

The Application of Biodegradable Poly(lactic acid) Membranes in Membrane Contactors: Synthesis and Performance Study

Mehran Khosravani Koochi ¹, Gholamreza Bakeri ^{1,2}, Majid Khorshidian ³

1. Chemical Engineering Faculty, Babol Noshirvani University of Technology,
P.O. Box: 484, Babol, Iran

2. Advanced Membrane Research Lab, Babol Noshirvani University of Technology,
P.O. Box: 484, Babol, Iran

3. Malek Ashtar University of Technology, Northern Research Center for Science and Technology,
P.O. Box: 47515373, Fereydunkenar, Iran

Received: 20 February 2025, accepted: 2 September 2025

ABSTRACT

Hypothesis: The global warming, driven by CO₂ emissions, necessitates urgent mitigation strategies. CO₂ capture using liquid absorbents (such as water) has emerged as a promising approach and the membrane contactors enhance the CO₂ removal. However, the membrane wetting remains a major challenge, typically addressed by using hydrophobic polymers. Despite their effectiveness, these polymers have limited diversity and are non-biodegradable.

Methods: Poly(lactic acid) (PLA) membrane, fabricated from a biodegradable polymer derived from renewable resources, was used as a sustainable alternative. The PLA membrane was fabricated using the common phase inversion method and the characterization tests were done. The CO₂ absorption performance was assessed in a flat-sheet membrane contactor and the long-term performance was studied over six days.

Findings: The PLA membrane exhibited moderate hydrophobicity with a contact angle of 76.01° and a liquid entry pressure of 2.5 bar. The scanning electron microscopy images confirmed the presence of a finger-like porous structure, facilitating efficient mass transfer. In short-term CO₂ absorption tests at liquid velocity of 0.06 m/s, the absorption rates were 0.0688 mol. m⁻².s⁻¹ and 0.0541 mol. m⁻².s⁻¹ for synthetic seawater (40,000 ppm NaCl) and distilled water, respectively as the absorbents. The long-term test over six days showed performance decline to 0.0479 mol. m⁻².s⁻¹ (30.32% reduction) for seawater and 0.0283 mol.m⁻².s⁻¹ (47.74% reduction) for distilled water. The superior stability observed with seawater was attributed to its higher surface tension, which delayed the membrane wetting and preserved the gas-liquid interface. These results demonstrated the potential of PLA membranes for CO₂ absorption applications, particularly when combined with high-salinity absorbents, offering an environmentally friendly option for capture technologies.

Keywords:

membrane contactor,
Poly(lactic acid),
absorption,
hydrophobicity,
greenhouse gases

(*)To whom correspondence should be addressed.

E-mail: bakeri@nit.ac.ir

Please cite this article using:

Khosravani Koochi M., Bakeri Gh., Khorshidian M., The Application of Biodegradable Poly(lactic acid) Membranes in Membrane Contactors: Synthesis and Performance Study, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **38**, 17-28, 2025.

کاربرد غشاهای زیست تخریب پذیر پلی (لاکتیک اسید) در تماس دهنده های غشایی: سنتز و ارزیابی عملکرد

دسترس پذیر در نشانی: <http://jips.ippi.ac.ir>

مجله علوم و تکنولوژی پلیمر،

سال سی و هشتم، شماره ۱،

صفحه ۲۸-۱۷، ۱۴۰۴

ISSN: 1016-3255

Online ISSN: 2008-0883

DOI: 10.22063/JIPST.2025.35660.2380

مهران خسروانی کوهی^۱، غلامرضا باکری^{۱،۲}، مجید خورشیدیان^۳

۱- بابل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشکده مهندسی شیمی، صندوق پستی ۴۸۴

۲- بابل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، آزمایشگاه تحقیقاتی فناوری های نوین غشایی، صندوق پستی ۴۸۴

۳- فریدونکنار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، پژوهشکده علوم و فناوری شمال، صندوق پستی ۴۷۵۱۵۳۷۳

دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲، پذیرش: ۱۴۰۴/۶/۱۱

چکیده

فرضیه: گرمایش جهانی که ناشی از انتشار CO_2 بوده، نیازمند راهبردهای فوری برای کاهش است. جذب CO_2 با جاذب های مایع، رویکردی امیدوارکننده است و تماس دهنده های غشایی، جداسازی CO_2 را افزایش می دهند. با وجود این، ترشوندگی غشا همچنان چالش بزرگی است که معمولاً با استفاده از پلیمرهای آبگریز برطرف می شود. با وجود اثربخشی این پلیمرها، تنوع آنها محدود است و زیست تخریب پذیر نیستند.

روش ها: در این مطالعه، از پلی (لاکتیک اسید) که پلیمری زیست تخریب پذیر مشتق شده از منابع تجدیدپذیر است، به عنوان جایگزینی پایدار استفاده شده است. غشای پلی (لاکتیک اسید) با روش وارونگی فاز ساخته شده و آزمون هایی برای ارزیابی انجام شد. عملکرد جذب CO_2 در تماس دهنده غشایی صفحه تخت ارزیابی شد و پایداری بلندمدت غشا در طول شش روز بررسی شد.

یافته ها: غشای پلی (لاکتیک اسید)، آبگریزی متوسط با زاویه تماس $76/01^\circ$ و فشار ورود مایع $2/5 \text{ bar}$ نشان داد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی پویشی، وجود ساختار متخلخل انگشتی شکل را تأیید کرد که انتقال جرم کارآمد را آسان می کند. در آزمایش های جذب CO_2 کوتاه مدت که در سرعت مایع $0/06 \text{ m/s}$ انجام شد، مقدارهای جذب با استفاده از آب مقطر و آب دریای سنتزی ($40,000 \text{ ppm NaCl}$) به ترتیب $0/0541$ و $0/0688 \text{ mol/m}^2\text{s}$ بود. آزمایش های بلندمدت طی شش روز کاهش عملکرد به $0/0479 \text{ mol/m}^2\text{s}$ ($32/30\%$ کاهش) برای آب دریا و $0/0283 \text{ mol/m}^2\text{s}$ ($74/47\%$ کاهش) برای آب مقطر را نشان داد. پایداری برتر مشاهده شده با آب دریا به کشش سطحی بیشتر آن نسبت داده شد که ترشوندگی غشا را به تأخیر می اندازد و سطح مشترک گاز-مایع را حفظ می کند. این نتایج قابلیت غشاهای PLA را برای کاربردهای جذب CO_2 ، به ویژه هنگامی که با جاذب های با شوری زیاد ترکیب می شوند، نشان می دهد و گزینه سازگار با محیط زیست برای فناوری های جذب ارائه می دهد.

واژه های کلیدی

تماس دهنده غشایی،

پلی (لاکتیک اسید)،

جذب،

آب گریزی،

گازهای گلخانه ای

* مسئول مکاتبات، پیام نگار:

bakeri@nit.ac.ir

مقدمه

گرمایش جهانی که به طور عمده ناشی از انتشار CO_2 است، تهدیدی جدی در سطح جهانی به شمار می آید و اقدام فوری برای کاهش اثرهای آن را ضروری می سازد. یکی از رویکردهای امیدوارکننده برای کاهش انتشار CO_2 ، جذب آن با جاذب های مایع در منبع انتشار است. با وجود این، روش های متداول جذب مانند برج های سینی دار و بسترهای آکنده، دارای معایب شایان توجهی از جمله نسبت کم سطح به حجم و مشکلات عملیاتی مانند ریزش، طغیان و کف کردن هستند که مانع از افزایش بازدهی می شوند [۱،۲].

تماس دهنده غشایی گاز-مایع، جایگزینی کارآمد برای برج های جذب سنتی ارائه می دهند. در این سامانه از غشاهای ریزمتخلخل برای جداسازی فازهای گاز و مایع استفاده می شود که سطح تماس بسیار بیشتری را برای انتقال CO_2 بدون اختلاط مستقیم دو فاز ایجاد می کند. این تماس دهنده غشایی، چالش های عملیاتی رایج مانند طغیان و کف کردن را حذف می کند، انتقال جرم را بهبود می بخشد و امکان کنترل مستقل سرعت جریان گاز و مایع را ضمن حفظ طراحی فشرده فراهم می کند. با وجود این، ترشوندگی غشا همچنان چالش اساسی است که بازدهی جذب را محدود می کند به عبارت دیگر، در حالت بهینه، باید حفره های غشا از فاز گاز پُر شده باشند. در حالی که جاذب مایع به منفذهای غشا نفوذ کند، ترکیب حل شونده باید بخشی یا کل مسیر انتقال جرم از فاز گاز به جاذب را در فاز مایع طی کند و به دلیل کاهش شدید ضریب نفوذ در فاز مایع، مقدار جذب به سرعت کاهش می یابد [۳]. بنابراین، افزایش آب گریزی غشا یا استفاده از غشاهای به طور ذاتی آب گریز برای بهبود عملکرد ضروری است.

در حال حاضر، پلیمرهای آب گریز مانند پلی اتیلن (PE)، پلی پروپیلن (PP)، پلی وینیل فلوئورید (PVDF) و پلی تترا فلوئورواتیلن (PTFE) به طور گسترده در ساخت غشا برای تماس دهنده ها استفاده می شوند [۴،۵]. Naim و همکاران [۶] غشاهای الیاف توخالی میکرومتخلخل PVDF را از روش ریسندگی تولید کرده و عملکرد آن ها را برای جداسازی CO_2 از دی اتانول آمین آبی در تماس دهنده های غشایی گاز-مایع بررسی کردند. افزایش غلظت LiCl ، اندازه منافذ و زاویه تماس را کاهش داد، در حالی که تخلخل سطحی و فشار ورود مایع افزایش یافت که به بهبود بازده جداسازی منجر شد. غشا با ۵٪ وزنی LiCl ، بیشترین شار جداسازی CO_2 ($1.61 \times 10^{-2} \text{ mol/m}^2\text{s}$) را نشان داد. باکری و همکاران [۷] غشاهای الیاف توخالی پلی اتیلن ایمین (PEI) و پلی اترسولفون (PES) را برای کاربردهای تماس دهنده گاز-مایع بررسی کردند و دریافتند، PES به دلیل گرانروی کمتر، ساختار متخلخل تری ایجاد می کند و

خواص نفوذپذیری گاز بهتری نشان می دهد. با وجود اینکه هر دو غشا LEP_w زیادی داشتند، PES به دلیل اندازه منافذ بزرگتر و پیچ خوردگی کمتر منفذهای غشا، ۲۶٪ شار جذب CO_2 بیشتر ($4/4 \times 10^{-3} \text{ mol/m}^2\text{s}$) نسبت به PEI نشان داد. deMontigny و همکاران [۸] عملکرد غشاهای الیاف توخالی پلی پروپیلن (PP) و پلی تترافلوروواتیلن (PTFE) را برای جذب CO_2 در تماس دهنده های غشایی با محلول های MEA و AMP ارزیابی کردند. در حالی که غشاهای PTFE عملکرد پایدارتری داشتند، غشاهای PP به دلیل برهم کنش با حلال طی گذشت زمان دچار کاهش عملکرد شدند. Naim و همکاران [۹] غشاهای الیاف توخالی PVDF-PEG و PEI-PEG را برای جداسازی CO_2 با استفاده از سامانه تماس دهنده غشایی بررسی کردند. غشاهای PVDF گاز تراوایی، تخلخل سطحی و زاویه تماس بیشتری نشان دادند و به حداکثر شار جذب $4 \times 10^{-2} \text{ mol/m}^2\text{s}$ دست یافتند، در حالی که غشاهای PEI شار کمتری داشتند، اما مقاومت بهتری در برابر ترشوندگی نشان دادند. هر دو غشا با گذشت زمان کاهش شار را تجربه کردند. اما، پس از ۳۰ h عملکرد آن ها پایدار شد. امیرآبادی و همکاران [۱۰] غشاهای ماتریس ترکیبی بر پایه PVC دارای نانوذرات کلسیم کربنات و سیلیس را توسعه دادند که استحکام مکانیکی و آب گریزی غشا را بهبود بخشید. غشاهای سنتز شده در شرایط بهینه به شار جذب CO_2 زیاد معادل $1/45 \times 10^{-3} \text{ mol/m}^2\text{s}$ رسیدند. این موضوع اهمیت اصلاحات ساختاری و سطحی را در پیشرفت عملکرد غشا برای جذب گاز برجسته می کند. Cocon و همکاران [۱۱] غشای پلی (لاکتیک اسید) (PLA) قابل بازیافت و بر پایه زیست توده را برای تماس دهنده های غشایی گاز-مایع در جذب CO_2 توسعه دادند. غشاهای تهیه شده به شار جذب CO_2 برابر $2/36 \times 10^{-5} \text{ mol/m}^2\text{s}$ رسیدند که با غشاهای تجاری PVDF ($2/47 \times 10^{-5} \text{ mol/m}^2\text{s}$) قابل مقایسه است. مطالعه آن ها پایداری شیمیایی، قابلیت بازیافت و عملکرد جذب پایدار این غشا را در طول چرخه های متعدد نشان داد.

بیشتر مواد پلیمری مصرفی در ساخت غشا از منابع تجدیدناپذیر به دست می آیند، زیست تخریب پذیر نیستند و دسترسی به آن ها محدود است. از طرف دیگر، پژوهش در زمینه کاربرد سایر پلیمرها در ساخت غشای تماس دهنده می تواند گستره انتخاب مواد را در این خصوص گسترده تر کند. از این رو، به عنوان جایگزین پایدار، در این پژوهش پلی (لاکتیک اسید) (PLA) انتخاب شد که پلیمری زیست تخریب پذیر مشتق شده از منابع تجدیدپذیر مانند نشاسته ذرت یا نشکر است و به دلیل زیست تخریب پذیری مناسب و رد پای کربن کم مزیت هایی دارد [۱۲].

جدول ۱- شرایط ساخت غشا.

Table 1. Membrane fabrication conditions.

Parameter	Value
Polymer	Polylactic acid
Solvent and polymer concentration (wt%)	NMP, 17
Temperature for solving the polymer (°C)	50
Membrane fabrication method	Flat sheet casting
Coagulation bath	Water at room temperature
Membrane drying condition	Room temperature for 24 h

در حلال NMP تهیه شد. محلول در ظرف شیشه ای در بسته با استفاده از همزن مغناطیسی به مدت ۲۴ h تحت گرما ملایم مخلوط شد. در ادامه و برای حذف حباب های هوای محبوس شده، محلول به مدت ۳۰ min در حمام فراصوت گاززدایی شد. سپس، محلول پلیمری قالب گیری شده و بلافاصله در حمام آب (به عنوان منعقدکننده) قرار داده شد. پس از گذشت ۲۴ h، غشای تشکیل شده از حمام آب خارج شده و خشک شد. شرایط تهیه غشای تخت در جدول ۱ آمده است.

مشخصه یابی غشا

پس از ساخت غشا و به منظور تعیین مشخصات، آزمون های مختلفی برای ارزیابی خواص غشا انجام شد که در ادامه شرح داده شدند.

ضخامت غشا

ضخامت غشاها با میکروسنج اندازه گیری شد که در محاسبه اندازه متوسط منفذها استفاده شد.

فشار ورود آب

آزمون فشار ورود آب (LEP_w , liquid entry pressure of water) برای ارزیابی مقاومت غشا در برابر نفوذ آب انجام می شود [۱۳]. در این روش، آب مقطر روی سطح غشا فرستاده شده و فشار آن به تدریج (هر مرحله ۱/۰ bar) افزایش داده می شود و در هر فشار، سامانه به مدت ۵ min ثابت نگه داشته می شود. فشاری که در آن اولین قطره آب در طرف مقابل غشا مشاهده می شود، به عنوان LEP_w ثبت می شود. از آنجا که بزرگ ترین منفذهای غشا سریع تر خیس می شوند، این آزمون به عنوان شاخصی از بزرگ ترین اندازه منفذهای

این پژوهش رویکرد جدیدی در استفاده از غشای صفحه تخت پلی (لاکتیک اسید) ۹ (PLA) در سامانه تماس دهنده غشایی با آب مقطر و آب دریای سنتزی به عنوان جاذب ارائه می دهد. برخلاف پژوهش های قبلی که به طور عمده بر استفاده از پلیمر بازیافتی PLA در ساخت غشا و استفاده از جاذب های شیمیایی متمرکز بود، این پژوهش بر اثر کشش سطحی و قدرت یونی جاذب بر مقاومت در برابر ترشوندگی غشا و عملکرد بلندمدت جذب CO_2 تأکید می کند. پیش بینی می شود، وجود نمک در آب دریای سنتزی ترشوندگی منافذ را به تأخیر بیندازد، سطح مشترک پایدار گاز-مایع را حفظ کند و مقدار انتقال جرم بیشتری را در طول عملکرد تماس دهنده نشان دهد. این پژوهش می تواند امکان جدیدی را برای فرایندهای جذب پایدار CO_2 و سازگار با محیط زیست، به ویژه در مناطق ساحلی که آب دریا به آسانی در دسترس است، باز کند و به پیشرفت فناوری های تماس دهنده غشایی سبز برای کاهش تغییرات آب و هوایی کمک کند.

تجربی

مواد

مواد استفاده شده در این پژوهش به شرح زیر است: پلی (لاکتیک اسید) (PLA، نوع D2002) که از شرکت NatureWorks آمریکا، به عنوان پلیمر پایه برای ساخت غشا خریداری شد. n-متیل-۲-پیرولیدون (NMP) با خلوص ۹۳/۹۹٪ از شرکت Eastman چین تهیه و به عنوان حلال برای تهیه محلول پلیمری استفاده شد. شناساگر فنول فتالین در مخلوط ۵۰/۵۰ آب و اتانول (خلوص ۷۰٪، شرکت شیمی الکل زنجان، ایران) حل و برای شناسایی نقطه پایانی تیتراژ کردن استفاده شد. برای آزمایش جذب گاز در تماس دهنده از گاز CO_2 با خلوص ۹۹/۹۹٪ به عنوان گاز حل شونده استفاده شد. برای جاذب دو حالت آب مقطر و آب دریای سنتزی (آب مقطر دارای ۴۰،۰۰۰ ppm نمک NaCl) در نظر گرفته شد.

دستگاه ها و روش ها

تهیه غشا

برای ساخت غشای PLA، ابتدا پلیمر به مدت ۲۴ h درون آون با دمای ۶۰ °C خشک شد. پس از ساخت غشاهای PLA با درصد های وزنی مختلف و انجام آزمون های اولیه، مشخص شد، غشای ساخته شده با ۱۷٪ وزنی پلیمر PLA مناسب ترین ویژگی ها را برای اهداف این پژوهش دارد. محلول پلیمری با غلظت ۱۷٪ وزنی با حل کردن PLA

°C ۶۰ قرار داده شدند.

$$\varepsilon = \frac{\frac{w_1 - w_2}{\rho_w}}{\frac{w_1 - w_2}{\rho_w} + \frac{w_2}{\rho_p}} \quad (2)$$

زاویه تماس آب

آب گریزی سطح غشا با اندازه گیری زاویه تماس بین قطره آب و سطح غشا به کمک دستگاه اندازه گیری زاویه تماس مدل Sharif solar CA500 ارزیابی شد. این آزمون معیاری از آب گریزی یا آب دوستی سطح است و تحت تأثیر عواملی مانند اندازه منافذ، زبری سطح و تخلخل سطحی قرار دارد. اندازه گیری ها حداقل در ۱۰ نقطه مختلف در سطح غشا برای در نظر گرفتن ناهمگنی های سطح انجام شده و مقدار متوسط گزارش شد.

میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM)

شکل شناسی سطح مقطع غشا با میکروسکوپ الکترونی پویشی SEM SNE4500M, Korea بررسی شد. تصویربرداری SEM بینش های مطلوبی درباره ساختار و اثر پارامترهای ساخت بر شکل شناسی غشا ارائه می دهد.

آزمایش های جذب CO₂

عملکرد غشای ساخته شده در فرایند جذب CO₂ به کمک سامانه تماس دهنده غشایی صفحه تخت با آب مقطر و آب دریای مصنوعی به عنوان جاذب ارزیابی شد. طرحی از چیدمان سامانه در شکل ۱ نشان داده شده است که در آن، گاز CO₂ (خلوص ۹۹/۹۹٪) با

غشا نیز عمل می کند. در واقع، ترشدن منفذهای غشا که بر عملکرد تماس دهنده غشایی اثری حیاتی دارد، تابع خواص مختلفی از غشا نظیر اندازه منفذها و توزیع آن ها، آب گریزی سطح و زبری سطح است که آزمون LEP_w می تواند طرح کلی از مقدار مقاومت غشا در برابر پدیده ترشدگی ارائه دهد.

اندازه متوسط منفذها

اندازه منفذ غشا اثر دوگانه ای بر عملکرد آن در تماس دهنده دارد. از یک سو، منفذهای بزرگتر مقاومت غشا در برابر نفوذ گاز را کاهش می دهند و در نتیجه، مقدار جذب گاز افزایش می یابد. این موضوع به دلیل آسانی بیشتر عبور مولکول های گاز از منفذهای بزرگتر است. از سوی دیگر، منفذهای بزرگتر احتمال خیس شدن غشا به وسیله مایع جاذب را افزایش می دهند. خیس شدن یا پرشدن منفذهای غشا با مایع، سرعت نفوذ گاز در آن را کاهش می دهد و در نتیجه، اثر منفی بر مقدار جذب گاز خواهد داشت. بنابراین، انتخاب اندازه مناسب منفذها، نیازمند ایجاد تعادل بین این دو اثر متضاد است تا حداکثر بازدهی جذب گاز حاصل شود [۱۴].

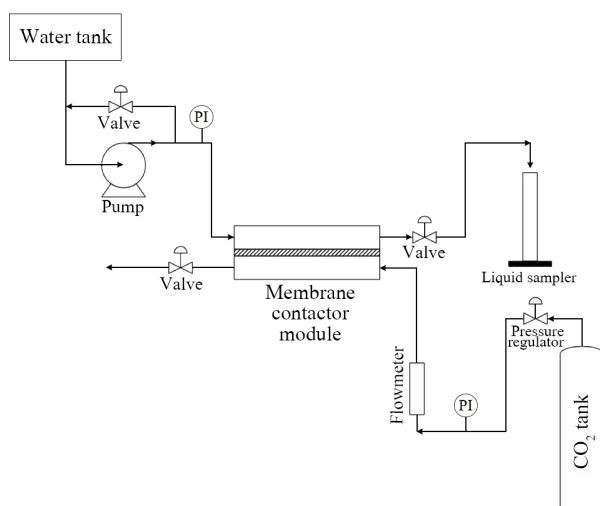
برای تعیین اندازه متوسط منفذها از آزمون نفوذپذیری آب استفاده شد، بدین صورت که آب مقطر با فشار ثابت ۱ bar از غشا عبور داده شده و شار آب اندازه گیری شد. شعاع متوسط منافذ (rm) با استفاده از معادله (۱) قابل محاسبه است [۱۵].

$$r_m = \sqrt{\frac{8\eta l Q (2.9 - 1.75\varepsilon)}{\varepsilon A \Delta P}} \quad (1)$$

در این معادله، η ، گرانروی آب (8.9×10^{-4} Pa.s)؛ Q ، سرعت حجمی آب تراویده از غشا (m^3/s)؛ ε ، تخلخل غشا؛ l ، ضخامت غشا (m)، A ، سطح غشا (m^2) و ΔP ، اختلاف فشار اعمال شده (۱۰۵ Pa) است.

تخلخل غشا

تخلخل غشا به درصد فضاهای خالی در ساختار غشا اشاره داشته و نقش مهمی در افزایش شار جذب دارد. تخلخل بیشتر مسیرهای بیشتری را برای عبور گاز از میان ساختار غشا فراهم کرده و نفوذپذیری را آسان می کند [۱۳]. تخلخل غشا براساس وزن غشا مرطوب و خشک (به ترتیب w_1 و w_2) از معادله (۲) [۱۶]، به همراه چگالی های آب خالص، w_p (0.998 g/cm^3) و پلیمر، p_p (1.25 g/cm^3) محاسبه شد. در این آزمون، نمونه های غشای مرطوب بریده و وزن شدند و سپس برای تعیین وزن خشک به مدت ۲۴ h در دمای



شکل ۱- طرحی از سامانه تماس دهنده غشایی.

Fig. 1. Schematic of the membrane contactor system.

جدول ۲- نتایج آزمون های ارزیابی غشا.

Table 2. The characterization test results of the membrane.

Contact angle (°)	Liquid entry pressure of water, LEP_w (bar)	Porosity (%)	Mean pore size (nm)
76.01 ± 2	2.5 ± 0.2	81.9	30.30 ± 0.3

غشا را در شرایطی شبیه به کاربردهای عملی فراهم می کند.

نتایج و بحث

غشای صفحه تخت پلی (لاکتیک اسید) با روش وارونگی فاز تهیه و خواص آن با آزمون های مختلف تعیین شد. همچنین عملکرد آن در تماس دهنده غشایی و جذب گاز CO_2 بررسی شد. در جدول ۲ نتایج آزمون های ارزیابی غشا ارائه شده است.

داده های جدول ۲ نشان می دهد، غشای PLA آب گریزی بیشتری ندارد، گرچه LEP_w آن عدد قابل قبولی است که می توان آن را به اندازه حفره های غشا مرتبط دانست. همچنین، تخلخل غشا در حد قابل قبولی است که می تواند به افزایش مقدار انتقال جرم در غشا کمک کند. شایان ذکر است، هر آزمایش مشخصه یابی سه تا شش مرتبه تکرار شد تا از تکرارپذیری و دقت نتایج، اطمینان حاصل شود. تصویر SEM سطح مقطع غشا در شکل ۲ نشان داده شده که بیانگر وجود حفره های انگشتی شکل است که از سطح غشا تا پایین امتداد یافته است. این ساختار برای افزایش مقدار انتقال جرم درون غشا بسیار مناسب است، زیرا طول مسیر انتقال جرم را کوتاه می کند. در فرایند واونگی فاز، دو پارامتر پایداری ترمودینامیکی محلول پلیمری و گرانروی آن کنترل کننده ساختار غشاست. این عوامل سرعت تبادل

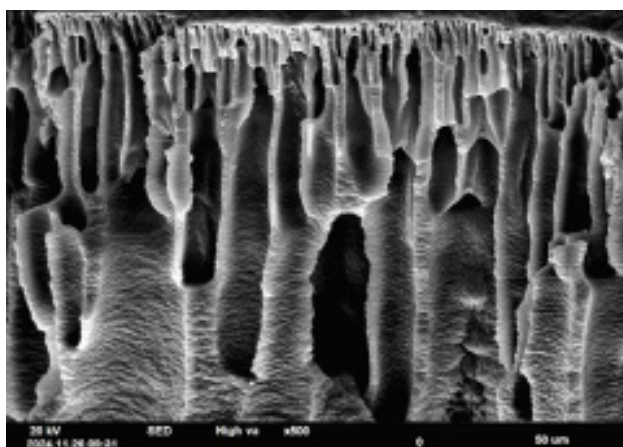
فشار ۱ bar و سرعت ۱ SCFH (standard cubic feet per hour) وارد مدول غشایی شده، در حالی که جاذب (آب مقطر یا آب دریای مصنوعی) به صورت جریان ناهمسو و با فشار ۱/۱ bar به کمک پمپ به سمت دیگر غشا ارسال می شود. سرعت جاذب با شیر تنظیم جریان در خروجی مدول کنترل می شود. سطح مؤثر غشا 32 cm^2 و آزمون های جذب در دمای اتاق (تقریباً 25°C) انجام شد. همچنین، آب دریای سنتزی با حل کردن ۴۰ g نمک طعام (NaCl) در یک لیتر آب مقطر تهیه شد.

برای تعیین شار جذب CO_2 ، از جاذب خروجی از مدول نمونه گرفته و غلظت CO_2 در آن از تیترا کردن با محلول سدیم هیدروکسید ۰/۰۵ مولار با استفاده از فنول فتالین به عنوان شناساگر نقطه پایانی تعیین می شود. شار جذب CO_2 با استفاده از معادله (۳) محاسبه می شود [۱۷]:

$$Q_{CO_2} = \frac{V_{NaOH} C_{NaOH}}{1000 t A_{\text{membrane}}} \quad (3)$$

در این معادله Q_{CO_2} ، شار جذب CO_2 به وسیله جاذب ($\text{mol/m}^2\text{s}$)؛ C_{NaOH} ، مولاریته محلول سدیم هیدروکسید (۰/۰۵ مولار)؛ V_{NaOH} ، حجم محلول هیدروکسید سدیم مصرف شده در تیترا کردن (mL)؛ t ، زمان نمونه برداری از جاذب خروجی از مدول (s) و A ، سطح غشای استفاده شده (m^2) است.

آزمون های بلندمدت برای ارزیابی پایداری غشا PLA در فرایند پیوسته و بلندمدت و برای دو حالت جاذب آب مقطر و آب دریای سنتزی انجام و کاهش شار جذب CO_2 و مقاومت غشا در برابر ترشیدگی در یک دوره شش روزه بررسی شد. در طول آزمایش، جاذب به طور مداوم با سرعت ۲ L/min و فشار ۰/۴ bar روی سطح غشا فرستاده و در بازه های زمانی مشخص، مقدار جذب CO_2 اندازه گیری شد. سایر پارامترهای آزمون مانند فشار گاز و مایع، سرعت CO_2 ، دما و ترکیب جاذب مانند آزمون کوتاه مدت بود. با توجه به وجود املاح زیاد در آب دریا و به منظور بررسی اثر آن بر عملکرد غشا، از آب دریای سنتزی دارای ۴۰,۰۰۰ ppm نمک طعام (NaCl) استفاده شد. این رویکرد امکان ارزیابی پایداری و عملکرد



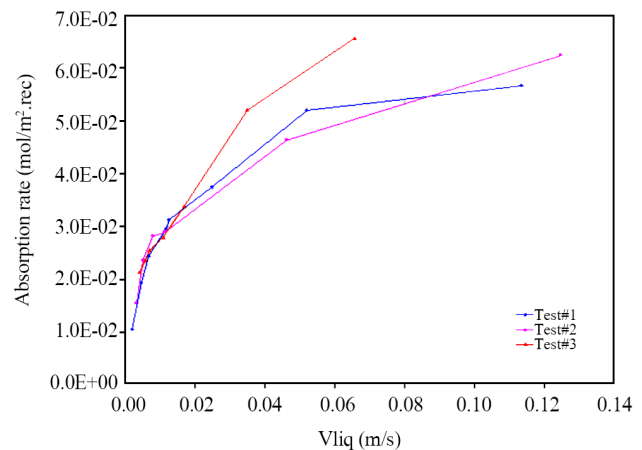
شکل ۲- تصویر SEM سطح مقطع غشا.

Fig. 2. SEM image of the membrane cross-section.

مقاومت انتقال جرم در فاز مایع است.

جدول ۳ مقایسه ای از عملکرد جذب CO_2 کوتاه مدت غشای PLA را با سایر مطالعات مشابه ارائه می دهد. اگرچه غشاهای الیاف توخالی ساخته شده از پلیمرهای آب گریز مانند PVDF مقاومت خوبی در برابر ترشوندگی نشان می دهند، ساختار آنها که معمولاً دارای دو لایه پوستی متراکم است، می تواند مقاومت انتقال جرم را افزایش داده و شار CO_2 را محدود کند. در مقابل، غشای صفحه تخت PLA با تخلخل زیاد، اندازه منافذ مناسب و شکل شناسی متخلخل انگشتی شکل خود، انتقال گاز سریع تری را ضمن حفظ مقاومت معقول در برابر ترشوندگی آسان می کند. این ویژگی های ساختاری به شار جذب زیاد کمک می کنند. با وجود این، توجه به این نکته مهم است که تفاوت ها در پیکربندی غشا (صفحه تخت در برابر الیاف توخالی)، سرعت های مایع و سایر جزئیات شرایط آزمایش مانند دما و فشار در مطالعات مرجع ممکن است، بر مقایسه نتایج اثر بگذارد. بنابراین، در حالی که غشای PLA عملکرد امیدوارکننده ای نشان می دهد، مقایسه های مستقیم باید با احتیاط تفسیر شوند.

نتایج آزمون های بلندمدت جذب CO_2 در تماس دهنده غشایی در دو حالت جاذب آب مقطر و آب دریای سنتزی با مقدار نمک محلول ۴۰,۰۰۰ ppm در شکل ۴ نشان داده شده است. گفتنی است، در آزمون تماس دهنده غشایی، سرعت مایع عبوری تغییر داده و مقدار جذب اندازه گیری می شد. به منظور بررسی روند مقدار جذب در گذر زمان، مقدار جذب در سرعت مایع ۰/۰۶ m/s ملاک قرار گرفت. همان طور که در شکل ۴ مشخص است، مقدار اولیه جذب CO_2 در این سرعت مایع برای آب دریا و آب مقطر به ترتیب



شکل ۳- نتایج آزمون کوتاه مدت تماس دهنده غشای PLA با جاذب آب مقطر.

Fig. 3. The short term contactor test results of PLA membrane with distilled water as the absorbent.

حلال با منعقدکننده طی وارونگی فاز و در نهایت ساختار منفذها و تخلخل غشا را تعیین می کنند [۱۸]. کاهش تعادل ترمودینامیکی و گرانروی محلول باعث افزایش سرعت وارونگی فاز و در نهایت ایجاد ساختار غشای نامتقارن با یک لایه بالایی متراکم و یک لایه زیرین متخلخل با حفره های انگشتی شکل می شود که در نتایج آزمون SEM نشان داده شده است.

در شکل ۳ نتایج آزمون کوتاه مدت تماس دهنده غشای PLA با جاذب آب مقطر نشان داده شده است که برای بررسی تکرارپذیری نتایج، این آزمون سه مرتبه تکرار شد. همان طور که مشاهده می شود، مقدار جذب با افزایش سرعت مایع بیشتر شده که به دلیل کاهش

جدول ۳- مقایسه شار جذب CO_2 غشای PLA با پژوهش های مشابه.

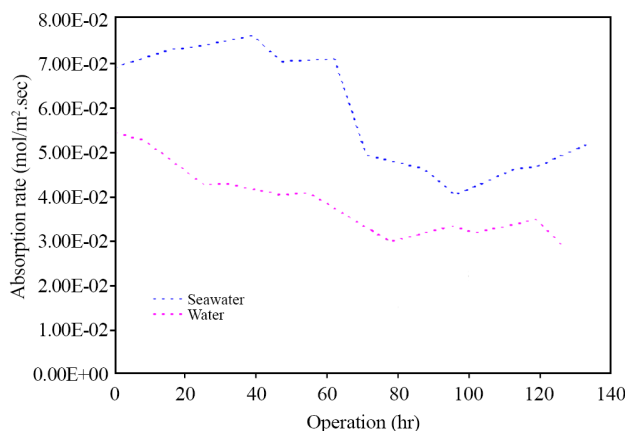
Table 2. Comparison of CO_2 absorption flux of PLA membrane with similar researches.

Mem. type	Mem. Material	Absorbent	Liquid velocity (m/s)	Feed gas	CO_2 absorption flux (mol/m ² s)	Ref.
Flat sheet	PLA	Distilled water	0.06	Pure CO_2	5.3×10^{-2}	Current work
Hollow fiber	PVDF biocatalyst	Water	0.25	Pure CO_2	2.3×10^{-3}	[19]
Hollow fiber	PP/CH ₃ SiO ₂	MEA (30 wt%)	0.55	Pure CO_2	1.7×10^{-3}	[20]
Hollow fiber	TiO ₂ -SiO ₂ /PVDF	MEA	0.3	Pure CO_2	8.6×10^{-3}	[21]
Hollow fiber	PVDF-filled MWCNT	Nanofluid based on water and Al ₂ O ₃	2.5	Pure CO_2	3.85×10^{-3}	[22]

Note: Changes in membrane type (flat sheet and hollow fiber) and differences in test conditions (such as temperature and pressure) will affect the amount of CO_2 absorption flux.

جدول ۴ مقایسه ای از عملکرد بلندمدت جذب CO_2 غشای PLA با سایر پژوهش های انجام شده در این باره را نشان می دهد. اندازه منفذهای غشا نقش مهمی در عملکرد آن ایفا می کند، زیرا در عین حالی که اندازه بزرگ تر منفذهای غشا باعث کاهش مقاومت نفوذ گاز از میان غشا می شود، اما می تواند پدیده ترشده گی غشا و از دست رفتن شایان توجه سطح مشترک گاز-مایع و کاهش جذب را باعث شود. همچنین، تخلخل غشا که معیاری از فضای خالی در ساختار غشاست، انتقال جرم را آسان می کند، ضمن اینکه نمک ها و ترکیبات محلول در جاذب مایع می توانند کشش سطحی آن را افزایش داده و قابلیت نفوذ مایع به منفذهای غشا را کاهش دهند. این موضوع به حفظ سطح مشترک پایدار گاز-مایع در فرایند جذب بلندمدت کمک می کند [۲۳، ۲۴].

زاویه تماس $76/01^\circ$ نشان دهنده آب گریزی متوسط است که برای مقاومت در برابر ترشده گی کافی به نظر نمی آید. با وجود این، وجود نمک در آب و به دلیل برهم کنش های یونی و تشکیل لایه آبپوشی روی سطح غشا، ترشده گی را تغییر داده و روند آن را کند می کند [۲۵]. همچنین LEP_w برابر $2/5$ bar غشا، نشان دهنده مقاومت مطلوب در برابر نفوذ مایع است [۲۴]. با گذشت زمان، این مقاومت در تماس با آب مقطر و به دلیل ترشده گی تدریجی منفذها کاهش می یابد، در حالی که اثرهای اسمزی و کاهش نیروهای مویرگی در آب دارای نمک، روند نزولی مقاومت در برابر نفوذ مایع را کند می کند. قدرت یونی آب دارای نمک، با کاهش فعالیت آب و افزایش یکپارچگی ساختاری فاز مایع در سطح مشترک غشا به حفظ پایداری غشا کمک می کند. این اثرهای تثبیت کننده از تخریب ساختاری جلوگیری و عملکرد



شکل ۴- عملکرد بلندمدت جذب CO_2 غشای PLA با جاذب آب مقطر و آب دریا سنتزی (ppm NaCl 400000) در سرعت مایع برابر $0/06$ m/s، سرعت گاز 1 SCFH، خوراک گاز CO_2 خالص.

Fig. 4. Long-term CO_2 absorption test of PLA membrane with distilled water and synthetic seawater (40,000 ppm NaCl) as the absorbents at liquid velocity of 0.06 m/s, gas flow rate: 1 SCFH, feed gas: pure CO_2 .

عملکرد مداوم غشا در تماس دهنده، مقدار جذب برای آب دریا و آب مقطر به ترتیب $0/0688$ mol/m²s و $0/0541$ mol/m²s بود و پس از شش روز که نشان دهنده کاهش $30/32\%$ و $47/74\%$ است. این یافته ها، عملکرد بلندمدت برتر را هنگام استفاده از آب دریا به عنوان جاذب نشان می دهد که به کشش سطحی بیشتر آب دریا در مقایسه با آب خالص و مقاومت بیشتر غشا در برابر پدیده ترشده گی منافذ مرتبط است.

جدول ۴- مقایسه عملکرد بلندمدت جذب CO_2 در غشای PLA با سایر پژوهش های مشابه.

Table 4. Comparison of the long-term CO_2 absorption performance of PLA membranes with other similar researches.

Mem. type	Mem. Material	Absorbent	Feed gas	$\text{LEP}_w^{(1)}$ (bar)	Contact angle ($^\circ$)	CO_2 absorption reduction (%)	Ref.
Flat sheet	PLA	Distilled water	Pure CO_2	2.5	76	47 (130 h)	Current work
Flat sheet	PLA	Seawater ⁽²⁾	Pure CO_2	2.5	76	30 (130 h)	Current work
Hollow fiber	PVDF	Distilled water	Pure CO_2	5.3	-	30 (150 h)	[27]
Hollow fiber	PVDF/ZSM-5	Distilled water	Pure CO_2	3.5	87	18.9 (350 h)	[28]
Hollow fiber	PSf + SMM	Distilled water	Pure CO_2	3	73	18 (130 h)	[29]
Flat sheet	TS-530 Silica/ PVDF MMM	Water	Pure CO_2	6.2	120	39 (180 h)	[16]

⁽¹⁾ LEP_w : Liquid entr pressure of water, ⁽²⁾ 40.000 ppm NaCl.

تجدیدپذیری و زیست تخریب پذیری نسبت به پلیمرهای معمولی بر پایه نفت مزایایی دارد، تولید آن بسته به منبع و فرایند تولید، همچنان ممکن است، شامل ورودی های انرژی و انتشار گازهای گلخانه ای شایان توجهی باشد [۳۱]. افزون بر این، پایداری مکانیکی و شیمیایی غشای PLA در شرایط عملیاتی بلندمدت می تواند بر پایداری کلی آن اثر بگذارد. بنابراین، پژوهش های آینده باید شامل یک LCA دقیق برای تأیید کامل مزایای زیست محیطی غشاهای بر پایه PLA برای کاربردهای جذب CO₂ باشد.

اگرچه نتایج آزمایشگاهی این مطالعه دلگرم کننده است، استفاده از غشاهای PLA در کاربردهای صنعتی مستلزم غلبه بر چالش های فنی و عملیاتی است. در کاربردهای واقعی، غشاها باید عملکرد پایدار را تحت کارکرد مداوم، قرار گرفتن در معرض دماهای بیشتر، نوسانات فشار و آلودگی احتمالی به وسیله ناخالصی ها حفظ کنند. در حالی که غشاهای PLA مزایای زیست تخریب پذیری و پایداری را ارائه می دهند، آب گریزی متوسط و خواص مکانیکی آنها ممکن است، نیاز به بهبود از راه اصلاحات سطحی، پوشش های نانوذرات یا تقویت کامپوزیتی داشته باشد. استفاده از آب دریا به عنوان جاذب باعث بهبود پایداری غشا می شود، همان طور که در این مطالعه نشان داده شد. این موضوع می تواند به ویژه در نیروگاه های ساحلی جذب کربن مفید باشد. پژوهش های آینده باید بر آزمایش دوام بلندمدت در شرایط صنعتی، بهینه سازی طراحی مدول و آزمایش های در مقیاس نیمه صنعتی برای ارزیابی قابلیت کامل غشاهای PLA برای جذب CO₂ در مقیاس بزرگ متمرکز شود. این مراحل برای پرکردن شکاف بین امکان سنجی آزمایشگاهی و پیاده سازی صنعتی بسیار مهم هستند. عملکرد دلگرم کننده غشاهای PLA که در این مطالعه مشاهده شد، قابلیت آنها را برای کاربردهای صنعتی گوناگون برجسته می کند. غشاهای PLA، به دلیل منشأ تجدیدپذیر، زیست تخریب پذیری، آب گریزی متوسط و ساختار متخلخل مطلوب، جایگزین سازگار با محیط زیست برای غشاهای پلیمری معمولی مانند PVDF و PTFE می تواند باشد.

در صنعت نفت و گاز، غشاهای PLA می تواند برای جداسازی CO₂ از جریان های گاز طبیعی (فرایند شیرین سازی) یا برای ارتقای زیست گاز استفاده شده قرار گیرند، جایی که کاهش اثرهای زیست محیطی مواد استفاده شده به طور فزاینده ای حیاتی می شود [۳۲، ۳۳]. آب گریزی متوسط همراه با پایداری قابل قبول در محیط های شور، همان طور که در آزمایش های آب دریا نشان داده شد، حاکی از آن است که غشاهای PLA می توانند به طور مؤثر در جریان های گازی با رطوبت زیاد یا شرایط شور عمل کنند.

پایدار را در طول استفاده بلندمدت تضمین می کنند [۲۶]. کاهش عملکرد جذب CO₂ در طول زمان، به ویژه در آب مقطر، به طور عمده به ترشوندگی غشا نسبت داده می شود، زیرا کشش سطحی کمتر آب مقطر، نفوذ مایع به داخل منافذ را آسان می کند. آب دریا، با کشش سطحی بیشتر خود این فرایند را به تأخیر می اندازد و در نتیجه پایداری بهتری را به همراه دارد. برای رفع این محدودیت و بهبود عملکرد بلندمدت غشا، پژوهش های آینده می تواند بر افزایش آب گریزی سطح غشاهای PLA از روش هایی مانند پوشش دهی با نانوذرات، عمل آوری پلاسما یا اصلاح شیمیایی سطح تمرکز کند. نتایج این پژوهش نشان می دهد، نوع جاذب به طور شایان توجهی بر دوام و عملکرد بلندمدت غشاهای PLA در کاربردهای جذب CO₂ اثر می گذارد. کشش سطحی بیشتر، کاهش ترشوندگی و اثرهای تثبیت کننده ناشی از نمک های حل شده در آب، به طور جمعی ترشوندگی منافذ را به تأخیر می اندازد و سطح مشترک گاز-مایع و بازدهی انتقال جرم بیشتری را حفظ می کنند. این یافته ها بر اهمیت انتخاب جاذب در بهینه سازی عملکرد غشا را برای فرایندهای جذب CO₂ تأکید می کنند.

در حالی که غشای PLA ساخته شده عملکرد رضایت بخشی در فرایندهای جذب CO₂ نشان داد، آب گریزی متوسط آن همچنان می تواند چالش هایی را برای پایداری بلندمدت و مقاومت در برابر ترشوندگی غشا ایجاد کند. افزایش آب گریزی غشاهای PLA می تواند عملکرد و طول عمر عملیاتی آنها را در سامانه های تماس دهنده غشایی بهبود بخشد. راهبردهای احتمالی برای دستیابی به این هدف شامل پوشش سطح با نانوذرات آب گریز (مانند سیلیس یا مواد فلوئوردار) برای ایجاد لایه دافع آب یا اصلاح شیمیایی گروه های عاملی سطح برای افزایش آب گریزی ذاتی پلیمر باشد. این رویکردها نه تنها می توانند پدیده ترشوندگی را کاهش دهند، بلکه به طور بالقوه می توانند استحکام مکانیکی و دوام شیمیایی غشا را نیز افزایش دهند. بنابراین، پژوهش های آینده باید بر کاربرد چنین روش های مهندسی سطح روی غشاهای PLA تمرکز کند تا قابلیت کامل آنها به عنوان جایگزین های پایدار برای غشاهای زیست تخریب ناپذیر معمول آشکار شود.

اگرچه PLA پلیمر زیست تخریب پذیر و بر پایه زیست توده است، ارزیابی کامل مزایای زیست محیطی آن نیازمند تحلیل چرخه حیات (life cycle assessment, LCA) جامع است. در مطالعات LCA، کل زنجیره تولید از جمله کشت مواد اولیه (مانند ذرت یا نیسکر)، سنتز پلیمر، فرایندهای ساخت غشا، طول عمر عملیاتی و دفع یا تخریب در پایان عمر را در نظر می گیرند [۳۰]. در حالی که PLA از نظر

غشایی ارزیابی شد. نتایج آزمون های ارزیابی غشا نشان داد، غشای PLA آب گریزی متوسط با زاویه تماس $76/01^\circ$ و فشار ورود مایع $2/5$ bar دارد. آزمون SEM وجود منافذ انگشتی شکل را تأیید کرد که به بهبود مقدار انتقال جرم با کاهش مقاومت درون ساختار غشا کمک می کند. آزمایش های عملکرد کوتاه مدت نشان داد، مقدار جذب CO_2 با افزایش سرعت مایع افزایش می یابد که اثر مقاومت انتقال جرم در فاز مایع را برجسته می کند. مقدارهای جذب در سرعت مایع $0/06$ m/s برای آب دریا $0/0688$ mol/m²s و برای آب مقطر $0/0541$ mol/m²s بود که نشان دهنده عملکرد بهتر با آب دریا به عنوان جاذب است. آزمایش های بلندمدت طی شش روز کاهش مقدارهای جذب را به ترتیب $30/32$ و $47/74\%$ برای آب دریا و آب مقطر نشان داد. نتایج برتر آب دریا را می توان به کشش سطحی بیشتر آن نسبت داد که ترشدگی غشا را به تأخیر می اندازد و سطح مشترک پایدار گاز-مایع را حفظ می کند. به طور کلی، نتایج نشان می دهد، غشاهای PLA قابلیت امیدوارکننده ای برای کاربردهای جذب CO_2 در تماس دهنده های غشایی دارند. یافته ها بر اهمیت انتخاب جاذب مناسب در افزایش طول عمر و عملکرد غشا تأکید می کند. کاهش ترشدگی و پایداری ساختاری غشا در حالت آب دریا نشان می دهد، غشاهای PLA می توانند به طور مؤثر در فرایندهای عملی جذب CO_2 به ویژه در مناطق حاشیه دریا استفاده شوند. این پژوهش پیشگامانه درباره غشاهای PLA، امکان جدیدی را برای توسعه فناوری های جذب بر پایه تماس دهنده های غشایی سازگار با محیط زیست و کارآمد، با پرداختن به چالش های زیست محیطی و عملیاتی، باز می کند. پژوهش های آینده می توانند بر افزایش آب گریزی غشاهای PLA و توسعه کاربرد آنها در اهداف واقعی برای مقابله با تهدید رو به رشد تغییرات آب و هوایی متمرکز شوند.

در بخش تولید برق، به ویژه در جذب CO_2 از گازهای دودکش پس از سوختن، غشاهای PLA می توانند به راه حل های پایدار جذب کربن کمک کنند. قابلیت آنها در حفظ عملکرد جذب در طول چند روز، به ویژه با جاذب های شور، قابلیت آنها را برای مقابله با محیط های پیچیده گاز دودکش نشان می دهد که در آن ترشوندگی غشا چالشی رایج است [۱۱، ۳۴]. افزون بر این، صنایع تصفیه آب و نمک زدایی می توانند به دلیل تخلخل زیاد و زیست تخریب پذیری غشاهای PLA، از آنها بهره مند شوند. قابلیت تولید غشا با اثر زیست محیطی کمتر می تواند به نگرانی های رو به رشد درباره مدیریت پسماند پلیمری در نیروگاه های بزرگ تصفیه آب پاسخ دهد [۳۳]. در نهایت، تصفیه گازهای زائد صنعتی در بخش هایی مانند تولید سیمان، فولاد و مواد شیمیایی، زمینه امیدوارکننده دیگری را برای غشاهای PLA ارائه می دهد. این صنایع تحت فشار فزاینده ای برای اتخاذ فناوری های سبزتر قرار دارند و استفاده از غشاهای ساخته شده از مواد زیست تخریب پذیر با اهداف پایداری جهانی همسو است [۳۵]. پژوهش های آینده باید بر آزمایش غشاهای PLA در محدوده گسترده تری از شرایط صنعتی، از جمله دماهای بیشتر، ترکیبات گاز مخلوط، دوام مکانیکی بلندمدت و قرار گرفتن در معرض محیط های شیمیایی تهاجمی، متمرکز شود تا امکان سنجی آنها برای استقرار در مقیاس بزرگ به طور کامل ارزیابی شود.

نتیجه گیری

در این مطالعه، غشای پلی (لاکتیک اسید) (PLA) صفحه تخت با روش وارونگی فاز ساخته شد و برای جذب CO_2 در تماس دهنده

مراجع

- Jung H., Park N., and Lee J.H., Evaluating the Efficiency and Cost-Effectiveness of RPB-Based CO_2 Capture: A Comprehensive Approach to Simultaneous Design and Operating Condition Optimization, *Appl. Energ.*, **365**, 123251, 2024.
- Shi X., Lee G.A., Liu S., Kim D., Alahmed A., Jamal A., Wang L., and Park A.H.A., Water-Stable MOFs and Hydrophobically Encapsulated MOFs for CO_2 Capture from Ambient Air and Wet Flue Gas, *Mater. Today*, **65**, 207-226, 2023.
- Chuah C.Y., Kim K., Lee J., Koh D.Y., and Bae T.H., CO_2 Absorption Using Membrane Contactors: Recent Progress and Future Perspective, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **59**, 6773-6794, 2019.
- Cui Z. and deMontigny D., Part 7: A Review of CO_2 Capture Using Hollow Fiber Membrane Contactors, *Carbon Manag.*, **4**, 69-89, 2013.
- Naim R., Ismail A.F., and Mansourizadeh A., Preparation of Microporous PVDF Hollow Fiber Membrane Contactors for CO_2 Stripping from Diethanolamine Solution, *J. Membrane Sci.*, **392**, 29-37, 2012.
- Bakeri G., Ismail A.F., DashtArzhandi M.R., and Matsuura T., Porous PES and PEI Hollow Fiber Membranes in a Gas-Liquid Contacting Process - A Comparative Study, *J. Membrane Sci.*, **475**, 57-64, 2015.

8. deMontigny D., Tontiwachwuthikul P., and Chakma A., Using Polypropylene and Polytetrafluoroethylene Membranes in a Membrane Contactor for CO₂ Absorption, *J. Membrane Sci.*, **277**, 99-107, 2006.
9. Naim R., Ismail A.F., Cheer N.B., and Abdullah M.S., Polyvinylidene Fluoride and Polyetherimide Hollow Fiber Membranes for CO₂ Stripping in Membrane Contactor, *Chem. Eng. Res. Des.*, **92**, 1391-1398, 2014.
10. Amirabedi P., Kojabad M.E., Raveshiyan S., and Dorfeshan M., Investigating the Effect of Hydrophobic Nanoparticles on the Performance of Polyvinyl Chloride Hollow Fiber Membrane Contactors for CO₂ Absorption, *Iran. J. Polym. Sci. Technol.* (Persian), **38**, 331-347, 2024.
11. Cocon K.D., Duvieusart A., Molina-Fernández C., Hartanto Y., and Luis P., Recyclable Bio-based Polylactic Acid Gas-Liquid Membrane Contactor for Carbon Capture Process, *Carbon Capture Sci. Technol.*, **18**, 100428, 2025.
12. Rezvani Ghomi E., Khosravi F., Saedi Ardahaei A., Dai, Y., Neisiany R.E., Foroughi F., Wu M., Das O., and Ramakrishna S., The Life Cycle Assessment for Polylactic Acid (PLA) to Make It a Low-Carbon Material, *Polymers*, **13**, 1854, 2021.
13. Bakeri G., Matsuura T., and Ismail A.F., The Effect of Phase Inversion Promoters on the Structure and Performance of Polyetherimide Hollow Fiber Membrane Using in Gas-Liquid Contacting Process, *J. Membrane Sci.*, **383**, 159-169, 2011.
14. Zhou W., Chen Y., Feng D., Xiao L., Li X., and Wang Z., Interplay between Membrane Wetting Resistance and the Carbon Dioxide Absorption Rate in a Membrane Contactor: The Critical Role of the gas-Liquid Interface, *ACS EST Eng.*, **4**, 2068-2076, 2024.
15. Mohammadi R., Hezarjaribi M., Ramasamy D.L., Sillanpää M., and Pihlajamäki A., Application of a Novel Biochar Adsorbent and Membrane to the Selective Separation of Phosphate from Phosphate-Rich Wastewaters, *Chem. Eng. J.*, **407**, 126494, 2021.
16. Rosli A., Shoparwe N.F., Ahmad A.L., Low S.C., and Lim J.K., Dynamic Modeling and Experimental Validation of CO₂ Removal Using Hydrophobic Membrane Contactor with Different Types of Absorbent, *Sep. Purif. Technol.*, **219**, 230-240, 2019.
17. Bakeri G., Rezaei-DashtArzhandi M., Ismail A.F., Matsuura T., Abdullah M.S., and Cheer N.B., Porous Polyethersulfone Hollow Fiber Membrane in CO₂ Separation Process via Membrane Contactor-The Effect of Nonsolvent Additives, *Korean J. Chem. Eng.*, **34**, 160-169, 2017.
18. Aerts P., Van Hoof E., Leysen R., Vankelecom I.F.J., Jacobs P.A. Polysulfone-Aerosil Composite Membranes: Part 1. The Influence of the Addition of Aerosil on the Formation Process and Membrane Morphology, *J. Membr. Sci.*, **176**, 63-73, 2000.
19. Xu Y., Lin Y., Chew N.G.P., Malde C., and Wang R., Biocatalytic PVDF Composite Hollow Fiber Membranes for CO₂ Removal in Gas-Liquid Membrane Contactor, *J. Membr. Sci.*, **572**, 532-544, 2019.
20. Amirabedi P., Akbari A., and Yegani R., Fabrication of Hydrophobic PP/CH₃SiO₂ Composite Hollow Fiber Membrane for Membrane Contactor Application, *Sep. Purif. Technol.*, **228**, 115689, 2019.
21. Xu Y., Lin Y., Lee M., Malde C., and Wang R., Development of Low Mass-Transfer-Resistance Fluorinated TiO₂-SiO₂/PVDF Composite Hollow Fiber Membrane Used for Biogas Upgrading in Gas-Liquid Membrane Contactor, *J. Membr. Sci.*, **552**, 253-264, 2018.
22. Talavari A., Ghanavati B., Azimi A., Sayyahi S., Preparation and Characterization of PVDF-Filled MWCNT Hollow Fiber Mixed Matrix Membranes for Gas Absorption by Al₂O₃ Nanofluid Absorbent via Gas-Liquid Membrane Contactor, *Chem. Eng. Res. Des.*, **156**, 478-494, 2020.
23. Eykens L., De Sitter K., Dotremont C., De Schepper W., Pinoy L., and Van Der Bruggen B., Wetting Resistance of Commercial Membrane Distillation Membranes in Waste Streams Containing Surfactants and Oil, *Appl. Sci.*, **7**, 118, 2017.
24. Hou Y., Shah P., Constantoudis V., Gogolides E., Kappel M., and Butt H.J., A Super Liquid-Repellent Hierarchical Porous Membrane for Enhanced Membrane Distillation, *Nat. Commun.*, **14**, 6886, 2023.
25. Chattopadhyay M., Krok E., Orlikowska H., Schwille P., Franquelim H.G., and Piatkowski L. Hydration Layer of only a Few Molecules Controls Lipid Mobility in Biomimetic Membranes, *J. Am. Chem. Soc.*, **143**, 14551-14562, 2021.
26. Obisesan O., Ahmed R., and Amani M., The Effect of Salt on Stability of Aqueous Foams, *Energies*, **14**, 279, 2021.
27. Mansourizadeh A., Ismail A.F., and Matsuura T., Effect of Operating Conditions on the Physical and Chemical CO₂ Absorption through the PVDF Hollow Fiber Membrane Contactor, *J. Membr. Sci.*, **353**, 192-200, 2010.
28. Rahbari-Sisakht M., Fauzi Ismail A., Matsuura T., and Emadzadeh D., Long-term Study of CO₂ Absorption by PVDF/ZSM-5 Hollow Fiber Mixed Matrix Membrane in Gas-Liquid Contacting Process, *J. Appl. Polym. Sci.*, **134**, 2017.

29. Rezaei M., Ismail A.F., Hashemifard S.A., Bakeri G., and Matsuura T., Experimental Study on the Performance and Long-Term Stability of PVDF/Montmorillonite Hollow Fiber Mixed Matrix Membranes for CO₂ Separation process, *Int. J. Greenh. Gas Con.*, **26**, 147-157, 2014.
30. Jamshidian M., Tehrani E.A., Imran M., Jacquot M., Desobry S., Polylactic Acid: Production, Applications, Nanocomposites, and Release Studies, *Compr. Rev. Food Sci. F.*, **9**, 552-571, 2010.
31. Groot W.J., Borén T., Life Cycle Assessment of the Manufacture of Lactide and PLA Biopolymers from Sugarcane in Thailand, *Int. J. Life Cycle Assess.*, **15**, 970-984, 2010.
32. Maleki M., Jafari M., Azizi M., and Ehsani M., Carbon capture and Storage: Application in the Oil and Gas Industry, *Sustainability*, **15**, 14486, 2023.
33. Jafari M., Ahmadi R., and Shokri E., Biodegradable Electrospun Membranes for Sustainable Industrial Applications, *ACS Omega*, **9**, 4567-4582, 2024.
34. Li K., Zhao H., and Chen X. Membrane-Based Technologies for Post-Combustion CO₂ Capture, *Membranes*, **14**, 123, 2024.
35. International Energy Agency (IEA), Carbon capture, utilization, and storage (CCUS)–Tracking Energy Transition 2024. Retrieved from <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage>, 2024.