



مدلسازی تأثیر شدت جریان مایع ورودی بر روی حذف گاز کربن دی اکسید از گاز طبیعی با استفاده از غشاء

عباس قره قاشی^۱

^۱ استادیار، دانشگاه ولایت ایرانشهر، ایرانشهر، a.ghareghashi@velayat.ac.ir

چکیده

در این تحقیق، با استفاده از روش تماس غشایی، حذف گاز کربن دی اکسید به کمک مایع جاذب از مخلوط گاز طبیعی مورد بررسی قرار گرفته شد و مدل مناسبی برای توصیف این فرایند ارائه گردید. شدت جریان مایع ورودی یکی از پارامترهایی است که بر روی حذف کربن دی اکسید تأثیر بسزایی دارد. تأثیر این پارامتر بر روی میزان حذف کربن دی اکسید از گاز طبیعی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل از تحقیق نشان داد که حذف گاز کربن دی اکسید تا بیش از ۹۳٪ انجام گردیده است. همچنین اثر افزایش جریان ورودی تا ۵۰ درصد حذف گاز را کاهش داده است.

واژه های کلیدی

کربن دی اکسید، مدلینگ، غشاء، جذب

مقدمه

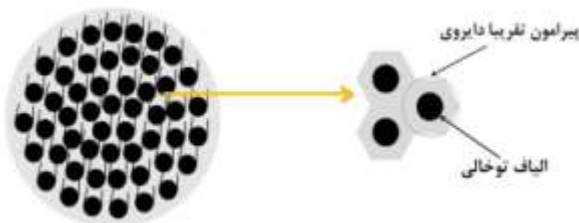
افزایش گازهای گلخانه‌ای موجب ایجاد پدیده‌های گرم شدن زمین و تغییرات آب و هوا شده است. علت اصلی افزایش این گازها، گسترش فعالیت صنایع در سه دهه اخیر است [۱]. حدود ۸۰٪ این گازها را کربن دی اکسید تشکیل می‌دهد که بیش از نیمی از آن توسط صنایع و نیروگاه‌هایی که از سوخت‌های فسیلی استفاده می‌کنند، تولید می‌شود [۲]. همچنین گاز H_2S به شدت سمی است به طوری که در غلظت بیش از ۱۰۰۰ ppm تنها با یک‌بار تنفس باعث تخریب شدید سیستم تنفسی و مرگ می‌شود [۳]. هردوی این گازها در گاز طبیعی وجود دارد. با توجه به بالا بودن هزینه‌های آماده‌سازی نفت برای تولید انرژی، استفاده از گاز طبیعی به عنوان منبع انرژی در حال افزایش است. بنابراین حذف گازهای اسیدی مانند کربن دی اکسید از جریان گاز یکی از مهم‌ترین بخش‌های فرآوری گاز طبیعی محسوب می‌شود [۳-۶]. روشی که معمولاً برای حذف گازهای CO استفاده می‌شود، جذب این گاز توسط حلال با استفاده از تماس

دهنده‌های گاز مایع مانند برج‌های سینی‌دار و آکنده است. مطالعات نظری و تجربی بر روی جذب همزمان این گاز با استفاده از برج‌های آکنده به‌طور گسترده‌ای در حال انجام است [۷]. از طرف دیگر هزینه زیاد آماده‌سازی این برج‌ها و نرخ بازگشت سرمایه پایین، موجب کاهش استفاده از این روش شده است. یکی از مهم‌ترین عوامل در بهبود شرایط جذب، بالا بودن نسبت سطح به حجم است. این عامل در برج‌های آکنده ۸۰۰-۱۰۰ و در تماس دهنده‌های غشایی ۳۰۰۰-۱۵۰۰ است [۸،۹]. به همین علت تماس دهنده غشای الیاف توخالی [HFM] مورد توجه بسیاری از تحقیقات قرار گرفته است [۱۰-۱۵]. علت استفاده از این تماس‌دهنده‌ها تماس در سطح بالا و بدون اختلاط دو فاز گاز و مایع با یکدیگر است.

بیشتر مطالعات انجام‌گرفته در مورد حذف کربن دی اکسید با محلول‌های آمینی مانند DEA و MDEA با مخلوط این دو بوده است [۱۶]. استفاده از تماس‌گیرنده الیاف توخالی برای جذب کربن دی اکسید به‌وسیله محلول NaOH و آب نیز گزارش شده است [۱۷]. مطالعات نظری و تجربی برای جذب همزمان گازهای کربن دی اکسید با MDEA و DEA توسط المرزوقی و همکاران انجام‌گرفته است [۱۸]. آنچاریاوت و همکاران جذب کربن دی اکسید با استفاده از MEA و NaOH را در تماس‌گیرنده غشایی الیاف توخالی مورد مطالعه قرار دادند [۱۹]. تقریباً در تمام مطالعات انجام‌شده فرض بر این است که با ساخت غشاء توسط مواد آب‌گریز، خلل و فرج غشاء خیس نمی‌شود. این فرض چندان صحیح نیست و همان‌طور که نشان داده شده است خیس شدگی تأثیر زیادی بر میزان جذب دارد. با در نظر گرفتن این پدیده، در این پژوهش غشای الیاف توخالی در سیستم استوانه‌ای و در دو بعد مدل شده است. همچنین بعد از تعیین گرادیان غلظت ابتدا با تغییر عبارت واکنش شیمیایی در شرایط مرزی، به مقایسه حلال‌های مختلف و تأثیر آن‌ها بر میزان جذب پرداخته شده است. در ادامه با جابه‌جا کردن شرایط مرزی برای مرز خیس شده، اثر خیس شدگی در حالت ۵۰٪ خیس شدگی و خیس شدگی کامل بررسی شده و با حالت خیس نشده مقایسه شده است.

مدلسازی

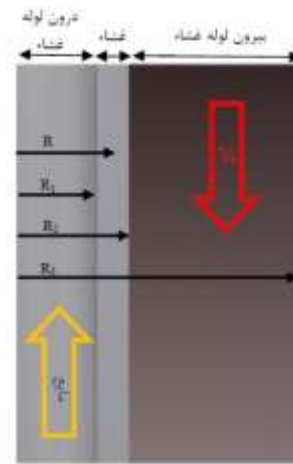
حرکت گاز کربن دی اکسید بر روی غشاء به صورت دو بعدی در نظر گرفته شده است. نفوذهای محوری و عمودی در جهت طول غشاء در میان لوله، خارج لوله و درون تماس دهنده غشایی در نظر گرفته شده است. غشای مورد بررسی به صورت پوسته استوانه ای بوده و جریان مایع و گاز به صورت غیرهمسو است. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، مایع از درون لوله غشاء و گاز در بیرون آن حرکت میکنند. در تمام حالات دما و فشار سیستم ثابت و برابر دما و فشار محیط فرض شده است.



شکل ۱. برشی از تماس گیرنده غشایی و تقریب دایروی پیرامونی که محل عبور گاز است [18]

برای نوشتن معادلات، سیستم مورد نظر به سه قسمت تقسیم شده و معادلات برای هر قسمت سیستم نوشته شده است. خارج لوله غشاء (محل عبور گاز)، غشاء و درون لوله غشاء (محل عبور مایع جاذب). محل ورود مایع به سیستم نقطه $Z=1$ و پروفایل سرعت مایع جاذب نیز به صورت جریان آرام سهمی شکل کاملاً توسعه یافته در نظر گرفته شده است. شماتیک کلی سیستم مدلسازی شده مطابق شکل ۲ است.

از آنجا که غشاءها توسط گاز احاطه می‌شوند، برای به دست آوردن شعاع مؤثر گاز اطراف هر غشاء از مدل سطح آزاد هیل استفاده شده است. این شعاع در شکل ۲ با R_3 داده شده است. در ادامه به بیان معادلات مربوط به مدلسازی هر قسمت پرداخته شده است. همچنین در فرمولبندی های غشاء با shell، غشاء با membrane و درون لوله غشاء با tube نمادگذاری شده است.



شکل ۲. شماتیک مدل

معادلات حاکم

قسمت بیرونی غشاء (محل عبور گاز)

با در نظر گرفتن مختصات استوانه برای سیستم، رابطه زیر نوشته شده است [۲۰].

$$D_{i-shell} \left[\frac{\partial^2 C_{i-shell}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_{i-shell}}{\partial r} \right] \quad (1)$$

$$+ \frac{\partial^2 C_{i-shell}}{\partial z^2} \Bigg] = V_{z-shell} \frac{\partial C_{i-shell}}{\partial z}$$

$$D_{CO_2-shell} \left[\frac{\partial^2 C_{CO_2-shell}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_{CO_2-shell}}{\partial r} \right] \quad (2)$$

$$+ \frac{\partial^2 C_{CO_2-shell}}{\partial z^2} \Bigg] = V_{z-shell} \frac{\partial C_{CO_2-shell}}{\partial z}$$

برای عبارت $V_{z-shell}$ در روابط فوق، از مدل سطح آزاد هیل استفاده شده که به صورت رابطه ۳ قابل بیان است [۲۱، ۲۲].

$$V_{z-shell} = 2 \langle V \rangle \left[1 - \left(\frac{R_2}{R_3} \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$\times \left[\frac{(r/R_3)^2 - (R_2/R_3)^2 + 2 \ln(R_2/r)}{3 + (R_2/R_3)^4 - 4(R_2/R_3)^2 + 4 \ln(R_2/R_3)} \right]$$

که در آن $R_3 = R_2 \sqrt{1/(1-\phi)}$ و ϕ برابر کسر حجم خالی است.

شرایط مرزی عبارتند از:

$$C_{i-shell} = C_0 \quad (4)$$



$$C_{i-shell} = C_{membrane} \quad (5)$$

$$\frac{\partial C_{i-shell}}{\partial r} = 0 \quad (6)$$

چون سیستم به صورت پایا می باشد، R_2 و $\frac{\partial C_i}{\partial t}$ در رابطه اصلی انتقال جرم برابر صفر است.

ناحیه داخلی لوله غشاء (محل عبور مایع جاذب)

در این قسمت با توجه به جذب گاز توسط مایع، واکنش شیمیایی اتفاق می افتد. رمعادله انتقال جرم عبارتست از:

$$D_{i-tube} \left[\frac{\partial^2 C_{i-tube}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_{i-tube}}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_{i-tube}}{\partial z^2} \right] + R_i = V_{z-tube} \frac{\partial C_{i-tube}}{\partial z} \quad (7)$$

در معادله ۷، جزء i علاوه بر کربن دی اکسید و مایع جاذب شامل موارد دیگری نیز می باشد که در طول واکنش تولید می شوند. برای عبارت V_{z-tube} با فرض جریان آرام سهمی شکل کاملاً توسعه یافته داریم:

$$V_{z-tube} = 2 \langle V \rangle \left[1 - \left(\frac{r}{R_1} \right)^2 \right] \quad (8)$$

شرایط مرزی عبارتند از:

$$i \text{ شامل تمام اجزا بجز MEA است.} \quad (9)$$

$$z = 0, C_{i-tube} = 0, C_{MEA-tube} = C_0$$

$$r = 0, (\partial C(i-tube)) / (\partial r) = 0 \quad (10)$$

$$r = R_1, C_{i-tube} = C_{i-membrane} \times m_i \quad (H_2S, CO_2 = i) \quad (11)$$

دقت شود که $\frac{\partial C_{j-tube}}{\partial r} = 0$ (j شامل تمام موارد بجز CO_2 و H_2S می باشد).

در ادامه محاسبات باید برای R_i عبارتی بدست آید. برای این کار، مایع جاذب MEA در نظر گرفته شده است. معادلات سرعت واکنش CO_2 و MEA مورد بررسی محققان بسیاری قرار گرفته است [23, 24] که یکی از معادلات عبارتست از:



سرعت واکنش عبارتست از:

$$R_{CO_2} = -K_{MEA}[CO_2][MEA] \quad (13)$$

$$K_{MEA} = \frac{10^{(10.99-2152/T)}}{1000} [m^3 mol^{-1} s^{-1}] \quad (14)$$

قسمت غشاء:

خیس شدن غشاء تاثیر بسزایی در معادلات دارد. در صورتی که غشاء خیس نشود، درون غشاء فقط گاز وجود دارد. با توجه به اینکه گازها با هم واکنش ندارند، عبارت واکنش در رابطه کلی انتقال جرم برابر صفر می باشد. با توجه به شرایط پایا عبارت $\frac{\partial C_i}{\partial t}$ هم برابر صفر می باشد. درون غشاء، حرکت به صورت شعاعی می باشد پس عبارت V_{z-tube} نیز برابر صفر می باشد. برای قسمت غشاء داریم:

$$D_{i-membrane} \left[\frac{\partial^2 C_{i-membrane}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_{i-membrane}}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_{i-membrane}}{\partial z^2} \right] = 0 \quad (15)$$

شرایط مرزی:

$$r = R_1, C_{i-membrane} = C_{i-shell} \quad (16)$$

در صورت خیس شدن غشاء، به دو بخش تقسیم می گردد: ۱- بخش خیس شده ۲- بخش خیس نشده. در قسمت خیس شده، عبارت واکنش شیمیایی (R_i) به دلیل وجود مایع جاذب درون غشاء، وجود دارد. در بخش خیس نشده این عبارت برابر با صفر خواهد بود. در این حالت (خیس بودن غشاء)، در سطح تماس مایع و گاز که درون غشاء است، قانون حلالیت هنری برقرار است. این در حالی است که اگر غشاء خیس نشود، سطح تماس مایع و گاز در مرز غشاء و محل عبور مایع اتفاق می افتد و قانون حلالیت هنری در این نقطه برقرار است.

معادلات حاکم بر حالتی که غشاء خیس شود به دو قسمت تقسیم شده است. برای قسمتی از غشاء که خیس نشده، رابطه (۱۵) برقرار است. شرایط مرزی برای حل معادله این قسمت، با توجه به شرایط مسئله، قانون هنری در سطح تماس مایع و گاز در $r = R$ و $r = R_1, C_{i-membrane} = C_{i-shell}$ به دلیل پیوستگی غلظت در برقرار است. مقدار R نیز فاصله مرکز تا قسمتی از غشاء است که خیس شدگی در آنجا اتفاق می افتد. برای قسمتی از غشاء که خیس شده است، رابطه (۱۷) برقرار است.



$$D_{i-membrane} \left[\frac{\partial^2 C_{i-membrane}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_{i-membrane}}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_{i-membrane}}{\partial z^2} \right] + R_i = 0 \quad (15)$$

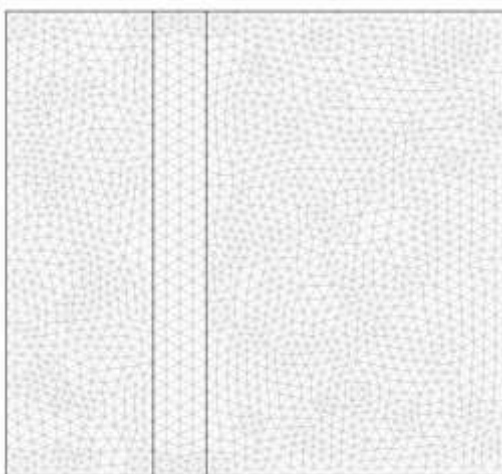
شرایط مرزی:

i شامل تمام اجزا بجز MEA است.	(16)
$z = 0, C_{i-tube} = 0, C_{MEA-tube} = C_0$	(17)
$r = 0, (\partial C(i-tube)) / (\partial r) = 0$	(18)
$r = R, C_{i-tube} = C_{i-membrane} \times m_i (H_2S, CO_2 = i)$	

دقت شود که $\frac{\partial C_{j-tube}}{\partial r} = 0$ (j شامل تمام موارد بجز CO_2 و H_2S) می باشد.

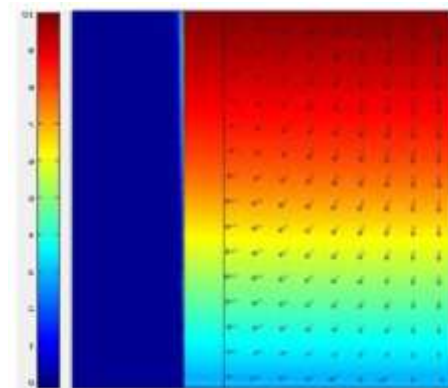
حل معادله مدل:

تاکنون معادله‌ی اصلی انتقال جرم برای هر سه قسمت مدل بسط داده شده و با حل آنها تغییرات غلظت اجزاء در جهت طول و شعاع قابل بررسی است. برای حل دستگاه معادلات دیفرانسیل پارهای حاصل از مدل، از نرم افزار COMSOL 3.4 استفاده شده و با روش المان محدود، دستگاه معادلات نیز حل شده است. همچنین سیستم مطابق شکل ۳ گره بندی گردیده است.



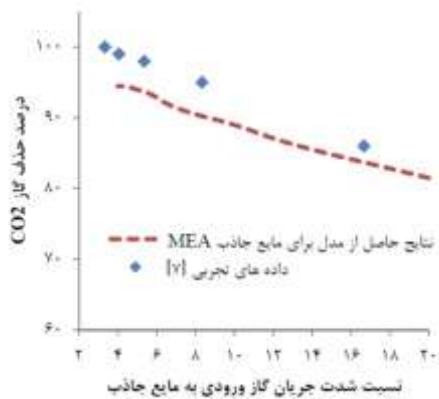
شکل ۳. گره بندی سیستم مدل سازی شده

غلظت مایع جاذب 1 مولار و ترکیب گاز طبیعی ورودی H_2S ۱۰٪ و CH_4 ۸۰٪، CO_2 ۱۰٪ در نظر گرفته شده است. همچنین دما نیز برابر دمای محیط و فشار برابر 1 atm است. گازهای H_2S و CO_2 از قسمت بالای راکتور $z=L$ وارد راکتور شده اند. با توجه به وجود اختلاف غلظت بین قسمت بیرونی لوله ی غشاء و غشاء، در این ناحیه انتقال جرم با سازوکار نفوذ است. این گازها نیز وارد تماس دهنده غشایی شده و طی واکنش شیمیایی با مایع جاذب (MEA) جذب آن شده و با مایع از سیستم خارج میشوند. در این سیستم گاز از بالای سیستم به طرف پایین در حرکت است. در این حالت علاوه بر انتقال جرم در جهت Z به علت حرکت توده و نفوذ مولکولی، به دلیل وجود اختلاف غلظت، انتقال جرم با سازوکار مولکولی بین تماس دهنده ی غشایی و گاز در جهت r نیز صورت میگیرد. در این شرایط بردارهای شار انتقال جرم و گرادیان غلظت برای مایع ورودی به صورت شکل ۴ است.



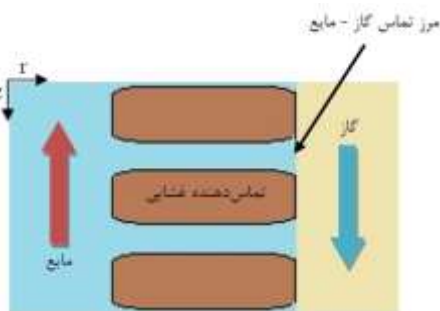
شکل ۴. بردارهای شار انتقال جرم و گرادیان غلظت شدت جریان مایع ورودی: ۱/۵ لیتر بر دقیقه، شدت جریان گاز ورودی: ۲۵ لیتر بر دقیقه و طول راکتور ۵۰ سانتیمتر

بررسی تأثیر خیس شدن غشاء بر روی جذب کربن دی اکسید درصد حذف گاز کربن دی اکسید در مقابل نسبت شدت جریان گاز ورودی به مایع ورودی در شکل ۵ رسم شده است.



شکل ۵. مقایسه نتایج مدل با داده های تجربی برای مایع جاذب MEA

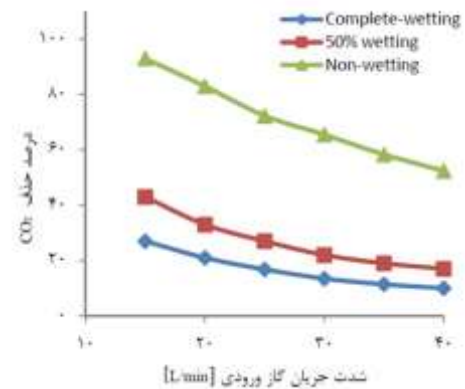
با افزایش نسبت گاز ورودی به مایع جاذب ورودی میزان حذف کاهش یافته است. زیرا در این شرایط مایع جاذب مدت کمتری برای تماس با گاز و واکنش با آن دارد. در صورتیکه غشاء توسط مایع جاذب خیس نشود، گاز حفره های غشاء را پر میکند و حالتی که غشاء کاملاً خیس شود، مایع درون این حفره ها را پر میکند. در نتیجه خیس شدگی بر روی معادلات بخش غشاء تأثیر گذار است. این تأثیر به صورت وجود یا عدم وجود عبارت واکنش شیمیایی و تغییر در محل برقراری شرط مرزی قانون انحلال هنری خود را نشان میدهد. در حالت غشای کاملاً خیس، این شرط مرزی در شعاع R2 (در شکل ۲) اعمال میشود. همچنین در این حالت عبارت واکنش شیمیایی مخالف صفر است. شماتیک خیس شدگی کامل در شکل ۶ نشان داده شده است. درصد حذف گاز کربن دی اکسید در مقابل نسبت شدت جریان گاز ورودی به مایع ورودی در شکل ۵ رسم شده است.



شکل ۶. شماتیک خیس شدگی کامل غشاء توسط مایع جاذب

شکل ۷ اثر خیس شدن غشاء بر روی درصد حذف کربن دی اکسید را برای حالت های عدم خیس شدن، 50% خیس شدگی و خیس شدگی کامل نشان داده است. با خیس شدن غشاء میزان حذف گاز کربن دی اکسید به شدت کاهش یافته زیرا در این حالت، مقاومت کلی انتقال جرم گاز به مایع، به شدت افزایش یافته است. این

حساسیت در شدت جریان های بالا کمتر از شدت جریان های پایین است. نکته قابل توجه در این شکل، اختلاف بین حالت های عدم خیس شدن و 50% خیس شدگی با اختلاف بین حالت های 50% خیس شدگی و خیس شدگی کامل است. با توجه به شکل ۶ در صورت 50% خیس شدگی غشاء، درصد حذف گاز کربن دی اکسید حدود 40-70 درصد کمتر از حالت خیس نشدن غشاء است. با توجه به نمودار درصد حذف گاز کربن دی اکسید نسبت به 50% خیس شدگی تنها 10-20 درصد کاهش یافته است.



شکل ۷. درصد حذف کربن دی اکسید به ازای شدت جریان های مختلف گاز ورودی

نتیجه گیری

در این پژوهش، حذف گاز کربن دی اکسید از گاز طبیعی توسط تماس دهنده غشایی مدلسازی گردیده است. در ادامه به برای جداسازی کربن دی اکسید از گاز طبیعی پیشنهاد شده است تا از MEA استفاده شود؛ زیرا علاوه بر میزان بالای حذف کربن دی اکسید، قابلیت احیاء و بازگشت مجدد به سیستم را دارد. در انتها نیز تأثیر خیس شدن غشاء بر میزان جذب کربن دی اکسید بررسی شده است. نتایج نشان داده است که خیس شدن غشاء به دلیل بالا بردن مقاومت انتقال جرم، تأثیر منفی بسیار زیادی بر روی عملکرد سیستم میگذارد. همچنین میزان حذف کربن دی اکسید از مخلوط گاز طبیعی را به شدت کاهش داده است. لازم به ذکر است که از مزایای استفاده از تماس دهنده های غشایی، حذف تقریباً کامل گاز کربن دی اکسید است. تحت شرایط مناسب عملیاتی درصد حذف کربن دی اکسید حدود 95% است.

مراجع و منابع

[1] I. Iliuta, F. Bougie, and M. C. Iliuta (2015), "CO2 removal by single and mixed amines in a hollow-fiber membrane module investigation of contactor performance." *AICHe Journal* 61(3) 955-971.



- [2] U. Desideri and A. Paolucci (1999), "Performance modeling of a carbon dioxide removal system for power plants", *Energy Convers. Manage.*, 40(18) 1899–1915.
- [3] P. D. Vaidya, E. Y. Kenig (2007), "CO₂-alkanolamine reaction kinetics: a review of recent studies", *Chem. Eng. Technol.*, 30(11) 1467–1474.
- [4] A. L. Kohl, R. B. Nielsen (1997), *Gas Purification*, fifth ed, Gulf Publishing Company, Houston, Texas.
- [5] S. M. Javaid Zaidi (2010), "Removal of acid gases from natural gas streams by membrane technology", in *Proceedings of the 2nd Annual Gas Processing Symposium*, 139–144.
- [6] A. Mansourizadeh, A. F. Ismail (2009), "Hollow fiber gas-liquid membrane contactors for acid gas capture: a review", *J. Hazard. Mater.*, 171(1) 38–53.
- [7] Y. Lv, X. Yu, S. T. Tu, J. Yan, and E. Dahlquist, (2012). Experimental studies on simultaneous removal of CO₂ and SO₂ in a polypropylene hollow fiber membrane contactor. *Applied Energy*, 97, 283–288.
- [8] K. R. Westerterp, W. P. M. van Swaaij, A. A. C. M. Beenackers (1984), *Chemical Reactor Design and Operation*, Wiley, New York.
- [9] P. S. Kumar, J. A. Hogendoorn, P. H. M. Feron, G. F. Versteeg (2002), "New absorption liquids for the removal of CO₂ from dilute gas streams using membrane contactors", *Chem. Eng. Sci.*, 57(9) 1639–1651.
- [10] Z. Wang, M. Fang, H. Yu, C. C. Wei, and Z. Luo, (2013). Experimental and Modeling Study of Trace CO₂ Removal in a Hollow-Fiber Membrane Contactor, Using CO₂-Loaded Monoethanolamine. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(50), 18059–18070.
- [11] M. Rahbari-Sisakht, A. F. Ismail, D. Rana, and T. Matsuura, (2013). Carbon dioxide stripping from diethanolamine solution through porous surface modified PVDF hollow fiber membrane contactor. *Journal of Membrane Science*, 427, 270–275.
- [12] Z. A. Tarsa, S. Hedayat, and M. Rahbari-Sisakht, (2015). Fabrication and Characterization of Polyetherimide Hollow Fiber Membrane Contactor for Carbon Dioxide Stripping from Monoethanolamine Solution. *Journal of Membrane Science and Research*, 1(3), 118–123.
- [13] R. Wang, D. Li, C. Zhou, M. Liu, D. Liang (2004), "Impact of DEA solutions with and without CO₂ loading on porous polypropylene membranes intended for use as contactors", *J. Membr. Sci.*, 229(1) 147–157.
- [14] S. H. Yeon, B. Sea, Y. I. Park, K. H. Lee (2003), "Determination of mass transfer rates in PVDF and PTFE hollow fiber membranes for CO₂ absorption", *Sep. Sci. Technol.*, 38(2) 271–293.
- [15] J. M. Zheng, Y. Y. Xu, Z. K. Xu (2003), "Shell side mass transfer characteristics in parallel flow hollow fiber membrane module", *Sep. Sci. Technol.*, 38(6) 1247–1267.
- [16] B. P. Mandal, A. K. Biswas, S. S. Bandyopadhyay (2004), "Selective absorption of H₂S from gas streams containing CO₂ and H₂S in aqueous solutions of N-methyldiethanolamine and 2-amino-2-methyl-1-propanol", *Sep. Purif. Technol.*, 35(3) 191–202.
- [17] V. Dindore, D. Brillman, G. Versteeg (2005), "Hollow fiber membrane contactor as a gas-liquid model contactor", *Chem. Eng. Sci.*, 60(2) 467–479.
- [18] M. Al-Marzouqi, M. El-Naas, S. Marzouk, N. Abdullatif (2008), "Modeling of chemical absorption of CO₂ in membrane contactors", *Sep. Purif. Technol.*, 62(3) 499–506.
- [19] S. Atchariyawut, R. Jiratananon, R. Wang (2007), "Separation of CO₂ from CH₄ by using gas-liquid membrane contacting process", *J. Membr. Sci.*, 304(1) 163–172.
- [20] R. E. Treybal (1980), *Mass Transfer Operation*, Third ed, McGraw-Hill.
- [21] Y. Lee, R. D. Noble, B. Y. Yeon, Y. I. Park, K. H. Lee (2001), "Analysis of CO₂ removal by hollow fiber membrane contactors", *J. Membr. Sci.*, 194(1) 57–67.
- [22] M. Mavroudi, S. P. Kaldis, G. P. Sakellariopoulos (2003), "Reduction of CO₂ emissions by a membrane contacting process", *Fuel*, 82(15) 2153–2159.
- [23] D. Barth, C. Tondre, J. Delpuech (1986), "Stopped-flow investigation of the reaction kinetics of carbon dioxide with some primary and secondary alkanolamines in aqueous solutions", *Int. J. Chem. Kinet.*, 18(4) 445–457. Author, A., Author, B., and Author, C., 1994. "Article Title". *Journal Name*, 1(5), May, pp. 1–3.