



Laboratory Investigation of Carbon Dioxide Separation by Aqueous Methyl Diethanolamine-Piperazine Solvent in a Microreactor Using Response Surface Methodology

SH. Choubtashani¹, H. Rashidi^{2*}

1- M. Sc. Student of Chemical Engineering, Kermanshah University of Technology

2- Associate Professor of Chemical Engineering, Kermanshah University of Technology

Email: h_rashidi@kut.ac.ir

Abstract

Carbon dioxide absorption is one of the ways to reduce greenhouse gases. This study investigates carbon dioxide absorption by methyl diethanolamine-piperazine aqueous solution using a microchannel. The Design Expert software was used to check and analyze the results. The effect of the parameters of amine concentration (30-50 wt.%), temperature (20-40°C), solvent flow entering the microreactor (3-9 ml/min) and carbon dioxide concentration (5-15 vol.%) on the overall mass transfer coefficient was evaluated. The importance of the input variables for this response is in the order of liquid flow > amine concentration > temperature. Liquid flow intensity is the most effective input variable because there is a direct relationship between liquid flow intensity and the succession of absorption sites. The highest value of the overall mass transfer coefficient was reported as 202.50 kmol/m³.h.kPa. This value was obtained in operating conditions: concentration of 40 wt.% of solvent, flow intensity of 9 ml/min of solvent, operating temperature of 40 degrees Celsius and input concentration of 10 vol.% of carbon dioxide gas.

Received: 25 December 2022

Accepted: 23 February 2023

Page Number: 104-114

Keywords:

Carbon Dioxide,
Methyl Diethanolamine,
Piperazine,
Microreactor,
Overall Mass Transfer
Coefficient

Please Cite this Article Using:

Choubtashani, SH., & Rashidi, H. (2024). Laboratory Investigation of Carbon Dioxide Separation by Aqueous Methyl Diethanolamine-Piperazine Solvent in a Microreactor Using Response Surface Methodology. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 22(131), 104-114, [In Persian].



بررسی آزمایشگاهی جداسازی کربن دی اکسید با حلال آبی متیل دی اتانول آمین - پیپرازین در میکرو راکتور با استفاده از روش سطح پاسخ

شیما چوبتاشانی^۱، حامد رشیدی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی کرمانشاه

۲- دانشیار گروه مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی کرمانشاه

پیام نگار: h_rashidi@kut.ac.ir

چکیده

جذب کربن دی اکسید یکی از راه های کاهش گازهای گلخانه ای است. این مطالعه به بررسی جذب گاز کربن دی اکسید به وسیله محلول آبی متیل دی اتانول آمین - پیپرازین با استفاده از یک میکرو کانال به کمک روش سطح پاسخ پرداخته است. اثر مشخصه های غلظت آمین (۵۰-۳۰ درصد وزنی)، دما (۴۰-۲۰ درجه سلسیوس)، شدت جریان حلال ورودی به میکرو راکتور (۹-۳ میلی لیتر بر دقیقه) و غلظت ورودی گاز کربن دی اکسید (۱۵-۵ درصد حجمی) بر ضریب کلی انتقال جرم ارزیابی شد. برای بررسی و تحلیل نتایج از نرم افزار دیزاین اکسپرت استفاده شد. اهمیت متغیرهای ورودی برای این پاسخ به ترتیب شدت جریان مایع < غلظت آمین < دماست. شدت جریان مایع مؤثرترین متغیر ورودی است؛ زیرا رابطه مستقیمی بین شدت جریان مایع و جانشینی مکان های جذب وجود دارد. بیشترین مقدار ضریب کلی انتقال جرم $2.02/50 \text{ kmol/m}^3 \cdot \text{h} \cdot \text{kPa}$ گزارش شد. این مقدار در شرایط عملیاتی: غلظت ۴۰ درصد وزنی حلال، شدت جریان ۹ میلی لیتر بر دقیقه حلال، دمای عملیاتی ۴۰ درجه سلسیوس و غلظت ورودی ۱۰ درصد حجمی گاز کربن دی اکسید به دست آمد.

کلیدواژه ها:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۴
شماره صفحات: ۱۰۴ تا ۱۱۴
کربن دی اکسید،
متیل دی اتانول آمین،
پیپرازین،
میکرو راکتور،
ضریب کلی انتقال جرم

* کرمانشاه، دانشگاه صنعتی، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی

استناد به مقاله:

چوبتاشانی، شیما، و رشیدی. حامد. (۱۴۰۲). بررسی آزمایشگاهی جداسازی کربن دی اکسید با حلال آبی متیل دی اتانول آمین - پیپرازین در میکرو راکتور با استفاده از روش سطح پاسخ، نشریه مهندسی شیمی ایران، ۲۲(۱۳۱)، ۱۱۴-۱۰۴.

۱. مقدمه

تولید و انتشار گازهای گلخانه‌ای و اثرات زیان‌بار ناشی از این گازها، به یکی از نگرانی‌های جامعه امروز تبدیل شده است. کربن دی اکسید شناخته شده‌ترین گاز گلخانه‌ای است و تخمین زده شده است که عامل ۶۴ درصد افزایش گرمایش کره زمین است [۱]. بنابراین جذب کربن دی اکسید طی دهه‌های اخیر به‌طور گسترده جلب توجه کرده است [۲]. روش‌های مختلف جذب کربن دی اکسید از جریان‌های گاز دودکش شامل جذب با حلال، جذب سطحی به‌وسیله جاذب، روش‌های برودتی و روش‌های مبتنی بر غشاست. در حال حاضر جذب گاز کربن دی اکسید به‌وسیله حلال، متداول‌ترین فناوری موجود در میان سایر روش‌هاست [۳-۹]. در فرایند جذب گاز کربن دی اکسید به‌وسیله مایع، حلال‌های مبتنی بر آلکانول آمین بیشترین کاربرد را دارند. در میان آلکانول آمین‌ها، حلال متیل دی اتانول آمین^۱ ($C_5H_{13}NO_2$) به‌عنوان یک جاذب برای حذف گازهای اسیدی به‌طور گسترده‌ای، در صنعت به‌کار می‌رود. این حلال شیمیایی، آمین نوع سوم است و دارای یک ساختار شیمیایی پایدار و دارای ویژگی‌هایی از جمله ظرفیت جذب بیشتر، فشار بخار پایین‌تر و انرژی احیای کمتر نسبت به دیگر حلال‌های شیمیایی آلکانول آمینی است [۱۰].

استفاده از این حلال موجب صرفه‌جویی در انرژی، افزایش ظرفیت، قابلیت انتخابی بالا و کاهش میزان خوردگی می‌شود. با این‌که متیل دی اتانول آمین برتری‌های فراوانی نسبت به دیگر آمین‌های مرسوم دارد، دارای یک نقطه ضعف اصلی است و آن سرعت پایین واکنش با کربن دی اکسید و در نتیجه میزان جذب کم کربن دی اکسید به‌وسیله این حلال است. یکی از روش‌های بهبود عملکرد حلال‌ها، فعال کردن آن‌هاست [۱۱-۱۳]. در آمین‌های فعال شده، معمولاً یک ماده فعال‌کننده به سامانه افزوده می‌شود. در نتیجه با تقویت و حفظ برتری‌های حلال آمینی، نقطه ضعف‌های آن نیز برطرف می‌شود. استفاده از فعال‌کننده‌های آمینی در صنعت موجب کاهش اندازه تجهیزات، صرفه‌جویی انرژی، کاهش خوردگی و کاهش جریان حلال می‌شود [۱۴]. یکی از پرکاربردترین حلال‌های فعال شده، متیل دی اتانول آمین فعال است که در آن پیپرازین^۲ ($C_4H_{10}N_2$) به‌عنوان فعال‌کننده معرفی شده است.

یکی دیگر از روش‌های افزایش میزان جذب کربن دی اکسید و هم‌چنین ضریب کلی انتقال جرم^۳ استفاده از دستگاه‌هایی است که تماس بین گاز و مایع را بهبود می‌بخشند؛ در نتیجه منجر به افزایش سرعت انتقال جرم می‌شود. در میان دستگاه‌های انتقال جرم امروزی، میکروکانال‌ها یکی از فناوری‌های برتر و کلیدی هستند [۱۵-۱۷]. میکروراکتورها، راکتورهایی با ساختار سه‌بعدی هستند که حداقل یک بعد از کانال‌های واکنش و انتقال حرارت آن کوچک‌تر از ۱ میلی‌متر است. به‌طور کلی، جذب کربن دی اکسید در برج‌های پر شده، برج‌های حبابی و برج‌های سینی دار انجام می‌شود. این تجهیزات رایج، اغلب دارای کاستی‌هایی چون حجم بزرگ، هزینه بالا و بازدهی کم هستند [۱۸]. در مقایسه با دستگاه‌های انتقال جرم معمول، میکروکانال‌ها با ایجاد سطح تماس بیشتر بین فازها امکان افزایش نرخ انتقال جرم را فراهم می‌کنند [۱۹-۲۱].

بررسی پیش‌بینی موضوع نشان می‌دهد که از حلال متیل دی اتانول آمین فعال برای جذب کربن دی اکسید در میکروکانال‌هایی T شکل به قطر (۰/۵ تا ۲/۰ میلی‌متر) استفاده شده است [۱۶]. نتایج بیان‌کننده آن است که با کاهش قطر میکروکانال، درصد جذب افزایش می‌یابد. در تحقیق مذکور تنها به مطالعه درصد جذب پرداخته شده است. در مطالعه حاضر با توجه به نتایج تحقیقات قبلی تلاش می‌شود، ضریب کلی انتقال جرم و اثر مشخصه‌های عملیاتی مختلف بر فرایند جذب کربن دی اکسید به‌وسیله این حلال ترکیبی در میکرو راکتور به‌صورت آزمایشگاهی بررسی شود. هم‌چنین برای طراحی آزمایش‌ها و تحلیل نتایج از روش سطح- پاسخ^۴ باکس- بنکن^۵ استفاده شده است. در پایان یک رابطه برای محاسبه ضریب کلی انتقال جرم ارائه می‌شود.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱ مواد

در این پژوهش از متیل دی اتانول آمین فعال شده (۹۲ درصد وزنی متیل دی اتانول آمین و ۶ درصد وزنی پیپرازین) و گاز کربن دی اکسید با درجه خلوص ۹۹/۹۵ درصد از شرکت گاز کربنیک شهر کرد تهیه شد.

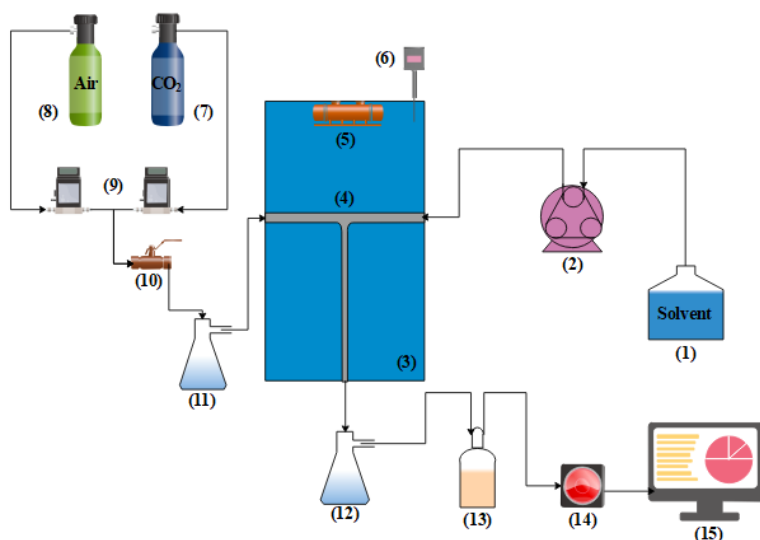
3. Overall Mass Transfer Coefficient ($K_G a_v$)
4. Surface-Response
5. Box-Benken

1. Methyl Diethanolamine (MDEA)
2. Piperazine

۲-۲ روش آزمایشگاهی و دستگاه‌ها

(مخلوطی از هوا و کربن دی‌اکسید) قرار گرفت. هدف از مرطوب کردن گاز ورودی به میکروکانال، شبیه‌سازی گاز حاصل از احتراق است. سرعت جریان گاز با استفاده از کنترل کننده‌های دبی جرمی^۱ کالیبره شده کنترل شد. دما با استفاده از یک ترموکوپل دما مدل ST-612 با دقت ± 0.1 K اندازه‌گیری می‌شود. شکل جزئیات فنی تجهیزات آزمایش در جدول (۱) ارائه شده است.

در این تحقیق، جذب کربن دی‌اکسید در محلول آبی متیل دی‌اتانول آمین- پیپرازین در شرایط مختلف غلظت حلال، دما، شدت جریان‌های حلال و غلظت ورودی گاز کربن دی‌اکسید انجام شد. آزمایش‌های جذب کربن دی‌اکسید به وسیله حلال با استفاده از یک میکرو راکتور T شکل (شکل (۱)) با سطح مقطع دایره‌ای انجام شد. در این آزمایش، محلول آمین با استفاده از پمپ پرستالتیک مدل (Hf-۸۳۶۷) در تماس جریان گاز مرطوب



شکل ۱. طرح ساده از دستگاه میکرو راکتور برای جذب کربن دی‌اکسید. (۱) مخزن حلال تازه، (۲) پمپ پرستالتیک، (۳) حمام آب گرم، (۴) میکروکانال، (۵) هیتر، (۶) تنظیمگر دما، (۷) سیلندر گاز کربن دی‌اکسید، (۸) سیلندر هوا، (۹) کنترل کننده دبی جرمی، (۱۰) شیر کنترل، (۱۱) مرطوب کننده، (۱۲) جداکننده، (۱۳) رطوبت گیر، (۱۴) سنسور، (۱۵) ثبت کننده

Figure 1. Simple design of the microreactor device for carbon dioxide absorption. 1) fresh solvent tank, 2) peristaltic pump, 3) hot water bath, 4) microchannel, 5) heater, 6) temperature regulator, 7) carbon dioxide gas cylinder, 8) air cylinder, 9) mass flow controller, 10) valve control, 11) Humidifier, 12) Separator, 13) Humidifier, 14) Sensor, 15) Recorder.

جدول ۱. اجزای اصلی و جزئیات فنی تجهیزات آزمایش.

Table 1. Main components and technical details of test equipment.

Equipment name	Manufacturer	Model	Accuracy
Mfc (1 slm)	Apasco company	gpc(1 slm)	$\pm 1\%$ fs
Mfc (10 slm)	Apasco company	gpc(10 slm)	$\pm 1\%$ fs
Sencor CO ₂	(Cozir Company)	cm-0123 (20%)	error of less than 0.01%
thermometer	(Beh Abzar)	H302	± 0.1 °C

۲-۳ تعریف پاسخها

۲-۳-۱ ضریب کلی انتقال جرم حجمی ($K_G a_v$)

کیفیت میزان جذب کربن دی اکسید با محلول آبی متیل دی اتانول آمین - پیپرازین در میکرو راکتور، با استفاده از ضریب کلی انتقال جرم اندازه گیری می شود. در این تحقیق از معادله (۱) برای محاسبه $K_G a_v$ استفاده شده است [۲۲]:

$$K_G a_v = \frac{G}{ZP} \left[\ln \left(\frac{Y_{in}}{Y_{out}} \right) + (Y_{in} - Y_{out}) \right] \quad (1)$$

در معادله (۱)، G سرعت مولی گاز ورودی بر حسب $\text{kmol/m}^2 \cdot \text{h}$ ، Z طول میکروکانال m ، P فشار میکروکانال kPa ، Y نسبت مولی کربن دی اکسید در جریان گاز و $K_G a_v$ ضریب کلی انتقال جرم $\text{kmol/m}^3 \cdot \text{h} \cdot \text{kPa}$ است.

۲-۴ طراحی آزمایشها برای روش سطح پاسخ

در این پژوهش، ضریب کلی انتقال جرم به متغیرهای عملیاتی شامل میزان جریان حلال، دمای جذب، غلظت حلال و کربن دی اکسید متکی است. به منظور طراحی آزمایشها از برنامه دیزاین اکسپرت^۱ نسخه ۱۱ و طرح باکس-بنکن استفاده شد. از طرفی، برای کاهش اثرات تغییرپذیری غیرقابل توضیح در پاسخ مشاهده شده، آزمایشها به صورت تصادفی انجام شد. پاسخهای این طرح در جدول (۲) نشان داده شده است. در این روش، ۲۷ آزمایش تجربی برای جذب کربن دی اکسید با شرایط اعمال و سه تکرار در نقطه مرکزی انجام شد. در نهایت، برای تعیین اهمیت و تأثیر متغیرها بر پاسخهای به دست آمده از تحلیل واریانس (ANOVA) با سطح اطمینان ۹۵٪ استفاده شد.

جدول ۲. نتایج حاصل از روش BBD برای متغیرهای مستقل و پاسخهای آنها از نظر ضریب کلی انتقال جرم.

Table 2. The results of the BBD method for the independent variables and their responses in terms of the overall carbon dioxide mass transfer coefficient.

Std No	Experime No.	Experime plan				$K_G a_v$ ($\text{kmol/m}^3 \cdot \text{h} \cdot \text{kPa}$)
		A (wt.%)	B (°C)	C (mL/min)	D (vol.%)	
4	1	50	40	6	10	187.67
10	2	50	30	6	5	171.69
20	3	50	30	9	10	193.58
1	4	30	20	6	10	101.18
3	5	30	40	6	10	166.15
2	6	50	20	6	10	147.86
18	7	50	30	3	10	128.09
23	8	40	20	6	15	137.79
15	9	40	20	9	10	170.82
24	10	40	40	6	15	158.00
26	11	40	30	6	10	164.12
13	12	40	20	3	10	121.19
5	13	40	30	3	5	134.72
25	14	40	30	6	10	163.52
11	15	30	30	6	15	130.14
12	16	50	30	6	15	147.50
7	17	40	30	3	15	95.65
6	18	40	30	9	5	181.73
8	19	40	30	9	15	169.04
17	20	30	30	3	10	95.32
16	21	40	40	9	10	202.50
9	22	30	30	6	5	141.46
22	23	40	40	6	5	188.10
27	24	40	30	6	10	169.57
14	25	40	40	3	10	134.64
19	26	30	30	9	10	128.89
21	27	40	20	6	5	149.05

۳. بحث و نتایج

با استفاده از روش حداقل مربعات خطا، ثوابت مدل‌های ریاضی برای پاسخ‌ها به دست آمد. نتایج برازش مدل برای هر یک از پاسخ‌ها در جدول (۳) ارائه شده است. معیار اصلی انتخاب مدل به حداکثر رساندن ضریب تعیین^۱، ضریب تعیین متعادل شده^۲ و ضریب تعیین تخمینی^۳ است. برای ضریب کلی انتقال جرم مدل درجه دوم بهترین گزینه است. بنابراین، در ادامه از مدل درجه دوم برای تحلیل بیشتر استفاده شده است.

۳-۱ تجزیه و تحلیل و ارزیابی مدل مناسب

نتایج تحلیل واریانس^۴ (ANOVA) مدل درجه دوم برای ضریب کلی انتقال جرم برای فرایند جذب کربن دی‌اکسید در میکروراکتور در جدول (۴) نمایش داده شده است. از مقدار P برای شناسایی شاخص‌های مهم استفاده می‌شود. مقادیر P کمتر از ۰/۰۵ بیانگر معنادار بودن تأثیر متغیرها بر پاسخ هستند. همان‌طور که مشاهده

شد، مقدار P مدل کمتر از ۰/۰۰۰۱ نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی از نظر آماری بسیار قابل توجه است. علاوه بر این، مقدار F مدل برای $K_G a_v$ مقدار F مدل درجه دوم برابر با ۳۱/۰۴ است و می‌توان گفت متغیرهای خطی شامل غلظت آمین (A)، دمای عملیات جذب (B)، شدت جریان حلال (C)، غلظت کربن دی‌اکسید (D)، A^2 و C^2 بیش‌ترین تأثیر را بر مقادیر $K_G a_v$ در فرایند جذب کربن دی‌اکسید دارند.

معادله مدل نشان‌دهنده ضریب کلی انتقال جرم ($K_G a_v$) براساس متغیرهای کدشده تابعی از جملات مهم برای متغیرهای مستقل با استفاده از معادله زیر است. با استفاده از این معادله، مدل‌ها مقادیر پاسخ‌ها را پیش‌بینی کرده و آن‌ها را با مقادیر آزمایشی مقایسه می‌کنند.

$$K_G a_v = 162.02 + 17.77 A + 17.43 B + 28.08 C - 10.72 D - 13.32 A^2 - 11.24 C^2 \quad (2)$$

جدول ۳. آمار مختصری از مدل برای ضریب کلی انتقال جرم ($K_G a_v$).

Table 3. Brief statistics of the model for the overall mass transfer coefficient ($K_G a_v$).

Source	Std. Dev.	R ²	Adjusted R ²	Predicted R ²	PRESS
Overall mass transfer coefficient ($K_G a_v$)					
Linear	13.08	0.83	0.80	0.75	5600.93
2FI	13.60	0.86	0.78	0.62	8412.55
Quadratic	9.35	0.95	0.90	0.73	5961.74 Suggested
Cubic	6.08	0.99	0.96	0.18	18127.63 Aliased

جدول ۴. نتایج ANOVA برای ضریب کلی انتقال جرم ($K_G a_v$).

Table 4. ANOVA results for overall mass transfer coefficient ($K_G a_v$).

Source	Overall mass transfer coefficients ($K_G a_v$)				
	SS	df	Mean square	F-value	P-value
Model	19899.67	6	3316.61	31.04	< 0.0001
A-C Amin	3789.25	1	3789.25	35.47	< 0.0001
B-T	3645.67	1	3645.67	34.12	< 0.0001
C-QL	9461.00	1	9461.00	88.55	< 0.0001
D-C CO ₂	1379.02	1	1379.02	12.91	0.0018
A ²	1134.72	1	1134.72	10.62	0.0039
C ²	808.03	1	808.03	7.56	0.0123
Residual	2136.79	20	106.84		
Lack of Fit	2114.59	18	117.48	10.58	0.0897
Pure Error	22.20	2	11.10		
Cor Total	22036.46	26			

1. R-Squared (R²)

2. R² Adjusted

3. R² Predicted

4. Analysis of Variance

۳-۲ تأثیر متغیرهای اصلی فرایند در جذب

تجزیه و تحلیل نتایج برای درک بهتر رفتار محلول آبی متیل دی اتانول آمین - پیپرازین برای جذب کربن دی اکسید انجام شد. شکل (۲)، تأثیر اصلی متغیرهای عملیاتی ورودی روی پاسخ را زمانی که سه متغیر دیگر در نقاط میانی خود ثابت باشند، نشان می دهد. براساس این شکل، مشاهده می شود که متغیر غلظت کربن دی اکسید ورودی بر ضریب کلی انتقال جرم تأثیر منفی و باقی متغیرهای فرایند ورودی تأثیر مثبت دارند. مقدار F قابل توجه به دست آمده برای هر متغیر از جدول ANOVA نیز تأثیر عمیق متغیرهای خطی مورد نظر در توابع پاسخ را تأیید می کند. شدت جریان حلال با $46/80\%$ بیشترین سهم را بر مقادیر ضریب کلی انتقال جرم داشته است. غلظت حلال با $18/74\%$ و دمای جذب با $18/03\%$ به ترتیب دومین و سومین مشخصه قابل توجه در میان مشخصه های دیگر در نظر گرفته شد. درحالی که غلظت کربن دی اکسید ورودی با $6/82\%$ کمترین تأثیر را در میان مشخصه های اصلی دارد.

۳-۲-۱ اثر غلظت حلال

فرایند جذب کربن دی اکسید به وسیله محلول آبی متیل دی اتانول آمین - پیپرازین با جذب شیمیایی همراه است. با افزایش غلظت متیل دی اتانول آمین فعال شده، با ثابت بودن سه مشخصه دیگر در مقدار مرکزی خود، جذب شیمیایی عامل تعیین کننده در عملیات جذب خواهد بود. با افزایش غلظت آمین در محلول، ضریب کلی انتقال جرم افزایش می یابد.

با افزایش مولکول های متیل دی اتانول آمین فعال شده، محل های فعال جذب در واحد حجم حلال افزایش می یابد. بنابراین افزایش میزان آمین در حلال، واکنش شیمیایی فرایند جذب را افزایش می دهد. با این حال، غلظت بالای آمین ها در حلال همیشه مفید نیست؛ زیرا با افزایش غلظت آمین، گرانروی حلال افزایش می یابد. افزایش گرانروی حلال تأثیر منفی بر کارایی جذب و هزینه انتقال حلال دارد [۲۳]. نتایج حاصل از شکل (۲-۲) نشان می دهد که افزایش غلظت حلال باعث افزایش تقریبی ضریب کلی انتقال جرم به میزان $27/3$ درصد می شود.

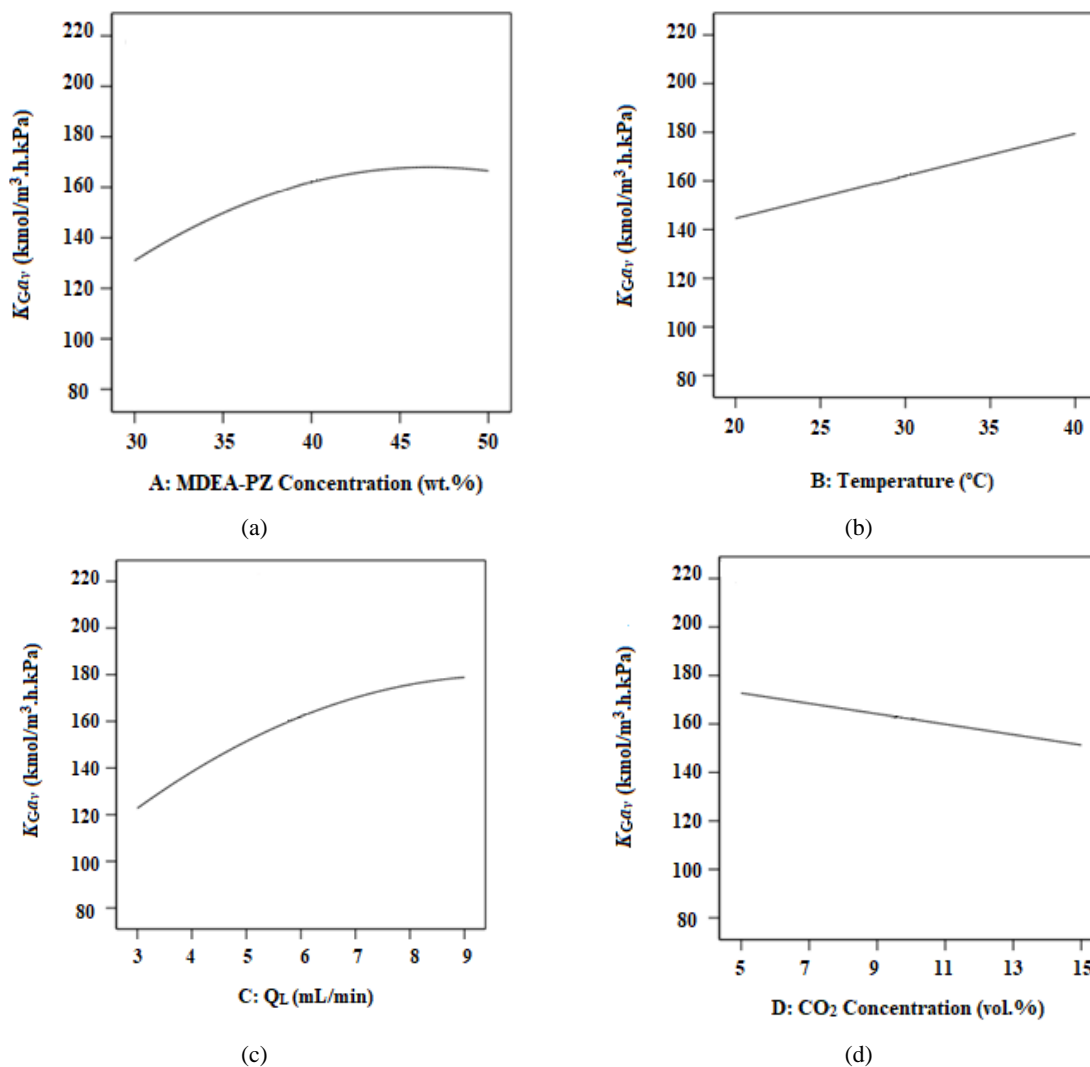
۳-۲-۲ اثر دمای جذب

دما یک مشخصه عملیاتی اصلی برای فرایند جذب کربن دی اکسید در واحدهای جذب و دفع است. شکل (۲-۲) تأثیر مستقیم دمای جذب را از 20 تا 40 درجه سلسیوس روی فرایند جذب شیمیایی کربن دی اکسید با محلول آبی متیل دی اتانول آمین - پیپرازین نشان می دهد. افزایش دما از 20 تا 40 درجه سلسیوس موجب بهبود ضریب کلی انتقال جرم به صورت تقریبی از 145 تا $175 \text{ kmol/m}^3 \cdot \text{h.kPa}$ شد. علت این امر، این واقعیت است که در طول جذب شیمیایی، دمای مایع ورودی مستقیماً با نرخ واکنش مطابق با معادله آرنیوس مرتبط است [۲۳]. با در نظر گرفتن دینامیک مولکولی، سرعت واکنش با افزایش دما افزایش می یابد. علاوه بر این، گرانروی حلال با دما کاهش می یابد و منجر به افزایش سرعت انتقال جرم می شود. در فرایند جذب، قانون هنری می تواند حلالیت گاز کربن دی اکسید در فاز مایع را توصیف کند و انحلال گاز کربن دی اکسید در حلال با افزایش دما کاهش می یابد. از این نظر، اثرات این دو پدیده در تقابل با یکدیگر قرار دارند؛ اما در نهایت با توجه به شکل (۲-۲) افزایش دما، ضریب کلی انتقال جرم کربن دی اکسید را حدود $23/4$ درصد افزایش می دهد که با پژوهش قبلی انجام شده مطابقت دارد [۲۴].

۳-۲-۳ اثر جریان مایع

با افزایش جریان حلال و ثابت بودن دیگر مشخصه ها در مقدار میانی خود، حلال بیشتری برای واکنش و انتقال جرم در دسترس خواهد بود. از طرفی افزایش سرعت جریان حلال در فرایند جذب کربن دی اکسید با حلال اثرات مهم متعددی دارد: (۱) افزایش میزان جریان حلال، سرعت بازنشانی جایگاه های فعال جذب در دسترس را افزایش می دهد. (۲) مطابق تئوری نوشوندگی سطح، افزایش جریان حلال باعث افزایش سرعت نوشوندگی سطح و بهبود انتقال جرم می شود. (۳) افزایش میزان جریان حلال باعث افزایش سرعت در میکروکانال می شود. این امر موجب اختلاط بهتر کربن دی اکسید و حلال و افزایش سطح تماس بین گاز کربن دی اکسید و حلال شده، در نتیجه ضخامت فیلم در میکروکانال کاهش می یابد [۲۴، ۲۵].

مجموع این عوامل و نتایج حاصل از شکل (۲-۲) نشان می دهد که ضریب کلی انتقال جرم با افزایش جریان حلال به طور تقریبی به ترتیب 44 درصد افزایش می یابد.



شکل ۲. تغییرات ضریب کلی انتقال جرم (K_{Ga_v}) (a) غلظت آمین، (b) دمای جذب، (c) شدت جریان مایع، (d) غلظت کربن دی‌اکسید ورودی به میکرو راکتور.

Figure 2. Variations of the overall mass transfer coefficient (K_{Ga_v}) (a) Amine concentration, (b) absorption temperature, (c) Liquid flow intensity, (d) Carbon dioxide concentration entering the microreactor.

افزایش و ضریب کلی انتقال جرم را کاهش می‌دهد [۲۶]. (۲) از نظر تئوری انتقال جرم دو فیلم، افزایش فشار جزئی کربن دی‌اکسید در فاز گاز، انتقال گاز به فصل مشترک گاز-مایع را افزایش می‌دهد. با این حال، اگر مقاومت اصلی انتقال جرم در فاز گازی نباشد، این افزایش فشار جزئی منجر به افزایش جزئی نرخ انتقال جرم می‌شود. بنابراین افزایش غلظت کربن دی‌اکسید در فاز گازی علی‌رغم افزایش میزان جذب کل، با کاهش شدید ضریب کلی انتقال جرم همراه است. با توجه به کاهش حدود ۱۰ درصدی ضریب انتقال جرم، به نظر می‌رسد که استدلال اولیه با نتایج گزارش شده مطابقت بیشتری دارد.

۳-۲-۴ اثر غلظت کربن دی‌اکسید ورودی

با افزایش غلظت کربن دی‌اکسید در گاز ورودی به میکرو راکتور براساس شکل (۲-د)، ضریب کلی انتقال جرم به صورت تقریبی ۱۲ درصد کاهش یافته است. برای توضیح این پدیده، چندین عامل را می‌توان در نظر گرفت: (۱) شار انتقال جرم از حاصل ضرب ضریب کلی انتقال جرم در نیروی محرکه انتقال جرم به دست می‌آید. بنابراین، ضریب کلی انتقال جرم و نیروی محرکه انتقال، با هم رابطه عکس دارند. بدین ترتیب، با افزایش غلظت کربن دی‌اکسید در گاز ورودی، فشار جزئی آن در طول میکرو راکتور افزایش می‌یابد. افزایش فشار جزئی کربن دی‌اکسید نیروی محرکه انتقال جرم را

۳-۲ مقایسه ضریب کلی انتقال جرم حجمی

باتوجه به نتایج، محدوده ضریب کلی انتقال جرم تعیین شده در این مطالعه $۹۵/۳۲-۲۰۲/۵۰ \text{ kmol/m}^3 \cdot \text{h.kPa}$ است. در فرایند جذب شیمیایی، مقادیر ضریب کلی انتقال جرم حجمی نشان دهنده عملکرد دستگاه مربوطه در واحد حجم را نشان می دهد. علاوه بر این، همان طور که در جدول (۵) نشان داده شده است، میکروکانال ها در مقایسه با سایر دستگاه های عملیات جذب، ضریب کلی انتقال جرم بالایی دارند، زیرا سطح تماس میکروکانال ها در مقایسه با سایر دستگاه های انتقال جرم مورد استفاده در فرایندهای جذب، بیشتر است. این موضوع نشان می دهد که میکروکانال ها نسبت به سایر دستگاه های انتقال جرم به حجم کمتری نیاز دارند. بنابراین استفاده از میکروکانال راندمان جذب را کاهش می دهد.

۴. نتیجه گیری

در این مطالعه، حلال متیل دی اتانول آمین- پیپرازین برای جذب کربن دی اکسید در میکروکانال به کمک روش سطح پاسخ ارزیابی شد. مجموعه ای از آزمایش ها در مقیاس آزمایشگاهی برای بررسی توانایی مطلوب حلال ترکیبی برای جذب کربن دی اکسید طراحی شده است. عملکرد عوامل فوق بر ضریب کلی انتقال جرم مطالعه شد.

نتیجه گیری های اصلی این مطالعه به شرح زیر است:

- باتوجه به مشخصه های تعریف شده، محدوده ضریب کلی انتقال جرم بین $۹۵/۳۲-۲۰۲/۵۰ \text{ kmol/m}^3 \cdot \text{h.kPa}$ متفاوت است.
- شدت جریان حلال با $۰.۴۶/۸۰\%$ بیشترین سهم را بر مقادیر ضریب کلی انتقال جرم داشته است. غلظت حلال با $۰.۱۸/۷۴\%$ و دمای جذب با $۰.۱۸/۰۳\%$ به ترتیب دومین و سومین مشخصه قابل توجه در میان مشخصه های دیگر در نظر گرفته شد. درحالی که غلظت کربن دی اکسید ورودی با $۰.۰۶/۸۲\%$ کمترین تأثیر را در میان مشخصه های اصلی دارد. هم چنین مشخصه های غلظت حلال، شدت جریان حلال و دمای جذب تأثیر مثبت و افزایش مشخصه غلظت کربن دی اکسید ورودی اثر منفی بر ضریب کلی انتقال جرم دارند.
- برای دستیابی به بیشترین ضریب کلی انتقال جرم $۲۰۲/۵۰ \text{ kmol/m}^3 \cdot \text{h.kPa}$ ، استفاده از دو مشخصه اصلی غلظت متیل دی اتانول آمین فعال و غلظت کربن دی اکسید ورودی به میکرو راکتور در سطح متوسط و بیشینه دمای جذب ۴۰ درجه سلسیوس و شدت جریان حلال ورودی به میکرو راکتور ۹ mL/min الزامی است.

جدول ۵. مقایسه ضریب کلی انتقال جرم حجمی در راکتورهای مختلف مورد استفاده در جذب CO_2 .

Table 5. Comparison of the overall mass transfer coefficient in different reactors used in CO_2 absorption.

Reactor type	solvent	Volumetric overall mass transfer coefficient. ($\text{kmol/m}^3 \cdot \text{h.kPa}$)	Source
Packed column	DEA	1.23	[27]
Bubble column	MEA	85	[28]
Packed column	MEA	3.04	[27]
Spray tower	MEA	6	[29]
Packed column	MDEA	0.17	[27]
Packed column	aMDEA*	1.04	[30]
Microchannel	MDEA+PZ+H ₂ O	95.32-202.50	In this research

*aMDEA: MDEA activated

- [1] Yadav, S. K., & Mishra, G. C. (2013). Global Energy Demand Consequences Versus Greenhouse Gases Emission. *International Journal of Engineering*, 6, 781-788.
- [2] Asgarifard, P., Rahimi, M., & Tafreshi, N. (2021). Response surface modelling of CO₂ capture by ammonia aqueous solution in a microchannel. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 99(2), 601-612
- [3] Bains, P., Psarras, P., & Wilcox, J. (2017). CO₂ capture from the industry sector. *Progress in Energy and Combustion Science*, 63, 146-172.
- [4] Cheung, O., Bacsik, Z., Liu, Q., Mace, A., & Hedin, N. (2013). Adsorption kinetics for CO₂ on highly selective zeolites NaKA and nano-NaKA. *Applied energy*, 112, 1326-1336.
- [5] Chu, F., Jon, C., Yang, L., Du, X., & Yang, Y. (2016). CO₂ absorption characteristics in ammonia solution inside the structured packed column. *Industrial & engineering chemistry research*, 55(12), 3696-3709.
- [6] Gao, H., Xu, B., Han, L., Luo, X., & Liang, Z. (2017). Mass transfer performance and correlations for CO₂ absorption into aqueous blended of DEEA/MEA in a random packed column. *AIChE Journal*, 63(7), 3048-3057.
- [7] Koysoumpa, E. I., Bergins, C., & Kakaras, E. (2018). The CO₂ economy: Review of CO₂ capture and reuse technologies. *The Journal of Supercritical Fluids*, 132, 3-16.
- [8] Maqsood, K., Mullick, A., Ali, A., Kargupta, K., & Ganguly, S. (2014). Cryogenic carbon dioxide separation from natural gas: a review based on conventional and novel emerging technologies. *Reviews in Chemical Engineering*, 30(5), 453-477.
- [9] Venna, S. R., & Carreon, M. A. (2015). Metal organic framework membranes for carbon dioxide separation. *Chemical engineering science*, 124, 3-19.
- [10] Lu, J.-G., Zheng, Y.-F., & He, D.-L. (2006). Selective absorption of H₂S from gas mixtures into aqueous solutions of blended amines of methyldiethanolamine and 2-tertiarybutylamino-2-ethoxyethanol in a packed column. *Separation and purification technology*, 52(2), 209-217.
- [11] Chen, P. C., & Lin, S. Z. (2016). *Absorption and Mass Transfer of CO₂ in Monoethanolamine Solution*. Paper presented at the Materials Science Forum.
- [12] Haji-Sulaiman, M., Aroua, M. K., & Benamor, A. (1998). Analysis of equilibrium data of CO₂ in aqueous solutions of diethanolamine (DEA), methyldiethanolamine (MDEA) and their mixtures using the modified Kent Eisenberg model. *Chemical engineering research and design*, 76(8), 961-968.
- [13] Jonassen, Ø., Kim, I., & Svendsen, H. F. (2014). Heat of absorption of carbon dioxide (CO₂) into aqueous N-methyldiethanolamine (MDEA) and N,N-dimethylmonoethanolamine (DMMEA). *Energy Procedia*, 63, 1890-1902.
- [14] Kohl, A. L., & Nielsen, R. (1997). *Gas purification*: Elsevier.
- [15] Heidaryan, E. (2019). A note on model selection based on the percentage of accuracy-precision. *Journal of Energy Resources Technology*, 141(4).
- [16] Niu, H., Pan, L., Su, H., & Wang, S. (2009). Effects of Design and Operating Parameters on CO₂ Absorption in Microchannel Contactors. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(18), 8629-8634. doi:10.1021/ie8018966
- [17] Vásquez, R. T., Jimenez Esteller, L., & Bojarski, A. D. (2008). Multiscale modeling approach for production of perfume microcapsules. *Chemical Engineering & Technology: Industrial Chemistry-Plant Equipment-Process Engineering-Biotechnology*, 31(8), 1216-1222.
- [18] Fair, J. R., Seibert, A. F., Behrens, M., Saraber, P., & Olujic, Z. (2000). Structured packing performance experimental evaluation of two predictive models. *Industrial & engineering chemistry research*, 39(6), 1788-1796.
- [19] Jahromi, P. F., Karimi-Sabet, J., & Amini, Y. (2018). Ion-pair extraction-reaction of calcium using Y-shaped microfluidic junctions: An optimized separation approach. *Chemical Engineering Journal*, 334, 2603-2615.
- [20] Marsousi, S., Karimi-Sabet, J., Moosavian, M. A., & Amini, Y. (2019). Liquid-liquid extraction of calcium using ionic liquids in spiral microfluidics. *Chemical Engineering Journal*, 356, 492-505.
- [21] Sadeghi, A., Amini, Y., Saidi, M. H., & Chakraborty, S. (2014). Numerical modeling of surface reaction kinetics in electrokinetically actuated microfluidic devices. *Analytica chimica acta*, 838, 64-75.
- [22] Fu, K., Rongwong, W., Liang, Z., Na, Y., Idem, R., & Tontiwachwuthikul, P. (2015). Experimental analyses of mass transfer and heat transfer of post-combustion CO₂ absorption using hybrid solvent MEA-MeOH in an absorber. *Chemical Engineering Journal*, 260, 11-19. doi:https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.08.064
- [23] Rashidi, H., & Sahraie, S. (2021). Enhancing carbon dioxide absorption performance using the hybrid solvent: Diethanolamine-methanol. *Energy*, 221, 119799.
- [24] Rashidi, H., Rasouli, P., & Azimi, H. (2022). A green vapor suppressing agent for aqueous ammonia carbon dioxide capture solvent: Microcontactor mass transfer

- study. *Energy*, 244, 122711. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122711>
- [25] Choubtashani, S., & Rashidi, H. (2023). CO₂ capture process intensification of water-lean methyl diethanolamine-piperazine solvent: Experiments and response surface modeling. *Energy*, 267, 126447. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126447>
- [26] Dey, A., & Aroonwilas, A. (2009). CO₂ absorption into MEA-AMP blend: Mass transfer and absorber height index. *Energy Procedia*, 1(1), 211-215.
- [27] Aroonwilas, A., & Veawab, A. (2004). Characterization and comparison of the CO₂ absorption performance into single and blended alkanolamines in a packed column. *Industrial & engineering chemistry research*, 43(9), 2228-2237.
- [28] Chen, P.-C. (2012). Absorption of carbon dioxide in a bubble-column scrubber. *Greenhouse Gases-Capturing, Utilization and Reduction*, 95-112.
- [29] Kuntz, J., & Aroonwilas, A. (2009). Mass-transfer efficiency of a spray column for CO₂ capture by MEA. *Energy Procedia*, 1(1), 205-209.
- [30] Chen, X. (2011). Carbon dioxide thermodynamics, kinetics, and mass transfer in aqueous piperazine derivatives and other amines. UT Electronic Theses and Dissertations