

T.C.  
BİLECİK ŐEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
KİMYA ANABİLİM DALI

**ELEKTRİK İLETKENLİĞİ İYİLEŞTİRİLMİŞ POLİANİLİN  
MEMBRANLARIN HAZIRLANMA KOŞULLARININ VE KİRLENME  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HÜSEYİN OĞUZ

TEZ DANIŐMANI  
DOÇ. DR. ADEM SARIHAN

BİLECİK, 2025

10601602

T.C.  
BİLECİK ŐEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
KİMYA ANABİLİM DALI

**ELEKTRİK İLETKENLİĞİ İYİLEŞTİRİLMİŞ POLİANİLİN  
MEMBRANLARIN HAZIRLANMA KOŞULLARININ VE KİRLENME  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HÜSEYİN OĞUZ

TEZ DANIŐMANI  
DOÇ. DR. ADEM SARIHAN

BİLECİK, 2025

10601602

## BEYAN

‘Elektrik İletkenliği İyileştirilmiş Polianilin Membranların Hazırlanma Koşullarının Ve Kirlenme Özelliklerinin İncelenmesi’ adlı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığı bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik şeyh Edebalı Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığı, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.			
<b>DESTEK ALINMIŐTIR</b>	X	<b>DESTEK ALINMAMIŐTIR</b>	
<b>Destek alındı ise;</b>			
<b>Destekleyen kurum; TÜBİTAK</b>			
<b>Desteğin Türü</b>		<b>Proje Numarası</b>	
<b>1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)</b>		121Y244	
<b>2- TÜBİTAK-3501 ARDEB projesi</b>			
<b>Diğer.....</b> .....			
<b>ETİK KURUL onayı var ise;</b>			
<b>ETİK KURUL karar tarih/sayı:</b>		...../..... .....	

**Hüseyin OĞUZ**

**Tarih**

**İmza**

## **ÖN SÖZ**

Bu çalışmanın fikir aşamasından tez yazım aşamasına kadar beni anlayışla ve nezaketle karşılayan, cesaretlendiren, kıymetli hocam Sayın Doç. Dr. Adem SARIHAN'a değerli katkı ve emekleri için büyük şükran ve saygılarımı sunarım.

Tez savunma sınavı jüri üyeleri Sayın Doç. Dr. Murat TUNA' ya ve Doç. Dr. Gökhan SEVİNÇ'e teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 121Y244 Numaralı proje ile desteklenmiştir. Projeye verdiği destekten ötürü TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

Her koşulda yanımda olan, desteklerini esirgemeyen aileme ve eşime teşekkürlerimi sunuyorum.

**Hüseyin OĞUZ**

**2025**

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖN SÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	ix
GRAFİKLER LİSTESİ.....	x
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	3
2.1. Su Arıtımı ve Membranlar.....	3
2.1.1. Su Arıtımının Önemi.....	3
2.1.2. Membranlar ve Tarihçesi.....	4
2.2. Membran Filtrasyon Süreçleri.....	5
2.2.1. Mikrofiltrasyon.....	5
2.2.2. Ultrafiltrasyon.....	5
2.2.3. Nanofiltrasyon.....	6
2.2.4. Ters Ozmoz.....	7
2.3. Membran Hazırlama Teknikleri.....	7
2.3.1. Faz Dönüşüm Metodu.....	7
2.3.2. Arayüzey Polimerizasyonu Yöntemi.....	8
2.4. Membranların Sınıflandırılması.....	8
2.4.1. İnorganik Membranlar.....	10
2.4.2. Kompozit Membranlar.....	11

2.4.3. Polimerik (Organik) Membranlar .....	11
2.5. Membran Hazırlanmasında Kullanılan Polimerler .....	14
2.5.1. Poliviniliden Florür .....	14
2.5.2. Polisülfon .....	15
2.5.3. Polietersülfon .....	15
2.5.4. Polivinil Klorür .....	15
2.5.5. Selüloz .....	16
2.6. Polianilin .....	16
2.6.1. Polianilin (PANI) Yapısı ve Özellikleri .....	16
2.6.2. PANI Sentez Yöntemleri .....	18
2.6.2.1. Kimyasal Oksidatif Polimerizasyon .....	18
2.6.2.2. Elektrokimyasal Oksidatif Polimerizasyon .....	19
2.6.3. Polianilin Membranlar .....	19
2.7. Membranların Kirlenmesi .....	21
2.7.1. Membran Kirletici Türleri .....	21
2.7.1.1. Organik kirlenme .....	22
2.7.1.2. Biyolojik Kirlenme .....	22
2.7.1.3. İnorganik Kirlenme .....	22
2.7.1.4. Kolloidal Kirlenme .....	22
2.7.2. Kirlenme Mekanizmaları .....	23
2.7.2.1. Konsantrasyon Polarizasyonu .....	23
2.7.2.2. Adsorpsiyon ve Gözenek Tıkanması .....	23
2.7.2.3. Jel/Kek Katmanı Oluşumu .....	23
2.8. Membran kirlenme kontrolü ve temizleme yöntemleri .....	24
2.8.1. Kimyasal Temizleme .....	24
2.8.2. Fiziksel Temizleme .....	25

2.9. Literatür Özeti .....	26
3. MATERYAL METOD.....	31
3.1. Kullanılan kimyasallar ve cihazlar .....	31
3.2. Asit Katkılı PANI Yapısının Sentezi.....	31
3.3. Membranların Hazırlanması.....	33
3.4. Polimer ve membranların karakterizasyon yöntemleri.....	35
3.4.1. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) .....	35
3.4.2. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) .....	35
3.4.3. X-ışını kırınımı (XRD).....	35
3.4.4. Su temas açısı.....	36
3.4.5. İletkenlik .....	36
3.5. Membranların performans incelemeleri .....	36
3.5.1. Su tutma.....	36
3.5.2. Gözeneklilik.....	37
3.5.3. Akı .....	37
3.5.4. Geçirgenlik.....	37
3.5.5. Gözenek yarıçapı.....	37
3.5.6. Dışlama.....	38
3.5.7. Molekül ağırlık dışlama sınırı (MWCO) .....	38
3.5.8. Membran kirlenme ve elektriksel temizleme çalışmaları .....	38
4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....	41
4.1. PANI-PAMPSA Yapısının Karakterizasyonu .....	41
4.2. Katkı Maddesi ve Membranların Karakterizasyonu.....	43
4.2.1. XRD analizleri.....	43
4.2.2. SEM analizleri.....	44
4.2.3. FTIR analizleri .....	46

4.2.4. Temas açısı analizleri.....	47
4.2.5. İletkenlik ölçümleri.....	48
4.2.6. Su tutma, gözeneklilik, ortalama gözenek yarıçapı ve geçirgenlik çalışmaları	48
4.2.7. Dışlama ve MWCO çalışmaları .....	49
4.2.8. Kirlenme çalışmaları .....	51
4.2.9. Temizleme Çalışmaları.....	55
5. SONUÇLAR.....	57
KAYNAKÇA .....	61

## ÖZET

### ELEKTRİK İLETKENLİĞİ İYİLEŞTİRİLMİŞ POLİANİLİN MEMBRANLARIN HAZIRLANMA KOŞULLARININ VE KİRLENME ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Bu çalışmada, öncelikle poli (2-akrilamido-2-metil-1-propansülfonik asit) (PAMPSA) ile yüklenmiş polianilin (PANI) yapısı oksidatif polimerizasyon yöntemiyle sentezlenmiş ve sentezlenen PAMPSA yüklü PANI yapısı kullanılarak grafen (Gr) katkılı, elektriksel iletkenliği iyileştirilmiş kompozit membranlar hazırlanmıştır. Hazırlanan membranların yapısal ve morfolojik olarak karakterizasyonu yapılmış, performans ve kirlenme özellikleri incelenmiş ve elektriksel temizleme çalışmaları gerçekleştirilerek elektriksel iletkenlik iyileştirilmesinin temizlemede etkinliği değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen XRD incelemeleri Gr'in membran yapısına katkılı olduğunu doğrulamıştır. Enine kesit SEM görüntü incelemeleri hazırlanan tüm kompozit membranların süngerimsi yapıda olduğunu, Gr katkısı varlığında üst yoğun tabakanın daha gözenekli ancak daha kalın hale geldiğini göstermiştir. İletkenlik ölçümleri Gr katkısı varlığında membran yapısının elektriksel iletkenliğinin yükseldiğini, %5 oranında Gr katkılı membranın  $2,16 \times 10^{-3}$  S/cm iletkenliğe sahip olduğunu ve bu değerin Gr katkısı içermeyen membrana göre 4,2 kat daha yüksek olduğunu göstermiştir. Dışlama çalışmalarında tüm membranların BSA için %90'ın üzerinde, HA için ise %80'in üzerinde dışlama performansı sergilediği görülmüştür. Kirlenme ve basit hidrolik temizleme çalışmaları sonucunda, BSA için toplam kirlenme oranlarının Gr katkısı ve artan Gr oranı ile yükselme gösterdiği ve katkısız membranda %75 seviyesinde olan kirlenme oranı %5 Gr katkılı membranda %77,6 seviyesine yükseldiği, kirlenmenin yüksek oranda tersinmez olduğu belirlenmiştir. HA ile kirlenmede ise nispeten daha düşük oranda kirlenme ve daha yüksek oranda tersinirlik elde edilmiştir. Elektriksel potansiyel uygulaması ile gerçekleştirilen temizleme çalışmaları, elektriksel temizlemenin klasik hidrolik temizlemeye göre hem katkısız hem de %5 oranında Gr katkılı membranda daha yüksek oranda tersinir kirlenme ve akı geri kazanım oranı eldesi sağladığını, %5 oranında Gr katkılı membranda BSA için tersinir kirlenme oranının %5,8'den %39,7 seviyesine, akı geri kazanım oranının ise %28,2'den %61,9 oranına yükseltilebildiğini göstermiştir. Çalışma sonuçları, Gr katkısı ile elektriksel iletkenlik iyileştirmesinin, membranların elektriksel temizleme etkinliğini artırdığı doğrulamıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Polianilin membran, Grafen, İletkenlik, Membran kirlenmesi, Elektriksel temizleme

## ABSTRACT

### INVESTIGATION OF THE PREPARATION CONDITIONS AND FOULING PROPERTIES OF POLYANILINE MEMBRANES WITH IMPROVED ELECTRICAL CONDUCTIVITY

In this study, the poly(2-acrylamido-2-methyl-1-propanesulfonic acid) (PAMPSA) doped polyaniline (PANI) structure was synthesised using the oxidative polymerisation method and graphene (Gr) modified composite membranes with improved electrical conductivity were then prepared using the synthesised PANI structure. The prepared membranes were characterised structurally and morphologically, their performance and fouling properties were investigated and electrical cleaning studies were carried out to evaluate the effectiveness of electrical conductivity improvement in cleaning. XRD analyses confirmed that Gr was modified into the membrane structure. Cross-sectional SEM image examination showed that all composite membranes were sponge like structure and the top dense layer became more porous but thicker with Gr doping. Conductivity measurements revealed that the electrical conductivity of the membrane structure increased with Gr doping and the membrane doped with 5% Gr had a conductivity of  $2.16 \times 10^{-3}$  S/cm, which was 4.2 times higher than the membrane without Gr modification. In the rejection studies, it was observed that all membranes exhibited rejection performance above 90% for BSA and above 80% for HA. As a result of fouling and simple hydraulic cleaning studies, it was determined that the total fouling rates for BSA increased with Gr modification and increasing Gr ratio and the fouling rate increased from 75% in the membrane without additive to 77.6% in the membrane with 5% Gr modified and the fouling was highly irreversible. HA fouling resulted in relatively lower fouling and higher reversibility. The electrical cleaning studies showed that electrical cleaning provided higher reversible fouling and flux recovery rates for both unmodified and 5% Gr modified membranes compared to simple hydraulic cleaning, and the reversible fouling rate for BSA was increased from 5.8% to 39.7% and the flux recovery ratio was increased from 28.2% to 61.9% for 5% Gr doped membrane. With the results of the study, it was confirmed that the improvement of electrical conductivity with Gr additive increases the electrical cleaning efficiency of the membranes.

**Keywords:** Polyaniline membrane, Graphene, Conductivity, Membrane fouling, Electrical cleaning

## ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
<b>Şekil 2.1.</b> Membranların Sınıflandırılması.....	9
<b>Şekil 2.2.</b> Polianilin'in farklı yükseltgenme durumları .....	17
<b>Şekil 3.1.</b> PAMPSA yüklenmiş PANI sentez sistemi şeması .....	32
<b>Şekil 3.2.</b> PAMPSA yüklenmiş PANI sentez sistemi .....	32
<b>Şekil 3.3.</b> PANI-PAMPSA hazırlanma aşaması .....	33
<b>Şekil 3.4.</b> Gr katkılı PANI-PAMPSA membranların hazırlanma basamaklarına ait bazı örnek görüntüler <b>a:</b> Hazırlanan döküm çözeltisinin mekanik karıştırıcı ile karıştırılma süreci, <b>b:</b> karıştırma süreci tamamlandığında döküm çözeltisinden cam yüzeyde film oluşturulması <b>c:</b> cam yüzeyindeki filmin koagülasyon ortamına alınması ve membran oluşumu).....	34
<b>Şekil 3.5.</b> Katkısız, %0,5 ve %5 Gr katkılı PANI-PAMPSA membranlar .....	35
<b>Şekil 3.6.</b> 4 Noktalı iletkenlik ölçer cihazı.....	36
<b>Şekil 3.7.</b> Dikey Akışlı Filtrasyon Sistemi .....	39
<b>Şekil 3.8.</b> Elektriksel temizleme sürecinde kullanılan sistem .....	40
<b>Şekil 4.1.</b> Sentezlenen PANI-PAMPSA yapısına ait SEM görüntüleri .....	41
<b>Şekil 4.2.</b> Sentezlenen PANI-PAMPSA yapısına ait EDX analizleri .....	42
<b>Şekil 4.3.</b> PANI-PAMPSA yapısına ait FTIR spektrumu .....	43
<b>Şekil 4.4.</b> Gr nanopartikülleri ve membranlara ait XRD paternleri .....	44
<b>Şekil 4.5.</b> Katkısız ve Gr katkılı PAMPSA yüklenmiş PANI membranların yüzey SEM görüntüleri ( <b>a:</b> Katkısız, <b>b:</b> %0,5 Gr katkılı, <b>c:</b> %5,0 Gr katkılı).....	44
<b>Şekil 4.6.</b> Katkısız ve Gr katkılı PAMPSA yüklenmiş PANI membranların enine kesit SEM görüntüleri (a: Katkısız, b: %0,5 Gr katkılı, c: %5,0 Gr katkılı).....	45
<b>Şekil 4.7.</b> Katkısız ve Gr katkılı PANI-PAMPSA membranların FTIR spektrumları .....	47
<b>Şekil 4.8.</b> BSA ile kirlenme FTIR spektrumları .....	54
<b>Şekil 4.9.</b> HA ile kirlenme FTIR spektrumları .....	55

## TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
<b>Tablo 3.1.</b> Hazırlanan membranların döküm çözelti bileşimleri .....	33
<b>Tablo 4.1.</b> Hazırlanan membranların temas açıları .....	47
<b>Tablo 4.2.</b> Hazırlanan membranlara ait iletkenlik ölçüm sonuçları .....	48
<b>Tablo 4.3.</b> Hazırlanan membranlara ait % su tutma, % gözeneklilik ve ortalama gözenek yarıçapı ve saf su geçirgenlik sonuçları, .....	49
<b>Tablo 4.4.</b> Hazırlanan membranların BSA dışlama oranları .....	51
<b>Tablo 4.5.</b> BSA kirlenme çalışma sonuçları .....	51
<b>Tablo 4.6.</b> HA kirlenme çalışma sonuçları .....	51
<b>Tablo 4.7.</b> BSA kirlenme ve elektriksel temizleme çalışması sonuçları .....	56

## GRAFİKLER LİSTESİ

	Sayfa
<b>Grafik 4.1.</b> BSA dışlama çalışmalarında kullanılan kalibrasyon grafiği.....	<b>50</b>
<b>Grafik 4.2.</b> HA dışlama çalışmalarında kullanılan kalibrasyon grafiği.....	<b>50</b>

## KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

**PANI:** Polianilin

**HCl:** Hidroklorik Asit

**PAMPSA:** Poli (2-akrilamido-2-metil-1-propansülfonik asit)

**Gr:** Grafen

**APS:** Amonyum Persülfat

**NMP:** N-metil-2-pirolidon

**4-MP:** 4-metilpiperidin

**MF:** Mikrofiltrasyon

**NF:** Nanofiltrasyon

**UF:** Ultrafiltrasyon

**RO:** Ters Ozmoz

**MWCO:** Moleküler Ağırlık Dışlama Sınırı

**SEM:** Taramalı Elektron Mikroskobu

**XRD:** X Işını Kırınımı

**FTIR:** Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi

**XPS:** X Işını Spektroskopisi

**EDX:** Enerji Dağılımı X-Işını Analizi

**ES:** Emeraldin Tuzu

**EB:** Emeraldin Bazı

**BSA :** Bovin serum albümin

**HA :** Hümik Asit

## 1. GİRİŞ

İnsan vücudunun ve dünyanın 3/4'ünü oluşturan su, yaşamımızı devam ettirebilmemiz için gereken en önemli maddedir. Günümüz tüketim toplumunda su kaynaklarımızın hızla azaldığı ve önlem alınmazsa bu durumun ilerde büyük bir sorun oluşturacağı bilinmektedir (<https://www.tiski.gov.tr/icerik/detay.aspx?Id=42>, t.y.). İklim değişikliği, nüfus artışı ve artan kentsel yerleşimler, su temini sistemleri için büyük zorluklar oluşturmakta ve sınırlı tatlı su kaynakları üzerinde artan talep oluşturmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü tarafından, dünya genelinde 844 milyon insanın güvenli içme suyu hizmetinden yoksun olduğu tahmin edilmektedir. Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi doğrultusunda, ülkelerden 2030 yılına kadar herkese güvenli ve uygun maliyetli içme suyu sağlanması istenmektedir (Sustainable DG Fund, 2015). Verimli ve maliyet etkin arıtma teknolojilerine yatırım yapmak, özellikle düşük ve orta gelirli ülkelerde su kıtlığının etkilerini hafifletmek için önemlidir (Hoslett vd., 2018:1269). Bu teknolojilerin arasında membran ayırma teknolojileri, daha az enerji tüketimi, daha az kirletici gaz salınımı ve daha az kimyasal kullanımı sebebiyle geleneksel teknolojilere göre daha sürdürülebilir ve çevre dostu teknikler olarak önümüze çıkmaktadır (Karki vd., 2024: 2).

Membranlar, basit olarak seçici geçirgen zarlar olarak tanımlanmakta ve başta su arıtımı olmak üzere birçok sektörde ayırma işlemlerinde kullanılmaktadır. Membranlar farklı malzemelerden üretilirler. Membranlar üretildikleri malzemeye göre biyolojik ve sentetik olarak iki gruba ayrılabilir. Sentetik membranlar ise organik (polimerik) ve inorganik (sentetik, metalik) olarak ikiye ayrılabilir (Aslan, 2016: 19).

Membran hazırlamada kullanılan polimerler arasında polianilin yüksek su severliği, iletken yapısı, kolay işlenebilirlik, çevresel (Moo Lee, 1999: 41-46), fiziksel, kimyasal, mekanik kararlılık ve nispeten ucuz bir monomerden basit sentez edilebilme (Hu, vd., 2011: 8453-8457, Luo, vd. 2007: 8132-8135) gibi özellikleri ile oldukça dikkat çeken ve araştırmacılar tarafından tercih edilen bir polimerdir. PANI polimer(ler)i yapılarındaki asit katkıları sayesinde iletken yapıya sahiptir (Ball, vd. 1999: 1311-1312; Shen, vd. 2018: 336-344). HCl gibi küçük yapıdaki asitler yapıya iletkenlik kazandırmasına rağmen bir süre sonra kullanım şartlarına bağlı, çeşitli sebeplerle yapıdan uzaklaşabilmekte ve bu nedenle hem polimerik malzemenin yapı ve performans özellikleri bozulmakta hem de elektriksel özellikleri olumsuz yönde etkilenmektedir (Padaki, vd. 2011: 409-414). Bu durumun önüne geçmek amacıyla yapı içerisinde nispeten daha büyük yapıdaki organik veya polimerik asitlerin kullanılması oldukça olumlu sonuçlar oluşturmaktadır. Ayrıca bu asitlerin polimerik yapıya

sentez sürecinde dâhil edilmesi, gerek yapı ile çok daha kuvvetli etkileşimlerle tutulması ve yapıdan uzaklaşmaması gerekse asidik grupların polimerde homojen bir şekilde bulunabilmesi bakımından, polimer sentezi sonrasında gerçekleştirilen asit modifikasyonuna göre, daha etkili ve işlevseldir.

Membran filtrasyon süreçleri üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar, membran kirlenmesinin bu süreçlerdeki en önemli problem olduğunu göstermektedir (Jiang vd., 2017: 12). Membran kirlenmesi, çözülmüş yapıların ya da partiküllerin membran yüzeyinde veya gözenekleri içerisinde birikmesi sonucu membran performansının olumsuz yönde etkilenmesidir. Kirlenme, membran geçirgenliğini azaltır, arıtılmış çözelti (su) kalitesini olumsuz etkileyebilir, yüksek basınç gereksinimine sebep olur, membran kullanım ömrünü kısıtlar ve böylece filtrasyon sürecinin maliyetini yükseltir (Liao vd., 2018: 2). Membran kirlenme kontrol ve/veya temizleme yöntemleri, süreç içerisinde kimyasal kullanılıp kullanılmamasına bağlı olarak, kimyasal temizleme ve fiziksel temizleme yöntemleri olarak 2'ye ayrılır. Fiziksel temizlemede herhangi bir kimyasal kullanımı olmadan, hidrolik, mekanik, ultrasonik ve elektriksel vb. kuvvetler kullanılır. Kimyasal temizlemede ise kirlilik türüne göre belirli özelliklere sahip kimyasal maddeler temizleme sürecine dâhil edilirler. Kimyasal temizleme sürecinde kullanılan kimyasallar genelde çevreye ve sağlığa zararlı kimyasallardır (Arnal vd., 2011: 71) ve temizleme süreçlerinde membran yapısına zarar verme riskleri bulunmaktadır. Kimyasal temizlemenin bahsi geçen dezavantajları ve özellikle çevreye verebileceği olumsuz etkiler sebebiyle araştırmacılar, nispeten daha çevreci ve yeşil olan fiziksel temizleme tekniklerinin kullanılması ve geliştirilmesi odağındaki çalışmalara daha yoğun ilgi göstermektedir. Fiziksel temizleme yöntemleri arasında ultrasonik ve elektriksel kuvvetlerin kullanıldığı teknikler yenilikçi ve gelişmekte olan teknikler olarak bilinmektedir (Shi vd., 2014: 5).

Bu tez kapsamında poli (2-akrilamido-2-metil-1-propansülfonik asit) (PAMPSA) ile yüklenmiş ve grafen nanopartikülleri kullanılarak modifiye edilmiş polianilin temelli elektriksel özellikleri iyileştirilmiş kompozit membranlar hazırlanmıştır. Hazırlanan membranların yapı, morfoloji, performans karakterizasyonları gerçekleştirilmiş ve çeşitli kirleticilerle kirlenme özellikleri incelenmiştir. Ayrıca kirlenmiş membranların elektriksel potansiyel kullanımı temizleme çalışmaları gerçekleştirilmiş ve iletkenlik iyileştirilmesinin elektriksel temizlemede etkinliği araştırılmıştır.

## **2. KURAMSAL TEMELLER**

### **2.1. Su Arıtımı ve Membranlar**

#### **2.1.1. Su Arıtımının Önemi**

Su temel yaşam kaynağımızdır. Suyun varlığı, sosyal ve ekonomik gelişim ile yoksulluğun azaltılmasında kritik bir rol oynamaktadır (Keith, 2006: 6). Su kirliliği ve su yetersizliği nedeniyle çevresel yük ciddi şekilde artmaktadır. Günümüzde doğal su kaynaklarının tahrip edilmesi sonucunda suyun bulunabilirliği azalmaktadır (Carolin vd., 2017: 2783). Dünya yüzeyinin %71'i suyla kaplıdır, ancak bunun sadece %0,3'ü kullanılabilir durumdadır (Bijekar vd., 2022: 1). Hızlı şehirleşme, nüfus artışı, kötüye kullanım ve iklim değişikliği nedeniyle temiz suya olan talebin artması ve suyun kıtlığı, acil olarak çözülmesi gereken sorunların başında gelmektedir. Dünyadaki her on kişiden neredeyse ikisi, güvenli içme suyuna erişememekte olup Dünya Sağlık Örgütü'ne göre, her gün 3900 çocuk, güvenli olmayan su veya kötü hijyen nedeniyle bulaşıcı hastalıklardan dolayı hayatını kaybetmektedir. Birleşmiş Milletler Dünya Su Kalkınma Raporunda bu durumun 2050 yılında daha endişe verici boyutlara ulaşacağı ve o dönemde, dünya nüfusunun en az dörtte birinin, kronik veya tekrar eden tatlı su kıtlığı çeken bir ülkede yaşayacağını belirtmektedir (Lee vd., 2016: 17).

Su kirliliği, genel olarak toksik maddelerin endüstrilerden veya diğer kaynaklardan arıtılmadan doğrudan suya salınması nedeniyle su kalitesinin azalması olarak tanımlanır. Kimyasalların yer yüzeyine sızmasından dolayı içme suyu olarak kullandığımız kaynaklarda kirlenmektedir (Saravanan vd., 2022: 2). Su kaynaklarındaki kirlilik dünya üzerinde sürekli artmakta olup insan sağlığı ve su ekosistemleri üzerinde ciddi tehditler oluşturmaktadır. Bu nedenle, suların düşük maliyetli, uygulanabilir ve sürdürülebilir teknolojilerle arıtılması büyük önem taşımaktadır (Xiang, vd., 2022: 2). Bunun sonucu olarak su arıtma teknolojilerinde araştırmaların sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Suyun arıtılarak yeniden kullanımı teşvik edilmekte ve su kalitesinin iyileştirilmesi araştırmacıların ilgi alanlarının başında gelmektedir (Ahmed vd., 2021: 2).

Su arıtımı, arıtım sonrasında kullanılma amacına göre suyun kalite standartlarına uygun hale getirilmesini sağlayan bir süreçtir. Gelişmiş ülkelerde yüzey suyu, çeşitli arıtma adımlarını içeren atıksu arıtma tesislerinde ve içme suyu arıtma tesislerinde işlenmektedir. Geleneksel ayırma yöntemlerine göre yüksek verimlilik, düşük enerji tüketimi ve çevre uyumluluğu gibi avantajlarından dolayı membran ayırma teknolojilerinin önemi her geçen gün artmakta ve daha çok tercih edilir hale gelmektedir (Li vd., 2025: 2).

### 2.1.2. Membranlar ve Tarihçesi

Membran, boyutlarına veya afinitelerine (çekimlerine) göre basınç, sıcaklık, elektrik veya konsantrasyon farkı gibi bir potansiyel gradyanı uygulayarak istenmeyen türleri besleme çözeltisinden ayıran seçici bir bariyer görevi gören ince bir yarı geçirgen malzeme tabakası olarak tanımlanır (Shaban vd., 2024: 2). Membran teknolojisi düşük maliyeti, daha az enerji tüketimi, temiz, uygulanabilir ve esnek tasarım sistemleriyle yüksek kaliteli su üretimi ve daha az alan gereksinimi gibi avantajları nedeniyle tercih edilmektedir (Al-Jubouri vd., 2023: 2). 1960'lı yıllarda faz dönüşüm metoduyla üretilen ticari membranlar piyasaya girmeye başlamıştır. Bu gelişmeyle birlikte, membran ayırma teknolojisi hızla ilerlemiş ve günümüzde çevre, gıda ve tıp gibi birçok endüstride kritik bir rol üstlenmiştir. Yüksek ayırma verimliliği, düşük enerji tüketimi ve minimum kimyasal gereksinimi gibi avantajları sayesinde, bu teknoloji su ve atıksu arıtımı, gıda işleme, farmasötik üretim ve biyoteknoloji gibi çeşitli uygulama alanlarında yaygın biçimde kullanılmaktadır (Yuan vd., 2021: 1). Bununla birlikte, membran kirlenmesi, düşük kimyasal stabilite ve kısa kullanım ömrü gibi dezavantajları vardır ve bu kusurları gidermek için yoğun araştırma ve geliştirme çalışmaları yürütülmektedir (Tai vd., 2025: 2-3).

Membran teknolojisi son 50 senedir farklı endüstriyel alanlarda kendini göstermektedir. Membranlar tarihsel gelişimi içerisinde kendine 1950'lerden önce yer bulmuş olsa da çok yaygın olarak kullanım alanına sahip olmayan membran teknolojilerinin gelişiminde kritik rol oynayan olaylardan ilki Nollet'in 1752'de bir tarafta su-etanol karışımı diğer tarafta su ortamı bulunurken, aradaki malzemenin seçici olarak etanolü geçirdiğini keşfetmesidir. Nollet'in bu sayede yarı geçirgen membran ve ozmotik basınç kavramlarını ilk keşfeden kişi olduğu düşünülmektedir (Koyuncu, vd., 2018: 15-16). 1855 yılında Fick tarafından ortaya konan sınır tabakalardan madde taşınımı kavramı ile 1866 yılında Thomas Graham tarafından ileri sürülen çözünme-difüzyon mekanizması kavramı, membran bazlı ayırma süreçlerinin temelini oluşturmaktadır. Membranların pratik uygulamaları ise 1907 yılında Benchold'un gözenek boyutu derecelendirilmiş nitroselüloz membranlar üretmesiyle başlamıştır. 1930'lara gelindiğinde, membran üretim tekniklerindeki gelişmeler sayesinde mikroporöz kollodion membranlar küçük ölçekli olarak ticarileştirilmeye başlanmıştır (Valappil vd., 2021:106). 1960 yılında Loeb ve Sourirajan tarafından geliştirilen asimetrik selüloz asetat membran, membran teknolojisinde devrim olarak nitelendirilmektedir. Bu membran, deniz suyunun ters ozmoz yoluyla tuzdan arındırılmasında büyük ölçekli uygulamalara olanak sağlayacak seçicilik ve kararlılık özelliklerine sahip bir malzemenin (membranın) elde edilmesinde gerekli olan

birtakım temel zorlukların aşılmasını mümkün kılmıştır (Calvo vd., 2021: 1-2). 1970’li yılların başında günümüzde nanofiltrasyon (NF) olarak adlandırdığımız membranlar da dahil olmak üzere çok çeşitli membranlar ticari olarak üretilmeye başlanmıştır (Linder & Kedem, 2021: 5). 1980’lerden itibaren ultrafiltrasyon, mikrofiltrasyon, ters ozmoz ve elektrodializ proseslerinin tümü dünya çapında yaygın olarak büyük tesislerde kurulmaya başlanmıştır (Yildiz vd., 2013: 64).

## **2.2. Membran Filtrasyon Süreçleri**

Membran filtrasyon, atıksu arıtımında yaygın olarak kullanılan, basınç temelli bir ayırma teknolojisidir. Bu yöntem, yalnızca ağır metal giderimi sağlamakla kalmayıp aynı zamanda dezenfeksiyon işlemlerinde de etkin bir rol oynamaktadır. Membran filtrasyon süreci; partikül boyutu, çözelti konsantrasyonu, pH ve uygulanan basınca bağlı olarak gerçekleşmektedir. Membranların kimyasal ajanlarla işlenmesi yoluyla filtrasyon etkinliği artırılmaktadır (Carolin vd., 2017: 2786). Basınç temelli membran filtrasyon süreçleri, gözenek boyutlarına ve ayırma mekanizmalarına göre mikrofiltrasyon (MF), ultrafiltrasyon (UF), nanofiltrasyon (NF) ve ters ozmoz (RO) olarak sınıflandırılabilir.

### **2.2.1. Mikrofiltrasyon**

MF, basınç temelli çalışan ve genellikle 100–1000 nm aralığında partiküllerin (örneğin, kolloidal maddeler ve nanopartiküller) ayrılmasını sağlayan bir membran ayırma yöntemidir. NF ve RO membran sistemlerinden önce ön arıtım olarak yaygın şekilde kullanılan MF, özellikle membran kirlenmesini azaltmak amacıyla tercih edilmektedir (Singh vd., 2023: 54). Geniş gözenek çapı aralığı sayesinde MF, yalnızca atıksu arıtımı ile sınırlı kalmaksızın; ilaç sanayi, gıda endüstrisi, tuzdan arındırma ve biyoteknoloji gibi pek çok alanda yaygın uygulama alanı bulmaktadır (Anis vd., 2019: 1). MF membranları; poliviniliden florür (PVDF), polisülfon (PSf), poliamid (PA), selüloz asetat (CA), politetrafloroetilen (PTFE), olefinler ve polikarbonat (PC) gibi çok çeşitli polimerlerin kullanımına olanak tanımaktadır (Gul vd., 2021: 3). Ancak MF’nin en büyük dezavantajı, gözeneklerinin büyük olması nedeniyle sudan mikroskobik boyuttaki maddeleri ayıramamasıdır (Shaban vd., 2024: 3).

### **2.2.2. Ultrafiltrasyon**

UF, yaklaşık 5 – 100 nm arasındaki bileşenleri ayırabilen bir yöntem olup, MF ile RO arasında yer almaktadır (Singh vd., 2023: 55). Tüm filtrasyon uygulamalarında filtre ortamının geçirgenliği; numunenin kimyasal, moleküler veya elektrostatik özelliklerinden etkilenebilse de UF’de ayırmanın temel kriteri molekül boyutudur. Bu yüzden UF ile ayrılacak moleküller

belirli boyutlarla sınırlanmıştır (Shaban vd., 2024: 4). UF, MF membranları tarafından tutulamayan partiküllerin uzaklaştırılmasında etkili bir yöntemdir. MF'den temel farkı, daha fazla partikül fraksiyonunu tutabilmesi ve membran işlevinin sürdürülebilmesi için daha yüksek besleme basıncı gerektirmesidir. UF membranları ayrıca, viral ve organik kirleticilerin uzaklaştırılmasında daha yüksek verimlilik göstermektedir. Günümüzde UF membran teknolojisinin gelişimi, enerji verimliliği, düşük üretim maliyeti ve yüksek kirlenme önleyici özellikleri gibi avantajlarından dolayı tercih edilmektedir (Ali vd., 2025: 12-13). UF teknolojisi, atıksu arıtımı, su geri kazanımı, endüstriyel temizlikte yüzey aktif madde geri kazanımı, gıda işleme, protein ayırıştırma ve gen mühendisliği gibi pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Lee vd., 2016: 19).

### **2.2.3. Nanofiltrasyon**

NF membranları, ilk olarak 1980'li yıllarda tanımlanmıştır. Özellikleri bakımından, RO ile UF arasında konumlanmaktadır (Tul Muntha vd., 2017: 842). Nanofiltrasyon, gelişmiş bir membran teknolojisi olarak su ve atıksu arıtımı ile iki değerlikli metallerin etkin geri kazanımı amacıyla kullanılmaktadır. Bu teknik, yarı geçirgen organik bir membran üzerinden uygulanan basınç farkı ile maddelerin ayrılmasını sağlar (Kafle vd., 2024: 8). NF membranları 0.5–2 nm gözenek çapına ve 200–1000 Da molekül ağırlık dışlama sınırına (MWCO) sahiptir. NF membranlar iyonlar ve molekülleri ayırmada iyi bir performans sergilemektedir. Yüzey yükü özelliklerine bağlı olarak, NF membranlar negatif yüklü, nötr yüklü ve pozitif yüklü olarak sınıflandırılabilir. Günümüzde piyasada bulunan NF membranların çoğu, negatif yüzey yüküne sahiptir (Zhang vd., 2024: 1). Membran materyali açısından bakıldığında, polimer bazlı NF membranlar atıksu arıtımında yaygın olarak kullanılsa da kirlenme eğilimi ve uzun vadeli stabilite gibi dezavantajlara sahiptirler (Ahmad vd., 2022: 2). NF membranları; organik membranlar, inorganik membranlar ve karışık matrisli membranlar gibi çeşitli malzemelerden ve farklı üretim yöntemlerinden elde edilebilmektedir. NF membranları, çeşitli alanlarda geniş uygulama potansiyeline sahiptir. Bu alanlar arasında tuzlu göllerden lityum çıkarılması, sert suların yumuşatılması, ilaç veya boya endüstrilerinde reaksiyon karışımlarından ara ürünlerin ayrılması, klor-alkali endüstrisinde reaksiyon çözeltilerinin geri kazanımı ve ağır metaller, antibiyotikler veya boyar maddeler gibi kirleticileri içeren atık suların arıtılması yer almaktadır (Zhou vd., 2023: 2).

#### **2.2.4. Ters Ozmoz**

RO, iyonları, istenmeyen molekülleri ve büyük partikülleri sudan uzaklaştırmak için yarı geçirgen bir membran kullanan ileri düzey bir filtrasyon yöntemidir (Ouyang vd., 2019: 1357). Doğal olarak gerçekleşen ozmoz sürecinde, çözücü, çözünen madde konsantrasyonunun düşük olduğu bölgeden yüksek olduğu bölgeye doğru hareket ederek, membranın her iki tarafındaki çözünen madde konsantrasyonunun dengelenmesini sağlar ve bu durum ozmotik basıncı oluşturur. RO membranına uygulanan basınç, çözücünün akış yönünü tersine çevirmek için kullanılır. Uygulanan basınç ozmotik basınçtan büyük olduğunda ( $\Delta p > \Delta \pi$ ), besleme suyu membrandan geçerek tuz ve diğer mineralleri geride bırakır ve saflaştırılmış su olarak elde edilir. RO membranının performansını belirleyen iki temel parametre, su akı ve tuz tutma oranıdır (Hailemariam vd., 2020: 3). RO membran teknolojisi, deniz suyu arıtımı, içme suyu üretimi, acı su arıtımı ve atık su arıtımı gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. RO, günümüzde tuzdan arındırma işlemleri için en enerji verimli teknoloji olarak kabul edilmekte olup, yaklaşık 1.8 kWh/m<sup>3</sup> enerji tüketimiyle diğer teknolojilere kıyasla çok daha düşük enerji maliyetine sahiptir (Jiang vd., 2017: 568).

### **2.3. Membran Hazırlama Teknikleri**

Membran üretimi için faz dönüşümü, arayüzey polimerizasyonu, ince film kaplama, çözelti dökümü, ekstrüzyon, eriyik presleme, germe ve track-etching gibi birçok teknik bulunmaktadır. Bu teknikler içerisinde faz dönüşümü ve arayüzey polimerizasyonu teknikleri diğer tekniklerden çok daha yaygın kullanım oranına ve öneme sahiptir.

#### **2.3.1. Faz Dönüşüm Metodu**

Loeb ve Sourirajan tarafından selüloz asetat esaslı tuzdan arındırma membranlarının hazırlanması için geliştirilen faz ayrımı yöntemi, günümüzde polimerik membranların üretimi için ticari olarak en uygulanabilir yöntem olarak kabul edilmektedir. Bunun başlıca nedenleri, işlem kolaylığı, ekonomik uygulanabilirlik, ince ve hatasız membranlar üretme kabiliyeti ve geniş yüzey alanlarına sahip yüksek akı değerlerinin pratik uygulamalarda yarar sağlamasıdır (Valappil vd., 2021: 112). Faz ayrımının temelinde, bir çözücü ile bir çözücü olmayan madde arasındaki bileşen değişimi yer alır. Bu değişim sonucunda membran yapısı oluşur. Üretim süreci; daldırma ile çöktürme ve kontrollü buharlaşma ile çöktürme gibi farklı yöntemlerle gerçekleştirilebilir (Ravichandran vd., 2022: 2). Faz dönüşüm metodu süreci kontrol eden parametreye bağlı olarak çözücü olmayan madde ile indüklenen faz ayrımı, ısı ile indüklenen faz ayrımı, buhar ile indüklenen faz ayrımı, buharlaşma ile indüklenen faz ayrımı olmak üzere

dört kategoriye ayrılmıştır. Bu sınıflandırma, kullanılan faz dönüşüm yönteminin temelinde yatan mekanizmayı ve membran oluşum sürecini belirlemede önemli rol oynar (Duraikkannu vd., 2021: 3). Faz ayrımı yöntemleri, nispeten basit ekipman gerektirmesi ve kolay uygulanabilirliği nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu yöntemlerde genellikle deiyonize su, buharlaşma ile indüklenen faz ayrımı ve sıvı ile indüklenen faz ayrımı süreçlerinde çözücü olmayan ortam, ısı ile indüklenen faz ayrımı yönteminde ise koagülasyon ortamı olarak kullanılır. Bu da süreçleri ekonomik hale getirir. Ayrıca, geniş bir malzeme yelpazesi ile uyumlu olmaları, bu yöntemlerin avantajları arasındadır. Bu yöntemin mevcut en önemli dezavantajlardan biri, kullanılan çözücülerin toksik olmasıdır. Ayrıca, kirlenme karşıtı amaçlarla organik veya inorganik katkı maddelerinin membran matrisine ilavesi, çözünürlük problemlerine yol açabilir. Bu durum, heterojen dağılımlar oluşmasına, membran stabilitesinin bozulmasına ve dolayısıyla kirlenme önleyici performansının azalmasına neden olabilir (Geleta vd., 2023: 3).

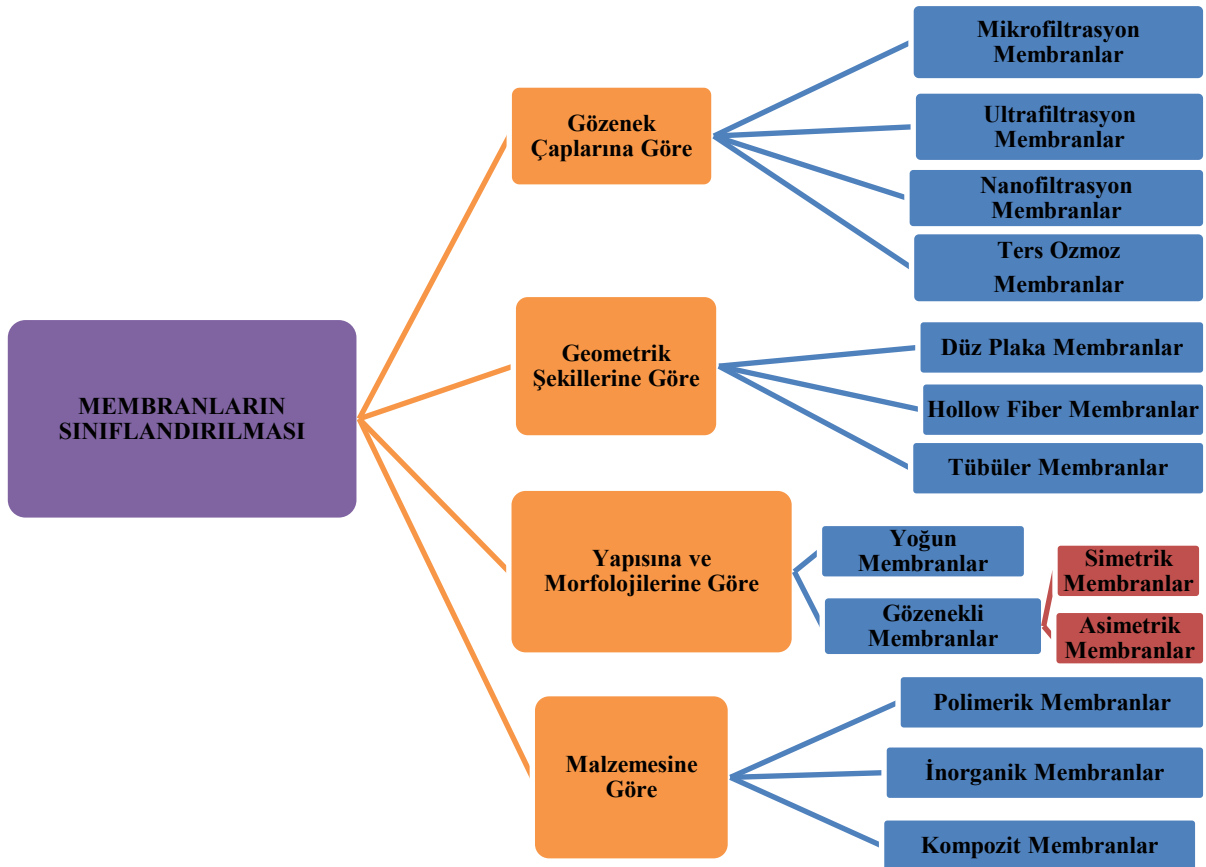
### **2.3.2. Arayüzey Polimerizasyonu Yöntemi**

Arayüzey polimerizasyonu, ince film kompozit RO ve NF membranlarının ticari olarak üretilmesinde en önemli yöntem olarak kabul edilmektedir. İlk ara yüzey polimerizasyonu ile sentezlenmiş ince film kompozit membranlar, Cadotte ve arkadaşları tarafından geliştirilmiş ve RO uygulamaları için membran performansında önemli bir atılım olarak değerlendirilmiştir (Lalia vd., 2013: 82). Arayüzey polimerizasyonu yönteminde, iki farklı ortamda (sulu ve organik) bulunan ve birbiriyle karışmayan reaktif monomerlerin kopolimerizasyonu ile, mikro gözenekli bir alt tabaka yüzeyinde yüksek derecede çapraz bağlı bir poliamid aktif tabaka oluşur (Jaafar & Nasir, 2022: 2). Bu teknikle ısı ve kimyasal olarak kararlı membranlar üretilebilir. Artırılmış performans, ultra yüksek geçirgenlik, yüksek ret oranları ve homojen polimerizasyon bu tekniğin avantajları arasında yer almakta olup Poliamid (PA) seçici tabakasının oluşumu için önemli miktarda organik çözücü ve monomer gerektirmesi ise dezavantajları arasındadır (Chong vd., 2025: 77).

### **2.4. Membranların Sınıflandırılması**

Membranlar gözenek çaplarına, geometrik şekillerine, kullanılan malzemeye ve morfolojik yapısına göre aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir. Kullanılacak üretim tekniğinin seçimi, üretilen membranın verimliliği, özellikleri ve üretim maliyeti gibi faktörlere bağlıdır. Membranların sınıflandırılmasına ait tablo Şekil 2.1’de verilmiştir.

Membranlar gözenek çaplarına göre, kullanıldıkları filtrasyon süreçlerinin adları ile, MF, UF, NF ve RO membranları şeklinde; geometrik şekillerine göre ise düz tabaka, tübüler ve içi boş fiber (hollow fiber) membranlar olmak üzere sınıflandırılmaktadır. Malzemelerine göre ise organik (polimerik), inorganik (seramik esaslı) ve kompozit membranlar olmak üzere üçe ayrılırlar (B. Li vd., 2023: 2). Bu sınıflandırmalar farklı uygulamalara uygun membran tipinin seçilmesinde ve geliştirilmesinde önemli bir rol oynar (Kanth vd., 2025: 1).



Şekil 2.1. Membranların Sınıflandırılması

Kaynak: (Koyuncu, 2018: 39-49)

Membranlar, yapılarına ve morfolojilerine göre yoğun, gözenekli (simetrik veya asimetrik), kompozit olmak üzere üçe ayrılır. Yoğun membranlarda, geçirgenlik genellikle oldukça düşüktür; dolayısıyla mekanik stabilitenin sağlanabilmesi için belirli bir minimum kalınlık gereklidir. Membran yapısının bu özelliği, ayırma performansı ile yapısal dayanıklılık arasında bir denge kurulmasını zorunlu kılar. Bu nedenle, yüksek geçirgenlik istenen uygulamalarda bu tür membranlar ancak sınırlı koşullarda tercih edilebilir (Juber vd., 2021: 7).

Gözenekli membranlar gözenek çaplarına göre mikro gözenekli ( $dp < 2 \text{ nm}$ ), mezo gözenekli ( $2 \text{ nm} < dp < 50 \text{ nm}$ ) ve makro gözenekli ( $dp > 50 \text{ nm}$ ) olarak ayrılabilir. Gözenekli membranlar yapılarına göre ise simetrik (izotropik) ve asimetrik (anizotropik) şeklinde sınıflandırılırlar (Ladewig & Al-Shaeli, 2017: 14). İzotropik membranlar, kimyasal bileşimleri ve fiziksel yapıları boyunca homojen bir özelliğe sahiptir. Bu tür membranlar mikro gözenekli olabileceği gibi yoğun (gözeneksiz) yapıda da olabilir. Mikro gözenekli olanlar yüksek geçirgenliğe sahipken, yoğun yapıları olanların geçirgenliği düşüktür ve bu nedenle kullanım alanları sınırlıdır. Mikrofiltrasyon işlemlerinde genellikle izotropik mikro gözenekli membranlar tercih edilmektedir. Anizotropik membranlar ise homojen olmayan bir yapıda olduklarından dolayı farklı topolojik ve kimyasal özelliklere sahip birden fazla katmandan oluşurlar. Bu membranlarda, ince ve seçici bir tabaka, daha kalın ve geçirgen bir destek katmanının üzerinde yer alır. Bu yapı özellikle ters ozmoz gibi ileri seviye ayırma işlemleri için oldukça uygundur (Birniwa vd., 2024: 4).

Gözenekli bir yapıyı kaplayan yoğun bir üst tabakadan oluşan ince film kompozit membranlar, asimetrik membranlara alternatif olarak kullanılabilir. İnce film kompozit membranların hazırlanmasında malzemelerin gözenek boyutunu kontrol etmek için çok sayıda adım içeren karmaşık prosedürler içeren çeşitli teknikler uygulanmaktadır. Günümüzde mevcut membranların çoğu asimetrik ve kompozit yapıdadır.

#### **2.4.1. İnorganik Membranlar**

İnorganik membranlar, yüksek termal stabiliteye, iyi mekanik ve yapısal dayanıklılığa sahip seramik ve metal bazlı membranlar olarak tanımlanır (Li vd., 2025: 2). Seramik membranlar mikro gözenekli yapıda, termal olarak kararlı ve kimyasal olarak dayanıklı olmalarından dolayı genellikle mikrofiltrasyon işlemlerinde kullanılırlar. Ancak, yüksek maliyet ve mekanik kırılabilirlik gibi dezavantajları bu membranların yaygın olarak kullanımını kısıtlamaktadır. Metal bazlı membranlar ise genellikle paslanmaz çelikten, oldukça ince ve gözenekli yapıda üretilirler. Bu membranlar esas olarak gaz ayırma uygulamalarında kullanılır; ancak yüksek sıcaklıklarda su filtrasyonu veya membran taşıyıcı olarak da kullanılabilirler (Abd El-Ghaffar & Tieama, 2017: 63). Son yıllarda inorganik membranlara olan ilginin artmasının temel nedeni, bu membranların yüksek sıcaklık ve basınca karşı üstün dayanıklılıklarıdır. Bu membranlar çeşitli malzemelerden hazırlanabilmekte olup, çözünme-difüzyon mekanizmasından iyonik-elektronik iletkenliğe kadar farklı ayırma mekanizmalarına göre çalışırlar (Kurniawan vd., 2024: S.6788). Genel olarak inorganik membranlar gözenekli veya gözeneksiz olmak üzere iki kategoriye ayrılır. Gözenekli inorganik membranlar genellikle

zeolit membranlar ve metal-organik kafes (MOF) membranlarını içerir; bu membranların her ikisi de nanometre boyutunda gözeneklere sahiptir. Gözeneksiz inorganik membran malzemeleri ise genellikle karışık iletken oksit seramik ile ergimiş karbonat fazlarını içeren çift fazlı kompozitlerdir. Bu tür gözeneksiz membranlar genellikle mutlak CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> seçiciliğine sahiptir, ancak CO<sub>2</sub> geçirgenlikleri düşüktür; bu da onları pratik gereksinimler açısından cazip kılmaz (Chen vd., 2021: 183).

İnorganik membranların düzenli gözenek yapısı, homojen morfolojisi ve yüksek kimyasal direnci gibi umut vaat eden özellikleri, onları gaz ayrımı, sıvı filtrasyonu, kataliz, enerji üretimi ve ilaç taşıma gibi çeşitli ayırma ve saflaştırma uygulamaları için değerli kılmaktadır. Petrokimya endüstrisinde, ham petrolün fraksiyonlanması ve rafinasyonu, doğal gaz arıtımı ve farklı hidrokarbon karışımlarının ayrılması gibi işlemlerde yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Zango vd., 2024: 3). Bununla birlikte, inorganik membranların endüstriyel gelişimini ciddi şekilde sınırlayan yüksek maliyeti, düşük üretim performansı ve hatasız membran hazırlama zorluğu gibi dezavantajları vardır (Niu vd., 2024: 3).

#### **2.4.2. Kompozit Membranlar**

Kompozit membran malzemeleri, atık su arıtımında kullanılan etkili bir malzeme olarak incelenmektedir. Bu membranlar çok ince yoğun bir tabaka ile gözenekli bir destek tabakasından oluşur ve farklı malzemelerin kombinasyonunu içerir. Asimetrik membranlarla karşılaştırıldığında, farklı mekanik veya gerilme mukavemetlerine sahip malzemeler, işlevsel gereksinimlere göre seçilebilir. Bu yöntem, birden fazla membran türünün hazırlanmasında daha esnek bir yaklaşım sunar (B. Li vd., 2023: 6). Kompozit membranlar, fiziksel harmanlama, sol-jel yöntemi, infiltrasyon ve membran çökeltme gibi çeşitli yöntemlerle üretilebilirler (Imteyaz vd., 2025: 6). Karışık matrisli membranlar (Mixed-Matrix Membranes, MMM'ler), organik polimer matris içerisine gömülü inorganik veya organik dolgu malzemelerinden oluşan gelişmiş kompozit membranlardır. Bu dolgu maddelerinin entegre edilmesindeki temel amaç, her iki bileşenin avantajlı özelliklerini birleştirerek özellikle seçicilik ve geçirgenlik gibi alanlarda tüm membranın performansını artırmaktır. Bu membranlar; su arıtımı, gaz ayrımı ve pervaporasyon gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Arundhathi vd., 2024: 4,16).

#### **2.4.3. Polimerik (Organik) Membranlar**

Polimerik membranlar, son yıllarda su arıtımı, gaz ayrımı ve kirletici giderimi gibi çeşitli çevresel sorunlara çözüm sunmadaki kritik rolleri nedeniyle önemli ölçüde ilgi gören membranlardır. Nano gözenekli kanalları, yüksek seçicilikleri, geçirgenlikleri ve esnek şekilde

ayarlanabilir özellikleri sayesinde polimer membranlar, çevre bilimleri alanında çok çeşitli uygulamalar için ideal adaylar olarak öne çıkmaktadır (Y. Wang & Wei, 2024: 1). Polimerler, kimyasal kararlılıkları, yüksek su geçirgenlikleri, iyi mekanik dayanımları, düşük maliyetleri ve üretim kolaylıkları nedeniyle membran teknolojisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, polimerik membranların hidrofobik yüzey yapısı, kirlenmeye eğilimli olmalarına neden olur. Bu durum; membran akısında düşüş, geçirgenliğin azalması, enerji tüketiminin artması, sık temizleme ihtiyacı ve buna bağlı olarak membran ömrünün kısalması gibi olumsuz etkilere yol açmaktadır (Mousa vd., 2022: 6). Polimerik membranlar, yalnızca makromoleküllerin değil, aynı zamanda çözünmüş iyonların uzaklaştırılmasını da sağlayarak çeşitli endüstriyel süreçlerin gereksinimlerini karşılamada önemli bir rol üstlenmektedir. Su kıtlığına yönelik artan endişeler ve kaynak geri kazanımı konusundaki girişimler, özellikle su ve atık su arıtımında bu membranların gelişimini hızlandırmıştır. Polimerik membranlar; deniz ve acı suyun tuzdan arındırılması, atık sudaki organik ve inorganik kirleticilerin giderilmesi, gıda ve içecek endüstrisinde ürünlerin yoğunlaştırılması ve saflaştırılması ile kaynak geri kazanımı gibi çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Seah vd., 2024: 1).

Membran üretiminde kullanılan polimer malzemelerin türü, membranın performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve bu malzemeler rastgele seçilmez. Gözeneklilik, gözenek boyutu dağılımı, mekanik dayanım, kimyasal direnç, hidrofobiklik/hidrofiliklik ve termal stabilite gibi özellikleri göz önünde bulundurularak tercih edilir. Polimerin kimyasal yapısı, sahip olduğu fizikokimyasal özellikleri (örneğin kimyasal direnç, mekanik dayanıklılık ve ısıl stabilite) belirlediğinden, bu özellikler doğrudan membran performansını etkilemektedir (Mashhadikhan vd., 2024: 4). Ortalama gözenek boyutu ve gözenek boyutu dağılımı, membran uygulamalarını büyük ölçüde belirleyen iki ana özelliktir. Membranda bulunan gözeneklerin boyutu, olası kullanım alanlarını ve performansını belirleyen temel faktörlerden biridir. Genellikle gözenekler birer elek gibi davranarak, besleme akısındaki hangi bileşenlerin geçeceğini ve hangilerinin tutulacağını belirler. Gözenek boyutu karakterizasyonu, ortalama gözenek çapının ve gözenek boyutu dağılımının belirlenmesini kapsar. Bir membranın ortalama gözenek boyutu, hangi büyüklükteki moleküllerin tutulacağını önceden tahmin etmeye olanak sağlar. Ancak, ret oranına dair daha hassas bir değerlendirme yapılmak isteniyorsa, gözenek boyutu dağılımına dair daha ayrıntılı bilgiye ihtiyaç duyulur (Tanis-Kanbur vd., 2021: 1-2). Ayrıca membran morfolojileri için kıvrımlılık, yüzey pürüzlülüğü, moleküler ağırlık dışlama sınırı (MWCO) ve membran kalınlığı gibi farklı parametrelerde bulunmaktadır. Kıvrımlılık (Tortuosity), iki nokta arasındaki düz mesafe (membran kalınlığı) ile gözenekli yapı içindeki

gerçek yol uzunluğu arasındaki ortalama oranın tersi olarak tanımlanır. Bu parametre, gerçek iç gözenek yapısının ideal bir yapıya olan farkı hakkında bilgi verir. Yüzey pürüzlülüğü, bir yüzeyin ideal düz geometrisine göre normal vektör yönündeki sapmalarla nicel olarak ifade edilir. MWCO çözünen maddenin %90'ının membran tarafından tutulduğu en düşük moleküler ağırlıklı çözünen maddeyi (dalton cinsinden) veya membran tarafından %90 oranında tutulan bileşenin moleküler ağırlığını ifade eder. Membran kalınlığı ise, üst ve alt (veya ön ve arka) yüzeyler arasındaki mesafeyi ifade eder (Tan vd., 2019: 2).

Membran yüzey özelliklerinden biri olan ıslanabilirlik, kullanılan malzemeye bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Bir malzemenin ıslanabilirliği, yüzey gerilimi ölçülerek değerlendirilebilir ve bu sayede malzemenin sıvıyla temas ettiğinde nasıl davrandığı tahmin edilebilir. Yüzey gerilimi, membran yüzeyi ile üzerine konulan sıvı damlası arasındaki temas açısının ölçülmesiyle hesaplanabilir. Hidrofilik membranlar suyu iyi emerken, hidrofobik membranlar suyu iter. Membran ıslanabilirliği, su filtrasyonu uygulamalarında ideal membranın seçilmesinde kritik bir parametredir. Su içeren sıvıların arıtımında genellikle hidrofilik membranlar tercih edilir (Al Harby vd., 2022: 26).

Genel olarak, membran performansı verimlilik (akış hızı) ve ayırma yeteneği (seçicilik) olmak üzere iki temel parametreyle değerlendirilir. Membran verimliliğinin değerlendirilmesinde akı (J), geçirgenlik (P) ve geçirgenlik katsayısı (P') gibi parametreler önemli rol oynarken, ayırma performansı ise seçicilik ( $\alpha$ ) ve ayırma faktörü ( $\beta$ ) ile belirlenir (Tan & Rodrigue, 2019b: 4).

Polimerik membranların karakterizasyonunda spektroskopik teknikler de yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu teknikler genellikle morfolojik veriler, kristal yapı, fonksiyonel gruplar ve kimyasal bileşim üzerine çalışmaktadır. Membran morfolojisinin incelenmesinde yaygın olarak taramalı elektron mikroskobu (SEM), geçirimli elektron mikroskobu (TEM) ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) kullanılmaktadır. Kristal yapının yanı sıra şekil ve boyutunun incelenmesinde klasik olarak X-ışını kırınımı (XRD) uygulanmaktadır. Ayrıca, küçük açılı X-ışını saçılması ve geniş açılı X-ışını saçılması teknikleri, kristalografi verilerine ek olarak partikül boyutu ve gözenek boyutu dağılımı hakkında da bilgi sunabilmektedir. Fonksiyonel grupların belirlenmesinde ise genellikle Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi, Raman spektroskopisi ve nükleer manyetik rezonans (NMR) spektroskopisi kullanılmaktadır. Kimyasal bileşimin ölçümünde ise enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS), X-ışını floresan (XRF) ve X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) yaygın olarak tercih edilmektedir (Alqaheem & Alomair, 2020: 1-2).

Mevcut membran oluşturucu polimerlerin sayısının sınırlı olması ve çoğunun hidrofobik yapıda bulunması, elde edilen membranların performanslarını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle, membran üretiminde kullanılan polimerlerin ya da doğrudan membranların, istenilen uygulamalara uygun hale getirilebilmesi için modifikasyon gerekebilmektedir. Polimer modifikasyonu genellikle kimyasal ve fiziksel olmak üzere ikiye ayrılır. Modifiye edilmiş membranlar, seçicilik ve özgüllük gibi üstün özellikler kazandıkları için, belirli iyon, partikül veya çözücülerini seçici şekilde geçirebilme yeteneğine sahiptir. Bu özellikler sayesinde karmaşık çözeltilerin ayrıştırılması daha verimli hale gelir; enerji tüketimi azalırken, ayırma süresi kısalmır ve zor besleme çözeltilerinin ayrıştırılması mümkün olur (Siekierka vd., 2021: 2).

## **2.5. Membran Hazırlanmasında Kullanılan Polimerler**

Polimerik malzemeler, mekanik ve kimyasal dayanıklılıkları, yüksek geçirgenlikleri ve ayırma performansları sayesinde membran ayırma proseslerinde ilgi çekici hale gelmektedir. Bununla birlikte, polimerik membranlar kirlenme ve maliyet arasında denge gibi dezavantajlarla karşı karşıya kalmaktadır. Bu nedenle, bu kısıtlamaların üstesinden gelmek için birçok araştırma yapılmaktadır (Hani, 2023: 308-309). Endüstride kullanılan membranların yüksek geçirgenlik, yüksek seçicilik, iyi mekanik dayanıklılık, yüksek sıcaklık kararlılığı, düşük maliyet, yüksek yüzey alanda paketlenme ve modül üretme yeteneği gibi özelliklere sahip olmaları gerekmektedir (Nasrollahi vd.,2022: 101). Polimerik membranların hazırlanmasında kullanılan polimerler arasında sentetik ve doğal kaynaklı birçok farklı yapı bulunmaktadır. Membran hazırlamada yaygın olarak kullanılan polimerler polisülfon (PSf), selüloz asetat (CA), poliviniliden florür (PVDF), polieter sülfon (PES), polidimetilsiloksan (PDMS), polietilen (PE) ve polianilin (PANI) gibi yapılardır. Bunun yanı sıra, doğal kauçuk, polikloropren, polikarbonat, polieterimid, poliasetilen, politiyofen, polisakkaritler, polimetilpentan ve polifenilen-vinilen gibi farklı özelliklere sahip birçok polimer de organik membran üretiminde kullanılmaktadır. Bu polimerler, membranların dayanıklılık, geçirgenlik, kimyasal stabilite ve işlem kolaylığı gibi istenen özellikleri karşılamasını sağlar (Wanjiya vd., 2024: 4).

### **2.5.1. Poliviniliden Florür**

PVDF, 1960 yılında DuPont şirketi tarafından keşfedilmiş ve 1965 yılında resmi olarak tanıtılmıştır. PVDF floropolimer ailesine aittir ve yüksek termoplastik özellikler içerir. Piezoelektrik özelliği sayesinde elektrik akımı üretebildiğinden tıbbi aletlerde ve hareket

dedektörlerinde yaygın olarak kullanılmıştır. Ayrıca organik çözücülerde kolayca çözünerek ayırıcı tabaka tipi malzeme olarak kullanılabilirdi bilinmektedir. PVDF, piller, yakıt hücreleri, biyomedikal araştırmalar, güneş enerjisi cihazları ve polimer karışımlarında da kullanılmıştır (Rehman Asghar vd., 2024: 5).

### **2.5.2. Polisülfon**

Polisülfon (PSf), aromatik ve  $-SO_2$  grupları sayesinde yüksek mekanik, kimyasal ve termal stabiliteye sahip, iyi işlenebilir bir polimerdir. Polisülfonun düşük sitotoksositeye sahip olması ve aromatik grup içeriğinin yüksekliğı nedeniyle mükemmel biyouyumluluk göstermesi, onu biyomedikal uygulamalarda da tercih edilen bir malzeme haline getirmiştir. Ancak polisülfonun geniş çapta kullanılmasının önündeki en büyük engel, hidrofobik yapısından kaynaklanan biyolojik kirlenme problemidir. Bu durum, membranların ayırma performansını olumsuz etkilerken enerji tüketimini ve bakım maliyetlerini artırmakta, aynı zamanda membran ömrünü ve ürün kalitesini düşürmektedir (Dumbrava vd., 2023: 1).

### **2.5.3. Polietersülfon**

Polietersülfon (PES), mükemmel termal, kimyasal ve mekanik stabiliteye sahip, hidrofobik bir polimerdir ve özellikle mikrofiltrasyon ve ultrafiltrasyonda yaygın olarak kullanılır. Yüksek sıcaklıklara dayanıklı yapısıyla asimetric, mikro gözenekli membranlar üretiminde tercih edilir. PES nanolif membranlar; gıda işleme, biyomedikal ve su arıtma gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Kumar vd., 2023: 7175). Polietersülfon (PES), hidrofobiktir ve su arıtımı işleminde uygulandığında membranın kolayca kirlenmesine neden olur. Kirlenme, membran performansında düşüşe neden olabilir; bu nedenle, kirlenme önleyici özelliklere sahip bir membran üretmek için membran yüzeyinin modifikasyonu önemlidir (Ambarita vd., 2021: 1).

### **2.5.4. Polivinil Klorür**

Polivinil klorür (PVC), dünya çapında en çok kullanılan üçüncü polimerdir. 2018'de 44,3 milyon ton üretimi yapılmış ve 2025'te bu miktarın 60 milyon tona ulaşması beklenmektedir. Sert ve yumuşak olmak üzere çeşitli türleri bulunan PVC, kimyasallara karşı yüksek direnç, güçlü mekanik özellikler, düşük maliyet ve kolay işlenebilirlik gibi avantajlar sunar. Hidrofobik/hidrofilik özellikleri ayarlanabilir ve düşük geçirgenliğı sayesinde hassas ayırma işlemlerinde kullanılabilir. Ancak UV ışınlarına ve yüksek sıcaklıklara uzun süre maruz kalması yapısını bozabilir. Ayrıca, biyolojik olarak parçalanamaması ve üretiminde klor gazı salımı gibi çevreye zararları vardır. PVC, üstün termal kararlılığı ve mekanik dayanımı

sayesinde; su ve atık su arıtımı, iyon değişimi, gaz ayırımı, pervaporasyon, elektro-membran ekstraksiyonu ve kompozit membran desteği gibi çeşitli uygulamalarda umut vadeden bir polimer olarak öne çıkmaktadır (Youness vd., 2025: 2-3).

### **2.5.5. Selüloz**

Selüloz,  $\beta$ -1,4 glikozidik bağlarla bağlanmış D-glukopiranoz birimlerinden oluşan, yüksek moleküler ağırlıklı, doğrusal bir polimerdir. Yaygın olarak kullanılan selüloz türleri arasında selüloz asetat, rejeneratif selüloz, nanoselüloz ve selüloz türevleri bulunur. Selüloz asetat iyi biyouyumluluğa ve kirlenme direncine sahipken, mekanik ve kimyasal dayanımı düşüktür (Yahya vd., 2024: 3-4).

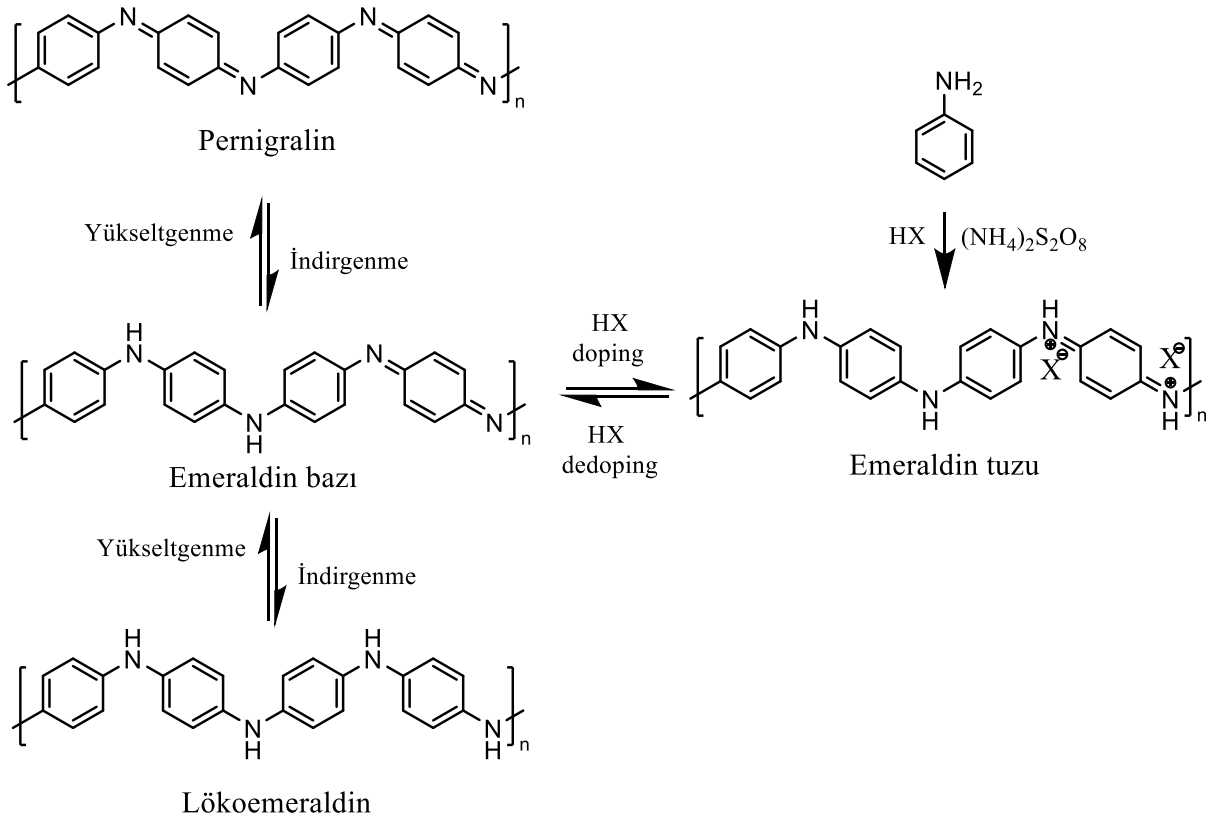
### **2.6. Polianilin**

PANI, iletken polimerler arasında en çok araştırılan ve çeşitli uygulamalarda ilgi gören malzemelerden biridir. İlk olarak 1862'de Letheby tarafından anilinın hafif oksidasyonu ile "anilin siyahı" olarak sentezlenmiştir. 1910'larda Green ve Woodhead sentez koşullarını kontrol altına almış, 1985'te ise MacDiarmid ve ekibi PANI'nın elektriksel iletkenliğini keşfetmiştir. PANI; düşük maliyeti, çevresel kararlılığı ve redoks özellikleri sayesinde enerji depolama, korozyon önleme ve sensör gibi alanlarda yaygın şekilde kullanılır. Ancak, sert ve düzensiz omurga yapısı nedeniyle işlenebilirliği düşüktür. Bu nedenle, doplama, türev ve kopolimer üretimi ile nanokompozit oluşturma gibi kimyasal modifikasyonlar kullanılarak bu sınırlamalar aşılmakta ve iletkenlik, aktif yüzey alanı ve kararlılık gibi özellikler geliştirilmektedir (Ramohlola vd., 2024: 4-5). PANI'nın elektronik, biyosensör ve enerji depolama sistemleri gibi pek çok alanda kullanımı artmakta ve bu da küresel PANI pazarının büyümesine katkı sağlamaktadır. Patent verilerine göre 2024 yılına kadar PANI temelli teknolojilere ilişkin 475 onaylı patent ve 798 başvuru tespit edilmiştir (Hosseine vd., 2024: 2).

#### **2.6.1. Polianilin (PANI) Yapısı ve Özellikleri**

PANI yaygın olarak kullanılan üçüncü iletken polimer olup asidik ortamda anilinın elektrokimyasal / kimyasal oksidasyon ürünlerini araştıran Letheby tarafından on dokuzuncu yüzyılda icat edilmiştir. PANI, hafifliği ve yüksek termal kararlılığı gibi dikkat çekici özellikleri nedeniyle küresel olarak daha fazla ilgi görmektedir (Ding vd., 2024: 255). 1969–2023 yılları arasında yalnızca "Polyaniline" anahtar kelimesiyle SCOPUS veri tabanında 31.272 makale yayımlanmıştır. PANI tekrarlayan birimi, amin ve imin gruplarından oluşur ve omurgasındaki azot atomları  $\pi$ -bağlarının oluşumuna katkı sağlayarak elektriksel iletkenlik sağlar. PANI'nın, Lökomeroldin bazı, Pernigralin bazı ve Emeraldin bazı olmak üzere üç ana yükseltgenme

durumu vardır. Şekil 2.2’de gösterilen bu oksidasyon durumlarından Lökomealdin bazı ise uygun doplama ile iletken olan Emeraldin tuzuna dönüştürülebilir. İletken olan Emeraldin tuzu zümrüt yeşili rengindedir. Bu oksidasyon halleri sayesinde PANI’nın fiziksel ve kimyasal özellikleri kolayca ayarlanabilir. Ayrıca, PANI grafen, karbon nanoyapılar, montmorillonit, selüloz, inorganik oksitler, silika ve kil gibi malzemelerle kompozitler oluşturularak elektrik iletkenliği, algılama kabiliyeti, enerji depolama, adsorpsiyon kapasitesi, kimyasal/termal kararlılık ve ağır metal seçiciliği gibi birçok özelliği geliştirebilmektedir. PANI’nın bu avantajları sayesinde sensörlerden enerji depolamaya, korozyon önleyicilerden membranlara, iletken mürekkeplerden esnek elektroniklere kadar birçok alanda uygulama alanı bulmuştur (Goswami vd., 2023: 2).



**Şekil 2.2.** Polianilin'in farklı yükseltgenme durumları

PANI'nın en iletken formu emeraldin tuzu (ES) formudur. Emeraldin bazı (EB) yarı iletken özellik gösterirken, protonlanarak ES formuna geçtiğinde, iyi derecede iletkenlik sergiler. Bu dönüşüm, protonların neden olduğu yapısal değişimle (spin ayrışması) gerçekleşir ve her tekrar biriminin pozitif yüklü hale gelmesine neden olur. Asidik ortamda (örneğin CSA, pikrik asit, fosforik asit, sülfürik asit, HCl gibi) doplama, iletkenliği artırır. Ancak, EB formunun çözünürlük sorunu ve sert polimer omurgası, PANI'nın işlenebilirliğini kısıtlar.

Ayrıca, EB formu erime sıcaklıklarında kararsız olduğu için eritme ile şekillendirme mümkün değildir (Yadav vd., 2024: 776).

Polianilin'in çözünürlüğü sınırlıdır; dimetilformamid (DMF), dimetilsülfoksit (DMSO) ve N-metil-2-pirolidon (NMP) gibi çözücülerde çözünürken, su, aseton ve etanol gibi yaygın çözücülerde çözünmez (Behera, 2024; s.50098).

PANI redoks özellikleri, elektron alımı veya verilmesine bağlı olarak farklı geri dönüşümlü formlarda bulunabilmesi nedeniyle oldukça kritiktir. Bu özellik, PANI'nın elektrokimyasal olarak aktif bir polimer olmasını sağlar. Yapılan çeşitli çalışmalar, PANI'nın farklı ortamlar altında gösterdiği redüksiyon davranışını ve elektroaktif özelliklerini araştırmıştır. Bu çalışmalar sonucunda, PANI'nın özellikle nano ölçekli bağlantılar (nanojunctions) ve redoks-aktif malzemeler gibi uygulamalarda kullanılma potansiyelinin yüksek olduğu ortaya konmuştur. Elektron alışverişine bağlı olarak yapısal ve iletkenlik değişiklikleri gösteren bu polimer, özellikle elektrokimyasal sensörler, enerji dönüşüm cihazları ve akıllı malzeme uygulamaları için önemli bir aday haline gelmiştir (Beygisangchin vd., 2024: 9).

### **2.6.2. PANI Sentez Yöntemleri**

PANI morfolojisi ve moleküler yapısı, uygulanan sentez yöntemi ve reaksiyon koşulları ile belirlenir. Kimyasal oksidatif polimerizasyon, elektrokimyasal polimerizasyon, buhar fazı polimerizasyonu ve fotokimyasal başlatmalı polimerizasyon yöntemleri PANI sentezinde kullanılan yöntemlerdir (Mandal vd.,2023: 3). Bu yöntemler arasında en yaygın kullanılanlar, kimyasal oksidatif polimerizasyon ve elektrokimyasal oksidatif polimerizasyondur. Bu yöntemler genellikle asidik ortamda ve inorganik (HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) ya da organik (CSA, DBSA, p-TSA) asit dopantlarıyla gerçekleştirilir (Meena & Surela, 2024: 3). Baz ve tuz formları arasında dönüşüm yapabilme yeteneği sayesinde dikkat çeken iletken polimerlerden biri olan PANI, oksidasyon ve redüksiyon süreçlerine uygunluğu ile birlikte kolay sentezlenebilmesi sayesinde araştırmalarda sık tercih edilen polimerlerden biri olmuştur.

#### **2.6.2.1. Kimyasal Oksidatif Polimerizasyon**

PANI üretiminde en yaygın yöntem, anilin monomerlerinin bir oksidasyon ajanı ile polimerleştirildiği kimyasal oksidasyon yöntemidir. Bu yöntemde anilin, oksitleyici ajan ve asidik ortam olmak üzere üç temel bileşen bulunur. Oksitleyici ajan olarak amonyum peroksidisülfat (APS) başta olmak üzere hidrojen peroksit, potasyum iyodat, seryum sülfat, potasyum dikromat, potasyum ferrisiyanür ve sodyum vanadat kullanılır. HCl ve H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ise hem

asidik ortam sağlar hem de dopant görevi görür (Meher vd., 2024: 3). PANI sentezi genellikle in situ kimyasal oksidatif polimerizasyon yöntemi ile gerçekleştirilir. Bu yöntemde anilin monomeri, amonyum persülfat (APS) gibi bir oksidant ve HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, PTSA, CSA veya asetik asit gibi bir asidik ortam/dopant kullanılır. Reaksiyon sulu ortamda, 0–5 °C sıcaklık aralığında ve sürekli karıştırma ile yaklaşık 3 saat sürdürülür. Polimerleşme sonucunda oluşan mavi renkli PANI süzülerek elde edilir. Daha sonra ürün saflaştırılır; birkaç kez distile su ile yıkanır, ardından aseton ve alkol ile işlenerek renksiz hale getirilir ve reaksiyona girmemiş bileşikler uzaklaştırılır. Elde edilen ürün genellikle yeşil renkte ve iletken olan PANI-ES formudur. Bu yapı, NH<sub>4</sub>OH ile işlem görek PANI-EB formuna dönüştürülebilir (Beygisangchin vd., 2024: 5-6).

### **2.6.2.2. Elektrokimyasal Oksidatif Polimerizasyon**

Elektrokimyasal polimerizasyon, anilin monomerlerinin anotta oksidatif olarak polimerleşmesiyle gerçekleşir. Bu yöntem, PANI makromoleküllerinin oluşmasını sağlar. PANI yapısındaki delokalize  $\pi$ -elektronları, metal yüzeylere kolayca tutunmasını (adsorpsiyon) ve elektrodepozisyonla kaplama yapılmasını sağlar (Gao vd., 2021: 3). PANI üretiminde kullanılan elektropolimerizasyon süreci şu aşamalardan oluşur: İlk olarak, anilin monomerleri anot üzerinde oksitlenerek pozitif yüklü katyonik serbest radikaller oluşturur. Ardından, aromatik halkalardaki elektronlar yeniden düzenlenir ve bu yapılar içerisinden protonlar ayrılarak dimerler oluşur. Daha sonra bu dimerler büyüyüp birbirine bağlanarak daha karmaşık ve sağlam yapılar meydana getirir. Son aşamada ise, asidik ortamda oluşan polimer zinciri kendiliğinden aktive olarak denatüre PANI yapısını oluşturur (Hosseine vd., 2024: 5).

### **2.6.3. Polianilin Membranlar**

Yeni nesil kendinden iletken polimerler arasında PANI membranları doping/dedoping mekanizmaları ile ayarlanabilir özelliğe sahip olması sebebiyle birçok bilim insanının dikkatini çekmiştir. PANI membranların ticarileştirilmesinin önündeki en büyük engellerden birisi düşük mekanik mukavemete sahip olmasıdır. Yüksek moleküler ağırlıklı PANI polimerleri kullanılarak, birbiriyle daha fazla etkileşim kurabilen bir polimer ağı oluşturulabilir ve mekanik mukavemet artırılabilir. Ancak, daha yüksek moleküler ağırlıklı PANI polimeri kullanımı, düşük polimer konsantrasyonunda dahi hızlı jel oluşumuna yol açar (Yusoff vd., 2019: 12989). İletken PANI membranlar, geleneksel polimer membranlarda olduğu gibi katman-katman kendiliğinden düzenleme ve faz dönüşümü yöntemleri kullanılarak hazırlanabilir. Ancak PANI'nın benzersiz yapısı nedeniyle, membranın yüzeyinde homojen gözenek boyutuna ve

kararlı özelliklere sahip olması için bazı ek hazırlama teknikleri gerekmektedir. Bu nedenle, PANI iletken membranlarının hazırlanma yöntemleri membran oluşturma süreçleri ve son işlem (post-treatment) süreçleri olmak üzere ikiye ayrılır. Son işlem süreçleri ise termal çapraz bağlama, kimyasal çapraz bağlama ve flaş kaynak (fototermal kaynak) olmak üzere üç çeşittir (Hao vd., 2023: 108-111)

İletken PANI membranlar, genellikle HCl veya çeşitli organik asitlerle katkılanmış PANI çözeltilerinden hazırlanmıştır. Özellikle HCl ile katkılama yapıldığında, PANI membranlarının iletkenliği oldukça yüksek seviyelere ulaşabilmektedir. Ancak HCl, kolaylıkla membran yapısından uzaklaştırılabilen (dedop edilebilen) bir katkı maddesi olduğundan, zamanla membranların iletkenliğinde azalma meydana gelmektedir. Buna karşılık, yüksek moleküler ağırlığa sahip dopantlar, PANI zinciriyle daha kararlı bir şekilde bütünleşerek uzun vadeli iletkenlik stabilitesi sağlamaktadır (Liu vd., 2024: 2). PANI, PAMPSA ve polistirensülfonik asit (PSSA) gibi organik asitlerle katkıldığında, hidrofiliği artmakta ve bu sayede kirlenmeye karşı dirençli membranlar için uygun adaylar haline gelmektedir. Ayrıca bu membranlar, kolay üretilebilir ve iyi kimyasal kararlılığa sahiptir. Yapılan güncel çalışmalar, bu tür membranların çözücüye dayanıklı nanofiltrasyon uygulamaları için sonradan modifiye edilebildiğini ve elektriksel olarak tepki verebilir davranışlar sergilediğini ortaya koymuştur (Puggioni vd., 2022: 110).

PANI membranların, gözenek boyutu ve yüzey özellikleri elektrik alanı ve pH gibi etkilerle ayarlanabilir özelliktedir. Bu da PANI'yı uyanarlara duyarlı ve kendi kendini temizleyebilen membranlar için uygun hale getirir. PANI membranlar, başka polimerlerle kompozit/blend şeklinde, ya da mevcut bir membranın üzerine kaplama/laminasyon yöntemiyle de hazırlanabilir. Kaplama yöntemi daha güçlü arayüzey bağları ve daha iyi kirlenme önleyici özellik sağlar. Buna karşılık, blend membranlarda gözenek yapısı daha kolay ayarlanabilir, ancak arayüzey stabilitesi düşük olabilir. PANI membranlar yüksek akı, geri kazanım, dışlama gibi özellikleri sayesinde, akıllı membran sınıfına girerler (Naseer vd., 2022: 2).

Poli (2-akrilamido-2-metil-1-propanesülfonik asit) (PAMPSA) kullanılarak in-situ polimerizasyon yöntemiyle hazırlanan PANI-PAMPSA membranlar, elektriksel olarak modifiye edilebilir özelliklere sahiptir. Bu membranlar, asit sızıntısına karşı dayanıklılık, yüksek çekme dayanımı gibi özelliklere sahiptirler. PAMPSA'nın PANI yapısına doğrudan entegre edilmesi, dopantların daha güçlü bağlarla tutunmasını sağlamakta ve membranın gözenek yapısının genişlemesine katkıda bulunmaktadır. Bu sayede, PANI-PAMPSA

membranlar yüksek performanslı, elektriksel uyarılara duyarlı ve kararlı membranlar olarak öne çıkmaktadır (Park & Patel, 2021: 107).

PANI matrisine aktif karbon, karbon nanotüp, grafit ve grafen gibi çeşitli karbon malzemelerinin entegre edilmesi, polimerin iletkenliğini artırmaktadır. En yaygın yöntemlerden biri, karbon malzemelerin varlığında anilin in-situ polimerizasyonudur. Bu sayede karbon malzemeler PANI ile donör-akseptör kompleksleri oluşturarak yük transferini kolaylaştıran iletken köprüler oluşturur. Ayrıca çözelti karıştırma yöntemi ile polimer zincirlerinin van der Waals kuvvetleri aracılığıyla karbon malzemeye tutunması, kompozitin iletkenliğini iyileştirmektedir. Bu yaklaşımlar, PANI-karbon kompozitlerinin performansını artırarak membran uygulamalarında önemli avantajlar sağlamaktadır. Grafen, karbon atomlarının düzenli altıgen yapıda dizildiği iki boyutlu bir malzeme olup, yüksek elektron hareketliliği, geniş özgül yüzey alanı, üstün mekanik dayanımı ve potansiyel olarak düşük üretim maliyetiyle karbon nanotüplere (CNT) kıyasla eşdeğer veya daha iyi özellikler sunmaktadır (L. Xu, 2016: 26,28).

## **2.7. Membranların Kirlenmesi**

Membran kirlenmesi, membran ile besleme çözeltisindeki kirleticiler ve kirleticilerin kendi aralarındaki fiziksel ve kimyasal etkileşimlerden kaynaklanan çok aşamalı ve dinamik bir süreçtir. Kirlenme; organik, inorganik, biyolojik ve koloidal olmak üzere dört ana gruba ayrılır ve farklı mekanizmalarla meydana gelir. Bu mekanizmalar arasında konsantrasyon polarizasyonu, adsorpsiyon, çökeltme, gözenek tıkanması, jel/kek tabakası oluşumu ve biyofilm gelişimi yer almaktadır. Kirlenme süreci, başlangıçta konsantrasyon polarizasyonu ile başlar, ardından geri dönüşümlü adsorpsiyon, sonrasında ise jel/kek tabakası ya da biyofilm oluşumu gibi daha kalıcı evrelere geçiş yapar. Bu süreç, membran performansında ciddi düşümlere neden olabilir. Dolayısıyla, membran kirlenmesinin aşamalarının ve temel etkileşim mekanizmalarının detaylı şekilde anlaşılması, filtrasyon veriminin artırılması ve uzun süreli, sürdürülebilir membran kullanımı açısından büyük önem taşımaktadır (Liang vd., 2024: 1).

### **2.7.1. Membran Kirletici Türleri**

Membran kirlenmesi, kirleticilerin membran yüzeyinde ya da gözenek yapısı içinde birikmesiyle meydana gelir. Kirleticiler ile membran arasındaki etkileşimlerin anlaşılması, etkin kirlenme giderimi için kritik öneme sahiptir. Kirlenme, kirleticilerin özelliklerine göre organik kirlenme, biyolojik kirlenme, koloidal kirlenme ve inorganik kirlenme olarak dört kategoriye ayrılır (Kang & Ge, 2025: 2).

### **2.7.1.1. Organik kirlenme**

Proteinler, polisakkaritler ve hümik maddeler gibi organik moleküllerin membran yüzeyine veya gözeneklerine tutunarak gözenekleri tıkanmasıyla meydana gelir. Bu moleküller doğal ya da sentetik kökenli olabilir ve atık su, gıda işleme ya da ilaç endüstrisi gibi çeşitli kaynaklardan gelebilir. Organik kirlenmenin temel mekanizması, organik moleküllerin membran yüzeyine adsorbe olması, ardından birikerek kek tabakası oluşturmasıdır. Bu süreç hem membranın yüzey özelliklerinden (hidrofobiklik, yüzey yükü, pürüzlülük) hem de organik moleküllerin özelliklerinden (boyut, şekil, yük yoğunluğu) etkilenir. Ayrıca, kirleticiler membranın yüzey kimyasını değiştirerek daha fazla adsorpsiyon ve birikmeye neden olabilir (Abuwatfa vd., 2023: 4).

### **2.7.1.2. Biyolojik Kirlenme**

Biyolojik kirlenme, mikroorganizmaların bir yüzeye tutunarak zamanla çoğalması ve yüzey üzerinde biyofilm adı verilen bir yapı oluşturmasıyla meydana gelir. Biyofilm, mikroorganizmaların salgıladığı ekstraselüler polimerik maddeler ile çevrili bir tabakadır. Bu tabaka, mikropları dış ortamın etkilerine (örneğin biyosit gibi dezenfektanlara) karşı koruyarak daha dirençli hale getirir. Membran yüzeyinin hidrofobik ve pürüzlü olması, mikroorganizmaların tutunmasını kolaylaştırarak biyolojik kirlenmeyi artırır. Buna karşılık, düz ve hidrofilik yüzeyler, biyolojik kirlenmeye karşı daha dirençlidir (Alsawafah vd., 2021: 3).

### **2.7.1.3. İnorganik Kirlenme**

İnorganik kirlenme tortu, kalsiyum, magnezyum, karbonat, sülfat ve fosfat gibi inorganik iyonların çökmesi veya kristalleşmesiyle oluşan kirlenme türüdür. Bu süreç, çözülmüş tuzların kristalleşmesi ve membran yüzeyine taşınması gibi karmaşık mekanizmaları içerir. Basınçlı arıtma süreçlerinde tuz konsantrasyonu 4–10 kat artabilir, bu da çözünürlük sınırı aşıldığında kristalleşmeye neden olur. Membran üzerinde kristal oluşumu, yüzey kristalleşmesi ve hacim kristalleşmesi olmak üzere iki anayolla gerçekleşir. Her iki süreç de membran akısını düşürür ve yüzey tıkanıklığına neden olur (Goh vd., 2018: 131).

### **2.7.1.4. Kolloidal Kirlenme**

Kolloidal kirlenme iki klasik mekanizmayla açıklanmıştır. Öncelikle büyük parçacıklar membran yüzeyinde, küçük parçacıklar ise gözeneklerin içinde birikir. Bu birikimin devamında, parçacıklar üst üste çökerek tortu tabakası oluşturur ve bu da membran akısına yüksek direnç oluşturur (W. Gao vd., 2011: 2).

## **2.7.2. Kirlenme Mekanizmaları**

### **2.7.2.1. Konsantrasyon Polarizasyonu**

Kirlilik sürecinin ilk aşaması, kirleticilerin membran yüzeyine doğru hareket etmesiyle başlar. Bu aşamada membran yüzeyi, sonraki adımlar için fiziksel ve kimyasal olarak şartlandırılır. Moleküllerin fiziksel boyutlarının membran gözeneklerine sığmaması (sterik engel) nedeniyle bazı kirleticiler mekanik olarak engellenir ve yüzeye yakın bölgede birikir. Bu birikim, çözünen maddelerin yoğunlaştığı ve difüzyonla taşınımın baskın olduğu ince bir tabaka oluşturur. Konsantrasyon polarizasyonu, membran yüzeyinde ozmotik basıncı artırarak kütle transferini olumsuz etkiler; ancak bu durum geri döndürülebilir. Membran yüzeyine yakın partiküller ve moleküller, elektrostatik etkileşimlere maruz kalır. Bu etkileşimler, pH ve iyonik şiddet gibi çözeltinin kimyasal özelliklerinden etkilenir (Cirillo vd., 2021: 5-6).

### **2.7.2.2 Adsorpsiyon ve Gözenek Tıkanması**

Adsorpsiyon olgusuna özel olarak, kirlenmenin bu aşaması genellikle hızlı kirlenme olarak adlandırılır ve bu olay, kek veya jel tabakasının oluşumu ve büyümesiyle ilişkili uzun vadeli akı düşüşüne kıyasla çok kısa zaman dilimlerinde gerçekleşir. Endüstriyel uygulamalarda, bazı membranların performansı hızlı kirlenme gerçekleştikten sonra değerlendirilir; hatta bazı membranlar ticari olarak ancak bu aşamadan sonra işlevsel hale gelir. Ancak genel anlamda bu durum istenmeyen bir olgudur (Cirillo vd., 2021: 7). Kirleticilerin membran yüzeyine adsorpsiyonu, kirleticiler ile membran yüzeyi ve gözenek duvarları arasındaki etkileşimler sonucunda gerçekleşir ve bu durum, membran boyunca hidrolik direncin artmasına neden olur. Alternatif olarak, gözenek tıkanması, membran gözeneklerinin kirleticilerle tıkanması sonucu geçirgenlik yolunun daralması anlamına gelir. Bu durum, membrandan geçen permeat akısının düşmesine yol açar (Amira Abdelrasoul & Huu Doan, 2020: 90).

### **2.7.2.3. Jel/Kek Katmanı Oluşumu**

Membran yüzeyinde biriken kirleticiler kritik bir yoğunluğa (örneğin jel noktası) ulaştığında, bir jel tabakası oluşmaya başlar ve bu tabaka membranı kaplayarak doğrudan membranla temas eden kirleticiler miktarını azaltır. Bu noktadan sonra, besleme çözeltisinden gelen yeni kirleticiler artık doğrudan membranla değil, jel veya kek tabakasıyla etkileşir. Bu geçişle birlikte baskın etkileşim türü, membran-kirleticiler etkileşiminden kirleticiler-kirleticiler etkileşimine kayar. Jel tabakasının oluşumunda temel mekanizma kovalent kompleksleşme olup, gözeneklilik, sıklık ve geçirgenlik ise kovalent olmayan ve sterik etkilerden etkilenir. Bu

etkiler, kirleticilerin hidrofobikliği, yükü, boyutu, morfolojisi ve fonksiyonel gruplarıyla yakından ilişkilidir (H. Xu vd., 2020: 6).

## **2.8. Membran kirlenme kontrolü ve temizleme yöntemleri**

Membran kirlenmesini azaltmaya yönelik çeşitli kontrol stratejileri bulunmaktadır. Kirlenmeyi önlemek veya azaltmak için önerilen yöntemler; besleme suyunun ön arıtımı (koagülasyon, adsorpsiyon), besleme özelliklerinin ayarlanması (sıcaklık, pH, çözülmüş oksijen), membran yüzeyinin modifikasyonu, filtrasyon koşullarının optimize edilmesi, geliştirilmiş alan uygulamaları (elektrik, ultrasonik, manyetik) ve kimyasal temizleme işlemlerini içermektedir. Özellikle mikrofiltrasyon (MF) ve ultrafiltrasyon (UF) sistemlerinde hava ile havalandırma, geri yıkama ve gerilme gevşemesi gibi standart uygulamalar yaygındır (Chang vd., 2019: 92).

Membran temizliği, membran kirlenmesini etkin bir şekilde gidererek veya kontrol altına alarak transmembran basıncı (TMP) azaltabilir ve membran akısını yeniden eski haline getirebilir. Membran temizleme yöntemleri, süreç içerisinde kimyasal kullanılıp kullanılmama durumuna göre, kimyasal temizleme ve fiziksel temizleme yöntemleri olarak 2'ye ayrılır. Kimyasal temizlemede kirlilik türüne göre belli türde kimyasal maddeler temizleme sürecine dâhil edilirler. Fiziksel temizlemede ise herhangi bir kimyasal kullanımı olmadan, hidrolik, mekanik, ultrasonik, elektriksel vb. kuvvetler kullanılır. Ancak, gerçek işletme koşullarında tek bir temizleme yönteminin optimal sonuç vermesi genellikle zordur. Bu nedenle, birden fazla yöntemin kombinasyonu membran temizliğinde genellikle daha etkili olmaktadır (Du vd., 2020: 20).

### **2.8.1. Kimyasal Temizleme**

Kimyasal temizlik, tersinmez (irreversible) kirlenme durumlarında tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntemin temelinde; kirletici ile membran malzemesi arasındaki etkileşimler, kirletici ile temizlik kimyasalı arasındaki ilişkiler ve temizlik maddesi ile membran yapısı arasındaki karşılıklı etkiler yer almaktadır. Bu üçlü ilişki, temizlik sürecine en uygun kimyasal maddenin seçilmesinde belirleyici rol oynamaktadır. Kimyasal temizliğin kirlenmiş bir membran üzerindeki beklenen başlıca etkileri kirleticilerin bağlarının gevşetilmesi ve çözüldürülmesi, çözültide askıda tutulması, yeni bir kirlenmeye neden olmaması ve temizlenen membran yapısına zarar vermemesidir. Genel olarak temizlik ajanları; asitler, alkali/bazlar, şelatlayıcı ajanlar, yükseltgen maddeler, enzimler, yüzey aktif maddeler ve dezenfektanlar olarak sınıflandırılır. Bu ajanların her biri, farklı bileşimde veya yüke sahip kirleticilerin

uzaklaştırılması için kullanılır. Kimyasal temizlik süreci, doğru kimyasal seçimi ve uygun proses parametreleri ile gerçekleştirildiğinde, membran performansını önemli ölçüde iyileştirebilmekte ve sistemin işletme ömrünü uzatabilmektedir (Ezugbe & Rathilal, 2020: 18-19). Ancak kimyasal temizleme sürecinde kullanılan kimyasallar genelde tehlikeli kimyasal sınıftadırlar, çevre kirliliğine sebep olabilmektedirler (Arnal vd., 2011: 71) ve temizleme süreçlerinde membran yapısına zarar verme riskleri bulunmaktadır. Bu nedenle kimyasal temizleme süreci ile membranın ömrü azalabilmekte, dışlama performansı olumsuz yönde etkilenebilmekte ve hatta membran amacına uygun şekilde kullanılabilme özelliğini yitirebilmektedir. Ayrıca kullanılacak kimyasalların ortaya çıkaracağı ilave maliyet temizlik sürecini daha da maliyetli hale getirebilmektedir.

### **2.8.2. Fiziksel Temizleme**

Fiziksel temizlik, başlıca basit hidrolik temizleme, geri yıkama, hava ile yıkama, mekanik temizleme, yüksek frekanslı titreşim, ultrasonik temizleme ve elektriksel temizleme gibi yöntemlerle gerçekleştirilir. Basit hidrolik temizlik, membran yüzeyindeki düşük kuvvetteki etkileşimlerle tutunan kirlenmelerin giderilmesinde etkili olabilmektedir. Geri yıkama, membran yüzeyindeki partikül kirlenmesi ve hafif kirlenmeleri uzaklaştırmak için yaygındır. Geri yıkamada temizlik verimi, geri yıkama akış hızı, süresi ve sıklığına bağlıdır. Hava temizliği, hava kabarcıklarının oluşturduğu kesme kuvvetiyle kirlenme tabakasını gevşetir ve biyofilmli azaltır. Membran biyoreaktörlerde sıkça kullanılır ve performansı artırır. Mekanik temizlik; parçacıklarla ovma, titreşim ve kazıma yöntemlerini içerir. Parçacık eklenmesi kirlenmeyi azaltabilir. Titreşim membran yüzeyindeki kirlenmeyi gevşetirken, kazıma daha ciddi kirlenme tabakalarını mekanik olarak temizler. Ultrasonik temizlik kaviteasyon etkisiyle membran yüzeyi ve gözeneklerdeki kirlenmeyi etkili şekilde temizler ancak yüksek enerji tüketimi ve potansiyel membran hasarı sebebiyle genelde zorlu kirlenmelerde kullanılır (Xiao vd., 2023: 6-8).

Fiziksel temizleme yöntemleri arasında elektriksel kuvvetlerin kullanıldığı teknikler yenilikçi ve gelişmekte olan teknikler olarak bilinmektedir (Shi vd., 2014: 5). Elektriksel kuvvetlerin kullanıldığı tekniklerde, membran üzerine potansiyel (voltaj) uygulanması ile elektrik alan oluşturulur ve elektriksel kuvvetler sayesinde membranda biriken kirliliklerin uzaklaşması veya birikiminin engellenmesi ve geciktirilmesi sağlanır. Sular içerisindeki kirlenmelerin birçoğu yüklü yapılardır (Ronen vd., 2016: 3). Uygulanan elektrik alan yüklü yapıya sahip kirlenmeleri membran yapısından (özellikle yüzeyden) taşıma ve uzaklaştırma etkisi yapar. Böylece membran geçirgenlik performansının azalmasında en önemli etkiler olan

konsantrasyon polarizasyonu ve membran kirlenmesinin kontrolü sağlanır ve membran geçirgenliği azalması geciktirilir (Arnal vd., 2011: 75). Elektriksel kirlenme kontrol süreçlerinde kirlenme kontrolü üç temel mekanizma üzerinden yürümektedir. Bunlar; elektrokimyasal indirgenme-yükseltgenme, elektroliz ve elektrostatik etkileşimlerdir (Sun vd., 2021: 1; Kim vd., 2024: 3). Bahsedilen mekanizmalarla ilerleyen kirlenme kontrol süreçlerinde kullanılacak sistemler genel itibariyle doğru akım (DC) potansiyel uygulamalıdır ve literatürde bu uygulamalar ile ilgili farklı membranların kullanıldığı çalışmalar bulunmaktadır (Yang vd., 2003: 2; J. Huang vd., 2015: 6; J. H. Lee vd., 2022: 3). Ancak doğru akım uygulamalı süreçlerde bazı temel olumsuzluklar bulunmaktadır. Bunlar; uygulanan potansiyel büyüklüğüne göre membran yapısında gerçekleşebilecek yükseltgenme-indirgenme ve elektroliz süreçleri membran yapısına zarar verebilir, elektroliz sürecinde filtrasyon ortamında oluşan ürünlerin de membran yapısına zarar verme ve yapıda deformasyona sebep olma potansiyelleri bulunmaktadır (Y. Shen & Badireddy, 2021: 21). DC potansiyel uygulamalı süreçlerin membran yapısını deforme etme risklerinin olması nedeniyle elektriksel temizleme süreçleri için DC yerine olarak alternatif akımın (AC) kullanıldığı süreçlerde uygulanabilmektedir. Literatürde DC uygulamalarının kullanıldığı elektriksel temizleme çalışmalarına daha çok rastlanırken AC uygulamalı çalışmalar daha az yaygındır. AC uygulamalarında yükseltgenme-indirgenme veya elektroliz gerçekleşmeden, elektrostatik etkileşimler sonucunda kirleticilerin salınımları sayesinde kirletici ile yüzey arasındaki etkileşimlerin azalmasına bağlı olarak kirlenmenin geciktirilmesi şeklinde kirlenme kontrolü gerçekleşebilmektedir.

## 2.9. Literatür Özeti

Lindfors vd., (2002) tarafından yapılan çalışmada farklı hacimlerde lipofilik katyonik katkı maddesi tridodesilmetilamonyum klorür (TDMACl) içeren elektriksel olarak iletken, çözünür PANI membranlar hazırlanmış ve hazırlanan membranlar Raman spektroskopisi, UV-vis spektroskopisi ve döngüsel voltametri teknikleri ile incelenmiştir. Analiz sonuçları, TDMACl'nin PANI membranına dahil edilmesinin PANI'nın oksidasyonunu ve indirgenmesini kolaylaştırdığını göstermiştir.

Gao vd. (2003) tarafından yapılan çalışmada faz dönüşüm tekniği kullanarak gözenekli ve asimetrik PANI hazırlanmış ve hazırlanan membranların çeşitli organik çözücü buharlarında (hekzan, etil eter, etil asetat, tetrahidrofuran (THF) ve etanol) bükülme-geri kazanım davranışları incelenmiştir. PANI membranların bükülme-geri kazanım oranlarının ve maksimum bükülme açılarının çeşitli buharlarda (hekzan, etil eter, etil asetat, tetrahidrofuran (THF) ve etanol) farklı olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak gözenekli asimetrik PANI

membranların organik buharların emilimine ve desorpsiyonuna yanıt olarak bükülme-toparlanma hareketinin polariteye bağlı olması ve membranın hidrofiliğini değiştirerek ince ayar yapılabilmesi, PANI'yı kimyasal sensörler ve aktüatörler geliştirmek için uygun bir malzeme haline getirdiği bulunmuştur.

Deligöz (2007) tarafından yapılan çalışmada tek, iki ve üç değerlikli katyonları içeren sulu tuz çözeltilerinin hem katkılı hem de katkısız polianilin (PANI) membranlar boyunca seçici iyon taşınımı incelenmiştir. Özellikle HCl katkılı PANI membranın, yüksek sıcaklık uygulamalarında yüksek ayırma verimliliği nedeniyle nadir toprak metal tuzlarının giderilmesinde kullanılabileceği tespit edilmiştir.

Xu vd., (2018) tarafından yapılan çalışmada harici olarak uygulanan elektriksel potansiyel ile polianilin (PANI) membranın ayarlanabilirliği incelenmiştir. Farklı polimerizasyon sıcaklıklarında kimyasal oksidatif polimerizasyon yoluyla sentezlenmiş PANI-EB yapısı 24 saat boyunca HCl ile katkılanmış ve bu yapı kullanılarak, faz dönüşümü yoluyla düz tabaka PANI membranlar hazırlanmıştır. Hazırlanan PANI membranların kimyasal, fiziksel, elektriksel ve mekanik özellikleri, Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), UV-görünür spektroskopisi (UV-vis), dinamik mekanik analiz (DMA), alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FSEM), dört noktalı prob iletkenliği, dinamik temas açısı, şişme derecesi, membran geçirgenliği ve MWCO analizleri ile gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda asit katkılı PANI membranlarının geçirgenlik ve seçicilik özelliklerinin, çapraz akışlı basınçlı filtrasyon sırasında membranlara uygulanan elektriksel potansiyel ile yerinde (in-situ) ayarlanabileceği tespit edilmiştir.

J. Shen vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada ilk kez poliasitlerin PANI katkısı olarak kullanıldığı asimetrik PANI membranlar, daldırma ile çöktürme yöntemiyle hazırlanmıştır. Farklı moleküler ağırlıklara (MW) ve asit ayrışma sabitlerine (pKa) sahip iki poliasit olan poli (4-stirenesülfonik asit) (PSSA, MW: 75000 g mol<sup>-1</sup>, pKa: 0.94) ve poli (2-akrilamido-2-metil-1-propansülfonik asit)i (PAMPSA, MW: 800000 g mol<sup>-1</sup>, pKa: 0.87) ile katkılanan PANI membranlar, HCl katkılı PANI ile karşılaştırılmıştır. Hazırlanan membranların FTIR, XPS ve SEM analizleri gerçekleştirilerek asitlerin PANI yapısına başarıyla katkılı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca temas açısı ölçümleriyle membranların hidrofiliği belirlenmiştir. PANI ve poliasitler arasındaki güçlü moleküller arası etkileşimler sayesinde artan hidrofiliğe sahip yoğun yapılar elde edilmiştir. Sonuç olarak bu çalışmada poliasit katkılamanın çapraz bağlamaya gerek kalmadan OSN uygulamaları için kararlı ve nano gözenekli PANI membranların

hazırlanabileceği ve bu yaklaşım sayesinde gelecekte zorlu ayırma işlemleri için yeni OSN membran sınıfları tasarlamak için kullanılabileceği tespit edilmiştir.

K. Wang vd., (2019) tarafından yapılan çalışmada çözücüsüz faz ayrıştırma yöntemiyle elektriksel olarak iletken yapıda PANI membranlar hazırlanmıştır. Hazırlanan DBSA katkılı ve katkısız PANI membranların yapıları, elektrik iletkenlikleri, hidrolikliği ve elektrokimyasal özellikleri analiz edilmiştir. Elde edilen iletken PANI membranların kirlenmeye karşı davranışını incelemek amacıyla sığır serum albümin çözültisi (BSA) ile farklı potansiyel uygulamaları altında filtrasyon deneyleri yapılmıştır. Yapılan test ve analizler sonucunda iletken PANI membranların, negatif potansiyel altında kirlenmesinin azaldığı ve artan potansiyel ile kirlenme direncinin daha iyi hale geldiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak bu araştırmada iletken polimer kullanılarak hazırlanan iletken membranların basit ve uygulanabilir bir şekilde üretilmesine, membran kirlenme kontrollüne ve kirlenmenin yerinde (in-situ) giderilmesine yönelik pratik bir yöntem sunulmuştur.

Sarihan vd., (2019) tarafından yapılan çalışmada elektriksel iletkenliğe sahip ve kararlı organik çözücü nanofiltrasyon (OSN) membranları geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında kimyasal oksidatif polimerizasyon yöntemi kullanılarak sentez sürecinde asit katkılama gerçekleştirilerek PAMPSA katkılı PANI yapıları sentezlenmiştir. Sentezlenen PAMPSA katkılı PANI yapısı kullanılarak membranlar hazırlanmış ve hazırlanan membranlara ısı işlem uygulaması yapılmıştır. Elde edilen membranlar yapısal ve morfolojik analizlerin yanı sıra filtrasyon testleriyle de sistematik olarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak basit in-situ katkılama yöntemi ve ısı işlem uygulaması ile farklı çözücülerde OSN süreçleri için umut verici, kararlı PANI membranlarının hazırlanabileceğini ve harici elektriksel potansiyel uygulamasıyla membran performanslarının in-situ olarak kontrol edilebileceği tespit edilmiştir.

Yusoff vd., (2019) tarafından yapılan çalışmada kimyasal oksidatif polimerizasyon yöntemiyle üretilen PANI yapısı kullanılarak faz dönüşümü yöntemiyle PANI membranlar hazırlanmıştır. Hazırlanan PANI membranlar, filtrasyon özelliklerinin ayarlanabilmesi için asitle katkılanmıştır. Elde edilen asit katkılı PANI membranlara katman katman (LBL) biriktirme yöntemiyle katyonik ve anyonik polielektrolitler dahil edilmiştir. Asit katkılama ve polielektrolit kaplama ile modifikasyon öncesi ve sonrası membranların morfolojik, fiziksel, kimyasal ve filtrasyon özellikleri karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak saf PANI membrana optimum asit katkılama uygulanması ile membranın hidrofobikliğinin ve iletkenlik özelliklerinin belirgin şekilde iyileştiği bulunmuştur. PANI membran yüzeyine polielektrolit katmanlarının LBL (katman-katman biriktirme) yöntemiyle başarılı bir şekilde uygulanması sonucunda,

membranın filtrasyon aralığını ultrafiltrasyondan nanofiltrasyona değiştirdiğini ve modifiye membranın geri yıkama işleminden sonra bile aynı geçirgenlik performansını koruyabildiği tespit edilmiştir.

Li vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada, tek adımlı elektrokimyasal metot kullanılarak Grafen-PANI iletken membranları hazırlanmıştır. Elde edilen membranların FTIR, Raman spektroskopisi, XRD ve AFM analizlerini yapıp Grafenin başarıyla uretildiğini ve tek adımlı elektrokimyasal yöntemle PANI membranı ile birleştirildiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca elde ettikleri membranların kirlenme karşıtı özelliklerini test etmek için maya süspansiyonu kullanmışlardır. Elde edilen veriler sonucunda Grafen/PANI membranının PANI membranına kıyasla daha iyi kirlenme karşıtı özelliklere ve daha yüksek geçiş akısına sahip olduğunu bulmuşlardır. Sonuç olarak Gr/PANI membranının elektrofiltrasyon alanlarında kullanım potansiyeline sahip olduğunu ve tek adımlı elektrokimyasal yöntemin diğer iletken polimer ayırma membranları için umut vadettiğini tespit etmişlerdir.

Amura vd., (2021) tarafından yapılan çalışmada sülfolanmış PANI (S-PANI) yapısı kullanılarak çözücü içermeyen faz inversiyonu yoluyla membranlar hazırlanmıştır. Hazırlanan membranlar  $\alpha,\alpha'$ -Diklor-p-ksilen (DCX), Glutaraldehit (GA) ve Tereftaloil klorür (TCL) kullanılarak kimyasal çapraz bağlama ile modifiye edilmiş ve elde edilen membranların morfolojileri, karşılaştırılmıştır. Saf S-PANI membranının PANI membran ile benzer morfoloji, akı ve dışlama performansı gösterdiği tespit edilmiştir. Kimyasal apraz bağlama ile işlem gören S-PANI membranlarının ise, uzun süreli çözücü stabilitesi, yüksek basınçta çalışabilme yeteneği ve gelişmiş polietilen glikol (PEG) dışlaması gibi özelliklerle başarılı sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Kimyasal apraz bağlamanın ayrıca kirlenme direncinde de önemli bir iyileşme sağladığı keşfedilmiştir. Sonuç olarak bu çalışmada düşük kirlenme eğilimli ve uzun vadeli çözücü direncine sahip membranların basit bir yöntemle hazırlanabileceği ve endüstriyel uygulamalarda membran teknolojisinin yaygın kullanımını artırma potansiyeli taşıdığını bulunmuştur.

Puggioni vd., (2022) tarafından yapılan çalışmada PAMPSA katkılanmış PANI yapısından faz dönüşüm metodu kullanılarak ultrafiltrasyon membranları hazırlanmıştır. Elde ettikleri membranların meyve suyundan fitosterol ve protein ayırıştırılmasındaki performansı ticari bir membran olan hidrofilik rejeneratif selüloz asetat (RCA) membranı ile karşılaştırılmıştır. Membranların yapıları, mekanik özellikleri ve hidrofilikliği incelenmiştir. Çapraz akışlı filtrasyon testlerinde, her iki membranın protein ayırımında benzer verimlilik gösterdiğini; ancak fitosterol geri kazanımında RCA membranının daha iyi performans

sergilediği tespit edilmiştir. Her iki membranın da kirlenmeye maruz kaldığını ancak PANI-PAMPSA membranı daha yüksek tersinmez kirlenme gösterdiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak PANI-PAMPSA membranın ultrafiltrasyon uygulamaları için uygun olduğu ve ticari olarak kullanılabilmesi tespit edilmiştir.

Liu vd., (2024) tarafından yapılan çalışmada PANI membranların nötr ve asidik koşullar altında organik tuz çözeltilerine poli (sodyum 4-stiren sülfonat) (PSS), Sodyum dodesil sülfat (SDS), Sodyum dodesilbenzen sülfonat (SDBS)) daldırılması ile katkılı PANI NF membranları hazırlanmıştır. Nötr ortamda katkılanmış PANI membranlarının tamamının, katkılanmamış PANI membranlara kıyasla daha düşük gözenek boyutu dağılımına, daha düşük Zeta potansiyeline ve daha yüksek iletkenliğe sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca asidik ortamda yapılan katkılanmanın (PANI-PSS-HCl, PANI-SDS-HCl ve PANI-SDBS-HCl) daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Özellikle PANI-PSS-HCl membranın, %99,9'un üzerinde boya geri tutma ve %95 oranında metil oranj (MO) ayrımı sağladığını, NaCl gibi tuzları %95'in üzerinde oranla dışladığı tespit edilmiştir. Aynı zamanda PANI-PSS-HCl membranının artan elektriksel potansiyel uygulaması ile mükemmel bir kirlenme direnci performansı sergilediği tespit edilmiştir. Böylece endüstriyel atık sulardaki boya/tuz ayrımı için yüksek potansiyelle sahip, çevre dostu bir metot ortaya koyulmuştur

Literatür incelemelerinde, sentez sürecinde PAMPSA ile yüklenmiş ve Gr ile modifiye edilmiş PANI membranların hazırlanması ile ilgili önemli bir çalışmaya rastlanmamıştır. Dolayısıyla Gr yapısının membran elektriksel özelliklerini iyileştirmesi amacıyla, modifikasyon gerektirmeksizin doğrudan kullanıldığı PANI membran yapılarının, gerek hazırlanması ve kirlenme özelliklerinin incelenmesi, gerekse elektriksel temizleme çalışmaları ile ilgili literatürde belirgin şekilde açık noktalar bulunmaktadır. Ayrıca literatürde, tez kapsamında hazırlanan membranlar ile ilgili AC potansiyel uygulamalı elektriksel temizleme sürecine ait herhangi bir çalışma ile de karşılaşılmamıştır. Bu tez çalışmasında sentez sürecinde PAMPSA ile yüklenmiş, Gr katkılı PANI-PAMPSA membranlar hazırlanmış, yapısal, morfolojik ve performans özellikleri bakımından karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan membranların farklı kirleticilere karşı kirlenme özellikleri ve basit hidrolik temizleme özellikleri incelenmiştir. Ayrıca hazırlanan membranlar için AC potansiyel uygulaması ile temizleme çalışmaları da incelenmiş ve Gr katkısı ile elektriksel özelliklerin iyileştirilmesinin elektriksel temizlemede üzerinde etkinliği değerlendirilmiştir.

### 3. MATERYAL METOD

#### 3.1. Kullanılan kimyasallar ve cihazlar

Asit yüklenmiş PANI yapısının sentezi ve saflaştırılması sürecinde, anilin, PAMPSA, amonyum persülfat (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub> (APS), aseton, kullanılmış ve tüm sentez çalışmaları ultra saf su kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

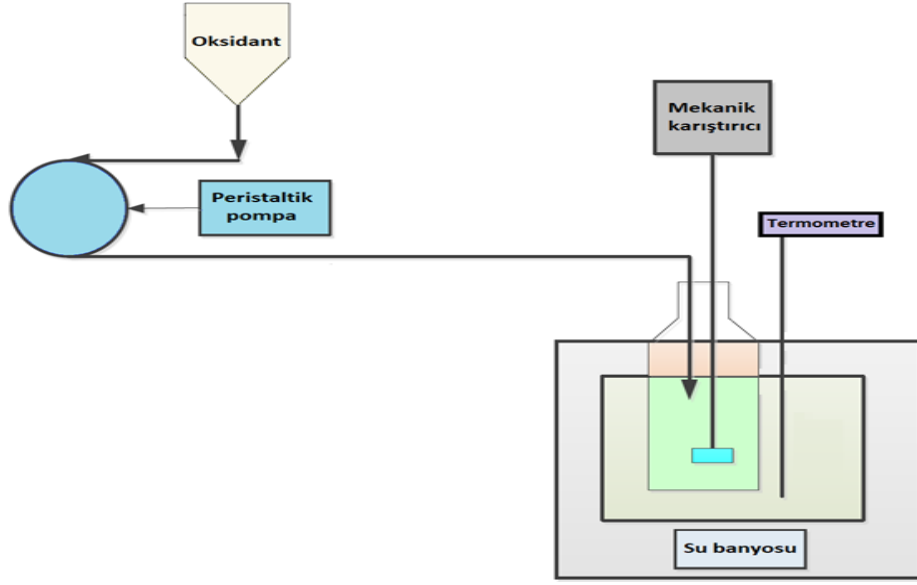
Katkısız, %0,5 ve %5 Gr katkılı membranların hazırlanması için sentezlenen PANI-PAMPSA yapısı, NMP ve 4-metilpiperidin (4-MP) kullanılmıştır.

Hazırlanan membranların, dışlama, kirlenme özellikleri ve temizleme çalışmaları bovin serum albümin (BSA) ve hümik asit (HA) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Sentezlenen polimer ve hazırlanan membranların yüzey morfolojisi ile membranların kesit görüntülerini incelemek için taramalı elektron mikroskopu (SEM), membranların kimyasal fonksiyonel gruplarını belirlemek için Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) kullanılmıştır. Membranların ve katkı maddelerinin kristal yapılarını belirlemek için X ışını kırınımı (XRD) analizleri, yüzey su severliklerinin incelenmesi için temas açısı ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca hazırlanan membranların iletkenlik ölçümleri 4 noktalı iletkenlik ölçer cihazı kullanılarak gerçekleştirildi. Membranların filtrasyon ve kirlenme süreçlerinde dikey akış filtrasyon tekniği, elektriksel temizleme süreçlerinde alternatif akım (AC) güç kaynağı kullanılmıştır.

#### 3.2. Asit Katkılı PANI Yapısının Sentezi

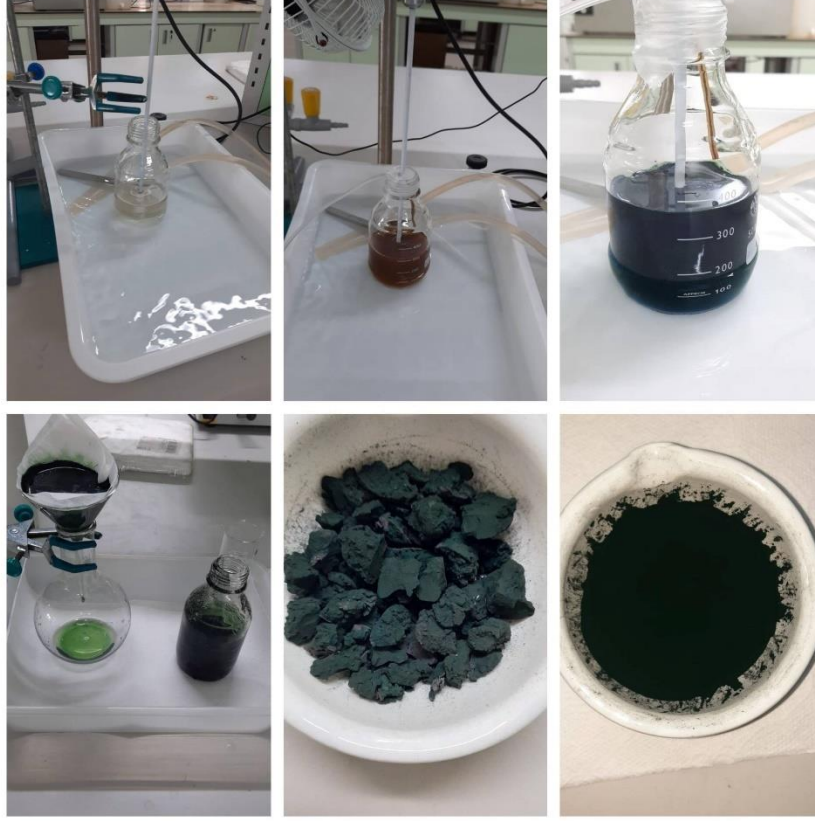
Asit katkılı PANI yapısının sentezi için anilin ve asit mol oranları 4:1 olarak ayarlanmış ve çözücü olarak su kullanımı ile reaksiyon ortamı oluşturulmuştur. Sentez sürecinde APS oksidant olarak kullanılmış ve anilin ile aynı mol oranında çözelti hazırlanarak, sentez reaksiyon ortamına peristaltik pompa yardımıyla 20 ml/saat hızda eklenmiştir. Reaksiyon ortamı sıcaklığı 15 °C olarak ayarlanmış ve reaksiyon 24 saatte tamamlanmıştır. Reaksiyon sonrasında elde edilen polimerik yapı süzülerek ayrılmış, reaksiyona girmeyen reaktiflerin/oligomerlerin uzaklaştırılması amacıyla 3 kez su ve 3 kez aseton ile yıkanarak saflaştırılmış, ardından 65 °C' etüvde kurutulmuştur. Kurutma sonrasında elde edilen PAMPSA yüklü PANI yapısı öğütülerek kullanıma hazır hale getirilmiştir. Sentez sürecinde kullanılan düzeneğin şematik gösterimi Şekil 3.1'de verilmiştir. Ayrıca Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te sırasıyla sentez sisteminin görseli ile sentez aşamalarına ait görseller verilmiştir.



Şekil 3.1. PAMPSA yüklenmiş PANI sentez sistemi şeması



Şekil 3.2. PAMPSA yüklenmiş PANI sentez sistemi



Şekil 3.3. PANI-PAMPSA hazırlanma aşaması

### 3.3. Membranların Hazırlanması

Tez çalışması kapsamında katkısız, %0,5 ve 5,0 oranlarında Gr katkılı olmak üzere üç çeşit PANI-PAMPSA kompozit membran hazırlanmıştır. Hazırlanan membranların döküm çözelti bileşimleri Tablo 3.1’ de verilmiştir.

Tablo 3.1. Hazırlanan membranların döküm çözelti bileşimleri

Membran	Döküm çözelti bileşimleri (%)		
	NMP	PANI-PAMPSA	Gr
PANI-PAMPSA	80	20	0
PANI-PAMPSA-Gr/0,5	80	20	0,5
PANI-PAMPSA-Gr/5,0	80	20	5,0

Membranların hazırlanması sürecinde öncelikle membran döküm çözeltileri hazırlanmıştır.

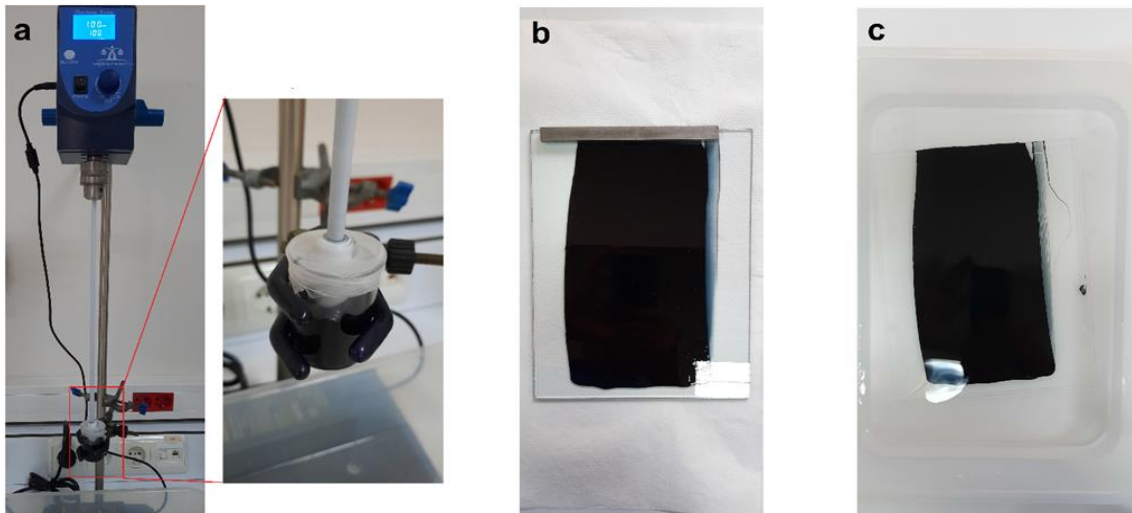
Katkısız PANI-PAMPSA membran yapısı için döküm çözeltisi hazırlanma sürecinde uygun miktarda NMP içerisine 4-MP ilave edilmiş ve uygun miktarda PANI-PAMPSA yapısı,

mekanik karıştırıcı ile karıştırma yapılan karışım içerisine yavaş yavaş eklenmiştir. Karışımın laboratuvar ortamında (25 °C), 24 saat boyunca karıştırılmasıyla döküm çözeltisi elde edilmiştir.

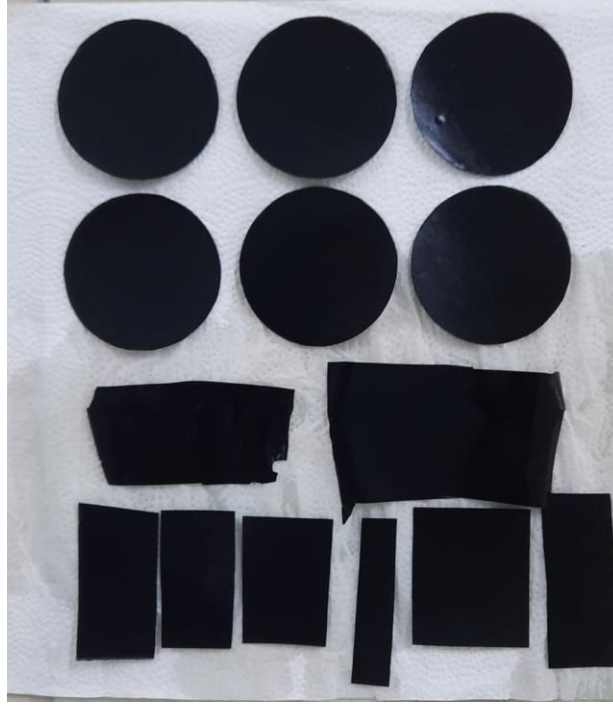
Gr katkılı membranlara ait döküm çözeltisi hazırlanmasında ise uygun miktarda NMP ve 4-MP karıştırılmış, sonrasında karışım içerisine uygun oranlarda Gr nanopartiküller ilave edilmiş ve karışıma 30 dakika boyunca ultrasonikasyon işlemi yapılarak Gr nanopartiküllerinin dağılması sağlanmıştır. Ardından katkısız membranlara ait döküm çözelti hazırlaması ile aynı koşullarda karıştırma işlemi yapılarak çözelti hazırlama süreçleri tamamlanmıştır.

Hazırlanan döküm çözeltileri, içerisindeki hava kabarcıklarının uzaklaştırılması için 30 dk açık şekilde bekletilmiş ardından cam yüzeyine dökülerek 200 µm kalınlığında boşluğa sahip film kesme bıçağı ile filmler oluşturulmuştur. Cam yüzeyine çekilen filmler koagülasyon banyosu içerisine daldırılmış ve faz dönüşümü sonucunda koagülasyon ortamında membranlar elde edilmiştir (koagülasyon banyosu olarak saf su kullanılmıştır). Elde edilen membranlar en az 24 saat saf su da bekletildikten sonra test ve filtrasyon süreçlerinde kullanılmak üzere uygun boyutlarda hazırlanarak 45 dk boyunca 65 °C etüvde ısıl işleme tabi tutularak mukavemeti artırılmış ve kullanıma hazır hale gelmiştir.

Membranların hazırlanma basamaklarına ait örnek görüntüler Şekil 3.4' te, hazırlanan membranlara ait görüntüler Şekil 3.5'te verilmiştir.



**Şekil 3.4.** Gr katkılı PANI-PAMPSA membranların hazırlanma basamaklarına ait bazı örnek görüntüler **a:** Hazırlanan döküm çözeltisinin mekanik karıştırıcı ile karıştırılma süreci, **b:** karıştırma süreci tamamlandığında döküm çözeltisinden cam yüzeyde film oluşturulması **c:** cam yüzeyindeki filmin koagülasyon ortamına alınması ve membran oluşumu).



Şekil 3.5. Katkısız, %0,5 ve %5 Gr katkıli PANI-PAMPSA membranlar

### 3.4. Polimer ve membranların karakterizasyon yöntemleri

Sentezlenen polimer ve hazırlanan membranların fiziksel, kimyasal, morfolojik özellikleri SEM, FTIR XRD, temas açısı analizleri ve iletkenlik ölçümleri yapılarak belirlenmiştir.

#### 3.4.1. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Sentezlenen asit katkıli PANI yapısının ve hazırlanan membranların yapısal ve morfolojik olarak incelenmesi ve karakterize edilmesi, hazırlanan membranların gözenek yapısı, gözenek boyutu, kalınlık vb. özelliklerinin analizi için çeşitli büyütme oranlarında yüzeysel ve enine kesit SEM görüntüleri alınmış ve incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

#### 3.4.2. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR)

Sentezlenen asit katkıli PANI yapısının ve hazırlanan membranların kimyasal özelliklerinin incelenmesi ve membran kirlenme süreçlerinin aydınlatılması için Fourier dönüşümü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

#### 3.4.3. X-ışını kırınımı (XRD)

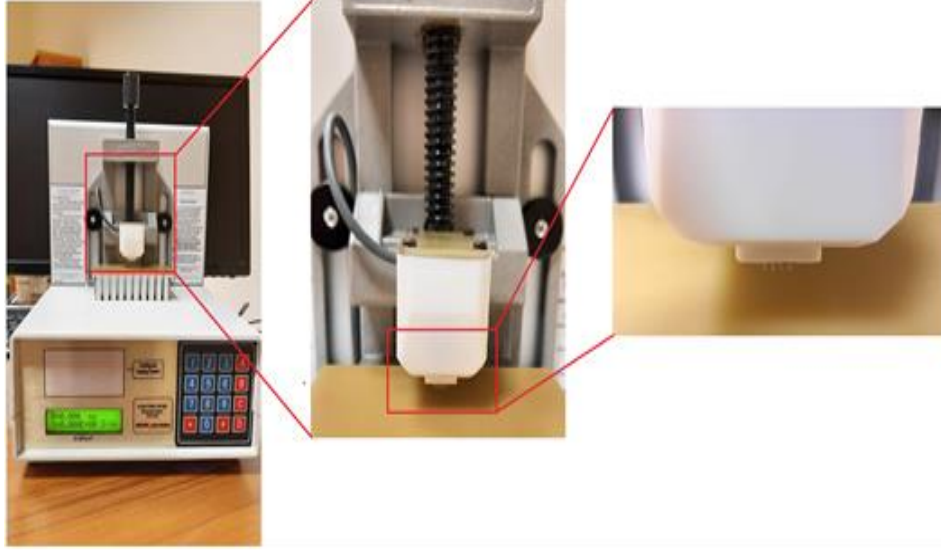
Katkı maddesi ve membranların yapısının incelenmesi ile katkılamanın doğrulanması amacıyla XRD incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

#### 3.4.4. Su temas açısı

Hazırlanan membranların yüzey su severlikleri ve Gr katkısı ile değişimlerinin incelenmesi amacıyla temas açısı ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

#### 3.4.5. İletkenlik

Hazırlanan membranların iletkenliklerini ve Gr katkılama işlemi ile değişimlerini incelemek amacıyla iletkenlik ölçümleri yapılmıştır. İletkenlik ölçümleri membran yüzeyinin farklı bölgelerinden ölçülen en az 10 değerin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Ölçümlerde kullanılan 4 noktalı iletkenlik ölçer cihazı Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. 4 Noktalı iletkenlik ölçer cihazı

### 3.5. Membranların performans incelemeleri

#### 3.5.1. Su tutma

Su ile dengeye ulaşmış belirli yüzey alanına sahip membran örneklerinin ıslak halde iken ve kurutulma işlemi sonrasında ölçülen ağırlıklarından faydalanılarak, Eşitlik 3.1 yardımıyla su tutma yüzdeleri belirlenmiştir.

$$\% \text{ Su tutma} = \frac{A_l - A_k}{A_k} \times 100 \quad (3.1)$$

Eşitlik 3.1'de;  $A_l$ : Membranın ıslak ağırlığı,  $A_k$ : Membranın kuru ağırlığı değerlerini ifade etmektedir.

### 3.5.2. Gözeneklilik

Su tutma hesaplamalarında kullanılan ıslak/kuru ağırlıklar, membran boyutları ve suyun yoğunluğundan faydalanılarak, Eşitlik 3.2 yardımı ile membran gözeneklilik yüzdeleri belirlenmiştir.

$$\% \text{ Gözeneklilik} = \frac{A_i - A_k}{d_{su} \cdot V} \times 100 \quad (3.2)$$

Eşitlik 3.2’de  $A_i$ ,  $A_k$ : Islak ve kuru membran ağırlıkları,  $d_{su}$ : Kullanılan suyun yoğunluğu,  $V$ : Membran hacmi değerlerini ifade etmektedir.

### 3.5.3. Akı

Membranların akı incelemeleri dikey akış filtrasyon hücresinde, 3 bar basınç altında sıkıştırılması ve sabit akış elde edilmesi sonrasında 2 bar çalışma basıncında gerçekleştirilen filtrasyon işlemi ile gerçekleştirilmiş ve Eşitlik 3.3 kullanılarak akı hesaplamaları gerçekleştirilmiştir.

$$A = \frac{Q}{A \cdot \Delta t} \text{ ile gösterilir.} \quad (3.3)$$

Eşitlik 3.3’ te,  $A$  saf su akısı ( $L/m^2 \cdot sa$ ),  $Q$  belli sürede toplanan su miktarı,  $A$  etkin membran yüzey alanı ( $m^2$ ) ve  $\Delta t$  numune alma süresi ( $sa$ ) değerlerini ifade etmektedir.

### 3.5.4. Geçirgenlik

Akı verileri basınca bağımlı olarak hesaplandığında geçirgenlik ( $G$ ) ( $L/m^2 \cdot h \cdot bar$ ) verileri elde edilmektedir. Geçirgenlik verileri farklı membranların, performans özelliklerinin birbirleri ile karşılaştırılmasında akı verilerinden daha kullanışlıdır. Geçirgenlik hesaplamaları Eşitlik 3.4 kullanılarak yapılmıştır.

$$G = \frac{Q}{A \cdot \Delta t \cdot P} \quad (3.4)$$

Eşitlik 3.4;  $G$ : Geçirgenlik ( $L/m^2 \cdot sa \cdot bar$ ),  $Q$ : Belli sürede toplanan su miktarı ( $L$ ),  $A$ : Membran yüzey alanı ( $m^2$ ),  $\Delta t$ : Numune alma süresi ( $sa$ ),  $P$ : Basınç ( $bar$ ) değerlerini ifade etmektedir.

### 3.5.5. Gözenek yarıçapı

Gözenek yarıçaplarının belirlenmesinde, membranlara ait gözeneklilik ve akış verilerine gereksinim duyulması sebebi ile öncelikle bu özelliklere ait sonuçlar elde edilmiş, bu

verilerden de faydalanılarak ve Eşitlik 3.5'te verilen Guerout-Elford-Ferry eşitliği kullanılarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

$$r_m = \sqrt{\frac{(2,9-1,75 \varepsilon) \times 8 \eta l Q}{\varepsilon X A x \Delta P}} \quad (3.5)$$

Eşitlik 3.5'te;  $r_m$ : Membranın ortalama gözenek yarıçapı (m),  $\varepsilon$ : Membrana ait gözeneklilik değeri,  $\eta$ : Suyun 25°C sıcaklıktaki viskozitesi ( $8,90 \times 10^{-4}$  Pa. s),  $l$ : Membran kalınlığı (m),  $Q$ : Suyun akış hızı ( $m^3/s$ ),  $A$ : Membran etkin çalışma alanı ( $m^2$ ),  $\Delta P$ : Çalışma basıncı (Pa) değerlerini ifade etmektedir.

### 3.5.6. Dışlama

Katkısız ve Gr katkılı PANI-PAMPSA membranların dışlama çalışmalarında BSA ve HA kullanılmıştır. BSA (500 ppm), HA (50 ppm) kirletici çözeltilerinin dışlama değerleri 3.6'da verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$(\%) D = \left(1 - \frac{C_s}{C_b}\right) \times 100 \quad (3.6)$$

Eşitlik 3.6'da;  $D$ : Gözlenen dışlama oranı,  $C_s$ : Süzüntü derişimi,  $C_b$ : Besleme derişimi değerlerini ifade etmektedir

### 3.5.7. Molekül ağırlık dışlama sınırı (MWCO)

Molekül ağırlık dışlama sınırı (MWCO) çözünen maddenin %90'ının membran tarafından tutulduğu en düşük moleküler ağırlıklı çözünen maddeyi (dalton cinsinden) veya membran tarafından %90 oranında tutulan molekülün moleküler ağırlığını ifade eder. Membran filtrasyonunda molekül ağırlık dışlama sınırı (MWCO) önemli bir parametredir. Çalışma kapsamında hazırlanan membranların MWCO incelemeleri BSA ve HA dışlama verilerinden faydalanılarak değerlendirilmiştir.

### 3.5.8. Membran kirlenme ve elektriksel temizleme çalışmaları

Membranların kirlenme incelemeleri için Şekil 3.7' de gösterilen dikey akış filtrasyon sistemi kullanılarak, BSA (500 ppm), HA (50 ppm) kirletici çözeltilerinin filtrasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Filtrasyon sürecinde öncelikle membranın, uygun basınç uygulaması altında saf su ile sabit akı değeri elde edilene kadar sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiş ve sıkışma sonrası elde edilen sabit akı ( $A_0$ ) kaydedilmiştir. Daha sonra belirli derişimlerdeki kirletici çözeltileri besleme çözeltisi olarak kullanılmış ve uygun basınç altında 60 dakika filtrasyon gerçekleştirilmiş bu süreçteki akı ( $A_1$ ) değeri kaydedilmiştir. Kirletici çözeltileri ile filtrasyon sonrasında membranlar 30 dakika saf su içerisinde bekletilerek basit hidrolik

temizleme işlemi gerçekleştirilmiş ve ardından tekrar saf su akışı belirlenmiş ( $A_2$ ) ve kaydedilmiştir.

Elde edilen akı verileri yardımıyla, Eşitlik 3.7, 3.8, 3.9 ve 3.10 kullanılarak, sırasıyla akı geri kazanım oranı (AGO), toplam kirlenme oranı (TKO), tersinir kirlenme oranı (RKO) ve tersinmez kirlenme oranı (ZKO) (%) değerleri hesaplanmıştır.

$$A_G (\%) = \frac{A_2}{A_0} \times 100 \quad (3.7)$$

$$T_K (\%) = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100 \quad (3.8)$$

$$R_K (\%) = \frac{A_2 - A_1}{A_0} \times 100 \quad (3.9)$$

$$Z_K (\%) = \frac{A_0 - A_2}{A_0} \times 100 \quad (3.10)$$



**Şekil 3.7.** Dikey Akışlı Filtrasyon Sistemi

Gr katkısı ile elektriksel iletkenliği iyileştirilmiş membranların elektriksel temizleme süreçlerindeki etkinliğinin incelenmesi amacıyla kirlenmiş membranların elektriksel potansiyel uygulaması ile temizleme çalışmaları da gerçekleştirilmiştir. Elektriksel temizleme çalışmalarında kullanılan sistem Şekil 3.8’de verilmiştir.

Elektriksel temizleme sürecinde, kirlenmiş membrana 30 dk boyunca elektriksel potansiyel uygulaması yapılmış ve daha sonra tekrar saf su ile filtrasyon çalışmaları gerçekleştirilerek, kirlenme ve akı geri kazanım oranları incelenmiştir. Elektriksel potansiyel uygulaması sürecinde ideal potansiyeli uygulama yönteminin belirlenebilmesi için 1, 5, 10, 15, 20V potansiyel uygulama süreçleri yürütülmesi ve akı geri kazanım verilerinin incelenmesiyle

optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Elektriksel temizleme çalışmalarında kirletici olarak, BSA seçilmiş ve çalışmalar bu kirletici kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elektriksel temizleme süreçleri ve katkısız PANI-PAMPSA ve %5,0 Gr katkılı membran kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



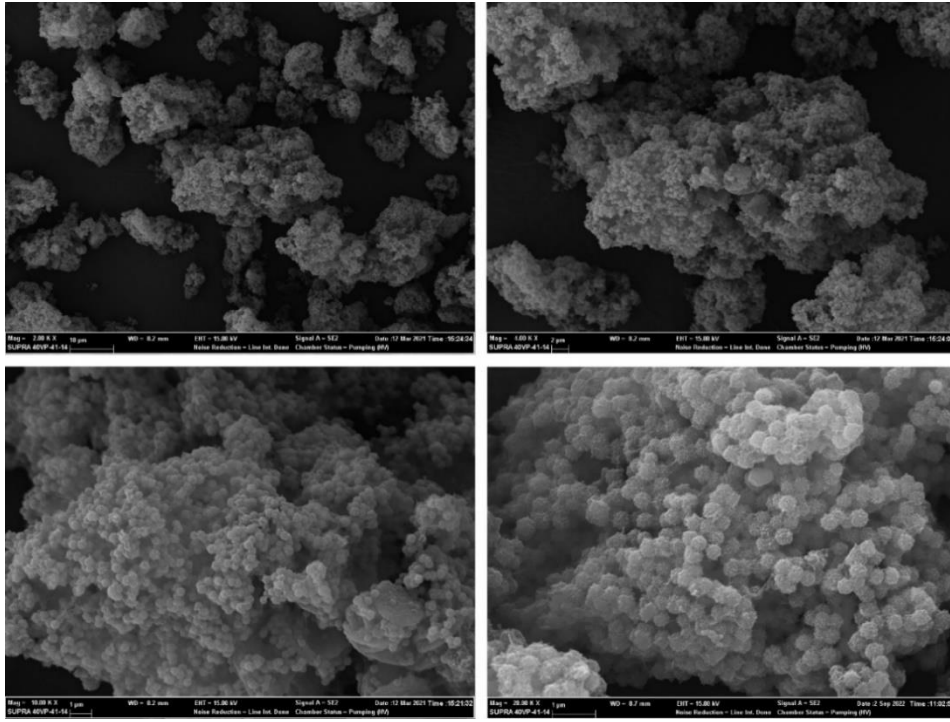
Şekil 3.8. Elektriksel temizleme sürecinde kullanılan sistem

## 4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. PANI-PAMPSA Yapısının Karakterizasyonu

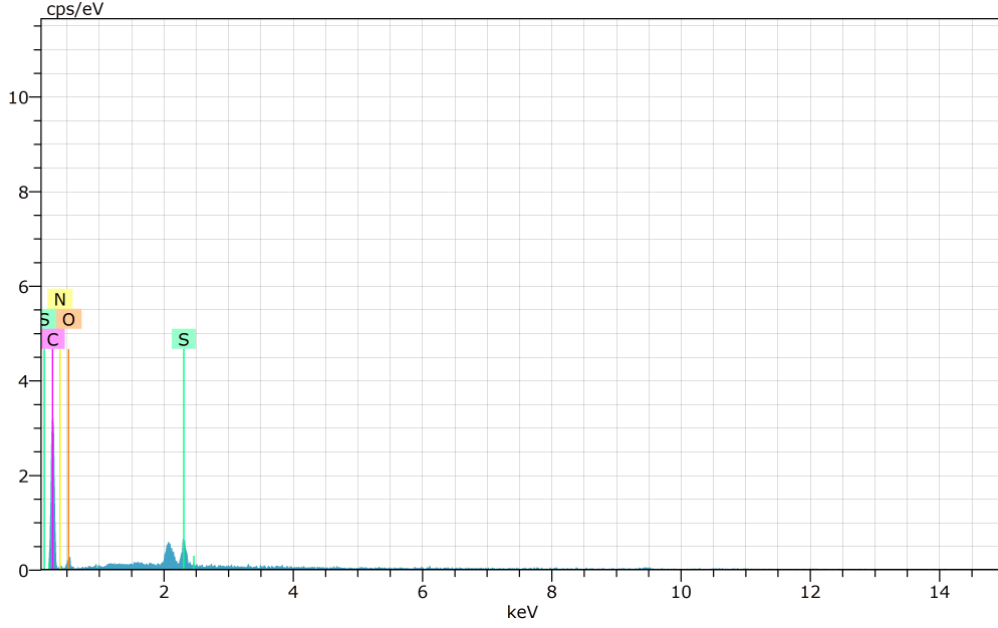
PANI-PAMPSA yapısının karakterizasyonu FTIR, EDX, SEM ve XRD teknikleri kullanılarak gerçekleştirildi.

Sentezlenen PANI-PAMPSA'nın 2KX, 4KX, 10KX ve 20KX büyütme oranlarındaki SEM görüntüleri Şekil 4.1' de verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde PANI-PAMPSA nanopartiküllerinin granüler yapıda olduğu ve ortalama boyutlarının 200-300 nm seviyesinde olduğu gözlemlenmiştir (Sapurina & Stejskal, 2009: 258 ; Sarihan, 2021: s.179). PAMPSA gibi daha büyük hacimli dopantların kullanımı PANI polimer zincirleri ve kümeleri arasındaki moleküller arası mesafeyi artırmakta, bu da polimerik yapıdan membran hazırlandığında, membran gözenek yapısının genişlemesine neden olarak daha gevşek ve yüksek gözenekliliğe sahip membranların oluşumunu desteklemektedir (L. L. Xu vd., 2019: 267).



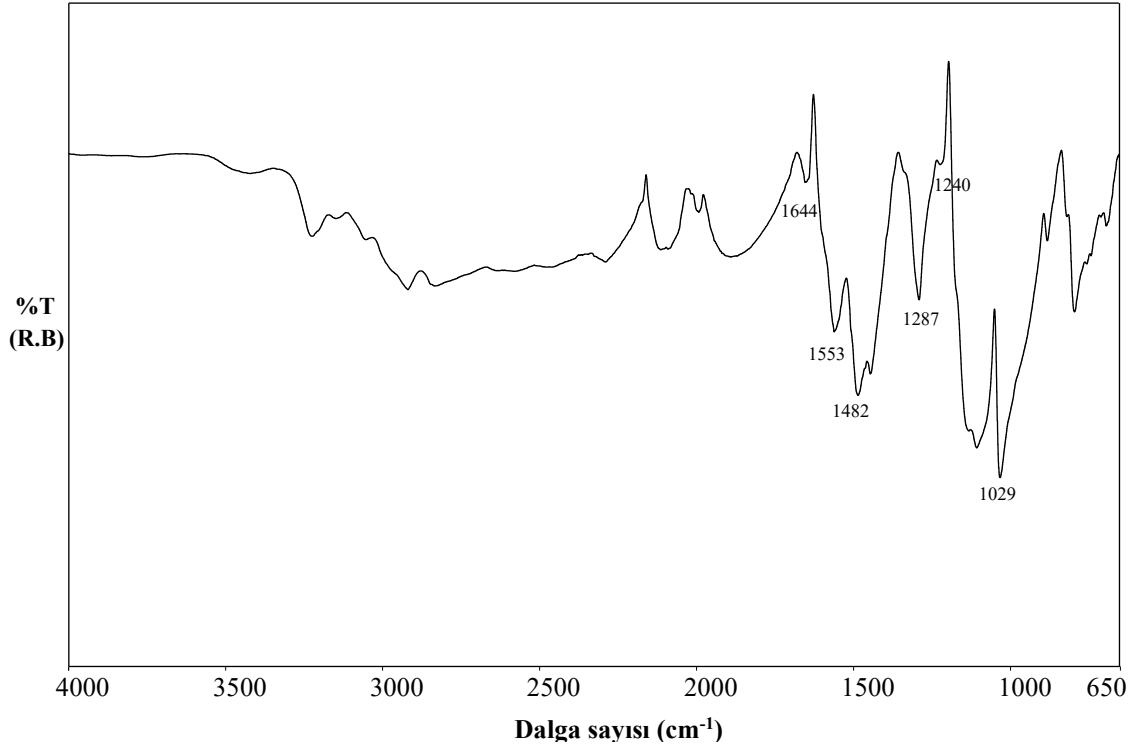
Şekil 4.1. Sentezlenen PANI-PAMPSA yapısına ait SEM görüntüleri

Şekil 4.2'de sentezlenen PANI-PAMPSA yapısına ait EDX analiz sonuçları verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde PANI yapısındaki karbon (C), Azot (N) ve Oksijen (O) atomlarının ve PAMPSA'nın yapısındaki sülfü (-SO<sub>2</sub>-) gruplarından kaynaklanan Kükürt (S) atomlarının yapıda varlığı görülmektedir. Elde edilen sonuçlar sentezin başarılı olduğunu, PAMPSA'nın PANI yapısına yüklendiğini doğrulamaktadır. (Rahman vd., 2021: 5393)



**Şekil 4.2.** Sentezlenen PANI-PAMPSA yapısına ait EDX analizleri

Şekil 4.3'te sentezlenen PANI-PAMPSA yapısına ait FTIR spektrumları verilmiştir. Spektrum incelendiğinde  $1553\text{ cm}^{-1}$  ve  $1482\text{ cm}^{-1}$  PANI yapısındaki kinoid halkasındaki  $\text{-C=N-}$  bağının ve benzenoid halkasındaki  $\text{-C=C-}$  bağının gerilme titreşimlerine aittir (K. Wang vd., 2019: 375).  $1240\text{ cm}^{-1}$  de bulunan pik PANI yapısındaki aromatik ikincil aminlerin C-N gerilmesine aittir (Cardoso vd., 2007: 426).  $1287\text{ cm}^{-1}$  de bulunan pik ise aromatik amin bağlarının gerilme titreşimlerinden kaynaklanmaktadır.  $1029\text{ cm}^{-1}$  ve  $1644\text{ cm}^{-1}$  bulunan pikler ise sırasıyla PAMPSA yapısındaki  $\text{O=S=O}$  ve  $\text{C=O}$  gerilme titreşimlerine atfedilmiştir. (Sarihan, 2021: 179; J. Shen vd., 2018: 339). Spektrumda PANI ve PAMPSA yapılarına ait spesifik piklerin ortaya çıkması, PAMPSA yüklenmiş PANI sentezinin başarılı bir şekilde gerçekleştirildiğini göstermiştir.

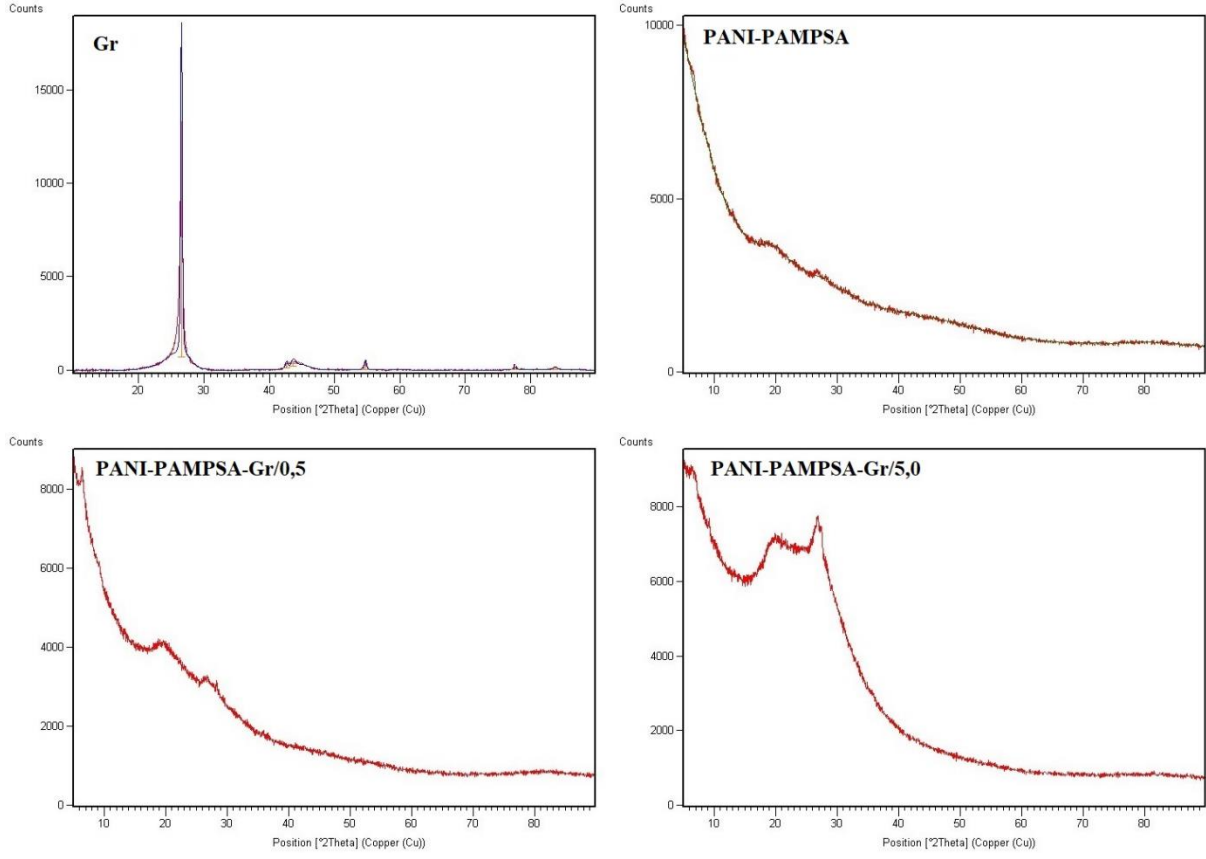


Şekil 4.3. PANI-PAMPSA yapısına ait FTIR spektrumu

## 4.2. Katkı Maddesi ve Membranların Karakterizasyonu

### 4.2.1. XRD analizleri

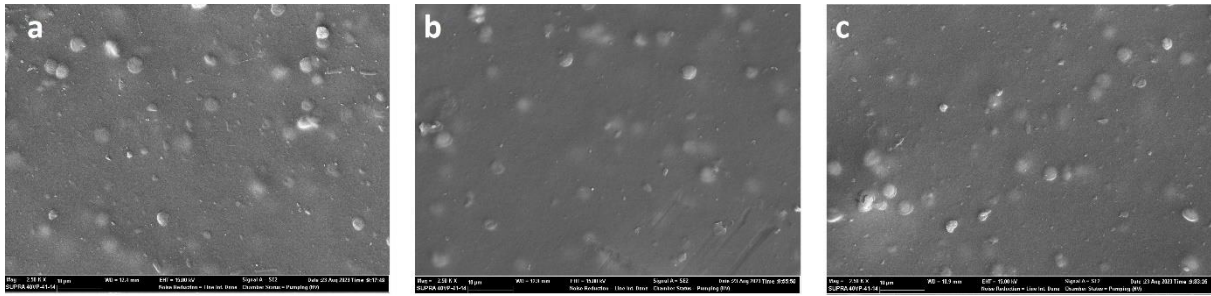
Şekil 4.4'te Grafen nanopartikülleri ve membran yapılarına ait XRD paterni verilmiştir. Gr nanopartiküllerine ait XRD paterni incelendiğinde,  $2\theta=26,5^\circ$ 'de belirgin bir pikin ortaya çıktığı görülmüştür (Darmawan vd., 2025: 4). Katkısız PANI PAMPSA membrana ait XRD paterninde Gr yapısına ait belirgin bir pik gözlemlenmezken Gr katkılı membran yapılarında spesifik Gr pikinin ortaya çıktığı ve artan katkı oranı ile şiddetinde belirgin bir artışın meydana geldiği gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Gr nanopartiküllerinin membran yapılarına katkılındığını doğrulamıştır.



Şekil 4.4. Gr nanopartikülleri ve membranlara ait XRD paternleri

#### 4.2.2. SEM analizleri

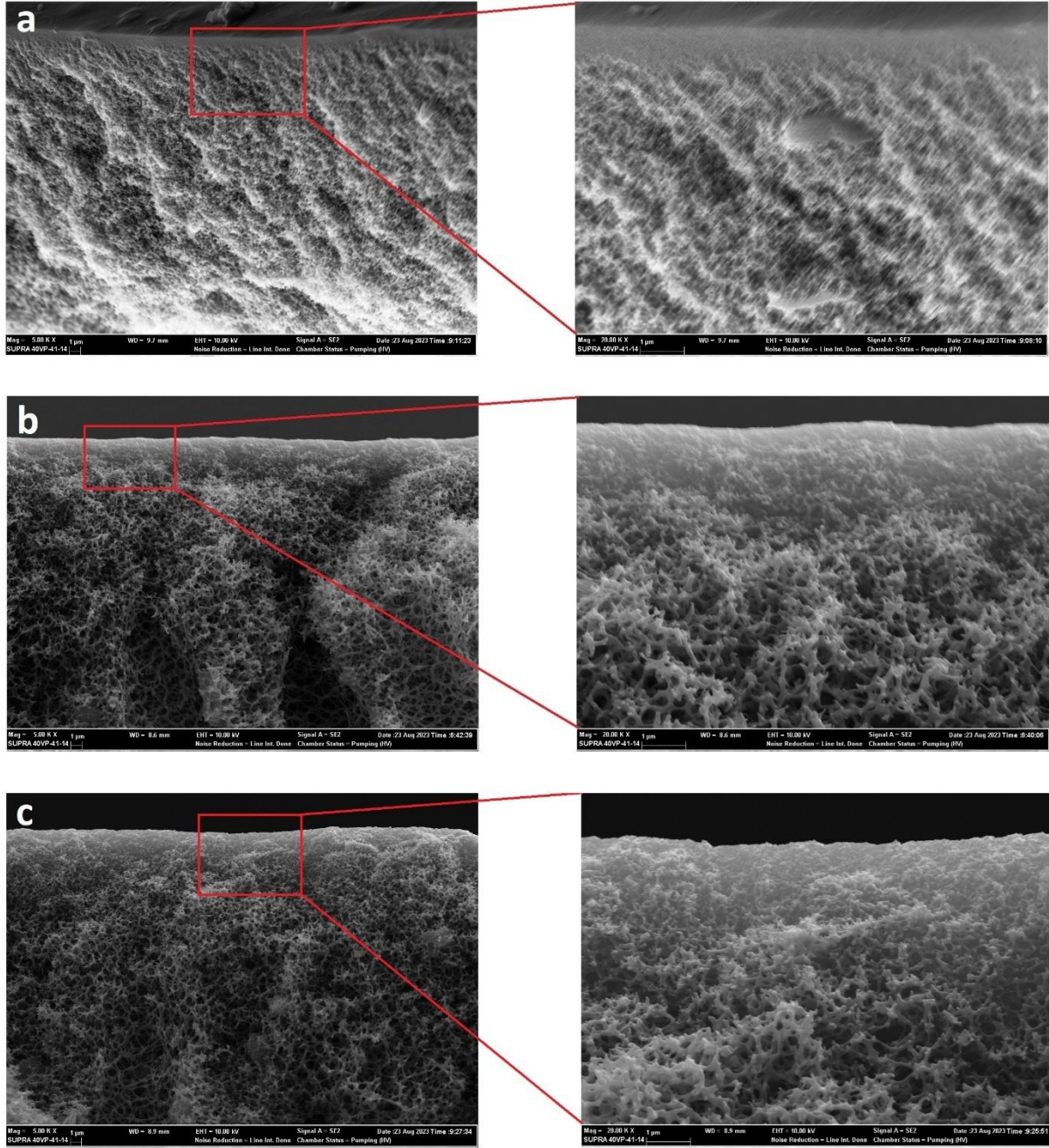
Hazırlanan membranların yüzey ve enine kesit morfolojileri, yoğun üst tabaka özelliklerinin incelenmesi, Gr nanopartiküllerinin membran yapısında homojen dağılımı, gibi incelemeler SEM analizleriyle gerçekleştirilmiştir. Katkısız ve Gr katkılı membranların yüzey SEM görüntüleri şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5. Katkısız ve Gr katkılı PAMPSA yüklenmiş PANI membranların yüzey SEM görüntüleri (a: Katkısız, b: %0,5 Gr katkılı, c: %5,0 Gr katkılı)

Şekil 4.5 incelendiğinde tüm membranların yüzey SEM görüntülerinin oldukça benzer ve klasik PANI membran görünümünde oldukları görülmüştür. Yüzeylerin SEM görüntülerinde yüzeyin makro gözenekler içermeyen, nispeten yoğun ve düz yapıda olduğu gözlemlenmiş,

ayrıca Gr modifikasyon sürecinde yüksek oranda Gr kullanımı da dahil yüzeyde belirgin bir topaklanma olmadığı görülmüştür.



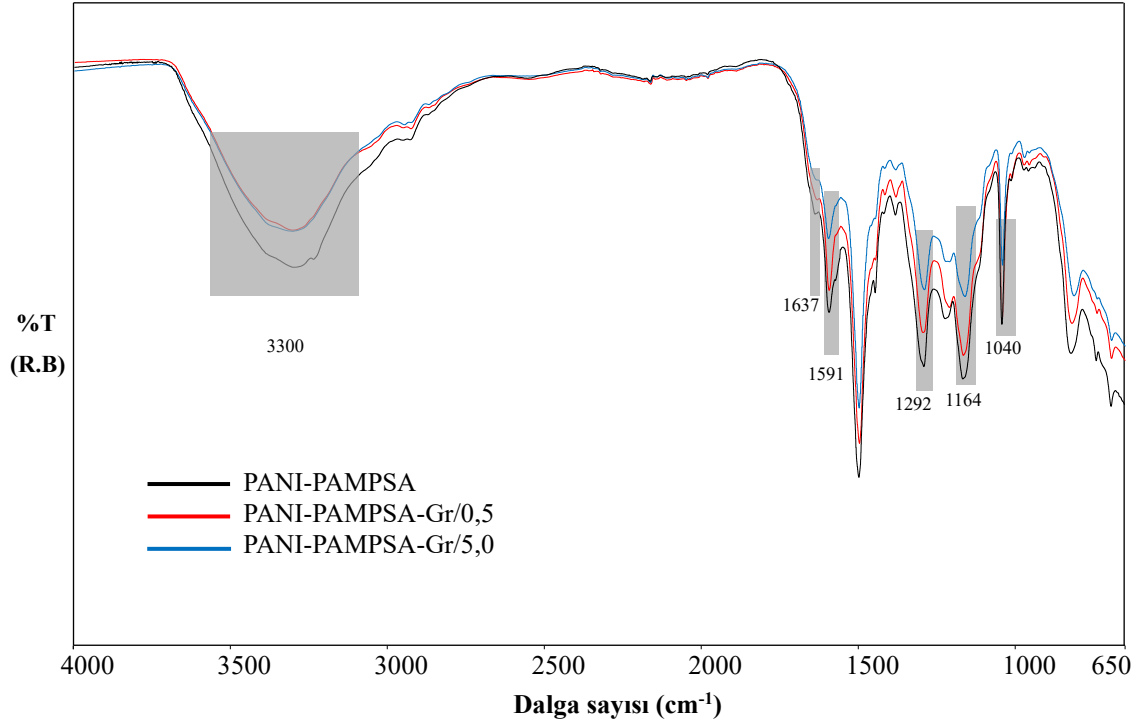
**Şekil 4.6.** Katkısız ve Gr katkılı PAMPSA yüklenmiş PANI membranların enine kesit SEM görüntüleri (a: Katkısız, b: %0,5 Gr katkılı, c: %5,0 Gr katkılı)

Şekil 4.6’da ise hazırlanan membranlara ait farklı büyütme oranlarında enine kesit SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde tüm membranların genel olarak süngerimsi yapıda oldukları ve kesitin üst bölgelerinde farklı kalınlıklarda yoğun tabakalarının bulunduğu gözlemlenmiştir. Üst tabaka kalınlıkları katkısız membranda  $0,7 \mu\text{m}$ , %0,5 ve %5,0 oranında Gr katkılı membranlarda ise sırası ile  $1,7 \mu\text{m}$  ve  $1,9 \mu\text{m}$  olarak belirlenmiştir. Yoğun üst tabaka

kalınlıklarının Gr katkılama ve artan katkı oranı ile artış göstermesi, Gr katkısı sebebiyle membran su severliğinin azalması ve buna bağlı olarak faz dönüşüm sürecinin daha yavaş gerçekleşmesine atfedilmiştir. Üst tabakalar ile ilgili bir diğer gözlem ise nispeten daha ince olan katkısız PANI-PAMPSA membrana ait tabakanın daha yoğun, sıkı ve gözeneksiz görünmesi olmuştur. Bu sonuç ise Gr katkılı membranlarda nanopartiküllerin faz dönüşüm sürecinde yapı içerisinde hareketliliği ve buna bağlı olarak nano boyut veya daha küçük boşluklar oluşturmaya atfedilmiştir. Yalnızca üst tabaka değil genel olarak tüm yapıda Gr katkılı membranların daha yüksek gözeneklilikte olduğu da gözlemlenen sonuçlardan biridir ve bu durumda üst tabakalara benzer şekilde nanopartiküllerin faz dönüşüm sürecindeki mobilitesinden kaynaklandığı öngörülmüştür. Membranların gözeneklilik incelemelerinde Gr katkısının gözenekliliği artırdığı yönündeki sonuçlar da SEM incelemelerini doğrular niteliktedir.

#### 4.2.3. FTIR analizleri

Katkısız ve Gr katkılı PANI-PAMPSA membranların FTIR spektrumları Şekil 4.7’de, verilmiştir. Spektrumlar incelendiğinde, tüm yapılara ait piklerin oldukça benzer olduğu görülmüştür. Tüm spektrumlarda gözlemlenen  $3100-3700\text{ cm}^{-1}$ ’deki geniş bant ve  $1637\text{ cm}^{-1}$  de gözlemlenen pikler -OH gerilme titreşimlerine veya yapıda tutunmuş su yapısına atfedilmiştir (Gautam vd., 2016: 211). Gr katkılı membranlarda bu piklerin şiddetlerinde meydana gelen azalmanın Gr katkılama sonucunda membranların daha hidrofobik hale gelmesinden kaynaklandığı öngörülmüştür. FTIR değerlendirmeleri ile temas açısı ve su tutma çalışma sonuçlarının aynı doğrultuda oldukları görülmüştür. Aynı zamanda  $1040, 1164, 1292, 1591\text{ cm}^{-1}$  de bulunan piklerin şiddetlerinde artan Gr oranı ile birlikte azalma meydana gelmiştir. Bu pikler sırası ile PAMPSA yapısındaki  $-\text{SO}_2-$  nin simetrik gerilme titreşimlerine, PANI zincirindeki kinon azotunun titreşimlerine, C-N bağlarına ait gerilme titreşimlerine ve kinon halkasına ait gerilme titreşimlerine aittir (Jeon vd., 2013: E). Hem PANI hem de PAMPSA yapılarındaki bağlara ait titreşimlerin şiddetlerinde azalma meydana gelmesi, Gr’in her iki yapı üzerinden etkileşimler oluşturarak tutunmasına atfedilmiştir.



**Şekil 4.7.** Katkısız ve Gr katkılı PANI-PAMPSA membranların FTIR spektrumları

#### 4.2.4. Temas açısı analizleri

Katkısız ve Gr katkılı PANI-PAMPSA membranlara ait temas açısı ölçüm sonuçları Tablo 4.1’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar, Gr katkısının membran yüzey temas açısını yükselttiğini, dolayısıyla membran yüzey su severliğini azalttığını göstermiştir. Ortaya çıkan sonuç Gr yapısının hidrofobik özelliğine atfedilmiştir (Assad vd., 2024: 9; De Luca vd., 2023: 15). Hidrofobik özelliği sayesinde yüzey ve yüzeye yakın bölgelerde tutunan nanopartiküllerin membran yüzeyinde suyun yayılmasını önlediği ve böylece yüzey temas açılarının arttığı kanaati oluşmuştur. Su severlik ile ilgili sonuçlar aynı zamanda geçirgenlik verileri ile de uyumludur, yüksek oranda Gr katkısı içeren membran daha düşük geçirgenlik performansı sergilenmesinin bir sebebinin de yüzey su severliğinin düşmesi olduğu öngörülmüştür.

**Tablo 4.1.** Hazırlanan membranların temas açıları

	PANI-PAMPSA	PANI-PAMPSA-Gr/0,5	PANI-PAMPSA-Gr/5,0
Temas açısı (°)	46	51	69

#### 4.2.5. İletkenlik ölçümleri

Hazırlanan membran yapılarının farklı noktaları üzerinde gerçekleştirilen iletkenlik ölçüm sonuçları ve ortalama iletkenlik değerleri Tablo 4.2’de verilmiştir. PANI-PAMPSA yapısı halihazırda iletken bir polimerdir, ölçüm sonuçlarında elde edilen iletkenlik değeri  $10^{-4}$  S/cm mertebesinde bulunmuştur ve bu sonuçlar literatür ile uyumludur (Sarihan vd., 2019b: s.18;L. L. Xu vd., 2019: 269). Grafen katkısı varlığında membran yapısının elektriksel iletkenliği yükselmiş ve  $10^{-3}$  S/cm seviyesinde iletkenlik elde edilmiştir. %5 oranında Gr katkısı ile membran iletkenliği  $2,16 \times 10^{-3}$  S/cm olarak belirlenmiş ve bu değer Gr katkısı içermeyen membrana göre 4,2 kat daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Çalışma kapsamında hedeflendiği gibi Gr katkısı ile PANI-PAMPSA membranın iletkenlik özellikleri etkili seviyede iyileştirilmiştir.

**Tablo 4.2.** Hazırlanan membranlara ait iletkenlik ölçüm sonuçları

	PANI-PAMPSA ( $\times 10^{-4}$ )	PANI-PAMPSA-Gr/0,5 ( $\times 10^{-3}$ )	PANI-PAMPSA-Gr/5,0 ( $\times 10^{-3}$ )
İletkenlik ölçümleri (S/cm)	7,20	1,30	1,6
	5,70	1,32	1,6
	5,40	1,10	4,1
	1,46	1,28	2,6
	6,38	1,19	1,6
	7,18	1,10	2,2
	4,84	1,32	1,5
	7,40	1,30	2,2
	1,54	1,26	2,7
	4,47	1,16	1,5
Ortalama iletkenlik (S/cm)	$5,16 \times 10^{-4}$	$1,23 \times 10^{-3}$	$2,16 \times 10^{-3}$

#### 4.2.6. Su tutma, gözeneklilik, ortalama gözenek yarıçapı ve geçirgenlik çalışmaları

Hazırlanan membranların genel yapılarının su severliği, gözenek ve geçirgenlik özellikleri ile ilgili incelemeler için gerçekleştirilen çalışmalara ait sonuçlar Tablo 4.3’te verilmiştir. Su tutma çalışmaları membran yapısının genel su severliği hakkında bilgi vermektedir. Su tutma çalışması sonuçları, membran yapılarının genel su severliklerinin Gr katkısı ile azaldığını göstermiştir ve sonuçların yüzey su severliği sonuçları aynı doğrultuda

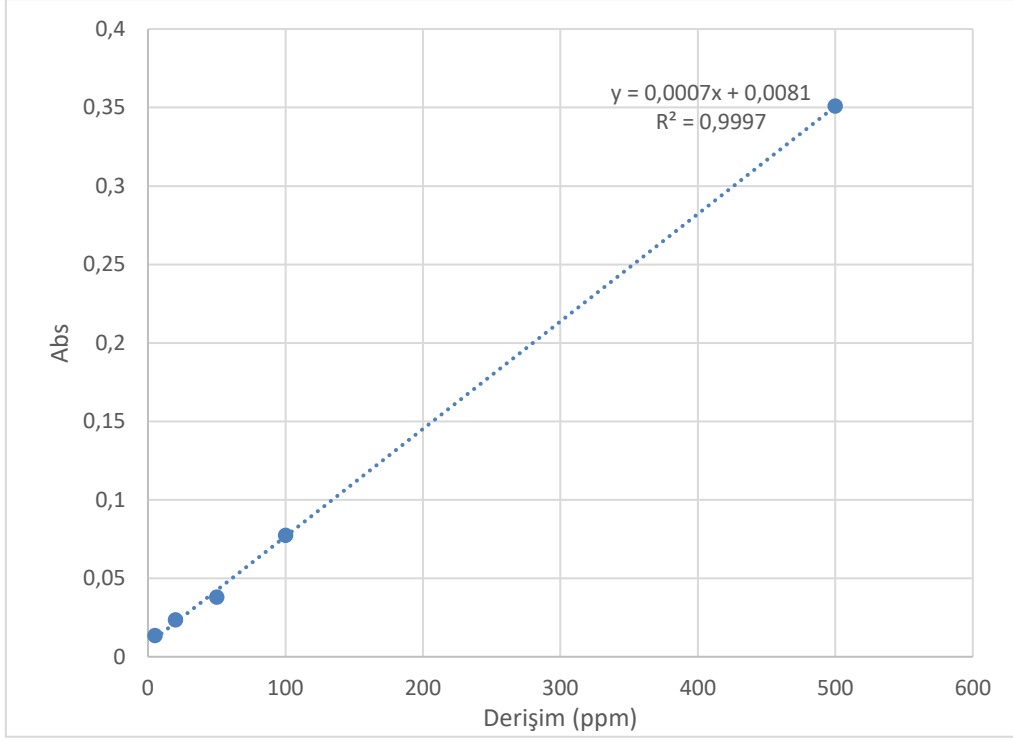
olduğu görülmüştür. Gözeneklilik çalışmaları ise, gözenekliliğin artan Gr katkısı ile yükselme eğiliminde olduğunu göstermiştir. Bu sonucun nanopartikül yapılarının faz dönüşümü sürecindeki mobilitesi sayesinde membran genel yapısında nano gözenekler oluşturabilmesi ve bu gözenekler içerisinde yerleşen suyun nispeten daha zor uzaklaşmasına bağlı olabileceği öngörülmüştür. Membran geçirgenlik çalışması sonuçları incelendiğinde Gr katkısının hidrofobik yapısına bağlı olarak artan katkı oranı ile birlikte azalma eğiliminde geçirgenlik gözlemlenmiştir. Ancak bu azalmaya rağmen, çalışma kapsamında hazırlanan membranların geçirgenlikleri literatürdeki PANI temelli UF membranları ile karşılaştırıldığında, benzer veya daha yüksek seviyede performans sergilediği belirlenmiştir (Huang vd., 2015: 8731; Lin vd., 2021: 3703; L. L. Xu vd., 2019: 269). Guerout-Elford-Ferry eşitliğinden faydalanılarak hesaplanan ortalama gözenek yarıçapları incelendiğinde artan Gr katkı oranı ile birlikte azalan ortalama yarıçap değerleri gözlemlenmiştir. Sonuçların geçirgenlik verileri ile benzer eğilimde olmasının, ortalama gözenek yarıçapı hesaplanmanın da suyun membrandan akış hızına bağlı olarak hesaplanması olduğu öngörülmüştür.

**Tablo 4.3.** Hazırlanan membranlara ait % su tutma, % gözeneklilik ve ortalama gözenek yarıçapı ve saf su geçirgenlik sonuçları,

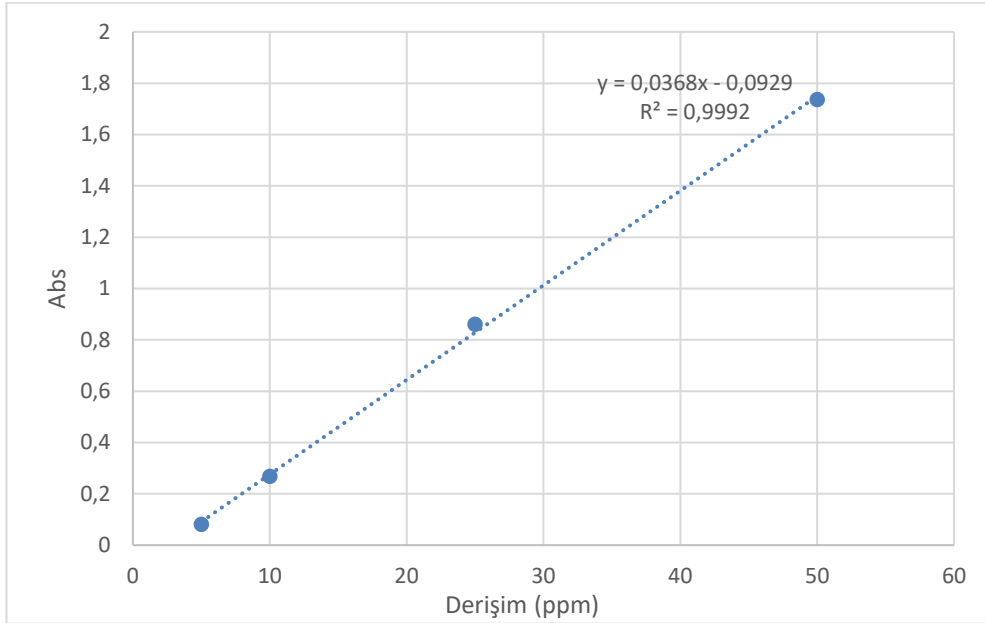
Membran	Su tutma (%)	Gözeneklilik (%)	Geçirgenlik (L/ (m <sup>2</sup> .sa.bar)	Ortalama gözenek yarıçapı (nm)
PANI-PAMPSA	92,4	20,4	200,7	64,1
PANI-PAMPSA-Gr/0,5	90,9	20,7	176,5	58,9
PANI-PAMPSA-Gr/5,0	88,5	21,6	146,3	51,4

#### 4.2.7. Dışlama ve MWCO çalışmaları

Hazırlanan membranların dışlama özelliklerinin incelenebilmesi için BSA ve HA çözeltileri kullanılmıştır. Elde edilen dışlama verilerinden yararlanılarak hazırlanan membranların MWCO değerleri de incelenmiştir. Dışlama çalışmaları ve MWCO incelemeleri hazırlanan membranların hedeflendiği gibi UF seviyesinde dışlama yapabilme özelliğinde olduklarının doğrulanması amacıyla gerçekleştirilmiştir. Dışlama sonrası permeat içerisindeki BSA ve HA derişimlerinin belirlenmesinde kullanılan kalibrasyon grafikleri sırasıyla Grafik 4.1 ve Grafik 4.2’de verilmiştir. Elde edilen kalibrasyon grafiklerinin R<sup>2</sup> değerleri 0,9997 ve 0,9992 olarak belirlenmiş ve grafiklerin yeterince hassas derişim belirlemeleri için elverişli oldukları değerlendirilmiştir.



**Grafik 4.1.** BSA dışlama çalışmalarında kullanılan kalibrasyon grafiği



**Grafik 4.2.** HA dışlama çalışmalarında kullanılan kalibrasyon grafiği

Hazırlanan membranlar için elde edilen BSA ve HA dışlama %'leri Tablo 4.4'te verilmiştir. Tablo 4.4, incelendiğinde, hazırlanan tüm membranların, UF membranlarının dışlama performanslarının incelenmesinde model bir yapı olan BSA için, %90'ın üzerinde dışlama performansı sergilediği görülmüştür. Ayrıca farklı moleküler ağırlıklardaki hümik bileşenlerin karışımından oluşan HA için ise tüm membranların %80'in üzerinde dışlama

performansı sergilediği belirlenmiştir. Bu sonuçlar tüm membranların MWCO değerlerinin 66000 Da'dan daha düşük (ortalama 60000-50000 Da seviyelerinde) olduğunu göstermekte ve UF membranı olarak kullanılabilir olduklarını doğrulamaktadır.

**Tablo 4.4.** Hazırlanan membranların BSA dışlama oranları

	PANI-PAMPSA	PANI-PAMPSA-Gr/0,5	PANI-PAMPSA-Gr/5,0
BSA dışlama (%)	94,6	93,2	92,9
HA dışlama (%)	84,9	83,9	82,2

#### 4.2.8. Kirlenme çalışmaları

Membranların kirlenme özelliklerinin belirlenmesinde kirletici olarak BSA ve HA ile çalışmalar gerçekleştirilmiştir. BSA ile gerçekleştirilen çalışmalarda 500 ppm BSA çözeltisi, HA ile gerçekleştirilen çalışmalarda 50 ppm HA çözeltisi, kullanılmıştır. Saf su ve kirletici içeren çözeltiler kullanılarak gerçekleştirilen filtrasyon süreçlerinden elde edilen verilerden hesaplanan, akı geri kazanım (% AGO), toplam kirlenme (% TKO), tersinir kirlenme (% RKO) ve tersinmez kirlenme (% ZKO) oranları, kirletici türüne göre belirlenmiş ve sırasıyla Tablo 4.5 ve 4.6'da verilmiştir.

**Tablo 4.5.** BSA kirlenme çalışma sonuçları

Membran	PANI-PAMPSA	PANI-PAMPSA-Gr/0,5	PANI-PAMPSA-Gr/5,0
(% TKO)	75,0	77,1	77,6
(% RKO)	6,90	6,50	5,80
(% ZKO)	68,1	70,6	71,8
(% AGO)	31,9	29,4	28,2

**Tablo 4.6.** HA kirlenme çalışma sonuçları

Membran	PANI-PAMPSA	PANI-PAMPSA-Gr/0,5	PANI-PAMPSA-Gr/5,0
(% TKO)	64,2	66,7	64,3
(% RKO)	32,0	33,7	34,5
(% ZKO)	32,2	33,0	29,8
(% AGO)	67,8	67,0	70,2

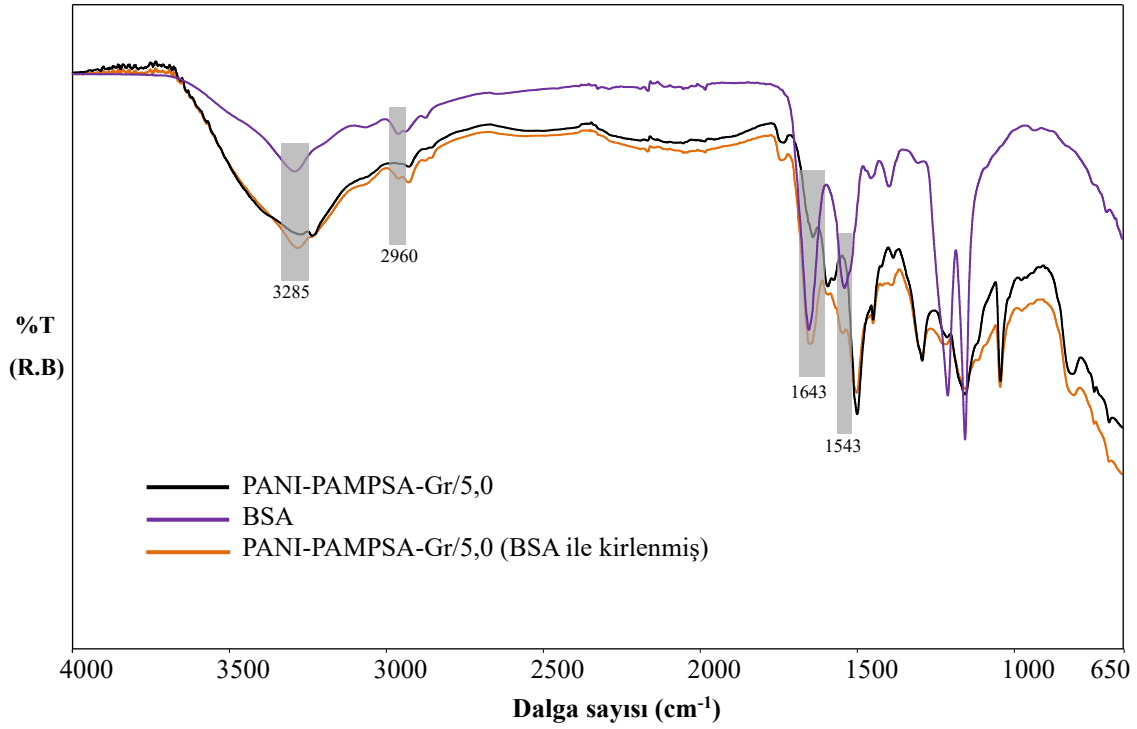
Kirlenme süreçlerinde kullanılan BSA 66 KDa moleküler ağırlığa sahip oldukça yüksek moleküler boyutta ve UF membranları için model bir proteindir. Hüyük asit ise geneli 20-50 KDa arasında yapılardan oluşan ve daha büyük ve daha küçük yapıları da içeren hüyük bileşenlerin karışımıdır. Tablo 4.5 ve 4.6'da verilen kirlenme verileri, membranların saf su akı özelliklerinin belirlenmesi, kirlenici çözeltileri ile filtrasyon süreci, temizleme süreci ve temizleme sonrası saf su ile filtrasyon süreçlerini içeren çalışmalar gerçekleştirilerek ve bu süreçlerde ortaya çıkan akı değerleri kullanılarak elde edilmiştir.

BSA ile kirlenme verileri incelendiğinde toplam kirlenme oranlarının Gr katkısı ve artan Gr oranı ile yükselme gösterdiği ve katkısız membranda %75 seviyesinde olan kirlenme oranı %5 Gr katkılı membranda %77,6 seviyesine yükseldiği gözlemlenmiştir. Bu artışın temel sebebinin Gr katkısı ile su severliği azalan membran yapısının büyük organik yapıdaki BSA ile daha kuvvetli etkileşim kurabilmesi olduğu öngörülmüştür. Tersinir ve tersinmez kirlenme oranları incelendiğinde, Gr katkısının tersinmez kirlenme oranını artırma yönünde etki yaptığı görülmüştür. Katkısız membranda görülen %6,9 oranındaki tersinmez kirlenme oranı, Gr katkısı varlığında azalmış ve %5 Gr katkılı membranda %5,8 seviyesine gerilemiştir. Bu sonuç ise membran yapılarının morfolojisi ile ilişkilendirilmiştir. Enine kesit SEM görüntülerinde de görüldüğü gibi, katkısız membranda daha yoğun ince bir üst tabaka gözlemlenirken, artan Gr katkısı daha kalın ancak nispeten daha az yoğun özellikte üst tabaka oluşuna sebep olmuştur. Oldukça büyük molekül yapısındaki BSA katkısız membrandaki nispeten daha yoğun üst tabaka sayesinde Gr katkılı membranlara göre daha yüksek oranda yüzeysel kirlenme oluşturmuş ve basit hidrolik temizleme süreci ile yüzeysel kirlenme daha kolay uzaklaştırılabilmiş ve böylece daha düşük tersinmez kirlenme (daha yüksek tersinir kirlenme) oranı elde edilmiştir. Gr katkılı membranlarda yoğunluğu nispeten azalan ve daha gözenekli hale gelen üst tabaka sebebiyle BSA yapıları daha yüksek oranda iç kısımlarda kirlenmeye sebep olmuş ve bu durum da tersinir kirlenme oranını azaltma eğiliminde sonuçların elde edilmesini sağlamıştır. Akı geri kazanım oranları da kirlenme sonuçları ile aynı doğrultuda sonuçlar ortaya çıkarmış, Gr katkısı ve artan katkı oranı daha düşük akı geri kazanım oranı eldesine sebep olmuştur.

HA ile kirlenme çalışması sonuçları incelendiğinde, BSA ile kirlenmeye göre toplam kirlenme oranlarında tüm membranlar için azaldığı görülmüştür. Bu azalmanın HA yapısının farklı büyüklüklerdeki moleküler ağırlıklara sahip karmaşık yapısından kaynaklandığı öngörülmüştür. Bu sonuç nispeten küçük moleküler ağırlıklardaki yapıların dışlanmadan membrandan geçebilmesi ve kirlenme oluşturmamasına atfedilmiştir. HA yapısına ait daha

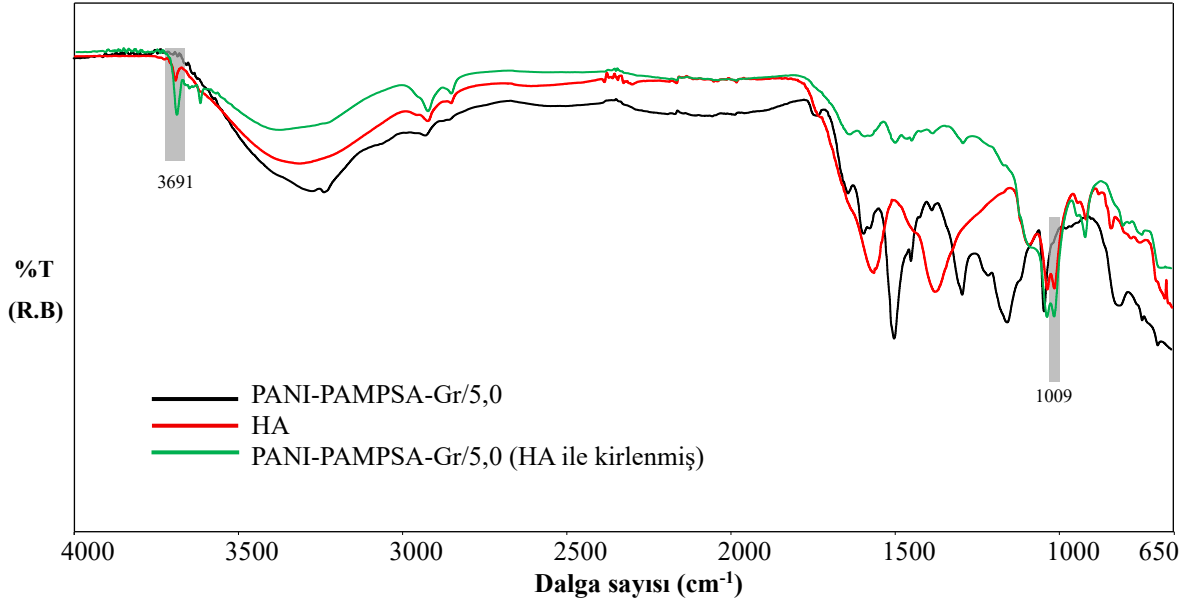
düşük oranda dışlama verileri bu sonucu destekler niteliktedir. Toplam kirlenmenin Gr katkısı ile %0,5 katkılı yapıda artması artan ve daha az yoğun hale gelen üst tabaka kalınlığına, %5,0 oranında katkı içeren membranda tekrar azalması ise yüksek oranda su sever yapıdaki HA'nın daha düşük su severliğe sahip membranla nispeten daha düşük etkileşim kurabilme durumuna atfedilmiştir. HA ile kirlenmenin tersinirliğinin BSA ile kirlenmeye göre belirgin şekilde daha yüksek olmasının temel sebebinin ise HA'nın iyonik yapısı sayesinde daha su sever olması ve hidrolik temizleme sürecinde su ile daha kuvvetli etkileşim kurabilmesi olduğu kanısı oluşmuştur. Katkısız membranda %32 olan tersinir kirlenme oranı Gr katkısı ve artan Gr oranı ile yükselmiş olup %5,0 oranında Gr içeren membranda %34,5 seviyesine ulaşmıştır. Bu sonuç, Gr katkısı ile membran yapısının su severliğinin azalmasına bağlı olarak su sever yapıdaki HA ile membran arasındaki etkileşim kuvvetinin azalması ve bu sayede hidrolik temizlemenin etkinliğinin daha da artmasına atfedilmiştir. HA ile kirlenme sonrasında, katkısız membranda %67,8 olarak elde edilen akı geri kazanım oranı %0,5 Gr katkısı ile küçük bir azalma göstererek %67 ye gerilemiştir. Burada temel etken daha kalın üst tabaka sayesinde kirliliklerin hidrolik temizleme ile daha zor uzaklaşmasına atfedilmiştir. %5,0 Gr katkılı membranda bu oran artarak %70,2 seviyesine yükselmesinde ise yüksek oranda Gr sayesinde su severliği azalan membran ile HA arasındaki etkileşimin azalması ve hidrolik temizleme ile nispeten daha kolay uzaklaştırılabilmesi olarak yorumlanmıştır.

Kirlenme türleri ile ilgili filtrasyon verilerine dayalı hesaplamaların yanı sıra kirlenmiş membranlara ait FTIR spektrumları incelenmiş, membran yapısı ile etkileşim kurarak tutunan kirleticilerin varlığı doğrulanmıştır. Bu amaçla gerçekleştirilen FTIR analizleri %5 Gr katkılı PANI-PAMPSA ile gerçekleştirilmiş ve kirlenme öncesi ve kirlenme sonrası elde edilen spektrumlar karşılaştırılarak değerlendirmeler yapılmıştır. Şekil 4.8'de, BSA yapısına ait FTIR spektrumu ile %5 Gr katkılı membrana ait BSA ile kirlenme öncesi ve sonrasına ait FTIR spektrumları verilmiştir. Verilen spektrumlar karşılaştırıldığında, kirlenme sonrasına ait spektrumda  $3285\text{ cm}^{-1}$ 'de gözlemlenen ve BSA yapısına ait spektrumda da belirgin olarak görünen pikin BSA yapısındaki C-N ve N-H gerilme titreşimlerine ait olduğu öngörülmüştür (Dubeau vd., 2010: s.16). Kirlenme sonrası ortaya çıkan bir diğer pik ise  $2960\text{ cm}^{-1}$  gözlemlenen ve C-H gerilme titreşimlerine atfedilen piktir (P. Yadav & Yadav, 2021: s.6).  $1643$  ve  $1543\text{ cm}^{-1}$ 'de gözlemlenen pikler de BSA yapısı için spesifik piklerdir ve sırasıyla C=O gerilme titreşimlerine ve C-N gerilme ile N-H eğilme titreşimlerine aittir (Nairi vd., 2018: s.46). Elde edilen sonuçlar membran yapısında BSA'nın varlığını göstermiş ve membranın BSA yapısı ile kirlendiğini doğrulamıştır.



**Şekil 4.8.** BSA ile kirlenme FTIR spektrumları

Şekil 4.9’da ise HA yapısına ait FTIR spektrumu ile %5 Gr katkılı membrana ait HA ile kirlenme öncesi ve sonrasına ait FTIR spektrumları verilmiştir. Verilen spektrumlar incelendiğinde kirlenme sonrasında spektrumda, HA yapısına ait spektrumda da var olan, yeni piklerin ortaya çıktığı ve aynı zamanda, membran yapısında kirlenme öncesinde şiddeti yüksek olan bazı piklerin şiddetlerinde belirgin bir azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Kirlenme sonrasına ait spektrumda  $3691$  ve  $1009\text{ cm}^{-1}$ ’ ortaya çıkan pikler sırası ile  $-\text{NH}_2$  ve C-O gerilme titreşimlerine aittir (Dyab vd., 2016: s.116). Bu pikler HA yapısı için spesifikdir ve polimerik yapının HA ile kirlendiğini doğrulamaktadır.



Şekil 4.9. HA ile kirlenme FTIR spektrumları

#### 4.2.9. Temizleme Çalışmaları

Çalışma kapsamında, PANI-PAMPSA membran yapısına Gr nanopartiküllerinin katılanması ile elektriksel iletkenliği iyileştirilmiş membran hazırlanmasında temel hedef membranın elektriksel temizleme süreci ile daha etkili şekilde temizlenebilmesidir. Bu amaçla, katkısız PANI-PAMPSA membran ve elektriksel iletkenliği en yüksek membran olan %5,0 Gr katkılı PANI-PAMPSA membran kullanılarak elektriksel temizleme çalışmaları gerçekleştirilmiş ve elektriksel iletkenliğin iyileştirilmesinin temizleme sürecine etkisi incelenmiştir. Elektriksel temizleme süreçlerinde kirletici olarak, kirlenme çalışmalarında daha yüksek toplam kirlenme oranına sahip olan, klasik hidrolik temizleme sürecinde tersinirliği ve akı geri kazanım oranı oldukça düşük olan, aynı zamanda ultrafiltrasyon membranları için model bir yapı olan BSA seçilmiş ve çalışmalar bu kirletici kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elektriksel temizleme sürecindeki optimizasyon çalışmaları sonucunda 15V'un altındaki potansiyel uygulamalarının sonuçlar üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. 15V uygulaması ile gerçekleştirilen çalışmada akı geri kazanım oranında kayda değer değişimlerin elde edildiği, 20V potansiyel uygulaması ile ise 15V potansiyel uygulaması ile elde edilen sonuçlara benzer bir etkinin olduğu görülmüş ve bu nedenle 15V alternatif akım (AC) potansiyel uygulaması optimum olarak belirlenmiştir. Membranların elektriksel temizlenme çalışmaları kapsamında, kirlenme çalışmaları sonrasında 30 dakika boyunca 15V elektriksel potansiyel uygulaması yapılarak elektriksel temizleme işlemi gerçekleştirilmiş ve ardından tekrar saf su ile filtrasyon işlemi gerçekleştirilerek akı değerleri elde edilmiştir. Çalışma

sonunda elde edilen verilerden, akı geri kazanım (% AGO), toplam kirlenme (% TKO), tersinir kirlenme (% RKO) ve tersinmez kirlenme (% ZKO) oranları belirlenmiş ve sonuçlar Tablo 4.7’de verilmiştir.

**Tablo 4.7.** BSA kirlenme ve elektriksel temizleme çalışması sonuçları

<b>Membran</b>	<b>PANI-PAMPSA</b>	<b>PANI-PAMPSA-Gr/5,0</b>
(% TKO)	75,0	77,6
<b>(% RKO)</b>	<b>23,3</b>	<b>39,7</b>
(% ZKO)	51,7	38,1
<b>(% AGO)</b>	<b>48,3</b>	<b>61,9</b>

Tablo 4.7’de verilen elektriksel temizlemenin etkinliği ile ilgili sonuçlar incelendiğinde ve klasik hidrolik temizleme sonuçları ile karşılaştırıldığında, elektriksel temizleme ile hem katkısız hem de %5,0 Gr katkılı membran için kirlenmenin tersinirliğinde ve akı geri kazanım oranında yükselme olduğu ancak özellikle Gr katkılı membran için yükselmenin çok daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir. Katkısız membranda klasik hidrolik temizleme süreci ile tersinir kirlenme oranı %6,9 seviyesinde iken, elektriksel temizleme ile %23,3 seviyesine ulaşmıştır. Gr katkılı membranda ise Gr yapısının membran su severliğini azaltmasına bağlı olarak azalan ve klasik hidrolik temizleme ile %5,8 oranında hesaplanan tersinir kirlenme oranı, elektriksel temizleme süreci ile membran iletkenliğinin daha yüksek olmasına bağlı olarak %39,7 seviyesine yükselmiştir. %AGO değerleri de katkısız membran için %31,9 değerinden %48,3’e yükselirken, Gr katkılı membranda %28,2 değerinden %61,9 değerine yükseldiği belirlenmiştir. Elektriksel potansiyel uygulaması ile temizleme sürecinde meydana gelen iyileşmeler, kirleticiler ile membran yapısı arasındaki elektrostatik etkileşimlerin elektriksel potansiyel etkisi ile değişmesi ve kirleticilerin salınımı sonucu yapıdan daha kolay ayrılması ile ilişkilidir. İletkenliği daha yüksek membrana elektriksel potansiyel uygulamasının elektrostatik etkileşimler üzerindeki etkisi daha yüksek olduğundan, %5 Gr katkılı membranda kirlenme daha yüksek oranda tersinir hale gelmiş ve daha yüksek akı geri kazanımı sağlanmıştır.

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada öncelikle PANI-PAMPSA oksidatif polimerizasyon yöntemiyle sentezlenmiş ve FTIR, EDX, SEM ve XRD analizleri ile PAMPSA'nın PANI'ya katkılı olduğu doğrulanmıştır. Ardından Gr katkısı kullanılarak elektriksel iletkenliği iyileştirilmiş PANI-PAMPSA membranlar hazırlanmıştır. Hazırlanan membranların yapısal ve morfolojik olarak karakterizasyonu yapılmış, performans ve kirlenme özellikleri incelenmiş ve elektriksel temizleme çalışmaları gerçekleştirilerek elektriksel iletkenlik iyileştirilmesinin temizlemede etkinliği değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen XRD incelemeleri Gr'in membran yapılarına katkılı olduğunu doğrulamıştır. Hazırlanan katkısız, %0,5 ve %5 Gr katkılı PANI-PAMPSA membranların yüzey SEM görüntüleri incelendiğinde tüm membranların yüzey SEM görüntülerinin oldukça benzer ve klasik PANI membran görünümünde oldukları, enine kesit SEM görüntüleri incelendiğinde ise tüm membranların genel olarak süngerimsi yapıda oldukları ve üst bölgelerinde farklı kalınlıklarda yoğun tabakaya sahip oldukları gözlemlenmiştir. Üst tabaka kalınlıkları katkısız membranda 0,7 µm, %0,5 ve %5,0 oranında Gr katkılı membranlarda ise sırası ile 1,7 µm ve 1,9 µm olduğu belirlenmiştir. Yoğun üst tabaka kalınlıklarının Gr katkılama ve artan katkı oranı ile artış göstermesi, Gr katkısı sebebiyle membran su severliğinin azalması ve buna bağlı olarak faz dönüşüm sürecinin daha yavaş gerçekleşmesine atfedilmiştir. Ayrıca Gr katkısının nanopartiküllerin faz dönüşüm sürecindeki mobilitesinden dolayı gözenekliliği artırdığı belirlenmiştir. Membranların yüzey temas açıları incelendiğinde Gr'in hidrofobik özelliğe sahip olmasından dolayı Gr katkısı ve artan katkı oranı ile yüzey su severliğinin azaldığı ve dolayısıyla yüzey temas açılarının yükseldiği belirlenmiştir. Aynı zamanda yüzey su severlik sonuçlarının geçirgenlik verileri ile birbirini destekler nitelikte olduğu, yüksek oranda Gr katkısı içeren membranın daha düşük geçirgenlik performansı sergilemesinin bir sebebinin de yüzey su severliğinin düşmesi olduğu öngörülmüştür. Hali hazırda iletken özellikte olan PANI-PAMPSA membranın %5,0 oranında Gr katkısı ile elektriksel iletkenliğinin yükseldiği ve  $2,16 \times 10^{-3}$  S/cm iletkenlik değerinin elde edildiği belirlenmiş ve bu değer katkısız membrana göre 4,2 kat daha yüksek olduğu görülmüştür. Çalışma kapsamında hedeflendiği gibi Gr katkısı ile PANI-PAMPSA membranın iletkenlik özelliklerinin etkili seviyede iyileştirildiği belirlenmiştir. Hazırlanan membranların dışlama özelliklerini tespit etmek için BSA ve HA çözeltileri kullanılmıştır. Membranların BSA dışlama oranı %90'ın üzerinde, HA dışlama oranının ise %80'in üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde ise MWCO değerlerinin 66000 Da'dan daha düşük (ortalama 60000-50000 Da seviyelerinde) olduğu ve UF membranı olarak kullanılabilir

oldukları doğrulanmıştır. Membranların kirlenme özelliklerinin belirlenmesinde kirlenme olarak BSA ve HA kullanılmıştır. Yapılan BSA kirlenme testleri, Gr katkısının membranların toplam kirlenme eğiliminde artışa neden olduğunu göstermiştir. Katkısız membranda %75 olan toplam kirlenme oranı, %5 Gr katkısıyla %77,6'ya yükselmiştir. Bu artış, Gr katkısıyla daha hidrofobik hale gelen membranın BSA molekülleriyle daha kuvvetli etkileşim kurabilmesine bağlanmıştır.

Tersinir ve tersinmez kirlenme oranları incelendiğinde, Gr katkısının tersinmez kirlenme oranını artırma yönünde etki yaptığı görülmüştür. Katkısız membranda görülen %6,9 oranındaki tersinmez kirlenme oranı, Gr katkısı varlığında azalmış ve %5 Gr katkılı membranda %5,8 seviyesine gerilemiştir. Bu sonuç ise membran yapılarının morfolojisi ile ilişkilendirilmiş, SEM görüntüleri ile de desteklenmiş ve Gr katkısıyla üst tabakanın daha kalın ancak daha gözenekli hale gelmesiyle açıklanmıştır. Katkısız membrandaki daha yoğun üst tabaka, kirlenmenin yüzeyde kalmasını sağlamış ve nispeten daha tersinir bir kirlenme oluşturmuştur. Buna karşılık, Gr katkılı membranlarda BSA'nın nispeten daha gözenekli üst tabakası içerisine daha fazla nüfuz etmesi tersinmez kirlenme eğilimini artırmıştır. Akı geri kazanım oranları da kirlenme sonuçları ile aynı doğrultuda sonuçlar ortaya çıkarmış, Gr katkısı ve artan katkı oranı daha düşük akı geri kazanım oranı eldesine sebep olmuştur. HA ile yapılan kirlenme testleri, tüm membranlarda toplam kirlenme oranlarının azaldığını göstermiştir. Bu azalmanın HA yapısının farklı büyüklüklerdeki moleküler ağırlıklara sahip karmaşık yapısından kaynaklandığı öngörülmüştür. Nispeten küçük moleküler ağırlıklardaki yapıların dışlanmadan membrandan geçebilmesi ve kirlenme oluşturmamasının, bu durumun en temel sebebi olduğu öngörülmüştür. Gr katkısının %0,5 oranında toplam kirlenmeyi artırması, üst tabakanın daha kalın ve daha az yoğun hale gelmesine; %5 Gr katkısında ise tekrar azalma göstermesi, HA'nın su sever yapısının, daha düşük su severliğe sahip membran yapısıyla daha zayıf etkileşim kurmasına atfedilmiştir. HA ile oluşan kirlenmenin daha yüksek oranda tersinir olması, HA'nın iyonik ve su sever yapısı sayesinde basit hidrolik temizlik sırasında suyla daha etkin etkileşim kurabilmesine bağlanmıştır. Tersinir kirlenme oranı katkısız membranda %32 iken, Gr katkısıyla artış göstermiş ve %5 Gr katkılı membranda %34,5'e yükselmiştir. Bu sonuç, membran-su etkileşiminin azalmasının, HA'nın tutulmasını zorlaştırarak temizliği kolaylaştırmasıyla ilişkilendirilmiştir. Akı geri kazanım oranları da bu eğilimi desteklemiştir. Katkısız membranda %67,8 olan akı geri kazanım oranı, %0,5 Gr katkısında %67'ye düşmüş, ancak %5 Gr katkısıyla %70,2'ye yükselmiştir. Bu artış, HA ile zayıflayan etkileşim sonucu kirlenmenin daha kolay giderilebilmesine bağlanmıştır. Kirlenme türlerine ilişkin filtrasyon

verilerine ek olarak yapılan FTIR analizleri, kirleticilerin membran yapısıyla etkileşime geçerek yapıda tutulduğunu doğrulamıştır.

Çalışma kapsamında, katkısız PANI-PAMPSA membran ve elektriksel iletkenliği en yüksek membran olan %5,0 Gr katkılı PANI-PAMPSA membran kullanılarak BSA için elektriksel temizleme çalışmaları gerçekleştirilmiş ve elektriksel iletkenliğin iyileştirilmesinin temizleme sürecine etkisi incelenmiştir. Elektriksel temizleme sürecinde potansiyel uygulaması için gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları sonucunda, 15V AC potansiyel uygulamasının temizleme açısından en verimli sonuçları verdiği belirlenmiştir. Bu potansiyel ile 30 dakika boyunca elektriksel temizleme uygulanan membranlarda toplam kirlenmenin azaldığı, tersinir kirlenme oranlarının ve akı geri kazanım oranlarının arttığı tespit edilmiştir. Katkısız membranlarda tersinir kirlenme oranı %6,9'dan %23,3'e, akı geri kazanım oranı ise %31,9'dan %48,3'e yükselirken %5,0 Gr katkılı membranda daha belirgin bir iyileşme gözlenmiş; tersinir kirlenme oranı %5,8'den %39,7'ye, akı geri kazanım oranı ise %28,2'den %61,9'a yükselmiştir. Bu artış, Gr katkısının membran iletkenliğini artırması sayesinde uygulanan elektriksel potansiyelin, kirleticilerle membran arasındaki elektrostatik etkileşimleri zayıflatarak kirleticilerin uzaklaştırılmasını kolaylaştırmasıyla ilişkilendirilmiştir. Çalışma sonuçları, Gr katkısı ile elektriksel iletkenlik iyileştirmesinin, membranların elektriksel temizleme etkinliğini artırdığını göstermiştir.

Tez çalışması kapsamında hazırlanan membranlara ait verilerin karşılaştırılmasından elde edilen sonuçların özeti aşağıda verilmiştir;

- PANI-PAMPSA, oksidatif polimerizasyon yöntemiyle sentezlenmiş ve FTIR, SEM, EDX ve XRD analizleri ile karakterize edilerek PAMPSA'nın PANI yapısına başarıyla entegre edildiği doğrulanmıştır.
- Grafen (Gr) katkısı ile elektriksel iletkenliği artırılmış PANI-PAMPSA membranlar hazırlanmış ve bu katkının membran morfolojisi, gözeneklilik, su severlik ve geçirgenlik gibi özellikler üzerinde önemli etkiler oluşturduğu belirlenmiştir.
- Yüzey SEM görüntüleri, tüm membranların klasik PANI membran yapısını koruduğunu; enine kesit SEM görüntüleri ise Gr katkısıyla üst tabaka kalınlığının arttığını ve gözenekliliğin yükseldiğini göstermiştir. Üst tabaka kalınlıkları katkısız membranda 0,7 µm iken, %0,5 ve %5 Gr katkısında sırasıyla 1,7 µm ve 1,9 µm olarak ölçülmüştür.

- Gr'in hidrofobik yapısı nedeniyle, katkı miktarı arttıkça membranların yüzey temas açıları yükselmiş ve su severlik azalmıştır. Bu durum, aynı zamanda membranların düşük geçirgenlik performansı göstermesine neden olmuştur.
- %5,0 oranında Gr katkısı ile membranların elektriksel iletkenliği 4,2 kat artırılmış ve iletkenlikte meydana gelen bu iyileşme elektriksel temizleme süreçlerinde etkinliğin artmasını sağlamıştır.
- Hazırlanan membranların dışlama performansları BSA ve HA çözeltileri ile test edilmiş; BSA için %90'ın, HA için ise %80'in üzerinde dışlama oranları elde edilmiştir. MWCO değerlerinin ise 50.000–60.000 Da arasında olduğu ve membranların UF sınıfında değerlendirilebileceği öngörülmüştür.
- BSA ile yapılan kirlenme testlerinde, Gr katkısının toplam kirlenme oranını artırdığı (%75'ten %77,6'ya), tersinmez kirlenme oranını azalttığı (%6,9'dan %5,8'e) tespit edilmiştir. Bu durum, Gr katkısı ile oluşan daha gözenekli üst tabakanın kirleticilerin yapıya nüfuz etmesine olanak sağlamasıyla açıklanmıştır.
- HA ile yapılan kirlenme çalışmalarında ise tüm membranlar için BSA sonuçlarına kıyasla daha düşük toplam kirlenme oranı elde edildiği ancak nispeten daha yüksek oranda tersinir kirlenme meydana geldiği belirlenmiştir.
- Elektriksel temizleme çalışmaları kapsamında yapılan optimizasyon ile optimum temizleme potansiyelinin 15V AC olduğu belirlenmiş, bu potansiyel ile gerçekleştirilen 30 dakikalık elektriksel temizlik süreci sonrası membran performansında anlamlı iyileşmeler sağlanmıştır. Katkısız membranda elektriksel temizlik sonrası tersinir kirlenme oranı (%TKO) %6,9'dan %23,3'e, akı geri kazanım oranı (%AGO) %31,9'dan %48,3'e yükselmiştir. %5 Gr katkılı membranda ise elektriksel temizlik sonrası tersinir kirlenme oranı (%TKO) %5,8'den %39,7'ye, akı geri kazanım oranı (%AGO) ise %28,2'den %61,9'a ulaşmıştır. Elde edilen sonuçlar, Gr katkısı ile artırılan iletkenliğin, elektriksel temizleme sürecinde kirleticilerle membran arasındaki elektrostatik etkileşimleri zayıflatarak kirleticilerin yapıdan uzaklaşmasını kolaylaştırdığını ve temizleme etkinliğini artırdığını göstermiştir.

## KAYNAKÇA

**Abd El-Ghaffar, M. A., & Tieama, H. A.** (2017). A Review of Membranes Classifications, Configurations, Surface Modifications, Characteristics and Its Applications in Water Purification. *Chemical and Biomolecular Engineering*, 2(2), 57-82. <https://doi.org/10.11648/j.cbe.20170202.11>

**Abuwatfa, W. H., AlSawaftah, N., Darwish, N., Pitt, W. G., & Hussein, G. A.** (2023). A Review on Membrane Fouling Prediction Using Artificial Neural Networks (ANNs). İçinde *Membranes* (C. 13, Sayı 7). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/membranes13070685>

**Ahmad, N. N. R., Ang, W. L., Teow, Y. H., Mohammad, A. W., & Hilal, N.** (2022). Nanofiltration membrane processes for water recycling, reuse and product recovery within various industries: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 45. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102478>

**Ahmed, S. F., Mofijur, M., Nuzhat, S., Chowdhury, A. T., Raza, N., Uddin, M. A., Inayat, A., Mahlia, T. M. I., Ong, H. C., Chia, W. Y., & Show, P. L.** (2021). Recent developments in physical, biological, chemical, and hybrid treatment techniques for removing emerging contaminants from wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 416. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125912>

**Al Harby, N. F., El-Batouti, M., & Elewa, M. M.** (2022). Prospects of Polymeric Nanocomposite Membranes for Water Purification and Scalability and their Health and Environmental Impacts: A Review. İçinde *Nanomaterials* (C. 12, Sayı 20). MDPI. <https://doi.org/10.3390/nano12203637>

**Ali, A. A., Al-Othman, A., Tawalbeh, M., Ali, A., Quist-Jensen, C. A., & Shirazi, M. M. A.** (2025). Membrane technologies for sustainable development goals: A critical review of bright horizons. İçinde *Journal of Environmental Chemical Engineering* (C. 13, Sayı 1). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114998>

**Al-Jubouri, S. M., Al-Batty, S., Al-Hamd, R. K. S., Sims, R., Hakami, M. W., & Manirul Haque, S. K.** (2023). Sustainable environment through using porous materials: A review on wastewater treatment. İçinde *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering* (C. 18, Sayı 4). John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/apj.2941>

**Alqaheem, Y., & Alomair, A. A.** (2020). Microscopy and spectroscopy techniques for characterization of polymeric membranes. *Membranes*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/MEMBRANES10020033>

**Alsawafteh, N., Abuwatfa, W., Darwish, N., & Hussein, G.** (2021). A comprehensive review on membrane fouling: Mathematical modelling, prediction, diagnosis, and mitigation. İçinde *Water (Switzerland)* (C. 13, Sayı 9). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/w13091327>

**Ambarita, A. C., Mulyati, S., Arahman, N., Suhendrayatna, & Rosnelly, C. M.** (2021). Modification of polyetersulfone (PES) membrane by using jernang (daemonorops draco blume) as a natural additive on humic acid fouling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1087(1), 012056. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1087/1/012056>

**Amira Abdelrasoul, & Huu Doan.** (2020). *Advances in Membrane Technologies*.

**Amura, I. F., Shahid, S., Sarihan, A., Shen, J., Patterson, D. A., & Emanuelsson, E. A. C.** (2021). Fabrication of self-doped sulfonated polyaniline membranes with enhanced antifouling ability and improved solvent resistance. *Journal of Membrane Science*, 620. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.117712>

**Anis, S. F., Hashaikeh, R., & Hilal, N.** (2019). Microfiltration membrane processes: A review of research trends over the past decade. *Journal of Water Process Engineering*, 32, 100941. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2019.100941>

**Arnal, J. M., García-Fayos, B., & Sancho, M.** (2011). *3 Membrane Cleaning*. [www.intechopen.com](http://www.intechopen.com)

**Arundhathi, B., Pabba, M., Raj, S. S., Sahu, N., & Sridhar, S.** (2024). Advancements in Mixed-Matrix Membranes for Various Separation Applications: State of the Art and Future Prospects. İçinde *Membranes* (C. 14, Sayı 11). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/membranes14110224>

**Aslan, M.** (2016). *Membrane Technologies*. <https://www.researchgate.net/publication/301701202>

**Assad, H., Lone, I. A., Kumar, A., & Kumar, A.** (2024). Unveiling the contemporary progress of graphene-based nanomaterials with a particular focus on the removal of contaminants from water: a comprehensive review. İçinde *Frontiers in Chemistry* (C. 12). Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/fchem.2024.1347129>

**Ball, I. , H. S. , M. K. , W. R. , S. J. , K. R.** (1999). The pervaporation of ethanol/water feeds with polyaniline membranes and blends. *Synthetic Metals*, 102(1-3), 1311-1312.

**Behera, S.** (2024). A Review on Polyaniline-Supported Catalyst for Organic Transformations. İçinde *ACS Omega* (C. 9, Sayı 51, ss. 50097-50117). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c04352>

**Beygisangchin, M., Hossein Baghdadi, A., Kartom Kamarudin, S., Abdul Rashid, S., Jakmune, J., & Shaari, N.** (2024). Recent progress in polyaniline and its composites; Synthesis, properties, and applications. İçinde *European Polymer Journal* (C. 210). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2024.112948>

**Bijekar, S., Padariya, H. D., Yadav, V. K., Gacem, A., Hasan, M. A., Awwad, N. S., Yadav, K. K., Islam, S., Park, S., & Jeon, B. H.** (2022). The State of the Art and Emerging Trends in the Wastewater Treatment in Developing Nations. İçinde *Water (Switzerland)* (C. 14, Sayı 16). MDPI. <https://doi.org/10.3390/w14162537>

**Birniwa, A. H., Habibu, S., Abdullahi, S. S. ad, Mohammad, R. E. A., Hussaini, A., Magaji, H., Al-dhawi, B. N. S., Noor, A., & Jagaba, A. H.** (2024). Membrane technologies for heavy metals removal from water and wastewater: A mini review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100538>

**Calvo, J. I., Casado-Coterillo, C., & Hernández, A.** (2021). Past, present and future of membrane technology in Spain. İçinde *Membranes* (C. 11, Sayı 11). MDPI. <https://doi.org/10.3390/membranes11110808>

**Cardoso, M. J. R., Lima, M. F. S., & Lenz, D. M.** (2007). Polyaniline synthesized with functionalized sulfonic acids for blends manufacture. *Materials Research*, 10(4), 425-429. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392007000400017>

**Carolin, C. F., Kumar, P. S., Saravanan, A., Joshiba, G. J., & Naushad, M.** (2017). Efficient techniques for the removal of toxic heavy metals from aquatic environment: A review. İçinde *Journal of Environmental Chemical Engineering* (C. 5, Sayı 3, ss. 2782-2799). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.05.029>

**Chang, Y. R., Lee, Y. J., & Lee, D. J.** (2019). Membrane fouling during water or wastewater treatments: Current research updated. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 94, 88-96. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2017.12.019>

- Chen, X., Liu, G., & Jin, W.** (2021). Natural gas purification by asymmetric membranes: An overview. *Green Energy & Environment*, 6(2), 176-192. <https://doi.org/10.1016/J.GEE.2020.08.010>
- Chong, H. Y., Muhammad, S. A. H., Norazmi, S. N., Chang, Z. H., & Teoh, Y. H.** (2025). A Review on Membrane Fabrication: Structure, Properties and Performance Relationship. *Journal of Applied Membrane Science & Technology*, 29(1), 73-97. <https://doi.org/10.11113/jamst.v29n1.311>
- Cirillo, A. I., Tomaiuolo, G., & Guido, S.** (2021). Membrane fouling phenomena in microfluidic systems: From technical challenges to scientific opportunities. İçinde *Micromachines* (C. 12, Sayı 7). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/mi12070820>
- Darmawan, A., Muhtar, H., Pratiwi, D. N., Bima, D. N., Panatarani, C., Hamidah, N. L., & Prima, E. C.** (2025). Thin-Film Nanofiltration membrane of polyaniline Decorated graphene oxide via In-Situ polymerization for ion separation. *Separation and Purification Technology*, 356. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.129975>
- De Luca, P., B.Nagy, J., & Macario, A.** (2023). Nanomaterials Used in the Preparation of Personal Protective Equipment (PPE) in the Fight against SARS-CoV-2. İçinde *Inorganics* (C. 11, Sayı 7). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/inorganics11070294>
- Deligöz, H.** (2007). Preparation of self-standing polyaniline-based membranes: Doping effect on the selective ion separation and reverse osmosis properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 105(5), 2640-2645. <https://doi.org/10.1002/app.26377>
- Ding, H., Hussein, A. M., Ahmad, I., Latef, R., Abbas, J. K., Ali, A. T. A., Saeed, S. M., Abdulwahid, A. S., Ramadan, M. F., Rasool, H. A., & Elawady, A.** (2024). Conducting polymers in industry: A comprehensive review on the characterization, synthesis and application. İçinde *Alexandria Engineering Journal* (C. 88, ss. 253-267). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.01.029>
- Du, X., Shi, Y., Jegatheesan, V., & Ul Haq, I.** (2020). A review on the mechanism, impacts and control methods of membrane fouling in MBR system. İçinde *Membranes* (C. 10, Sayı 2). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/membranes10020024>

- Dubeau, S., Bourassa, P., Thomas, T. J., & Tajmir-Riahi, H. A.** (2010). Biogenic and synthetic polyamines bind bovine serum albumin. *Biomacromolecules*, *11*(6), 1507-1515. <https://doi.org/10.1021/bm100144v>
- Dumbrava, O., Filimon, A., & Marin, L.** (2023). Tailoring properties and applications of polysulfone membranes by chemical modification: Structure-properties-applications relationship. İçinde *European Polymer Journal* (C. 196). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2023.112316>
- Duraikkannu, S. L., Castro-Muñoz, R., & Figoli, A.** (2021). A review on phase-inversion technique-based polymer microsphere fabrication. *Colloid and Interface Science Communications*, *40*, 100329. <https://doi.org/10.1016/J.COLCOM.2020.100329>
- Dyab, A. K. F., Abdallah, E. M., Ahmed, S. A., & Rabee, M. M.** (2016). Fabrication and Characterisation of Novel Natural &lt;i>Lycopodium clavatum&lt;/i> Sporopollenin Microcapsules Loaded &lt;i>In-Situ&lt;/i> with Nano-Magnetic Humic Acid-Metal Complexes. *Journal of Encapsulation and Adsorption Sciences*, *06*(04), 109-131. <https://doi.org/10.4236/jeas.2016.64009>
- Ezugbe, E. O., & Rathilal, S.** (2020). Membrane technologies in wastewater treatment: A review. İçinde *Membranes* (C. 10, Sayı 5). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/membranes10050089>
- Gao, F., Mu, J., Bi, Z., Wang, S., & Li, Z.** (2021). Recent advances of polyaniline composites in anticorrosive coatings: A review. İçinde *Progress in Organic Coatings* (C. 151). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.106071>
- Gao, J., Sansiñena, J. M., & Wang, H. L.** (2003). Tunable polyaniline chemical actuators. *Chemistry of Materials*, *15*(12), 2411-2418. <https://doi.org/10.1021/cm020329e>
- Gao, W., Liang, H., Ma, J., Han, M., Chen, Z. lin, Han, Z. shuang, & Li, G. bai.** (2011). Membrane fouling control in ultrafiltration technology for drinking water production: A review. İçinde *Desalination* (C. 272, Sayı 1-3, ss. 1-8). <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.01.051>
- Gautam, V., Srivastava, A., Singh, K. P., & Yadav, V. L.** (2016). Vibrational and gravimetric analysis of polyaniline/polysaccharide composite materials. *Polymer Science - Series A*, *58*(2), 206-219. <https://doi.org/10.1134/S0965545X16020085>
- Geleta, T. A., Maggay, I. V., Chang, Y., & Venault, A.** (2023). Recent Advances on the Fabrication of Antifouling Phase-Inversion Membranes by Physical Blending Modification

Method. İçinde *Membranes* (C. 13, Sayı 1). MDPI. <https://doi.org/10.3390/membranes13010058>

**Goh, P. S., Lau, W. J., Othman, M. H. D., & Ismail, A. F.** (2018). Membrane fouling in desalination and its mitigation strategies. İçinde *Desalination* (C. 425, ss. 130-155). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.10.018>

**Goswami, S., Nandy, S., Fortunato, E., & Martins, R.** (2023). Polyaniline and its composites engineering: A class of multifunctional smart energy materials. *Journal of Solid State Chemistry*, 317. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2022.123679>

**Gul, A., Hruza, J., & Yalcinkaya, F.** (2021). Fouling and chemical cleaning of microfiltration membranes: A mini-review. İçinde *Polymers* (C. 13, Sayı 6). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/polym13060846>

**Hailemariam, R. H., Woo, Y. C., Damtie, M. M., Kim, B. C., Park, K. D., & Choi, J. S.** (2020). Reverse osmosis membrane fabrication and modification technologies and future trends: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 276, 102100. <https://doi.org/10.1016/J.CIS.2019.102100>

**Hani, U.** (2023). Comprehensive review of polymeric nanocomposite membranes application for water treatment. İçinde *Alexandria Engineering Journal* (C. 72, ss. 307-321). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.04.008>

**Hao, J., Wang, L., Wang, X., Wang, J., He, M., Zhang, X., Wang, J., Nie, L. J., & Li, J. X.** (2023). Preparation, modification and antifouling properties of polyaniline conductive membranes for water treatment: a comprehensive review. İçinde *Environmental Science: Water Research and Technology* (C. 10, Sayı 1, ss. 105-127). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d3ew00709j>

**Hoslett, J., Massara, T. M., Malamis, S., Ahmad, D., van den Boogaert, I., Katsou, E., Ahmad, B., Ghazal, H., Simons, S., Wrobel, L., & Jouhara, H.** (2018). Surface water filtration using granular media and membranes: A review. İçinde *Science of the Total Environment* (C. 639). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.247>

**Hosseine, M., Bakhshi, A., Naghib, S. M., & Rabiee, N.** (2024). Recent advancements in polyaniline-based biosensors for diagnosis of cancers: A comprehensive review. İçinde *TrAC - Trends in Analytical Chemistry* (C. 181). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.118040>

<https://www.tiski.gov.tr/icerik/detay.aspx?Id=42>. (t.y).

**Hu, W., Chen, S., Yang, Z., Liu, L., & Wang, H.** (2011). "Flexible Electrically Conductive Nanocomposite Membrane Based on Bacterial Cellulose and Polyaniline", . *The Journal of Physical Chemistry B*, 115(26), 8453-8457.

**Huang, J., Wang, Z., Zhang, J., Zhang, X., Ma, J., & Wu, Z.** (2015). A novel composite conductive microfiltration membrane and its anti-fouling performance with an external electric field in membrane bioreactors. *Scientific Reports*, 5. <https://doi.org/10.1038/srep09268>

**Huang, X., McVerry, B. T., Marambio-Jones, C., Wong, M. C. Y., Hoek, E. M. V., & Kaner, R. B.** (2015). Novel chlorine resistant low-fouling ultrafiltration membrane based on a hydrophilic polyaniline derivative. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(16), 8725-8733. <https://doi.org/10.1039/c5ta00900f>

**Imteyaz, S., Maheshwari, A., & Rafiuddin.** (2025). An outlook on membranes: Types, synthesis, and application in membrane technology. İçinde *Hybrid Advances* (C. 8). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100351>

**Jaafar, J., & Nasir, A. M.** (2022). Grand Challenge in Membrane Fabrication: Membrane Science and Technology. *Frontiers in Membrane Science and Technology*, 1. <https://doi.org/10.3389/frmst.2022.883913>

**Jeon, J. W., O'Neal, J., Shao, L., & Lutkenhaus, J. L.** (2013). Charge storage in polymer acid-doped polyaniline-based layer-by-layer electrodes. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 5(20), 10127-10136. <https://doi.org/10.1021/am402809e>

**Jiang, S., Li, Y., & Ladewig, B. P.** (2017). A review of reverse osmosis membrane fouling and control strategies. *Science of The Total Environment*, 595, 567-583. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.03.235>

**Juber, F. A. H., Jawad, Z. A., Chin, B. L. F., Yeap, S. P., & Chew, T. L.** (2021). The prospect of synthesis of PES/PEG blend membranes using blend NMP/DMF for CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> separation. İçinde *Journal of Polymer Research* (C. 28, Sayı 5). Springer Science and Business Media B.V. <https://doi.org/10.1007/s10965-021-02500-6>

**Kafle, S. R., Adhikari, S., Shrestha, R., Ban, S., Khatiwada, G., Gaire, P., Tuladhar, N., Jiang, G., & Tiwari, A.** (2024). Advancement of membrane separation technology for organic pollutant removal. İçinde *Water Science and Technology* (C. 89, Sayı 9, ss. 2290-2310). IWA Publishing. <https://doi.org/10.2166/wst.2024.117>

- Kang, X., & Ge, Q.** (2025). A critical review on the mechanism, progress and challenge of electrochemically assisted membrane cleaning in water treatment. İçinde *Desalination* (C. 597). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.118350>
- Kanth, M. S., Sandhya Rani, S. L., & Raja, V. K.** (2025). Advancing ceramic membrane technology in chemical industries applications by evaluating cost-effective materials, fabrication and surface modification methods. *Hybrid Advances*, 8, 100380. <https://doi.org/10.1016/J.HYBADV.2025.100380>
- Karki, S., Hazarika, G., Yadav, D., & Ingole, P. G.** (2024). Polymeric membranes for industrial applications: Recent progress, challenges and perspectives. İçinde *Desalination* (C. 573). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.117200>
- Keith, K.** (2006). *Water, a shared responsibility : the United Nations world water development report 2*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO); Berghahn Books.
- Kim, J., Lee, J., Lee, S., Tijing, L., Shon, H. K., & Hong, S.** (2024). Electrically conductive membrane for fouling control: Its mechanisms and applications. *Desalination*, 578, 117445. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2024.117445>
- Koyuncu, İ.** (2018). Su/Atıksu Arıtılması ve Geri Kazanılmasında Membran Teknolojileri ve Uygulamaları (İ. Koyuncu, Ed.; C. Cilt1).
- Kumar, S., Shandilya, M., Uniyal, P., Thakur, S., & Parihar, N.** (2023). Efficacy of polymeric nanofibrous membranes for proficient wastewater treatment. İçinde *Polymer Bulletin* (C. 80, Sayı 7, ss. 7145-7200). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04417-6>
- Kurniawan, T. A., Riaz, M., Mohyuddin, A., Haider, A., Ali, S., Abdulkareem-Alsultan, G., Othman, M. H. D., Goh, H. H., Anouzla, A., Al-Hazmi, H. E., Aziz, F., Wibisono, Y., Kusworo, T. D., Alkhadher, S. A. A., & Khan, M. M. H.** (2024). Inorganic membrane: a game changer for gas separation and purification. İçinde *Chemical Papers* (C. 78, Sayı 12, ss. 6787-6820). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s11696-024-03589-x>
- Ladewig, B., & Al-Shaeli, M. N. Z.** (2017). *Fundamentals of Membrane Processes* (ss. 13-37). [https://doi.org/10.1007/978-981-10-2014-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-10-2014-8_2)

- Lalia, B. S., Kochkodan, V., Hashaikeh, R., & Hilal, N.** (2013). A review on membrane fabrication: Structure, properties and performance relationship. İçinde *Desalination* (C. 326, ss. 77-95). <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.06.016>
- Lee, A., Elam, J. W., & Darling, S. B.** (2016). Membrane materials for water purification: Design, development, and application. İçinde *Environmental Science: Water Research and Technology* (C. 2, Sayı 1, ss. 17-42). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/c5ew00159e>
- Lee, J. H., Yun, E. T., Ham, S. Y., Kim, H. S., Sun, P. F., & Park, H. D.** (2022). Electrically conductive carbon nanotube/graphene composite membrane for self-cleaning of biofouling via bubble generation. *Desalination*, 535, 115841. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2022.115841>
- Li, B., Qi, B., Guo, Z., Wang, D., & Jiao, T.** (2023). Recent developments in the application of membrane separation technology and its challenges in oil-water separation: A review. İçinde *Chemosphere* (C. 327). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138528>
- Li, B., Sun, D., Li, B., Tang, W., Ren, P., Yu, J., & Zhang, J.** (2020). One-Step Electrochemically Prepared Graphene/Polyaniline Conductive Filter Membrane for Permeation Enhancement by Fouling Mitigation. *Langmuir*, 36(9), 2209-2222. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b03114>
- Li, H., Lv, Y., Tang, Z., Liu, H., Zhu, H., Song, Z., Li, B., & Zhang, Y.** (2025). Molecular separation applications of next-generation graphene oxide composite membranes with enhanced properties: Current status and future prospects. İçinde *Separation and Purification Technology* (C. 358). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.130451>
- 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. İçinde *Advances in Colloid and Interface Science* (C. 328). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2024.103179>
- Liao, Y., Bokhary, A., Maleki, E., & Liao, B.** (2018). A review of membrane fouling and its control in algal-related membrane processes. *Bioresource Technology*, 264, 343-358. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2018.06.102>
- Lin, C. W., Xue, S., Ji, C., Huang, S. C., Tung, V., & Kaner, R. B.** (2021). Conducting Polyaniline for Antifouling Ultrafiltration Membranes: Solutions and Challenges. İçinde *Nano*

*Letters* (C. 21, Sayı 9, ss. 3699-3707). American Chemical Society.  
<https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.1c00968>

**Linder, C., & Kedem, O.** (2021). *History of Nanofiltration Membranes from 1960 to 1990*.

**Lindfors, T., Kvarnströ, C., & Ivaska, A. A.** (2002). Raman and UV-vis spectroscopic study of polyaniline membranes containing a bulky cationic additive. İçinde *Journal of Electroanalytical Chemistry* (C. 518). [www.elsevier.com/locate/jelechem](http://www.elsevier.com/locate/jelechem)

**Liu, Y., Li, Q., Ji, Y., Younas, M., & He, B.** (2024). Preparation of polyaniline conductive membranes through immersion of dopant solution for dye/salt separation. *Separation and Purification Technology*, 348. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127531>

**Luo, J. , Z. H. , W. X. , L. J. , W. F.** (2007). Stable Aqueous Dispersion of Conducting Polyaniline with High Electrical Conductivity. *Macromolecules*, 40(23), 8132-8135.

**Mandal, G., Bauri, J., Nayak, D., Kumar, S., Ansari, S., & Bilash Choudhary, R.** (2023). *Synthesis, Structural Study and Various Applications of Polyaniline and its Nanocomposites*. [www.intechopen.com](http://www.intechopen.com)

**Mashhadikhan, S., Ahmadi, R., Ebadi Amooghin, A., Sanaeepur, H., Aminabhavi, T. M., & Rezakazemi, M.** (2024). Breaking temperature barrier: Highly thermally heat resistant polymeric membranes for sustainable water and wastewater treatment. İçinde *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (C. 189). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113902>

**Meena, P. L., & Surela, A. K.** (2024). Polyaniline based binary nanocomposite heterostructures with semiconductor photocatalysts for photocatalytic improvement. İçinde *Journal of Molecular Liquids* (C. 412). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.125828>

**Meher, A., Tandi, A., Jena, H. K., Rout, L., Moharana, S., & Sagadevan, S.** (2024). Polyaniline assembly ultra-thin graphene hybrid nanocomposites synthesis for current research trends of promising applications in emerging fields. İçinde *Materials Science and Engineering: B* (C. 308). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2024.117596>

**Moo Lee, Y. , Y. N. S. , Y. H. S.** (1999). “Pervaporation of water/isopropanol mixtures through polyaniline membranes doped with poly(acrylic acid)”, . *Journal of Membrane Science*, 159 (1 2)-41 46.

- Mousa, H. M., Fahmy, H. S., Ali, G. A. M., Abdelhamid, H. N., & Ateia, M.** (2022). Membranes for Oil/Water Separation: A Review. İçinde *Advanced Materials Interfaces* (C. 9, Sayı 27). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/admi.202200557>
- Nairi, V., Medda, S., Piludu, M., Casula, M. F., Vallet-Regi, M., Monduzzi, M., & Salis, A.** (2018). Interactions between bovine serum albumin and mesoporous silica nanoparticles functionalized with biopolymers. *Chemical Engineering Journal*, 340, 42-50. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2018.01.011>
- Naseer, M. N., Dutta, K., Zaidi, A. A., Asif, M., Alqahtany, A., Aldossary, N. A., Jamil, R., Alyami, S. H., & Jaafar, J.** (2022). Research Trends in the Use of Polyaniline Membrane for Water Treatment Applications: A Scientometric Analysis. *Membranes*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/membranes12080777>
- Nasrollahi, N., Ghalamchi, L., Vatanpour, V., Khataee, A., & Yousefpoor, M.** (2022). Novel polymeric additives in the preparation and modification of polymeric membranes: A comprehensive review. İçinde *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* (C. 109, ss. 100-124). Korean Society of Industrial Engineering Chemistry. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2022.02.036>
- Niu, Z., He, N., Yao, Y., Ma, A., Zhang, E., Cheng, L., Li, Y., & Lu, X.** (2024). Mixed matrix membranes for gas separations: A review. İçinde *Chemical Engineering Journal* (C. 494). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152912>
- Ouyang, W., Chen, T., Shi, Y., Tong, L., Chen, Y., Wang, W., Yang, J., & Xue, J.** (2019). Physico-chemical processes. İçinde *Water Environment Research* (C. 91, Sayı 10, ss. 1350-1377). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/wer.1231>
- Padaki, M. , I. A. , W. P.** (2011). “Polysulfone/N-phthaloylchitosan novel composite membranes for salt rejection application”,. *Desalination*, 279(1-3), 409-414.
- Park, S., & Patel, R.** (2021). Recent Progress in Conductive Polymer-based Membranes. *Membrane Journal*, 31(2), 101-119. [https://doi.org/10.14579/MEMBRANE\\_JOURNAL.2021.31.2.101](https://doi.org/10.14579/MEMBRANE_JOURNAL.2021.31.2.101)
- Puggioni, G., Abd-Razak, N. H., Amura, I. F., Bird, M. R., Emanuelsson, E. A. C., & Shahid, S.** (2022). Preparation and benchmarking of highly hydrophilic polyaniline poly(2-acrylamido-2-methyl-1-propanesulfonic acid) PANI PAMPSA membranes in the separation of

sterols and proteins from fruit juice. *Food and Bioproducts Processing*, 134, 109-120. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2022.05.008>

**Rahman, M. M., Mahtab, T., Mukhlis, M. Z. Bin, Faruk, M. O., & Rahman, M. M.** (2021). Enhancement of electrical properties of metal doped polyaniline synthesized by different doping techniques. *Polymer Bulletin*, 78(9), 5379-5397. <https://doi.org/10.1007/s00289-020-03389-9>

**Ramohlola, K. E., Modibane, K. D., Ndipingwi, M. M., & Iwuoha, E. I.** (2024). Polyaniline-based electrocatalysts for electrochemical hydrogen evolution reaction. *Çinde European Polymer Journal* (C. 213). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2024.113125>

**Ravichandran, S. R., Venkatachalam, C. D., Sengottian, M., Sekar, S., Subramaniam Ramasamy, B. S., Narayanan, M., Gopalakrishnan, A. V., Kandasamy, S., & Raja, R.** (2022). A review on fabrication, characterization of membrane and the influence of various parameters on contaminant separation process. *Chemosphere*, 306, 135629. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.135629>

**Rehman Asghar, M., Divya, K., Su, H., & Xu, Q.** (2024). Advancement of PVDF and its copolymer-based proton exchange membranes for direct methanol fuel cells: A review. *Çinde European Polymer Journal* (C. 213). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2024.113110>

**Ronen, A., Walker, S. L., & Jassby, D.** (2016). Electroconductive and electroresponsive membranes for water treatment. *Reviews in Chemical Engineering*, 32(5), 533-550. <https://doi.org/10.1515/revce-2015-0060>

**Sapurina, I., & Stejskal, J.** (2009). Ternary composites of multi-wall carbon nanotubes, polyaniline, and noble-metal nanoparticles for potential applications in electrocatalysis. *Chemical Papers*, 63(5), 579-585. <https://doi.org/10.2478/s11696-009-0061-3>

**Saravanan, A., Deivayanai, V. C., Kumar, P. S., Rangasamy, G., Hemavathy, R. V., Harshana, T., Gayathri, N., & Alagumalai, K.** (2022). A detailed review on advanced oxidation process in treatment of wastewater: Mechanism, challenges and future outlook. *Chemosphere*, 308. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136524>

**Sarihan, A.** (2021). PAMPSA Yüklendiş Polianilin Sulu Ortamdan Naproksen Giderimine Etkisi. *European Journal of Science and Technology*. <https://doi.org/10.31590/ejosat.949645>

**Sarihan, A., Shahid, S., Shen, J., Amura, I., Patterson, D. A., & Emanuelsson, E. A. C.** (2019). Exploiting the electrical conductivity of poly-acid doped polyaniline membranes with enhanced durability for organic solvent nanofiltration. *Journal of Membrane Science*, 579, 11-21. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.02.030>

**Seah, M. Q., Chua, S. F., Ang, W. L., Lau, W. J., Mansourizadeh, A., & Thamaraiselvan, C.** (2024). Advancements in polymeric membranes for challenging water filtration environments: A comprehensive review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(3), 112628. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2024.112628>

**Shaban, M., Morsy, A., Mahmoud, A. S., & Abdel-Hamid, H.** (2024). *Membrane Separation Processes: Principles, Structures, Materials, and Future Prospects*. [www.intechopen.com](http://www.intechopen.com)

**Shen, J., S. S., S. A., P. D., E. E.** (2018). “Effect of polyacid dopants on the performance of polyaniline membranes in organic solvent nanofiltration”. ”, *Separation And Purification Technology*, 204, 336-344.

**Shen, J., Shahid, S., Sarihan, A., Patterson, D. A., & Emanuelsson, E. A. C.** (2018). Effect of polyacid dopants on the performance of polyaniline membranes in organic solvent nanofiltration. *Separation and Purification Technology*, 204, 336-344. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.04.034>

**Shen, Y., & Badireddy, A. R.** (2021). A critical review on electric field-assisted membrane processes: Implications for fouling control, water recovery, and future prospects. İçinde *Membranes* (C. 11, Sayı 11). MDPI. <https://doi.org/10.3390/membranes11110820>

**Shi, X., Tal, G., Hankins, N. P., & Gitis, V.** (2014). Fouling and cleaning of ultrafiltration membranes: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 1, 121-138. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2014.04.003>

**Sidhikku Kandath Valappil, R., Ghasem, N., & Al-Marzouqi, M.** (2021). Current and future trends in polymer membrane-based gas separation technology: A comprehensive review. İçinde *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* (C. 98, ss. 103-129). Korean Society of Industrial Engineering Chemistry. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.03.030>

**Siekierka, A., Smolińska-Kempisty, K., & Wolska, J.** (2021). Enhanced specific mechanism of separation by polymeric membrane modification—a short review. İçinde *Membranes* (C. 11, Sayı 12). MDPI. <https://doi.org/10.3390/membranes11120942>

**Singh, H. L., Khaturia, S., Chahar, M., & Bishnoi, A.** (2023). Membrane and Membrane-Based Processes for Wastewater Treatment. İçinde *Membrane and Membrane-Based Processes for Wastewater Treatment* (ss. 51-65). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003165019-4>

**Sun, M., Wang, X., Winter, L. R., Zhao, Y., Ma, W., Hedtke, T., Kim, J. H., & Elimelech, M.** (2021). Electrified Membranes for Water Treatment Applications. İçinde *ACS ES and T Engineering* (C. 1, Sayı 4, ss. 725-752). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acsestengg.1c00015>

**Sustainable DG Fund.** (2015). *Clean water and sanitation*. <https://www.jointsdgfund.org/sustainable-development-goals/goal-6-clean-water-and-sanitation>.

**Tai, S. L., Abidin, M. N. Z., Ma'amor, A., Hashim, N. A., & Hashim, M. L. H.** (2025). Polyethylene terephthalate membrane: A review of fabrication techniques, separation processes, and modifications. İçinde *Separation and Purification Technology* (C. 354). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.129343>

**Tan, X. M., & Rodrigue, D.** (2019a). A review on porous polymeric membrane preparation. Part I: Production techniques with polysulfone and poly (vinylidene fluoride). İçinde *Polymers* (C. 11, Sayı 7). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/polym11071160>

**Tan, X. M., & Rodrigue, D.** (2019b). A review on porous polymeric membrane preparation. Part II: Production techniques with polyethylene, polydimethylsiloxane, polypropylene, polyimide, and polytetrafluoroethylene. İçinde *Polymers* (C. 11, Sayı 8). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/polym11081310>

**Tanis-Kanbur, M. B., Peinador, R. I., Calvo, J. I., Hernández, A., & Chew, J. W.** (2021). Porosimetric membrane characterization techniques: A review. *Journal of Membrane Science*, 619, 118750. <https://doi.org/10.1016/J.MEMSCI.2020.118750>

**Tul Muntha, S., Kausar, A., & Siddiq, M.** (2017). Advances in Polymeric Nanofiltration Membrane: A Review. İçinde *Polymer - Plastics Technology and Engineering* (C. 56, Sayı 8, ss. 841-856). Taylor and Francis Inc. <https://doi.org/10.1080/03602559.2016.1233562>

**Wang, K., Xu, L., Li, K., Liu, L., Zhang, Y., & Wang, J.** (2019). Development of polyaniline conductive membrane for electrically enhanced membrane fouling mitigation. *Journal of Membrane Science*, 570-571, 371-379. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.10.050>

- Wang, Y., & Wei, G.** (2024). Recent Trends in Polymer Membranes: Fabrication Technique, Characterization, Functionalization, and Applications in Environmental Science (Part I). İçinde *Polymers* (C. 16, Sayı 20). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/polym16202889>
- 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. İçinde *Desalination* (C. 578). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117441>
- Xiang, H., Min, X., Tang, C. J., Sillanpää, M., & Zhao, F.** (2022). Recent advances in membrane filtration for heavy metal removal from wastewater: A mini review. İçinde *Journal of Water Process Engineering* (C. 49). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103023>
- Xiao, T., Zhu, Z., Li, L., Shi, J., Li, Z., & Zuo, X.** (2023). Membrane fouling and cleaning strategies in microfiltration/ultrafiltration and dynamic membrane. İçinde *Separation and Purification Technology* (C. 318). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123977>
- Xu, H., Xiao, K., Wang, X., Liang, S., Wei, C., Wen, X., & Huang, X.** (2020). Outlining the Roles of Membrane-Foulant and Foulant-Foulant Interactions in Organic Fouling During Microfiltration and Ultrafiltration: A Mini-Review. İçinde *Frontiers in Chemistry* (C. 8). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00417>
- Xu, L.** (2016). *Electrically Tuneable Membranes: Revolutionising Separation and Fouling Control for Membrane Reactors.*
- Xu, L. L., Shahid, S., Patterson, D. A., & Emanuelsson, E. A. C.** (2019). Flexible electro-responsive in-situ polymer acid doped polyaniline membranes for permeation enhancement and membrane fouling removal. *Journal of Membrane Science*, 263-272. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.09.070>
- Xu, L., Shahid, S., Holda, A. K., Emanuelsson, E. A. C., & Patterson, D. A.** (2018). Stimuli responsive conductive polyaniline membrane: In-filtration electrical tuneability of flux and MWCO. *Journal of Membrane Science*, 552, 153-166. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.01.070>

- Yadav, A. K., Mohammad, N., Chamanehpour, E., Mishra, Y. K., & Khanna, P. K.** (2024). Polyaniline (PANI) nanocomposites with Se, Te and their metal chalcogenides: a review. *RSC Applied Polymers*. <https://doi.org/10.1039/d4lp00093e>
- Yadav, P., & Yadav, A. B.** (2021). Preparation and characterization of BSA as a model protein loaded chitosan nanoparticles for the development of protein-/peptide-based drug delivery system. *Future Journal of Pharmaceutical Sciences*, 7(1). <https://doi.org/10.1186/s43094-021-00345-w>
- Yahya, L. A., Tobiszewski, M., Kubica, P., Koronkiewicz, S., & Vakh, C.** (2024). Polymeric porous membranes as solid support and protective material in microextraction processes: A review. İçinde *TrAC - Trends in Analytical Chemistry* (C. 173). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.117651>
- Yang, G. C. C., Yang, T. Y., & Tsai, S. H.** (2003). Crossflow electro-microfiltration of oxide-CMP wastewater. *Water Research*, 37(4), 785-792. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00388-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00388-3)
- Yildiz, S., Namal, O. Ö., Çekim, M., Üniversitesi, C., Fakültesi, M., Mühendisliği, Ç., & Sivas, B.** (2013). *Bilim ve Tekn. Derg.*, c.1, s.1, 2013 Selcuk Univ. *J. Eng. Sci. Tech.*, v.1, n, 1.
- Youness, F., Akhtiyar, S., Tehrani-Bagha, A., & Bilbeisi, R. A.** (2025). Progress in modified electrospun PVC membranes: Toward sustainable solutions for environmental remediation. İçinde *Separation and Purification Technology* (C. 359). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.130456>
- Yuan, X. T., Wu, L., Geng, H. Z., Wang, L., Wang, W., Yuan, X. S., He, B., Jiang, Y. X., Ning, Y. jie, Zhu, Z. R., & Li, J.** (2021). Polyaniline/polysulfone ultrafiltration membranes with improved permeability and anti-fouling behavior. *Journal of Water Process Engineering*, 40. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101903>
- Yusoff, I. I., Rohani, R., Ng, L. Y., & Mohammad, A. W.** (2019). Conductive polyelectrolyte multilayers PANI membranes synthesis for tunable filtration ranges. *Journal of Materials Science*, 54(19), 12988-13005. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03779-z>
- Zango, Z. U., Khoo, K. S., Ali, A. F., Abidin, A. Z., Zango, M. U., Lim, J. W., Wadi, I. A., Eisa, M. H., Alhathloul, R., Abu Alrub, S., Aldaghri, O., Suresh, S., & Ibnaouf, K. H.** (2024). Development of inorganic and mixed matrix membranes for application in toxic dyes-

contaminated industrial effluents with in-situ treatments. İçinde *Environmental Research* (C. 256). Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119235>

**Zhang, L., Hu, M., Matsuyama, H., & Li, X.** (2024). Preparation strategies of the positively charged nanofiltration membrane: A comprehensive review. İçinde *Separation and Purification Technology* (C. 334). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.126011>

**Zhou, Z., Lu, T. D., Sun, S. P., & Wang, Q.** (2023). Roles and gains of coordination chemistry in nanofiltration membrane: A review. İçinde *Chemosphere* (C. 318). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137930>