

## Performance Evaluation of Facilitated Transport Membranes Based on PEBA/Chitosan/Graphene Oxide for CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> Separation

Behnam Rezazadeh<sup>1</sup>, Ali Akbar Babaluo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Chemical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran. E-mail. [B.rezazadeh92@gmail.com](mailto:B.rezazadeh92@gmail.com)

<sup>2</sup> Corresponding author, Faculty of Chemical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran. E-mail. [a.babaluo@sut.ac.ir](mailto:a.babaluo@sut.ac.ir)

### Article Info

**Article type:** research paper

#### Article history:

Received 26 October 2025

Received in revised form 1 February 2026

Accepted 13 June 2026

Published online 30 June 2026

#### Keywords:

Membrane

PEBA

Chitosan

M-GO

CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> separation

### ABSTRACT

**Objective:** The development of facilitated transport membranes often faces the challenge of reduced selectivity due to the increased free volume within the polymer matrix. The aim of this study is to investigate the distribution of unmodified graphene oxide (GO) and modified graphene oxide (M-GO) in a PEBA polymer matrix, as well as to evaluate the effect of surface-modified graphene oxide on improving the selectivity of PEBA/chitosan membranes.

**Material and Methods:** To prepare the facilitated transport membranes, graphene oxide was first dispersed in a water/ethanol solvent using an ultrasonic device. Then, 2 wt.% PEBA was dissolved in the prepared dispersion. Subsequently, a 1 wt.% chitosan solution was mixed with the homogeneous PEBA solution at a 1:1 ratio under magnetic stirring at room temperature.

The prepared membranes for investigation of the uniform distribution of filler in the polymer matrix by SEM and AFM tests and the interaction between filler and the polymer matrix were evaluated by FTIR. The CO<sub>2</sub> permeation test was performed using constant pressure and variable volume.

**Results :** According to the SEM and AFM morphological and topological analyses, the membrane containing M-GO exhibited a smoother surface morphology compared to the one with unmodified GO. This improvement is attributed to better compatibility with the polymer chains and a more uniform dispersion within the membrane structure. The results indicated that membranes containing M-GO showed enhanced CO<sub>2</sub> permeability and CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> selectivity compared to those with unmodified GO.

**Conclusion:** Surface modification of M-GO, owing to stronger interfacial interactions through hydrogen bonding and improved interfacial compatibility between GO nanosheets and the polymer matrix, led to a 314% increase in CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> selectivity and a 440% improvement in CO<sub>2</sub> permeability.

**Citation:** Rezazadeh, Babaluo, (2026). Performance Evaluation of Facilitated Transport Membranes Based on PEBA/Chitosan/Graphene Oxide for CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> Separation, Journal of Separation Science and Engineering, 18(1), 14-30. <http://doi.org/10.22103/jsse.2026.5527>



© The Author(s).

Publisher: Shahid Bahonar University of Kerman



## بررسی عملکرد غشاهای انتقال تسهیل یافته PEBA/ کیتوسان/ اکسید گرافن در جداسازی CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>

بهنام رضازاده<sup>۱</sup>، علی اکبر بابالو<sup>۲</sup>

۱. دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران. رایانامه: [B.rezazadeh92@gmail.com](mailto:B.rezazadeh92@gmail.com)

۲. نویسنده مسئول، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران. رایانامه: [a.babaluo@sut.ac.ir](mailto:a.babaluo@sut.ac.ir)

### چکیده

**هدف:** توسعه غشاهای انتقال تسهیل یافته عمدتاً به دلیل افزایش حجم آزاد زمینه پلیمری با چالش کاهش انتخاب‌گری روبه‌رو هستند. هدف این تحقیق، بررسی نحوه توزیع اکسید گرافن اصلاح سطحی نشده (GO) و اصلاح شده با اسید آمینه (M-GO) در زمینه پلیمری PEBA و همچنین تاثیر اکسید گرافن اصلاح سطحی شده بر روی افزایش انتخاب‌گری غشای PEBA/ کیتوسان است.

**مواد و روش:** جهت تهیه غشاهای انتقال تسهیل یافته ابتدا اکسید گرافن در داخل حلال آب / اتانول توسط دستگاه التراسونیک توزیع شد. سپس PEBA با ۲٪ وزنی در داخل محلول تهیه شده حل شد. در ادامه محلول کیتوسان از قبل تهیه شده با ۱٪ درصد وزنی و با نسبت ۱:۱ با محلول همگن PEBA تهیه شده توسط همزن مغناطیسی در دمای محیط مخلوط شدن. غشاهای تهیه شده جهت بررسی توزیع یکنواخت نانو پرکن در زمینه پلیمری توسط آزمون‌های SEM و AFM و نحوه برهمکنش بین پرکن و زمینه پلیمری توسط آزمون FTIR ارزیابی شد. سپس تست عبوردهی گازها از روش عبوردهی با فشار ثابت و حجم متغیر استفاده شد.

**نتایج:** براساس آنالیز FTIR, SEM و AFM غشای تهیه شده با اکسید گرافن اصلاح سطحی شده به دلیل سازگاری بیشتر با زنجیرهای پلیمری و توزیع یکنواخت در ساختار غشا، دارای مورفولوژی سطح صاف نسبت به نمونه غشای بدون اصلاح سطحی است. نتایج نشان داد که غشاهای حاوی M-GO در مقایسه با GO اصلاح سطحی نشده باعث بهبود عبوردهی CO<sub>2</sub> و انتخاب‌گری CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> شد.

**نتیجه‌گیری:** M-GO به دلیل برهم‌کنش‌های بین‌سطحی از طریق پیوندهای هیدروژنی قوی‌تر و همچنین افزایش سازگاری فصل مشترک بین نانولایه‌های GO و پلیمر باعث بهبود بیش از ۳۱۴ درصد در انتخاب‌گری CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> و ۴۴۰ درصد در عبوردهی CO<sub>2</sub> شد.

### اطلاعات مقاله

نوع مقاله: علمی پژوهشی

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۴

دریافت فایل اصلاح شده نهایی: ۱۴۰۴/۱۱/۱۲

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۳

انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۹

کلمات کلیدی:

غشا  
کیتوسان  
PEBA  
M-GO

جداسازی CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>

استناد: رضازاده، بابالو (۱۴۰۵). بررسی عملکرد غشاهای انتقال تسهیل یافته PEBA/ کیتوسان/ اکسید گرافن در جداسازی CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>. نشریه

علوم و مهندسی جداسازی، (۱) ۱۸، ۳۰-۱۴. <http://doi.org/10.22103/jsse.2026.5527>



© نویسندگان

ناشر: دانشگاه شهید باهنر کرمان

۱. مقدمه

امروزه آلودگی ناشی از گازهای گلخانه‌ای یکی از بزرگترین چالش برای هر کشوری محسوب می‌شود. در بین گازهای گلخانه‌ای، دی‌اکسیدکربن اثر زیادی بر اتمسفر دارد که به لحاظ مقداری حدود ۶۰ درصد اثر گرمایشی زمین را شامل می‌شود [۱]. همچنین دی‌اکسیدکربن بسیار خورنده است و باعث خوردگی لوله‌های خطوط انتقال صنایع شیمیایی از قبیل پالایشگاه‌ها، صنایع پتروشیمی و صنایع گاز می‌شود بنابراین برای کنترل خوردگی، حذف دی‌اکسیدکربن تا غلظت‌های بسیار پایین ضروری است. روش‌های مختلفی برای جداسازی و حذف CO<sub>2</sub> وجود دارد که شامل جذب توسط محلول‌های آمینی، جذب سطحی توسط جاذب‌ها و فرایند غشایی از جمله این روش‌ها می‌باشند [۲].

فرایندهای غشایی به دلیل داشتن ویژگی‌های منحصر به فردی همچون سادگی عملیاتی، قابلیت جابجایی، قابلیت جداسازی اجزا بدون نیاز به تغییر فاز و مصرف انرژی پایین می‌تواند نقش مهمی در کاهش اثرات زیست محیطی و هزینه‌های عملیاتی فرایندهای صنعتی داشته باشند [۳-۵]. از این رو جداسازی گازهای اسیدی با فناوری غشایی اهمیت قابل ملاحظه‌ای دارد که روز به روز در حال پیشرفت و توسعه می‌باشد. گام برداشتن در این راستا و کمک به توسعه این فناوری می‌تواند نقش موثری در شرایط زیست محیطی و اقتصادی داشته باشد.

در این بین غشاهای پلیمری علی‌رغم مزیت‌هایی همچون شرایط فرآیندی ملایم و سهولت افزایش مقیاس را دارند ولی برای صنعتی شدن با چالش‌هایی مواجه هستند، از مهمترین این چالش‌ها اساس جداسازی غشاهای پلیمری می‌باشد که براساس سازوکار حلالیت-نفوذ می‌باشد، که افزایش انتخاب‌گری در این غشاها کاهش عبوردهی را به همراه خواهد داشت. این مشکل به محدودیت عبوردهی-انتخاب‌گری<sup>۱</sup> در غشاهای پلیمری معروف است که این مانع از اقتصادی بودن و نیز کاربرد گسترده این غشاها در صنعت شده است [۶-۹]. یکی از کوپلیمرها در زمینه جداسازی گازهای اسیدی، کوپلیمر پلی اتر بلاک آمید (PEBA) می‌باشد که عملکرد مناسبی در زمینه حذف گازهای اسیدی از خود نشان داده است. PEBA اگرچه پلیمری مناسب برای جداسازی گازهای اسیدی می‌باشد، اما غشاهای ساخته

<sup>1</sup> Trade-off

شده با این کوپلیمر محدودیت عبوردهی-انتخابگری دارند. چرا که سازوکار جداسازی در این غشاها از نوع حلالیت-نفوذ می‌باشد [۱۴-۱۰]. بدست آوردن فناوری که بتوان عبوردهی و انتخاب‌گری در غشاهای پلیمری را هم زمان افزایش داد، از دغدغه‌های محققان در این زمینه است. مطالعات نشان داده، استفاده از ترکیبات آلی با گروه‌های عاملی آمینی و هیدروکسیل به عنوان بایندر نوید بخش‌ترین روش برای افزایش عبوردهی و انتخاب‌گری در غشاهای پلیمری می‌باشد [۱۷-۱۵]. اگر بتوان جهت افزایش کارایی غشا PEBA از ترکیبات آلی بزرگ مقیاس و قابل دسترس همچون پلی ساکاریدها به عنوان بایندر به زمینه پلیمری PEBA اضافه کرد، این یک راه حل ایده‌ال خواهد بود. ولی به دلیل سایز مولکولی بزرگ ترکیبات پلی ساکاریدی و با توزیع بین زنجیرهای پلیمری باعث افزایش حجم آزاد زمینه پلیمری و ایجاد کانال‌های نفوذ سریع در ساختار غشا می‌شود که این باعث افزایش ناچیز انتخاب‌گری این غشاها می‌شود.

یکی از راهکارهای امید بخش جهت رفع این محدودیت، استفاده از پرکن‌های دو بعدی با نسبت ابعادی بسیار بالا، قابلیت تنظیم گروه‌های عاملی سطحی، سنتز ساده و خواص مکانیکی و حرارتی عالی، به عنوان یک پرکن بسیار امیدوارکننده مطرح است [۱۸]. نسبت ابعادی بالای پرکن‌های دو بعدی مسیره‌های طولانی‌تر و پریچ وخم‌تری برای عبور مولکول‌های گاز ایجاد کرده و به افزایش گزینش‌پذیری کمک می‌کند. ولی به دلیل عدم سازگاری پرکن‌های دو بعدی با زنجیرهای پلیمری باعث توزیع غیره یکنواخت بین زنجیرهای پلیمری می‌شود. برای رفع این مشکلات، اصلاح سطح پرکن‌ها به‌منظور بهبود سازگاری با زنجیرهای پلیمری و جلوگیری از ایجاد نواقص ساختاری انجام شده است [۲۰-۱۹]. با این حال، دستیابی به مورفولوژی ایده‌آل و پراکندگی یکنواخت پرکن‌ها در زمینه پلیمری همچنان چالش برانگیز است.

به‌منظور افزایش انتخاب‌گری غشاهای انتقال تسهیل یافته PEBA/کیتوسان، از پرکن دو بعدی اکسید گرافن در دو حالت بدون اصلاح (GO) و اصلاح شده با اسید آمینه (M-GO) ارائه شده است. علاوه بر این، از جنبه‌های مهم این تحقیق، افزایش انتخاب‌گری غشاها از طریق توزیع یکنواخت M-GO در زمینه پلیمری است که می‌تواند به راحتی در توسعه غشاهای لایه نازک مورد استفاده قرار گیرد. نسبت ابعادی بالای M-GO و همچنین میل زیاد آن به جذب CO<sub>2</sub> باعث بهبود عبوردهی CO<sub>2</sub> می‌دهد. علاوه بر این، اصلاح نانو پرکن GO، سازگاری میان پرکننده و پلیمر را در سطح مشترک بهبود می‌بخشد.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۱.۲. مواد

گرانول‌های پلیمر PEBA از شرکت آرکما فرانسه و نانو اکسید گرافن GO از شرکت آنجنکس خریداری شدند. M-GO از مرکز تحقیقات مواد نانوساختار دانشگاه صنعتی سهند تهیه شد. کیتوسان (CS) با درجه داستیلاسیون ۹۰ درصد از شرکت زجیانگ (چین) تهیه شد. اسید استیک و اتانول توسط شرکت مرک تهیه شدن. پلی‌سولفون (PSf) نیز به‌عنوان پایه نانوساختار از شرکت سپرو ممبران با مشخصه (MWC) ۱۰ کیلو دالتون تهیه گردید. گازهای مورد استفاده شامل دی‌اکسید کربن و نیتروژن خالص از شرکت احترامی خریداری شدند.

### ۲.۲. ساخت غشای کامپوزیتی PEBA / کیتوسان / M-GO

ابتدا وزن مشخصی از پرکن‌های مختلف (GO/ M-GO) در داخل حلال مخلوط آب و اتانول (۳۰-۷۰) توسط دستگاه التراسونیک با توان ۱۵۰ وات به مدت ۵ دقیقه توزیع شد. سپس گرانول‌های پلیمر PEBA در داخل محلول تهیه شده تحت هم‌زدن مکانیکی و با استفاده از رفلکس در دمای ۸۰ °C به‌طور کامل حل شدند. در ادامه کیتوسان به صورت جداگانه در داخل محلول ۱درصد حجمی آب و اسید در دمای محیط به مدت ۲۴ ساعت توسط همزن مغناطیسی حل شد. سپس محلول PEBA/کیتوسان محلول با نسبت ۱:۱ در دمای محیط توسط همزن مغناطیسی با یکدیگر ترکیب شدند. پس از آن، برای جلوگیری از تبخیر حلال، محلول در ظرف دربسته قرار داده شد. سپس محلول تهیه شده به روش پوشش دهی غوطه وری بر روی پایه غشایی پلی‌سولفون (PSf) پوشش داده شد. غشاهای تهیه شده پس از خشک شدن در دمای محیط، به مدت ۱۲ ساعت جهت ارزیابی عملکرد غشای کامپوزیتی مورد استفاده قرار گرفتند.

### ۳.۲. مشخصه‌یابی

برای مشخصه‌یابی ساختار شیمیایی پرکن و غشاهای تهیه شده در محدوده عدد موج ۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰ سانتی‌متر مربع، از طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR، Shimadzu، IR-Tracer 100) استفاده شد. مورفولوژی غشاهای

سنتز شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM، Nanosem 430) بررسی شد. علاوه بر این، مورفولوژی سطح و ویژگی‌های ریزساختاری غشاهای سنتز شده با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) با استفاده از Veeco AFM مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

#### ۴.۲. ارزیابی عملکرد غشاها در جداسازی گازها

برای انجام تست‌های عبوردهی، گازهای خالص شامل  $\text{N}_2$ ،  $\text{CO}_2$  تحت شرایط رطوبت در دمای  $25^\circ\text{C}$  در بازه فشاری (۱-۵) بار مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱). برای وارد کردن رطوبت به جریان خوراک، آب توسط پمپ سرنگی با وارد لوله گرم شده و در مسیر عبور از لوله گرم تبدیل به بخار آب شده و سپس وارد خط جریان خوراک می‌شود. غشاهای کامپوزیتی ساخته شده به صورت دیسک‌های دایره‌ای با قطر ۵ سانتی‌متر در داخل ماژول غشایی قرار داده شدند و عبور گازها در فشار ثابت حجم متغییر مورد ارزیابی قرار گرفت. برای اندازه‌گیری حجم گاز عبوری از غشا، از دستگاه حجم‌سنج حباب صابون استفاده شد. پس از اندازه‌گیری حجم گاز عبور کرده از غشا میزان عبوردهی (P) را می‌توان از رابطه ۱ محاسبه کرد.

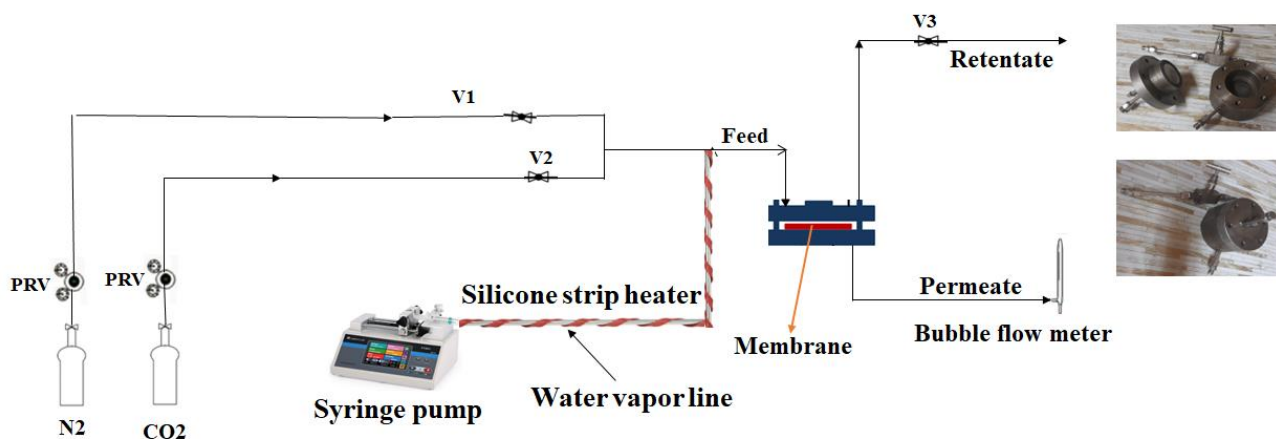
$$P = \frac{V}{A \times \Delta p} \quad (1)$$

$V$  حجم گاز عبور کرده از غشا،  $A$  سطح موثر غشا،  $\Delta p$  اختلاف فشار دو طرف غشاکه برای ارزیابی عملکرد غشا انتخاب شدن. واحد عبوری از غشا بر حسب GPU بیان می‌شود.

$$(\text{GPU} = 10^{-6} \text{cm}^3(\text{STP}) / (\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{cmHg}))$$

انتخاب‌گری ایده‌آل گازهای  $i, j$  ( $\alpha_{i/j}$ ) توسط با استفاده از عبوردهی گازهای  $i, j$  توسط رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

$$\alpha_{i/j} = J_i / J_j \quad (2)$$



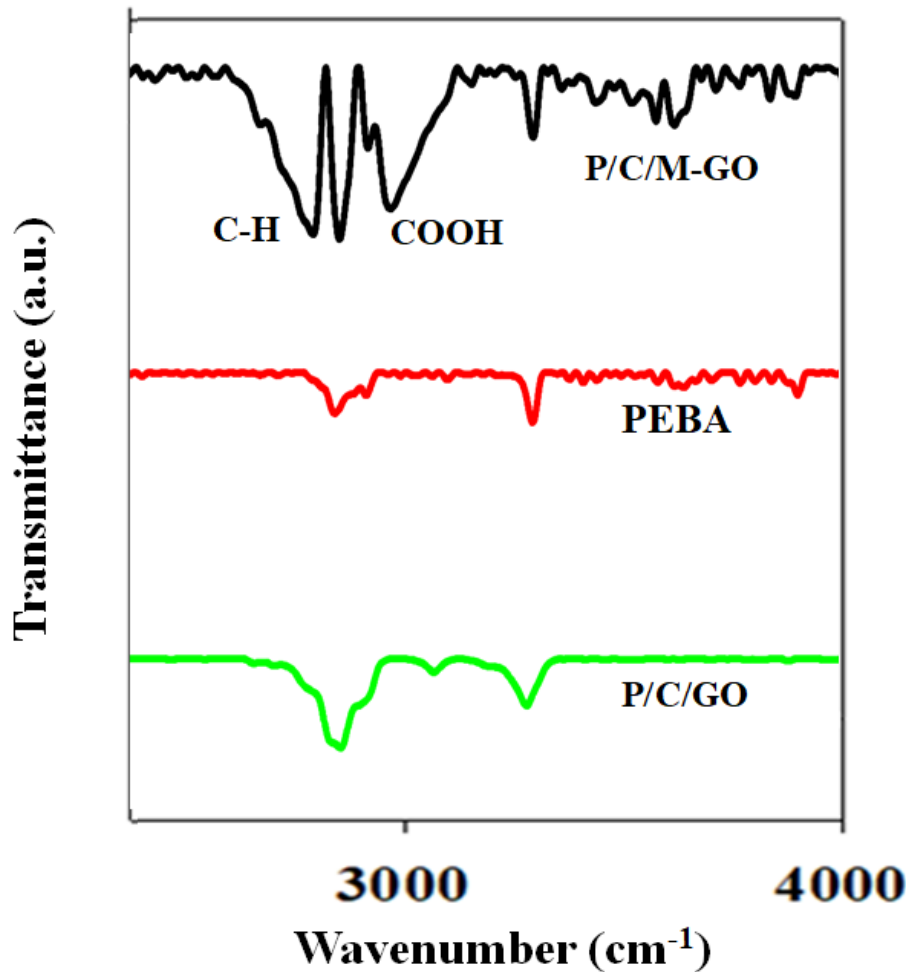
شکل ۱: شماتیکی از سیستم اندازه گیری عبوردهی گاز.

Fig1: Schematic of a gas flow measurement system.

### ۳. نتایج و بحث

#### ۱.۳. مشخصه یابی غشاها

با توجه به شکل ۲، طیف FTIR غشا P/C/M-GO، در مقایسه با غشا P/C/GO پس از افزودن M-GO در مقایسه با GO یک پیک قوی در ناحیه ۳۰۱۰ و ۲۸۰۰ ظاهر می شود که به ترتیب مرتبط با گروه عاملی OH مربوط به کربوکسیلیک اسید و C-H از اسید آمینه می باشد. این تغییرات طیفی تایید می کند که اصلاح سطحی اکسید گرافن با اسید آمینه انجام شده است.



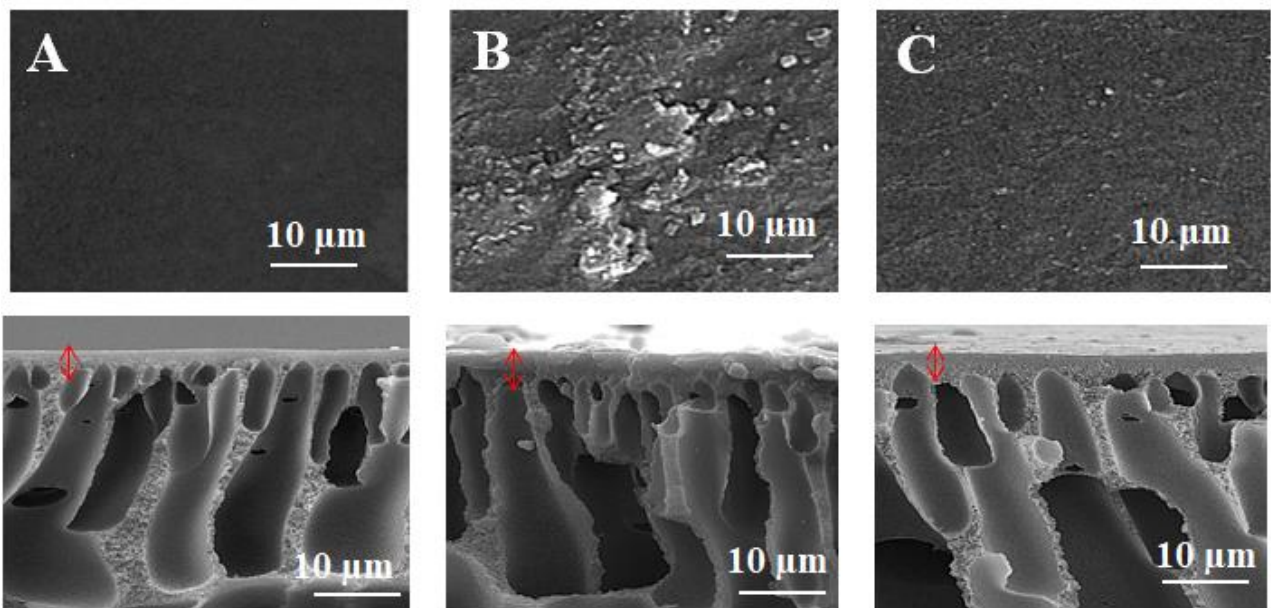
شکل ۲: تصاویر FTIR خالص و غشاهای PEBA، P/C/GO، P/C/M-GO  
 Fig 2: FTIR images of PEBA, P/C/GO and P/C/M-GO membranes.

### ۲.۳. ریز ساختار غشا

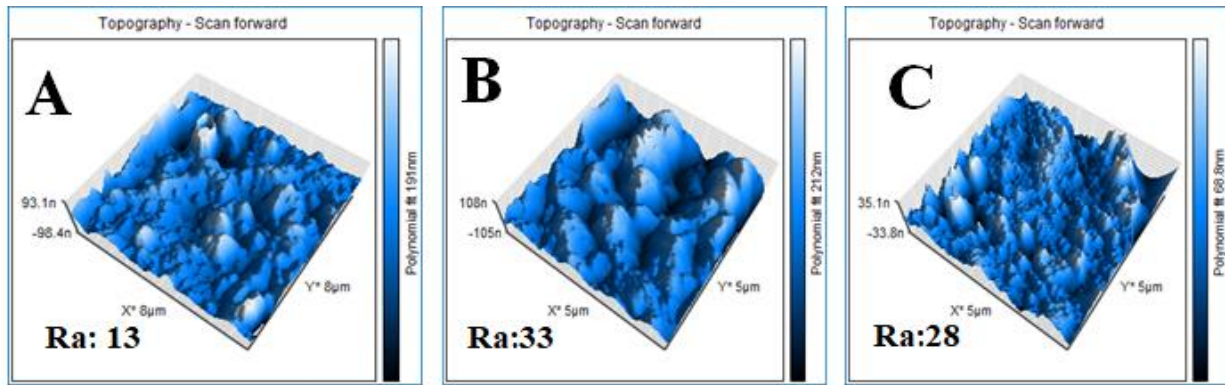
برای بررسی تاثیر پراکندگی نانوذرات درون زمینه پلیمری PEBA/کیتوسان بر روی مورفولوژی سطحی غشاهای حاوی GO و M-GO، از آنالیز FESEM نیز استفاده شد. تصاویر FESEM از مقطع عرضی و سطح غشاهای تهیه شده توسط FESEM در شکل ۳، نشان داده شده‌اند. غشای کوپلیمر PEBA دارای مورفولوژی همگن و متراکم بوده با این حال، غشای حاوی M-GO مورفولوژی همگن‌تری در مقایسه با غشای حاوی GO را نشان می‌دهد (شکل ۳). این موضوع نشان دهنده سازگاری بالا و پراکندگی یکنواخت M-GO در زمینه پلیمری و بدون هرگونه تجمع یا حفره در فصل مشترک M-GO پلیمر است. این نتایج تأیید می‌کنند که اصلاح سطحی پرکننده‌های GO، سازگاری بین

سطحی را از طریق ایجاد پیوندهای هیدروژنی قوی بین M-GO و زمینه پلیمری بهبود بخشیده است؛ عاملی که برای رسیدن به عملکرد بالا در جداسازی گازها ضروری است.

با توجه به تصاویر AFM ارائه شده در شکل ۴، PEBA یک کوپلیمر بخش‌بندی‌شده با فاز نرم لاستیکی و فاز سخت شیشه‌ای است که می‌تواند منجر به جدایش میکروفازی شود. با از اضافه شدن نانوذرات M-GO و GO درون زنجیره‌های پلیمری باعث افزایش زبری سطح می‌شود. به‌ویژه، در نمونه غشا حاوی GO در مقایسه با غشای مبتنی بر M-GO به‌وضوح افزایش زبری سطح از ۱۳ نانومتر برای PEBA خالص به ۳۳ نانومتر برای غشا حاوی GO می‌رسد که در شکل ۴، قابل مشاهده است. این افزایش زبری در نمونه غشا حاوی GO به دلیل توزیع غیره یکنواخت به دلیل عدم سازگاری با زنجیره‌های پلیمری و تجمع ذرات می‌باشد به‌طوری‌که در نمونه غشا حاوی M-GO به دلیل سازگار بیشتر با زنجیره‌های پلیمری و توزیع یکنواخت در ساختار غشا دارای سطحی صاف و هموار است. که این باعث کاهش زبری سطح می‌شود، به‌طوری‌که برای نمونه حاوی M-GO زبری سطح به ۲۸ نانومتر کاهش می‌یابد.



شکل ۳: تصاویر FESEM نمای مقطع، سطح بالا PEBA خالص (A)؛ P/C/GO (B)؛ P/C/M-GO (C).  
 Fig 3: FESEM images cross-sectional, Top surface of Pure PEBA(A); P/C/GO(B); P/C/M-GO(C).



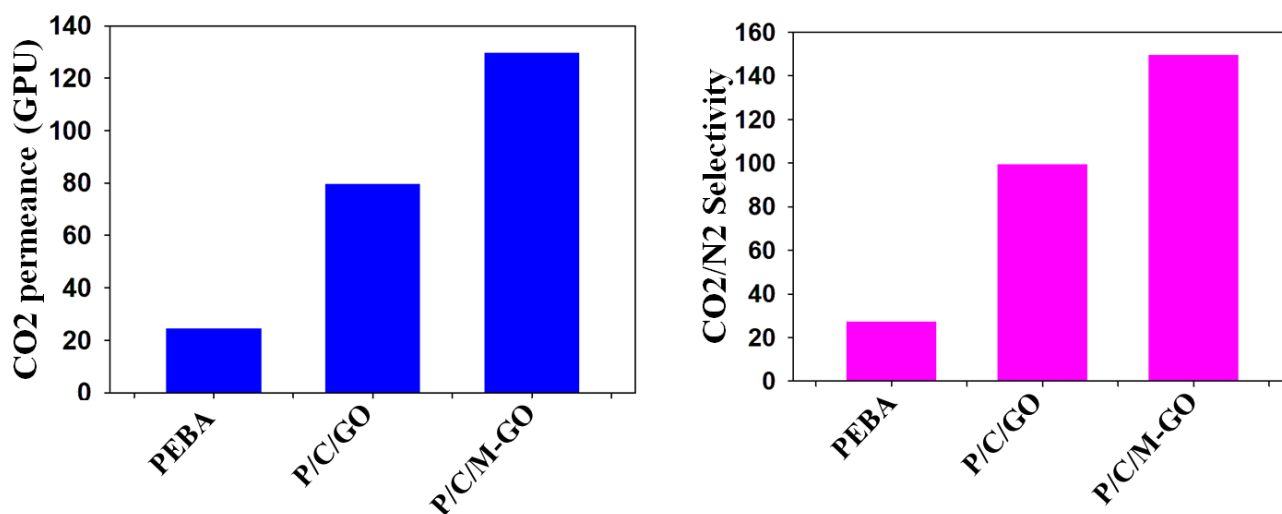
شکل ۴: تصاویر AFM PEBA خالص (A)؛ P/C/GO (B)؛ P/C/M-GO (C).  
 Fig 4: AFM images of Pure PEBA (A); P/C/GO (B); P/C/M-GO (C).

### ۳.۲. تاثیر نانوذرات M-GO و GO بر عملکرد غشاها

در این مطالعه، به منظور بهبود انتخاب‌گری غشاهای انتقال تسهیل یافته PEBA/کیتوسان از نانوذرات GO و M-GO استفاده شد. عبوردهی گازهای خالص برای غشاهای حاوی GO و M-GO در فشار ۵ بار و دمای ۲۵ درجه سلسیوس تحت شرایط مرطوب اندازه‌گیری شد. با توجه به شکل ۵، عبوردهی  $\text{CO}_2$  و گزینش‌پذیری  $\text{CO}_2/\text{N}_2$  در غشا PEBA خالص به ترتیب ۲۵ و ۳۸ است. بدین ترتیب در غشاهای حاوی GO وزنی، عبوردهی  $\text{CO}_2$  و انتخاب‌گری نسبت به غشا PEBA خالص افزایش یافت. به‌طوری‌که در غشا حاوی GO عبوردهی  $\text{CO}_2$  برابر با GPU و گزینش‌پذیری  $\text{CO}_2/\text{N}_2$  ۱۲۰ را نشان می‌دهد. به‌طوری‌که در غشا حاوی M-GO عبوردهی  $\text{CO}_2$  برابر با GPU و گزینش‌پذیری  $\text{CO}_2/\text{N}_2$  ۱۴۶ را نشان می‌دهد.

به‌منظور بهبود قابل توجه عبوردهی و انتخاب‌گری از نانوذرات دوبعدی در دو حالت اصلاح سطحی شده M-GO و بدون اصلاح سطحی شده استفاده شده است. با توجه به شکل ۵، بهبود عبوردهی و انتخاب‌گری  $\text{CO}_2/\text{N}_2$  غشاهای تهیه شده با M-GO نسبت به GO به دلیل حضور اسید آمینه به‌عنوان گروه‌های با تمایل بالا نسبت به  $\text{CO}_2$  در فضاهای بین‌لایه‌ای نانولایه‌های GO می‌باشد در این بین  $\text{N}_2$  به دلیل عدم تمایل به گروه‌های قطبی همچون آمین و هیدروکسیل موجود در ساختار غشا نسبت به  $\text{CO}_2$  که با گروه‌های قطبی وارد واکنش می‌شود یک مسیر ناهمواری

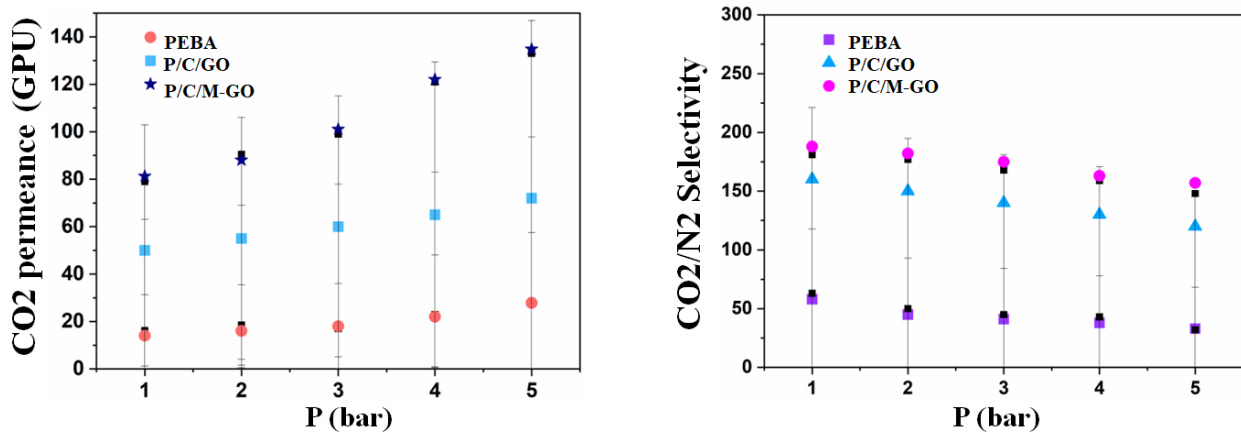
را طی می‌کند که این باعث می‌شود انتخاب‌گری غشای مبتنی بر M-GO افزایش بیشتری نسبت به نمونه غشا حاوی GO داشته باشد. همچنین حضور اسید آمینه بر روی سطح نانولایه‌های GO منجر به تشکیل پیوند هیدروژنی قوی بین بخش‌های سخت زمینه پلیمری و پرکن می‌شود تشکیل این پیوندهای هیدروژنی، سازگاری بین سطحی بین زنجیره‌های پلیمری و پرکننده M-GO را افزایش می‌دهد که برای فرایند جداسازی سریع و گزینشی گازها ضروری است.



شکل ۵: تأثیر GO و M-GO بر عبوردهی CO<sub>2</sub> انتخاب‌گری CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> در دمای ۲۵ °C و فشار خوراک ۵ بار.  
 Fig 5: Effects GO and M-GO on CO<sub>2</sub> permeance CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> selectivity at 25 °C, feed pressure 5 (bar).

شکل ۶، تأثیر فشار بر عملکرد غشاهای انتقال تسهیل یافته مبتنی بر حضور نانوذرات GO و M-GO در جداسازی CO<sub>2</sub> را نشان می‌دهد، به‌طوریکه عبوردهی CO<sub>2</sub> برای تمام غشاها با افزایش فشار افزایش می‌یابد که این روند به افزایش پلاستیکی شدن و نیروی محرک لازم برای انتقال جرم نسبت داده می‌شود. با افزایش فشار برای غشای PEBA خالص، عبوردهی CO<sub>2</sub> از ۸ به ۲۵ GPU افزایش می‌یابد، در حالی که انتخاب‌گری CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> روند کاهشی را دارد. با این حال برای غشای حاوی M-GO در مقایسه با PEBA خالص و غشای حاوی GO افزایش عبوردهی و انتخاب‌گری کاهشی با افزایش فشار، می‌تواند ناشی از افزایش حلالیت CO<sub>2</sub> به دلیل برهم‌کنش قوی آن با گروه‌های عاملی آمین و هیدروکسیل اسید آمینه می‌باشد همچنین به دلیل ایجاد پیوندهای هیدروژنی گروه‌های عاملی آمین و هیدروکسیل موجود بر روی سطح نانو ذره M-GO با گروه‌های عاملی اتری و آمینی کیتوسان باعث استحکام بیشتر

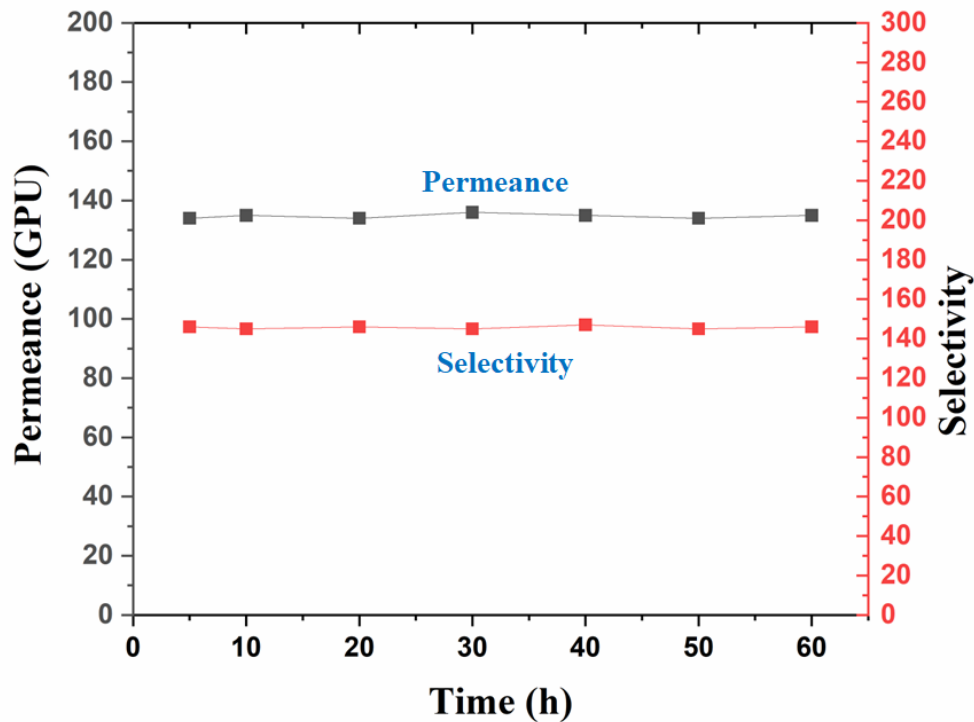
شبکه پلیمری شده که این باعث کاهش اثر پلاستیکی شدن می‌شود و باعث بهبود انتخاب‌گری در مقایسه با غشا PEBA خالص و غشای حاوی GO می‌شود.



شکل ۶: تأثیر فشار بر عبوردهی CO<sub>2</sub> (A) و انتخاب‌گری CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> (B)  
 Fig 6: The effect of pressure on CO<sub>2</sub> permeance CO<sub>2</sub>/ N<sub>2</sub> selectivity.

#### ۴.۳. عملکرد زمان طولانی غشا

به منظور بررسی پایداری عملکرد غشا P/C/M-GO به مدت ۶۰ ساعت تحت شرایط فشار ۵ بار، دما ۲۵ °C تحت شرایط رطوبت مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نمودار شکل ۷، عبوردهی و انتخاب‌گری غشای طی مدت ۶۰ ساعت روند تقریباً ثابت را نشان می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهد که غشا ساخته شده از پایداری مطلوبی برخوردار است و می‌تواند در فرایندهای صنعتی عملکرد پایداری داشته باشد.



شکل ۷: آزمون تست پایداری برای عملکرد جداسازی غشا بهینه P/C/M-GO در دمای ۲۵ °C و فشار ۵ بار.  
 Fig 7: separation performance stability test of optimized P/C/M-GO at 25 °C, feed pressure 5 (bar).

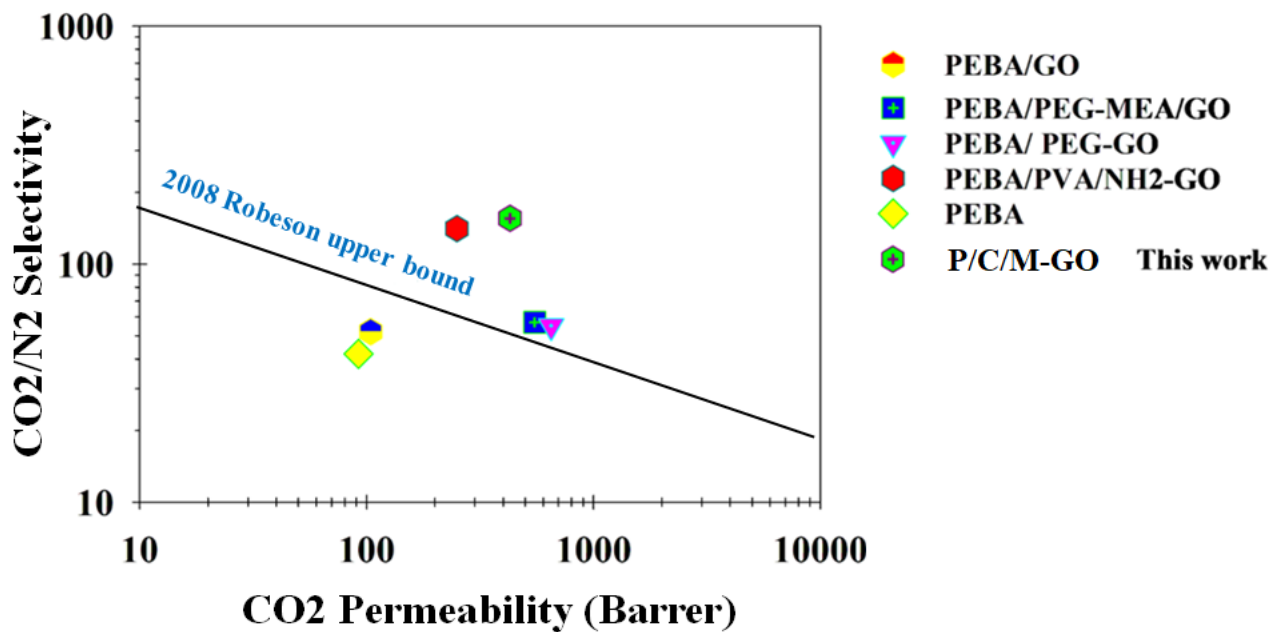
### ۵.۳. مقایسه عملکرد غشا با دیگر غشاهای مشابه

عملکرد غشاهای کامپوزیتی ساخته شده با غشاهای موجود در مراجع مختلف در جدول ۱ و در شکل ۸، مورد مقایسه قرار گرفته است. غشا خالص PEBA عبوردهی و انتخاب‌گری کمتری برای گازی CO<sub>2</sub> و N<sub>2</sub> را نشان می‌دهد. به‌طوریکه افزودن کیتوسان و پرکننده GO به غشا PEBA موجب افزایش انتخاب‌پذیری می‌شود بدون اینکه عبوردهی به طور قابل توجهی تغییر کند. GO اصلاح شده می‌تواند عبوردهی و انتخاب‌گری را نسبت به غشا PEBA مبتنی بر-M-GO حتی در بارگذاری نسبتاً کم، بهبود ببخشد. برای مثال، عملکرد جداسازی غشا P/C/M-GO در موقعیت بالاتری نسبت به دیگر غشاهای حاوی پرکننده GO قرار دارد. عملکرد کلی غشا حاوی M-GO بسیار فراتر از حد بالای رایسون سال ۲۰۰۸ است که امکان استفاده از آن را در فرایندهای صنعتی برای جداسازی CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> را فراهم می‌کند.

جدول ۱: مقایسه عملکرد غشا ساخته شده با غشاهای مختلف در مراجع مختلف.

Table1: Comparison of membrane performance made with different membranes in different references.

Polymer/Filler	T (°C)	p (bar)	CO <sub>2</sub> Permeability (Barrer)	CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> Selectivity	Reference
PEBA	25	5	92	42	23
PEBA/GO	25	6	104	52	23
PEBA/PEG-MEA/G	30	1	5	57	24
PEBA/ PEG-GO	25	4	650	55	25
PEBA/PVA/NH <sub>2</sub> -GO	25	7	252	141	26
P/C/M-GO	25	5	425	70	<b>this work</b>



شکل ۸: منحنی رابسون ۲۰۰۸ (مبادله): مقایسه عملکرد جداسازی غشا P/C/M-GO تهیه شده با داده‌های گزارش شده.

Fig 8: 2008 Robeson upper bound (Trade-off) curve: comparison of the separation performance of prepared P/C/M-GO blend membrane with the reported data.

## ۴. نتیجه گیری

در این تحقیق مجموعه‌ای از غشاهای انتقال تسهیل یافته با اضافه کردن GO اصلاح سطحی شده و بدون اصلاح سطحی در زمینه پلیمری PEBA/کیتوسان ساخته شدند. تصاویر AFM و FESEM نشان می‌دهد که اصلاح سطحی پرکن GO منجر به توزیع یکنواخت در زمینه پلیمری می‌شود. لذا افزودن M-GO به ساختار غشا موجب ایجاد مسیرهای طولانی‌تر و پریپچ و خم‌تری برای مولکول‌های  $N_2$  گردید و بدین ترتیب، موجب افزایش انتخاب‌گری شد. افزودن اسید آمینه نیز باعث بهبود برهم‌کنش‌های بین‌سطحی از طریق پیوندهای هیدروژنی قوی‌تر و همچنین افزایش سازگاری فصل مشترک بین نانولایه‌های GO و پلیمر شد. علاوه بر این، حضور اسید آمینه در فضاهای بین‌لایه‌ای نانولایه‌های GO انتقال  $CO_2$  را از طریق واکنش‌های برگشت‌پذیر را نسبت به غشاهای تهیه شده با GO تسهیل کرد. غشای ساخته‌شده بر پایه M-GO عملکرد بسیار مطلوبی در عبوردهی و انتخاب‌گری نسبت به دیگر نمونه غشا نشان داد. به طوری که در غشا حاوی M-GO عبوردهی  $CO_2$  برابر با ۱۳۵ GPU و گزینش‌پذیری  $CO_2/N_2$  ۱۴۶ را نشان می‌دهد. که این باعث بهبود بیش از ۳۱۴ درصد در انتخاب‌گری  $CO_2/N_2$  و ۴۴۰ درصد در عبوردهی  $CO_2$  شد.

## References

- [1] Songolzadeh, M., Soleimani, M., Takht Ravanchi, M., & Songolzadeh, R. (2014). Carbon dioxide separation from flue gases: a technological review emphasizing reduction in greenhouse gas emissions. *The Scientific World Journal*, 2014(1), 828131. <https://doi.org/10.1155/2014/828131>
- [2] Lin, H., Van Wagner, E., Freeman, B. D., Toy, L. G., & Gupta, R. P. (2006). Plasticization-enhanced hydrogen purification using polymeric membranes. *science*, 311(5761), 639-642. <https://doi.org/10.1126/science.1118079>
- [3] Dautzenberg, F. M., & Mukherjee, M. (2001). Process intensification using multifunctional reactors. *Chemical Engineering Science*, 56(2), 251-267 [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(00\)00228-1](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(00)00228-1)
- [4] Vinoba, M., Bhagiyalakshmi, M., Alqaheem, Y., Alomair, A. A., Pérez, A., & Rana, M. S. (2017). Recent progress of fillers in mixed matrix membranes for CO<sub>2</sub> separation: A review. *Separation and Purification Technology*, 188, 431-450. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.07.051>
- [5] Baker, R. W. (2023). *Membrane technology and applications*. John Wiley & Sons.
- [6] Kenarsari, S. D., Yang, D., Jiang, G., Zhang, S., Wang, J., Russell, A. G., ... & Fan, M. (2013). Review of recent advances in carbon dioxide separation and capture. *Rsc Advances*, 3(45), 22739-22773. <https://doi.org/10.1039/C3RA43965H>
- [7] Ho, M. T., Leamon, G., Allinson, G. W., & Wiley, D. E. (2006). Economics of CO<sub>2</sub> and mixed gas geosequestration of flue gas using gas separation membranes. *Industrial & engineering chemistry research*, 45(8), 2546-2552. <https://doi.org/10.1021/ie050549c>
- [8] Bernardo, P., Drioli, E., & Golemme, G. (2009). Membrane gas separation: a review/state of the art. *Industrial & engineering chemistry research*, 48(10), 4638-4663. <https://doi.org/10.1021/ie8019032>
- [9] Van Der Sluijs, J. P., Hendriks, C. A., & Blok, K. (1992). Feasibility of polymer membranes for carbon dioxide recovery from flue gases. *Energy Conversion and Management*, 33(5-8), 429-436. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(92\)90040-4](https://doi.org/10.1016/0196-8904(92)90040-4)
- [10] Freeman, B. D., & Pinnau, I. (1999). *Polymer membranes for gas and vapor separation* (Vol. 733). Washington, DC, USA: American Chemical Society.
- [11] Bondar, V. I., Freeman, B. D., & Pinnau, I. (2000). Gas transport properties of poly (ether-b-amide) segmented block copolymers. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 38(15), 2051-2062. [https://doi.org/10.1002/1099-0488\(20000801\)38:15%3C2051::AID-POLB100%3E3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/1099-0488(20000801)38:15%3C2051::AID-POLB100%3E3.0.CO;2-D)
- [12] Bondar, V. I., Freeman, B. D., & Pinnau, I. (1999). Gas sorption and characterization of poly (ether-b-amide) segmented block copolymers. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 37(17), 2463-2475. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0488\(19990901\)37:17%3C2463::AID-POLB18%3E3.0.CO;2-H](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0488(19990901)37:17%3C2463::AID-POLB18%3E3.0.CO;2-H)
- [13] Liu, S. L., Shao, L., Chua, M. L., Lau, C. H., Wang, H., & Quan, S. (2013). Recent progress in the design of advanced PEO-containing membranes for CO<sub>2</sub> removal. *Progress in Polymer Science*, 38(7), 1089-1120. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.02.002>
- [14] Robeson, L. M. (1991). Correlation of separation factor versus permeability for polymeric membranes. *Journal of membrane science*, 62(2), 165-185. [https://doi.org/10.1016/0376-7388\(91\)80060-J](https://doi.org/10.1016/0376-7388(91)80060-J)
- [15] Yave, W., Car, A., & Peinemann, K. V. (2010). Nanostructured membrane material designed for carbon dioxide separation. *Journal of Membrane Science*, 350(1-2), 124-129. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2009.12.019>
- [16] Duan, K., Wang, J., Zhang, Y., & Liu, J. (2019). Covalent organic frameworks (COFs) functionalized mixed matrix membrane for effective CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> separation. *Journal of Membrane Science*, 572, 588-595. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.11.054>
- [17] Chung, T. S., Jiang, L. Y., Li, Y., & Kulprathipania, S. (2007). Mixed matrix membranes (MMMs) comprising organic polymers with dispersed inorganic fillers for gas separation. *Progress in polymer science*, 32(4), 483-507. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2007.01.008>

- [18] Li, H., Song, Z., Zhang, X., Huang, Y., Li, S., Mao, Y., ... & Yu, M. (2013). Ultrathin, molecular-sieving graphene oxide membranes for selective hydrogen separation. *Science*, 342(6154), 95-98. <https://doi.org/10.1126/science.1236686>
- [19] Shen, J., Liu, G., Huang, K., Jin, W., Lee, K. R., & Xu, N. (2015). Membranes with fast and selective gas-transport channels of laminar graphene oxide for efficient CO<sub>2</sub> capture. *Angewandte Chemie*, 127(2), 588-592. <https://doi.org/10.1002/ange.201409563>
- [20] Lee, H., Park, S. C., Roh, J. S., Moon, G. H., Shin, J. E., Kang, Y. S., & Park, H. B. (2017). Metal-organic frameworks grown on a porous planar template with an exceptionally high surface area: promising nanofiller platforms for CO<sub>2</sub> separation. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(43), 22500-22505. <https://doi.org/10.1039/C7TA06049A>
- [21] Karunakaran, M., Shevate, R., Kumar, M., & Peinemann, K. V. (2015). CO<sub>2</sub>-selective PEO-PBT (PolyActive™)/graphene oxide composite membranes. *Chemical Communications*, 51(75), 14187-14190. <https://doi.org/10.1039/C5CC04999G>
- [22] Li, Y., Wang, S., He, G., Wu, H., Pan, F., & Jiang, Z. (2015). Facilitated transport of small molecules and ions for energy-efficient membranes. *Chemical Society Reviews*, 44(1), 103-118.
- [23] Huang, G., Isfahani, A., P. Muchtar, A., Sakurai, K., Shrestha, B. B. (2018). Pebax/ionic liquid modified graphene oxide mixed matrix membranes for enhanced CO<sub>2</sub> capture. *Journal of membrane science*, 565 370-37.
- [24] Li, X., Cheng, Y., Zhang, H., Wang, S., Jiang, Z., Guo, R. (2015). Efficient CO<sub>2</sub> capture by functionalized graphene oxide nanosheets as fillers to fabricate multi-permselective mixed matrix membranes. *ACS applied materials & interfaces* 7(9) 5528-5537.
- [25] Shin, J., E. Lee, S., K. Cho, Y., H. (2019). Effect of PEG-MEA and graphene oxide additives on the performance of Pebax® 1657 mixed matrix membranes for CO<sub>2</sub> separation. *Journal of Membrane Science* 572 300-308
- [26] Kheirtalab, M., Abedini, R., & Ghorbani, M. (2024). Pebax/poly (vinyl alcohol) mixed matrix membrane incorporated by amine-functionalized graphene oxide for CO<sub>2</sub> separation. *Journal of Polymer Science* 62(3), 517-535. <https://doi.org/10.1002/pol.20230301>