

Performance of Poly(lactic acid) Membrane in Membrane Distillation Process

Negin Chamanara¹, Gholamreza Bakeri^{1,2*}, Mahnam Ketabi¹, and Asiye Khalilpour³

1. Department of Chemical Engineering, Faculty of Chemical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, 4714871167, Iran

2. Membrane Technology Research Laboratory, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, 4714871167, Iran

3. Babol University of Medical Sciences, Babol, 47745-47176, Iran

Received: 23 August 2025, accepted: 13 May 2026

ABSTRACT

Hypothesis: The water scarcity is one of the greatest challenges of today's human societies and due to the rapid growth of populations and increasing the urbanization, industrial development, global climate changes and at the same time, the warming of the planet; it has been intensified in recent years. Under these conditions, the water treatment and the water resource management have gained great importance in various industries such as oil and gas, food, power plants, etc. Various technologies using heat and membranes are introduced for water treatment and in recent years, the membrane distillation process has been developed due to its advantages compared to the conventional processes (such as high energy efficiency and low operational costs). However, the search for membrane improvement and modification of its properties is still underway. The use of biodegradable polymers is one of the proposed solutions so that this approach can be considered for further optimization to make it economically viable.

Methods: Through the application of biodegradable polymer such as poly(lactic acid), membranes were synthesized by phase inversion method at three polymer concentrations of 16%, 17%, and 19%. The membrane characterization tests such as mean pore size, liquid entry pressure, contact angle and porosity were performed. Subsequently, the membranes were applied in the membrane distillation process for the treatment of synthetic wastewater with high salt content.

Findings: The purification flux (1.46 kg/m²/h of a 17% PLA membrane) and salt rejection (92.7% of a 17% PLA membrane) demonstrated the capability of the PLA membrane to be utilized in the membrane distillation process. In addition, the long-term performance of a 19% PLA membrane was evaluated over 16 h, during which its flux increased from 0.17 kg/m²/h to 0.99 kg/m²/h and its salt rejection declined from 100% to 46.52%.

Keywords:

water and wastewater treatment, membrane distillation, poly(lactic acid), desalination wettability

(*To whom correspondence should be addressed.

E-mail: bakeri@nit.ac.ir

Please cite this article using:

Chamanara N., Bakeri G.H., Ketabi M., and Khalilpour A., Performance of poly(lactic acid) Membrane in Membrane Distillation Process, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **38**, 329-339, 2026.

کارایی غشای پلی (لاکتیک اسید) در فرایند تقطیر غشایی

نگین چمن آرا^۱، غلامرضا باکری^{۲*}، مهنام کتابی^۱، آسیه خلیل پور^۵

۱- بابل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشکده مهندسی شیمی، کد پستی ۴۷۱۴۸۷۱۱۶۷

۲- بابل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، آزمایشگاه تحقیقاتی فناوری های نوین غشایی، کد پستی ۴۷۱۴۸۷۱۱۶۷

۳- بابل، دانشگاه علوم پزشکی بابل، کد پستی ۴۷۱۷۶-۴۷۷۴۵

دریافت: ۱۴۰۴/۶/۱، پذیرش: ۱۴۰۵/۲/۲۳

چکیده

فرضیه: کمبود آب یکی از بزرگترین چالش‌های امروز جوامع بشری است و به دلیل گسترش سریع جمعیت و افزایش شهرنشینی، توسعه صنعت، تغییرات آب و هوایی جهان و هم‌زمان، گرم شدن سیاره زمین در سال‌های اخیر، شدت یافته است. در این شرایط، تصفیه آب و مدیریت منابع آن اهمیت بسیار زیادی برای صنایع مختلف نظیر نفت و گاز، مواد غذایی و نیروگاه‌ها پیدا کرده است. فناوری‌های متنوعی مبتنی بر گرمایش و غشا برای تصفیه آب ارائه شده‌اند که طی سال‌های اخیر، فرایند تقطیر غشایی به دلیل مزایایی که نسبت به فرایندهای مرسوم دارد (نظیر بازده انرژی زیاد و هزینه‌های عملیاتی کم) در تصفیه آب و پساب مورد توجه قرار گرفته است، اما همچنان نیاز به بهبود غشا و اصلاح خواص آن احساس می‌شود. استفاده از پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر یکی از راه‌حل‌های پیشنهادی است تا این فناوری بهینه و اقتصادی‌تر شود.

روش‌ها: در این پژوهش با استفاده از پلیمر زیست‌تخریب‌پذیر پلی (لاکتیک اسید)، غشاهایی با روش وارونگی فاز در سه غلظت پلیمر ۱۶، ۱۷ و ۱۹٪ ساخته شد و آزمون‌های ارزیابی غشا نظیر اندازه متوسط منافذها، فشار ورود مایع، زاویه تماس و تخلخل‌سنجی انجام شد. در ادامه، غشاها در فرایند تقطیر غشایی برای تصفیه پساب مصنوعی با درصد املاح زیاد استفاده شده‌اند.

یافته‌ها: شار تصفیه $1/46 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ برای غشا ۱۷٪ و پس‌زنی نمک $(92/7\%)$ برای غشا ۱۷٪ قابلیت غشای پلی (لاکتیک اسید) را برای استفاده در فرایند تقطیر غشایی نشان داد. همچنین کارایی بلندمدت غشای ۱۹٪ طی مدت ۱۶ h بررسی شد که شار آن از $0/17 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ به $0/99 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ و پس‌زنی نمک آن از ۱۰۰٪ به ۴۶/۵۲٪ تغییر یافت.

واژه‌های کلیدی

تصفیه آب و پساب،

تقطیر غشایی،

پلی (لاکتیک اسید)،

نمک‌زدایی،

ترشوندگی

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

bakeri@nit.ac.ir

مقدمه

گرمایش جهانی، به‌عنوان واقعیت انکارناپذیر، آثار مخربی بر بوم‌سازگان، اقتصاد و جوامع بشری در سراسر جهان ایجاد کرده است. یکی از بارزترین پیامدهای این پدیده، تشدید تنش آبی در مقیاس جهانی است. افزایش دما، تغییر الگوهای بارش و تبخیر بیشتر، به کاهش منابع آب شیرین و افزایش تقاضا برای آب در بخش‌های مختلف از جمله کشاورزی، صنعت و مصارف خانگی منجر شده است. این وضعیت، به‌ویژه در مناطقی که از قبل با کمبود آب مواجه بوده‌اند، بحرانی‌تر شده و لزوم اتخاذ راهکارهای نوآورانه و پایدار برای مدیریت منابع آب را بیش از پیش آشکار می‌سازد. در این راستا، توسعه منابع آبی و استفاده از فناوری‌های پیشرفته تصفیه آب، به‌عنوان راهبردهای کلیدی برای مقابله با چالش کمبود آب، مورد توجه قرار گرفته است [۱،۲]. فرایندهای گرمایی و غشایی، به‌عنوان دو فناوری مؤثر در تصفیه و نمک‌زدایی آب، نقش مهمی در تأمین آب مورد نیاز جوامع ایفا می‌کنند. فرایندهای گرمایی، با استفاده از تبخیر آب و سپس مایع‌کردن آن، قابلیت حذف طیف گسترده‌ای از آلاینده‌ها را از آب‌های شور و آلوده دارند. فرایندهای غشایی، می‌توانند ذرات معلق، نمک‌ها و سایر آلاینده‌ها را از آب جدا کرده و آب شیرین با کیفیت بالا تولید کنند. از جمله روش‌های تصفیه بر پایه غشا می‌توان به میکروصفافش (microfiltration, MF)، فراصفافش (ultrafiltration, UF)، نانوصفافش (nanofiltration, NF)، اسمز معکوس (reverse osmosis, RO) و تقطیر غشایی (membrane distillation, MD) اشاره کرد که چهار فرایند اول، براساس نیروی محرکه اختلاف فشار عمل می‌کنند. یکی از مهم‌ترین نقاط ضعف فرایندهای NF و RO، محدودیت فشار اسمزی به‌ویژه در نمک‌زدایی آب و پساب‌های بسیار شور است. با وجود اینکه فرایند RO فناوری بسیار مطلوب است و قابلیت جداسازی زیادی را نشان می‌دهد، نیاز به فشار عملیاتی زیاد و دشواری جداسازی برخی یون‌ها در یک مرحله از معایب این فناوری به‌شمار می‌آید [۱،۳،۴]. ادغام تقطیر گرمایی با جداسازی غشایی، رویکرد جدیدی را معرفی کرده است که با نام تقطیر غشایی شناخته می‌شود. تقطیر غشایی به‌عنوان فناوری نوظهور، قابلیت زیادی در حل چالش کمبود آب دارد. این فرایند، ترکیبی از فناوری‌های گرمایی و غشایی است که مزایای هر دو روش را به‌همراه دارد. مانند بازده زیاد در حذف آلاینده‌ها، کارایی مطلوب در دماهای کم، صرفه‌جویی در مصرف انرژی، قابلیت استفاده از منابع گرمایی با کیفیت کم و تولید آب با خلوص زیاد که به گسترش پژوهش در این زمینه در سال‌های اخیر شده منجر است. تقطیر غشایی می‌تواند در نمک‌زدایی آب دریا و آب‌های شور، تصفیه پساب‌های صنعتی و کشاورزی، تولید آب

آشامیدنی و تغلیظ محلول‌ها کاربرد داشته باشد [۳]. در واقع، تقطیر غشایی یک فرایند مبتنی بر تغییر فاز است که در آن، نیروی محرکه تفاوت بین فشار بخار ناشی از اختلاف دما بین دو سمت غشای میکرومتخلخل آب‌گریز است [۵].

Drioli و همکاران [۶] تقطیر غشایی و تحولات مهم در فرایند MD را از منظر ساخت غشا، پدیده انتقال گرما و جرم، ایجاد رسوب، ساخت مدول و کاربردها بررسی کردند. آن‌ها عنوان کردند، تقطیر غشایی به‌عنوان جایگزین کم‌هزینه و با صرفه انرژی شناخته می‌شود و امکان تصفیه خوراک با غلظت‌ها و ذرات جامد با اندازه‌های مختلف برای دستیابی به محصول با خلوص زیاد را فراهم می‌کند. Woo و همکاران [۳] برای کاهش مصرف انرژی نمک‌زدایی، چندین فرایند جایگزین مانند تقطیر غشایی را بررسی کردند. از آنجا که جهان از نظر محیط زیست، تقاضا برای آب و مصرف بهینه انرژی با چالش‌هایی مواجه است، غشای مناسب برای استفاده در فرایند MD به‌منظور کاربرد در نمک‌زدایی می‌تواند به‌عنوان نسل بعدی، جایگزین فرایند نمک‌زدایی تجاری اسمز معکوس شود. Kalla و همکاران [۷] تلاش‌هایی برای ساخت غشاهای MD بهبودیافته با خواص ضدترشوندگی و ضدجرم‌گرفتگی کردند که راه‌حل ارائه‌شده، توسعه غشاهای ابرآب‌گریز با ویژگی‌های ضدترشوندگی بود که به‌طور هم‌زمان، باعث افزایش شار نیز شد. Tai و همکاران [۸] نوآوری‌ها در فرایند MD و بررسی اقتصادی آن را بررسی کرده و بیان کردند، خواص اساسی غشا مانند تخلخل، اندازه منفذها، ضخامت، فشار ورودی و زاویه تماس آب برای بهبود کارایی غشاهای تجاری MD ضروری هستند. همچنین هزینه تولید آب در بحث تجاری‌سازی MD می‌تواند تحت تأثیر هزینه و خواص غشا باشد. از این‌رو پیش‌بینی می‌شود، پژوهشگران بتوانند مسیر خوبی برای توسعه غشاهای MD با شار زیاد ایجاد کنند.

یکی از مهم‌ترین جنبه‌های تقطیر غشایی، در اختیار داشتن غشاهایی با خواص کنترل‌شده است و مواد استفاده‌شده برای ساخت غشا به‌هنگام طراحی یک سامانه MD، اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار خواهند بود. زیرا، بر انتقال گرما، انتقال جرم در سراسر غشا و کارایی بلندمدت اثرگذارند. کارایی نهایی این فرایند نیز نتیجه مستقیم عوامل ساختاری، فیزیکی و شیمیایی غشاهای استفاده‌شده است و به‌طور ذاتی تحت تأثیر ساختار غشا از نظر ضخامت، تخلخل، توزیع و اندازه متوسط منفذها و آب‌گریزی قرار می‌گیرد. بنابراین، انتظار می‌رود، نتیجه موفقیت‌آمیز فرایند به‌طور منطقی به قابلیت غشا برای اتصال دو فاز، بدون پراکندگی یک فاز در فاز دیگر و ترکیب انتقال جرم حداکثری با مقاومت زیاد در برابر نفوذ مایع به منفذها بستگی داشته

کدرتر می‌شود. این پلیمر می‌تواند برای ساخت غشا در کاربردهای آب‌گریز نیز استفاده شود [۱۰،۱۱]. در سال‌های اخیر، PLA به‌عنوان پلیمر زیست‌تخریب‌پذیر در ساخت غشاهای استفاده‌شده در فرایندهای تصفیه آب و پساب، به‌ویژه تصفیه پساب‌های دارای روغن و غشاهای میکروصافشی و فراصافشی، کاربرد گسترده‌ای یافته است. این ماده به‌دلیل سمی نبودن، پایداری شیمیایی زیاد و زیست‌سازگاری از گزینه‌های مطلوب برای ساخت غشاهای تصفیه به‌شمار می‌رود [۱۲]. از مزایای مهم PLA، قابلیت انحلال آن در گستره‌ای از حلال‌های آلی مانند کلروفرم، تتراهیدروفوران (THF)، دی‌اکسان و بنزن است. این ویژگی امکان ساخت غشاهای پلیمری از PLA را با استفاده از روش محلول‌سازی فراهم می‌سازد [۱۳]. Tanaka و همکاران [۱۴،۱۵] کارایی غشای پلی(لاکتیک اسید) در فرایند میکروصافش را طی پژوهشی بررسی کردند. آن‌ها از روش جداسازی فازی برای ساخت غشای PLA استفاده کرده و گزارش کردند، این نوع غشا قابلیت جداسازی یاخته‌های باکتریایی از محلول‌های یاخته‌ای را دارد. براساس نتایج، غشای MF ساخته‌شده از PLA می‌تواند به‌عنوان پیش‌صافی مناسب در کاربردهای صنعتی استفاده شود. در مطالعه‌ای دیگر، Xiong و همکاران [۱۶] کارایی غشای PLA را در فرایند فراصافش بررسی کردند. آن‌ها از غشای مبتنی بر بلورهای فضاکامپلکسی PDLA/PLLA برای حذف آلبومین سرم گاوی (bovine serum albumin, BSA) استفاده کردند. نتایج حاکی از آن بود که غشای PLA با نسبت‌های جرمی مختلف از PDLA/PLLA قابلیت دستیابی به شار عبوری حدود $3325 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$ دارد که برای غشاهای فراصافشی کارایی مطلوبی است. مقدار حذف BSA حدود ۹۰٪ بود و همچنین غشای کارایی ضد جرم‌گرفتگی از خود نشان داد. در پژوهش دیگری، غشاهای نانوالیافی PLA با پوشش پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان (PDMS) با روش الکتروریسی و با افزودن تنها ۰/۱٪ نانوذرات سیلیکای اصلاح‌شده با فلئوئور (F-SiO_2) ساخته شده‌اند. ترکیب این دو ماده با PLA، موجب ایجاد ابرآب‌گریزی و بهبود مقاومت در برابر خیس شدن شد. طراحی دولایه‌ای شامل لایه با منافذ بزرگ و لایه با منافذ ریز باعث بازده زیاد دفع نمک شد. این غشا شار عبوری $6/87 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$ و بازده حذف نمک بیش از ۹۹٪ نشان داده و به‌عنوان گزینه‌ای زیست‌سازگار برای نمک‌زدایی و تصفیه آب معرفی شد [۱۷].

با توجه به نتایج مطالعات متعدد انجام‌شده در زمینه کاربرد غشاهای PLA در تصفیه آب و پساب، می‌توان بیان کرد، PLA یکی از پلیمرهای مطلوب در این حوزه به‌شمار می‌رود. با توجه به اهمیت روزافزون منابع آب و نیاز به فناوری‌های پیشرفته تصفیه، در این پژوهش، کارایی غشاهای بر پایه پلی(لاکتیک اسید) در فرایند تقطیر

باشد. غشا برای کاربرد در فرایند MD باید متخلخل، آب‌گریز و با پایداری گرمایی خوب و مقاومت شیمیایی عالی در برابر محلول‌های خوراک باشد [۶،۹].

عوامل ساختاری مؤثر غشا شامل ضخامت، تخلخل، اندازه و توزیع منافذها هستند و خواص شیمیایی آن به‌ویژه مقدار آب‌گریزی، نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در کارایی غشا در فرایند ایفا می‌کند. غشای ایده‌آل برای تقطیر غشایی باید دارای تخلخل کنترل‌شده با توزیع یکنواخت منافذها باشد تا تعادل مناسبی بین تراوایی و مقاومت در برابر نفوذ مایع (liquid entry pressure of water, LEPw) ایجاد شود. به‌عبارت دیگر، منافذهای بزرگ‌تر باعث افزایش جریان می‌شوند، اما همچنین کاهش LEPw را به‌دنبال خواهند داشت. همچنین، آب‌گریزی و زاویه تماس بزرگ برای جلوگیری از پدیده ترشوندگی ضروری است. از دیگر ویژگی‌های ضروری غشا می‌توان به پایداری گرمایی و شیمیایی مناسب و مقاومت در دماهای زیاد برای تصفیه پساب‌های با درصد املاح زیاد اشاره کرد. ساختار غشا باید به‌گونه‌ای باشد که ضمن حفظ استحکام مکانیکی، مقاومت در برابر انتقال جرم را به‌حداقل برساند. یکی از چالش‌های اصلی در این زمینه، ایجاد تعادل مناسب بین افزایش جریان عبوری از راه افزایش اندازه منافذها و حفظ فشار ورود مایع کافی برای جلوگیری از ترشوندگی است. افزون بر این، غشا باید از پایداری بلندمدت در برابر رسوب‌گیری و تخریب شیمیایی برخوردار باشد. در مجموع، فرایند تقطیر غشایی به قابلیت غشا در ایجاد جداسازی مؤثر فازها بدون اختلاط و نیز ترکیب بهینه انتقال جرم زیاد با مقاومت در برابر نفوذ مایع بستگی دارد [۹]. همان‌طور که عنوان شد، ماده سازنده غشا یکی از پارامترهای اصلی برای ساخت غشا با ویژگی‌های مطلوب است. معمولاً از پلیمرهایی نظیر پلی(وینیلیدن فلئوئورید) (PVDF)، پلی(تترافلئوئورواتیلن) (PTFE) و پلی‌پروپیلن (PP) برای ساخت غشاهای MD استفاده می‌شود که این ترکیبات برای محیط زیست مضر است و مدت زمان زیادی برای تجزیه در طبیعت نیاز دارند. از این‌رو، تمایل بر جایگزینی مواد با سمیت کمتر و کم‌ضررتر مانند پلی(لاکتیک اسید) (PLA) وجود دارد. پلی(لاکتیک اسید) پلیمری است که مقاومت گرمایی و مکانیکی قابل قبولی دارد و قابل بازیابی است و قابلیت حل مشکل زیست‌تخریب‌پذیری را دارد [۳،۵]. پلی(لاکتیک اسید) (PLA) یک پلیمر پلی‌استری سنتزی و آلیفاتیک از لاکتیک اسید با فرمول مولکولی $(\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_2)_n$ است. غشاهای ساخته‌شده از PLA به‌دلیل خواص مطلوب و تطبیق‌پذیری در کاربردهای مختلف، امروزه مورد توجه قرار گرفته‌اند. PLA ماده بلوری شفاف با حالت بی‌شکل و نسبتاً آب‌گریز است و هر چقدر بلورینگی آن بیشتر باشد،

گزارش شده است، درصد تخلخل غشاهای تقطیر غشایی از ۳۰٪ تا ۸۵٪ متغیر است. تخلخل غشا (ϵ) با معادله (۱) اندازه گیری می‌شود [۱۸]:

$$\epsilon = \frac{w_1 - w_2}{\frac{\rho_w}{w_1 - w_2} + \frac{w_2}{\rho_p}} \quad (1)$$

که w_1, w_2, ρ_w, ρ_p به ترتیب وزن غشای مرطوب و خشک، چگالی آب (1 g/cm^3) و چگالی پلیمر PLA ($1/25 \text{ g/cm}^3$) هستند. برای انجام آزمون، غشای خیس پس از وزن‌شدن، درون آون و در دمای 60°C به مدت ۲۴ h خشک شده و وزن آن اندازه گیری می‌شود. به‌طور کلی، تخلخل غشا در فرایند MD باید تا حد امکان زیاد باشد تا مسیرهای بیشتری برای انتقال جرم از راه غشا ایجاد شود [۱۹].

آزمون ضخامت

ضخامت و شار نفوذ غشا رابطه معکوس با یکدیگر دارند و با نازک‌شدن غشا، شار نفوذی به دلیل کاهش مقاومت انتقال جرم افزایش می‌یابد. از طرف دیگر و با افزایش ضخامت، اتلاف گرمایی از راه غشا کاهش می‌یابد [۱۹]. در این پژوهش، ضخامت غشا در نقاط مختلف و با استفاده از ضخامت‌سنج مدل Mahr-40EWR اندازه‌گیری و مقدار متوسط آن گزارش شد.

آزمون زاویه تماس

تمایل غشا به خیس‌شدن به وسیله مایعات اغلب با بررسی زاویه تماس مایع اندازه‌گیری می‌شود. در فرایند MD، به دلیل اینکه آب جزء اصلی محلول خوراک است، زاویه تماس با آب برای تعیین تمایل غشا به خیس‌شدن استفاده می‌شود. برای به حداقل رساندن خطا، حداقل ۱۰ نقطه روی سطح غشا برای انجام این آزمون انتخاب و میانگین نتایج به‌عنوان زاویه تماس گزارش شد. سطوح با زاویه تماس بیشتر از 90° تمایل کمتری به خیس‌شدن دارند و آب‌گریز نامیده می‌شوند در حالی که سطوح با زاویه تماس کمتر از 90° ، آب‌دوست شناخته می‌شوند [۱۹، ۲۰]. این آزمون با دستگاه مدل CA-500M ساخت شرکت شریف سولار انجام شد.

آزمون تعیین اندازه متوسط منفذها

تراوایی به اندازه منفذهای غشا بستگی دارد. اندازه منفذهای بزرگ‌تر باعث می‌شود، مسیرهای بیشتری برای انتقال جرم ایجاد شود و در نتیجه شار کلی غشا افزایش یابد. با وجود این، افزایش اندازه منفذ

جدول ۱- درصد ترکیبات محلول‌های پلیمری برای ساخت غشاها.
Table 1. The compositions of polymer solutions for membrane fabrication.

Membrane code	Solvent (wt%)	Polymer (wt%)
16% PLA	84	16
17% PLA	83	17
19% PLA	81	19

غشایی بررسی شد که طبق بررسی‌های انجام‌شده، مطالعات محدودی در این زمینه انجام شده است. در ادامه روش ساخت غشا و نتایج آزمون‌های ارزیابی غشاهای ساخته‌شده بررسی شد.

تجربی

مواد

از پلی(لاکتیک اسید)، PLA، خریداری‌شده از شرکت Nature Works، آمریکا به‌عنوان پلیمر پایه، حلال N-متیل پیرولیدون (NMP) محصول شرکت Eastman، چین به‌عنوان حلال پلیمر و نمک سدیم سولفات (Na_2SO_4) خریداری‌شده از شرکت اشیم، ایران برای تهیه محلول خوراک مصنوعی با درصد املاح زیاد استفاده شد.

دستگاه‌ها و روش‌ها

در این پژوهش، غشاهای پلیمری PLA با روش وارونگی فاز تهیه شدند. ابتدا، مقادیر مشخص پلیمر PLA در حلال NMP با نسبت‌های وزنی آمده در جدول ۱ مخلوط شده و به مدت ۲۴ h در دمای 30°C تا 50°C تحت هم‌زدن مداوم با همزن مغناطیسی قرار گرفتند تا پلیمر کاملاً حل شود. پس از آماده‌سازی محلول‌ها، ساخت غشاها با فرایند وارونگی فاز با غوطه‌وری درون حمام آب مقطر انجام شد و غشاهای ساخته‌شده برای خروج کامل حلال به مدت ۲۴ h داخل آب قرار داده شدند. سپس، غشاها در دمای محیط به مدت ۴ h تا ۵ h خشک شدند.

مشخصه‌یابی غشا

پس از آماده‌شدن غشاها با آزمون‌های مختلف ارزیابی و مشخصات آن‌ها تعیین شد.

آزمون تخلخل

تخلخل غشا یکی از عوامل اثرگذار بر نرخ انتقال جرم در غشاست.

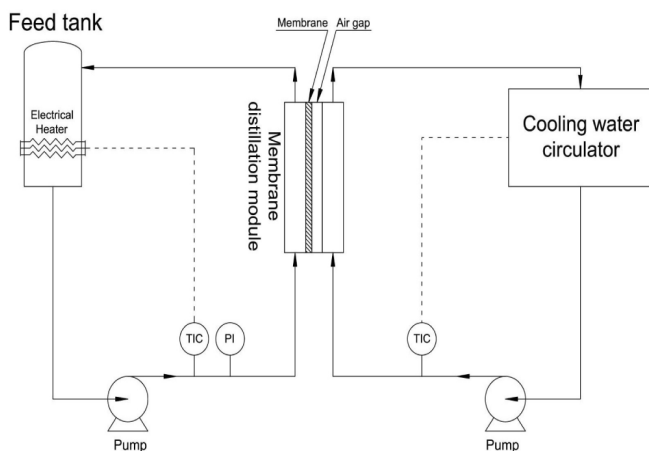
$$\Delta P_{\text{Interface}} = P_f - P_p = \frac{-2\gamma_L B \cos(\theta)}{r_{\text{max}}} \quad (3)$$

آزمون میکروسکوپی الکترونی پوششی

میکروسکوپی الکترونی پوششی (SEM) یکی از روش‌های پیشرفته در بررسی ساختار سطحی و شکل‌شناسی غشاست. SEM به‌ویژه در ارزیابی ویژگی‌های سطح مواد در مقیاس نانومتری کاربرد فراوانی دارد. در این پژوهش، برای بررسی شکل‌شناسی سطح و مقطع غشاها، این آزمون با دستگاه مدل SNE4500M انجام شد.

آزمون تقطیر غشایی

در نهایت، کارایی غشاها در فرایند تقطیر غشایی با شکاف هوا (air gap membrane distillation, AGMD) بررسی شد. طرحی از سامانه استفاده‌شده در این آزمون در شکل ۱ نشان داده شده است. در این آزمون، محلول ۱۰ g/L نمک Na_2SO_4 در دمای 80°C به‌عنوان خوراک در نظر گرفته شد، در حالی که دمای بخش سرد مدول با استفاده از گرداننده (circulator) آب سرد در محدوده 14°C – 10°C تنظیم شد. فاصله هوایی بین غشا و میعان‌کننده در مدول غشایی برابر $2/5$ mm، ابعاد مؤثر غشای استفاده‌شده در مدول 8×4 cm و مدت زمان انجام فرایند شامل زمانی برای پایدارسازی سامانه و زمانی برای جمع‌آوری نمونه آب تصفیه‌شده در نظر گرفته شد. برای اطمینان از صحت نتایج آزمون‌های انجام شده، آزمون‌ها حداقل سه بار تکرار شدند. برای ارزیابی کارایی بلندمدت، غشای ۱۹٪ به دلیل مقاومت بیشتر در برابر پدیده ترشدگی انتخاب و شرایط آزمون همانند آزمون‌های کوتاه‌مدت در نظر گرفته شد. محلول ۱۰ g/L نمک Na_2SO_4 در دمای



شکل ۱- طرحی از سامانه استفاده‌شده در آزمون تقطیر غشایی.

Fig. 1. Schematic of the system used in the membrane distillation test.

باعث کاهش LEPw می‌شود، از این رو لازم است، اندازه بهینه منافذ برای یافتن تعادل بین LEPw و تراوایی غشا ایجاد شود. توزیع اندازه منافذ غشا نشان‌دهنده تغییر در اندازه منافذها و در نتیجه، تغییر در سازوکار انتقال جرم و گرما در غشاست [۹]. برای اندازه‌گیری متوسط اندازه منافذهای غشا، از آزمون تراوایی آب استفاده می‌شود که در آن، غشا پس از خیس شدن در مدول غشایی قرار داده می‌شود و آب تحت فشار ۱ bar روی غشا ارسال می‌شود. مقدار تراوایی آب از غشا اندازه‌گیری شده از معادله (۲)، متوسط اندازه منافذهای غشا (r_m) محاسبه می‌شود:

$$r_m = \sqrt{\frac{8 \eta l Q (2.9 - 1.75 \varepsilon)}{\varepsilon A \Delta P}} \quad (2)$$

در این معادله، η ، گرانروی آب ($10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$)؛ l ضخامت غشا (m)؛ ε ، تخلخل غشا؛ Q ، مقدار عبوردهی آب به‌کمک غشا (m^3/s)؛ A ، سطح غشا (m^2) و ΔP ، فشار آب ورودی به مدول غشایی (10^5 Pa) است.

آزمون تعیین فشار ورود مایع به منفذها

فشار ورود مایع به منفذها (liquid entry pressure of water, LEPw) را می‌توان به‌عنوان کمترین فشار لازم برای ورود مایع به منفذهای خشک غشا، تعریف کرد و باید تا حد ممکن، زیاد باشد. به‌عبارت دیگر، LEPw حداکثر فشار مایع است که می‌تواند بر غشا اعمال شود، بدون اینکه به خیس شدن منافذهای غشا منجر شود. LEPw برای غشاها تجاری که در فرایند MD استفاده می‌شوند معمولاً بین ۱ bar تا ۴ bar است. افزایش زاویه تماس غشا، استفاده از مایعات با کشش سطحی زیاد و اندازه منافذهای کوچک‌تر غشا باعث بهبود LEPw می‌شود [۱۸]. در این آزمون، آب روی سطح غشا فرستاده شده و فشار آن به تدریج افزوده می‌شود و در هر فشار، چند دقیقه مقدار فشار ثابت نگاه داشته می‌شود. فشاری از مایع که قطره آب در سمت دیگر غشا دیده شود، به‌عنوان فشار ورود مایع ثبت می‌شود. باید توجه داشت، منافذهای بزرگ‌تر ابتدا مرطوب می‌شوند، بنابراین LEPw معیاری از اندازه بزرگ‌ترین منفذ است.

برای جلوگیری از خیس شدن، غشاها MD باید دو ویژگی را به‌طور هم‌زمان داشته باشند: زاویه تماس و آب‌گریزی زیاد و توزیع باریک اندازه منفذ. معادله لاپلاس (معادله ۳) نشان می‌دهد، LEP به‌طور معکوس با شعاع بزرگ‌ترین منفذ (r_{max}) و به‌طور مستقیم با عامل هندسی (B)، کشش سطحی مایع (γ_L) و کسینوس زاویه تماس مایع-جامد (θ) مرتبط است [۱۹].

جدول ۲- مشخصه‌های غشاهای ساخته شده.

Table 2. The characteristics of the fabricated membranes.

Membrane code	Thickness (mm)	Porosity (%)	Contact angle (°)	Mean pore size (nm)	Liquid entry pressure of water (bar)
16% PLA	0.276 ± 0.010	84.7	73.88 ± 3.39	4.88 ± 0.17	1.13 ± 0.13
17% PLA	0.316 ± 0.020	82.4	83.06 ± 2.24	3.49 ± 0	1.2 ± 0.13
19% PLA	0.248 ± 0.009	81.0	91.69 ± 2.44	3.20 ± 0.9	1.8 ± 0.2

بین غشاهای بررسی شده است.

به‌طور کلی نتایج نشان می‌دهد، بین تخلخل و اندازه منفذ غشاها، رابطه مستقیمی وجود دارد، بدین معنی که با افزایش تخلخل، اندازه منفذ نیز افزایش می‌یابد. همچنین، بین تخلخل و LEPw و بین تخلخل و زاویه تماس رابطه معکوس وجود دارد. غشاهایی با تخلخل زیاد، LEPw کم و زاویه تماس کمی نشان می‌دهند و برعکس. افزایش اندازه منفذها باعث ورود آب به داخل آن‌ها و کاهش زاویه تماس آب با سطح غشا می‌شود [۲۱]. یکی از عوامل مهم ساختاری که می‌تواند بر کارایی غشا اثرگذار باشد، ضخامت غشاست. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، ضخامت غشاها با افزایش غلظت پلیمر از ۱۶٪ تا ۱۹٪، ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته است. این روند را می‌توان به خواص محلول‌های پلیمری و رفتار آن‌ها حین فرایند تغییر فاز نسبت داد. با افزایش غلظت از ۱۶٪ به ۱۷٪، ساختار جامد غشا افزایش حجم داشته و باعث بهبود ضخامت شده است، در حالی که با افزایش غلظت از ۱۷٪ به ۱۹٪ به‌نظر می‌رسد، غشا متراکم‌تر شده که به کاهش ضخامت غشا منجر شده است. از آنجا که عبور بخار آب از میان غشا در فرایند AGMD با سازوکار نفوذ مولکولی انجام می‌شود، ضخامت غشا اثر معکوس بر شار تصفیه خواهد داشت. ضمن اینکه ضخامت غشا اثر معکوس بر رسانندگی گرمایی غشا در فرایند تقطیر غشایی نیز دارد.

براساس نتایج می‌توان بیان داشت، غشای ۱۶٪، با توجه به اندازه منفذ بزرگ‌تر و LEPw کم، برای کاربردهایی مناسب‌تر است. که به مقدار تصفیه کمتری نیاز دارند. این‌که از این غشا در فرایند تقطیر غشایی به‌عنوان پیش تصفیه استفاده شود. در مقابل، غشای ۱۹٪، با توجه به اندازه منافذ کوچک‌تر، آب‌گریزی و LEPw زیاد، برای کاربردهایی مناسب‌تر است که به ضریب جداسازی بیشتری نیاز دارند.

کارایی غشا در تقطیر غشایی

نتایج آزمون تقطیر غشایی نشان داد، در کارایی غشاها با تغییر در

۸۰ °C به عنوان خوراک و دمای قسمت سرد مدول با استفاده از گرداننده آب سرد در محدوده ۱۴-۱۰ °C تنظیم شد. مدت زمان انجام فرایند ۱۶ h متوالی و هر ۲ h، نمونه از آب تقطیر شده برای محاسبه شار و پس‌زنی گرفته شد.

نتایج و بحث

ارزایی ویژگی‌های غشا

در این مطالعه، غشاهای ساخته شده از نظر پارامترهای عملیاتی مانند LEPw (فشار ورود مایع آب)، اندازه متوسط منفذها، زاویه تماس و تخلخل بررسی شدند. نتایج در جدول ۲ نشان می‌دهد، غشاها در این پارامترها، تفاوت‌های قابل توجهی با یکدیگر دارند. غشای ۱۶٪ وزنی پلیمر که دارای بیشترین تخلخل ۸۴/۷٪ و بزرگ‌ترین اندازه منفذ ۴/۸۸ nm است، کمترین LEPw به مقدار ۱/۱۳ bar و کمترین زاویه تماس ۷۳/۸۸° را نشان داد. این نتایج تأیید می‌کند، غشای ۱۶٪، آب‌دوست‌ترین غشا در میان تمام غشاهای بررسی شده است. بدین معنی که آب به راحتی می‌تواند از راه منفذهای این غشا جریان یابد. تخلخل زیاد و اندازه بزرگ منفذهای این غشا به کاهش LEPw و زاویه تماس منجر شده است.

در مقابل، غشاهای ۱۷٪ و ۱۹٪، با تخلخل‌های کمتر (به ترتیب ۸۲/۴ و ۸۱٪) و متوسط اندازه منفذ کوچک‌تر (به ترتیب ۳/۴۹ و ۳/۲ nm)، دارای فشار ورود آب مایع (LEPw) بیشتر (به ترتیب ۱/۲ و ۱/۸ bar) و زاویه تماس بیشتر (به ترتیب ۸۳/۰۶ و ۹۱/۶۹°) بودند. براساس نتایج، افزایش غلظت پلیمر موجب کاهش اندازه منفذها و افزایش مقاومت غشا نسبت به ترشدگی شده است؛ از این‌رو، برای ورود آب به منفذهای غشاهای با غلظت بیشتر (۱۷ و ۱۹٪) نسبت به غشای ۱۶٪، به فشار بیشتری نیاز است. غشای ۱۹٪، با کمترین مقدار تخلخل (۸۱٪) و کوچک‌ترین اندازه منفذ (۳/۲ nm)، بیشترین زاویه تماس (۹۱/۶۹٪) را نشان داد که نشان‌دهنده آب‌گریزی غشا در

منفذا و تخلخل غشاها در درصدهای ساخته شده تشریح کرد. غشاهایی با تخلخل و اندازه متوسط کوچکتر، احتمال ترشوندگی کمتری دارند و در نتیجه، احتمال عبور خوراک از غشا و اختلاط آن با محصول کاهش یافته و پس زنی بیشتری را نشان می دهند، اما شار آن ها کمتر خواهد بود. باید توجه داشت، ترشنگی جزئی جدا از نوع غشا اتفاق می افتد که این پدیده به دلیل مایع شدن بخار آب در طول منفذهای غشا، به ویژه در مکان هایی با قطر کمتر است. این موضوع با نام پدیده میعان کلومین شناخته می شود و روی شار غشا اثر منفی دارد. از طرف دیگر، عبور خوراک از غشا که معمولاً در منفذهای بزرگ تر رخ می دهد، گرچه باعث افزایش شار می شود، اما پس زنی غشا را کاهش می دهد. در صورتی که بتوان هم زمان با افزایش اندازه منفذها، مقدار آب گریزی را نیز افزایش داد، می توان همچنان با شار زیاد به پس زنی مطلوب نیز دست یافت [۲۲].

اندازه منفذهای غشاها تأییدکننده این موضوع است که غشاهای با اندازه منفذ کوچکتر، قابلیت جداسازی بیشتری را دارند که در نتیجه به شار کمتر و پس زنی بیشتر منجر می شود. نتایج آزمون ها در جدول های ۲ و ۳، تأییدکننده این تحلیل ها هستند.

تصاویر SEM مقطع عرضی غشاهای ۱۷٪ و ۱۹٪ در شکل ۲ نشان داده شده است که هر دو غشا، ساختاری متخلخل دارند، اما اندازه و یکنواختی منافذ در دو غشا متفاوت است. تصاویر SEM بیانگر نامتقارن بودن سطح مقطع غشاهاست که در آن لایه پوستی (skin layer) نازک در بالای تصویر و زیرلایه متخلخل با منفذها انگشتی شکل در پایین تصویر قرار دارند که نتیجه فرایند تغییر فاز سریع است. به عبارت دیگر، گرانروی کم محلول پلیمر امکان نفوذ سریع ناحلال (آب) را به داخل محلول پلیمری فراهم می کند که

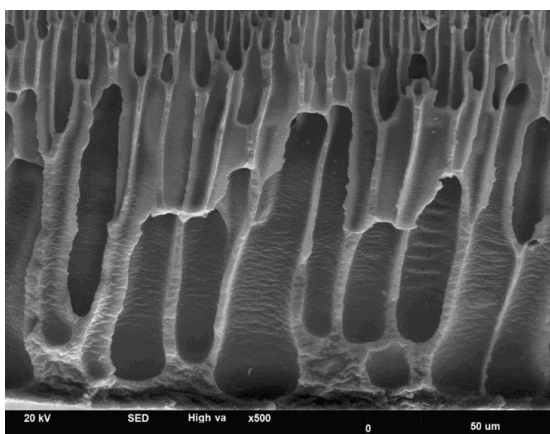
جدول ۳- کارایی غشاهای ساخته شده در فرایند تقطیر غشایی.

Table 3. The performance of the fabricated membranes in the membrane distillation process.

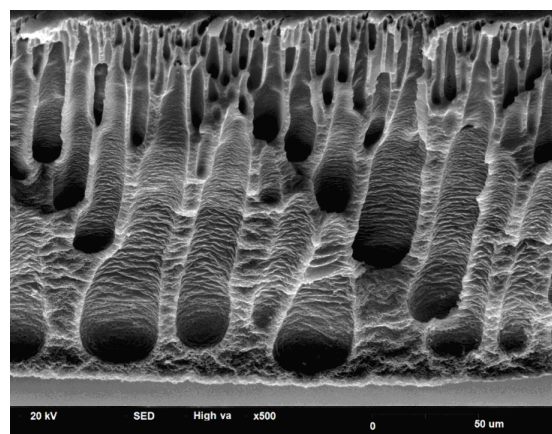
Membrane code	Flux (kg/m ² /h)	Rejection (%)
16% PLA	4.43 ± 1.16	45.66 ± 4.72
17% PLA	1.46 ± 0.22	92.70 ± 4.49
19% PLA	0.76 ± 0	95.82 ± 5.39

ترکیب آن ها، تفاوت شایان توجهی ایجاد می شود. همان طور که در جدول ۲ مشاهده شد، با افزایش غلظت، اندازه منفذها کاهش یافت. این ویژگی باعث می شود، احتمال خیس شدن غشا در فرایند کاهش یافته و پس زنی افزایش یابد. از طرف دیگر، این پدیده باعث افزایش مقاومت انتقال جرم و کاهش شار می شود. در جدول ۳ مشاهده می شود، غشای ۱۶٪ با شار تصفیه ۴/۴۳ kg/m².h، کمترین مقدار پس زنی (۴۵٪) را نشان داد. این موضوع حاکی از آن است که این غشا، اگرچه دارای شار زیادی است، اما قابلیت جداسازی به مقدار مطلوب را ندارد. در مقابل، غشاهای ۱۷٪ و ۱۹٪، با شارهای ۱/۴۶ و ۰/۷۶ kg/m².h، به ترتیب پس زنی ۹۲/۷٪ و ۹۵/۸۲٪ را نشان دادند. این نتایج نشان می دهد، با کاهش شار، مقدار پس زنی نمک افزایش یافته است. غشای ۱۹٪، با بیشترین مقدار پس زنی (۹۵/۸۲٪)، کارایی بسیار مطلوبی در جداسازی نشان داد، اما شار آن نسبت به سایر غشاها، کمتر است. در واقع، به کمک غشای ۱۹٪ می توان به آب فوق خالص دست یافت.

به طور کلی نتایج نشان می دهد، بین شار و پس زنی غشاها، رابطه معکوسی وجود دارد. بدین معنی که با افزایش شار، مقدار پس زنی کاهش می یابد و برعکس. این موضوع را می توان با استفاده از اندازه



(a)



(b)

شکل ۲- تصاویر SEM غشای PLA با بزرگنمایی ۵۰۰: (a) غشای ۱۷٪ و (b) غشای ۱۹٪.

Fig. 2. The SEM images of PLA membrane with magnification 500: (a) 17%, and (b) 19%.

جدول ۴- مقایسه کارایی غشای ۱۷٪ با سایر مطالعات انجام شده.

Table 4. The performance comparison of 17% PLA membrane with other researches.

Membrane	LEP _w (bar)	CA (°)	Porosity (%)	Pore size (nm)	Flux (L/m ² /h)	Rejection (%)	Ref.
Neat PVDF	1.02	131.87	94.11	5.96	14.7	94.5	[23]
Neat PTFE	0.76	127	65	450	6	99.1	[24]
PVDF with 0.5 wt% GQDs *	1.05	115.83	90.66	NA	8.2	99	[23]
Neat 17% PLA	1.2	83.06	82.4	3.49	1.46	92.7	This study

* Graphene Quantum Dots

۱۹٪ موجب افزایش LEP_w و بهبود پایداری در برابر خیس شدگی و در نتیجه افزایش درصد دفع نمک می‌شود، ساختار فشرده غشای ۱۹٪ به‌ویژه برای کاربردهایی که به حداکثر جداسازی و حداقل نفوذ مایع نیاز دارند، گزینه بهتری به‌شمار می‌آید. بررسی تصاویر SEM نشان می‌دهد، تغییر در تراکم ساختار و اندازه منافذ لایه پوستی غشا، اثر مستقیمی بر شار و درصد دفع نمک دارد.

نتایج آزمون تقطیر غشایی نشان داد، غشای خالص PLA کارایی مطلوبی در فرایند تقطیر غشایی نشان می‌دهد و این غشا در مقایسه با غشاهای دارای نانوذرات در سایر پژوهش‌ها (جدول ۴) قادر است، کارایی مطلوبی نشان دهد. از دیگر ویژگی‌های برتر این غشا، زیست‌تخریب‌پذیری آن است. بررسی کارایی غشاهای تهیه‌شده از پلی(لاکتیک اسید) با مقادیر مختلف وزنی در فرایند MD و مقایسه آن با غشاهای تجاری پلی(وینیلیدن فلوئورید) (PVDF)، پلی(تترافلوئورواتیلن) (PTFE) و غشاهای دارای نانوذره نشان می‌دهد، غشاهای PLA در درصدهای بیشتر قابلیت پس‌زنی بسیار خوبی (تا حدود ۹۳٪) دارند که قابل رقابت با غشاهای تجاری از جنس PVDF و PTFE است. با وجود این، شار عبوری این غشاها نسبت به غشاهای PVDF و PTFE کمتر است، به‌نحوی که شار غشای PLA در بازه ۰/۷۶ kg/m².h تا ۴/۴۳ kg/m².h قرار دارد، در حالی که غشای PVDF خالص شاری تا ۱۴/۷ kg/m².h نشان می‌دهد. این تفاوت به‌طور عمده به‌دلیل اندازه کوچک‌تر منافذ غشای PLA (که بین ۳ nm تا ۵ nm به‌دست آمده) در مقایسه با اندازه منافذهای بزرگ‌تر غشاهای PVDF و PTFE است. از نظر آب‌گریزی، زاویه تماس غشاهای PLA بین ۷۴° تا ۹۲° است که کمتر از غشاهای PVDF و PTFE با زاویه تماس بیش از ۱۱۵° است. گفتنی است، می‌توان به‌کمک افزودن نانوذرات، این ویژگی را بهبود بخشید. نکته مثبت دیگر غشای PLA، فشار ورود مایع (LEP_w) بیشتر نسبت به غشاهای PVDF و PTFE است که نشان‌دهنده قابلیت مقاومت بیشتر در برابر خیس شدن و نفوذ آب به منافذ است. به‌طور کلی، غشای

باعث ایجاد منافذهای بزرگ در زیرلایه غشا می‌شود. از آنجا که انتقال بخار آب در مقطع غشا با سازوکار نفوذ انجام می‌شود، وجود منافذ با پیچش کم در ساختار غشا باعث کاهش مقاومت انتقال جرم می‌شود. البته باید توجه داشت، اندازه منافذ در لایه پوستی بسیار کوچک‌تر از زیرلایه غشاست، بنابراین این بخش از غشا نقش تعیین‌کننده‌تری در انتقال جرم درون غشا خواهد داشت.

در تصاویر SEM مقطع عرضی غشاها، مرز بین لایه پوستی و زیرلایه به‌صورت کاملاً واضح مشاهده نمی‌شود و تغییر ساختار میان این دو لایه، ماهیتی تدریجی دارد. با وجود این، بخش بالایی تصویر را که تراکم بیشتری دارد، می‌توان به‌عنوان لایه پوستی در نظر گرفت و بخش زیری تصویر با منافذهای بزرگ‌تر و ساختار انگشتی شکل را به‌عنوان زیرلایه متخلخل در نظر گرفت. درباره غشای ۱۷٪، منافذهای لایه پوستی بزرگ‌تر و بازتر بوده و توزیع اندازه آن‌ها نیز گسترده‌تر است. این شکل‌شناسی می‌تواند به افزایش شار عبوری منجر شود، اما احتمال نفوذ مایع و کاهش نسبی درصد دفع نمک را نیز به‌همراه دارد. منافذهای زیرلایه نسبتاً باریک‌تر و کشیده‌تر بوده که نشان‌دهنده ساختاری نسبتاً منظم و پیوسته است. منافذهای کشیده و عمودی در بخش زیرلایه غشا، مسیرهای نسبتاً مستقیمی برای عبور بخار آب ایجاد می‌کند که به شار عبوری مناسب منجر می‌شود. همچنین اندازه منافذهای لایه پوستی در این غشا نسبت به غشای ۱۹٪ بزرگ‌تر است که همین موضوع اندکی از قابلیت آن در دفع نمک می‌کاهد، گرچه باعث افزایش شار می‌شود. این ویژگی‌ها به‌طور مستقیم با نتایج زاویه تماس و LEP_w همخوانی داشته و باعث افزایش قابل توجه خاصیت آب‌گریزی و مقاومت در برابر خیس شدن غشای ۱۹٪ شده است. در مقابل، زیرلایه غشای ۱۹٪ متراکم‌تر است و منافذهای آن کوتاه‌تر و تا حدی خمیده‌تر دیده می‌شوند. این شکل‌شناسی فشرده‌تر، اگرچه تا حدی می‌تواند شار را کاهش دهد، اما از نظر مکانیکی پایدارتر است و از ایجاد مسیرهای ترجیحی برای نفوذ فاز مایع جلوگیری می‌کند. به‌طور کلی، ترکیب لایه فعال فشرده‌تر و زیرلایه متراکم در غشای

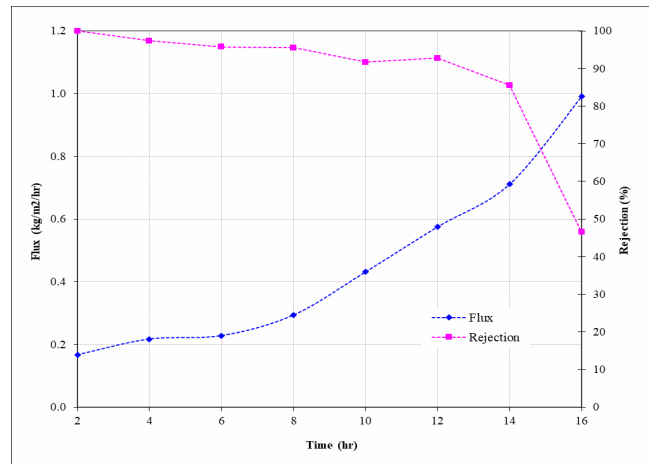
اصلاحات سطحی یا ترکیب با مواد دیگر برای بهبود مقاومت در برابر ترشوندگی در کاربردهای نمک‌زدایی بلندمدت است.

بررسی منابع نشان می‌دهد، وجود نانوذرات در ساختار غشا باعث بهبود کارایی بلندمدت نسبت به غشای PLA خالص شده است. به عنوان مثال، غشای نانوالیافی PVDF اصلاح شده با ۰/۲۵٪ وزنی نقاط کوانتومی گرافن (GQDs) شار اولیه‌ای معادل $18/43 \text{ kg/m}^2/\text{h}$ داشته و پس از گذشت ۲۰ h همچنان شار زیاد $12 \text{ kg/m}^2/\text{h}$ را با بازده پس‌زنی نمک بیش از ۹۹/۵٪ حفظ کرده است. این پایداری زیاد ناشی از ساختار متراکم‌تر لیاف، اندازه منفذ کوچک‌تر و LEPw بیشتر نسبت به PVDF خالص و PLA است که مقاومت به ترشوندگی را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد [۲۳]. همچنین، غشای PVDF دارای ۴٪ وزنی مونت‌موریلونیت آلی در چیدمان AGMD، شار اولیه $8/3 \pm 0/3 \text{ kg/m}^2/\text{h}$ و بازده پس‌زنی نمک بیش از ۹۹/۸٪ را در کل بازه زمانی آزمایش حفظ کرد. این غشا در آزمون پایداری پنج روزه نیز کاهش شار کمی (حدود ۵٪) را نشان داد و توانست کارایی پایدار خود را بدون خیس شدن منفذها حفظ کند [۲۵]. برتری قابل توجه غشاهای اصلاح شده PVDF نسبت به PLA خالص را می‌توان با اصلاح غشای خالص PLA و بهبود خواص آن جبران کرد. در مقایسه با غشای تجاری، مدول تجاری ماریچی شرکت Aquastill که در مطالعه‌ای در پیکربندی تقطیر غشایی با شکاف هوایی تقویت شده با خلاء (vacuum enhanced AGMD, V-AGMD) آزمایش شدند، شار پایداری در حدود $7/8 \text{ kg/m}^2/\text{h}$ بازده پس‌زنی نمک بیش از ۹۹/۶٪ را طی آزمون بلندمدت حفظ کرد. استفاده از خلاء در چیدمان AGMD به افزایش محسوس شار و بهبود بازده گرمایی منجر شد، بدون اینکه باعث کاهش کیفیت آب تصفیه شده طی زمان آزمایش شود [۲۶].

مقایسه این نتایج نشان می‌دهد، اگرچه غشای PLA خالص ۱۹٪ در ساعات اولیه می‌تواند بازده جداسازی زیادی ارائه دهد، اما پایداری آن در استفاده بلندمدت AGMD به‌طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از غشاهای PVDF اصلاح شده یا مدول تجاری V AGMD است. بنابراین، بهبودهای ساختاری و سطحی در غشاهای PLA نظیر اصلاح آب‌گریزی، کاهش اندازه منفذها و افزایش LEP برای رقابت‌پذیری در کاربردهای صنعتی ضروری است.

نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش، ارائه دیدگاه کاربردی در خصوص نقش غشای



شکل ۳- کارایی بلندمدت غشای ۱۹٪ در ۱۶ h.

Fig. 3. The long-term operation performance of the 19% PLA membrane over 16 h.

PLA با توجه به سازگاری زیست‌محیطی و پس‌زنی قابل قبول، گزینه مناسبی برای کاربردهای تقطیر غشایی به‌شمار می‌آید، هرچند که به‌منظور افزایش شار و بهبود خاصیت آب‌گریزی، نیاز به بهینه‌سازی وجود دارد [۲۳، ۲۴]. با وجود این، هدف این پژوهش تمرکز بر ارزیابی اولیه کارایی غشاهای زیست‌تخریب‌پذیر PLA بوده است و نتایج نشان می‌دهد، این غشاها می‌توانند کارایی قابل‌قبولی در فرایند تقطیر غشایی ارائه دهند.

کارایی بلندمدت غشای ۱۹٪

برای ارزیابی پایداری عملیاتی غشای خالص ۱۹٪، آزمون بلندمدت در سامانه تقطیر غشایی انجام شد. نتایج در شکل ۳ نشان می‌دهد، شار طی مدت ۱۶ h فرایند، به‌طور پیوسته افزایش یافته و از مقدار اولیه $0/17 \text{ kg/m}^2/\text{h}$ در ساعت دوم به $0/99 \text{ kg/m}^2/\text{h}$ در ساعت شانزدهم رسید. این افزایش شار را می‌توان به افزایش ترش‌دگی منفذها و عبور خوراک از آن‌ها نسبت داد. در مقابل، پس‌زنی در ابتدای آزمایش در سطح بسیار زیادی قرار داشت، اما با گذشت زمان، روند نزولی نشان داد. مقدار پس‌زنی از حدود ۱۰۰-۹۷٪ در ساعات اولیه به ۹۱-۹۳٪ در حدود ۱۲ h کاهش یافت و در ادامه کاهش شدیدتری داشته و در پایان دوره آزمایش به ۴۶/۵۲٪ رسید. این کاهش قابل توجه، بیانگر وقوع پدیده خیس شدن منفذهای غشا و انتقال مستقیم محلول خوراک به سمت نفوذ غشاست که به کاهش کارایی جداسازی منجر شد. این نتایج نشان می‌دهد، غشای ۱۹٪ در چیدمان AGMD، اگرچه در ساعات اولیه کارایی جداسازی بسیار مطلوبی دارد، اما پایداری بلندمدت آن به دلیل حساسیت به خیس شدن محدود است و نیازمند

مطالعات آتی فراهم می‌کند. به‌طور کلی به‌دلیل زیست‌تخریب‌پذیری پلی(لاکتیک اسید) می‌توان مطالعات را روی آن گسترش و خواص غشا را بهبود بخشید که در پژوهش‌های آینده، به آن پرداخته خواهد شد. به‌طور کلی پژوهش حاضر به‌عنوان مطالعه مبنا، درک اولیه از رفتار PLA در فرایند تقطیر غشایی ارائه می‌دهد و مسیر را برای پژوهش‌های بعدی در جهت بهینه‌سازی خواص و دستیابی به کارایی رقابتی هموار می‌سازد. افزون بر این، چالش‌های صنعتی مهمی همچون رسوب‌گیری، پایداری بلندمدت و هزینه‌های اقتصادی نیز می‌توانند مسیر پژوهش‌های آتی را شکل دهند. این چالش‌ها بیانگر این مطلب هستند که برای انتقال فناوری تقطیر غشایی از مقیاس آزمایشگاهی به مقیاس صنعتی، لازم است، راهکارهای کنترل رسوب، افزایش دوام کارایی و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری به‌طور جامع بررسی شوند.

قدردانی

نویسندگان مقاله از حمایت مالی دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل برای اعتبار پژوهشی با شماره ۱۴۰۱/۴۰۱۴۰۱۵۰۰۸/BNUT تشکر و قدردانی می‌کنند.

مراجع

- Nigiz F.U. and Karakoca B., Halloysite Nanotube Doped Poly (lactic acid) Membrane Preparation and Seawater Desalination, *Appl. Clay Sci.*, **231**, 106721, 2023.
- Abejón R., Romero J., and Quijada-Maldonado E., Potential of Membrane Distillation for Water Recovery and Reuse in Water Stress Scenarios: Perspective from a Bibliometric Analysis, *Desalination*, **591**, 117989, 2024.
- Woo Y.C., Kim S.H., Shon H.K., and Tijing L.D., Introduction: Membrane Desalination Today, Past, and Future, 2018.
- Alsebaei M.K. and Ahmad A.L., Membrane Distillation: Progress in the Improvement of Dedicated Membranes for Enhanced Hydrophobicity and Desalination Performance, *J. Indust. Eng. Chem.*, **86**, 13-34, 2020
- Boubakri A., Bouguecha S.A.T., and Hafiane A., Solvents-Dilute, Dissolve, and Disperse-Insights on Green Solvents and Distillation, In *Membrane Distillation Process: Fundamentals, Applications, and Challenges*, 2024.
- Drioli E., Ali A., and Macedonio F., Membrane Distillation: Recent Developments and Perspectives, *Desalination*, **356**, 56-84, 2015.
- Kalla S., Piash K.S., and Sanyal O., Anti-Fouling and Anti-Wetting Membranes for Membrane Distillation, *J. Water Process Eng.*, **46**, 102634, 2022.
- Tai Z.S., Othman M.H.D., Koo K.N., and Jaafar J., Critical Review on Membrane Designs for Enhanced Flux Performance in Membrane Distillation, *Desalination*, **553**, 116484, 2023.
- Sinha Ray S., Singh Bakshi H., Dangayach R., Singh R., Deb C.H.K., Ganesapillai M., Chen S.H.S.H., and Purkait M.K., Recent Developments in Nanomaterials-Modified Membranes for Improved Membrane Distillation Performance, *Membranes*, **10**, 140, 2020.
- Maharana T., Pattanaik S., Routaray A., Nibedita N., and Kumar Sutar A., Synthesis and Characterization of Poly(lactic acid) Based Graft Copolymers, *React. Funct. Polym.*, **93**, 47-67, 2015.
- More N., Avhad M., Utekar S., and More A., Polylactic acid

- (PLA) Membrane—Significance, Synthesis, and Applications: A Review, *Polym. Bull.*, **80**, 1117-1153, 2023.
12. Ghorbani M., Vakili M.H., and Ameri E., Fabrication and Evaluation of a Biopolymer-Based Nanocomposite Membrane for Oily Wastewater Treatment, *Mater. Today Commun.*, **28**, 102560, 2021.
 13. Rhim J.W., Mohanty A.K., Singh S.P., and Perry K.W., Effect of the Processing Methods on the Performance of Poly-lactide Films: Thermocompression Versus Solvent Casting, *J. Appl. Polym. Sci.*, **101**, 3736-3742, 2006.
 14. Tanaka T. and Lloyd D.R., Formation of Poly(L-lactic acid) Microfiltration Membranes via Thermally Induced Phase Separation, *J. Membr. Sci.*, **238**, 65-73, 2004.
 15. Tanaka T., Ueno M., Watanabe Y., Kouya T., Taniguchi M., and Lloyd D.R., Poly(L-lactic acid) Microfiltration Membrane Formation via Thermally Induced Phase Separation with Drying, *J. Chem. Eng. Japan*, **44**, 467-475, 2011.
 16. Xiong Z., Zhong Y., Lin H., Liu F., Li T., and Li J., PDLA/PLLA Ultrafiltration Membrane with Excellent Permeability, Rejection and Fouling Resistance via Stereocomplexation, *J. Membr. Sci.*, **533**, 103-111, 2017.
 17. He Y., Ye Y., Zhou M., Yan L., Zhang Y., Drioli E., Ma J., Li Y., and Cheng X, F-SiO₂-Embedded PLA-Based Superhydrophobic Nanofiber Membrane for Highly Efficient Membrane Distillation, *Environmental Science: Water Res. Technol.*, **10**, 3137-3145, 2024.
 18. Abu-Zeid M.A.E.R., Zhang Y., Dong H., Zhang L., Chen H.L., and Hou L., Comprehensive Review of Vacuum Membrane Distillation Technique, *Desalination*, **356**, 1-14, 2015.
 19. Kebria M.R.S. and Rahimpour A., Membrane Distillation: Basics, Advances, and Applications, *Adv. Membr. Technol.*, 2020.
 20. GhasemI S., Behrooz R., and GhasemI I., Investigating the Properties of Maleated Poly(lactic acid) (and Its Effect on Poly(lactic acid)/(Cellulose Nanofiber Composites), *J. Polym. Eng.*, **38**, 391-398, 2018.
 21. Hubadillah S.K., Tai Z.S., Othman M.H.D., Harun Z., Jamalludin M.R., Rahman M.A., Jaafar J., and Fuazi Ismail A., Hydrophobic Ceramic Membrane for Membrane Distillation: A Mini Review on Preparation, Characterization, and Applications, *Separat. Purif. Technol.*, **217**, 71-84, 2019.
 22. Alkhudhiri A., Darwish N., and Hilal N., Membrane Distillation: A Comprehensive Review, *Desalination*, **287**, 2-18, 2012.
 23. Jafari A., Kebria MRS., Rahimpour A., and Bakeri G., Graphene Quantum Dots Modified Polyvinylidene fluoride (PVDF) nanofibrous Membranes with Enhanced Performance for Air Gap Membrane Distillation, *Chem. Eng. Proc.-Process Intensification*, **126**, 222-231, 2018.
 24. Mansi A.E., El-Marsafy S.M., Elhenawy Y., and Bassyouni M., Assessing the Fouling Behavior of PTFE Membrane in Air-gap Membrane Distillation Against Oil-In-Brine Stabilized Emulsions, *Appl. Water Sci.*, **14**, 35, 2024.
 25. Navarro-Tovar R., Gorgojo P., Jobson M., Martin P., and Perez-Page M, Innovations in Water Desalination: Enhancing Air Gap Membrane Distillation Performance by the Incorporation of Clay Nanoparticles into PVDF Matrix Membranes, *Environ. Sci. Water Res. Technol.*, **10**, 2418-2431, 2024.
 26. Andrés-Mañas J.A., Ruiz-Aguirre A., Ación F.G., and Zaragoza G., Performance Increase of Membrane Distillation Pilot Scale Modules Operating in Vacuum-Enhanced Air-Gap Configuration, *Desalination*, **475**, 114202, 2020.