بررسی عملکرد حلال ترکیبی پتاسیم هیدروکسید – گلیسرول در جذب گاز کربن‌دی‌اکسید

حامد رشیدی*+، شیما چوبتاشانی، جواد براتی
گروه مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

چکیده: امروزه فرایند جذب واکنشی گازهای اسیدی توسط حلال، به صورت وسیعی به منظور کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به کار می‌رود. در این پژوهش تجربی، فرایند جذب گاز کربن‌دی‌اکسید توسط حلال ترکیبی پتاسیم هیدروکسید- گلیسرول در یک برج جذب آکنده انجام شده است. اثر عامل‌های گوناگون، مانند؛ غلظت پتاسیم هیدروکسید (۰/۸ -۰/۲ مولار)، غلظت گلیسرول (۱۲-۴ درصد وزنی)، و شدت جریان گاز ورودی به برج (۲/۳ و ۱/۷ لیتر بر دقیقه) در دمای ثابت ۳۵ درجه سلسیوس و غلظت ثابت گاز کربن‌دی‌اکسید ۱۰ درصد در فشارجو به صورت آزمایشگاهی بر روی فرایند جذب کربن‌دی‌اکسید توسط حلال ترکیبی پتاسیم هیدروکسید – گلیسرول بررسی شد و درصد جذب کربن‌دی‌اکسید، ضریب کلی انتقال جرم حجمی برمبنای فاز گاز و شار انتقال جرم حجمی به عنوان پاسخ در نظر گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد، در شرایط عملیاتی اعمال شده، افزایش میزان غلظت گلیسرول و پتاسیم هیدروکسید می‌تواند سبب کاهش غلظت کربن‌دی‌اکسید گاز خروجی از برج و افزایش درصد جذب، ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز و شار انتقال جرم حجمی گردد. درصد جذب گاز کربن‌دی‌اکسید توسط این حلال ترکیبی، در حالت بیشینه، در شدت جریان ۱/۷ لیتر بر دقیقه، در غلظت‌های ۱۲ درصد وزنی گلیسرول و ۰/۸ مولار پتاسیم هیدروکسید، ۹۴/۲۸ درصد ارزیابی گردید. همچنین حداکثر میزان ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز و شار انتقال جرم حجمی در شرایط عملیاتی ذکر شده، در غلظت‌های حداکثری ۰/۸ مولار پتاسیم هیدروکسید و ۱۲ درصد وزنی گلیسرول و شدت جریان گاز ورودی ۲/۳ لیتر بر دقیقه، به ترتیب ۰/۹۶ $kmol/m^3.h.kpa$ و ۶۷/۶۵ $kmol/m^3.h$ است.

کلمات کلیدی: جذب، ضریب انتقال جرم، کربن‌دی‌اکسید، حلال ترکیبی، پتاسیم هیدروکسید، گلیسرول، برج پرشده.

KEYWORDS: *Absorption, Mass transfer coefficient, Carbon dioxide, Hybrid solvent, Potassium hydroxide, Glycerol, Packed tower.*

مقدمه

افزایش گازهای گلخانه‌ای، به خصوص گاز کربن‌دی‌اکسید، در طی سال‌های اخیر به دلایلی از جمله: افزایش روند رشد جمعیت، تخریب منابع طبیعی و محیط زیست و سیر صنعتی‌شدن جامعه است. گاز کربن‌دی‌اکسید به عنوان یک گاز مهم مصرفی در صنعت می‌باشد. همچنین، یک گاز مهم گلخانه‌ای است که سبب بالارفتن دمای جو می‌شود. بنابراین جداسازی گاز کربن‌دی‌اکسید از گازهای مخرب خروجی به دلیل غلظت بالای کربن‌دی‌اکسید به میزان ۳۶/۸ گیگاتن در جو، روز به روز در حال افزایش است. بااین روند افزایش گازهای گلخانه‌ای

* عهده‌دار مکاتبات
+E- mail: h_rashidi@kut.ac.ir

انتظار می‌رود که تا سال ۲۰۳۰میلادی، فرایند گرم شدن زمین ادامه داشته باشد و دمای کره زمین تا ۲ درجه سلسیوس افزایش یابد [۲].

جداسازی گاز کربن‌دی‌اکسید می‌تواند با روش‌های گوناگونی از جمله جذب توسط حلال، جذب سطحی روی جامد، نفوذ از میان غشاها و تبدیل‌های شیمیایی انجام شود. برای حذف گاز کربن‌دی‌اکسید در مقیاس صنعتی، روش جذب گاز توسط حلال مهم‌ترین و متداول‌ترین روش تصفیهٔ گاز است [۳]. فرایند جذب گاز به طور گسترده‌ای در خالص‌سازی گاز و همچنین در بسیاری از فرایندهای شیمیایی و پتروشیمی در صنعت به کار می‌رود. از میان آن‌ها، فرایند جذب گاز در برج‌های پرشده[۱] به صورت نامنظم و با استفاده از محلول‌های بازی مانند محلول آبی سدیم‌هیدروکسید به طور متداول در فرایندهای تصفیهٔ گازهای اسیدی به کار گرفته شده است [۴]. از برج‌های پرشده در انواع فرایندهای جداسازی، تبادل حرارتی و تبدیل شیمیایی استفاده می‌شود. این فرایندها شامل جذب و دفع گاز، تقطیر، استخراج و انتقال گرما می‌باشد. بیش‌ترین کاربرد برج‌های پرشده در فرایند جذب گاز است. جذب گاز فرایندی است که در آن مخلوط گازی با حلال تماس پیدا می‌کند و در طی این تماس یک یا چند جزء از مخلوط گازی به فاز مایع منتقل می‌شود. در جذب گاز ممکن است افزون بر انتقال جرم بین دو فاز، واکنش شیمیایی نیز بین اجزای گاز و مایع رخ دهد. این واکنش‌ها برگشت پذیر یا برگشت ناپذیر می‌باشند [۵].

درگذشته حلال‌های زیادی برای جذب کربن‌دی‌اکسید استفاده شده است و دانشمندان همچنان به دنبال حلال‌های جدیدی برای این مهم هستند. مخلوط حلال پتاسیم هیدروکسید و گلیسرول یکی از این حلال‌های جدید است که تاکنون برای جذب کربن‌دی‌اکسید مورد ارزیابی قرار نگرفته است. پتاسیم هیدروکسید (KOH)، جامد سفید رنگ با ساختار بلوری مونوکلینیک[۲] دارای جرم مولکولی ۵۶/۱۰۵۶ گرم در مول، درآب محلول است و محلول قلیایی قوی ایجاد می‌کند و حلال شیمیایی محسوب می‌شود. گلیسرول با فرمول مولکولی ($C_3H_8O_3$) و با جرم مولکولی ۹۲/۰۹ گرم در مول، الکل سه عاملی است و با هر نسبتی در آب حل می‌شود و حلال فیزیکی تجدیدپذیری است. از ترکیب گلیسرول و حلال‌های شیمیایی نتیجه‌های خوبی به‌دست آمده است. در جدول ۱ و ۲، به برخی از کاربردهای این حلال‌ها اشاره شده است.

ناگومو[۳] و *همکاران* در سال ۲۰۱۶میلادی، برخی از حلال‌های فیزیکی از جمله گلیسرول را در دمای ثابت ۲۹۸ K و فشار جو، برای جذب کربن‌دی‌اکسید موردبررسی قراردادند. گلیسرول در شرایط ترمودینامیکی ذکرشده دارای ظرفیت بارگیری ۲۸/۸ $mmolCO_2/molGlyserol$ است [۶]. *شامیری*[۴] و *همکاران* در سال ۲۰۱۶میلادی، ظرفیت جذب کربن‌دی‌اکسید را از ترکیب ۳۰ درصد وزنی مونواتانول‌آمین با ۷۰ درصد وزنی گلیسرول در دما و فشارهای گوناگون به‌دست آوردند. این حلال ترکیبی در دمای پایین (۳۱۳ K)، دارای بیش‌ترین میزان بارگیری کربن‌دی‌اکسید یعنی ۸۸ mol CO_2/mol solvent بود [۷]. به‌تازگی در پژوهشی، جذب کربن‌دی‌اکسید توسط حلال ترکیبی ۳۰ درصد وزنی مونواتانول‌آمین – ۱۵ درصد وزنی گلیسرول در برج پرشده مورد ارزیابی قرار گرفت. نتیجه‌های این پژوهش نشان می‌دهد که افزایش غلظت گلیسرول، درصد جذب کربن‌دی‌اکسید را تا ۱۵ درصد افزایش می‌دهد [۱۰]. در پژوهش دیگری، با افزودن ۵ تا ۱۰ درصد وزنی گلیسرول به حلال ۳۰ درصد وزنی مونواتانول‌آمین حلالیت کربن‌دی‌اکسید در محلول آبی مونواتانول‌آمین ـ گلیسرول در فشارهای پایین بهبود یافت [۱۲].

در این پژوهش با توجه به تأثیر مثبت افزودن گلیسرول به دیگر حلال‌ها در فرایند جذب کربن‌دی‌اکسید تلاش می‌شود تا برای اولین بار با استفاده از ترکیب حلال شیمیایی پتاسیم هیدروکسید و حلال فیزیکی و تجدیدپذیر گلیسرول، رفتار حلال ترکیبی بالا برای جذب کربن‌دی‌اکسید در برج پرشده بررسی شود. به همین منظور درصد جذب و ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز برای اولین بار برای این محلول ترکیبی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

بخش تجربی

مواد شیمیایی

در این پژوهش از پتاسیم هیدروکسید (KOH) با درجه خلوص ۹۹ درصد از شرکت کیمیا صنعت و گلیسرول ($C_3H_8O_3$) با درجه خلوص ۹۹ درصد از شرکت کیمیا شیمی استفاده شد. گاز کربن‌دی‌اکسید با درجه خلوص ۹۹/۹۵ درصد از شرکت کاسپین تهیه شد.

بررسی نظری

جذب شیمیایی یک فناوری کارآمد برای حذف کربن‌دی‌اکسید از مخلوط گاز است. در برج جذب، محلول آبی پتاسیم هیدروکسید

(۱) Packed column
(۲) Monoclinic
(۳) Ryo Nagumo
(۴) Shamiri

جدول۱: نمونه‌هایی از عملکرد حلال‌های گلیسرول و پتاسیم هیدروکسید برای جذب کربن‌دی‌اکسید

حلال	دما (کلوین)	فشار (کیلوپاسکال)	درصد جذب یا میزان بارگیری کربن‌دی‌اکسید	منبع
گلیسرول	۲۹۸	۱۰۱/۳۲۵	۰/۲۸۸ mol CO_2/mol solvent	[۶]
۳۰ درصد وزنی گلیسرول + ۷۰ درصد وزنی مونواتانول‌آمین	۳۱۳	۱۵۰۰	۰/۸۸ mol CO_2/mol solvent	[۷]
	۳۱۳	۱۰۰۰	۰/۸۳ mol CO_2/mol solvent	
	۳۱۳	۵۰۰	۰/۷۷ mol CO_2/mol solvent	
	۳۲۳	۱۵۰۰	۰/۸۵۵ mol CO_2/mol solvent	
	۳۲۳	۱۰۰۰	۰/۸۱ mol CO_2/mol solvent	
	۳۲۳	۵۰۰	۰/۷۴۵ mol CO_2/mol solvent	
	۳۳۳	۱۵۰۰	۰/۸۰ mol CO_2/mol solvent	
	۳۳۳	۱۰۰۰	۰/۷۵ mol CO_2/mol solvent	
	۳۳۳	۵۰۰	۰/۷۰ mol CO_2/mol solvent	
۴ مولار مونواتانول‌آمین + ۲ مولار گلیسرول	۳۰۳	۱-۱۵	-	[۸]
۴۰ درصد وزنی پتاسیم کربنات + ۱۰ درصد وزنی گلیسرول	۲۹۸	۱۰۱/۳۲۵	-	[۹]
۳۰ درصد وزنی مونواتانول‌آمین + ۱۵ درصد وزنی گلیسرول	۳۱۸	۱۰۱/۳۲۵	۹۴ /۸ درصد	[۱۰]
کولین کلرید + گلیسرول (DES)	۳۴۳	۱۰۱/۳۲۵	۰/۳۳۳ درصد وزنی	[۱۱]
۳۰ درصد وزنی مونواتانول‌آمین + ۵ درصد وزنی گلیسرول	۳۱۳	۵۰۰	۰/۷۷۱	[۱۲]
۳۰ درصد وزنی مونواتانول‌آمین + ۱۰ درصد وزنی گلیسرول	۳۱۳	۵۰۰	۰/۷۷۴	[۱۲]

جدول۲: نمونه‌هایی از عملکرد حلال پتاسیم هیدروکسید برای جذب کربن‌دی‌اکسید

حلال	دما (کلوین)	فشار (کیلوپاسکال)	درصد جذب کربن‌دی‌اکسید	منبع
۵۳ درصد وزنی پتاسیم هیدروکسید	۳۱۸	۱۰۱/۳۲۵	۹۳/۳۳	[۱۳]
۰/۴ درصد وزنی پتاسیم هیدروکسید + ۰/۷۴ درصد وزنی کلسیم هیدروکسید	۳۰۳	۱۰۱/۳۲۵	۹۱/۴۵	[۱۴]
۱۰ درصد وزنی سدیم هیدروکسید	۳۰۳	۱۰۱/۳۲۵	۸۵	[۱۵]

با کربن‌دی‌اکسید موجود در جریان هوا، در فشار جو واکنش می‌دهد. گلیسرول حلالی فیزیکی است و در واکنش شیمیایی حضور ندارد. از واکنش جذب بین پتاسیم هیدروکسید و کربن‌دی‌اکسید، محلول آبی پتاسیم کربنات تولید می‌شود:

$$2KOH + CO_2 \longrightarrow K_2CO_3 + H_2O \qquad (۱)$$

در این واکنش، پتاسیم هیدروکسید اضافی منجر به افزایش تولید پتاسیم کربنات می‌شود، در حالی‌که کربن‌دی‌اکسید بیش‌تر، منجر به واکنش شیمیایی نادلخواه زیر می‌شود:

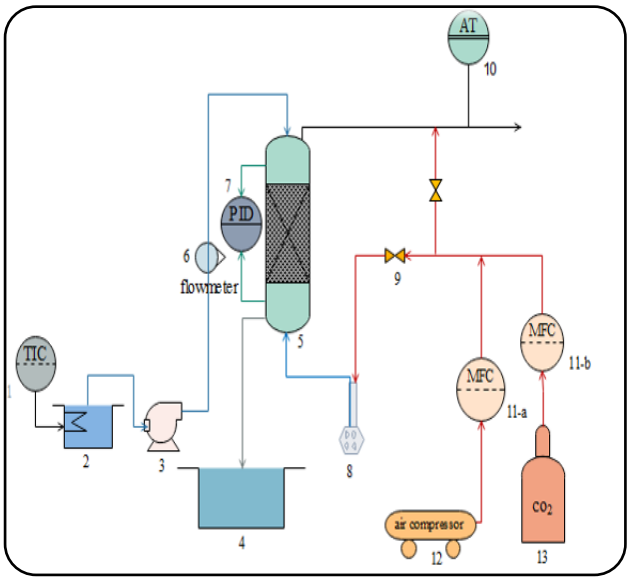
$$K_2CO_3 + CO_2 \longrightarrow 2KHCO_3 \qquad (۲)$$

پتاسیم کربنات محصولی است که در صورت دستیابی با کیفیت مناسب، کاربردهای گوناگونی در صنایع شیمیایی دارد [۱۳].

روش آزمایش

مرسوم‌ترین و مطلوب‌ترین روش جداسازی گازها در صنعت، استفاده از برج‌های جذب می‌باشد. مطابق شکل۱، برج جذب از یک ستون پلکسی گلاس به قطر ۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر تشکیل شده است. ۴۰ سانتی‌متر از طول ستون برج جذب به طور تصادفی با حلقه‌های راشینگ ۶ میلی‌متر پر شده است.

حلال‌های مناسب و مخلوط‌های گازی را در جهت گوناگون عبور می‌دهند که با توجه به حلال‌های مورد استفاده، گاز مورد نظر جدا می‌شود. شکل ۱، نمایی از دستگاه برج جذب مورد استفاده در این پژوهش است. برای انجام آزمایش‌های جذب گاز کربن‌دی‌اکسید، محلول پتاسیم هیدروکسید و گلیسرول مورد نیاز در مخزن خوراک تهیه می‌شود. از یک پمپ برای انتقال مایع جهت ریزش و تماس با گاز استفاده می‌شود. مخلوط گاز کربن‌دی‌اکسید و هوا با غلظت ۱۰ درصد از جریان سنج عبور می‌کند و به درون دستگاه جذب وارد می‌شود.



شکل ۱: طرح‌واره دستگاه برج آکنده جهت جداسازی کربن‌دی‌اکسید. ۱) سنسور دما، ۲) مخزن حلال تازه، ۳) پمپ، ۴) مخزن حلال خروجی از برج، ۵) برج پرکن، ۶) دبی‌سنج مایع، ۷) مرطوب کننده، ۸) مرطوب کننده، ۹) شیر، ۱۰) سنسور گاز کربن‌دی‌اکسید، ۱۱) کنترل کننده دبی جرمی، ۱۲) کمپرسور هوا، ۱۳) سیلندر گازی کربن‌دی‌اکسید.

جذب گاز کربن‌دی‌اکسید توسط ترکیبی از حلال‌های پتاسیم هیدروکسید با غلظت‌های (۰/۲، ۰/۵ و ۰/۸ مولار) و گلیسرول با غلظت‌های (۴، ۸ و ۱۲ درصد وزنی)، در دو جریان گاز ورودی به برج (۱/۷ و ۲/۳ لیتر بر دقیقه) و در دمای ثابت ۳۵ درجه سلسیوس و فشار اتمسفریک در این پژوهش صورت گرفته است. سرانجام غلظت کربن‌دی‌اکسید در گاز خروجی با استفاده از یک سنسور که از طریق جذب نور مادون قرمز در محدوده ۴۳۰ نانومتر کار می‌کند، اندازه‌گیری می‌گردد. در جدول ۳، شرایط عملیاتی برای آزمایش‌های جذب کربن‌دی‌اکسید و نتایج بدست آمده، ارائه شده است.

وسیله‌ها و تجهیزهای آزمایش

از تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش، می‌توان به کنترل کننده جریان مدل GPC Series - BREEZENS ساخت شرکت آپاسکو با دقت fs ۱٪ ± ، پمپ پریستالتیک مدل BT100 ساخت کشور تایوان، حسگر کربن‌دی‌اکسید مدل CM-0123 شرکت کوزیر با دقت اندازه‌گیری کمتر از ۰/۰۱ درصد و کنترلر دما ساخت شرکت به ابزار با دقت اندازه‌گیری °C ۰/۱ ± اشاره کرد.

درصد جذب گاز کربن‌دی‌اکسید (A)

برای تعیین درصد جذب گاز کربن‌دی‌اکسید از رابطه زیر استفاده شده است:

$$A(\%) = \frac{N_{in} - N_{out}}{N_{in}} \times 100 \qquad (۱)$$

در معادله بالا N_{in} تعداد مول‌های گاز کربن‌دی‌اکسید ورودی، N_{out} تعداد مول‌های گاز کربن‌دی‌اکسید خروجی و A درصد جذب گاز کربن‌دی‌اکسید است.

ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز ($K_G a_v$)

کیفیت میزان جذب کربن‌دی‌اکسید توسط حلال ترکیبی پتاسیم هیدروکسید - گلیسرول، با استفاده از ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز اندازه‌گیری می‌شود. در این پژوهش از معادله (۲) برای محاسبه $K_G a_v$ استفاده شده است [۱۷، ۱۶]:

$$K_G a_v = \frac{G}{ZP}\left[ln\left(\frac{Y_{in}}{Y_{out}}\right) + (Y_{in} - Y_{out})\right] \qquad (۲)$$

در معادله (۲)، G سرعت مولی گاز ورودی (kmol/m^2.h)، Z ارتفاع بستر جذب (m)، P فشار برج جذب (kPa)، Y نسبت مولی کربن‌دی‌اکسید در جریان گاز و $K_G a_v$ ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز (kmol/m^3.h.kpa) می‌باشد.

شار انتقال جرم حجمی فاز گاز ($N_A a_v$)

شار انتقال جرم حجمی بیانگر میزان انتقال جرم در واحد حجم برج جذب است و به صورت معادله (۳) ارائه می‌گردد:

$$N_A a_V = \frac{G}{Z}(N_{in} - N_{out}) \qquad (۳)$$

در این معادله، G سرعت مولی گاز ورودی (kmol/m^2.h)، Z ارتفاع بستر جذب (m)، N_{in} و N_{out} به ترتیب تعداد مول‌های گاز کربن‌دی‌اکسید ورودی و خروجی و $N_A a_V$ شار انتقال جرم حجمی فاز گاز (kmol/m^3.h.kpa) است.

نتیجه‌ها و بحث

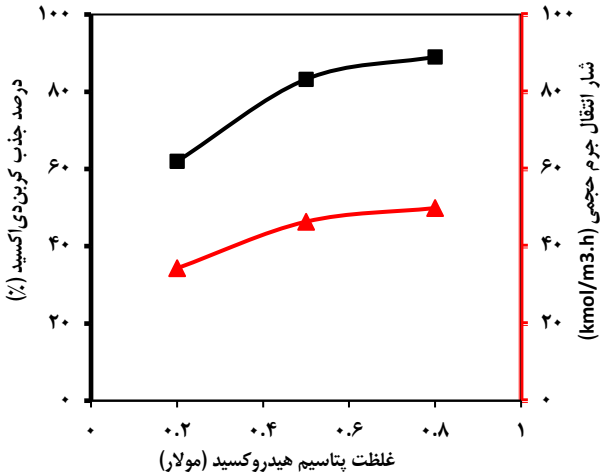
اثر غلظت پتاسیم هیدروکسید بر درصد جذب کربن‌دی‌اکسید و شار انتقال جرم حجمی

اثر غلظت پتاسیم هیدروکسید بر درصد جذب کربن‌دی‌اکسید و شار انتقال جرم حجمی در شکل ۲ نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در دمای ثابت ۳۵ درجه سلسیوس، فشار اتمسفریک، جریان گاز ورودی به برج ۱/۷ لیتر بر دقیقه و غلظت ثابت گلیسرول (۴ درصد وزنی)، با افزایش غلظت پتاسیم هیدروکسید، درصد جذب کربن‌دی‌اکسید افزایش می‌یابد. با افزایش غلظت پتاسیم هیدروکسید

جدول۳: شرایط عملیاتی آزمایش‌های جذب گاز کربن‌دی‌اکسید توسط حلال پتاسیم هیدروکسید – گلیسرول

شماره آزمایش	غلظت مولی پتاسیم هیدروکسید (مولار)	غلظت گلیسرول (درصد وزنی)	شدت جریان گاز ورودی (Qg) (لیتر بر دقیقه)	غلظت گاز کربن‌دی‌اکسید در خروجی(درصد حجمی)	درصد جذب گاز کربن‌دی‌اکسید (٪)	ضریب انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز ($kmol/m^3.h.kpa$)	شار انتقال جرم حجمی ($kmol/m^3.h$)
۱	۰/۲	۴	۱/۷	۳/۶۳	۶۱/۹۵	۰/۴۶	۳۴/۲۸
۲	۰/۲	۴	۲/۳	۶/۲۵	۳۶/۴۲	۰/۳۷	۲۸/۰۹
۳	۰/۲	۸	۱/۷	۳/۱۴	۶۵/۵۳	۰/۴۷	۳۴/۶۳
۴	۰/۲	۸	۲/۳	۵/۱۴	۴۵/۵۵	۰/۴۴	۳۳/۷۴
۵	۰/۲	۱۲	۱/۷	۳/۳	۶۶/۳۳	۰/۵۱	۳۷/۷۰
۶	۰/۲	۱۲	۲/۳	۵/۴۱	۴۶/۹۶	۰/۴۹	۳۷/۵۹
۷	۰/۵	۴	۱/۷	۱/۶۱	۸۳/۲۳	۰/۶۵	۴۶/۳۴
۸	۰/۵	۴	۲/۳	۳/۱۲	۶۸/۸۶	۰/۷۳	۵۴/۱۵
۹	۰/۵	۸	۱/۷	۱/۳	۸۶/۵۰	۰/۶۹	۴۸/۳۱
۱۰	۰/۵	۸	۲/۳	۲/۱۸	۷۸/۴۶	۰/۸۶	۶۲/۳۱
۱۱	۰/۵	۱۲	۱/۷	۱/۱۸	۸۷/۸۳	۰/۷۱	۴۹/۴۲
۱۲	۰/۵	۱۲	۲/۳	۲/۵۹	۷۴/۴۳	۰/۸۱	۵۹/۱۷
۱۳	۰/۸	۴	۱/۷	۱/۰۶	۸۹/۰۳	۰/۷۲	۴۹/۸۸
۱۴	۰/۸	۴	۲/۳	۱/۶	۸۳/۹۰	۰/۹۲	۶۵/۴۵
۱۵	۰/۸	۸	۱/۷	۰/۷۴	۹۲/۳۴	۰/۷۷	۵۱/۷۴
۱۶	۰/۸	۸	۲/۳	۱/۱۸	۸۷/۷۱	۰/۹۵	۶۶/۰۸
۱۷	۰/۸	۱۲	۱/۷	۰/۵۵	۹۴/۲۸	۰/۸۰	۵۲/۶۱
۱۸	۰/۸	۱۲	۲/۳	۱/۳۹	۸۶/۱۱	۰/۹۶	۶۷/۶۵

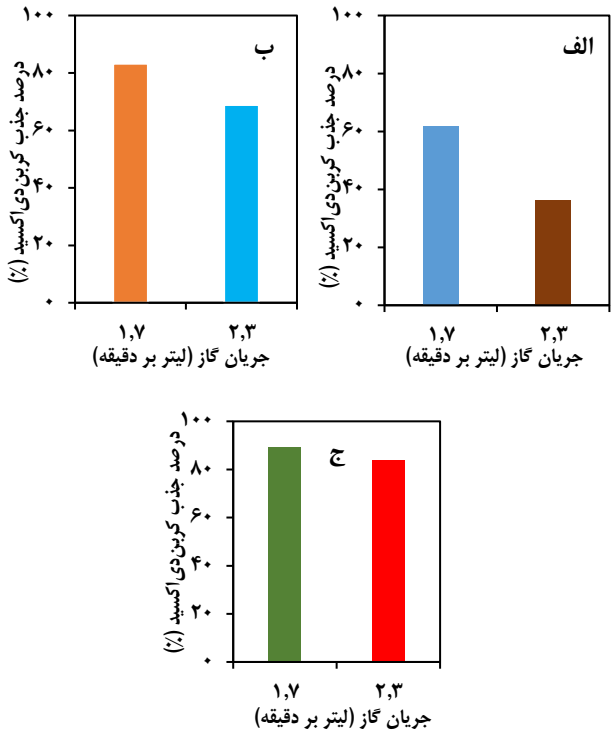
نیرو محرکه لازم واکنش حلال و کربن‌دی‌اکسید توسط پتاسیم هیدروکسید تأمین می‌گردد. به این ترتیب، تعداد سایت‌های فعال برای جذب شیمیایی کربن‌دی‌اکسید با افزایش غلظت پتاسیم هیدروکسید در حلال افزایش می‌یابد و منجر به افزایش درصد جذب کربن‌دی‌اکسید می‌شود. به طوری‌که با افزایش غلظت پتاسیم هیدروکسید از ۰/۲ به ۰/۵ مولار، میزان جذب از ۶۱/۹۵ درصد به ۸۳/۲۳ درصد می‌رسد. در ادامه، با افزایش غلظت پتاسیم هیدروکسید به ۰/۸ مولار، میزان جذب به ۸۹/۰۳ درصد می‌رسد. همچنین با توجه به شکل ۲ با افزایش غلظت پتاسیم هیدروکسید، شار انتقال جرم حجمی افزایش می‌یابد. در فرایند جذب کربن‌دی‌اکسید توسط حلال ترکیبی پتاسیم هیدروکسید ـ گلیسرول، جذب شیمیایی و فیزیکی مطرح است. در این میان جذب شیمیایی توسط پتاسیم هیدروکسید عامل تعیین کننده در فرایند جذب است. بنابراین، افزایش غلظت پتاسیم هیدروکسید در حلال ورودی به برج موجب افزایش جذب شیمیایی و افزایش انتقال جرم بین کربن‌دی‌اکسید و حلال و در نتیجه کاهش میزان کربن‌دی‌اکسید در جریان خروجی از برج می‌شود. طبق رابطه (۳)، کاهش میزان کربن‌دی‌اکسید در جریان خروجی، افزایش شار انتقال جرم حجمی را به همراه دارد.



شکل۲: بررسی درصد جذب کربن‌دی‌اکسید و شار انتقال جرم حجمی در غلظت‌های گوناگون پتاسیم هیدروکسید و غلظت ۴ درصد وزنی گلیسرول و شدت جریان گاز ۱/۷ لیتر بر دقیقه.

اثر شدت جریان گاز ورودی به برج بر درصد جذب کربن‌دی‌اکسید

اثر شدت جریان گاز ورودی به برج بر درصد جذب کربن‌دی‌اکسید در شکل۳ نمایش داده شده است. شکل۳–الف، مقایسه درصد جذب



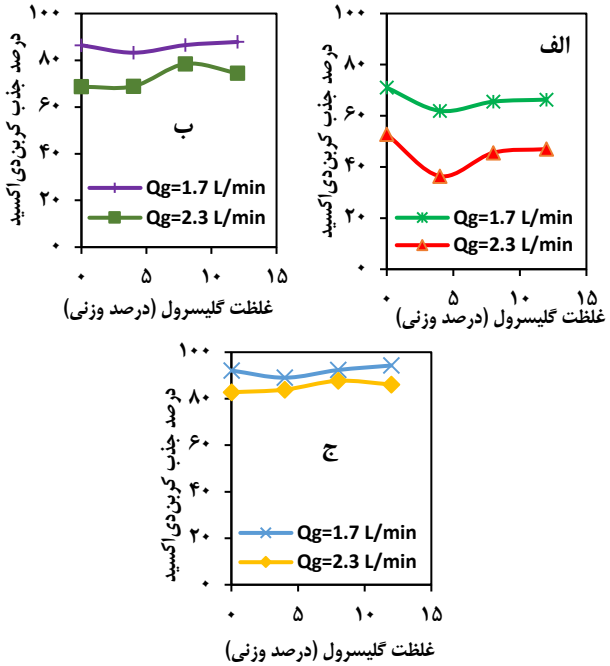
شکل۳: مقایسه درصد جذب کربن‌دی‌اکسید در دو جریان گاز ۱/۷ و ۲/۳ لیتر بر دقیقه و غلظت ۴ درصد وزنی گلیسرول و غلظت پتاسیم هیدروکسید، الف) ۰/۲ مولار ب) ۰/۵ مولار ج) ۰/۸ مولار.

کربن‌دی‌اکسید توسط حلال ترکیبی، در پایین‌ترین غلظت موجود محلول یعنی ۰/۲ مولار پتاسیم هیدروکسید و غلظت ۴ درصد وزنی گلیسرول در جریان‌های گاز ۱/۷ و ۲/۳ لیتر بر دقیقه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود؛ در شدت جریان گاز برابر با ۱/۷ لیتر بر دقیقه، درصد جذب کربن‌دی‌اکسید برابر با ۶۱/۹۵ و در شدت جریان گاز برابر با ۲/۳ لیتر بر دقیقه، ۳۶/۴۲ درصد کربن‌دی‌اکسید جذب شده است. در شکل۳–ب، در غلظت ۰/۵ مولار پتاسیم هیدروکسید نیز مشاهده می‌شود که با افزایش جریان گاز از ۱/۷ لیتر بر دقیقه به ۲/۳ لیتر بر دقیقه، جذب کربن‌دی‌اکسید از ۸۳/۲۳ درصد به ۶۸/۸۶ درصد کاهش می‌یابد. همین روند در شکل۳– ج نیز دیده می‌شود. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت هر چقدر میزان جریان گاز ورودی به برج کم شود زمان اقامت فاز گاز افزایش یافته و انتقال جرم بین این دو فاز به خوبی صورت می‌گیرد و گاز کربن‌دی‌اکسید بیشتری جذب می‌شود. نکته قابل توجه دیگر در شکل ۳، تأثیر غلظت پتاسیم هیدروکسید می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش غلظت پتاسیم هیدروکسید، اثر تغییر جریان گاز بر میزان جذب کاهش می‌یابد به طوریکه در غلظت ۰/۸ مولار پتاسیم هیدوکسید، با افزایش جریان گاز، درصد جذب تنها ۵ درصد کاهش می‌یابد. باتوجه به این امر می‌توان نتیجه گرفت که غلظت پتاسیم هیدروکسید عامل تأثیرگذارتری بر درصد جذب کربن‌دی‌اکسید است به‌طوری‌که در غلظت‌های بالای پتاسیم هیدروکسید تأثیر جریان گاز ضعیف می‌شود.

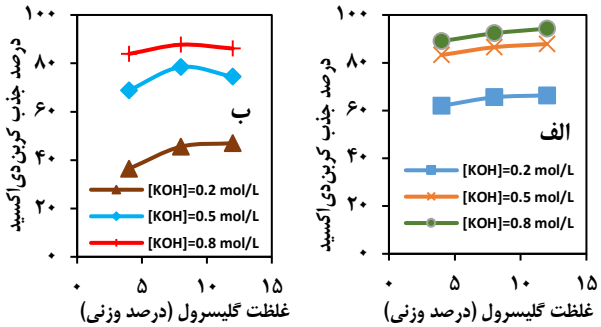
اثر غلظت گلیسرول بر درصد جذب کربن‌دی‌اکسید

از دیگر پارامترهای موثر بر درصد جذب کربن‌دی‌اکسید، غلظت گلیسرول است. در شکل ۴، اثر غلظت گلیسرول بر میزان جذب در غلظت‌های گوناگون پتاسیم هیدروکسید (۲/۸–۰/۰ مولار) و در جریان گوناگون گاز نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۴–الف می‌توان نتیجه گرفت که در غلظت ۰/۲ مولار پتاسیم هیدروکسید با افزایش غلظت گلیسرول، درصد جذب کربن‌دی‌اکسید افزایش می‌یابد. دلیل این امر بهبود جذب فیزیکی حلال با افزایش غلظت گلیسرول می‌باشد. در شکل‌های (۴–ب و ۴–ج) در شدت جریان گاز ورودی ۲/۳ لیتر بر دقیقه، در غلظت‌های ۰/۵ و ۰/۸ مولار پتاسیم هیدروکسید، افزایش غلظت گلیسرول تا ۸ درصد وزنی اثر مثبت داشته و درصد جذب کربن‌دی‌اکسید افزایش می‌یابد. اما غلظت گلیسرول از ۸ تا ۱۲درصد وزنی، اثر منفی بر جذب کرین‌دی‌اکسید داشته و موجب کاهش درصد جذب کربن‌دی‌اکسید می‌شود. برای توجیه این پدیده می‌توان گفت که بالا بودن گرانروی گلیسرول نسبت به آب سبب می‌شود با افزایش غلظت گلیسرول، گرانروی محلول افزایش یابد. بالا بودن گرانروی محلول موجب کاهش ضریب نفوذ و پیرو آن کاهش ضریب انتقال جرم می‌گردد. سرانجام، این پدیده سبب کاهش میزان جذب گاز کربن‌دی‌اکسید در محلول شده و بارگیری کربن‌دی‌اکسید در محلول خروجی کم می‌شود [۱۸]. همان‌گونه که از شکل ۴–الف مشخص است با افزایش غلظت گلیسرول، در غلظت ثابت ۰/۲ مولار پتاسیم هیدروکسید، درصد جذب کربن‌دی‌اکسید افزایش می‌یابد. اما این افزایش برای جریان گاز ۲/۳ لیتر بر دقیقه دو برابر بیشتر از ۱/۷ لیتر بر دقیقه می‌باشد. این امر می‌تواند به دلیل درهمی بیشتر در جریان‌های بالاتر گاز باشد که منجر به کاهش ضخامت لایه فیلم و افزایش نرخ انتقال جرم می‌شود.

در شکل ۵، اثر غلظت گلیسرول بر جذب کربن‌دی‌اکسید در غلظت‌های گوناگون پتاسیم هیدروکسید و جریان‌های گوناگون نمایش داده شده است. با توجه به شکل، می‌توان نتیجه گرفت حداکثر درصد جذب کربن‌دی‌اکسید (۹۴/۲۸٪) همانند شکل ۴، در غلظت‌های (۰/۸ مولار پتاسیم هیدروکسید و ۱۲درصد وزنی گلیسرول) و شدت جریان گاز ۱/۷ لیتر بر دقیقه است.



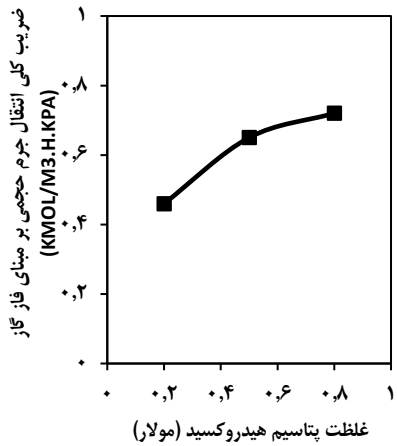
شکل۴: بررسی اثر غلظت گلیسرول بر درصد جذب کربن‌دی‌اکسید در شدت جریان‌های گازی ۱/۷ و ۲/۳ لیتر بر دقیقه و غلظت‌های پتاسیم هیدروکسید (الف) ۰/۲ مولار ب) ۰/۵ مولار ج) ۰/۸ مولار.



شکل۵: بررسی اثر غلظت گلیسرول بر جذب کربن‌دی‌اکسید در غلظت‌های گوناگون پتاسیم هیدروکسید (الف) شدت جریان گاز ورودی ۱/۷ لیتر بر دقیقه (ب) شدت جریان گاز ورودی ۲/۳ لیتر بر دقیقه.

اثر غلظت پتاسیم هیدروکسید بر ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز

اثر غلظت پتاسیم هیدروکسید بر ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز در شکل۶ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل پیداست با افزایش غلظت پتاسیم هیدروکسید از ۰/۲ مولار تا ۰/۸ مولار ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز افزایش یافته است. بدیهی است اگر مولکول پتاسیم هیدروکسید بیش‌تری برای تماس با کربن‌دی‌اکسید در سطح گاز مایع وجود داشته باشد،



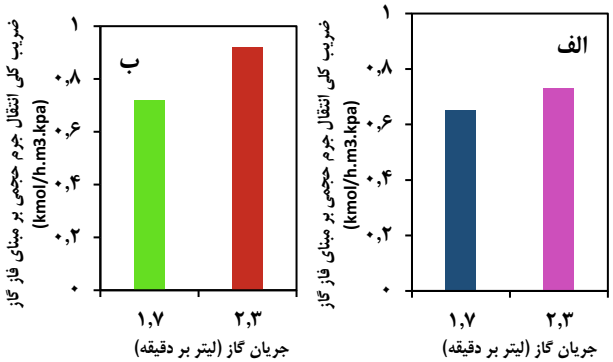
شکل۶: بررسی ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز در غلظت‌های گوناگون پتاسیم هیدروکسید و غلظت ۴ درصد وزنی گلیسرول و شدت جریان گاز ۱/۷ لیتر بر دقیقه

واکنش پتاسیم هیدروکسید و کربن‌دی‌اکسید بیشتری در برج جذب صورت خواهد گرفت و راندمان جذب شیمیایی بالاتری حاصل می‌شود. در نتیجه ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز افزایش می‌یابد. با افزایش غلظت پتاسیم هیدروکسید از ۰/۲ مولار به ۰/۸ مولار در شدت جریان گاز ۱/۷ لیتر بر دقیقه، میزان ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز از ۰/۴۶ $kmol/m^3.h.kpa$ به ۰/۷۲ $kmol/m^3.h.kpa$ افزایش یافته است. می‌توان گفت با افزایش غلظت پتاسیم هیدروکسید، ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز بطور کلی روند افزایشی داشته و ۵۶/۵۲ درصد افزایش یافته است.

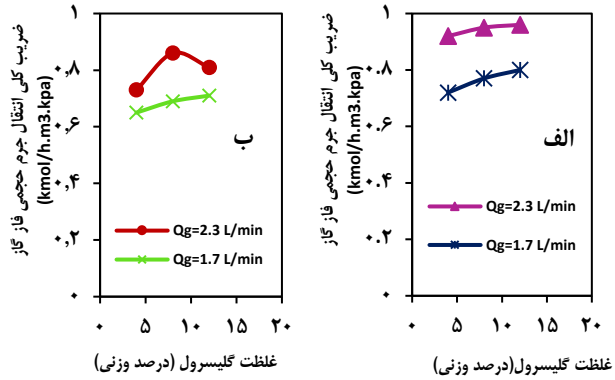
ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز برای جذب کربن‌دی‌اکسید با استفاده از حلال شیمیایی سدیم هیدروکسید بطور تقریبی برابر با ۰/۶۴ — ۰/۱۶ $kmol/m^3.h.kpa$ گزارش شده است [۱۹]. این در حالی است که ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز برای حلال ترکیبی پتاسیم هیدروکسید- گلیسرول برابر ۰/۹۶ — ۰/۳۷ $kmol/m^3.h.kpa$ است که بطور تقریبی ۶۷ — ۴۳ درصد بیشتر است. این مقایسه بیانگر عملکرد مثبت حلال ترکیبی پتاسیم هیدروکسید ـ گلیسرول در جذب کربن‌دی‌اکسید است.

اثر جریان گاز ورودی برج بر ضریب کلی انتقال جرم حجمی فاز گاز

اثر جریان گاز ورودی به برج بر ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز در شکل ۷ بررسی شده است. افزایش شدت جریان گاز ورودی برج موجب افزایش ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز می‌شود. افزایش شدت جریان گاز ورودی باعث



شکل۷: مقایسه ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز در دو جریان گاز ۱/۷ و ۲/۳ لیتر بر دقیقه، غلظت ۴ درصد وزنی گلیسرول و غلظت پتاسیم هیدروکسید، الف) ۰/۵ مولار ب) ۰/۸ مولار.



شکل۸: بررسی ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز با افزایش غلظت گلیسرول در دو جریان گازی ۱/۷ و ۲/۳ لیتر بر دقیقه و غلظت پتاسیم هیدروکسید، الف) ۰/۵ مولار ب) ۰/۸ مولار.

بالارفتن سرعت گاز در برج شده که این خود افزایش ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز را موجب می‌شود. همچنین با افزایش شدت جریان گاز، تعداد مول‌های بیشتری از کربن‌دی‌اکسید در واحد زمان وارد برج شده که تعداد مول‌های کربن‌دی‌اکسید در دسترس برای جذب توسط حلال را افزایش می‌دهد [۲۰]. از طرفی باتوجه به تعریف ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز در رابطه‌ی (۲)، مشاهده می‌گردد افزایش جریان گاز ورودی به طور مستقیم موجب افزایش مقدار ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز می‌شود. با توجه به شکل ۷–ب بیشترین مقدار ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز در غلظت ثابت ۴ درصد وزنی گلیسرول، در غلظت ۰/۸ مولار پتاسیم هیدروکسید و در شدت جریان گاز برابر با ۲/۳ لیتر بر دقیقه، برابر با ۰/۹۲ kmol/m^3.h.kpa است که در این حالت اثر تغییر جریان گاز بر ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز باعث افزایش ۰/۲ kmol/m^3.h.kpa شده است. به عبارت دیگر در این حالت تغییر شدت جریان گاز بر ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز ۲۷/۷۷ درصد تأثیر مثبت داشته است که این وضعیت در شکل ۷–الف، ۱۲/۳ درصد است. نکته مهم دیگر که می‌توان به آن اشاره کرد اثر غلظت پتاسیم هیدروکسید بر ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز است که اثر آن بیشتر از اثر تغییر جریان گاز است. با افزایش غلظت پتاسیم هیدروکسید از ۰/۵ مولار تا ۰/۸ مولار در شدت جریان ۲/۳ لیتر بر دقیقه، ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز بیش از ۲۷ درصد افزایش می‌یابد.

اثر غلظت گلیسرول بر ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز

آخرین پارامتر موثر بر ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز، غلظت گلیسرول است. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، افزودن گلیسرول به محلول آبی پتاسیم هیدروکسید، با افزایش ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز همراه است. حداکثر میزان ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز در شدت جریان ۲/۳ لیتر بر دقیقه و غلظت‌های ۰/۸ مولار پتاسیم هیدروکسید و ۱۲ درصد وزنی گلیسرول برابر با ۰/۹۶ kmol/m^3.h.kpa است. در شکل ۸–الف در شدت جریان گاز ورودی ۲/۳ لیتر بر دقیقه، در غلظت ۰/۵ مولار پتاسیم هیدروکسید، افزایش غلظت گلیسرول تا ۸ درصد وزنی اثر مثبت داشته و ۱۷/۸ درصد ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز افزایش می‌یابد. ولی غلظت گلیسرول از ۸ تا ۱۲ درصد وزنی، اثر منفی بر ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز داشته و ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز با کاهش ۶/۱۷ درصدی مواجه می‌شود. برای توجیه این پدیده می‌توان به بالا بودن گرانروی گلیسرول نسبت به آب اشاره کرد؛ با افزایش غلظت گلیسرول، گرانروی محلول افزایش می‌یابد. بالا بودن گرانروی محلول موجب کاهش ضریب نفوذ در مایع، کاهش ضریب انتقال جرم فاز مایع و در ادامه کاهش ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز را در پی دارد. همانطور که از شکل ۸–ب مشخص است با افزایش غلظت گلیسرول در غلظت ثابت ۰/۸ مولار پتاسیم هیدروکسید، ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز در شدت جریان گاز ۱/۷ لیتر بر دقیقه ۱۱ درصد و در شدت جریان گاز ۲/۳ لیتر بر دقیقه ۴ درصد افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، جذب گاز کربن‌دی‌اکسید توسط حلال ترکیبی پتاسیم هیدروکسید ـ گلیسرول در مقیاس آزمایشگاهی در یک برج پرشده بررسی شده است. آزمایش‌های گوناگونی برای بررسی

اثر شدت جریان و غلظت‌های گوناگونی از حلال‌های پتاسیم هیدروکسید و گلیسرول طراحی شد که درصد جذب گاز کربن‌دی‌اکسید و ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز از نتیجه‌های آن‌ها به‌دست آمده است. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت؛ افزایش غلظت‌های پتاسیم هیدروکسید و گلیسرول باعث افزایش درصد جذب کربن‌دی‌اکسید و ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز می‌شود ولی افزایش غلظت حلال پتاسیم هیدروکسید نسبت به غلظت گلیسرول تأثیر بیشتری بر جذب گاز کربن‌دی‌اکسید و ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز دارد. حداکثر درصد جذب کربن‌دی‌اکسید در غلظت ۱۲ درصد وزنی گلیسرول و ۰/۸ مولار پتاسیم هیدروکسید با جریان ۱/۷ لیتر بر دقیقه، برابر با ۹۴/۲۸ درصد است. همچنین حداکثر میزان ضریب کلی انتقال جرم حجمی بر مبنای فاز گاز در شرایط حاکم، در غلظت‌های بیشینه ۰/۸ مولار پتاسیم هیدروکسید و ۱۲ درصد وزنی گلیسرول و شدت جریان گاز ورودی ۲/۳ لیتر بر دقیقه، ۰/۹۶ $kmol/m^3.h.kpa$ است.

استفاده از حلال ترکیبی پتاسیم هیدروکسید ـ گلیسرول در جذب کربن‌دی‌اکسید، علاوه بر افزایش میزان جذب و انتقال جرم بالای کربن‌دی‌اکسید، از لحاظ هزینه نیز با توجه به تجدیدپذیر بودن، نسبت به دیگر حلال‌ها، اقتصادی‌تر است. همین امر، سبب می‌شود نگرانی‌های امروزه پیرامون فرایند جذب و جداسازی کربن‌دی‌اکسید و محیط زیست تا حدودی برطرف گردد.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۲۷ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۲۷

منابع

[1] Metz, Bert, et al. "Carbon Dioxide Capture and Storage. Summary for Policymakers." (2005).

[2] Mumford, Kathryn A., et al. "Review of Solvent Based Carbon-Dioxide Capture Technologies." *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, **9(2):** 125-141 (2015).

[3] Aschenbrenner, Ortrud, and Peter Styring. "Comparative Study of Solvent Properties for Carbon Dioxide Absorption." *Energy & Environmental Science*, **3(8):** 1106-1113 (2010).

[4] Mota-Martinez, Maria T., Jason Hallett, Niall Mac Dowell. "Screening Solvents Properties for CO_2 Capture Based on the Process Performance." *Energy Procedia*, **114:** 1551-1557 (2017).

[۵] مریم اسدی، حسین ابوالقاسمی، جذب دی‌اکسید کربن توسط محلول آبی هیدروکسید سدیم در ستون پرشده: ضریب انتقال جرم و میزان جذب، *نشریه مهندسی شیمی ایران*، دوره یازدهم، شماره شصت و دوم ۲۷-۳۳ (۱۳۹۱).

[6] Nagumo, Ryo, et al. "Molecular Dynamics Simulations for Systematic Prediction of the CO_2 Solubility of Physical Absorbents." *Journal of Chemical Engineering of Japan*, **49(1):** 1-5 (2016).

[7] Babamohammadi, Shervan, Ahmad Shamiri, Mohamed Kheireddine Aroua. "A Review of CO_2 Capture by Absorption in Ionic Liquid-Based Solvents." *Reviews in Chemical Engineering*, **31(4):** 383-412 (2015).

[8] Babamohammadi, Shervan, et al. "Solubility of CO_2 in Aqueous Solutions of Glycerol and Monoethanolamine." *Journal of Molecular Liquids*, **249:** 40-52 (2018).

[9] Smith, Kathryn, et al. "Pilot Plant Results for a Precipitating Potassium Carbonate Solvent Absorption Process Promoted with Glycine for Enhanced CO_2 Capture." *Fuel Processing Technology*, **135:** 60-65 (2015).

[10] Valeh-e-Sheyda, Peyvand, Javad Barati. "Mass Transfer Performance of Carbon Dioxide Absorption in a Packed Column Using Monoethanoleamine-Glycerol as a Hybrid Solvent." *Process Safety and Environmental Protection* **146:** 54-68 (2021).

[11] Alok, R., et al. "CO_2 Capture Using Crude Glycerol-Derived Deep Eutectic Solvents." *Advances in Energy Research*, Springer, Singapore, **2:** 735-743(2020).

[12] Shamiri, A., et al. "Absorption of CO_2 into Aqueous Mixtures of Glycerol and Monoethanolamine." *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **35:** 605-613 (2016).

[13] Lombardia, L, et al. "Carbon Dioxide Removal and Capture for Landfill Gas Up-Grading." *Energy Procedia*, **4:** 465-472 (2011).

[14] Tippayawong, N., Thanompongchart, P., "Biogas Quality Upgrade by Simultaneous Removal of CO_2 and H_2S in a Packed Column Reactor." *Energy*, **35(12):** 4531-4535 (2010).

[15] Zhao, Q., et al. "Purification Technologies for Biogas Generated by Anaerobic Digestion." *Compressed Biomethane, CSANR, Ed*, **24:** (2010).

[16] Dey, Anindo, Adisorn Aroonwilas. "CO_2 Absorption into MEA-AMP Blend: Mass Transfer and Absorber Height Index." *Energy Procedia*, **1(1):** 211-215 (2009).

[17] Sema, Teerawat, et al. "Mass Transfer of CO_2 Absorption in Hybrid MEA-Methanol Solvents in Packed Column." *Energy Procedia*, **37:** 883-889 (2013).

[18] Rashidi, H, Valeh-e-Sheyda, P., Sahraie, S., "A Multiobjective Experimental Based Optimization to the CO_2 Capture Process Using Hybrid Solvents of MEA-MeOH and MEA-Water." *Energy*, **190:** 116430 (2020).

[19] Baciocchi, Renato, Giuseppe Storti, Marco Mazzotti. "Process Design and Energy Requirements for the Capture of Carbon Dioxide from Air." *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, **45(12):** 1047-1058 (2006).

[۲۰] ساسان صحرایی، حامد رشیدی، بررسی اثر متغیرهای عملیاتی و بهینه‌سازی فرایند جذب کربن‌دی‌اکسید از گاز حاصل از احتراق توسط دی‌اتانول‌آمین با استفاده از روش پاسخ- سطح، *نشریه علوم و مهندسی جداسازی*، **۱۱(۱):** ۲۶-۴۰ (۱۳۹۸).