NF90 Membranı İle Seramik Endüstrisi Atık Suyunun Çapraz Akışlı Nanofiltrasyon Yöntemiyle Arıtımı

Hatice Özbek

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık 2025

Treatment of Ceramic Industry Wastewater by Cross-Flow Nanofiltration Using an NF90 Membrane

Hatice Özbek

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Chemical Engineering

December 2025

NF90 Membranı İle Seramik Endüstrisi Atık Suyunun Çapraz Akışlı Nanofiltrasyon Yöntemiyle Arıtımı

Hatice Özbek

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı
Proses ve Reaktör Tasarımı Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

Danışman: Prof. Dr. Duygu Kavak

Aralık 2025

ONAY

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Hatice Özbek'nın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "NF90 Membranı İle Seramik Endüstrisi Atık Suyunun Çapraz Akışlı Nanofiltrasyon Yöntemiyle Arıtımı" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Duygu Kavak

İkinci Danışman :

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye: Prof. Dr. Duygu Kavak

Üye: Prof. Dr. Yeliz Aşçı

Üye: Prof. Dr. Hande Çelebi

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ……..…….. tarih ve ……..……. sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. ....

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Duygu Kavak danışmanlığında hazırlamış olduğum "NF90 Membranı İle Seramik Endüstrisi Atık Suyunun Çapraz Akışlı Nanofiltrasyon Yöntemiyle Arıtımı" başlıklı Yüksek Lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim.

19/12/2025
Hatice Özbek
İmza

T.C.

ESKİŞEHİR OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÜRETKEN YAPAY ZEKÂ KULLANIMI BEYAN FORMU

Bu tezi/projeyi hazırlarken aşağıdaki Üretken Yapay Zekâ (ÜYZ) araçlarından destek aldığımı beyan ederim:

Aşağıdaki ÜYZ araçlarını kullandım. (Birden fazla seçenek işaretlenebilir)

☐ Claude

X ChatGPT

☐ DeepSeek

☐ Gemini

☐ Copilot

☐ Diğer (Belirtiniz): .....

ÜYZ araçlarını tezimin/projemin aşağıdaki aşamalarında ilgili amaçlar için kullandım. (Birden fazla seçenek işaretlenebilir):

X Metin oluşturma	☐ Veri işleme ve analizi
X Literatür tarama	☐ Veri görselleştirme
X Çeviri	☐ Görüntü üretme
☐ Düzenleme/dil kontrolü	☐ Kaynakça düzenleme
	☐Diğer(Belirtiniz): .....

Bu çalışmada ÜYZ kullanımı, **Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehber**'e ve akademik dürüstlük ilkelerine uygun şekilde gerçekleştirilmiş olup ÜYZ araçlarından alınan destek etik kurallar ve kaynak gösterme esaslarına uygun biçimde belirtilmiştir.

ÜYZ araçlarının sağladığı bilgilerin doğruluğunu kontrol ettiğimi, yanlış veya eksik bilgi bulunması halinde tüm sorumluluğun tarafıma ait olduğunu; ayrıca çalışmamla ilgili bu beyana aykırı bir durumun herhangi bir zamanda tespit edilmesi durumunda ortaya çıkabilecek akademik ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi beyan ederim.

Hatice Özbek

13/02/2026

İmza

ÖZET

Seramik endüstrisi, Türkiye'nin ihracatında ve sanayileşmesinde önemli bir rol oynamakta olup üretim süreçlerinde yüksek miktarda su tüketimiyle dikkat çekmektedir. Bu süreçler sonucunda oluşan atık sular; kil, toprak, glazür, boya, ağır metaller, çözücüler, bağlayıcılar ve çeşitli organik-inorganik kirleticiler içermektedir. Bu atık sular doğrudan çevreye deşarj edildiğinde sucul yaşamı ve halk sağlığını tehdit etmektedir. Bu nedenle seramik atık sularının etkin bir şekilde arıtılması çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, seramik atık sularının arıtımında nanofiltrasyon (NF) teknolojisinin uygulanabilirliği araştırılmıştır. NF90 tipi membran kullanılarak yapılan deneylerde, farklı işletme koşullarının membran performansı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

Deneysel çalışmalar çapraz akışlı bir membran sistemi ile gerçekleştirilmiş olup üç farklı basınç değeri (4, 6 ve 8 bar) ve üç farklı sıcaklık (25°C, 30°C, 35°C) uygulanmıştır. Deneyler kapsamında akı, KOİ (kimyasal oksijen ihtiyacı) giderimi, bulanıklık giderimi, pH değişimi, iletkenlik, renk giderimi ve askıda katı madde (AKM) analiz edilmiştir.

Deneyler sonucunda maksimum akı değeri 35^{o}C sıcaklıkta 8 bar basınçta 80 L/m^{2}saat bulunmuştur. Maksimum renk giderimi ve askıda katı madde giderimi 4 bar ve 25^{o}C'de sırasıyla %96,78 ve %99,06 olarak hesaplanmıştır. Maksimum bulanıklık ve KOİ giderim verimi 8 bar ve 25^{o}C'de sırasıyla %80,00 ve %75,43 olarak hesaplanmıştır. En düşük iletkenlik değeri 25°C sıcaklıkta ve 8 bar basınçta 0,254 µS/cm olarak ölçülmüştür. pH değerlerinde ise sıcaklık ve basınç değiştikçe büyük değişimler gözlenmemiştir. İşletme basıncının artmasıyla birlikte membran geçirgenliğinde azalma gözlemlenmiştir. Bu bağlamda çalışma, seramik atık sularının çevreye zarar vermeden yeniden kullanımı veya güvenli deşarjı için nanofiltrasyon teknolojisinin uygulanabilirliğini ortaya koymakta ve sürdürülebilir su yönetimi açısından önemli katkılar sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Seramik endüstrisi, nanofiltrasyon, NF90 membranı, çapraz akış sistem

SUMMARY

The ceramics industry plays a significant role in Turkey's exports and industrialization, and it is notable for its high water consumption in production processes. The wastewater generated as a result of these processes contains clay, soil, glaze, paint, heavy metals, solvents, binders, and various organic and inorganic pollutants. When these wastewater discharges are released directly into the environment, they threaten aquatic life and public health. Therefore, the effective treatment of ceramic wastewater is of great importance for environmental sustainability.

This study investigated the applicability of nanofiltration (NF) technology in the treatment of ceramic wastewater. Experiments conducted using NF90 type membranes evaluated the effect of different operating conditions on membrane performance.

The experimental studies were carried out using a cross-flow membrane system with three different pressure values (4, 6, and 8 bar) and three different temperatures (25°C, 30°C, 35°C). Within the scope of the experiments, flow, COD (chemical oxygen demand) removal, turbidity removal, pH change, conductivity, color removal, and total suspended solids (TSS) were analyzed.

Experiments showed that the maximum flow rate was 80 L/m²h at a temperature of 35°C and a pressure of 8 bar. Maximum color removal and suspended solids removal were calculated as 96,78% and 99,06% at 4 bar and 25°C, respectively. The maximum turbidity and COD removal efficiency were calculated as 80% and 75,43%, respectively, at 8 bar and 25°C. The lowest conductivity value was measured as 0,254 µS/cm at a temperature of 25°C and a pressure of 8 bar. No significant changes were observed in pH values as temperature and pressure changed. A decrease in membrane permeability was observed with increasing operating pressure. In this context, the study demonstrates the applicability of nanofiltration technology for the reuse or safe discharge of ceramic wastewater without harming the environment and makes important contributions to sustainable water management.

Keywords: Ceramic industry, nanofiltration, NF90 membrane, cross-flow system

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında bana rehberlik eden ve destek veren başta değerli danışmanım Prof. Dr. Duygu Kavak'a, tezime katkıda bulunan arkadaşlarıma ve aileme, her zaman yanımda olan yakınlarıma en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmada emeği geçen herkese gösterdikleri yardım ve destek ile bu sürecin daha anlamlı ve verimli hale gelmesini sağladıkları için minnettarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET vii

SUMMARY viii

TEŞEKKÜR ix

İÇİNDEKİLER x

ŞEKİLLER DİZİNİ xii

ÇİZELGELER DİZİNİ xiii

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xiv

1. GİRİŞ VE AMAÇ 1

2. SERAMİK ENDÜSTRİSİ VE ATIKSU MEMBRAN TEKNOLOJİLERİ 3

2.1. Seramik Endüstrisi 3

2.1.1. Türkiye'de Seramik Endüstrisi 5

2.1.2. Seramik Endüstrisi Atık Suyu 6

2.2. Atıksu Arıtma 7

2.3. Membran Prosesler 8

2.3.1. Membran Yapısı 10

2.3.2. Membran Tipleri 10

2.3.2.1. İtici güce göre membran sınıflandırılması 10

2.3.2.2. Gözenek boyutuna göre membran sınıflandırılması 11

2.3.2.3. Akım türüne göre membran sınıflandırılması 11

2.4. Mikrofiltrasyon 12

2.6. Ters Ozmos 13

2.7. Nanofiltrasyon 13

2.8. Membran Basıncını Etkileyen Parametreler 15

2.8.1 Basınç 15

2.8.2 Sıcaklık 15

2.8.3 Konsantrasyon 15

2.8.4 Membran diziliş yoğunluğu 16

2.8.5 Akı 16
2.8.6 Geri kazanım faktörü 16
2.8.7 Membran ömrü 16
2.8.8 pH 17
2.8.9 Ön arıtma 17
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 18
4. MATERYAL VE YÖNTEM 20
4.1. Deneyin Yapılışı 21
4.2. Kullanılan Cihazlar 22
4.3. Uygulanan Analitik Yöntemler 23
5. BULGULAR VE TARTIŞMA 25
5.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Membran 25
5.2. Deneysel Çalışmada Kullanılan Ham Atıksu 26
5.3. Akı Hesaplanması 26
5.4. Renk, Bulanıklık, AKM ve KOİ Giderim Verimi Hesaplanması 27
5.5. Atık Su İçin Deneysel Sonuçlar 27
5.5.1. Akı Değerleri 27
5.5.2. Renk ve Askıda Katı Madde (AKM) Giderim Verimi 30
5.5.3. KOİ ve Bulanıklık Giderimi, İletkenlik ve pH Değerleri 35
5.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi 38
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 41
KAYNAKLAR DİZİNİ 43

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

1.1. NF (Nanofiltrasyon) tekniğinin çeşitli uygulama alanları…..……...2

1.2. Seramik üretiminde yaşam döngüsü ……4

1.3. Seramik üretimi proses akış şeması ……..6

2.1. Atık su arıtma endüstrilerinde kullanılan çeşitli membran kategorilerini temsil eden şematik diyagram……..9

2.2 Gözenek boyutuna göre membran çeşitleri……...11

2.3 Çapraz (A) ve dikey (B) akışlı filtrasyon…….12

2.4 Nanofiltrasyon……...14

4.1 Çapraz akışlı membran sistemi görüntüsü…….21

5.1. Seramik atık suyu için 25^{o}C'de 4,6 ve 8 bar basınçlardaki akı değerleri…….28

5.2. Seramik atık suyu için 30^{o}C'de 4,6 ve 8 bar basınçlardaki akı değerleri…….29

5.3. Seramik atık suyu için 35^{o}C'de 4, 6 ve 8 bar basınçlardaki akı değerleri…….....29

5.4. Seramik atık suyu için 25˚C'de 4, 6, ve 8 bar için renk giderim verimleri……...31

5.5. Seramik atık suyu için 30˚C'de 4, 6, ve 8 bar için renk giderim verimleri……...31

5.6. Seramik atık suyu için 35˚C'de 4, 6, ve 8 bar için renk giderim verimleri…….....32

5.7. Seramik atık suyu için 25˚C'de 4, 6, ve 8 bar için AKM giderim verimleri…….....33

5.8. Seramik atık suyu için 30˚C'de 4, 6, ve 8 bar için AKM giderim verimleri…….....33

5.9. Seramik atık suyu için 35˚C'de 4, 6, ve 8 bar için AKM giderim verimleri…….34

5.10. Seramik atık suyu için bulanıklık giderim verimleri……...36

5.11. Seramik atık suyu için KOİ giderim verimleri…….....37

5.12. NF90 temiz membranın a) 10 µm ve b) 5 µm SEM görüntüleri…….....38

5.13a. Kirlenmiş membranın 1 µm,3 µm, 10 µm, 20 µm SEM görüntüleri…….....39

5.13b. Kirlenmiş membran 100 µm SEM görüntüsü……....40

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge **Sayfa**

1.1. Seramik üretim sürecine göre enerji ve hammadde tüketimi…….....3

2.1. SKKY'e göre atık su deşarj limitleri……...7

4.1. Deney Parametreleri…… ….20

4.2. Analizler ve ölçümler için kullanılan cihazlar……...23

5.1. Seramik Atık Suyunun Ölçülen Parametreleri…….....26

5.2. Seramik atık suyu için 25^{o}C'de 4,6 ve 8 bar basınçlardaki akı değerleri……..28

5.3. Seramik atık suyu için 30^{o}C'de 4,6 ve 8 bar basınçlardaki akı değerleri…….....28

5.4. Seramik atık suyu için 35^{o}C'de 4,6 ve 8 bar basınçlardaki akı değerleri…….....29

5.5. 25^{o}C'de renk giderim verimleri (%)……..30

5.6. 30^{o}C'de renk giderim verimleri (%)…….....31

5.7. 35^{o}C'de renk giderim verimleri (%)…….....32

5.8. 25^{o}C'de Askıda katı madde giderim verimleri (%)……...32

5.9. 30^{o}C'de Askıda katı madde giderim verimleri (%)……...33

5.10. 35^{o}C'de Askıda katı madde giderim verimleri (%)…….34

5.11. 25˚C'de KOİ ve bulanıklık değerleri……...35

5.12. 30˚C'de KOİ ve bulanıklık değerleri…….…….....35

5.13. 35˚C'de KOİ ve bulanıklık değerleri…….…….....35

5.14. İletkenlik ve pH ölçüm verileri……...37

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
C	Konsantrasyon
P	Basınç
pH	Çözeltideki hidrojen iyonu konsantrasyonunun (-) logaritması
T	Sıcaklık
J_V	Membrandan geçen akı miktarı
V	Hacim
t	Zaman
Q	Membrandan geçen akış miktarı
Y	Membran yüzey alanı
Ax	Beslemenin x değeri
A	Süzüntüdeki x değeri
R	Giderim verimi
Kısaltmalar	**Açıklama**
AKM	Askıda Katı Miktarı
dk	Dakika
MWCO	Moleküler ağırlık kesme sınırı
UF	Ultrafiltrasyon
MF	Mikrofiltrasyon
NF	Nanofiltrasyon
TO	Ters Osmoz
pH	Asitlik-baziklik değeri
SKKY	Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği
TKM	Toplam Katı Madde
TDS	Toplam çözünmüş katı
KOİ	Kimyasal Oksijen İhtiyacı
BOİ	Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı
rp	Gözenek yarıçapı
COD	Chemical Oxygen Demand
BOD	Biochemical Oxygen Deman

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Temiz suya olan talebin artışı ve su kıtlığı, ağır metal iyonlarıyla kirlenmiş suyun yükselmesiyle daha da kötüleşen ekosistemi ve insan yaşamını tehdit etmektedir (Wanjiya vd., 2024). Ekosistemin devamlılığı ve hayatta kalması suya büyük ölçüde bağlıdır, bu da suyun kritik rolünü vurgular (Shahid vd., 2024). Dünyada yaklaşık 7 milyar insanın %15'inin temiz suya erişiminin olmaması nedeniyle sağlıklı bir yaşam sürmesi çok zordur (Sheikh vd., 2020; Ağtaş vd., 2021). Sürekli artan insan nüfusu, temiz su talebinin hızla artmasına neden olmuş ve su talebi ile arzı arasındaki fark giderek büyümektedir (Hakami vd., 2020).

Endüstrilerde su tüketimi yoğun olduğundan su geri kazanım ve yeniden kullanım uygulamaları, atık suyun alıcı su kaynaklarına deşarjının ve atık suyun içerdiği kirletici miktarının azaltılmasına önemli ölçüde katkı sağlayacaktır (Ağtaş vd., 2021). Sudan ağır metaller, mikroplastikler, antibiyotikler ve virüsler gibi tehlikeli kirleticilerin giderilmesi büyük bir aciliyet taşımaktadır ve bu durum bilimsel açıdan büyük ilgi çekmektedir (Chen vd., 2022).

Tuğla, kil ve kum üretimi seramik endüstrisi için hammadde olarak mühendislik alanında belirli bir ölçüde katkıda bulunmuştur. Özellikle atık su kullanımında büyük bir geri dönüşüm işlevi vardır; nihai ürünün oluşumu sırasında maliyet azaltılmıştır ve atıkların işlenmesi nedeniyle çevresel olarak güvenlidir. Ancak, seramik endüstrisinin de ağır metaller içeren önemli miktarda atık su ürettiği belirtilmelidir (Elias vd., 2014).

Nanofiltrasyon (NF) membranları kullanılarak su arıtımı, yeraltı suyu, yüzey suyu, deniz suyu ve atık su gibi kirli kaynaklardan temiz su üretmek için güçlü bir ayırma teknolojisidir. NF membranlarının gözenek boyutu 0.5–2 nm arasında olup, 200–1000 Dalton (Da) moleküler ağırlık kesme sınırına (MWCO) karşılık gelir. Küçük gözenek boyutları nedeniyle, küçük organik bileşikleri giderme yeteneği, ultrafiltrasyon ve mikrofiltrasyon gibi yaygın olarak kullanılan kaba membranlara kıyasla daha iyidir. Ozon

ve biyolojik olarak aktif karbon gibi ileri su arıtma yöntemlerinden daha yüksek organik madde giderimi sağlayabilir ve bu yöntemler yüksek kaliteli su sağlar (Boivin ve Fujioka, 2024).



Şekil 1.1. NF (Nanofiltrasyon) tekniğinin çeşitli uygulama alanları (Guo vd., 2022).

Dolar vd., NF membranlarının daha büyük gözenek boyutuna, sıkı ağ gözeneklerinin tıkanmasına ve kirlenme sırasında bu gözeneklerin kaybolmasını gözlemleyerek performanslarının kötüleştiğini gözlemlediler (Dolar vd., 2011; Khanzada vd., 2020). Membran kirlenmesi ve biyokirlenme, yüksek akış hızlarıyla başa çıkamama, süreç karmaşıklığı, ön arıtma, periyodik membran temizliği ve konsantre atıkların yüksek bertaraf maliyeti gibi bazı eksikliklerin olduğu bilinmektedir (Collivignarolli vd., 2019).

İşletme maliyeti, membran tıkanması ve uzun vadeli stabilite de dikkate alınarak NF'nin içme suyu üretimindeki kapasitesi kapsamlı bir şekilde değerlendirilmelidir (Guo vd., 2022). Membran uygulamalarının maliyetlerinin düşmesi nedeniyle, gelecekte membran filtrasyonunun giderek daha önemli bir rol oynaması beklenmektedir (Vrouwenvelder vd., 2006).

2. SERAMİK ENDÜSTRİSİ VE ATIKSU MEMBRAN TEKNOLOJİLERİ

2.1. Seramik Endüstrisi

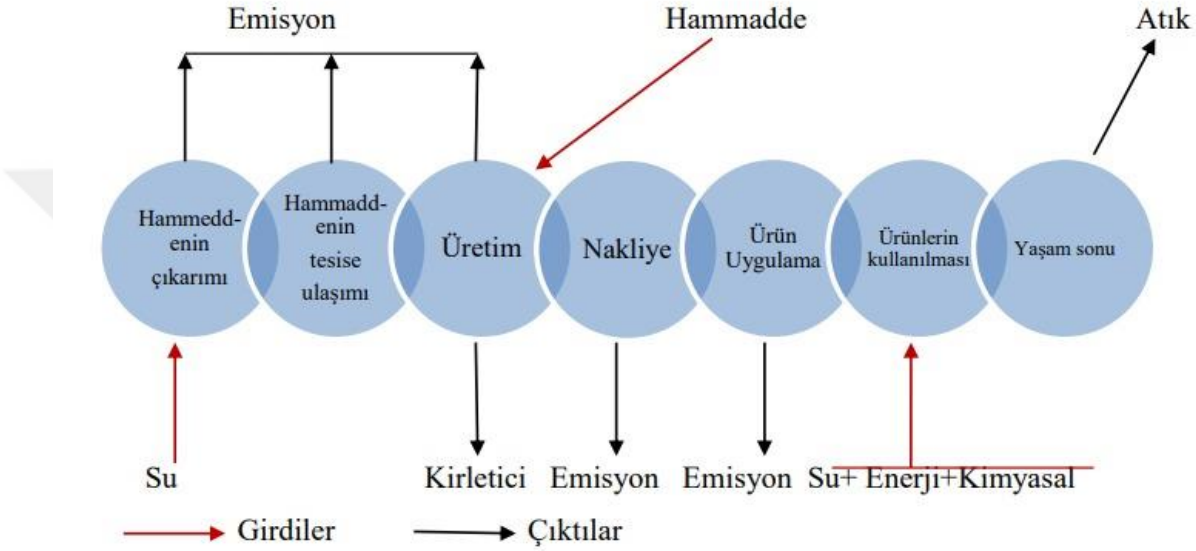
Seramik endüstrisi, üretim, tüketim ve ticaret hacmi bakımından dünyada hızlı büyüyen ve stratejik öneme sahip bir endüstridir. Dünya seramik karo üretiminde Çin, hem en büyük üretici hem de ihracatçı konumunda yer almakta ve küresel üretimin önemli bir kısmını karşılamaktadır. Hindistan, İspanya ve İtalya gibi ülkeler de seramik sektöründe öne çıkan diğer lider üreticilerdir. 2022 yılı verilerine göre, dünya seramik karo ihracatında Avrupa Birliği'nin %76,2'lik payla en büyük ihracat bölgesi olması dikkat çekmektedir. Bunun yanı sıra, ABD (Amerika Birleşik Devletleri), seramik karo ithalatında lider konumdadır. Türkiye de bu bağlamda küresel seramik sektöründe önemli bir ihracatçı olup, özellikle Avrupa, Orta Doğu ve Türk Cumhuriyetlerine yönelik pazarlarda rekabetçi bir konuma sahiptir (Çakır, 2024).

Seramik sektörü, teknolojik yenilikler ve sürdürülebilirlik uygulamalarıyla geleceğin endüstriyel ekosisteminde önemli bir rol oynamaktadır. Enerji verimliliği, döngüsel ekonomi ve çevresel sürdürülebilirlik hedefleri, sektörün hem ekonomik hem de çevresel etkilerini optimize etmeyi amaçlamaktadır (Çelik Saydam, 2025).
Seramik üretiminde enerji ve hammadde kullanımı sürece göre değişiklik göstermektedir.

Çizelge 1.1. Seramik üretim sürecine göre enerji ve hammadde tüketimi (Ibanez-fores vd., 2011; Ganesh, 2019)

Girdiler	Kil hazırlama	Presleme	Kurutma	Sırlama	Pişirme	Paketleme ve paletleme	Depolama	Diğer faaliyetler	Toplam
Elektrik (kWh/m²)	0,12	0,48	0,12	0,33	0,41	0,07	0,08	0,33	1,94
Doğal gaz (kWh/m²)	0	0	6,7	0	14	0	0	0	20,66
Su (lt/m²)	0,76	0,07	0	4,29	0	0	0,74	0	5,86
Kil ve kum (kg/m²)	21,9	0	0	0	0	0	0	0	21,9
Seramik sırlama (kg/m²)	0	0	0	0,95	0	0	0	0	0,95
Makine yağı (kg/m²)	0	0,0004	0	0	0	0,0004	0,0004	0	0,0012

Seramik ürünlerin üretimi, hammaddeler, teknolojik süreçler, insan kaynağı ve ekonomik yatırımların karmaşık bir etkileşimidir. Bu süreç; hammaddelerin, yardımcı malzemelerin ve katkı maddelerinin taşınmasını ve depolanmasını, hammadde hazırlığını, şekillendirmeyi, kurutmayı, yüzey işlemlerini, pişirmeyi ve ardından gelen işlemleri kapsar (Barata vd., 2019). Seramik üretimin yaşam döngüsü Şekil 1.2'de verilmiştir.



Şekil 1.2. Seramik üretiminde yaşam döngüsü (Cineviz, 2024).

Seramik endüstrisi, sağlık gereçleri, ev eşyaları, kiremitler ve diğer seramik ürünler dahil olmak üzere çeşitli ürünler üretmektedir. Bu endüstrinin rolü; iç ihtiyaçları karşılamak, devlet gelirini artırmak ve iş gücünü istihdam etmek açısından oldukça önemlidir. Seramik endüstrisi, kil gibi ham maddeleri yüksek ekonomik değere sahip seramik ürünlere dönüştüren bir işleme sektörüdür (Pristyanto,2024).

Seramik sektörü, düşük ithalat bağımlılığı ve yüksek ihracat kabiliyeti sayesinde Türkiye'nin en stratejik sanayi kollarından biridir. Yerli kaynaklarla katma değerli üretim yaparak ülke ekonomisine ciddi döviz girdisi sağlamaktadır (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2020).

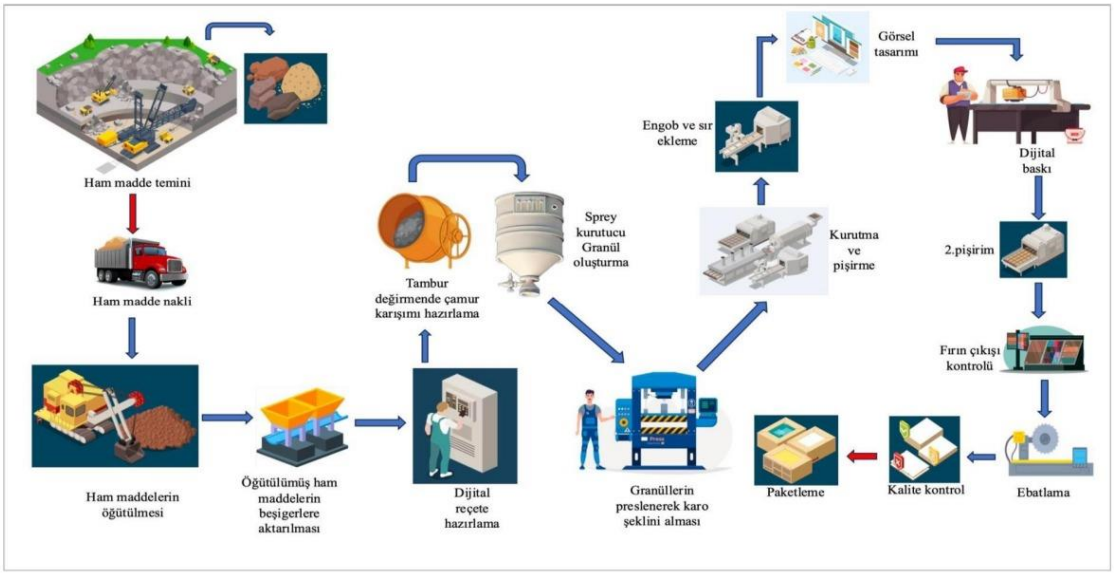
Seramik atıklarının hem endüstriyel hem de inşaat kaynaklı olmak üzere iki ana kaynağa sahip olduğunu vurgulamaktadır. Günlük seramik üretiminin yaklaşık %30'unun geri dönüştürülemeyen atıklarla sonuçlandığı bilinmektedir (Alenezi, 2016).

2.1.1. Türkiye’de Seramik Endüstrisi

Türkiye'nin sanayileşme tarihinde köklü bir geçmişe sahip olan seramik sektörü, dinamik yapısı sayesinde ürün geliştirme ve çeşitlendirme faaliyetlerini sürekli kılmaktadır. 1950’li yıllarda endüstriyel boyutta temelleri atılan sektör, özellikle 1980 sonrası dönemde ivme kazanarak küresel ölçekteki modern üretim teknolojilerini ve ileri seviye hatları bünyesine entegre etmeyi başarmıştır (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2022; Yeşiltepe ve Bulut, 2025).

Türkiye’nin bu sektördeki konumu ve geliştirdiği stratejik hedefler, sektörü yalnızca ulusal düzeyde değil, uluslararası ölçekte de güçlü bir konuma taşımaktadır. Bu bağlamda, seramik sektörü hem tarihsel köklerini koruyan hem de modern dünyanın çevresel ve ekonomik taleplerine yanıt veren bir yapıya sahiptir (Çelik Saydam, 2025).

Türkiye, seramik sektöründe dünya genelinde önemli konumdadır. Seramik kaplama malzemeleri ve sağlık gereçleri, Türkiye’nin bu alandaki temel ürün gruplarıdır. Ülkemiz, yüksek üretim kapasitesi, kalite standartlarına uyum ve yenilikçi teknoloji yatırımlarıyla uluslararası pazarda güçlü bir rekabet avantajı sağlamaktadır. Onuncu Kalkınma Planı kapsamında belirlenen hedefler, sektördeki büyüme ve sürdürülebilirlik stratejilerini desteklemektedir. Ayrıca, yerel ve uluslararası iş birlikleri, sektörün daha geniş pazarlara erişimini kolaylaştırmaktadır (Çelik Saydam, 2025).



Şekil 1.3. Seramik üretimi proses akış şeması (Çelik Saydam, 2025)

2.1.2. Seramik Endüstrisi Atık Suyu

Seramik endüstrisinin de ağır metaller içeren önemli miktarda atık su ürettiği belirtilmelidir. Bor, fayansların mekanik dayanımının geliştirilmesi sırasında seramik endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Genel olarak, seramik malzeme, organik içerik ile birlikte inorganik ve metalik olmayan bileşikler olarak tanımlanır (Elias vd., 2014).

Seramik üretiminde kullanılan çeşitli kil grupları ve minerallerden kaynaklanan organik safsızlıklar; atıksuyun BOİ, KOİ ve AKM değerlerini yükseltmektedir. Ayrıca üretim süreci, suya kurşun ve kadmiyum gibi ağır metallerin geçmesine neden olarak kirlilik yükünü artırmaktadır (Gülmez vd., t.y.). Bu kirletici maddelere karşı seramik sektörü için deşarj standartları belirlenmiştir.

Sektörde uyulması gereken deşarj standartları 25687 sayılı 31.12.2004 tarihli resmi gazete yayınlanan “Su Kalitesi Kontrolü Yönetmeliği” (SKKY) ile belirlenmiştir. İlgili yönetmeliğin standart değerleri Çizelge 2.1’te verilmiştir.

Çizelge 2.1. SKKY'e göre atık su deşarj limitleri

PARAMETRE	BİRİM	DEĞER
KİMYASAL OKSİJEN İHTİYACI (KOİ)	(mg/L)	70
ASKIDA KATI MADDE (AKM)	(mg/L)	100
KURŞUN (Pb)	(mg/L)	1
KADMİYUM (Cd)	(mg/L)	0.1
ÇİNKO (Zn)	(mg/L)	3
pH	-	6-9

Su yönetimi, ürettikleri büyük miktarda atık su nedeniyle çoğu geleneksel endüstri sektöründe giderek daha kritik bir sorun haline gelmiştir. Seramik karo endüstrisi söz konusu olduğunda, atık suyun çoğu sırların ve diğer kaplamaların hazırlanması ve uygulanması için kullanılan tesislerin yıkama işlemlerinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, sır ve diğer kaplamaların hazırlanması için önemli miktarda yeraltı suyu kullanılmaktadır. Ancak, yeraltı suyu kaynağı giderek daha sınırlı hale geldikçe, seramik endüstrisi yeraltı suyu tüketimini azaltmak için çözümler bulmak zorundadır. Bir olasılık, örneğin, sır işlemlerinde geri dönüştürülmüş su kullanmaktır. Atık su arıtımı, bu suyun aynı üretim sürecinde yeniden kullanılmasını imkansız hale getirmekte ve hatta suyun deşarjını engelleyebilmektedir. Sonuç olarak, bu suyun dışarıda işlenmesi veya ek bir arıtma gereklidir, bu da yüksek ekonomik maliyetler ve/veya çevresel etki yaratmaktadır (Moliner Deratani vd., 2012).

2.2. Atıksu Arıtma

Endüstriyel atık suyun özellikleri genellikle COD, BOD, AKM, amonyum azotu (NH_4^+-N), ağır metaller, pH, renk, bulanıklık ve biyolojik parametreler gibi belirli parametrelerle temsil edilir. Membran yöntemleri, belediye atık sularının arıtılmasında yaygın olarak kullanılmakta olup, arıtılmış su ve atık su deşarj maliyetlerini artırmaktadır. Bu teknik, geri kazanılmış malzemelerin, yan ürünlerin ve çözücülerin doğrudan geri kazanılmasına yardımcı olur ve büyük, yüksek kirlenmiş atık su akışlarının önlenmesine katkıda bulunur (Bera vd., 2022). Atıksu arıtımı için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Atıksu arıtım yöntemleri arasında fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma yöntemleri ile ileri arıtma teknolojileri yer alır ve son aşama olarak dezenfeksiyon işlemi yapılır.

Fiziksel ve kimyasal yöntemler; koagülasyon-flokülasyon, adsorpsiyon, iyon değişimi ve membran prosesler olarak sıralanmaktadır. En sık kullanılan adsorpsiyon

yöntemidir (Durur, 2023). Adsorpsiyon, ekzotermik bir süreç olup yüzeyde meydana gelen bir olgudur. Bu süreç, adsorbat adı verilen bir fazın belirli koşullar altında adsorban adı verilen bir katı, nadiren de sıvı yüzeye fizikokimyasal veya kimyasal etkileşimler yoluyla transfer edilmesini ve bu yüzeyde tek moleküllü bir tabaka oluşturmasıyla arıtma işlemi gerçekleşir (Jain vd., 2021). Kimyasal Çöktürme, sadece basit araçlar bir öncü ve ucuz bir çözücü olarak su gerektirdiği için tercih edilir (Nahar vd., 2023).

Biyolojik Arıtma, atık sudaki toksinleri parçalamak veya ortadan kaldırmak için canlı mikropları kullanarak, endüstriyel faaliyetlerin olumsuz çevresel sonuçlarına uzun vadeli bir çözüm sunar (Chandran vd., 2023).

İleri Arıtma yöntemleri, ters osmoz, membran prosesleri, iyon değiştirme, aktif karbon filtrasyonu, ultrafiltrasyon ve ileri oksidasyon yöntemleridir. İyon Değişimi, negatif veya pozitif yüklü katı inorganik oksitler ya da organik iyon değişim reçineleri kullanarak çözeltiden iyonların ayrılması işlemidir (El Ouardi vd., 2023). İleri Oksidasyon Prosesleri (AOPs), yüksek derecede kirlenmiş, toksik, tehlikeli, dirençli ve biyolojik olarak parçalanamayan organik kirleticilerin sulu çözeltilerde arıtılması için en etkili yöntemdir ve su ve atık su arıtımında önemli bir yer kazanmıştır (Honarmandrad vd., 2023).

Dezenfeksiyon, atıksu arıtımının son aşamalarından biridir. Bunlar: Klorlama, Klor kullanarak mikroorganizmaların öldürülmekte etkilidir. UV Işınlama, patojenik mikroorganizmaların giderilmesinde etkilidir (Høibye vd., 2008). Ozonlama, endüstriyel atık sulardaki tehlikeli bileşenleri gidermek için kullanılmaktadır. Ozonlama ağır metallerin giderilmesinde etkili değildir (Huber vd., 2004).

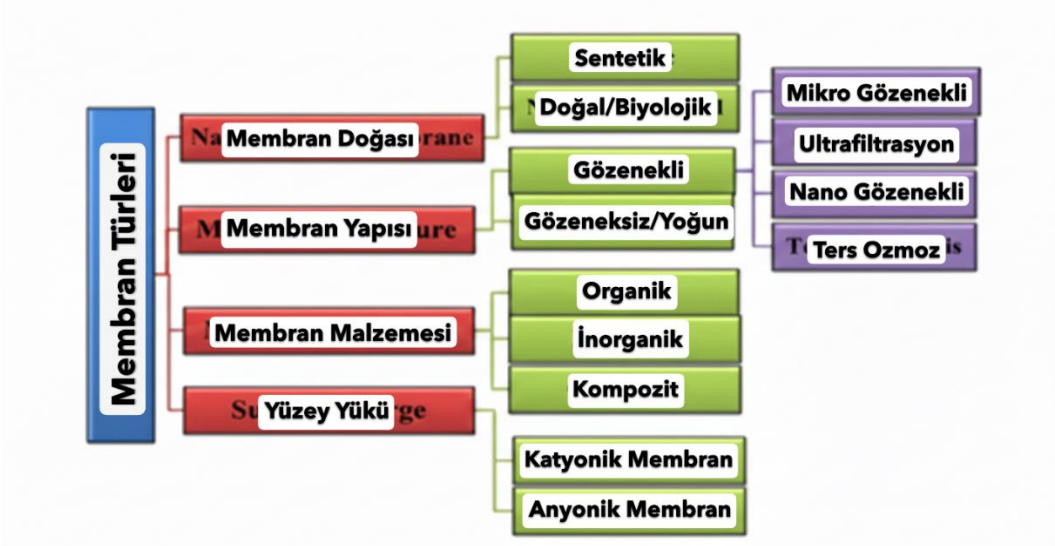
2.3. Membran Prosesler

Membran malzemeleri kullanarak suyun arıtılması, 60'lı yıllarda sentetik membranların sunduğu iyi performanslar nedeniyle önemli hale gelmeye başladı. Membran ayırma süreci şu avantajlara sahiptir: maliyet açısından verimli, çevre dostu ve temiz bir teknoloji, çünkü ek kimyasallara ihtiyaç duyulmaz, işletmesi kolaydır ve bileşim değişkenliğine karşı çok hassas değildir, yüksek kaliteli su üretimini sağlar. Bununla birlikte, son yıllarda membran arıtımı atık su arıtımında uygulanmaya başlamıştır. Membran

teknolojisinin yeni uygulamalara geliştirilmesi, membranların hazırlanması alanında sayısız ilerlemenin sonucu olmuştur (Moliner Salvador, 2012).

Yüksek membran performansı, akı ve giderme verimi parametreleriyle ölçülür. İdeal bir sistemde yüksek geçirgenlik (akı) ve seçicilik hedeflenir. Akı, birim zamanda birim membran alanından geçen hacmi L/m2.h ifade ederken; giderme verimi, membranın kirleticiyi tutma (reddetme) kapasitesini temsil eder (Uçak, 2023).

Membran yöntemi, temel olarak bileşenlerin hareketini seçici bir şekilde kısıtlayarak iki fazı birbirinden ayıran bir bariyerdir. Membranlar 18. yüzyıldan beri varlık göstermektedir. O zamandan beri, membranların birçok farklı uygulamaya daha uygun hale gelmesi için pek çok iyileştirme yapılmıştır (Obotey Ezugbe ve Rathilal, 2020). Membran proseslerde kullanılan membranlar ayırma mekanizmalarına, morfolojilerine, geometrilerine ve kimyasal yapılarına göre sınıflandırılırlar (Sert, 2015). Şekil 2'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Atık su arıtma endüstrilerinde kullanılan çeşitli membran kategorilerini temsil eden şematik diyagram (Bera vd., 2022).

2.3.1. Membran Yapısı

Membran, iki fazı birbirinden ayıran ve bileşenlerin üzerinden seçici bir şekilde hareketini kısıtlayan bir bariyerdir

Membranlar, su geçirgen membranlar veya solüt geçirgen membranlar olarak iki kategoriye ayrılabilir. Su geçirgen membranlar, çeşitli solütler (örneğin, tuz iyonları ve organik moleküller) üzerinde suyun taşınmasını destekler ve içme suyu arıtma, atık su geri kazanımı ve deniz suyu tuzdan arındırma gibi istenmeyen kirleticilerin giderilmesinde yaygın olarak kullanılır (Zuo vd., 2021).

2.3.2. Membran Tipleri

Kullanılan membran tipine göre, membran proseslerin gösterecekleri performansları önemli ölçüde değişmektedir (Sert, 2015).

2.3.2.1. İtici güce göre membran sınıflandırılması

Seçici bir bariyer işlevi gören membranlar, bileşenlerin fiziksel veya kimyasal özelliklerine göre geçişine izin verir ya da bu bileşenleri tutar. Suyun membrandan geçebilmesi için gereken itici güç genellikle basınçtır. Basınç esaslı çalışan membran proseslerdir. Bu prosesler;

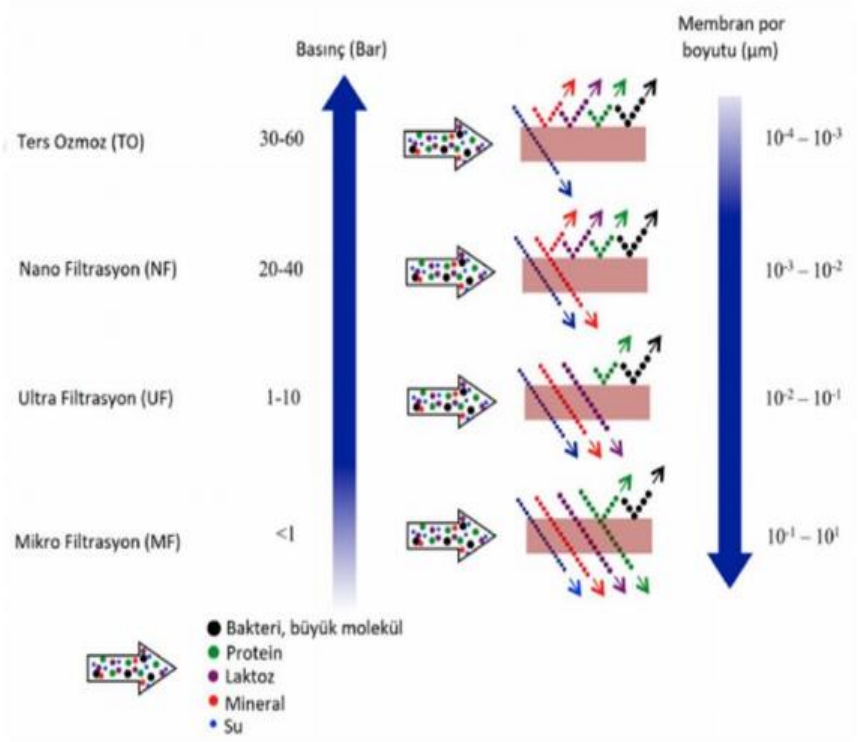
•Mikrofiltrasyon (MF)

•Ultrafiltrasyon (UF)

•Nanofiltrasyon (NF)

•Ters Ozmos (TO)'dur (Sert, 2015).

2.3.2.2. Gözenek boyutuna göre membran sınıflandırılması

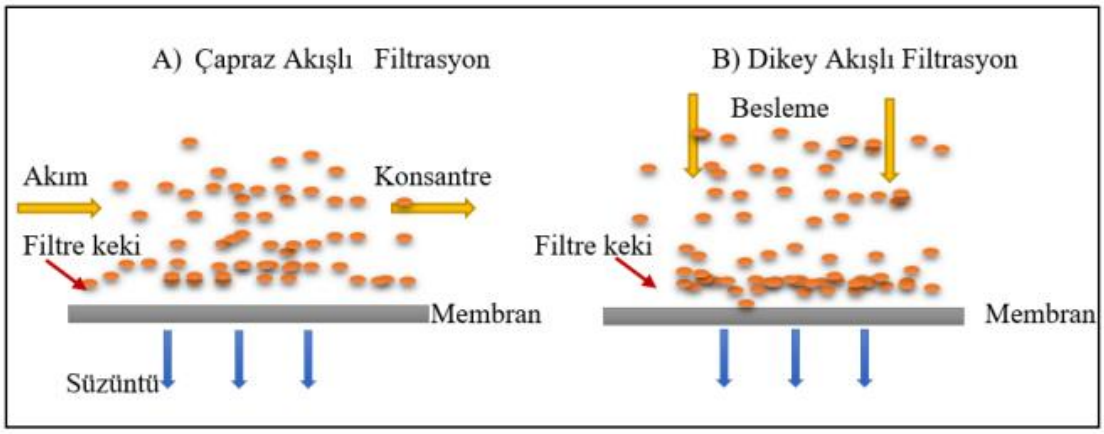


Şekil 2.2. Gözenek Boyutuna Göre Membran Çeşitleri (Gül ve Tiyek, 2022)

Membran gözenek yarıçapı boyutuna (rp) bağlı olarak membran süreçlerinde aşağıdaki sınıflandırma ortaya çıkabilir: mikrofiltrasyon, ultrafiltrasyon, nanofiltrasyon ve ters ozmoz.

2.3.2.3. Akım türüne göre membran sınıflandırılması

Membran proseslerinde; besleme suyunun niteliğine ve işletme şartlarına göre belirlenen iki temel filtrasyon modu mevcuttur. Çapraz akışlı ve dikey akışlı olarak sınıflandırılan bu konfigürasyonlar, Şekil 2.3'te şematik olarak gösterilmiştir (Ormancı Acar,2017).



Şekil 2.3. Çapraz (A) ve dikey (B) akışlı filtrasyon (Ormancı Acar, 2017; Munir, 2006)

Membran filtrasyon uygulamalarında ciddi bir sorun, membran tıkanmasıdır; bu durum, normalize edilmiş basınç düşüşünde bir artışa ve/veya normalize edilmiş akışta bir azalmaya neden olmaktadır (Vrouwenvelder vd., 2006). Çapraz akış filtrasyon modunda çalışmak, membran üzerinde daha az kek tabakası oluşumuna neden olarak membranın tıkanma olasılığını azaltır. Yüksek havalandırma oranları, membran tıkanma oranlarını düşürür. Düşük sıcaklıklar, membran tıkanmasını artırma potansiyelini artırır, ancak daha iyi membran verimliliği ve daha uzun çalışma süresi sağlar (Bera vd., 2022).

2.4. Mikrofiltrasyon

Membran teknolojilerinin en eski yöntemi olan mikrofiltrasyon (MF), 0.1-2 mikron büyüklüğündeki partiküllerin tutulmasında kullanılır. Bu proses; askıda katı maddeler, büyük kolloidler, bakteri ve yağ gibi gözenek çapından büyük bileşenleri sudan uzaklaştırır. Genellikle çapraz akış prensibiyle çalışan MF sistemlerinde karşılaşılan temel sorun, hızlı tıkanma neticesinde meydana gelen akı kaybı ve buna bağlı yüksek işletme maliyetleridir (Akbacak, 2018; Çelik, 2022).

2.5. Ultrafiltrasyon

Ultrafiltrasyon (UF) membranları, gözenek boyutu 1-100 nm aralığında olan, 1-10 bar basınç aralığında moleküler ağırlıkları 1000 Da'dan büyük partiküllerin sudan ayrıştırılmasında kullanılan membran prosesidir (Tang vd., 2011).

2.6. Ters Ozmos

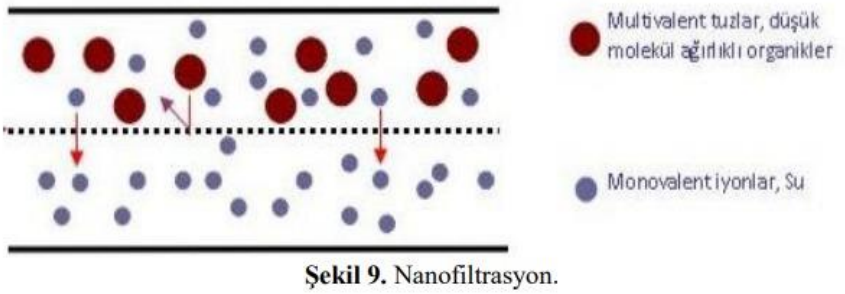
Ters ozmos (TO) membranları, önceden tanımlanmış gözenekleri olmayan yoğun bir bariyerden oluşur. Taşınım mekanizması bu nedenle tamamen farklıdır ve bir çözüm-difüzyon mekanizmasına göre gerçekleştiği düşünülmektedir. Bu durumda geçirgenlik, yukarıda belirtilen membranlardan çok daha düşüktür. Öte yandan, besleme çözeltisinde bulunan yüklü çözücülerin reddi neredeyse tamamen olur. TO genellikle besleme çözeltisinin ozmotik basıncına bağlı olarak yüksek basınçlar (120 bara kadar) gerektirir ve bu teknik oldukça enerji tüketicidir (Lefebvre vd., 2003).

2.7. Nanofiltrasyon

Nanofiltrasyon alanı, su arıtımı ve temizliği konusundaki potansiyel uygulamaları nedeniyle son yıllarda önemli bir ilgi görmüştür.

Membran teknolojisi, ileri bir su arıtma yöntemidir. Membran süreçleri kullanılarak kirli sulardan iyonların ve moleküllerin seçici olarak uzaklaştırılabileceği gösterilmiştir. İstenilen ayrışmayı sağlamak için uygun membranın seçimi, arıtılacak suyun besleme bileşimi ve ulaşılacak arıtma hedefi tarafından belirlenir. Son zamanlarda geliştirilmiş olan nanofiltrasyon (NF), diğer membran süreçleri ile karşılaştırıldığında önemli avantajlar sunmaktadır. NF süreci, çok değerlikli iyonların ve nispeten küçük organik bileşiklerin neredeyse tamamen uzaklaştırılmasını ve membrana ve çalışma koşullarına bağlı olarak tek değerlikli iyonların iyi bir şekilde reddedilmesini sağlar ve ters ozmozdan (TO) daha düşük çalışma basıncı gerektirir (Deratani, 2012). Belirli su koşullarında nanofiltrasyonun, yaygın olarak kullanılan ters ozmoz işlemlerine rekabetçi bir alternatif olabileceğini öngörülmüştür (Mountadar vd., 2017).

Nanofiltrasyon (NF) membranları, 1-10 nm gözenek yapısına sahip nanofiltrasyon; suyun yumuşatılması, ağır metal ve organik boya gideriminde kullanılan etkili bir yöntemdir. Çok değerlikli iyonları ve UF'nin tutamadığı mikro kirleticileri yüksek verimle arıtabilen NF, ultrafiltrasyon ve ters ozmoz arasında bir performans sergiler (Akbacak, 2018; Çelik, 2022). Renk, atıksuyun en belirgin özelliğidir. Dezenfeksiyon sırasında, ana analiz nesnesi, atıksudan renk kaybıdır (Hao vd., 2000; Kumar, vd., 2021).



Şekil 9. Nanofiltrasyon.

Şekil 2.4 Nanofiltrasyon (Çelik, 2022)

Doğal organik madde kirlenmesinde kimyasal ve fiziksel etkileşimlerin kritik düzeyde birbirine bağlı olduğunu ve bunun membran performansı açısından önemli zorluklar oluşturduğunu gözlemlenmiştir. Bu durumun kirlenme kontrol stratejileri üzerindeki etkileri, nanofiltrasyon sistemlerinin etkinliğini artırmak açısından büyük önem taşımaktadır (Payant, 2016).

Nanofiltrasyon membranlarının ayırma kabiliyetlerini artırmak için membran kirlenmesiyle başa çıkma stratejileri içme suyu üretiminde güvenilir performans sağlamanın yollarını için önemlidir (Guo vd., 2021).

Su arıtımı için nano yapılı membranlardaki kirlenme ve seçicilikten kaynaklanan zorluklar dezatavantajdır. Grafen bazlı malzemeler de dahil olmak üzere nanoyapılı membranların su arıtımında iyileştirilmiş performans için umut vericidir, bu teknolojilerin pratikte uygulanabilmesi için dünya koşullarının dikkatlice değerlendirilmesi ve standartlaştırma çabalarının gerektiğini bilinmelidir (Aydın vd., 2024). Membran performansını artırma, kirlenme sorunlarını çözme ve nanofiltrasyonun su arıtımı ve saflaştırmadaki uygulama alanlarını genişletmek için araştırmalar devam etmektedir.

2.8. Membran Basıncını Etkileyen Parametreler

2.8.1 Basınç

Membran proseslerinde akı, uygulanan basınç ile ozmotik basınç arasındaki farka bağlı olarak artış gösterir. Ters ozmoz sistemlerinde basınç ve akı arasında doğru orantılı bir ilişki bulunsa da membran mukavemeti nedeniyle bu basınç sınırlıdır. Artan işletme basıncı, akıyı artırmanın yanı sıra süzüntü suyunun konsantrasyonunu da düşürerek arıtma verimini iyileştirir. Teorik olarak 68 atm seviyelerine çıkılabilse de uygulamada genellikle 27-41 atm aralığında çalışılmaktadır. (Kayacan B., 2010).

2.8.2 Sıcaklık

Sıcaklık, membran geçirgenlik katsayısını ve ozmotik basıncı etkileyen temel parametrelerden biridir. Sıcaklıktaki her 1°C'lik artış, akı değerinde %3 ile %5 oranında bir yükselme sağlamaktadır. İdeal işletme sıcaklığı genellikle 21°C olarak kabul edilse de 29°C'ye kadar olan değerler tolere edilebilir. Ancak 29-38°C aralığındaki yüksek sıcaklıklar, membran yapısında deformasyona yol açarak sistemin servis ömrünü ciddi şekilde kısaltmaktadır (Dhodapkar vd., 2007).

2.8.3 Konsantrasyon

Membrana giren suyun konsantrasyon© değerinin, performans üzerinde bir büyük etkisi gözlenmektedir. Giriş suyunun konsantrasyonu arttıkça, ozmotik basınçta gerçekleşen artışla beraber membrana uygulanan basınçta azalmaktadır. Bunun sonucun da giderme verimi düşmektedir. Basınç arttırılarak istenen oranın gerçekleşmesi sağlanabilir (Kayacan B., 2010).

2.8.4 Membran diziliş yoğunluğu

Birim hacime yerleştirilecek membran alanıdır. Bu alan ne kadar büyük ise sistemden çıkan akı da o oranda büyük olur. Genellikle membran yoğunluğu 160 ile 1640 m^2/m^3 olarak seçilmektedir (Kayacan B., 2010).

2.8.5 Akı

Akı, membranın birim zamanda birim alanından geçen akım miktarına denir. Akı genellikle L/m^2.saat veya m^3/m^2.sn birimleri ile ifade edilebilmektedir (Mulder, 1996). Membran filtrasyonunda ise membrandan geçen akım membrana uygulanan basınç ile doğru orantılıdır. Çalıştırma süresi ve 1 ila 2 yıl işletmeden sonra akı azalır (Koyuncu,1997).

2.8.6 Geri kazanım faktörü

Geri kazanım faktörü genel olarak sistemin kapasitesini gösterir ve membran uygulamalarında ulaşılan değer %80'dir. Proses suyunda fazla tuz konsantrasyonu olduğunda daha yüksek geri kazanım faktörüne ulaşılır. Yüksek konsantrasyonlarda ise membran yüzeyinde çökme fazla olur bundan dolayı işletme veriminde düşme gözlenir (Kayacan B. , 2010).

2.8.7 Membran ömrü

Gelen atık sudaki mantar, fenol ve bakteri gibi maddeler, yüksek sıcaklık, yüksek-düşük pH gibi bileşenler membran ömrünü olumsuz yönde etkiler ve bunlara bağlı olarak membran kullanım ömürü en fazla iki yıla iner (Kayacan B., 2010).

2.8.8 pH

Yüksek veya düşük pH' larda selüloz asetat membranlar hidroliz olurlar. Ortalama işletme pH aralığı 5,5 ila 7,5 arasındadır (Kayacan B., 2010).

2.8.9 Ön arıtma

TDS konsantrasyonu 10.000 mg/L'yi aşan besleme sularında membran proseslerinin doğrudan kullanımı teknik olarak uygun değildir. Membran yüzeyinde tabakalaşmaya neden olan kalsiyum, demir, mangan ve silikon bazlı bileşiklerin; pH ayarı, kimyasal çöktürme veya filtrasyon gibi ön arıtma yöntemleriyle kontrol edilmesi zorunludur. Ayrıca, mikrobiyolojik yük ve organik kalıntılar için klorlama veya aktif karbon üniteleri kullanılmalıdır. Günümüzde sıkılaşan çevre mevzuatları, ağır metal ve organik gideriminde katı membranların yanı sıra endüstriyel ölçekte yaygınlaşmaya başlayan sıvı membran teknolojilerini de stratejik bir çözüm haline getirmiştir (Kayacan B., 2010).

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Deratani vd. (2012) seramik endüstrisine ait atık suların ileri arıtımı için polimer nanofiltrasyon (NF) membranlarının etkinliğini değerlendiren çalışması bulunmaktadır. Üretim sürecinde yeniden kullanım veya çevreye zarar vermeden deşarj edilebilecek kalitede su elde etmek amacıyla NF membran teknolojisi uygulanmıştır. Özellikle kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) gibi organik kirleticiler ile sodyum (Na^{+}), magnezyum (Mg^{2+}), klorür (Cl^{-}) ve sülfat (SO_4^{2-}) gibi inorganik iyonların giderimi hedeflenmiştir. Sürecin optimizasyonu için bu sonuçlar aynı zamanda NanoFlux'un de deneysel çalışmalar sırasında zaman ve maliyet tasarrufu sağlayabilecek iyi bir tahmin aracı olduğunu ortaya koymaktadır. Program tarafından yapılan tahminler, deneysel olarak elde edilen sonuçlara oldukça yakın çıkmaktadır. Farklı membranlarla gerçekleştirilen deneyler sonucunda, düşük basınçlarında (4 ve 5 bar) çalışılmasına rağmen yaklaşık %90 oranında tutma verimi ve yüksek temiz su akısı elde edilmiştir. Bu bulgular, nanofiltrasyonun seramik sektörüne ait atık suların arıtımında uygulanabilir ve etkili bir yöntem olduğunu öne sürmüşlerdir (Derenati vd., 2012).

Moliner-Salvador vd. (2014) nanofiltrasyon teknolojilerinin seramik sanayi uygulamalarındaki sıvı atıkların arıtılmasındaki kullanımını incelemektedir. Çalışmada, endüstriyel atık su ve tedarik suyu gibi farklı su matrisleri kullanılmıştır. Nanofiltrasyonun, özellikle polimer membranlar kullanılarak yapılan uygulamalarda, organik bileşenlerin, boronun ve elektrolitlerin uzaklaştırılmasında başarılı sonuçlar verdiği bulunmuştur. Ayrıca, NF-90 (5-7 bar) ve NF-270 (5.5-7 bar) gibi farklı membranların performansları karşılaştırılmış ve her iki membranın da belirli koşullarda etkili olduğu gözlemlenmiştir. Nanofiltrasyon, ters ozmoz gibi diğer teknolojilere kıyasla daha düşük basınçlarla çalışarak daha yüksek verimlilikle temiz su sağlamaktadır, bu da işletme maliyetlerini düşürmektedir. Nanofiltrasyon teknolojisi, seramik sanayi gibi endüstriyel alanlarda su yönetimini iyileştirmek ve suyun yeniden kullanımını artırmak için umut verici bir çözüm olarak öne çıkmaktadır (Moliner-Salvador vd., 2014).

Premachandra vd. (2021), üç farklı endüstriyel atık su kullanılarak yapılan 120 dakikalık filtrasyon süresi boyunca permeat örneklerinin KOİ ölçümleri ve normalize edilmiş permeat akış profilleri gösterilmiştir. NF90'ın organik kirliliği uzaklaştırma ve

yüksek kaliteli permeat elde etme konusunda güçlü bir seçenek olduğunu ortaya koymaktadır. Filtrasyon sırasında pH değeri yaklaşık 7.0 olup, membranın yüzey yükü negatif olduğundan organik moleküllerin membran yüzeyine yapışması engellenmiştir. Bu durum, NF90 membranının organik maddeyi uzaklaştırmadaki verimliliğini artırmış ve diğer membranlarla kıyaslandığında daha iyi bir performans sergilemesine olanak sağlamıştır. Bu bulgular, NF90 membranının özellikle endüstriyel atık suların arıtılmasında en etkili seçeneklerden biri olduğunu göstermektedir (Premachandra vd., 2021).

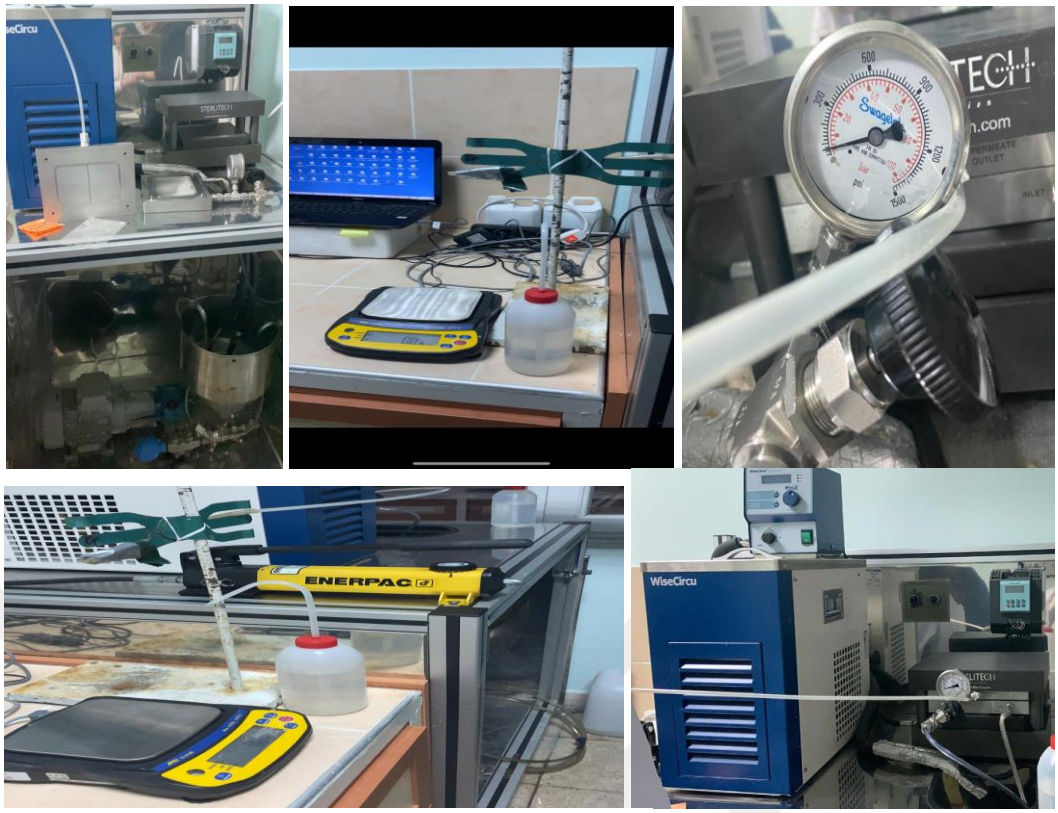
4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada seramik atıksuyundan nanofiltrasyon yöntemiyle basınç (4, 6 ve 8 bar) ve sıcaklık (25, 30 ve 35^{o}C) parametrelerin etkisi incelenmiştir. Askıda katı madde, kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), renk giderimi, bulanıklığın giderim verimine etkisi gözlemlenerek ideal çalışma şartları öngörülmüştür. pH, iletkenlik ve akının süzüntü suyunun kalitesine etkisi gözlemlenmiştir. Çizelge 4.1'de deney parametreleri verilmiştir.

Çizelge 4.1. Deney Parametreleri

Çalışma Koşulları	**Basınç**	**Sıcaklık**
Parametreler	4, 6 ve 8 (bar)	25, 30 ve 35 (^{o}C)
Değişkenler	Süzüntü Akısı Tayini Askıda Katı Madde Verimi (%) KOİ Giderim Verimi (%) Renk Giderim Verimi (%) pH İletkenlik Bulanıklık (%)	

Deneysel çalışmalarda Sterlitech marka, kimyasal dayanımı yüksek paslanmaz çelikten imal edilmiş çapraz akışlı membran filtrasyon düzeneği kullanılmıştır. Sistem; membran modülü (150 cm^2 etkin alan), santrifüj pompa, hidrolik el pompası, ısıtıcı, hassas terazi ve veri kayıt bilgisayarı gibi bileşenlerden oluşmaktadır. Filtrasyon sisteminin genel görünümü Şekil 4.1'de sunulmuştur.



Şekil 4.1. Çapraz akışlı membran sistemi görüntüsü

4.1. Deneyin Yapılışı

Deneysel çalışmaya başlamadan önce, membran sisteminde bulunabilecek olası safsızlıkların giderilmesi amacıyla %2'lik zayıf asit içeren bir yıkama solüsyonu sistemden geçirilmiştir. Ardından sistemde kalan yıkama solüsyonunun uzaklaştırılması amacıyla saf su ile durulama işlemi yapılmıştır. Temizlenen sisteme membran modülü yerleştirilmiş ve deneysel çalışmalara hazırlık aşamasına geçilmiştir.

Deneyin başında bilgisayar açılarak, süzüntü miktarını tartmak ve dijital ortamda kaydetmek amacıyla hassas teraziye bağlı veri toplama programı çalıştırılmıştır. Kullanılacak atık su, membran düzeneğini tıkayabilecek büyük partiküllerden filtreleme yöntemiyle arındırılmış ve besleme tankına aktarılmıştır.

Deneye başlamadan önce, sisteme elektrik verilmeden önce hidrolik el pompası yardımıyla sistem basıncı 900 Psi'a çıkarılarak membran modülü sabitlenmiş ve göstergeden bu basınç değeri doğrulanmıştır. Sonrasında, sistem elektrikle çalıştırılmış, ısıtıcı aktif hale getirilmiş ve deney için belirlenen sıcaklık değeri sisteme tanımlanmıştır. Besleme

tankındaki su, hedef sıcaklığa ulaştığında sistemdeki akış hızı ve vana ayarları ile istenen basınç değeri sağlanmıştır.

Düzenekten ilk süzüntü damlası alındığında, süzüntü tartımını gerçekleştiren program başlatılmış ve tartım verileri dakika bazında bilgisayara kaydedilmiştir. Deney süresince süzüntüden 5., 15., 30. ve 45. dakikalarda numuneler alınmıştır. Akı değerleri 45. dakikadan itibaren sabitlenmiş olup, sistemin kararlı duruma ulaştığı kabul edilerek deney bu sürede tamamlanmıştır.

Renk giderim veriminin hesaplanabilmesi için UV-VIS spektrofotometre cihazında öncelikle saf su ile dalga boyu taraması yapılarak referans oluşturulmuştur. Daha sonra ham atık suyun maksimum absorbans gösterdiği dalga boyu tespit edilmiş ve bu dalga boyunda alınan numunelerin absorbans değerleri ölçülerek kaydedilmiştir.

Her sıcaklık koşulunda, 45. dakikada alınan süzüntü numuneleri kullanılarak KOİ analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde, belirlenen hacimde süzüntü KOİ kitlerine eklenmiş, kitler termoreaktörde uygun sıcaklık ve sürede bekletilmiş, ardından oda sıcaklığına soğutulmuş ve spektrofotometreye yerleştirilerek KOİ değerleri ölçülmüştür.

Benzer şekilde, 45. dakikada alınan numuneler kullanılarak bulanıklık analizleri UV-VIS cihazı ile gerçekleştirilmiş, iletkenlik değerleri iletkenlik ölçer cihazı ile ölçülmüş ve pH değerleri pH-metre ile tespit edilmiştir.

4.2. Kullanılan Cihazlar

Bu çalışmada kullanılan cihazlar Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Analizler ve ölçümler için kullanılan cihazlar

ÇALIŞMADA KULLANILAN EKİPMANLAR	İŞLEVİ
Bilgisayar, Exper	Süzüntü tartım verilerinin kaydedilmesi
Çapraz Akışlı Membran Sistemi, Sterlitech	İçerisine yerleştirilen membran ile atıksu arıtılması
Hidrolik El Pompası, Enerpac	Membran sisteminin sıkıştırılması
Isıtıcı, WiseCircu	Deney sıcaklığının ayarlanması
UV Spektrofotometresi, Hach DR 3900	Renk giderim veriminin ölçülmesi
Spektrofotometre, Hach DR 2000	Bulanıklılık giderim veriminin ölçülmesi
Hassas Terazi, A&J EJ6100	Birim zamanda süzüntü akısının tartılması
Termoreaktör, Hach LT 200	KOİ kitlerinin hazırlanması
KOİ Kiti, Hach LCK 514	KOİ değerlerinin tayini
İletkenlik ölçer, Janvey 4310	İletkenlik ölçülmesi
pH Metre, Thermo Scientific	pH ölçülmesi

4.3. Uygulanan Analitik Yöntemler

KOİ, sudaki organik madde miktarını belirlemede kullanılan en önemli parametrelerden biridir ve organik kirlilik düzeyine dair bilgi verir. Organik kirliliği tespit etmek amacıyla, hazır KOİ test kitleri (LCK 514) kullanılmıştır. Her bir test kiti için 2 mL atıksu örneği alınarak kitlere eklenmiştir. Numuneler, Hach LT 200 marka termoreaktöre yerleştirilmiş ve 148 °C sıcaklıkta 2 saat süreyle reaksiyona bırakılmıştır. Süre sonunda kitler termoreaktörden çıkarılarak oda sıcaklığında soğumaya bırakılmış, ardından spektrofotometre ile ölçüm yapılarak KOİ değerleri mg/L biriminde kaydedilmiştir. Kitin

içindeki kimyasallar (genellikle potasyum dikromat) suyun içindeki organik maddelerle reaksiyona girer, ve bu reaksiyon sonucunda oluşan renk değişikliği fotometre ile ölçülür. Renk yoğunluğu, suyun oksijen tüketme kapasitesini yansıtarak KOİ değeri hesaplanır.

İşlem sırasıyla 5, 15, 30 ve 45. Dakikalarda numune alınması ve alınan numunenin Hach Lange DR 3900 markalı cihazla UV ölçümlerinin yapılmasıyla sürdürülmüştür. Ölçüm sonuçlarından renk giderimi verimi ve AKM giderim verimi hesaplandı. Ham atık suyun değerleri ile karşılaştırılarak giderimler yorumlandı.

Deneyleri gerçekleştirilen 25˚C, 30˚C ve 35˚C'de arıtılan seramik atık suyu, her bir sıcaklık analizi için 45.dakika sonunda alınan numuneler üzerinde Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ), iletkenlik ve pH analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, ham atık su değerleriyle karşılaştırılarak arıtım performansı değerlendirilmiştir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Membran

Bu çalışmada, nanofiltrasyon işlemlerinde yaygın olarak kullanılan NF90 membranı tercih edilmiştir. NF90, yüksek organik madde tutma kapasitesine ve düşük molekül ağırlıklı çözücülere karşı seçiciliğe sahip bir nanofiltrasyon (NF) membranıdır. Özellikle renk, organik bileşikler ve çözünmüş tuzların gideriminde yüksek verimlilik sağlaması nedeniyle tercih edilmiştir.

Poliamid esaslı ince film kompozit yapıya sahiptir. Gözenek çapı yaklaşık olarak 200 Dalton civarında olup, bu yapı sayesinde hem düşük moleküler ağırlıklı organiklerin hem de çok değerli iyonların tutulmasına olanak tanımaktadır. Bu özellikleri sayesinde, özellikle endüstriyel atıksuların ileri arıtımında, içme suyu temininde ve renk giderimi gibi uygulamalarda etkili sonuçlar vermektedir.

Çalışma kapsamında kullanılan NF90 membranı, üretici firma tarafından önerilen ön yıkama prosedürleri doğrultusunda saf su ile yıkanmış, ardından deneysel düzeneğe entegre edilmiştir. Deney boyunca sıcaklık ve basınç parametreleri sabitlenerek membranın performansı değerlendirilmiş ve süzüntülerden elde edilen veriler doğrultusunda membran etkinliği analiz edilmiştir.

5.2. Deneysel Çalışmada Kullanılan Ham Atıksu

Deneysel çalışmada kullanılan atıksu Eskişehir'de bulunan bir seramik fabrikasında hat yıkama işlemlerinden kaynaklanan atıksudur. Çizelge 5.1. seramik fabrikasından alınıp ölçülen ham atık suyun parametreleri verilmiştir.

Çizelge 5.1. Seramik Atık Suyunun Ölçülen Parametreleri

PARAMETRE	BİRİM	SERAMİK ATIKSUYU
Askıda Katı Madde	mg/L	596
Maksimum Absorbans A_0	abs	2,98
İletkenlik	µs/cm	0,94
Bulanıklık	ftu	210
pH	pH	7,48
Kimyasal Oksijen İhtiyacı	mg/L	639

5.3. Akı Hesaplanması

Deneysel akı verileri, hassas teraziye bağlı bir veri aktarım programı (AND) aracılığıyla dakikalık periyotlarla kaydedilmiştir. Hesaplanan akı ve kirletici giderme verimleri MS Excel üzerinden analiz edilerek zaman bazlı grafiklere dönüştürülmüştür. Akı değeri, birim membran alanından birim zamanda geçen akış miktarı baz alınarak hesaplanmıştır.

Akı, cihazın kaydettiği birimi akı birimine dönüştürmek için denklem (5.3) kullanılıp değer dönüşüm işleminin yapılmış ve elde edilen veriler çizelgelere aktarılmıştır.

$$Jv = Q/A \tag{5.3}$$

t_1 (dk.) için $V=V_1$ ve t_2 (dk.) için $V=V_2$

Q (t_2-t_1) (dakikada membrandan geçen süzüntünün miktarı) = V_2-V_1

A (membranın yüzey alanı) = 150 cm^2 (sabit)

5.4. Renk, Bulanıklık, AKM ve KOİ Giderim Verimi Hesaplanması

Atık suyun 4, 6 ve 8 bar' da membran filtrasyon düzeneğinden geçirilmesi ile elde edilen süzüntü cihazlara yüklenmiştir. Denklem (5.4) kullanılarak yüzde giderim verimleri hesaplanmıştır.

$$\%R_x = (A_x\text{-}A)/A_x \times 100 \quad (5.4)$$

R_x: Giderim verimi
x: AKM, KOİ, bulanıklık ve renk giderim
A_x: Beslemenin x değeri
A: Süzüntüdeki x değeridir

5.5. Atık Su İçin Deneysel Sonuçlar

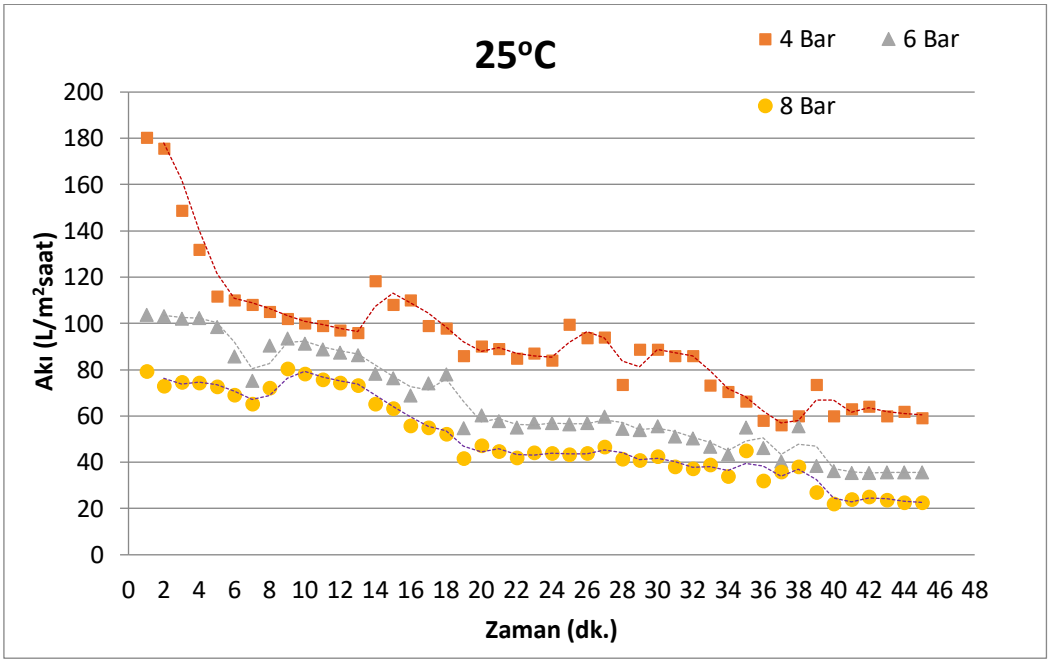
Seramik hat yıkama atık suyu NF90 membranı kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir.

5.5.1. Akı Değerleri

Membran akısı önemli bir çalışma parametresidir ve bir dizi farklı parametreden etkilenir. Bu deneysel çalışmada, basınç ve sıcaklığın akı üzerine etkileri araştırılmıştır. Seramik atıksu numunesi için Çizelge 5.2, Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4 farklı sıcaklıkta çalışılan 4, 6 ve 8 bar'da akı değerleri verilmiştir. Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te zamana karşı akı grafikleri verilmiştir.

Çizelge 5.2. Seramik atık suyu için 25°C'de 4,6 ve 8 bar basınçlardaki akı değerleri

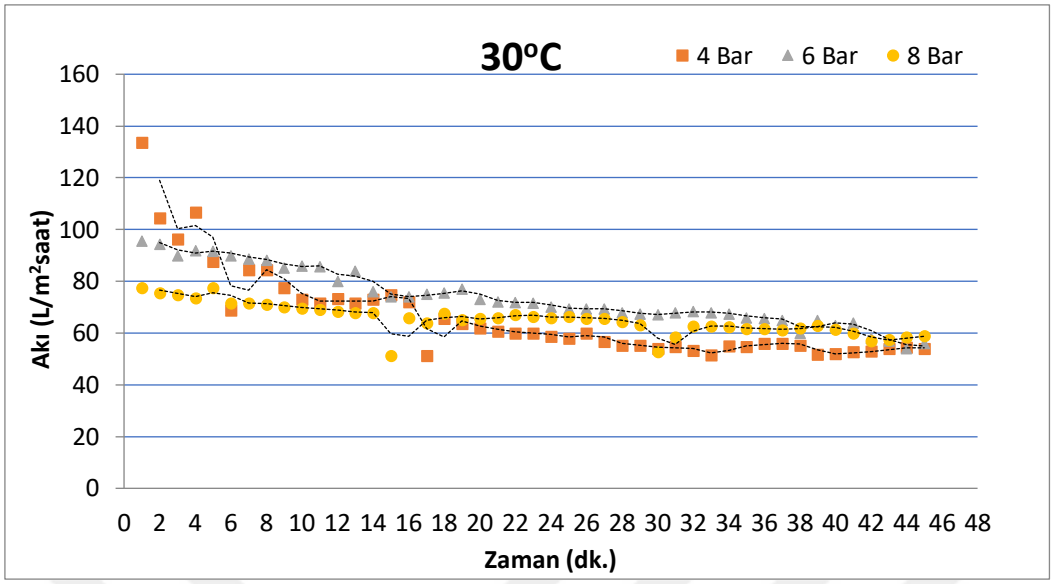
Zaman(Dakika)	4 bar Akı (L/m^2 saat)	6 bar Akı (L/m^2 saat)	8 bar Akı (L/m^2 saat)
5 dk.	111,6	102,4	74,3
15 dk.	108,0	78,1	65,1
30 dk.	88,8	55,4	42,4
45 dk.	59,0	35,6	22,6



Şekil 5.1. Seramik atık suyu için 25°C'de 4,6 ve 8 bar basınçlardaki akı değerleri

Çizelge 5.3. Seramik atık suyu için 30°C'de 4,6 ve 8 bar basınçlardaki akı değerleri

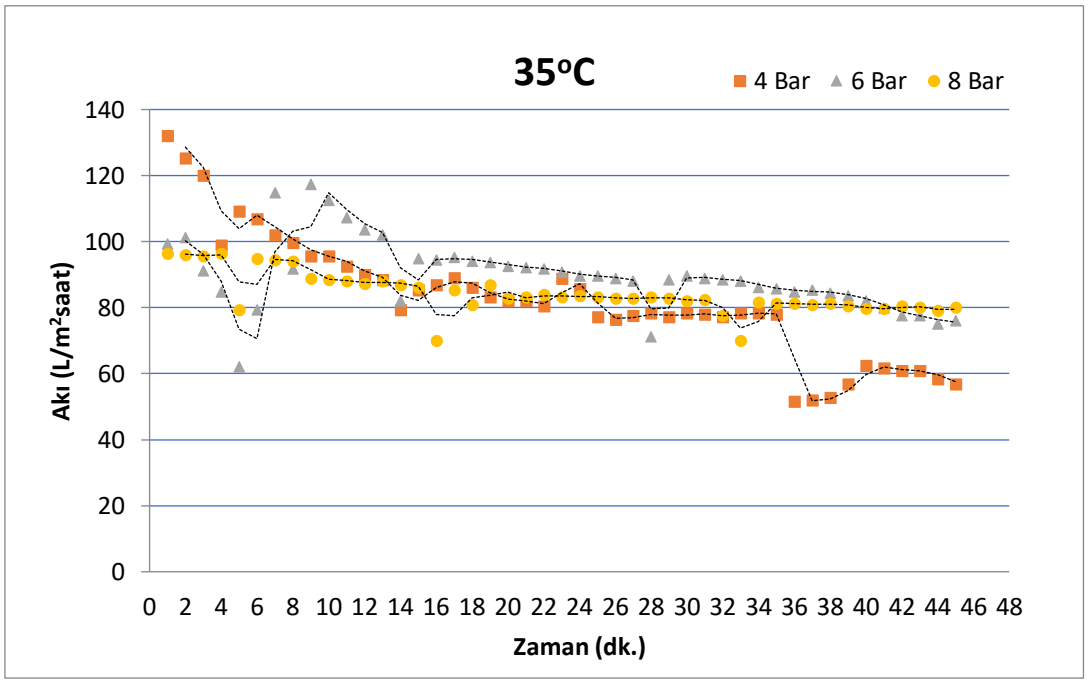
Zaman(Dakika)	4 bar Akı (L/m^2 saat)	6 bar Akı (L/m^2 saat)	8 bar Akı (L/m^2 saat)
5 dk.	87,6	91,6	77,6
15 dk.	74,8	74,0	51,4
30 dk.	54,0	67,2	52,8
45 dk.	54,0	56,0	59,1



Şekil 5.2. Seramik atık suyu için 30°C'de 4,6 ve 8 bar basınçlardaki akı değerleri

Çizelge 5.4. Seramik atık suyu için 35°C'de 4,6 ve 8 bar basınçlardaki akı değerleri

Zaman (Dakika)	4 bar Akı (L/m^2 saat)	6 bar Akı (L/m^2 saat)	8 bar Akı (L/m^2 saat)
5 dk.	109,2	62,0	79,2
15 dk.	85,2	94,8	86,0
30 dk.	78,4	89,6	82,0
45 dk.	56,8	76,0	80,0



Şekil 5.3. Seramik atık suyu için 35°C'de 4, 6 ve 8 bar basınçlardaki akı değerleri

Deney sonuçlarına göre 45. dakikada 35 °C sıcaklık ve 8 bar çalışma basıncında membran akısı maksimum seviyeye ulaşmıştır.

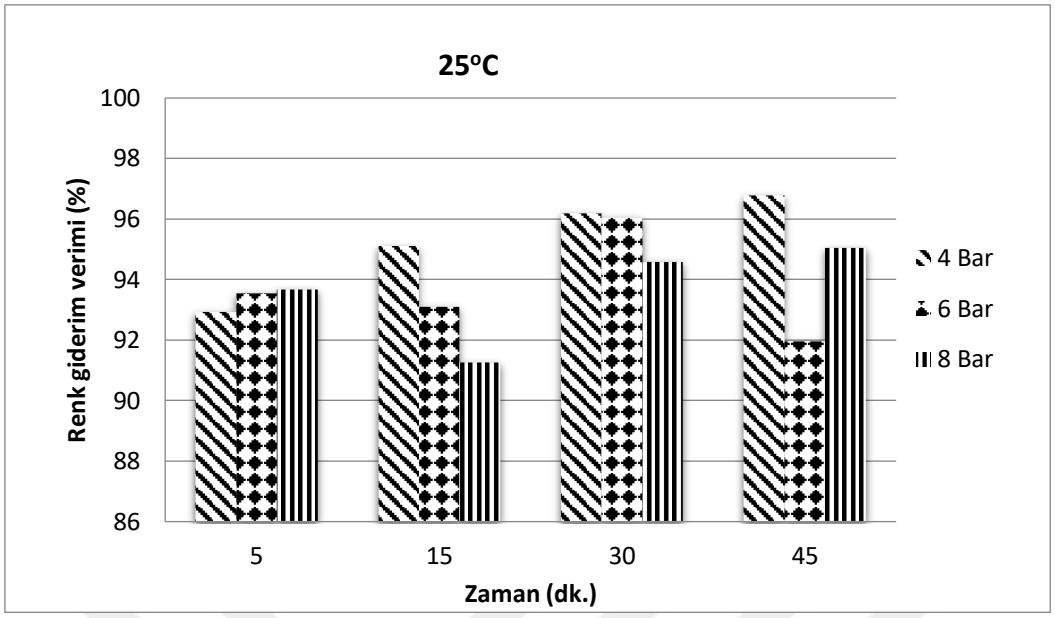
Seramik atık suyu için 45. dakikada elde edilen maksimum akı değeri 35°C ve 8 bar koşullarında 80 L/m^2 saat olarak bulunmuştur.

5.5.2. Renk ve Askıda Katı Madde (AKM) Giderim Verimi

Seramik atık su numunesi ile yapılan deneylerin 5, 15, 30 ve 45. dakikalarında süzüntülerden UV küvetlerine örnekler alınmıştır ve UV spektrofotometresi ile 25˚C, 30˚C ve 35˚C için 4, 6 ve 8 bar'da değerler ölçülmüştür. Ölçülen renk değerlerinden renk giderim verimi yüzde olarak hesaplanıp 25˚C için Şekil 5.4'de, 30ºC için Şekil 5.5'de ve 35˚C için Şekil 5.6'da verilmiştir. Ölçülen AKM değerlerinden AKM giderim verimi yüzde olarak hesaplanıp 25˚C için Şekil 5.7'de, 30ºC için Şekil 5.8'de ve 35˚C için Şekil 5.9'da verilmiştir.

Çizelge 5.5. 25ºC'de renk giderim verimleri (%)

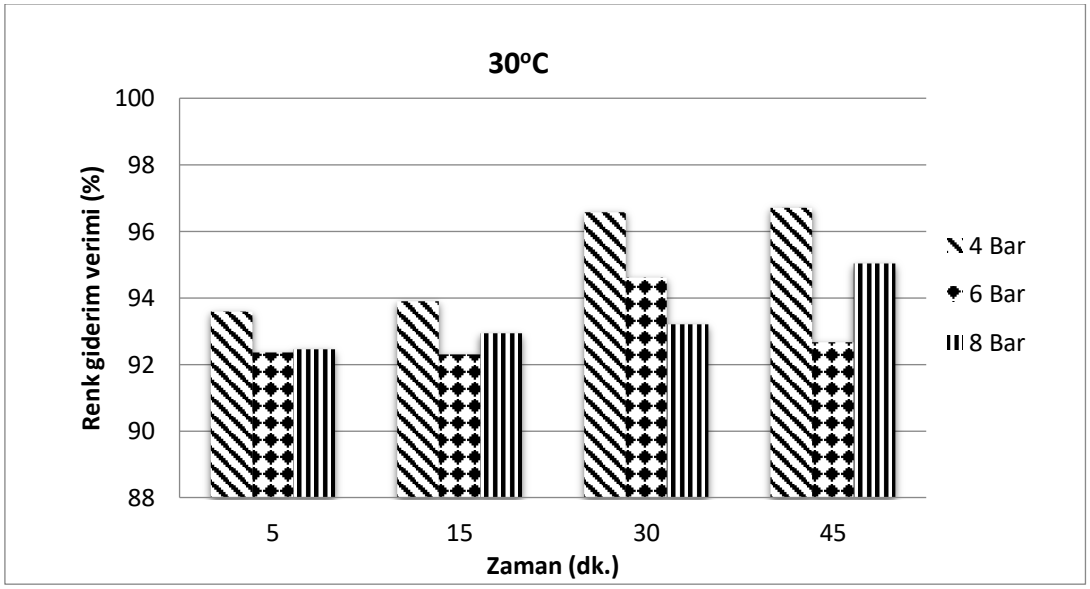
Basınç\Dakika	5 dk.	15 dk.	30 dk.	45 dk.
4 Bar	92,93	95,11	96,18	96,78
6 Bar	93,53	93,09	96,05	91,96
8 Bar	93,66	91,25	94,57	95,04



Şekil 5.4. Seramik atık suyu için 25˚C'de 4, 6, ve 8 bar için renk giderim verimleri

Çizelge 5.6. 30°C'de renk giderim verimleri (%)

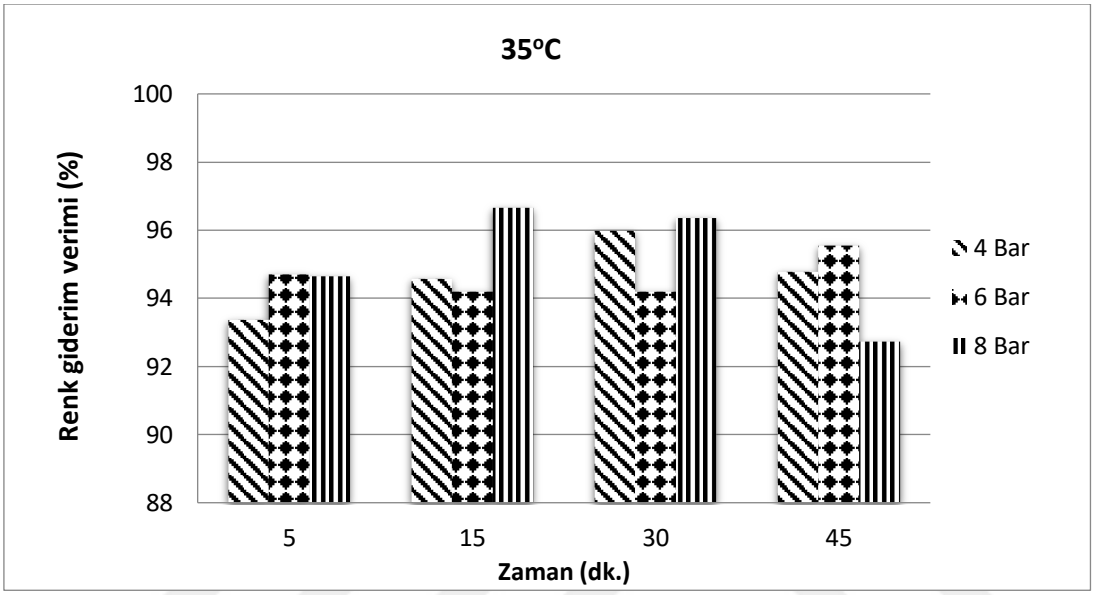
Basınç\Dakika	5 dk.	15 dk.	30 dk.	45 dk.
4 Bar	93,59	93,90	96,58	96,71
6 Bar	92,36	92,29	94,60	92,66
8 Bar	92,46	92,93	93,19	95,04



Şekil 5.5. Seramik atık suyu için 30˚C'de 4, 6, ve 8 bar için renk giderim verimleri

Çizelge 5.7. 35ºC'de renk giderim verimleri (%)

Basınç\Dakika	5 dk.	15 dk.	30 dk.	45 dk.
4 Bar	93,36	94,57	95,98	94,77
6 Bar	94,70	94,20	94,20	95,54
8 Bar	94,64	96,65	96,35	92,72

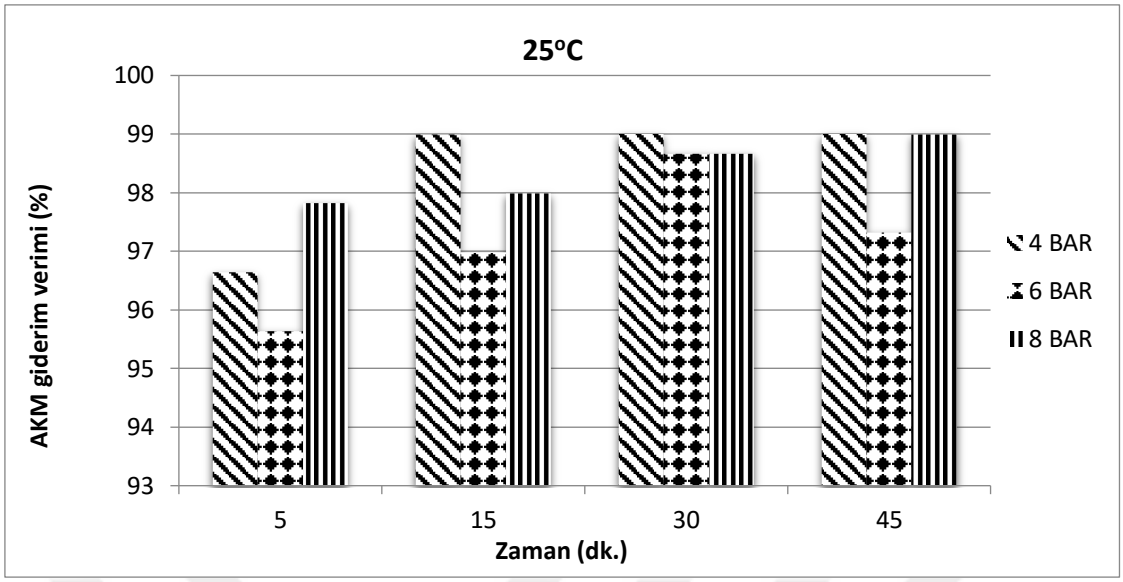


Şekil 5.6. Seramik atık suyu için 35˚C'de 4, 6, ve 8 bar için renk giderim verimleri

En yüksek renk giderim veriminin elde edildiği en uygun koşullar, 25°C sıcaklık ve 4 bar basınçta %96,78 olarak belirlenmiştir. Bu koşullarda, maksimum renk giderim verimine ulaşılmıştır.

Çizelge 5.8. 25ºC'de Askıda katı madde giderim verimleri (%)

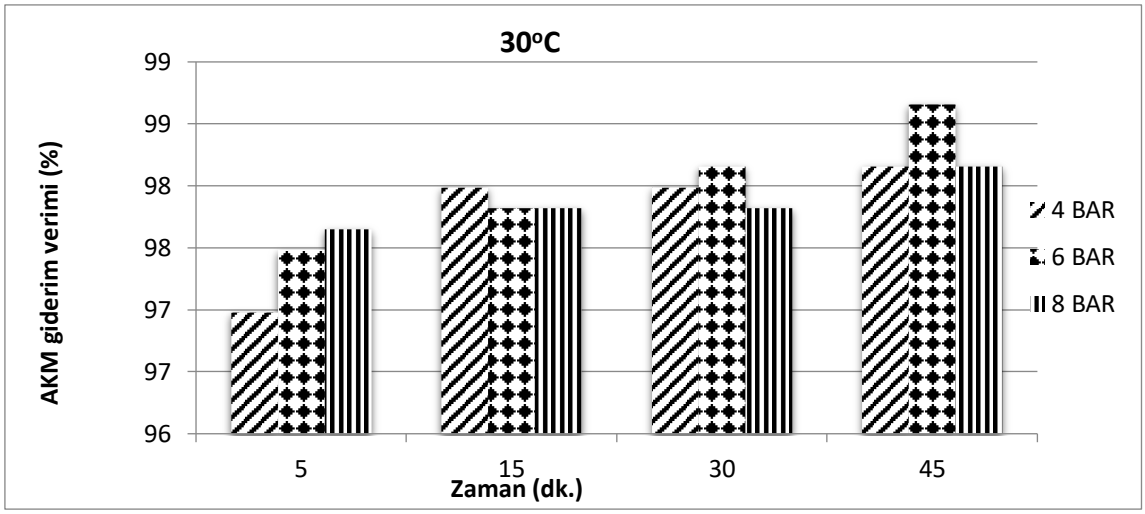
Basınç\Dakika	5 dk.	15 dk.	30 dk.	45 dk.
4 Bar	96,61	99,01	99,04	99,06
6 Bar	95,64	97,06	98,71	97,30
8 Bar	97,82	98,02	98,71	99,02



Şekil 5.7. Seramik atık suyu için 25˚C'de 4, 6, ve 8 bar için AKM giderim verimleri

Çizelge 5.9. 30°C'de Askıda katı madde giderim verimleri (%)

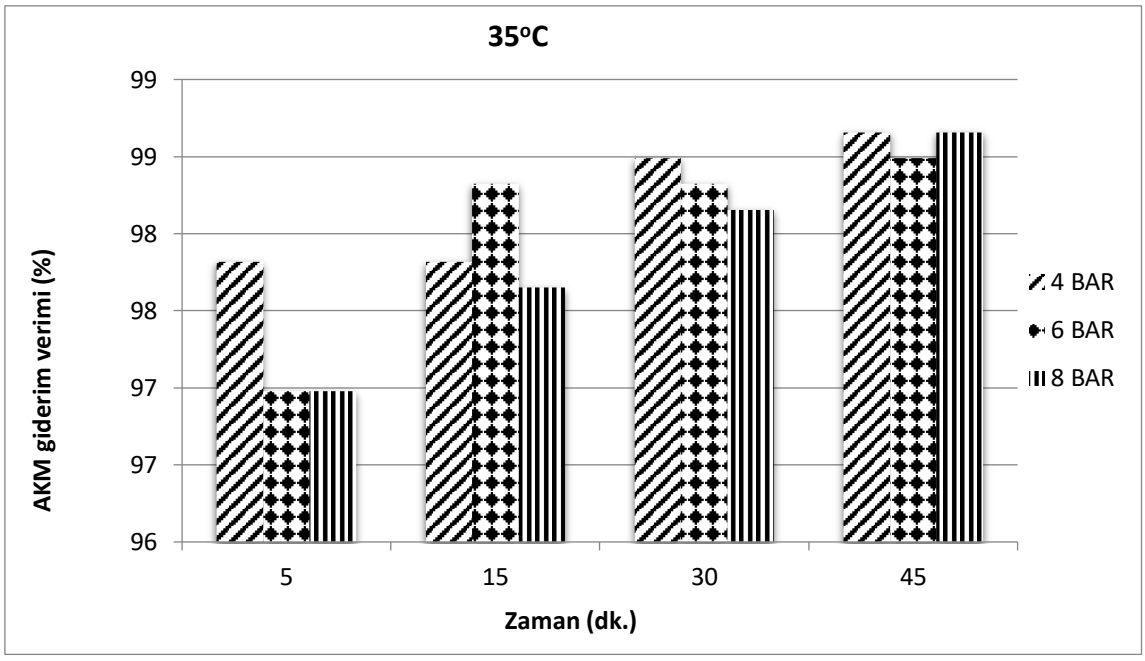
Basınç\Dakika	5 dk.	15 dk.	30 dk.	45 dk.
4 Bar	97,04	98,01	98,07	98,26
6 Bar	97,52	97,82	98,23	98,76
8 Bar	97,76	97,87	97,84	98,22



Şekil 5.8. Seramik atık suyu için 30˚C'de 4, 6, ve 8 bar için AKM giderim verimleri

Çizelge 5.10. 35ºC'de Askıda katı madde giderim verimleri (%)

Basınç\Dakika	5 dk.	15 dk.	30 dk.	45 dk.
4 Bar	97,81	97,82	98,59	98,72
6 Bar	97,03	98,31	98,32	98,55
8 Bar	97,03	97,74	98,21	98,72



Şekil 5.9. Seramik atık suyu için 35˚C'de 4, 6, ve 8 bar için AKM giderim verimleri

Farklı sıcaklıklarda ve farklı basınçlarda, NF membranı yüksek renk giderim askıda katı madde giderim etkinliği göstermiştir. NF90 membran ile renk ve askıda katı madde giderim verimi en yüksek 4 bar ve 25ºC sıcaklığında sırasıyla %96,78 ve %99,06 olduğu hesaplanmıştır.

Deney sonuçları, NF90 membranın seramik endüstrisi atıksularının renk ve AKM gideriminde etkili bir arıtma yöntemi sunduğunu ve süreç parametrelerinin (sıcaklık ve basınç) giderim verimliliği üzerinde önemli rol oynadığını ortaya koymuştur.

5.5.3. KOİ ve Bulanıklık Giderimi, İletkenlik ve pH Değerleri

Çizelge 5.11, Çizelge 5.12 ve Çizelge 5.13'de 25°C, 30°C ve 35°C sıcaklık değerlerinde 4, 6 ve 8 bar' da NF90 kullanılarak Seramik atık suyunun arıtımı 45. dakikalarından elde edilen süzüntülerin bulanıklık ve KOİ değerleri verilmiştir. Şekil 5.10 ve Şekil 5.11 ise grafik haline getirilmiştir.

Çizelge 5.11. 25˚C'de KOİ ve bulanıklık değerleri

	25ºC			
	KOİ (mg/L)	KOİ Giderim Verimi (%)	Bulanıklık (FTU)	Bulanıklık Verimi (%)
Ham Atıksu	639	-	210	-
4 bar	229	64,16	145	30,95
6 bar	203	68,23	106	49,52
8 bar	157	75,43	42	80,00

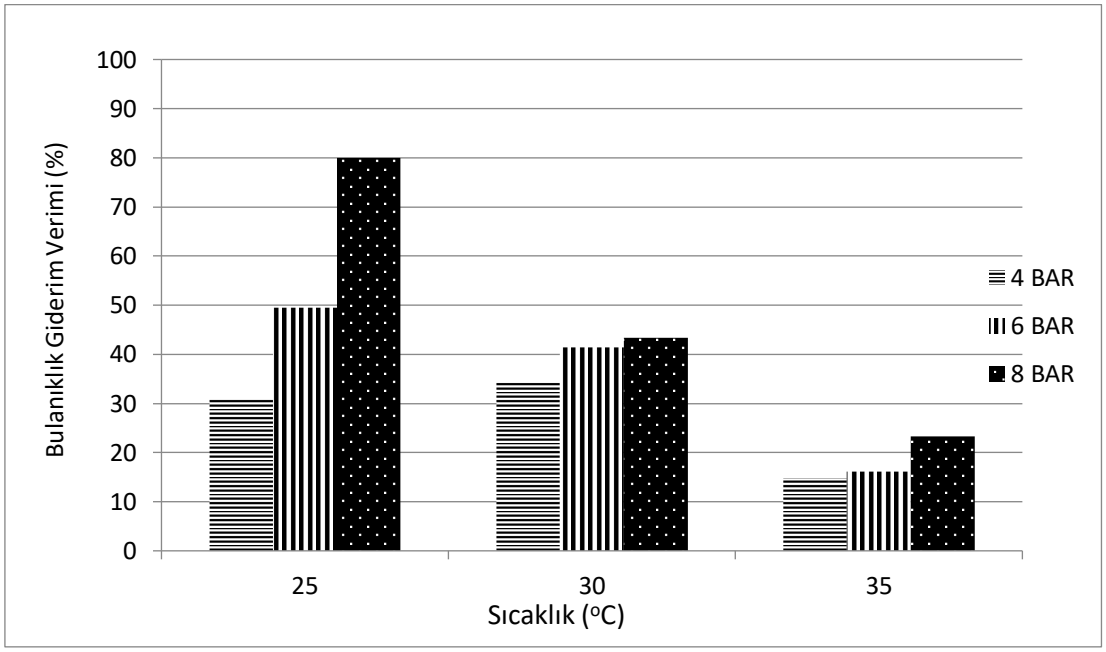
Çizelge 5.12. 30˚C'de KOİ ve bulanıklık değerleri

	30ºC			
	KOİ (mg/L)	KOİ Giderim Verimi (%)	Bulanıklık (FTU)	Bulanıklık Verimi (%)
Ham Atıksu	639	-	210	-
4 bar	202	68,38	138	34,29
6 bar	197	69,17	123	41,43
8 bar	190	70,26	119	43,33

Çizelge 5.13. 35˚C'de KOİ ve bulanıklık değerleri

	35ºC			
	KOİ (mg/L)	KOİ Giderim Verimi (%)	Bulanıklık (FTU)	Bulanıklık Verimi (%)
Ham Atıksu	639	-	210	-
4 bar	210	67,13	179	14,76
6 bar	202	68,38	176	16,19
8 bar	200	68,70	161	23,33

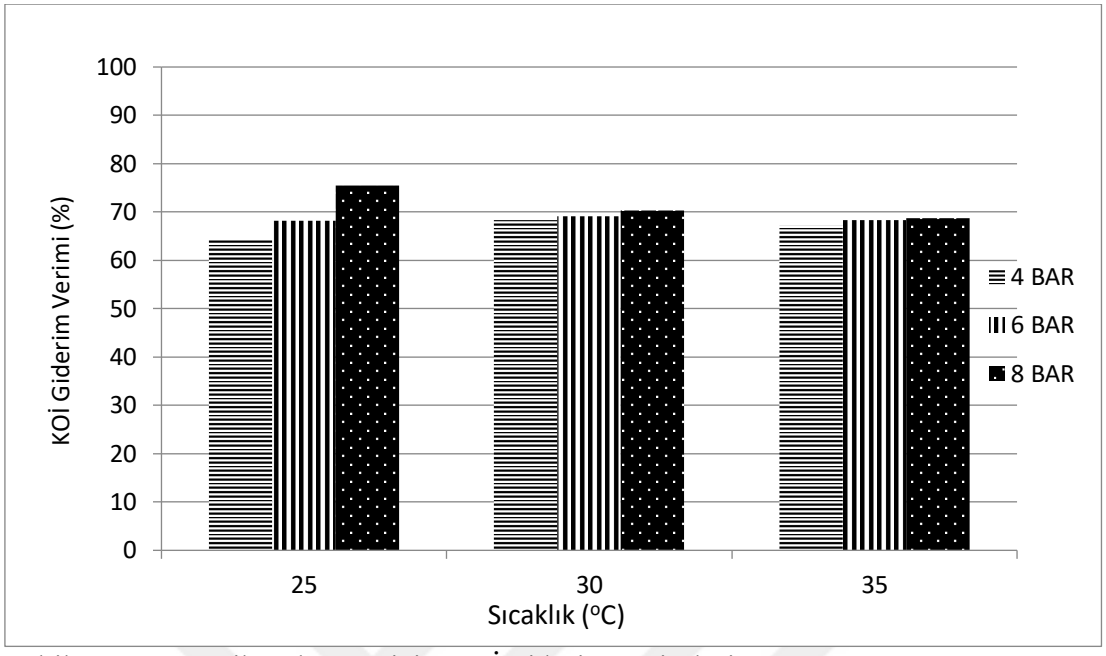
25°C'de bulanıklık giderim verimi, 4 bardan 8 bara çıkıldığında %30,95'ten %80,00'e yükselmiştir. 30°C'de verimde bir düşüş görülmekle birlikte, 35°C'de bulanıklık giderim oranlarının ciddi şekilde düştüğü (%14,76–23,33) dikkat çekicidir. Bu durum, yüksek sıcaklıkların membran performansını olumsuz etkileyebileceğini düşündürmektedir.



Şekil 5.10. Seramik atık suyu için bulanıklık giderim verimleri

Özellikle 25°C'de 8 bar basınç altında %75,43'lük en yüksek giderim oranına ulaşılmıştır. Bu durum, KOİ gideriminin basınca duyarlı olduğunu ve yüksek basınç koşullarında membran geçirgenliğinin artmasıyla verimin yükseldiğini göstermektedir. Sıcaklığın 30°C ve 35°C'ye çıkarılmasıyla KOİ giderimi %70,26 ve %68,70 seviyelerinde kalmıştır, bu da sıcaklığın verimi olumsuz yönde etkilediğini ortaya koymaktadır.

NF90 membranı ile çapraz akışlı sistemde gerçekleştirilen arıtımda, düşük sıcaklık ve basınç koşullarında membran yüzeyinde daha kararlı bir akış rejimi sağlanmıştır. Sıcaklık ve basınç artışı ise konsantrasyon polarizasyonu ve membran tıkanma eğilimini artırarak giderim performansını düşürmüştür.



Şekil 5.11. Seramik atık suyu için KOİ giderim verimleri

Genel olarak değerlendirildiğinde, 25°C sıcaklık ve 8 bar basınç koşullarında KOİ ve bulanıklık giderim verimlerinin en yüksek değerlere ulaştığı tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklıklar, bazı parametrelerde olumlu etkiler göstermiş olsa da, özellikle bulanıklık gideriminde 35°C'de performans düşüşü gözlemlenmiştir. Bu da sıcaklığın membran stabilitesi ve geçirgenliği üzerinde sınırlayıcı etkileri olabileceğini göstermektedir.

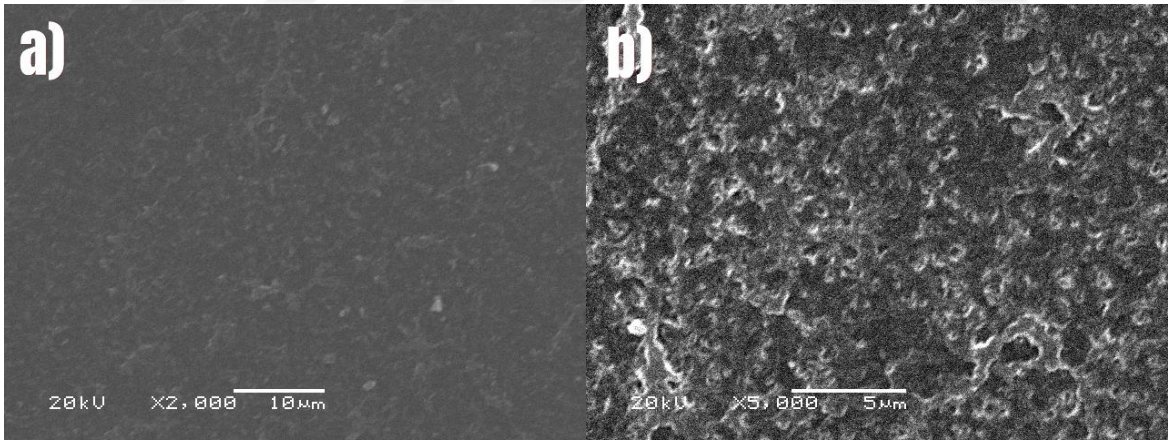
Çizelge 5.14. İletkenlik ve pH ölçüm verileri

Sıcaklık (°C)	Basınç (bar)	Çıkış İletkenlik (µS/cm)	Çıkış pH
25	4	0,63	7,20
25	6	0,59	7,22
25	8	0,25	7,72
30	4	0,63	7,45
30	6	0,63	7,69
30	8	0,63	7,76
35	4	0,62	7,68
35	6	0,58	7,72
35	8	0,54	7,90

İletkenlik ve pH ölçüm verileri Çizelge 5.14'te listelenmiştir. Giriş iletkenlik değeri 0,947 µS/cm ve giriş pH değeri 7,48 olarak ölçülmüştür. İletkenlik değerleri tüm sıcaklıklarda ve basınç seviyelerinde azalma göstermiştir. Bu, membranların çözünmüş iyonları da belirli oranda tuttuğunu göstermektedir. Özellikle 25°C ve 8 bar'da iletkenlik 0,254 µS/cm'ye düşmüştür. pH değerlerinde ise büyük değişimler gözlenmemekle birlikte, 8 bar ve yüksek sıcaklıklarda hafif bir artış eğilimi olduğu dikkat çekmektedir. Bu artış, membran yüzeyinde iyon değişiminden veya suyun iyonik dengesinden kaynaklanmış olabilir.

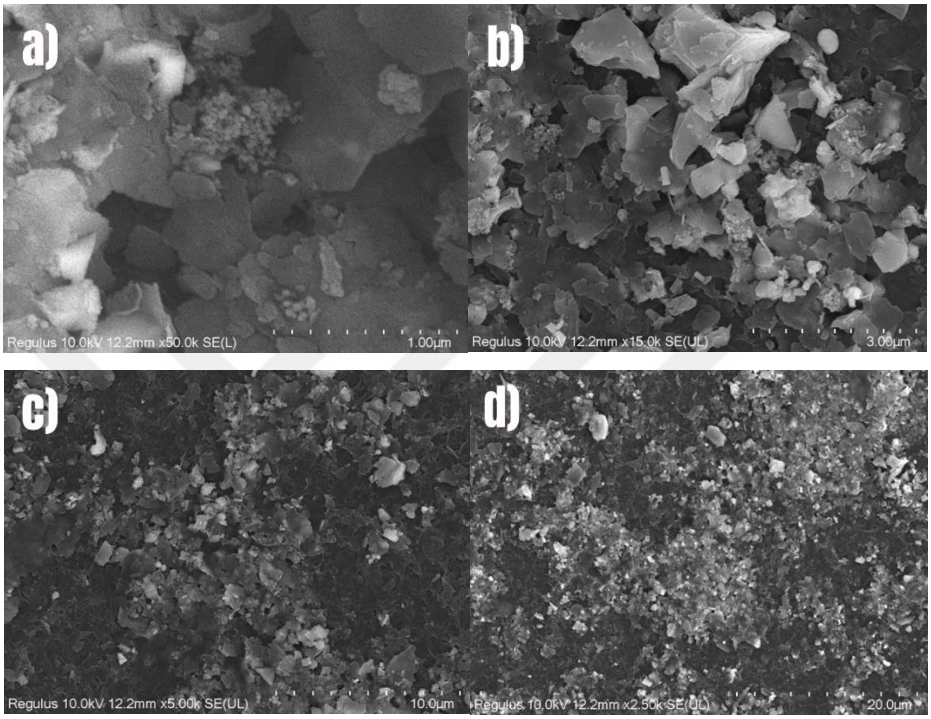
5.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

NF90 nanofiltrasyon membranına ait temiz ve arıtım sonrası kullanılan numunelerin yüzey yapıları SEM analizi ile incelenmiştir. Temiz membran yüzeyinde Şekil 5.12'de görüldüğü gibi düzgün ve süreklilik gösteren bir morfoloji gözlenirken, arıtım sonrası membran yüzeyinde heterojen bir yapı oluştuğu, yüzey pürüzlülüğünün arttığı ve bazı gözeneklerin kapandığı belirlenmiştir.

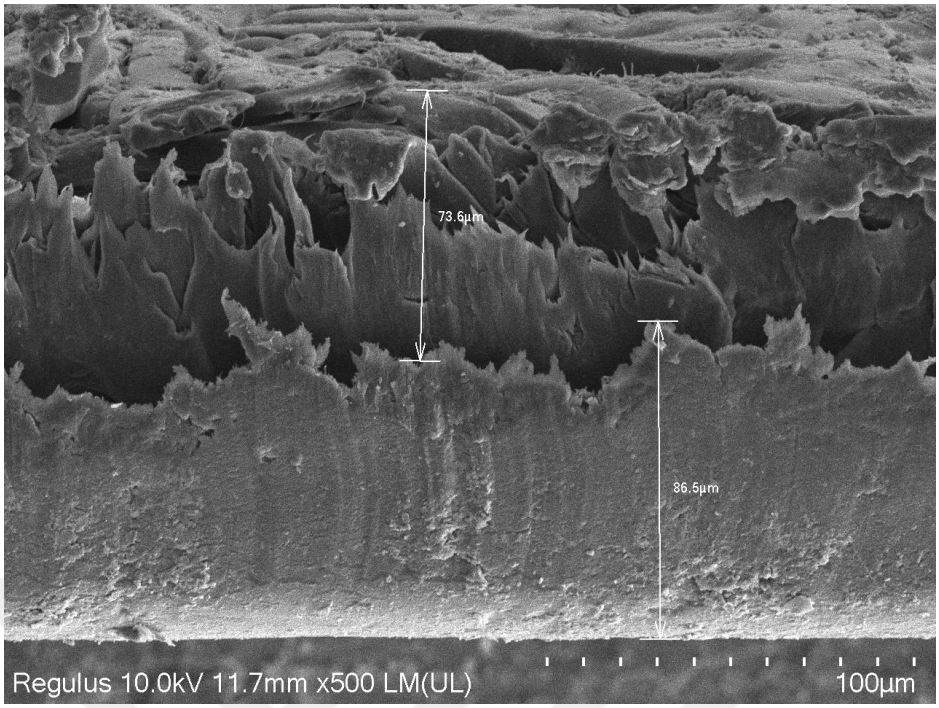


Şekil 5.12. NF90 temiz membranın a) 10 µm ve b) 5 µm SEM görüntüleri

Yapılan nanofiltrasyon sonrası NF90 membranın SEM görüntüleri aşağıda verilmektedir (Şekil 5.13a). Kek tabakasının kalınlığı (Şekil 5.12b). Seramik atıksuyun içerisinde kil, toprak, glazür, boya, ağır metaller, çözücüler, bağlayıcılar ve çeşitli organik-inorganik kirleticiler kek oluşumunda güçlü bağlar oluşturur ve membran kirlenmesine neden olur.



Şekil 5.13a. Kirlenmiş membranın a) 1 µm, b) 3 µm, c) 10 µm, d) 20 µm SEM görüntüleri



Şekil 5.13b. Kirlenmiş membran 100 µm SEM görüntüsü

Şekil 5.13b'de sunulan kullanılmış membranın Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kesit görüntüsü, çapraz akış membran yüzeyinde kayma gerilimi oluşturarak kirlenmeyi en aza indirmeyi amaçlasa da, görüntüde belirgin bir kek tabakası oluşumu görülmektedir. Bu birikinti tabakası 73,6 µm kalınlığında ölçülmüş olup, hemen altındaki orijinal membran destek katmanının 86,5 µm kalınlığına yakındır. Membran yüzeyindeki aktif tabaka bütünlüğünü koruyor gibi görünse de, üzerinde ve destek yapının üst bölgelerinde düzensiz bir kir tabakası biriktiği görülmektedir. Su içindeki organik maddeler ve askıda katı maddeler nedeniyle birikintilerin oluştuğu söylenebilir. Destek tabakanın içindeki gözenekli yapılarda da tıkanma izleri dikkat çekmektedir. Bu durum, kirleticilerin sadece yüzeyde değil, membranın daha içine ilerlediğini göstermektedir. Görüntüdeki bu bulgular, zamanla membran veriminde azalma ve daha sık temizlik ihtiyacı gibi sorunların ortaya çıkabileceğini göstermektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

NF90 membranının seramik endüstrisine ait kompleks yapılı atık suların arıtımında etkili bir seçenek olduğunu ve renk, bulanıklık, KOİ ve iletkenlik gibi temel parametrelerde önemli oranda iyileşme sağladığını göstermektedir. Bu bağlamda çalışma, seramik atık sularının çevreye zarar vermeden yeniden kullanımı veya güvenli deşarjı için nanofiltrasyon teknolojisinin uygulanabilirliğini ortaya koymakta ve sürdürülebilir su yönetimi açısından önemli katkılar sunmaktadır.

Arıtma işlemiyle geri kazanılan suyun, döngüsel ekonomiye kazandırılması gerekir. Saflaştırılmış suyun sanayi süreçlerinde, sulama amaçlı ya da seramik üretim döngüsünde yeniden kullanılması, sürdürülebilirlik için önemlidir. Böyle bir yaklaşım, hem su kaynaklarının kullanımını azaltır.

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, giderim verimi için NF90 membranının en uygun sıcaklık koşulunun 25°C olduğu sonucunu ortaya çıkarmıştır. Maksimum akı değeri 35^{o}C ve 8 bar basınçta 80 L/m^{2}saat bulunmuştur. Renk giderimi ve askıda katı madde giderimi 25^{o}C ve 4 bar basınçta sırasıyla %96,78 ve %99,06 olarak hesaplanmıştır. Bulanıklık, KOİ 8 bar basınçta ve 25^{o}C sıcaklıkta sırasıyla %80 ve %75,43 olarak hesaplanmıştır. İletkenlik değeri en düşük 25^{o}C ve 8 bar basınçta 0,25 µS/cm ölçülmüştür. pH değerlerinde ise sıcaklık ve basınç değiştikçe büyük değişimler gözlenmemekle birlikte 7,2-7,9 değerleri ölçülmüştür. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'ne (SKKY) göre yapılan değerlendirme sonucunda, çıkış suyuna ait KOİ değerinin ilgili sınır değerin üzerinde, buna karşın AKM değeri yönetmelikte belirtilen limitlerin altındadır ve pH değerlerinin uygun aralıkta olduğu belirlenmiştir. Bu durum, mevcut arıtma prosesine ek olarak KOİ giderimini artırmaya yönelik koagülasyon–flokülasyon, ileri oksidasyon prosesleri veya aktif karbon adsorpsiyonu ile gerekiyorsa ilave biyolojik arıtım basamaklarının entegrasyonunun araştırılmasının uygun olacağını göstermektedir.

Seramik atıksularında çoğu endüstriyel atıksuya göre daha bulanıktır. Literatürde, AKM ve bulanıklık arasında çoğu durumda pozitif bir ilişki bulunduğu, ancak bu ilişkinin doğrusal olmadığı sıklıkla vurgulanmaktadır. Bu çalışmada gözlenen yüksek AKM giderim verimine rağmen bulanıklık gideriminin veriminin daha düşük olması, bulanıklığın optik bir parametre olması ve ince partiküllerin ışık saçılımına katkısının yüksek olmasıyla açıklanabilir (Spellman, 2014; Metcalf ve Eddy, 2014; Judd, 2011).

Bu analizlere göre deneysel sürecin en büyük etkeni basınç değişimi olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek verimlilik, tıkanmaya karşı dirençli yapıları ve uzun ömürlü performanslarıyla öne çıkan çapraz akışlı membran sistemleri, pek çok endüstriyel alanda kilit bir teknoloji olarak sürdürülebilir çözümlere zemin hazırlamaktadır. NF90 membranı ile gerçekleştirilen nanofiltrasyon deneylerinde sıcaklık artışıyla birlikte giderim verimlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, yüksek sıcaklıklarda membran polimer yapısının gevşemesi, difüzyon katsayısının artması ve elektrostatik ayırma mekanizmalarının zayıflaması sonucu çözünen maddelerin membrandan geçişinin kolaylaşmasıyla açıklanabilir. Sonuç olarak, düşük sıcaklıklarda yüksek verim alınması, yöntemin proses ekonomisi bakımından avantajlı olduğunu ve endüstriyel ölçekte uygulanabilirliğini artırdığını göstermektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Ağtaş, M., Dilaver, M., & Koyuncu, İ. (2021). Ceramic membrane overview and applications in textile industry: a review. Water Science and Technology, 84(5), 1059-1078.

Akbacak, U. A. (2018). Kağıt endüstrisi atıksularının membran filtrasyonu ve oluşan membran konsantrelerinin ileri oksidasyon prosesi/ultrafiltrasyon hibrit sistemi ile arıtımı. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Alenezi, F. T. (2016). Workability and compressive strength of eco-friendly concrete based on waste ceramic particles.

Aydin, D., Gübbük, İ. H., & Ersöz, M. (2024). Recent advances and applications of nanostructured membranes in water purification. Turkish Journal of Chemistry, 48(1), 1-20.

Barata, J., Silva, F., & Almeida, M. (2019). Ceramic Industry 4.0. Res. Anthol. Cross-Ind. Chall. Ind, 4.

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.

Boivin, S., & Fujioka, T. (2024). Membrane fouling control and contaminant removal during direct nanofiltration of surface water. Desalination, 581, 117607.

Chen, Z., Wei, W., Chen, H., & Ni, B. J. (2022). Recent advances in waste-derived functional materials for wastewater remediation. Eco-Environment & Health, 1(2), 86-104.

Cineviz, M. (2024). Seramik Üretim Süreçlerinin Sürdürülebilirlik Kapsamında İncelenmesi ve Dönüşümünün İmkanları= Examination of Ceramic Production Processes within the scope of Sustainability and the Possibilities of their Transformation (Master's thesis, Sakarya Üniversitesi).

Collivignarelli, M. C., Abbà, A., Miino, M. C., & Damiani, S. (2019). Treatments for color removal from wastewater: State of the art. Journal of Environmental Management, 236, 727-745.

Çakır, S. (2024). Seramik endüstrisi atıksularının seramik membranlarla arıtımı ve geri kazanımı (Yüksek lisans tezi). Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

Çelik, G. N. (2022). Kağıt endüstrisi atıksularının çapraz akışlı ultrafiltrasyon membran sistemiyle arıtımı (Yüksek lisans tezi, Balıkesir Üniversitesi).

Çelik Saydam, Y. (2025). Seramik sanayide kaynak verimliliği ve temiz üretim (Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü).

KAYNAKLAR DİZİNİ

Deratani, A., Palmeri, J., Moliner-Salvador, S., & Sánchez, E. (2012). Use of nanofiltration membrane technology for ceramic industry wastewater treatment. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 51(103), 1-12.

Deratani, A., Palmeri, J., Sánchez, E., Celades, I., & Moliner, R. PONENCIA 30 Bloque C: Use of Nanofiltration Membrane Technology for Ceramic Industry Wastewater Treatment.

Dhodapkar, R. S., Pophali, G. R., Nandy, T., & Devotta, S. (2007). Exploitation results of seven RO plants for recovery and reuse of treated effluents in textile industries. Desalination, 217(1-3), 291-300.

Dolar, D., Vuković, A., Ašperger, D., & Košutić, K. (2011). Effect of water matrices on removal of veterinary pharmaceuticals by nanofiltration and reverse osmosis membranes. Journal of Environmental Sciences, 23(8), 1299-1307.

Durur, İ. (2023). 2,6-dimetilfenol gideriminde elektrokimyasal arıtımın uygulanabilirliği (Yüksek lisans tezi, Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).

El Ouardi, Y., Virolainen, S., Mouele, E. S. M., Laatikainen, M., Repo, E., & Laatikainen, K. (2023). The recent progress of ion exchange for the separation of rare earths from secondary resources – A review. Hydrometallurgy, 218, 106047.

Elias, S. H., Mohamed, M. A. K. E. T. A. B., Ankur, A. N., Muda, K. H. A. L. I. D. A., Hassan, M. A. H. M., Othman, M. N., & Chelliapan, S. (2014). Water hyacinth bioremediation for ceramic industry wastewater treatment – application of rhizofiltration system. Sains Malaysiana, 43(9), 1397-1403.

Ganesh, C. (2019). The environmental impact caused by the ceramic industries and assessment methodologies. International Journal for Quality Research, 13(2), 315-334.

Guo, H., Li, X., Yang, W., Yao, Z., Mei, Y., Elfa Peng, L., Yang, Z., Shao, S., & Tang, C. Y. (2021). Nanofiltration for drinking water treatment: a review.

Guo, H., Li, X., Yang, W., Yao, Z., Mei, Y., Peng, L. E., & Tang, C. Y. (2022). Nanofiltration for drinking water treatment: a review. Frontiers of Chemical Science and Engineering, 1-18.

Gül, A., & Tiyek, İ. (2022). Memran teknolojileri ve membran teknolojilerinin elektrospinning yöntemi ile nano lif üretimi üzerine literatür taraması. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 25(3), 183-211.

Gülmez, S., Kahraman, B. F., & Altın, A. (t.y.). Seramik sektöründe atıksular ve arıtım teknolojileri.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Hakami, M. W., Alkhudhiri, A., Al-Batty, S., Zacharof, M. P., Maddy, J., & Hilal, N. (2020). Ceramic microfiltration membranes in wastewater treatment: filtration behavior, fouling and prevention. Membranes, 10(9), 248.

Hao, O. J., Kim, H., & Chiang, P. C. (2000). Decolorization of wastewater. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 30(4), 449-505.

Honarmandrad, Z., Sun, X., Wang, Z., Naushad, M., & Boczkaj, G. (2023). Activated persulfate and peroxymonosulfate based advanced oxidation processes (AOPs) for antibiotics degradation – A review. Water Resources and Industry, 29, 100194.

Huber, M. M., Ternes, T. A., & von Gunten, U. (2004). Removal of estrogenic activity and formation of oxidation products during ozonation of 17-α-ethinylestradiol. Environmental Science & Technology, 38, 5177-5196.

Høibye, L., Clauson-Kaas, J., Wenzel, H., Larsen, H. F., Jacobsen, B. N., & Dalgaard, O. (2008). Sustainability assessment of advanced wastewater treatment technologies. Water Science and Technology, 58(5), 963-968.

Ibáñez-Forés, V., Bovea, M. D., & Simó, A. (2011). Life cycle assessment of ceramic tiles: Environmental and statistical analysis. The International Journal of Life Cycle Assessment, 16, 916-928.

Jain, K., Patel, A. S., Pardhi, V. P., & Flora, S. J. S. (2021). Nanotechnology in wastewater management: a new paradigm towards wastewater treatment. Molecules, 26(6), 1797.

Judd, S. (2011). The MBR book: Principles and applications of membrane bioreactors for water and wastewater treatment. Elsevier.

Kayacan, B. B. (2010). Pamuklu tekstil endüstrisi atıksularının membran proseslerle geri kazanımının araştırılması (Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul).

Khanzada, N. K., Farid, M. U., Kharraz, J. A., Choi, J., Tang, C. Y., Nghiem, L. D., & An, A. K. (2020). Removal of organic micropollutants using advanced membrane-based water and wastewater treatment: A review. Journal of Membrane Science, 598, 117672.

Koyuncu, İ. (1997). Membran teknolojisinin çevre mühendisliğinde kullanım potansiyeli ve ters osmoz ile amonyum iyonu giderimi.

Kumar, A., Srivastava, N. K., & Gera, P. (2021). Removal of color from pulp and paper mill wastewater – methods and techniques: A review. Journal of Environmental Management, 298, 113527.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Lefebvre, X., Palmeri, J., Sandeaux, J., Sandeaux, R., David, P., Maleyre, B., Lamaze, B. (2003). Nanofiltration modeling: a comparative study of the salt filtration performance of a charged ceramic membrane and an organic nanofilter using the computer simulation program NANOFLUX. Separation and Purification Technology, 32(1-3), 117-126.

Metcalf & Eddy, Inc., Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., & Burton, F. L. (2014). Wastewater engineering: Treatment and resource recovery. McGraw-Hill Education.

Moliner-Salvador, R., Celades, I., Sánchez, E., Deratani, A., & Palmeri, J. (2014, Şubat). Strategic nanofiltration applications in ceramic and related industry waters. XIII World Congress on Ceramic Tile Quality – Qualicer 14.

Moliner Salvador, R., Deratani, A., Palmeri, J., & Sánchez-Vilches, E. (2012). Use of nanofiltration membrane technology for ceramic industry wastewater treatment.

Mountadar, S., Carbonell Alcaina, C., José Luján Facundo, M., Ferrer-Polonio, E., Luis Soler Cabezas, J., Antonio Mendoza Roca, J., & Tahiri, S. (2017). Desalination of brackish water and reverse osmotic retentate using nanofiltration membranes: effects of TMP and feed concentration on the treatment.

Munir, A. (2006). Dead-end membrane filtration. Laboratory Feasibility Studies in Environmental Engineering, 1-33.

Nahar, B., Chaity, S. B., Gafur, M. A., & Hossain, M. Z. (2023). Synthesis of spherical copper oxide nanoparticles by chemical precipitation method and investigation of their photocatalytic and antibacterial activities. Journal of Nanomaterials, 2023(1), 2892081.

Obotey Ezugbe, E., & Rathilal, S. (2020). Membrane technologies in wastewater treatment: a review. Membranes, 10(5), 89.

Ormancı-Acar, T. (2017). Nanofiltrasyon Membranların Üretimi ve Tekstil Endüstrisinde Uygulanması (Doktora Tezi). İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Payant, A. (2016). Efficacité des lavages physiques de membranes de nanofiltration à fibres creuses (Doktora tezi, École Polytechnique de Montréal).

Premachandra, A., O'Brien, S., Perna, N., McGivern, J., LaRue, R., & Latulippe, D. R. (2021). Treatment of complex multi-sourced industrial wastewater — New opportunities for nanofiltration membranes. Chemical Engineering Research and Design, 168, 499-509.

Pristyanto, Y. (2024). Eliminating production process waste with Lean Six Sigma in the Gresik ceramic industry. Jurnal Sistem Cerdas, 7(2), 120-132.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Sert, G. (2015). Membran biyoreaktör (MBR) prosesi ile arıtılan endüstriyel atık suların yeniden kullanımı için membran teknolojilerin uygulanması.

Shahid, M. U., Najam, T., Islam, M., Hassan, A. M., Assiri, M. A., Rauf, A., Nazir, M. A. (2024). Engineering of metal–organic framework (MOF) membrane for wastewater treatment: Synthesis, applications and future challenges. Journal of Water Process Engineering, 57, 104676.

Sheikh, M., Pazirofteh, M., Dehghani, M., Asghari, M., Rezakazemi, M., Valderrama, C., & Cortina, J. L. (2020). Application of ZnO nanostructures in ceramic and polymeric membranes for water and wastewater technologies: a review. Chemical Engineering Journal, 391, 123475.

Spellman, F. R. (2014). Handbook of water and wastewater treatment plant operations. CRC Press.

Tang, C. Y., Chong, T. H., & Fane, A. G. (2011). Colloidal interactions and fouling of NF and RO membranes: a review. Advances in colloid and interface science, 164(1-2), 126-143.

T. C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı (2022). Seramik sektörü raporu. Ankara: Sanayi Genel Müdürlüğü Yayınları.

T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. (2020). T.S.V.T. Seramik sektörü raporu.

Uçak, Z. (2023). İçme suyu kaynaklarının arıtımında membran teknolojilerinin etkinliğinin istatistiksel yöntemler ile belirlenmesi (Yüksek lisans tezi, Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).

Vrouwenvelder, J. S., Van Paassen, J. A. M., Wessels, L. P., Van Dam, A. F., & Bakker, S. M. (2006). The membrane fouling simulator: a practical tool for fouling prediction and control. Journal of Membrane Science, 281(1-2), 316-324.

Wanjiya, M., Zhang, J. C., Wu, B., Yin, M. J., & An, Q. F. (2024). Nanofiltration membranes for sustainable removal of heavy metal ions from polluted water: A review and future perspective. Desalination, 117441.

Yeşiltepe, S. A., & Bulut, E. (2025). Seramik endüstrisinde endüstri içi ticaret ve sosyal ağ analizi: Türkiye için Avrupa pazarının başrol oyuncuları üzerine bir değerlendirme. İmtiyaz Sahibi, 5.

Zuo, K., Wang, K., DuChanois, R. M., Fang, Q., Deemer, E. M., Huang, X., Li, Q. (2021). Selective membranes in water and wastewater treatment: Role of advanced materials. Materials Today, 50, 516-532.