

ساخت لایه های غشایی پلیمری PEBA روی پایه های نانوساختار PSF بمنظور

جداسازی دی اکسید کربن از نیتروژن و متان

مهدی الیاسی کجاباد، معصومه مومنی، علی اکبر بابالو*

دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۱/۲۱

تاریخ تصحیح: ۹۷/۱۱/۱۸

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۸/۰۵

چکیده

یکی از روش های رایج برای حذف گازهای اسیدی موجود در گاز طبیعی فرایند غشایی است. از جمله مهمترین و مستعدترین مواد غشایی در این زمینه کوپلیمر پلی اتر بلاک آمید (PEBA) است که در ساختارهای کامپوزیتی چند لایه ای مورد استفاده قرار می گیرد. در این تحقیق، بمنظور جداسازی دی اکسید کربن از نیتروژن و متان لایه های غشایی پلی اتر بلاک آمید با استفاده از روش غوطه وری به طور مستقیم و بدون استفاده از لایه میانی بر روی پایه های نانوساختار پلی سولفون (PSF) پوشش دهی شده و عملکرد آن ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. میانگین اندازه حفرات پایه غشایی استفاده شده و زبری آن با استفاده از آنالیز AFM اندازه گیری شده که به ترتیب ۱۰/۱۲ و ۶/۸۷ نانومتر بدست آمده است. در ادامه با استفاده از آنالیز SEM مورفولوژی دو غشای ساخته شده با غلظت های ۲ و ۳ درصد وزنی PEBA و نیز عملکرد این غشاها مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته که در این میان غشای ساخته شده با غلظت ۳ درصد، با داشتن عبوردهی GPU 27 برای CO₂ و انتخابگری ۴۶ و ۲۳ به ترتیب برای جداسازی CO₂ از N₂ و CH₄. عملکرد مناسبتری داشته است. از این رو در ادامه تأثیر اختلاف فشار خوراک و جریان عبور کرده بر روی عملکرد این غشا مورد ارزیابی قرار گرفته که بر این اساس با افزایش اختلاف فشار، هر دو پارامتر عبوردهی و انتخابگری، روند صعودی را به خود گرفته اند.

کلمات کلیدی: غشای کامپوزیتی چند لایه ای؛ پلی اتر بلاک آمید؛ پایه غشایی نانوساختار؛ پلی سولفون.

۱- مقدمه

جداسازی گازهای ترش نظیر CO₂، H₂S از گازهای غیرقطبی یک نیاز اساسی در زمینه شیرین سازی گاز طبیعی می باشد. فرایند غشایی بدلیل داشتن ویژگی های منحصر بفردی نظیر سادگی عملیاتی، قابلیت جابجایی، قابلیت جداسازی اجزا بدون نیاز به تغییر فاز و مصرف انرژی پایین می تواند نقش مهمی در هر چه بیشتر اقتصادی کردن این جداسازی داشته باشد [۱-۳]. در میان غشاها مورد استفاده در این زمینه، غشاها پلیمری بدلیل تولید آسان، انعطاف پذیری و مازوله شدن عالی نقش قابل توجهی را داشته و ابزاری مهم برای تجاری سازی می باشند [۴ و ۵]. اما جریان عبوری پایین از میان فیلم های پلیمری چگال مانع از آن شده است که بتوانند کاندیدای مناسبی برای استفاده بعنوان غشاها عملیاتی باشند [۶].

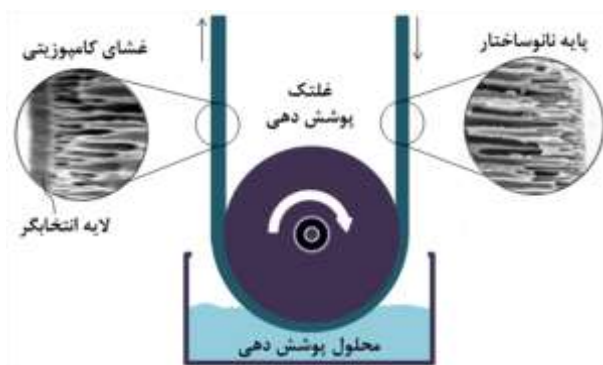
از این رو تلاش های زیادی برای شناخت رابطه بین ساختار غشاها و خواص جداسازی آنها انجام شده که منجر به ساخت غشاهای دارای خواص بهتر شده است [۷]. یکی از نتایج این تلاش ها، رسیدن به ساختارهای کامپوزیتی چند لایه می باشد که نکته ای کلیدی برای بکارگیری وسیع غشاهای پلیمری بصورت تجاری است [۶ و ۸]. در ساختارهای کامپوزیتی پتانسیل مواد مختلف با یکدیگر ترکیب شده و قابلیت بهبود عملکرد غشا در سطح بالایی فراهم می گردد [۹]. از طرفی به دلیل اینکه مقدار موادی که به عنوان لایه انتخابگر در ساختار این غشاها به کار می رود خیلی کم است از این رو می توان از موادی با عملکرد بالا هر چند گران قیمت استفاده کرد [۱۰ و ۱۱].

به طور کلی، یک غشای کامپوزیتی چند لایه ای با نشان دادن مواد مختلف بر روی پایه متخلخل ایجاد می شود که حداقل شامل پایه متخلخل و لایه انتخاب گر می باشد. و در مواردی نیز این غشاها دارای لایه میانی مابین پایه متخلخل و لایه انتخابگر می باشند [۱۰]. در این غشاها لایه های مختلف وظایف گوناگونی را ایفا کرده و به دنبال آن تاثیر متفاوتی را بر روی خواص غشا اعمال می کنند. به طوری که لایه انتخاب گر که جداسازی اصلی غشا را تامین می کند بخش اصلی غشای کامپوزیتی می باشد، پایه متخلخل اساسا استحکام مکانیکی را تامین می کند و هدف اصلی از بکار بردن لایه میانی مابین لایه انتخاب گر و پایه متخلخل، کاهش زبری سطح پایه و همچنین کاهش نفوذ محلول پوشش دهی به داخل منافذ پایه می باشد [۹ و ۱۰]. استفاده از لایه میانی علاوه بر طولانی کردن فرایند ساخت غشا، مقاومت کلی عبوری از غشا را افزایش داده و به دنبال آن عبوردهی غشا را کاهش می دهد بنابراین در صورتی که بتوان با انتخاب یک پایه متخلخل با اندازه حفرات و زبری مناسب، لایه میانی را حذف کرد می توان گام مناسبی را در راستای استفاده صنعتی از غشاهای کامپوزیتی برداشت.

یکی از کopolymerهای جذاب و محبوب در زمینه شیرین سازی گاز طبیعی پلی اتر بلاک آمید می باشد که عملکرد مناسبی در زمینه حذف گازهای اسیدی از خود نشان داده است. این کopolymer در واقع یک الاستومر ترموپلاستیک بوده و دارای یک بخش پلی آمیدی و یک بخش پلی اتری می باشد که بخش پلی آمیدی سخت بوده و مقاومت مکانیکی را تامین کرده و بخش پلی اتری انعطاف پذیر بوده و تراوایی بالا را فراهم می کند [۱۲ و ۱۳]. ایجاد پوششی نازک و بدون نقص از این ماده بر روی پایه ای با عبوردهی بالا و نیز استحکام مکانیکی بالا (در ساختار کامپوزیتی)، منجر به ساخت غشایی مطلوب از نظر اقتصادی، برای کاربردهای صنعتی می شود [۹]. پایه استفاده شده در غشاهای کامپوزیتی علاوه بر اینکه بایستی دارای تخلخل بالا و مقاومت انتقال جرم پایینی باشد، باید از موادی ساخته شود که ارزان قیمت بوده و با فرایند آسانی به صورت ساختار متخلخل درآیند [۱۰]. از طرفی از آنجایی که لایه انتخاب گر بسیار نازک است، از این رو حفرات باید به اندازه کافی کوچک باشند تا از لایه انتخابگر نازک تحت فشار بالا حمایت کنند. همچنین این حفرات باید بسیار به هم نزدیک بوده تا اجزای عبوری مسیر پیچ در پیچ طولانی را برای عبور از حفره طی نکنند [۱۴].

تنوع وسیعی از پلیمرها بعنوان پایه برای ساخت غشاهای کامپوزیتی لایه نازک بصورت موفقیت آمیز در طول سالها استفاده شده است. در میان همه پلیمرهای استفاده شده تا به حال، PSF بعنوان یک پایه مناسب به منظور بکارگیری در ساخت غشاهای کامپوزیتی تجاری، معرفی شده است [۱۵].

در چند دهه اخیر، روش های مختلفی بمنظور ساخت غشاهای کامپوزیتی توسعه یافته اند که در این میان پوشش دهی به روش غوطه ورسازی، ساده ترین و متداولترین روش برای ساخت چنین غشاهایی می باشد. در این روش با غوطه ور کردن پایه در داخل محلول پلیمری و خارج کردن آن با یک سرعت کنترل شده لایه انتخاب گر بر روی پایه متخلخل پوشش دهی شده و غشای کامپوزیتی ساخته می شود [۱۰]. شکل ۱ شماتیکی از دستگاه پوشش دهی به روش غوطه وری که می تواند برای ایجاد لایه انتخابگر و دیگر لایه ها در غشاهای کامپوزیتی مورد استفاده قرار گیرد را نشان می دهد.



شکل ۱- شماتیکی از سیستم پوشش دهی بروش غوطه ورسازی

در این کار ابتدا پایه نانوساختار مناسب با اندازه حفرات نانومتری از جنس پلی سولفون انتخاب شده و با استفاده از روش پوشش دهی غوطه وری، لایه های غشایی PEBA به طور مستقیم (بدون استفاده از لایه میانی) بر روی این پایه ها پوشش دهی شده است. در این تحقیق به دلیل استفاده از پایه نانوساختار با اندازه حفرات نانومتری، به لایه میانی نیازی نبوده و از این طریق ساخت آسان تر و کم هزینه تر شده است. همچنین مقاومت ایجاد شده توسط لایه میانی در برابر عبور مولکولهای گازی نیز با حذف این لایه از بین رفته که منجر به افزایش عبوردهی غشا به گاز CO₂ شده است. در ادامه غشای مناسب انتخاب و عملکرد آن در اختلاف فشارهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که آنالیز AFM بمنظور بررسی توپولوژی پایه نانوساختار پلی سولفون، آنالیز SEM بمنظور بررسی مورفولوژی غشاها و تست عبوردهی گازهای خالص بمنظور بررسی عملکرد غشاها استفاده شده است.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد

در این پژوهش PEBA از شرکت فرانسوی آرکما بصورت دانه های بیضوی خرید شده و نرمال بوتانول نیز از شرکت آلمانی مرک تهیه شده است. پایه نانوساختار PSF از شرکت آمریکایی سپرو ممبرین تهیه شده و گازهای دی اکسید کربن، نیتروژن و متان نیز از شرکت گاز احترامی، خریداری شده اند.

۲-۲- روش های آزمایشگاهی

۲-۲-۱- ساخت غشای کامپوزیتی PEBA/PSF

ابتدا گرانول های پلیمری PEBA و حلال نرمال بوتانول در داخل بالن ریخته شده و حین اختلاط تحت دمای ۱۱۰ درجه سانتی گراد قرار داده شدند. برای جلوگیری از تبخیر حلال، یک چگالنده نیز به بالن وصل شد. پس از اینکه پلیمر به طور کامل در حلال حل شد، دمای محلول پایین آورده شده و با استفاده از روش پوشش دهی غوطه وری، لایه های PEBA بر روی پایه غشایی پوشش دهی شده و پس از خشک شدن در دمای محیط به مدت ۱۲ ساعت، عملکرد غشای کامپوزیتی مورد ارزیابی قرار گرفت.

از آنجایی که در این کار دو نوع غشای کامپوزیتی با غلظت لایه انتخابگر ۲ و ۳ درصد وزنی ساخته شده، از این رو مقدار گرانول پلیمری ریخته شده به داخل حلال نیز بر اساس غلظت تغییر داده شد.

۲-۲-۲- روش اندازه گیری توزیع اندازه حفرات پایه غشایی

برای یافتن میانگین اندازه حفرات و توزیع اندازه حفرات پایه، تعداد ۳۰ اندازه حفره به کار گرفته شد، به این شکل که حفرات اندازه گیری شده به صورت صعودی مرتب شده و با استفاده از تقریب بنارد (رابطه ۱) میانگین متوسط بر حسب اندازه حفرات، تعیین گردید.

$$\text{Median rank} = \frac{j-0.3}{N+0.4} \times 10 \quad (1)$$

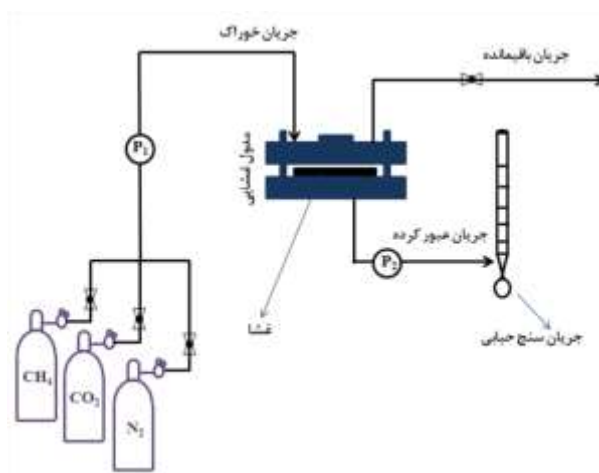
در این رابطه j شماره حفره (وقتی که حفرات بصورت صعودی مرتب شده باشند) و N تعداد کل حفرات اندازه گیری شده می باشد. در ادامه از تابع بدست آمده، میانگین اندازه حفرات پایه و انحراف معیار استاندارد هندسی تخمین زده شد. میانگین اندازه حفرات معادل با ۵۰ درصد توزیع تجمعی حفرات و انحراف معیار استاندارد هندسی نیز معادل با نسبت ۸۴/۱۳ درصد توزیع تجمعی حفرات به ۵۰ درصد توزیع تجمعی حفرات می باشد. برای بدست آوردن تابع چگالی احتمال یا همان توزیع اندازه حفرات پایه از رابطه ۲ استفاده شد.

$$\frac{df(d_p)}{d(d_p)} = \frac{1}{d_p \ln \sigma_p \sqrt{2\pi}} \times \exp\left(-\frac{(\ln d_p - \ln \mu_p)^2}{2(\ln \sigma_p)^2}\right) \quad (2)$$

در این رابطه d_p اندازه حفره، σ_p انحراف معیار استاندارد هندسی و μ_p میانگین اندازه حفرات می باشد.

۲-۳-۲- ارزیابی عملکرد غشاها در جداسازی گازها

در این تست ها، عبوردهی گازهای خالص دی اکسید کربن، نیتروژن و متان مورد بررسی قرار گرفت. برای انجام این تست ها، غشای کامپوزیتی ساخته شده به صورت دیسک های دایره ای به قطر ۶ سانتی متر بریده شده و در داخل ماژول غشایی قرار گرفت. ارزیابی عبوردهی گازها به صورت فشار ثابت بوده و حجم گاز عبوری از غشا با استفاده از جریان سنج حبابی اندازه گیری شد. شماتیکی از سیستم ارزیابی عملکرد غشا در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- شماتیکی از سیستم اندازه گیری عبوردهی گازها

پس از اندازه گیری شدت جریان حجمی گازهای عبوری از غشا می توان با استفاده از رابطه ۳ مقدار عبوردهی (J) را بدست آورد.

$$J = \frac{Q}{A \cdot \Delta p} \times \frac{273.15}{T} \times \frac{P}{76} \quad (3)$$

Q شدت جریان حجمی گازهای عبوری از غشا (cm^3/s)، A سطح موثر غشا (cm^2)، Δp اختلاف فشار طرفین غشا (cmHg)، T و P دما (K) و فشاری (cmHg) هستند که برای ارزیابی عملکرد غشا انتخاب شده اند. واحد عبوردهی به طور معمول برحسب GPU بیان می شود ($\text{GPU} = 10^{-6} \text{ cm}^3 (\text{STP})/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{cmHg})$).

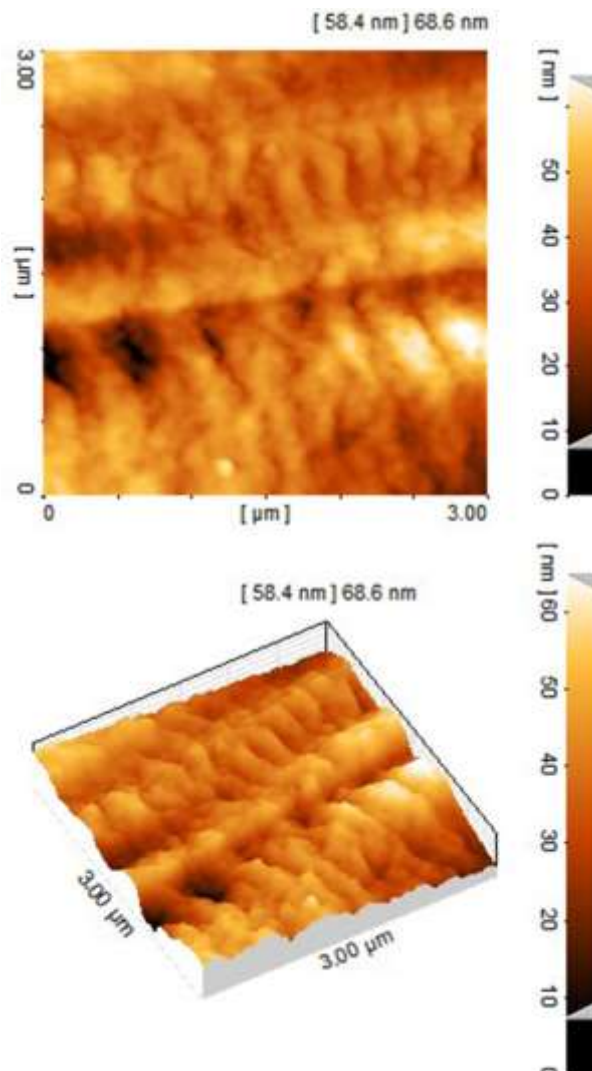
انتخابگری ایده آل گاز A به گاز B ($\alpha_{A/B}$)، با استفاده از عبوردهی گازهای A و B، از رابطه ۴ بدست می آید.

$$\alpha_{A/B} = J_A/J_B \quad (4)$$

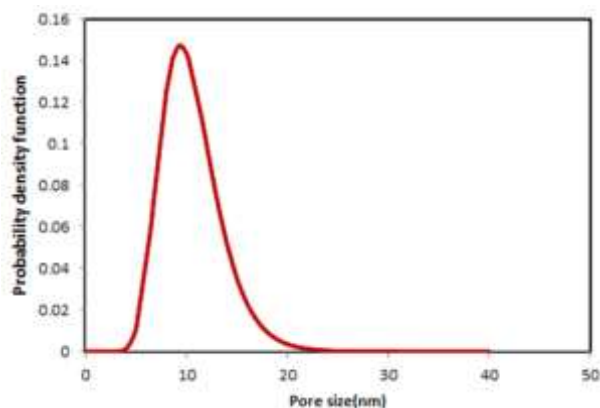
۳- نتایج و بحث

۱-۳ مشخصات پایه غشایی

بمنظور بررسی توپولوژی سطح پایه PSF، از تصاویر AFM استفاده شده است. زبری میانگین سطح پایه PSF، با توجه به AFM گرفته شده از آن که تصویر دو بعدی و سه بعدی آن در شکل ۳ نشان داده شده است، حدود ۶/۸۷ نانومتر می باشد. این مقدار زبری نشان می دهد که سطح پایه مورد نظر صاف و یکنواخت می باشد. از طرفی میانگین اندازه حفرات پایه استفاده شده نیز با استفاده از تصاویر AFM در حدود ۱۰/۱۲ نانومتر بدست آمد. همچنین توزیع اندازه حفرات پایه PSF استفاده شده نیز در شکل ۴ آورده شده است. با توجه به این که زبری سطح پایه مورد نظر بسیار پایین بوده و از طرفی این پایه دارای اندازه حفرات نانومتری، از این رو می توان نتیجه گرفت که می توان لایه انتخابگر را به طور مستقیم و بدون لایه میانی، بر روی این پایه متخلخل پوشش دهی نمود.



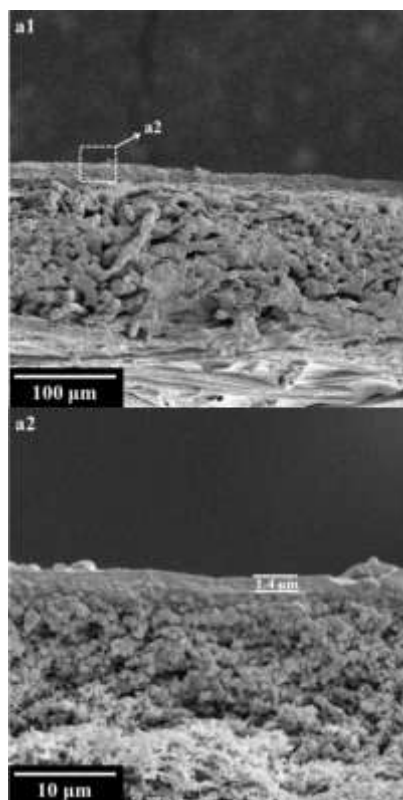
شکل ۳- تصویر دوبعدی و سه بعدی AFM از سطح پایه PSF استفاده شده در این تحقیق بمنظور بررسی زبری و اندازه حفرات پایه غشایی



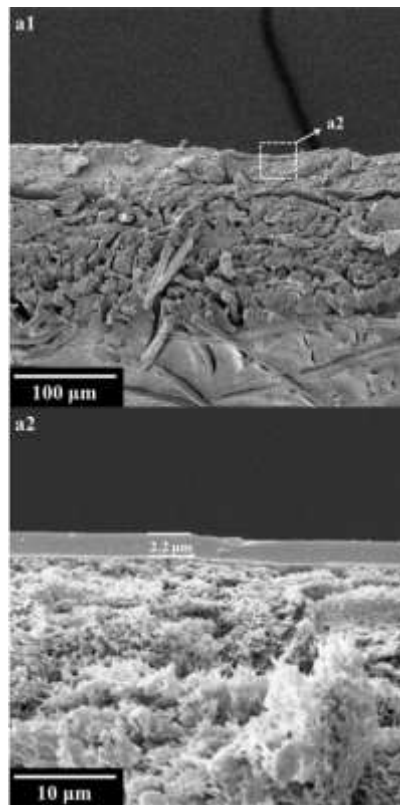
شکل ۴- توزیع اندازه حفرات پایه PSF

۳-۲- مورفولوژی و عملکرد غشاهای کامپوزیتی

تصویر SEM مربوط به غشاهای کامپوزیتی ساخته شده با غلظت های ۲ و ۳ درصد وزنی محلول PEBA، به ترتیب در شکل های ۵ و ۶ نشان داده شده است. براساس این شکلها، غشاهای ساخته شده شامل ۳ لایه: لایه انتخابگر، پایه متخلخل از نوع اسفنجی و الیاف پلیمری می باشند که در این میان لایه انتخابگر نقش اصلی جداسازی را ایفا کرده و پایه متخلخل بعنوان پایه نگهدارنده این لایه می باشد. الیاف پلیمری نیز پایه متخلخل را در انجام این وظیفه حمایت کرده و منجر به استحکام هر چه بیشتر غشای ساخته شده، می شوند.



شکل ۵- تصویر SEM از سطح مقطع عرضی غشای کامپوزیتی دارای لایه انتخابگر با غلظت ۲ درصد وزنی بر روی پایه غشایی پلی سولفون در دو بزرگنمایی مختلف



شکل ۶- تصویر SEM از سطح مقطع عرضی غشای کامپوزیتی دارای لایه انتخابگر با غلظت ۳ درصد وزنی بر روی پایه غشایی پلی سولفون در دو بزرگنمایی مختلف

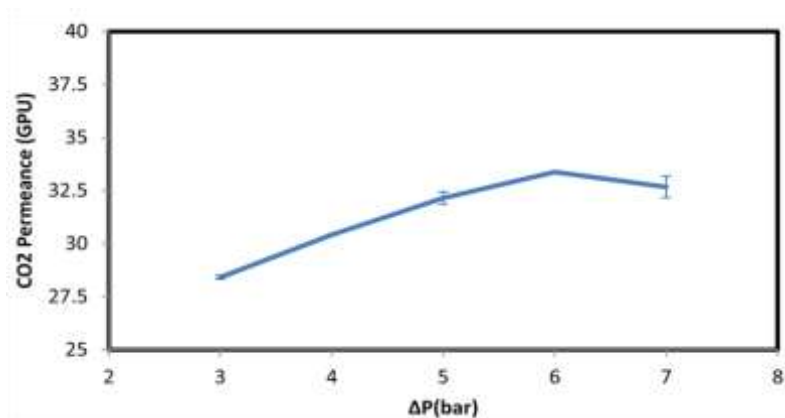
مطابق شکل ۵ ضخامت لایه انتخابگر با غلظت ۲ درصد وزنی، $1/4$ میکرومتر می باشد این در حالی است که این مقدار برای لایه انتخابگر با غلظت ۳ درصد وزنی $2/2$ میکرومتر می باشد (شکل ۶). که این افزایش ضخامت لایه انتخابگر میتواند بدلیل بیشتر شدن گرانروی محلول PEBA با افزایش غلظت باشد. چرا که در فرایند پوشش دهی به روش غوطه وری با افزایش گرانروی محلول، نیروی فراهم شده برای تشکیل لایه بیشتر شده و از این رو لایه تشکیل شده، ضخیم تر می شود. علاوه بر این عبوردهی و انتخابگری این غشاها در جدول ۱ آورده شده است که نشان می دهد عبوردهی این غشاها با نتایج بدست آمده از تصاویر SEM مطابقت داشته و غشای دارای لایه انتخابگر با غلظت کمتر (درصد وزنی ۲) عبوردهی بیشتری دارد که این رفتار می تواند بدلیل ضخامت پایین لایه انتخابگر در این غلظت باشد. علاوه بر این جدول ۱ نشان می دهد با افزایش غلظت لایه انتخابگر از ۲ به ۳ درصد وزنی، اگر چه عبوردهی غشای کامپوزیتی به مقدار معینی کاهش یافته ولی انتخابگری آن افزایش قابل توجهی را داشته است چرا که در غلظت ۳ درصد وزنی نسبت به غلظت ۲ درصد وزنی، گرانروی محلول پوشش-دهی و به دنبال آن نیروی فراهم شده برای تشکیل لایه انتخابگر بیشتر شده است که این امر باعث می شود لایه انتخابگر تشکیل شده اگرچه ضخیمتر ولی کامل تر و یکنواخت تر باشد.

جدول ۱. عملکرد غشاهای کامپوزیتی ساخته شده

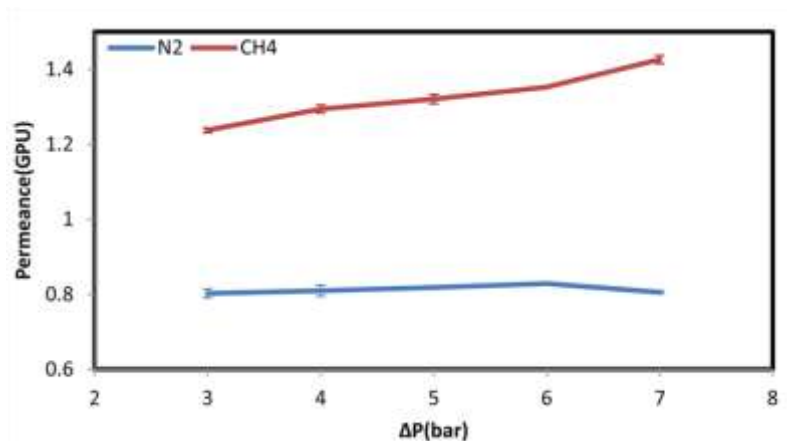
انتخابگری CO ₂ /N ₂	عبوردهی CO ₂ (GPU)	غلظت لایه انتخابگر (درصد وزنی)
۲۷	۳۷	۲
۴۶	۲۹	۳

۳-۳- تأثیر اختلاف فشار بر روی عملکرد غشای کامپوزیتی

با توجه به اینکه غشای ساخته شده با غلظت ۳ درصد وزنی عملکرد مناسبی از خود نشان داد از این رو در ادامه، تست‌های عملکردی بر روی آن صورت گرفت تا از این طریق عملکرد این غشای کامپوزیتی و همچنین تأثیر اختلاف فشار بر عملکرد آن در جداسازی CO₂ از N₂ و CH₄ مورد بررسی قرار گیرد. عبوردهی CO₂، N₂ و CH₄ برای این غشا در شکل‌های ۷ و ۸ آورده شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که غشای ساخته شده، در اختلاف فشارهای مختلف، عبوردهی بالایی برای CO₂ نسبت به N₂ و CH₄ دارد که نشان از قابلیت بالای این غشا در زمینه جداسازی گازهای اسیدی دارد. از طرفی با افزایش اختلاف فشار خوراک و جریان عبورکرده، عبوردهی CO₂ افزایش یافته که این افزایش می‌تواند به دلیل نرم شدن زمینه پلیمری بدلیل حل شدن مولکول‌های CO₂ در آن باشد. از سویی دیگر بیشتر شدن حلالیت گاز CO₂ در PEBA در اثر افزایش فشار خوراک (افزایش پتانسیل شیمیایی) می‌تواند دلیل دیگری برای افزایش عبوردهی CO₂ با افزایش اختلاف فشار باشد.

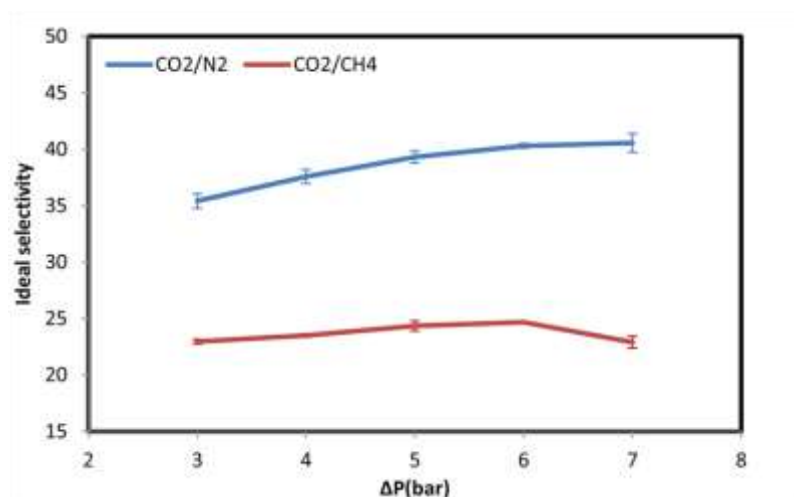


شکل ۷- عبوردهی غشای کامپوزیتی ساخته شده برای CO₂ در اختلاف فشارهای مختلف



شکل ۸- عبوردهی غشای کامپوزیتی ساخته شده برای N_2 و CH_4 در اختلاف فشارهای مختلف

با توجه به اینکه مکانیزم جداسازی در غشاهای کامپوزیتی ساخته شده، از نوع مکانیزم حلالیت- نفوذ می باشد، از این رو به دلیل تمایل بالای لایه انتخابگر (PEBA) به گاز CO_2 (به علت قطبی بودن) و همچنین به دلیل چگالش پذیری بالای گاز CO_2 نسبت به گازهای N_2 و CH_4 ، این گاز عبوردهی بالایی را نسبت به گازهای N_2 و CH_4 از خود نشان می دهد. علاوه بر این، CH_4 چگالش پذیرتر از N_2 بوده و این امر منجر به عبوردهی بالای این گاز در مقایسه با N_2 می شود. از طرفی، با افزایش اختلاف فشار خوراک و جریان عبورکرده، عبوردهی N_2 و CH_4 افزایش کمتری را نسبت CO_2 به دلیل کریستالیزاسیون ماتریس پلیمری دارد. این پدیده منجر به بهبود انتخابگری ایده ال غشای کامپوزیتی با افزایش اختلاف فشار می شود(شکل (۹)).



شکل ۹- انتخابگری ایده ال غشای کامپوزیتی ساخته شده با افزایش اختلاف فشار

۳-۴- مقایسه عملکرد غشاهای ساخته شده با مراجع مختلف

عملکرد غشاهای ساخته شده با غشاهای موجود در مراجع مختلف مورد مقایسه قرار گرفت که داده‌های آن در جدول ۲ ارائه شده است. مقایسه داده‌ها نشان می‌دهد که غشای کامپوزیتی ساخته شده با غلظت ۳ درصد وزنی بدون اینکه نیازی به لایه میانی داشته باشد می‌تواند عبوردهی و انتخابگری مطلوبی در زمینه جداسازی CO₂ از خود نشان دهد.

جدول ۲. مقایسه عملکرد غشاهای کامپوزیتی ساخته شده در این تحقیق با غشاهای موجود در مراجع مختلف

ردیف	غشای کامپوزیتی	عبوردهی CO ₂ (GPU)	انتخاب گری CO ₂ /N ₂	انتخاب گری CO ₂ /CH ₄	مرجع
۱	PSf/Pebax (2 wt%)	۳۰٫۷	۱٫۷	-	[۱۵]
۲	PSf/Pebax (3 wt%)	۵۲٫۹	۱٫۴	-	[۱۵]
۳	PSf/Pebax (4 wt%)	۷٫۶	۱۹٫۷	-	[۱۵]
۴	PSf/Pebax (5 wt%)	۶٫۳	۵۷٫۶	-	[۱۵]
۵	PAN/Pebax (3 wt%)	۴۳٫۸	۵۵	۱۷	[۱۶]
۶	PVC/Pebax (5 wt%)	۱۷٫۹	۵۶	-	[۱۷]
۷	PEI/Pebax (3 wt%)	۳۲	۵٫۴	-	[۱۸]
۸	PSf/Pebax (3 wt%)	۲۷٫۷	۲۴٫۲	-	[۱۹]
۹	PSf/Pebax (1.5 wt%)	۴۰٫۵	۲۱	-	[۱۹]
۱۰	PEI/Pebax (5 wt%)	۱۲٫۳	۵۷	-	[۲۰]
۱۱	PSf/PDMS/Pebax (3%)	۱۷٫۲۸	۴۸	۱۶	[۲۱]
۱۲	PSf/Pebax (3 wt%)	۲۷	۴۶	۲۳	این تحقیق
۱۳	PSf/Pebax (2 wt%)	۳۷	۲۷	-	این تحقیق

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، غشای کامپوزیتی PEBA/PSF بمنظور جداسازی دی اکسیدکربن از نیتروژن و متان ساخته شده و عملکرد آن مورد ارزیابی قرار گرفت. از آنجایی که وجود لایه میانی در غشاهای کامپوزیتی منجر به زیاد بودن هزینه و طولانی بودن فرایند ساخت در این غشاها می‌شود در این تحقیق استفاده از پایه نانوساختار PSF در کنار به کارگیری یک روش مناسب برای پوشش دهی لایه های غشایی PEBA بر روی این پایه (روش غوطه وری) منجر به حذف لایه میانی در این غشاها شد به طوری که نتایج بدست آمده بیانگر عملکرد مناسب این غشاها در زمینه جداسازی دی اکسیدکربن از نیتروژن و متان بود. در ادامه تأثیر اختلاف فشار خوراک و جریان عبور کرده بر روی عملکرد غشای کامپوزیتی ساخته شده مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد با افزایش اختلاف فشار، عبوردهی CO₂ و نیز به دنبال آن انتخابگری CO₂ به N₂ و CH₄ به دلیل نرم شدن زمینه پلیمری و زیاد بودن پتانسیل شیمیایی در فشارهای بالا افزایش می‌یابد.

۵- مراجع

- [1] P. Mahdi, H. Ali, N. Masoud, *J. Of Applied Chemistry*, **24** (1391) 99, in Persian.
- [2] K. Dalane, Z. Dai, G. Mogseth, M. Hillestad, and L. Deng, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **39** (2017) 101.
- [3] T.E. Rufford, et al., *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **94** (2012) 123.
- [4] C.A. Scholes, G.W. Stevens and S.E. Kentish, *Membrane gas separation applications in natural gas processing, Fuel*. **96** (2012) 15.
- [5] F. Karamouz, H. Maghsoudi and R. Yegani, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **35** (2016) 980.
- [6] A.A. Shamsabadi, H. Riazi, and M. Soroush, *In Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes*. (2018) 103.
- [7] V. Mozaffari, M. Sadeghi, A. Fakhar, G. Khanbabaei, A.F. Ismail, *Separation and Purification Technology*. **185** (2017) 202.
- [8] M. Yavari, T. Le and H. Lin, *Journal of Membrane Science*, **525** (2017) 387.
- [9] L. Wang, Y. Li, S. Li, P. Ji, C. Jiang, *Journal of Energy Chemistry*, **23** (2014) 717.
- [10] Z. Dai, L. Ansaloni and L. Deng, *Green Energy & Environment*, **1** (2016) 102.
- [11] F. Hamad, K. Khulbe and T. Matsuura, *Journal of membrane science*, **256** (2005) 29.
- [12] S.L. Liu, L. Shao, M.L. Chua, C.H. Lau, H. Wang, S. Quan, *Progress in Polymer Science*, **38** (2013) 1089.
- [13] R. Surya Murali, A.F. Ismail, M.A. Rahman, S. Sridhar, *Separation and Purification Technology*, **129** (2014) 1.
- [14] R.W. Baker, *Membrane technology and applications*, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, (2004).
- [15] D. Zhao, Y. Wu, J. Ren, H. Li, Y. Qiu, and M. Deng, *Journal of Membrane Science*, **570** (2019) 184.
- [16] A. Car, C. Stropnik, W. Yave, and K.V Peinemann, *Separation and Purification Technology* **62**, no. 1 (2008) 110.
- [17] I. Khalilnejad, A. Kargari, and H. Sanaeepur, *Chemical Papers*, **71**, no. 4 (2017) 803.
- [18] K.H. Kim, P.G. Ingole, J.H. Kim, and H.K. Lee, *Chemical Engineering Journal*, **233** (2013) 242.
- [19] L. Liu, A. Chakma, and X. Feng, *Chemical Engineering Journal*, **105**, no. 1-2 (2004) 43.
- [20] X. Ren, J. Ren, and M. Deng, *Separation and Purification Technology*, **89** (2012) 1.
- [21] M. Momeni, M. Elyasi Kojabad, S. Khanmohammadi, Z. Farhadi, R. Ghalandarzadeh, A.A. Babaluo and M. Zare, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **62** (2019) 236.