

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

**ELEKTRODİYALİZ MEMBRANLARININ ÜRETİMİ,  
ELEKTRODİYALİZ PERFORMANSLARININ VE KİRLENME  
EĞİLİMLERİNİN BELİRLENMESİ**

**AYŞEGÜL DERYA ALTINAY**  
**DOKTORA TEZİ**  
**ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GEBZE**  
**2023**

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

**ELEKTRODİYALİZ MEMBRANLARININ**  
**ÜRETİMİ, ELEKTRODİYALİZ**  
**PERFORMANSLARININ VE KİRLENME**  
**EĞİLİMLERİNİN BELİRLENMESİ**

**AYŞEGÜL DERYA ALTINAY**  
**DOKTORA TEZİ**  
**ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMANI**  
**PROF. DR. BÜLENT KESKİNLER**  
**II. DANIŞMANI**  
**PROF. DR. İSMAİL KOYUNCU**

**GEBZE**

**2023**



**T.R.**  
**GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY**  
**GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

**FABRICATION OF ELECTRODIALYSIS  
MEMBRANES, DETERMINATION OF  
ELECTRODIALYSIS PERFORMANCES,  
AND FOULING TENDENCIES**

**AYŞEGÜL DERYA ALTINAY**  
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF  
DOCTOR OF PHILOSOPHY**  
**DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING**

**THESIS SUPERVISOR**  
**PROF. DR. BÜLENT KESKİNLER**  
**II. THESIS SUPERVISOR**  
**PROF. DR. İSMAİL KOYUNCU**

**GEBZE**  
**2023**



## DOKTORA JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 31/01/2023 tarih ve 2023/08 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 08/05/2023 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Ayşegül Derya Altınay'ın tez çalışması Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

### JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Bülent KESKİNLER

ÜYE

:Prof. Dr. Ahmet Karagündüz

ÜYE

:Prof. Dr. Halil Hasar

ÜYE

:Prof. Dr. Ergün Yıldız

ÜYE

:Doç. Dr. Derya Yüksel İmer

### ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

## ÖZET

Gün geçtikçe su tüketiminin öneminin arttığı dünyamızda suların geri kazanımı ve alternatif kaynaklardan su temini önem arz eder bir hal almıştır. Su geri kazanımı ve arıtılarak tekrar kullanımı amacıyla, farklı ve çevre dostu prosesler geliştirilmekte ve performansları incelenmektedir. Bu bağlamda elektrodializ prosesi iyon giderim yöntemi olarak ilgi çeken bir prosestir.

Elektrodializ desalinasyon ve iyon giderimi işlemlerinde aktif bir şekilde kullanılmakta olan bir elektro membran prosesidir. Elektrodializ prosesinde kullanılmakta olan elektrodializ membranları prosesin performansı açısından oldukça önem taşıyan bileşenlerdir.

Gerçekleştirilen tez çalışması ile elektrodializ prosesinin temel bileşeni olan elektrodializ membranlarının üretimi iki farklı yöntem ile gerçekleştirilmiştir. Üretilen membranlar karakterize edilerek elektrodializ performansları test edilmiştir. Elektrodializ membranlarında görülen kirlenme elektrodializ prosesi için önemli bir sorundur. Tez çalışması kapsamında elektrodializ membranlarında görülen kirlenme, büyük ölçekli su kullanımına sahip tekstil endüstrisinin membran konsantrelerinden iyon giderimi çalışmaları ile araştırılmıştır. Bu amaçla tekstil endüstrisine ait nanofiltrasyon ve ters osmoz membran konsantrelerine elektrodializ prosesi uygulanarak iyon giderimleri gerçekleştirilmiştir. İyon gideriminde kullanılan membranlarda oluşan kirlenme temas açısı, FTIR spektrumları, AFM ve SEM EDX analizleri ile saptanmıştır.

**Anahtar Kelimeler: Elektrodializ Prosesi, Elektrodializ Membranlarının Üretimi, Elektro Dializ Membranlarında Kirlenme.**

## SUMMARY

In the world, where the importance of water consumption is increasing day by day, the recovery of water and the supply of water from alternative sources have become important issue. Different and environmentally friendly processes are developed and their performances are examined for the purpose of water recovery and reuse after treatment. In this context, the electrodialysis process is an interesting process as an ion removal method.

Electrodialysis is an electro membrane process that is actively used in desalination and ion removal. Membranes used in the electrodialysis process are very important components for the performance of the process.

With the thesis study carried out, the production of electrodialysis membranes, which is the basic component of the electrodialysis process, was investigated by two different methods. The produced membranes were characterized. The performances of electrodialysis membranes were investigated. Contamination of electrodialysis membranes is an important problem for the electrodialysis process. Within the scope of the thesis, the contamination of the electrodialysis membranes was investigated by the ion removal studies from the membrane concentrates of the textile industry, which has large-scale water use. For this purpose, ion removal was carried out by applying electrodialysis process to nanofiltration and reverse osmosis membrane concentrates of the textile industry. Contamination on membranes was investigated by contact angle measurements, FTIR spectrums, AFM and SEM EDX analyses.

**Key Words: Electrodialysis Process, Fabrication of Electrodialysis Membranes, Fouling on Electrodialysis Membranes.**

## TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmam süresince tecrübesi ile bana yol gösteren, anlayış ve desteğini esirgemeyen, kıymetli hocam ve danışmanım Prof. Dr. Bülent Keskinler'e,

Tez deneylerimi gerçekleştirmem için MEM-TEK'te çalışma imkânı sağlayan, tez çalışmamı yakından takip eden ve bu süre zarfında bana her zaman yol gösteren eş danışmanım Prof. Dr. İsmail Koyuncu'ya,

Tezimin membran üretimi kısmında yardımlarını esirgemeyen arkadaşım Dr. Serkan Güçlü'ye,

Çalışmalarım sırasında güzel dostluklarını sunan sevgili Enise Pekgenç'e, Sevde Korkut'a, membran modülü yapmamda yardımcı olan MEMTEK Araştırma grubundan sevgili arkadaşım Hamza Bakar'a, bir aile olduğumuz MEMTEK'teki tüm çalışma arkadaşlarıma,

Tez sürecimde GTÜ ile aktif bağ kurmama vesile olan sevgili arkadaşlarım Doç. Dr. Çiğdem Balçık'a, Dr. Hilal Yılmaz'a,

Tez sürecimde verdikleri desteklerden dolayı sevgili arkadaşlarım Dr. Ayşe Yüksekdağ'a ve Doç. Dr. Bahar Özbey-Ünal'a,

Çalışmalarım esnasında şahsi imkanlarını benimle paylaşarak bu zorlu süreci kolaylaştıran, dostluğunu esirgemeyen Doç. Dr. Bihter Zeytuncu Gökoğlu'na,

Tezim süresince manevi destekleri ile yanımda olan Nalan Koç ve Fatma Yıldırım ablalarıma,

Bu zorlu sürecin tamamlanması sırasında her zaman yanımda hissettiğim sevgili ablam Sevda Filiz Taskala'ya ve abim Ömer Yüksel Altınay'a,

Hayatımın her anında benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen ve her zaman yanımda olan sevgili annem Selamiye Altınay'a ve sevgili babam Ali Altınay'a sonsuz teşekkür ederim.

Tez çalışmamda membran performanslarının araştırıldığı kısım TÜBİTAK 114Y409, eriyik çekme yöntemi ile membran üretimi kısmı ise TÜBİTAK 7160767 numaralı proje destekleri ile gerçekleştirilmiştir. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER

|                                                                 | <u>Sayfa</u> |
|-----------------------------------------------------------------|--------------|
| ÖZET                                                            | v            |
| SUMMARY                                                         | vi           |
| TEŞEKKÜR                                                        | vii          |
| İÇİNDEKİLER                                                     | viii         |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ                                  | xii          |
| ŞEKİLLER DİZİNİ                                                 | xiv          |
| TABLolar DİZİNİ                                                 | xvii         |
| <br>                                                            |              |
| 1. GİRİŞ                                                        | 1            |
| 1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği                            | 2            |
| 2. ELEKTRODİYALİZ MEMBRANLARI                                   | 3            |
| 2.1. Elektrodializ Membranlarının Kullanım Alanları             | 4            |
| 2.2. İyon Değişim Membranlarının Sınıflandırılması              | 5            |
| 2.2.1. Homojen Membranlar                                       | 5            |
| 2.2.2. Heterojen Membranlar                                     | 5            |
| 2.2.3. Anyon Değişim Membranları                                | 5            |
| 2.2.4. Katyon Değişim Membranları                               | 6            |
| 2.3. Elektrodializ Membranlarının Özellikleri                   | 6            |
| 2.3.1 Membran Direnci                                           | 6            |
| 2.3.2. Membran Potansiyeli                                      | 6            |
| 2.3.3. Kütle Transferi ve Taşınım Sayısı                        | 7            |
| 2.3.4. Konsantrasyon Polarizasyonu                              | 8            |
| 2.3.5. Permselektivite                                          | 10           |
| 2.3.6. İyon Değişim Kapasitesi                                  | 10           |
| 2.3.7. Mekanik Dayanımı                                         | 11           |
| 2.4. Elektrodializ Prosesi Bileşenleri ve İşletme Parametreleri | 11           |
| 2.4.1. Elektrodializ Hücresi                                    | 11           |
| 2.4.2. Boşluk Oluşturucular                                     | 12           |
| 2.4.3. Elektrotlar                                              | 13           |

|                                                                                                         | <b><u>Sayfa</u></b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 2.4.4. Doğru Akım Kaynağı                                                                               | 13                  |
| 2.4.5. Çözeltiler                                                                                       | 13                  |
| 2.4.6. Sınırlayıcı Akım Yoğunluğu (LCD)                                                                 | 13                  |
| 2.5. Nanomateryal İçeren Elektrodializ Membranlarının Üretim Yöntemleri                                 | 17                  |
| 2.5.1. Çözelti İçerisine Karıştırma Yöntemi                                                             | 17                  |
| 2.5.2. Yerinde (In-Situ) Polimerizasyon Yöntemi                                                         | 18                  |
| 2.5.3. Yerinde Sol-Jel Yöntemi                                                                          | 18                  |
| 2.5.4. Eriyik Karıştırma Yöntemi                                                                        | 19                  |
| 2.5.4.1. Ekstrüderler                                                                                   | 21                  |
| 2.6. Elektrodializ Membranlarında Kirlenme                                                              | 21                  |
| 2.6.1. Elektrodializ Membranlarında Kirlenme Türleri                                                    | 22                  |
| 2.6.2. Elektrodializ Membranlarında Kirlenmeyi Önleyen İşlemler                                         | 23                  |
| 2.6.2.1. Elektrokoagülasyon                                                                             | 23                  |
| 2.6.2.2. Elektrofenton                                                                                  | 25                  |
| 3. MATERYAL ve METOT                                                                                    | 27                  |
| 3.1. Elektrodializ Membranı Üretiminde Kullanılan Materyaller ve Yöntemler                              | 27                  |
| 3.1.1. Çözelti İçerisinde Karıştırma Yöntemi ile Membran Üretiminde Kullanılan Materyaller ve Yöntemler | 27                  |
| 3.1.1.1 PPO'nun Bromlanması                                                                             | 27                  |
| 3.1.1.2. Br-PPO'ya Fonksiyonel Grup Eklenmesi                                                           | 28                  |
| 3.1.2. Eriyik Çekme Yöntemi ile Membran Üretimi                                                         | 32                  |
| 3.2. Ticari İyon Değişim Membranları ve Boşluk Oluşturucular                                            | 35                  |
| 3.3. Membranların İşletiminde Kullanılan Sistemler ve Proses Şartları                                   | 38                  |
| 3.4. Elektrodializ Membranlarında Kirlenme ve Uygulanan Ön İşlemler                                     | 39                  |
| 3.4.1. Elektrokoagülasyon                                                                               | 41                  |
| 3.4.2. Elektrofenton                                                                                    | 42                  |
| 3.5. Membran Karakterizasyonu                                                                           | 42                  |
| 3.5.1. Genleşme İndeksi                                                                                 | 42                  |
| 3.5.2. Kimyasal Dayanım Testleri                                                                        | 43                  |

|                                                                                                | <b><u>Sayfa</u></b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 3.5.3. Mekanik Dayanım Testleri                                                                | 43                  |
| 3.5.4. Fourier Dönüşüm Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR)                                        | 44                  |
| 3.5.5. İyon Değişim Kapasitesi (IEC)                                                           | 44                  |
| 3.5.6. Membran Direnci                                                                         | 44                  |
| 3.5.7. Membran Potansiyeli (Em ve Taşınım Sayısı)                                              | 45                  |
| 3.5.8. Zeta Potansiyeli                                                                        | 46                  |
| 3.5.9. Taramalı Elektron Mikroskobu-Enerji Dağıtıcı X-Işını Spektroskopisi (SEM-EDX)           | 47                  |
| 4. BULGULAR VE TARTIŞMA                                                                        | 48                  |
| 4.1. Çözelti İçerisinde Karıştırma Yöntemi ile ED Membranı Üretimi                             | 48                  |
| 4.1.1. PPO'nun Bromlanması                                                                     | 48                  |
| 4.2.2. HNT Katkılı Membran Üretimi                                                             | 51                  |
| 4.2. Eriyik Çekme Yöntemi ile ED Membranı Üretimi                                              | 57                  |
| 4.2.1. Üretilen Membranların Karakterizasyonu                                                  | 63                  |
| 4.2.1.1 Genleşme İndeksi                                                                       | 63                  |
| 4.2.1.2. Kimyasal Dayanım Testleri                                                             | 67                  |
| 4.2.1.3. Mekanik Dayanım Testleri                                                              | 76                  |
| 4.2.1.4. FTIR Spektrumları                                                                     | 77                  |
| 4.2.1.5. Membranların İyon Değişim Kapasiteleri                                                | 77                  |
| 4.2.1.6. Membran Direnç Ölçümleri                                                              | 80                  |
| 4.2.1.7. Membran Potansiyeli ve Taşınım Sayısı                                                 | 83                  |
| 4.2.1.8. Zeta Potansiyeli Ölçümleri                                                            | 86                  |
| 4.3. İyon Değişim Membranlarının Performanslarının Belirlenmesi                                | 88                  |
| 4.3.1. Elektrokoagülasyon ve Elektrofenton Optimizasyonu                                       | 89                  |
| 4.3.2. İyon Değişim Membranlarının Performanslarının Ön Arıtmalı Konsantreler ile Belirlenmesi | 91                  |
| 4.3.2.1.Heterojen Membranların Performanslarının Ön Arıtmalı Konsantreler ile Belirlenmesi     | 91                  |
| 4.3.2.2.Ticari Membranların Performanslarının Ön Arıtmalı Konsantreler ile Belirlenmesi        | 97                  |
| 4.4. İyon Değişim Membranlarının Kirlenme Eğilimlerinin İncelenmesi                            | 101                 |
| 4.4.1.FTIR Spektrumları ve Temas Açısı Ölçümleri                                               | 101                 |



|                              | <b><u>Sayfa</u></b> |
|------------------------------|---------------------|
| 4.4.2. SEM EDS               | 101                 |
| 4.4.3. AFM Analizleri        | 103                 |
| 4.4.4. Temas Açısı Ölçümleri | 113                 |
| 5. SONUÇLAR                  | 115                 |
| <br>KAYNAKLAR                | <br>119             |
| ÖZGEÇMİŞ                     | 124                 |
| EKLER                        | 125                 |



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler ve Açıklamalar

#### Kısaltmalar

|            |                                                           |
|------------|-----------------------------------------------------------|
| $C\Delta$  | : Akımlar arasındaki konsantrasyon farkı                  |
| $t_c^s$    | : Aynı yüklü iyonların dış çözeltide taşınım sayısı       |
| $\Lambda$  | : Akım verimliliği                                        |
| $C_{fd}$   | : Besleme akımı konsantrasyonu                            |
| $t_g^s$    | : Dış çözelti taşınım sayısı                              |
| $D$        | : Difüzyon katsayısı ( $m^2/s$ ),                         |
| $\delta l$ | : Diluat sınır bölgesi                                    |
| $U_{don}$  | : Donnan potansiyeli                                      |
| $z$        | : Elektron değeri                                         |
| $\phi$     | : Elektrostatik potansiyel                                |
| $R_g$      | : Evrensel gaz sabiti ( $Jmol^{-1}K^{-1}$ ),              |
| $F$        | : Faraday sabiti ( $mol^{-1}$ ).                          |
| $F_a$      | : Faraday sabiti ( $9.65 \times 10^4 C/mol$ ),            |
| $\delta 2$ | : Konsantre sınır bölgesi                                 |
| $i_{lim}$  | : Limit akım                                              |
| $t_g^m$    | : Membranda taşınım sayısı.                               |
| $F$        | : Poröz materyalin birim kesit alandan dakikada geçen akı |
| $\Pi$      | : $P_i$                                                   |
| $Pt$       | : Platinler                                               |
| $r$        | : Radyal uzaklık                                          |
| $Q_{sey}$  | : Seyreltik akım akış hızı                                |
| $T$        | : Sıcaklık (K),                                           |
| $Ti$       | : Titanyum                                                |
| $x$        | : Uzaklık (m)                                             |
| $\phi$     | : Voltaj                                                  |
| $\rho$     | : Yük yoğunluğu                                           |
| AFM        | : Atomik kuvvet mikroskobu                                |
| ADM        | : Anyon değişim membranı                                  |

|                  |                                             |
|------------------|---------------------------------------------|
| BPPO             | : Bromlanmış polifenilen oksit              |
| Br               | : Brom                                      |
| ED               | : Elektrodiyaliz                            |
| EC               | : Elektrodiyaliz                            |
| EF               | : Elektrofenton                             |
| FTIR             | : Fourier dönüşüm kızılötesi spektroskopisi |
| HNT              | : Halloysite                                |
| İDM              | : İyon değişim membranı                     |
| IEC              | : İyon değişim kapasitesi                   |
| KCl              | : Potasyum klorür                           |
| KDM              | : Katyon değişim membranı                   |
| KOİ              | : Kimyasal oksijen ihtiyacı                 |
| LCD              | : Sınırlayıcı akım yoğunluğu                |
| MFI              | : Eriyik akış indeksi                       |
| NaCl             | : Sodyum klorür                             |
| NaN <sub>3</sub> | : Sodyum azid                               |
| NM               | : Nanomateryal                              |
| NMP              | : N-metil-2-pirolidon                       |
| TED              | : Ters elektrodiyaliz                       |
| PPO              | : Poli(2,6-dimetil-1,4-fenilen oksit)       |
| SEM              | : Semi elektron mikroskopi                  |
| TEOS             | : Tetraetoksisilan                          |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

| <b><u>Sekil No:</u></b>                                                                              | <b><u>Sayfa</u></b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 2.1: Konsantrasyon polarizasyonu: (a) gradient oluşumu, (b) LCD (c) LCD'nin aşılması ve su ayrımı.   | 9                   |
| 2.2: a) ED cihazı ve bileşenleri, b) ED hücresi ve bileşenleri.                                      | 12                  |
| 2.3: LCD'yi belirlemek için Isaacson ve Sonin tarafından geliştirilen akım yoğunluğu-voltaj grafiği. | 15                  |
| 2.4: La Cerva tarafından geliştirilen akım verimliliği akım yoğunluğu grafiği.                       | 17                  |
| 2.5: Çözelti içerisinde karıştırma yönteminin genel gösterimi.                                       | 18                  |
| 2.6: Elektrokoagülasyon prosesi.                                                                     | 24                  |
| 3.1: PPO bromlama reaksiyonu.                                                                        | 27                  |
| 3.2: HNT katkılı membran üretiminde izlenen yol.                                                     | 28                  |
| 3.3: Halloysit nanotüp partükülü ve yapısı.                                                          | 29                  |
| 3.4: BrPPO'ya silanli grup bağlanma reaksiyonu.                                                      | 30                  |
| 3.5: HNT modifikasyonu.                                                                              | 30                  |
| 3.6: Kullanılan ticari iyon değişim membranları.                                                     | 36                  |
| 3.7: Heterojen membranlar ile oluşturulan anot hücreleri.                                            | 37                  |
| 3.8: PC CELL elektrodializ deney düzeneği a) membran modülü, b) pompa sistemi ve güç kaynağı.        | 38                  |
| 3.9: Membran konsantrelerinin oluşturulması ve ön arıtımı.                                           | 39                  |
| 3.10: NF ve TO membran konsantreleri.                                                                | 39                  |
| 3.11: Ön arıtmada kullanılan deney düzeneği.                                                         | 41                  |
| 3.12: Mekanik dayanım testi için hazırlanmış örnekler (ASTM D 638 standartı).                        | 42                  |
| 3.13: Perkin Elmer Spectrum100 ATR-FTIR spektrometresi.                                              | 43                  |
| 3.14: Dört prob ölçüm yöntemi.                                                                       | 44                  |
| 3.15: Membran potansiyeli ve taşınım sayısı analiz düzeneği.                                         | 45                  |
| 3.16: Anton PAAR SurPASS elektrokinetik analiz cihazı.                                               | 46                  |
| 3.17: SEM-EDX Cihazı ve kaplama ünitesi.                                                             | 46                  |
| 4.1: Bromlanmış PPO.                                                                                 | 47                  |

| <b><u>Sekil No:</u></b>                                                                   | <b><u>Sayfa</u></b> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 4.2: BPPO'nun SEM görüntüsü ve EDS analizi.                                               | 48                  |
| 4.3: BPPO- $\text{NaN}_3$ reaksiyonu. A) PPO, B) Br-PPO, C) PPO- $\text{N}_3$ .           | 48                  |
| 4.4: BPPO- $\text{NaN}_3$ reaksiyonu sonrasında alınan FTIR spektrumları.                 | 49                  |
| 4.5: Silan gruplu BPPO'ya ait görüntü.                                                    | 50                  |
| 4.6: Silan gruplu BPPO'ya ait FTIR spektrumu.                                             | 51                  |
| 4.7: Silan gruplu ve HNT bağlı BPPO'ya ait FTIR spektrumu.                                | 53                  |
| 4.8: Oda sıcaklığında kurutulan HNT'li APTES bağlı BrPPO membran çözeltisi.               | 54                  |
| 4.9: Koagülasyon banyosu sonrası HNT ve sillanlı BPPO membran çözeltisi.                  | 55                  |
| 4.10: Modifiye HNT'ye ait SEM görüntüsü.                                                  | 55                  |
| 4.11: Membran yapısındaki aglomere HNT nanopartikülleri.                                  | 56                  |
| 4.12: R3 ile üretilen ara mamul.                                                          | 57                  |
| 4.13: Öğütülmüş reçineler A) öğütülmemiş ve öğütülmüş R1, B) öğütülmemiş ve öğütülmüş R2. | 57                  |
| 4.14: Yüksek MFI değerli PE2 ile ekstrüzyon.                                              | 59                  |
| 4.15: a) Çubuk ve b) Şerit membran üretimi.                                               | 59                  |
| 4.16: EKST-1 ile gerçekleştirilen üretim.                                                 | 59                  |
| 4.17: EKST-2 ile gerçekleştirilen üretim.                                                 | 60                  |
| 4.18: Çift beslemeli çift vidalı ekstruder EKST-3.                                        | 60                  |
| 4.19: EKST-3 ile üretilen ara mamul.                                                      | 61                  |
| 4.20: Tek beslemeli tek vidalı EKST-1 ile membran üretimi.                                | 61                  |
| 4.21: A) Havada ve B) suda soğutma uygulanan membranlar.                                  | 62                  |
| 4.22: PE1 R1 membranlara ait zetapotansiyeli grafikleri.                                  | 85                  |
| 4.23: PE1 R2 membranlara ait zetapotansiyeli grafikleri.                                  | 86                  |
| 4.24: PE3 R1 membranlara ait zeta potansiyeli grafikleri.                                 | 86                  |
| 4.25: PE3 R2 membranlara ait zetapotansiyeli grafikleri.                                  | 87                  |
| 4.26: RO ve NF Konsantrelerinde EC ve EF prosesleri ile elde edilen renk giderimi.        | 98                  |
| 4.27: TO EC konsantresinin Ticari Membran 1 ile elde edilen iletkenlik-zaman grafiği.     | 90                  |

| <b><u>Sekil No:</u></b>                                                                     | <b><u>Sayfa</u></b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 4.28: TO EF konsantresinin Ticari Membran 1 ile elde edilen iletkenlik-zaman grafiği.       | 90                  |
| 4.29: NF EC konsantresinin PE3 R1 50:50 membran ile elde edilen iletkenlik-zaman grafiği.   | 91                  |
| 4.30: NF EC konsantresinin PE3 R1 60:40 membran ile elde edilen iletkenlik-zaman grafiği.   | 92                  |
| 4.31: TO EC konsantresinin PE3 R1 50:50 membran ile elde edilen iletkenlik-zaman grafiği.   | 92                  |
| 4.32: TO EC konsantresinin PE3 R1 60:40 membran ile elde edilen iletkenlik-zaman grafiği.   | 93                  |
| 4.33: NF EF konsantresinin PE3 R1 50:50 membran ile elde edilen iletkenlik-zaman grafiği.   | 94                  |
| 4.34: NF EF konsantresinin PE3 R1 60:40 membran ile elde edilen iletkenlik-zaman grafiği.   | 94                  |
| 4.35: TO EF konsantresinin PE3 R1 50:50 membran ile elde edilen iletkenlik-zaman grafiği.   | 95                  |
| 4.36: TO EF konsantresinin PE3 R1 50:50 membran ile elde edilen iletkenlik-zaman grafiği.   | 95                  |
| 4.37: NF/EC konsantresinin PCCell membranlar ile elde edilen iletkenlik-zaman grafiği.      | 96                  |
| 4.38: TO/EC konsantresinin PCCell membranlar ile elde edilen iletkenlik-zaman grafiği.      | 97                  |
| 4.39: NF/EF konsantresinin PCCell membranlar ile elde edilen iletkenlik-zaman grafiği.      | 97                  |
| 4.40: TO/EF konsantresinin PCCell membranlar ile elde edilen iletkenlik-zaman grafiği.      | 98                  |
| 4.41: TO/EF konsantresinin Fuji Type 1 membranlar ile elde edilen iletkenlik-zaman grafiği. | 99                  |
| 4.42: NF/EF konsantresinin Fuji Type 2 membranlar ile elde edilen iletkenlik-zaman grafiği. | 99                  |
| 4.43: Konsantre arıtımında kullanılan PE3 R1 membranlara ait SEM görüntüleri.               | 101                 |
| 4.44: Konsantre arıtımında kullanılan PCCell membranlara ait SEM görüntüleri.               | 102                 |

## TABLÖLAR DİZİNİ

| <b><u>Tablo No:</u></b>                                                                             | <b><u>Sayfa</u></b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 2.1: Sınırlayıcı akım yoğunluğu ile ilgili literatürde bulunan korelasyonlar.                       | 14                  |
| 3.1: Çözelti içerisinde karıştırma yöntemi ile membran üretiminde kullanılan materyaller.           | 31                  |
| 3.2: Kullanılan reçineler ve özellikleri.                                                           | 32                  |
| 3.3: Kullanılan kafes polimerlerin özellikleri.                                                     | 32                  |
| 3.4: Eriyik çekme yöntemi ile IDM üretiminde kullanılan yüzdelere.                                  | 33                  |
| 3.5: Kullanılan ekstruderler ve özellikleri.                                                        | 34                  |
| 3.6: EKST-1 proses şartları.                                                                        | 34                  |
| 3.7: EKST-2 proses şartları.                                                                        | 34                  |
| 3.8: EKST-3 proses şartları.                                                                        | 35                  |
| 3.9: EKST-1 yüksek ve düşük devir proses şartları.                                                  | 35                  |
| 3.10: Kullanılan ticari iyon değişim membranlarının özellikleri.                                    | 37                  |
| 3.11: NF ve TO konsantrasyonlarına ait değerler.                                                    | 41                  |
| 4.1: Eriyik çekme yöntemi ile üretilen PE1R1 membranların genleşme katsayıları.                     | 63                  |
| 4.2: Eriyik çekme yöntemi ile üretilen PE1 R2 membranların genleşme katsayıları.                    | 64                  |
| 4.3: Eriyik çekme yöntemi ile üretilen PE3 R1 membranların genleşme katsayıları.                    | 65                  |
| 4.4: Eriyik çekme yöntemi ile üretilen PE3 R2 membranların genleşme katsayıları.                    | 65                  |
| 4.5: Eriyik çekme yöntemi ile farklı proses şartlarında üretilen membranların genleşme katsayıları. | 66                  |
| 4.6: Kimyasal dayanım testine tabi tutulan PE1 R1 membranlar.                                       | 67                  |
| 4.7: Kimyasal dayanım testine tabi tutulan PE1 R2 membranlar.                                       | 69                  |
| 4.8: Kimyasal dayanım testine tabi tutulan PE3 R1 membranlar.                                       | 70                  |
| 4.9: Kimyasal dayanım testine tabi tutulan PE3 R2 membranlar.                                       | 72                  |
| 4.10: Kimyasal dayanım testine tabi tutulan ticari membranlar.                                      | 74                  |

| <b><u>Tablo No:</u></b>                                                             | <b><u>Sayfa</u></b> |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 4.11: Eriyik çekme yöntemi ile üretilen membranların mekanik dayanım değerleri.     | 76                  |
| 4.12: Ticari numune 1 ve 2 membranların IEC değerleri.                              | 77                  |
| 4.13: Üretilen PE1 R1 membranlarının IEC değerleri.                                 | 77                  |
| 4.14: Üretilen PE1 R2 membranlarının IEC değerleri.                                 | 78                  |
| 4.15: Üretilen PE3 R1 membranlarının IEC değerleri.                                 | 79                  |
| 4.16: Üretilen PE3 R2 membranlarının IEC değerleri.                                 | 79                  |
| 4.17: Ticari numunelere ait membranların direnç ölçümleri.                          | 80                  |
| 4.18: PE1 R1 membranların direnç ölçümleri.                                         | 80                  |
| 4.19: PE1 R2 membranların direnç ölçümleri.                                         | 81                  |
| 4.20: PE3 R1 membranların direnç ölçümleri.                                         | 80                  |
| 4.21: PE3 R2 membranların direnç ölçümleri.                                         | 82                  |
| 4.22: Ticari membran numunelerinin potansiyelleri ve taşınım sayıları.              | 83                  |
| 4.23: PE1 R1 membranların potansiyelleri ve taşınım sayıları.                       | 83                  |
| 4.24: PE1 R2 membranların potansiyelleri ve taşınım sayıları.                       | 84                  |
| 4.25: PE3 R1 membranların potansiyelleri ve taşınım sayıları.                       | 84                  |
| 4.26: PE3 R2 membranların potansiyelleri ve taşınım sayıları.                       | 85                  |
| 4.27: Üretilen heterojen membranlar ile elde edilen iletkenlik değerleri.           | 89                  |
| 4.28: Optimum EC şartları.                                                          | 89                  |
| 4.29: Optimum EF şartları.                                                          | 90                  |
| 4.30: EC ve EF prosesleri ile membran konsantrelerinde elde edilen KOİ giderimleri. | 90                  |
| 4.31: PE3 R1 50:50 membranlara ait AFM analizleri.                                  | 104                 |
| 4.32: PE3 R1 60:40 membranlara ait AFM analizleri.                                  | 105                 |
| 4.33: NF/EC konsantreleri ile kullanılan PCCell Membranlara ait AFM analizleri.     | 106                 |
| 4.34: TO/EC prosesinde kullanılan PCCell Membranlara ait AFM analizleri.            | 107                 |
| 4.35: NF/EF prosesinde kullanılan PCCell Membranlara ait AFM analizleri.            | 108                 |



|                                                                                | <b><u>Sayfa</u></b> |
|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 4.36: TO/EF prosesinde kullanılan PCCell Membranlara ait AFM görüntüleri.      | 110                 |
| 4.37: TO/EC prosesinde kullanılan Fujifilm T1 Membranlara ait AFM görüntüleri. | 111                 |
| 4.38: NF/EC prosesinde kullanılan Fujifilm T2 Membranlara ait AFM görüntüleri. | 112                 |
| 4.39: PE1 R2 Membranlara ait temas açıları.                                    | 113                 |
| 4.40: PCCell Membranlara ait temas açıları.                                    | 114                 |
| 4.41: Fujifilm T1 Membranlara ait temas açıları.                               | 115                 |
| 4.42: Fujifilm T2 Membranlara ait temas açıları.                               | 115                 |

# 1. GİRİŞ

Su insan yaşamı için hayati önem taşır. Bu nedenle suyun arıtımı, tekrar kullanımı, alternatif kaynaklardan içme/kullanma suyu üretimi oldukça önem arz eden uygulamalardır. Son zamanlarda insan nüfusunun giderek artması ve buna paralel olarak su kaynaklarında yaşanan azalma mevcut teknolojilerde yapılan proses optimizasyonlarının yanısıra su kaynaklarını koruyacak, su üretimi-arıtımı ve geri kazanımını kolay uygulanabilir hale getirecek, çevreye dost teknolojilerin geliştirilmesi için arayışlara sebep olmuştur.

Elektrokimya elektriğin kimyasal değişiklikler üretme şekli ve kimyasal değişikliklerin elektrik üretimine nasıl yol açtığı ile ilgilidir. Yerleşik birçok uygulama olmasına rağmen, gerçekleştirilen yeni araştırmalar elektrokimyanın olası kullanımlarında daha büyük bir ilgiye yol açmıştır. Elektrokimyasal prosesler arasında elektrodializ kullanımı özellikle önemlidir. Çünkü elektrodializ membran teknolojisine endüstriyel proseslerde su geri kazanımı için temiz arıtım dizileri gelişmesini sağlayan gelişmiş bir çevre teknolojisi olarak yaklaşır. Elektrodializ prosesinin kullanımı, membran sentezi ve karakterizasyonu, malzeme bilimi, fizik, kimya ve sıhhi mühendislik gibi farklı alanlarda çok disiplinli bir çaba gerektiren önemli bir uygulamadır. Suyun yeniden kullanımı, bilim ve endüstri, ülke ve genel olarak toplumu ilgilendiren büyük bir ilgi konusudur. [Reahl, 2006]

Elektrodializ (ED), elektriksel olarak yüklü membranlar ve elektriksel potansiyel farkı ile sulu çözücülerden iyonik türlerin ve diğer yüksüz bileşiklerin ayrıldığı bir kütle ayırım prosesidir ve günümüzde acı suların tuzdan arındırılması için yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektrodializ ile acı su desalinasyonu dünyanın bazı bölgelerinde içme suyu üretimi için ana süreçtir. Elektrodializ prosesi iyon giderimi için ana proses olmasının yanında birçok proses ile birlikte de kullanılmaktadır. Örneğin Japonya'da, elektrodializ sofr tuzu üretimi için bir ön-konsantrasyon aşaması olarak büyük ölçekli kullanılmaktadır.

Elektrodializ; prensipleri yüz yılı aşkın bir süredir bilinmekle birlikte, büyük ölçekli endüstriyel uygulamaları son 30 yılda artan bir prosestir [Bernardes et al., 2014]. Elektrodializ prosesinin kullanım alanları; daha iyi seçiciliğe sahip, düşük elektriksel dirençli, arttırılmış termal, kimyasal ve mekanik özellikli yeni iyon değiştirici membranların geliştirilmesi ile artmıştır. Bu durum prosesin gıda, ilaç ve

endüstriyel kimyasal prosesler ile biyoteknoloji alanında da kullanımına izin vermiş ve son zamanlarda elektrodializ prosesine karşı genişleyen bir ilgi söz konusu olmuştur.

## **1.1. Tezin Amacı Katkısı ve İçeriği**

Gerçekleştirilen tez çalışması ile; elektrodializ prosesinde kullanılan iyon değişim membranlarının üretimi, üretilen membranların karakteristik özelliklerinin membranların elektrodializ performanslarına etkisi ve kirlenme eğilimlerini aydınlatmak amaçlanmıştır.

Tez çalışmasında iki farklı yöntem ile iyon değişim membranlarının üretimi çalışılmıştır. Eriyik çekme yöntemi ile kaplama endüstrisinde kullanılan elektrodializ membranı üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen membranlar karakterize edilmiş ve elektrodializ performansları belirlenmiştir.

Gerçekleştirilen tez çalışması su kullanımının ve su geri kazanımının büyük bir önem taşıdığı günümüz Dünyasında oldukça yüksek miktarlarda su tüketimine sahip tekstil endüstrisi özelinde membran konsantrelerinden iyon gideriminde elektrodializ prosesinin kullanımını ve iyon değişim membranlarında kirliliğinin araştırılmasını içermektedir.

Ayrıca tez çalışması Ulusal Tez Merkezi verilerine göre eriyik çekme prosesi ile kaplama banyolarında kullanılan iyon değişim membranlarını konu alan ilk tez çalışmasıdır. Bu yönleri ile gerçekleştirilen tez çalışması heterojen iyon değişim membranlarının üretimi ve tekstil endüstrisi membran konsantrelerinin arıtımı sırasında iyon gideriminin araştırılması açısından literatüre katkı sağlayacak veriler sunmaktadır.

## 2. ELEKTRODİYALİZ MEMBRANLARI

Elektrodiyaliz (ED) iyonların bir çözeltiden diğerine taşındığı elektrokimyasal bir ayırım prosesidir [Bazinet, 2005]. Uygulanan voltaj, iyon değişim membranları (İDM) yolu ile yüklü türlerin yüksüz maddelerden ve çözeltilerden ayrılmasını sağlar ED prosesi ile tuzlu su kaynaklarından içme suyu üretimi endüstriyel ölçekte atmış yılı aşkın süredir uygulanmaktadır [Al-Amshawee et al., 2020].

Elektrodiyaliz membranları iyon değişim membranlarıdır ve yarı geçirgen membranlardır. Bu membranların kullanıldığı proseslerin gelişimi; yarı geçirgen membranların özelliklerini çalışan ve kendi katyon veya anyonlarına geçirimsiz membranların herhangi bir elektrolite de geçirimsiz olduğunu bulan Ostwald'ın 1890 yılındaki çalışmaları ile başlamıştır İlk sentetik İDM ise 1950'lerde üretilmiştir [Grebenyuk et al., 2002]. ED'nin gelişimi; İDM özelliklerinin iyileştirilmesi, daha iyi malzemeler kullanılması, teknolojinin gelişmesi ve ters polarite özellikleri ile hızlanmıştır [Ankoliya et al., 2021]. İDM'ler polimer matrisine tutturulmuş iyonik baş gruplara sahip yapılardan oluşurlar.

İyon seçiciliği membran içerisindeki iyon değişim polimerine bağlı karşıt yüklü iyonların yüksek elektriksel hareketliliğinin sonucudur. Karşıt yüklü iyonlar elektrik potansiyeli uygulandığında ilgili elektroda göç eden diğer aynı yüklü iyonlarla kolaylıkla yer değiştirir [Korngold et al., 1984]. Genel olarak membran tabaksından geçebilen iyon tipine göre anyon (ADM) ve katyon değiştirici (KDM) olarak adlandırılırlar. Örneğin ADM'ler negatif yüklü anyonların geçişine izin veren, pozitif yüklü katyon geçişini engelleyen pozitif baş grupları içerirler. KDM'ler ise anyon değiştirici membranların aksine pozitif yüklü katyon geçişine izin veren negatif yüklü baş gruplar içermektedir [Hagesteijn et al., 2018]. Polimerik İDM'lerin iki basit tipi olan: anyon ve katyon değişim membranlarının yüzeyinde bulunan kovalent bağlı negatif ya da pozitif gruplar ADM'ler için yaygın olarak;  $-NR_3^+$ ,  $-NR_2H^+$ ,  $-NRH_2^+$ ,  $-NH_3^+$ ,  $-SR_2^+$ ,  $-PR_3^+$  ve KDM'ler için ise  $-SO_3^-$ ,  $-COO^-$ ,  $-PO_3^{2-}$ ,  $-C_6H_4O^-$  grupları şeklindedir. İDM'ler genel olarak iyon değişimini sağlayan yüklü grupların membran içerisindeki dağılımlarına göre homojen ve heterojen olmak üzere ikiye ayrılırlar.

İDM'ler ile ilgili çalışmalar daha düşük dirençli, yüksek seçiciliğe sahip, tek yüklü ya da iki yüklü seçiciliği olan, kirlenme yatkınlığı düşük membranlar geliştirmek üzerine devam etmektedir [Nunes et al., 2020].

## 2.1. Elektrodializ Membranlarının Kullanım Alanları

İDM'ler endüstriyel uygulamalar, çevresel enerji teknolojileri, ED ve ters elektrodializ (TED) uygulamaları, elektro deiyonizasyon ve bipolar membran elektrodializi, enerji dönüştürme ve depolama, asit geri kazanımında atık biyokütle arıtımı, inorganik asit/baz üretimi ve geri kazanımı (örneğin difüzyon diyaliz gibi) vb., geniş bir kullanıma sahiptir [Hagesteijn et al., 2018], [Fan et al., 2019].

İDM'lerin endüstriyel uygulamalarından biri de kataforez prosesidir. Kataforetik boyama metalleri korozyondan korumada kullanılan oldukça ekonomik bir yöntemdir. Genel anlamda küçük ve kompleks geometrik şekilli parçaları elektroforetik olarak kaplama konseptidir. Yöntemde kaplama çözelti içerisindeki partiküllerin elektrik alanı ile elektrodpozisyonu ile gerçekleştirilir. Elektrodpozisyon; anot ve katot arasındaki potansiyel farkı nedeni ile oluşan şartlar ile gerçekleşmektedir [Hylák et al., 2019].

Kataforez işlemi sırasında kullanılan boyalar iki temel başlık altında incelenebilir. Bunlar; organik çözücü içeren ve suda yüzebilen boyalardır. Suda yüzebilen boyalar organiklere göre çevresel açıdan daha az kirillik yüküne sahiptir. Çünkü organik çözücüler oldukça küçük miktarlarda içerirler. Fakat tüm proseste organik çözücüler her iki boya türünde de viskoziteyi kontrol etmek amacıyla ek olarak kullanılmaktadır. Kullanılan kaplama materyalleri genellikle akrilat ya da epoksi temellidir ve boyama sırasında polimerizasyon reaksiyonu da gerçekleşmektedir.

Kataforez banyolarında kaplama işlemi gerçekleştirilirken asit yan ürünleri oluşmaktadır. Bu ürünler kataforez banyosunun pH'sını etkilemekte ve böylelikle kaplama işleminin etkin ve istenilen kalitede olmasını engelleyen bozukluklara/kusurlara yol açmaktadır. Kataforez banyolarının pH'larını sabit tutmak ve banyo muhtevasını bozulmadan korumak için banyo suyu belirli aralıklarla tasfiye edilip arıtılarak tekrar kullanılmaktadır. Bu yöntem suyun başka bir hacme pompalanması, arıtımı ve tekrar banyoya geri döndürülmesi şeklinde düşünüldüğünde enerji ve zaman açısından oldukça maliyetli bir işlemdir. Fakat iyon değişim membranları ile suyun başka bir yere aktarılması pompalanması gibi işlemlere gerek kalmamaktadır. Kataforez prosesine ait anot, iyon değişim membranı ile oluşturulan hücre içerisine alınır, böylelikle kataforez prosesi için sürücü kuvvet olan elektrik potansiyel farkı aynı zamanda banyo içerisinde oluşan asit yan ürünlerinin ayrılması

için de kullanılmış olmaktadır. Böylelikle prosesin işleyişi banyo suyunun boşaltılıp arıtılıp tekrar banyoya pompolanması için durdurulmak sızın enerji ve zaman açısından çok daha etkin ve kullanışlı bir hal almaktadır ve Kataforez anoduna iyon değişim membran ile anot hücresi oluşturulması ile proses için gerekli alan ihtiyacı ve proses işletim maliyeti düşmektedir.

## **2.2. İyon Değişim Membranlarının Sınıflandırılması**

### **2.2.1. Homojen Membranlar**

İyon değişim özelliğinin membran boyunca eşit ve homojen dağıldığı İDM'lerdir.

### **2.2.2. Heterojen Membranlar**

Heterojen İDM'ler iyon değişim malzemesinin devamsız fazı yani bir bağlayıcı içerisinde dağılması ile oluşturulurlar. İyonların heterojen membrandan verimli bir şekilde geçmesi için iyon değişim partikülleri arasında bir temas veya partiküller arası iyon ileten bir çözelti olması gerekmektedir. Bu İDM'lerde iyon iletkenliği membranın her yerinde eşit özellik göstermez. İlk heterojen İDM'ler 1930'larda iyon değişim reçineleri geliştirildikten sonra bu reçinelerin ince toz haline getirilmesi ve yapıştırıcı polimer içerisine hapsedilmesi olarak çalışılmıştır. Heterojen iyon değişim membranları, sabit yükün (iyon değişim grupları) dağılım ve türü, membranın yapıldığı malzemeler vb. özelliklere göre sınıflandırılır [Bazinet 2005].

### **2.2.3. Anyon Değişim Membranları**

Anyon değişim membranları (ADM) yüzeylerinde bulunan pozitif yükler ile kationların geçişini engeller ve karşıt yüklü, negatif iyonların geçişine izin verir. ADM üzerine yapılan çalışmalar oldukça komplekstir ve öncelikli olarak membran yakıt pilleri ya da su elektrodializi için yüksek pH ve sıcaklıkta çalışmaya elverişli membranların geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır [Hagesteijn et al., 2018]. Bu doğrultuda ADM'ler üzerindeki çalışmalar polimer ana zincir kimyası, sabit kation

grubu kimyası, katyon grupları kimyası ve özellikleri, ana zincir fonksiyonelleşmesi gibi birçok alanda devam etmektedir [Pan et al., 2018].

#### **2.2.4. Katyon Değişim Membranları**

Katyon değişim membranları (KDM) yüzeylerinde bulunan negatif yükler ile anyonların geçişini engeller ve karşıt yüklü, pozitif iyonların geçişine izin verir. KDM üzerine yapılan çalışmalar yüksek pH ve sıcaklıkta çalışmaya elverişli membranların geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır.

### **2.3.Elektrodiyaliz Membranlarının Özellikleri**

#### **2.3.1 Membran Direnci**

İyon değişim membranlarının düşük dirençli olması oldukça önemlidir. Teoride bir membran çiftinden geçen bir Faraday'lık yük besleme akımından konsantre akımına bir ekivalent gram elektron taşıyabilmektedir [Bernardes et al., 2014]. Böylelikle n çift membran eklemek proses verimini arttıran bir durumdur. Fakat elektrik açısından bakıldığında böyle bir sistem seri halinde bağlanmış dirençlere benzemektedir.

Sonuçta toplam elektrik direncine elektrotlar, membranlar ve membranlar arasında dolaşan çözeltiler katkı sağlar. Maksimum membran çifti sayısı üzerindeki limit, elektrotlar arasındaki membran çiftlerinin toplam direnci ne kadar yükselttiği ile ilgilidir. İdeal olarak membranların direnci oldukça düşük olmalıdır ve toplam dirence asıl katkı besleme çözeltisi akımından olmalıdır [de Barros Machado et al., 2014].

#### **2.3.2. Membran Potansiyeli**

Bir membran ile ayrılmış iki çözeltide tuz konsantrasyonlarındaki fark herhangi bir akım uygulanmasa da membran boyunca bir elektriksel potansiyel farkına yol açar [Galama et al., 2016]. Bu durumu açıklamak için, konsantrasyon farkının bir sonucu olarak, membran ile çözelti arasındaki sınırda “membran potansiyeli” nin varlığını

kabul etmiştir. 1911'de Donnan'ın bu kabulü iyon değişim membranlarının ve çevresindeki çözücünün sınırı için doğrulamıştır. Eş zamanlı olarak konsantrasyon dengesine dayanan ve "Donnan dışlama potansiyeli" denen matematiksel bir eşitlik geliştirmiştir.

### 2.3.3. Kütle Transferi ve Taşınım Sayısı

ED prosesinde sürücü kuvvet elektrik alanıdır. Ayrım yapılacak ortam iletken ve düşük dirençli olmalı, ayrıca hedef yüklü partiküller mobil olmalıdır. Poisson eşitliği iyon transferinin elektro membran prosesinde madde dengesini açıklamak için yaygın olarak kullanılan bir matematiksel ifadedir [Zourmand et al., 2015]. Referans iyon etrafındaki iyonların yuvarlak ve simetrik olduğu kabul edildiğinde, yük yoğunluğu ( $\rho$ ) ve elektrostatik potansiyel ( $\phi$ ) arasındaki ilişki belirlenen radyal uzaklıkta ( $r$ ) Poisson tarafından eşitlik 2.1 ile ifade edilmiştir [Claisse 2014].

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left( r^2 \frac{d\phi_r}{dr} \right) = -\frac{4\pi}{\epsilon} \rho_r \quad (2.1)$$

Elektro nötralizasyon durumunda, Poisson yerine Donnan eşitliği kullanılmaktadır ([Zourmand et al., 2015], [Claisse 2014], [MacGillivray 1968]). Donnan eşitliği ya da potansiyeli çözelti ve yüklü membran arasındaki ara yüzey potansiyelidir. ED prosesindeki her bir membran için seyreltik ve konsantre taraflarında ayrı Donnan Potansiyelleri söz konusudur. Konsantre ve seyreltik akımlarının konsantrasyonları eşit olduğu durumlarda Donnan potansiyeli sıfır olur [Qasem et al., 2020].  $\text{Na}^+$  ve  $\text{Cl}^-$  model iyonları için Donnan potansiyeli eşitlik 2.2 ile ifade edilir.

$$U_{don,arayüzey} = \frac{U_{don,Na} + U_{don,Cl}}{2} \approx 0.5 \frac{R_g T}{F} \ln \frac{C_{Cl,m}}{C_{Na,m}} \quad (2.2)$$

$R_g$  evrensel gaz sabiti ( $\text{Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$ ),  $F$  Faraday sabiti ( $\text{mol}^{-1}$ ). Membran için Donnan potansiyeli eşitlik 2.3 ile ifade edilir;



$$U_{Don,m} = [U_{arayüzey 1} - U_{donarayüzey 2}] \quad (2.3)$$

Bağlı yüklü membranda denge şartlarında iyon taşınımı Nernst-Planck eşitliği ile ifade edilir ([MacGillivray 1968], [Gjelstad et al., 2007]). Nernst-Planck eşitliği difüzyon ve elektron taşınımının kombinasyonudur ve eşitlik 2.4 ile ifade edilir.

$$F = D \frac{dC}{dx} + \frac{zF_a}{RT} DC \frac{d\phi}{dx} \quad (2.4)$$

Eşitlikte D difüzyon katsayısı (m<sup>2</sup>/s), F akı (poröz metaryalin birim kesit alandan dakikada geçen akış), z elektronun değeri, Fa; Faraday sabiti (9.65×10<sup>4</sup> C/mol), R = 8.31 J/mol/K, T sıcaklık (K), φ voltaj ve x; uzaklık (m)'dir [Claisse 2005].

Membran taşınım sayısı iyon değişim membranlarının karakteristik bir özelliğidir. Taşınım sayısının ED prosesi üzerinde önemli bir etkisi vardır. Taşınım sayısı sadece su taşınımı hakkında bilgi vermez aynı zamanda membran yapısını ve iyon taşınım mekanizmasını da açıklar. Membran oldukça yüksek bir iyon değişim kapasitesine ve düşük su içeriğine sahip olduğunda taşınım sayısı bire oldukça yaklaşır [Larchet et al., 2004].

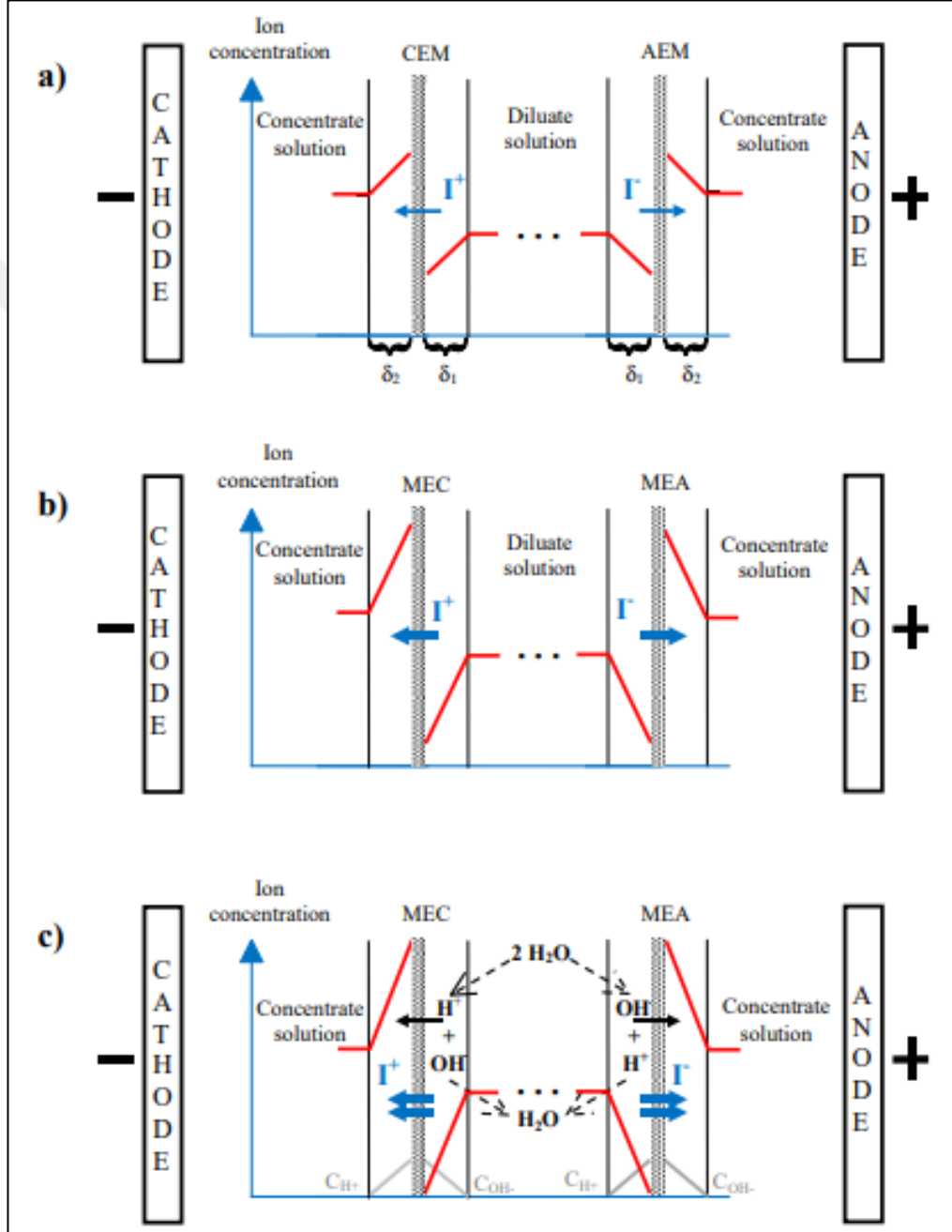
#### 2.3.4. Konsantrasyon Polarizasyonu

Konsantrasyon polarizasyonu ED için oldukça önemli bir fenomendir. IUPAC Önerileri konsantrasyon polarizasyonunu; membran yüzeyindeki yüksek ya da düşük katı miktarının membranın uzağındaki iyi karışmış yığın akışı ile kıyaslandığı konsantrasyon profili olarak tanımlar.

Konsantrasyon polarizasyonu elektrik akımının çözelti içerisinde anyon ve katyonları birlikte taşınması, fakat sadece karşıt yüklü iyonların membrandan geçmesi nedeni ile oluşur. Konsantrasyon polarizasyonu membran taşınım sayısı ile iyonik türlerin sayısı arasındaki fark ile artar [Zourmand et al., 2015].

Konsantrasyon polarizasyonu seyreltik çözücülerin elektrodializi ile engellenebilmektedir. Bu tip durumlarda tüm enerjiyi iyon taşınımında kullanabilmek için ED sistemini sınırlayıcı akım yoğunluğunun %80'inde çalıştırmak önemlidir. Teoride; mümkün olan en düşük aktif membran alanı ile yüksek hızda desalinasyon

yapılmak istense de, uygulamada bu durum akım yoğunluğunun konsantrasyon polarizasyon fenomeni ile kısıtlanması ile neticelenir [Luo et al., 2018]. ED prosesi sırasında gözlemlenen konsantrasyon polarizasyonu Şekil 2.1'de gösterilmektedir. Şekilde;  $\delta_1$ : diluat sınır bölgesi;  $\delta_2$ : konsantre sınır bölgesi;  $CH^+$ :  $H^+$ 'daki konsantrasyon ve  $COH^-$ :  $OH^-$ 'daki konsantrasyonu ifade etmektedir.



Şekil 2.1: Konsantrasyon polarizasyonu: (a) gradient oluşumu, (b) LCD (c) LCD'nin aşılması ve su ayrımı.

Besleme akımının konsantrasyonu ( $C_d$ ) ya da akımlar arasındaki konsantrasyon farkı ( $C\Delta$ ) prostesten beklenen son ürün konsantrasyonuna göre belirlenir.  $C_d$  ya da  $C\Delta$  kütle transfer eşitliğinden türetilir. İyonların seyreltik akımdan konsantre sisteme geçtiği düşünüldüğünde, eşit akış hızlarında olduğu varsayıldığında, bu iki akımın tuzluluk farkları aynı kabul edilir. Herhangi bir giriş ya da çıkış konsantrasyonuna göre değeri eşitlik 2.5 ile ifade edilir [Ankoliya vd., 2021].

$$C\Delta = C_d \quad (2.5)$$

### 2.3.5. Permselectivite

Permselectivite süzütünün karşı yüklü iyonlara göre aynı yüklü iyonların süzülebilmesi yeteneğidir. Permselectivite genellikle aşağıda verilmekte olan eşitlik ile tanımlanır [Kamcev 2021].

$$\Pi = \frac{t_g^m - t_g^s}{t_c^s} = \frac{t_g^m - t_g^s}{1 - t_g^s} \quad (2.6)$$

$t_g^m$  ve  $t_g^s$  karşıt yüklü iyonların sırasıyla membranda ve dış çözeltide taşınım sayısı,  $t_c^s$ ; aynı yüklü iyonların dış çözeltide taşınım sayısıdır. Anyon değişim mebranlarının karşıt yüklü iyonlara karşı geçirgen oluşu ilk defa Donnan tarafından açıklanmıştır [Alabi et al., 2018], [Sung et al., 2021].

İyonların membrandan taşınması, membrandaki iyonların difüzyon katsayılarına, çözelti/membran ara yüzeyindeki iyon konsantrasyonlarına ve iyon değişim kapasitesine bağlı olan oldukça karmaşık bir işlemdir.

### 2.3.6. İyon Değişim Kapasitesi

İyon değişim kapasitesi iyon değişim membranlarının bir diğer karakteristik özelliğidir. Membran yapısında bulunan yüklü kısımların ortamdaki zıt yüklü iyonları değiştirmesinin ölçütüdür ve genellikle titrasyon yöntemi ile belirlenir. [Karas et al., 2014].

### **2.3.7. Mekanik Dayanımı**

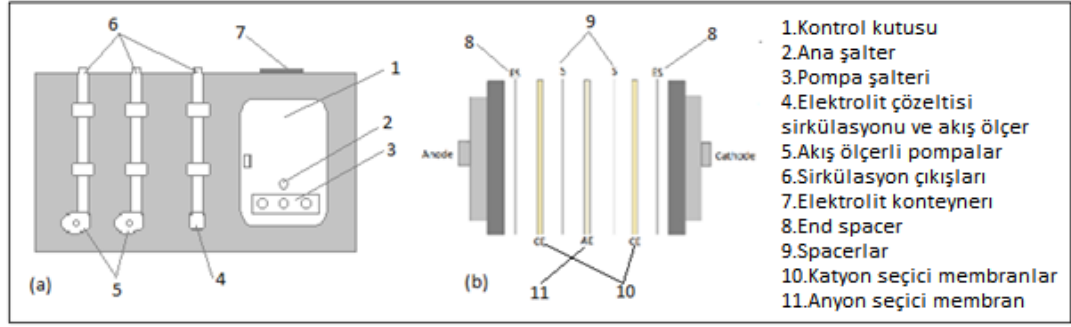
Elektrodiyaliz prosesinde kullanılan iyon değişim membranlarının mekanik dayanımı oldukça önem arz etmektedir. Aksi taktirde membranlar işletim sırasında yapılarında oluşan bozulma sonucu kullanılamaz hale gelmektedirler. Mekanik dayanım ile iyon değişim kapasitesi arasında ters bir orantı mevcuttur. Yüksek mekanik dayanımlı ve iyon değişim kapasiteli membranlar üretmek için literatürde hala yoğun bir şekilde çalışmalar gerçekleştirilmektedir.

## **2.4. Elektrodiyaliz Prosesi Bileşenleri ve İşletme Parametreleri**

ED iyon değişim membranlarının elektrik alan altında sıralanarak kullanıldığı bir deiyonizasyon teknolojisidir. ED düzeneği iyon değişim membranları, boşluk oluşturucular (spacerlar), elektrotlar, ED hücresi, su devridaim pompaları, konsantre ve seyreltik akımlar için su hatlarından oluşmaktadır. İDM'ler ED'nin anahtar bileşenleridir. İDM'lerin performanslarını anlayabilmek için ED prosesini etkileyen parametreler ile proses bileşenlerini de iyi anlamak gerekmektedir.

### **2.4.1. Elektrodiyaliz Hücresi**

ED hücresi elektrotları ve elektrotlar arasında sıralanmış iyon değişim membranları ve boşluk oluşturucuları bir arada tutan yapıdır. ED membranları ED hücresi içerisinde ADM ve KDM'lerin tekrarlayan serileri halindedir. Endüstriyel uygulamalarda ED hücresi içerisine yerleştirilen membranlar 100 ile 200 hücre çiftine ulaşabilmektedir [Strathmann 2010]. ED prosesi, ED hücresi ve seri halinde yerleştirilen anyon ve katyon değişim membranları ile membranların oluşturduğu kompartmanlar şekil 2.2'de gösterilmektedir.



Şekil 2.2: a) ED cihazı ve bileşenleri, b) ED hücresi ve bileşenleri.

ED hücresi içerisindeki akış rejimi hücrenin yapısı ile ilgilidir ve bu durum membran deformasyonuna etki etmektedir. ED hücresi ile ilgili çalışmalar enerji açısından kendine yeten ve yüksek miktarda desaline edilmiş su üretimine izin veren hücre yapıları üzerine odaklanmıştır [Mei et al., 2020].

#### 2.4.2. Boşluk Oluşturucular

ED hücresi içerisinde su akışını yönlendirmek için kullanılırlar ve hücre içerisinde türbülanslı akış oluşturmada etkilidirler. İDM'ler üzerinde oluşan çökelmeler membran yüzeyini kaplayarak membranların elektrik iletkenliğini düşürmektedir [Dufton et al., 2018]. Hücre içerisinde akış eş yönlü (co-current) ya da zıtyönlü (counter current) olabilmektedir. Özetlenecek olursa ED uygulamalarını bütünlükten bileşenler; İDM'ler (anyon seçici ve katyon seçici membranlar), boşluk oluşturucular, doğru akım kaynağı, elektrotlar ve elektrolit, konsantre ve seyreltik akımlarından oluşan çözeltilerdir.

Elektrodiyaliz uygulamalarında genellikle kafes tipi (mesh type) boşluk oluşturucular kullanılmaktadır [Bai et al., 2018]. Boşluk oluşturucular iletken değildir ve Hicks'e göre kullanıldıklarında iyonik kütle transferini arttırırlar. Boşluk oluşturucular akışkanların hidrodinamik karışımları ile konsantrasyon polarizasyonunu ortadan kaldırmaktadırlar. Literatürde boşluk oluşturucuların kütle transferini arttırdığına yönelik bir çok çalışma bulunmaktadır. İletken boşluk oluşturucu üretimi, üç boyutlu boşluk oluşturucu basma (3D Print Spacers) bu çalışmalardan bazılarıdır [Shahi et al., 2001], [Balster et al., 2006].

### 2.4.3. Elektrotlar

ED prosesinde elektrotlar ED hücresinde bulunur ve membranlar ile boşluk oluşturmalar iki elektrot arasında sıralanırlar. Genellikle anot ve katot elektrotlar aynı boyutlara aynı materyal ya da kaplamalara sahiptir. Metal oksitler (örn. Ru/Ir) ya da soy metaller (örn Pt) kaplı Ti kafes metaryaller en yaygın kullanılan elektrot malzemeleridir [Jang et al., 2020].

İyonik iletimden elektron iletimine geçişi oksidasyon/redüksiyon reaksiyonları ve iyon göçü için gerçek itici güç elektrotlar ile sağlanır.

### 2.4.4. Doğru Akım Kaynağı

Doğru akım kaynağı; ED hücresinde bulunan elektrotlara etkin iyon göçü için gerekli elektrik akımını sağlar. Elektrotlar vesilesi ile doğru akım kaynağından gelen akım ile ED hücresinde potansiyel farkı oluşur. Böylelikle ED için itici kuvvet olan elektriksel güç sağlanmış olur.

### 2.4.5. Çözeltiler

Elektrodiyaliz prosesinde elektrolit, konsantre ve seyreltik (diluat) çözeltileri mevcuttur.

Elektrolit çözeltileri elektrotlar ile temas halindedir ve elektrotlardan sağlanan elektrik akımının ED hücresinde bulunan membran ve çözeltilere, osmotik basınç etkisini azaltarak ulaştırılmasını sağlar. Konsantre; giderimi yapılan iyonların toplandığı çözeltilidir. Seyreltik çözelti ise iyon giderimi gerçekleştirilen çözeltilidir.

### 2.4.6. Sınırlayıcı Akım Yoğunluğu (LCD)

Sınırlayıcı akım yoğunluğu (LCD); akım yoğunluğu kullanımı ve elektrik direncini tanımlar. Sınırlayıcı akım yoğunluğu çoğunlukla çözelti ve membran özelliklerine, ED hücresi konfigürasyonuna ve seyreltik çözeltinin akış hızı gibi proses parametrelerine bağlıdır.

Belirli bir akım seviyesinde, membrandan taşınım, membran yüzeyinde laminar sınır tabakası (difüzyon tabakası) boyunca olan difüzyondan yüksek hale gelir. Bu değerdeki elektrik akımı LCD olarak adlandırılır.

LCD'nin üzerindeki akım değerlerinde; ED hücresi boyunca seyreltik çözeltinin bulunduğu bölümlerde elektrik direnci keskin bir şekilde iyon tükenmesi nedeni ile düşer. Ortamda iyon üretmek için membran yüzeyinde suyun ayrışması gerçekleşir. Bu noktada Ohm Kanunu geçersiz hale gelir. Hücrelerde pH değişimi gözlemlenir ve ED'nin akım yoğunluğu  $H^+$  ve  $OH^-$  taşınımı sonucu düşer. Bu nedenle birçok membran özelliğinden, elektrolit tipi ve konsantrasyonundan ya da hidrodinamik özelliklerden etkilenen LCD değerinin bilinmesi önemlidir [Káňavová et al., 2014].

Herhangi bir ED sistemi için LCD; sistemde kullanılan membran alanı ve membranlardan oluşan kompartımanlı ED hücresi uzunluğunun seçimindeki en büyük kısıttır. LCD membran yüzeyindeki laminar sınır tabakasındaki kütle transfer katsayısı ve seyreltik akışın çıkış konsantrasyonu ile doğru orantılıyken, membran ve çözeltideki iyonların taşınım sayısı arasındaki farkla ters orantılıdır. Sınırlayıcı akım yoğunluğunu belirleyen parametre, çözeltinin akış hızının ve boşluk geometrisinin bir fonksiyonu olan kütle transfer katsayısıdır, dolayısıyla kütle transfer katsayısını teorik olarak hesaplamak zordur. Pratik olarak, sınırlayıcı akım yoğunluğu, çözeltinin akış hızının, kullanılan boşluk oluşturucu tipi ve konsantrasyonun bir fonksiyonu olarak deneyle geliştirilen fonksiyona dayalı olarak hesaplanır [Lee et al., 2006], [Ankoliya vd., 2021]. Tablo 2.1'de Sınırlayıcı akım yoğunluğu ile ilgili literatürde bulunan korelasyonlar sunulmaktadır.

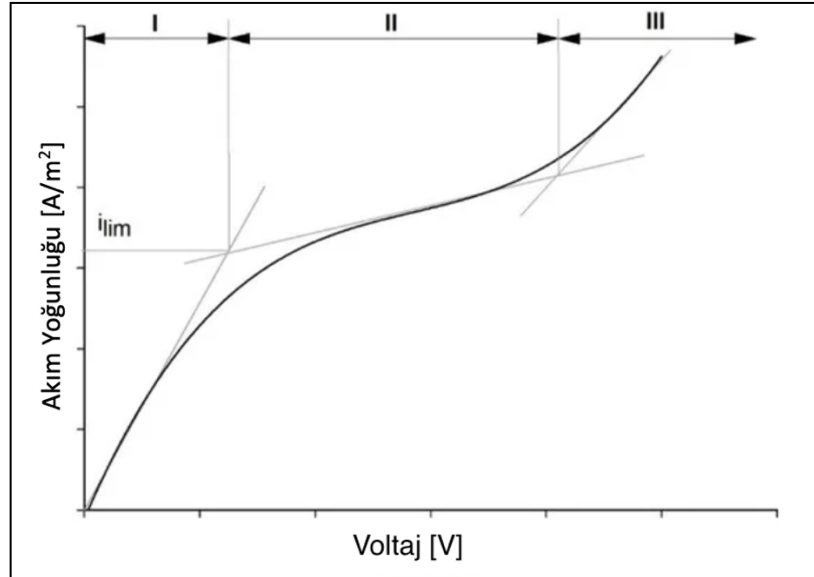
Tablo 2.1: Sınırlayıcı akım yoğunluğu ile ilgili literatürde bulunan korelasyonlar.

| Yazar (Yıl)                                                                 | Eşitlik                                                                            |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Peers (1956)                                                                | $i_{lim} = \frac{FDC}{\delta(T - t)}$                                              |
| Leveque (1973) [Newman and Thomas-Alyea 2012], [Pis'menskaya et al., 2012]. | $i_{lim} = 1.4 \frac{FDC}{H(T - t)} \left( \frac{H^2 u}{LD} \right)^{\frac{1}{3}}$ |
| [Gerald, and Afonso 2010]                                                   | $i_{lim} = F \frac{k_{c,eff}}{D_{eff}} Z_1 D_1 (C_{1,b} + C_{2,b} + C_{3,b})$      |

Tablo 2.1:Devam.

| Yazar (Yıl)                                                         | Eşitlik                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [Nakayama et al., 2017] [26]                                        | $i_{lim} = 1.772F\bar{C}_d(0)\left(\frac{\bar{u}_d}{L}\varepsilon D_e\left(1 + \xi\frac{u_d W}{D_e}\right)\right)^{\frac{1}{2}} \text{ için } \frac{u_d W^2}{\varepsilon D_e(1+\xi\frac{u_d W}{D_e})L} \gg 1$ |
| Lee vd. (2002, 2006) [27,28] ([Lee et al., 2002],[Lee et al., 2006] | $i_{lim} = aCu^b$                                                                                                                                                                                             |
| [Tanaka 2004] [Tanaka 2005]<br>Tanaka (2004, 2005) [29,30]          | $i_{lim} = (m_1 + m_2 u_{out})C_{out}^{n_1} + n_2 u_{out}$                                                                                                                                                    |

LCD'nin saptanması için grafiksel yöntemler de mevcuttur. Bu metotlar; Isaacson ve Sonin metodu, Cowan ve Brown metodu, pH metodu, La Cerva ve ark. tarafından sunulan akım verimliliği ( $\lambda$ ) temeline dayanan metot ve Meng ve ark. tarafından tuz giderim verimliliğine dayanan metotlardır. Isaacson ve Sonin'in kullandığı metotta akım yoğunluğunun davranışı ED hücresine uygulanan voltaja bağlı olarak ifade edilir (Şekil 2.3). Bu yolla elde edilen grafiğin üç bölgesi vardır.



Şekil 2.3: LCD'yi belirlemek için Isaacson ve Sonin tarafından geliştirilen akım yoğunluğu-voltaj grafiği.

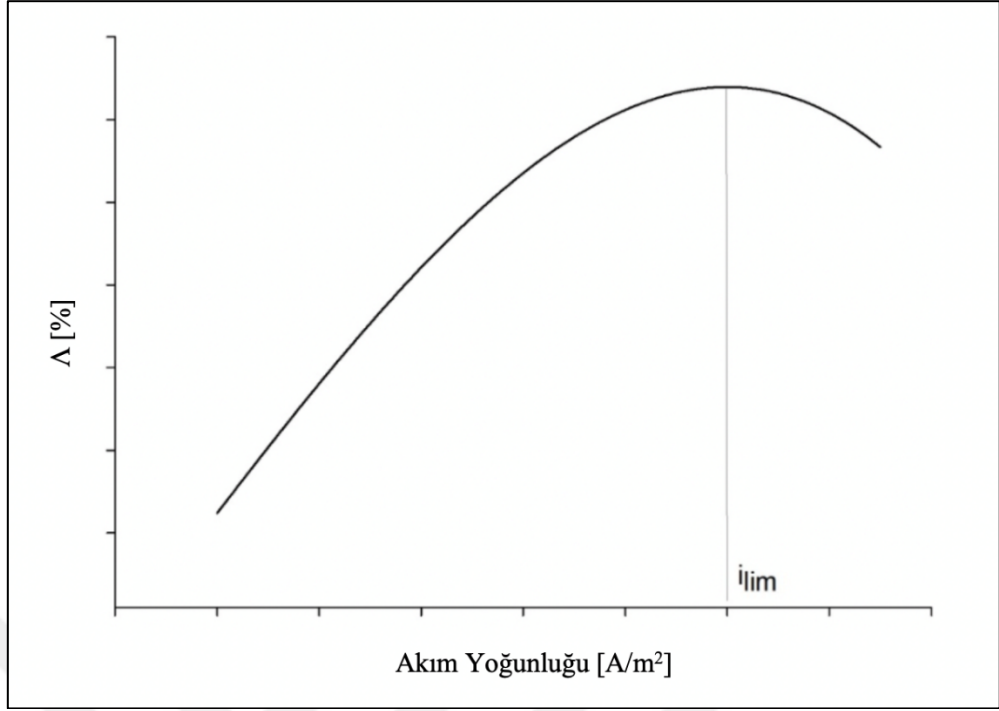


Isaacson ve Sonin'in kullandığı grafiğin ilk bölümü (I) uygulanan voltaj ile akım yoğunluğunun doğrusal bir korelasyonda olduğu Ohmik bölge olarak adlandırılır. İkinci (II) bölge ise doğrusal bağımlılığın dengelenmeye başladığı bir bölgedir. Burada çalışma modu LCD bölgesini şekillendirir. Yükselen voltaj su moleküllerinin  $H^+$  ve  $OH^-$  iyonlarına ayrışmasıyla, iyonların yoğunluk farkları nedeni ile yerçekimi konveksiyonu ve elektro konveksiyon gerçekleşir ve bir enerji kaybı oluşur. Bu durum seyrelmiş akım tarafındaki membran yüzeyinde sınır tabakası oluşumu nedeniyledir. Ohmik ve ikinci (plato) bölgeye ait iki eğimin kesişme noktası LCD'yi gösterir. Ohmik bölgeyi genişletmenin bir yolu, besleme akımını artırmak, iyon giderimi gerçekleştirilen çözeltide bulunan iyonların daha iyi karışmasını sağlamak ve membrana yakın sınır tabakası oluşumunun azalmasına izin vermektir. Üçüncü bölge (III), ikinci bir kesişme noktasının belirlenebildiği, artan bir pozitif eğim ile uzanır. Bu bölge, zaten ayrılmış su moleküllerinin ED hücresi aracılığıyla elektriği ilettiği, yerçekimi konveksiyonu, elektro konveksiyon ve tuz karşı iyonlarının akıma katkısı ile açıklanabilir [Knežević, et al., 2022].

La Cerva tarafından sunulan akım verimliliği ( $\lambda$ ) temeline dayanan metotta ise akım verimliliği Eşitlik 2.7'ye göre hesaplanarak akım yoğunluğuna karşı grafiğe geçirilir (Şekil 2.4) [Knežević, et al., 2022].

$$\Lambda = \frac{zFQ_{sey}(C_{sey}^{Gir} - C_{sey}^{Çık})}{NI} \cdot \%100 \quad (2.7)$$

Eşitlikte  $z$  iyonik yük,  $F$  Faraday sabiti (96485,33 sA/mol),  $Q_{sey}$  seyreltik akım akış hızı (L/s),  $C_{sey}^{Gir}$  ve  $C_{sey}^{Çık}$  giriş ve çıkış akımlarındaki NaCl konsantrasyonudur (mol/L).



Şekil 2.4: La Cerva tarafından geliştirilen akım verimliliği akım yoğunluğu grafiği.

Grafikte akım verimliliğinin en yüksek olduğu değer sınırlayıcı akım yoğunluğunu vermektedir.

Sınırlayıcı akım yoğunluğunun tespitinde kullanılan yöntemlerden biri de Cowan ve Brown metotudur. Bu metotta ED hücresinin direnci karşı gelen akım değerine göre grafiğe geçirilir. Grafiğin eğimindeki ani değişim noktası limit akım yoğunluğu değerini vermektedir. [Knežević, et al., 2022].

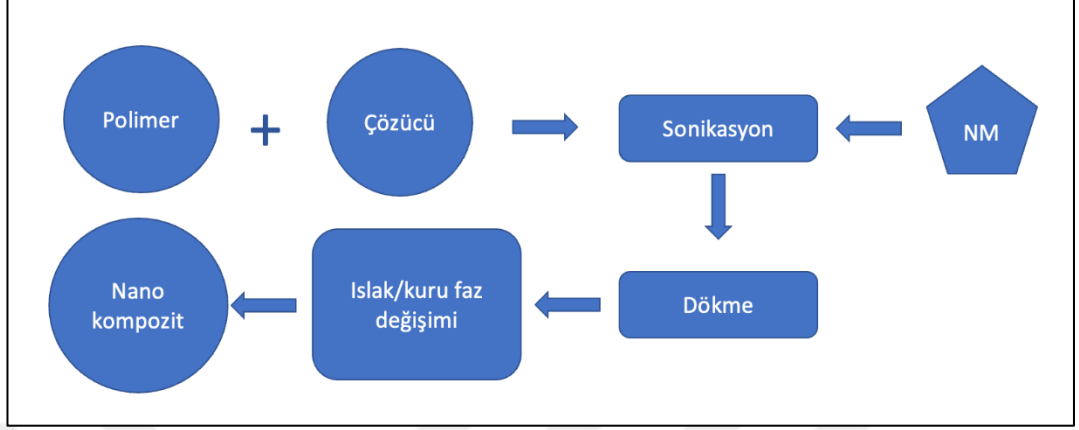
Sınırlayıcı akım yoğunluğu pH metodu ve desalinasyon etkinliği üzerinden de bulunabilmektedir.

## 2.5. Nanomateryal İçeren Elektrodiyaliz Membranlarının Üretim Yöntemleri

### 2.5.1. Çözelti İçerisine Karıştırma Yöntemi

Membran üretiminde en çok kullanılan yöntemdir. Genellikle nanopartikül/nanomateryal (NM) bulunduran polimerik iyon değişim membranlarının üretiminde kullanılırlar. Polimer uygun bir çözücü içerisinde çözülür. Uygulaması

basittir, kolayca yeniden üretilebilir ve dolayısıyla büyük ölçekli üretim için oldukça elverişli bir yöntemdir [Alabi et al., 2018].



Şekil 2.5: Çözelti içerisinde karıştırma yönteminin genel gösterimi.

### 2.5.2. Yerinde (In-Situ) Polimerizasyon Yöntemi

Çözelti içerisine karıştırma yönteminden farklı olarak polimer çözeltisi yerine monomer kullanılarak membran çözeltisi hazırlanır. İyon değişimini sağlayacak nanomateriyal veya bunların öncülleri, sıvı bir monomer veya monomer çözeltisi içinde dağılır, ardından polimerizasyon gerçekleştirilir. Polimerizasyon genellikle uygun bir başlatıcının difüzyonu veya ısı ya da UV gibi uygulamalar ile indüklenir. Bu yöntem çözelti karıştırma ile karşılaştırıldığında polimerizasyon basamağı nedeni ile daha maliyetli ve zaman alıcı bir yöntemdir. [Alabi et al., 2018].

### 2.5.3. Yerinde Sol-Jel Yöntemi

Yerinde sol-jel tekniği, bir polimerin silika için tetraetoksisilan (TEOS) gibi bir NM öncülü ile karıştırılmasını ve ardından öncünün hidrolizini ve polikondenzasyonunu içerir [Sung et al., 2021]. Yerinde-jel tekniği, yalnızca silika ve TiO<sub>2</sub> gibi öncülleri olan NM'ler için kullanılabilirler. Bu nedenle uygulanabilirliği birkaç NM ile sınırlıdır. Ayrıca hidroliz ve polikondenzasyon adımı, çözelti karıştırma tekniğine kıyasla daha maliyetli ve zaman alıcıdır.

#### 2.5.4. Eriyik Karıştırma Yöntemi

Bu yöntem iyon değişim birimlerinin erimiş bir polimer matris içinde dağılmasını temel alır. Ekstrüzyon ve enjeksiyonla kalıplama gibi teknikler, bir termoplastik polimeri yüksek sıcaklıklarda NM ile karıştırmak için kullanılır. Sonuç olarak, polimer zincirleri polimerik nanokompozitler oluşturmak için birbirine bağlanır. Eriterek karıştırma yönteminde herhangi bir çözücü kullanımı gerekmemektedir. Bununla birlikte, bu tekniğin bir dezavantajı, ısıyla sertleşen polimerler için uygun olmamasıdır [Alabi et al., 2018].

İyon-değişim malzemesi olarak organik ve/veya inorganik iyon değiştiricileri kullanılmaktadır. Literatürde termoplastik polimer yapıların yanı sıra silikat bileşikleri gibi inorganik malzemelerin de kafes polimer yapı için önerildiği bilinmektedir. [Grebenyuk vd., 2002] Bazı durumlarda membranlar, formülasyona uygun bir plastikleştirici eklenmesi ile, dokunmuş kumaş, polietilen veya naylon gibi bir polimer ağıyla güçlendirilmiştir. Genelde organik plastiklerden poli(vinil klorür), polietilen, polipropilen kullanılarak ısıtılmış ve sonra ısıtma ve/veya preslemeyle polimer karışımı membran haline getirilmiştir [Bodamer 1954].

Eriyik karıştırma ile iyon İDM üretimi sırasında dikkat edilmesi gereken parametrelerden biri eriyik akış indeksi (MFI) değeridir, bu değer polimerin akış yeteneğinin bir göstergesidir. Polimerlerin akış özellikleri üzerinde yapılan çalışmalar, eriyik akış davranışının oluşturulan kompozitlerinin yapı-özellik ilişkisi üzerinde önemli bir rol oynadığını göstermiştir. MFI değeri iki bileşenin karıştırılma kalitesini etkilemektedir. Yüksek MFI'li (düşük viskoziteli) plastikler daha iyi ıslanma ve dağılım sağlarken, düşük MFI değerli polimer kullanımı zayıf bir ıslanma ve dağılıma neden olur. Öte yandan, çok düşük bir viskoz matris (çok yüksek MFI) kullanmak, polimerik matris ve iyon değişim birimleri arasındaki ara yüzeyi bozabilmektedir. [Kajaks et al., 2018].

Eriyik çekme yöntemi ile üretilen heterojen membranlarda iyon değişim partiküllerinin büyüklüğü genellikle 50 µm dolaylarındadır [Kojima et al. 1971].

İDM olabilecek en düşük elektriksel direnç sahip heterojen membranların ağırlık olarak %65'inden fazlası iyon değişim partiküllerinden oluşur. Bu iyon değişim partikülleri suya batırıldığında şiştiğinden, düşük elektriksel dirençle (çok miktarda iyon değişim reçinesi kullanıldığı durumlarda) yeterli mekanik dayanımı sağlamak zordur. Yeterli mekanik dayanıma sahip çoğu heterojen membran genelde zayıf

elektrokimyasal özelliklere sahiptir. Diğer taraftan istenen yükseklikte elektrokimyasal performansı gösterecek iyon değişim partikülü konsantrasyonuna sahip bir membran yoğunlukla düşük mekanik dayanıma sahiptir. Homojen iyon değişim membranları ile aynı iyon değişim özelliklerine sahip heterojen membranlar suya batırıldıklarında ıslak iyon değişim malzemesi ve yapıştırıcı polimerin yoğunluk miktarlarından beklenenden daha fazla şişer. Bu membranlarda şişme esnasında su dolu aralıklar oluşturmaktadır. Bu durum sadece mekanik özelliklerin kalitesinde düşüklük değil aynı zamanda kötü seçici geçirgenliğe de sebep olmaktadır. Fakat iyon değişim boncukları ve iyon değişim membran tabakaları arasındaki boyut ve şekil farkı sebebiyle polimer yapısı bakımından iyon değişim membranları ve iyon değişim reçineleri arasında önemli farklar vardır. İki durumda da sulu bir çözeltiye temas ettiğinde sabit iyon değişim grupları polimerin şişmesine sebep olur. Şişme seviyesi çözeltinin iyonik gücüne ve polimerin çapraz bağ derecesine bağlıdır. Taneli iyon değişim reçinelerinin küresel simetrisine ve kullanım esnasında fiziksel olarak kuşatılmış olmamalarına bağlı olarak kurutulma ve tekrar ıslatılma veya çevresel iyonik kuvvetteki değişimler reçineyi önemli bir fiziksel hasara uğratmaz. Taneli iyon değişim reçinelerinin kullanımı esnasında boyutsal değişimler (yani reçinelerin su alarak şişmesi) iyon değişim membranlarının büyük boyutu ve de içinde kullanıldıkları elektrodializ yığınının fiziksel olarak engellenmiş olması sebebiyle iyon değişim membranları tarafından büyük oranda tolere edilemez. Sonuç olarak, heterojen iyon değişim membranlarının kilogram bazında iyon değişim kapasiteleri aynı kütledeki kuru membranın 1 ile 3 katı arasındadır [Dufton et al., 2018]. Polimerlerin çapraz bağlanmasına ek olarak başka şişme kısıtlayıcı önlemler de vardır. Örneğin, sağlamlaştırıcı kumaşlar veya reçinelerde mikrokristalin bölgeler oluşturan polimer parçalarını iyon değişim reçinelerine katarak kısıtlama sağlanabilir. Genelde heterojen iyon değişim membranlarının göreceli olarak yüksek elektriksel dirençleri vardır. Homojen iyon değişim membranlarının sabit iyon dağılımları daha düzenlidir ve yoğunlukla elektriksel dirençleri daha düşüktür [Tamersit et al., 2018].

Heterojen iyon değişim membranları kolaylıkla hazırlanabilen yüksek mekanik dayanıma sahip membranlar olmalarına rağmen, elektrokimyasal özellikleri homojen membranlara göre biraz daha düşüktür. Fakat heterojen tip membranlar yüksek mekanik dayanımları ve kolay kullanımları sayesinde elektrikle kaplama işlemlerinde;

otomotiv ve diğer metal aygıtların kaplanması gibi endüstrilerde çok önemli bir yeri olan uygulamalarda kullanılmaktadır [Strathmann 2010].

#### **2.5.4.1. Ekstrüderler**

Ekstrüderler; ham materyallerin spesifik kesit özelliklerine sahip ürünlere, malzemenin basınç ve sıcaklık altında ekstrüder boşluğundan geçmek için zorlanması ile ya da kontrollü koşullar altında kalıplanması ile dönüştürülmesinde kullanılan cihazlardır [Abdulkareem et al, 2014].

Ekstrüderler basınç, sıcaklık, vida hızı, besleme hızı, tork gibi proses şartlarını kontrol etmede kullanılan panel, besleme hazneleri, vida, ekstrüzyon haznesi ve ürünün çıktığı kafa kısımlarından oluşur. Ekstrüde edilecek ürün besleme haznelerinden ekstrüder haznesine beslenir burada dönen ekstruder vidası/vidaları sayesinde sıcaklık ve basınç altında erimiş bir halde ekstrüderden çıkış noktası olan baş kısmına doğru ilerler [Özmen, S., 2019].

Vidalı ekstruderlar kendi içlerinde çift ve tek vidalı olarak ikiye ayrılırlar. Çift vidalı ekstruderler ise dönüş yönlerine göre eş yönlü ve zıt yönlü olarak ikiye ayrılırlar. Tek vidalı ekstruderlar genellikle şekil vermede, çift vidalı ekstruderler ise polimer endüstrisinde termal olarak hassas malzemelerin, zorlu bileşikleştirme uygulamaları, uçucu hale getirme, kimyasal reaksiyon ve profil ekstrüzyonu için kullanılır.

Ekstrüderler ile kafa yapısına göre birçok farklı ürün elde etmek mümkündür.

### **2.6. Elektrodializ Membranlarında Kirlenme**

Kirlenme terimi İDM yüzeyinde bir kirlilik tabakasının oluşumunu belirtmek için kullanılmaktadır [Dammak et al., 2021]. Kirleticiler kolloid bir tabaka oluşturarak yapışma veya membran matrisine sızma yolu ile membranların iletkenliğini azaltarak, ED prosesinin elektriksel direncinin artmasına neden olur. Böylece sistemde daha yüksek enerji tüketimi, daha düşük su geri kazanımı gözlemlenir.

İDM'lerde kirlenmenin en büyük nedeni olarak seyreltik akımda bulunan organik maddeler görülmektedir. Bu maddeler ED membranı üzerine adsorblanarak membranın zeta potansiyelinde değişikliklere neden olurlar. İDM kirlenmesi sadece elektrik direncini artırmakla kalmaz, aynı zamanda bu membranların ömrünü de azaltır. Membran kirlenmesi özellikle ADM'ler kullanıldığında, ED prosesinde hala

ciddi bir problemdir [Dammak et al., 2021]. Literatür verileri kirlenmenin voltaj altında ya da herhangi bir voltaj uygulanmadan gerçekleştiğini göstermektedir. Voltaj uygulanmadan görülen kirlenme adsorbsiyon sonucu oluşur ve membran direncinde artmaya neden olur. Konvansiyonel ED'de sisteme voltaj uygulandığında membran boyunca voltaj düşmelerinin arttığı gözlemlenmiştir [Lindstrand et al., 2000].

Kirlenmeyi aza indirmek için [Ruan et al., 2018] anyon değişim membranlarının üzerini hidrofilik polimer polidopamin ile kaplamıştır ve sülfabetainin zwitteriyonik yapısını aza-Micheal reaksiyonu ile yüzeye aşılarmıştır. Gerçekleştirilen bu modifikasyon ile membranların, kirlenme eğilimi azaltırken tuz rejeksiyonunun arttığı gözlemlenmiştir [Ruan et al., 2018], [Nthunya et al., 2022]. Kirlenme etkisini azaltmak için deiyonizasyon yapılacak çözeltiliye ön arıtım yaparak kirlleticilerin uzaklaştırılması da uygulanmakta olan yöntemlerdendir [Lindstrand et al., 2000]. Böylelikle kirliliğe neden olan maddelerin daha proses edilmeden sistemden uzaklaştırılması gerçekleştirilmektedir.

### **2.6.1. Elektrodializ Membranlarında Kirlenme Türleri**

ED membranlarının yüzeylerine, proteinler, yüzey aktif maddeler, polifenoller veya diğer doğal organik maddeler gibi bileşiklerin oluşturduğu kirlenme organik kirlenme olarak tanımlanır. Bu tip kirleticiler FTIR spektrumları ile belirlenebilmektedir.

Membranların yüzeyinde ve gözeneklerinde minerallerin çökmesi veya kristal büyümesi, olduğu durumlar ise inorganik kirlenme olarak adlandırılır. İnorganik kirlenmenin belirlenmesinde SEM-EDX analizleri kullanılmaktadır. Biyolojik kirlenme ise AFM analizleri ile aydınlatılmaktadır.

Membranların yükünü ve hidrofobiklik derecesini karakterize etmek için kullanılan diğer teknikler, kirlenmenin doymuş olup olmadığının belirlenmesinde çok faydalıdır. Bu tekniklerden biri temas açısidir. Organik kirleticiler sıklıkla yüksek oranda hidratlı polar gruplar (karboksil, hidroksil, fosforik asit, amino grupları vb.) içerir. Oldukça sık olarak bu gruplar hidrofobik aromatik zincirlere (polifenoller, aromatik amino asitler, vb.) bağlıdır. Bu nedenle, İDM yüzeyinin hidrofilik/hidrofobik dengesi, kirleticiler ve bunların İDM malzemesi ile etkileşimlerinin doğası hakkında önemli bilgiler verir. Örneğin, fenilalanin (aromatik amino asitler),

poliakrilamid veya sığır serum albümin ve hümkik bileşikler ile kirlenme, membran hidrofobikliğinde önemli bir artış göstermektedir [Dammak et al., 2021].

## **2.6.2. Elektrodializ Membranlarında Kirlenmeyi Önleyen İşlemler**

Elektrodializ membranlarında kirlenmeyi önlemek için proses edilecek sulara ön arıtım uygulanması kirlilik yükünü azaltan bir işlemdir.

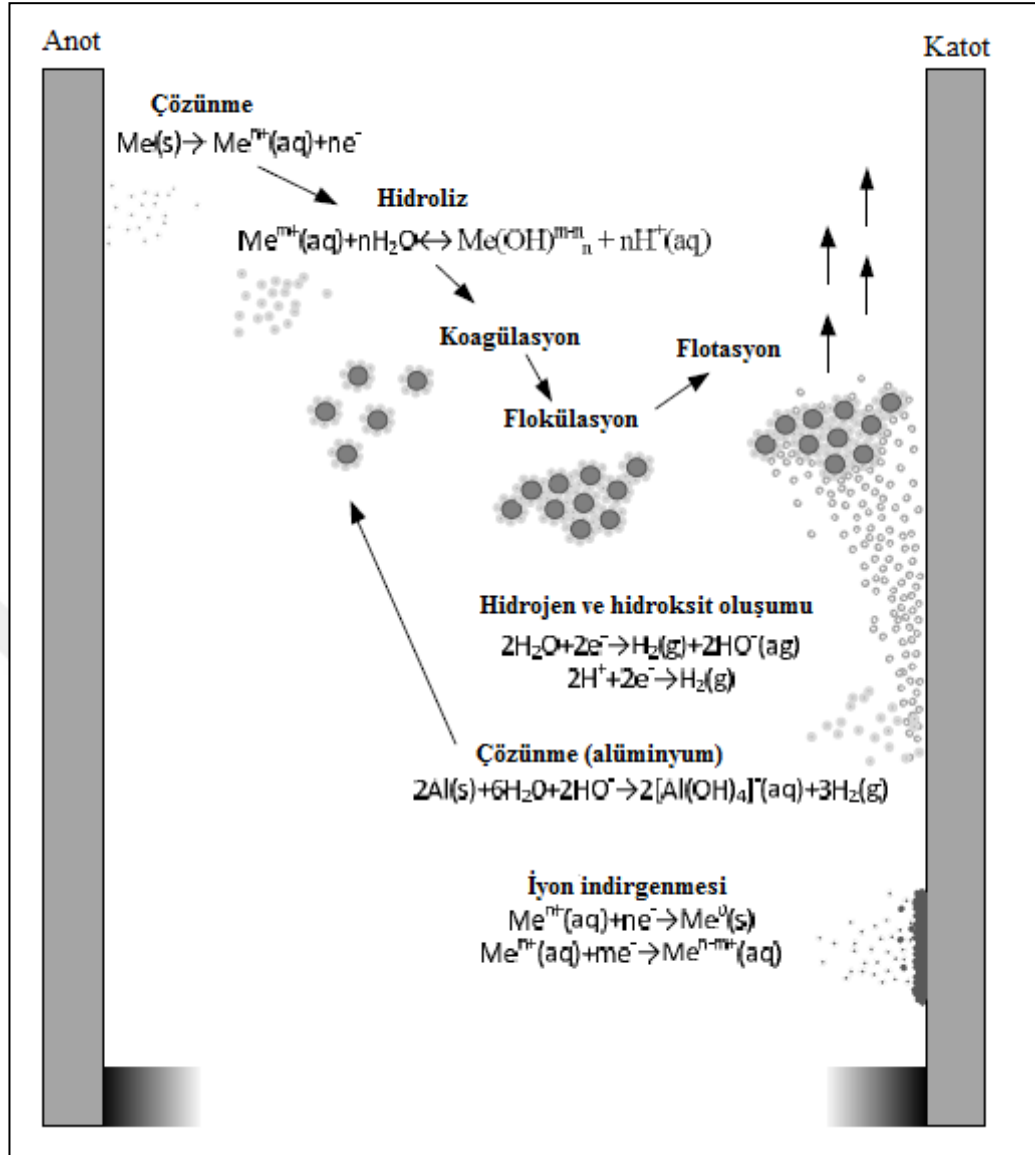
Proses edilecek suyun muhtevasına göre membran prosesler, ileri oksidasyon, koagülasyon gibi birçok proses ED öncesi ön arıtım olarak kullanılmaktadır.

### **2.6.2.1. Elektrokoagülasyon**

Elektrokoagülasyon (EC), elektroliz sonucu anotun çözünmesi ile atıksu içerisinde metal hidroksit floklarının oluşturulduğu bir prosestir. Bu prosesinin kirleticileri uzaklaştırmadaki temel prensibi koagülasyon, adsorpsiyon çöktürme ve flotasyon mekanizmalarının biri veya birkaçına dayanmaktadır. Alüminyum ve demir gibi metal anotların anodik çözünmeye uğraması ve hidrolizi ile çok az çözünen  $Al(OH)_3$ ,  $Fe(OH)_2$  ve  $Fe(OH)_3$  gibi metal hidroksitleri oluşmaktadır (Şekil 2.6).

Elektrotlardan çözünen metal iyonları ortam koşullarına göre metal-polimer kompleksleri oluşturmakta ve kirleticileri adsorplayarak koagüle olmaktadır.





Şekil 2.6: Elektrokoagülasyon prosesi.

EC prosesinde metal elektrotların bulunduğu elektrolitik bir reaktör vardır. Arıtılacak atıksu/konsantre reaktörden geçirilir ve elektrotlardan çözünen metaller ile koagülasyon-flokülasyonu gerçekleştirir. Sıvı mediada elektrotların elektrik akımı ile çözünmesi ile çözülmüş ya da kollodial kirleticiler koagülant üzerinde adsorblanarak giderilir [Koby et al., 2006]. Ayrıca metal anot eriyiği katotta hidrojen gazı kabarcıklarıyla birleşir, bu durum flokların yakalanmasına ve askıda katı maddelerin yüzmesine, böylelikle kirleticilerin giderilmesine sebep olur. EC’de proses performansı akım, pH, elektrotlar arası mesafe, karıştırma hızı parametrelerine bağlıdır. Literatürde toksik olmamaları, ucuz olmaları, kolay olarak erişilebilirlikleri

ve kanıtlanmış etkileri ile alüminyum, demir ve paslanmaz çeliğin EC prosesinde elektrot olarak kullanıldığı görülmektedir [Kuokkanen and Kuokkanen 2013].

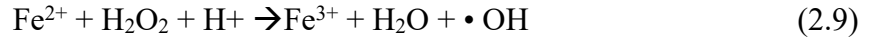
EC tekstil endüstrisi atıksularının arıtımı için etkili bir yöntemdir [Koby et al., 2006]. Elektrokoagülasyon prosesi ters osmoz membran konsantrelerinde bulunan iki değerlikli iyonların ve metallerin gideriminde sıklıkla kullanılmaktadır.

### 2.6.2.2. Elektrofenton

Elektrofenton; EC ve Fenton prosesinin birleştirildiği bir prosestir. Bu iki prosesin beraber kullanılmasının nedeni iki farklı metodun giderim kapasitelerinden ayrı ayrı yararlanmaktır [Kamcev 2021]. Fenton prosesi, klasik fenton reaksiyonuna göre (2.8) hidroksil radikalının oluşumu ile başlar [Alabi et al., 2018].



Bu reaksiyon asidik ortamda yer aldığı için, alternatif olarak aşağıdaki gibi (2.9) ifade edilebilir [Brillas et al., 2009].



Elektrofenton prosesinde, proses performansına etki eden parametreler elektroliz zamanı, proses suyunun başlangıç pH'sı, akım şiddeti, elektrotlar arası mesafe ve peroksit konsantrasyonudur.

EF'nin avantajı yüksek derecede organik madde giderimi, düşük işletme maliyeti ve kolay bakım imkanındır. Elektrofenton prosesi, konvansiyonel Fenton prosesine alternatif olarak membran konsantresi arıtımında kullanılır. Özellikle yüksek oranda inorganik tuzları içeren membran konsantresi için uygun bir arıtma yöntemidir [Sung et al., 2021].

EF prosesinin verimini etkileyen faktörlerden biri katot yüzey alanıdır. Wang'ın çalışmalarına göre, katot yüzey alanı arttıkça E-fenton prosesinin TOK giderim verimi artar [Wang, et al., 2012]. E-fenton prosesi için optimum başlangıç pH'ı 3'tür. Yüksek tuzluluk ve düşük organik madde içeriğinden dolayı RO konsantresi için biyolojik

arıtma uygun değildir. Bu yüzden fiziko-kimyasal prosesler RO konsantresi arıtımı için daha uygundur [Breytus et al., 2019].

Literatürde EF basınç sürücülü membran konsantresi arıtımında başarıyla kullanıldığı görülmüştür. Zhou ve arkadaşları EF'yi çelik üretim tesisi ters osmoz membran konsantresinde organikleri degrade etmekte kullanmış ve %62'den fazla KOİ giderimi elde edilmiştir [Zhou et al., 2012]. Van der Bruggen ve arkadaşları çalışmalarında hidrojen peroksitin  $Fe^{2+}$  ile kombinasyonunun tekstil atıksuyu arıtımında kullanılan TO ve NF membran konsantrelerinde kanıtlanmış etkisini göstermiştir [Van der Bruggen et al., 2003].



### 3. MATERİYAL ve METOT

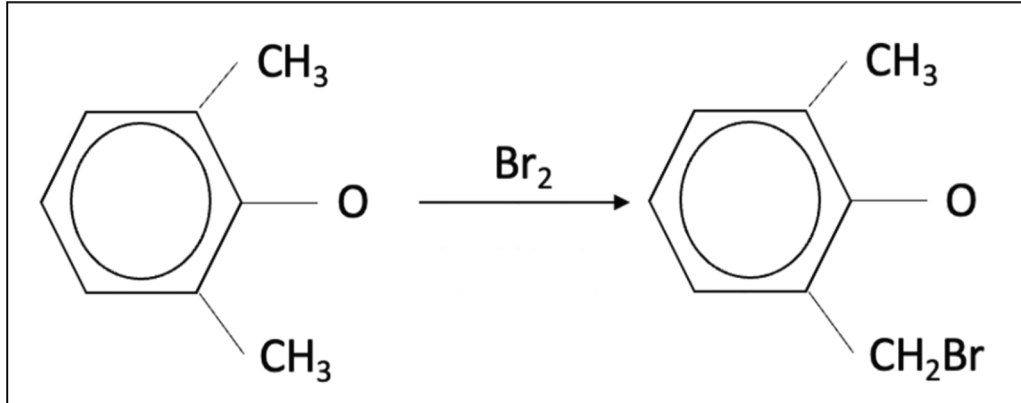
#### 3.1. Elektrodializ Membranı Üretiminde Kullanılan Materyaller ve Yöntemler

Tez çalışması kapsamında iki farklı yöntem ile membran üretimi yapılmıştır. Bu yöntemlerden birincisi çözelti içerisinde karıştırma yöntemi, diğeri ise eriyik çekme yöntemidir.

##### 3.1.1 Çözelti İçerisinde Karıştırma Yöntemi ile Membran Üretimi

###### 3.1.1.1 PPO'nun Bromlanması

Çözelti içerisinde karıştırma yöntemi ile çalışılırken membran ana polimeri olarak poli(2,6-dimetil-1,4-fenilen oksit) (PPO) kullanılmıştır. Ana polimer zincirine iyon değişimi için gerekli fonksiyonel grupların eklenebilmesi amacıyla PPO bromlama reaksiyonuna tabi tutulmuştur (Şekil 3.1).



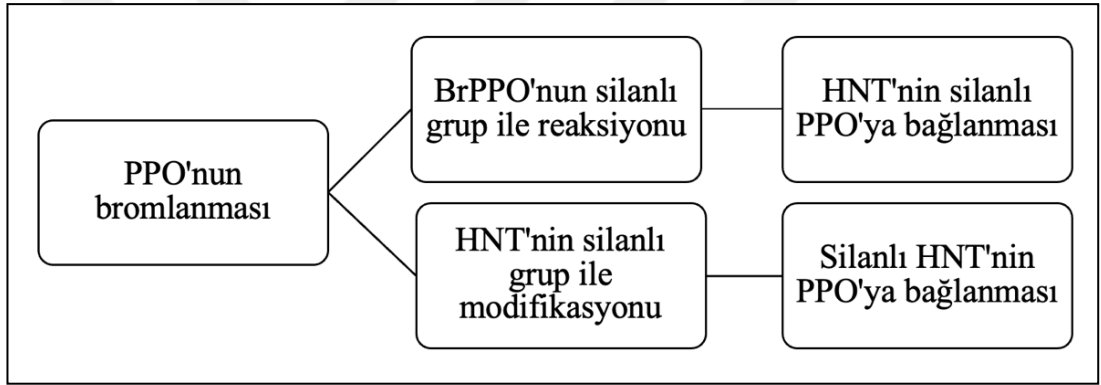
Şekil 3.1: PPO bromlama reaksiyonu.

PPO'nun bromlanması serbest radikal bromlaması ile gerçekleştirilmiştir. Prosedür 60 mL klorobenzen içerisinde çözünmüş 6 g (50 mmol) PPO çözeltisine 3,6g (20mmol) N-bromosuksinimid ve 0.3g 2,2- azobis(2-metilpropionitrile) eklenerek gerçekleştirilmiştir.

Reaksiyon 140 °C'de 8 saat sürdürülmüş ve daha sonra bromlanan PPO etanol içerisinde çöktürülmüştür. Bromlanmış PPO (BrPPO) çöktürüldükten sonra tekrar kloroform içerisinde çözülüp, tekrar çöktürme işlemi yapılarak saf olarak elde edilmesi sağlanmıştır. Daha sonra 48 saat boyunca 60 °C'de etüvde kurutularak açık kahverengi bromlanmış BPPO ipliksi yapıları elde edilmiştir.

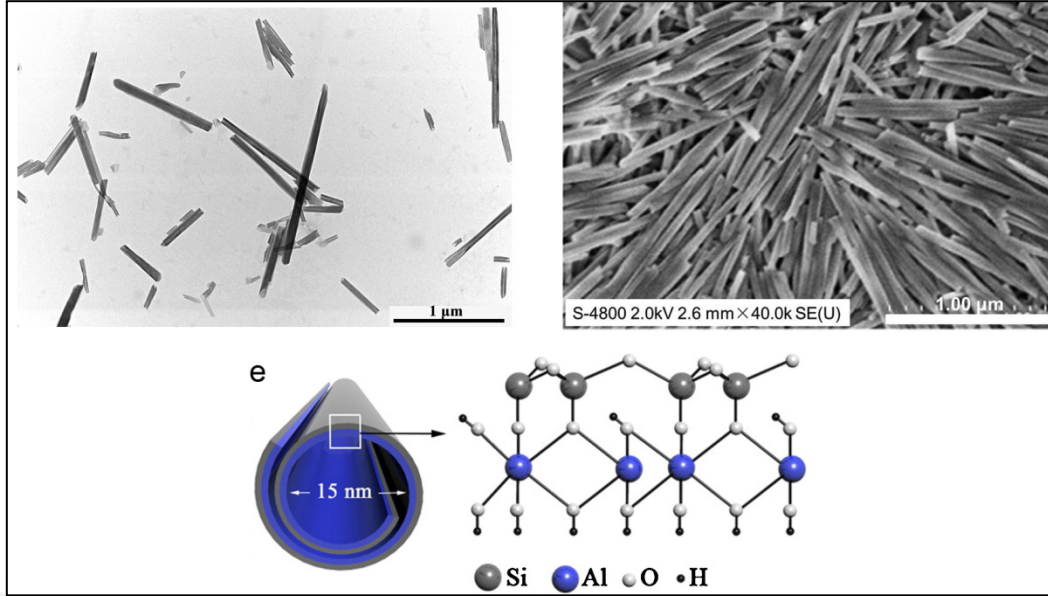
### 3.1.1.2. Br-PPO'ya Fonksiyonel Grup Eklenmesi

PPO'nun bromlanmasının ardından fonksiyonelleştirme reaksiyonları gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.2). Fonksiyonelleştirme ile amaçlanan polimere iyon değişim özelliğini arttıracak Halloysit nanotüp (HNT) nanopartikülünün eklenmesidir.



Şekil 3.2: HNT katkılı membran üretiminde izlenen yol.

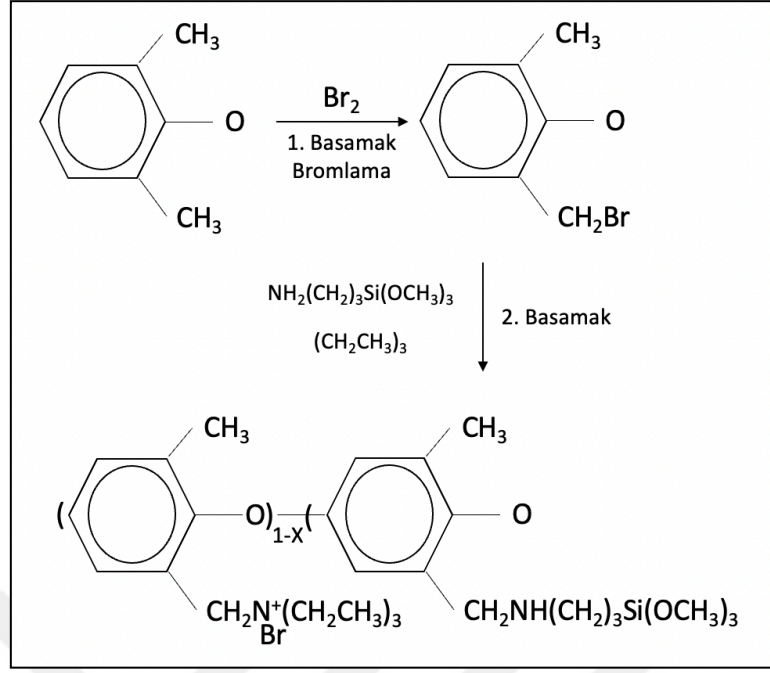
Elektron mikroskobu görüntüleri HNT'nin; kaolinitin  $4H_2O$  formunun üst üste gelerek kıvrılan levhalar şeklinde oluşturduğu tüpler olduğunu göstermektedir. Halloysit dehidrasyona uğradığında  $2H_2O$  formuna dönüşür, tüpler çöker, dağılır ya da kıvrılmış halleri bozulur. HNT'nin iyon değişim kapasitesi kaolinitten daha büyüktür ve daha geniş bir aralığa sahiptir. Oktahedronlarda, merkezinde alüminyum atomu, köşelerinde ise altı adet oksijen atomu/hidroksil bulunur (Şekil 3.3).



Şekil 3.3: Halloysit nanotüp partükülü ve yapısı.

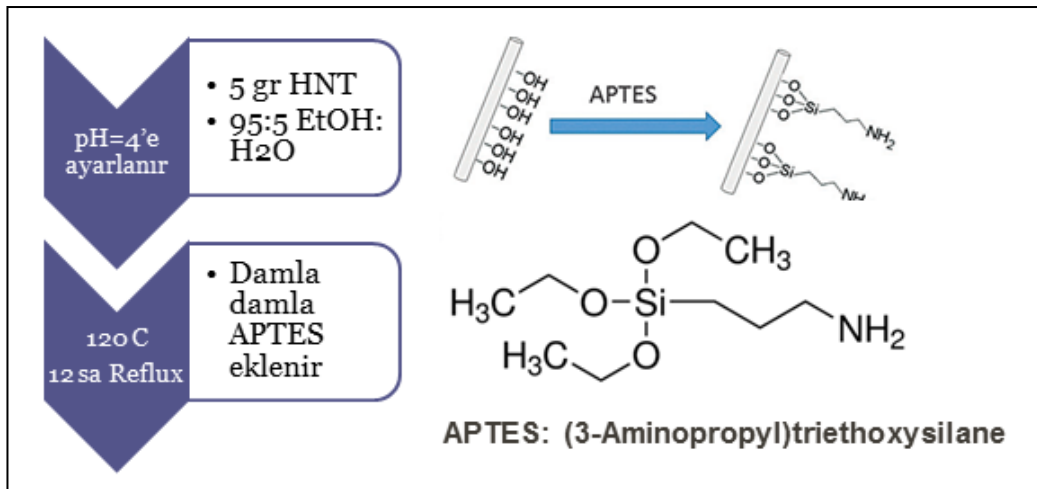
İyon değişim terimi ile anlatılan mineral yüzeyinin yakınında bulunan negatif yüklerce tutulan iyonların çözelti içerisinde bulunan ve mineralle temas halinde olan diğer iyonlarla değişimidir. Kristal minerallerin kenarlarında bulunan kırık bağlar ayrıca iyon değişimine izin verirler.

Fonksiyonelleştirme çalışmalarında ilk olarak Br-PPO APTES ile direkt reaksiyona sokulmuştur. Reaksiyon BrPPO, 3-aminopropiltrioksilan ve trietilenamin arasında azot atmosferi altında 24 saat boyunca sürdürülerek gerçekleştirilmiştir. Daha sonra HNT nanopartikülüne silanli grup bağlanmıştır (Şekil 3.4). İkincisinde ise HNT'nin modifikasyonu gerçekleştirilmiş sonrasında BrPPO'ya modifiye HNT bağlanmıştır.



Şekil 3.4: BrPPO'ya silanli grup bağlanma reaksiyonu.

HNT iç ve dış kısmının farklı kimyasal özellikler taşıması nedeniyle hem iç yüzey hem de dış yüzeylerinden modifiye edilebilmektedir. Tez çalışması kapsamında halloysitin dış yüzeyi modifiye edilmiştir. HNT'nin modifiye edilmesindeki amaç bu nanopartikülün membranın ana polimeri olan PPO'ya bağlanmasını sağlamaktır. HNT partikülünün dış yüzeyi (3-aminopropil)triethoksisilan (APTES) ile Şekil 3.5'de gösterilen şekilde modifiye edilmiştir.



Şekil 3.5: HNT modifikasyonu.

HNT partikülünün bağlanması için aglomere olmuş yapının dağıtılması gerekmektedir. HNT aglomerlerinin dağıtılmasına iki farklı aşamada ihtiyaç duyulmuştur. Bunlardan ilki HNT'nin modifikasyon öncesi homojen bir şekilde dağıtılması, ikincisi ise modifiye HNT'nin polimer içerisinde dağıtılmasıdır. Bu amaçla HNT çözücü içerisinde şu şekilde dağıtılmıştır; 60°C'ye ısıtılan çözücü 1000 rpm'de karıştırılırken HNT eklenmiş ve yarım saat karıştırılmaya devam edilmiştir. Daha sonra çözelti sonikasyon banyosuna konmuştur ve burada yarım saat tutulmuştur. Tekrar karıştırıcı üzerine alınarak karıştırılmaya başlanmıştır ve bu sırada silanlı BrPPO eklenerek 48 saat karışmaya bırakılmıştır.

Çözelti içerisinde karıştırma yöntemi ile membran üretimi sırasında kullanılan materyaller Tablo 3.1'de sunulmaktadır.

Tablo 3.1: Çözelti içerisinde karıştırma yöntemi ile membran üretiminde kullanılan materyaller.

| Materyal                            | Marka        | Kullanım amacı                                 |
|-------------------------------------|--------------|------------------------------------------------|
| poli(2,6-dimetil-1,4-fenilen oksit) | Sigma        | Membran ana polimeri                           |
| N-bromosüksinimid                   | Acros        | Bromlama reaksiyonu                            |
| 2,2- azobis(2-metilpropionitril)    | Sigma        | Bromlama reaksiyonu                            |
| Klorobenzen                         | Fisher       | Bromlama reaksiyonu                            |
| Kloroform                           | Fisher       | Bromlama reaksiyonu                            |
| Etanol                              | Merck        | Bromlama reaksiyonu                            |
| APTES                               | Merck        | PPO'nun ve halloysitin fonksiyonelleştirilmesi |
| Halloysit                           | Esan         | Membranın iyon değişim özelliğinin artırılması |
| Asetik asit                         | Merck        | PPO'nun ve halloysitin fonksiyonelleştirilmesi |
| Dimetilformamid (DMF)               | SigmaAldrich | Membran dökme çözeltisi                        |
| N-metil-2-pirrolidon (NMP)          | SigmaAldrich | Membran dökme çözeltisi                        |

Membran üretimi için gerçekleştirilen sentezler sonrası membran dökme çözeltileri hazırlanmıştır. 48 saatlik karıştırma sonucunda elde edilen çözeltiler iki



farklı yöntem ile dökülmüştür. İlk döküm işlemi polimerin borasilikat cam kaba dökülerek 60°C'lik etüvde 8 saat bekletmesi şeklinde gerçekleştirilmiştir. İkinci yöntemde ise çözelti cam plaka üzerine Dr. Blade yöntemi çekilerek koagülasyon banyosuna daldırılmıştır. Koagülasyon banyosu olarak saf su ve 60:40 saf su-etanol olmak üzere iki farklı koagülasyon banyosu içeriği kullanılmıştır.

### 3.1.2. Eriyik Çekme Yöntemi ile Membran Üretimi

Eriyik çekme yöntemi ile gerçekleştirilen üretim çalışmalarında üç farklı iyon değiştirici reçine (Tablo 3.2) ve reçineleri tutan kafes yapıyı oluşturacak dört farklı bağlayıcı polimer (Tablo 3.3) kullanılmıştır.

Tablo 3.2: Kullanılan reçineler ve özellikleri.

| Reçine   | Fonksiyonel Grup                       | Matriks                          | İyonik Form     | Toplam kapasite (eq/ℓ) |
|----------|----------------------------------------|----------------------------------|-----------------|------------------------|
| Reçine 1 | Tip 1<br>trimetilamonyum               | Stiren<br>Divinilbenzen jel      | Cl <sup>-</sup> | 1,30↑                  |
| Reçine 2 | Tip 2<br>trimetilamonyum               | Stiren<br>Divinilbenzen jel      | Cl <sup>-</sup> | 1,30↑                  |
| Reçine 3 | Kuaterner<br>amonyum/<br>tersiyer amin | Çapraz bağlı<br>akrilik jel yapı | Cl <sup>-</sup> | ≥1,15 eq/L             |

Tablo 3.3: Kullanılan kafes polimerlerin özellikleri.

| Kafes Polimeri | Türü | Form     | MFI (190 °C/2,16 kg) |
|----------------|------|----------|----------------------|
| PE 1           | YYPE | Granüler | 5,5                  |
| PE 2           | YYPE | Toz      | 30                   |
| PE 3           | DYPE | Granüler | 2-3,5                |

Üretim çalışmalarında kullanılan reçine ve kafes polimer ile Tablo 3.4’de gösterilen oranlarla çalışılmıştır.

Tablo 3.4: Eriyik çekme yöntemi ile IDM üretiminde kullanılan yüzdeler.

| Kafes polimeri | İyon değişim Reçinesi | Ağırlıkça Yüzde (%w/w) |        |
|----------------|-----------------------|------------------------|--------|
|                |                       | PE                     | Reçine |
| PE             | Reçine 1              | 70                     | 30     |
|                |                       | 60                     | 40     |
|                |                       | 50                     | 50     |
|                | Reçine 2              | 70                     | 30     |
|                |                       | 60                     | 40     |
|                |                       | 50                     | 50     |
|                | Reçine 3              | 70                     | 30     |
|                |                       | 60                     | 40     |
|                |                       | 50                     | 50     |

İyon değişim reçineleri yüksek oranda nem ihtiva eden maddelerdir. Tez çalışması kapsamında reçinelerin membran üretiminde kullanılabilmesi için etüvde kurutulmuştur

İyon değişim reçineleri yüksek sıcaklıkta bozunabilen materyallerdir. Bu nedenle reçinelerden nem uzaklaştırma işlemi hassasiyetle ele alınması gereken bir konudur. Yapılan çalışmada iyon değiştirici reçinelerin kurutma işlemi için reçinelere 75, 90 ve 105 °C sıcaklıklar uygulanmıştır. 75 °C sıcaklıkta reçine örneklerinin kuruması 48 saatten fazla zaman alırken, 105 °C uygulanan reçine örneklerinin bazı kısımlarında kararmalar gözlemlenmiştir. Bu nedenle reçinelerin kurutulması için en uygun sıcaklık 90 °C olarak belirlenmiştir ve kurutma işlemi bu sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir.

Eriyik çekme yöntemi ile IDM üretilirken iyon değişim reçinelerinin tanecik boyutu üretilen membranların mekanik dayanımı ve iyon taşınımında önemli rol oynamaktadırlar. Ayrıca iyon değiştirici reçinelerin kafes polimer içerisine etkin bir şekilde hapsolmesi için reçineler kullanılmadan önce uygun tanecik boyutuna getirilmiştir.

Eriyik çekme yöntemi ile İDM üretimi ekstrüder cihazı ile kullanılmıştır. Ekstrüderler çift helezonlu ve tek helezonlu olarak ikiye ayrılmaktadır. Çift helezonlu ekstrüderler ise aynı yönlü dönüşlü ve zıt yönlü dönüşlü olarak ikiye ayrılmaktadır.

Çift helezonlu ekstrüderler ara mamul oluşturma ve karıştırma gibi işlemlerde oldukça etkin kullanılabilirken, son ürün eldesi için gerekli olan yüksek basıncı sağlayamazlar. Tek helezonlu ekstrüderler ise karıştırma işleminde çok etkin olmayıp, yüksek basınca çıkabilme ve son ürün eldesi konusunda oldukça başarılıdır [Shah ve arkadaşları, 2004], [Kalyon et al., 2004]. Bu özelliklerinden dolayı tez çalışması kapsamında farklı özelliklere sahip üç farklı ekstrüder ile çalışılmıştır. Kullanılan ekstrüderler ve cihazlara ait özellikler Tablo 3.5’de verilmiştir.

Tablo 3.5: Kullanılan ekstrüderler ve özellikleri.

| Ekstrüder | Besleme tipi   | Zon sayısı | Vida sayısı | Vida çapı (mm) |
|-----------|----------------|------------|-------------|----------------|
| EKST-1    | Tek beslemeli  | 3          | Tek         | 18             |
| EKST-2    | Tek beslemeli  | 3          | Çift        | 15             |
| EKST-3    | Çift beslemeli | 10         | Çift        | 15             |

Çalışmalara EKST-1 tek beslemeli tek vidalı ekstrüderi ile başlanmıştır. Uygulanan proses şartları Tablo 3.6’da sunulmaktadır.

Tablo 3.6: EKST-1 proses şartları.

|        | Vida Hızı (rpm) | Tork (%) | Sıcaklık (°C) |
|--------|-----------------|----------|---------------|
| EKST-1 | 20              | 27       | 130-155       |

EKST-2 çift vidalı tek beslemeli bir ekstrüderdir. Ekstrüder ile üretim sırasında uygulanan proses şartları Tablo 3.7’de sunulmaktadır.

Tablo 3.7: EKST-2 proses şartları.

|        | Vida Hızı (rpm) | Tork (%) | Sıcaklık (°C) |
|--------|-----------------|----------|---------------|
| EKST-2 | 9.9             | 35       | 152-163       |

EKST-3 10 farklı ısıtma bölgesi olan ve ikinci besleme kısmının yeri ekstrüder konfigürasyonu içerisinde değiştirilebilen bir cihazdır. Tablo 3.8’de EKST-3 ile çalışılırken kullanılan proses şartları gösterilmektedir.

Tablo 3.8: EKST-3 proses şartları.

|        | Vida Hızı (rpm) | Tork (%) | Sıcaklık (°C) |
|--------|-----------------|----------|---------------|
| EKST-3 | 80              | 9,4      | 50-150        |

Ara mamulden heterojen membran üretimi sırasında numunenin karıştırılma hızının morfolojiye etkisini saptamak için EKST-1 ile yüksek devir ve düşük devir olmak üzere iki farklı modda üretim gerçekleştirilmiştir. Üretim şartları Tablo 3.9’da sunulmaktadır.

Tablo 3.9: EKST-1 yüksek ve düşük devir proses şartları.

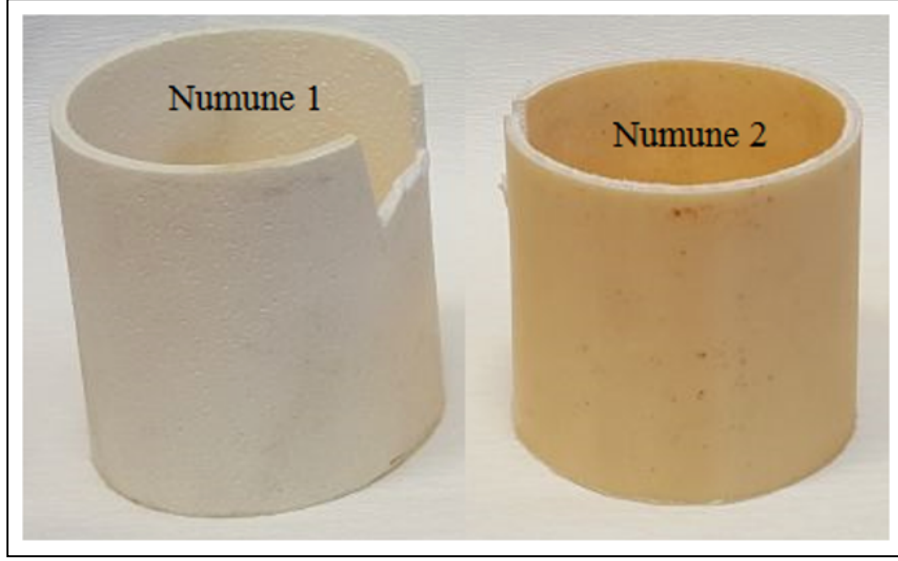
| EKST-4       | Vida Hızı (rpm) | Tork (%) | Sıcaklık (°C) |
|--------------|-----------------|----------|---------------|
| Düşük devir  | 9               | 13       | 138-145       |
| Yüksek devir | 14,6            | 8,8      | 148-165       |

Membran yapısına etki eden bir diğer parametre de üretilen membranlara çekme sonrası uygulanan işlemlerdir (post treatment). Bu işlemler membran morfolojisi üzerinde direkt olarak etkilidir. Üretilen membranlara bu amaçla havada ve suda olmak üzere iki farklı son işlem (soğutma) uygulanmıştır.

### 3.2. Ticari İyon Değişim Membranları ve Boşluk Oluşturucular

Tez çalışması kapsamında İDM’lerin kirlenme eğilimlerini ve performanslarını araştırmak için PCCell ve Fujifilm’e ait membranlar kullanılmıştır. Kullanılan ED hücresinde her bir membran için aktif membran alanı 8x8 cm<sup>2</sup>’dir.

Eriyik çekme yöntemi ile üretilen membranların kıyaslanması amacıyla aynı yöntem ile üretilmiş iki farklı ticari membran kullanılmıştır (Şekil 3.6). Tez çalışmasında kullanılan ticari membranlar ve membranlara ait özellikler Tablo 3.10’da gösterilmektedir.



Şekil 3.6: Kullanılan ticari iyon değişim membranları.

PCCell ve Fujifilm'e ait membranlar ile çalışılırken PCCell markasına ait polipropilen boşluk oluşturucular kullanılmıştır. Sonlandırıcı ve akış yönünü manipüle eden ara boşluk oluşturucular için 0,45 mm kalınlıkta iki farklı tip boşluk oluşturucu kullanılmıştır.

Tablo 3.10: Kullanılan ticari iyon değişim membranlarının özellikleri.

| Membran         | Tip            | Kalınlık (μm)         | Taşınım sayısı | Direnç (Ohm.cm <sup>2</sup> ) | Su geçirgenliği | pH dayanımı |
|-----------------|----------------|-----------------------|----------------|-------------------------------|-----------------|-------------|
| PC SA           | Anyon değişim  | 100-110               | >0,95          | 1.8                           | -               | 0-9         |
| PC SK           | Katyon Değişim | 100-120               | >0,95          | 2.5                           | -               | 0-11        |
| Fuji film Tip 1 | Anyon değişim  | 120                   | -              | 1,77                          | 3               | 1-13        |
| Fuji film Tip 1 | Katyon Değişim | 120                   | -              | 1,89                          | 3,5             | 1-13        |
| Fuji film Tip 2 | Anyon değişim  | 160                   | -              | 5                             | 6,5             | 2-10        |
| Fuji film Tip 2 | Katyon Değişim | 130                   | -              | 8                             | 6,5             | 4-12        |
| Numune 1        | Anyon değişim  | 2,8 (mm)              | >0,95          | 100-150                       | -               | 1-12        |
| Numune 2        | Anyon değişim  | max. 0,75 ± 0,05 (mm) | >0,95          | 150 ± 50                      | -               | 0-12        |

### 3.3. Membranların İşletiminde Kullanılan Sistemler ve Proses Şartları

Tez çalışmasında eriyik çekme yöntemi ile üretilen heterojen membranların ve ticari heterojen membranların performanslarının belirlenmesi için membranlar, içerisine elektrot girebilecek şekilde bir boruya adapte edilerek anot elektrot hücreleri oluşturulmuştur (Şekil 3.7)



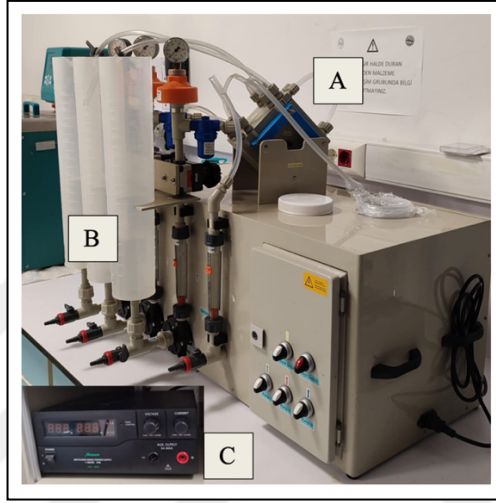
Şekil 3.7: Heterojen membranlar ile oluşturulan anot hücreleri.

Oluşturulan hücreler ile yapılan performans testlerinde, membranların çalışma etkinlikleri, hücre içerisine doldurulan ve anottan gelen akımın ortama iletimini sağlayan elektrolit çözeltisinin iletkenlik ve pH değerlerindeki değişim takip edilerek belirlenmiştir. Bu amaçla oluşturulan hücreler deneme banyosunda 6'şar dakikalık 5 işletim ile işletilmiştir.

Heterojen membranların performanslarının belirlenmesinde kullanılan bir diğer sistem ise, membran potansiyeli ve taşınım sayısı ölçümlerinde kullanılan düzendir (Şekil 3.13). Bu düzener iki farklı hazne arasına bir plakaya sabitlenmiş membran konularak, hazneler ve membran plakasının vidalar ile sabitlenmesi ile oluşturulmuştur. Katotun bulunduğu haznede tekstil atıksuyunun EC ya da EF ile ön arıtım yapılmış nanofiltrasyon (NF) ve ters osmoz (TO) konsantreleri ile, anotun bulunduğu haznede ise tuzlu su çözeltisi ile çalışılmıştır. Sisteme bağlanan doğru akım güç kaynağı ile elektrotlara elektrik akımı verilmiştir. Böylelikle prosesin itici kuvveti olan elektrik alan oluşturulmuştur ve haznelere yerleştirilen iletkenlik ölçer probalar ile

haznelerdeki iletkenlik değişimi 180 dk boyunca zamana karşı kaydedilmiştir. Heterojen iyon değişim membranlarının performanslarını belirlemek için gerçekleştirilen çalışmalarda ticari membran numunesi T1 ile, PE3 R1 ile üretilen 50:50 ve 60:40 konsantrasyonlu membranlar kullanılmıştır.

PCCell ve Fujifilm markalarına ait ticari düz tabaka membranların performanslarının ölçülmesi ve kirlenme deneylerinin yapılması için PCCell’e ait şekil 3.8’de gösterilen sistem kullanılmıştır.



şekil 3.8: PC CELL elektrodiyaliz deney düzeneği a) membran modülü, b) pompa sistemi ve güç kaynağı.

PCCell ED sistemi kompakt bir sistem olup düzeneğe sabitlenmiş üç adet besleme tankı, bu tankların çıkışında bulunan debi ölçerler ve pompalar bulunmaktadır. PCCell’e ait ED sisteminde kullanılan membran hresi Pt/IR kaplı titanyum anot ve V4A elik katoda sahiptir.

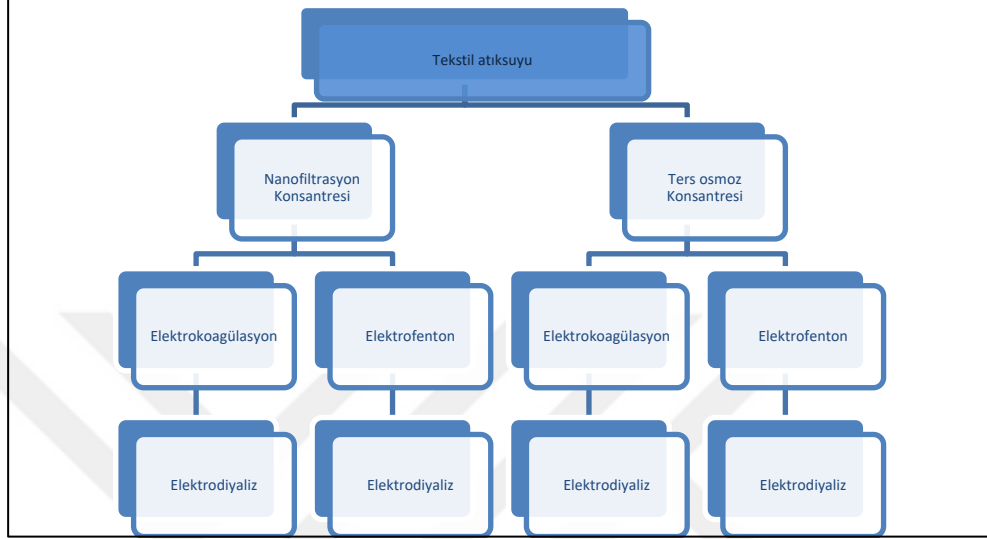
PCCell ve Fujifilm’e ait iyon değişim membranlarının performanslarının belirlenmesi için de heterojen membranların performanslarının belirlenmesinde kullanılan EC ve EF n arıtmılı tekstil atıksuyu NF ve TO membran konsantreleri ile çalışılmıştır.

### 3.4. Elektrodiyaliz Membranlarında Kirlenme ve Uygulanan n İşlemler

Elektrodiyaliz membranlarında kirlenmenin araştırılması tekstil atıksularının membran konsantreleri ile gerçekleştirilmiştir. ED prosesi öncesi tekstil atık suyu

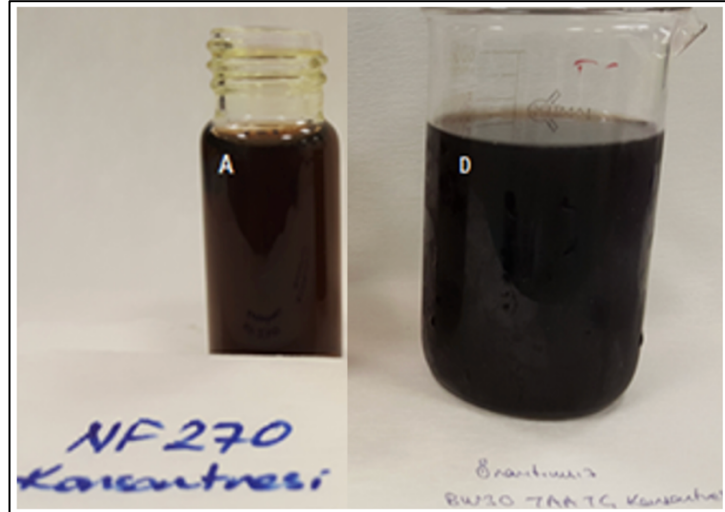


membran konsantrelerine ön arıtım uygulanmıştır. Tez çalışmasında ön arıtım olarak elektrokoagülasyon ve elektrodializ prosesleri kullanılmıştır. Tekstil atıksuyundan konsantrelerin oluşumuna ve elektrodializine kadar gerçekleştirilen çalışmalar Şekil 3.9’da özetlenmiştir.



Şekil 3.9: Membran konsantrelerinin oluşturulması ve ön arıtımı.

Kullanılan membran konsantrelerine ait karakterizasyon değerleri Tablo 3.11’de sunulmuştur. Konsantrelere ait görsel ise Şekil 3.10’da sunulmaktadır.



Şekil 3.10: NF ve TO membran konsantreleri.

Tablo 3.11: NF ve TO konsantrelerine ait değerler.

| Konsantre      | İletkenlik( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) | Pt-Co (mg/L) | KOI (mg/L) |
|----------------|---------------------------------------|--------------|------------|
| NF Konsantresi | 6370                                  | 864          | 867        |
| TO Konsantresi | 20590                                 | 410          | 880        |

ED membranlarındaki organik kirlenme temiz membranlar ile konsantre deiyonizasyonunda kullanılan membranlara ait FTIR spektrumlarının karşılaştırılması sureti ile belirlenmiştir. Böylelikle yüzey gruplarına bağlanan herhangi bir organik yapının var olup olmadığı aydınlatılmıştır. Organik kirlenmenin belirlenmesinde ayrıca membranların temas açılarındaki değişiklikler de incelenmiştir.

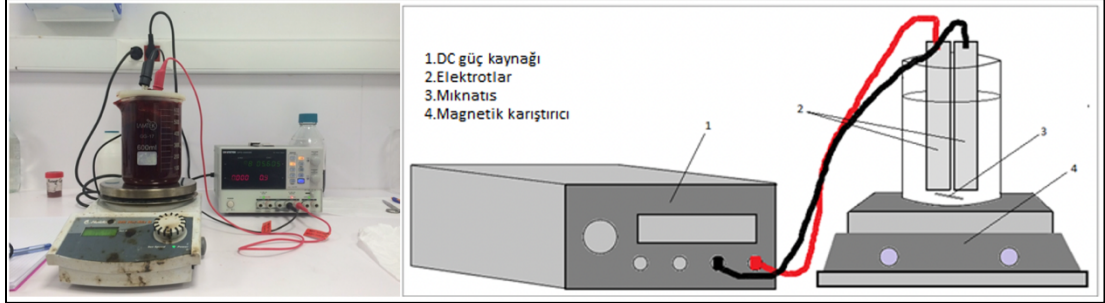
İnorganik kirlenmenin belirlenmesi için konsantrelerin deiyonizasyonunda kullanılan membran örneklerine SEM EDX analizleri yapılmıştır.

Gerçekleştirilen AFM analizleri ile membranların yüzeylerinde biyolojik olarak bir kirlenmenin olup olmadığı ayrıca kirlenmenin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri saptanmıştır.

### 3.4.1. Elektrokoagülasyon

Elektrokoagülasyon deneyleri Şekil 3.11’de sunulan deneysel düzenek ile gerçekleştirilmiştir. Deneylerde iki adet alüminyum elektrot kullanılmıştır. Elektrotlar aralarındaki mesafenin sabit tutulmasını sağlayan özel bir başlıkla EC’nin gerçekleştirileceği cam beher reaktöre yerleştirilmiştir. Deney süresince elektrotlara, kullanılan güç kaynağından elektrik akımı verilerek koagülasyon prosesini gerçekleştiren alüminyum iyonlarının anottan ortama salınması sağlanmıştır. Elektrokoagülasyon deneylerine optimizasyon çalışmaları ile başlanmıştır. Optimizasyon çalışmalarında sentetik tekstil atıksuyu membran konsantresi kullanılmıştır. Burada optimum zaman belirlendikten sonra pH ve elektrotlar arası mesafe aynı değerlerde tutularak akım şiddeti için optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Akım şiddeti için de optimum değerler bulunduktan sonra sırasıyla pH ve elektrotlar arası mesafe optimizasyonları gerçekleştirilmiştir. Deneyler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Optimum değerler kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) ve renk analizleri ile belirlenmiştir. Elektroliz zamanı olarak 15, 30, 45, 60, 75 ve 90 dak.,

akım şiddeti olarak 23.14, 34.71, 46.28, 57.85, 40 ve 69.42 mA/cm<sup>2</sup>, pH olarak 3.5, 5.1, 8.0 ve 9.5, elektrotlar arası mesafe olarak ise 5, 10, 20 ve 30 mm değerleri çalışılmıştır.



Şekil 3.11. Ön arıtımda kullanılan deney düzeneği.

### 3.4.2. Elektrofenton

Elektrofenton (EF) deneyleri EC prosesinde kullanılan düzenek ile gerçekleştirilmiştir. EC'den farklı olarak elektrofenton deneylerinde demir elektrot materyali olarak kullanılmıştır. EF prosesinde ortama hidroksit radikallerini oluşturmak için H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dozlaması yapılmaktadır. Bu nedenle EC için optimize edilen parametrelere ortama dozlanan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> miktarının optimizasyonu da eklenmiştir. 0, 1.5, 2.25, 3.0, 4.5, 6.0, 7.5 mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> kullanılarak optimum peroksit miktarı belirlenmeye çalışılmıştır.

## 3.5. Membran Karakterizasyonu

### 3.5.1. Genleşme İndeksi

Genleşme indeksinin (SI) bulunması için membranlar oda sıcaklığında deiyonize su içinde 4 saat boyunca bekletilmiştir. Membran üzerinde kalan su damlaları, filtre kâğıdı ile alındıktan sonra tartılmıştır (m<sub>1</sub>). Membranlar etüvde 6 saat boyunca 80 °C'de kurutularak tekrar tartılmıştır (m<sub>2</sub>). İki tartım arasındaki kütle farkından % cinsinden su adsorbsiyonu yani SI değeri bulunmuştur (3.1).

$$\text{Genleşme İndeksi, \%} = [(m_1 - m_2) / m_1] \times 100 \quad (3.1)$$

### 3.5.2. Kimyasal Dayanım Testleri

Membranların düşük pH değerlerindeki dayanımlarını belirlemek amacı ile 1M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisi içerisinde 24, 48 ve 168 saat bekletilerek membranların renk, doku, parlaklık, bozunma, parçalanma, boşluk oluşması, baloncuk oluşumu, kıvrılma ve yapışma gibi özellikleri incelenmiştir. Mevcut çalışmada kimyasal dayanım testleri aynı zamanda SEM görüntüleri alınarak desteklenmiştir.

### 3.5.3. Mekanik Dayanım Testleri

Membranlara ASTM D-638 standartına göre çekme dayanımı ve kopma uzama testleri uygulanmıştır. Bu yöntem ile destekli ya da desteksiz plastiklerin çekme özellikleri standart numune formunda belirlenmektedir. Böylelikle tanımlanmış bir noktadan alınan test numunesinin temel mekanik özellikleri aydınlatılmaktadır.

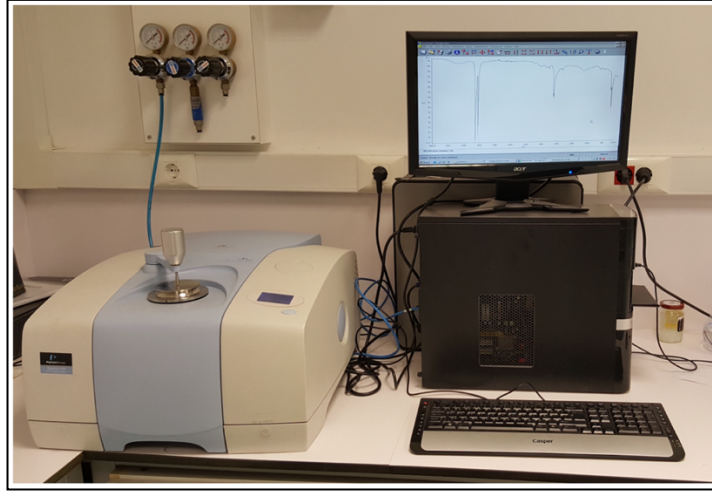
Membranlar testin ASTM D 638 standartına göre uygulanabilmesi için Şekil 3.12'de görüldüğü gibi özel ölçülere sahip kalıp ile standart numune formunda kesilerek hazırlanmıştır.



Şekil 3.12: Mekanik dayanım testi için hazırlanmış örnekler (ASTM D 638 standardı).

### 3.5.4. Fourier Dönüşüm Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR)

Üretilen membranların yüzeylerindeki fonksiyonel grupların ve bağların belirlenmesi için Perkin Elmer Spectrum100 ATR-FTIR spektrometresi kullanılmış ve 4000-400  $\text{cm}^{-1}$  dalgaboyu aralığında spektrumlar alınmıştır. ATR-FTIR spektroskopi cihazı Şekil 3.13’de gösterilmektedir.



Şekil 3.13: Perkin Elmer Spectrum100 ATR-FTIR spektrometresi.

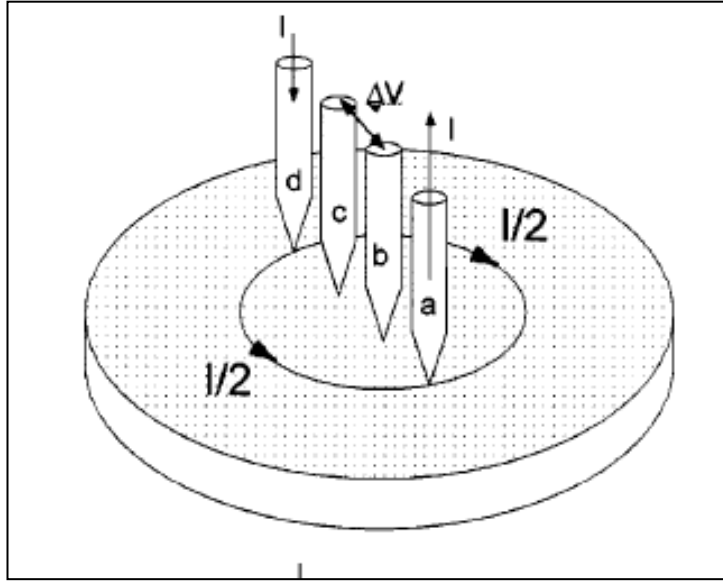
### 3.5.5. İyon Değişim Kapasitesi (IEC)

Membranların iyon değişim kapasitelerini (IEC) bulmak için membran örnekleri öncelikle 48 saat boyunca 1 M KOH çözeltisi içerisinde tutulurlar. Ardından saf su içerisinde 24 saat bekletilerek -OH formuna gelmeleri sağlanır. 24 saat sonunda membranlar birçok kez distile su ile yıkanır ve membranların üzerinde bulunan iz KOH uzaklaştırılır. Membran örnekleri daha sonra 24 saat boyunca  $10^{-2}$  M HCl çözeltisi içerisinde bekletilir. Anyon değişim kapasitesi; nötralizasyon sonrası elde edilen geri titrasyon ile belirlenir.

### 3.5.6. Membran Direnci

Membran direnci ölçümleri dört prop tekniği ile gerçekleştirilmiştir: Bu yöntemde iğne şeklindeki dört elektrot, ölçüm yapılacak numune üzerine belirli aralıklarla yerleştirilmiştir (Şekil 3.14). Numuneye akım, dıştaki iki elektrot

vasıtasıyla verilmiştir. İçteki iki elektrot ise elektrik potansiyel dağılımını ölçmektedir. Akım iletimi ve elektrik potansiyelinin belirlenmesi için farklı elektrotlar kullanılması metal elektrotlarla ölçümü yapılacak madde arasındaki temas direncini etkileyerek ölçüm değerlerinin artmasına neden olmamaktadır. Ayrıca dört prob yöntemi ile elde edilen veriler iki prob yöntemine göre daha kolay yorumlanmaktadır [Schuetze et al., 2004].



Şekil 3.14: Dört prob ölçüm yöntemi.

### 3.5.7. Membran Potansiyeli (Em ve Taşınım Sayısı)

Membran potansiyeli ve taşınım sayısı ölçümleri 0,2 M KCl çözeltisinin ölçüm yapılacak membran ile ayrılmış iki hazneden oluşan ölçüm düzeneğinin haznelerine doldurulması ile başlar. Her iki hazneye yerleştirilmiş ve dijital multimetre MASTECH MS8229'a bağlanmış HACH XR 300 Ag–AgCl referans elektrotlar ile çözeltiler arasındaki potansiyel farkı (E) takip edilir. Ag–AgCl elektrotlar ile okunan değer sabitlendiğinde haznelerden birine belirli hacimde 0,2 M'lık KCl çözeltisi eklenirken diğer hazneye aynı miktarda saf su eklenir. 60 sn sonra multimetrede okunan değer alınır. Şekil 3.15'te ölçümde kullanılan düzenek gösterilmektedir. Bu işlem her membran için üç kez tekrarlanmıştır. Elde edilen değerlerle membran potansiyeli eşitlik 3.2 ve 3.3 ile hesaplanır.

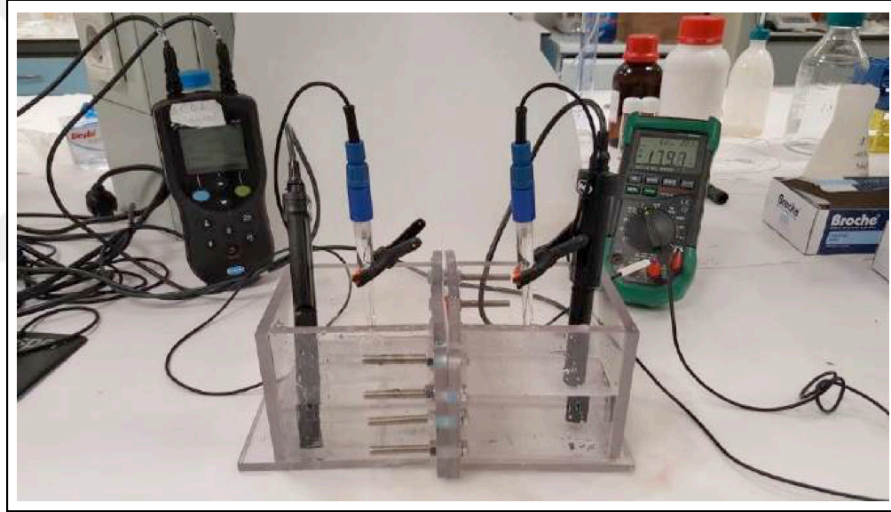
$$Em = E - Eo \quad (3.2)$$

$$Eo = -\frac{RT}{F} \ln \frac{C2}{C1} \quad (3.3)$$

Daha sonra membran taşınım sayısı eşitlik 3.4 ile hesaplanır:

$$t = \frac{0.5 E}{Eo} \quad (3.4)$$

$Em$ ; membran potansiyelini,  $E_0$  ölçülen ilk potansiyel değerini,  $E$  KCl ve saf su eklendikten sonra ölçülen potansiyel değerini,  $t$  membran taşınım sayısını ifade etmektedir.

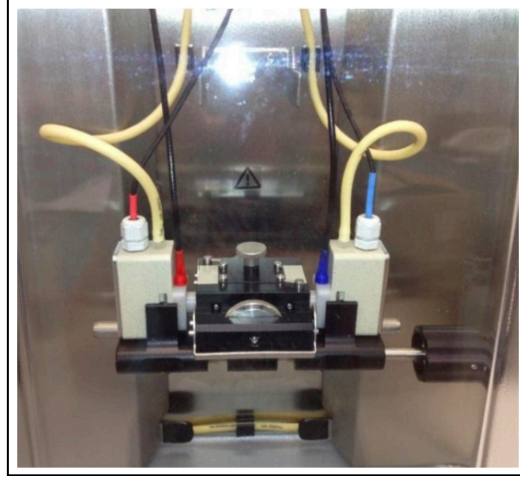


Şekil 3.15: Membran potansiyeli ve taşınım sayısı analiz düzeneği.

### 3.5.8. Zeta Potansiyeli

Membranların zeta potansiyel ölçümleri Anton PAAR SurPASS elektrokinetik analiz cihazıyla (Şekil 3.16) yapılmıştır. Farklı pH değerlerinde membranların yüzey yüklerinde oluşan değişimler izlenmiştir. Üretilen membranların yüzey yükleri, membranların iyon transferi özellikleri hakkında bilgi vermesi açısından önemlidir.





Şekil 3.16: Anton PAAR SurPASS elektrokinetik analiz cihazı.

### 3.5.9. Taramalı Elektron Mikroskobu-Enerji Dağıtıcı X-Işını Spektroskopisi (SEM-EDX)

Membranların yüzey morfolojisi ve ara-yüzey özelliklerinin gözlenmesi amacıyla Quanta FEG 250 marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazında ölçümler gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.17). Ayrıca yüzeydeki inorganik tutunumlar (semi-kantitatif olarak element tayini) EDX analizi ile belirlenmiştir. Membranlar SEM görüntüleri alınmadan önce yüzeylerinin elektrik iletkenliği özelliği kazanması için Au-Pd ile 45 sn süreyle kaplanmıştır.



Şekil 3.17: SEM-EDX Cihazı ve kaplama ünitesi.



## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. Çözelti İçerisinde Karıştırma Yöntemi ile ED Membranı Üretimi

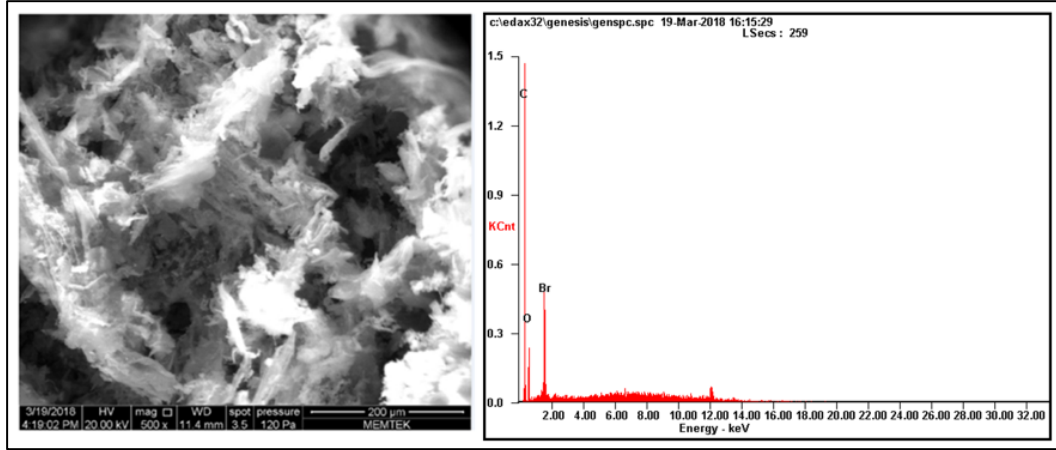
#### 4.1.1. PPO'nun Bromlanması

Tez kapsamında membranların sentezi çalışmalarına ilk olarak PPO'nun bromlanması adımı ile başlanmıştır. Daha önce belirtildiği gibi PPO serbest radikal bromlaması ile bromlanmıştır. Bromlama derecesini arttırmak için bromlama iki kez gerçekleştirilmiştir. Bromlama reaksiyonu sonucu Şekil 4.1'de görülen lifli BPPO yapısı elde edilmiştir.



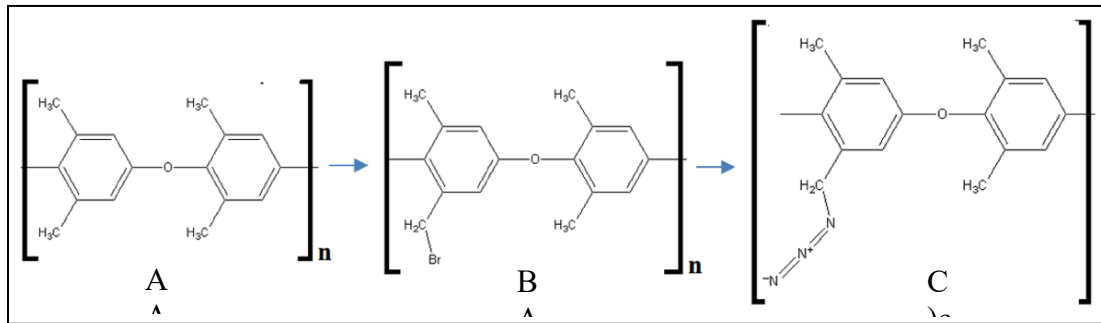
Şekil 4.1: Bromlanmış PPO.

Bromlama reaksiyonu sonucu elde edilen BPPO'nun SEM ve EDX spektrumu görüntüsü Şekil 4.2'de verilmiştir. Elde edilen SEM görüntülerinden de anlaşıldığı üzere lifli yapıda BrPPO polimeri elde edilmiş ve EDX spektrumunda Br'a ait pik gözlemlenmiştir. Bu da bize yapının bromlandığını göstermektedir.

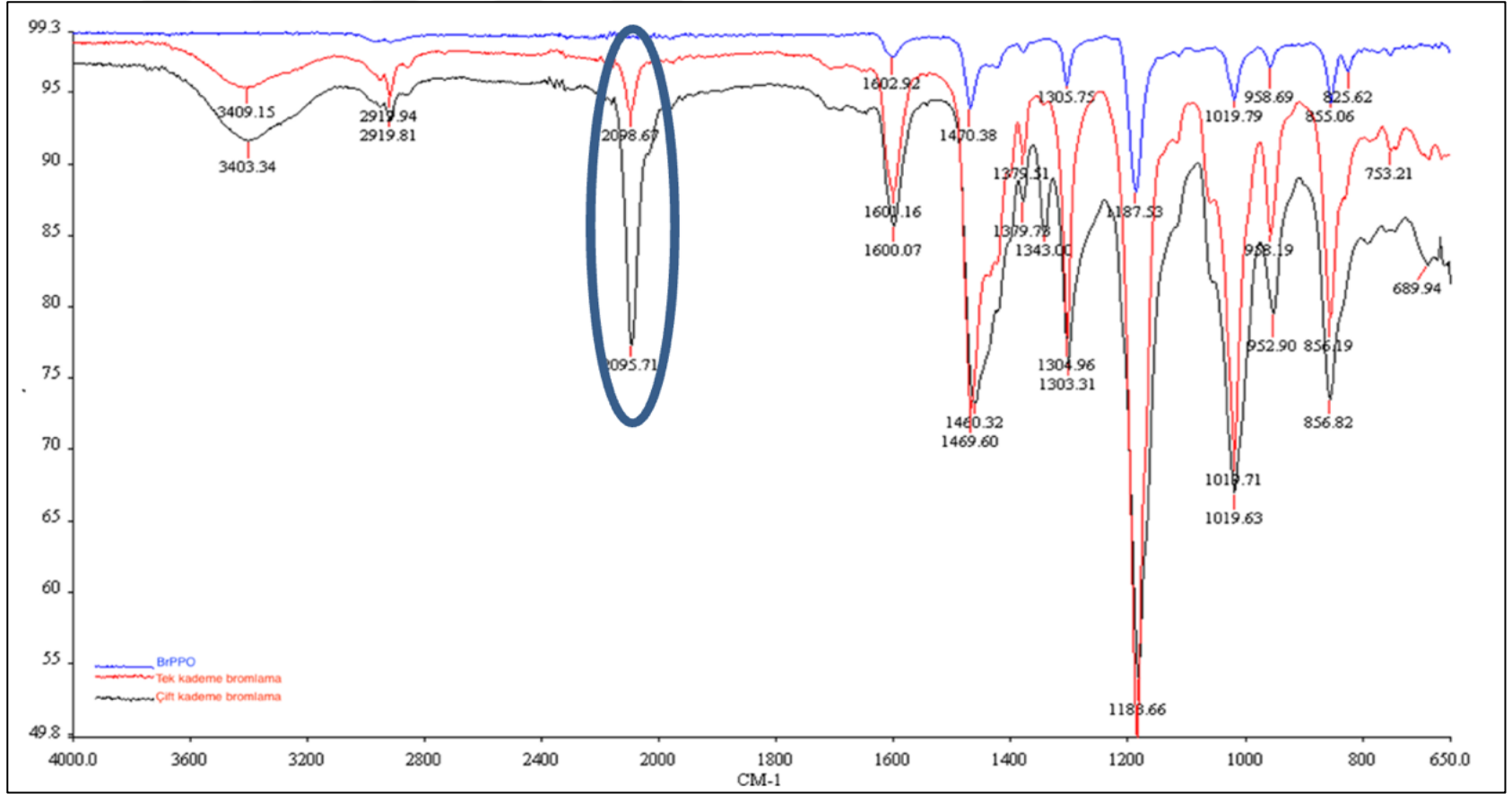


Şekil 4.2: BPPO'nun SEM görüntüsü ve EDX analizi.

Bromlama reaksiyonunun bir diğer analizi olarak FTIR spektrumu alınmıştır. Brom FTIR spektrumunda pik vermediğinden FTIR spektrumu ile bromlamanın gerçekleşip gerçekleşmediği direkt olarak anlaşılamamaktadır. Bu nedenle BPPO bir fonksiyonel grup ile reaksiyona sokulmuştur. Fonksiyonel grup ancak bromlama gerçekleşmiş ise Br ile yer değiştirerek PPO zincirine bağlanabilmektedir. Reaksiyon sonrası FTIR spektrumunda Br ile yer değiştiren grubun pikinin görülmesi, bromlama işleminin gerçekleştiğinin kanıtıdır. Bu amaçla BPPO, sodyum azid ( $\text{NaN}_3$ ) ile Şekil 4.3'te gösterilen mekanizma üzerinden reaksiyona sokulmuştur ve sonrasında FTIR spektrumları alınmış ve bu spektrumlar Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.3: BPPO-  $\text{NaN}_3$  reaksiyonu. A) PPO, B) Br-PPO, C) PPO-N<sub>3</sub>.



Şekil 4.4: BPPO-  $\text{NaN}_3$  reaksiyonu sonrasında alınan FTIR spektrumları.

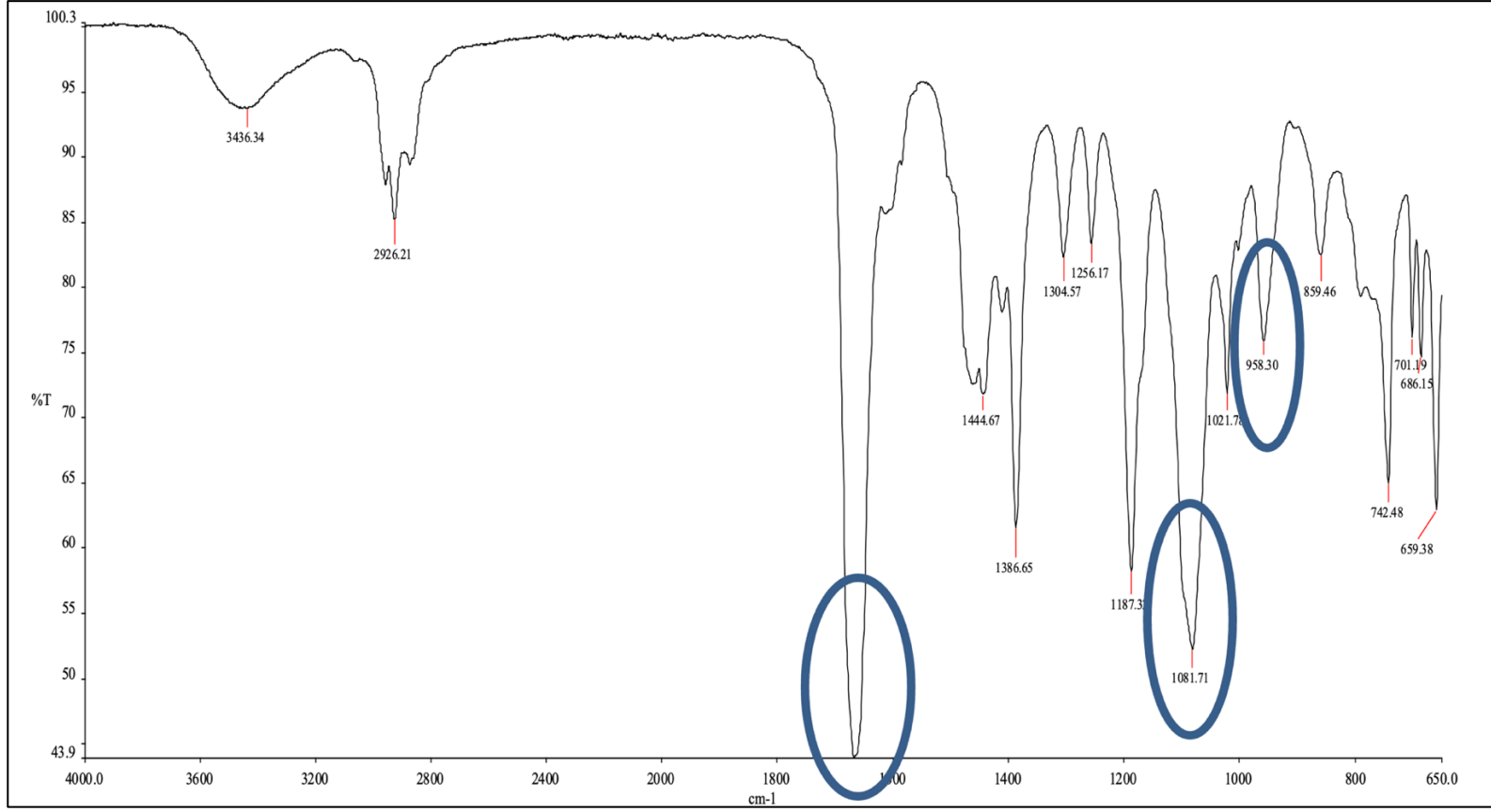
Spektrumda 2098-2095  $\text{cm}^{-1}$ 'lerde gözlemlenen pikler karakteristik N-R pikleridir. N-R piklerinin şiddetinin bromlama derecesini arttırmak amacı ile ikinci kez gerçekleştirilen bromlama reaksiyonu sonucu arttığı görülmüştür.

#### 4.2.2. HNT Katkılı Membran Üretimi

Uygun reaksiyon şartları sağlanarak aminosilan yapıları, amino grubu üzerinden PPO'ya bağlanmıştır. BPPO, 3-aminopropiltrietoksisilan ve trietilenamin arasında azot atmosferi altında 24 saat boyunca sürdürülerek gerçekleştirilen reaksiyon ile elde edilen silan gruplu BPPO'ya ait fotoğraf Şekil 4.5'de ve FTIR spektrumu Şekil 4.6'da gösterilmektedir.



Şekil 4.5: Silan gruplu BPPO'ya ait görüntü.

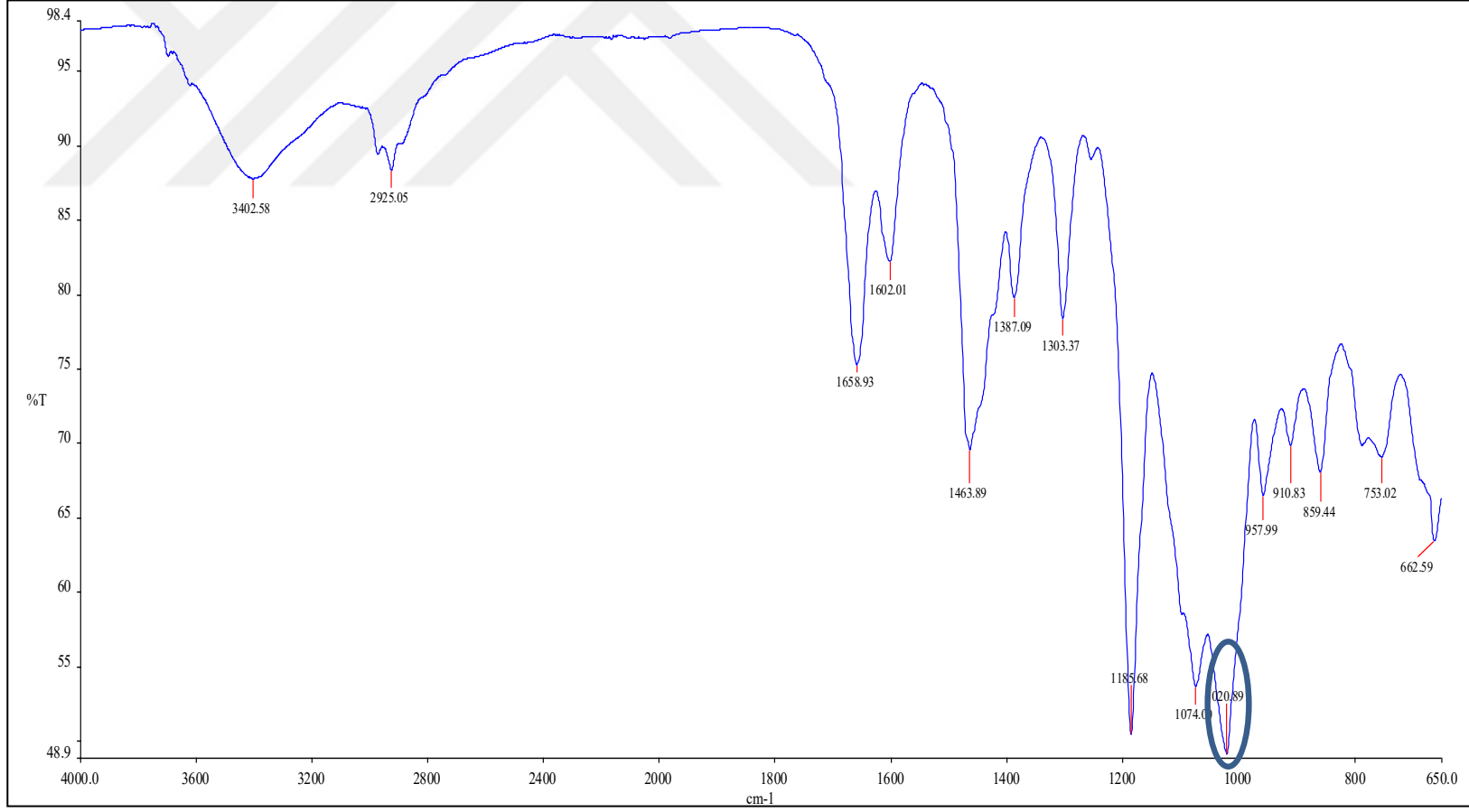


Şekil 4.6: Silan gruplu BPPO'ya ait FTIR spektrumu.

Silan gruplu BrPPO'ya ait FTIR spektrumunda  $3436\text{ cm}^{-1}$  dolaylarında görülmekte olan pik, yapı içerisinde bulunan N-H bağlarını temsil etmektedir.  $2926\text{ cm}^{-1}$  dolaylarındaki pik  $\text{CH}_2\text{CH}_3$  ve yanı sıra  $\text{CH}_3$  yapılarına ait karakteristik piklerdir. Spektrumda 3-aminopropiltrietoksilan ve amin grubu üzerinden BPPO'ya bağlanması ve trietilenaminin yapısı gereği beklenen C-N piki oldukça şiddetli bir şekilde  $1680\text{ cm}^{-1}$  dolaylarında görülmektedir. Sırasıyla 1444, 1304 ve  $1187\text{ cm}^{-1}$  pikleri PPO yapısına ait -C-O, C-O-C ve O-C karakteristik piklerdir [Zhang, et. al. 2006].  $1081\text{--}1021\text{ cm}^{-1}$ 'de görülen pikler Si-O bağlarını temsil etmektedir.  $1256\text{ cm}^{-1}$ 'de bulunan pik ise  $1150\text{--}1185\text{ cm}^{-1}$  arasında görülen aromatik eter (C-O) piklerine aittir.

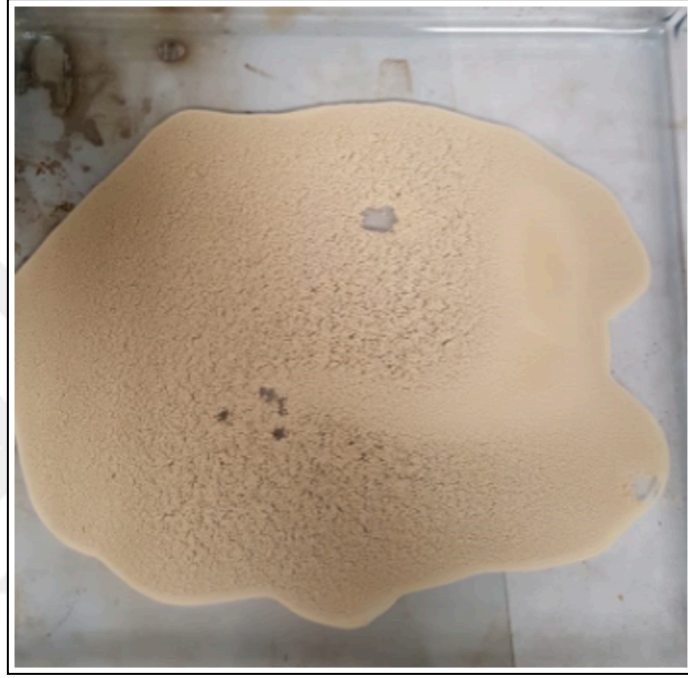
Silanlı grup BrPPO yapısına eklendikten sonra yapıya HNT partikülü bağlanmıştır. Elde edilen yapıya ait FTIR spektrumu Şekil 4.7'de gösterilmektedir.

Elde edilen spektrumda  $3402\text{ cm}^{-1}$ 'de gözlemlenen pik N-H pikidir.  $2926\text{ cm}^{-1}$  dolaylarındaki pik  $\text{CH}_2\text{--CH}_3$  ve yanısıra  $\text{CH}_3$  yapılarına ait karakteristik piklerdir. 1458, 1303,  $1185\text{ cm}^{-1}$  pikleri PPO yapısına ait karakteristik piklerdir [Zhang, et. al. 2006].  $1074$  ve  $1020\text{ cm}^{-1}$ 'de görülen pikler Si-O bağlarını temsil etmektedir. Silanlı BPPO'ya bağlanmayı gösteren ve trietilenaminin yapısı gereği beklenen C-N piki  $1658\text{ cm}^{-1}$ 'lerde görülmektedir.



Şekil 4.7: Silan gruplu ve HNT bağlı BPPO'ya ait FTIR spektrumu.

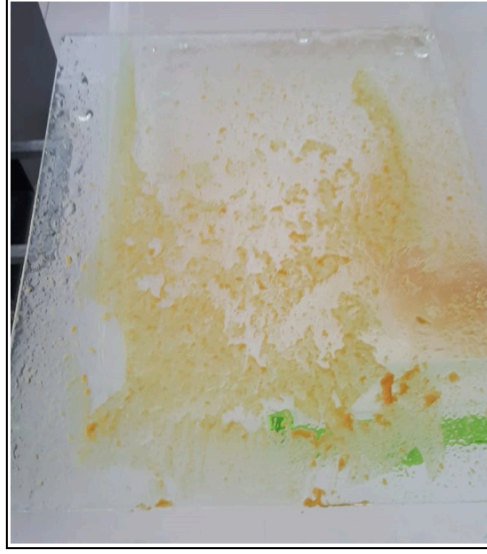
Sentezlenen polimerler ile membran dökme çözeltileri hazırlanmış ve borasilikat kap içerisine dökülerek etüvlenmiştir. Kurutma sonrası etüvden çıkarılan polimer kum gibi dağılmış ve membran formu oluşturamamıştır. Bu durumu engellemek için kurutma işlemi 6 saat, 4 saat ve değişen sıcaklıklar ile oda sıcaklığında tekrar gerçekleştirilmiştir. Tüm kurutma işlemlerinde membran çözeltisi kumsu bir yapı oluşturmuş ve membran formu almamıştır (Şekil 4.8).



Şekil 4.8: Oda sıcaklığında kurutulan HNT'li APTES bağlı BrPPO membran çözeltisi.

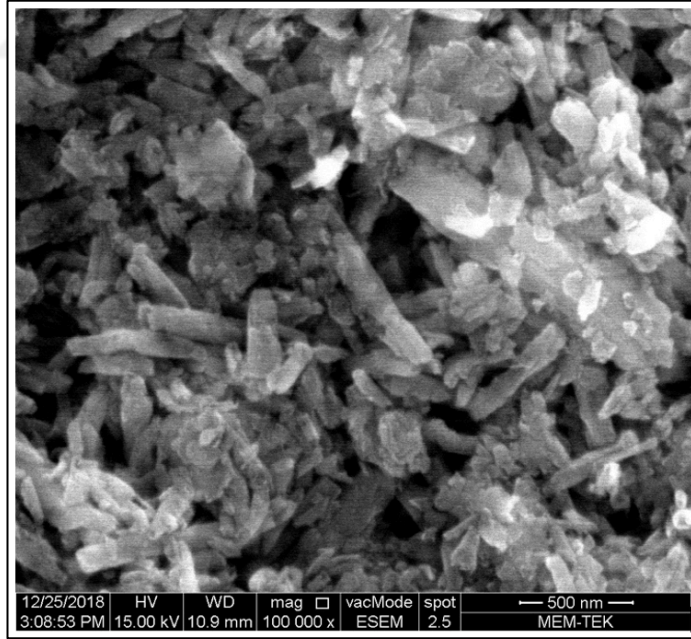
Cam plaka üzerine Dr. Blade yöntemi ile dökülen membranlar ise koagülasyon banyosuna daldırıldığında dağılarak cam yüzey üzerinden uzaklaşmıştır (Şekil 4.9). Saf su ve saf su-etanol olmak üzere iki farklı koagülasyon banyosu içeriği ve farklı banyo sıcaklıkları denemiş fakat sonuçta herhangi bir değişiklik olmamıştır.





Şekil 4.9: Koagülasyon banyosu sonrası HNT ve silanli BPPO membran çözeltisi.

Diğer taraftan silanli grup BrPPO yapısına eklenmeden önce HNT'nin silanli grup ile modifikasyonu sonrasında BrPPO ile reaksiyonu çalışmalarına ile devam edilmiştir. Modifiye HNT'nin SEM görüntüsü alınmıştır (Şekil 4.10).



Şekil 4.10: Modifiye HNT'ye ait SEM görüntüsü.

Modifiye edilen HNT; sonikasyon, öğütme, öğütme-sonikasyon gibi birçok yöntemle tabi tutulmuş fakat yine de polimer içerisinde tam olarak dağıtılması sağlanamamıştır. HNT polimer içerisine eklenip dökme çözeltisi oluşturulurken

ökelerek membran çözeltisinden ayrılmıştır. Bu durum sonucu membran yapısında yırtılmalara neden olan ve membrana kırılğanlık veren aglomere HNT bölgeleri oluşturmuştur. Şekil 4.11'de de görüldüğü gibi HNT aglomerleri oldukça büyük ebatlıdır.



Şekil 4.11: Membran yapısındaki aglomere HNT nanopartikülleri.

Dökülen membranların mekanik dayanımı çok düşük olduğu için membranın levha halinde elde edilmesi neredeyse olanaksızdır. Levha şeklinde dökülen membranlar çözeltideki solvent uzaklaştırıldıktan sonra çatlayarak dağılmıştır.

## 4.2. Eriyik ekme Yöntemi ile ED Membranı Üretimi

Bu amaçla PE1, PE2 ve PE3 kafes polimerler ve R1, R2, R3 reçineleri tedarik edilmiştir. İyon değişim reçinelerinin tanecik boyutunun küçültülmesi için öğütme işlemi uygulanmıştır. Kullanılan reçinelerden Reçine 3 (R3) akrilik bazlı reçine, yapısının kırılğanlığı nedeniyle öğütme işlemine tabi tutulamamıştır. Yapılan üretim çalışmalarında oluşan mamulde büyük tanecik boyutu nedeniyle Reçine 3'ün kafes yapı içerisinde etkin bir şekilde tutulamadığı görülmüştür (Şekil 4.12).



Bu nedenle çalışmalarda ortalama bir MFI değerine sahip PE1 ve PE3 kafes polimerler kullanılmıştır.



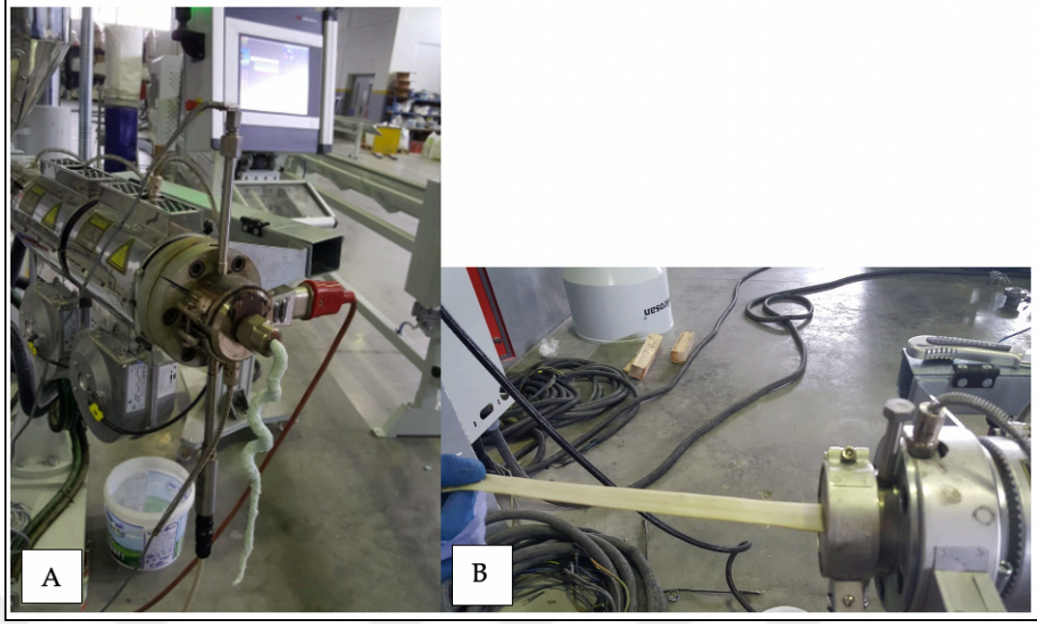
şekil 4.14: Yüksek MFI değerli PE2 ile ekstrüzyon.

Üretilen ürünün şekilsel özellikleri (şerit, makarna ya da boru tipli oluşu) tamamı ile nihai ürünün çekildiği ekstrüderde bulunan kafa ile alakalıdır. Tez çalışmasında iki farklı şekilde son ürün eldesi gerçekleştirilmiştir (şekil 4.15).

ubuk şeklinde üretilen membranlar ile gerçekleştirilen analizlerde morfolojide oluşan değişiklikler nedeni ile sonuç alınamamıştır.

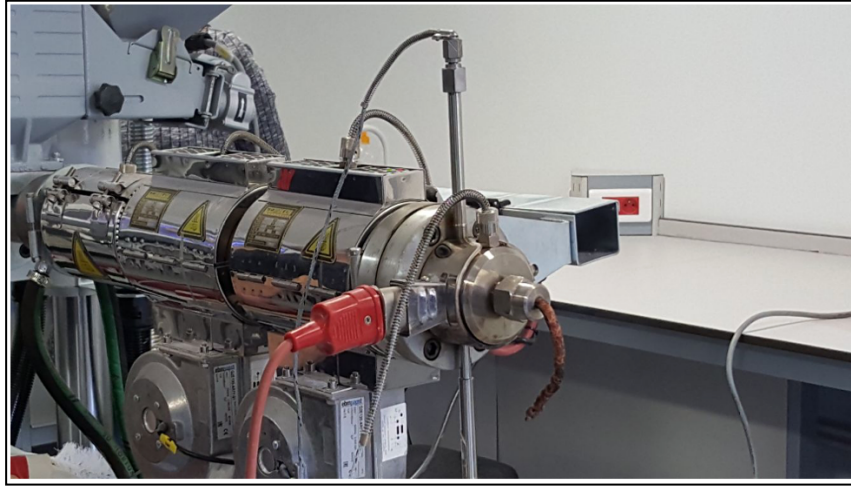
şerit şeklinde üretilen membranlar ise gerçekleştirilen karakterizasyon deneyleri ve membranların işletimi için uygun yapıdadır.





Şekil 4.15: a) Çubuk ve b) Şerit membran üretimi.

EKST-1 ile gerçekleştirilen çalışmada kafes polimerin eriyik ekstrüzyonu için gerekli sıcaklık değerinde iyon değiştirici reçinenin yandığı ve ekstrüder içerisinde sıkışarak torka neden olduğu görülmüştür (Şekil 4.16).



Şekil 4.16: EKST-1 ile gerçekleştirilen üretim.

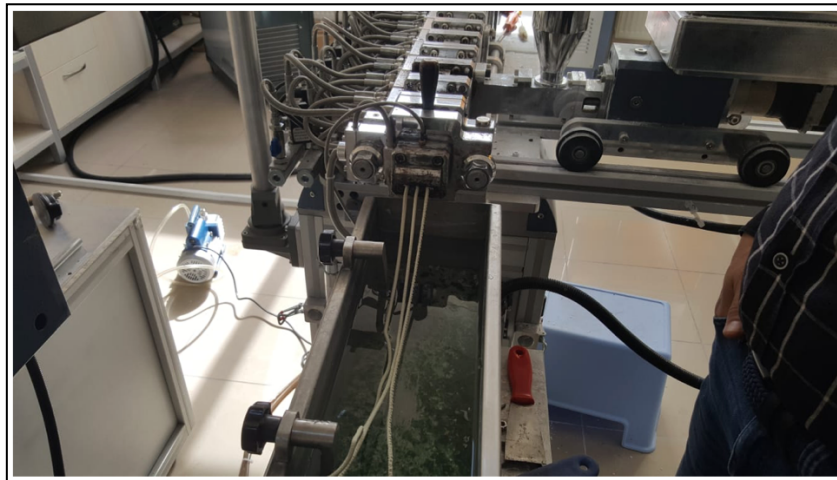
Reçinenin yanma sorununun üstesinden gelmek için farklı bir ekstrüder ile üretim yapılmıştır. Kullanılan EKST-2 çift vidalı bir ekstrüderdir. Gerçekleştirilen üretim sonucu iyon değişim reçinesinin ekstrüder içerisinde uzun kalış süresi nedeniyle yandığı görülmüştür (Şekil 4.17).



Şekil 4.17: EKST-2 ile gerçekleştirilen üretim.

Gerçekleştirilen çalışmalar iyon değişim reçinesi ve kafes polimerin karıştırılmak sureti ile direkt üretiminin mümkün olmadığını göstermiştir. İyon değişim reçinesi ve kafes polimerinin termal özellikleri birbirinden farklıdır. Bu nedenle bu iki bileşiğin termal özelliklerini koruyarak karıştırılabilmeleri için çift beslemeli ekstrüzyon yapılması gerektiği saptanmıştır.

On farklı ısıtma bölgesi ve iki farklı besleme zonu olan EKST-3 ile kafes polimer ve reçine herhangi bir yanma olmadan etkin bir şekilde harmanlanarak ekstrüde edilmiştir. EKST-3 ile reçine ve kafes polimer yapısı çubuklar şeklinde çekilerek daha sonra pellet haline getirilmiştir (Şekil 4.18).

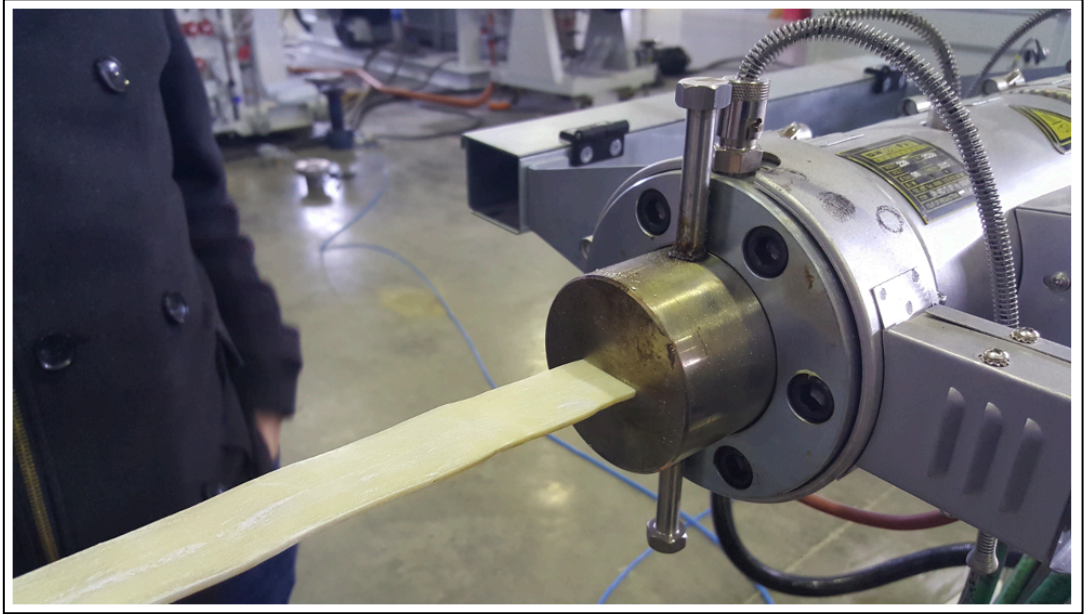


Şekil 4.18: Çift beslemeli çift vidalı ekstruder EKST-3.

EKST-3 ile üretilen ve pellet haline getirilen ara mamul (Şekil 4.19) daha sonra tek vidalı ekstrüdere beslenerek (Şekil 4.20) heterojen membran üretimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.19: EKST-3 ile üretilen ara mamul.



Şekil 4.20: Tek beslemeli tek vidalı EKST-1 ile membran üretimi.

Üretilen membranlara havada ve suda olmak üzere iki farklı son işlem (soğutma) uygulanmıştır. Havada ve suda soğutma uygulanan membranlar Şekil 4.21’de görülmektedir.





Şekil 4.21: A) Havada ve B) suda soğutma uygulanan membranlar.

#### 4.2.1. Üretilen Membranların Karakterizasyonu

##### 4.2.1.1 Genleşme İndeksi

İyon değiştirici kafes polimer PE1 ve R1 ile farklı konsantrasyon ve farklı proses koşullarında üretilen membranların genleşme katsayıları Tablo 4.1’de, verilmiştir.

Tablo 4.1: Eriyik çekme yöntemi ile üretilen PE1R1 membranların genleşme katsayıları.

| Membran  | Genleşme Katsayısı (SI) |                |
|----------|-------------------------|----------------|
| PE1R1    | Su soğutmalı            | Hava soğutmalı |
| 70:30    | 1,22                    | 2,99           |
| 60:40    | 2,55                    | 3,01           |
| 50:50    | 6,08                    | 7,17           |
| Numune 1 | 18,18                   |                |
| Numune 2 | 16,89                   |                |

PE1 R1 ile üretilen membranların genleşme katsayıları değişen reçine konsantrasyonuna göre Numune 1 ve Numune 2 ile kıyaslandığında 3 ile 9 kat mertebesinde daha düşük genleşme kat sayılarına sahip olduğu saptanmıştır. Üretilen membranların genleşme katsayısı değerleri kendi aralarında da uygulanan son işleme



göre farklılık göstermiştir. PE1 yüksek yoğunluklu ve sert yapılı bir polimerdir. Üretim sonrası su ile temas ettiğinde membranın dış kısmında sert bir yapı oluşturmuştur. Oluşan bu sert yapı kafes yapı içerisinde bulunan iyon değişim reçinelerinin su ile temas ettiğinde genişleyebileceği yeterli alanı sağlayamamıştır. Bu nedenle su ile soğutma uygulanan membranların genleşme katsayılarının hava ile soğutulanlara göre daha düşük olduğu düşünülmektedir.

İyon değiştirici kafes polimer PE1 ve R2 ile farklı konsantrasyon ve farklı proses koşullarında üretilen membranların genleşme katsayıları Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2: Eriyik çekme yöntemi ile üretilen PE1 R2 membranların genleşme katsayıları.

| Membran         | Genleşme Katsayısı (SI) |                |
|-----------------|-------------------------|----------------|
|                 | Su soğutmalı            | Hava soğutmalı |
| 70:30           | 0,78                    | 0,78           |
| 60:40           | 1,96                    | 2,02           |
| 50:50           | 3,24                    | 3,88           |
| Ticari Numune 1 | 18,18                   |                |
| Ticari Numune 2 | 16,89                   |                |

PE1 R2 ile üretilen membranların genleşme katsayılarının PE1 R1 ile üretilen membranlara göre çok daha düşük olduğu saptanmıştır. R1 reçine ile üretilen membranlarda gözlemlendiği gibi elde edilen genleşme katsayıları uygulanan son işleme göre farklılık göstererek su ile soğutulan membranlarda daha düşük değerler elde edilmiştir. Bu durum PE1 R1 reçinelerin genleşme katsayıları ile ilgili kısımda da belirtildiği gibi PE1 membranın su ile temas ettiğinde oluşturduğu sert yapı kaynaklıdır. R2 ile üretilen membranların R1 ile üretilen membranlara göre daha düşük genleşme indeksine sahip olması ise bu iki reçinenin farklı su tutunumlarına sahip olması ile ilişkilendirilmiştir.

İyon değiştirici kafes polimer PE3 ve R1 ile farklı konsantrasyon ve farklı proses koşullarında üretilen membranların genleşme katsayıları Tablo 4.3’de, verilmiştir.

Tablo 4.3: Eriyik çekme yöntemi ile üretilen PE3 R1 membranların genleşme katsayıları.

| Membran         | Genleşme Katsayısı (SI) |                |
|-----------------|-------------------------|----------------|
| PE3 R1          | Su soğutmalı            | Hava soğutmalı |
| 70:30           | 4,23                    | 1,75           |
| 60:40           | 6,99                    | 2,56           |
| 50:50           | 13,05                   | 11,59          |
| Ticari Numune 1 | 18,18                   |                |
| Ticari Numune 2 | 16,89                   |                |

PE1 R1 ile üretilen membranların genleşme katsayıları artan reçine konsantrasyonu ile artış göstermiştir. PE3 kafes polimer düşük yoğunluktadır ve PE 1'e göre esnek bir yapıya sahiptir. PE3 R1 ile üretilen membranlardan su ile soğutulan membranlar hava ile soğutulanlara göre daha yüksek genleşme katsayılarına sahiptir. PE3 su ile temas ettiğinde PE1 gibi membran yüzeyinde katı bir katman oluşturmamaktadır. Oluşan homojen yapı soğuma esnasında iyon değişim reçinelerinin su ile temas ederek şişmesine alan sağlamaktadır. Böylelikle daha yüksek genleşme katsayıları elde edilmiştir.

İyon değiştirici kafes polimer PE3 ve R2 ile farklı konsantrasyon ve farklı proses koşullarında üretilen membranların genleşme katsayıları Tablo 4.4'de, verilmiştir.

Tablo 4.4: Eriyik çekme yöntemi ile üretilen PE3 R2 membranların genleşme katsayıları.

| Membran         | Genleşme Katsayısı (SI) |                |
|-----------------|-------------------------|----------------|
| PE3 R2          | Su soğutmalı            | Hava soğutmalı |
| 70:30           | 1,65                    | 1,32           |
| 60:40           | 4,27                    | 3,01           |
| 50:50           | 7,63                    | 7,49           |
| Ticari Numune 1 | 18,18                   |                |
| Ticari Numune 2 | 16,89                   |                |

PE3 R2 ile üretimi gerçekleştirilen membranların genleşme katsayılarının PE3 R1 ile üretilen membranlardan daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Kafes polimer yapı aynı olduğu düşünüldüğünde bu durumun daha önceden de belirtildiği gibi iyon değiştirici reçine R2'nin R1'e göre daha düşük su tutunumuna sahip olması ile ilişkilendirilmiştir.

İyon değiştirici kafes polimer PE1 ve R1, R2 ile farklı proses şartlarında üretilen membranların genleşme katsayıları Tablo 4.5'de, verilmiştir.

Tablo 4.5: Eriyik çekme yöntemi ile farklı proses şartlarında üretilen membranların genleşme katsayıları.

| Membran         | Genleşme Katsayısı (SI) |                |                 |                |
|-----------------|-------------------------|----------------|-----------------|----------------|
|                 | Su soğutmalı            |                | Hava soğutmalı  |                |
| PE1 R1          | Yüksek Devir            | Düşük Devir    | Yüksek Devir    | Düşük Devir    |
| 50:50           | 5,83                    | 6,08           | 6,21            | 7,17           |
| PE1 R2          |                         |                |                 |                |
| 50:50           | 3,63                    | 3,88           | 3,01            | 3,24           |
| PE3 R1          |                         |                |                 |                |
| 50:50           | 10,61                   | 13,05          | 10,52           | 11,59          |
| PE3 R2          | Yüksek Sıcaklık         | Düşük Sıcaklık | Yüksek Sıcaklık | Düşük Sıcaklık |
| 50:50           | 7,32                    | 7,63           | 1,35            | 7,49           |
| Ticari Numune 1 | 18,18                   |                |                 |                |
| Ticari Numune 2 | 16,89                   |                |                 |                |

Proses şartlarının değiştirilmesi ile üretilen membranlarda; düşük devirli proses ile üretilen membranların yüksek devir ile üretilen membranlara göre daha yüksek genleşme katsayılarına sahip olduğunu saptanmıştır. Yüksek devirli üretim ile iyon değişim reçinelerinin oluşturduğu dağılımın reçinelerin birbiri ile temasını düşürdüğü ve bu nedenle membranların genleşme indeksinin düştüğü düşünülmektedir.

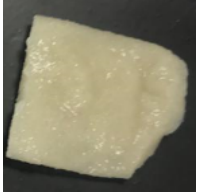
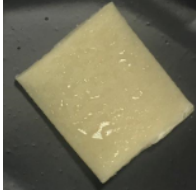
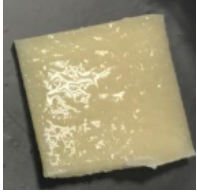
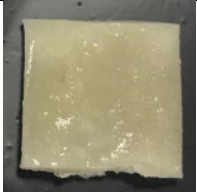
Çalışmada elde edilen farklı konsantrasyonlu, farklı üretim şartlarına sahip ve farklı son işlemlere (soğutma) tabi tutulmuş membran numunelerin, ticari membran örneklerine göre genleşme indeksleri düşüktür.

Yüksek sıcaklıkta uygulanan ekstrüzyonun membran genişleme indeksine pozitif bir etkisinin olmadığı saptanmıştır.

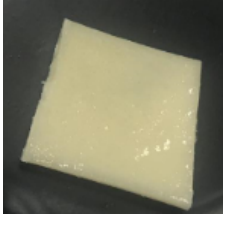
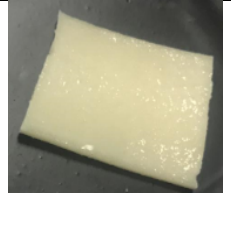
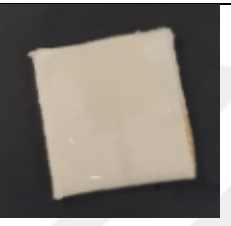
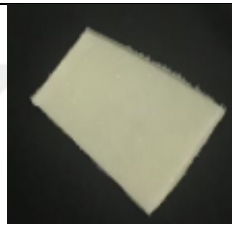
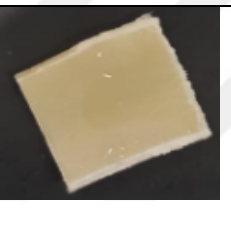
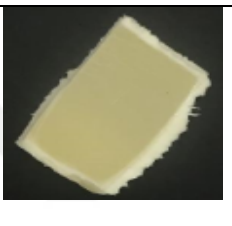
#### 4.2.1.2. Kimyasal Dayanım Testleri

Tablo 4.6'da eriyik çekme yöntemi ile üretilen ve kimyasal dayanım testine tabi tutulan PE1 R1 membranların 24, 48 ve 168 inci saatlerdeki görüntüleri sunulmaktadır. Kimyasal dayanım testleri süresince ve sonunda alınan numunelere ait SEM görüntüleri EK C kısmında Şekil C1.1'de sunulmuştur.

Tablo 4.6: Kimyasal dayanım testine tabi tutulan PE1 R1 membranlar.

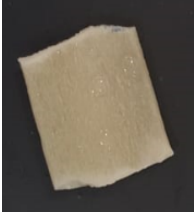
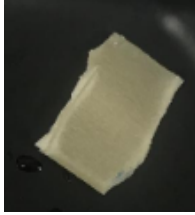
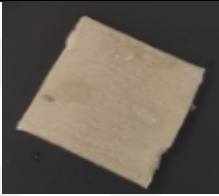
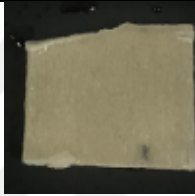
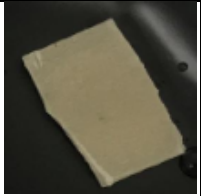
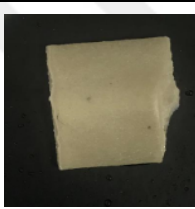
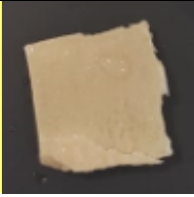
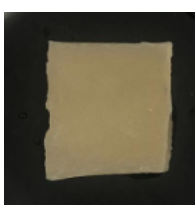
| PE1 R1     | 24 Saat                                                                             | 48 Saat                                                                              | 168 Saat                                                                              |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 70:30 Su   |   |   |   |
| 70:30 Hava |  |  |  |
| 60:40 Su   |  |  |  |
| 60:40 Hava |  |  |  |

Tablo 4.6: Devam.

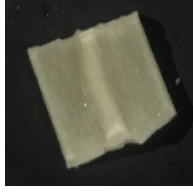
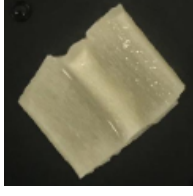
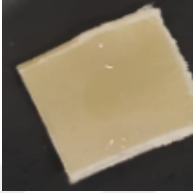
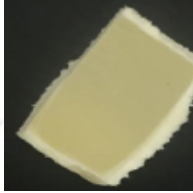
|           |                                                                                    |                                                                                     |                                                                                      |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 5050 Su   |   |   |   |
| 5050 Hava |   |   |   |
| Numune 1  |   |   |   |
| Numune 2  |  |  |  |

Gerçekleştirilen kimyasal dayanım testleri sonucunda PE1 ile üretilen membranların sertlikleri nedeniyle düzgün kesilemeyen uçlarında aşınmalar gözlemlenmiştir. Ayrıca membranların renginde de 48 ve 168. saatlerde değişimler saptanmıştır. Ticari membran numunelerinde renk değişimi ve açık uçlarda deformasyon Numune 2’de Numune 1’e göre daha yüksek oranda gözlemlenmiştir. Kimyasal dayanım testleri süresince ve test sonunda alınan numunelere ait SEM görüntülerinde ise mikro ölekte bir deformasyon görülmemiştir. Tablo 4.7’de eriyik çekme yöntemi ile üretilen ve kimyasal dayanım testine tabi tutulan PE1 R2 membranların 24, 48 ve 168 inci saatlerdeki görüntüleri sunulmaktadır.

Tablo 4.7: Kimyasal dayanım testine tabi tutulan PE1 R2 membranlar.

| PE1 R2        | 24 Saat                                                                             | 48 Saat                                                                              | 168 Saat                                                                              |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 70:30 Su      |    |    |    |
| 70:30 Hava    |    |    |    |
| 60:40 Su      |    |    |    |
| 60:40 Hava    |  |  |  |
| 50:50 Su DD   |  |  |  |
| 50:50 Hava DD |  |  |  |
| 50:50 Su YD   |  |  |  |

Tablo 4.7: Devam.

|               |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 50:50 Hava YD |  |  |  |
| Numune 1      |  |  |  |
| Numune 2      |  |  |  |

PE1 R2 ile üretilen membranlardan örnek alınması sert ve kırılkan yapıları nedeni ile oldukça zor olmuştur. Kimyasal dayanım testleri sırasında membranların kırılmalar oluşan bölgelerinde daha çok aşınma olduğu görülmüştür. Bu deformasyon ve aşınmaların membran işletilirken modüle sabitlenmiş olacağı ve açık uç ihtiva etmeyeceği için önem arz etmediği düşünülmektedir. Kimyasal dayanım testleri süresince ve test sonunda alınan numunelere ait SEM görüntüleri numunelerde mikro ölçekte bir deformasyon olmadığını göstermiştir.

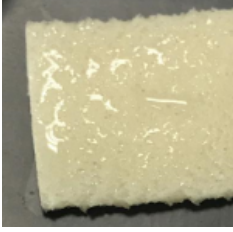
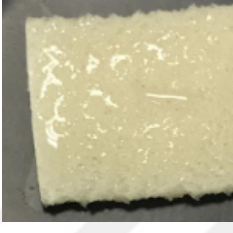
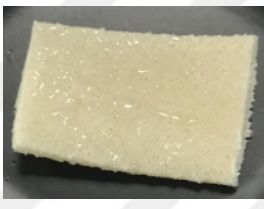
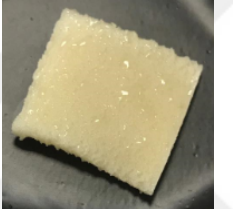
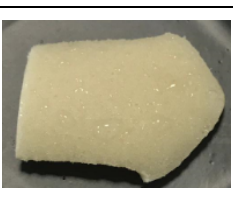
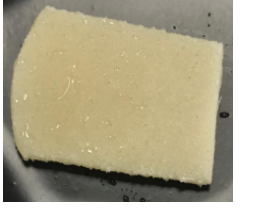
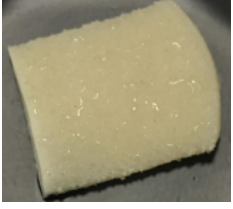
Tablo 4.8'de eriyik çekme yöntemi ile üretilen ve kimyasal dayanım testine tabi tutulan PE3 R1 membranların 24, 48 ve 168 inci saatlerdeki görüntüleri sunulmaktadır.

Tablo 4.8: Kimyasal dayanım testine tabi tutulan PE3 R1 membranlar.

| PE3 R1   | 24 Saat                                                                             | 48 Saat                                                                              | 168 Saat                                                                              |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 70:30 Su |  |  |  |

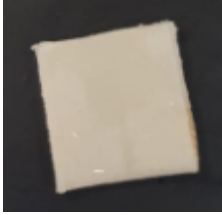
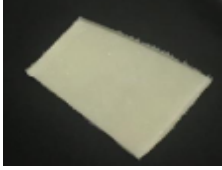
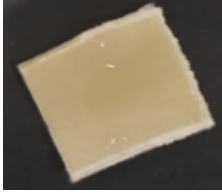
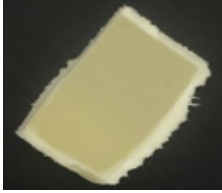


Tablo 4.8:Devam.

| PE3 R1          | 24 Saat                                                                             | 48 Saat                                                                              | 168 Saat                                                                              |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 70:30 Hava      |    |    |    |
| 70:30 Hava      |    |    |    |
| 60:40 Su        |   |   |   |
| 60:40 Hava      |  |  |  |
| 50:50 Su (DD)   |  |  |  |
| 50:50 Hava (DD) |  |  |  |



Tablo 4.8:Devam.

| PE3 R1   | 24 Saat                                                                           | 48 Saat                                                                            | 168 Saat                                                                            |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Numune 1 |  |  |  |
| Numune 2 |  |  |  |

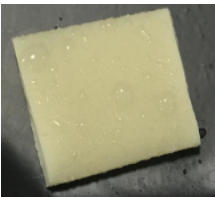
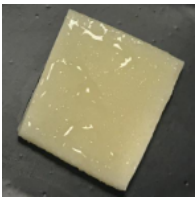
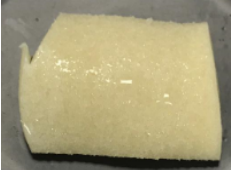
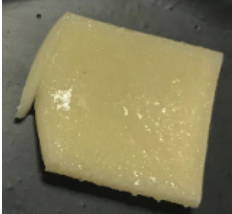
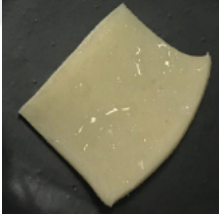
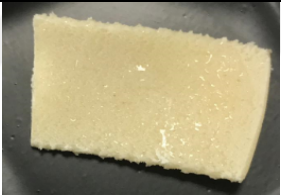
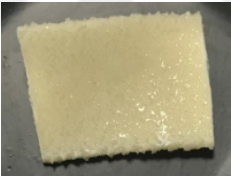
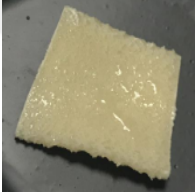
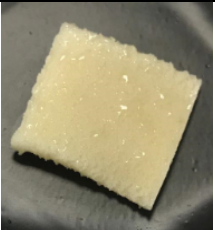
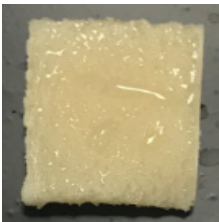
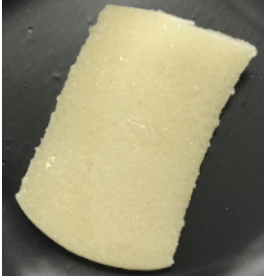
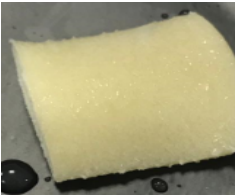
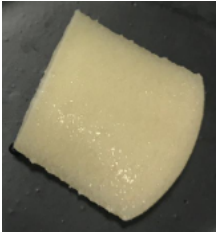
PE1 ile üretilen membranlara göre daha esnek bir yapıya sahip olan PE3 R1 membranların kimyasal dayanım testlerinde membran gövdesinde aşınma, renk değişimi baloncuk oluşumu gibi deformasyonlar hiçbir reçine yüzdesi için görülmemiştir. 70:30 ve 60:40 yüzdeleri membranların kesik uçlarında küçük aşınmalar gözlemlenmiş olmakla birlikte bu uçlar membran işletimi sırasında açık kalmayacağı için sorun teşkil etmeyeceği düşünülmektedir. Ayrıca kimyasal dayanım testleri süresince ve test sonunda alınan numunelerin SEM görüntüleri mikro ölçekte bir deformasyon olmadığını göstermiştir.

Tablo 4.9’da eriyik çekme yöntemi ile üretilen ve kimyasal dayanım testine tabi tutulan PE3 R2 membranların 24, 48 ve 168 inci saatlerdeki görüntüleri sunulmaktadır.

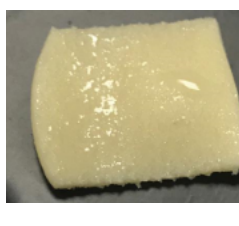
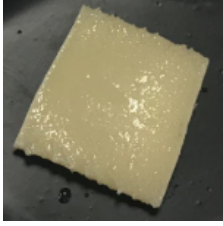
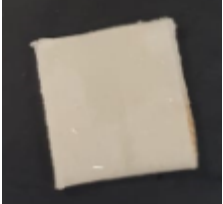
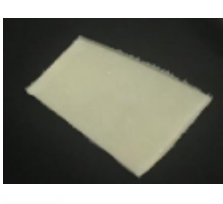
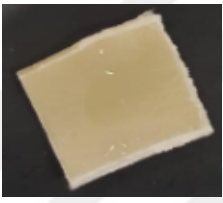
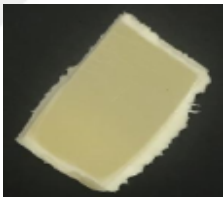
Tablo 4.9: Kimyasal dayanım testine tabi tutulan PE3 R2 membranlar.

| PE3 R2   | 24 Saat                                                                             | 48 Saat                                                                              | 168 Saat                                                                              |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 70:30 Su |  |  |  |

Tablo 4.9: Devam.

| PE3 R2          | 24 Saat                                                                             | 48 Saat                                                                              | 168 Saat                                                                              |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 70:30 Hava      |    |    |    |
| 60:40 Su        |    |    |    |
| 60:40 Hava      |   |   |   |
| 50:50 Su (YS)   |  |  |  |
| 50:50 Hava (YS) |  |  |  |
| 50:50 Su (DS)   |  |  |  |

Tablo 4.9: Devam.

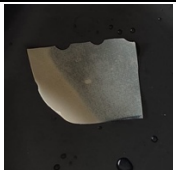
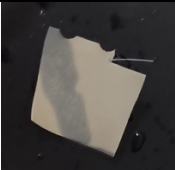
| PE3 R2          | 24 Saat                                                                            | 48 Saat                                                                             | 168 Saat                                                                             |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 50:50 Hava (DS) |   |   |   |
| Numune 1        |   |   |   |
| Numune 2        |  |  |  |

Testler sırasında membranlarda boşluk oluşması, baloncuk oluşumu, kıvrılma ve yapışma gibi durumlara rastlanmamıştır.

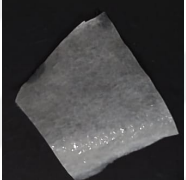
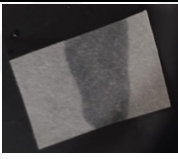
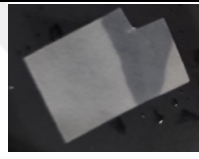
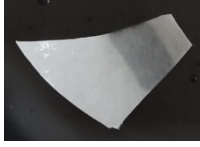
Kimyasal dayanım testleri süresince ve test sonunda alınan numunelere ait SEM görüntüleri numunelerde mikro ölçekte bir deformasyon olmadığını göstermiştir. SEM görüntülerinde önemli bir farklılığa rastlanmamıştır.

Elektrodiyaliz prosesinde kullanılan ticari membranlara ait kimyasal dayanım testi sonuçları Tablo 4.10'da sunulmaktadır.

Tablo 4.10: Kimyasal dayanım testine tabi tutulan ticari membranlar.

| Membran     | 24 Saat                                                                             | 48 Saat                                                                              | 168 Saat                                                                              |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| PC Cell ADM |  |  |  |

Tablo 4.10:Devam.

| Membran               | 24 Saat                                                                             | 48 Saat                                                                              | 168 Saat                                                                              |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| PC Cell KDM           |    |    |    |
| Fuji Film Type 1 ADM  |    |    |    |
| Fuji Film Type 1 KDM  |   |   |   |
| Fuji Film Type II ADM |  |  |  |
| Fuji Film Type II KDM |  |  |  |

Asit dayanım testleri sırasında PCCell firmasına ait ADM ve KDM'lerin renklerinde koyulaşma gözlemlenmiştir. Ayrıca PCCell KDM ilk yirmi dört saat sonrası kıvrık bir hal almıştır. Ticari membranların hiçbirinde baloncuk oluşumu, yapışma gibi durumlar gözlemlenmemiştir. Ticari membranların kimyasal dayanım testi süresince ve sonunda alınan SEM görüntüleri EK C kısmında Şekil C1.2 ve Şekil C1.3'de sunulmuştur. Sem görüntüleri membran yapılarında herhangi bir mikro bozunma varlığını göstermemektedir.

#### 4.2.1.3. Mekanik Dayanım Testleri

Eriyik çekme yöntemi ile üretilen membran numunelerinin mekanik dayanımını aydınlatmak için, bu membranlar ve ticari heterojen membranlar ASTM D-638 standartına göre hazırlanmıştır.

PE3 ile üretilen membranlar ve ticari membran Numune 1 analiz için standart şekilde kesilebilmişken PE1 ile üretilen membranlarda çatlama ve kırılmalar olmuştur. Bu nedenle yüksek yoğunluklu polietilen ile üretilen membranların çekme dayanımı ve kopma uzama değerleri ölçülememiştir. Tablo 4.11'de Numune 1, PE3 R1 ve PE3 R2 ile üretilen membranların çekme dayanımı ve kopma uzama değerleri verilmiştir.

Tablo 4.11: Eriyik çekme yöntemi ile üretilen membranların mekanik dayanım değerleri.

| Membran  | Çekme Dayanım |       | Kopma Uzama |
|----------|---------------|-------|-------------|
|          | (N)           | (Mpa) |             |
| Numune 1 | 87            | 5     | %60         |
| PE3 R1   |               |       |             |
| 70:30    | 100           | 4     | %25         |
| 60:40    | 75            | 3,5   | %15         |
| 50:50    | 60            | 2,95  | %15         |
| PE3 R2   |               |       |             |
| 70:30    | 117           | 5     | %35         |
| 60:40    | 82            | 4     | %35         |
| 50:50    | 67            | 3     | %15         |

Yapılan çekme dayanımı ve kopma uzama testi sonuçlarına göre üretilen membranlarda reçine miktarı arttıkça çekme dayanımında azalma olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca artan reçine miktarı ile kopma uzama yüzdesinde de azalma söz konusudur. R1 ile üretilen membranlar R2 ile üretilenlere göre daha düşük çekme dayanımına ve kopma gerilimine sahiptir. Düşük yoğunluklu polietilen ve her iki reçine ile üretilen membranların ticari membran Numune 1'e göre çekme dayanımı ve kopma gerilimi değerleri daha düşük bulunmuştur.

#### 4.2.1.4. FTIR Spektrumları

Çalışmada elde edilen örnekler ile ticari heterojen membranların karşılaştırmalı FTIR spektrumları alınmıştır. Bu spektrumlar ekler kısmında EK B’de sunulmaktadır. Ticari numunelerin pikleri üstte verilirken, karşılaştırma yapılan membranların pikleri altta verilmiştir. Elde edilen spektrumlar üretilen membranlar ile ticari, membranların yüzey gruplarının çok benzer olduğu saptanmıştır.

#### 4.2.1.5. Membranların İyon Değişim Kapasiteleri

Ticari membran numunelerine uygulanan iyon değişim kapasitesi testlerinin sonuçları Tablo 4.12’de sunulmaktadır.

Tablo 4.12: Ticari numune 1 ve 2 membranların IEC değerleri.

| Membran  | IEC    |
|----------|--------|
| Numune 1 | 0,0441 |
| Numune 2 | 0,3324 |

Elde edilen değerler Numune 2’nin Numune 1’den daha yüksek iyon değişim kapasitesi değerine sahip olduğunu göstermektedir. PE1 R1 membranlarına uygulanan iyon değişim kapasitesi testlerinin sonuçları Tablo 4.13’de sunulmaktadır.

Tablo 4.13: Üretilen PE1 R1 membranlarının IEC değerleri.

| PE1 R1     | IEC    |
|------------|--------|
| 70:30 Hava | 0,3301 |
| 70:30 Su   | 0,371  |
| 60:40 Hava | 0,4064 |
| 60:40 Su   | 0,9427 |

Tablo 4.13:Devam.

| PE1 R1     | IEC    |
|------------|--------|
| 50:50 Hava | 0,8758 |
| 50:50 Su   | 0,6288 |

PE1 R1 ile üretilen membranlarda artan reçine konsantrasyonu ile iyon değişim kapasitesinde belli bir eğilim saptanmamıştır. 70:30 ve 60:40 konsantrasyonlu membranlarda su ile son işlem uygulanan membranların daha yüksek IEC değerine sahip olduğu görülürken, 50:50 konsantrasyonlu membranda bu durum tersi hal almıştır. 50:50 konsantrasyonlu hava soğutmalı membranların IEC değeri daha yüksek elde edilmiştir.

PE1 R2 membranlarına uygulanan iyon değişim kapasitesi testlerinin sonuçları Tablo 4.14’de sunulmaktadır.

Tablo 4.14: Üretilen PE1 R2 membranlarının IEC değerleri.

| PE1 R2            | IEC    |
|-------------------|--------|
| 70:30 Su          | 0,0010 |
| 70:30 Hava        | 0,0009 |
| 60:40 Su          | 0,0762 |
| 60:40 Hava        | 0,0022 |
| 50:50 Su Yüksek   | 0,3202 |
| 50:50 Hava Yüksek | 0,2412 |
| 50:50 Su Düşük    | 0,3372 |
| 50:50 Hava Düşük  | 0,2815 |

PE1 R2 ile üretilen membranların IEC değerleri diğer membranlar ile kıyaslandığında en düşük değerlere sahiptir. PE1 R2 ile üretilen membranlarda artan reçine konsantrasyonu ile IEC değerinde artış gözlemlenmekle birlikte ayrıca su ile

soğutulan membranların IEC değerlerinin hava soğutmalı membranlara göre daha yüksek olduğu görülmüştür.

PE3 R1 membranlarına uygulanan iyon değişim kapasitesi testlerinin sonuçları Tablo 4.15’de sunulmaktadır.

Tablo 4.15: Üretilen PE3 R1 membranlarının IEC değerleri.

| PE3 R1            | IEC    |
|-------------------|--------|
| 70:30 Su B (YD)   | 0,2399 |
| 70:30 Su A (DD)   | 0,3009 |
| 70:30 Hava A (DD) | 0,3725 |
| 60:40 Su          | 0,9962 |
| 60:40 Hava        | 0,8569 |
| 50:50 Su          | 1,3334 |
| 50:50 Hava        | 0,6683 |

PE3 R1 membranlarına uygulanan iyon değişim kapasitesi testleri; en yüksek iyon değişim kapasitesinin bu membranlar ile elde edildiğini göstermektedir. Üretilen membranlarda artan reçine konsantrasyonu ile IEC’nin arttığı ve su ile soğutma uygulanan membranlara ait değerlerin hava ile soğutulan membranlara göre daha yüksek olduğu görülmüştür.

PE3 R2 membranlarına uygulanan iyon değişim kapasitesi testlerinin sonuçları Tablo 4.16’da sunulmaktadır.

Tablo 4.16: Üretilen PE3 R2 membranlarının IEC değerleri.

| PE3 R2            | IEC    |
|-------------------|--------|
| 70:30 Su          | 0,1970 |
| 70:30 Hava        | 0,0382 |
| 60:40 Su          | 0,2961 |
| 60:40 Hava        | 0,0299 |
| 50:50 Su A (YS)   | 0,6760 |
| 50:50 Hava A (YS) | 0,5957 |
| 50:50 Su B (DS)   | 1,0437 |
| 50:50 Hava B (DS) | 0,4652 |



PE3 R2 ile üretilen membranların IEC değerleri artan reçine konsantrasyonu ile artış göstermektedir. Su ile son işlem gören membranlarda iyon değişim kapasitesinin yüksek oluşunun nedeni; üretim sonrası su ile temas eden reçinelerin şişmesi sonucu membran morfolojisinde iyonların transferini sağlayan kanallar oluşturmaya bağlanmaktadır. Hava soğutması ile yüksek devirde üretilen membranların IEC değerindeki düşüş kafes polimer içerisine dağılım gösteren reçineleri birbirine bağlayan mikro kanalların oluşmaması olarak yorumlanmaktadır. Su ile soğutma yönteminin iyon iletimi açısından pozitif fayda sağladığı tüm reçine yüzdeleri ile yapılan üretimlerinde görülmektedir.

#### 4.2.1.6. Membran Direnç Ölçümleri

Ticari numunelerin dört prob yöntemi ile direnç ölçümlerine ait sonuçlar Tablo 4.17'de sunulmuştur.

Tablo 4.17: Ticari numunelere ait membranların direnç ölçümleri.

|          | Direnç (ohm.cm <sup>2</sup> ) |
|----------|-------------------------------|
| Numune 1 | 2,33x10 <sup>10</sup>         |
| Numune 2 | 2,23x10 <sup>9</sup>          |

Ticari numunelerin direnç ölçümleri Numune 2'nin elektriksel direncinin Numune 1 membrana göre daha düşük olduğunu göstermektedir.

PE1 R1 membranların direnç ölçümlerine ait sonuçlar Tablo 4.18'de sunulmuştur.

Tablo 4.18: PE1 R1 membranların direnç ölçümleri.

| PE1 R1     | Direnç (ohm.cm <sup>2</sup> ) |
|------------|-------------------------------|
| 70:30 Su   | 5,33x10 <sup>9</sup>          |
| 70:30 Hava | 4,97x10 <sup>9</sup>          |
| 60:40 Su   | 3,19x10 <sup>9</sup>          |

Tablo 4.18: Devam.

| PE1 R1     | Direnç (ohm.cm <sup>2</sup> ) |
|------------|-------------------------------|
| 60:40 Hava | 2,04x10 <sup>9</sup>          |
| 50:50 Su   | 3,7x10 <sup>9</sup>           |
| 50:50 Hava | 2,25x10 <sup>9</sup>          |

Elde edilen sonuçlar hava ile soğutma sağlanan PE1 R1 membranlarının elektriksel dirençlerinin su ile soğutulanlara göre daha düşük olduğunu göstermiştir. Artan iyon değişim reçinesi konsantrasyonu ile membranların elektriksel direnci düşmektedir.

PE1 R2 membranların direnç ölçümlerine ait sonuçlar Tablo 4.19’da sunulmuştur.

Tablo 4.19: PE1 R2 membranların direnç ölçümleri.

| PE1 R2          | Direnç (ohm.cm <sup>2</sup> ) |
|-----------------|-------------------------------|
| 70:30 Su        | 1,3x10 <sup>10</sup>          |
| 70:30 Hava      | 1.13x10 <sup>10</sup>         |
| 60:40 Su        | 1,16x10 <sup>10</sup>         |
| 60:40 Hava      | 1.6x10 <sup>10</sup>          |
| 50:50 Su (YD)   | 6,4x10 <sup>9</sup>           |
| 50:50 Hava (YD) | 6,46x10 <sup>10</sup>         |
| 50:50 Su (DD)   | 3x10 <sup>10</sup>            |
| 50:50 Hava (DD) | 2,8x10 <sup>9</sup>           |

PE1 R2 ile üretilen membranların direnç değerleri aynı kafes polimer ile üretilmiş PE1 R1 membranlara göre daha yüksektir. Bu durum PE3 kafes yapı ile üretilen membranlarda da aynı eğilimde seyretmiştir. Dolayısıyla direnç değerinin kullanılan reçine özellikleri ile yakından ilgili olduğu düşünülmektedir.

PE3 R1 membranların direnç ölçümlerine ait sonuçlar Tablo 4.20’de sunulmuştur.

Tablo 4.20: PE3 R1 membranların direnç ölçümleri.

| PE3 R1            | Direnç (ohm.cm <sup>2</sup> ) |
|-------------------|-------------------------------|
| 70:30 Su A (DD)   | 1,07x10 <sup>9</sup>          |
| 70:30 Hava A (DD) | 1,57x10 <sup>9</sup>          |
| 70:30 Su B (YD)   | 1,39x10 <sup>9</sup>          |
| 60:40 Su          | 3,79x10 <sup>8</sup>          |
| 60:40 Hava        | 3,67x10 <sup>9</sup>          |
| 50:50 Su          | 1,84x10 <sup>9</sup>          |
| 50:50 Hava        | 5,13x10 <sup>9</sup>          |

PE3 R2 membranların direnç ölçümlerine ait sonuçlar Tablo 4.21’de sunulmuştur.

Tablo 4.21: PE3 R2 membranların direnç ölçümleri.

| PE3 R2          | Direnç (ohm.cm <sup>2</sup> ) |
|-----------------|-------------------------------|
| 70:30 Su        | 1,83x10 <sup>10</sup>         |
| 70:30 Hava      | 2,33x10 <sup>9</sup>          |
| 60:40 Su        | 2,33x10 <sup>8</sup>          |
| 60:40 Hava      | 4,15x10 <sup>9</sup>          |
| 50:50 Su (YS)   | 1,16x10 <sup>9</sup>          |
| 50:50 Hava (YS) | 4,96x10 <sup>9</sup>          |
| 50:50 Su (DS)   | 1,36x10 <sup>9</sup>          |
| 50:50 Hava (DS) | 5,35x10 <sup>9</sup>          |

Ticari membranlar arasında en düşük direnç değeri Numune 1’de görülmüştür. Genel anlamda direnç değerleri 10<sup>9</sup>-10<sup>10</sup> mertebelerinde seyretmektedir. Direncin değişen reçine konsantrasyonu ile ilişkilendirilmesi belirgin olmamakla birlikte PE3 R2 membranlar için reçine oranı yükseldikçe direncin düştüğü saptanmıştır. Ayrıca üretim sırasında artan sıcaklık direnç değerinde düşmeye neden olmuştur.

#### 4.2.1.7. Membran Potansiyeli ve Taşınım Sayısı

Ticari membranlara ait membran potansiyeli ve taşınım sayıları Tablo 4.22’de sunulmaktadır.

Tablo 4.22: Ticari membran numunelerinin potansiyelleri ve taşınım sayıları.

|          | Membran Potansiyeli | Taşınım sayısı |
|----------|---------------------|----------------|
| Numune 1 | 24,93               | 8,34           |
| Numune 2 | 228,47              | 80,54          |

Ticari numune 2’nin membran potansiyeli ve taşınım sayısı değerleri Numune 1’e göre daha yüksektir,

Tez çalışmasında üretilen PE1 R1membranlara ait membran potansiyeli ve taşınım sayıları Tablo 4.23’de sunulmaktadır.

Tablo 4.23: PE1 R1 membranların potansiyelleri ve taşınım sayıları.

| PE1 R1     | Membran Potansiyeli | Taşınım sayısı |
|------------|---------------------|----------------|
| 70:30 Su   | 7,46                | 90,97          |
| 70:30 Hava | 7,99                | 14,35          |
| 60:40 Su   | 72,99               | 30,87          |
| 60:40 Hava | 82,1                | 34,82          |
| 50:50 Su   | 137,77              | 48,06          |
| 50:50 Hava | 124,39              | 45,67          |

Elde edilen değerler uygulanan soğutma işleminin membranların potansiyellerinde ve taşınım sayılarında majör değişiklikler oluşturmadığını göstermiştir. En yüksek membran potansiyeli ve taşınım sayısı değerleri 50:50 PE R1 konsantrasyonlu membranlarda görülmüştür.

Tez çalışmasında üretilen PE1 R2 membranlara ait membran potansiyeli ve taşınım sayıları Tablo 4.24’de sunulmaktadır.

Tablo 4.24: PE1 R2 membranların potansiyelleri ve taşınım sayıları.

| PE1 R2          | Membran Potansiyeli | Taşınım sayısı |
|-----------------|---------------------|----------------|
| 70:30 Su        | 179,54              | 63,18          |
| 70:30 Hava      | 199,11              | 70,13          |
| 60:40 Su        | 188,15              | 67,24          |
| 60:40 Hava      | 197,29              | 70,48          |
| 50:50 Su (YD)   | 22,91               | 7,63           |
| 50:50 Hava (YD) | 5,32                | 2,39           |
| 50:50 Su (DD)   | 188,24              | 66,27          |
| 50:50 Hava (DD) | 46,02               | 16,82          |

PE1 R2 membranların saptanan membran potansiyeli ve taşınım sayıları düşük devirli membranlara göre yüksek devir ile üretilen membranların taşınım sayılarının daha düşük değerli olduğunu göstermiştir. Elde edilen değerler membran potansiyeli ve taşınım sayısı üzerinde soğutma tipinin etkisi hakkında net bir eğilimden söz etmeye elverişli değildir.

Tez çalışmasında üretilen PE3 R1 membranlara ait membran potansiyeli ve taşınım sayıları Tablo 4.25’de sunulmaktadır.

Tablo 4.25: PE3 R1 membranların potansiyelleri ve taşınım sayıları.

| PE3 R1          | Membran Potansiyeli | Taşınım sayısı |
|-----------------|---------------------|----------------|
| 70:30 Su (DD)   | 82,63               | 45,22          |
| 70:30 Hava (DD) | 101,71              | 63,10          |
| 70:30 Su (YD)   | 203,37              | 136,92         |
| 60:40 Su        | 76,81               | 55,26          |
| 60:40 Hava      | 180,01              | 106,77         |
| 50:50 Su        | 171,37              | 69,50          |
| 50:50 Hava      | 36,29               | 23,54          |

PE3 R1 ile üretilen membranların membran potansiyelleri ve taşınım sayıları soğutma tipine göre artan ya da azalan bir eğilim göstermemiştir. Artan reçine konsantrasyonu ile de membran potansiyeli ve taşınım sayısının orantısal bir ilişkisi saptanmamıştır.

Tez çalışmasında üretilen PE3 R2 membranlara ait membran potansiyeli ve taşınım sayıları Tablo 4.26’de sunulmaktadır.

Tablo 4.26: PE3 R2 membranların potansiyelleri ve taşınım sayıları.

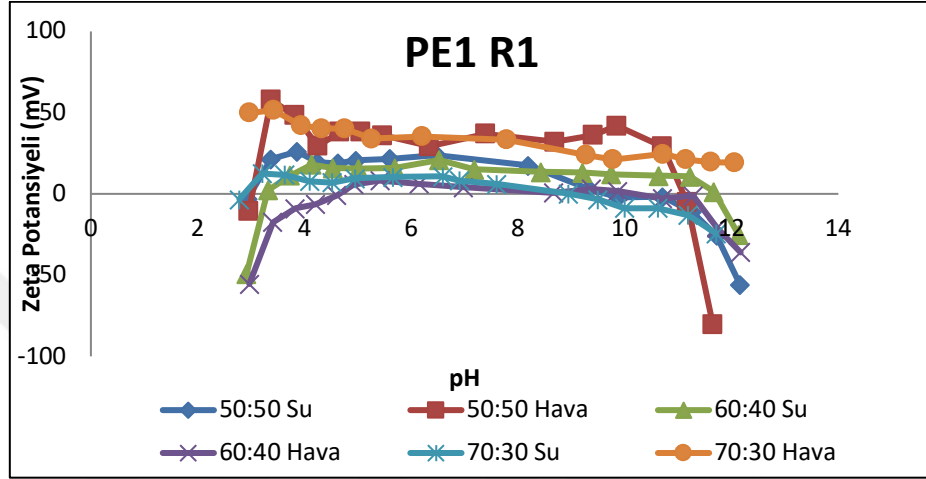
| PE3 R2          | Membran Potansiyeli | Taşınım sayısı |
|-----------------|---------------------|----------------|
| 70:30 Su        | 66,59               | 1,61           |
| 70:30 Hava      | 216,09              | 70,65          |
| 60:40 Su        | 193,29              | 56,24          |
| 60:40 Hava      | 18,98               | 10,82          |
| 50:50 Su (YS)   | 8,14                | 0,82           |
| 50:50 Hava (YS) | 75,54               | 6,50           |
| 50:50 Su (DS)   | 76,89               | 26,07          |
| 50:50 Hava (DS) | 3,22                | 2,91           |

PE3 R2 membran lar ile elde edilen membran potansiyeli ve taşınım sayıları üretilen tüm membranlar içerisinde en düşük değerlere sahiptir. Bu membranlarda da soğutma tipi ya da değişen reçine konsantrasyonu ile artan ya da azalan membran potansiyeli ve taşınım sayısı değerlerinden bahsedilememektedir.

Heterojen membranların, membranın her alanında farklı iyon değişimi ve elektriksel özellikler gösterdiği bilinmektedir. Bu nedenle analizler sırasında membranların farklı kısımlarında minimum 3 farklı örnekleme ile yapılan analizlere rağmen elde edilen veriler membran potansiyeli ve taşınım sayıları açısından net çıkarımlara izin verir nitelikte değildir.

#### 4.2.1.8. Zeta Potansiyeli Ölçümleri

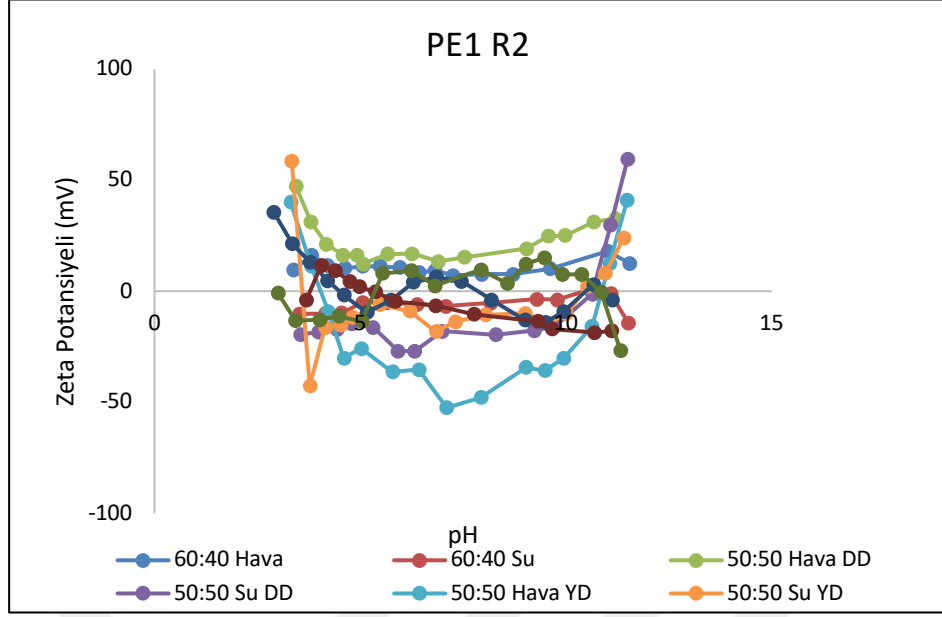
Tez çalışması kapsamında üretilen membranların anyon değişim membranları olması nedeniyle yüzey yüklerinin ortamdaki anyonların membran yüzeyinden itilmesini engelleyecek şekilde pozitif yüklü olması beklenmektedir. PE1R1 membranlarına ait zeta potansiyeli ölçümleri Şekil 4.22’de sunulmaktadır.



Şekil 4.22: PE1 R1 membranlara ait zeta potansiyeli grafikleri.

PE1 R1 membranları pH 3-11 arasında pozitif özellik göstermektedir. pH 11 üzerinde ise membranların negatif özellik gösterdiği görülmüştür. 70:30 hava membranı ise pH'sı 3-11 aralığında negatif yüzey yüküne sahiptir.

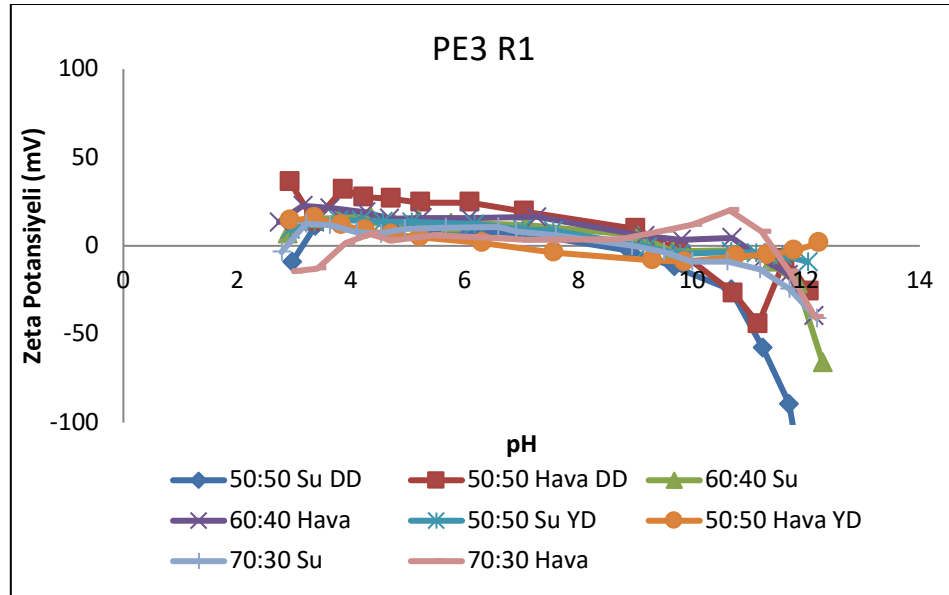
PE1R2 membranlarına ait zeta potansiyeli ölçümleri Şekil 4.23’de sunulmaktadır.



Şekil 4.23: PE1 R2 membranlara ait zetapotansiyeli grafikleri.

PE1 R2 ile üretilen membranlarda hava ile soğutulan 50:50 hava, 60:40 hava membranları pH 3-12 arasında pozitif özellik gösterirken ticari numune 2 pH 6-10 aralığında pozitif özellik göstermiştir. PE1 R2 membranlarının pH 3-12 aralığında genel olarak yüzey yüklerinin negatif özellikte olduğunu göstermiştir.

PE3R1 membranlarına ait zeta potansiyeli ölçümleri Şekil 4.24'de sunulmaktadır.

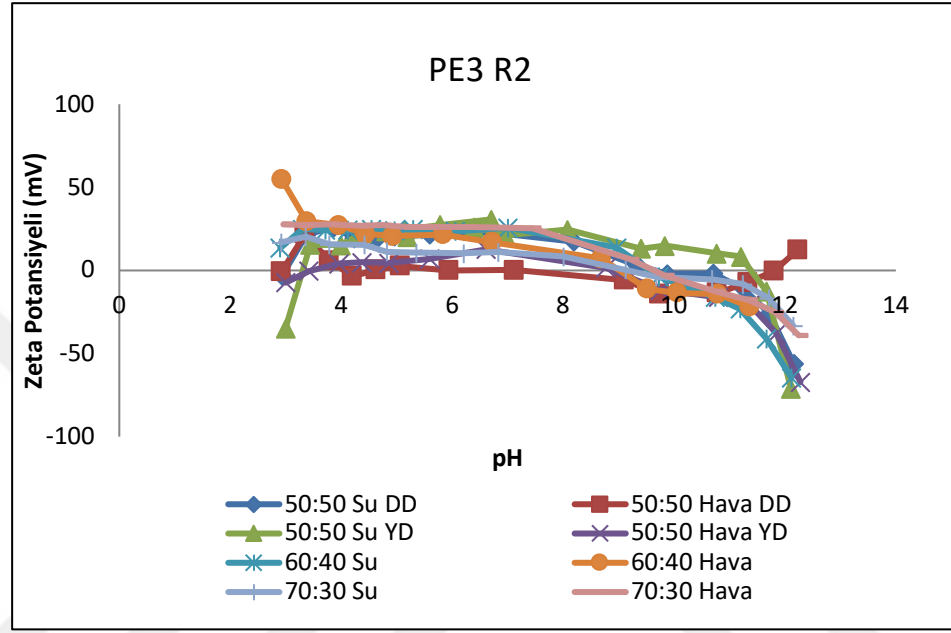


Şekil 4.24: PE3 R1 membranlara ait zeta potansiyeli grafikleri.



PE3 R1 membranlarına ait zeta potansiyeli ölçümleri bu membranların pH 3-9 aralığında pozitif yüklü olduğunu göstermektedir. pH 8 sonrası özellikle su ile soğutma uygulanan membranlarda negatif yüzey yüküne geçiş gözlemlenmektedir.

PE3 R2 membranlarına ait zeta potansiyeli ölçümleri Şekil 4.25’de sunulmaktadır.



Şekil 4.25: PE3 R2 membranlara ait zeta potansiyeli grafikleri.

PE3 R2 membranlara gerçekleştirilen zeta potansiyel ölçümleri üretilmiş olan membranların pH 3-9,5 aralığında yüzey yüklerinin pozitif olduğunu göstermiştir pH 9,5 sonrası membranların yüzey yükleri negatif değer almaya başlamıştır. 50:50 Hava YD membranı pH 11 sonrası negatif yüzey özelliği göstermiştir.

### 4.3. İyon Değişim Membranlarının Performanslarının Belirlenmesi

Bu amaçla tekstil atıksularının membran konsantreleri ile çalışılmıştır. Eriyik çekme yöntemi ile üretilen membranların performanslarını belirlemek için oluşturulan hücrelerle yapılan performans testlerinde, Tablo 4.27’de sunulan iletkenlik değerleri kaydedilmiştir.

Tablo 4.27: Üretilen heterojen membranlar ile elde edilen iletkenlik değerleri.

| Membran numuneleri | pH   | İletkenlik                   |
|--------------------|------|------------------------------|
| Başlangıç          | 3,08 | 488 $\mu\text{S}/\text{cm}$  |
| PE3 R1 50:50 su    | 3,32 | 540 $\mu\text{S}/\text{cm}$  |
| PE3 R1 60:40       | 2,49 | 1534 $\mu\text{S}/\text{cm}$ |
| PE3 R1 70:30       | 2,97 | 765 $\mu\text{S}/\text{cm}$  |
| PE3 R2 50:50       | 2,56 | 1334 $\mu\text{S}/\text{cm}$ |
| Numune 1           | 2,52 | 2070 $\mu\text{S}/\text{cm}$ |

Performans deneyleri Numune 1 ile PE3 R1 reçine ile üretilen 50:50, 40:60, 30:70 konsantrasyonlu membranlar ve PE3 R2 ile üretilen 50:50 konsantrasyonlu membran ile gerçekleştirilmiştir. PE3 R1 60:40 ve P3 R2 50:50 membranlar ve ticari numune olan Numune 1 yakın performanslar göstermiştir.

#### 4.3.1. Elektrokoagülasyon ve Elektrofenton Optimizasyonu

Tekstil konsantreleri ile optimizasyon çalışmalarında elde edilen giderim verimlerine ait grafikler Ekler bölümünde EK D kısmında sunulmuştur. EC prosesi için saptanan optimum şartların sayısal değerleri ise Tablo 4.28’de sunulmaktadır.

Tablo 4.28: Optimum EC şartları.

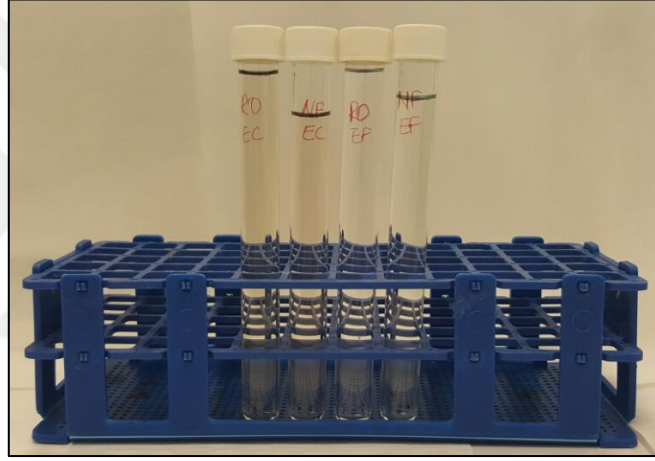
| Parametre                | Değer                         |
|--------------------------|-------------------------------|
| Zaman                    | 90 dk                         |
| Elektrotlar arası mesafe | 10 mm                         |
| Akım şiddeti             | 34,72 $\text{mA}/\text{cm}^2$ |
| pH                       | 6,7                           |

EF prosesi için optimizasyon çalışmalarında elde edilen giderim verimlerine ait grafikler Ekler bölümünde EK D kısmında sunulmuştur. Optimum şartların sayısal değerleri ise Tablo 4.29’da sunulmaktadır.

Tablo 4.29: Optimum EF şartları.

| Parametre                | Değer                    |
|--------------------------|--------------------------|
| Zaman                    | 60 dk                    |
| Elektrotlar arası mesafe | 10 mm                    |
| Akım şiddeti             | 64,02 mA/cm <sup>2</sup> |
| pH                       | 2,8                      |
| Peroksit konsantrasyonu  | 6 mL/L                   |

Elde edilen optimum şartlar altında arıtılan konsantrelere ait görüntüler Şekil 4.26’da sunulmaktadır. Elde edilen giderim verimleri ise Tablo 4.30’da sunulmaktadır.



Şekil 4.26: RO ve NF Konsantrelerinde EC ve EF prosesleri ile elde edilen renk giderimi.

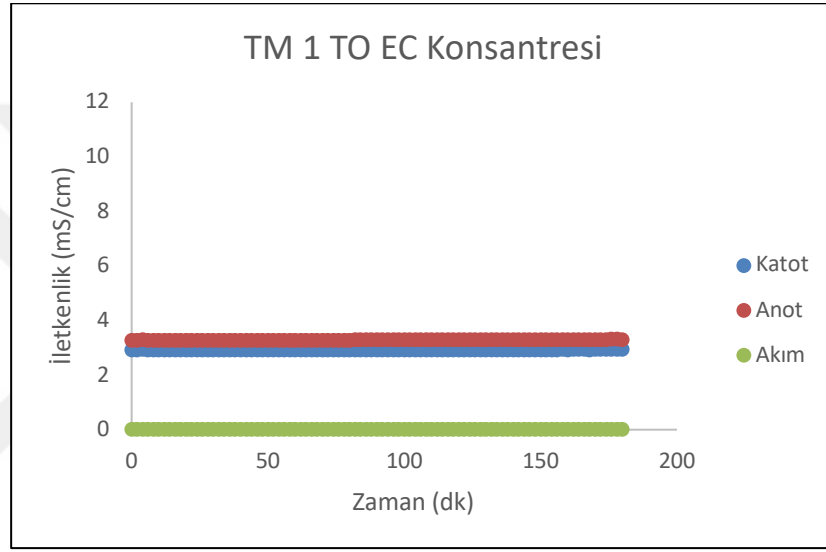
Tablo 4.30: EC ve EF prosesleri ile membran konsantrelerinde elde edilen KOİ giderimleri.

| Elektrokoagülasyon |           |       |             |
|--------------------|-----------|-------|-------------|
| KOİ                | Başlangıç | Final | Giderim (%) |
| NF Konsantresi     | 867       | 179   | 79          |
| TO Konsantresi     | 880       | 262   | 70          |
| Elektrofenton      |           |       |             |
| NF Konsantresi     | 867       | 135   | 84          |
| TO Konsantresi     | 880       | 192   | 78          |

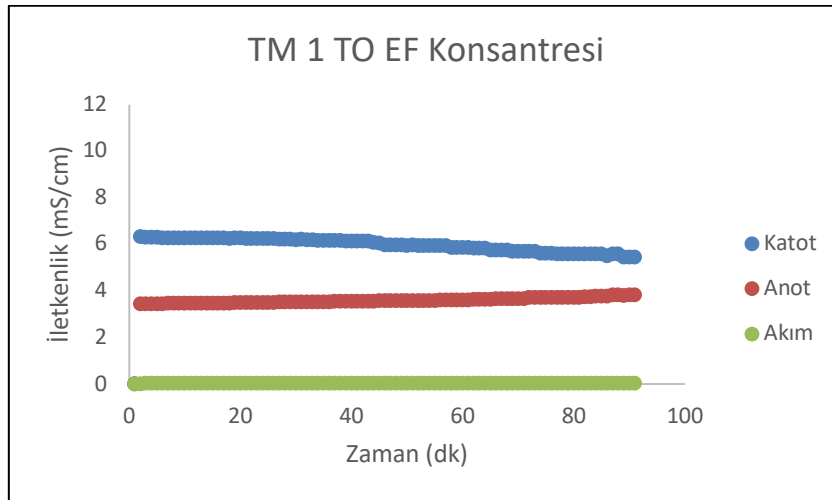
### 4.3.2. İyon Değişim Membranlarının Performanslarının Ön Arıtmalı Konsantreler ile Belirlenmesi

#### 4.3.2.1. Heterojen membranların performanslarının ön arıtmalı konsantreler ile belirlenmesi

TO EC konsantresinin ticari membran TM1 ile elde edilen iletkenlik-zaman grafiği Şekil 4.27’de, TO EF konsantresi ile elde edilen iletkenlik zaman grafiği ise Şekil 4.28’de sunulmaktadır.



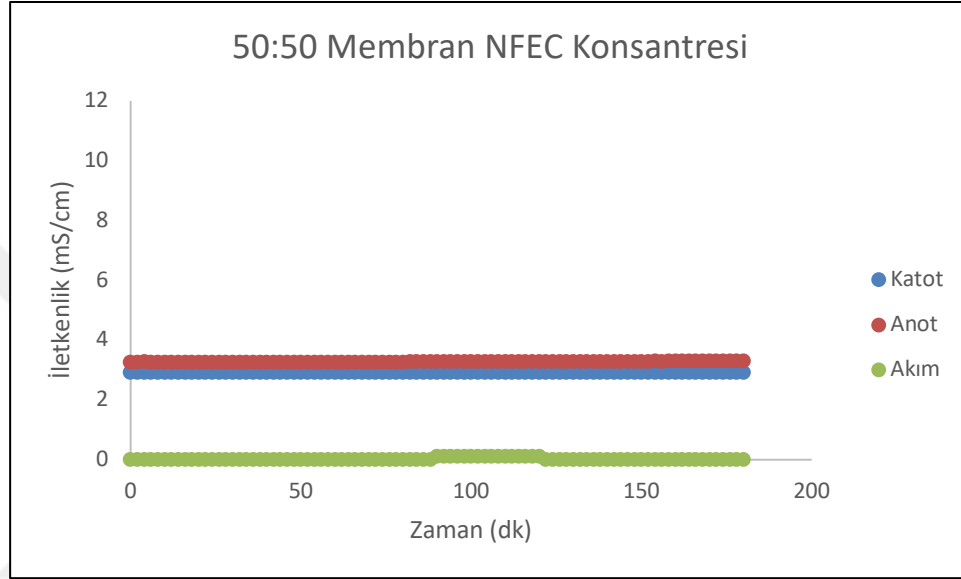
Şekil 4.27: TO EC konsantresinin Ticari Membran 1 ile elde edilen iletkenlik-zaman grafiği.



Şekil 4.28: TO EF konsantresinin Ticari Membran 1 ile elde edilen iletkenlik-zaman grafiği.

Elde edilen veriler EC ön arıtmalı TO membran konsantrelerinden ticari membran TM1 ile iyon gideriminin gerçekleştirilemediğini göstermiştir. Ticari Membran TM1'in TO EF konsantresi ile işletimi sonrası ise anotta çözeltinin iletkenliğinin 3,44 mS/cm'den 3,81 mS/cm'ye yükseldiği görülmüştür.

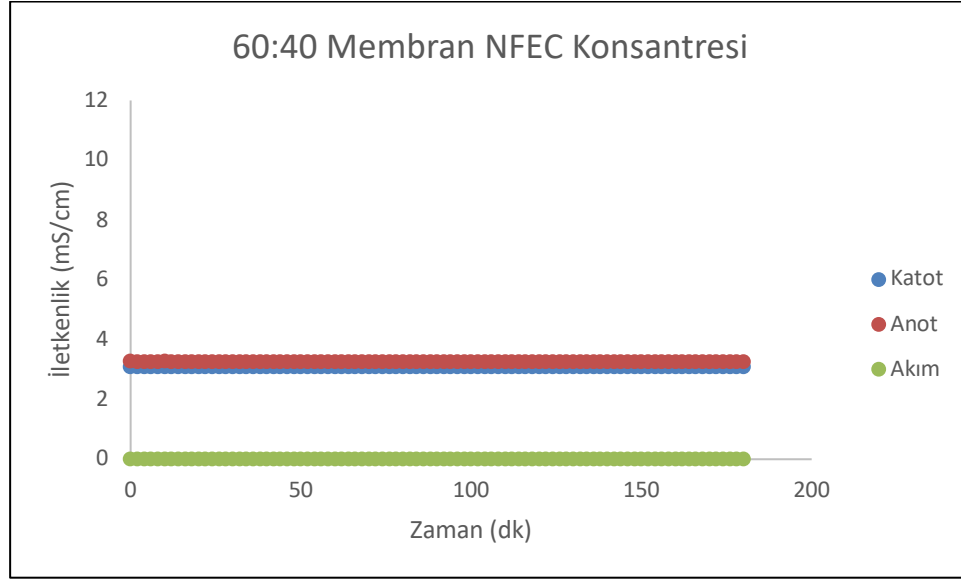
PE3 R1 50:50 membran ile elde edilen iletkenlik-zaman grafiği Şekil 4.29'da sunulmaktadır.



Şekil 4.29: NF EC konsantresinin PE3 R1 50:50 membran ile elde edilen iletkenlik-zaman grafiği.

NF EC Membran konsantresinin PE3 R1 50:50 membran ile iyon giderimi çalışmasında gerçekleştirilen işletim süresince katot ve anot haznelerinde bulunan çözeltilerin iletkenlik değerinde herhangi bir değişim gözlemlenmemiştir.

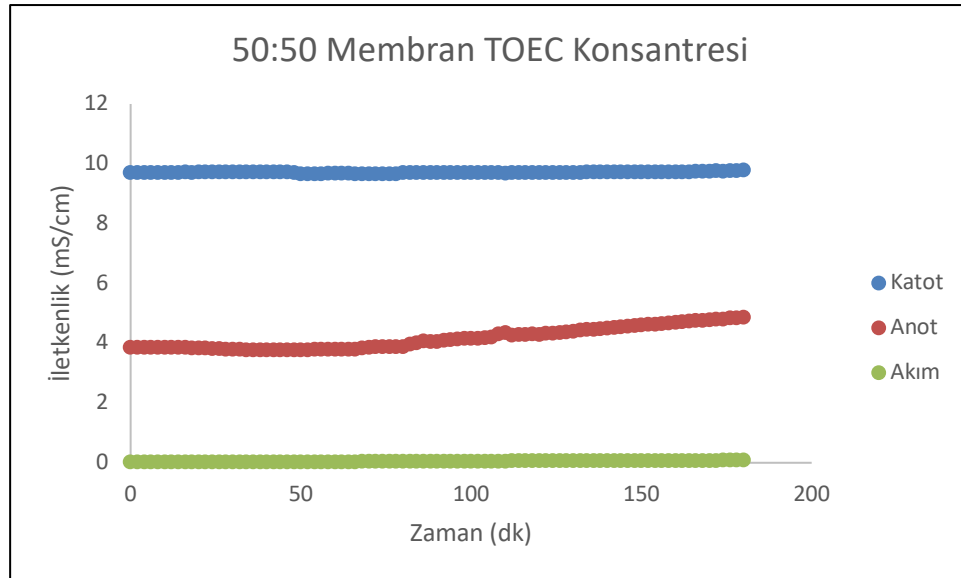
PE3 R1 60:40 membran ile NF EC konsantresi ile elde edilen iletkenlik-zaman grafiği Şekil 4.30'da sunulmaktadır.



Şekil 4.30: NF EC konsantresinin PE3 R1 60:40 membran ile elde edilen iletkenlik-zaman grafiği.

Elde edilen değerler NF EC konsantresinden PE3 R1 60:40 membran ile iyon gideriminin gerçekleşmediğini göstermiştir.

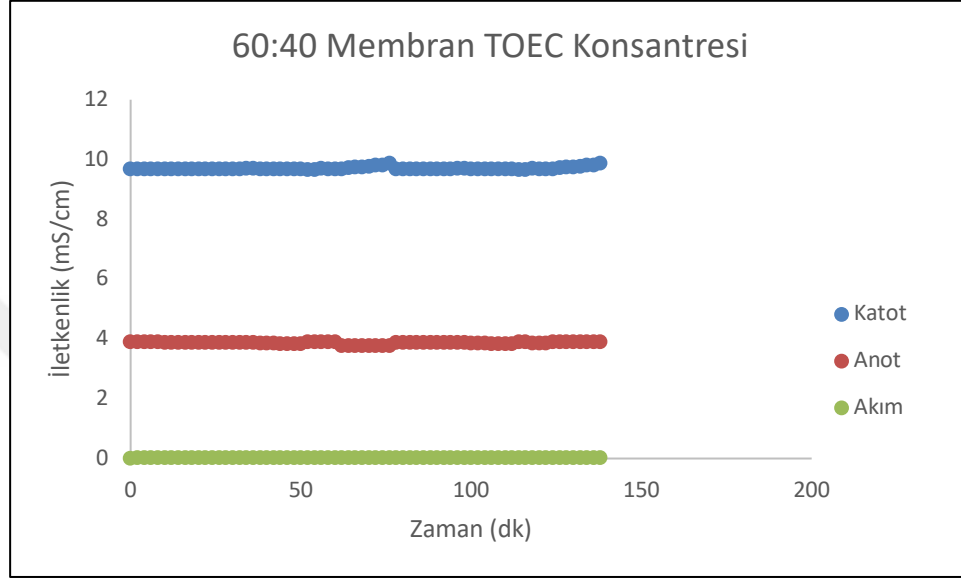
TO EC konsantresinin PE3 R1 50:50 membran ile elde edilen iletkenlik-zaman grafiği Şekil 4.31’de sunulmaktadır.



Şekil 4.31: TO EC konsantresinin PE3 R1 50:50 membran ile elde edilen iletkenlik-zaman grafiği.

Elde edilen değerler TO EC konsantresinden PE3 R1 50:50 membran ile iyon giderimi gerçekleştirildiğini göstermiştir. Anotta başlangıçta 3,88 mS/cm dolaylarında olan iletkenliğin yaklaşık olarak 4,88 mS/cm mertebesine çıktığı gözlemlenmiştir.

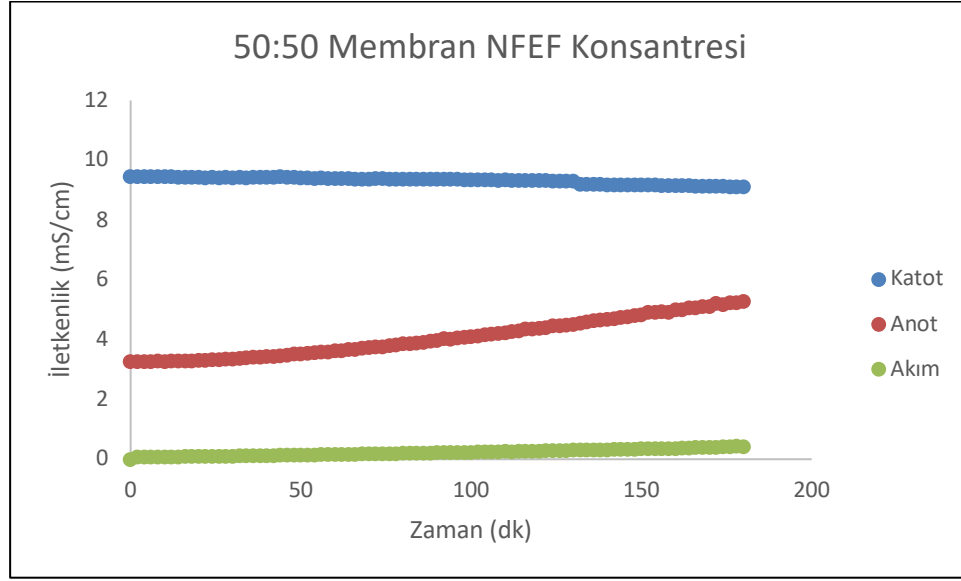
PE3 R1 60:40 membran ile elde edilen TO EC membran konsantresine ait iletkenlik-zaman grafiği şekil 4.32’de sunulmaktadır.



şekil 4.32: TO EC konsantresinin PE3 R1 60:40 membran ile elde edilen iletkenlik-zaman grafiği.

Elde edilen değerler TO EC konsantresinden PE3 R1 60:40 membran ile iyon gideriminin gerçekleşmediğini göstermiştir.

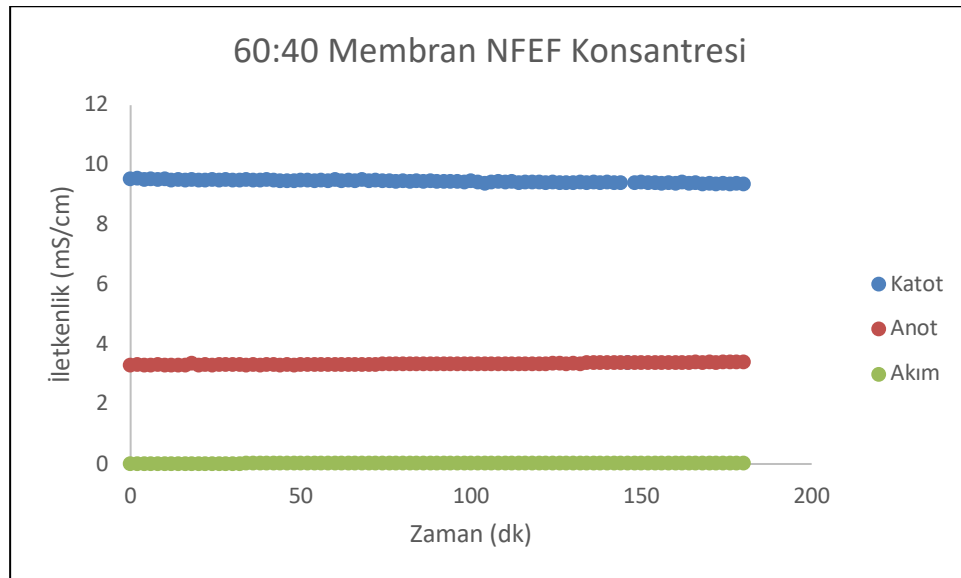
PE3 R1 50:50 membran ile elde edilen NFEF membran konsantresine ait iletkenlik-zaman grafiği şekil 4.33’de sunulmaktadır.



Şekil 4.33: NF EF konsantresinin PE3 R1 50:50 membran ile elde edilen iletkenlik-zaman grafiği.

Elde edilen değerler NFEF konsantresinden PE3 R1 50:50 membran ile iyon giderimi gerçekleştirildiğini göstermiştir. Anotta başlangıçta 3 mS/cm dolaylarında olan iletkenliğin yaklaşık olarak 6 mS/cm mertebesine çıktığı gözlemlenmiştir.

PE3 R1 60:40 membran ile elde edilen NFEF membran konsantresine ait iletkenlik-zaman grafiği Şekil 4.34’de sunulmaktadır.

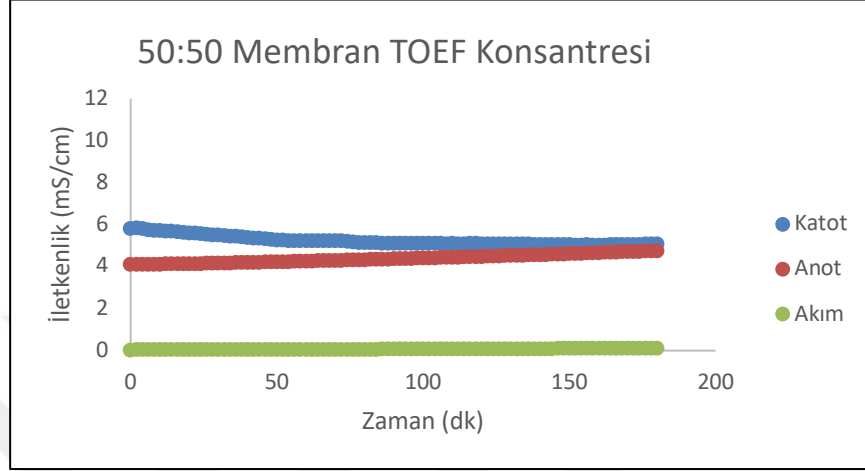


Şekil 4.34: NF EF konsantresinin PE3 R1 60:40 membran ile elde edilen iletkenlik-zaman grafiği.



Elde edilen değerler NF EF konsantresinden PE3 R1 60:40 membran ile iyon gideriminin gerçekleşmediğini göstermiştir.

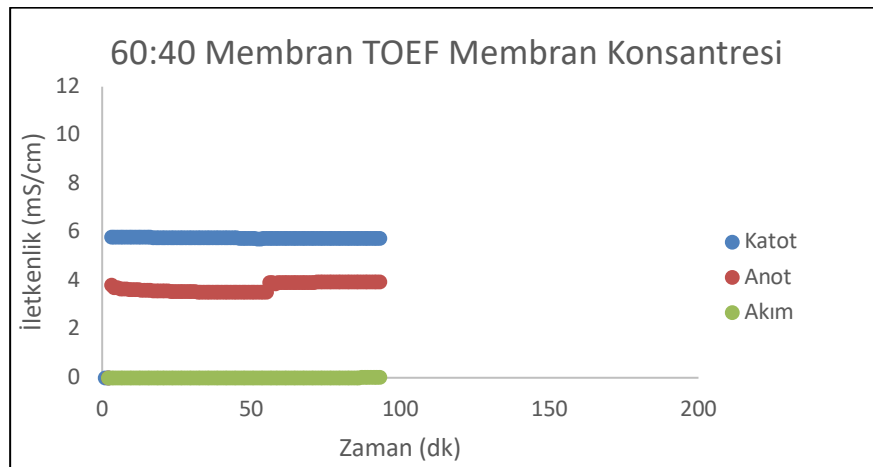
PE3 R1 50:50 membran ile elde edilen TOEF membran konsantresine ait iletkenlik-zaman grafiği şekil 4.35’de sunulmaktadır.



şekil 4.35:TO EF konsantresinin PE3 R2 50:50 membran ile elde edilen iletkenlik-zaman grafiği.

Elde edilen değerler TOEF konsantresinden PE3 R1 60:40 membran ile iyon giderimi gerçekleştirildiğini göstermiştir. Anotta başlangıçta 4 mS/cm dolaylarında olan iletkenliğin yaklaşık olarak 5,5 mS/cm mertebesine çıktığı gözlemlenmiştir.

PE3 R1 60:40 membran ile elde edilen TOEF membran konsantresine ait iletkenlik-zaman grafiği şekil 4.36’de sunulmaktadır.



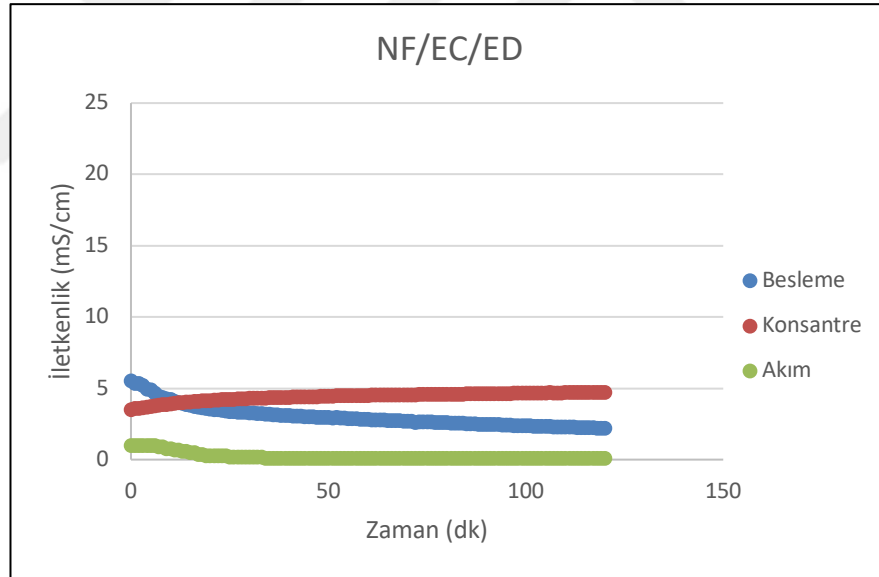
şekil 4.36:TO EF konsantresinin PE3 R1 50:50 membran ile elde edilen iletkenlik-zaman grafiği.

Elde edilen değerler NF EF konsantresinden PE3 R1 60:40 membran ile iyon gideriminin gerçekleşmediğini göstermiştir. Bir saatlik işletimin sonlarına doğru iletkenlik değerinde bir artma gözlemlenmiştir fakat bu durumun membrandan ayrılarak anot haznesine çözünen iyon değiştirici reçine kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

#### 4.3.2.2. Ticari membranların performanslarının n arıtımlı konsantreler ile belirlenmesi

Ticari membranların performanslarını belirlemek için tekstil atıksuyunun membran konsantresi ile çalışılmıştır. PCCell membranlar ve Fuji Filme ait Tip 1 ve Tip 2 Membranlar ile çalışılmıştır.

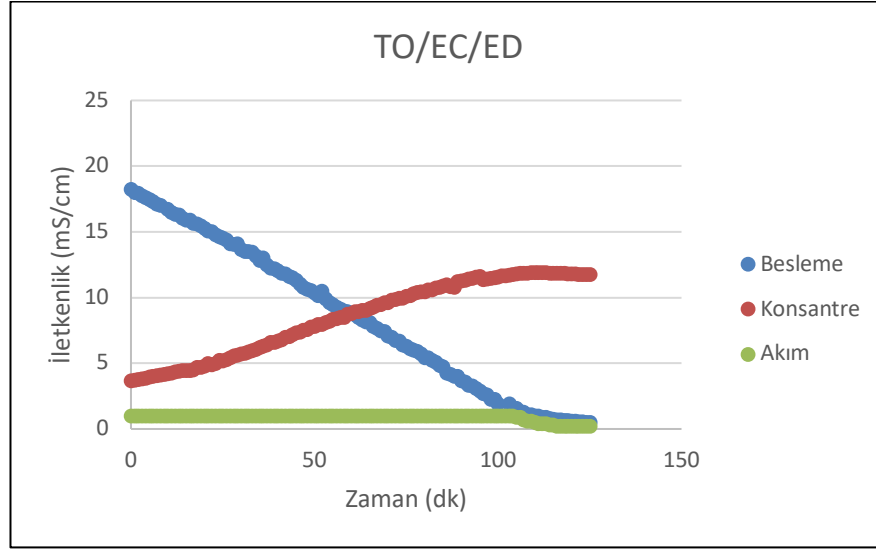
NF membran konsantresi EC ile ön işleme tabi tutulduktan sonra ED prosesi ile gerçekleştirilen iyon giderimi şekil 4.37’de gösterilmektedir.



şekil 4.37: NF/EC konsantresinin PCCell membranlar ile elde edilen iletkenlik-zaman grafiği.

NF/EC konsantresinin 120 dk’lık işletimi sonucunda başlangıçta 5,54 mS/cm olan iletkenlik değerinin 2 mS/cm mertebesine dşmştir.

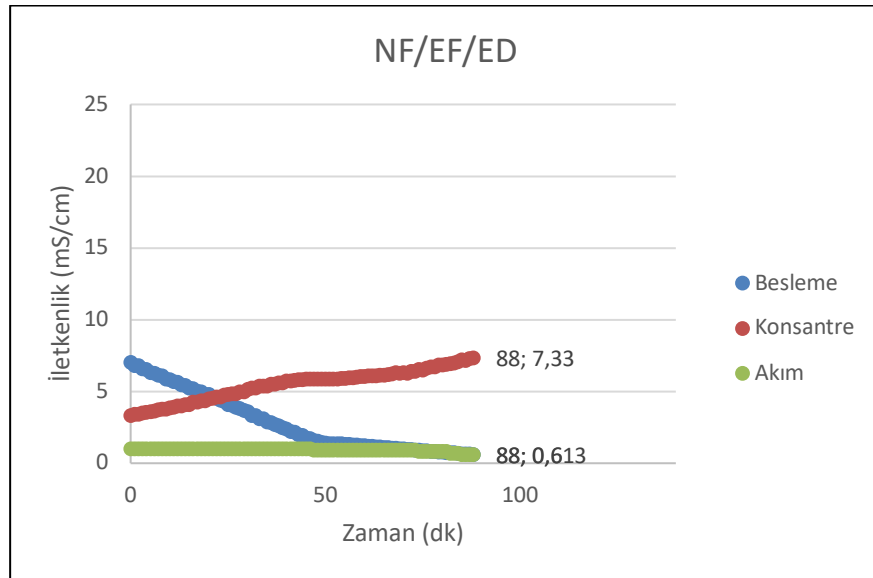
TO membran konsantresi EC ile ön işleme tabi tutulduktan sonra ED prosesi ile gerçekleştirilen iyon giderimi şekil 4.38’de gösterilmektedir.



Şekil 4.38: TO/EC konsantresinin PCCell membranlar ile elde edilen iletkenlik-zaman grafiği.

TO/EC konsantresinin 120 dk'lık işletimi sonucunda başlangıçta 18 mS/cm olan iletkenlik değerinin 200  $\mu$ S/cm mertebesine düşerek etkin bir iyon giderimi elde edilmiştir.

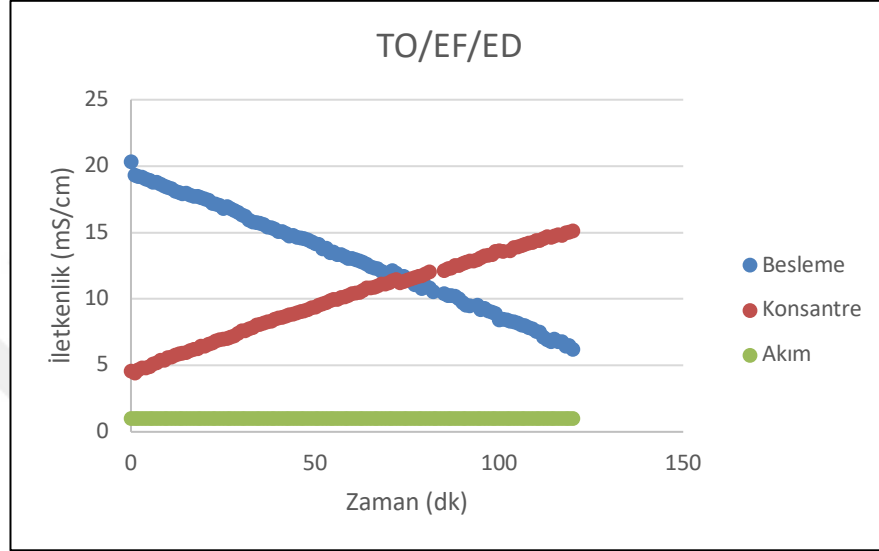
NF membran konsantresi EF ile ön işleme tabi tutulduktan sonra ED prosesi ile gerçekleştirilen iyon giderimi Şekil 4.39'da gösterilmektedir.



Şekil 4.39: NF/EF konsantresinin PCCell membranlar ile elde edilen iletkenlik-zaman grafiği.

NF/EC konsantresinin 120 dk'lık işletimi sonucunda başlangıçta 7 mS/cm olan iletkenlik değerinin 700  $\mu$ S/cm mertebesine düşerek etkin bir iyon giderimi elde edilmiştir.

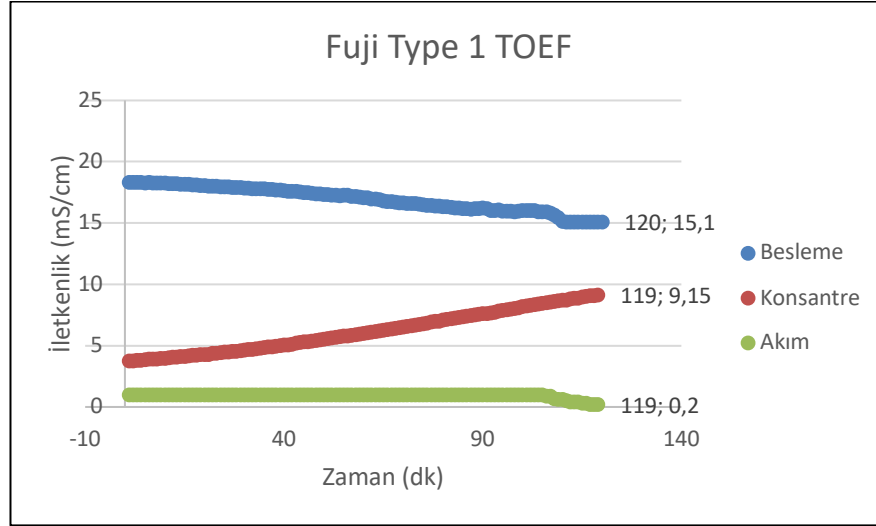
TO membran konsantresi EF ile ön işleme tabi tutulduktan sonra ED prosesi ile gerçekleştirilen iyon giderimi Şekil 4.40'da gösterilmektedir.



Şekil 4.40: TO/EF konsantresinin PCCell membranlar ile elde edilen iletkenlik-zaman grafiği.

TO/EF konsantresinin 120 dk'lık işletimi sonucunda başlangıçta 20 mS/cm olan iletkenlik değerinin 6.5 mS/cm mertebesine düştüğü gözlemlenmiştir. Bu iyon giderim değeri PCCell membranlar ile TO konsantresinden iyon giderimi açısından EC ile ön arıtımı gerçekleştirilen konsantreye göre daha düşük bir iyon giderim verimi anlamına gelmektedir.

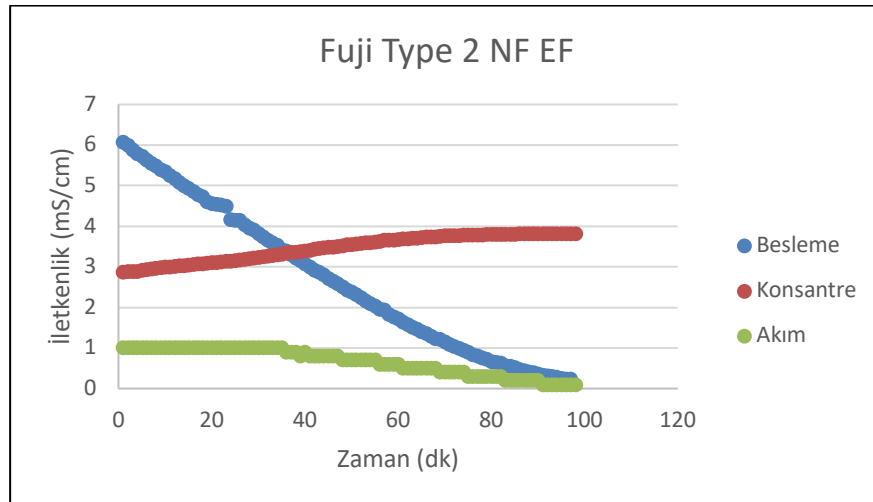
Membran konsantrelerinden iyon giderimi için tek yüklü iyonların gideriminde etkin olan Type1 ve çift yüklü iyonların gideriminde etkin olan Type 2 türleri olan Fuji Film membranlarla çalışılmıştır. Bu amaçla gerçekleştirilen iyon giderimlerine ait grafikler aşağıda sunulmaktadır. Gerçekleştirilen çalışmalardan Fuji TYPE 1 membran ile EF ön arıtmalı TO membran konsantresine ait iyon giderimi Şekil 4.41'de sunulmaktadır.



Şekil 4.41: TO/EF konsantresinin Fuji Type 1 membranlar ile elde edilen iletkenlik-zaman grafiği.

TO/EF konsantresinin Fuji Type 1 membran ile 120 dk'lık işletimi sonucunda başlangıçta 19 mS/cm olan iletkenlik değerinin 15 mS/cm mertebesine düştüğü gözlemlenmiştir. Bu iyon giderim değeri EF ile ön arıtımı gerçekleştirilen TO konsantresinden PCCell membranlar ile gözlemlenen iyon giderim verimine göre daha düşük bir değer elde edildiği anlamına gelmektedir.

NF membran konsantresi EF ile ön işleme tabi tutulduktan sonra Fuji Film Type 2 membran ile gerçekleştirilen iyon giderimi Şekil 4.42'de gösterilmektedir.



Şekil 4.42: NF/EF konsantresinin Fuji Type 2 membranlar ile elde edilen iletkenlik-zaman grafiği.

NF/EF konsantresinin 120 dk'lık işletimi sonucunda başlangıçta 6 mS/cm olan iletkenlik değerinin 750 µ/cm mertebesine düştüğü gözlemlenmiştir. Bu iyon giderim değeri PCCell membranlar ile NF konsantresinden iyon giderimi açısından EC ile ön arıtımı gerçekleştirilen konsantrenin iyon giderimine benzer bir iyon giderim verimi anlamına gelmektedir.

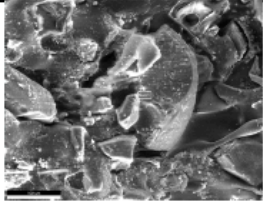
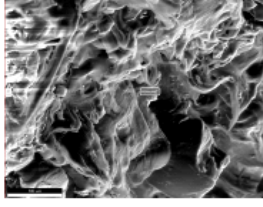
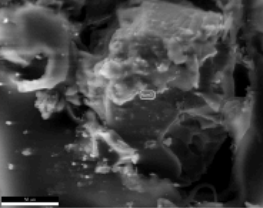
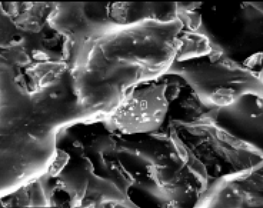
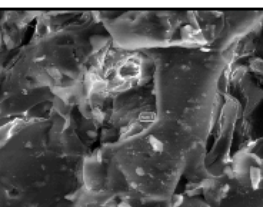
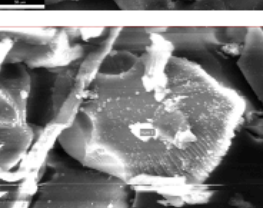
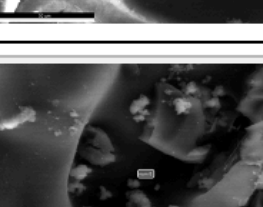
#### **4.4. İyon Değişim Membranlarının Kirlenme Eğilimlerinin İncelenmesi**

##### **4.4.1. FTIR Spektrumları ve Temas Açısı Ölçümleri**

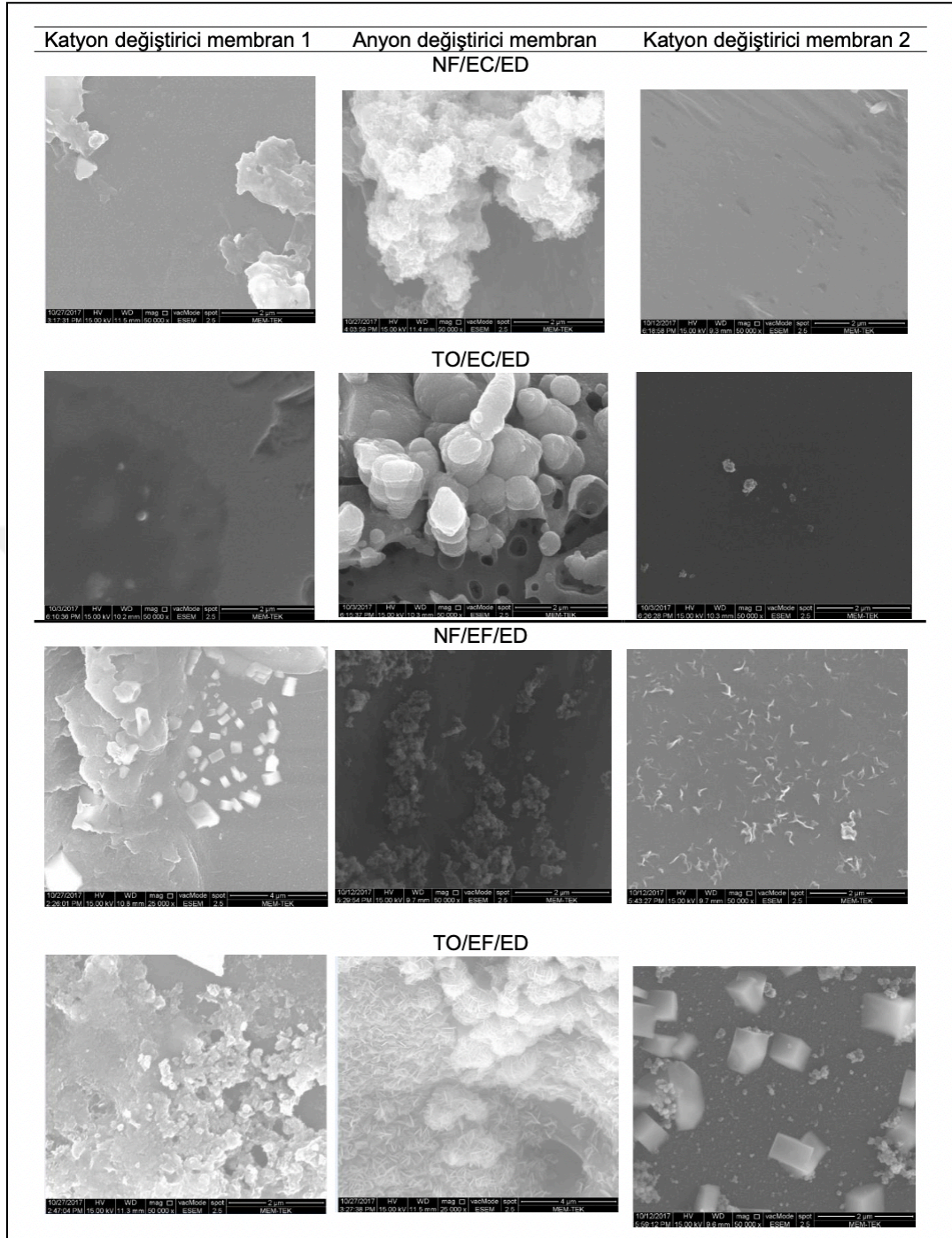
Konsantre arıtımı gerçekleştirilen membranların FTIR spektrumları alınarak kullanılmamış membranlara göre yüzeylerinde bulunan grupların değişimi incelenmiştir. Elde edilen FTIR spektrumları Ekler bölümünde EK F kısmında sunulmaktadır.

##### **4.4.2. SEM EDX**

NF ve TO konsantrelerine EC ve EF ön arıtımının ardından ED prosesi uygulanmıştır. ED prosesi sırasında İDM'lerde oluşan inorganik kirliliklerin tespiti SEM EDX analizleri ile gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen SEM EDX analizlerine ait sonuçlar Ekler bölümünde EK G kısmında sunulmaktadır. En ciddi kirlilik ADM'lerde gözlemlenmiştir. Neredeyse tüm membranların yüzeyinde inorganik kirlilik olan kristal yapılar olduğu görülmüştür. Analizler sonucu ED membranlarının yüzeyinde EC ve EF prosesleri kaynaklı Fe ve Al birikimleri olduğu saptanmıştır. Membranlarda en yüksek birikim ile kirliliğe neden olan inorganikler NF konsantresi ve RO konsantreleri için ADM membranlarında Cl ve KDM membranları için S olarak saptanmıştır. Heterojen membranlara ait SEM görüntüleri Şekil 4.43'de, ticari membranlara ait SEM görüntüleri ise Şekil 4.44'de sunulmaktadır.

| SEM EDX    |                                                                                      |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| TOEF 50:50 |    |
| TOEF 60:40 |    |
| NFEF 50:50 |    |
| NFEF 60:40 |   |
| TOEC 50:50 |  |
| TOEC 60:40 |  |
| NFEC 50:50 |  |

Şekil 4.43: Konsantre arıtımında kullanılan PE3 R2 membranlara ait SEM görüntüleri.



şekil 4.44: Konsantre arıtımında kullanılan PCCell membranlara ait SEM görüntüleri.

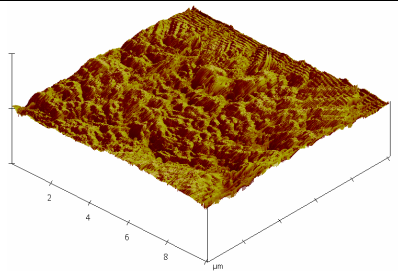
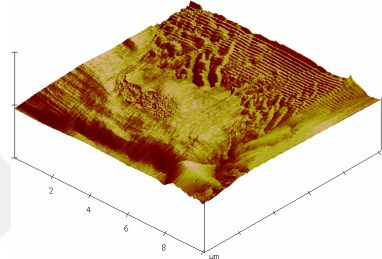
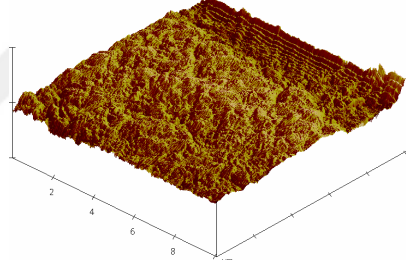
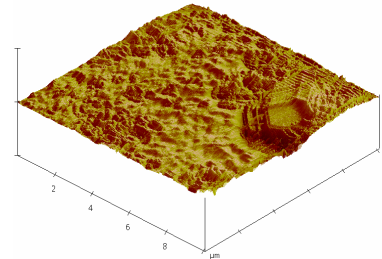
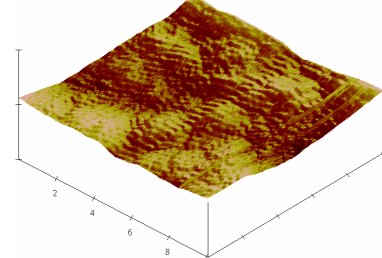
#### 4.4.3. AFM Analizleri

ED prosesi sırasında İDM'lerde oluşan biyolojik kirliliklerin tespiti AFM analizleri ile gerekleştirilmiştir.



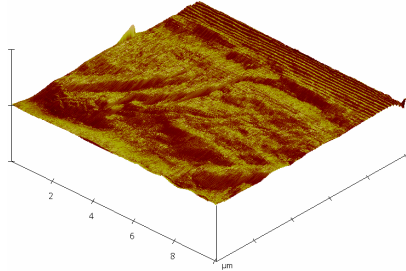
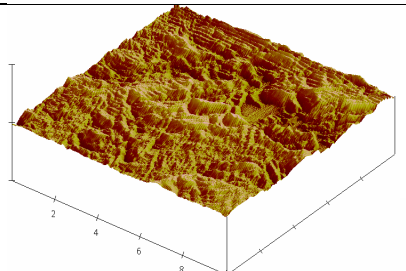
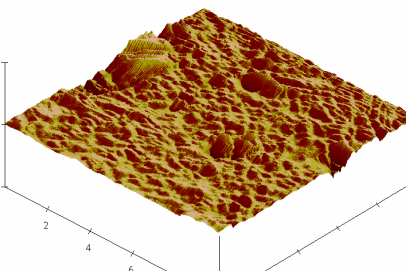
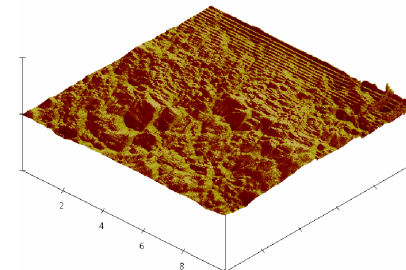
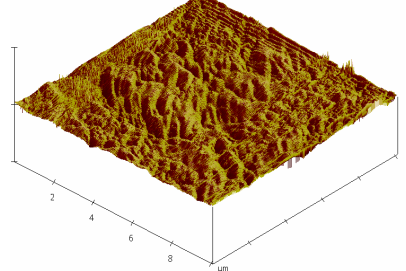
Membran konsantreleri ile kullanılan PE3 R1 50:50 membranlara ait AFM analizleri Tablo 4.31’de sunulmaktadır.

Tablo 4.31: PE3 R1 50:50 membranlara ait AFM analizleri.

| PE3 R1 50:50 |                                                                                                                                                                                                |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 50:50 bare   |  <p> <math>\times</math> 2.000 <math>\mu\text{m}/\text{div}</math><br/> <math>z</math> 1661.228 nm/div </p>   |
| ECNF         |  <p> <math>\times</math> 2.000 <math>\mu\text{m}/\text{div}</math><br/> <math>z</math> 942.883 nm/div </p>   |
| ECRO         |  <p> <math>\times</math> 2.000 <math>\mu\text{m}/\text{div}</math><br/> <math>z</math> 985.255 nm/div </p>  |
| EFNF         |  <p> <math>\times</math> 2.000 <math>\mu\text{m}/\text{div}</math><br/> <math>z</math> 1540.999 nm/div </p> |
| EFRO         |  <p> <math>\times</math> 2.000 <math>\mu\text{m}/\text{div}</math><br/> <math>z</math> 3519.945 nm/div </p> |

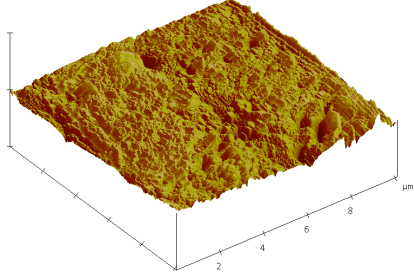
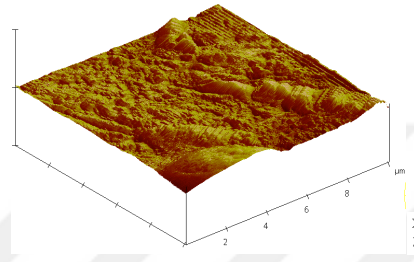
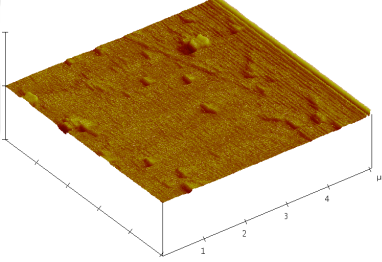
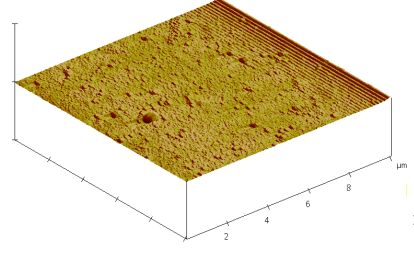
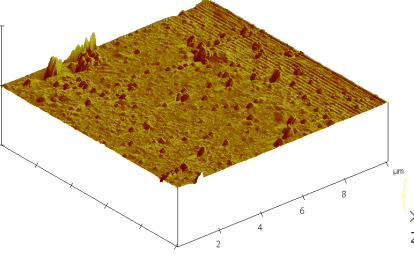
Membran konsantreleri ile kullanılan PE3 R1 60:40 membranlara ait AFM analizleri Tablo 4.32’de sunulmaktadır.

Tablo 4.32: PE3 R1 60:40 membranlara ait AFM analizleri.

| PE3 R1 60:40 |                                                                                                                                                                                                |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 60:40        |  <p> <math>\times</math> 2.000 <math>\mu\text{m}/\text{div}</math><br/> <math>z</math> 330.289 nm/div </p>    |
| ECNF         |  <p> <math>\times</math> 2.000 <math>\mu\text{m}/\text{div}</math><br/> <math>z</math> 1518.522 nm/div </p>   |
| ECRO         |  <p> <math>\times</math> 2.000 <math>\mu\text{m}/\text{div}</math><br/> <math>z</math> 985.254 nm/div </p>   |
| EFNF         |  <p> <math>\times</math> 2.000 <math>\mu\text{m}/\text{div}</math><br/> <math>z</math> 1661.228 nm/div </p> |
| EFRO         |  <p> <math>\times</math> 2.000 <math>\mu\text{m}/\text{div}</math><br/> <math>z</math> 1046.185 nm/div </p> |

Membran konsantreleri ile kullanılan PCCell membranlara ait AFM analizleri Tablo 4.33’de sunulmaktadır.

Tablo 4.33: NF/EC konsantreleri ile kullanılan PCCell Membranlara ait AFM analizleri.

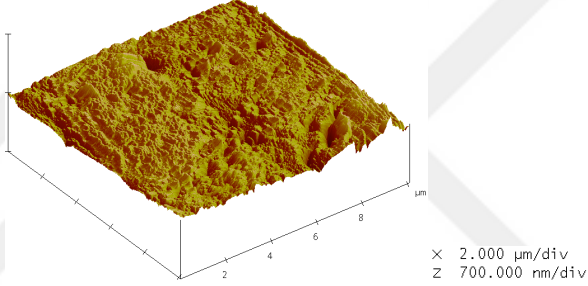
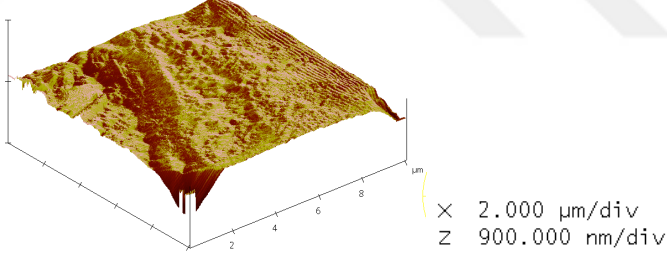
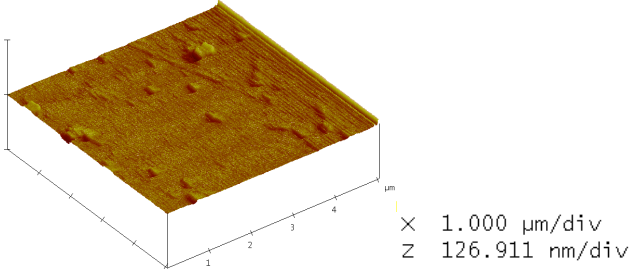
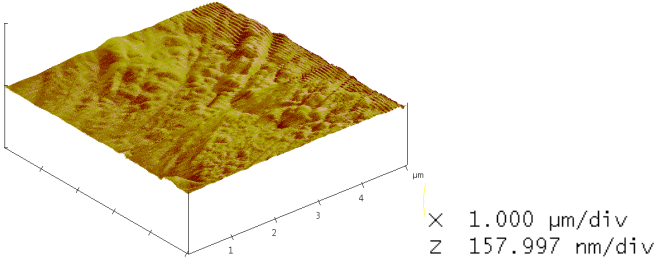
| PCCell         |                                                                                                                                                                                                 |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ADM            |  <p> <math>\times</math> 2.000 <math>\mu\text{m}/\text{div}</math><br/> <math>z</math> 700.000 nm/div </p>    |
| NF/EC/<br>ADM  |  <p> <math>\times</math> 2.000 <math>\mu\text{m}/\text{div}</math><br/> <math>z</math> 1753.845 nm/div </p>   |
| KDM            |  <p> <math>\times</math> 1.000 <math>\mu\text{m}/\text{div}</math><br/> <math>z</math> 126.911 nm/div </p>   |
| NF/EC/<br>KDM1 |  <p> <math>\times</math> 2.000 <math>\mu\text{m}/\text{div}</math><br/> <math>z</math> 1186.852 nm/div </p> |
| NF/EC/<br>KDM2 |  <p> <math>\times</math> 2.000 <math>\mu\text{m}/\text{div}</math><br/> <math>z</math> 325.145 nm/div </p>  |

Konsantrelerden iyon gideriminde kullanılmamış membranlar ve konsantrelerden iyon gideriminde kullanılan membranlarından alınan AFM görüntüleri; membranlar üzerinde biyolojik kirlenme olarak yorumlanacak bir

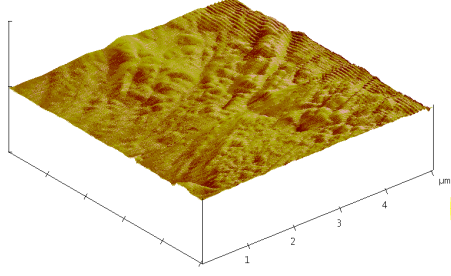
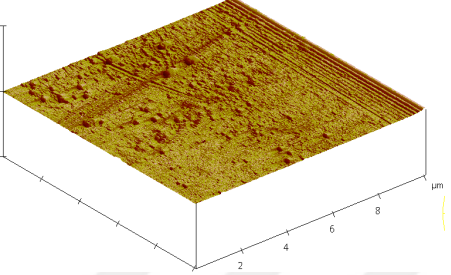
birikimin olmadığını göstermiştir. PCCell'e ait ADM membranı yapısal olarak pürüzlü bir yüzeye sahiptir. NF/EC konsantrelerinden iyon giderimi için kullanılan membranlarda ayrıca kristalize yapıların varlığı saptanmıştır. Aynı durum PCCell KDM membranlarında da görülmüştür. Kristalize yapıların alınan SEM görüntüleri ve EDX analizleri ile inorganik oluşumlar oldukları belirlenmiştir.

TO/EC konsantreleri ile kullanılan PCCell Membranlara ait AFM analizleri Tablo 4.34'de sunulmaktadır.

Tablo 4.34: TO/EC konsantreleri ile kullanılan PCCell Membranlara ait AFM analizleri.

| PCCell         |                                                                                                                                                              |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ADM            |  <p>X 2.000 <math>\mu\text{m}/\text{div}</math><br/>Z 700.000 nm/div</p>  |
| TO/EC/<br>ADM  |  <p>X 2.000 <math>\mu\text{m}/\text{div}</math><br/>Z 900.000 nm/div</p> |
| KDM            |  <p>X 1.000 <math>\mu\text{m}/\text{div}</math><br/>Z 126.911 nm/div</p> |
| TO/EC/<br>KDM1 |  <p>X 1.000 <math>\mu\text{m}/\text{div}</math><br/>Z 157.997 nm/div</p> |

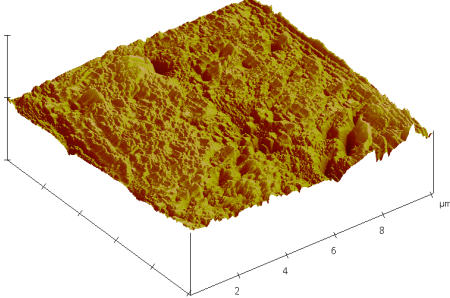
Tablo 4.31:Devam.

|                |                                                                                                                                                                                               |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| TO/EC/<br>KDM1 |  <p> <math>\times</math> 1.000 <math>\mu\text{m}/\text{div}</math><br/> <math>z</math> 157.997 nm/div </p>  |
| TO/EC/<br>KDM2 |  <p> <math>\times</math> 2.000 <math>\mu\text{m}/\text{div}</math><br/> <math>z</math> 1726.135 nm/div </p> |

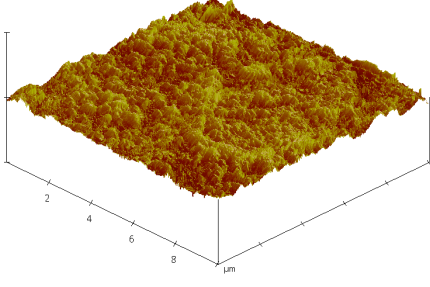
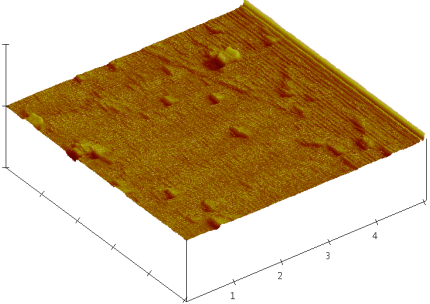
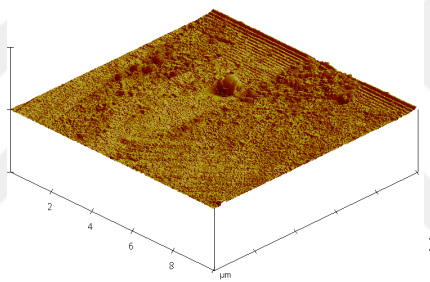
TO/EC konsantreleri ile kullanılan PCCell Membranlara ait AFM görüntüleri ADM ve KD1 membranlarında birtakım birikimler olduğunu göstermiştir. Membranlar üzerindeki bu birikimler ADM ve KDM membranlarda yüzeyin kaplanması şeklinde saptanmıştır. Alınan SEM görüntüleri ve EDX analizleri kaplanmaya inorganik kirliliğin neden olduğunu göstermiştir.

NF/EF konsantreleri ile kullanılan PCCell Membranlara ait AFM analizleri Tablo 4.35’de sunulmaktadır.

Tablo 4.35: NF/EF prosesinde kullanılan PCCell Membranlara ait AFM analizleri.

| PCCell |                                                                                                                                                                                                |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ADM    |  <p> <math>\times</math> 2.000 <math>\mu\text{m}/\text{div}</math><br/> <math>z</math> 700.000 nm/div </p> |

Tablo 4.32:Devam.

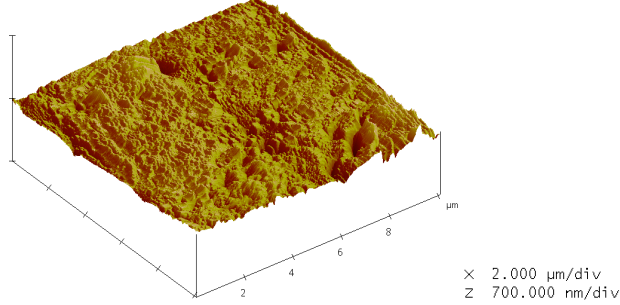
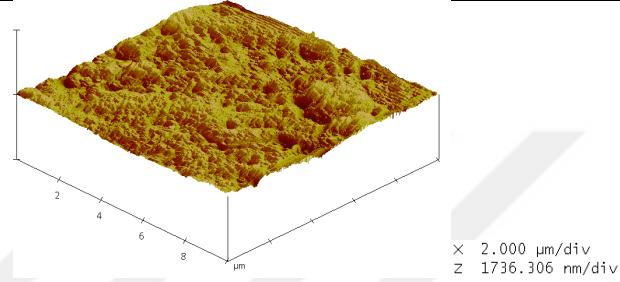
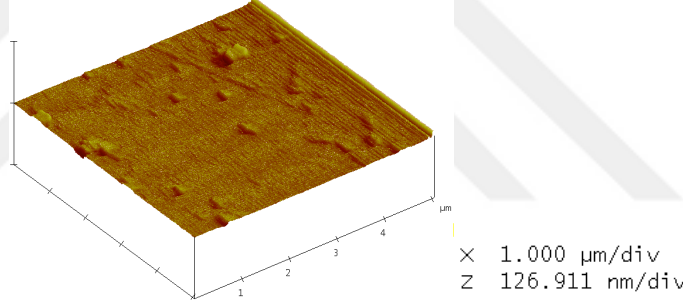
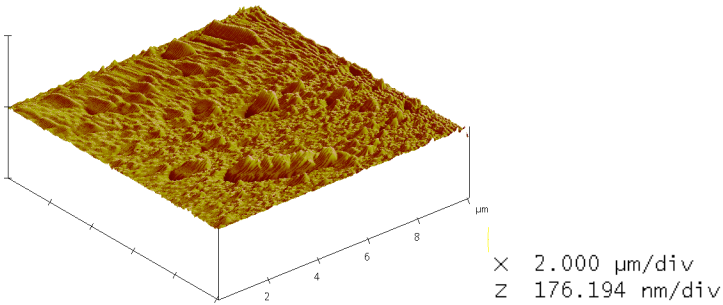
|                |                                                                                                                                |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| NF/EF/<br>ADM  |  <p>× 2.000 µm/div<br/>Z 959.777 nm/div</p>  |
| KDM            |  <p>× 1.000 µm/div<br/>Z 126.911 nm/div</p>  |
| NF/EF/<br>KDM1 |  <p>× 2.000 µm/div<br/>Z 907.270 nm/div</p> |

NF/EF konsantreleri ile kullanılan PCCell Membranlara ait AFM görüntüleri ADM ve KDM membranlarında herhangi bir biyolojik kirlilik oluşmadığını göstermektedir. Membranların yüzeylerindeki oluşumlar NF/EC ile arıtılan konsantrelerde kullanılan membranlara göre daha az birikimin olduğunu göstermektedir.

TO/EF konsantreleri ile kullanılan PCCell Membranlara ait AFM analizleri Tablo 4.36'da sunulmaktadır.



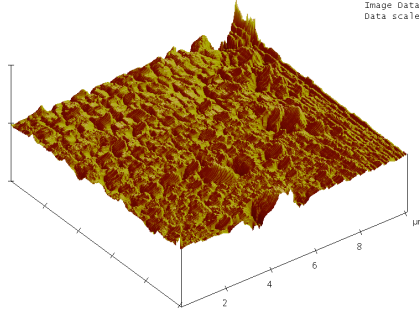
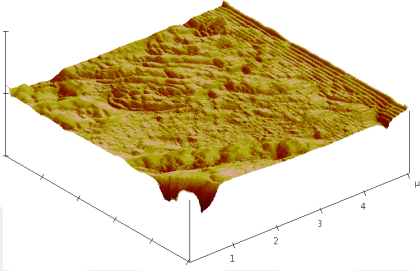
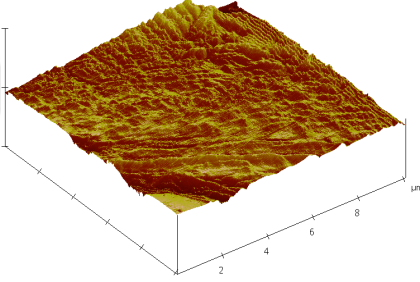
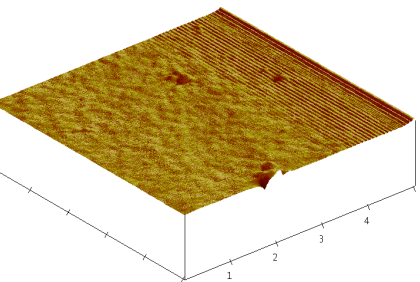
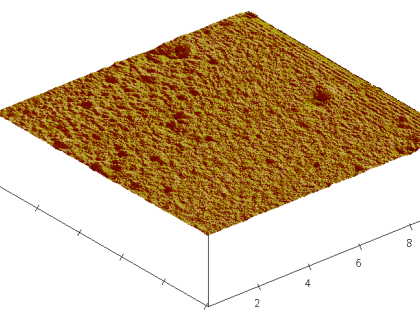
Tablo 4.36:TO/EF prosesinde kullanılan PCCell Membranlara ait AFM görüntüleri.

| PCCell         |                                                                                                                                 |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ADM            |  <p>× 2.000 µm/div<br/>Z 700.000 nm/div</p>   |
| TO/EF/<br>ADM  |  <p>× 2.000 µm/div<br/>Z 1736.306 nm/div</p>  |
| KDM            |  <p>× 1.000 µm/div<br/>Z 126.911 nm/div</p>  |
| TO/EF/<br>KDM1 |  <p>× 2.000 µm/div<br/>Z 176.194 nm/div</p> |

Gerçekleştirilen AFM analizleri ile KDM TO/EF konsantreleri ile kullanılan membranlarda birikimler gözlemlenmiştir. Bu birikimlerin kristalize yapıda olduğu alınan SEM görüntüleri ile saptanmıştır.

TO/EC konsantreleri ile kullanılan Fujifilm T1 Membranlara ait AFM analizleri Tablo 4.37’de sunulmaktadır.

Tablo 4.37: TO/EC prosesinde kullanılan Fujifilm T1 Membranlara ait AFM görüntüleri.

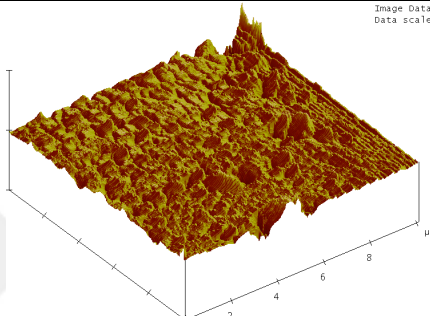
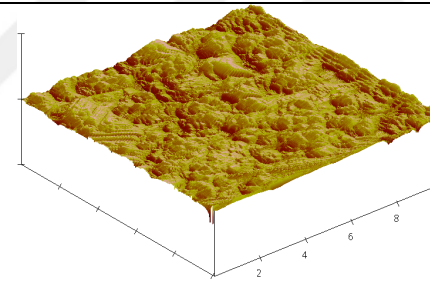
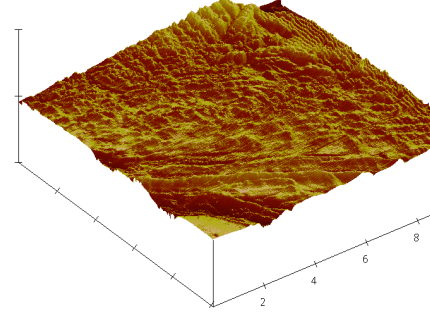
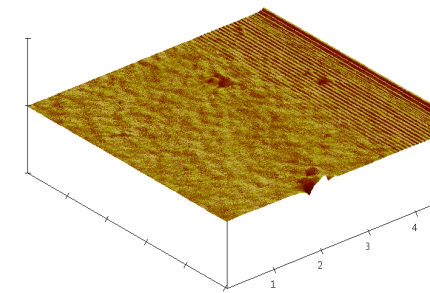
| Fujifilm T1    |                                                                                                                                                                                             |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ADM            |  <p>Image Data<br/>Data scale</p> <p>× 2.000 <math>\mu\text{m}/\text{div}</math><br/>Z 400.000 nm/div</p> |
| TO/EC/<br>ADM  |  <p>× 1.000 <math>\mu\text{m}/\text{div}</math><br/>Z 406.210 nm/div</p>                                  |
| KDM            |  <p>× 2.000 <math>\mu\text{m}/\text{div}</math><br/>Z 900.000 nm/div</p>                                |
| TO/EC/<br>KDM1 |  <p>× 1.000 <math>\mu\text{m}/\text{div}</math><br/>Z 168.776 nm/div</p>                                |
| TO/EC/<br>KDM2 |  <p>× 2.000 <math>\mu\text{m}/\text{div}</math><br/>Z 1228.237 nm/div</p>                               |



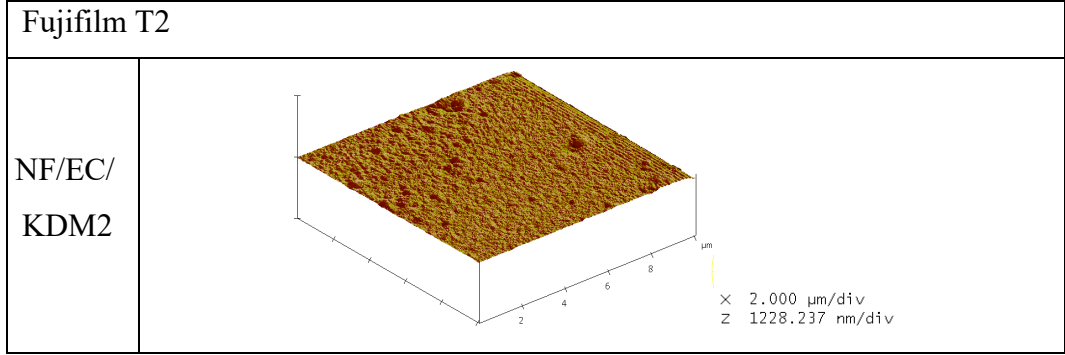
TO/EC konsantreleri ile kullanılan Fujifilm T1 membranlardan alınan AFM görüntüleri membran yüzeyinin bir tabaka ile kaplanmış olduğunu göstermektedir. Membranların yüzeyinde biyolojik kaynaklı bir kirlilik olmadığı gözlemlenmiştir.

NF/EC konsantreleri ile kullanılan Fujifilm T2 Membranlara ait AFM analizleri Tablo 4.38’de sunulmaktadır.

Tablo 4.38: NF/EC prosesinde kullanılan Fujifilm T2 Membranlara ait AFM görüntüleri.

| Fujifilm T2    |                                                                                                                                                                                              |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ADM            |  <p>Image Data<br/>Data scale</p> <p>× 2.000 <math>\mu\text{m}/\text{div}</math><br/>Z 400.000 nm/div</p> |
| NF/EC/<br>ADM  |  <p>× 2.000 <math>\mu\text{m}/\text{div}</math><br/>Z 2540.100 nm/div</p>                                |
| KDM            |  <p>× 2.000 <math>\mu\text{m}/\text{div}</math><br/>Z 900.000 nm/div</p>                                 |
| NF/EC/<br>KDM1 |  <p>× 1.000 <math>\mu\text{m}/\text{div}</math><br/>Z 168.776 nm/div</p>                                 |

Tablo 4.35: Devam.



NF/EC konsantreleri ile kullanılan Fujifilm T2 membranların yüzeyinde yoğun bir birikim gözlemlenmiştir. Mevcut birikim yoğun ve homojen bir tabaka şeklindedir. AFM görüntülerinde biyolojik kirlilik olarak ifade edilebilecek herhangi bir yapı-oluşum gözlemlenmemiştir.

#### 4.4.4. Temas Açısı Ölçümleri

İyon değişim membranlarının kirlenme eğilimleri araştırılırken yüzey hidrofilitik/hidrofobluğundaki değişimler incelenmektedir.

Heterojen membranlar kullanılarak, konsantreler ile gerçekleştirilen kirlenme deneyleri sonrası membranların temas açısı değerleri Tablo 4.39’da sunulmaktadır.

Tablo 4.39: PE1 R2 Membranlara ait temas açıları.

| Membran | Proses | Temas açısı |
|---------|--------|-------------|
| PE1 R2  | 50:50  | -           |
|         |        | 114,18      |
|         |        | NFEC        |
|         |        | 60,21       |
|         |        | TOEC        |
|         |        | 90,2        |
|         |        | NFEF        |
|         |        | 91,38       |
|         |        | TOEF        |
|         |        | 96,57       |
|         | 60:40  | -           |
|         |        | 115,15      |
|         |        | NFEC        |
|         |        | 112,92      |
|         |        | TOEC        |
|         |        | 111,03      |
|         |        | NFEF        |
|         |        | 115,07      |
|         |        | TOEF        |
|         |        | 115,24      |

Elde edilen değerler 50:50 konsantrasyonlu membranların temas açılarında 60:40 konsantrasyonlu membranlara göre daha yoğun bir kirlenmenin olduğunu göstermiştir. Bu durumun yüklü tanecikler olan ve 50:50 membranda daha yüksek oranda bulunan iyon değişim reçinelerinin kirleticiler ile etkileşime girmesi nedeni ile olduğu düşünülmektedir. 50.50 membranda oluşan kirlilik membranın hidrofiliğini arttırmıştır.

Tablo 3.40'da konsantrelerden iyon giderimi için kullanılan PCCell iyon değişim membranlarının temas açılarındaki değişimler sunulmaktadır.

Tablo 4.40: PCCell Membranlara ait temas açıları.

| Membran |     | Proses   | Temas açısı |
|---------|-----|----------|-------------|
| PCCell  | ADM | -        | 99,92±0,06  |
|         |     | NF/EC/ED | 103,48±1,23 |
|         |     | TO/EC/ED | 101,10±0,6  |
|         |     | NF/EF/ED | 94,28±1,47  |
|         |     | TO/EF/ED | 103,71±0,18 |
|         | KDM | -        | 99,27±1,2   |
|         |     | NF/EC/ED | 73,92±1,62  |
|         |     |          | 75,69±2,11  |
|         |     | TO/EC/ED | 96,78±1,31  |
|         |     |          | 98,41±2,28  |
|         |     | NF/EF/ED | 78,84±2,65  |
|         |     |          | 78,63±1,75  |
|         |     | TO/EF/ED | 80,84±1,16  |
|         |     |          | 80,78±1,75  |

PCCell membranlar ile gerçekleştirilen iyon giderimleri; EC prosesi ile ön arıtım görmüş konsantrelerin ADM'lerde temas açısını yükseltir, hidrofiliği düşürür karakterde bir kirliliğe neden olduğunu göstermiştir. ADM membranlarında yalnızca NF/EF konsantresi ile kullanılan ADM membranında temas açısında düşme görülmüştür. KDM membranlarda ise bu durum TO/EC konsantresi ile kullanılan KDM'ler dışında hidrofiliği arttığı bir eğilim sergilemiştir.

Tablo 3.41’de konsantrelerden iyon giderimi için kullanılan Fujifilm T1 membranlarının temas açılarındaki değişimler sunulmaktadır.

Tablo 4.41: Fujifilm T1 Membranlara ait temas açıları.

| Membran         |     | Proses   | Temas açısı |
|-----------------|-----|----------|-------------|
| Fujifilm Type 1 | ADM | -        | 76,62±2,1   |
|                 |     | TO/EC/ED | 88,98±1,2   |
|                 |     | TO/EF/ED | 88,98±0,6   |
|                 | KDM | -        | 53,68±1,03  |
|                 |     | TO/EC/ED | 91,10±1,24  |
|                 |     |          | 88,15±1,08  |
|                 |     | TO/EF/ED | 90,20±1,2   |
|                 |     |          | 91,05±0,05  |

Fujifilm T1 iyon değişim membranlarının konsantrelerden iyon giderimi sonrası yüzeylerine tutunan bileşikler hem ADM hem de KDM membranlarında yüzey hidrofiliğini düşürür karakter sergilemişlerdir.

Tablo 4.42’de konsantrelerden iyon giderimi için kullanılan Fujifilm T2 membranlarının temas açılarındaki değişimler sunulmaktadır.

Tablo 4.42: Fujifilm T2 Membranlara ait temas açıları.

| Membran         |     | Proses   | Temas açısı |
|-----------------|-----|----------|-------------|
| Fujifilm Type 2 | ADM | -        | 61,47±2,21  |
|                 |     | NF/EC/ED | 80,21±1,23  |
|                 |     | NF/EF/ED | 79,5±2,72   |
|                 | KDM | -        | 68,47±1,84  |
|                 |     | NF/EC/ED | 80,72±      |
|                 |     |          | 80,69       |
|                 |     | NF/EF/ED | 78,12±1.02  |
|                 |     |          | 79.05±0.24  |

Konsantrelerden iyon gideriminde kullanılan Fujifilm T2 membranların konsantre arıtımı sonrası membran yüzeylerinin hidrofilitik özelliklerinde düşürür nitelikte kirlenme olduğu gözlemlenmiştir.

İyon değişim membranlarının hidrofilitik özelliklerindeki düşüş membran yüzeyine aromatik amino asitler, poliakrilamid ya da hümk bileşikler ile kirlenme gibi durumlar ile artış göstermektedir.



## 5. SONUÇLAR

Gerçekleştirilen tez çalışması ile İDM üretimi, performanslarının belirlenmesi ve kirlenme eğilimlerinin incelenmesi sonucu aşağıda belirtilen sonuçlara ulaşılmıştır.

- İDM üretimi için PPO'nun bromlanması aşamasında bromlama reaksiyonunun tekrarının polimerin bromlanma derecesini arttırdığı görülmüştür.
- Bromlanmış PPO ve bir zeolit olan HNT ile gerçekleştirilen katkılı membran üretimi çalışmaları meydana gelen kompozit yapının filmleşmediğini göstermiştir.
- Eriyik çekme yöntemi ile üretimde; ekstrüdera ait vida çapı, vida tipi, tork özellikleri, ısıtma zonlarının iyi ayarlanmış ve ayrılmış olması özelliklerinin elde edilecek ürünün belli bir standartta üretimi ve olası formülasyon değişiklikleri açısından önem arz ettiği görülmüştür.
- Eriyik çekme yöntemi ile iyon değiştirici membran üretiminde bağlayıcı polimer ve iyon değiştirici reçine materyalinin etkin karışımı oldukça önem taşımaktadır. Bağlayıcı polimerler yüksek erime sıcaklığına sahip maddelerdir. İyon değiştirici reçineler ise yüksek sıcaklıkta bozunma eğilimi gösterebilmektedirler. Ekstrüzyon işleminde erime noktası farklı olan bu iki maddenin homojen karışımı için çift helezonlu ekstrüder kullanımı gerekmektedir.
- Heterojen membran üretiminde bağlayıcı polimer özellikleri üretilen membranların morfolojik özelliklerini ciddi şekilde etkilemektedir. PE1 bağlayıcı polimerinin sert yapılı ve kırılkan olmasının membranların genleşme katsayılarını ve iyon değişim kapasitelerini negatif yönde etkilediği görülmüştür.
- İyon değişim kapasitesi açısından R1 reçine ile üretilen membranların R2 reçine ile üretilenlere göre daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmüştür.
- Mekanik dayanım özelliklerinin tespiti PE 1 ile üretilen membranlarda kırılkan membran yapısı nedeni ile mümkün olmamıştır.
- Heterojen membranların direnç ölçümleri; PE1 bağlayıcı polimeri ile üretilen membranların dirençlerinin PE3 ile üretilenlere göre daha yüksek olduğunu göstermiştir.
- Üretilen heterojen membranlar anyon değişim membranlarıdır. Anyon değişim membranları, yüzey yükü pozitif membranlardır. Heterojen membranlarda

gerçekleştirilen zeta potansiyel ölçümleri membranların ağırlıklı olarak 3-9,5 pH aralığında yüzey yüklerinin pozitif olduğunu göstermektedir.

- Membran potansiyeli ve taşınım sayısı membranların heterojen yapıları nedeniyle tespiti oldukça zor parametrelerdir. Tez çalışması kapsamında membran potansiyeli ve taşınım sayısı özellikleri üretim koşulu ve kullanılan materyal konsantrasyonu ile değişken değerler göstermiştir. Herhangi bir eğilimden bahsetmek mümkün değildir.
- Üretilen heterojen membranların performansları oluşturulan anot hücreleri ile belirlenmiştir. Test edilen membranlar ile en yüksek performans değeri Numune 1 ile elde edilmiştir. Bu membrana yakın değerler PE3 R1 60:40 ve PE3 R1 50:50 membranlar ile elde edilmiştir.
- Tekstil atıksuyu membran konsantreleri ile gerçekleştirilen deneylerde EC ön arıtmı membran konsantrelerinde üretilen PE3 R1 60:40 ve PE3 R1 50:50 membranlar ile iyon gideriminin etkin bir şekilde gerçekleşmediği saptanmıştır.
- Tekstil atıksuyu membran konsantreleri ile gerçekleştirilen deneylerde EF ön arıtmı membran konsantrelerinde ticari membran ve üretilen membranlar ile iyon gideriminin gerçekleştiği görülmüştür. Üretilen heterojen membranlar ile en yüksek iyon giderimi ( $\sim 1,5$  mS/cm) 50:50 konsantrasyonlu membran ile TOEF konsantresinde kaydedilmiştir.
- PCCell ve Fujifilm membranların performansları EC ve EF ön arıtım uygulanan tekstil atıksuyu membran konsantreleri ile belirlenmiştir. EC ön arıtımı ile NF ve TO konsantrelerinden sırasıyla %79 ve %70 KOİ giderimi elde edilmiştir. EF ön arıtımı ile NF ve TO konsantrelerinden sırasıyla %84 ve %78 KOİ giderimi elde edilmiştir.
- İyon değişim membranlarının kirlenme eğilimlerinin belirlenmesi amacıyla SEM EDX, FTIR, temas açısı ve AFM analizleri gerçekleştirilmiş, membranlarda oluşan kirliliklerin ağırlıklı olarak inorganik maddelerden kaynaklı olduğu saptanmıştır. Ayrıca membranların hidrofili/hidrofob özelliklerini değiştirecek ölçüde organik kirlilik varlığı da tespit edilmiştir.
- Elde edilen değerler PCCell membranlar ile kıyaslandığında EF ön arıtmı TO konsantresi için PCCell membranlar ile daha etkin bir iyon giderimi (120 dk'lık işletimde %99 giderim) elde edildiği görülmüştür.

## KAYNAKLAR

Abdulkareem A., Akınbulire T.O., Agbetuyi A.F., (2014), “Improving The Thermoplastic Extrusion Process In Cable Manufacturing”, *International Journal of Research in Applied, Natural and Social Sciences*, Vol. 2, Issue 4., pp 192-202.

Alabi A., Al Hajaj A., Cseri L., Szekely G., Budd P., Zou L., (2018), “Review of nanomaterials-assisted ion exchange membranes for electromembrane desalination”, *npj Clean Water*, 1(1), 1-22.

Al-Amshawee S., Yunus M. Y. B. M., Azoddein A. A. M., Hassell D. G., Dakhil I. H., Hasan H. A., (2020), “Electrodialysis desalination for water and wastewater: A review”, *Chemical Engineering Journal*, 380, 122231.

Ankoliya D., Mudgal A., Sinha M. K., Davies P., Licon E., Alegre R. R., Patel V., Patel J., (2021), “Design and optimization of electrodialysis process parameters for brackish water treatment”, *Journal of Cleaner Production*, 319, 128686.

Bai X., Sano Y., Amagai S., Nakayama A., (2018), “An experimental study on the performance of an electro-dialysis desalination using hollow cubic assembled porous spacers fabricated by a 3D printer”, *Desalination*, 445, 6-14.

Balster J., Pünt I., Stamatialis D. F., Wessling M., (2006), “Multi-layer spacer geometries with improved mass transport”, *Journal of membrane science*, 282(1-2), 351-361.

Bazinet L., (2005), “Electrodialytic phenomena and their applications in the dairy industry: a review. Critical reviews in food science and nutrition”, 45(4), 307-326.

Breytus A., Hasson D., Semiat R., Shemer H., (2019), “Ion exchange membrane adsorption in Donnan dialysis”, *Separation and Purification Technology*, 226, 252-258.

Bodamer G. W., (1954), “Permselective Films of Anion Exchange Resins “ U.S. Patent 2,681,319A

Claisse P. A., (2005), “Using sulphate activated pozzolans in controlled low strength materials”.

Claisse P. A., (2014), “*Transport properties of concrete: Measurements and applications*”, Elsevier.

Dammak L., Fouilloux J., Bdiri M., Larchet C., Renard E., Baklouti L., Pismenskaya, N., (2021), “A Review on Ion-Exchange Membrane Fouling during the Electrodialysis Process in the Food Industry”, Part 1: Types, Effects, Characterization Methods, Fouling Mechanisms and Interactions. *Membranes*, 11(10), 789.



de Barros Machado M., Santiago V. M., (2014), “Electrodialysis treatment of refinery wastewater”, In *Electrodialysis and Water Reuse* (pp. 77-90). Springer, Berlin, Heidelberg.

Dufton G., Mikhaylin S., Gaaloul S., Bazinet L., (2018), “How electrodialysis configuration influences acid whey deacidification and membrane scaling”, *Journal of dairy science*, 101(9), 7833-7850.

Fan H., Yip N. Y., (2019), “Elucidating conductivity-permselectivity tradeoffs in electrodialysis and reverse electrodialysis by structure-property analysis of ion-exchange membranes”, *Journal of Membrane Science*, 573, 668-681.

Galama A. H., Post J. W., Hamelers H. V. M., Nikonenko V. V., Biesheuvel P. M., (2016), “On the origin of the membrane potential arising across densely charged ion exchange membranes: How well does the Teorell-Meyer-Sievers theory work?”, *Journal of Membrane Science and Research*, 2(3), 128-140).

Geraldes V., Afonso M. D., (2010), “Limiting current density in the electrodialysis of multi-ionic solutions”, *Journal of Membrane Science*, 360(1-2), 499-508.

Gjelstad A., Rasmussen K. E., Pedersen-Bjergaard S., (2007), “Simulation of flux during electro-membrane extraction based on the Nernst–Planck equation”, *Journal of Chromatography A*, 1174(1-2), 104-111.

Grebenyuk V. D., Grebenyuk O. V., (2002), “Electrodialysis: From an idea to realization”, *Russian journal of electrochemistry*, 38(8), 806-809.

Hagesteijn K. F., Jiang S., Ladewig B. P., (2018), “A review of the synthesis and characterization of anion exchange membranes”, *Journal of materials science*, 53(16), 11131-11150.

Hylák K., Matuška Z., Drašnar P., Kudláček J., Horník J., (2019), “Development of equipment for mass cataphoresis painting”, In *Materials Science Forum* (Vol. 952, pp. 92-98).

Jang J., Kang Y., Han J. H., Jang K., Kim C. M., Kim I. S., (2020), “Developments and future prospects of reverse electrodialysis for salinity gradient power generation: Influence of ion exchange membranes and electrodes”, *Desalination*, 491, 114540.

Kajaks J., Kalnins K., Naburgs R., (2018), “Wood plastic composites (WPC) based on high-density polyethylene and birch wood plywood production residues”, *International Wood Products Journal*, 9(1), 15-21.

Kalyon D. M., Gevgilili H., Shah A., (2004), “Detachment of the polymer melt from the roll surface: calendering analysis and data from a shear roll extruder”, *International Polymer Processing*, 19(2), 129-138.

Kamcev J., (2021), “Reformulating the permselectivity-conductivity tradeoff relation in ion-exchange membranes”, *Journal of Polymer Science*, 59(21), 2510-2520.

Káňavová N., Machuča L., Tvrzník D., (2014), “Determination of limiting current density for different electrodialysis modules”, *Chemical Papers*, 68(3), 324-329.

Karas F., Hnát J., Paidar M., Schauer J., Bouzek K., (2014), “Determination of the ion-exchange capacity of anion-selective membranes”, *International journal of hydrogen energy*, 39(10), 5054-5062.

Knežević K., Reif D., Harasek M., Krampe J., Kreuzinger N., (2022), “Assessment of Graphical Methods for Determination of the Limiting Current Density in Complex Electrodialysis-Feed Solutions”, *Membranes*, 12(2), 241.

Kobya M., Demirbas E., Can O. T., Bayramoglu M., (2006), “Treatment of levafix orange textile dye solution by electrocoagulation”, *Journal of hazardous materials*, 132(2-3), 183-188.

Kojima K., Nakayama Y., (1971), “Polypropylene resin composites and production thereof”, U.S. Patent US 3627703.

Korngold E., (1984), “Electrodialysis—membranes and mass transport”, *Synthetic membrane processes*, 191-220.

Kuokkanen V., Kuokkanen T., (2013). “Recent applications of electrocoagulation in treatment of water and wastewater—a review”.

La Cerva M., Gurreri L., Tedesco M., Cipollina A., Ciofalo M., Tamburini A., Micale, G., (2018), “Determination of limiting current density and current efficiency in electrodialysis units”, *Desalination*, 445, 138-148.

Lee H. J., Sarfert F., Strathmann H., Moon S. H., (2002), “Designing of an electrodialysis desalination plant”, *Desalination*, 142(3), 267-286.

Lee H.J., Strathmann H., Moon S.H., (2006). Determination of the limiting current density in electrodialysis desalination as an empirical function of linear velocity. *Desalination* 190. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.08.004>.

Lindstrand V., Jönsson A. S., Sundström G., (2000), “Organic fouling of electrodialysis membranes with and without applied voltage”, *Desalination*, 130(1), 73-84.

Luo, T., Abdu S., Wessling M., (2018), “Selectivity of ion exchange membranes: A review”, *Journal of membrane science*, 555, 429-454.

MacGillivray A. D., (1968), “Nernst-Planck Equations and the Electroneutrality and Donnan Equilibrium Assumptions”, *The journal of chemical physics*, 48(7), 2903-2907.

Mei Y., Li X., Yao Z., Qing W., Fane A. G., Tang C. Y., (2020), “Simulation of an energy self-sufficient electrodialysis desalination stack for salt removal efficiency and fresh water recovery”, *Journal of Membrane Science*, 598, 117771.

Nakayama A., Sano Y., Bai X., Tado, K., (2017), “A boundary layer analysis for determination of the limiting current density in an electrodialysis desalination”, *Desalination*, 404, 41-49.

Newman J., Thomas-Alyea K. E., (2012), “*Electrochemical systems*. John Wiley & Sons”.

Nthunya L. N., Bopape M. F., Mahlangu O. T., Mamba B. B., Van der Bruggen B., Quist-Jensen C. A., Richards H., (2022), “Fouling, performance and cost analysis of membrane-based water desalination technologies: A critical review”, *Journal of Environmental Management*, 301, 113922.

Nunes S. P., Culfaz-Emecen P. Z., Ramon G. Z., Visser T., Koops G. H., Jin W., Ulbricht M., (2020), “Thinking the future of membranes: Perspectives for advanced and new membrane materials and manufacturing processes”, *Journal of Membrane Science*, 598, 117761.

Pan Z. F., An L., Zhao, T S., Tang,Z. K., (2018), “Advances and challenges in alkaline anion exchange membrane fuel cells”, *Progress in Energy and Combustion Science*, 66, 141-175.

Pis'menskaya N. D., Nikonenko V. V., Mel'nik N. A., Pourcelli G., Larchet G., (2012), “Effect of the ion-exchange-membrane/solution interfacial characteristics on the mass transfer at severe current regimes”, *Russian Journal of Electrochemistry*, 48(6), 610-628.

Qasem N. A., Zubair S. M., Qureshi B. A., Generous M. M. (2020), “The impact of thermodynamic potentials on the design of electrodialysis desalination plants”, *Energy Conversion and Management*, 205, 112448.

Özmen S. (2019), “Thermal, mechanical and physical properties of chain extended recycled Polyamide 6 via reactive extrusion”.

Reahl E. R. (2006), “Half a century of desalination with electrodialysis”, GE Water & Process Technologies, General Electric Company.

Ruan H., Liao J., Tan R., Pan J., Sotto A., Gao C., Shen J., (2018), “Dual functional layers modified anion exchange membranes with improved fouling resistant for electrodialysis”, *Advanced Materials Interfaces*, 5(20), 1800909

Sarabi M. T., Behravesht A. H., Shahi P., Soury E., “Experimental Study on the Effect of Melt Flow Index on Properties of Virgin and Reprocessed Wood-HDPE Composites”.

Schuetze A. P., Lewis W., Brown C., Geerts W. J., (2004), “A laboratory on the four-point probe technique”, *American Journal of Physics*, 72(2), 149-153.

Shahi V. K., Thamby S. K., Rangarajan R., (2001), “The effect of conducting spacers on transport properties of ion-exchange membranes in electrodriven separation”, *Desalination*, 133(3), 245-258.

Strathmann H. (2010), "Electrodialysis, a mature technology with a multitude of new applications", *Desalination*, 264(3), 268-288.

Sung S., Mayadevi T. S., Min K., Lee J., Chae J. E., Kim T. H. (2021), "Crosslinked PPO-based anion exchange membranes: The effect of crystallinity versus hydrophilicity by oxygen-containing crosslinker chain length", *Journal of Membrane Science*, 619, 118774.

Tamersit S., Bouhidel K. E., Zidani Z., (2018), "Investigation of electrodialysis anti-fouling configuration for desalting and treating tannery unhairing wastewater: Feasibility of by-products recovery and water recycling", *Journal of environmental management*, 207, 334-340.

Tanaka Y., (2004), "Concentration polarization in ion-exchange membrane electrodialysis: The events arising in an unforced flowing solution in a desalting cell", *Journal of membrane science*, 244(1-2), 1-16.

Van der Bruggen B., Lejon L., Vandecasteele C., (2003), "Reuse, treatment, and discharge of the concentrate of pressure-driven membrane processes", *Environmental science & technology*, 37(17), 3733-3738.

Zourmand Z., Faridirad F., Kasiri N., Mohammadi T., (2015), "Mass transfer modeling of desalination through an electrodialysis cell", *Desalination*, 359, 41-51.

Zhou M., Tan Q., Wang Q., Jiao Y., Oturan N., Oturan M. A., (2012), "Degradation of organics in reverse osmosis concentrate by electro-Fenton process", *Journal of hazardous materials*, 215, 287-293.

## ÖZGEÇMİŞ

Ayşegül Derya ALTINAY 2006 yılında başladığı Eskişehir Osmangazi Üniversitesi (ESOGÜ) Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümünü 2010 yılında bitirdi. Aynı yıl Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2013-2014 eğitim öğretim yılında Erasmus değişim programı ile Almanya'da TU- Braunschweig-Sürdürülebilir Kimya Anabilim Dalı'nda yüksek lisansına devam etti.

2015 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora eğitimine başlamış, aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesinde bulunan Prof. Dr. Dincer Topacık Ulusal Membran Teknolojileri UYG-AR Merkezinde (MEM-TEK) araştırmacı olarak çalışmaya başlamıştır.

2019 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümünde Öğretim Görevlisi olmuştur. İTÜ Çevre Mühendisliği Bölümünde Öğretim Görevlisi ve MEMTEK'te araştırmacı olarak çalışmaya devam etmektedir.

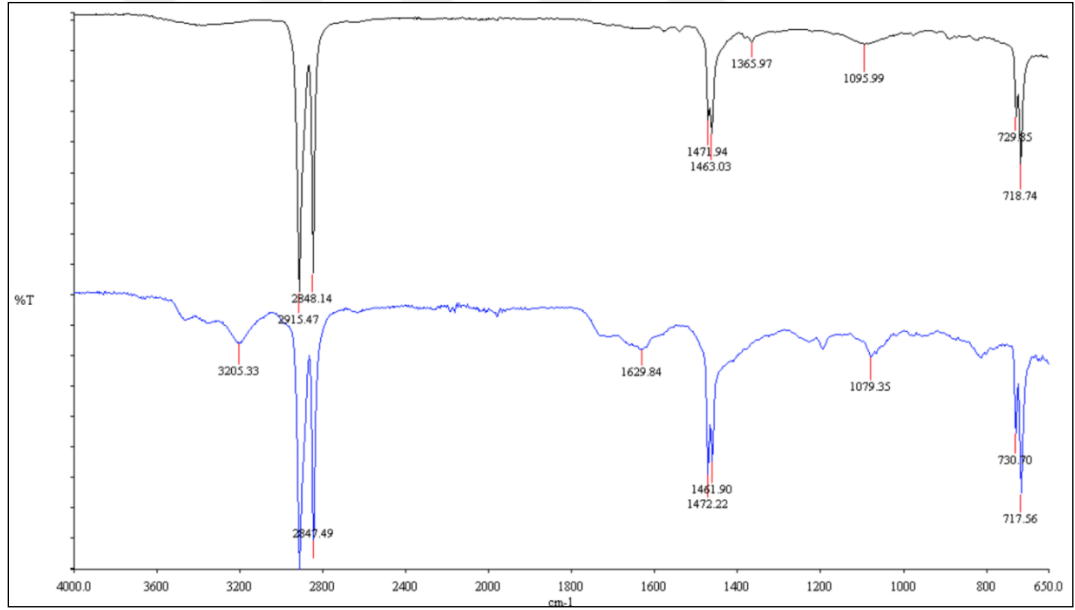
## EKLER

### Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Yayınlar

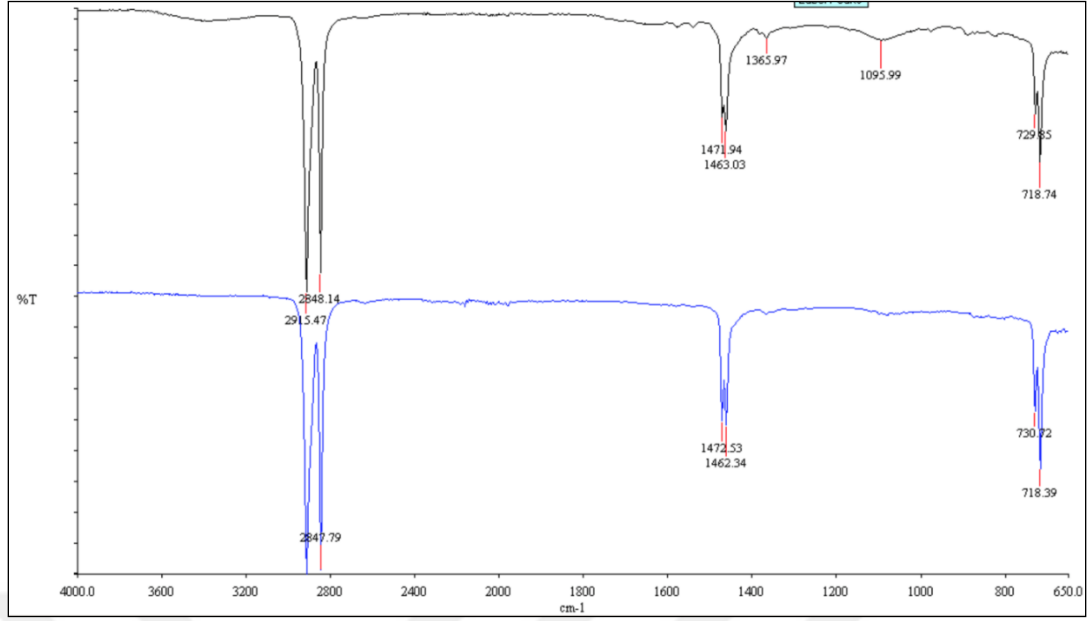
Aouni A., Altınay A. D., İlhan F., Koseoglu-Imer D. Y., Avsar Y., Hafiane A., Keskinler B., Koyuncu, I., (2018), “The applicability of combined physico-chemical processes for treatment and reuse of synthetic textile reverse osmosis concentrate”, *Desalination and Water Treatment*, 111, 111-124.

Altınay A. D., Yazagan A., Koseoglu-Imer D. Y., Keskinler B., Koyuncu I., (2022), “Membrane Concentrate Management Model of Biologically Pre-treated Textile Wastewater for Zero-Liquid Discharge”, *Water, Air, & Soil Pollution*, 233(8), 303.

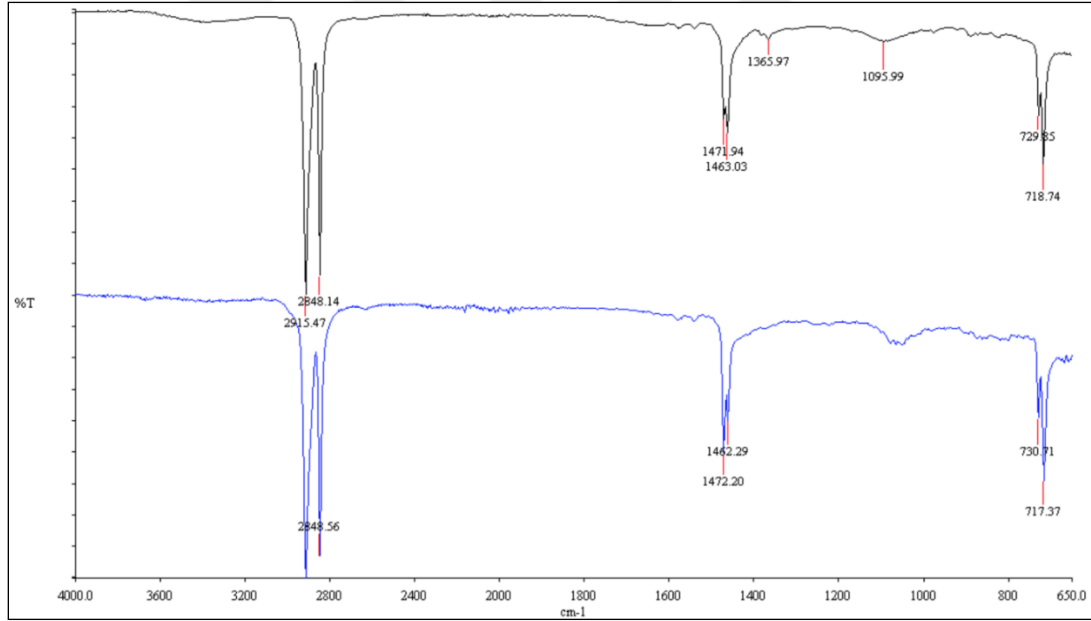
### Ek B: FTIR Spektrumları



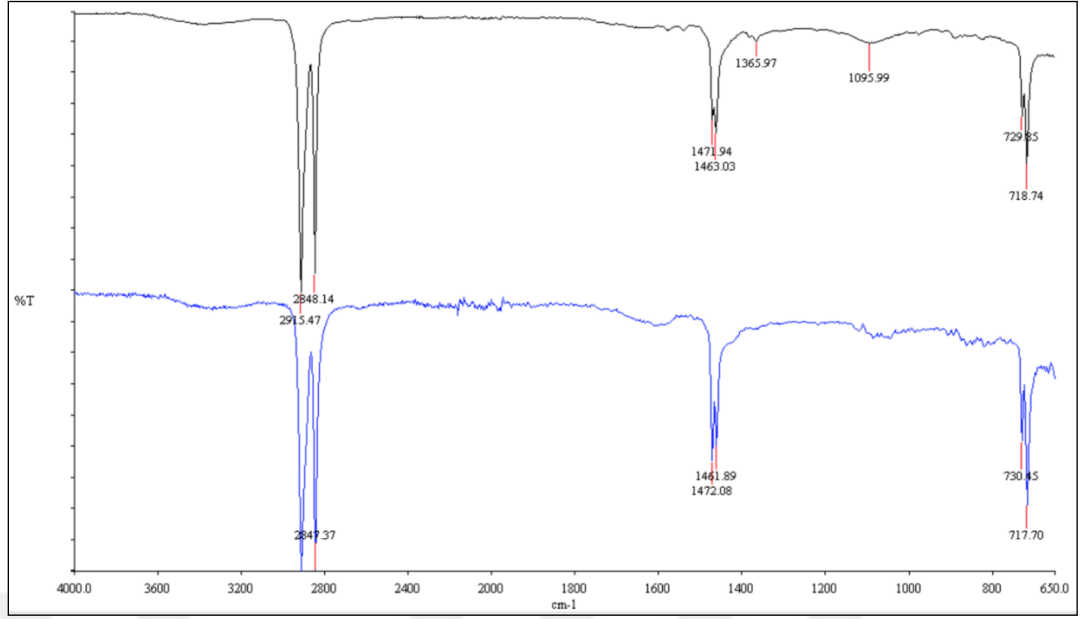
Şekil B1.1: 40:60 hava soğutmalı numunenin (üstte) 1 numaralı ticari numune (altta) ile karşılaştırılması.



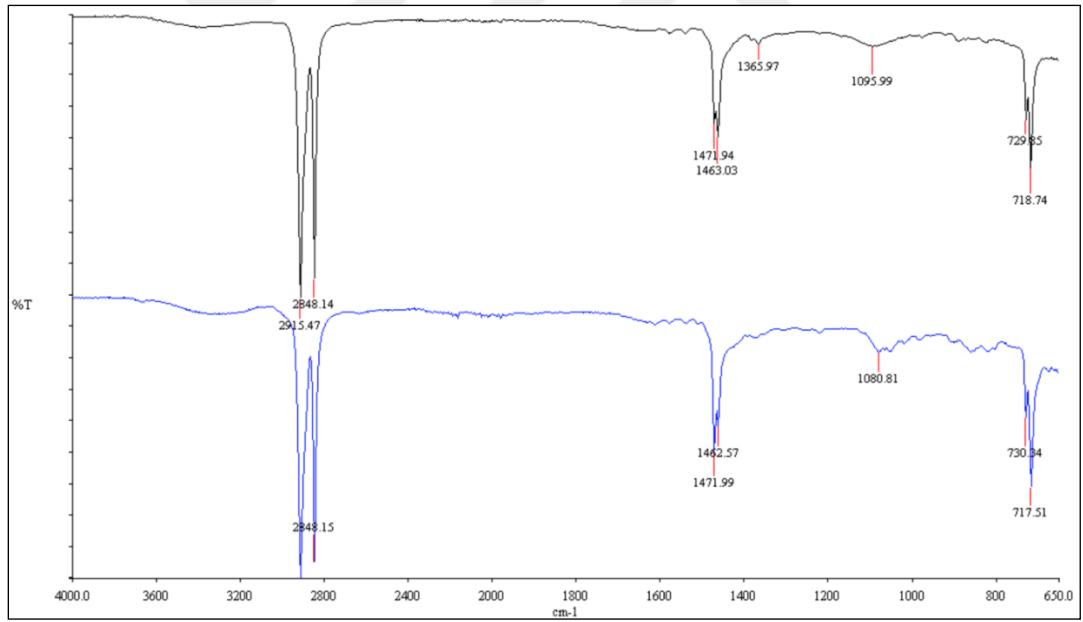
Şekil B1.2: 40:60 su soğutmalı numunenin (üstte) 1 numaralı ticari numune ile (altta) karşılaştırılması.



Şekil B1.3: 50:50 düşük devirli hava soğutmalı numunenin (üstte) 1 numaralı ticari numune (altta) ile karşılaştırılması.

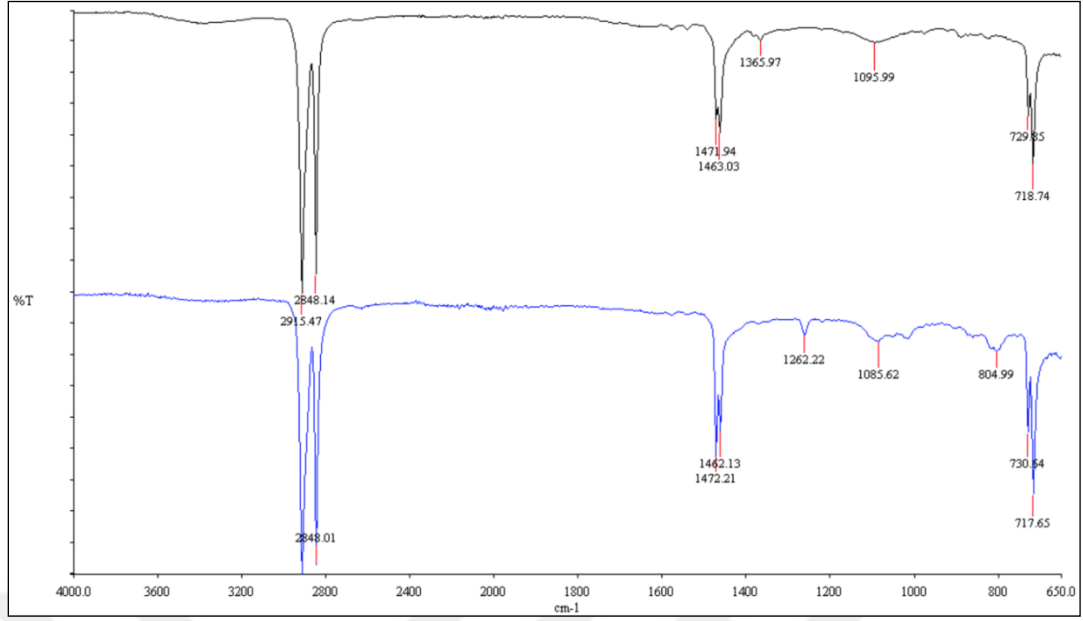


Şekil B1.4: 50:50 yüksek devirli hava soğutmalı numunenin (üstte) 1 numaralı ticari numune (altta) ile karşılaştırılması.

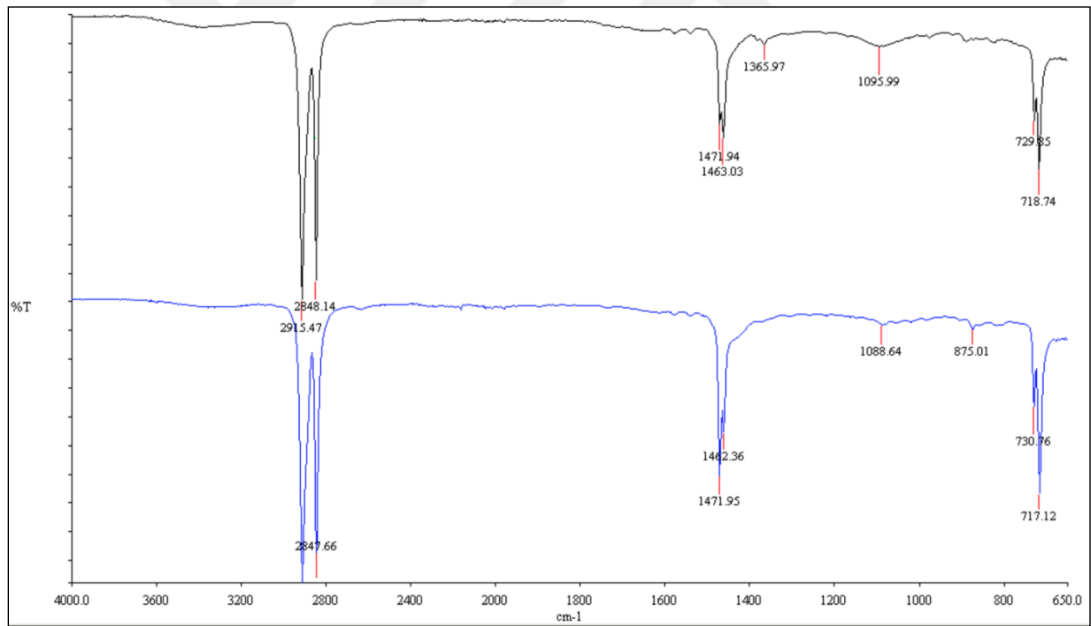


Şekil B1.5: 50:50 düşük devirli su soğutmalı numunenin (üstte) 1 numaralı ticari numune (altta) ile karşılaştırılması.

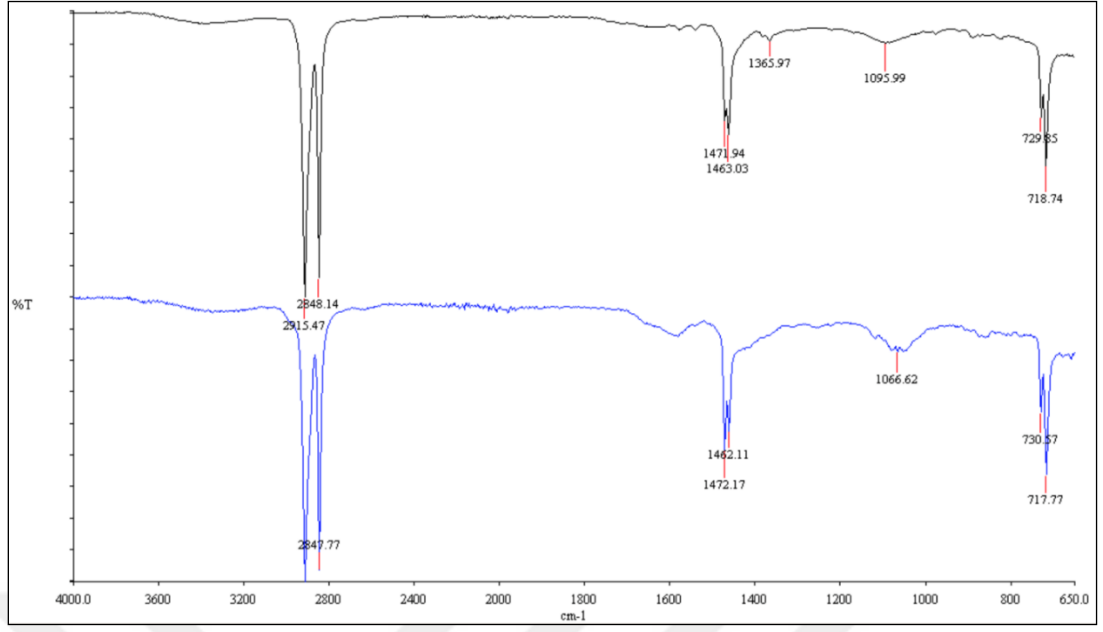




Şekil B1.6: 50:50 yüksek devirli su soğutmalı numunenin (üstte) 1 numaralı ticari numune (altta) ile karşılaştırılması.



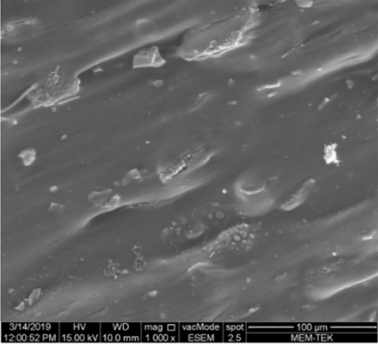
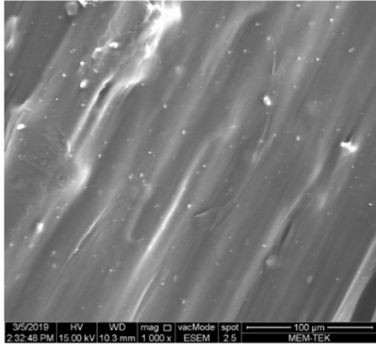
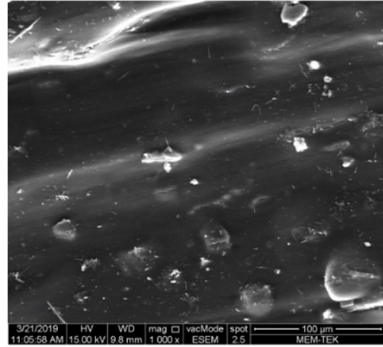
Şekil B1.7: 70:30 hava soğutmalı numunenin (üstte) 1 numaralı ticari numune (altta) ile karşılaştırılması.



Şekil B1.8: 70:30 su soğutmalı numunenin (üstte) 1 numaralı ticari numune (altta) ile karşılaştırılması.

## EK C: Kimyasal Dayanım Testleri Süresince ve Sonunda Alınan Numunelere ait SEM Görüntüleri

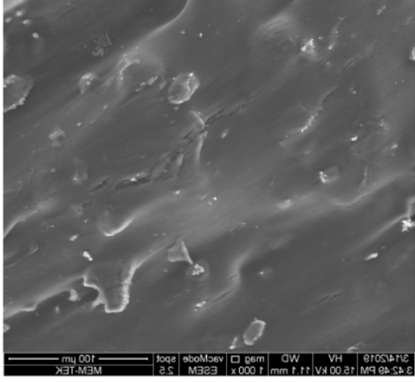
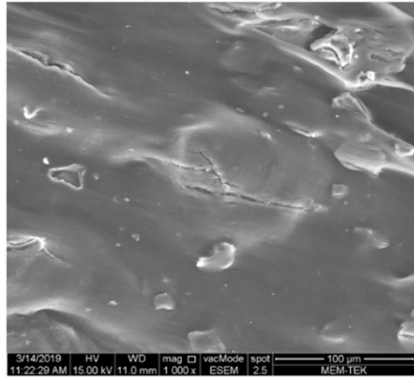
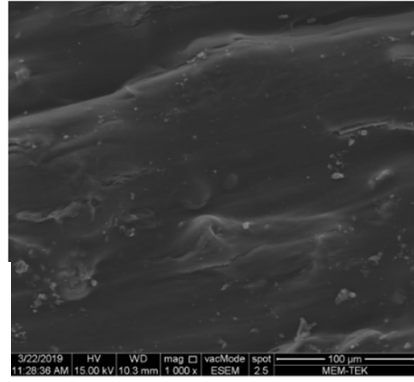
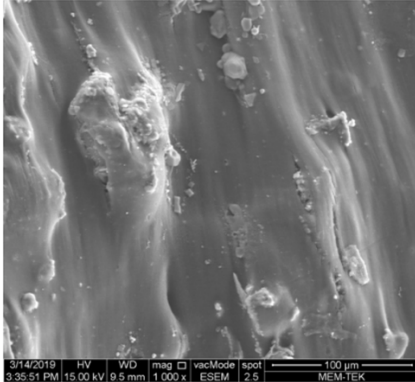
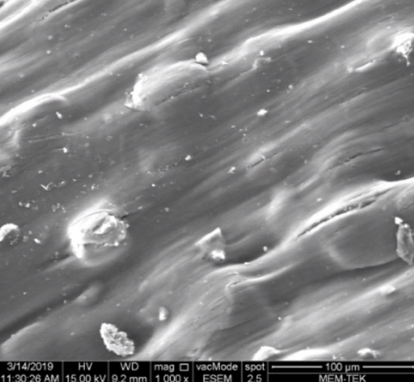
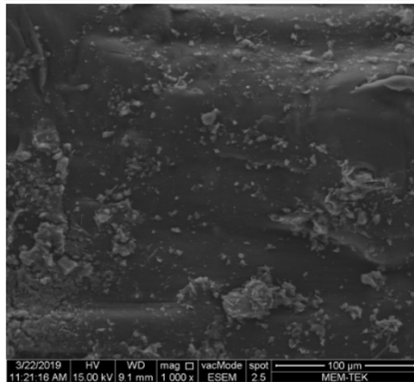
Tablo C1.1: Heterojen membranların kimyasal dayanım testi sırasında alınan SEM görüntüleri.

| PE3 R1                  | 24 Saat                                                                           | 48 Saat                                                                             | 168 saat                                                                            |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 50 50 hava<br>soğutmalı |  |  |  |

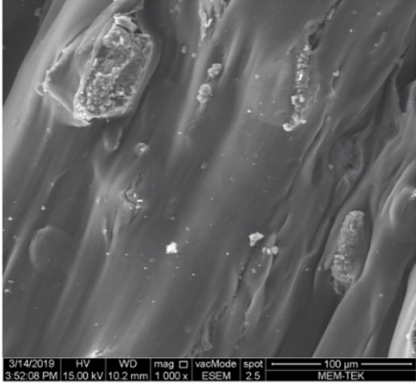
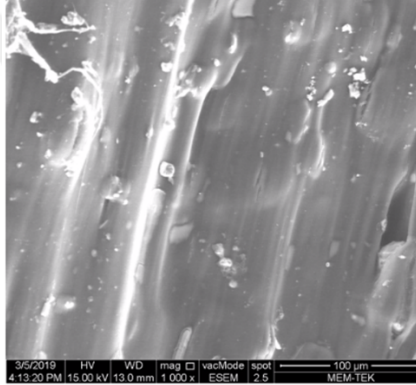
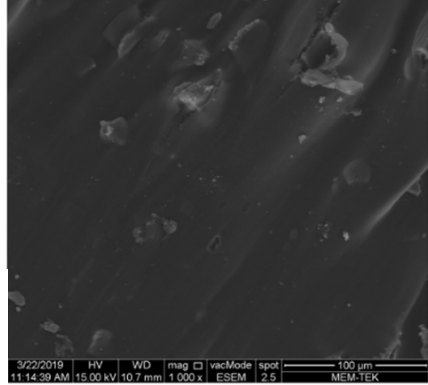
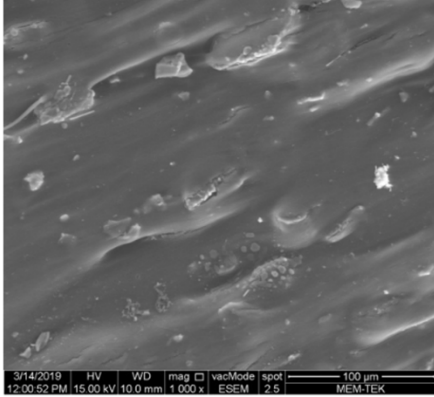
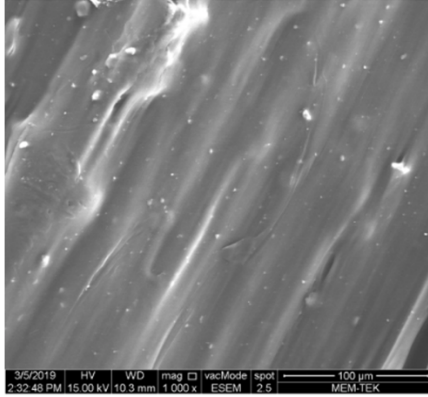
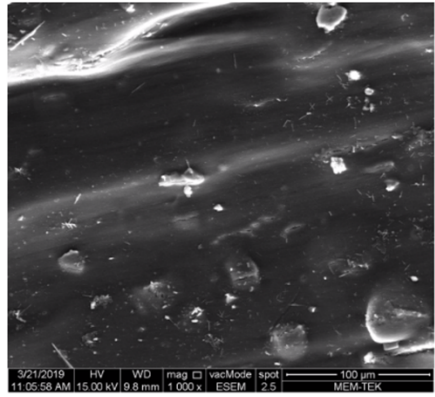
Tablo C1.1: Devam.

| PE3R1                   | 24 Saat | 48 Saat | 168 saat |
|-------------------------|---------|---------|----------|
| 50:50 su<br>soğutmalı   |         |         |          |
| 60:40 hava<br>soğutmalı |         |         |          |

Tablo C1.1: Devam.

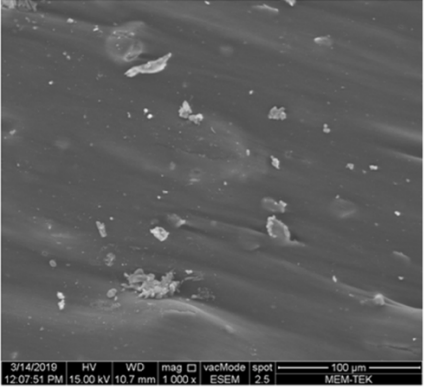
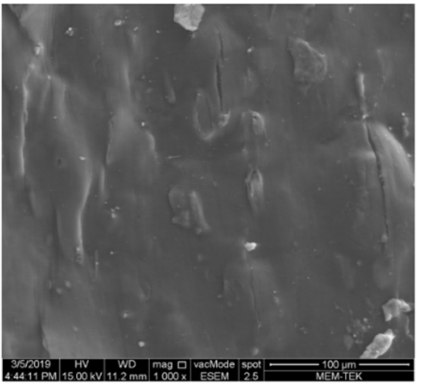
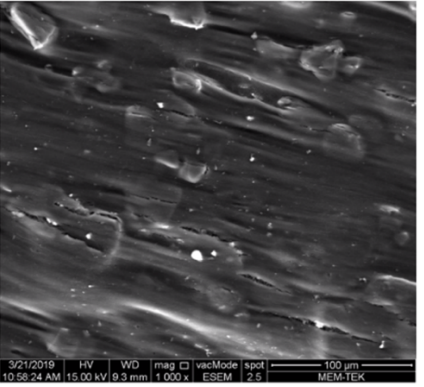
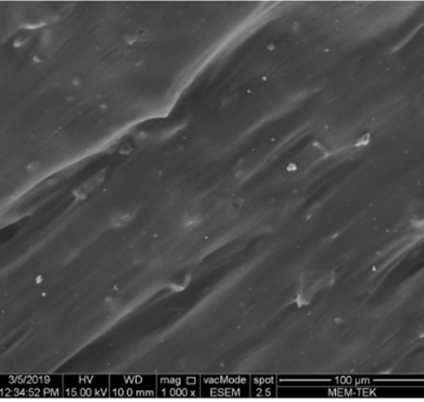
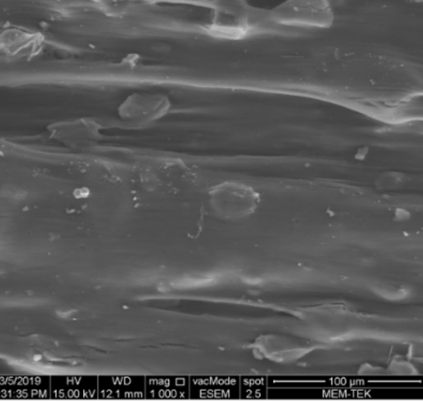
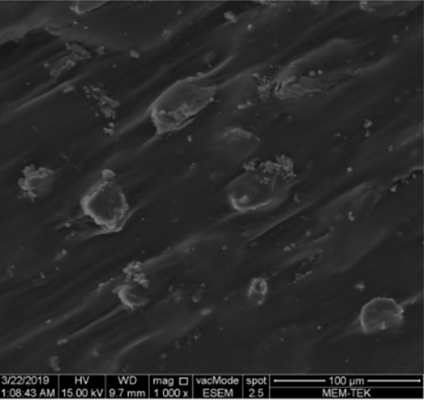
| PE3R1                   | 24 Saat                                                                            | 48 Saat                                                                              | 168 saat                                                                             |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 60:40 su<br>soğutmalı   |   |   |   |
| 70:30 hava<br>soğutmalı |  |  |  |

Tablo C1.1: Devam.

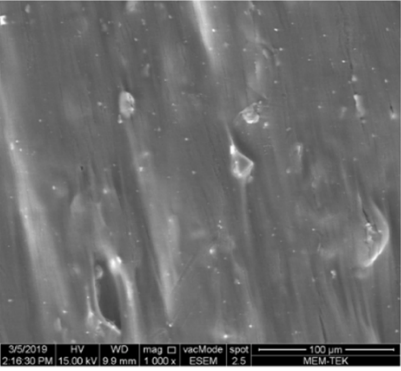
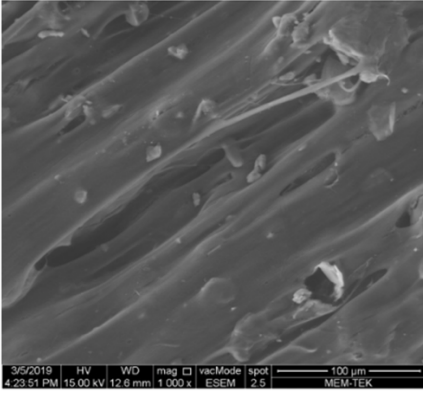
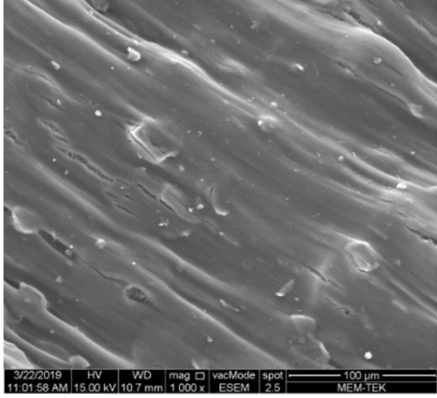
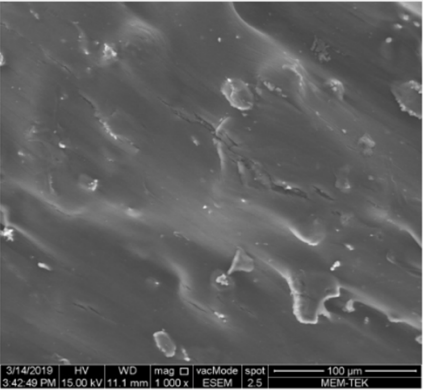
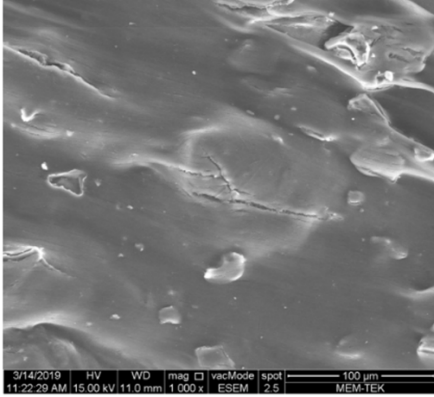
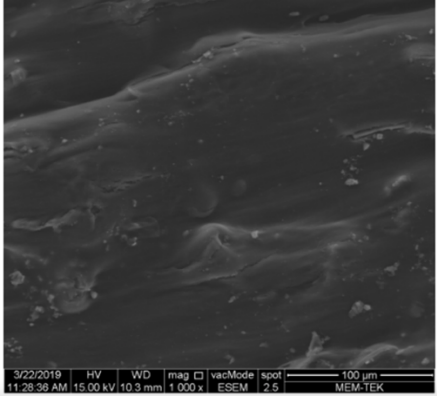
| PE3 R2                                    | 24 Saat                                                                            | 48 Saat                                                                              | 168 saat                                                                             |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 70:30 su<br>soğutmalı                     |   |   |   |
| 50 50 hava<br>soğutmalı<br>yüksek devirli |  |  |  |



Tablo C1.1: Devam.

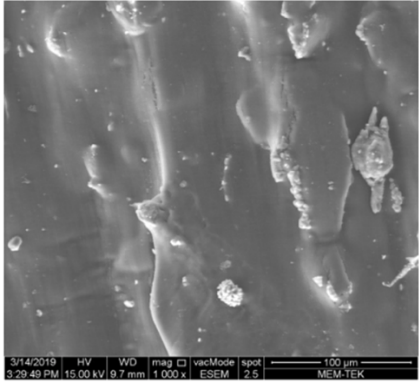
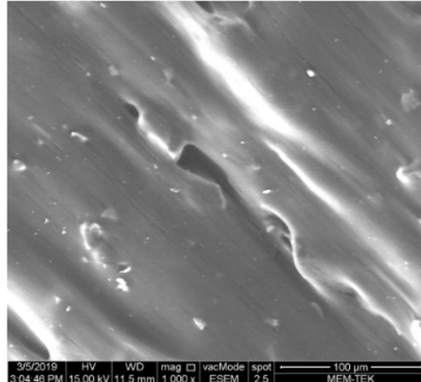
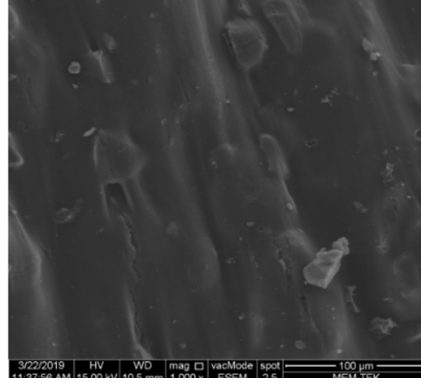
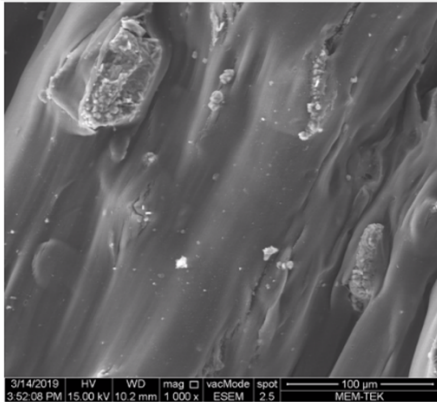
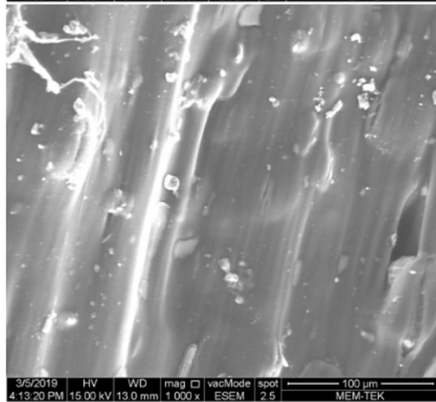
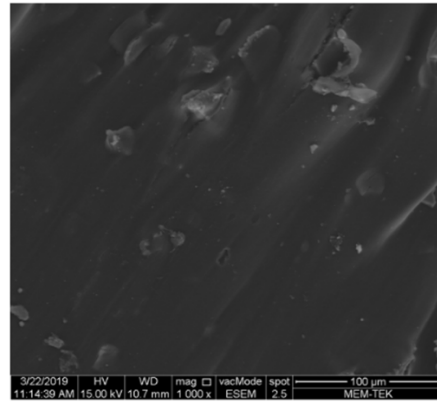
| PE3 R2                                     | 24 Saat                                                                            | 48 Saat                                                                              | 168 saat                                                                             |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 50 50 su<br>soğutmalı<br>yüksek<br>devirli |   |   |   |
| 50 50 hava<br>soğutmalı<br>düşük devirli   |  |  |  |

Tablo C1.1: Devam.

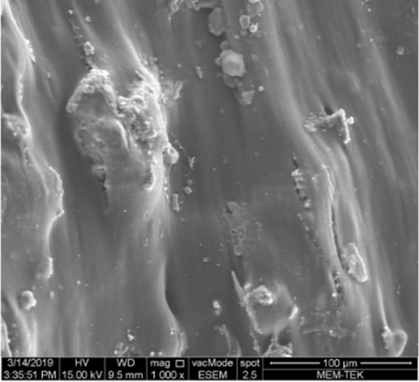
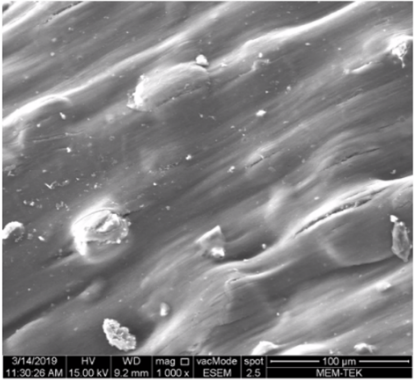
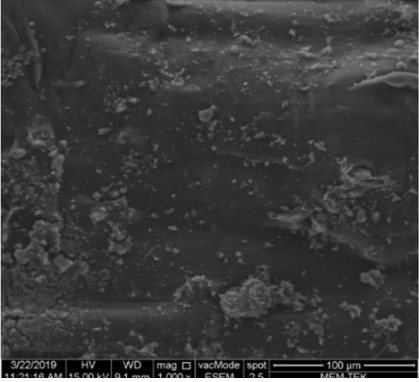
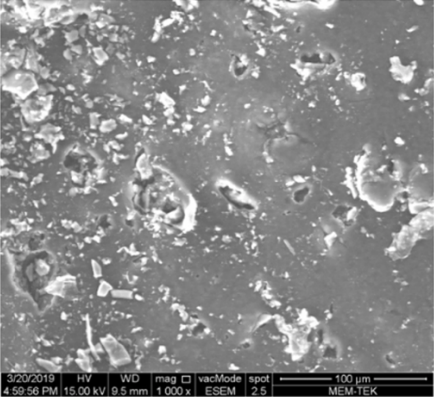
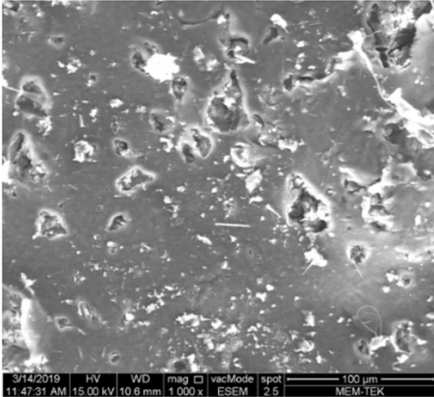
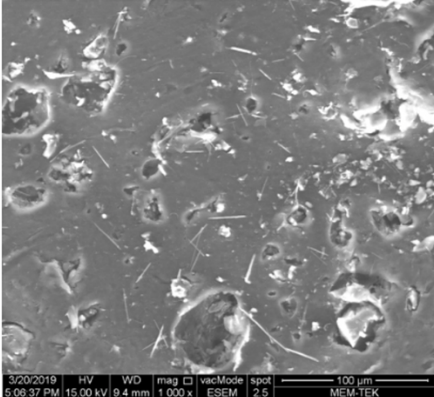
| PE3 R2                                 | 24 Saat                                                                            | 48 Saat                                                                             | 168 saat                                                                             |
|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 50 50 su<br>soğutmalı<br>düşük devirli |   |   |   |
| 60:40 su<br>soğutmalı                  |  |  |  |



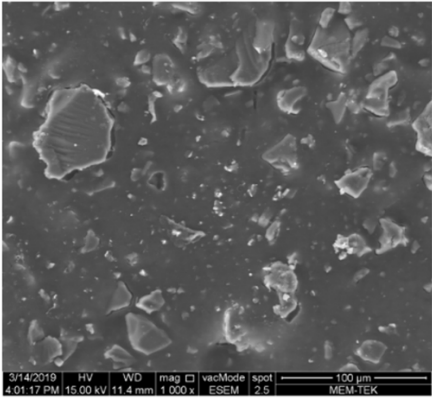
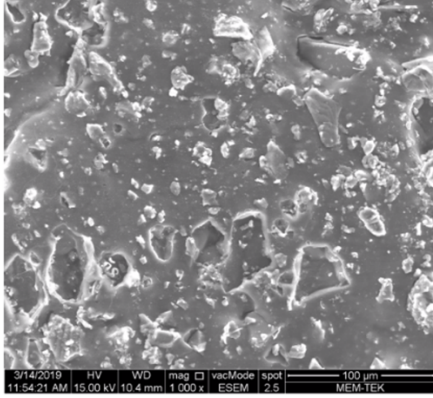
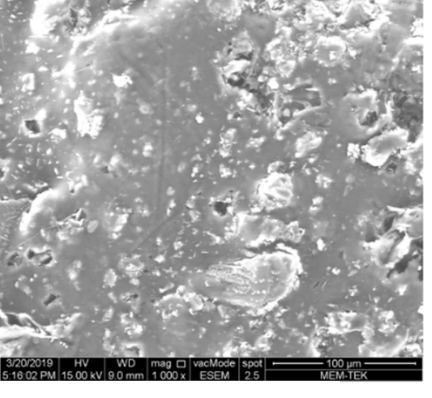
Tablo C1.1: Devam.

| PE3 R2                  | 24 Saat                                                                            | 48 Saat                                                                              | 168 saat                                                                             |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 60:40 hava<br>soğutmalı |   |   |   |
| 70:30 su soğ<br>utmalı  |  |  |  |

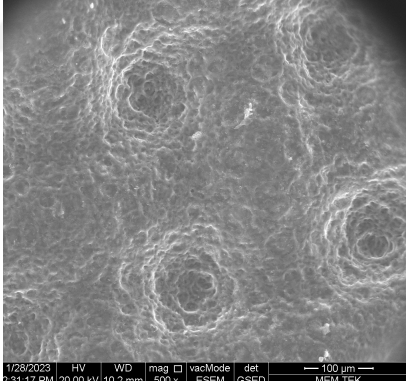
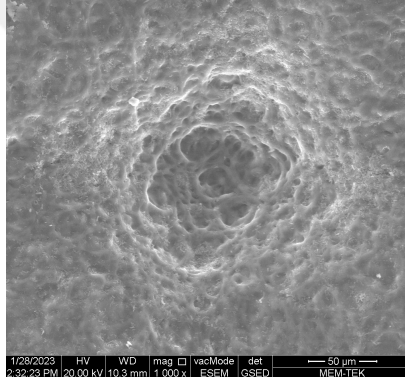
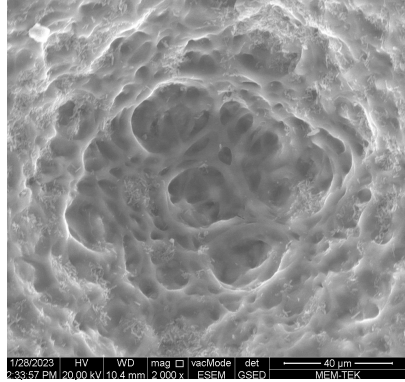
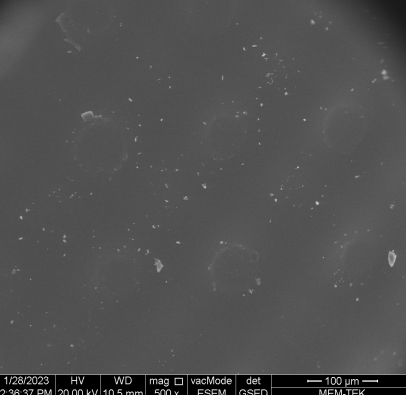
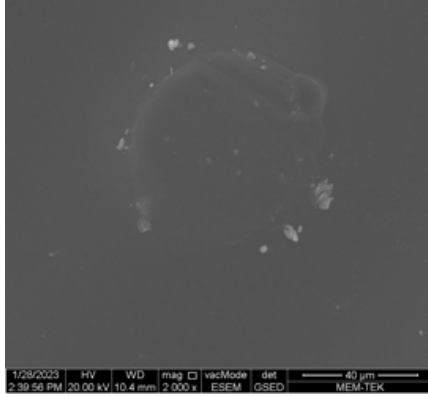
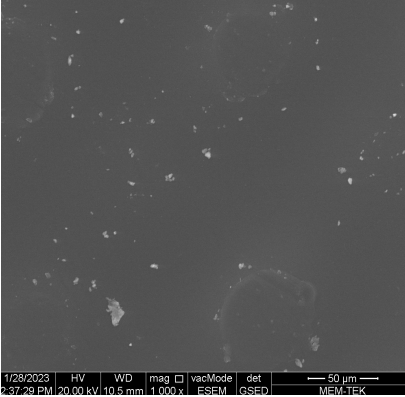
Tablo C1.1: Devam.

| PE3 R2                  | 24 Saat                                                                            | 48 Saat                                                                              | 168 saat                                                                             |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 70:30 hava<br>soğutmalı |   |   |   |
| Numune 1                |  |  |  |

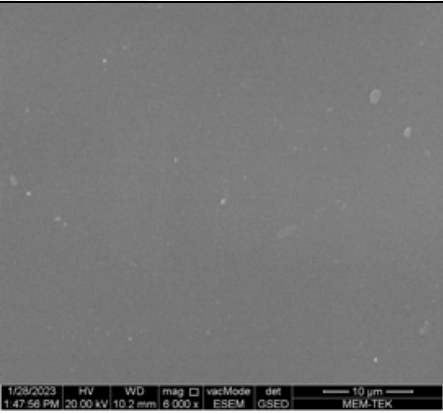
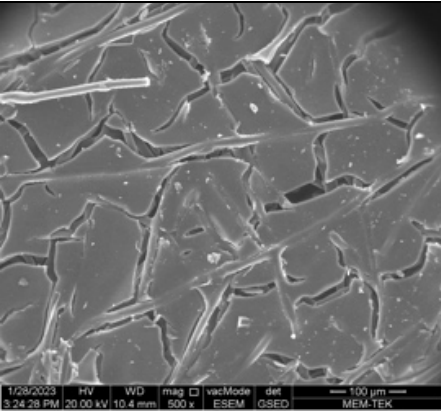
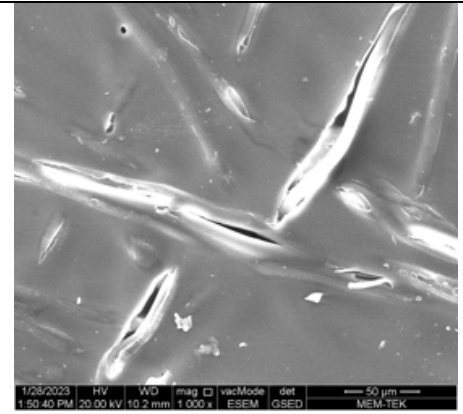
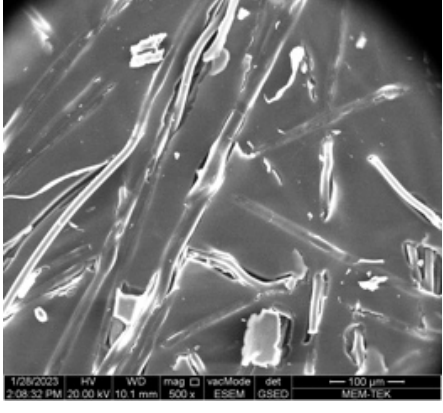
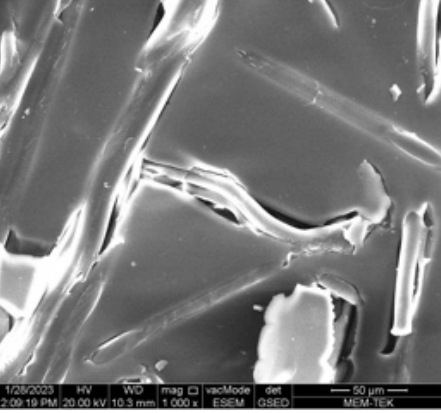
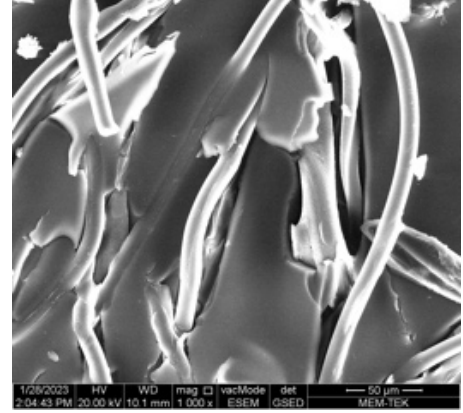
Tablo C1.1: Devam.

| Membran  | 24 Saat                                                                                                                                                                                     | 48 Saat                                                                                                                                                                                        | 168 Saat                                                                                                                                                                                     |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Numune 2 |  <p>3/14/2019 HV WD mag □ vacMode spot 100 µm<br/>4:01:17 PM 15.00 kV 11.4 mm 1.000 x ESEM 2.5 MEM-TEK</p> |  <p>3/14/2019 HV WD mag □ vacMode spot 100 µm<br/>11:54:21 AM 15.00 kV 10.4 mm 1.000 x ESEM 2.5 MEM-TEK</p> |  <p>3/20/2019 HV WD mag □ vacMode spot 100 µm<br/>5:18:02 PM 15.00 kV 9.0 mm 1.000 x ESEM 2.5 MEM-TEK</p> |

Tablo C1.2: PCCell membranların kimyasal dayanım testi sırasında alınan SEM görüntüleri.

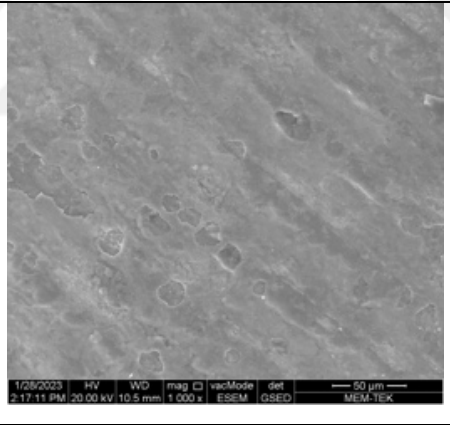
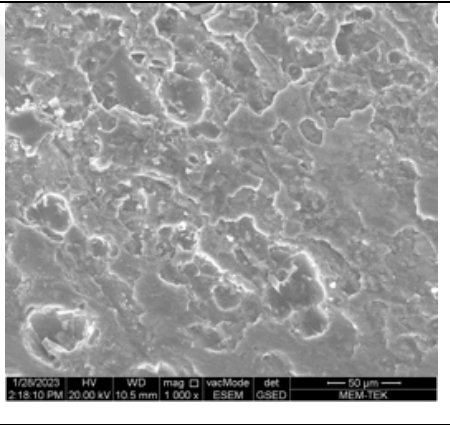
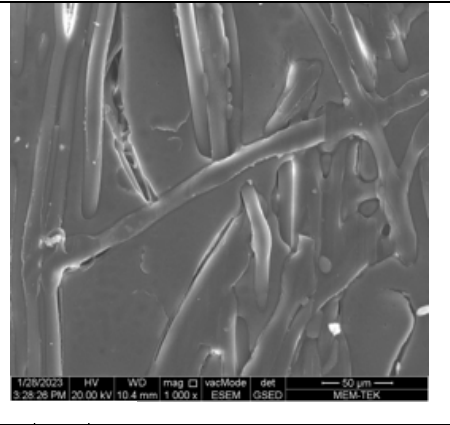
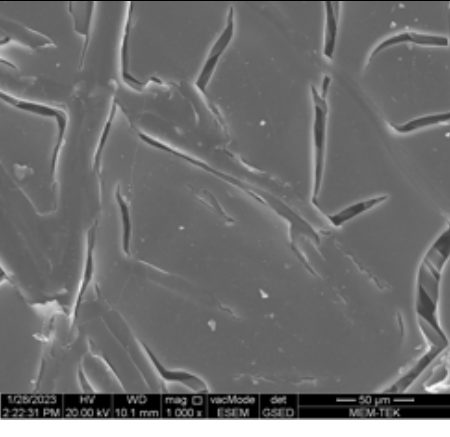
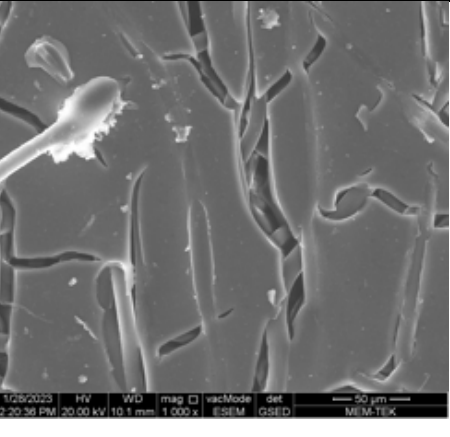
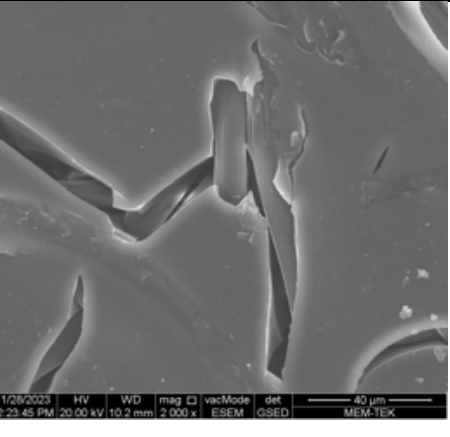
| Membran    | 24 Saat                                                                            | 48 Saat                                                                              | 168 Saat                                                                             |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| PCCell ADM |   |   |   |
| PCCell KDM |  |  |  |

Tablo C1.3: Fuji Film Type 1 membranların kimyasal dayanım testi sırasında alınan SEM görüntüleri.

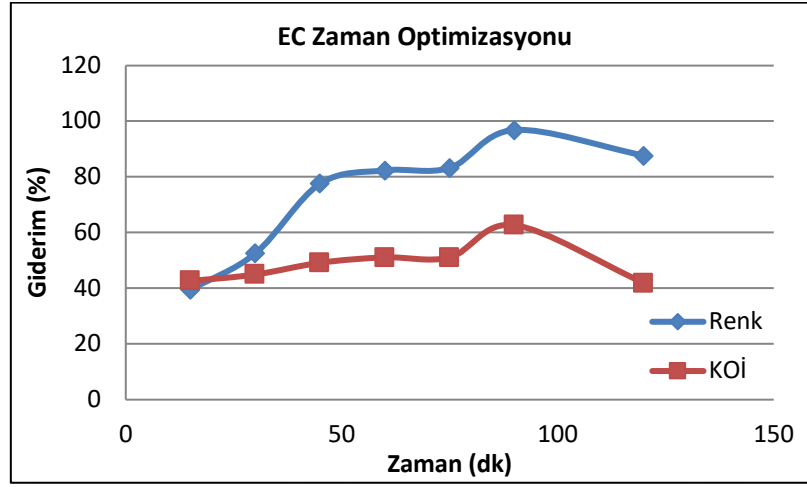
|                         |                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                               |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fuji Film Type 1<br>ADM |  <p>1/28/2023 HV WD mag □ vacMode det 10 µm<br/>1:47:56 PM 20.00 kV 10.2 mm 6.000 x ESEM GSED MEM-TEK</p> |  <p>1/28/2023 HV WD mag □ vacMode det 100 µm<br/>3:24:28 PM 20.00 kV 10.4 mm 500 x ESEM GSED MEM-TEK</p>   |  <p>1/28/2023 HV WD mag □ vacMode det 50 µm<br/>1:50:40 PM 20.00 kV 10.2 mm 1.000 x ESEM GSED MEM-TEK</p>  |
| Fuji Film Type 1<br>KDM |  <p>1/28/2023 HV WD mag □ vacMode det 100 µm<br/>2:08:32 PM 20.00 kV 10.1 mm 500 x ESEM GSED MEM-TEK</p> |  <p>1/28/2023 HV WD mag □ vacMode det 50 µm<br/>2:09:19 PM 20.00 kV 10.3 mm 1.000 x ESEM GSED MEM-TEK</p> |  <p>1/28/2023 HV WD mag □ vacMode det 50 µm<br/>2:04:43 PM 20.00 kV 10.1 mm 1.000 x ESEM GSED MEM-TEK</p> |



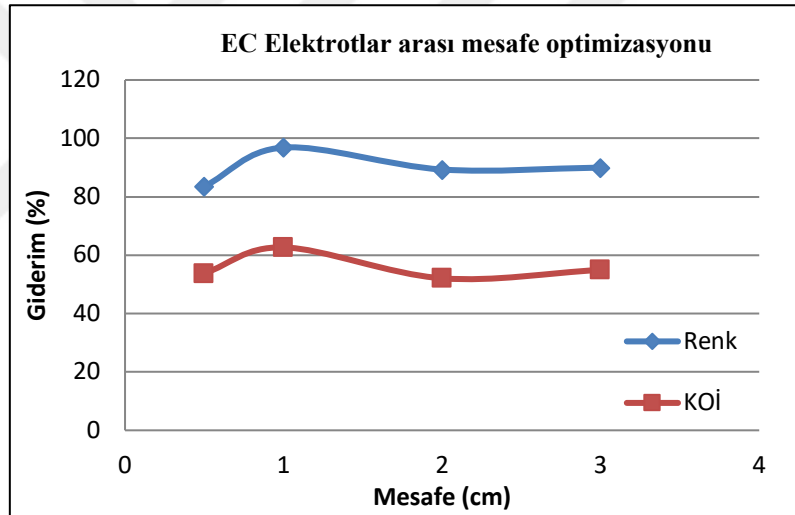
Tablo C1.3: Fuji Film Type 2 membranların kimyasal dayanım testi sırasında alınan SEM görüntüleri

|                          |                                                                                    |                                                                                      |                                                                                      |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Fuji Film Type II<br>ADM |   |   |   |
| Fuji Film Type II<br>KDM |  |  |  |

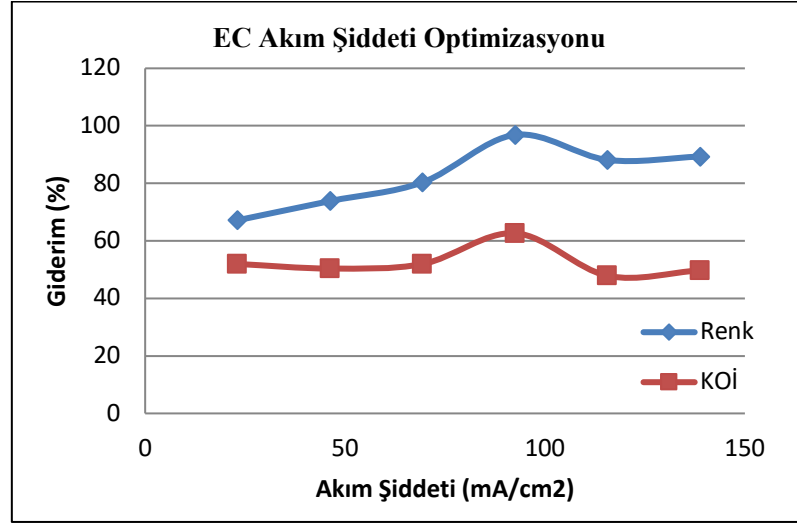
## EK D: Elektrokoagülasyon Optimizasyonu



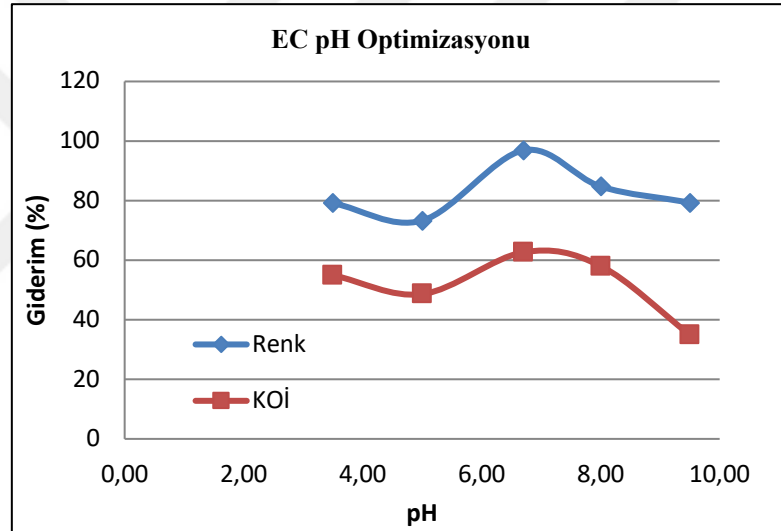
Şekil D1.1: EC zaman optimizasyonu.



Şekil D1.2 EC elektrotlar arası mesafe optimizasyonu.



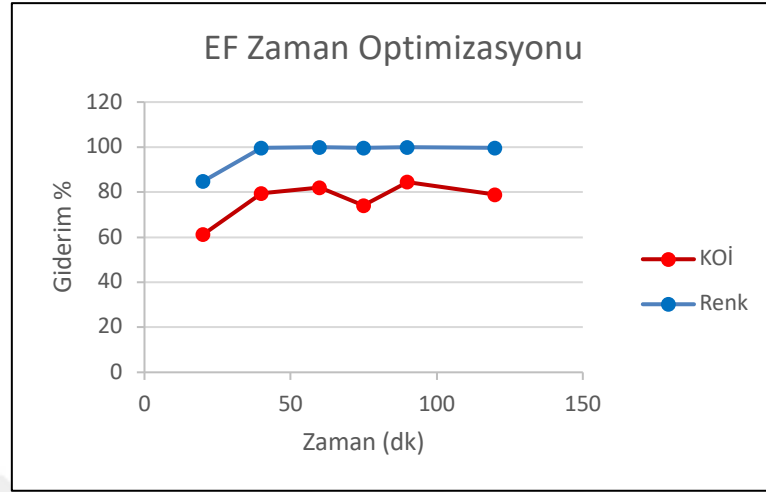
Şekil d1.3: EC akım şiddeti optimizasyonu.



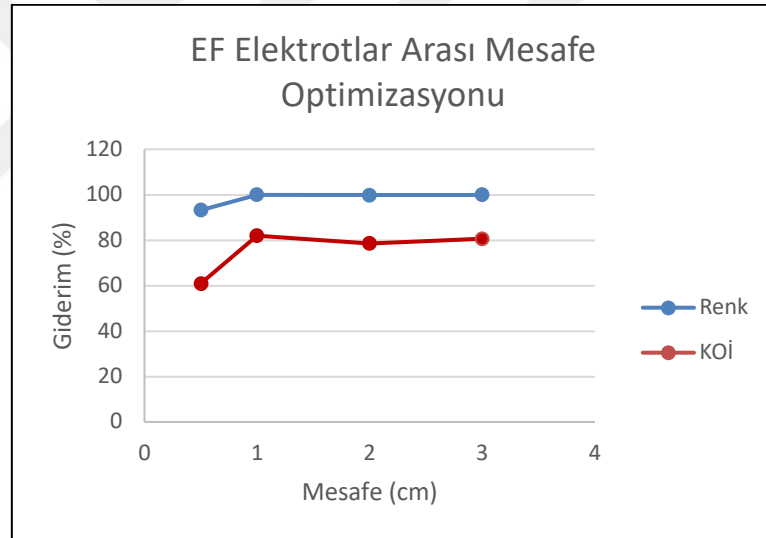
Şekil C1.4: EC pH optimizasyonu.



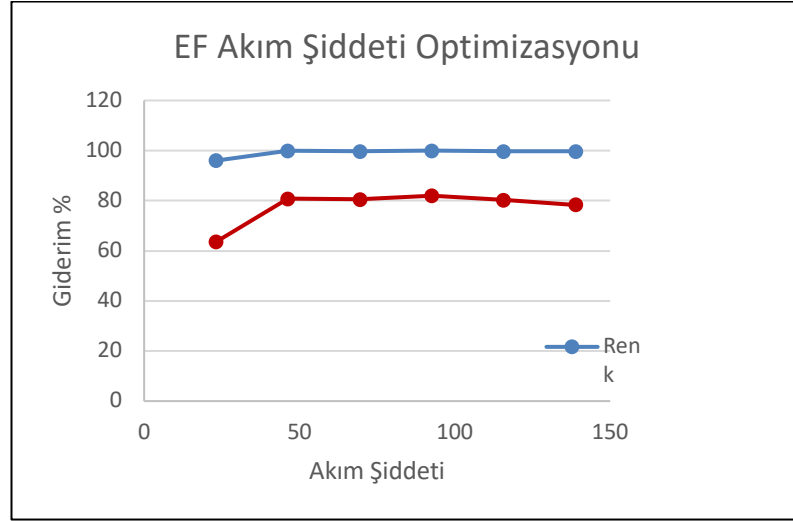
## EK E: Elektrofenton Optimizasyonu



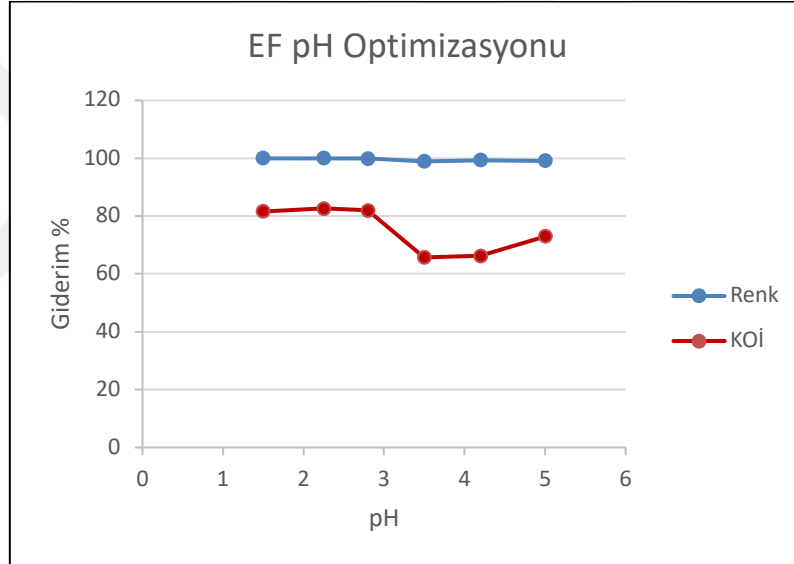
Şekil E1.1: EF Zaman optimizasyonu.



Şekil E1.2: EF Elektrotlar arası mesafe optimizasyonu.

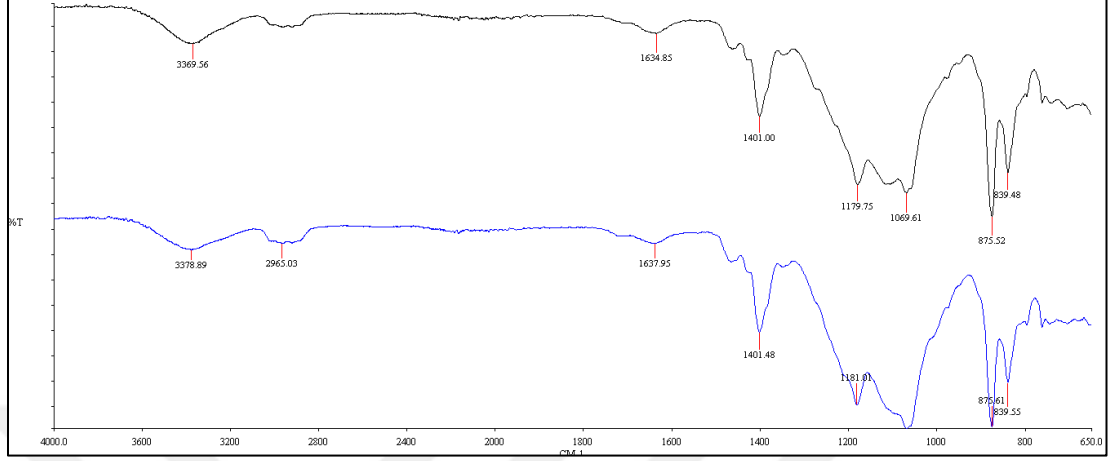


Şekil E1.3: EF Akım şiddeti optimizasyonu.

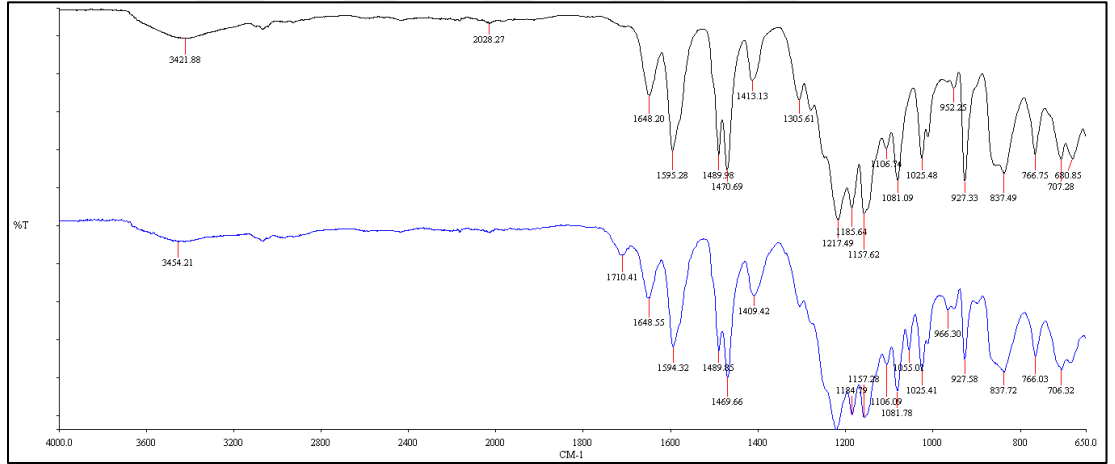


Şekil E1.4: EF pH optimizasyonu.

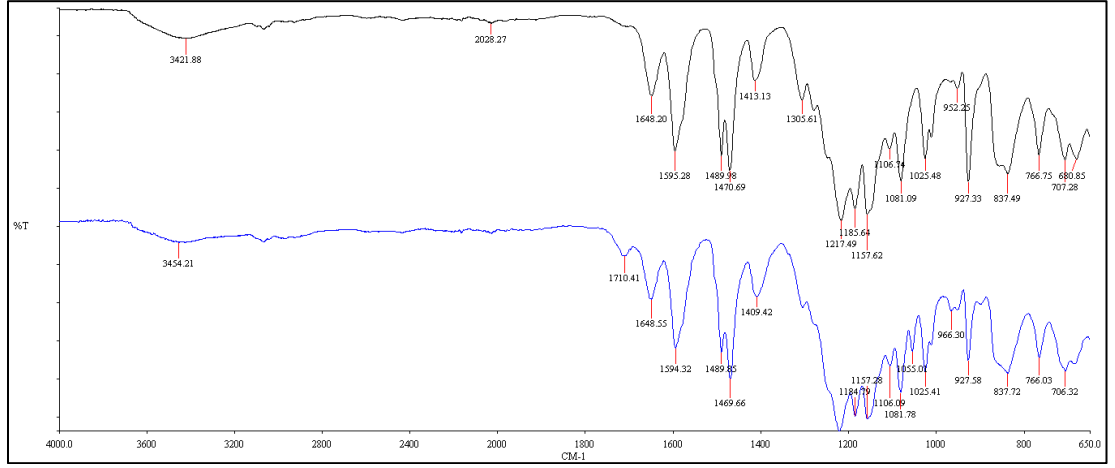
## EK F: Konsantre arıtımında kullanılan membranların FTIR spektrumları



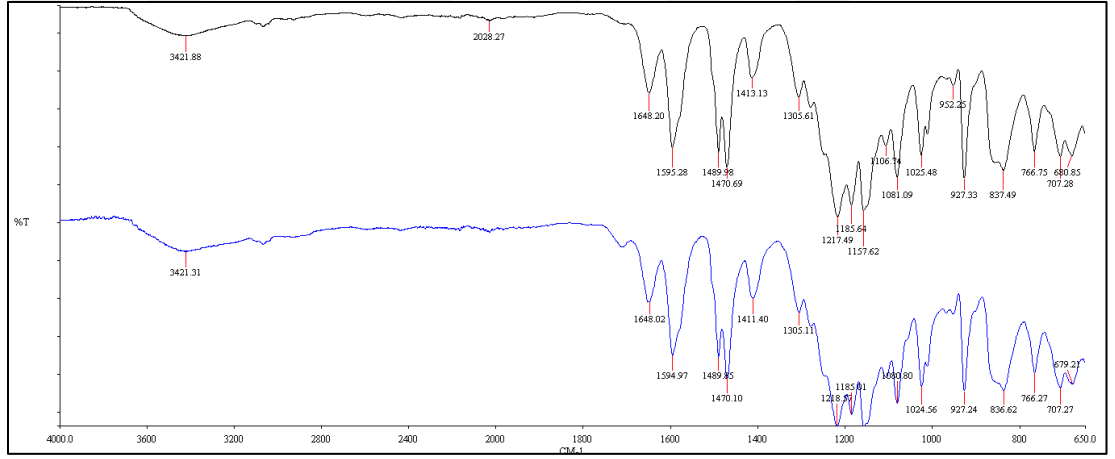
EK F1. 1: PCCell NF/EC/ADM (üstte) ve PCCell ADM (altta) membranların kıyaslanması.



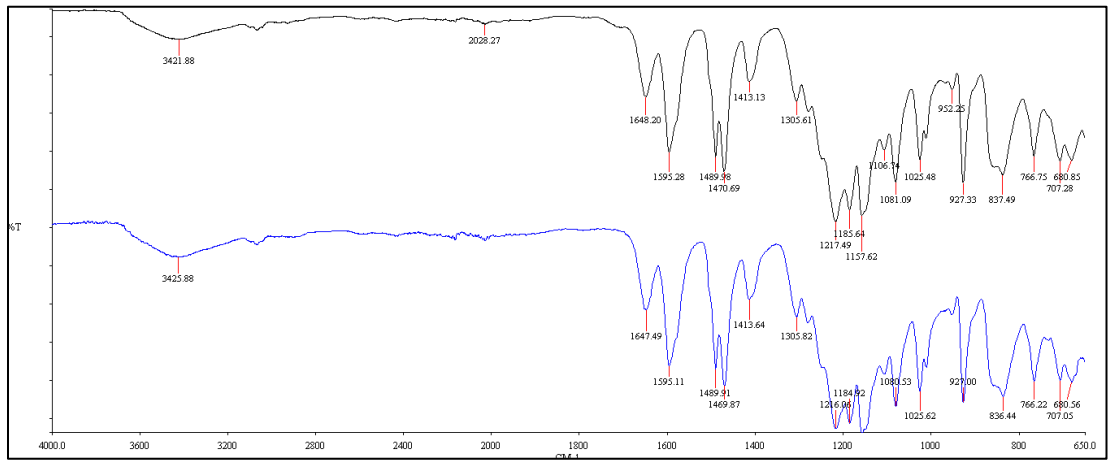
EK F1.2: PCCell NF/EC/KDM 1(üstte)ve PCCell KDM (altta) membranların kıyaslanması.



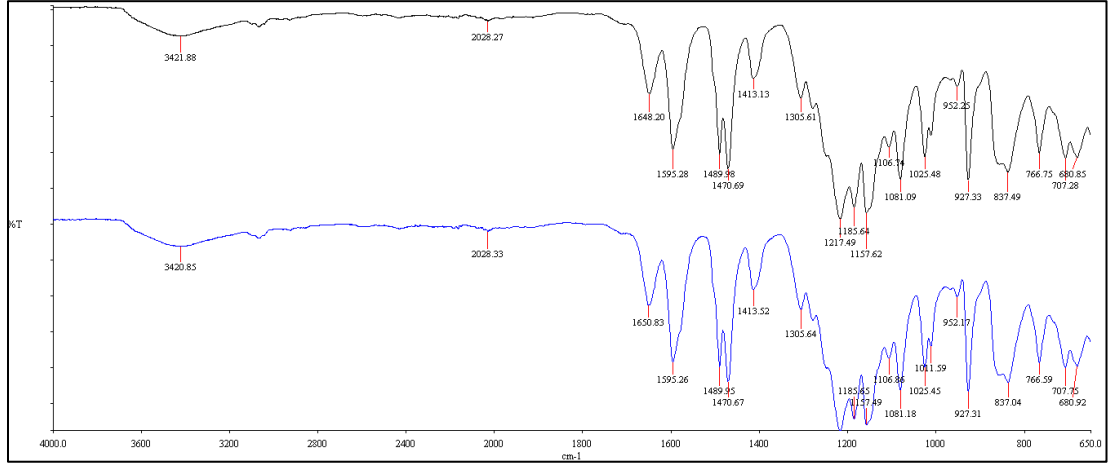
EK F1.3 PCCell NF/EC/KDM 2 (üstte) ve PCCell KDM (altta) membranların kıyaslanması.



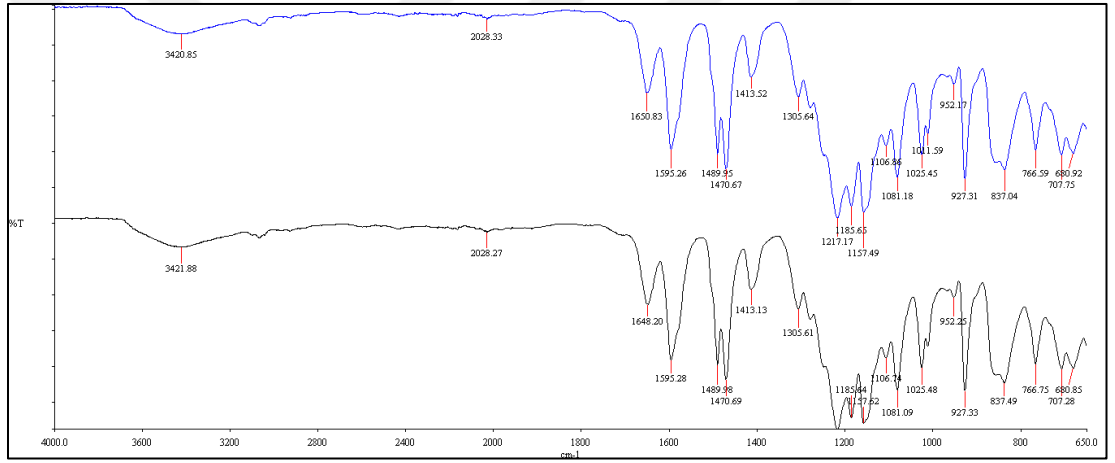
EK F1.4: PCCell TO/EC KDM (üstte) ve PCCell KDM (altta) membranların kıyaslanması.



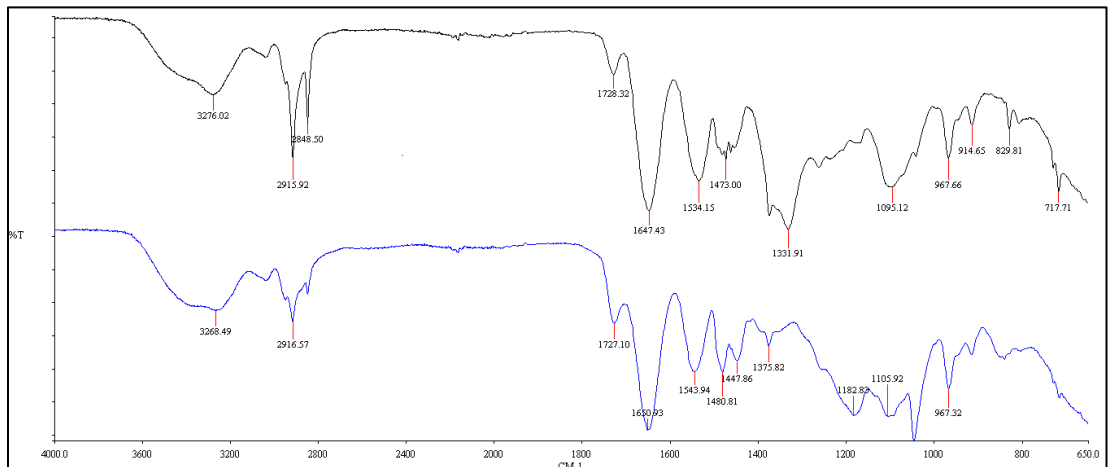
EK F1.5: PCCell TO/EC KDM 2 (üstte) ve PCCell KDM (altta) membranların kıyaslanması.



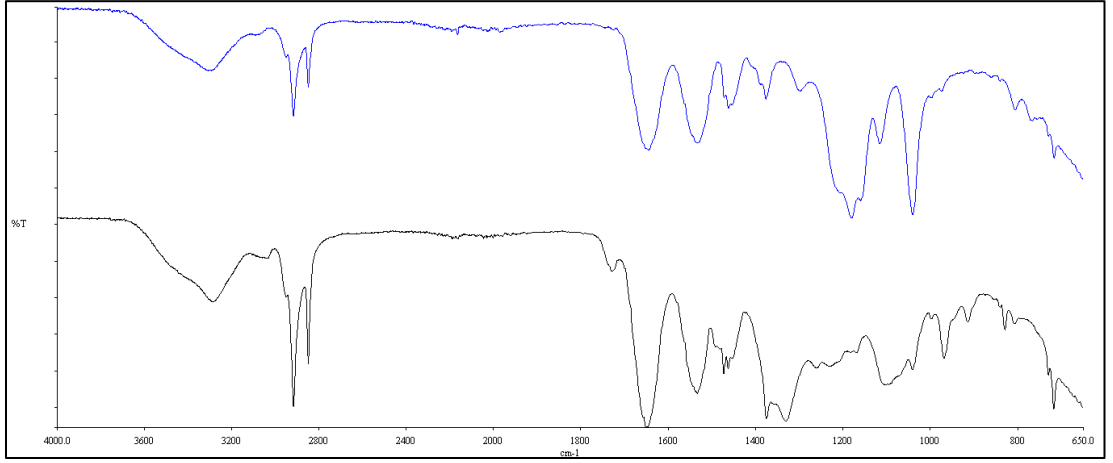
EK F1.6: PCCell NF/EF CEM1 (üstte) ve PCCell KDM (altta) membranların kıyaslanması.



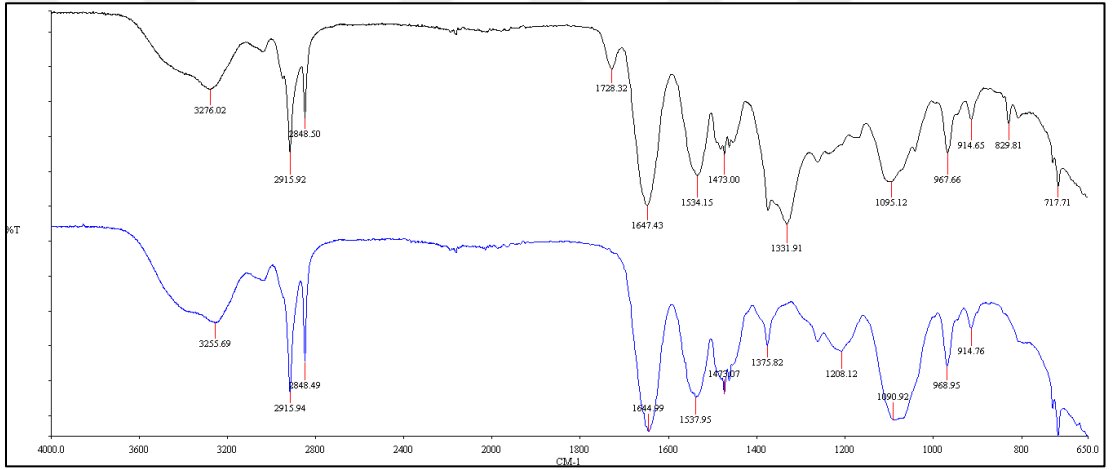
EK F1.7: PCCell NF/EF KDM (üstte) ve PCCell KDM (altta) membranların kıyaslanması.



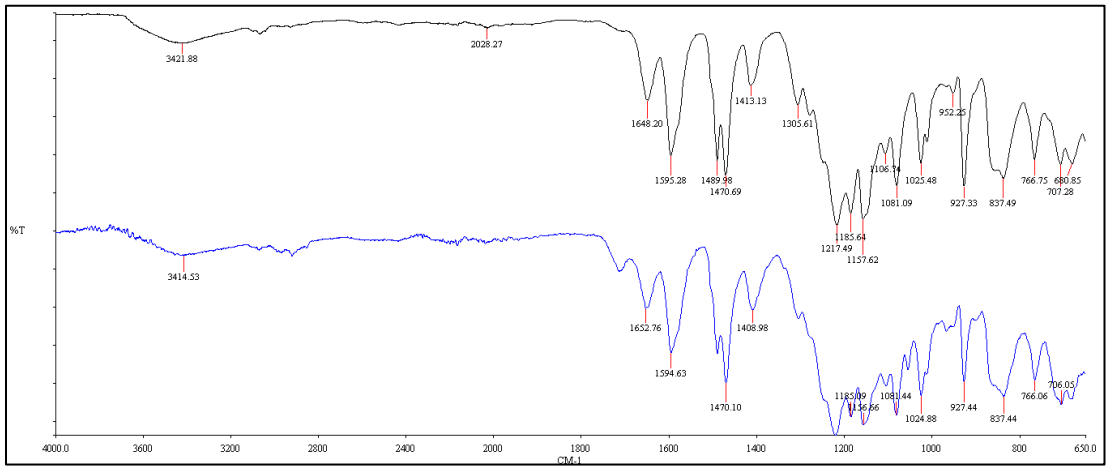
EKF1.8: Fujifilm T2 NF/EC ADM (üstte) ve Fujifilm T2 ADM (altta) membranların kıyaslanması.



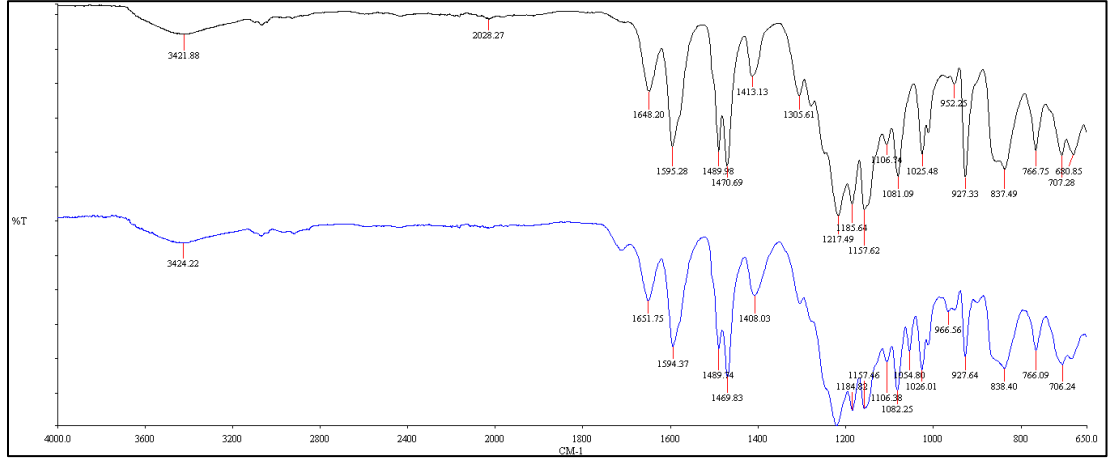
EK F1.9: Fujifilm T2 NF/EC KDM (üstte) ve Fujifilm T2 KDM (altta) membranların kıyaslanması.



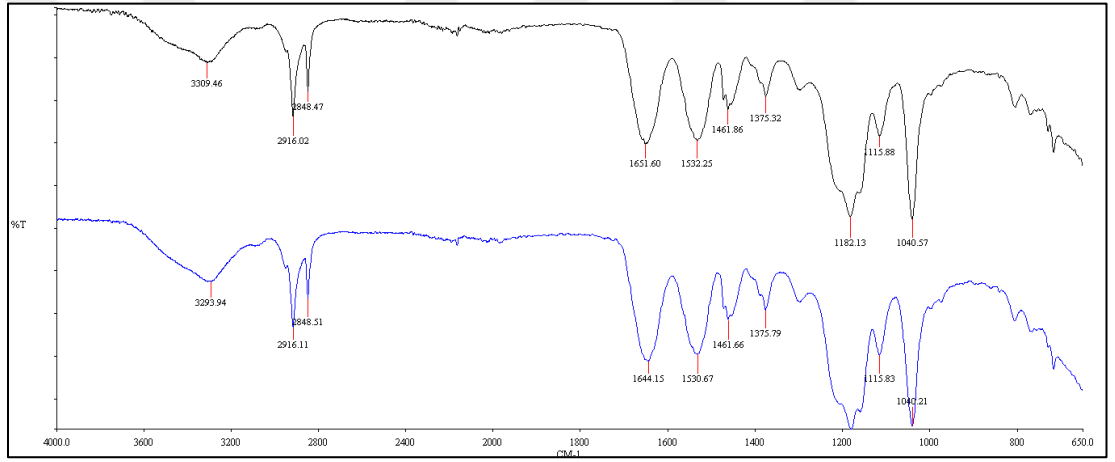
EK F1.10: Fujifilm T2 NF/EF ADM (üstte) ve Fujifilm T2 ADM (altta) membranların kıyaslanması.



EK F1.11: PCCell RO/EF KDM (üstte) ve PCCell KDM (altta) membranların kıyaslanması.



EK F1.12: PCCell RO/EF (üstte) ve PCCell KDM (altta) membranların kıyaslanması.



EK F1.13: Fujifilm T1 KDM (üstte) ve Fujifilm T1 TO/EC KDM (altta) membranların kıyaslanması.

## EK G1: Membranlara ait SEM-EDX analizleri

Tablo G1.1: Heterojen membranlara ait SEM-EDX analizleri.

Heterojen Membranlar

TM1 TO EF

/OOT/New Sample/Area 93/Num1/

kV: 20

Mag: 600

Takeoff: 36

Live Time(s): 30

Amp Time(μs): 7.68

Resolution:(eV) 126.4

| Element | Weight % | Atomic % |
|---------|----------|----------|
| C K     | 80.7     | 86.0     |
| O K     | 15.8     | 12.6     |
| F K     | 0.4      | 0.2      |
| Na K    | 0.5      | 0.3      |
| Si K    | 0.2      | 0.1      |
| P K     | 0.1      | 0.1      |
| S K     | 0.1      | 0.0      |
| Cl K    | 1.1      | 0.4      |
| Ca K    | 0.4      | 0.1      |
| Fe K    | 0.8      | 0.2      |



Tablo G1.1: Devam.

50:50 TOEC

/OOT/New Sample/Area 92/Num3/

KV: 20    Mag: 1200    Takeoff: 36.9    Live Time(s): 30    Amp Time(μs): 7.68    Resolution:(eV) 126.4

EDS spectrum showing peaks for Carbon (C), Oxygen (O), Sodium (Na), Aluminum (Al), Sulfur (S), Chlorine (Cl), Calcium (Ca), and Iron (Fe). The x-axis represents energy in keV (0.0 to 13.0), and the y-axis represents intensity in counts (0.00K to 8.64K).

| Element | Weight % | Atomic % |
|---------|----------|----------|
| C K     | 90.2     | 93.5     |
| O K     | 6.7      | 5.2      |
| Na K    | 0.2      | 0.1      |
| Al K    | 1.4      | 0.6      |
| Si K    | 0.1      | 0.0      |
| Cl K    | 1.2      | 0.4      |
| Ca K    | 0.3      | 0.1      |
| Fe K    | 0.1      | 0.0      |

60:40 NFEF

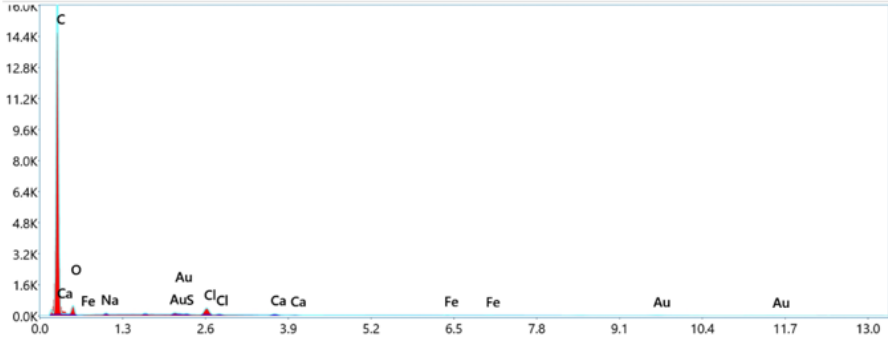
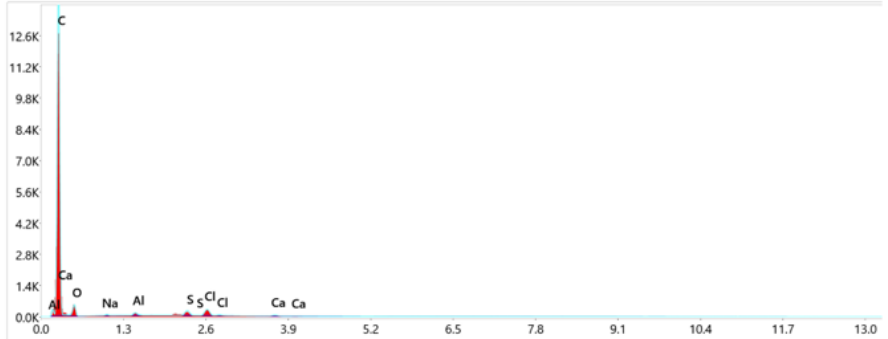
/OOT/New Sample/Area 92/Num3/

KV: 20    Mag: 1200    Takeoff: 36.9    Live Time(s): 30    Amp Time(μs): 7.68    Resolution:(eV) 126.4

EDS spectrum showing peaks for Carbon (C), Oxygen (O), Sodium (Na), Aluminum (Al), Sulfur (S), Chlorine (Cl), Calcium (Ca), and Iron (Fe). The x-axis represents energy in keV (0.0 to 13.0), and the y-axis represents intensity in counts (0.00K to 8.64K).

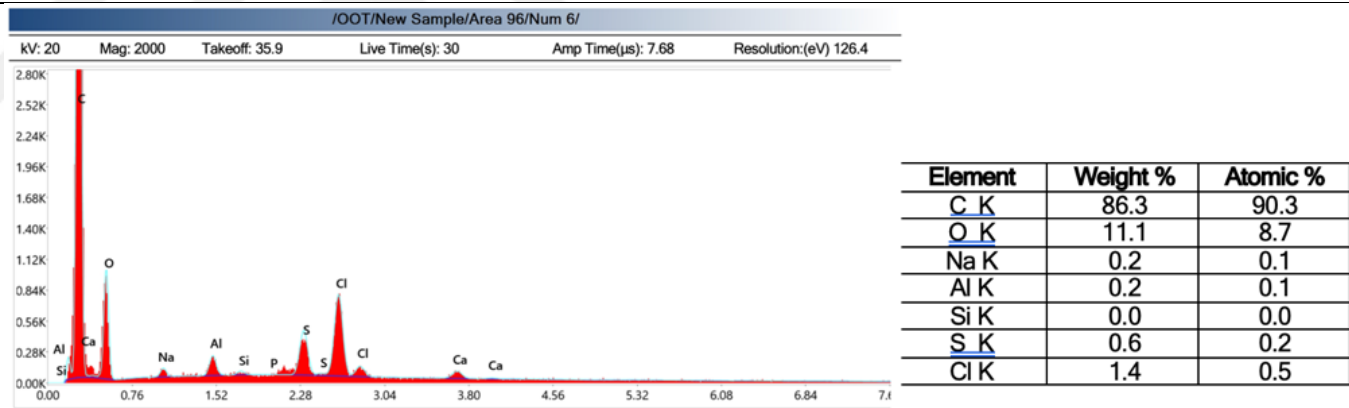
| Element | Weight % | Atomic % |
|---------|----------|----------|
| C K     | 85.6     | 90.0     |
| O K     | 11.3     | 8.9      |
| Na K    | 0.3      | 0.2      |
| Al K    | 0.1      | 0.0      |
| S K     | 0.3      | 0.1      |
| Cl K    | 1.4      | 0.5      |
| Ca K    | 0.5      | 0.2      |
| Fe K    | 0.4      | 0.1      |

Tablo G1.1: Devam.

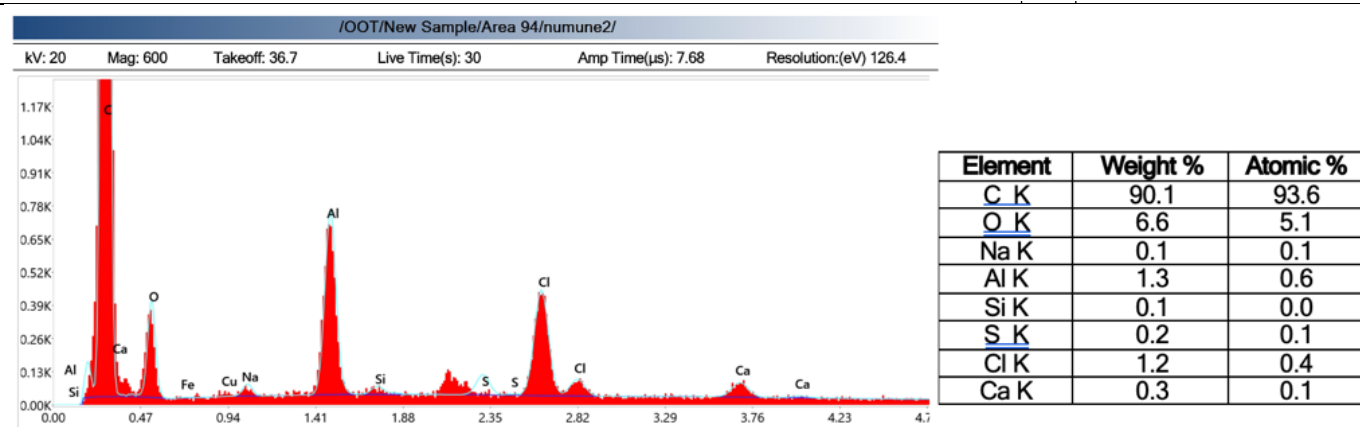
| 50:50 NFEF | <div><table><tr><th>Element</th><th>Weight %</th><th>Atomic %</th></tr><tr><td>C_K</td><td>93.3</td><td>96.3</td></tr><tr><td>O_K</td><td>4.1</td><td>3.2</td></tr><tr><td>Na_K</td><td>0.1</td><td>0.1</td></tr><tr><td>S_K</td><td>0.1</td><td>0.0</td></tr><tr><td>Cl_K</td><td>0.5</td><td>0.2</td></tr><tr><td>Ca_K</td><td>0.2</td><td>0.1</td></tr><tr><td>Fe_K</td><td>0.1</td><td>0.0</td></tr><tr><td>Au_L</td><td>1.6</td><td>0.1</td></tr></table></div>                                                                                                                          | Element  | Weight % | Atomic % | C_K | 93.3 | 96.3 | O_K | 4.1 | 3.2 | Na_K | 0.1 | 0.1 | S_K  | 0.1 | 0.0 | Cl_K | 0.5 | 0.2 | Ca_K | 0.2 | 0.1 | Fe_K | 0.1 | 0.0 | Au_L | 1.6 | 0.1 |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|-----|------|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|------|-----|-----|------|-----|-----|------|-----|-----|------|-----|-----|------|-----|-----|
| Element    | Weight %                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Atomic % |          |          |     |      |      |     |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |
| C_K        | 93.3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 96.3     |          |          |     |      |      |     |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |
| O_K        | 4.1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 3.2      |          |          |     |      |      |     |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |
| Na_K       | 0.1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0.1      |          |          |     |      |      |     |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |
| S_K        | 0.1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0.0      |          |          |     |      |      |     |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |
| Cl_K       | 0.5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0.2      |          |          |     |      |      |     |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |
| Ca_K       | 0.2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0.1      |          |          |     |      |      |     |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |
| Fe_K       | 0.1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0.0      |          |          |     |      |      |     |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |
| Au_L       | 1.6                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0.1      |          |          |     |      |      |     |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |
| 60:40 TOEC | <div><div>/OOT/New Sample/Area 97/num 5/</div><div>KV: 20    Mag: 1000    Takeoff: 35.9    Live Time(s): 30    Amp Time(μs): 7.68    Resolution:(eV) 126.4</div><div><table><tr><th>Element</th><th>Weight %</th><th>Atomic %</th></tr><tr><td>C_K</td><td>93.6</td><td>95.5</td></tr><tr><td>O_K</td><td>5.3</td><td>4.0</td></tr><tr><td>Na_K</td><td>0.1</td><td>0.1</td></tr><tr><td>Al_K</td><td>0.1</td><td>0.1</td></tr><tr><td>S_K</td><td>0.3</td><td>0.1</td></tr><tr><td>Cl_K</td><td>0.5</td><td>0.2</td></tr><tr><td>Ca_K</td><td>0.1</td><td>0.0</td></tr></table></div></div> | Element  | Weight % | Atomic % | C_K | 93.6 | 95.5 | O_K | 5.3 | 4.0 | Na_K | 0.1 | 0.1 | Al_K | 0.1 | 0.1 | S_K  | 0.3 | 0.1 | Cl_K | 0.5 | 0.2 | Ca_K | 0.1 | 0.0 |      |     |     |
| Element    | Weight %                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Atomic % |          |          |     |      |      |     |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |
| C_K        | 93.6                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 95.5     |          |          |     |      |      |     |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |
| O_K        | 5.3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 4.0      |          |          |     |      |      |     |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |
| Na_K       | 0.1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0.1      |          |          |     |      |      |     |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |
| Al_K       | 0.1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0.1      |          |          |     |      |      |     |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |
| S_K        | 0.3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0.1      |          |          |     |      |      |     |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |
| Cl_K       | 0.5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0.2      |          |          |     |      |      |     |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |
| Ca_K       | 0.1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0.0      |          |          |     |      |      |     |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |      |     |     |

Tablo G1.1: Devam.

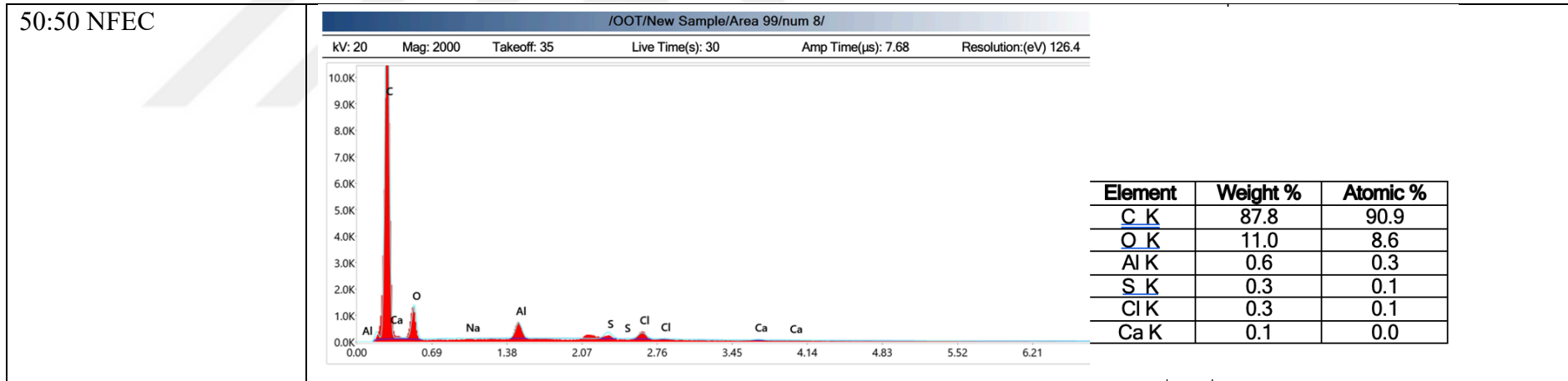
60:40 NFEC



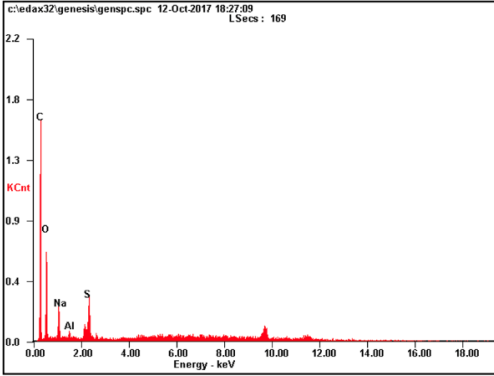
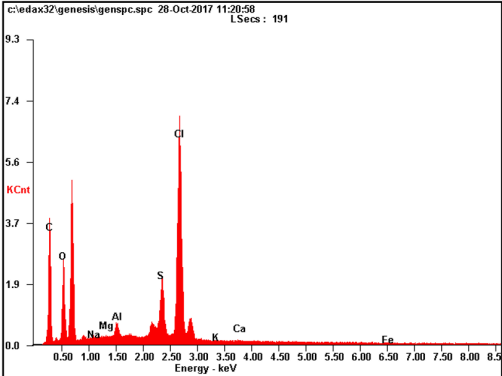
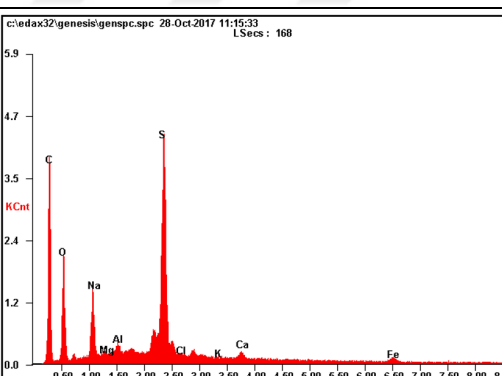
TM1 TOEC



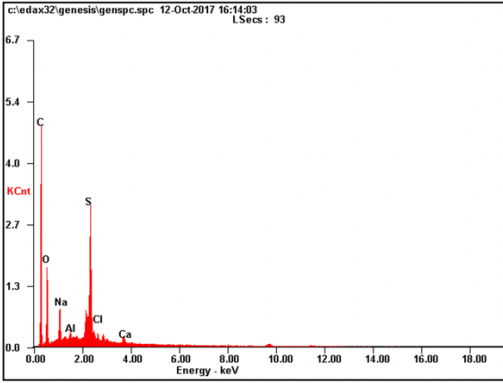
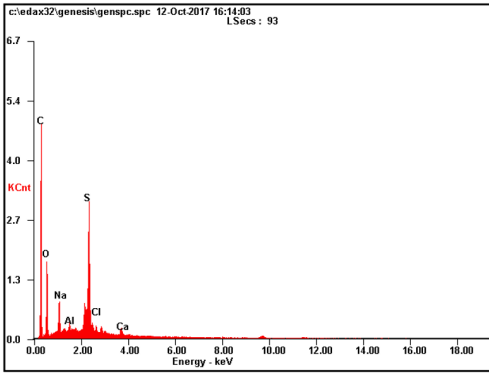
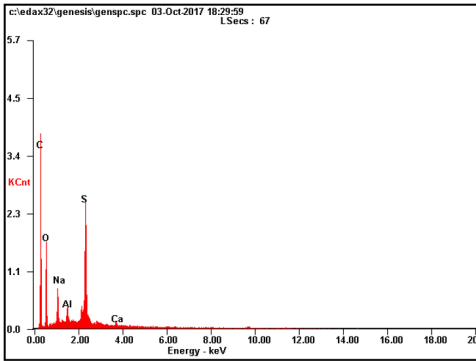
Tablo G1.1: Devam.



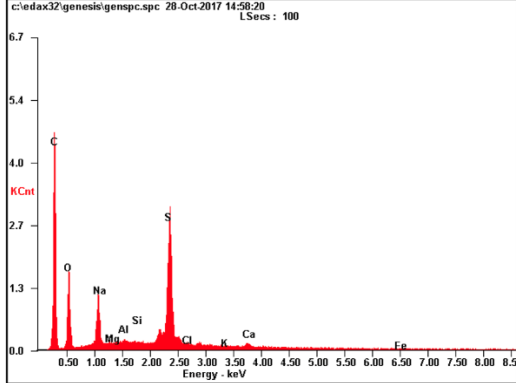
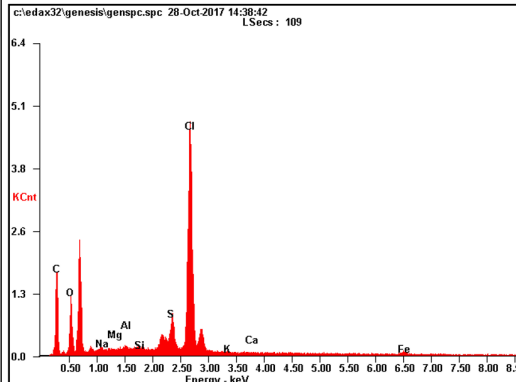
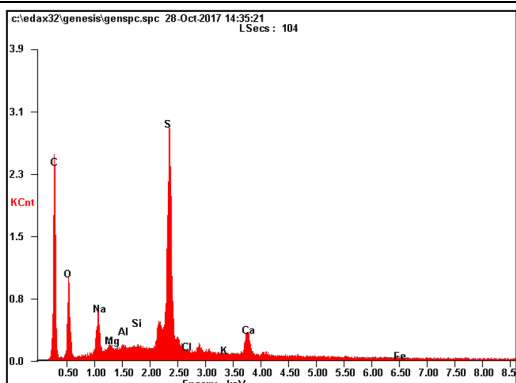
Tablo G1.2: NF/EC/ED konsantresi ile kullanılmış PCCell Membranlara ait SEM-EDX analizleri.

| PCCell  | NF/EC/ED                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|------|------|-----|-------|-------|-----|-------|-------|-----|-------|-------|-----|-------|-------|-----|-------|-------|-----|-------|-------|-----|-------|-------|-----|-------|-------|-----|-------|-------|-----|-------|-------|
| KDM1    |    | <table><tr><th>Element</th><th>Wt %</th><th>At %</th></tr><tr><td>C K</td><td>59.58</td><td>68.18</td></tr><tr><td>O K</td><td>31.92</td><td>27.42</td></tr><tr><td>NaK</td><td>04.16</td><td>02.49</td></tr><tr><td>AlK</td><td>00.61</td><td>00.31</td></tr><tr><td>S K</td><td>03.73</td><td>01.60</td></tr></table>                                                                                                                                                                                                                                                      | Element | Wt % | At % | C K | 59.58 | 68.18 | O K | 31.92 | 27.42 | NaK | 04.16 | 02.49 | AlK | 00.61 | 00.31 | S K | 03.73 | 01.60 |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| Element | Wt %                                                                                | At %                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| C K     | 59.58                                                                               | 68.18                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| O K     | 31.92                                                                               | 27.42                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| NaK     | 04.16                                                                               | 02.49                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| AlK     | 00.61                                                                               | 00.31                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| S K     | 03.73                                                                               | 01.60                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| ADM     |   | <table><tr><th>Element</th><th>Wt %</th><th>At %</th></tr><tr><td>C K</td><td>56.20</td><td>69.88</td></tr><tr><td>O K</td><td>22.20</td><td>20.72</td></tr><tr><td>NaK</td><td>00.20</td><td>00.13</td></tr><tr><td>MgK</td><td>00.08</td><td>00.05</td></tr><tr><td>AlK</td><td>00.84</td><td>00.46</td></tr><tr><td>S K</td><td>03.70</td><td>01.72</td></tr><tr><td>ClK</td><td>16.51</td><td>06.95</td></tr><tr><td>K K</td><td>00.00</td><td>00.00</td></tr><tr><td>CaK</td><td>00.06</td><td>00.02</td></tr><tr><td>FeK</td><td>00.21</td><td>00.06</td></tr></table> | Element | Wt % | At % | C K | 56.20 | 69.88 | O K | 22.20 | 20.72 | NaK | 00.20 | 00.13 | MgK | 00.08 | 00.05 | AlK | 00.84 | 00.46 | S K | 03.70 | 01.72 | ClK | 16.51 | 06.95 | K K | 00.00 | 00.00 | CaK | 00.06 | 00.02 | FeK | 00.21 | 00.06 |
| Element | Wt %                                                                                | At %                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| C K     | 56.20                                                                               | 69.88                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| O K     | 22.20                                                                               | 20.72                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| NaK     | 00.20                                                                               | 00.13                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| MgK     | 00.08                                                                               | 00.05                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| AlK     | 00.84                                                                               | 00.46                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| S K     | 03.70                                                                               | 01.72                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| ClK     | 16.51                                                                               | 06.95                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| K K     | 00.00                                                                               | 00.00                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| CaK     | 00.06                                                                               | 00.02                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| FeK     | 00.21                                                                               | 00.06                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| KDM2    |  | <table><tr><th>Element</th><th>Wt %</th><th>At %</th></tr><tr><td>C K</td><td>57.10</td><td>69.31</td></tr><tr><td>O K</td><td>22.94</td><td>20.90</td></tr><tr><td>NaK</td><td>05.25</td><td>03.33</td></tr><tr><td>MgK</td><td>00.18</td><td>00.11</td></tr><tr><td>AlK</td><td>00.53</td><td>00.29</td></tr><tr><td>S K</td><td>11.98</td><td>05.45</td></tr><tr><td>ClK</td><td>00.12</td><td>00.05</td></tr><tr><td>K K</td><td>00.04</td><td>00.01</td></tr><tr><td>CaK</td><td>00.60</td><td>00.22</td></tr><tr><td>FeK</td><td>01.27</td><td>00.33</td></tr></table> | Element | Wt % | At % | C K | 57.10 | 69.31 | O K | 22.94 | 20.90 | NaK | 05.25 | 03.33 | MgK | 00.18 | 00.11 | AlK | 00.53 | 00.29 | S K | 11.98 | 05.45 | ClK | 00.12 | 00.05 | K K | 00.04 | 00.01 | CaK | 00.60 | 00.22 | FeK | 01.27 | 00.33 |
| Element | Wt %                                                                                | At %                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| C K     | 57.10                                                                               | 69.31                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| O K     | 22.94                                                                               | 20.90                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| NaK     | 05.25                                                                               | 03.33                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| MgK     | 00.18                                                                               | 00.11                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| AlK     | 00.53                                                                               | 00.29                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| S K     | 11.98                                                                               | 05.45                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| ClK     | 00.12                                                                               | 00.05                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| K K     | 00.04                                                                               | 00.01                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| CaK     | 00.60                                                                               | 00.22                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| FeK     | 01.27                                                                               | 00.33                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |

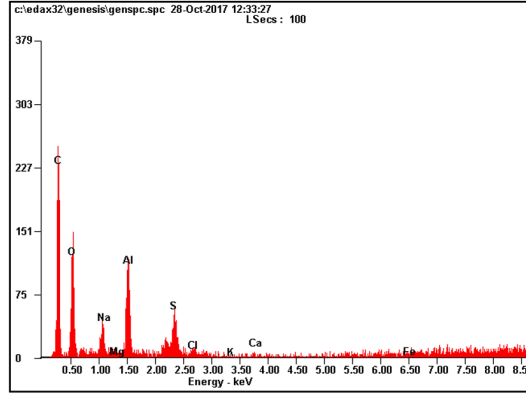
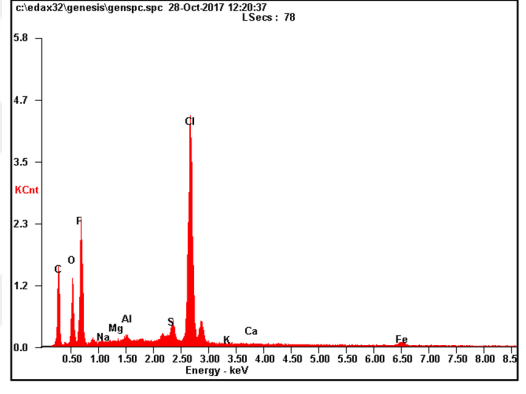
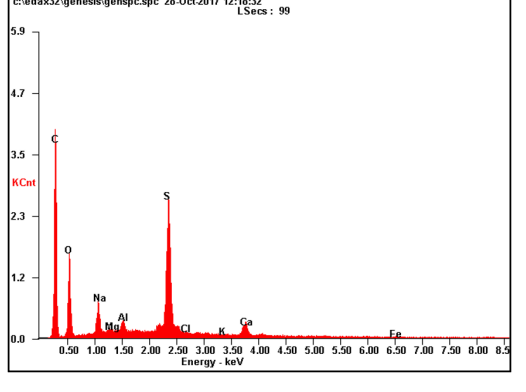
Tablo G1.3: TO/EC/ED konsantresi ile kullanılmış PCCell Membranlara ait SEM-EDX analizleri.

| PCCell     |                                                                                     | TO/EC/ED                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |      |         |      |      |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|---------|------|------|------------|-------|-------|------------|-------|-------|------------|-------|-------|------------|-------|-------|------------|-------|-------|------------|-------|-------|------------|-------|-------|
| KDM1       |    | <table><tr><th>Element</th><th>Wt %</th><th>At %</th></tr><tr><td><b>C K</b></td><td>63.06</td><td>73.37</td></tr><tr><td><b>O K</b></td><td>22.90</td><td>20.00</td></tr><tr><td><b>NaK</b></td><td>03.28</td><td>02.00</td></tr><tr><td><b>AlK</b></td><td>00.41</td><td>00.21</td></tr><tr><td><b>S K</b></td><td>09.00</td><td>03.92</td></tr><tr><td><b>ClK</b></td><td>00.56</td><td>00.22</td></tr><tr><td><b>CaK</b></td><td>00.80</td><td>00.28</td></tr></table> |      | Element | Wt % | At % | <b>C K</b> | 63.06 | 73.37 | <b>O K</b> | 22.90 | 20.00 | <b>NaK</b> | 03.28 | 02.00 | <b>AlK</b> | 00.41 | 00.21 | <b>S K</b> | 09.00 | 03.92 | <b>ClK</b> | 00.56 | 00.22 | <b>CaK</b> | 00.80 | 00.28 |
|            | Element                                                                             | Wt %                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | At % |         |      |      |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |
| <b>C K</b> | 63.06                                                                               | 73.37                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |      |         |      |      |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |
| <b>O K</b> | 22.90                                                                               | 20.00                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |      |         |      |      |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |
| <b>NaK</b> | 03.28                                                                               | 02.00                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |      |         |      |      |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |
| <b>AlK</b> | 00.41                                                                               | 00.21                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |      |         |      |      |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |
| <b>S K</b> | 09.00                                                                               | 03.92                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |      |         |      |      |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |
| <b>ClK</b> | 00.56                                                                               | 00.22                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |      |         |      |      |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |
| <b>CaK</b> | 00.80                                                                               | 00.28                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |      |         |      |      |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |
| ADM        |   | <table><tr><th>Element</th><th>Wt %</th><th>At %</th></tr><tr><td><b>C K</b></td><td>63.06</td><td>73.37</td></tr><tr><td><b>O K</b></td><td>22.90</td><td>20.00</td></tr><tr><td><b>NaK</b></td><td>03.28</td><td>02.00</td></tr><tr><td><b>AlK</b></td><td>00.41</td><td>00.21</td></tr><tr><td><b>S K</b></td><td>09.00</td><td>03.92</td></tr><tr><td><b>ClK</b></td><td>00.56</td><td>00.22</td></tr><tr><td><b>CaK</b></td><td>00.80</td><td>00.28</td></tr></table> |      | Element | Wt % | At % | <b>C K</b> | 63.06 | 73.37 | <b>O K</b> | 22.90 | 20.00 | <b>NaK</b> | 03.28 | 02.00 | <b>AlK</b> | 00.41 | 00.21 | <b>S K</b> | 09.00 | 03.92 | <b>ClK</b> | 00.56 | 00.22 | <b>CaK</b> | 00.80 | 00.28 |
| Element    | Wt %                                                                                | At %                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |      |         |      |      |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |
| <b>C K</b> | 63.06                                                                               | 73.37                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |      |         |      |      |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |
| <b>O K</b> | 22.90                                                                               | 20.00                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |      |         |      |      |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |
| <b>NaK</b> | 03.28                                                                               | 02.00                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |      |         |      |      |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |
| <b>AlK</b> | 00.41                                                                               | 00.21                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |      |         |      |      |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |
| <b>S K</b> | 09.00                                                                               | 03.92                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |      |         |      |      |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |
| <b>ClK</b> | 00.56                                                                               | 00.22                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |      |         |      |      |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |
| <b>CaK</b> | 00.80                                                                               | 00.28                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |      |         |      |      |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |
| KDM2       |  | <table><tr><th>Element</th><th>Wt %</th><th>At %</th></tr><tr><td><b>C K</b></td><td>60.53</td><td>71.01</td></tr><tr><td><b>O K</b></td><td>24.58</td><td>21.65</td></tr><tr><td><b>NaK</b></td><td>04.27</td><td>02.62</td></tr><tr><td><b>AlK</b></td><td>01.21</td><td>00.63</td></tr><tr><td><b>S K</b></td><td>08.91</td><td>03.92</td></tr><tr><td><b>CaK</b></td><td>00.50</td><td>00.18</td></tr></table>                                                         |      | Element | Wt % | At % | <b>C K</b> | 60.53 | 71.01 | <b>O K</b> | 24.58 | 21.65 | <b>NaK</b> | 04.27 | 02.62 | <b>AlK</b> | 01.21 | 00.63 | <b>S K</b> | 08.91 | 03.92 | <b>CaK</b> | 00.50 | 00.18 |            |       |       |
| Element    | Wt %                                                                                | At %                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |      |         |      |      |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |
| <b>C K</b> | 60.53                                                                               | 71.01                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |      |         |      |      |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |
| <b>O K</b> | 24.58                                                                               | 21.65                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |      |         |      |      |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |
| <b>NaK</b> | 04.27                                                                               | 02.62                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |      |         |      |      |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |
| <b>AlK</b> | 01.21                                                                               | 00.63                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |      |         |      |      |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |
| <b>S K</b> | 08.91                                                                               | 03.92                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |      |         |      |      |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |
| <b>CaK</b> | 00.50                                                                               | 00.18                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |      |         |      |      |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |

Tablo G1.4: NF/EF/ED konsantresi ile kullanılmış PCCell Membranlara ait SEM-EDX analizleri

| PCCell |                                                                                     | NF/EF/ED                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |      |  |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|--|---------|------|------|-----|-------|-------|-----|-------|-------|-----|-------|-------|-----|-------|-------|-----|-------|-------|-----|-------|-------|-----|-------|-------|-----|-------|-------|-----|-------|-------|-----|-------|-------|-----|-------|-------|
| KDM1   |    | <table><tr><th>Element</th><th>Wt %</th><th>At %</th></tr><tr><td>C K</td><td>55.83</td><td>71.68</td></tr><tr><td>O K</td><td>13.77</td><td>13.27</td></tr><tr><td>NaK</td><td>04.85</td><td>03.26</td></tr><tr><td>MgK</td><td>00.07</td><td>00.04</td></tr><tr><td>AlK</td><td>00.22</td><td>00.12</td></tr><tr><td>SiK</td><td>00.06</td><td>00.03</td></tr><tr><td>S K</td><td>21.37</td><td>10.28</td></tr><tr><td>ClK</td><td>00.48</td><td>00.21</td></tr><tr><td>K K</td><td>00.16</td><td>00.06</td></tr><tr><td>CaK</td><td>01.50</td><td>00.58</td></tr><tr><td>FeK</td><td>01.70</td><td>00.47</td></tr></table> |      |  | Element | Wt % | At % | C K | 55.83 | 71.68 | O K | 13.77 | 13.27 | NaK | 04.85 | 03.26 | MgK | 00.07 | 00.04 | AlK | 00.22 | 00.12 | SiK | 00.06 | 00.03 | S K | 21.37 | 10.28 | ClK | 00.48 | 00.21 | K K | 00.16 | 00.06 | CaK | 01.50 | 00.58 | FeK | 01.70 | 00.47 |
|        | Element                                                                             | Wt %                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | At % |  |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| C K    | 55.83                                                                               | 71.68                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |  |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| O K    | 13.77                                                                               | 13.27                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |  |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| NaK    | 04.85                                                                               | 03.26                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |  |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| MgK    | 00.07                                                                               | 00.04                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |  |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| AlK    | 00.22                                                                               | 00.12                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |  |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| SiK    | 00.06                                                                               | 00.03                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |  |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| S K    | 21.37                                                                               | 10.28                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |  |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| ClK    | 00.48                                                                               | 00.21                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |  |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| K K    | 00.16                                                                               | 00.06                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |  |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| CaK    | 01.50                                                                               | 00.58                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |  |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| FeK    | 01.70                                                                               | 00.47                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |  |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| ADM    |   | <table><tr><th>Element</th><th>Wt %</th><th>At %</th></tr><tr><td>C K</td><td>53.36</td><td>69.10</td></tr><tr><td>O K</td><td>18.59</td><td>18.08</td></tr><tr><td>NaK</td><td>01.06</td><td>00.72</td></tr><tr><td>MgK</td><td>00.66</td><td>00.42</td></tr><tr><td>AlK</td><td>00.79</td><td>00.45</td></tr><tr><td>SiK</td><td>00.63</td><td>00.35</td></tr><tr><td>S K</td><td>02.81</td><td>01.36</td></tr><tr><td>ClK</td><td>20.67</td><td>09.07</td></tr><tr><td>K K</td><td>00.27</td><td>00.11</td></tr><tr><td>CaK</td><td>00.19</td><td>00.07</td></tr><tr><td>FeK</td><td>00.96</td><td>00.27</td></tr></table> |      |  | Element | Wt % | At % | C K | 53.36 | 69.10 | O K | 18.59 | 18.08 | NaK | 01.06 | 00.72 | MgK | 00.66 | 00.42 | AlK | 00.79 | 00.45 | SiK | 00.63 | 00.35 | S K | 02.81 | 01.36 | ClK | 20.67 | 09.07 | K K | 00.27 | 00.11 | CaK | 00.19 | 00.07 | FeK | 00.96 | 00.27 |
|        | Element                                                                             | Wt %                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | At % |  |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| C K    | 53.36                                                                               | 69.10                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |  |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| O K    | 18.59                                                                               | 18.08                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |  |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| NaK    | 01.06                                                                               | 00.72                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |  |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| MgK    | 00.66                                                                               | 00.42                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |  |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| AlK    | 00.79                                                                               | 00.45                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |  |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| SiK    | 00.63                                                                               | 00.35                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |  |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| S K    | 02.81                                                                               | 01.36                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |  |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| ClK    | 20.67                                                                               | 09.07                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |  |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| K K    | 00.27                                                                               | 00.11                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |  |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| CaK    | 00.19                                                                               | 00.07                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |  |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| FeK    | 00.96                                                                               | 00.27                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |  |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| KDM2   |  | <table><tr><th>Element</th><th>Wt %</th><th>At %</th></tr><tr><td>C K</td><td>60.13</td><td>72.50</td></tr><tr><td>O K</td><td>19.92</td><td>18.03</td></tr><tr><td>NaK</td><td>03.54</td><td>02.23</td></tr><tr><td>MgK</td><td>00.44</td><td>00.26</td></tr><tr><td>AlK</td><td>00.20</td><td>00.11</td></tr><tr><td>SiK</td><td>00.16</td><td>00.08</td></tr><tr><td>S K</td><td>13.01</td><td>05.87</td></tr><tr><td>ClK</td><td>00.05</td><td>00.02</td></tr><tr><td>K K</td><td>00.00</td><td>00.00</td></tr><tr><td>CaK</td><td>02.26</td><td>00.82</td></tr><tr><td>FeK</td><td>00.28</td><td>00.07</td></tr></table> |      |  | Element | Wt % | At % | C K | 60.13 | 72.50 | O K | 19.92 | 18.03 | NaK | 03.54 | 02.23 | MgK | 00.44 | 00.26 | AlK | 00.20 | 00.11 | SiK | 00.16 | 00.08 | S K | 13.01 | 05.87 | ClK | 00.05 | 00.02 | K K | 00.00 | 00.00 | CaK | 02.26 | 00.82 | FeK | 00.28 | 00.07 |
|        | Element                                                                             | Wt %                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | At % |  |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| C K    | 60.13                                                                               | 72.50                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |  |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| O K    | 19.92                                                                               | 18.03                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |  |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| NaK    | 03.54                                                                               | 02.23                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |  |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| MgK    | 00.44                                                                               | 00.26                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |  |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| AlK    | 00.20                                                                               | 00.11                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |  |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| SiK    | 00.16                                                                               | 00.08                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |  |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| S K    | 13.01                                                                               | 05.87                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |  |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| ClK    | 00.05                                                                               | 00.02                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |  |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| K K    | 00.00                                                                               | 00.00                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |  |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| CaK    | 02.26                                                                               | 00.82                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |  |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| FeK    | 00.28                                                                               | 00.07                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |  |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |

Tablo G1.5: TO/EF/ED konsantresi ile kullanılmış PCCell Membranlara ait SEM-EDX analizleri

| PCCell | TO/EF/ED                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |      |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|---------|------|------|-----|-------|-------|-----|-------|-------|-----|-------|-------|-----|-------|-------|-----|-------|-------|-----|-------|-------|-----|-------|-------|-----|-------|-------|-----|-------|-------|-----|-------|-------|-----|-------|-------|
| KDM1   |    | <table><tr><th>Element</th><th>Wt %</th><th>At %</th></tr><tr><td>C K</td><td>55.82</td><td>66.37</td></tr><tr><td>O K</td><td>29.05</td><td>25.93</td></tr><tr><td>NaK</td><td>03.30</td><td>02.05</td></tr><tr><td>MgK</td><td>00.27</td><td>00.16</td></tr><tr><td>AlK</td><td>06.52</td><td>03.45</td></tr><tr><td>S K</td><td>03.08</td><td>01.37</td></tr><tr><td>ClK</td><td>00.89</td><td>00.36</td></tr><tr><td>K K</td><td>00.04</td><td>00.02</td></tr><tr><td>CaK</td><td>00.28</td><td>00.10</td></tr><tr><td>FeK</td><td>00.76</td><td>00.19</td></tr></table>                                                  |      | Element | Wt % | At % | C K | 55.82 | 66.37 | O K | 29.05 | 25.93 | NaK | 03.30 | 02.05 | MgK | 00.27 | 00.16 | AlK | 06.52 | 03.45 | S K | 03.08 | 01.37 | ClK | 00.89 | 00.36 | K K | 00.04 | 00.02 | CaK | 00.28 | 00.10 | FeK | 00.76 | 00.19 |     |       |       |
|        | Element                                                                             | Wt %                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | At % |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| C K    | 55.82                                                                               | 66.37                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| O K    | 29.05                                                                               | 25.93                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| NaK    | 03.30                                                                               | 02.05                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| MgK    | 00.27                                                                               | 00.16                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| AlK    | 06.52                                                                               | 03.45                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| S K    | 03.08                                                                               | 01.37                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| ClK    | 00.89                                                                               | 00.36                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| K K    | 00.04                                                                               | 00.02                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| CaK    | 00.28                                                                               | 00.10                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| FeK    | 00.76                                                                               | 00.19                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| ADM    |   | <table><tr><th>Element</th><th>Wt %</th><th>At %</th></tr><tr><td>C K</td><td>39.53</td><td>53.93</td></tr><tr><td>O K</td><td>14.94</td><td>15.30</td></tr><tr><td>F K</td><td>23.92</td><td>20.63</td></tr><tr><td>NaK</td><td>00.53</td><td>00.37</td></tr><tr><td>MgK</td><td>00.29</td><td>00.19</td></tr><tr><td>AlK</td><td>00.60</td><td>00.36</td></tr><tr><td>S K</td><td>01.34</td><td>00.68</td></tr><tr><td>ClK</td><td>17.67</td><td>08.17</td></tr><tr><td>K K</td><td>00.00</td><td>00.00</td></tr><tr><td>CaK</td><td>00.05</td><td>00.02</td></tr><tr><td>FeK</td><td>01.15</td><td>00.34</td></tr></table> |      | Element | Wt % | At % | C K | 39.53 | 53.93 | O K | 14.94 | 15.30 | F K | 23.92 | 20.63 | NaK | 00.53 | 00.37 | MgK | 00.29 | 00.19 | AlK | 00.60 | 00.36 | S K | 01.34 | 00.68 | ClK | 17.67 | 08.17 | K K | 00.00 | 00.00 | CaK | 00.05 | 00.02 | FeK | 01.15 | 00.34 |
|        | Element                                                                             | Wt %                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | At % |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| C K    | 39.53                                                                               | 53.93                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| O K    | 14.94                                                                               | 15.30                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| F K    | 23.92                                                                               | 20.63                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| NaK    | 00.53                                                                               | 00.37                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| MgK    | 00.29                                                                               | 00.19                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| AlK    | 00.60                                                                               | 00.36                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| S K    | 01.34                                                                               | 00.68                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| ClK    | 17.67                                                                               | 08.17                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| K K    | 00.00                                                                               | 00.00                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| CaK    | 00.05                                                                               | 00.02                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| FeK    | 01.15                                                                               | 00.34                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| KDM2   |  | <table><tr><th>Element</th><th>Wt %</th><th>At %</th></tr><tr><td>C K</td><td>61.59</td><td>72.41</td></tr><tr><td>O K</td><td>23.07</td><td>20.36</td></tr><tr><td>NaK</td><td>03.17</td><td>01.95</td></tr><tr><td>MgK</td><td>00.27</td><td>00.16</td></tr><tr><td>AlK</td><td>00.73</td><td>00.38</td></tr><tr><td>S K</td><td>09.30</td><td>04.10</td></tr><tr><td>ClK</td><td>00.14</td><td>00.06</td></tr><tr><td>K K</td><td>00.04</td><td>00.01</td></tr><tr><td>CaK</td><td>01.46</td><td>00.52</td></tr><tr><td>FeK</td><td>00.23</td><td>00.06</td></tr></table>                                                  |      | Element | Wt % | At % | C K | 61.59 | 72.41 | O K | 23.07 | 20.36 | NaK | 03.17 | 01.95 | MgK | 00.27 | 00.16 | AlK | 00.73 | 00.38 | S K | 09.30 | 04.10 | ClK | 00.14 | 00.06 | K K | 00.04 | 00.01 | CaK | 01.46 | 00.52 | FeK | 00.23 | 00.06 |     |       |       |
|        | Element                                                                             | Wt %                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | At % |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| C K    | 61.59                                                                               | 72.41                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| O K    | 23.07                                                                               | 20.36                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| NaK    | 03.17                                                                               | 01.95                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| MgK    | 00.27                                                                               | 00.16                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| AlK    | 00.73                                                                               | 00.38                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| S K    | 09.30                                                                               | 04.10                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| ClK    | 00.14                                                                               | 00.06                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| K K    | 00.04                                                                               | 00.01                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| CaK    | 01.46                                                                               | 00.52                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |
| FeK    | 00.23                                                                               | 00.06                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |         |      |      |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |     |       |       |