

شبیه‌سازی ماژول غشایی الیاف توخالی برای حذف گازهای اسیدی از جریان مخلوط با متان در نرم‌افزار Comsol

فرشاد عرفان‌هرزندی^۱، مرتضی خیری کرمجوان^۲

^۱ کارشناسی‌ارشد مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه سهند تبریز، ایران.

^۲ کارشناسی‌ارشد مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه سهند تبریز، ایران.

نام و نشانی ایمیل نویسنده مسئول:

فرشاد عرفان‌هرزندی

FarshadErfan76@gmail.com

چکیده

هدف از انجام مطالعه حاضر، شبیه‌سازی فرآیند جداسازی گاز دی‌اکسیدکربن از مخلوط گازی حاوی متان با استفاده از غشای الیاف توخالی پلیمری همراه با مایع جاذب آمینی با استفاده از نرم‌افزار کامسول بوده است. ماژول غشایی شبیه‌سازی شده در این مطالعه از نوع پلی پروپیلن (PP) و ماده حلال مورد استفاده متیل‌دی‌اتانول‌آمین (MDEA) بوده‌اند. برای این منظور در ابتدا داده‌های مربوط به شبیه‌سازی از طریق یک مطالعه تجربی از پیش انجام شده گردآوری شدند تا واحد جداسازی گاز کربن دی‌اکسید در ماژول غشایی توسط نرم‌افزار Comsol شبیه‌سازی شود. در بحث شبیه‌سازی تاثیر برخی پارامترهای موثر جداسازی کربن دی‌اکسید از مخلوط گازی مورد بررسی قرار گرفت که از جمله این پارامترها می‌توان به مقدار ماده حلال، دما، سرعت گاز، سرعت مایع حلال، تخلخل و پیچ‌پیچی اشاره نمود. در بحث نتایج مشخص شد که بیشترین تاثیر پارامترهای موثر بر جداسازی گاز کربن دی‌اکسید مربوط به سرعت گاز ورودی به ماژول غشایی دارد.

واژگان کلیدی: گاز، شبیه‌سازی، اسیدی، متان، غشا.

مقدمه

گازها به مقدار زیادی در صنایع کوچک و بزرگ استفاده می‌شود و از آن‌ها به عنوان ماده اولیه برای تولید محدوده وسیعی از محصولات کمک گرفته می‌شود. برای جداسازی آن‌ها از روش‌های گوناگونی استفاده می‌شود مانند روش‌های جذبی، روش‌های تبریدی، تقطیر و غیره که در همه آن‌ها مصرف انرژی زیاد می‌باشد. با روی کار آمدن غشاها و آشکار شدن مشخصات خوب عملیاتی آن‌ها رویکرد به استفاده از این وسایل روز به روز بیشتر می‌گردد. چرا که فرآیندهای غشایی معمولاً در مقایسه با فرآیندهای رقیب خود ارزان‌تر، دارای تجهیزات کمتر، هزینه نگهداری کمتر و دارای قیمت محصول تمام شده‌ی کمتری هستند. اما با تمام این مزایا تلاش‌های زیادی در رابطه با این فرآیندها در حال انجام شدن است تا بتوان موادی مناسب‌تر برای تولید غشا، مدولی بهتر و آرایش مناسب‌تری برای جریان در این مدول‌ها پیدا کرد تا درخور فرآیند مذکور باشند. با توجه به اینکه گازهای مختلف از لحاظ اندازه مولکولی و توانایی حل شدن و یا نفوذ در مواد مختلف، به دسته‌های متفاوتی تقسیم می‌شوند، لذا باید برای هر جداسازی خاص غشایی مناسب با آن‌را تهیه نمود و در مدولی مناسب جای داد [۱].

روش جداسازی غشایی روش نسبتاً جدیدی می‌باشد. جداسازی توسط غشاها تا حدود ۳۰ سال پیش از لحاظ تکنیکی به عنوان یک روش جداسازی چندان مورد توجه نبود. اما امروزه با پیشرفت این تکنولوژی، فرآیندهای غشایی در محدوده وسیعی از کاربردها مثل صنایع دارویی و لبنیات، بیوتکنولوژی، نفت، گاز و غیره استفاده می‌شوند و این کاربردها روزه‌به‌روز افزایش می‌یابند. از جمله فرآیندهای غشایی می‌توان میکروفیلتراسیون، اولترافیلتراسیون، نانوفیلتراسیون، اسمز معکوس، دیالیز، الکترودیالیز، جداسازی گازها و تراوش تبخیری و غیره اشاره نمود. امروزه در بین فرآیندهای جداسازی غشایی فرآیندهای سنتی مثل میکروفیلتراسیون، اولترافیلتراسیون، اسمز معکوس موقعیت خود را تثبیت نموده‌اند [۲]. این در حالی است که فرآیندهایی مثل جداسازی گازها و تراوش تبخیری در مقیاس صنعتی به عنوان جایگزین تکنولوژی‌های جداسازی مرسوم توسعه فراوانی یافته‌اند و همچنین استفاده از زمینه‌های جدید مثل تقطیر غشایی و راکتورهای غشایی و غیره مورد توجه قرار گرفته‌است.

گاز طبیعی چاه دارای مقادیری از برخی آلاینده‌ها مانند دی اکسید کربن است که مخاطرات زیست‌محیطی فراوانی دارند. CO₂ در گروه گازهای اسیدی قرار دارد، به شدت خورنده و به سرعت خطوط لوله و تجهیزات را تخریب می‌کند. دی‌اکسید کربن ارزش حرارتی جریان گاز طبیعی را کاهش داده و سبب تبلور در فرآیند مایع‌سازی گاز طبیعی می‌شود. غلظت CO₂ در گاز طبیعی بسته به چاه منبع، بین ۵۰٪-۴ متغیر است. گاز طبیعی جهت رسیدن به کیفیت مدنظر برای انتقال توسط لوله (۵٪-۲ CO₂) می‌بایست فرآوری شود. بنابراین، لازم است فرآیندهایی با کارایی بالا جهت زدایش CO₂ از گاز طبیعی توسعه داده شود. جهت جداسازی CO₂ از گاز طبیعی، فرآیندهای مختلفی با فاکتورهای متفاوت از جمله الزامات زیست محیطی مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله فرآیندهای اصلی به کار رفته می‌توان به فرآیند جداسازی فیزیکی (غشا) اشاره کرد.

بنابراین هدف از انجام مطالعه پیش رو، شبیه سازی سیستم غشایی پلیمری همراه با مایع جاذب برای جداسازی گاز دی اکسید کربن می باشد که با استفاده از نرم افزار کامسول صورت خواهد گرفت.

در مطالعه چو و همکارانش [۳] در سال ۲۰۱۹، محققین مطالعه ای بر روی مدلسازی ریاضی جداسازی دی اکسید کربن از گاز طبیعی با استفاده از غشاهای الیاف توخالی انجام دادند. در این مطالعه از گاز طبیعی به عنوان خوراک ورودی به سیستم غشایی استفاده شد و ضمناً از غشای الیاف تو خالی پلیمری با قطر میانگین حفرات ۲۰۰ میکرومتر استفاده گردید. نتایج بررسی های آنها نشان داد که افزایش فشار گاز ورودی به سیستم غشایی می تواند راندمان جداسازی دی اکسید کربن از گاز طبیعی را تا حد زیادی افزایش دهد. همچنین تاثیر عواملی مانند سرعت گاز، دمای عملیاتی و تخلخل غشای الیاف توخالی نیز بر راندمان جداسازی گاز دی اکسید کربن از مخلوط گاز طبیعی مورد بررسی قرار گرفتند.

کائو و همکارانش [۴] در سال ۲۰۲۱، مطالعه ای بر روی شبیه سازی و مدلسازی جداسازی گاز دی اکسید کربن از مخلوط گازی غشاهای الیاف توخالی همراه مایع جاذب MDEA انجام دادند. در این مطالعه، خوراک ورودی شامل گاز خالص نیتروژن و گاز دی اکسید کربن بوده است و همچنین غشای پلیمری مدنظر آنها به وسیله نانو لوله های کربنی اصلاح شده بود که نتایج نشان داد این اصلاح می تواند راندمان جداسازی را تا حد قابل قبولی نسبت به حالت بدون نانو لوله های کربنی افزایش دهد. این افزایش

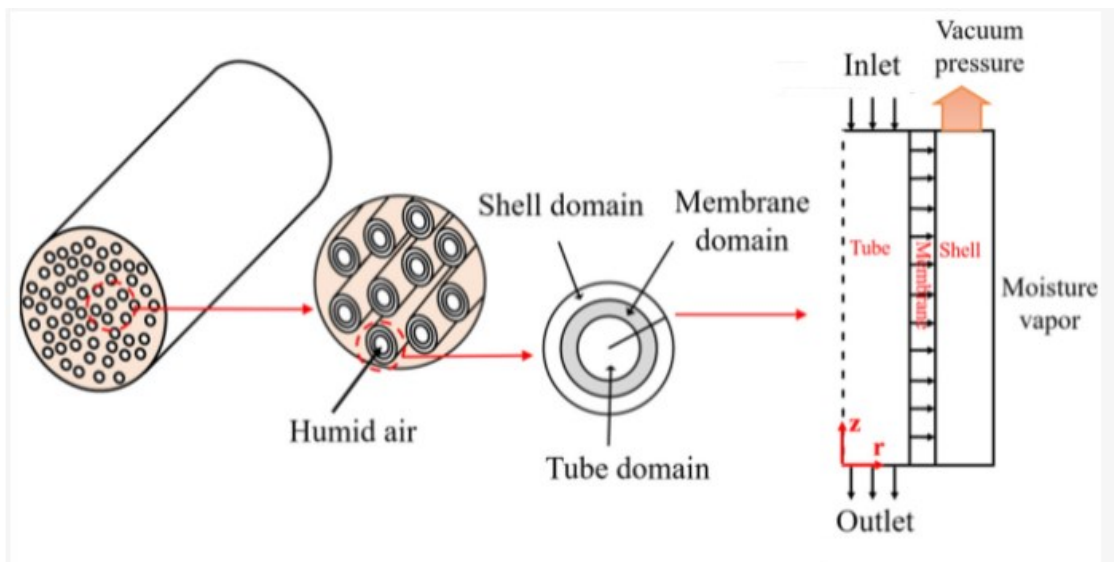
تا ۳۵ درصد گزارش شده است. تاثیر عوامل عملیاتی مختلفی نیز در این مطالعه بر راندمان جداسازی گاز دی اکسید کربن مورد بررسی قرار گرفت که تاثیر گذارترین عامل، سرعت گاز ورودی به سیستم غشایی بوده است. علی عبد و ناجی [۵] در سال ۲۰۲۰، مطالعه ای بر روی عملکرد فعال کننده ها برای محلول MDEA گازهای اسیدی جذب شده از گاز طبیعی: بر اساس شبیه سازی بر اساس یک گیاه واقعی انجام دادند. در این مطالعه از نرم افزار Aspen Hysys به عنوان فضای شبیه سازی برای واحد شیرین سازی استفاده شده است. این مطالعه به بررسی عملکرد پپیرازین/MDEA و سولفولان/MDEA در فرآیند جذب از نظر مصرف انرژی و بارگذاری گازهای اسیدی پرداخته است.

روش مطالعه

کاملاً روشن است که برای بیان معادلات ریاضی چنین سیستم های پیچیده ای، ساده سازی ها و فرضیات مناسب نقطه آغاز برای تعریف معادلات مناسب می باشد. اصولاً پدیده هایی که در طبیعت رخ می دهد خیلی پیچیده تر از آن است که بتوان با مدل های ریاضی آن را توصیف کرد بنابراین جزئیات مورد نیاز برای توصیف باید هدفمند باشد به عبارت دیگر پیچیدگی مدل و نتایج مربوطه باید کاملاً مرتبط با اهداف تحلیل باشد. از سویی دیگر، مدل ها به عنوان ابزاری برای طراحی و بهبود عملکرد جزئی ویژه از غشای الیاف توخالی استفاده می شوند، بنابراین مدل باید توانایی فراهم کردن اطلاعات کاملاً دقیق برای بخش مورد بررسی را داشته باشد [۶].

مدل های ریاضی در غشای الیاف توخالی ابزاری مهم برای فهم و بررسی اثرات پارامترهای مختلف طراحی و عملکردی بر روی جداسازی گازها، می باشد. نتایج مدلسازی می توانند برای بهینه سازی و انتخاب شرایط عملکردی بهینه مورد استفاده قرار گیرند. به دلیل فیزیک چندگانه فرآیند جداسازی درون غشای الیاف توخالی، پدیده های انتقال جرم، گرما و مومنتوم که در هم آمیخته شده اند به دلیل مکانیسم های جداسازی، همزمان اتفاق می افتد.

در این مسئله مدل دو بعدی به منظور جداسازی همزمان دی اکسید کربن و هیدروژن سولفید از گاز طبیعی با استفاده حلال مونواتانول آمین در تماس دهنده غشایی الیاف توخالی توسعه داده می شود. نفوذ محوری و شعاعی در داخل پوسته، بخش پوسته و نیز در داخل غشا در نظر گرفته می شود و همچنین برای داشتن بهترین بازده در جداسازی همزمان دی اکسید کربن و هیدروژن سولفید با استفاده از مونواتانول آمین حالت غشا غیر مرطوب در نظر گرفته می شود.



شکل ۱- شماتیک تماس دهنده غشایی در نظر گرفته شده

جزئیات غشا استفاده شده در جدول ۱ آمده است، تمامی خواص فیزیکی و شیمیایی مورد نیاز در جدول ۲ آمده است [۷].
 جدول ۱- خواص غشای مورد استفاده برای شبیه سازی [۸]

مقدار	خواص
۳۰۰	قطر خارجی الیاف μm
۲۲۰	قطر داخلی الیاف μm
۶۳۵	قطر داخلی ماژول mm
۰.۴	تخلخل غشا
۲	پیچاپیچی
۳۶۰۰	تعداد الیافها
۲/۵	طول ماژول m

جدول ۳-۲- خواص فیزیکی و شیمیایی گاز و مایع [۹]

واحد	مقدار	پارامتر
m.s^{-1}	۵	سرعت گاز
m.s^{-1}	۱	سرعت مایع
Atm	۱	فشار
K	۲۹۸	دما
mol.m^{-3}	۴	غلظت CO_2
mol.m^{-3}	۴	غلظت H_2S
mol.m^{-3}	۱۰۰۰	غلظت MDEA
$\text{J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$	۸.۳۱۴	ثابت گازها
--	۰.۸	m_{CO_2}
--	۲.۳	$m_{\text{H}_2\text{S}}$
$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$	1.8×10^{-5}	$D_{\text{CO}_2\text{-shell}}$
$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$	1.51×10^{-9}	$D_{\text{CO}_2\text{-tube}}$
$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$	2.01×10^{-5}	$D_{\text{H}_2\text{S-shell}}$
$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$	1.52×10^{-9}	$D_{\text{H}_2\text{S-tube}}$
$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$	9.32×10^{-10}	$D_{\text{MDEA-tube}}$

معادله پیوستگی برای هریک از اجزا در طی انتقال جرم و واکنش شیمیایی همزمان در یک سیستم جذب واکنشی به صورت زیر بیان می شود.

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -\nabla \cdot N_i + R_i$$

که در آن C_i غلظت، N_i فلاکس، و R_i سرعت واکنش جزء i در امتداد طول غشا می باشد. قانون نفوذ فیک را برای تعیین فلاکس هریک از اجزا به شکل زیر می توان نوشت:

$$N_i = -D_i \nabla C_i + C_i V_z$$

که در آن D_i و V_z به ترتیب ضریب نفوذ جزء i و سرعت محوری در راستای طول ماژول می باشد. با ترکیب معادلات فوق موازنه جرم کلی که شامل اثر واکنش شیمیایی، کنوکسیون، و نفوذ در اثر اختلاف غلظت می باشد. به فرم زیر است:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = D_i \nabla^2 C_i - \nabla \cdot C_i V_z + R_i$$

بسته به مکانیزم ها و سرعت های واکنش، سرعت کلی واکنش را می توان تعیین کرد. معادله پایستگی جرم پایا برای انتقال دی اکسید کربن و هیدروژن سولفید در سمت پوسته، که در آن مخلوط گازی جریان دارد و واکنشی رخ نمی دهد، به فرم زیر است:

$$D_{CO_2-shell} \left[\frac{\partial^2 C_{CO_2-shell}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_{CO_2-shell}}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_{CO_2-shell}}{\partial z^2} \right] = V_{z-shell} \frac{\partial C_{CO_2-shell}}{\partial z}$$

$$D_{H_2S-shell} \left[\frac{\partial^2 C_{H_2S-shell}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_{H_2S-shell}}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_{H_2S-shell}}{\partial z^2} \right] = V_{z-shell} \frac{\partial C_{H_2S-shell}}{\partial z}$$

با فرض مول سطح آزاد سطح هایل پروفایل سرعت در پوسته به صورت زیر است:

$$V_{z-shell} = 2(V) \left(1 - \left(\frac{R_2}{R_3} \right)^2 \right) * \frac{\left(\frac{r}{R_3} \right)^2 - \left(\frac{R_2}{R_3} \right)^2 + 2 \ln \left(\frac{R_2}{r} \right)^2}{3 + \left(\frac{R_2}{R_3} \right)^4 - 4 \left(\frac{R_2}{R_3} \right)^2 + 4 \ln \left(\frac{R_2}{R_3} \right)^2}$$

ک در آن $R_3 = R_2 \sqrt{1/(1-\phi)}$ و ϕ کسر حجمی فضای خالی است.

شرایط مرزی به صورت زیر می باشد:

$$\begin{aligned} \text{at } z = L, \quad C_{i-shell} &= C_{initial} \quad (i = CO_2 \text{ and } H_2S) \\ \text{at } r = R_2, \quad C_{i-shell} &= C_{i-membrane} \\ \text{at } r = R_3, \quad \frac{\partial C_{i-shell}}{\partial r} &= 0 \quad (\text{symmetry}) \end{aligned}$$

معادله پایستگی جرم پایا برای انتقال CO_2 و H_2S در حالی که با MDEA در داخل پوسته واکنش می دهد به همراه گونه های جدید تشکیل شده از واکنش شامل ترم نفوذ، کنوکسیون و واکنش بوده و به فرم زیر است:

$$D_{i-tube} \left[\frac{\partial^2 C_{i-tube}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_{i-tube}}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_{i-tube}}{\partial z^2} \right] + R_i = V_{z-tube} \frac{\partial C_{i-tube}}{\partial z}$$

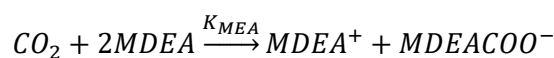
فرض می شود در داخل پوسته توزیع سرعت به صورت نیوتونی و آرام زیر می باشند:

$$V_{z-tube} = 2(V) \left(1 - \left(\frac{r}{R_1} \right)^2 \right)$$

شرایط مرزی:

$$\begin{aligned} \text{at } C_{i-tube} = 0, \quad C_{MDEA-tube} &= C_{initial} \quad (i = \text{all species}) \\ \text{at } r = 0, \quad \frac{\partial C_{i-tube}}{\partial r} &= 0 \quad (\text{symmetry}) \quad (i = \text{all species}) \\ \text{at } r = R_1, \quad \begin{cases} C_{i-tube} = C_{i-membrane} * m_i & (i = CO_2, H_2S) \\ \frac{\partial C_{s-tube}}{\partial r} = 0 & (s = \text{other species than } CO_2 \text{ and } H_2S) \end{cases} \end{aligned}$$

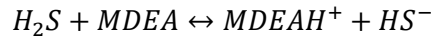
معادله واکنش دی اکسید کربن با MDEA به صورت زیر است [۱۰]:



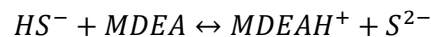
که در آن K_{MDEA} ثابت سرعت واکنش دی اکسید کربن با MDEA می باشد که در دماهای مختلف از رابطه زیر به دست می آید:

$$k_{MDEA}(m^3 mol^{-1} s^{-1}) = \frac{10^{(10.99 - 2152/T)}}{1000}$$

واکنش هیدروژن سولفید با MDEA به صورت زیر است:



از آنجایی که این واکنش تنها شامل جابه جایی پروتون است بینهایت سریع بوده (ثابت سرعت واکنش از مرتبه دوم می باشد) و مقدار $K_{H_2S-MDEA} \geq 3.6 * 10^{12} (m^3 kmol^{-1} h^{-1})$ می باشد به طوری که می توان هیدروژن سولفید و آمین را در همه جا در حال تعادل فرض کرد. معادله ثانویه دیگری را نیز می توان در نظر گرفت [۱۱]:



تمامی معادلات سرعت واکنش برای واکنش همزمان دی اکسید کربن و هیدروژن سولفید با MDEA به صورت زیر است [۱۲، ۱۳]:

$$R_{CO_2} = -k_{MDEA}[CO_2][MDEA]$$

$$R_{H_2S} = -k_{H_2S-MDEA}([H_2S][MDEA] - \frac{[HS^-][MDEAH^+]}{K_{eq}})$$

$$R_{MDEA} = -2k_{MDEA}[CO_2][MDEA] - k_{H_2S-MDEA}([H_2S][MDEA] - \frac{[HS^-][MDEAH^+]}{K_{eq}})$$

$$R_{MDEAH^+} = -k_{H_2S-MDEA}([H_2S][MDEA] - \frac{[HS^-][MDEAH^+]}{K_{eq}})$$

$$R_{MDEA^+} = k_{MEA}[CO_2][MDEA]$$

$$R_{MDEACOO^-} = k_{MEA}[CO_2][MDEA]$$

$$R_{HS^-} = k_{H_2S-MDEA}([H_2S][MDEA] - \frac{[HS^-][MDEAH^+]}{K_{eq}})$$

$$\%Removal = 100 \frac{(vC)_{inlet} - (vC)_{outlet}}{(vC)_{inlet}} = 100(1 - \frac{C_{outlet}}{C_{inlet}})$$

$$J = \frac{((vC)_{inlet} - (vC)_{outlet}) * 273.15 * 1000}{22.4 * T_g * A_T}$$

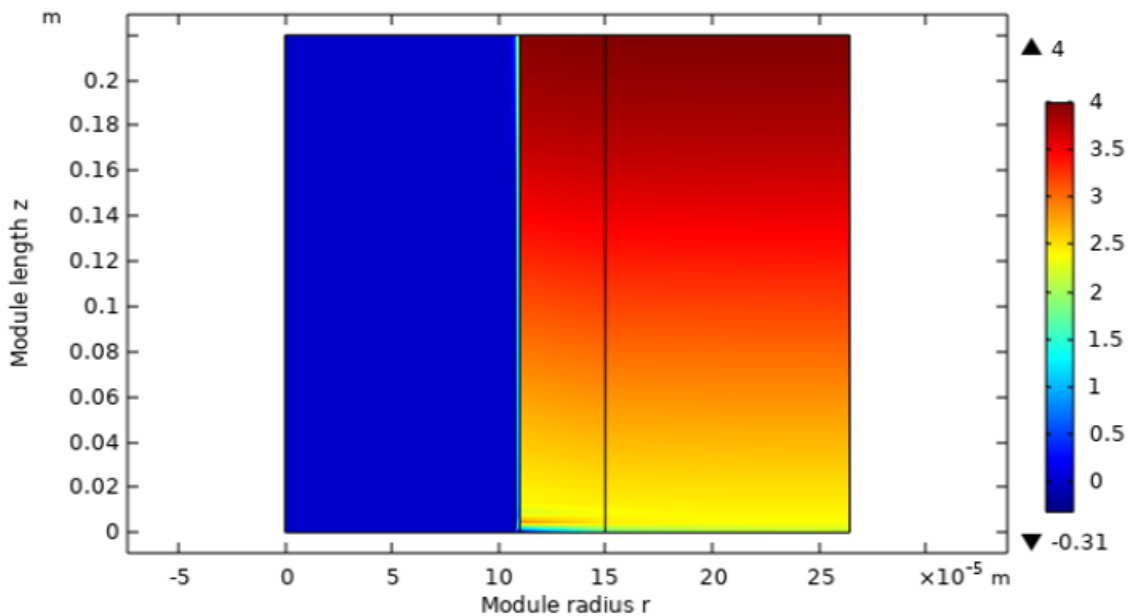
که در آن $K_{eq} = 295$ می باشد.

بحث و بررسی نتایج

همانگونه که از روی شکل ۲ مشخص است غلظت کربن دی اکسید در ورودی به داخل غشا بیشترین مقدار است و با طی طول غشا مقدار آن به دلیل نفوذ به حلال داخل پوسته کاهش می یابد. از طرف دیگر حلال به صورت خالص وارد شده و با طی طول غشا مقدار بیشتری از گاز دی اکسید کربن را دفع می کند.

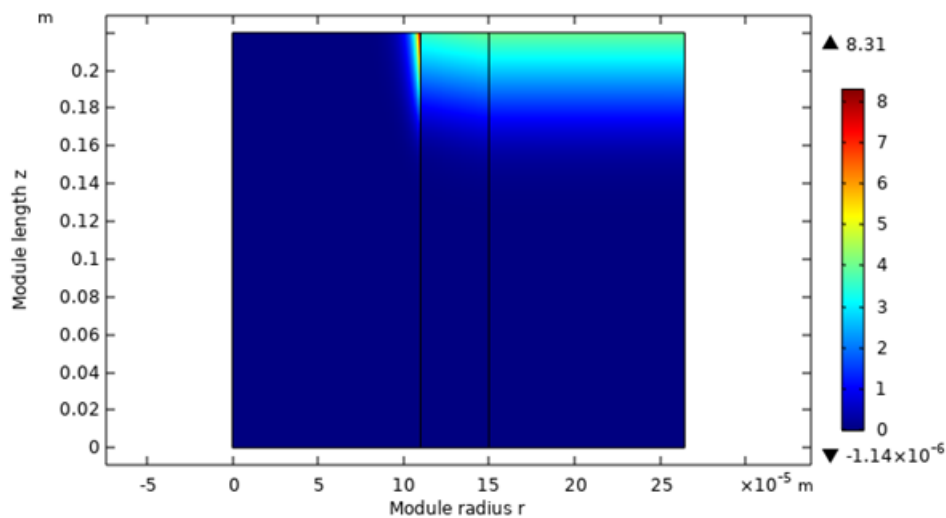
همچنین نشان می دهد که کاهش غلظت کربن دی اکسید در طول غشا ناشی از نفوذ کربن دی اکسید از پوسته به حلال در طی غشا است. با توجه به شکل هنگامی که خوراک گازی وارد سیستم می شود مقدار نفوذ گاز در فاصله کمی از ورودی غشا پایین است ولی با پیشروی خوراک در طول غشا نفوذ افزایش می یابد دلیل آن این است که چون حلال در خلاف جهت خوراک به گردش در آمده است بنابراین در پایین غشا حلال خالص تر بوده و گرادیان غلظت بیشتری وجود دارد و در نتیجه انتقال جرم

نفوذی بیشتر است، و هر چقدر که حلال مسیر بیشتری را طی می کند مقدار کربن دی اکسید در آن افزایش یافته و اختلاف غلظت محلی نقاط حلال با خوراک کاهش می یابد.



شکل ۲- جواب مدل برای CO₂

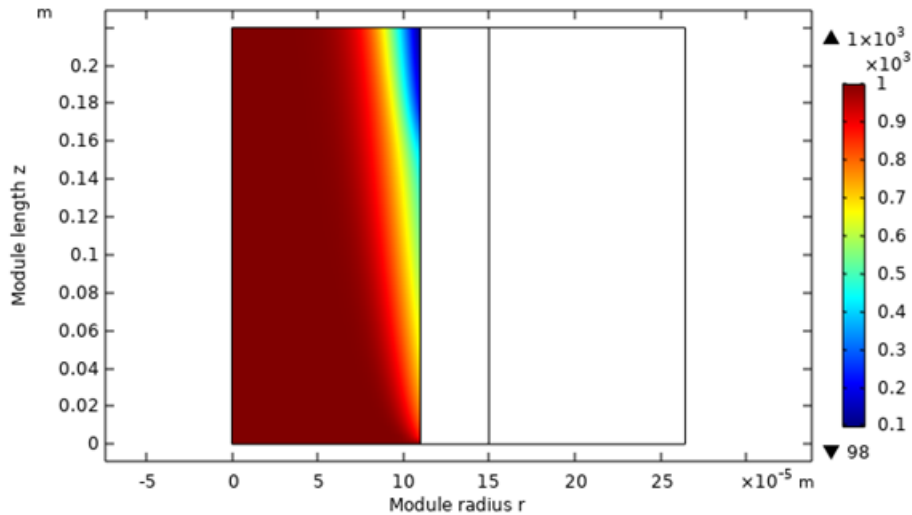
$$V_{liq.} = 1 \text{ m.s}^{-1}, V_{gas} = 5 \text{ m.s}^{-1}, C_{MDEAO} = 1000 \text{ mol.m}^{-3}, C_{CO_2o} = 4 \text{ mol.m}^{-3}, L = 22 \text{ cm}, r_3 = 0.265 \text{ mm}, r_2 = 0.15 \text{ mm}, r_1 = 0.11 \text{ mm}$$



شکل ۳- جواب مدل برای H₂S

$$V_{liq.} = 1 \text{ m.s}^{-1}, V_{gas} = 5 \text{ m.s}^{-1}, C_{MDEAO} = 1000 \text{ mol.m}^{-3}, C_{H_2So} = 4 \text{ mol.m}^{-3}, L = 22 \text{ cm}, r_3 = 0.265 \text{ mm}, r_2 = 0.15 \text{ mm}, r_1 = 0.11 \text{ mm}$$

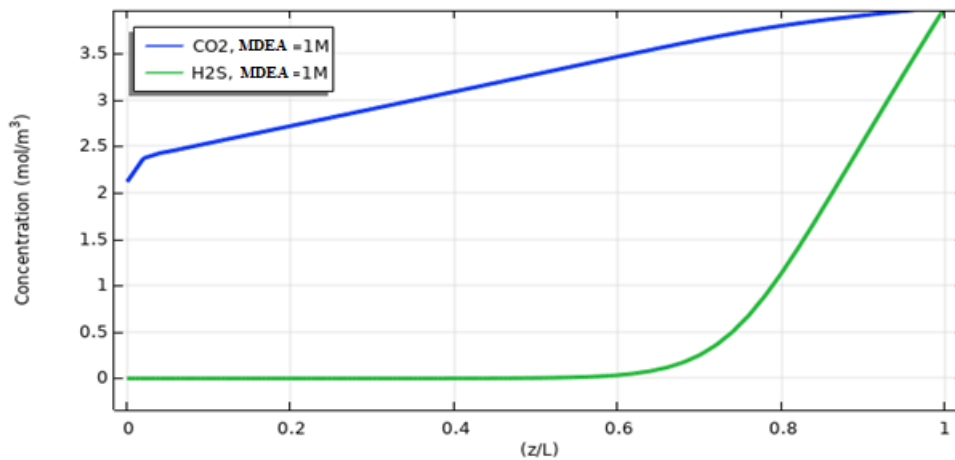
با توجه به شکل ۳، می بینیم که H₂S به دلیل سرعت بالای واکنش با MDEA به سرعت از جریان گازی حذف می شود و همانطور که مشخص است در ناحیه گازی گرادیان غلظتی شعاعی مشاهده نمی شود و بیشترین گرادیان غلظت در ناحیه ورودی گاز با خروج مایع از تماس دهنده می باشد، و همچنین لازم به ذکر است که در نواحی که در آن جداسازی H₂S صورت می گیرد روند جداسازی CO₂ کندتر خواهد بود و این به علت سرعت زیاد واکنش H₂S با آمین است.



شکل ۴- جواب مدل برای MDEA

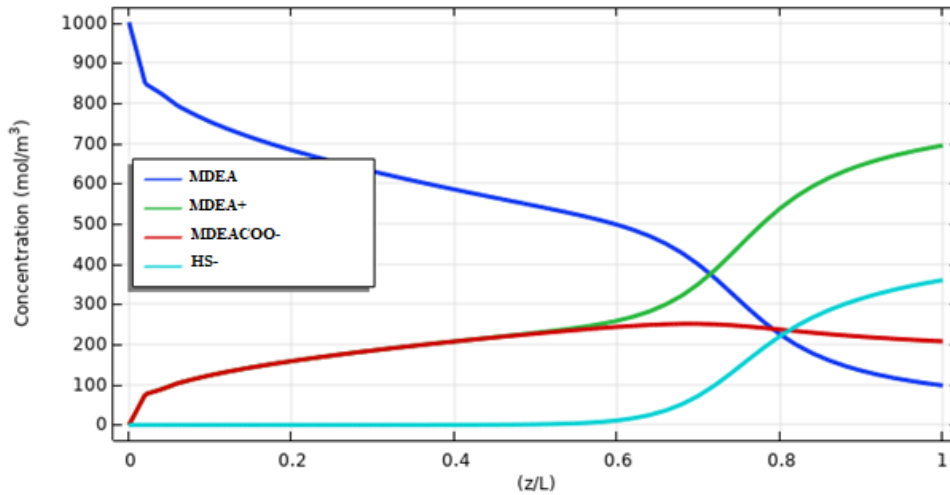
$$V_{liq.} = 1 \text{ m. s}^{-1}, V_{gas} = 5 \text{ m. s}^{-1}, C_{MDEA0} = 1000 \text{ mol. m}^{-3}, L = 22 \text{ cm}, r_3 = 0.265 \text{ mm}, r_2 = 0.15 \text{ mm}, r_1 = 0.11 \text{ mm}$$

از شکل مشخص است که غلظت MDEA در نزدیکی فصل مشترک پوسته و غشا کمترین مقدار خود را دارد. این موضوع به دلیل حل شدن CO_2 و H_2S در فصل مشترک پوسته و غشا و واکنش با MDEA می‌باشد.

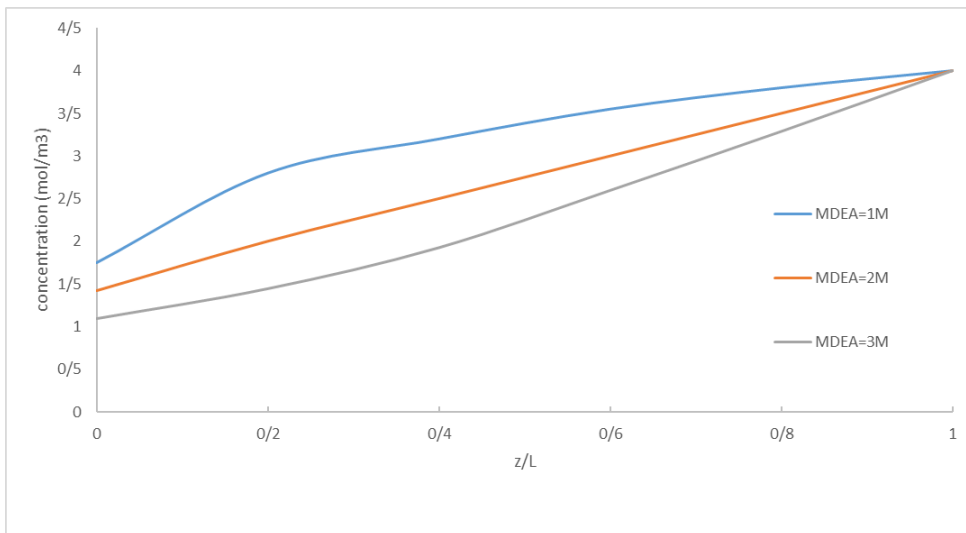


شکل ۵- جواب مدل برای پروفایل غلظت CO_2 و H_2S در امتداد طول غشا (سطح تماس پوسته-غشا)

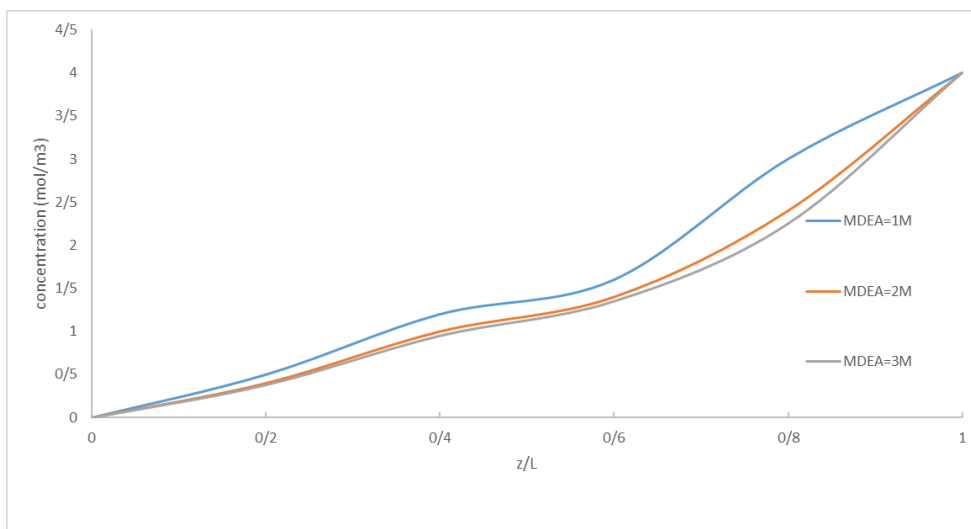
همانطور که در شکل ۵، مشاهده می‌شود غلظت CO_2 به صورت خطی در طول غشا کاهش می‌یابد تا به مینیمم غلظت در خروجی برسد. در حالی که غلظت H_2S در ۳۰٪ طول اولیه غشا به طور ناگهانی به صفر می‌رسد، که این تغییر غلظت ناگهانی به علت بالا بودن سرعت واکنش H_2S با MDEA می‌باشد.



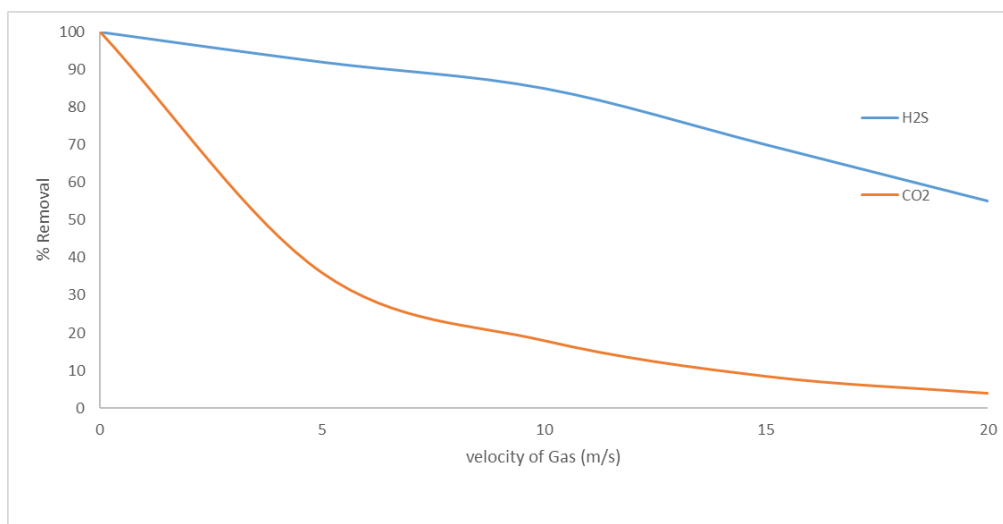
شکل ۶- جواب مدل برای پروفایل غلظت MDEA، MDEA+، MDEACOO- و HS- در امتداد طول غشا (سطح تماس پوسته-غشا)



شکل ۷- اثر غلظت MDEA بر پروفایل غلظت CO2 در امتداد طول غشا (سطح تماس پوسته-غشا)

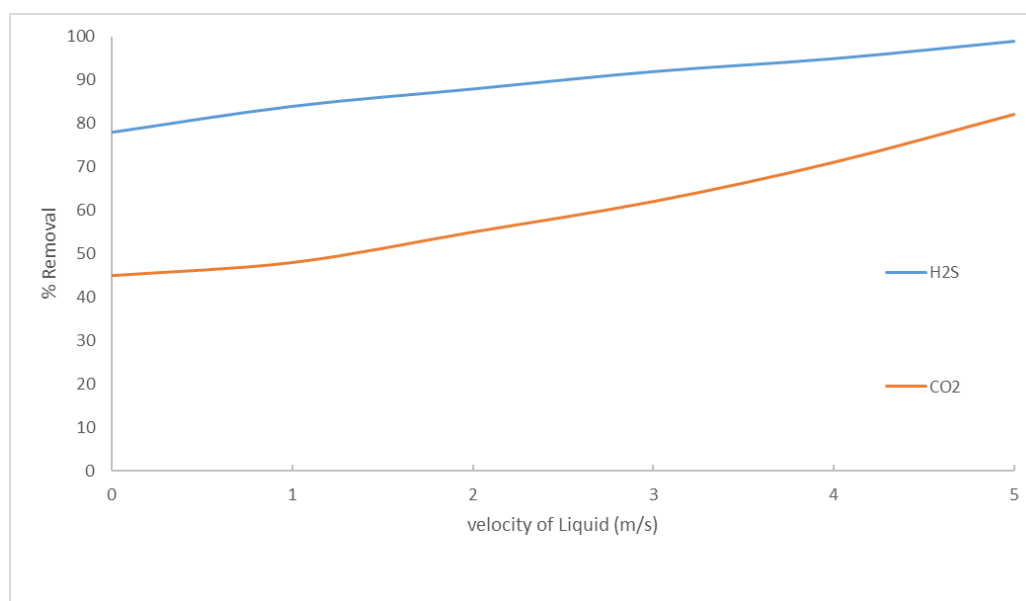


شکل ۸- اثر غلظت MDEA بر پروفایل غلظت H2S در امتداد طول غشا (سطح تماس پوسته-غشا)



شکل ۹- اثر سرعت گاز بر روی درصد جداسازی H_2S و CO_2

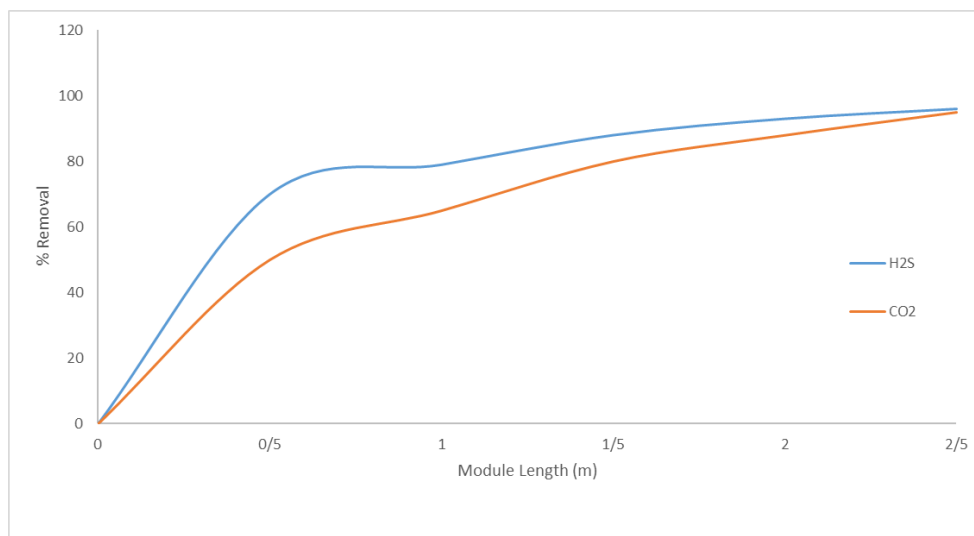
شکل ۹، اثر تغییر سرعت گاز را بر روی غلظت دی اکسید کربن خروجی از پوسته نمایش می دهد. هر چقدر که سرعت گاز بیشتر شود، غلظت خروجی CO_2 از پوسته کاهش می یابد و این بدین معناست که در داخل پوسته زمان تماس است که راندمان سیستم را کنترل می کند و افزایش زمان تماس راندمان را افزایش می دهد. هر چند که افزایش زمان تماس باعث افزایش ضخامت لایه ی مرزی می گردد ولی در این قسمت اثر افزایش زمان تماس برای داشتن راندمان بیشتر مهم تر است.



شکل ۱۰- اثر سرعت مایع بر روی درصد جداسازی H_2S و CO_2

در شکل ۱۰، افزایش راندمان سیستم در اثر افزایش سرعت حلال نشان داده شده است، هنگامی که سیالی وارد یک سطح شود تنش باعث ایجاد لایه ی مرزی می گردد. ایجاد لایه ی مرزی در سیستم های تماس دهنده ی غشایی باعث ایجاد مقاومتی در برابر انتقال جرم می گردد. میزان این مقاومت ارتباط مستقیمی با ضخامت لایه ی مرزی ایجاد شده دارد. در نتیجه برای کاهش لایه ی مرزی می توان سرعت سیال را افزایش داد تا ضخامت لایه ی مرزی کاهش یابد. با افزایش سرعت جریان حلال در داخل پوسته غلظت خروجی CO_2 و H_2S از سیستم کاهش می یابد و بنابراین اثر کاهش ضخامت لایه ی مرزی یا همان کاهش مقاومت در قسمت تیوب عامل تعیین کننده و کنترل کننده راندمان در این قسمت است.

مقادیر بالای سرعت حلال و مقادیر کم سرعت گاز باعث افزایش راندمان سیستم می گردد. پس به صورت تجربی بهتر است از نسبت های بالای سرعت حلال به خوراک استفاده کرد. از طرف دیگر چون افزایش راندمان بیشتر تابع افزایش سرعت حلال است تا کاهش سرعت گاز، بنابراین بهتر است که افزایش نسبت سرعت حلال به گاز با کاهش سرعت گاز صورت پذیرد.



شکل ۱۱- اثر طول تماس دهنده بر روی درصد جداسازی CO₂ و H₂S

همانطور که شکل ۱۱، نشان می دهد با افزایش طول راکتور درصد حذف H₂S تغییر بیشتری نسبت به CO₂ می کند زیرا به دلیل زیاد بودن طول مسیر واکنش با MDEA به راندمان حذف هر دو ماده به صورت فزاینده ای افزایش می یابد به گونه ای که می توان گفت به ازای هر ۵۰ سانتی متر افزایش طول تماس دهنده، درصد حذف هر دو ماده به صورت قابل توجهی چشمگیر می یابد. به دلیل اینکه با افزایش طول، افزایش سطح و فرصت تماس بین گاز و مایع جاذب بیشتر می شود.

نتیجه گیری

نتایج نشان می دهد که استفاده از غشاهای آبگریز می تواند تاثیر چشمگیری بر حذف گازهای اسیدی داشته باشد و همچنین حداقل امکان بایستی سرعت گاز را پایین و سرعت حلال و غلظت آنرا افزایش دهیم و شرایط عملیاتی (دما و فشار) مساعد برای حذف را تعیین کنیم تا در نهایت بتوانیم به درصد حذف قابل توجهی برسیم، همچنین کاهش قطر داخلی الیاف نیز می تواند مصرف MDEA را کاهش دهد و اینکه کاهش حلال MDEA می تواند میزان ترشوندگی غشا را کاهش دهد بنابراین بهینه سازی غلظت آمین خود یکی از مهمترین پارامترهای تاثیر گذار بر میزان حذف گازهای اسیدی می باشد. در ادامه می خواهیم پارامترهای سرعت گاز، سرعت مایع، طول تماس دهنده، غلظت MDEA و دما را در یک محدوده مشخص به نحوی تعیین کنیم که در صد حذف CO₂ و H₂S ماکزیمم شوند.

در آخرین مرحله مقدار فشار مایع ورودی به سیستم غشای الیاف توخالی مورد بررسی قرار گرفت که افزایش آن نیز تاثیر بر راندمان حذف گاز کربن دی اکسید داشت و آن را افزایش داد. سرعت مایع مونو اتانول آمین در سیستم غشایی در پژوهش پیش رو نشان داد که هر چه قدر این سرعت افزایش پیدا کند، راندمان جذب گازهای کربن دی اکسید و سولفید هیدروژن افزایش پیدا می کند.

منابع و مراجع

- [۱] معینی، ح. و م. بیاتی، شبیه سازی جداسازی دی اکسید کربن با استفاده از غشای فیبری تو خالی توسط *MDEA* با کمک تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی. شباک، ۱۳۹۵. ۷(۲) (پیاپی ۱۴) (جلد ۲ مطالعات علوم مهندسی): p. --.
- [۲] جداسازی گاز توسط تکنولوژی غشایی. نفت پارس، ۱۳۸۴. سال سوم. 8- (30): p.
- [3] Chu, Y., et al., *Mathematical modeling and process parametric study of CO2 removal from natural gas by hollow fiber membranes*. Chemical Engineering Research and Design, 2019. 148: p. 45-55.
- [4] Cao, Y., et al., *Mathematical modeling and numerical simulation of CO2 capture using MDEA-based nanofluids in nanostructure membranes*. Process Safety and Environmental Protection, 2021. 148: p. 1377-1385.
- [5] Abd, A.A. and S.Z. Naji, *Comparison study of activators performance for MDEA solution of acid gases capturing from natural gas: Simulation-based on a real plant*. Environmental Technology & Innovation, 2020. 17: p. 100562.
- [6] Harr, J., et al., *Hollow Fiber Membranes*. 2012.
- [7] Faiz, R. and M. Al-Marzouqi, *Mathematical modeling for the simultaneous absorption of CO2 and H2S using MEA in hollow fiber membrane contactors*. Journal of Membrane Science, 2009. 342: p. 269-278.
- [8] Lu, J.-G., Y.-F. Zheng, and M.-D. Cheng, *Wetting mechanism in mass transfer process of hydrophobic membrane gas absorption*. Journal of Membrane Science, 2008. 308(1): p. 180-190.
- [9] Paul, S., A.K. Ghoshal, and B. Mandal, *Removal of CO2 by Single and Blended Aqueous Alkanolamine Solvents in Hollow-Fiber Membrane Contactor: Modeling and Simulation*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2007. 46(8): p. 2576-2588.
- [10] Bolhar-Nordenkampf, M., et al., *Modelling Selective H2S Absorption and Desorption in an Aqueous MDEA-Solution*. Chemical Engineering and Processing - CHEM ENG PROCESS, 2004. 43: p. 701-715.
- [11] Blauwhoff, P.M.M., G.F. Versteeg, and W.P.M. Van Swaaij, *A study on the reaction between CO2 and alkanolamines in aqueous solutions*. Chemical Engineering Science, 1984. 39(2): p. 207-225.
- [12] Mandal, B. and S.S. Bandyopadhyay, *Simultaneous Absorption of CO2 and H2S Into Aqueous Blends of N-Methyldiethanolamine and Diethanolamine*. Environmental Science & Technology, 2006. 40(19): p. 6076-6084.
- [13] Saha, A.K., et al., *Selective removal of hydrogen sulfide from gases containing hydrogen sulfide and carbon dioxide by absorption into aqueous solutions of 2-amino-2-methyl-1-propanol*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1993. 32(12): p. 3051-3055.