



DOI: 10.22034/ijche.2023.331807.1188

This journal is an open access journal licensed under an Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International license (CC BY-NC-ND 4.0).

Simulation of Carbon Dioxide Removal by Amine Based Solvents in Polypropylene Hollow Fiber Membrane Reactor

M. Makhsousi¹, M. R. Jafari Nasr^{2*}, H. Baniasadi³

1- M. Sc. in Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Professor of Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

3- Assistant Professor of Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Email: drnasr50@yahoo.ca

Abstract

The removal of carbon dioxide due to environmental problems is still of great interest to researchers. In this study, simulation of carbon dioxide removal by absorption four amine base solvents including; monoethanolamine (MEA), diethanolamine (DEA), methyl diethanolamine (MDEA) and aminomethylpropanol (AMP) in a polypropylene hollow fiber membrane reactor is investigated. A comparative study for solvents by multi-physics Comsol software based on fluid dynamics (CFD) calculations is performed. The results showed that the best adsorption rate was obtained by MEA solvent with 88% CO₂ absorption rate. The absorption of carbon dioxide by each amine-based solvents in the references is investigated separately. The simulation results are validated separately for each solvent. An acceptable consistency is obtained between the present simulation data and the results of others given references. Finally, as a result of this study, it is shown that the present simulation is powerfully provided suitable and alternative data for carbon dioxide removal by each four traditional amine-based solvents in compare with the available experimental data.

Received: 27 February 2022

Accepted: 20 May 2023

Page Number: 8-21

Keywords:

CO₂ Removal,
Membrane,
Amine Based Solvents,
Simulation,
Polypropylene

Please Cite this Article Using:

Makhsousi, M., Jafari Nasr, M. R., & Baniasadi, H. (2024). Simulation of Carbon Dioxide Removal by Amine Based Solvents in Polypropylene Hollow Fiber Membrane Reactor. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 23(133), 8-21, [In Persian].



شبهه‌سازی حذف دی‌اکسید کربن با حلال‌های پایه آمینی در راکتور غشایی الیاف توخالی پلی‌پروپیلنی

مریم مخصوصی^۱، محمدرضا جعفری نصر^{۲*}، حسین بنی‌اسدی^۳

۱- کارشناس ارشد مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استاد تمام مهندسی شیمی، پژوهشگاه صنعت نفت و دانشکده مهندسی شیمی، واحد علوم و تحقیقات،

دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- استادیار مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

پیام‌نگار: drnsr50@yahoo.ca

چکیده

حذف دی‌اکسید کربن به دلیل مشکلات محیط زیستی ناشی از آن، هم‌چنان مقصود اصلی پژوهشگران است. در این مطالعه مقایسه‌ی نتایج شبهه‌سازی حذف دی‌اکسید کربن به وسیله جذب هر چهار حلال پایه آمینی متداول شامل: مونیو اتانول آمین (MEA)، دی‌تانول آمین (DEA)، متیل‌دی‌تانول آمین (MDEA) و آمینومتیل پروپانول (AMP) در راکتور غشایی الیاف توخالی پلی‌پروپیلنی و بررسی مقایسه‌ی حلال‌ها با مراجع دیگر به صورت مجزا با نرم‌افزار کامسول مولتی-فیزیک بر پایه محاسبات دینامیکی سیالاتی (CFD) شبهه‌سازی شده‌است. نتایج کار حاضر با هر چهار حلال پایه آمینی بر حسب طول غشا (بدون بعد) با داده‌های مورد مطالعه‌ی سایر پژوهشگران مقایسه شده‌است. این نتایج نشان داد که بهترین میزان جذب با حلال MEA با میزان جذب ۸۸٪ از گاز CO₂ به دست آمده‌است. نتایج شبهه‌سازی‌ها برای هر چهار حلال پایه آمینی در مقایسه با خروجی مدل سایر پژوهشگران به صورت جداگانه با مراجع دیگر اعتبارسنجی شده‌اند و سازگاری قابل قبولی بین داده‌های شبهه‌سازی حاضر با نتایج دیگران دیده می‌شود. نتیجه این بررسی نشان داد که شبهه‌سازی حاضر نیز قادر است برای موارد حذف دی‌اکسید کربن به وسیله هر چهار حلال پایه آمینی در راکتور غشایی الیاف توخالی پلی‌پروپیلن، داده‌های مناسب و جای‌گزینی در مقایسه با مدل تجربی در بر داشته باشد.

کلیدواژه‌ها:

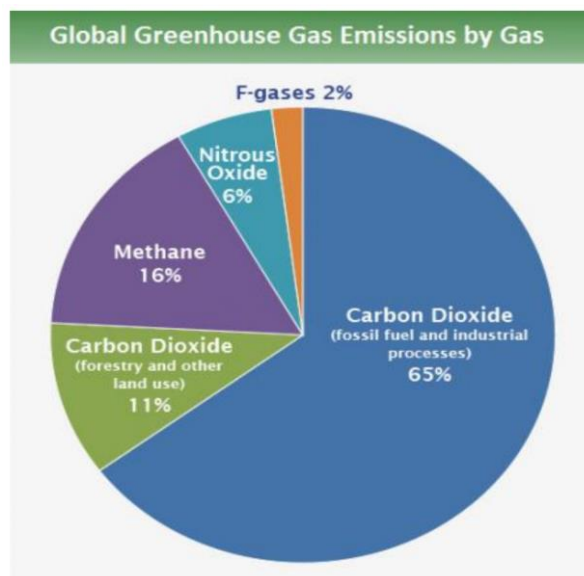
حذف CO₂،
غشا،
حلال‌های پایه آمینی،
شبهه‌سازی،
پلی‌پروپیلن

* تهران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، پژوهشگاه صنعت نفت و دانشکده مهندسی شیمی
استناد به مقاله:

مخصوصی، مریم، جعفری نصر، محمدرضا، و بنی‌اسدی، حسین. (۱۴۰۳). شبهه‌سازی حذف دی‌اکسید کربن با حلال‌های پایه آمینی در راکتور غشایی الیاف توخالی پلی‌پروپیلنی، نشریه مهندسی شیمی ایران، ۲۳(۱۳۳)، ۲۱-۸.

۱. مقدمه

شوربختانه توسعه فعالیت‌های صنعتی اخیر موجب شده تا میزان غلظت گازهای گلخانه‌ای در هوا کره افزایش یابد. افزایش این گازها مهم‌ترین عامل در پدیده گرمایش زمین شناخته شده است. گاز CO₂^۱ حدود ۶۵ درصد از گازهای گلخانه‌ای را تشکیل می‌دهد. نیمی از CO₂ منتشرشده در جو، به وسیله صنایع و کارخانه‌هایی با سوخت‌های فسیلی، ایجاد می‌شود [۱]. در شکل (۱) توزیع میزان گازهای گلخانه‌ای در جو زمین ملاحظه شده است. در سال‌های اخیر حدود ۲٪ از گاز فلوئوردار^۲ مربوط به F-gases، ۶٪ مربوط به اکسید نیتروژن، ۱۶٪ مربوط به متان و ۶۵٪ مربوط به گاز CO₂ است، این مقادیر نشان از نقش پررنگ گاز CO₂ در اثر گازهای گلخانه‌ای است. فرایند حذف دی‌اکسیدکربن شامل سه مرحله و عبارت است از: جداسازی، انتقال و ذخیره‌سازی [۷-۲].



شکل ۱. توزیع میزان گازهای گلخانه‌ای در جو زمین، در سال ۲۰۱۸ میلادی تا تاریخ ۲۲ دسامبر [۷-۵].

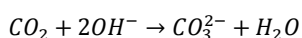
Figure 1. Distribution of greenhouse gases in the Earth's atmosphere, in 2018 until December 22 [5-7].

فناوری‌هایی که در حال حاضر برای جداسازی CO₂ استفاده می‌شود، بر مبنای فرایندهای فیزیکی و شیمیایی است. فرایندهای شیمیایی متداول برای جداسازی CO₂ و دو فرایند جذب و جذب سطحی است

1. Carbon Dioxide
2. Fluorinated Gas

که عموماً دارای چندین مشکل اساسی از جمله؛ طغیان و کف کردن، کانالیزه شدن (مسیرهای خالی مجزا) و بالابودن هزینه‌های عملیاتی است [۱]. در پژوهش‌های اخیر به کارگیری تماس‌دهنده‌های غشایی الیاف توخالی پلی‌پروپیلن برای جذب گاز دی‌اکسیدکربن (CO₂) بسیار محبوب شده است [۱ و ۲]. به طور رایج، جذب CO₂ به وسیله جذب هر چهار حلال پایه آمینی با استفاده از شگرد تماس‌دهنده غشایی الیاف توخالی پلی‌پروپیلن حاصل می‌شود [۱ و ۲].

در شکل (۲) جداسازی دی‌اکسیدکربن به وسیله جذب حلال MEA^۳ در یک تماس‌دهنده غشایی الیاف توخالی پلی‌پروپیلن نشان داده شده است. ساختار تماس‌دهنده غشایی از سه بخش مجزا (لوله، غشا و پوسته) تشکیل شده و به صورت نمایشی در شکل (۲) آمده است. برای این منظور جریان سیالاتی فاز گاز در درون پوسته و فاز مایع در درون لوله در جریان است. دارای جریان ناهمسو و موازی است. فاز گاز از بالا به پایین و فاز مایع از پایین به بالا جریان می‌یابد؛ به طوری که فاز گاز از قسمت پوسته به غشا و به لوله حرکت و فاز مایع از قسمت لوله به غشا و به پوسته حرکت می‌کند [۱ و ۲]. غشا دارای خاصیت نفوذپذیری و انتخاب‌پذیری است و تمایل دارد تا ضمن عدم عبور نیتروژن، گاز دی‌اکسیدکربن را از خود عبور دهد. با جذب آب بر روی سطح به وسیله غشا، حلال به تمام منافذ غشا نفوذ می‌کند و حذف CO₂ همراه با واکنش شیمیایی زیر به وسیله حلال انجام می‌شود [۱ و ۲].



در تماس‌دهنده غشایی، دی‌اکسیدکربن در قسمت پوسته از بالا وارد و از پایین خارج و حلال MEA در قسمت لوله از پایین وارد و از بالا خارج می‌شود. در شکل (۲) جداسازی CO₂ در قسمت غشا به کمک نفوذ و در قسمت لوله همراه با واکنش شیمیایی زیر انجام می‌شود [۲]. از آنجایی که عملکرد آمین‌های نوع اول، نوع دوم و نوع سوم ارتباط نزدیکی با نسبت محصول بی‌کربنات به کاربامات دارند، درک سازوکار واکنش شیمیایی برای توسعه حلال‌های با عملکرد بالا ضروری است. از سوی دیگر توانایی آزادسازی یون OH⁻ به وسیله یک حلال، یکی دیگر از برتری‌های آن محسوب می‌شود؛ چراکه مطابق واکنش بالا باعث تبدیل CO₂ به یون CO₃²⁻ و جذب با

3. Monoethanol

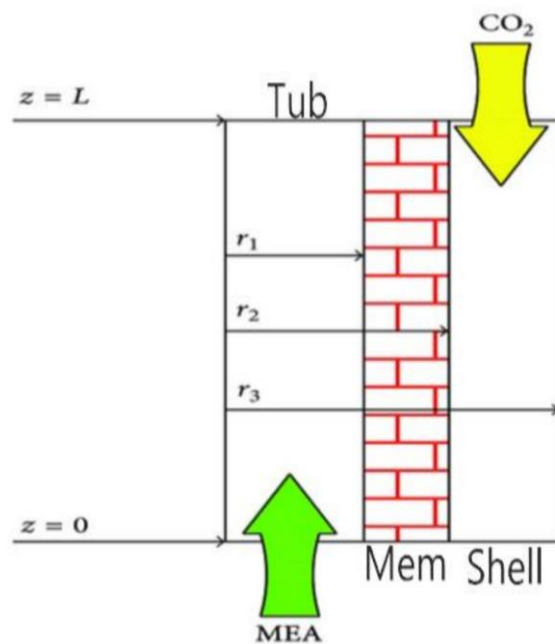
جداسازی برودتی، فناوری غشایی و جذب فیزیکی. غشای پلی‌پروپیلن از یک لایه بسیار نازک انتخابگر و یک لایه محافظ بسیار ضخیم با تراوایی بالا تشکیل می‌شود. در نتیجه درصد حذف دی‌اکسیدکربن با تماس دهنده غشایی فیبر توخالی به وسیله غشای پلی‌پروپیلن بالاتر از پلی‌وینیلیدن دی‌فلوراید و پلی‌تترافلووراتیلن است [۸-۳-۱].

پژوهش‌های مختلفی بر روی مدل‌سازی حذف گاز دی‌اکسیدکربن به وسیله جذب حلال‌های پایه آمینی در راکتور با غشای پلی‌پروپیلنی انجام گرفته که نتایج آن در مرجع [۹] گردآوری شده است.

در این مقاله ابتدا نتایج حذف CO_2 به وسیله جذب هر چهار حلال پایه آمینی با یکدیگر مقایسه شده و پس از آن نتایج مقایسه شیشه‌سازی حذف CO_2 به وسیله جذب هر چهار پایه آمینی حاضر با داده‌های مورد مطالعه‌ای [۱۰] انجام شده است. در نهایت نتایج مقایسه شیشه‌سازی حاضر حذف CO_2 با جذب هر چهار حلال پایه آمینی با سایر مقالات دیگر به صورت مجزا از مراجع متنوع ارائه داده شده است. در نتیجه حاصل هر چهار حلال به طور جداگانه با بهره‌گیری از اطلاعات مراجع [۱۰ و ۳ و ۲] شیشه‌سازی شده است. همچنین انتخاب بهترین حلال و همچنین مقایسه بهترین حلال با مدل تجربی نیز شیشه‌سازی شده است که به طور نمونه جذب با حلال (MEA) در یک گزارش از نتایج تجربی به ۹۳٪ و در شیشه‌سازی حاضر میزان جذب به ۹۰٪ به دست آمده است. جزئیات مدل‌سازی، به همراه فرضیات مدل، هندسه مدل، معادلات حاکم بر آن و روش حل آن در مراجع [۹ و ۱۰] به طور کامل آمده است؛ لذا در زیر ابتدا به اختصار مبانی مدل‌سازی در این نوع راکتورها در نظر گرفته می‌شود، سپس با استفاده از آن به شیشه‌سازی و ارائه نتایج و راستی‌آزمایی آن‌ها پرداخته شده است.

۲. مدل‌سازی

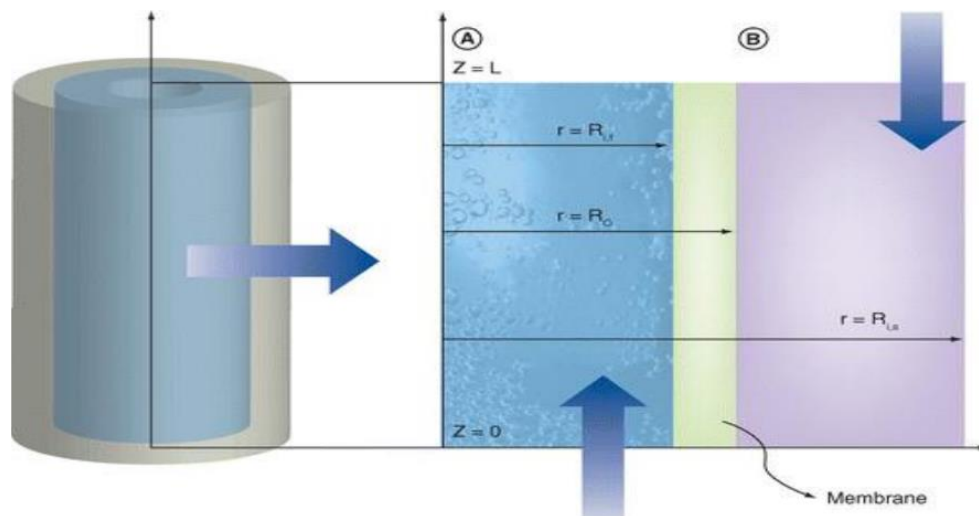
در شکل‌های (۳) و (۴) به صورت طرحواره، قسمت‌های مختلف یک تماس دهنده غشایی الیاف توخالی پلی‌پروپیلنی و سازوکارهای مختلف واکنش شیمیایی بین CO_2 و MEA به وسیله داده‌های مورد مطالعه‌ای [۱۰] نشان داده شده است.



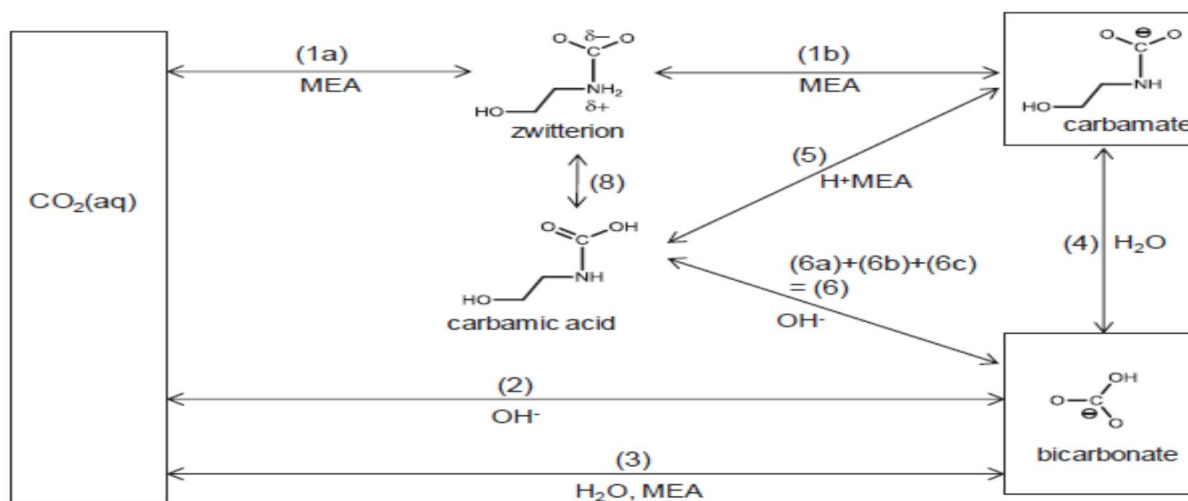
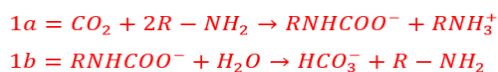
شکل ۲. نمودار طرحواره جداسازی دی‌اکسیدکربن به وسیله حلال MEA در یک تماس دهنده غشایی الیاف توخالی پلی‌پروپیلن [۲].

Figure 2. Schematic diagram of carbon dioxide separation by MEA solvent in a polypropylene hollow fiber membrane contactor [2].

حلال می‌شود، که این امر معمولاً به وسیله پایه آب حلال انجام می‌پذیرد. با استفاده از غشاهای پلی‌پروپیلن می‌توانند حذف دی‌اکسیدکربن را با گازهای حاصل از احتراق، گاز طبیعی، نیتروژن و هیدروژن جداسازی کنند. غشای پلی‌پروپیلن را می‌توان به عنوان یک فاز که اجزای خوراک به صورت انتخابی از آن عبور می‌کنند، در نظر گرفت. بهترین روش برای حذف دی‌اکسیدکربن از تماس دهنده غشایی پلی‌پروپیلنی استفاده از جریان‌های گازی شناخته شده است. با افزایش جریان و غلظت جذب می‌توان جذب دی‌اکسیدکربن را افزایش داد و از طرف دیگر با افزایش جریان گاز میزان جذب دی‌اکسیدکربن کاهش می‌یابد. تماس دهنده‌های غشایی پلی‌پروپیلنی نوع جدیدی از غشاهای ریزمتخلخل هستند که به شکل الیاف توخالی هستند و نقش مهم غشاها جلوگیری از آمیزش دو فاز محلول در یکدیگر است. حذف دی‌اکسیدکربن از غشای پلی‌پروپیلنی طی پنج فرایند است: جذب سطحی، جذب شیمیایی،



شکل ۳. قسمت‌های مختلف یک تماس‌دهنده غشایی الیاف توخالی پلی‌پروپیلن [۱۰].
Figure 3. Different parts of a polypropylene hollow fiber membrane contactor [10].



شکل ۴. سازوکارهای مختلف واکنش شیمیایی بین CO₂ و MEA [۱۱-۱۴].
Figure 4. Different chemical reaction mechanisms between MEA and CO₂ [11-14].

در مدل‌سازی حاضر برای شکل (۳) و (۴) جهت حرکت و نحوه تماس جریان فاز گاز و فاز مایع موازی و ناهمسو است. فاز گاز از بالا به پایین و فاز مایع از پایین به بالا جریان می‌یابد. انتقال جرم در محیط متخلخل در بخش غشاست. گاز مورد مطالعه، مخلوطی از گاز

CO₂ و N₂^۱ است که تنها CO₂ قابل جذب و انتقال به فاز مایع است. شرایط مدل‌سازی آن از جمله؛ ضریب نفوذ و سایر خواص فیزیکی و شیمیایی گاز و مایع ثابت، تغییرات دما در طول فرایند ثابت، فرایند آیزوترمال، تغییرات فشار بر اساس تغییرات سرعت ورودی گاز و

1. Nitrogen

پلی‌پروپیلنی شبه‌سازی شده‌است؛ به طوری که در این شبه‌سازی با کاهش دبی جریان فاز گاز میزان سرعت واکنش جذب در حلال در قسمت لوله افزایش یافت که به دلیل افزایش زمان تماس فاز مایع و فاز گاز و افزایش میزان انتقال جرم در طول کل راکتور غشایی است. گاز دی‌اکسیدکربن جذب حلال‌های پایه آمینی می‌شود و با دبی 300 ml/min به کمترین کاهش غلظت خروجی در انتهای لوله راکتور رسیده‌است. از سویی دیگر با کاهش دبی جریان گاز در طول کل راکتور، میزان حذف دی‌اکسیدکربن در خروجی کل راکتور افزایش یافت. در صورتی که بیشترین افزایش جذب در قسمت آخر لوله راکتور است. این نتایج نشان می‌دهد که در طول کل راکتور غشایی، بهترین حلال برای حذف دی‌اکسیدکربن حلال MEA است. به‌طور ویژه در (شکل ۵-۷) با کاهش دبی جریان گاز از مقدار 700 ml/min تا 300 ml/min میزان جذب دی‌اکسیدکربن برای حلال MEA در خروجی کل راکتور افزایش یافت و غلظت خروجی دی‌اکسیدکربن در طول کل راکتور غشایی کاهش یافت و در نهایت با کمترین دبی در بخش پایانی لوله راکتور به صفر رسید و در نتیجه بالاترین میزان جذب CO_2 در خروجی لوله راکتور به دست آمده‌است. در شبه‌سازی حاضر به‌طور مشابه در قسمت‌های (a, b, d) در مورد سایر حلال‌های دیگر نیز چنین روالی از تغییرات جذب و با میزان جذب‌های متفاوتی مشاهده می‌شود.

۲-۳ مقایسه نتایج در دبی ثابت جریان حلال‌های جاذب

در مطالعه حاضر شکل (۶-۸) نتایج شبه‌سازی میزان تغییرات غلظت دی‌اکسیدکربن (بدون بعد) بر حسب طول غشا (بدون بعد) در فاز مایع با دبی ثابت (500 ml/min) برای جریان حلال‌های جاذب در طول کل راکتور غشایی بررسی شده‌است. جذب دی‌اکسیدکربن با هر چهار حلال MEA, DEA, MDEA, AMP در طول کل راکتور به وسیله تماس‌دهنده غشایی الیاف توخالی پلی‌پروپیلنی شبه‌سازی شده‌است؛ در حالی که این شبه‌سازی با داده‌های مورد مطالعاتی [۱۰] در فرایند آیزوترمال مقایسه شد و در طول راکتور غشایی به دلیل افزایش میزان انتقال جرم و افزایش زمان تماس فاز مایع و فاز گاز میزان غلظت خروجی دی‌اکسیدکربن در انتهای راکتور برای حلال MEA نسبت به حلال‌های دیگر کمتر است که خود نشانه جذب بیشتر آن حلال است. در شبه‌سازی حاضر

مایع با استفاده از قانون گاز ایده‌آل، اختلاف فشار عامل حرکت سیال و جابه‌جایی در نظر گرفته شده‌است. به دلیل بالا بودن حجم محاسبات دوفازی، فرض تغییر حالت CO_2 از گاز به مایع درون غشا لحاظ شده‌است. دی‌اکسیدکربن در فصل مشترک فاز مایع و فاز گاز در داخل غشا و از راه واکنش شیمیایی به درون غشا جذب حلال می‌شود. فرضیات مدل، معادلات حاکم، هندسه مسئله، همچنین نوع روش حل نرم‌افزار کامسول مورد استفاده در مش‌بندی و استقلال مش در مرجع [۹ و ۱۰] آورده و توضیح داده شده‌است. خوانندگان برای آشنایی با جزئیات (فرضیات مدل، معادلات حاکم، هندسه مسئله، نوع روش حل نرم‌افزار کامسول و مدل‌سازی) و نتایج حاصل از این بخش به همراه سایر اطلاعات لازم به مراجع [۹ و ۱۰] رجوع کنند.

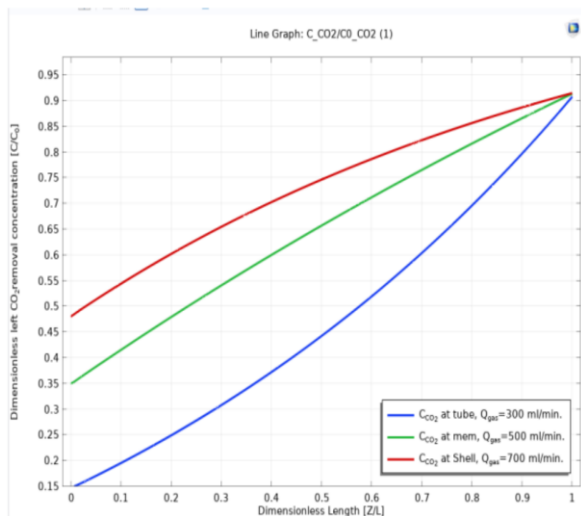
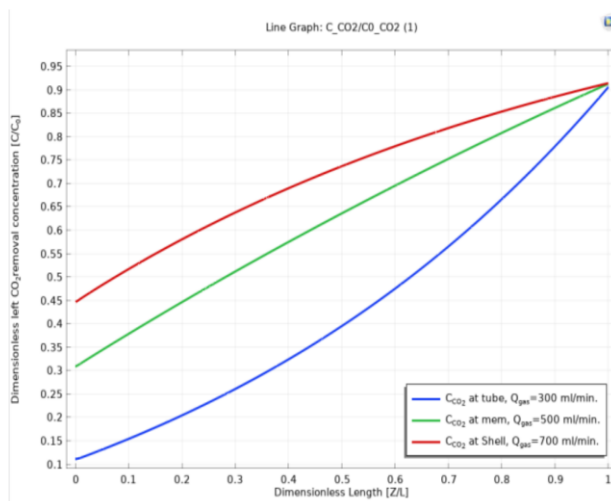
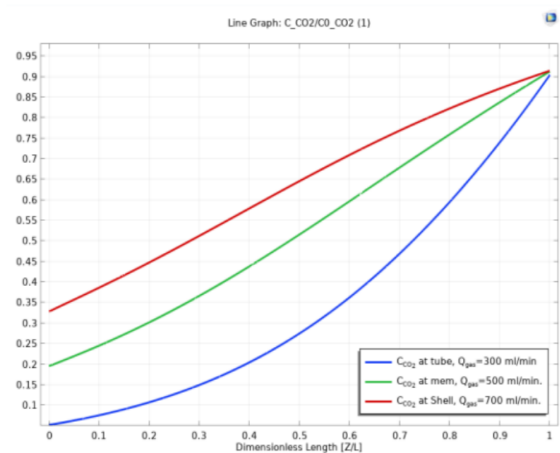
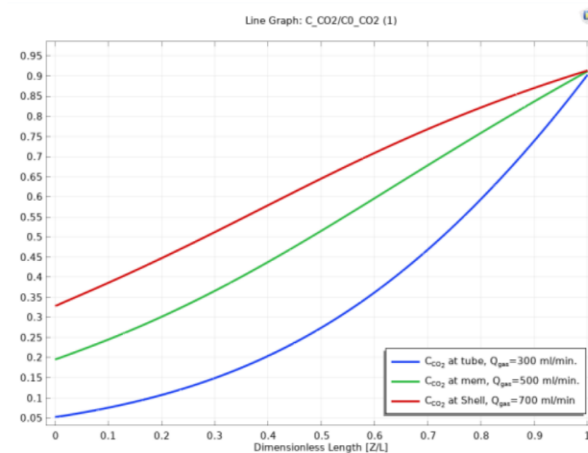
۳. نتایج و بحث

فرایند مدل‌سازی حاضر با استفاده از داده‌های مورد مطالعاتی [۱۰] و به کمک نرم‌افزار کامسول شبه‌سازی شده‌است. بنابراین مقایسه نتایج شبه‌سازی حاضر حاصل از جذب دی‌اکسیدکربن با استفاده از هر چهار حلال پایه آمینی MEA^1 , DEA^2 , AMP^3 , MDEA^3 در فرایند آیزوترمال با تغییرات دبی جریان فاز گاز در طول کل راکتور غشایی و انتخاب بهترین حلال ارائه شده‌است. هم‌چنین مقایسه نتایج مورد مطالعاتی با نتایج شبه‌سازی حاضر با دبی ثابت برای جریان حلال‌های جاذب در طول کل راکتور غشایی بررسی شده‌است.

۱-۳ مقایسه نتایج حاصل از جذب دی‌اکسیدکربن به وسیله چهار حلال پایه آمینی با تغییرات دبی جریان فاز گاز در طول کل راکتور و انتخاب بهترین حلال

در شکل (۵) بررسی مقایسه نتایج شبه‌سازی میزان غلظت‌های مختلف حذف دی‌اکسیدکربن (بدون بعد) بر حسب طول غشا (بدون بعد) با تغییرات دبی جریان فاز گاز آمده‌است. حذف دی‌اکسیدکربن با جذب هر چهار حلال پایه آمینی MEA, DEA, MDEA, AMP در طول کل راکتور به وسیله تماس‌دهنده غشایی الیاف توخالی

1. Diethanolamine
2. Aminomethylpropanol
3. Methyl Diethanolamine

(a) MDEA C_{MDEA}= 15mol/m³(b) AMP C_{AMP}= 15mol/m³(c) MEA C_{MEA}= 5mol/m³(d) DEA C_{DEA}= 5mol/m³

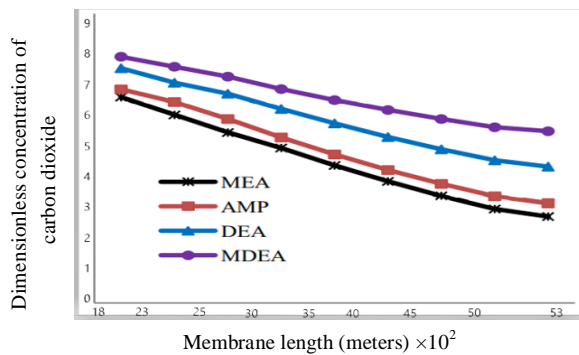
شکل ۵. مقایسه نتایج شبیه‌سازی میزان غلظت‌های مختلف حذف دی‌اکسیدکربن (بدون بعد) بر حسب طول غشا (بدون بعد) با تغییرات دبی جریان گاز در طول کل راکتور غشایی به وسیله جذب هر چهار حلال پایه آمینی در تماس‌دهنده غشایی الیاف توخالی پلی‌پروپیلن.

(MEA>DEA>AMP>MDEA), (MEA <DEA <AMP <MDEA)

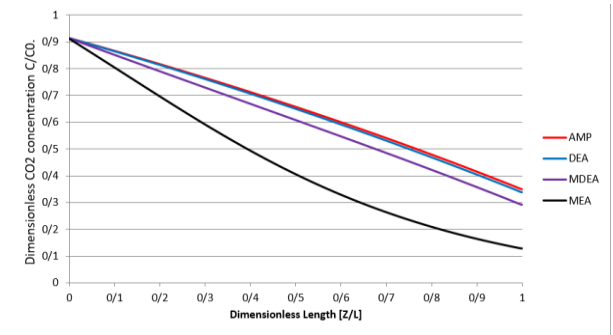
Figure 5. Comparison of simulation results of different concentrations of carbon dioxide removal (dimensionless) in terms of membrane length (dimensionless) with changes in gas flow rate along the entire membrane reactor by adsorption of four amine-based solvents in the polypropylene hollow fiber membrane contactor.

به ۱۲ درصد کاهش می‌یابد و بدین ترتیب میزان حذف دی‌اکسیدکربن در خروجی راکتور بالاتر می‌رود. در شبیه‌سازی حاضر به‌طور مشابه در مورد سایر حلال‌های دیگر نیز چنین روند مشابهی از تغییرات جذب در هر دو کار مشاهده می‌شود.

(شکل ۶-ب) نیز نشان داده شده که در طول کل راکتور غشایی بهترین حلال برای جذب دی‌اکسیدکربن حلال MEA است. به‌طور ویژه وقتی که دبی جریان مایع برابر با (۵۰۰ ml/min) باشد، میزان جذب دی‌اکسیدکربن برای حلال MEA در خروجی راکتور افزایش یافت و غلظت خروجی CO₂ در طول کل راکتور غشایی از مقدار ۹۰



(a) مورد مطالعاتی (محمدرضا طلاقت و همکاران) از مرجع [۱۰] ۲۰۱۷



(b) شبیه‌سازی حاضر: (MEA < MDEA < DEA < AMP)

(a) Study case [10] (Mohammad Reza & Ahmad Reza (2017) From Persian reference) (b) Present simulation (MEA < MDEA < DEA < AMP)

شکل ۶: مقایسه نتایج شبیه‌سازی میزان تغییرات غلظت CO₂ (بدون بعد) با دبی ثابت جریان حلال جاذب (۵۰۰ ml/min) برحسب طول غشا (بدون بعد) به وسیله جذب هر چهار حلال پایه آمینی در طول کل راکتور غشایی با تماس‌دهنده غشایی الیاف توخالی پلی‌پروپیلن.

$$Q_L = 500 \text{ ml/min}, n = 3600 \text{ T} = 298 \text{ K}, \epsilon/t = 0/2, C_{\text{solvent}} = 0/005 \text{ mol/m}^3$$

Figure 6. Comparison of simulation results of changes in CO₂ concentration (dimensionless) with constant flow rate of adsorbent solvent (500 ml / min) in terms of membrane length (dimensionless) by adsorption of four amine-based solvents along the entire membrane reactor with polypropylene hollow fiber membrane contactor. (MEA < AMP < DEA < MDEA)

$$Q_L = 500 \text{ ml/min}, n = 3600 \text{ T} = 298 \text{ K}, \epsilon/t = 0/2, C_{\text{solvent}} = 0/005 \text{ mol/m}^3$$

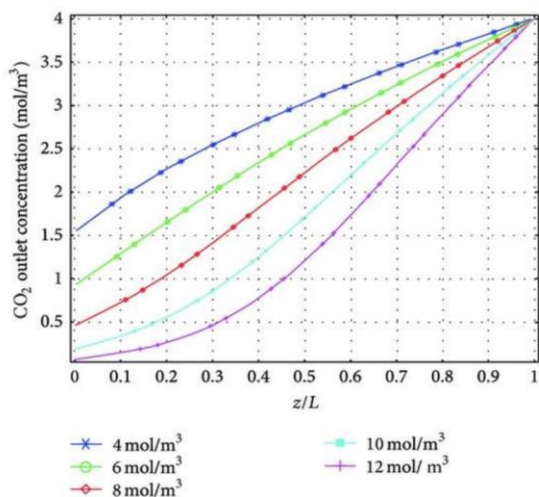
دی‌اکسیدکربن افزایش و میزان غلظت خروجی دی‌اکسیدکربن کاهش یافت. در واقع به دلیل کاهش زمان تماس آن با غشا، میزان سرعت واکنش جذب در حلال داخل لوله افزایش می‌یابد [۸ و ۲۰].

که در این مرحله حلال MEA با نتایج مدل حاصل از شبیه‌سازی ژانگ و همکاران [۲] مقایسه شده‌است. در مطالعه حاضر (شکل ۷-ا) میزان تغییرات غلظت خروجی دی‌اکسیدکربن برحسب طول غشا (بدون بعد) در فاز گاز به‌ازای غلظت‌های مختلف حلال MEA آورده شده‌است. در شبیه‌سازی حاضر (شکل ۷-ب) مقایسه نتایج حلال MEA نشان می‌دهد که میزان حذف دی‌اکسیدکربن در خروجی راکتور به‌وسیله این حلال افزایش می‌یابد. به‌طور ویژه مشاهده می‌شود که در این شبیه‌سازی در فاز گاز به‌دلیل افزایش میزان غلظت‌های اولیه حلال مایع، مدت زمان تماس فاز مایع و فاز گاز و میزان انتقال جرم در طول کل راکتور غشایی افزایش می‌یابد. در نتیجه هر چقدر میزان غلظت‌های اولیه حلال MEA افزایش یابد، غلظت خروجی دی‌اکسیدکربن در طول کل راکتور غشایی کاهش می‌یابد. با افزایش میزان غلظت‌های اولیه منو اتانول آمین از مقدار ۴ mol/m³ تا ۱۲ به‌علت بالا رفتن میزان جذب دی‌اکسیدکربن در خروجی راکتور برای این حلال، در نهایت مقدار غلظت خروجی دی‌اکسیدکربن آن در انتهای راکتور به صفر رسیده‌است.

۳-۳ مقایسه اعتبارسنجی چهار حلال پایه آمینی

از آن جایی که داده‌های مربوط به هر چهار حلال پایه آمینی به کمک مدل‌های مختلف و انتخاب بهترین مدل وابسته به نوع حلال به‌طور یکجا و کامل در مراجع موجود نیست؛ لذا چنین مقایسه‌ای با مراجع معتبر امکان‌پذیر نیست. به‌منظور بررسی اعتبارسنجی مدل‌ها، داده‌های حاصل از مدل‌سازی برای هر چهار حلال پایه آمینی با داده‌های موجود به‌طور جداگانه از مراجع متنوع در فرایند آیزوترمال مقایسه شده‌است. در نتیجه حاصل هر چهار حلال به‌طور مجزا با مراجع [۲ و ۱۱] آورده و شبیه‌سازی شده‌است.

۳-۳-۱ مقایسه اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی برای حلال [MEA] در شکل (۷) مدل‌سازی تغییرات غلظت خروجی CO₂ در طول کل راکتور غشایی برای غلظت‌های اولیه مختلف و نمودار دوبعدی خطوط جریان و حرکت CO₂ در مطالعه ژانگ و همکاران [۲] نشان داده شده‌است. بنابراین به‌علت افزایش میزان غلظت‌های اولیه حلال MEA، مدت زمان تماس فاز مایع و فاز گاز و انتقال جرم در طول کل راکتور غشایی افزایش می‌یابد. با افزایش جذب آب بر روی سطح به‌وسیله غشا و مقاومت انتقال جرم میزان حذف دی‌اکسیدکربن، افزایش و غلظت خروجی دی‌اکسیدکربن کاهش می‌یابد، در نتیجه میزان جذب دی‌اکسیدکربن برای حلال MEA بالاتر می‌رود. با افزایش دبی جریان فاز مایع (حلال‌های پایه آمینی) میزان حذف



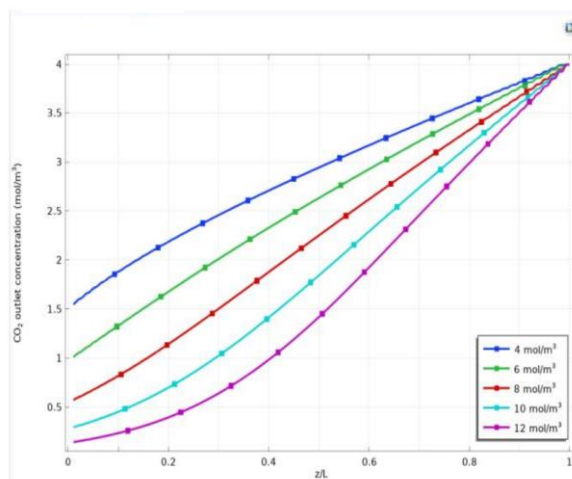
(a) مدل ژانگ و همکاران از مرجع [۲]

غلظت خروجی دی‌اکسیدکربن در ورودی راکتور

$$C/C_0 = 4 \text{ mol/m}^3 \quad C_0 = 4 \text{ mol/m}^3, V_{\text{MEA}} = 0.5 \text{ m/s}^{-1} \quad V_{\text{CO}_2} = 0.2 \text{ m/s}^{-1}$$

(a) Model from reference Zhan et al. (2014), (MEA)

$$C/C_0 = 4 \text{ mol/m}^3 \quad C_0 = 4 \text{ mol/m}^3, V_{\text{MEA}} = 0.5 \text{ m/s}^{-1} \quad V_{\text{CO}_2} = 0.2 \text{ m/s}^{-1}$$



(b) شبیه‌سازی حاضر (MEA)

(b) Present simulation (MEA)

شکل ۷. مقایسه نتایج شبیه‌سازی میزان تغییرات غلظت خروجی دی‌اکسیدکربن در طول کل راکتور غشایی با تماس‌دهنده غشایی

الیاف توخالی پلی‌پروپیلن برحسب طول غشا (بدون بعد) به وسیله میزان غلظت‌های مختلف حلال MEA.

Figure 7. Comparison of simulation results of changes in carbon dioxide output concentration along the entire membrane reactor with polypropylene hollow fiber membrane contactor in terms of membrane length (dimensionless) by different concentrations of MEA solvent.

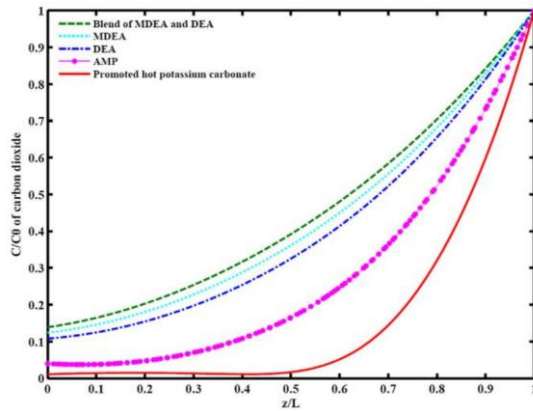
۳-۳-۳ مقایسه اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی برای حلال

[MDEA]

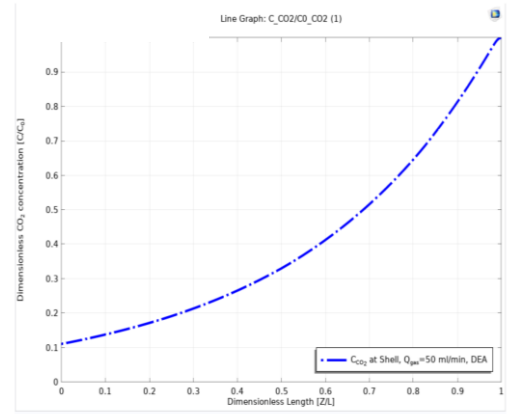
در این بخش نتایج پژوهش حاضر با نتایج حاصل از شبیه‌سازی سهرابی و همکاران [۳] مقایسه شده است. در مطالعه حاضر (شکل ۹-ا) میزان تغییرات غلظت خروجی دی‌اکسیدکربن در فاز گاز برحسب دبی جریان مایع برای حلال MDEA آورده شده است. در شبیه‌سازی حاضر (شکل ۹-ب) مقایسه نتایج برای حلال MDEA نشان می‌دهد که با افزایش تغییرات دبی جریان فاز مایع از مقدار ۱۰ تا ۶۰ ml/min در خروجی راکتور افزایش پیدا کرده است؛ زیرا با افزایش دبی جریان فاز مایع و به دلیل کاهش زمان تماس آن با غشا، میزان سرعت واکنش جذب در حلال در قسمت لوله افزایش یافت که میزان سرعت انتقال جرم از دی‌اکسیدکربن به حلال مایع در کل راکتور غشایی افزایش می‌یابد؛ در نتیجه گرادیان غلظت CO_2 در فاز مایع بالا می‌رود و مقدار نسبت جریان حجمی گاز به مایع ناچیز می‌شود. در نهایت با افزایش دبی جریان فاز مایع غلظت خروجی دی‌اکسیدکربن در فاز گاز کاهش می‌یابد و میزان

۳-۳-۲ مقایسه اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی برای حلال [DEA]

حلال DEA با نتایج مدل حاصل از شبیه‌سازی طلاقت و همکاران [۱۰] مقایسه شده است. در مطالعه حاضر (شکل ۸-ا) میزان تغییرات غلظت دی‌اکسیدکربن (بدون بعد) برحسب طول غشا (بدون بعد) در فاز گاز آورده شده است. در طول راکتور غشایی در قسمت پوسته برای حلال DEA نشان داده شده است. در شبیه‌سازی حاضر (شکل ۸-ب) مقایسه نتایج نشان می‌دهد که حلال DEA در دبی ثابت برابر با ۵۰ ml/min است که در قسمت پوسته راکتور غشایی دیده می‌شود. در طول پوسته راکتور غشایی به دلیل افزایش زمان تماس فاز مایع و فاز گاز و افزایش میزان انتقال جرم میزان جذب دی‌اکسیدکربن برای این حلال در خروجی پوسته راکتور افزایش یافت و غلظت خروجی دی‌اکسیدکربن در طول پوسته راکتور غشایی کاهش یافت و سرانجام در انتهای پوسته راکتور به ۱۱ رسید؛ به طوری که میزان حذف دی‌اکسیدکربن آن در خروجی پوسته راکتور به ۸۹ درصد رسیده است.



(a) مدل طلاقت و همکاران از مرجع [۱۰] (DEA)



(b) شبیه‌سازی حاضر (DEA)

(a) Model from reference Mohammad Reza Talaghat et al.s. (Talaghat, Saidi, 2014).(DEA)

(b) Present simulation (DEA)

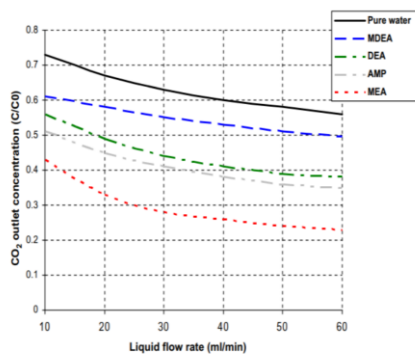
شکل ۸. مقایسه نتایج شبیه‌سازی میزان تغییرات غلظت دی‌اکسیدکربن (بدون بعد) در طول پوسته راکتور غشایی در تماس‌دهنده غشایی الیاف توخالی پلی‌پروپیلن برحسب طول غشا (بدون بعد) به وسیله حلال DEA.

$$(Q_{shell} = 50 \text{ ml/min}, n = 3600, T = 303 \text{ K}, C_{DEA} = 385 \text{ mol/m}^3).$$

Figure 8. Comparison of simulation results of changes in the concentration of carbon dioxide (dimensionless) along the shell of the membrane reactor in the polypropylene hollow fiber membrane contactor in terms of membrane length (dimensionless) by DEA solvent.

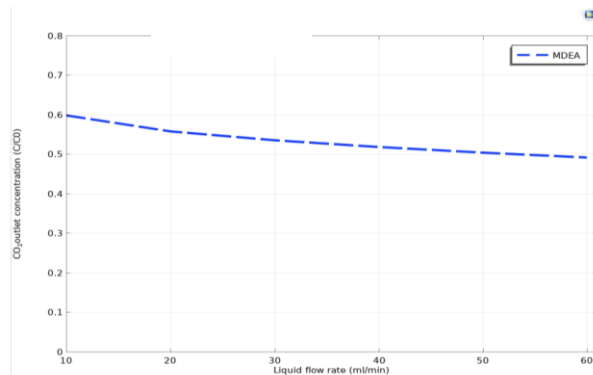
بنابراین میزان سرعت واکنش جذب در حلال MDEA بالاتر می‌رود و میزان جذب دی‌اکسیدکربن در خروجی راکتور برای حلال MDEA افزایش یافته و غلظت خروجی دی‌اکسیدکربن آن در فاز گاز در انتهای راکتور به کمترین مقدار رسیده‌است.

جذب دی‌اکسیدکربن برای حلال MDEA افزایش خواهد یافت. علاوه بر این که سرعت واکنش جذب CO_2 با حلال MDEA بیشتر است، میزان دبی جریان فاز مایع افزایش می‌یابد که منجر به بالاترین میزان شار جذب CO_2 در کل راکتور غشایی می‌شود، که این روند به ترتیب برای حلال MDEA, DEA, AMP, MEA, آب مقطر است.



(a) مدل سهرابی و همکاران از مرجع [۳] (MDEA)

(a) Model from reference Sohrabi et al.s. 2011, (MDEA)



(b) شبیه‌سازی حاضر (MDEA)

(b) Present simulation (MDEA)

شکل ۹. مقایسه نتایج شبیه‌سازی میزان تغییرات غلظت خروجی دی‌اکسیدکربن در فاز گاز در تماس‌دهنده غشایی الیاف توخالی پلی‌پروپیلن به وسیله حلال MDEA برحسب دبی جریان مایع.

$$\text{Gas pressure} = 121/3 \text{ kPa}; \text{ temperature} = 298 \text{ K}; n = 100; R_v = 0/5 \text{ cm}; \text{ Gas flow rate} = 100 \text{ ml/min}; \text{ Liquid flow rate} = 100-60 \text{ ml/min},$$

$$C_{MDEA} = 40 \text{ mol/m}^3$$

Figure 9. Comparison of simulation results of changes in carbon dioxide output concentration in gas phase in polypropylene hollow fiber membrane contactor by MDEA solvent in terms of liquid flow rate.

۳-۳-۴ مقایسه اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی برای حلال‌های [MEA] و [AMP]

در مقایسه دیگری مرجانی و همکاران [۳]، حلال MEA را با نتایج مدل حاصل از شبیه‌سازی بررسی کردند. در مطالعه حاضر (شکل (۱۰-a) میزان تغییرات غلظت دی‌اکسیدکربن (بدون بعد) بر حسب طول غشا (بدون بعد) در فاز مایع با دبی ثابت (1 ml/min) برای جریان حلال‌های جاذب در طول کل راکتور غشایی برای حلال MEA آمده‌است. در کار حاضر نتایج شبیه‌سازی برای حلال MEA و AMP بر اساس دبی (1 ml/min) به دست آمده‌است. در شبیه‌سازی حاضر (شکل (۱۰-b, c) در طول کل راکتور غشایی نتایج دو حلال AMP و MEA برای میانگین غلظت خروجی دی‌اکسیدکربن در مقادیر مختلف عدد پکلت آورده شده‌است. با وجود انتقال جرم در پوسته و لوله به صورت جابه‌جایی و در غشا به صورت نفوذ جرمی، مقادیر مختلف عدد پکلت بر حسب نفوذ جرمی سیال در جهت شعاعی و سرعت در جهت طولی بررسی و مقایسه می‌شود. تغییرات عدد پکلت نشان‌دهنده مقایسه این دو مشخصه است: سرعت در جهت طولی بیشتر شده یا نفوذ جرمی سیال در جهت شعاع بیشتر شده‌است. با افزایش عدد پکلت از مقدار ۱۵ تا ۶۰ در طول راکتور غشایی میزان نفوذ جرمی سیال در جهت شعاعی و سرعت در جهت طولی افزایش می‌یابد. در اینجا جابه‌جایی در جهت طولی و نفوذ جرمی سیال در جهت شعاعی افزایش می‌یابد. در نتیجه زمان تماس فاز مایع و فاز گاز و میزان انتقال جرم افزایش می‌یابد که منجر به کمترین غلظت خروجی دی‌اکسیدکربن در انتهای راکتور می‌شود. تعداد عدد پکلت به طور ثابت: نرخ جریان گاز مساوی است با نسبت جریان حجمی گاز به مایع (R_v) برابر با مقدار ۰/۵ cm در نرخ جریان مایع، نیز به دست آمده‌است. به طور ویژه وقتی که نفوذ جرمی سیال به صورت شعاعی در نظر گرفته می‌شود، میزان جذب دی‌اکسیدکربن برای هر دو حلال در خروجی راکتور، افزایش و غلظت خروجی دی‌اکسیدکربن در طول کل راکتور غشایی کاهش می‌یابد. به طوری که دیده می‌شود بیشترین میزان سرعت حذف دی‌اکسیدکربن در خروجی راکتور به عدد پکلت ($P_e = 15$) با حالت شعاعی اختصاص

داشته‌است. سرانجام غلظت خروجی دی‌اکسیدکربن آن در انتهای راکتور به صفر درصد رسیده‌است.

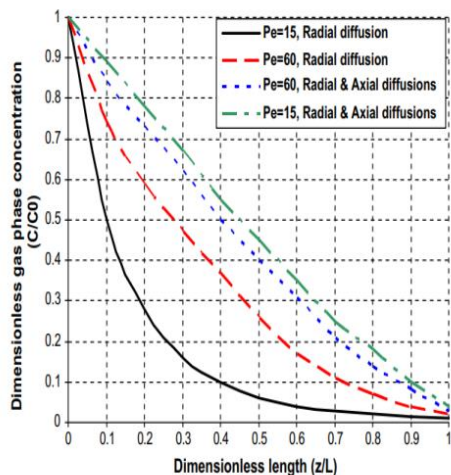
درستی نتایج شبیه‌سازی حاضر در فرایند آیزوترمال تنها برای هر چهار حلال پایه آمینی به صورت جداگانه و با در نظر گرفتن تشابه شرایط حاکم بر آن‌ها امکان پذیر شده‌است. در نتیجه برای ارائه بهترین مدل‌ها، باید میزان حذف دی‌اکسیدکربن در هر مدل به طور جداگانه حساب شود. در این کار حلال MEA بهترین نتایج را در شبیه‌سازی نشان می‌دهد. به همین دلیل در بخش زیر نتایج بهترین حلال MEA با نتایج تجربی در فرایند آیزوترمال مقایسه می‌شود.

۳-۴-۴ مقایسه نتایج شبیه‌سازی و مدل‌سازی برای حلال MEA با نتایج تجربی

در شکل (۱۱) مقایسه نتایج بهترین حلال (MEA) با داده‌های تجربی ژانگ و همکاران [۲] بررسی شده‌است. در مطالعه حاضر (شکل (۱۱-a) میزان تغییرات حذف دی‌اکسیدکربن به وسیله حلال MEA بر حسب میزان غلظت‌های مختلف حلال جاذب نشان داده شده‌است. به منظور اعتبارسنجی مدل توسعه یافت، مقایسه‌ای بین داده‌های تجربی و شبیه‌سازی با مقادیر متفاوت غلظت حلال MEA انجام شده‌است. مشخصه‌های غشایی مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها مشابه مشخصه‌های آزمایش تجربی است. بدیهی است که میزان حذف CO_2 با افزایش میزان غلظت جاذب مایع افزایش می‌یابد؛ زیرا به علت بالارفتن میزان جذب دی‌اکسیدکربن در خروجی راکتور غشایی برای این حلال، میزان غلظت خروجی دی‌اکسیدکربن آن در فاز گاز کاهش می‌یابد. علاوه بر این، نرخ جذب حساب شده به وسیله این کار با نتایج آزمایش‌ها تقریباً مطابقت داشته‌است. در شبیه‌سازی حاضر (شکل (۱۱-b) نتایج حلال MEA نشان می‌دهد که میزان حذف CO_2 با افزایش میزان غلظت جاذب مایع افزایش می‌یابد؛ به طوری که ملاحظه می‌شود، با افزایش غلظت حلال MEA از مقدار 4 mol/m^3 تا ۱۲، میزان حذف دی‌اکسیدکربن در نتایج تجربی به ۹۳ درصد و در شبیه‌سازی حاضر به ۹۰ درصد رسیده‌است. اختلاف خطای این نتایج به طور میانگین معادل ۱۳ درصد است.

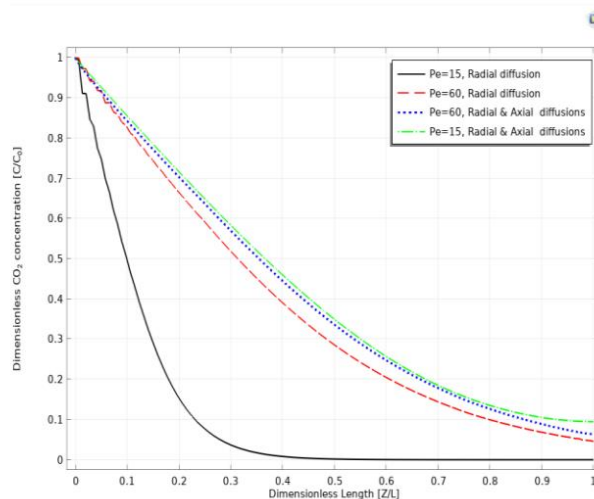
۱. عدد پکلت Peclet number یک عدد بدون بعد است که در مطالعه فرایندهای انتقال در شاره‌ها به کار می‌رود. عدد پکلت نشان‌دهنده نسبت حرکت هدفمند (جهت‌دار) یک کمیت فیزیکی به حرکت کاتوره‌ای (واپخشی) آن در شاره است. (سرعت گاز در جهت طولی (محوری) و نفوذ جرمی گاز در جهت غشا (شعاعی))

$$P_e = (V_{\text{gas}}L)/D_{\text{gas}}R$$



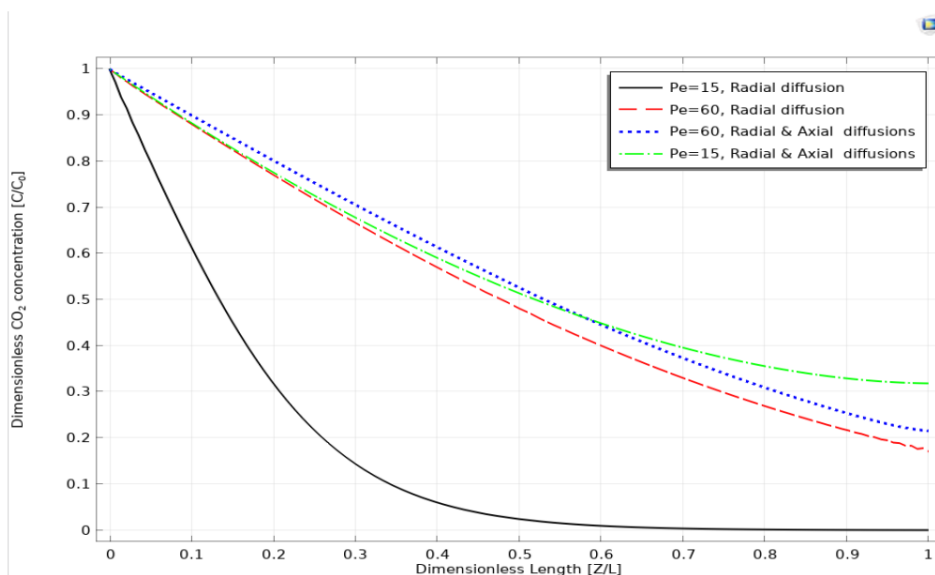
(a) مدل مرجانی و همکاران از مرجع [۳] (MEA)

(a) Model from reference Marjani et al.s. 2011, (MEA)



(b) شبیه‌سازی حاضر (MEA)

(b) Present simulation (MEA)



(c) شبیه‌سازی حاضر (AMP)

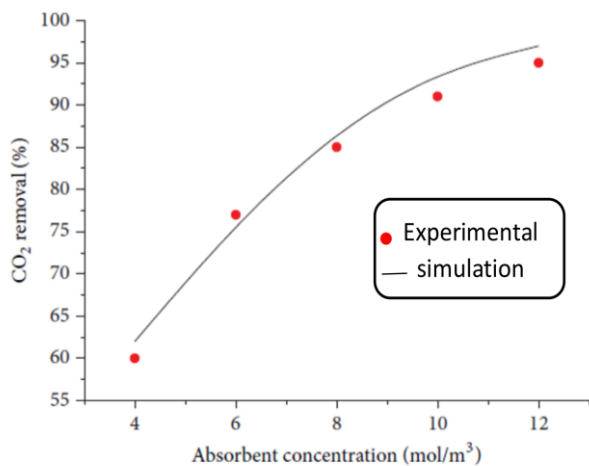
(c) Present simulation (AMP)

شکل ۱۰. نتایج شبیه‌سازی میزان تغییرات غلظت دی‌اکسیدکربن (بدون بعد) در طول کل راکتور غشایی در تماس‌دهنده غشایی الیاف توخالی پلی‌پروپیلن برحسب طول غشا (بدون بعد) به وسیله غلظت حلال AMP و MEA

$$\text{تعداد عدد پکلت} \rightarrow \text{Gas flow rate} = R_v \times \text{liquid flow rate.}$$

$$\text{Gas pressure} = 121/3 \text{ kPa; temperature} = 298 \text{ K; } n = 100; R_v = 0/5 \text{ cm, } C_{\text{MEA}} = 160 \text{ mol/m}^3, C_{\text{AMP}} = 160 \text{ mol/m}^3, \\ \text{Gas flow rate} = 0/125 \text{ ml/min}$$

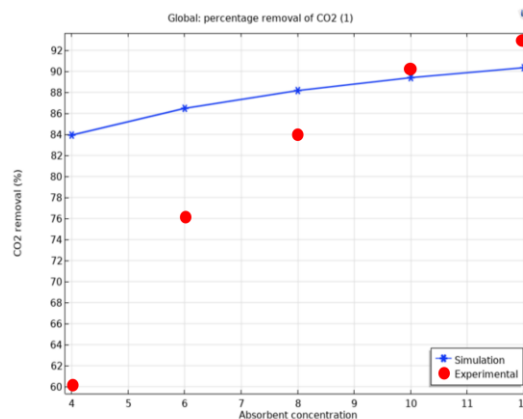
Figure 10. Simulation results of changes in carbon dioxide concentration (dimensionless) along the entire membrane reactor in the polypropylene hollow fiber membrane contactor in terms of membrane length (dimensionless) by AMP and MEA solvent concentrations.



$$C_{MEA} = 4.17 \text{ mol/m}^3, V_{CO_2} = 0.7 \text{ m}^3/\text{s}, V_{MEA} = 0.5 \text{ m}^3/\text{s}$$

مدل ژانگ و همکاران از مرجع [۲] (a)

(a) Model from reference Zhan et al.s.2014, (MEA)



شبیه‌سازی حاضر (MEA) (b)

(b) Present simulation (MEA)

شکل ۱۱. مقایسه نتایج شبیه‌سازی میزان تغییرات حذف دی‌اکسیدکربن در تماس‌دهنده غشایی الیاف توخالی پلی‌پروپیلن به وسیله حلال MEA برحسب میزان غلظت‌های مختلف حلال جاذب.

Figure 11. Comparison of Simulation Results of Carbon Dioxide Removal Changes in Polypropylene Hollow Fiber Membrane Contactor with MEA Solvent in terms of Different Concentrations of Absorbent Solvent.

مراجع

- [1] Gorohi, E., Davari, S., & Sohrabi, A. S. (2013). Separation of CO₂ from exhaust gas of power plants by membrane contactor. *Journal of Tehran Force Research Institute*, 13, 8.
- [2] Zhang, Z., Yan, Y., Zhang, L., & Ju, S. (2014). Numerical Simulation and Analysis of CO₂ Removal in a Polypropylene Hollow Fiber Membrane Contactor. *International Journal of Chemical Engineering*, 2014, 256840. doi:10.1155/2014/256840
- [3] Sohrabi, M. R., Marjani, A., Moradi, S., Davallo, M., & Shirazian, S. (2011). Mathematical modeling and numerical simulation of CO₂ transport through hollow-fiber membranes. *Applied Mathematical Modelling*, 35(1), 174-188. doi:https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.05.016
- [4] Farjami, M., Moghadassi, A., & Vatanpour, V. (2015). Modeling and simulation of CO₂ removal in a polyvinylidene fluoride hollow fiber membrane contactor with computational fluid dynamics. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 98, 41-51. doi:https://doi.org/10.1016/j.cep.2015.10.006

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، شبیه‌سازی و مدل‌سازی حذف دی‌اکسیدکربن با جذب هر چهار حلال پایه آمینی (MEA, DEA, MDEA, AMP) در یک راکتور غشایی الیاف توخالی پلی‌پروپیلن با نرم‌افزار کامسول، بررسی شد و نتایج آن با نتایج موجود در سایر مراجع معتبر مقایسه و راستی آزمایی شد. در این کار، ابتدا نتایج شبیه‌سازی حاضر حذف CO₂ به وسیله جذب هر چهار حلال پایه آمینی با یکدیگر در فرایند آیزوترمال مقایسه شده‌است. هم‌چنین نتایج این بررسی درمقایسه‌با سایر پژوهش‌های دیگر سازگاری قابل قبولی را از حذف CO₂ به وسیله جذب هر چهار حلال پایه آمینی به‌طور مجزا از مراجع متنوع نشان می‌دهد. در نتیجه انتخاب بهترین نوع حلال، نوع تماس‌دهنده غشایی و شبیه‌سازی بهترین حلال درمقایسه‌با مدل تجربی و اطلاعات تجربی قابل دسترس نشان می‌دهد که دی‌اکسیدکربن به وسیله MEA به‌عنوان مناسب‌ترین حلال در راکتور غشایی پلی‌پروپیلن حذف شده‌است و درمقایسه‌با مقادیر مدل تجربی تنها به میزان ۱۳ درصد خطا در بر دارد.

- [5] Mansourizadeh, A., & Ismail, A. F. (2009). Hollow fiber gas-liquid membrane contactors for acid gas capture: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 171(1), 38-53. doi:https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.06.026
- [6] Mansourizadeh, A., & Ismail, A. F. (2011). Preparation and characterization of porous PVDF hollow fiber membranes for CO₂ absorption: Effect of different non-solvent additives in the polymer dope. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 5(4), 640-648. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2011.03.009
- [7] Yeon, S. -H., Lee, K. -S., Sea, B., Park, Y. -I., & Lee, K. -H. (2005). Application of pilot-scale membrane contactor hybrid system for removal of carbon dioxide from flue gas. *Journal of Membrane Science*, 257(1), 156-160. doi:https://doi.org/10.1016/j.memsci.2004.08.037
- [8] Eslami, S., Mousavi, S. M., Danesh, S., & Banazadeh, H. (2011). Modeling and simulation of CO₂ removal from power plant flue gas by PG solution in a hollow fiber membrane contactor. *Advances in Engineering Software*, 42(8), 612-620. doi:https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2011.05.002
- [9] Makhsofi, M. (2020). *Comparison of the process of modeling and software simulation of carbon dioxide removal with the help of membrane*. (M.Sc. Thesis), Islamic Azad University, Tehran.
- [10] Saidi, M., Heidarinejad, S., Rahimpour, H., Talaghat, M., & Rahimpour, M. R. (2014). Mathematical modeling of carbon dioxide removal using amine-promoted hot potassium carbonate in a hollow fiber membrane contactor. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 18, 274-285. doi:10.1016/j.jngse.2014.03.001
- [11] Gao, X. -Y., Liu, L., Hu, M. -L., Xiang, Y., Chu, G.-W., Zou, H. -K., ... Chen, J. -F. (2016). Numerical simulation for mass transfer characteristics of CO₂ capture in a rotating packed bed. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 109, 68-79. doi:https://doi.org/10.1016/j.cep.2016.08.015
- [12] Neumann, K., Hunold, S., de Beer, M., Skiborowski, M., & Górak, A. (2018). Mass Transfer Studies in a Pilot Scale RPB with Different Packing Diameters. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 57(6), 2258-2266. doi:10.1021/acs.iecr.7b04186
- [13] Sheng, M., Xie, C., Sun, B., Luo, Y., Zhang, L., Chu, G., ... Chen, J. -F. (2019). Effective Mass Transfer Area Measurement Using a CO₂-NaOH System: Impact of Different Sources of Kinetics Models and Physical Properties. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(25), 11082-11092. doi:10.1021/acs.iecr.9b00538