

بررسی فرایند جذب گاز دی‌اکسید کربن در میکروراکتور توسط حلال ترکیبی پتاس - گلیسرین

حامد رشیدی*، مریم صحرایی

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

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۲ اسفند ۱۳۹۹

دریافت پس از اصلاح: ۳۰ شهریور ۱۴۰۰

پذیرش نهایی: ۱۹ آبان ۱۴۰۰

کلمات کلیدی:

جذب

دی‌اکسید کربن

میکروراکتور

پتاسیم هیدروکسید

گلیسرین

چکیده

در سال‌های اخیر حذف گاز دی‌اکسید کربن به عنوان مهمترین گاز گلخانه‌ای مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش عملکرد حلال ترکیبی پتاس-گلیسرین در فرآیند جذب دی‌اکسید کربن با استفاده از میکروراکتور مطالعه شده است. آزمایش‌ها در شرایط عملیاتی مختلف شامل: جریان حلال ورودی (۸-۴ میلی لیتر بر دقیقه)، غلظت حلال پتاسیم هیدروکسید (۰/۷ - ۰/۳ مولار) و غلظت گلیسرین (۳۰ - ۰ درصد وزنی) در دمای ثابت ۴۰ درجه سلسیوس انجام شد. درصد جذب کربن دی‌اکسید و ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز (K_{Ga}) به عنوان پاسخ در نظر گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مقدار گلیسرین به عنوان یک حلال فیزیکی از صفر تا ۳۰ درصد وزنی، درصد جذب از ۵۹/۱۳ به ۶۶/۱ درصد افزایش می‌یابد. همچنین افزایش غلظت گلیسرین علیرغم افزایش گرانیوی سیال منجر به افزایش ضریب کلی انتقال جرم از $۵۵/۵۰ \text{ kmol/m}^3 \cdot \text{hr} \cdot \text{kPa}$ به ۶۶/۵۳ در میکروراکتور می‌شود. مقایسه مقادیر گزارش شده K_{Ga} در این پژوهش با مقادیر محاسبه شده برای منواتانول آمین در یک برج پر شده نشان داد که ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز در میکروراکتور حدود ۶۰ برابر بزرگ‌تر از یک برج پر شده است که نشان دهنده عملکرد بهتر انتقال جرم میکروراکتور می‌باشد.

* عهده دار مکاتبات

حقوق ناشر محفوظ است.

h_rashidi@kut.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه به دلیل صنعتی شدن جوامع و افزایش مصرف انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای افزایش یافته است. در میان گازهای گلخانه‌ای، دی‌اکسیدکربن با حدود ۶۰ درصد، بالاترین سهم را به خود اختصاص می‌دهد و یکی از مهم‌ترین عوامل گرم شدن کره زمین است [۱]. با توجه به این امر، حذف دی‌اکسیدکربن از اتمسفر و جلوگیری از نشر آن اهمیت بالایی دارد. برای این منظور از فناوری‌های مختلفی برای جداسازی دی‌اکسیدکربن استفاده می‌شود. در این میان، جذب پس از احتراق، به علت راندمان بالا و مصرف انرژی پایین به طور وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲]. روش رایج جداسازی دی‌اکسیدکربن، جذب شیمیایی با آلکانول‌آمین‌ها می‌باشد که تجاری‌سازی شده است. تری‌اتانول‌آمین اولین حلالی بود که به صورت تجاری در واحد تصفیه گاز استفاده شد. سپس مونو اتانول‌آمین، دی‌اتانول‌آمین و متیل‌دی‌اتانول‌آمین مطرح شدند. پس از آن دی‌ایزوپروپیل‌آمین وارد فرآیندهای جذب و دفع دی‌اکسیدکربن شد که مجدداً توسط متیل‌دی‌اتانول‌آمین جایگزین شد. از مزایای استفاده از آمین‌ها در جذب پس از احتراق می‌توان به سرعت واکنش بسیار بالا، قیمت مناسب، پایداری شیمیایی خوب و معیبهی چون مصرف زیاد انرژی، حساسیت به اکسیژن، ظرفیت جذب پایین آمین و خوردگی تجهیزات اشاره کرد [۳و۴].

باتوجه به مطالب ذکر شده توجهات به سوی یافتن ماده جایگزین آمین‌ها جلب شده است. در این میان هیدروکسیدها به علت امتیازات ویژه‌ای مانند ظرفیت جذب بالا، هزینه پایین و فراوانی، مورد توجه قرار گرفته‌اند. مطالعات زیادی در زمینه جذب دی‌اکسیدکربن با حلال‌های هیدروکسیدی مانند سدیم هیدروکسید، پتاسیم هیدروکسید، لیتیم هیدروکسید صورت گرفته است. ماساکی^۱ و همکاران تاثیر دما در جذب دی‌اکسیدکربن با سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید یک نرمال را مطالعه نمودند؛ آن‌ها دریافتند سرعت جذب دی‌اکسیدکربن با افزایش دما افزایش می‌یابد. مطابق مشاهدات ماساکی، در دمای پایین، جذب سدیم هیدروکسید سریع‌تر از پتاسیم هیدروکسید می‌باشد اما در دمای بالا، جذب پتاسیم هیدروکسید بیشتر می‌باشد [۵]. جذب دی‌اکسیدکربن توسط حلال‌های هیدروکسید توسط محققان دیگری نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. در بسیاری از این مطالعه‌ها، ضمن بررسی اثر

پارامترهای مختلف بر میزان جذب دی‌اکسیدکربن، در مورد اثر مثبت دما بر راندمان جذب تاکید شده است [۶-۸]. نتایج مطالعه گومز^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۵ نشان داد که ظرفیت جذب هیدروکسیدها در مقایسه با تعدادی از حلال‌های آمینی نظیر مونواتانول‌آمین، پایپرازین، اتیل‌دی‌اتانول‌آمین، متیل‌دی‌اتانول‌آمین و دی‌اتانول‌آمین بالاتر است [۹].

امروزه استفاده از حلال‌های ترکیبی مورد توجه قرار گرفته است. حلال ترکیبی حلالی متشکل از حلال فیزیکی و شیمیایی است که در آن گازهای اسیدی به صورت مؤثرتر و به صورت انتخابی جدا می‌شود. در این فرآیند، بخش فیزیکی به حلال این قابلیت را می‌دهد که قسمت عمده‌ای از گازهای اسیدی خوراک را در خود حل کند و بخش شیمیایی نیز باقی‌مانده آن را در خود حل می‌کند. بنابراین حلال ترکیبی، اثری به مراتب بیش‌تر از یک حلال شیمیایی یا حلال فیزیکی تنها دارد. همچنین، در حلال ترکیبی معایب حاصل از حلال‌های شیمیایی یا فیزیکی کاسته می‌شود [۱۰]. به منظور ارزیابی دقیق‌تر حلال ترکیبی بر پایه گلیسرین نمونه‌هایی از نتایج بدست آمده توسط محققان در جدول ۱، آورده شده است.

با توجه به تاثیر مثبت افزودن گلیسرول به دیگر حلال‌ها در فرآیند جذب کربن‌دی‌اکسید، در این مطالعه با ترکیب هیدروکسید پتاسیم (KOH) به عنوان حلال شیمیایی و گلیسرین به عنوان بخش فیزیکی حلال، عملکرد این حلال ترکیبی مورد مطالعه قرار گرفت. گلیسرین با فرمول مولکولی $(C_3H_8O_3)$ یک الکل سه‌عاملی است و دارای ظرفیت بارگیری $mmolCO_2/mol$ Glycerol ۲۸/۸ است. در مطالعه انجام شده توسط شامیری^۳ و همکاران، حلالیت دی‌اکسیدکربن در محلول‌های آبی حاوی ۳۰ درصد وزنی مونواتانول‌آمین با غلظت‌های ۰ تا ۲۰ درصد وزنی گلیسرین در سه درجه حرارت ۳۱۳، ۳۲۳ و ۳۳۳ کلونین اندازه‌گیری شد. بارگیری دی‌اکسیدکربن در دماها، فشارها و غلظت‌های مختلف نشان داد که مخلوط ۵ درصد وزنی گلیسرین با مونواتانول‌آمین می‌تواند حلالیت دی‌اکسیدکربن را در فشارهای پایین افزایش دهد. آن‌ها تأیید کردند که حلال ترکیبی حاوی گلیسرین برای جذب مناسب است [۱۱]. مطالعه چانگ^۴ و همکاران بر روی حلال ترکیبی هیدروکسید سدیم و گلیسرین در بستر چرخان پر شده صورت گرفت. نتایج حاصل حاکی از آن بود که راندمان جذب دی‌اکسیدکربن می‌تواند به بیش از ۹۰ درصد افزایش یابد [۲۰].

³ Shamiri

⁴ Chiang

¹ Masaki

² Gomes

علاوه بر این، با روش افزایش تعداد کانال‌های یک میکروراکتور، می‌توان ظرفیت تولید را ارتقاء و به میزان قابل توجهی، زمان لازم برای رسیدن از تحقیقات آزمایشگاهی به کاربرد صنعتی را کاهش داد [۲۱-۲۳]. با توجه به این امر، میکروراکتورها قابلیت زیادی برای بهبود کارایی فرآیندهای جذب و دفع گاز دی‌اکسیدکربن را دارند [۲۲-۲۸]. پژوهشگران زیادی کارایی بالای راکتورهای میکروکانال برای جذب گاز دی‌اکسیدکربن را نشان داده‌اند. بی^۵ و همکاران اثر دما، فشار و نسبت مولی مونواتانول‌آمین به دی‌اکسیدکربن بر بازده جذب را در یک میکروکانال T شکل با مقطع چهارگوش، بررسی کردند و دریافتند بازده جذب دی‌اکسیدکربن می‌تواند به ۹۹/۹۴ درصد برسد [۲۵].

در پژوهش حاضر، برای اولین بار جذب گاز دی‌اکسیدکربن با حلال ترکیبی پتاسیم هیدروکسید-گلیسرین در میکروکانال در شرایط عملیاتی مختلف مطالعه و اثر سه عامل جریان حلال، غلظت پتاسیم هیدروکسید و غلظت گلیسرین هر کدام در سه سطح بر روی میزان جذب دی‌اکسیدکربن و ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز بررسی شده است.

۲- مواد و روش‌ها

در انجام آزمایش‌ها از پتاسیم هیدروکسید و گلیسرین با خلوص بالا استفاده شد. گاز دی‌اکسیدکربن نیز با خلوص ۹۹/۹۹ درصد از شرکت کاسپین تامین گردید. این مواد شیمیایی بدون هیچ‌گونه تصفیه بیشتر مورد استفاده قرار گرفتند.

در شکل ۱، نمایی از دستگاه آزمایشگاهی نمایش داده شده است. برای انجام آزمایش جذب گاز کربن دی‌اکسید از کنترل کننده جریان گاز، سنسور دی‌اکسید کربن، میکروراکتور T شکل با طول و عرض ۲۹-۷ سانتیمتر، حمام آب گرم، ترمومتر، پمپ، جداکننده حلال خروجی از میکروکانال، مرطوب کننده، کمپرسور جهت تامین هوا و پمپ پرستالیک جهت تامین حلال با شدت جریان مورد نظر استفاده شده است.

برای انجام آزمایش‌های جذب گاز کربن دی‌اکسید، محلول پتاسیم هیدروکسید و گلیسرین مورد نیاز در مخزن خوراک با ظرفیت مشخص تهیه و ذخیره‌سازی شد. از یک پمپ پرستالیک برای انتقال مایع به میکروراکتور و تماس با گاز استفاده گردید. از اختلاط هوا با دی‌اکسیدکربن به منظور شبیه‌سازی گاز حاصل از احتراق، استفاده شد که قبل از ورود

جدول (۱) عملکرد حلال‌های فیزیکی و شیمیایی بر جذب دی‌اکسیدکربن

منبع	دستگاه	درصد جذب	دما (K)	درصد وزنی حلال	حلال
[۱۱]	راکتور همزن دار تعادلی	-	-۳۱۳ ۳۳۳	۲۰-۰	MEA+Glyserol
[۱۲]	برج پرشده	۹۵/۲	-۳۱۸ ۳۰۳	۳۰-۱۰	MEA+Glyserol
[۱۳]	شبیه‌سازی معکوس	۲۸/۸	۲۹۸	-	Glyserol
[۱۴]	برج پرشده	-	۲۹۸	۱۰-۴۰	K ₂ CO ₃ +Glyserol
[۱۵]	میکروکانال	۹۷	-	۴-۱۰	MDEA+PZ
[۱۶]	میکروکانال	۹۹	۴۰-۲۰	۱۰	MDEA
[۱۷]	میکروکانال	۹۱	۲۹۸	۳۰	MEA
		۹۵	۳۰۸		
		۹۹/۴۵	۳۱۸		
[۱۸]	میکروکانال	۹۶/۴۸	۲۹۳	۱۳/۸۲	NH ₃
[۱۹]	میکروکانال	۷۰/۹	-۳۰۳ ۳۲۳	-	H ₂ O
[۲۰]	بستر چرخان پرشده	۹۵	۳۱۳	۰/۵ M +۰/۷	NaOH+Glyserol

در حال حاضر فرآیند صنعتی جذب گاز دی‌اکسیدکربن توسط حلال در برج جذب پرشده انجام می‌شود. اما این تجهیزات برای جذب دی‌اکسیدکربن به حجم بالایی نیاز دارد. امروزه میکروراکتورها به عنوان یک فناوری پیشرو مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌اند. در مورد میکروراکتور تعاریف مختلفی وجود دارد؛ به عنوان یک تعریف میکروراکتور به دستگاهی اطلاق می‌شود که حداقل یکی از ابعاد آن دارای مقیاس میکرومتر باشد. با مقایسه میکروراکتورها با برج‌های جذب و دفع (پاششی، آکنده و حبابی) می‌توان به مزایای میکروراکتورها پی‌برد. از جمله مزایای استفاده از میکروراکتورها عبارتند از:

- حجم کوچک
- عملکرد عالی در زمینه انتقال جرم و حرارت
- سهولت در انجام عملیات
- کنترل فرایند بهتر

$$(2) \quad \text{درصد جذب} = \frac{\text{مول CO}_2 \text{ خروجی} - \text{مول CO}_2 \text{ ورودی}}{\text{مول CO}_2 \text{ ورودی}} \times 100$$

۳- نتایج و تحلیل

۳-۱- تأثیر غلظت پتاسیم هیدروکسید

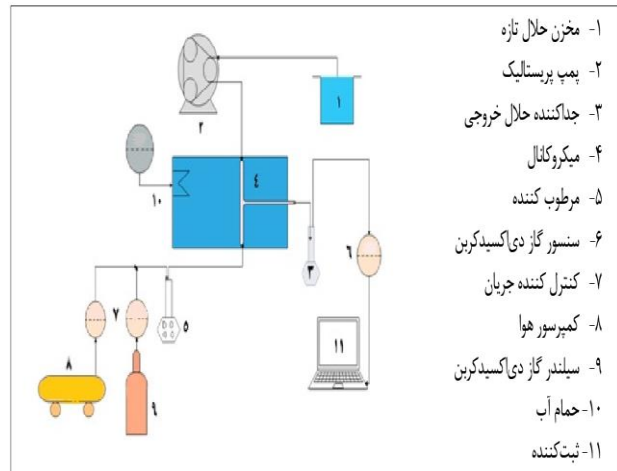
غلظت حلال یک پارامتر مهم در میزان جذب دی‌اکسیدکربن می‌باشد. تأثیر غلظت پتاسیم هیدروکسید بر روی جذب دی‌اکسیدکربن در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل قابل مشاهده است، با افزایش غلظت پتاسیم هیدروکسید میزان درصد جذب دی‌اکسیدکربن، افزایش یافته است. جذب دی‌اکسیدکربن در محلول پتاسیم هیدروکسید و گلیسیرین به ترتیب شیمیایی و فیزیکی است. همان‌طور که می‌دانیم جذب شیمیایی در راندمان جذب بسیار تعیین‌کننده است. افزایش درصد جذب دی‌اکسیدکربن، به علت وجود گروه عاملی OH در ساختار شیمیایی پتاسیم هیدروکسید است که موجب ایجاد پیوند هیدروکسیل میان مولکول‌های گاز و پتاسیم هیدروکسید می‌گردد. بنابراین افزایش غلظت پتاسیم هیدروکسید در حلال منجر به افزایش تعداد سایت‌های فعال جذب خواهد شد. افزایش تعداد سایت‌های فعال جذب باعث تقویت جذب شیمیایی و بالا بردن میزان جذب دی‌اکسیدکربن می‌گردد.

اثر غلظت پتاسیم هیدروکسید بر ضریب کلی انتقال جرم بر مبنای فاز گاز در شکل ۲، نمایش داده شده است. با افزایش غلظت پتاسیم هیدروکسید، ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز افزایش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود؛ در غلظت پتاسیم هیدروکسید ۰/۳ مولار، ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز برابر با ۴۰/۳۳ و در غلظت پتاسیم هیدروکسید ۰/۷ مولار، ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز برابر ۷۶/۵۹ $\text{kmol/m}^3 \cdot \text{hr} \cdot \text{kPa}$ است. این افزایش ضریب کلی انتقال جرم بر مبنای فاز گاز به علت ایجاد سایت‌های فعال جذب بیشتر در اثر افزایش غلظت پتاسیم هیدروکسید در حلال است که موجب افزایش میزان جذب شیمیایی و همین‌طور افزایش میزان $K_G a_v$ می‌گردد.

۳-۲- تأثیر غلظت گلیسیرین

در شکل ۳، تأثیر غلظت گلیسیرین بر حسب درصد وزنی بر درصد جذب کربن دی‌اکسید نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در جریان مایع ۶ میلی‌لیتر بر دقیقه و غلظت ثابت ۰/۵ مولار پتاسیم هیدروکسید، با افزایش غلظت

به میکروکانال مرطوب شده و با آب اشباع می‌شود. در ورودی میکروراکتور جریان مایع با گاز برخورد کرده و در ادامه جریان دوفازی گاز-مایع در میکروکانال جریان می‌یابد.



شکل ۱: طرح واره دستگاه آزمایشگاهی

در طول مسیر میکروکانال، دی‌اکسیدکربن توسط حلال جذب و در خروجی، هوای جذب نشده و باقیمانده دی‌اکسیدکربن توسط یک ظرف به سرعت از حلال جدا می‌شود. جذب گاز دی‌اکسیدکربن توسط ترکیبی از حلال‌های پتاسیم هیدروکسید با غلظت‌های ۰/۷، ۰/۵ و ۰/۳ مولار و گلیسیرین با غلظت‌های ۳۰، ۱۵ و ۰ درصد وزنی، در فشار اتمسفریک انجام شد. در تمامی آزمایشات جریان گاز ورودی به میکروراکتور ۴۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه است. غلظت دی‌اکسیدکربن در گاز ورودی ۱۵ درصد حجمی و دمای حمام در ۴۰ درجه سلسیوس ثابت نگه داشته شد. پس از اختلاط مایع-گاز، خروجی از میکروراکتور توسط سنسور گاز دی‌اکسیدکربن اندازه‌گیری و داده‌ها ذخیره می‌شود.

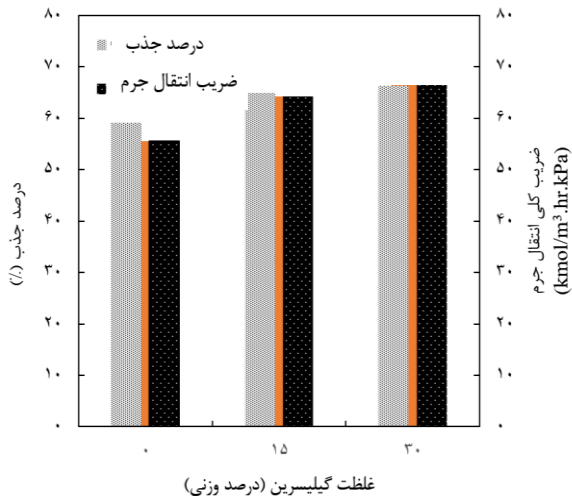
در این پژوهش جذب گاز دی‌اکسیدکربن توسط حلال ترکیبی پتاس-گلیسیرین صورت گرفته و جهت محاسبه ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز ($K_G a_v$) از معادله زیر استفاده شده است [۲۰].

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

G سرعت جرمی گاز ورودی بر حسب $\text{kmol/m}^3 \cdot \text{h}$ فشار P بر حسب kPa ، Z طول میکروراکتور بر حسب m و Y کسر مولی نسبی دی‌اکسیدکربن در جریان گاز می‌باشد.

همچنین برای تعیین میزان گاز کربن دی‌اکسید جذب شده توسط حلال ترکیبی پتاسیم هیدروکسید-گلیسیرین از رابطه زیر استفاده شده است:

توجه به ابعاد کوچک میکروراکتور، افزایش گرانیوی اثر بسیار کمی بر ضریب انتقال جرم در این دستگاه دارد. نتایج تجربی پژوهش انجام شده توسط چیانگ در برج پر شده دوار نیز نشان می‌دهد که افزودن گلیسیرین در محلول آبی



شکل ۳: اثر غلظت گلیسیرین بر درصد جذب و ضریب کلی انتقال جرم در غلظت ۰/۵ مولار پتاسیم هیدروکسید و جریان حلال ۶ میلی لیتر بر دقیقه

سدیم هیدروکسید باعث افزایش ضریب انتقال جرم می‌شود [۲۰]. البته اثر افزایش گرانیوی در اثر افزایش غلظت گلیسیرین در غلظت‌های بالا تقویت می‌شود و علت رشد کم ضریب انتقال جرم و درصد جذب در غلظت ۳۰ درصد وزنی گلیسیرین این امر می‌باشد.

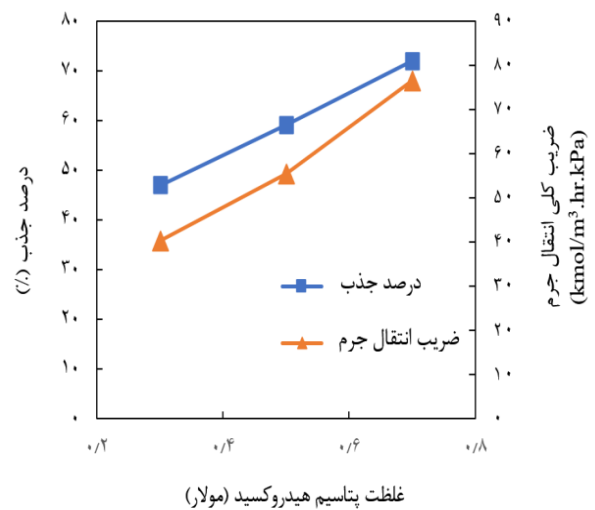
شیب نمودارها در شکل ۲ نسبت به شکل ۳ بیشتر است. به عبارت دیگر، در جذب دی‌اکسیدکربن، افزایش غلظت پتاسیم هیدروکسید نسبت به افزایش غلظت گلیسیرین موثرتر می‌باشد. این امر به دلیل اثر قوی‌تر جذب شیمیایی نسبت به جذب فیزیکی در فشارهای پایین است.

مقایسه مقادیر گزارش شده برای KGa_v در این تحقیق با مقادیر KGa_v محاسبه شده برای منواتانول آمین در برج پر شده نشان داد که ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز در میکروراکتور حدود ۶۰ برابر بزرگ‌تر است که نشان دهنده عملکرد بهتر انتقال جرم میکروراکتور می‌باشد [۳۰].

۳-۳- اثر جریان مایع بر جذب دی‌اکسیدکربن

در شکل ۴، اثر جریان مایع بر درصد جذب دی‌اکسیدکربن در غلظت گلیسیرین صفر درصد وزنی در میکروکانال بررسی شده است. در غلظت پتاسیم هیدروکسید ۰/۷ مولار و جریان مایع ۴

گلیسیرین، از صفر درصد وزنی به ۳۰ درصد وزنی، درصد جذب کربن دی‌اکسید از ۵۹/۱۳ به ۶۶/۴۰ می‌رسد؛ زیرا با افزایش غلظت گلیسرول جذب فیزیکی حلال بهبود می‌یابد. مطابق



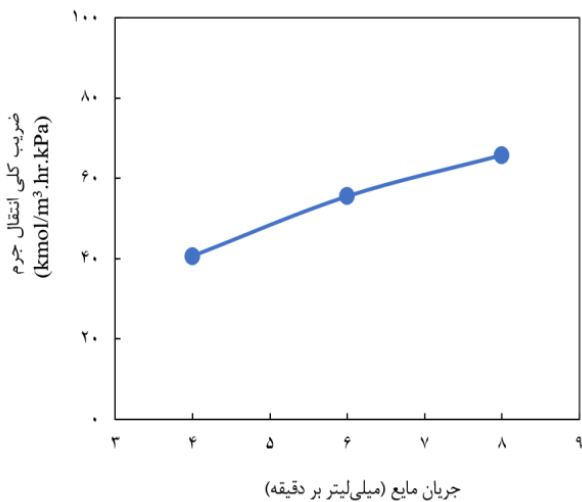
شکل ۲: اثر غلظت پتاسیم هیدروکسید بر درصد جذب و ضریب کلی انتقال جرم در غلظت صفر درصد گلیسیرین و جریان حلال ۶ میلی لیتر بر دقیقه

مطالعات صورت گرفته، افزایش میزان گلیسیرین موجب افزایش حلالیت دی‌اکسیدکربن می‌شود [۱۱ و ۱۳]. دلیل این امر ساختار شیمیایی گلیسیرین و ساختار زنجیره‌ای آن در ایجاد پیوند با مولکول‌های گاز دی‌اکسید کربن است. با افزایش حلالیت، غلظت دی‌اکسیدکربن در فصل مشترک گاز-مایع افزایش یافته و سرعت انتقال جرم افزایش می‌یابد.

مطابق شکل ۳ مشاهده می‌شود با افزایش غلظت گلیسیرین ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز نیز افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود، در غلظت ۰/۵ مولار پتاسیم هیدروکسید و جریان حلال ۶ میلی لیتر بر دقیقه و غلظت صفر درصد وزنی گلیسیرین، میزان ضریب کلی انتقال جرم بر مبنای فاز گاز برابر ۵۵/۵۰ و با افزایش غلظت گلیسیرین به ۳۰ درصد وزنی، ضریب کلی انتقال جرم بر مبنای فاز گاز به ۶۶/۵۳ می‌رسد. با افزایش غلظت گلیسیرین، گرانیوی سیال افزایش می‌یابد. افزایش گرانیوی سیال باعث کاهش ضریب نفوذ در فاز مایع می‌شود که تاثیر منفی بر ضریب انتقال جرم دارد.

از طرف دیگر، در میکروراکتور با توجه به ابعاد کوچک دستگاه، ضخامت لایه فیلم انتقال جرم کاهش می‌یابد. با توجه به تئوری فیلمی، با کاهش ضخامت لایه فیلم، ضریب انتقال جرم افزایش می‌یابد. این دو موضوع در تقابل با یکدیگر هستند. با توجه به شکل ۳، به نظر می‌رسد که با

جریان حلال موجب افزایش ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز می‌گردد. افزایش میزان جریان حلال موجب افزایش سرعت مایع و در نتیجه اختلاط بهتر گاز-مایع در میکروراکتور می‌شود. از طرفی درصد جذب را افزایش می‌دهد. همچنین، می‌توان گفت هر چه میزان جریان حلال افزایش یابد، سطح تماس بین فاز گاز و مایع جهت انتقال جرم افزایش و نرخ انتقال جرم افزایش می‌یابد.

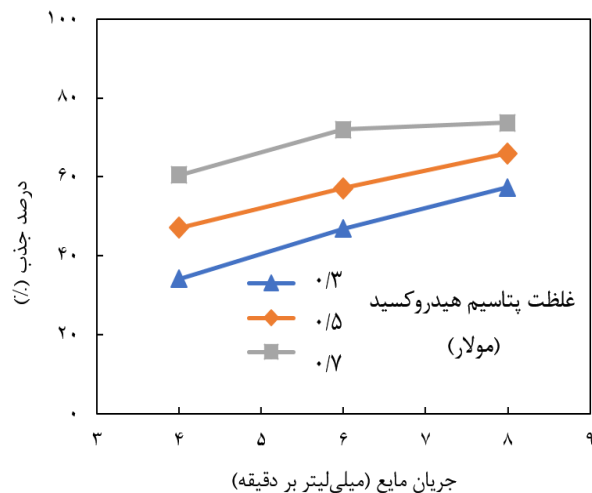


شکل ۵: تاثیر جریان مایع بر ضریب کلی انتقال جرم در صفر درصد گلیسیرین و غلظت ۰/۵ مولار پتاسیم هیدروکسید

۳- نتیجه‌گیری

در این پژوهش فرایند جذب دی‌اکسیدکربن توسط حلال ترکیبی پتاسیم هیدروکسید-گلیسیرین بررسی شد. در مقیاس آزمایشگاهی از میکروراکتور برای تماس دو فاز گاز و مایع استفاده شد. مطابق نتایج آزمایش و تحلیل داده‌ها، افزایش میزان غلظت پتاسیم هیدروکسید، از ۰/۳ مولار به ۰/۷ مولار موجب افزایش میزان جذب دی‌اکسیدکربن از ۳۴/۲۰ به ۶۰/۴۷ درصد شد. همچنین با افزایش جریان از ۴ به ۸ میزان درصد جذب دی‌اکسیدکربن از ۳۴/۲۰ به ۵۷/۳۳ درصد و ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز از ۲۷/۳۲ به ۵۳/۰۴ $\text{kmol/m}^3 \cdot \text{hr.kPa}$ رسید. با افزایش غلظت گلیسیرین به عنوان حلال فیزیکی از صفر به ۳۰ درصد وزنی در شرایط یکسان میزان جذب دی‌اکسیدکربن از ۵۹/۱۳ به ۶۶/۴۰ رسید. همچنین افزایش گلیسیرین علیرغم افزایش گرانشی سیال منجر به افزایش ضریب کلی انتقال جرم از $\text{kmol/m}^3 \cdot \text{hr.kPa}$

میلی‌لیتر بر دقیقه، درصد جذب دی‌اکسیدکربن برابر با ۶۰/۴۷ و در جریان مایع ۸ میلی‌لیتر بر دقیقه، راندمان جذب دی‌اکسیدکربن برابر با ۷۳/۷۳ درصد است. بالا بودن میزان جریان مایع به معنای افزایش دسترسی به حلال تازه برای جذب دی‌اکسیدکربن است. مطابق نتایج بدست آمده در آزمایش‌ها، افزایش جریان حلال از ۴ به ۸ موجب کاهش غلظت خروجی دی‌اکسیدکربن از میکروراکتور شد. این امر به معنای افزایش میزان جذب دی‌اکسیدکربن توسط حلال است. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود روند صعودی در غلظت‌های پتاسیم هیدروکسید ۰/۵-۰/۳ مولار، کاملاً مشهود است. در غلظت ۰/۷ پتاسیم هیدروکسید، با افزایش جریان حلال از ۴ به ۸ شاهد روند صعودی نمودار هستیم اما با افزایش جریان حلال از ۶ به ۸، نسبت به سایر غلظت‌های پتاسیم هیدروکسید، افزایش درصد جذب کند می‌شود. به نظر می‌رسد که در این شرایط اثر افزایش غلظت و افزایش جریان به صورت رقابتی عمل می‌کند و در غلظت‌های بالای پتاسیم هیدروکسید با توجه به اثر غالب غلظت حلال، افزایش جریان مایع تاثیر زیادی بر افزایش درصد جذب ندارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت هر چه میزان جریان حلال بیشتر باشد سطح تماس لازم بین فاز گاز و مایع، افزایش یافته و دی‌اکسیدکربن بیشتری جذب می‌شود.



شکل ۴: اثر جریان مایع بر درصد جذب در غلظت صفر درصد گلیسیرین و غلظت ۰/۵ مولار پتاسیم هیدروکسید

با توجه به شکل ۵، در جریان مایع ۴ میلی‌لیتر بر دقیقه، صفر درصد وزنی گلیسیرین و غلظت ۰/۵ مولار پتاسیم هیدروکسید، ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز برابر با ۴۰/۵۶ و در جریان مایع ۸ میلی‌لیتر بر دقیقه، ضریب کلی انتقال جرم برابر با ۶۵/۷۶ $\text{kmol/m}^3 \cdot \text{hr.kPa}$ شده است. افزایش

[10] Rashidi, H. and S. Sahraie, Enhancing carbon dioxide absorption performance using the hybrid solvent: Diethanolamine-methanol. *Energy*, 2021. 221: p. 119799.

[11] Shamiri, A., Shafeeyan, M. S., Tee, H. C., Leo, C. Y., Aroua, M. K., & Aghamohammadi, N. (2016). Absorption of CO₂ into aqueous mixtures of glycerol and monoethanolamine. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 35, 605-613

[12] Valeh-e-Sheyda, P. and J. Barati, Mass transfer performance of carbon dioxide absorption in a packed column using monoethanolamine-Glycerol as a hybrid solvent. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021. 146: p. 54-68.

[13] Ryo Nagumo, etc, Molecular Dynamics simulations for Systematic Prediction of the CO₂ Solubility of Physical Absorbents, *Journal of chemical engineering of japan*, Vol.49, No.1, pp. 1-5, 2016.

[14] Smith, K., Lee, A., Mumford, K., Li, S., Thanumurthy, N., Temple, N., ... & Stevens, G. (2015). Pilot plant results for a precipitating potassium carbonate solvent absorption process promoted with glycine for enhanced CO₂ capture. *Fuel Processing Technology*, 135, 60-65.

[15] Pan, M. Y., Qian, Z., Shao, L., Arowo, M., Chen, J. F., & Wang, J. X. (2014). Absorption of carbon dioxide into N-methyldiethanolamine in a high-throughput microchannel reactor. *Separation and Purification Technology*, 125, 52-58. promoted with glycine for enhanced CO₂ capture. *Fuel Processing Technology*, 135, 60-65.

[16] Pan, M. Y., Li, T., Zhou, Y., Qian, Z., Shao, L., Wang, J. X., & Chen, J. F. (2015). Selective absorption of H₂S from a gas mixture with CO₂ in a microporous tube-in-tube microchannel reactor. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 95, 135-142.

[17] Ye, C., Dang, M., Yao, C., Chen, G., & Yuan, Q. (2013). Process analysis on CO₂ absorption by monoethanolamine solutions in microchannel reactors. *Chemical engineering journal*, 225, 120-127.

[18] 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.

[19] Akkarawatkoosith, N., Nopcharoenkul, W., Kaewchada, A., & Jaree, A. (2020). Mass Transfer Correlation and Optimization of Carbon Dioxide Capture in a Microchannel Contactor: A Case of CO₂-Rich Gas. *Energies*, 13(20), 5465.

[20] Chiang, C. Y., Lee, D. W., & Liu, H. S. (2017). Carbon dioxide capture by sodium hydroxide-glycerol aqueous solution in a rotating packed bed. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 72, 29

[21] G.W. Chen, J. Yue, Q. Yuan, Gas-liquid microreaction technology: recent developments and future challenges, *Chin. J. Chem. Eng.* 16 (2008) 663-669.

[22] J. Yue, G.W. Chen, Q. Yuan, L. Luo, Y. Gonthier, Hydrodynamics and mass transfer characteristics in gas-liquid flow through a rectangular microchannel, *Chem. Eng. Sci.* 62 (2007) 2096-2108.

۵۵/۵۰ به ۶۶/۵۳ در میکروراکتور شد. یافته‌های این پژوهش نشان داد که راندمان جذب دی‌اکسیدکربن و شار انتقال جرم با استفاده از حلال ترکیبی پتاسیم‌هیدروکسید-گلیسرین در میکروکانال بسیار بالا است. در این پژوهش حداکثر مقدار ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز $85/54 \text{ kmol/m}^3 \cdot \text{hr} \cdot \text{kpPa}$ گزارش شده است. مقایسه مقادیر گزارش شده برای K_{GaV} در این تحقیق با مقادیر محاسبه شده در برج پر شده نشان داد که ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز در میکروراکتور حدود ۶۰ برابر بزرگ‌تر است که نشان دهنده عملکرد بهتر انتقال جرم میکروراکتور می‌باشد.

مراجع

- [۱] سمیه نوروزبهراری، شاهرخ شاه حسینی، احد قائمی. ۱۳۹۲. بررسی کاهش انتشار گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن به روش جذب واکنشی در حلال‌های شیمیایی. اولین همایش تخصصی محیط زیست، انرژی و صنعت پاک
- [2] Yu, C.-H., C.-H. Huang, and C.-S. Tan, A review of CO₂ capture by absorption and absorption. *Aerosol Air Qual. Res.*, 2012. 12(5): p. 745-769.
- [3] Gouedard, C., et al., Amine degradation in CO₂ capture. I. A review. *Int. J. Greenhouse Gas Control*, 2012. 10: p. 244-270.
- [4] Lepaumier, H., D. Picq, and P.-L. Carrette, Degradation study of new solvents for CO₂ capture in post-combustion. *Energy Procedia*, 2009. 1(1): p. 893-900
- [5] Masaki, K., On the CO₂ absorption velocity of naoh-and koh-solutions. *The J. Biochem.*, 1931. 13(1): p. 211-217.
- [6] Rumpf, B., J. Xia, and G. Maurer, Solubility of carbon dioxide in aqueous solutions containing acetic acid or sodium hydroxide in the temperature range from 313 to 433 K and at total pressures up to 10 MPa. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1998. 37(5): p. 2012-2019.
- [7] Yincheng, G., N. Zhenqi, and L. Wenyi, Comparison of removal efficiencies of carbon dioxide between aqueous ammonia and NaOH solution in a fine spray column. *Energy Procedia*, 2011. 4: p. 512-518.
- [8] Gondal, S., et al., Kinetics of the absorption of carbon dioxide into aqueous hydroxides of lithium, sodium and potassium and blends of hydroxides and carbonates. *Chem. Eng. Sci.*, 2015. 123: p. 487-499.
- [9] Gomes, J., S. Santos, and J. Bordado, Choosing amine-based absorbents for CO₂ capture. *Environ. Technol.*, 2015. 36(1): p. 19-25.

[23] H.S. Cao, G.W. Chen, Q. Yuan, Testing and design of a microchannel heat exchanger with multiple plates, *Ind. Eng. Chem. Res.* 48 (2009) 4535-4541.

[24] Wang, J., et al., An intensification of mass transfer process for gas-liquid counter-current flow in a novel microchannel with limited path for CO₂ capture. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021. 149: p. 905-914

[25] C.B. Ye, G.W. Chen, Q. Yuan, Process characteristics of CO₂ absorption by aqueous monoethanolamine in a microchannel reactor, *Chin. J. Chem. Eng.* 20 (2012) 111-119.

[26] J. Yue, G. Chen, Q. Yuan, L. Luo, and Y. Gonthier, *Chemical Engineering Science* 62, 2096 (2007).

[27] J. Yue, L. Luo, Y. Gonthier, G. Chen, and Q. Yuan, *Chemical Engineering Science* 64, 3697 (2009).

[28] C.B. Ye, M.H. Dang, C.Q. Yao, G.W. Chen, Q. Yuan, Process analysis on CO₂ absorption by monoethanolamine solutions in microchannel reactors, *Chem. Eng. J.* 225 (2013) 120-127.

[29] Krauß, M. and R. Rzehak, Reactive absorption of CO₂ in NaOH: Detailed study of enhancement factor models. *Chem. Eng. Sci.*, 2017. 166: p. 193-209.

[30] Demontigny, D., Tontiwachwuthikul, P. and Chakma, A. (2001), Parametric studies of carbon dioxide absorption into highly concentrated monoethanolamine solutions. *Can. J. Chem. Eng.*, 79: 137-142.

Investigation of carbon dioxide absorption process in a microreactor by potash-glycerol hybrid solvent

Hamed Rashidi*, Maryam Sahraei

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Kermanshah University of Technology, Iran

ABSTRACT

In recent years, the removal of carbon dioxide as the most important greenhouse gas has been noticed. In this study, the performance of potash-glycerol hybrid solvent in the process of carbon dioxide absorption was investigated using a microreactor. Experiments have been done under different conditions include: flow of inlet solvent (4-8 ml/min), potassium hydroxide concentration (0.3- 0.7 M) and glycerol concentration (0-30 wt.%) at constant temperature of 40 °C, and the percentage of carbon dioxide absorption and the overall volumetric mass transfer coefficient based on gas phase ($K_{G a_v}$) have been considered as response. According to the results, with increasing glycerol concentration as physical solvent from 0 to 30 wt. %, the absorption efficiency increases from 59.13 to 66.1%. Also, by increasing glycerol concentration despite increased fluid viscosity, the overall volumetric mass transfer coefficient increases from 55.50 to 66.53 kmol/m³.hr.kPa. Comparison of the reported values for $K_{G a_v}$ in this study with the values published for monoethanolamine in the packed tower shows that the overall volumetric mass transfer coefficient in the microreactor is about 60 times larger, indicating better microreactor mass transfer performance.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: March 2, 2021

Received in revised form: September 21, 2021

Accepted: November 10, 2021

Key words:

Absorption

Carbon dioxide

Microreactor

Potassium hydroxide

Glycerol

* Corresponding author

h_rashidi@kut.ac.ir

All right reserved.