

**SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF POLYANILINE DERIVATIVE
STRUCTURES DOPED WITH DIFFERENT ACIDS FOR USE IN MEMBRANE
PREPARATION**

**MEMBRAN HAZIRLAMADA KULLANILMAK ÜZERE FARKLI ASİTLERLE
YÜKLENMİŞ POLİANİLİN YAPILARIN SENTEZİ VE KARAKTERİZASYONU**

Adem SARIHAN¹, Hüseyin OĞUZ²

¹Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Fakültesi, Kimya Bölümü,

ORCID: 0000-0003-1809-7034

²Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Kimya Ana Bilim Dalı,

ORCID: 0009-0009-8632-6223

Özet

Membran filtrasyon süreçleri, geleneksel ayırma yöntemlerine göre düşük enerji gereksinimi, ayırma sürecinde ilave kimyasal gerektirmemesi ve daha yeşil olmaları gibi birçok avantaja sahiptir. Bu avantajları sayesinde, yaygın olarak kullanımı her geçen gün artmakta ve geleneksel ayırma ve saflaştırma tekniklerinin yerini almaktadır. Özellikle polimerik membranlar gerek su arıtım gerekse organik çözücü geri kazanım süreçlerinde çokça kullanılmaktadır. Polianilin yüksek su severliği ve iletken yapısı sayesinde son yıllarda yenilikçi ve iletken polimerik membranların hazırlanmasında kullanılabilecek dikkat çekici bir polimer olarak görülmektedir. Polianilin iletkenlik özelliğini yapısına ilave edilen asit katkısı sayesinde kazanır. Asit katkılama süreçlerinde klasik olarak HCl gibi küçük yapıdaki asitler kullanılır ancak bu yapıların kullanım şartlarına bağlı olarak, çeşitli sebeplerle yapıdan uzaklaşması sonucunda malzemenin yapısı bozulmakta ve iletkenlik özelliği olumsuz yönde etkilenmektedir. Bu durumun önüne geçmek amacıyla asit katkılamasında nispeten daha büyük yapıdaki organik veya polimerik asitlerin kullanılması oldukça olumlu sonuçlar oluşturmaktadır. Ayrıca bu asitlerin polimerik yapıya sentez sürecinde dâhil edilmesi, yapı ile etkileşimlerinin yüksek olmasını sağlayarak yapıdan uzaklaşma riskini azaltması ve asidik grupların polimerde daha homojen bir şekilde katkılanabilmesi bakımından, polimer sentezi sonrasında gerçekleştirilen asit modifikasyonuna göre, daha etkili ve işlevseldir. Bu çalışmada, iletken yapıları polimerik kompozit membran hazırlama süreçlerinde kullanılmak üzere, PAMPSA (poli(2-akrilamido-2-metil-1-propansülfonik asit), CSA (kamfor sülfonik asit) ve TMA (trimesik asit) ile modifiye edilmiş polianilin yapıları kimyasal oksidatif polimerizasyon tekniği kullanılarak sentezlenmiş ve sentezlenen polimerik yapılar SEM-EDX ve FTIR teknikleri kullanılarak karakterize edilmiştir. Aynı zamanda sentezlenen polimerlerin N-metil piperidin içerisinde çözünürlüğü test edilmiş ve membran döküm çözeltisi hazırlanabilme durumları incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Polianilin, iletken polimer, asit katkılı polianilin, membran

Abstract

Membrane filtration processes have been shown to exhibit numerous advantages over conventional separation methods. These include low energy requirements, the absence of any

requirement for additional chemicals during the separation process, and a reduced environmental impact. The aforementioned advantages are responsible for the increasing widespread use of these techniques, which are gradually replacing traditional separation and purification techniques. It is evident that polymeric membranes are extensively utilised in both water treatment and organic solvent recovery processes. Polyaniline has been identified as a remarkable polymer that has the potential to be used in the preparation of innovative and conductive polymeric membranes in recent years thanks to its hydrophilicity and conductive structure. The conductivity exhibited by polyaniline is attributable to the incorporation of acid doping within its structure. In the context of acid doping processes, the utilisation of small acids such as HCl is a conventional approach. However, the removal of these acids from the material structure, attributable to various factors associated with the conditions of use, results in the deterioration of the material's structure and its concomitant reduction in conductivity. In order to circumvent this issue, the utilisation of relatively larger organic or polymeric acids in the process of acid doping has been shown to yield highly favorable outcomes. Furthermore, the incorporation of these acids into the polymeric structure during the synthesis process is more effective and functional than acid modification performed after polymer synthesis in terms of reducing the risk of distancing from the structure by ensuring high interactions with the structure and homogeneous doping of acidic groups in the polymer. In the present study, polyaniline structures were modified with PAMPSA (poly(2-acrylamido-2-methyl-1-propanesulfonic acid)), CSA (camphor sulfonic acid) and TMA (trimesic acid) through a chemical oxidative polymerization technique. The resulting polymeric structures were characterized using SEM-EDX and FTIR techniques. Concurrently, the solubility of the synthesized polymers in N-methyl pyrrolidone was investigated, and the preparation of membrane casting solution was examined.

Keywords: Polyaniline, conductive polymer, acid doped polyaniline, membrane

1. GİRİŞ

Endüstriyel süreçlerdeki gelişmeler, küresel nüfustaki hızlı artış ve buna bağlı olarak tarımsal üretime gereksinimin artması gibi etkenlerle, birçok ülke ve bölgenin su ihtiyacının artışı ve önemli seviyede su kirliliğiyle karşı karşıya kalma riski son yılların en önemli sorunlarından biri haline gelmiştir (X.-R. Zhang vd., 2017). Temiz suya ve daha sürdürülebilir endüstriyel süreçlere yönelik talebin artmasıyla birlikte, ileri teknoloji ayırma ve saflaştırma tekniklerine olan ihtiyaç daha da önemli hale gelmiştir (Boretti & Rosa, 2019). Membran filtrasyon süreçleri, geleneksel ayırma yöntemlerine göre düşük enerji gereksinimi, fazladan kimyasal gerektirmemesi ve daha yeşil olmaları gibi birçok avantaja sahiptir (Kamalesh vd., 2024). Bu avantajları sayesinde, membranların filtrasyon süreçlerinde kullanım oranı her geçen gün artmakta ve membran filtrasyon süreçleri, geleneksel ayırma ve saflaştırma tekniklerinin yerini almaktadır. Membranlar, filtrasyon süreçlerinde iki fazı birbirinden ayıran ve seçici geçirgen özellik gösteren malzemedir. Seçici geçirgen özellikleri sayesinde ilgilenilen bileşenlerin karşı faza geçişini, çeşitli mekanizmalara göre sınırlandırarak kontrollü geçişe imkân sağlarlar. Kontrollü geçiş gözenek boyutuna göre dışlama ve elektriksel itme-çekme kuvvetleri mekanizmaları üzerinden yürümektedir. Belli bir amaç için hazırlanmış uygun morfolojide ve gözenek yapısındaki membranın, su içerisindeki ilgilenilen madde(ler) için kabul edilebilir seviyede dışlama sağlarken mümkün olduğunca yüksek geçirgenliğe sahip olması beklenir. Membran malzemesi olarak kullanılacak organik ve inorganik yapılar arasında gerek ticari uygulamalar gerekse araştırma süreçlerinde kullanım için en önemli malzeme grubu polimerlerdir (S. Kim & Lee, 2015). İletken özellikli polimer yapıları ile ayarlanabilir ve kirlenme dirençli membranlar hazırlanabilmektedir (J. Kim vd., 2024; Sarihan vd., 2019).

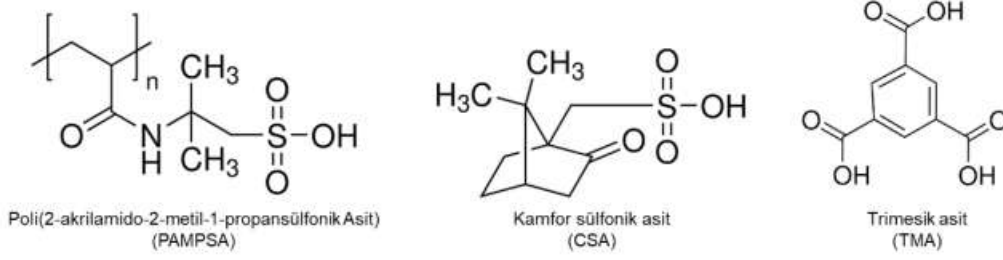
Ayarlanabilir membranlar, elektriksel potansiyel gibi çeşitli dış kuvvetler ile membranın yapısal özellikleri ve performanslarının değiştirilebilmesine imkân oluşturabilen özelliktedirler (Formoso vd., 2017). Böylece kendi kendini temizleyen ve kirlenme dirençli membran yüzeylerinin hazırlanabilmesi mümkün olabilmektedir (Li vd., 2023; Liu vd., 2024). Aynı zamanda elektriksel iletkenliğe sahip membran yapıları ile membran kirlenme kontrol süreçlerinde kimyasal kullanımı gerektirmeyen, daha yeşil ve sürdürülebilir bir metot olan elektriksel temizleme süreçleri uygulanabilmektedir. Membran hazırlamada kullanılan polimerler arasında polianilin yüksek su severliği, iletken yapısı, nispeten kolay işlenebilirlik, çevresel (Moo Lee vd., 1999), fiziksel, kimyasal, mekanik kararlılık ve nispeten ucuz bir monomerden basit sentez edilebilme (Hu vd., 2011) gibi özellikleri ile oldukça dikkat çeken ve araştırmacılar tarafından tercih edilen bir polimerdir. Polianilin polimer(ler)i yapılarındaki asit katkıları sayesinde iletken yapıya sahiptir (Ball vd., 1999; Shen vd., 2018). Yaygın olarak kullanılan HCl gibi küçük yapıdaki asitler yapıya iletkenlik kazandırmasına rağmen bir süre sonra kullanım şartlarına bağlı, çeşitli sebeplerle yapıdan uzaklaşabilmekte ve bu nedenle hem polimerik malzemenin yapı ve performans özellikleri bozulmakta hem de elektriksel özellikleri olumsuz yönde etkilenmektedir (Padaki vd., 2011). Bu olumsuz durumun önüne geçmek amacıyla yapı içerisinde nispeten daha büyük yapıdaki organik veya polimerik asitlerin kullanılması oldukça olumlu sonuçlar oluşturmaktadır. Ayrıca bu asitlerin polimerik yapıya sentez sürecinde dâhil edilmesi, gerek yapı ile çok daha kuvvetli etkileşimlerle tutulması ve yapıdan uzaklaşmaması gerekse asidik grupların polimerde homojen bir şekilde bulunabilmesi bakımından, polimer sentezi sonrasında gerçekleştirilen asit modifikasyonuna göre, daha etkili ve işlevseldir. Bu amaçla çalışma kapsamında, polimerik kompozit membran hazırlama süreçlerinde kullanılmak üzere, PAMPSA (poli(2-akrilamido-2-metil-1-propansülfonik asit), CSA (kamfor sülfonik asit) ve TMA (trimesik asit) ile yüklenmiş Polianilin yapıları kimyasal oksidatif polimerizasyon tekniği kullanılarak sentezlenmiştir. Sentezlenen polimerik yapılar için SEM-EDX ve FTIR teknikleri kullanılarak yapısal ve morfolojik karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sentezlenen polimerik yapılarının, amacına uygun şekilde membran hazırlanma süreçlerinde kullanılabilirliğinin belirlenmesi için uygun bir polar aprotik çözücüde çözünürlüğü ve uygun özellikte çözelti oluşturabilmesi ile ilgili testler gerçekleştirilmiştir.

2. YÖNTEM

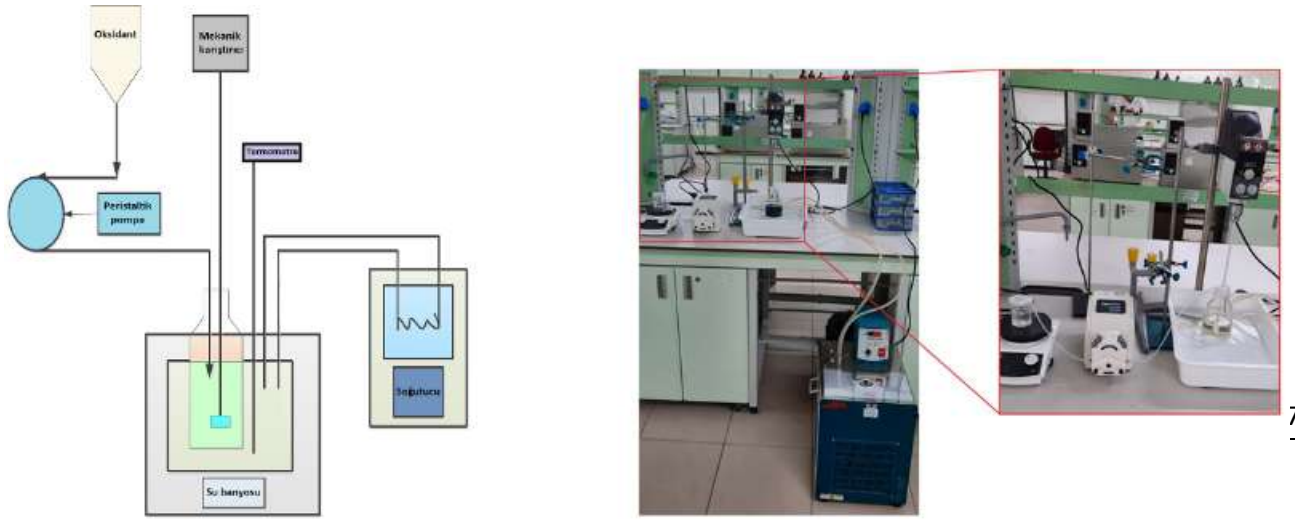
2.1. Asit Katkılı Polianilin Yapılarının Sentezi

Polimer asit ve organik asit yüklenmiş polianilin polimerinin sentezi, saflaştırılması ve testleri için anilin, poli(2-akrilamido-2-metil-1-propansülfonik Asit) (PAMPSA), kamfor sülfonik asit (CSA), amonyum persülfat (APS) ((NH₄)₂S₂O₃), N -Metil pirolidon (NMP), aseton kullanılmış ve tüm sentez çalışmaları ultra saf su ile gerçekleştirilmiştir.

Sentez süreçleri 15 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Sentez için anilin ve asit mol oranları 4:1 olarak ayarlanmış ve çözücü olarak su kullanımı ile reaksiyon ortamı oluşturulmuştur. APS oksidant olarak kullanılmış ve peristaltik pompa yardımıyla 15 ml/saat hızda, anilin ve yüklenecek asit(ler)in bulunduğu sentez reaksiyon ortam(lar)ına eklenmiştir. Reaksiyon tamamlanma süreleri 24 saat olarak ayarlanmış ve reaksiyon sonrasında elde polimerler süzülerek ayrılmıştır. Sentezlenen yapı reaksiyona girmeyen reaktiflerin ve oligomerlerin uzaklaştırılması amacıyla birkaç kez su ve aseton ile yıkanarak saflaştırılmış, ardından 70 °C sıcaklıkta, etüvde kurutulmuştur ve öğütülmüştür. Elde edilen polimerler, yüklenen asitlere göre PAMPSA-PANI, CSA-PANI ve TMA-PANI olarak adlandırılmıştır. Polimer katkılamada kullanılan asitlerin kimyasal yapıları Şekil 1'de, sentez sürecinde kullanılan düzeneğin şeması ve görüntüsü Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 1. Asit katkılı polianilin hazırlamada kullanılan asit yapıları



Şekil 2. Polimer sentez sürecinde kullanılan düzeneğin şeması ve görüntüsü

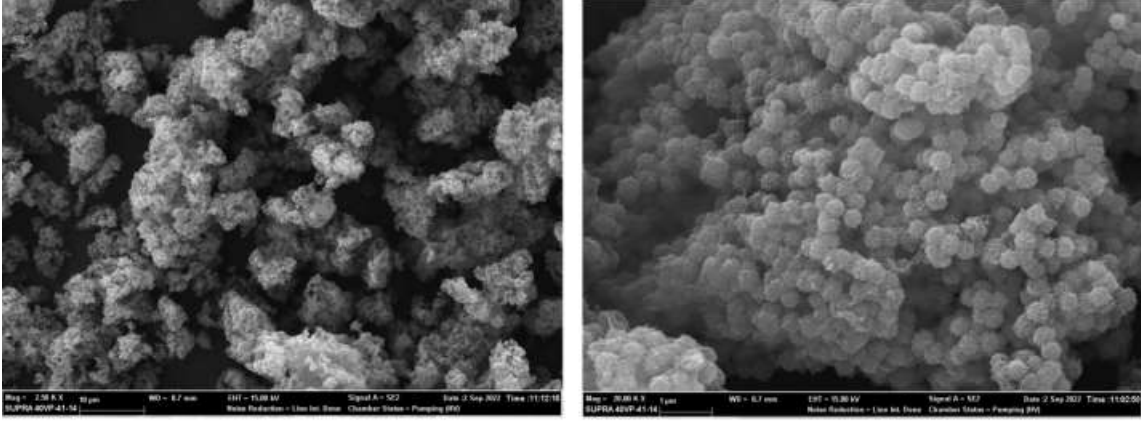
2.2. Asit Katkılı Polianilin Yapılarının Karakterizasyonu

Hazırlanan polimerlerin yapısal-morfolojik karakterizasyonu, kimyasal bileşim ve fonksiyonel grup incelemeleri için Taramalı Elektron Mikroskobu- Enerji Dağıtıcı X-Ray spektroskopisi (SEM-EDX) ve Fourier-Transform Infrared (FTIR) spektroskopisi teknikleri kullanılmıştır. Ayrıca membran hazırlamada kullanılabilirliğini incelemek için jel formu oluşturmadan NMP içerisinde çözünebilirliği test edilmiştir.

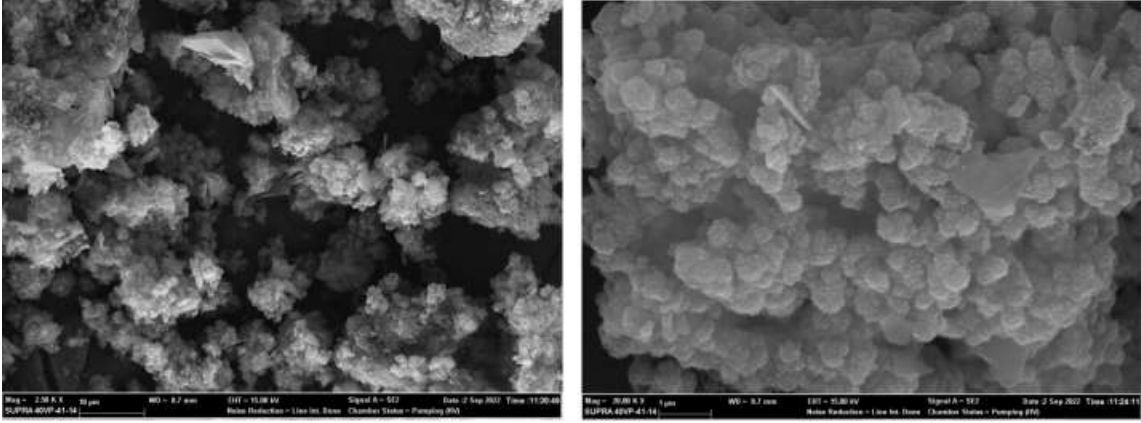
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. SEM-EDX incelemeleri

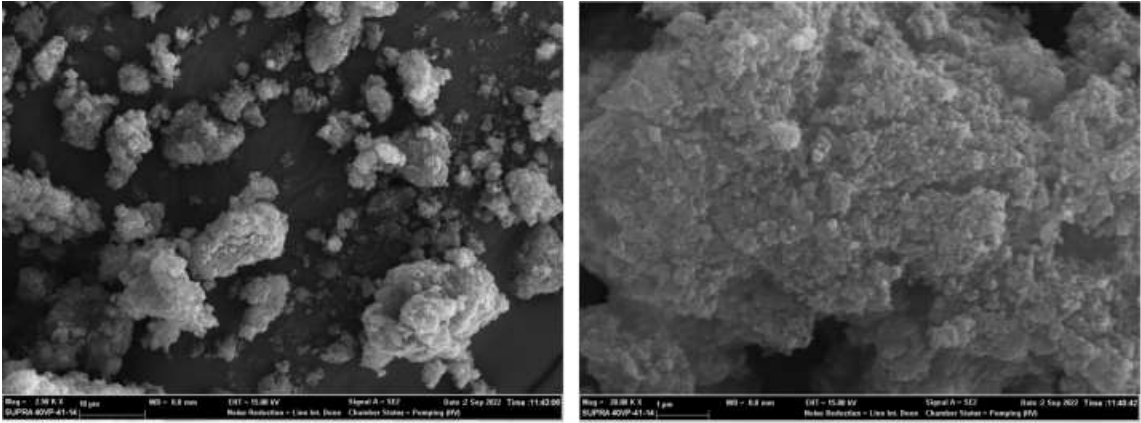
Sentezlenen asit katkılı polimerlere ait 2,5 KX ve 20 KX büyütme oranlarında elde edilen SEM görüntüleri Şekil, 3, 4 ve 5'te verilmiştir.



Şekil 3. PAMPSA katkılı Polianilin yapısına ait SEM görüntüleri



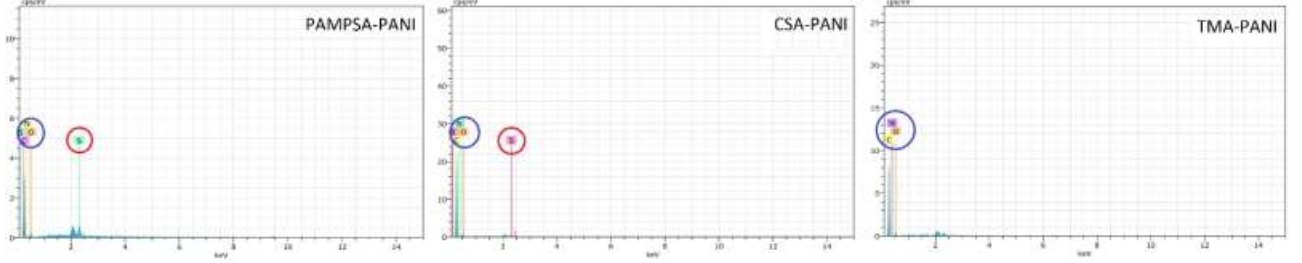
Şekil 4. CSA katkılı Polianilin yapısına ait SEM görüntüleri



Şekil 5. TMA katkılı Polianilin yapısına ait SEM görüntüleri

Elde edilen SEM görüntüleri incelendiğinde, PAMPSA-PANI ve CSA-PANI polimerlerinin küresel görünümüne nano boyutta yapılardan oluşurken, TMA-PANI de küresel olmayan, pul görünümüne yapıların birleşmesi ile oluşan mikro boyutta yapılardan oluştuğu görülmektedir. TMA-PANI yapısının sentez, saflaştırma ve kurutma işlemleri sonrasında öğütme işleminin belirgin şekilde daha zor gerçekleştirilebildiği ve daha rijit bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Bu durum, katkılama sürecinde kullanılan asit yapısında bulunan karboksilli asit grupları sayesinde polianilin zincirleri ile daha kuvvetli bir şekilde etkileşim kurabilmesine ve bu sayede

nispeten daha büyük mikro yapılardan oluşmasına atfedilmiş ve bu sonuç SEM görüntüleri ile desteklenmiştir.

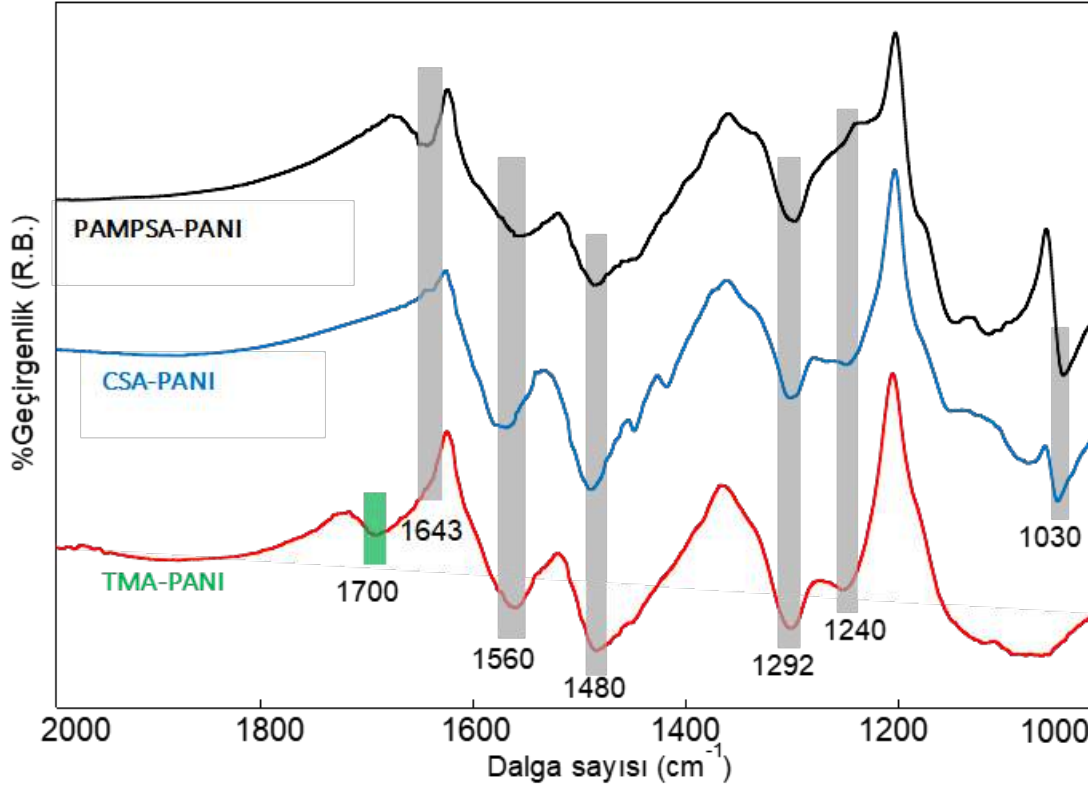


Şekil 6. Hazırlanan polimerlere ait EDX sonuçları

EDX sonuçları incelendiğinde PAMPSA-PANI ve CSA-PANI yapılarına ait EDX verilerinde C ve N elementlerin yanı sıra “O” ve “S” elementinin de (asit yapılarındaki sülfü gruplarından kaynaklanan) bulunması polianilin yapılarına ilgili asitlerin yüklendiğini ve sentezin başarılı olduğunu doğrulamıştır. TMA-PANI yapısına ait EDX verilerinde ise asit yapısında sülfü grubunun bulunmaması sebebiyle beklendiği gibi “S” elementine ait pik görülmemiş, yalnızca C, N ve O yapıları görülmüştür. TMA-PANI için de katkı yapısında bulunan “O” elementinin EDX sonuçlarında gözlemlenmesi asit katkılama işleminin başarılı olduğunu göstermektedir.

3.2. FTIR incelemeleri

Hazırlanan polimerlere ait FTIR spektrumları Şekil 7’de verilmiştir. Spektrumlar incelendiğinde yüklenen asit türlerine göre meydana gelen en temel farklılıklardan biri 1700 cm^{-1} de ortaya çıkan ve yalnızca TMA-PANI yapısında gözlenen piktir. Bu pik TMA yapısındaki karboksil gruplarına atfedilmiştir (Medina-Velazquez vd., 2016; Zhang vd., 2021) ve TMA yapısının PANI yapısına yüklendiğini doğrulamıştır. Bu pikin diğer asitlerle yüklenen PANI yapılarında görülmemesinin nedeni PAMPSA ve CSA yapılarında karboksil grubunun bulunmamasıdır. Spektrumlarda gözlemlenen bir diğer temel fark 1030 cm^{-1} civarında gözlenen piklerdir. Bu pikler ise sülfü ($-\text{SO}_2-$) gruplarının simetrik gerilme titreşimlerine aittir (Hechavarría vd., 2003) ve yalnızca yapısında sülfü grubu bulunan, PAMPSA ve CSA ile yüklenen polimerlere ait spektrumlarda gözlemlenmiştir. Bu pikler haricinde 1560 cm^{-1} ve 1480 cm^{-1} de tüm polimerik yapıların spektrumlarında ortaya çıkan pikler sırası ile polianilin yapısındaki $\text{C}=\text{N}$ ve $\text{C}=\text{C}$ bağlarına ait gerilme titreşimlerine, 1240 ve 1292 cm^{-1} de bulunan pikler ise yine polianilin yapısındaki $\text{C}-\text{N}$ bağlarının gerilme titreşimlerine atfedilmiştir (Babu vd., 2013; Jeong Kim vd., 2006).



Şekil 7. Hazırlanan polimerlere ait FTIR spektrumları

Sentezlenen polimerik yapılarının, amacına uygun şekilde membran hazırlanma süreçlerinde kullanılabilmesi için suda çözünmeyen, uygun bir polar aprotik çözücü olan NMP içerisinde ise çözünebilir olmaları gereklidir. Bu anlamda yapılan çözdürme testleri sonucunda ilgili asitlerle yüklenerek hazırlanan tüm polimerik yapılarının suda çözünmediği, PAMPSA ve CSA ile katkılanan yapıların NMP içerisinde yeterince çözünebildiği ve istenmeyen jelleşme oluşumlarının kontrol edilebildiği belirlenmiştir. TMA ile katkılanan yapıda ise çözünme probleminin olduğu jelleşme eğiliminin önüne geçilemediği gözlemlenmiştir. Bu durum TMA'nın, yapısında bulunan üç tane karboksilli asit grubu sayesinde polianilin zincirleri ile daha kuvvetli bir şekilde etkileşim kurabilmesine ve bu sayede nispeten daha büyük mikro yapılardan oluşmasına atfedilmiştir.

4. SONUÇLAR

Karakterizasyon çalışmaları sonucunda çeşitli asitlerle yüklenmiş Polianilin yapılarının hedeflendiği şekilde sentezlenebildiği görülmüştür. Sentezlenen polimerik yapılarının, su arıtım süreçlerinde kullanım için membran hazırlanma süreçlerinde kullanılabilirliği ile yapılan ilgili ön denemelerde, tüm yapıların hedeflenen şekilde, suda çözünmediği ve özellikle PAMPSA ve CSA ile katkılanan yapıların NMP içerisinde yeterince çözünebildiği ve istenmeyen jelleşme oluşumlarının kontrol edilebildiği belirlenmiş ve membran hazırlama süreçlerinde kullanıma elverişli olduğu belirlenmiştir. TMA ile katkılanan yapıda ise jelleşme eğiliminin önüne geçilemediği için membran döküm çözeltisi hazırlanmasına elverişsiz olduğu ve membran hazırlamada kullanılabilir olmadığı görülmüştür.

5. TEŞEKKÜR

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

6. KAYNAKLAR

Babu, V. J., Vempati, S., & Ramakrishna, S. (2013). Conducting Polyaniline-Electrical Charge Transportation. *Materials Sciences and Applications*, 04(01), 1-10. <https://doi.org/10.4236/msa.2013.41001>

Ball, I. J., Huang, S.-C., Miller, K. J., Wolf, R. A., Shimano, J. Y., & Kaner, R. B. (1999). The pervaporation of ethanol/water feeds with polyaniline membranes and blends. *Synthetic Metals*, 102(1), 1311-1312. [https://doi.org/10.1016/S0379-6779\(98\)01004-2](https://doi.org/10.1016/S0379-6779(98)01004-2)

Boretti, A., & Rosa, L. (2019). Reassessing the projections of the World Water Development Report. *Npj Clean Water*, 2(1), 1-6. <https://doi.org/10.1038/s41545-019-0039-9>

Formoso, P., Pantuso, E., De Filpo, G., & Nicoletta, F. P. (2017). Electro-Conductive Membranes for Permeation Enhancement and Fouling Mitigation: A Short Review. *Membranes*, 7(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/membranes7030039>

Hechavarría, L., Hu, H., & Rincón, M. E. (2003). Polyaniline–poly(2-acrylamido-2-methyl-1-propanosulfonic acid) composite thin films: Structure and properties. *Thin Solid Films*, 441(1), 56-62. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(03\)00864-2](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(03)00864-2)

Hu, W., Chen, S., Yang, Z., Liu, L., & Wang, H. (2011). Flexible Electrically Conductive Nanocomposite Membrane Based on Bacterial Cellulose and Polyaniline. *The Journal of Physical Chemistry B*, 115(26), 8453-8457. <https://doi.org/10.1021/jp204422v>

Jeong Kim, S., Rae Lee ,Na, Yi ,Byung-Ju, & and Kim, S. I. (2006). Synthesis and Characterization of Polymeric Acid-Doped Polyaniline Interpenetrating Polymer Networks. *Journal of Macromolecular Science, Part A*, 43(3), 497-505. <https://doi.org/10.1080/10601320600575165>

Kamalesh, R., Karishma, S., Saravanan, A., & Yaashikaa, P. R. (2024). Emerging breakthroughs in membrane filtration techniques and their application in agricultural wastewater treatment: Reusability aspects. *Sustainable Chemistry for the Environment*, 8, 100183. <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2024.100183>

Kim, J., Lee, J., Lee, S., Tijing, L., Shon, H. K., & Hong, S. (2024). Electrically conductive membrane for fouling control: Its mechanisms and applications. *Desalination*, 578, 117445. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117445>

Kim, S., & Lee, Y. M. (2015). Rigid and microporous polymers for gas separation membranes. *Progress in Polymer Science*, 43, 1-32. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2014.10.005>

Li, J., Qiu, X., Ren, S., Liu, H., Zhao, S., Tong, Z., & Wang, Y. (2023). High performance electroactive ultrafiltration membrane for antibiotic resistance removal from wastewater effluent. *Journal of Membrane Science*, 672, 121429. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2023.121429>

Liu, Y., Jiang, M., Hu, J., Guo, Z., Liu, J., Fu, X., Liu, L., & Jiang, S. (2024). Polypyrrole-bound carbon nanotube conductive polysulfone membranes for self-cleaning of fouling. *Composites Communications*, 52, 102155. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2024.102155>

- Medina-Velazquez, D. Y., Alejandre-Zuniga, B. Y., Loera-Serna, S., Ortiz, E. M., Morales-Ramirez, A. D. J., Garfias-Garcia, E., Garcia-Murillo, A., & Falcony, C. (2016). An alkaline one-pot reaction to synthesize luminescent Eu-BTC MOF nanorods, highly pure and water-insoluble, under room conditions. *Journal of Nanoparticle Research*, 18(12), 352. <https://doi.org/10.1007/s11051-016-3593-9>
- Moo Lee, Y., Yong Nam, S., & Yong Ha, S. (1999). Pervaporation of water/isopropanol mixtures through polyaniline membranes doped with poly(acrylic acid). *Journal of Membrane Science*, 159(1), 41-46. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(99\)00051-4](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(99)00051-4)
- Padaki, M., Isloor, A. M., & Wanichapichart, P. (2011). Polysulfone/N-phthaloylchitosan novel composite membranes for salt rejection application. *Desalination*, 279(1), 409-414. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.06.045>
- Sarihan, A., Shahid, S., Shen, J., Amura, I., Patterson, D. A., & Emanuelsson, E. A. C. (2019). Exploiting the electrical conductivity of poly-acid doped polyaniline membranes with enhanced durability for organic solvent nanofiltration. *Journal of Membrane Science*, 579, 11-21. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.02.030>
- Shen, J., Shahid, S., Sarihan, A., Patterson, D. A., & Emanuelsson, E. A. C. (2018). Effect of polyacid dopants on the performance of polyaniline membranes in organic solvent nanofiltration. *Separation and Purification Technology*, 204, 336-344. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.04.034>
- Zhang, C., Wang, Q., Zhang, W., Li, X., Zhu, Z., Zhang, C., Xie, A., & Luo, S. (2021). Preparation and application of Co₃O₄-Ni-MOF/MWCNTs hybrid for supercapacitor. *Ionics*, 27(8), 3543-3551. <https://doi.org/10.1007/s11581-021-04137-3>
- Zhang, X.-R., Fu, J., & Liu, Y. (2017). Resourceful Treatment of Seawater Desalination or High Concentrated Sewage by Renewable Energy. İçinde X. Zhang & I. Dincer (Ed.), *Energy Solutions to Combat Global Warming* (ss. 307-327). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26950-4_15