

مدل سازی عملیات جداسازی کربن دی اکسید از مخلوط گازی توسط غشای الیاف توخالی پلی پروپیلن در حضور مایع یونی [Emim][EtSO₄]

سینا کاویانی، بهاره کامیاب مقدس*

گروه مهندسی شیمی، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

چکیده: وجود کربن دی اکسید در مخلوط‌های گازی در واحدهای عملیاتی مانند واحد آمونیاک و متانول باعث بروز مشکل‌هایی مانند کاهش ارزش گرمایی گاز، خوردگی و مشکل‌هایی زیست محیطی می‌شود. یکی از روش‌های جداسازی کربن دی اکسید از این گازها، استفاده از غشای الیاف توخالی با کمک یک مایع جاذب مناسب است که در آن، با تغییر دادن کاتیون یا آنیون تشکیل دهنده مایع‌های یونی، می‌توان به بازدهی بیش‌تری دست یافت. هدف از این پژوهش، مدل سازی جذب فیزیکی کربن دی اکسید توسط غشای الیاف توخالی با استفاده از مایع یونی خالص [Emim][EtSO₄] بوده که در آن انتقال جرم در سه فاز گاز، مایع و غشا، در قالب معادله‌های دیفرانسیل پاره‌ای، با روش‌های عددی و به صورت هم‌زمان حل می‌شوند. درستی نتیجه‌های به‌دست‌آمده از مدل با داده‌های تجربی موجود مقایسه شده و مشخص شد که مدل ارائه شده با خطای میانگین حدود ۷/۵ درصد، از تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی برخوردار است. بنابراین مدلی مناسب، برای پیش‌بینی جذب فیزیکی CO₂ در شرایط این پژوهش بوده و می‌توان تأثیر پارامترهای گوناگونی همچون شدت جریان مایع و گاز، دمای محلول جاذب، ترشوندگی و طول غشا را مورد بررسی قرار داد. در بررسی نتیجه‌های به‌دست‌آمده دیده شد که در یک شدت جریان ثابت مایع ۲۵ میلی لیتر در یک دقیقه حضور مایع یونی باعث جذب حدود ۴۰ درصد CO₂ موجود در گاز ورودی شده و افزایش ۳۰ میلی لیتر بر دقیقه شدت جریان گاز در حضور مایع یونی نیز باعث افزایش ۱۵ درصدی جذب کربن دی اکسید شد. افزایش ترشوندگی از صفر تا صد درصد نیز باعث کاهش بازده حذف CO₂ از گاز ورودی تا حدود ۱۵ درصد خواهد شد.

کلمات کلیدی: جذب کربن دی اکسید، تماس دهنده غشایی الیاف توخالی، مایع یونی [Emim][EtSO₄]، مدل سازی.

KEYWORDS: Carbon dioxide absorption, Hollow fiber membrane contactors, Ionic liquid [Emim][EtSO₄], Modeling.

مقدمه

عمل می‌نماید و به دلیل نسبت سطح به حجم بزرگ آن‌ها، توجیه اقتصادی خوبی در بحث جداسازی دارند [۱]. این دسته لوله‌ها درون محفظه‌ای

غشاهای الیاف توخالی، مجموعه‌ای از لوله‌های مویینی هستند که در آن‌ها جداره الیاف به عنوان یک سطح با قابلیت انتخاب پذیری

*E-mail: kamyab_bahareh@yahoo.com, kamyab@iaushiraz.ac.ir

*عهده‌دار مکاتب

همچون بهای بالا، روش سخت تولیدشان، کمبود اطلاعات مربوط به ویژگی‌های فیزیکی و داده‌های سمیت، گرانروی بالا و غیره دارند [۱۰]. سرآغاز استفاده از تماس دهنده‌های غشایی الیاف توخالی را می‌توان استفاده/ایساتو و/ایسمن^۱ از تماس دهنده‌های غشایی الیاف توخالی به منظور اکسیژن‌دار کردن خون در سال ۱۹۷۵ میلادی دانست [۱۱]. افراد زیادی جذب کربن دی‌اکسید و دیگر گازها را با استفاده از تماس دهنده‌های غشایی مورد بررسی قرار داده‌اند که می‌توان به دنسور^۲ در سال ۲۰۰۵ و معصومی در سال ۲۰۱۴ میلادی اشاره نمود [۱۲، ۱۳]. در همین سال، لو^۳ و همکاران جذب کربن دی‌اکسید در تماس دهنده‌های غشایی الیاف توخالی را توسط محلول آبی دو نوع مایع یونی به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند که یکی از آن‌ها از نوع جاذب فیزیکی و دیگری از نوع جاذب شیمیایی بود [۱۴]. در سال ۲۰۱۱ میلادی، کاظمی و همکاران جذب شیمیایی کربن دی‌اکسید در محلول تترا متیل آمونیوم گلیسینات^۴ توسط غشای الیاف توخالی را شبیه‌سازی کرده و مشخص شد که با افزایش سرعت فاز مایع و کاهش شدت جریان جریان گاز، جذب کربن دی‌اکسید افزایش می‌یابد [۱۵]. نجف‌لو در سال ۱۳۹۷ فرآیند جذب کربن دی‌اکسید در محلول آبی متیل دی اتانول آمین را به صورت ترمودینامیکی مدل‌سازی نمود. در این پژوهش برای تعیین حلالیت گاز کربن دی‌اکسید در این محلول از معادله حالت SAFT-HR استفاده شده و با استفاده از پارامترهای موجود در مقاله‌ها و پارامترهای به‌دست‌آمده از این پژوهش، حلالیت تعادلی دی‌اکسید کربن را پیش‌بینی نمود [۱۶]. بن‌منصور و همکاران در سال ۲۰۱۷ میلادی جداسازی چند جزئی کربن دی‌اکسید از مخلوط کربن دی‌اکسید و تیتروژن را در یک بستر ثابت مدل‌سازی نمودند و با جواب‌های به‌دست‌آمده از نرم افزار CFD مقایسه نمودند. تطابق به‌نسبت مناسبی بین جواب‌های به‌دست‌آمده از مدل‌سازی با نرم افزار مربوطه موجود بود [۱۷]. مگان^۵ و همکاران در سال ۲۰۱۸ میلادی جداسازی گاز کربن دی‌اکسید از گاز سنتز را در یک غشای الیاف توخالی مدل‌سازی کردند و داده‌های آزمایشگاهی موجود در جداسازی با گاز اکسیژن را با مدل‌سازی خود مقایسه نمودند از تطابق مناسب داده‌ها در شرایط حالت پایدار یا مدل‌سازی مربوطه توانستند پیش‌بینی مناسبی برای جداسازی‌های دیگر انجام داده و به این ترتیب مدل مربوطه را توسعه داده و بازه‌های مناسب کاری برای انجام مدل‌سازی دقیقتر روی گاز سنتز را تعیین نمودند [۱۸]. چو^۶ و همکاران در سال ۲۰۱۹ میلادی جداسازی کربن دی‌اکسید از گاز طبیعی را در غشای الیاف توخالی به صورت ریاضی مدل‌سازی

به نام مدول قرار می‌گیرند که افزون بر نگهداری غشا بر چگونگی حرکت سیال و افزایش نسبت سطح به حجم بزرگ آن‌ها، تأثیر مثبتی دارند [۲]. در انتخاب غشا می‌بایست عامل‌هایی همچون نفوذپذیری، پایداری فیزیکی و شیمیایی، هزینه و آب دوست یا آب‌گریز بودن غشا در نظر گرفته شود. حتی ضخامت بالای غشا نیز باعث افزایش مقاومت انتقال جرم و در نتیجه کاهش راندمان جذب می‌شود [۳].

از جمله غشاهای مورد استفاده به عنوان تماس دهنده‌های غشایی می‌توان به پلی‌تترافلورئورو اتیلن، پلی‌پروپیلن، پلی‌وینیلیدین فلوئورید اشاره کرد. غشای پلی‌پروپیلن یکی از پرکاربردترین غشاهایی است که به دلیل داشتن ویژگی‌هایی به نسبت خوب و بهای پایین به وفور مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴]. بسته به آب دوست یا آب‌گریز بودن غشا، در هنگام تماس دو فاز، خلل و فرج غشا می‌تواند با مایع یا گاز پر شود که همین پر شدن خلل و فرج توسط فاز مایع سبب ایجاد پدیده ترشوندگی می‌شود که باید از بروز این پدیده جلوگیری کرد، چرا که این پدیده، باعث افزایش مقاومت کلی انتقال جرم و کاهش راندمان غشا شده و حتی در درصد‌های پایین ترشوندگی نیز کاهش چشم‌گیر نرخ انتقال جرم را به دنبال دارد [۵]. در غشاهای الیاف توخالی، جنس غشا تعیین‌کننده انتخاب‌پذیری نبوده و مایع جاذب، انتخاب‌پذیری سامانه را تعیین می‌نماید. مایع جاذب مناسب باید در برابر گرما پایدار بوده و تجزیه نشود، قابلیت احیای آسانی داشته باشد تا هزینه فرایند کاهش یابد، فشار بخار آن کم بوده و به سادگی تبخیر نشود تا موجب کاهش بازده سامانه نشود. همچنین باید کشش سطحی پایینی داشته باشد تا از بروز پدیده ترشوندگی جلوگیری نماید [۶، ۷]. مایعات یونی به نسبت تازه‌ای از مایع‌های جاذب بوده که می‌توان با تغییر دادن کاتیون یا آنیون سازنده آن‌ها به ویژگی‌های دلخواه یک مایع جاذب اختصاصی برای جذب عنصر هدف رسید. این مایع‌ها با وجود این‌که ماهیت نمکی دارند، به دلیل دارا بودن کاتیون‌هایی با تقارن کم، دارای نقطه ذوب پایینی می‌باشند و در نتیجه در دماهای پایین به صورت مایع ظاهر می‌شوند [۸]. ویژگی‌های یک مایع یونی همچون آب دوستی، گرانروی، چگالی و حلالیت آن را می‌توان با تغییر آنیون اصلاح کرده و تغییر داد. وظیفه کاتیون به‌طور معمول تأثیر گذاری روی آب‌گریزی یا توانایی تشکیل پیوند هیدروژنی و وظیفه آنیون کنترل امتزاج‌پذیری مایع‌های یونی در آب است [۹]. با وجود ویژگی‌های بارز مایع‌های یونی، این مایع‌ها عیب‌هایی

(۱) Esato, K., and B. Eiseman

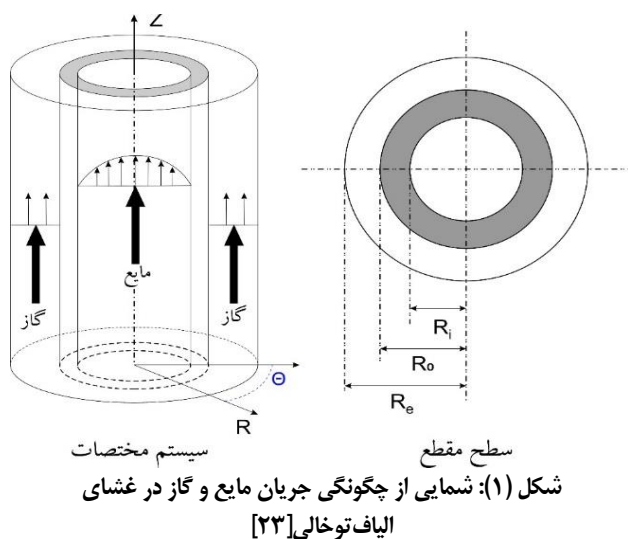
(۳) Lu

(۵) Megan

(۲) Dindore

(۴) Tetramethylammonium Glycinate

(۶) Chu



اطراف ایلیف) عبور کنند، مدل‌سازی شده است. فرایند انتقال جرم در تماس دهنده غشایی ایلیف تو خالی شامل چهار مرحله می‌باشد:

- ۱) نفوذ از توده‌ی گاز به سمت دیواره‌ی غشا
 - ۲) نفوذ گاز درون منافذ خشک غشا
 - ۳) انحلال درون مایع جاذب و نفوذ به همراه واکنش شیمیایی درون منافذ ترشده، اگر غشا تر باشد.
 - ۴) نفوذ به همراه واکنش درون فاز مایع
- اگر ایلیف آب‌گریز با منافذ خشک باشد، مرحله سوم حذف می‌شود و در صورتی که جذب از نوع فیزیکی باشد، عبارت واکنش شیمیایی حذف شده و فقط واکنش از طریق حل شدن CO_2 صورت می‌گیرد. فرضیه‌های اصلی که روی الگوی مدل در نظر گرفته شده است عبارتند از: [۲۴]

- شرایط هم‌دما در نظر گرفته می‌شود.
- رفتار گاز ایده‌آل برای فاز گاز معتبر است.
- توزیع اندازه‌ی حفره‌ها و قطر دیواره‌ی غشا یکنواخت است.
- نفوذ محوری در برابر حرکت توده قابل چشم‌پوشی است.
- توزیع سرعت مایع درون ایلیف‌ها به صورت کامل توسعه‌یافته و سهموی می‌باشد.
- از قانون هنری برا حلالیت گاز در مایع استفاده می‌شود.

شایان ذکر است که مکانیسم جداسازی و عملیات جذب در این پژوهش فیزیکی بوده و واکنش شیمیایی رخ نمی‌دهد. بنابراین جمله واکنش در معادله‌ها حذف می‌شود. اطلاعات آزمایشگاهی موجود در پژوهش کرور و سیرکار^۱ نیز همه به صورت جذب فیزیکی با آب است [۲۵].

کردند. در این مدل‌سازی مشخص شد که غشاهای ایلیف توخالی پتانسیل بالایی در جداسازی و شیرین‌سازی گاز طبیعی نسبت به کربن دی‌اکسید دارند. همچنین تأثیر پارامترهای گوناگونی چون شدت جریان سیال گاز و مایع و همچنین ترشوندگی غشا مورد بررسی قرار گرفت [۱۹].

از آنجا که مدل‌سازی ابزاری مناسب برای طراحی و بهبود فرایند از مقیاس آزمایشگاهی به مقیاس پایلوت و صنعتی می‌باشد و به وسیله‌ی مدل‌سازی می‌توان شرایط بهینه یک فرایند را تعیین کرد [۲۰، ۲۱]، بنابراین هدف از این پژوهش، مدل‌سازی جذب فیزیکی کربن دی‌اکسید توسط غشای ایلیف توخالی با استفاده از مایع یونی خالص $[\text{Emim}][\text{EtSO}_4]$ می‌باشد مایع یونی به کار رفته در این پژوهش $[\text{Emim}][\text{EtSO}_4]$ می‌باشد که همان ۱ اتیل ۳ متیل ایمیدازولیوم اتیل سولفات است که دارای وزن مولکولی $296/236$ گرم به ازای هر مول با خلوص ۹۹ درصد وزنی می‌باشد. همچنین چگالی این مایع یونی در دمای محیط (۲۵ درجه سلسیوس) $11236/70$ کیلوگرم به ازای یک متر مکعب می‌باشد. این مایع با داشتن ویژگی‌های دلخواه چشمگیری مانند قابلیت احیاء پذیری بالا و قابلیت جذب و حلالیت بالای CO_2 گزینه مناسبی برای سامانه جذب مورد اشاره در این پژوهش به شمار می‌رود. بنابراین به هدف جذب بهتر و دقیق‌تر از این مایع یونی در مدل‌سازی برای پیش‌بینی بهتر جذب CO_2 استفاده شده است. شایان ذکر است که در کنار برتری‌های ذکر شده این مایع یونی گرانبه‌ای به نسبت بالایی دارد که باید برای انجام بخش آزمایشگاهی پژوهش بایستی مورد توجه قرار گیرد [۲۲]. در این سامانه، برای حل معادله‌های به دست آمده از روش عددی تفاضل محدود و الگوریتم توماس با استفاده از نرم افزار متلب استفاده شد و سرانجام نتیجه‌های مدل‌سازی با نمونه کار آزمایشگاهی همانند در مقاله کرور و سیرکار مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. دیده می‌شود که مدل ارائه شده برای جذب فیزیکی CO_2 در آب خالص از تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی برخوردار است، بنابراین می‌توان از این مدل برای پیش‌بینی جذب فیزیکی CO_2 در مایع‌های یونی خالص گوناگون استفاده کرد.

بخش نظری

شرح مدل

مطابق با شکل ۱ فرض می‌شود که فرایند جذب CO_2 در مایع یونی خالص $[\text{Emim}][\text{EtSO}_4]$ به صورت حرکت هم‌جهت فازها، به گونه‌ای که جاذب مایع از درون ایلیف و مخلوط گازی (۲۰ درصد مولی کربن دی‌اکسید و ۸۰ درصد مولی نیتروژن) از درون پوسته

(۱) Karoor, Sujatha, and Kamalesh K. Sirkar

انتقال جرم در فاز مایع

معادله حاکم برای انتقال جرم در فاز مایع را می توان به صورت زیر ارائه کرد [۲۶]:

$$U_z(r) \frac{\partial C_{jL}}{\partial z} = D_{jL} \left(\frac{\partial^2 C_{jL}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_{jL}}{\partial r} \right) \quad (1)$$

در رابطه (۱) زیرنویس z مربوط به جزء نفوذ کننده و D_{jL} ضریب نفوذ آن جزء در فاز مایع می باشد. به دلیل آرام بودن جریان مایع درون الیاف، توزیع سرعت جریان مایع درون الیاف از جریان آرام نیوتونی پیروی کرده و آن را می توان به صورت رابطه‌ی (۲) بیان کرد.

$$U_z(r) = 2 U_{aveL} \left[1 - \left(\frac{r}{R_i} \right)^2 \right] \quad (2)$$

$$U_{aveL} = U_{inL} = \frac{q_{Lin}}{\pi R_i^2} \quad (3)$$

که q_{Lin} شدت جریان مایع جاذب ورودی بر حسب m^3/s می باشد. شرط اولیه برای هر جزء نفوذ کننده درون الیاف به علت ورود مایع یونی خالص عبارت است از: (مبدا مختصات روی شکل ۱ مشخص شده است).

$$C_{jL} = C_{jLin} = 0 \quad z = 0 \quad (4)$$

به علت تقارن در مرکز هر الیاف می توان از معادله (۵) به عنوان شرط مرزی استفاده کرد.

$$\frac{\partial C_{jL}}{\partial r} = 0 \quad r = 0 \quad (5)$$

با به کارگیری موازنه جرم برای جزء نفوذ کننده در سطح مشترک مایع و غشاء مطابق با معادله‌ی (۶) یک شرط مرزی دیگر به دست می آید:

$$D_{jL} \frac{\partial C_{jL}}{\partial r} = D_{jm} \frac{\partial C_{jm}}{\partial r} \quad r = R_i \quad (6)$$

که در این رابطه D_{jm} ضریب نفوذ آن جزء در غشا می باشد. با به کار گرفتن قانون هنری^۱ در سطح تماس گاز - مایع می توان از آن به عنوان شرط مرزی استفاده کرد:

$$C_{jL} = H C_{jG} \quad r = R_w \quad (7)$$

در رابطه های بالا، R_i و R_w به ترتیب شعاع درونی الیاف و مجموع شعاع درونی و جزء ترشده غشا می باشند.

انتقال جرم در فاز غشا

زمانی که میزان تخلخل غشا بیش از ۱۰٪ باشد، انتقال جرم درون خلل و فرج غشا را می توان یک بعدی در نظر گرفت [۲۷]. این خلل و فرج می توانند با مایع و یا با گاز اشغال شوند.

معادله‌ی حاکم وقتی که غشاء خشک است

در الیاف آب گریز، با اعمال موازنه جرم برای انتقال CO_2 به درون روزنه‌های غشاء که از گاز اشغال شده است به معادله (۸) می‌رسیم.

$$D_{jm.nonwet} \left(\frac{\partial^2 C_{jm}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_{jm}}{\partial r} \right) = 0 \quad (8)$$

که در این رابطه $D_{jm.nonwet}$ ضریب نفوذ جزء نفوذکننده در غشای خشک می باشد و از رابطه زیر بدست می آید:

$$D_{jm} = \frac{\varepsilon}{\tau} \left[\frac{1}{\left(\frac{1}{D_{jG}} \right) + \left(\frac{1}{D_{jk}} \right)} \right] \quad (9)$$

همچنین ε و τ به ترتیب میزان تخلخل غشا^۲ و ضریب پیچش منافذ^۳ و D_{jk} ضریب نفوذ نادرین است و به صورت زیر تعریف می شود:

$$D_{jk} = 0.485 d_p \left(\frac{T}{M} \right)^{0.5} \quad (10)$$

در فصل مشترک غشا و مایع، شرط مرزی زیر برای هر جزء نفوذ کننده برقرار می باشد:

$$D_{jL} \frac{\partial C_{jL}}{\partial r} = D_{jm.nonwet} \frac{\partial C_{jm}}{\partial r} \quad r = R_i \quad (11)$$

در فصل مشترک گاز و مایع ($R_w = R_i$) قانون هنری برقرار می باشد.

$$R_w = R_i + (R_o - R_i) \frac{X}{100} \quad (12)$$

که در حالت غشای خشک، این نقطه برابر با شعاع درونی غشا می باشد. همچنین X درصد ترشوندگی غشا می باشد که به صورت رابطه زیر تعریف می شود.

$$X = \frac{\delta_L}{\delta} \quad (13)$$

که δ_L و δ به ترتیب ضخامت ترشده غشا و ضخامت غشا می باشند. همچنین در فصل مشترک گاز و غشاء، شرط مرزی به صورت زیر تعریف می شود.

$$D_{jG} \frac{\partial C_{jG}}{\partial r} = D_{jm.nonwet} \frac{\partial C_{jm}}{\partial r} \quad r = R_o \quad (14)$$

(۱) Henry Law

(۳) Tortuosity of membrane pores

(۲) Porosity

معادله‌ی حاکم وقتی که غشا تر شده است

در الیاف آب دوست حفره های غشا توسط مایع پر شده و باعث به وجود آمدن مقاومت فزونی در برابر انتقال جرم شده و در نتیجه بازده فرایند جذب به میزان چشمگیری کاهش می‌یابد. با در نظر گرفتن این که غشای مرطوب شده است، معادله حاکم بر فاز غشا به صورت زیر به دست می‌آید:

$$D_{jm.wet} \left(\frac{\partial^2 C_{jm}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_{jm}}{\partial r} \right) = 0 \quad (15)$$

ضریب نفوذ اجزا در منافذ تر غشا به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D_{jm.wet} = \frac{D_{jL} \varepsilon}{\tau} \quad (16)$$

شرایط مرزی در دیواره درونی و بیرونی غشا همانند شرایط تر نشده می‌باشد، تنها با این تفاوت که یک شرط مرزی در $r = R_w$ افزوده می‌شود، همچنین می‌توان از قانون هنری در R_w استفاده کرد:

$$D_{jm.nonwet} \frac{\partial C_{jm}}{\partial r} = D_{jm.wet} \frac{\partial C_{jm}}{\partial r} \quad r = R_w \quad (17)$$

انتقال جرم در فاز گاز

معادله حاکم در فاز گاز به صورت معادله دیفرانسیلی پاره‌ای زیر می‌باشد:

$$U_z(r) \frac{\partial C_{jG}}{\partial z} = D_{jG} \left(\frac{\partial^2 C_{jG}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_{jG}}{\partial r} \right) \quad (18)$$

در این پژوهش از مدل سطح آزاد هپل^۱ برای تعیین توزیع سرعت گاز در سمت پوسته استفاده می‌شود که تغییرات سرعت و غلظت در اطراف هر الیاف تا شعاع سطح آزاد ادامه دارد و پس از آن سرعت و غلظت ثابت خواهد شد. همچنین فرض بر این است که الیاف‌ها هیچ گونه اثر متقابلی بر هم ندارند [۲۸]. توزیع سرعت گاز بر اساس این روش به صورت زیر خواهد بود:

$$U_z(r) = 2 U_{aveG} \left[1 - \left(\frac{R_0}{R_e} \right)^2 \right] \beta(r) \quad (19)$$

$$U_{aveG} = U_{inG} = \frac{q_{Gin}}{\pi R_m^2 - \pi R_0^2} \quad (20)$$

که q_{Gin} و R_m به ترتیب شدت جریان گاز ورودی بر حسب m^3/s و شعاع داخلی تماس دهنده‌ی غشایی بر حسب m می‌باشد.

$$\beta(r) = \frac{\left(\frac{r}{R_e} \right)^2 + \left(\frac{R_0}{R_e} \right)^2 + 2 \ln \left(\frac{R_0}{r} \right)}{3 + \left(\frac{R_0}{R_e} \right)^4 - 4 \left(\frac{R_0}{R_e} \right)^2 + 4 \ln \left(\frac{R_0}{R_e} \right)} \quad (21)$$

همچنین R_e و R_0 به ترتیب شعاع سطح آزاد هپل و شعاع خارجی الیاف غشایی می‌باشند. شعاع سطح آزاد هپل به صورت معادله (۲۲) تعریف می‌شود:

$$R_e = \left(\frac{1}{\theta} \right)^{0.5} R_0 \quad (22)$$

$$\theta = \left(\frac{n R_0^2}{R_m^2} \right) \quad (23)$$

در این روابط n عبارت است از تعداد الیاف، θ درصد فضای اشغال شده توسط الیاف در ماژول و R_m شعاع داخلی تماس دهنده غشایی است. فاز گاز ایده‌آل فرض می‌شود، بنابراین شرط مرزی برای قسمت پوسته به صورت معادله زیر می‌باشد:

$$C_{jG} = \frac{P}{RT} y_j = C_{jG.in} \quad z = 0 \quad (24)$$

در رابطه (۲۴) y_j جزء مولی ماده نفوذ کننده در گاز ورودی به تماس دهنده غشایی می‌باشد. در سطح آزاد (R_e) می‌توان از معادله (۲۵) به عنوان شرط مرزی استفاده کرد.

$$\frac{\partial C_{jG}}{\partial r} = 0 \quad r = R_e \quad (25)$$

از قانون بقای جرم در سطح خارجی غشا به صورت زیر به عنوان شرط مرزی دیگر استفاده می‌کنیم:

$$D_{jG} \frac{\partial C_{jG}}{\partial r} = D_{jm} \frac{\partial C_{jm}}{\partial r} \quad r = R_0 \quad (26)$$

برای محاسبه میزان غلظت گاز خروجی از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$C_{CO_2.G} \left(\frac{mol}{m^3} \right) = \frac{q_{out} C_{out}}{q_{out}} = \frac{\int_{R_0+dr_G}^{R_e} 2\pi r U(r) C dr (@ z=L)}{\int_{R_0+dr_G}^{R_e} 2\pi r U(r) dr (@ z=L)} \quad (27)$$

در رابطه بالا q_{in} و q_{out} شدت جریان گاز ورودی و خروجی بر حسب m^3/s و C_{in} و C_{out} غلظت CO_2 در گاز ورودی و خروجی بر حسب mol/m^3 است. پارامترهای مورد استفاده در مدل مورد نظر در جدول (۱) آورده شده است:

حل عددی معادلات

پس از نوشتن معادلات موجود برای سه فاز مایع، غشاء و گاز با داشتن تعداد کافی شرایط مرزی برای سطح تماس فازهای گوناگون با یکدیگر، می‌توان مجهول‌های گوناگون را در معادله‌ها به دست آورد. هر کدام از الیاف‌ها به المان‌های زیادی با طول معادل Δr و Δz هر دو جهت

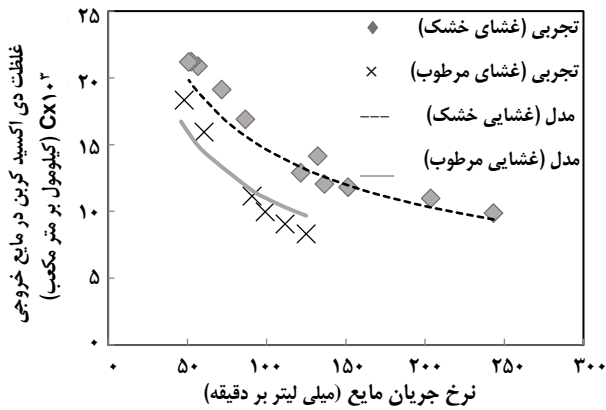
(۱) Happel, John

جدول (۱): پارامترهای مورد استفاده در این پژوهش

پارامتر	معادله	مرجع
$D_{CO_2-water} (m^2/s)$	$2/35 \times 10^{-6} e^{-3119/T}$	[۲۹]
$D_{CO_2-N_2} (m^2/s)$	$1/17 \times 10^{-5}$	[۳۰]
$H_{CO_2-water} (kPa \cdot m^3 \cdot kmol^{-1})$	$2/8246 \times 10^{-6} e^{-2044/T}$	[۲۹]
$H_{CO_2-[Emim][Etso4]} (Mpa)$	۶،۰۷	[۳۱]
$D_{CO_2-[Emim][Etso4]} (m^2/s)$	86×10^{-10}	[۳۱]
$\rho_{H_2O} (kg/m^3)$	۱۰۰۰	[۳۲]
$\rho_{[Emim][Etso4]} (kg/m^3)$	۱۲۳۳	[۲۲]
$\mu_{H_2O} (cP)$	۱	[۳۲]
$\mu_{[Emim][Etso4]} (cP)$	۷۷،۸	[۲۲]

جدول (۲): مشخصه‌های مدول مورد استفاده در این پژوهش

مدول	پارامتر
۶۵	طول موثر الیاف (میلی متر)
۳۷۵	قطر خارجی الیاف (میکرو متر)
۳۷۵	قطر داخلی الیاف (میکرو متر)
۲۰۰	میانگین اندازه حفرات فایبر (نانومتر)
۱۴۰	تعداد فایبر
۹	قطر داخلی ماژول (میلی متر)
۰،۶	میزان تخلخل
۰،۰۰۸۵	سطح تماس غشاء (متر مربع)



شکل ۲: اعتبار سنجی مدل با داده‌های آزمایشگاهی موجود در شرایط غشاء تر شده و خشک [۲۵]

مایع یونی خالص استفاده کرد. جدول ۳ جزئیات خطاهای نتیجه‌های گوناگون این پژوهش و خطای میانگین را به تفصیل نشان می‌دهد.

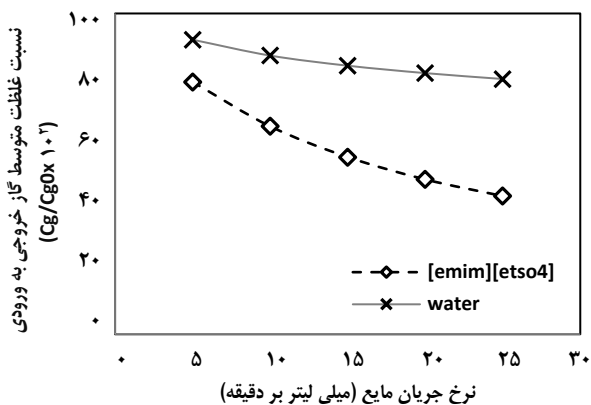
تأثیر شدت جریان مایع

با افزایش شدت جریان مایع، سرعت مایع در الیافها افزایش یافته و محلول تازه سریع‌تر جایگزین می‌شود که سرانجام منجر به افزایش اختلاف غلظت CO_2 در دو فاز مایع و گاز می‌شود. بنابراین با افزایش شدت جریان مایع مقاومت در برابر انتقال جرم در فاز مایع کم شده و عملکرد جذب بهبود می‌یابد، بنابراین نسبت غلظت متوسط گاز خروجی به غلظت ورودی آن، با افزایش شدت جریان مایع کاهش می‌یابد که در شکل ۳ این روند کاهش می‌مشخص می‌باشد. به طور مثال در یک شدت جریان ثابت ۲۵ میلی لیتر در یک دقیقه حضور مایع یونی باعث کاهش حدود ۴۰ درصد CO_2 غلظت گاز خروجی نسبت به غلظت ورودی آن شده است. بدیهی است این درصد جذب در شدت جریان های کمتر مایع مقدار کمتری خواهد شد. این مسئله در حالی است که بدون حضور مایع یونی و با آب خالص به تنهایی در همین شدت جریان کاهش در حد ۱۰ درصد غلظت CO_2 در گاز خروجی در مقایسه با گاز ورودی خواهیم داشت.

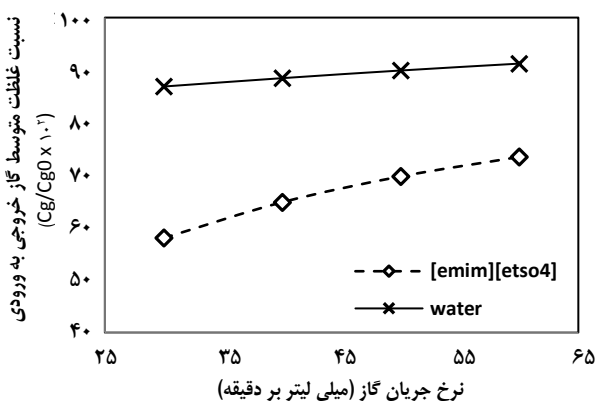
شعاعی و محوری تقسیم‌بندی شده و همه معادله‌ها به صورت گسسته درآمده‌اند. البته مدل سازی تنها برای یک لیف انجام شده و به کل الیاف تعمیم داده شده است. به منظور حل هم‌زمان مجموعه معادله‌های دیفرانسیل معمولی و پاره‌ای و برای جلوگیری از به وجود آمدن مشکل ناپایداری، از روش ضمنی استفاده شده است. در هر المان Δz ، برای هر گره در راستای شعاعی معادله‌های دیفرانسیلی به صورت گسسته نوشته شده و پس از نوشتن این معادله‌های برای نقاط هر سه فاز، یک دستگاه معادله‌های خطی سه‌قطری به وجود می‌آید که این دستگاه معادله‌ها با روش عددی توماس حل می‌شود. بدین ترتیب از حل دستگاه معادله‌ها، غلظت همه نقطه‌ها در یک المان Δz به دست آمده و این مراحل برای المان های بعدی تا انتهای الیاف تکرار شده است. از برتری‌های این روش می‌توان به عدم نیاز به عملیات حدس و خطا و در نتیجه کوتاه بودن زمان اجرای برنامه اشاره کرد. برنامه مورد نظر به کمک نرم‌افزار برنامه نویسی متلب نوشته و اجرا شده است. مدول مورد نظر با مشخصات ابعادی کوچک انتخاب شده است، چون که مایع‌های یونی گران و با گرانیوی بالا هستند و با مدول‌های بزرگ، این عمل هزینه‌بر بوده و همچنین افت فشار ناشی از آن زیاد می‌باشد. جدول ۲ مشخصه‌های این مدول را نشان می‌دهد.

صحت سنجی مدل

در شکل ۲ نتیجه‌های حاصل از جذب CO_2 در آب خالص در دو شرایط غشای تر شده و خشک توسط مدل با نتیجه‌های آزمایشگاهی مدول شماره ۲ مقاله کرور و سیرکار در شرایط یکسان مقایسه شده و تغییرات غلظت CO_2 در مایع خروجی غشا بر حسب شدت جریان مایع ورودی نمایش داده شده است [۲۵]. دیده می‌شود که مدل ارائه شده از تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی برخوردار است (خطای % ۷/۵۱)، بنابراین می‌توان از این مدل برای پیش بینی جذب فیزیکی CO_2



شکل ۳: تأثیر شدت جریان مایع (شدت جریان گاز ۴۰ میلی‌لیتر بر دقیقه، درصد CO_2 در گاز ورودی: ۲۰ درصد مولی، دمای ۳۰ درجه سلسیوس)



شکل ۴: تأثیر شدت جریان گاز (شدت جریان مایع ۱۰ میلی‌لیتر بر دقیقه، درصد CO_2 در گاز ورودی: ۲۰ درصد مولی، دمای ۳۰ درجه سلسیوس)

تأثیر دمای محلول جاذب

با افزایش دمای مایع جاذب به علت کاهش گرانشی، ضریب نفوذ افزایش و حلالیت فیزیکی کاهش می‌یابد. دمای محلول از ۳۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس متغیر می‌باشد. طبق شکل ۵ در کل اثر کاهشی حلالیت بیش‌تر از اثر افزایشی ضریب نفوذ است و میزان غلظت متوسط کربن دی‌اکسید در گاز خروجی نسبت به غلظت ورودی افزایش می‌یابد، یعنی با افزایش دما، درصد جداسازی کربن دی‌اکسید کاهش می‌یابد.

تأثیر ترشوندگی

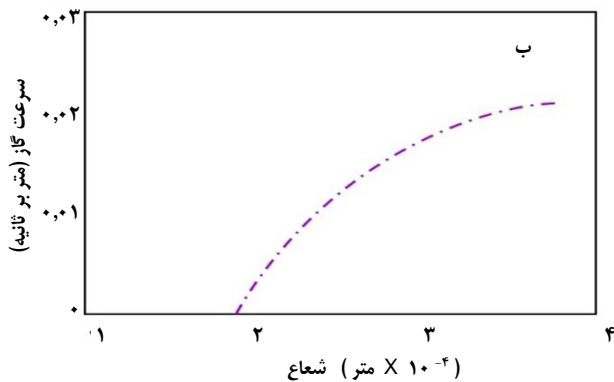
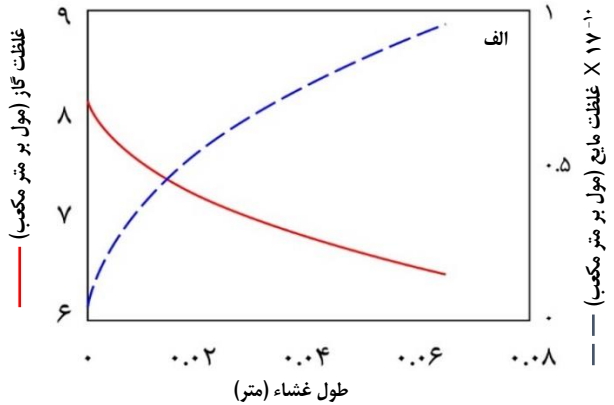
در صورتی که روزنه‌های غشا از مایع پر شوند، میزان جذب به علت وجود یک مقاومت اضافی در برابر انتقال جرم به شدت کاهش می‌یابد که این اثر در شکل ۶ قابل دیدن می‌باشد. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود افزایش درصد ترشوندگی روزنه‌های غشا از صفر تا صد درصد باعث افزایش ماندگی CO_2 در گاز ورودی و سرانجام افت انتقال جرم و کاهش بازده در حدود ۱۵ درصد خواهد بود.

جدول ۳: مقایسه داده‌های تجربی و محاسباتی و محاسبه خطای میانگین

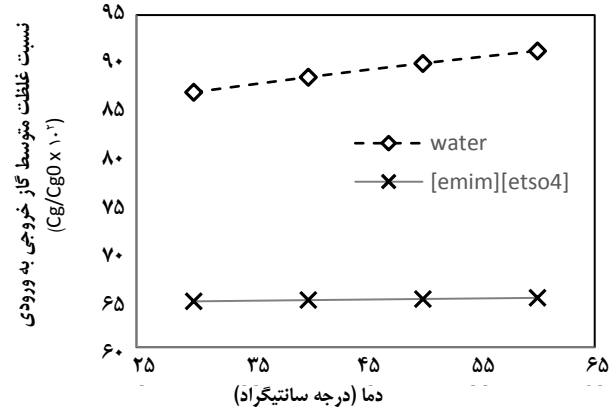
شرایط غشاء	نتیجه‌های محاسباتی مدل	داده تجربی	خطای نقطه به نقطه
شرایط غشای خشک	۳۱/۳۳۸۸	۱۹/۹	۶/۳۰%
	۲۱/۲۰۲۳	۱۹/۶۴۲۹	۷/۳۵%
	۲۰/۸۷۴۴	۱۹/۰۴۴۷	۸/۷۷%
	۱۹/۱۲۵۵	۱۷/۱۵۹	۱۰/۲۸%
	۱۶/۸۳۷	۱۵/۶۶۰۳	۶/۹۹%
	۱۳/۲۴	۱۲/۸۷۰۸	۲/۷۹%
	۱۲/۹	۱۴/۰۵	۸/۹۱%
	۱۲/۰۸۱۲	۱۲/۵۲	۳/۶۳%
	۱۱/۸۴۲۲	۱۱/۹۸۷۹	۱/۲۳%
	۱۰/۹۱۸۶	۱۰/۳۸۶	۴/۸۸%
شرایط غشای مرطوب	۹/۸۴۱۲۸	۹/۵۳۳۶۴	۳/۱۳%
	۱۸/۳۲۰۳	۱۶/۵۲۷	۹/۷۹%
	۱۵/۹۲۳۷	۱۴/۴	۹/۵۷%
	۱۱/۱۰۶۳	۱۱/۵۳۵۴	۳/۸۶%
	۹/۹۴۴۲	۱۱/۰۲۲	۱۰/۸۴%
	۹/۱۰۶۳۳	۱۰/۳۳۲۹	۱۳/۴۷%
۸/۳۷۷۵۲		۹/۷۱	۱۵/۹۱%
۷/۵۱%			خطای میانگین:

تأثیر شدت جریان گاز

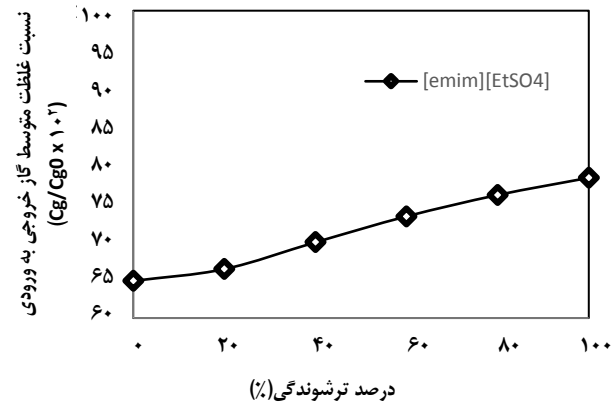
در شدت جریان‌های بالای گاز، تفاوت بین شدت جریان مایع و گاز ممکن است زیاد شود و عمل جذب به خوبی صورت نگیرد. اثر شدت جریان گاز بر جذب در شکل ۴ آمده است. با افزایش شدت جریان گاز در یک غلظت خاص، مقدار بیش‌تری گاز وارد تماس دهنده‌ی غشایی می‌شود که باعث افزایش نیرو محرکه‌ی انتقال جرم و در نتیجه افزایش غلظت و شار انتقال جرم در اثر افزایش شدت جریان گاز می‌شود. به‌نوعی غلظت در گاز خروجی افزایش می‌یابد. با توجه به این که جذب کربن دی‌اکسید در آب و مایع یونی $[Emim][EtSO_4]$ از نوع جذب فیزیکی است و واکنش شیمیایی ندارد، بنابراین برای عمل جذب دو پارامتر ضریب نفوذ و حلالیت فیزیکی که در اینجا با ثابت هنری بیان شده است مهم می‌باشند. با توجه به نتیجه‌هایی که تا به حال ارائه شده‌اند، در مایع یونی $[Emim][EtSO_4]$ هم ضریب نفوذ و هم حلالیت فیزیکی یا ثابت هنری بهتر از آب است و دیده می‌شود که در همه بازه شدت جریان‌ها عملکرد بهتری نسبت به آب دارد. طوری که اختلاف غلظت گاز خروجی به گاز ورودی با افزایش ۳۰ میلی‌لیتر بر دقیقه شدت جریان گاز حدود ۱۵ درصد خواهد بود. این در حالیست که اگر از آب به تهایی بدون حضور مایع یونی در عمل جداسازی استفاده شود با همین افزایش شدت جریان اختلاف غلظت گاز خروجی از گاز ورودی چیزی حدود ۵ درصد خواهد بود.



شکل (۷): تأثیر طول و شعاع غشاه روی غلظت کربن دی اکسید در فاز مایع و گاز



شکل (۸): تأثیر دمای خوراک (شدت جریان مایع و گاز ۱۰ و ۴۰ میلی لیتر بر دقیقه، درصد CO₂ در گاز ورودی: ۲۰ درصد مولی)



شکل ۹: تأثیر ترشوندگی بر جذب CO₂ (شدت جریان مایع و گاز ۱۰ و ۴۰ میلی لیتر بر دقیقه، درصد CO₂ در گاز ورودی: ۲۰ درصد مولی، دمای ۳۰ درجه سلسیوس)

بیانگر افزایش سرعت گاز در پوسته خارجی بوده که با توجه به کاهش سطح مقطع کانال عبور گاز و همچنین افزایش سطح محیطی لوله الیاف و افزایش نرخ عبور گاز از این جداره، می‌توان انتظار چنین رفتاری را از سامانه داشت که بیانگر افزایش میزان جذب گاز و انتقال آن از مجرای بیرونی غشا به مجرای درونی می‌باشد؛ هرچند که این پارامتر نیز در حوالی مقدار 4×10^{-4} متر نیز به بیش‌ترین اثر بخشی خود رسیده و افزایش بیش از حد این پارامتر نیز مانند شکل A، بدون تأثیر معنی دار در سرعت گاز خواهد بود.

نتیجه گیری

نتیجه‌های خروجی از مدل ارایه شده با نتیجه‌های آزمایشگاهی موجود در مقاله کرور و سیرکار مقایسه شد و پس از اطمینان از درستی مدل، تأثیر عامل‌های گوناگون بر جذب کربن دی اکسید پیش‌بینی شد. یکی از این پارامترهای مؤثر بر میزان درصد جداسازی کربن دی اکسید، شدت جریان مایع و گاز می‌باشد. محاسبه‌ها نشان داد که هر چه شدت جریان مایع بیشتر باشد سرعت عبور مایع از درون فایبرها افزایش یافته و در نتیجه مایع تازه سریع‌تر جایگزین می‌شود. بنابراین زمان تماس مایع

تأثیر طول و شعاع غشا روی غلظت کربن دی اکسید در فاز مایع و گاز

همان‌گونه که در نمودارهای شکل ۷ دیده می‌شود، بر مبنای شبیه‌سازی مدل پیشنهادی در این پژوهش، می‌توان اثر طول و شعاع غشا را در قالب نمودارهای یادشده استخراج نمود. در بخش A تأثیر طول الیاف تو خالی را بر روی غلظت‌های فاز مایع و گاز و رفتار معکوس این دو پارامتر در قبال تغییرهای طول نشان می‌دهد که به خوبی مؤید تأثیر مثبت این پارامتر بر روی جداسازی CO₂ از فاز گاز و ورود به فاز مایع می‌باشد. همان‌گونه که دیده می‌شود، با افزایش طول، از غلظت گاز کاسته شده و غلظت فاز مایع افزایش یافته است. همچنین کندی شیب این منحنی در حوالی طول الیاف برابر ۰.۰۶ متر، بیانگر بهینه بودن این مزازه از طول الیاف بوده و با افزایش بیش‌تر طول الیاف نمی‌توان انتظار تغییر بیش‌تری در میزان جذب گاز داشت. در بخش B تأثیر شعاع غشا بر مبنای نتیجه‌های مدل سازی استخراج شده که

و گاز کم‌تر شده و مقاومت در برابر انتقال جرم در فاز مایع کاهش یافته و در نتیجه میزان جذب و درصد جداسازی افزایش می‌یابد. البته در این میان می‌بایست فاکتور ترشوندگی غشاء هم مد نظر قرار گیرد، چرا که با افزایش شدت جریان جریان مایع، افت فشار دو سر غشا بیش‌تر شده و در نتیجه پدیده ترشوندگی اتفاق می‌افتد که باعث افت شدید درصد جداسازی کربن دی‌اکسید می‌شود. از دیگر پارامترهای مهم می‌توان به شدت جریان جریان گاز اشاره کرد. با افزایش شدت جریان جریان گاز در یک غلظت خاص، مقدار بیش‌تری گاز وارد تماس دهنده‌ی غشایی شده که منجر به افزایش نیرو محرکه‌ی انتقال جرم و در نتیجه افزایش میزان جذب و البته کاهش درصد جداسازی می‌شود. با افزایش دمای مایع جاذب، حلالیت فیزیکی که با ثابت هنری بیان می‌شود افت می‌کند ولی در مقابل، ضریب نفوذ به دلیل کاهش گرانیوی مایع افزایش می‌یابد. نتیجه‌های حاصل از مدل‌سازی نشان داد که تأثیر حلالیت فیزیکی نسبت به ضریب نفوذ بیشتر بوده و در کل میزان جذب کاهش می‌یابد. در حالت ترشوندگی، به دلیل این‌که روزنه‌های غشا توسط مایع پر می‌شوند، مقاومت اضافی در برابر انتقال جرم ایجاد شده و میزان جذب نسبت به حالت تر نشده شدیداً کاهش می‌یابد. افزایش طول غشا تا حد معینی باعث افزایش غلظت CO_2 در فاز مایع و کاهش غلظت CO_2 در فاز گاز میشود. همچنین افزایش شعاع غشاء تا حد معینی سبب افزایش سرعت عبور گاز از پوسته (اطراف الیاف) و سرانجام افزایش بازده جذب CO_2 در فاز مایع خواهد نمود. توجه به این نکته ضروری است که افزایش طول غشا تا حد معینی کمک به افزایش جذب در فاز مایع و کاهش مقدار CO_2 در فاز گاز خواهد کرد.

فهرست نمادها

Rw	شعاع سطح تلاقی گاز - مایع (m)
T	دما (K)
U	سرعت (m/s)
ρ	چگالی (g/cm^3)
δ	طول ترشوندگی حفره‌های غشاء
μ	لزجت (mPa.s)
R	ثابت گازها
n	تعداد الیاف در غشا
θ	چگالی پرتکننده‌ها
τ	انعطاف پذیری غشا
av	میانگین
e	مؤثر
G	گاز
in	ورودی
j	شماره گونه
L	مایع
M	غشاء
P	تخلخل
[Emim][EtSO4]	1-ethyl-3-methylimidazolium ethylsulfate
C	غلظت ($kmol/m^3$)
d	قطر (m)
dp	قطر حفره (cm)
D	نفوذ پذیری (m^2/s)
Dkj	نفوذ پذیری ناسن برای گونه J (m^2/s)
H	ثابت هانری ($kmol/kmol$)
J	شار جذب ($kmol/m^2 s$)
M	وزن مولکولی ($kg/kmol$)
P	فشار (kPa)
r	مختصات (فاصله شعاعی) (m)
Re	شعاع سطح آزاد الیاف (m)
Ri	شعاع داخلی الیاف (m)
Rj	نرخ واکنش گونه J ($kmol/m^3 s$)
Rm	قطر داخلی مدول (m)
Ro	شعاع خارجی الیاف (m)
z	مختصات محوری (ارتفاعی) (m)
ε	تخلخل غشاء
Re	عدد رینولدز

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۲۷

مراجع

- [1] Fougerit V., Pozzobon V., Pareau D., Théoleyre M. A., Stambouli M., *Experimental and Numerical Investigation Binary Mixture Mass Transfer in a Gas-Liquid Membrane Contactor*, *Journal of Membrane Science*, **572**: 1-11 (2019).
- [2] Ahmadi H., Hashemifard S.A., Ismail A.F., *A Research on CO₂ Removal Via Hollow Fiber Membrane Contactor: The Effect of Heat Treatment*, *Chemical Engineering Research, and Design* **120**: 218-230 (2017).
- [۳] سروش، سپیده؛ بختیاری، امید، مدل‌سازی بازیابی موادخوش بو از جریان‌های دربرگیرنده آن‌ها با تماس دهنده‌های غشایی، *نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران*، (۱) ۳۳: ۹ تا ۱۹ (۱۳۹۳)
- [4] Nakhjiri A.T., Taghvaie A., Heydarinasab A., Bakhtiari O., and Mohammadi T., *Experimental Investigation and Mathematical Modeling of CO₂ Sequestration From CO₂/CH₄ Gaseous Mixture Using MEA and TEA Aqueous Absorbents Through Polypropylene Hollow Fiber Membrane Contactor*, *Journal of Membrane Science* **565**: 1-13 (2018).
- [5] Keshavarz P., Fathikalajahi J., Ayatollahi S., *Analysis of CO₂ Separation and Simulation of a Partially Wetted Hollow Fiber Membrane Contactor*. *Journal of Hazardous Materials*, **152**(3): 1237-1247 (2008).
- [6] Gabelman A., Hwang S.A., *Hollow Fiber Membrane Contactors*, *Journal of Membrane Science* **159**(1-2): 61-106 (1999).
- [۷] باکری، غلامرضا؛ لطفی، شبنم؛ بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی بر فرایند فراتصفیه آب پنیرو مقاومت غشا با استفاده از غشای الیاف توخالی نانوساختار پلی اترسولفون، *نشریه شیمی و مهندسی شیمی*، (۱) ۳۷: ۱۳۳ تا ۱۴۳ (۱۳۹۷)
- [8] Mesbah, M., Momeni, M., Soroush, E., Shahsavari, S., & Galledari, S. A., *Theoretical Study of CO₂ Separation from CO₂/CH₄ Gaseous Mixture Using 2-Methyl Piperazine-Promoted Potassium Carbonate Through Hollow Fiber Membrane Contactor*, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **7**(1): 102781 (2019).
- [9] Andreu J.S., Vega, L.F., *Capturing the Solubility Behavior of CO₂ in Ionic Liquids by a Simple Model*, *The Journal of Physical Chemistry C*, **111**(43): 16028-16034 (2007).
- [10] Rogers R.D., "Tonic Liquids: Industrial Applications to Green Chemistry", *ACS Symposium Series*. American Chemical Society (2002).
- [11] Esato K., Eiseman B., *Experimental Evaluation of Gore-Tex Membrane Oxygenator*, *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, **69**(5): 690-697 (1975).
- [12] Dindore V.Y., Brillman D.W.F., Versteeg, G.F., *Modelling of Cross-Flow Membrane Contactors: Mass Transfer with Chemical Reactions*, *Journal of Membrane Science*, **255**(1-2): 275-289 (2005).

- [13] Masoumi S., Keshavarz P., Rastgoo Z., [Theoretical Investigation on CO₂ Absorption Into DEAB Solution Using Hollow Fiber Membrane Contactors.](#), *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **18**: 23-30 (2014).
- [14] Lu J.G., Lu C.T., Chen, Y., Gao, L., Zhao, X., Zhang, H., Xu, Z.W., [CO₂ Capture by Membrane Absorption Coupling Process: Application of Ionic Liquids.](#), *Applied Energy*, **115**: 573-581 (2014).
- [15] Rezakazemi, M., Niazi, Z., Mirfendereski, M., Shirazian, S., Mohammadi, T., Pak, A., [CFD Simulation of Natural Gas Sweetening in a Gas-Liquid Hollow-Fiber Membrane Contactor.](#), *Chemical Engineering Journal*, **168**(3): 1217-1226 (2011).
- [۱۶] نجف لو، اعظم؛ مدلسازی ترمودینامیکی جذب دی اکسیدکربن در محلول آبی متیل دی اتانول آمین، تشریح شیمی و مهندسی شیمی ایران، **۳۸**(۲): ۱۸۳ تا ۱۹۴ (۱۳۹۸)
- [17] Ben-Mansour R., Basha M., Qasem N.A., [Multicomponent and Multi-Dimensional Modeling and Simulation of Adsorption-Based Carbon Dioxide Separation.](#), *Computers & Chemical Engineering*, **99**: 255-270 (2017).
- [18] McNeil M.V., Wilfart F.M., Haelssig J.B., [Modelling Hollow Fiber Membrane Modules for Anesthesia Gas Separation.](#), *Chemical Engineering Science*, **191**: 479-489 (2018).
- [19] Chu Y., Lindbråthen A., Lei L., He X., Hillestad, M., [Mathematical Modeling and Process Parametric Study of CO₂ Removal from Natural Gas by Hollow Fiber Membranes.](#), *Chemical Engineering Research and Design*. (2019).
- [20] Haghayegh M., Zabihi F., Eikani M.H., Kamyra Moghadas B., Vaziri Yazdi S.A., [Supercritical fluid Extraction of Flavonoids and Terpenoids from Herbal Compounds: Experiments and Mathematical Modeling.](#), *Journal of Essential oil Bearing Plants*, **18**(5): 1253-1265 (2015).
- [21] Moghadas B.K., Safekordi A.A., Honarvar B., Kaljahi J.F., Yazdi S.V., [Supercritical Extraction of Flavonoid Compounds from Dorema aucheri Boiss., Experimental and Modeling Using CH₂Cl₂ as Co-Solvent.](#) *Asian Journal of Chemistry*, **24**(8): (2012).
- [22] Froba A.P., Kremer H., Leipertz A., [Density, Refractive Index, Interfacial Tension, and Viscosity of Ionic Liquids \[EMIM\]\[EtSO₄\],\[EMIM\]\[NTf₂\],\[EMIM\]\[N\(CN\)₂\], and \[OMA\]\[NTf₂\] in Dependence on Temperature at Atmospheric Pressure.](#), *The Journal of Physical Chemistry B*, **112**(39): 12420-12430 (2008).
- [23] Zhang H.Y., Wang R., Liang D.T., Tay J.H., [Modeling and Experimental Study of CO₂ Absorption in a Hollow Fiber Membrane Contactor.](#), *Journal of Membrane Science*, **279**(1-2): 301-310 (2006).
- [24] Wang R., Li D.F., Liang D.T., [Modeling of CO₂ Capture by Three Typical Amine Solutions in Hollow Fiber Membrane Contactors.](#), *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, **43**(7): 849-856 (2004).
- [25] Karoor S., Sirkar K.K., [Gas Absorption Studies in Microporous Hollow Fiber Membrane Modules.](#), *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **32**(4): 674-684 (1993).

- [26] Mehdipour M., Karami M. R., Keshavarz P., Ayatollahi S., *Analysis of CO₂ Separation with Aqueous Potassium Carbonate Solution in a Hollow Fiber Membrane Contactor.*, *Energy & Fuels*, **27**(4): 2185-2193 (2013).
- [27] Keller K.H., Stein T.R., *A Two-Dimensional Analysis of Porous Membrane Transport.*, *Mathematical Biosciences*, **1**(3): 421-437 (1967).
- [28] Happel J., *Viscous Flow Relative to Arrays of Cylinders.*, *AIChE Journal*, **5**(2): 174-177 (1959).
- [29] Versteeg G.F., Van Swaaij W.P., *Solubility and Diffusivity of Acid Gases (Carbon Dioxide, Nitrous Oxide) in Aqueous Alkanolamine Solutions.*, *Journal of Chemical & Engineering Data*, **33**(1): 29-34 (1988).
- [30] Bird R.B., Stewart W.E., Lightfoot E.N., *"Transport Phenomena"*, John Wiley & Sons, Inc. (2007).
- [31] Jalili A.H., Mehdizadeh A., Shokouhi M., Ahmadi A.N., Hosseini-Jenab M., Fateminassab F., *Solubility and Diffusion of CO₂ and H₂S in the Ionic Liquid 1-Ethyl-3-Methylimidazolium Ethyl Sulfate*, *The Journal of Chemical Thermodynamics*, **42**(10): 1298-1303 (2010).
- [32] Streeter V. L., Wylie E. B., Bedford K. W., *"Fluid Mechanics"*, McGraw-Hill College 1997).