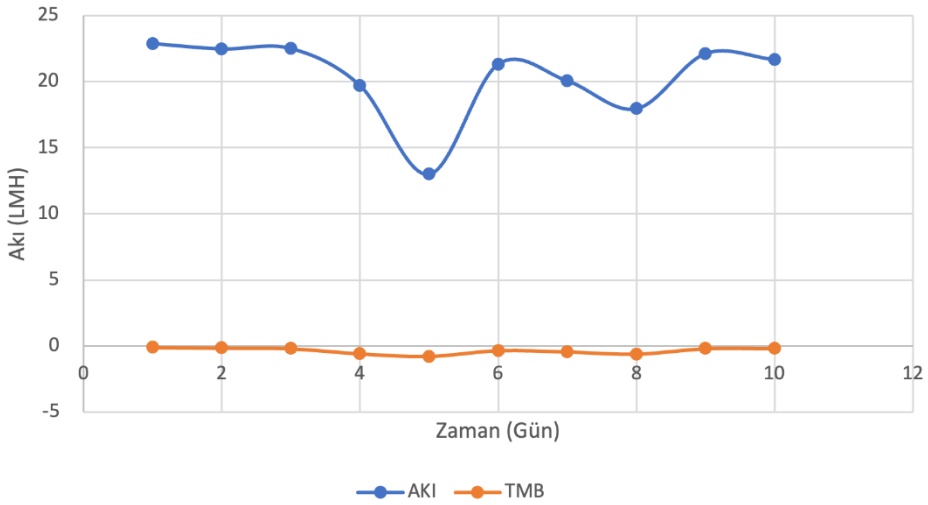
İşletmenin ilerleyen günlerinde akı değerlerinde gözlenen kısmi toparlanmalar ve sınırlı dalgalanmalar, sistemin kararlı bir filtrasyon rejimine ulaştığını ve dinamik membran tabakasının kalınlığının belirli bir aralıkta çalıştığını ortaya koymaktadır. Uzun süreli işletme koşullarında da akı değerlerinin korunmasının, 3000 mg/L MLSS koşullarının DMBR sisteminde filtrasyon kararlılığı açısından fayda sağlayacağı öngörülmüştür.

Bu bulgular, daha düşük MLSS konsantrasyonlarında dinamik membran tabakasının arıtma performansını desteklerken filtrasyon direncini aşırı derecede artırmadığını; dolayısıyla sistemin uzun dönem işletme açısından daha sürdürülebilir bir davranış sergilediğini ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar, 3000 mg/L MLSS koşullarının DMBR sistemlerinde akı sürekliliği ve işletme stabilitesi açısından avantajlı bir işletme aralığı sunduğunu göstermektedir.




Şekil 4.9. 3000 mg/L MLSS'de DMBR zaman bağlı akı değişimi

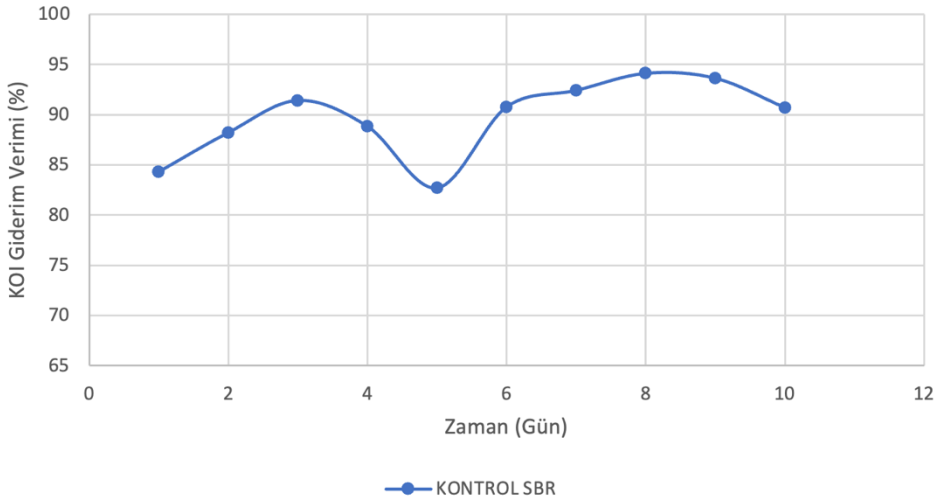
3000 mg/L MLSS konsantrasyonunda yapılan işletimde zamana bağlı olarak TMB ve akı değerlerinin 4000 mg/L MLSS konsantrasyonunda olduğu gibi birlikte azalıp birlikte arttığı tespit edilmiş ve Şekil 4.10.'da ki detaylı grafikte sunulmuştur.




Şekil 4.10. 3000 mg/L MLSS'de DMBR zamana bağlı akı ve TMB değişimi

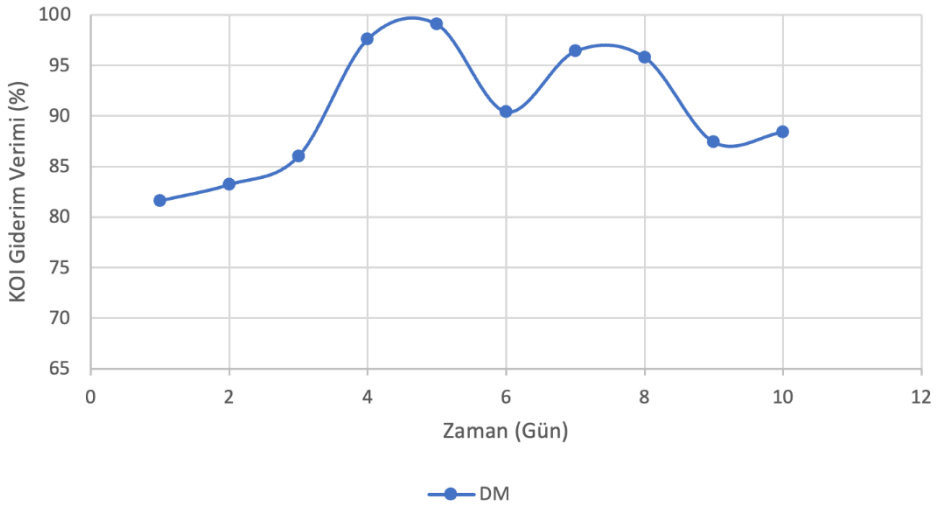
Kontrol SBR reaktöründe 3000 mg/L MLSS koşullarında KOİ gideriminin zamana bağlı değişimi Şekil 4.11.'de sunulmuştur. İşletme süresi boyunca kontrol reaktöründe KOİ giderim verimlerinin yaklaşık %83–94 aralığında değiştiği ve genel olarak kararlı bir seyir izlediği görülmektedir. Bu durum, sistemde biyolojik arıtma prosesinin stabil çalıştığını ve organik madde gideriminin ağırlıklı olarak biyokimyasal mekanizmalarla gerçekleştiğini göstermektedir.

İşletmenin belirli günlerinde gözlenen sınırlı dalgalanmalar, aktif çamur sistemlerinde tipik olarak karşılaşılan biyokütle adaptasyonu, giriş atıksu karakterindeki değişimler ve işletme koşullarına bağlı doğal varyasyonlar ile ilişkilendirilmiştir. Bununla birlikte, kontrol reaktöründe ilave bir fiziksel ayırma mekanizmasının bulunmaması nedeniyle, KOİ giderim performansının biyolojik arıtım kapasitesi ile sınırlı kaldığı değerlendirilmiştir.

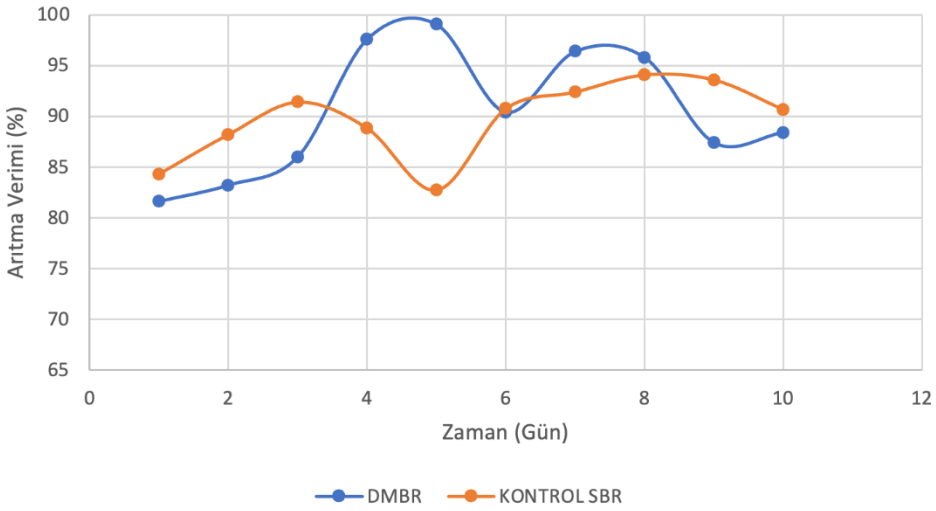



Şekil 4. 11. 3000 mg/L MLSS'de Kontrol SBR KOİ giderimleri

DMBR reaktörünün KOI giderim verimi grafiği Şekil 4.12.'de, Kontrol SBR reaktörü ile DMBR reaktörlerinin KOI giderim verimlerinin birlikte göründüğü grafik ise Şekil 4.13.'de sunulmuştur.

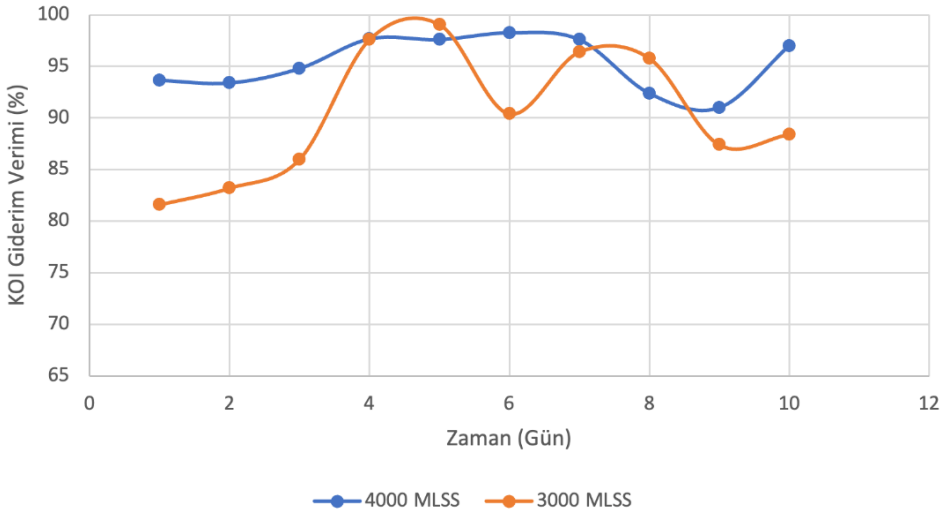



Şekil 4.12. 3000 mg/L MLSS'de DMBR KOİ giderimleri




Şekil 4.13. 3000 mg/L MLSS'de Kontrol SBR ve DMBR'nin KOİ giderimleri

4000 mg/L MLSS ile 3000 mg/L MLSS konstrasyonlarında DMBR sistemlerinin KOI giderim verimlerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.14.'de verilmiştir.




Şekil 4.14. 4000 - 3000 mg/L MLSS'de DMBR'lerinin KOİ giderimleri

Çizelge 4.1. DM farklı destek malzemelerinin işletme parametreleri

| Membran/Destek Tipi | Gözenek Boyutu (µm) | İşletme Süresi (gün) | Giriş KOİ Kons. (mg/L) | KOİ Giderim Verimi (%) | Süzüntü Akısı (LMH) | TMB (mbar) | Kaynak |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Naylon örgü (Nylon mesh) | 30 µm | 102 | - | 22 - 41 | 0.8 - 0.9 | 6 - 88 | Erşahin, 2015 |
| Naylon Mesh | 53 µm | 32 | 996.38 ± 83 | 94.9 ± 2.0 | 10.65 - 31.8 | 0 - 480 | Erşahin, 2015 |
| Dacron örgü (Dacron mesh) | 61 µm | - | - | 57.3 | 65 | 250 | Erşahin, 2015 |
| Naylon mesh | 70 µm | 127 | 3309 ± 1429 | 89 ± 5 | 51.5 ± 3.9 | - | Veral, 2018 |
| İçi boş fiber polyester kumaş (MBTF) | 30 µm | 15 | 1021 | 85.6 - 98.3 | 8.46 - 12.85 | ~200 | Elbir, 2025 |
| Naylon mesh | 80 µm | 90 | - | 83.3 ± 8.4 | 41.7 | 25 | Elbir, 2025 |
| Polipropilen torba filtre | 50 µm | 10 | 500 | 95.34 | 19,06 | 0-1000 | Bu çalışma |

# 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

## 5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, evsel atıksuların arıtımında dinamik membran teknolojisinin laboratuvar ölçeğinde uygulanabilirliği araştırılmış ve sistem performansı konvansiyonel biyolojik arıtma yaklaşımı ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- Dinamik membran biyoreaktör (DMBR) sistemi, sentetik evsel atıksu ile işletildiğinde yüksek KOİ ve askıda katı madde (AKM) giderim verimleri sağlamış; çıkış suyu kalitesi açısından ardışık kesikli reaktör işletimli aktif çamur sistemine kıyasla daha verimli bir performans sergilemiştir.
- Dinamik membran tabakasının oluşumu, sistemin başlangıç işletme döneminde süzüntü kalitesinde kısa süreli dalgalanmalara neden olmakla birlikte, tabakanın stabil hâle gelmesiyle birlikte bulanıklık ve AKM değerlerinin düşük seviyelerde seyrettiği gözlemlenmiştir. Bu durum, DM tabakasının etkin bir katı–sıvı ayırıcı bariyer işlevi gördüğünü ortaya koymuştur.
- İşletilen reaktörlerde 3000 mg/L MLSS için %90,60 ve 4000 mg/L MLSS için %95,34 ortalama KOİ giderim verimlerine ulaşılmıştır. Anlık verim analizlerinde bazı zamanlar birbirine yakın değerler sergileseler de, 3000 mg/L MLSS işletim esnasında oldukça düşük KOİ giderim verimleri de gözlemlenmiştir. Bunun sebebi 3000 mg/L MLSS'de kek direncinin düşük olup, kararsız bir işletim davranışı göstermesi ve TMB yükseldiğinde parçalanarak tekrar TMB'nin hızla düşmesidir.
- Farklı MLSS konsantrasyonlarında yapılan işletme koşulları karşılaştırıldığında, 4000 mg/L MLSS seviyelerinin, 3000 mg/L MLSS seviyelerine kıyasla; dinamik membran oluşumunu hızlandırdığı ve çıkış suyu kalitesini olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir. Bununla beraber yüksek MLSS değerlerinde transmembran basınç (TMB) artışının hızlandığı ve filtrasyon direncinin yükseldiği tespit edilmiştir.
- TMB değeri >400mbar olduğunda, membran tabakası parçalanarak çıkış suyunda çamur floğu kaçışları gözlemlenmiş olup, akı değerinin düşmesi ile KOİ giderim verimi artmış olmasına rağmen geri yıkama, sıyırma, temizleme gibi işlemlere ihtiyaç duyduğu tespit edilmiştir. Bu basınç düzeylerinden sonra TMB'nin çok hızlı yükseldiği grafiklerde de görülmektedir.
- Filtrasyon akısı ile TMB arasındaki ilişki incelendiğinde, dinamik membran sisteminde akı düşüşünün kademeli ve yönetilebilir olduğu; klasik membran sistemlerinde görülen ani tıkanma davranışının bu çalışmada gözlenmediği belirlenmiştir. Bu sonuç, DM

teknolojisinin tıkanmasını tamamen ortadan kaldırmasa da kontrol edilebilir bir işletme avantajına dönüştürdüğünü göstermektedir.

- Dinamik membran destek malzemesi üzerinde oluşan kek tabakasının, sistemin esas ayırma mekanizmasını oluşturduğu; destek malzemesinin kendisinin ise düşük maliyetli bir taşıyıcı yüzey olarak yeterli performans sağladığı ortaya konmuştur. Bu durum, pahalı mikrofiltrasyon veya ultrafiltrasyon membranlarına olan ihtiyacın azaltılabileceğini göstermektedir.
- Çalışma süresince DM sisteminde kimyasal temizlik ihtiyacının sınırlı olduğu, fiziksel temizlik ve hidrolik kontrol uygulamalarının sistem performansını sürdürmek için yeterli olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, uzun vadede işletme ve bakım maliyetlerinin düşürülebileceğine işaret etmektedir.

Genel olarak elde edilen sonuçlar, dinamik membran teknolojisinin evsel atıksuların arıtımında yüksek arıtma verimi, operasyonel esneklik ve ekonomik potansiyel sunduğunu ve konvansiyonel membran biyoreaktör sistemlerine güçlü bir alternatif oluşturduğunu göstermektedir.

## 5.2. Öneriler

Bu tez çalışması kapsamında elde edilen bulgular doğrultusunda, dinamik membran teknolojisinin geliştirilmesine ve uygulamaya aktarılmasına yönelik aşağıdaki öneriler sunulmuştur:

Dinamik membran sistemlerinin pilot ve tam ölçekli tesislerde uzun süreli işletme performanslarının değerlendirilmesi, özellikle TMB gelişimi, temizlik sıklığı ve enerji tüketimi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, saha ölçekli uygulamalara yönelik çalışmalar teşvik edilmelidir.

DM destek malzemesinin gözenek yapısı, yüzey özellikleri ve tekstil dokusu sistem performansı üzerinde belirleyici olduğundan, farklı destek malzemelerinin karşılaştırıldığı ayrıntılı optimizasyon çalışmaları yapılmalıdır.

Bu çalışmada ağırlıklı olarak KOİ ve AKM parametreleri değerlendirilmiştir. Gelecek çalışmalarda, azot ve fosfor giderimi, mikrokirleticiler ve patojen mikroorganizmaların tutulumu gibi ileri arıtım kriterleri de incelenmelidir.

Dinamik membran sistemlerinin enerji tüketimi ve yaşam döngüsü maliyet analizi yapılarak, klasik MBR ve konvansiyonel biyolojik arıtma sistemleriyle ekonomik ve çevresel açıdan karşılaştırılması önerilmektedir.

Dinamik membran tabakasının mikrobiyolojik yapısının ve içeriğinin daha iyi anlaşılabilmesi için SEM, EPS/SMP analizleri ve mikrobiyolojik karakterizasyon çalışmalarının yapılması, sistem davranışının modellenmesine katkı sağlayacaktır.

Bu tez çalışması dinamik membran teknolojisinin evsel atıksu arıtımında uygulanabilirliğini ortaya koymakta; elde edilen bulgular, DM sistemlerinin düşük maliyetli, enerji verimli ve

sürdürülebilir bir arıtma alternatifi olarak geliştirilmesine yönelik önemli bir bilimsel temel sunmaktadır.

## KAYNAKLAR


Abdelrahman, A. M. (2018). Comparison of ultrafiltration and self-forming dynamic membranes in membrane bioreactors for municipal wastewater treatment (Master's thesis, Istanbul Technical University). Istanbul Technical University Institutional Repository.

Adana Su ve Kanalizasyon İdaresi (ASKİ). (2024). 2024 Yılı Faaliyet Raporu. Adana Büyükşehir Belediyesi, Adana.

Alhussaini, M. A., Souza-Chaves, B. M., Felix, V., & Achilli, A. (2024). Comparative analysis of reverse osmosis and nanofiltration for the removal of dissolved contaminants in water reuse applications. Desalination, 586, 117822.

Başaran, E. (2020). Dinamik membran biyoreaktör kullanılarak tekstil endüstrisi atıksuyunda boya giderimi (Yüksek lisans tezi), Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Bellona, C., Drewes, J. E., Xu, P., & Amy, G. (2004). Factors affecting the rejection of organic solutes during NF/RO treatment—a literature review. Water research, 38(12), 2795-2809.

Bera, S. P., Godhaniya, M., & Kothari, C. (2022). Emerging and advanced membrane technology for wastewater treatment: A review. Journal of Basic Microbiology, 62(3-4), 245-259.

Brindle, K., & Stephenson, T. (1996). The application of membrane biological reactors for the treatment of wastewaters. Biotechnology and Bioengineering, 49(6), 601-610.

Cai, D., Huang, J., Liu, G., Li, M., Yu, Y., & Meng, F. (2018). Effect of support material pore size on the filtration behavior of dynamic membrane bioreactor. Bioresource Technology, 255, 359-363.

Cengiz, A. İ. (2022). Impact of different inoculum sources on performance of MBRs for municipal wastewater treatment: Dynamic membrane versus ultrafiltration membrane (Master's thesis). Istanbul Technical University.

Chu, H., Zhang, Y., Zhou, X., Zhao, Y., Dong, B., & Zhang, H. (2014). Dynamic membrane bioreactor for wastewater treatment: operation, critical flux, and dynamic membrane structure. Journal of membrane science, 450, 265-271.

CSGB, (2017). Arıtılmış Atıksuların Yeniden Kullanımı Projesi, Nihai Rapor

Demiral, Y. O. (2021). Treatment of domestic/municipal wastewaters by using dynamic membrane bioreactor system for irrigation purpose (Master's thesis). Istanbul Technical University.

DSİ (Devlet Su İşleri). (2023). DSİ 2023 Yılı Performans Programı, Ankara.

El Batouti, M., Al-Harby, N. F., & Elewa, M. M. (2021). A review on promising membrane technology approaches for heavy metal removal from water and wastewater to solve water crisis. Water, 13(22), 3241.

Elbir, H. (2025). Farklı gözenek çapına sahip destek tabakaları üzerinde dinamik membran oluşumunun incelenmesi (Yüksek lisans tezi), Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Elimelech, M., & Phillip, W. A. (2011). The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment. science, 333(6043), 712-717.

Ersahin, M. E., Ozgun, H., & van Lier, J. B. (2013). Effect of support material properties on dynamic membrane filtration performance. Separation Science and Technology, 48(15), 2263-2269.

Ersahin, M. E., Ozgun, H., Dereli, R. K., Ozturk, I., Roest, K., & van Lier, J. B. (2012). A review on dynamic membrane filtration: materials, applications and future perspectives. Bioresource technology, 122, 196-206.

Erşahin, M. E. (2015). Application of dynamic membranes in anaerobic membrane bioreactor systems (Doctoral dissertation, Istanbul Technical University & Delft University of Technology).

Fan, B., & Huang, X. (2002). Characteristics of a self-forming dynamic membrane coupled with a bioreactor for municipal wastewater treatment. Environmental Science & Technology, 36(23), 5245-5251.

Fane, A. G., Wang, R., & Jia, Y. (2010). Membrane technology: past, present and future. In Membrane and desalination technologies (pp. 1-45). Totowa, NJ: Humana Press.

Fritzmann, C., Löwenberg, J., Wintgens, T., & Melin, T. (2007). State-of-the-art of reverse osmosis desalination. Desalination, 216(1-3), 1-76.

Gray, N. F. (2014). Filtration methods. In Microbiology of waterborne diseases (pp. 631-650). Academic Press.

Hudayarizka, R. (2019). Impact of support material type on the performance of dynamic membrane bioreactors treating municipal wastewater (Master's thesis). Istanbul Technical University, Graduate School of Science, Engineering and Technology.

Işık, O. (2021). Dynamic membranes in aerobic membrane bioreactor systems for municipal wastewater treatment (Master's thesis). Istanbul Technical University.

Judd, S. (2010). The MBR book: principles and applications of membrane bioreactors for water and wastewater treatment. Elsevier.

Le-Clech, P., Chen, V., & Fane, T. A. (2006). Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment. Journal of membrane science, 284(1-2), 17-53.

Li, L., Xu, G., Yu, H., & Xing, J. (2018). Dynamic membrane for micro-particle removal in wastewater treatment: performance and influencing factors. Science of the Total Environment, 627, 332-340.

Liu, Y., Ran, J., Guo, Q., Gao, L., Yin, S., Li, S., ... & Zhou, G. (2024). Advancements in nanofiltration fouling phenomenon: From water treatment to salt lakes environments. Desalination, 583, 117649.

Majamaa, K., Aerts, P. E., Groot, C., Paping, L. L., van den Broek, W., & van Agtmaal, S. (2010). Industrial water reuse with integrated membrane system increases the sustainability of the chemical manufacturing. Desalination and Water Treatment, 18(1-3), 17-23.

Meng, F., Chae, S. R., Drews, A., Kraume, M., Shin, H. S., & Yang, F. (2009). Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): membrane fouling and membrane material. Water research, 43(6), 1489-1512.

Metcalf & Eddy, Inc., AECOM. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.

Millanar-Marfa, J. M. J., Borea, L., Castrogiovanni, F., Hasan, S. W., Choo, K. H., Korshin, G. V., ... & Naddeo, V. (2022). Self-forming dynamic membranes for wastewater treatment. *Separation & Purification Reviews*, *51*(2), 195-211.

Mohan, S. M., & Nagalakshmi, S. (2020). A review on aerobic self-forming dynamic membrane bioreactor: Formation, performance, fouling and cleaning. Journal of Water Process Engineering, 37, 101541.

Mulder, M. (1996). Basic Principles of Membrane Technology. *Kluwer Academic Publishers.*

Paçal, M. (2021). Treatment of high loading dairy industry wastewater by anaerobic dynamic membrane bioreactor (Doctoral dissertation, Marmara University). Institute for Graduate Studies in Pure and Applied Sciences.

Schaep, J., Van der Bruggen, B., Vandecasteele, C., & Wilms, D. (1998). Influence of ion size and charge in nanofiltration. Separation and Purification Technology, 14(1-3), 155-162.

Shannon, M. A., Bohn, P. W., Elimelech, M., Georgiadis, J. G., Mariñas, B. J., & Mayes, A. M. (2008). Science and technology for water purification in the coming decades. Nature, 452(7185), 301-310.

Smith, M. D., Sikka, A., Taguta, C., Dirwai, T. L., & Mabhaudhi, T. (2024). Embracing complexities in agricultural water management through nexus planning. Irrigation and Drainage, 73(5), 1695-1716.

TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu). (2025). Su ve Atıksu İstatistikleri 2024, Yayım Tarihi : 09 Aralık 2025. Ankara.

Van der Bruggen, B., Vandecasteele, C., Van Gestel, T., Doyen, W., & Leysen, R. (2003). A review of pressure-driven membrane processes in wastewater treatment and drinking water production. Environmental progress, 22(1), 46-56.

Veral, M. A. (2018). Performance comparison of membrane bioreactor with dynamic membrane bioreactor (Master's thesis, Yıldız Technical University). Graduate School of Natural and Applied Sciences.

World Health Organization, & United Nations Children's Fund. (2022). State of the world's drinking water: an urgent call to action to accelerate progress on ensuring safe drinking water for all. World Health Organization.

Xie, Y., Fan, C., Fang, Y., Zhu, X., Yan, J., Liu, H., & Liu, H. (2025). Ceramic ultrafiltration membrane as pretreatment for drinking water nanofiltration treatment: Performance,

cleaning, and costs based on an engineering case. Journal of Cleaner Production, 506, 145527.

Yıldız, M. (2019). Farklı gözenek boyutu ve materyaller ile üretilmiş dinamik membran destek tabakalarının evsel atıksuların arıtımında kullanımı (Yüksek lisans tezi), Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Zhang, M., Gao, C., Chen, W., & Wang, X. (2019). Recent advances in dynamic membrane technology for wastewater treatment. Journal of Environmental Management, 246, 228–242.

Zhang, Y., Zhao, Y., Chu, H., Dong, B., & Zhou, X. (2014). Characteristics of dynamic membrane filtration: structure, operation mechanisms, and cost analysis. Chinese Science Bulletin, 59(3), 247-260.

Liang, S., Qu, L., Meng, F., Han, X., & Zhang, J. (2013). Effect of sludge properties on the filtration characteristics of self-forming dynamic membranes (SFDMs) in aerobic bioreactors: Formation time, filtration resistance, and fouling propensity. Journal of Membrane Science, 436, 186-194.

Hu, Y., Wang, X. C., Tian, W., Ngo, H. H., & Chen, R. (2016). Towards stable operation of a dynamic membrane bioreactor (DMBR): operational process, behavior and retention effect of dynamic membrane. Journal of Membrane Science, 498, 20-29.

Zhang, X., Wang, Z., Wu, Z., Wei, T., Lu, F., Tong, J., & Mai, S. (2011). Membrane fouling in an anaerobic dynamic membrane bioreactor (AnDMBR) for municipal wastewater treatment: characteristics of membrane foulants and bulk sludge. Process Biochemistry, 46(8), 1538-1544.

Lin, H., Zhang, M., Wang, F., Meng, F., Liao, B. Q., Hong, H., ... & Gao, W. (2014). A critical review of extracellular polymeric substances (EPSs) in membrane bioreactors: characteristics, roles in membrane fouling and control strategies. Journal of Membrane science, 460, 110-125.

Yu, Z., Hu, Y., Dzakpasu, M., & Wang, X. C. (2019). Thermodynamic prediction and experimental investigation of short-term dynamic membrane formation in dynamic membrane bioreactors: Effects of sludge properties. Journal of Environmental Sciences, 77, 85-96.

Saleem, M., Lavagnolo, M. C., Campanaro, S., & Squartini, A. (2018). Dynamic membrane bioreactor (DMBR) for the treatment of landfill leachate; bioreactor's performance and metagenomic insights into microbial community evolution. Environmental Pollution, 243, 326-335.

Segredo-Morales, E., González, E., & Díaz, O. (2025). A brief review of dynamic membrane bioreactors for wastewater treatment: Research status and development trends. Journal of Industrial and Engineering Chemistry.

Isik, O., Batyrow, M., Abdelrahman, A. M., Orman, I., Ozgun, H., Ersahin, M. E., ... & Koyuncu, I. (2021). Dynamic membrane bioreactor performance for treatment of municipal wastewaters at different sludge concentrations. Environmental Technology & Innovation, 22, 101452.

Poostchi, A. A., Mehrnia, M. R., & Rezvani, F. (2015). Dynamic membrane behaviours during constant flux filtration in membrane bioreactor coupled with mesh filter. Environmental Technology, 36(14), 1751-1758.

Liang, S., Fu, K., Li, X., & Wang, Z. (2024). Unveiling the spatiotemporal dynamics of membrane fouling: A focused review on dynamic fouling characterization techniques and future perspectives. Advances in Colloid and Interface Science, 328, 103179.

Xiao, T., Zhu, Z., Li, L., Shi, J., Li, Z., & Zuo, X. (2023). Membrane fouling and cleaning strategies in microfiltration/ultrafiltration and dynamic membrane. Separation and Purification Technology, 318, 123977.

## ÖZGEÇMİŞ

Ağah Oktay ACAROĞLU, ilköğretim, ortaöğretim ve lise eğitimlerini Elbistan/Kahramanmaraş ve Karataş/Adana'da tamamlamıştır. Lisans eğitimini 2004 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümünde başarıyla tamamlayarak Çevre Mühendisi unvanını almıştır. Mesleki kariyerine 2005 yılında başlayan Acaroğlu, çevre mühendisliği ve çevre teknolojileri alanlarında çeşitli görevlerde bulunmuş; özellikle atıksu arıtma ve çevre teknolojileri konularında mesleki deneyim kazanmıştır. 2009 yılından itibaren AAG Arıtma Çevre Teknolojileri Ltd. Şti.'de Şirket Müdürü olarak görev yapmakta olup, bu görev kapsamında mühendislik, proje yönetimi ve işletme faaliyetlerini yürütmektedir. Evli ve bir kız çocuğu babasıdır.