

POLİLAKTİK ASİT TEMELLİ MEMBRANIN MORFOLOJİSİNİN DESALİNASYON PERFORMANSINA ETKİSİ

Betül Karakoca^{1*}, Filiz Uğur Nigiz¹

¹ Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 17020, ÇANAKKALE

Öz

Nüfus artışı, küresel ısınma ve insanların sebep olduğu kirlilikler nedeni ile su kaynaklarımız azalmaktadır. Dünya üzerindeki sular doğrudan kullanılmayan tuzlu sulardan oluşmaktadır. Bu nedenle mevcut su kaynaklarının kullanımı için ayırma işlemlerinin kullanılması son yıllarda önem kazanmaktadır. Pervaporasyon tekniği, tuzlu sulardan saf su elde etmek için yeni gelişen bir tekniktir. Bu çalışmada, deniz suyunun saflaştırılması için Polilaktik asit (PLA) polimeri ile membranlar üretilmiş, membranın hidrofilitesini ve ayırma performansını iyileştirmek, aynı zamanda kararlılıklarını da korumak polietilen glikol (PEG) polimeri eklenmiştir. Çalışma kapsamında, gözeneksiz yoğun ve asimetric olmak üzere iki farklı membran hazırlanmıştır ve morfolojik yapı farklılıklarının desalinasyon performansına etkileri incelenmiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve temas açısı testi ile membranlar karakterize edilmiş, ardından tuzlu su desalinasyon testleri yapılmıştır. Sonuç olarak membranın hidrofobitesi azaltılmış bu sayede akı değerleri artmıştır. Tüm membranlar %99 üzerinde tuz reddi elde edilmiştir. En iyi sonuçlar ise %5 PEG içeren PLA membran ile elde edilmiştir. Bu membranın akısı 1,57 kg/m²h, tuz reddi ise %99,98 olarak hesaplanmıştır. Üretilen membranın asimetric yapıda olması akıyı arttırmış buna rağmen yüksek saflıkta su elde edilmesini sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Desalinasyon, pervaporasyon, PLA membran

THE EFFECT OF THE MORPHOLOGY OF A POLYLACTIC ACID BASED MEMBRANE ON DESALINATION PERFORMANCE

Extended Abstract

The water resources are decreasing due to population growth, global warming, and pollution. The water on Earth consists of salt water that cannot be used directly. For this reason, separation processes for the use of existing water resources, has gained importance in recent years. Pervaporation is a novel desalination technique for obtaining pure water from the saline water source. The most important part of the pervaporation method is the membrane. The difference of the pervaporation from other membrane-based techniques is the non-porous and selective membrane usage. It is possible to obtain high purity water due to the selective separation capability of pervaporation membranes. Therefore, most of the studies in the literature are related to innovative membrane production. Pervaporative desalination membranes should have high salt rejection and acceptable flux values. Moreover, the use of sustainable and environmentally friendly materials has also important to determine the membrane types. In this study, polylactic acid (PLA) based membranes prepared and used for the purification of sea water. Polyethylene glycol (PEG) polymer was added to improve the hydrophilicity and the separation performance of the membrane, while maintaining its stability. Within the scope of the study, two different membranes, nonporous dense and asymmetric, were prepared and the effects of morphological structure differences on the desalination performance were investigated. Scanning electron microscopy (SEM) and the contact angle tests were performed and the saltwater desalination tests were performed. As a result, the hydrophobicity of the membrane was decreased, and the flux was increased. The salt rejection results were obtained over 99%. The best results were obtained with % of PEG containing PLA membrane. The flux of this membrane was calculated as 1.57 kg/m²h, and the salt rejection was calculated as 99.98%. The asymmetrical structure of the produced membrane increased the flux, as well as providing high purity water.

Key Words: Desalination, pervaporation, PLA membrane

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author):

Betül KARAKOCA; Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi,
Kimya Mühendisliği Bölümü
17020, Çanakkale-Turkey.

Geliş (Received) : 30.11.2021

Kabul (Accepted) : 14.12.2021

Basım (Published) : 31.12.2021

1. Giriş

Dünya yüzeyinin büyük bir kısmını sular oluşturmaktadır. Ancak bu suların çoğunluğu doğrudan kullanılmayan tuzlu sulardan oluşmaktadır. Küresel ısınma ve kirlilikler nedeni ile su kaynakları azalmaktadır (Kaminski vd., 2018). Özellikle su kıtlığı olan bölgelerde insanların temiz suya ulaşması oldukça zordur. Bu problemin çözümü olarak, deniz suyunun ve atık suların; tuz ve diğer safsızlıklardan arındırılması işlemi olan desalinasyon kullanılmaktadır (Gude, 2017). Desalinasyon yöntemi, termal temelli ve membran temelli yöntemler olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Termal proseslerde, buharlaşma ve yoğuşma sistemi kullanılarak desalinasyon yapılmaktadır. Membran prosesleri ise modüler yapıda, düşük maliyetli ve enerji tasarrufu sağlayan yöntemlerdir. Bu prosesler hem makro hem de mikro seviyelerdeki kirleticilerin, sulardan ayrılması için kullanılan yöntemlerdir. Özellikle suların içerisinde ppm seviyesinde bulunan organik bileşenlerin, çözünmüş tuzların, bazı iyon ve ağır metallerin ayrılması için daha ileri düzey membran ayırma sistemlerinin kullanılması zorunludur (Burn vd., 2015).

Membran temelli yöntemlerden desalinasyon için en çok kullanılan proses ters ozmosdur. Dünya üzerinde kurulu tesislerin %60'ının kullandığı bu proses oldukça etkili bir yöntemdir ve bu yöntemle %99 üzerinde kirlilik giderimi sağlamaktadır. Bu proseslerin besleme kısmında yüksek basınç uygulamak gerekmektedir. Membranda uygulanan yüksek basınçla birlikte kirleticiler de geçebilmektedir. Bunu engellemek için birkaç kademeli ayırım yapılmaktadır. Yine de henüz ters ozmos kadar etkili, ileri düzey bir arıtım sistemi gelişimi sağlanamamıştır. Bununla birlikte bazı yeni yöntemler üzerine yeni çalışmalar yapılmaktadır. Bunlar arasında ise membran distilasyon ve pervaporasyon yöntemleri yer almaktadır. Membran distilasyon ve pervaporasyon prosesleri de ileri düzey su saflaştırma yöntemleri olup, bu proseslerle %99,9 üzerinde kirlilik giderilebilmektedir. Ancak bu yöntemlerde, nispeten düşük akı değerleri elde edildiği için özellikle “membran üretimi” basamağı ile ilgili detaylı araştırmalara ihtiyaç vardır (Wang vd., 2016).

Pervaporasyon (PV) ile desalinasyon işlemi 21. yüzyılın başlarında gelişmeye başlamıştır. Son yıllarda ise bu konu ile ilgili çalışmalar çoğalmıştır ve bu yöntem yeni bir su arıtım metodlarından birisi haline gelmiştir. Pervaporasyon, çok uzun yıllardan beri alkol kazanımı, alkol saflaştırma, organik madde giderimi gibi birçok işlemde etkinliğini kanıtlamıştır. Pervaporasyonun diğer yöntemlerden farkı; gözeneksiz membran kullanımı ve basınç farkının, membranın alt akımından oluşturulan vakum ile sağlanmasıdır. Pervaporasyon proseslerinde gözeneksiz membran kullanımı, seçici madde geçirimi sağlamaktadır. Basınç farkının vakum ile sağlanması ise membran tarafından seçilen ürünün alt akıma buhar olarak geçmesini sağlamaktadır. Gözeneksiz membran, hiçbir kirleticinin süzünüye (membrandan seçilerek geçirilen akım) geçmemesini sağlamaktadır. Ancak gözeneksiz membran kullanımı nedeni ile diğer yöntemlere göre daha düşük akılar elde edilebilmektedir. Bir membran prosesinin üretkenliğini yani ticari kullanımını sağlayan en önemli faktörden biri akıdır. Bu nedenle özellikle akı değerlerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Son yıllarda grafen oksit temelli nano malzemelerin kullanıldığı membranların desalinasyonda kullanılması ile ters ozmos tekniğinde elde edilen akılara yakın akı değerleri, ters ozmos yönteminden çok daha yüksek kirlilik giderimi ile sağlanmıştır (Liu vd., 2018; Liang vd., 2015; Qian vd., 2018; Zhang vd., 2016). Literatürde, polivinil alkol (PVA) (Liang vd., 2014), sülfolanmış polietilen (Korin vd.,1996), gibi hidrofilik polimerik membranlar, MFI-1 tipi zeolit (Drobek vd., 2012), klinoptilolit (An vd., 2014), hidroksisodalit (Khajavi vd., 2010) gibi inorganik membranlar veya karma matrisli membranlar (Xie vd., 2011; Liang vd., 2015) üretilmiş ve tamamında %95 üzerinde tuz tutma değerleri elde edilmiştir. Sistemin en önemli kısmı pervaporasyonda kullanılan membranın kendisidir. Bu nedenle yapılan araştırmaların tamamına yakını uygun ve yüksek performanslı membran üretimine yöneliktir. Literatürde polimerik, inorganik ve karma matrisli membranlar ile pervaporasyon çalışmaları yapılmıştır. Hidrofilik polimerik membranların kullanımında, özellikle uzun süreli su ayırımlarında membranların şişmesi ve mekanik dayanımlarının azalması çok önemli bir sorundur ve işlemin pratikte kullanımını imkânsız hale getirir.

Bu çalışmada pervaporatif desalinasyonda kullanılmak üzere, hidrofobik yapıda polilaktik asit (PLA) membranı üretilmesi amaçlanmıştır. Membranın hidrofilitesini ve ayırma performansını iyileştirmek, aynı zamanda kararlılıklarını da korumak için PLA içine, polietilen glikol (PEG) eklenmiştir. PEG, sadece hidrofilik membranlarda değil, hidrofobik membranda da geçirgenlik özelliklerini geliştirmekte kullanılmaktadır (Wongchitphimon vd., 2011). Bu çalışma kapsamında PEG eklenmeyen yoğun membran ve PEG eklenen asimetrik membranlar hazırlanarak ayırma performansları karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada 2003D kodlu polilaktik asit (PLA) (Natureworks'den temin edildi), kloroform (CHCl_3) (%99,9), dimetilformamid (DMF) (%99,9), etil laktat ($\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_3$)(%98), sodyum klorür (NaCl) (%99,5), poletilen glikol (PEG400)($\text{HO}(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_n\text{H}$) kullanılmıştır.

2.1. Gözeneksiz yoğun ve homojen membran hazırlama

Bu çalışmada Natureworks2003D kodlu PLA kullanılmıştır. Kullanımdan önce polimerler etüvde kurutulmuştur. Saf PLA membranı için, %15 PLA içeren etil laktat-PLA karışımı çözünene kadar 80 °C sıcaklıkta karıştırılır. Ardından cam petriye dökülerek tamamen kuruyuncaya kadar 50 °C sıcaklıkta bekletilir (Galiano vd., 2019; Zereski vd., 2010). Membranların kalınlıkları 60 µm olacak şekilde hazırlanmıştır. Membran kalınlıkları Dasqua 4310 digital mikrometresi ile ölçülmüştür.

2.2. Asimetrik membran hazırlama

PEG katkılı PLA membran için; bir önceki aşamada hazırlanan PLA çözeltisinin içine kütlece %1-5 arası oranlarda PEG eklenir ve karıştırılır. Homojen hale kadar karıştırılan çözeltiler cam petriye dökülerek 50 °C sıcaklıkta bir saat kurutulur. Ardından membranlar su banyosuna alınarak 10 dakika bekletilir. Bu sayede membranın cam ile temas etmeyen yüzeyi gözenekli hale gelirken, cam ile temasta olan yüzeyi yoğun olarak kalır.

2.3. Karakterizasyon testleri

Membranın kesit morfolojisini ve PLA-PEG madde arasındaki uyumu belirlemek için SEM (QUANTA 400F Field Emission) analizi yapılmıştır.

Membran çeşitlerinin yüzey hidrofilik-hidrofobik özelliklerini belirlemek için temas açısı testleri (Attension, KSV) kullanılmıştır. Sessile drop yöntemi ile membranların yüzeylerinin belirli noktalarından ölçümler alınarak ortalama temas açısı değerleri belirlenmiştir.

2.4. Desalinasyon testleri

Desalinasyon testleri paslanmaz çelik membran hücresinin kullanıldığı bir pervaporasyon test sisteminde yapılmıştır. Bu test için, hazırlanan membranlar membran hücresinin içine yerleştirilir. Pervaporasyon desalinasyon işlemi boyunca sıcaklık kontrolü sağlanması için membran hücresi etüv içinde tutulur. %3 NaCl-su karışımı hazırlanır. Sonrasında membranın üst bölümünden pompa ile besleme yapılır. Membran hücresi soğuk kapanlara ve soğuk kapanlar ise vakum pompasına bağlanır. Alt akımda 30 mbar basınç sağlanarak ve üst akım atmosferik koşullarda tutularak bir basınç farkı oluşturulur ve kimyasal potansiyel farkına bağlı olarak ayırım işlemi gerçekleştirilir.

Pervaporatif desalinasyonun performansı su akısı ve tuz tutma kapasitesinin fonksiyonu olarak hesaplanmıştır. Deneysel sonucu membrandan birim zamanda (t) birim membran alanından (A) geçen madde miktarına göre (M) "akı" (J) değerleri hesaplanmıştır (Denklem 1).

$$J = \frac{M}{A.t} \quad (1)$$

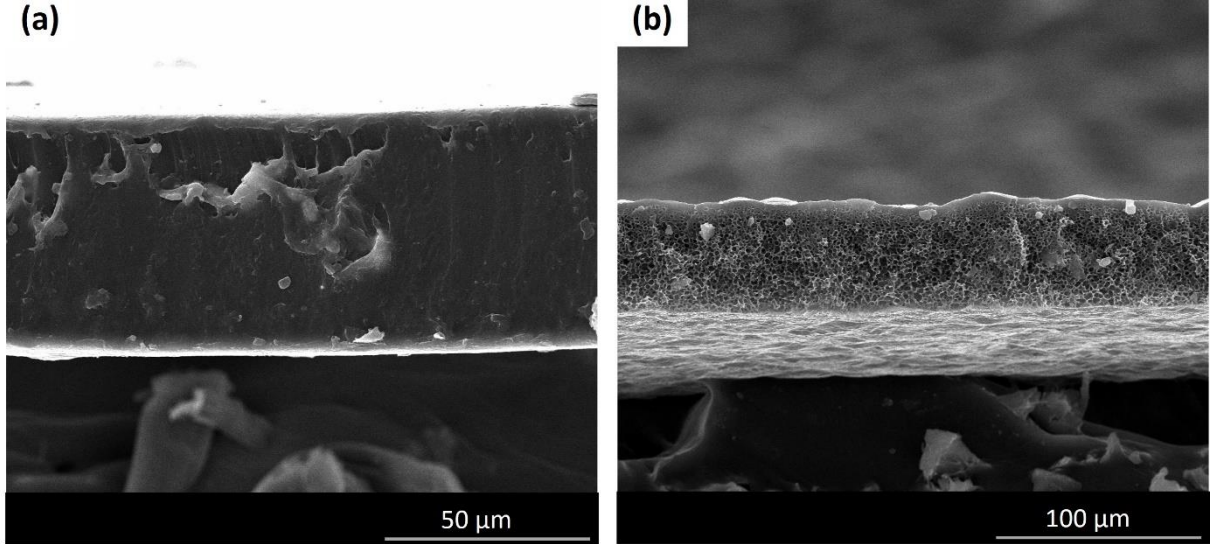
Membrandan geçen (C_p) ve membrana ilk beslenen (C_f) tuzların kondüktometrik (MettlerToledo Seven Compact) sonuçlarına göre de toplam tuz tutma kapasitesi (R) ya da diğer bir ifade ile toplam madde tutma kapasitesi hesaplanmıştır (Denklem 2).

$$R = \frac{C_f - C_p}{C_f} * 100 \quad (2)$$

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Membran karakterizasyon

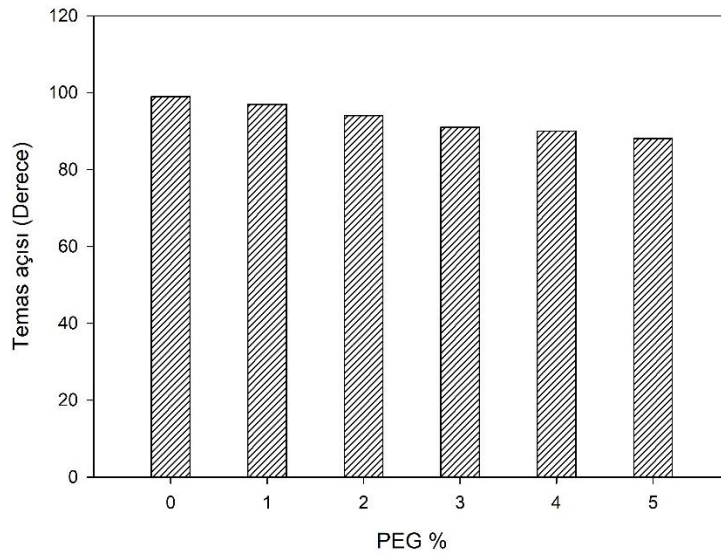
Şekil 1’de PEG katkısız (yoğun) ve %5 PEG katkılı (asimetrik) membranların kesit alanlarının taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüleri görülmektedir.



Şekil 1. Gözeneksiz yoğun (a) ve asimetrik (b)(%5 PEG katkılı) membranın SEM görüntüsü

Katkısız PLA membran gözeneksiz olarak üretilmiştir. Bu membranda SEM sonuçları Şekil 2a’da yer almaktadır. Üretilen membran kalınlığı 55,95-57,13 µm olarak ölçülmüştür. Membranın tamamının homojen ve gözeneksiz yapıda olduğu görülmüştür. Hazırlanan %5 PEG katkılı asimetrik membran Şekil 2b’de görülmektedir. Buna göre membranın alt bölümünün homojen gözeneklerle dolu olduğu üst bölümünün ise (yaklaşık 4 µm’lik bir kalınlıkta) yoğun bir yapıda olduğu görülmektedir. SEM analizleri sonucunda özellikle PEG katkılı asimetrik membranın başarılı bir şekilde üretildiği görülmüştür.

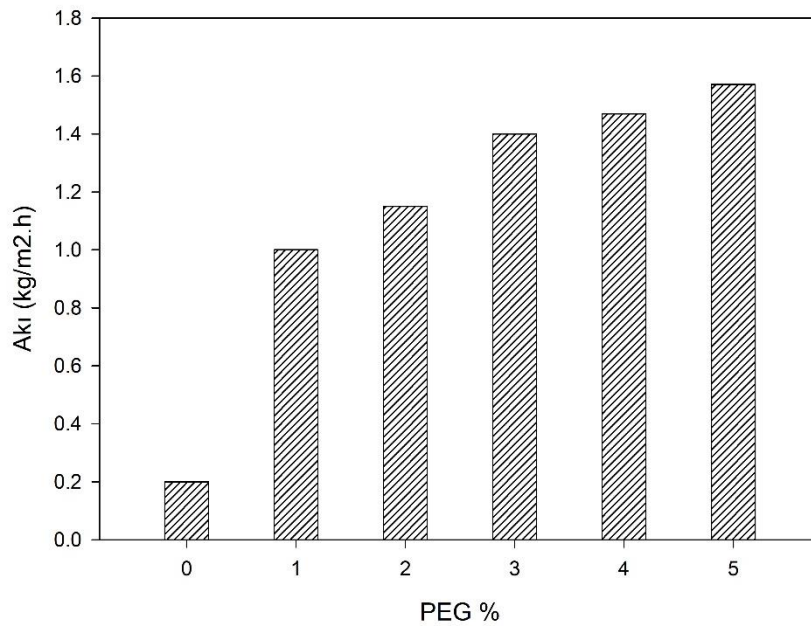
Şekil 2’de membranların yüzeylerinin su ile yaptıkları temas açıları görülmektedir. Membranlara PEG eklenmesi sonucunda yapısı asimetrik olarak değişse de, membranların yüzeyi yine gözeneksizdir. Ancak PEG malzemesi sahip olduğu yapıdan dolayı membran yüzeyinin hidrofobitesini bir miktar düşürmüştür. PEG eklenmeyen membranın temas açısı 99 iken, PEG eklenmesi ile bu oran 88’e kadar gerilemiştir. Bu sonucun da desalinasyon performansına olumlu şekilde yansması beklenmektedir.



Şekil 2. Membranların PEG katkısına göre temas açısı sonuçları

3.2. Desalinasyon sonuçları

Hidrofobik bir malzeme olan PLA'ya PEG eklendikçe akı üzerindeki etkisini Şekil 3'deki grafikte görülmektedir.

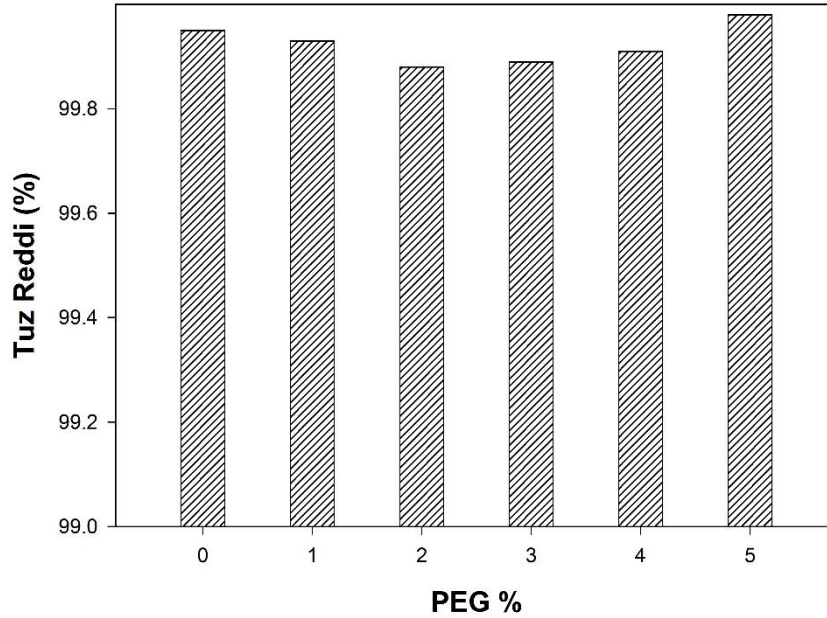


Şekil 3. % PEG katkılı PLA membranların akı grafiği

Membranın temel malzemesini oluşturan PLA hidrofobik bir malzeme olduğu için, membran ilgisine göre su geçişi sağlanmamaktadır. Bu membranda su geçişi yalnızca polimerin yapısal boşluklarından, boşluk mekanizmasına göre gerçekleşmektedir. Bu nedenle de akı değerleri düşük olmaktadır. Literatürde, PLA'nın hidrofilitesini arttırmak ve ayırma performansını iyileştirmek için PEG eklendiği görülmüştür. Shen ve arkadaşları (2013) tarafından yapılan bir çalışmada, PEG katkılı içi boş fiber PLA membranlar üretilmiş, PEG katkısı arttıkça membranın hidrofilitesinin de arttığını bulunmuştur. Ancak bu aynı zamanda gözenekli yapıyı da arttırabileceği için bu değerler bu çalışmada %5 ile sınırlandırılmıştır. Mevcut çalışmanın temel amacı nispeten hidrofob bir malzeme ile desalinasyon çalışması yapmaktır. Yeterince ince yapılan membranın, hidrofobik olsa da, yapısal boşluklarından suyun geçebileceği görülmüştür. Bu nedenle, PEG eklenmeyen membran akısı 0.2 kg/m²h olarak elde edilmiştir. PLA matrisine PEG eklendikçe akı oranlarında artma gözlenmiştir. PEG, PLA

membranı asimetrik membran haline getirmiştir. PEG katkılı PLA membranların hidrofobitesi azalmıştır. Asimetrik olarak hazırlanan membranın üst ayırma tabakası yoğun ve gözeneksiz, alt tabakası ise gözeneklidir. En yüksek akı değerleri %5 PEG katkılı PLA membranda hesaplanmıştır. Çalışmanın devamında PEG oranları %10'a kadar artırılmış ancak %5'den sonra tuz reddi değerlerinde önemli düşüşler olmuştur. Bu nedenle çalışma kapsamında yalnızca %5 PEG oranına kadar olan etkiye yer verilmiştir.

Şekil 4'de PEG katkılı PLA membranlar için, tuzlu su ile yapılan deneylerdeki tuz reddi oranları verilmiştir. Katkısız PLA membranda tuz reddi %99.95 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4. % PEG katkılı PLA membranların % tuz reddi grafiği

PEG katkılı membranlarda ise tuz reddi oranları arasında çok büyük farklar görülmemektedir. Tüm değerler %99 üzerindedir ve bu saf su eldesi için çok önemli bir bulgudur. En yüksek tuz reddi, %5 PEG katkılı PLA membran ile %99,98 olarak elde edilmiştir. Asimetrik membranın üst tabakası çok ince gözeneksiz, alt tabakası ise gözenekli olduğu için kütle transfer hızı bu sayede artırılmıştır. Yüzeyinin yoğun yapısından dolayı iyon geçişi engellenmiş, geçen su buharı ise gözenekli yapıdan dolayı hızlanmış, dolayısıyla akı değerleri önemli derecede artarken tuz reddi etkilenmemiştir. Bu durum genellikle akı ve tuz reddi arasında olan “trade-off” yani biri azalırken diğ erinin artması ilişkisini engellemiştir. Membran teknolojisi açısından bu bulgu önemlidir. Yapılan detaylı literatür araştırmasında, PLA ile pervaporatif desalinasyon çalışmasına hiç rastlanmamıştır. Ancak, polimerik membranların kullanıldığı, membran kalınlıklarının bu çalışmaya yakın olduğu, benzer sıcaklık ve vakum basınçlarında yapılan bazı çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Quinones-Bolanos vd. (2005) polyster membran kullanarak oda koşullarında 0.13 kg/m².h akı elde etmişlerdir. Zwijnenberg vd. (2005) yüksek sıcaklıkta poliamid membran ile benzer vakum değerlerinde 0.56 kg/m².h akı elde etmişlerdir. Huth vd. (2014) benzer koşullarda 0.54 kg/m².h akı değeri ve %99.84 tuz reddi elde etmiştir. Görüldüğü gibi mevcut çalışmada elde edilen değerler bu açıdan umut vericidir.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada pervaporasyon prosesinde kullanılmak üzere yoğun ve asimetrik PLA membranlar hazırlanmıştır. Hazırlanan membranların hepsi ince yapıya sahiptirler. PLA membran gözeneksiz ve hidrofobik bir yapıya sahip olduğu için su geçişi çok fazla olmamıştır. Bu membrana PEG eklendiğinde ise su geçişi artmıştır ve tuz reddi aynı oranlarda kalmıştır. Pervaporasyon prosesinde 50°C’de %3 NaCl-su çözeltisi kullanılarak deneyler yapılmıştır. Katkısız PLA membranda akı 0,2 kg/m².h olarak elde edilmiştir. PEG katkısı eklendikçe akı değerlerinde artma gözlenmiştir. En iyi sonuçlar, %5 PEG katkılı PLA membran ile elde edilmiştir. Bu membranın akı değeri 1,57 kg/m².h, tuz reddi ise %99,98 olarak hesaplanmıştır. Yapılan bu çalışmada, hazırlanan asimetrik membranlar ile pervaporasyon prosesleri için umut verici sonuçlar elde edilmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 121Y080 numaralı proje numarası ile desteklenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Kaynaklar

1. An, W., Zhou, X., Liu, X., Chai, P. W., Kuznicki, T., & Kuznicki, S. M. (2014). Natural zeolite clinoptilolite-phosphate composite membranes for water desalination by pervaporation. *Journal of membrane science*, 470, 431-438.
2. Burn, S., Hoang, M., Zarzo, D., Olewniak, F., Campos, E., Bolto, B., & Barron, O. (2015). Desalination techniques—A review of the opportunities for desalination in agriculture. *Desalination*, 364, 2-16.
3. Drobek, M., Yacou, C., Motuzas, J., Julbe, A., Ding, L., & da Costa, J. C. D. (2012). Long term pervaporation desalination of tubular MFI zeolite membranes. *Journal of Membrane Science*, 415, 816-823.
4. Galiano, F., Ghanim, A. H., Rashid, K. T., Marino, T., Simone, S., Alsahy, Q. F., & Figoli, A. (2019). Preparation and characterization of green polylactic acid (PLA) membranes for organic/organic separation by pervaporation. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21(1), 109-120.
5. Gude, V. G. (2017). Desalination and water reuse to address global water scarcity. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 16(4), 591-609.
6. Huth, E., Muthu, S., Ruff, L., & Brant, J. A. (2014). Feasibility assessment of pervaporation for desalinating high-salinity brines. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 4(2), 109-124.
7. Kaminski, W., Marszalek, J., & Tomczak, E. (2018). Water desalination by pervaporation—Comparison of energy consumption. *Desalination*, 433, 89-93.
8. Korin, E., Ladizhensky, I., & Korngold, E. (1996). Hydrophilic hollow fiber membranes for water desalination by the pervaporation method. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 35(6), 451-457.
9. Khajavi, S., Jansen, J. C., & Kapteijn, F. (2010). Production of ultra pure water by desalination of seawater using a hydroxy sodalite membrane. *Journal of Membrane Science*, 356(1-2), 52-57.
10. Liang, B., Zhan, W., Qi, G., Lin, S., Nan, Q., Liu, Y., ... & Pan, K. (2015). High performance graphene oxide/polyacrylonitrile composite pervaporation membranes for desalination applications. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(9), 5140-5147.
11. Liang, H. Q., Wu, Q. Y., Wan, L. S., Huang, X. J., & Xu, Z. K. (2014). Thermally induced phase separation followed by in situ sol-gel process: A novel method for PVDF/SiO₂ hybrid membranes. *Journal of membrane science*, 465, 56-67.
12. Liu, X., Demir, N. K., Wu, Z., & Li, K. (2015). Highly water-stable zirconium metal-organic framework UiO-66 membranes supported on alumina hollow fibers for desalination. *Journal of the American Chemical Society*, 137(22), 6999-7002.
13. Qian, X., Li, N., Wang, Q., & Ji, S. (2018). Chitosan/graphene oxide mixed matrix membrane with enhanced water permeability for high-salinity water desalination by pervaporation. *Desalination*, 438, 83-96.
14. Quinones-Bolanos, E., Zhou, H., Soundararajan, R., & Otten, L. (2005). Water and solute transport in pervaporation hydrophilic membranes to reclaim contaminated water for micro-irrigation. *Journal of Membrane Science*, 252(1-2), 19-28.
15. Shen, P., Moriya, A., Rajabzadeh, S., Maruyama, T., & Matsuyama, H. (2013). Improvement of the antifouling properties of poly (lactic acid) hollow fiber membranes with poly (lactic acid)-polyethylene glycol-poly (lactic acid) copolymers. *Desalination*, 325, 37-39.
16. Wongchitphimon, S., Wang, R., Jiraratananon, R., Shi, L., & Loh, C. H. (2011). Effect of polyethylene glycol (PEG) as an additive on the fabrication of polyvinylidene fluoride-co-hexafluoropropylene (PVDF-HFP) asymmetric microporous hollow fiber membranes. *Journal of Membrane Science*, 369(1-2), 329-338.
17. Wang, Q., Li, N., Bolto, B., Hoang, M., & Xie, Z. (2016). Desalination by pervaporation: A review. *Desalination*, 387, 46-60.
18. Xie, Z., Hoang, M., Duong, T., Ng, D., Dao, B., & Gray, S. (2011). Sol-gel derived poly (vinyl alcohol)/maleic acid/silica hybrid membrane for desalination by pervaporation. *Journal of Membrane Science*, 383(1-2), 96-103.

19. Zereszki, S., Figoli, A., Madaeni, S. S., Simone, S., Jansen, J. C., Esmailinezhad, M., & Drioli, E. (2010). Poly (lactic acid)/poly (vinyl pyrrolidone) blend membranes: Effect of membrane composition on pervaporation separation of ethanol/cyclohexane mixture. *Journal of Membrane Science*, 362(1-2), 105-112.
20. Zhang, Y., Feng, X., Yuan, S., Zhou, J., & Wang, B. (2016). Challenges and recent advances in MOF–polymer composite membranes for gas separation. *Inorganic Chemistry Frontiers*, 3(7), 896-909.
21. Zwijnenberg, H. J., Koops, G. H., & Wessling, M. (2005). Solar driven membrane pervaporation for desalination processes. *Journal of Membrane Science*, 250(1-2), 235-246.