

مطالعه تجربی جذب کربن دی اکسید با استفاده از محلول آبی پتاسیم هیدروکسید

زهرا رستگار، احد قائمی*⁺، منصور شیروانی

دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده: فناوری جذب شیمیایی به طور گسترده در صنعت، برای حذف کربن دی اکسید از گاز احتراق و همچنین شیرین سازی گاز طبیعی مورد استفاده قرار می گیرد. برای رشد این روش، توسعه و شناسایی جاذب های بهینه به منظور جذب بیش تر و کاهش انرژی جذب، لازم می باشد. محلول های آبی هیدروکسید های فلز های قلیایی به دلیل نیاز به انرژی پایین و سازگاریشان با محیط زیست در مقایسه با جاذب های آمینی، مورد توجه پژوهشگران قرار دارند. در این پژوهش از پتاسیم هیدروکسید برای جذب کربن دی اکسید استفاده شده است. در آزمایش های جذب تأثیر دور همزن و دما بر روی میزان جذب کربن دی اکسید توسط محلول آبی پتاسیم هیدروکسید در یک راکتور همزن دار مورد مطالعه قرار گرفت. نتیجه ها نشان داد که با افزایش دور همزن از ۵۰rpm تا ۱۵۰rpm میزان بارگیری، درصد جذب و شار انتقال جرم کربن دی اکسید به ترتیب ۳۳٪، ۳۲٪ و ۳۶٪ افزایش می یابند ولی افزایش دور همزن بیش از این مقدار تأثیری بر میزان جذب نخواهد داشت. افزایش دما نیز در بازه ۲۲-۶۵°C با فشار ۶ بار، غلظت ۱/۲ مول بر لیتر و دور همزن ۱۵۰rpm انجام شد و دیده شد که افزایش دما تا نیمه های فرایند جذب باعث افزایش بارگیری، درصد جذب و شار جذب کربن دی اکسید شد ولی میزان تعادلی این پارامترها با افزایش دما به میزان کمی کاهش یافت. در واقع با افزایش دما از ۲۲°C به ۶۵°C میزان بارگیری، درصد جذب و شار انتقال جرم تعادلی به ترتیب ۱۵٪، ۴/۲٪ و ۱۳٪ کاهش یافتند.

واژه های کلیدی: جذب شیمیایی؛ کربن دی اکسید؛ پتاسیم هیدروکسید؛ دور همزن؛ دما.

KEYWORDS: Chemical absorption; Carbon dioxide; Potassium hydroxide; Stirrer speed; Temperature.

مقدمه

رویکردهای بسیاری ارایه شده اند. سیاست های کلی موجود برای کاهش انتشار کربن دی اکسید شامل کاهش مصرف انرژی، جایگزینی سوخت های فسیلی و جداسازی گاز کربن دی اکسید و جلوگیری از ورود آن به جو می باشد که به دلیل ارزان بودن سوخت های فسیلی و توسعه یافته بودن فرایند تولید انرژی با استفاده از این سوخت ها، سیاست جداسازی کربن دی اکسید بیش ترین

گاز کربن دی اکسید یکی از مهم ترین گاز های گلخانه ای است و به طور عمده در زمان احتراق سوخت های فسیلی آزاد می شود. افزایش نگرانی های زیست محیطی در رابطه با گرمایش جهانی و تغییر های آب و هوایی، تلاش جهانی را برای ثابت ساختن غلظت کربن دی اکسید در جو و کاهش انتشار بدون محدودیت گاز های گلخانه ای به اتمسفر بهبود داده است. برای مقابله با این مسئله

*عده دار مکاتبات

+E-mail: aghaemi@iust.ac.ir

زیست توده، ممکن است حلال‌های سنتی آمینی بهترین انتخاب برای جذب کربن‌دی‌اکسید موجود در گاز دودکش به دست آمده از این فرایند نباشند [۱۷]. از آغاز قرن بیستم میلادی، حلال‌های هیدروکسیدی به‌ویژه لیتیم هیدروکسید، پتاسیم و سدیم هیدروکسید به‌عنوان جاذب کربن‌دی‌اکسید مورد مطالعه قرار گرفته‌اند و برای چندین کاربرد نیز استفاده شده‌اند. ولی در طول دو دهه‌ی اخیر، به‌علت افزایش نگرانی‌های زیست محیطی و سخت‌گیری‌ها در مورد انتشار گاز کربن‌دی‌اکسید از نیروگاه‌ها و انرژی بالای مورد نیاز برای احیای حلال‌های آمینی، مشکل‌های محیط زیستی ناشی از تخریب گرمایی آمین‌ها و دیگر عامل‌های اقتصادی و اجتماعی، جاذب‌های هیدروکسیدی دوباره مورد توجه قرار گرفته‌اند و به تازگی پژوهش‌های زیادی روی این محلول‌ها با هدف کاهش مقدار کربن‌دی‌اکسید انجام شده‌است [۱۸]. سامانه‌های مبتنی بر لیتیم هیدروکسید از اولین روزهای اکتشاف‌های فضایی برای پشتیبانی از زندگی مورد استفاده قرار گرفته‌اند و همچنین در زیردریایی‌ها برای کنترل سطح کربن‌دی‌اکسید در موارد اضطراری به کار برده شده‌اند [۱۹، ۲۰]. فناوری جداسازی مستقیم کربن‌دی‌اکسید از هوای محیط شامل جذب شیمیایی توسط جاذب‌هایی مانند سدیم هیدروکسید، پتاسیم هیدروکسید و سدیم کربنات، پتاسیم کربنات و کلسیم هیدروکسید می‌باشد [۲۱-۲۴]. طی مطالعه‌ای که توسط گومز^(۴) و همکاران در سال ۲۰۱۵ میلادی روی تعدادی از محلول‌های آبی آمینی (دی‌اتیل آمین، مونواتانول آمین، پپرازین، اتیلن دی‌آمین، متیل دی‌اتانول آمین و دی‌اتانول آمین) انجام شد، دی‌اتانول آمین مؤثرترین آمین در بین این آمین‌ها از لحاظ بارگیری بالاتر کربن‌دی‌اکسید و اقتصادی بودن مشخص شد [۲۵]؛ ولی ظرفیت جذب این آمین نیز از محلول آبی سدیم هیدروکسید پایین‌تر است. ضمن آن‌که سدیم هیدروکسید ماده‌ی در دسترس‌تر و ارزان‌تری نسبت به حلال‌های آمینی می‌باشد [۲۶].

مطالعه‌های محدودی در مورد بررسی تأثیر دما روی راندمان جذب توسط این جاذب‌ها انجام شده‌است ولی سینتیک جذب و تأثیر دما روی سینتیک جذب از آغاز قرن بیستم بارها مورد مطالعه قرار گرفته‌است. در سال ۱۹۳۰ تأثیر دما بر جذب کربن‌دی‌اکسید با سدیم و پتاسیم هیدروکسید یک نرمال در سه دمای ۱۱، ۱۸، ۲۵ درجه سلسیوس توسط ماساکی^(۵) در یک لوله‌ی ماریچ انجام شد و

اهمیت را دارد [۱]. روش‌های جداسازی و ذخیره‌سازی کربن‌دی‌اکسید^(۱) (CCS)، به دلیل داشتن توانایی کاهش انتشار کربن‌دی‌اکسید از نیروگاه‌ها تا حدود ۹۰٪-۸۵٪، راهی امیدوارکننده به‌نظر می‌رسند [۶ - ۲]. شایان ذکر است که با وجود اصرار بر استفاده از سوخت‌های فسیلی، برای دستیابی به هدف کاهش گرمایش جهانی به مقدار یک درجه سلسیوس که با توجه به بررسی‌های گروه بین‌المللی تغییرهای آب و هوایی^(۲) (IPCC) برای جلوگیری از آب شدن یخ‌ها و از بین رفتن گونه‌ها لازم می‌باشد، جایگزینی سوخت‌های فسیلی و استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر ضروری می‌نماید. به‌همین دلیل امروزه، استفاده از سوخت‌های جایگزین مانند زیست‌توده، همراه با جداسازی و ذخیره‌سازی کربن‌دی‌اکسید، برای کاهش گرمایش زمین مورد توجه زیادی قرار گرفته است و اقدام‌های سیاسی به‌منظور افزایش استفاده از زیست توده در سراسر جهان در حال انجام است [۸، ۷]. با توجه به مطالعه‌های انجام شده، استفاده از انرژی زیست توده به‌همراه جداسازی و ذخیره‌سازی کربن^(۳) (BECCS) می‌تواند به‌طور چشمگیری امکان دستیابی به غلظت‌های پایین کربن‌دی‌اکسید در جو (کربن‌دی‌اکسید در حدود ۳۵۰ ppm) را افزایش دهد [۹]. در بین فرایندهای جداسازی و ذخیره‌سازی کربن، جذب پس‌احتراقی کربن‌دی‌اکسید در حال حاضر بالغ‌ترین و کامل‌ترین فرایند می‌باشد [۱۱، ۱۰]. این فناوری به‌علت راندمان بالا، مصرف انرژی پایین، دوست‌دار محیط زیست بودن و دیگر برتری‌های آن به‌صورت گسترده‌ای در حذف کربن‌دی‌اکسید مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۲]. اما از آنجایی که هزینه‌ی جداسازی کربن‌دی‌اکسید در مقیاس‌های بزرگ یک عامل محدودکننده می‌باشد؛ کاهش هزینه‌ی فرایند جداسازی کربن‌دی‌اکسید با بهبود فرایند و حلال، اولویت اصلی فرایند جذب کربن‌دی‌اکسید می‌باشد [۱۴، ۱۳]. بنابراین با وجود این‌که حلال‌های پایه آمینی در مقیاس صنعتی به‌طور گسترده استفاده می‌شوند، ولی به دلیل محدودیت‌هایشان، مانند انرژی زیاد مورد نیاز برای احیای حلال، پتانسیل تخریب حلال، خوردگی تجهیزات و تبخیر و وارد شدن این آمین‌ها به محیط که می‌تواند برای محیط‌زیست مضر باشد [۱۶، ۱۵]؛ معرفی حلالی با عیب‌های کم‌تر می‌تواند بسیار کارساز باشد. به‌خصوص که با وجود رویکرد نوین به استفاده از سوخت‌های زیست‌توده و به‌علت ترکیب و غلظت متفاوت گاز دودکش به دست آمده از سوختن

(۱) Carbon Capture and Storage

(۲) The Intergovernmental Panel on Climate Change

(۳) Biomass Energy with Carbon Capture and Storage

(۴) Gomez

(۵) Masaki

آمینی برای جذب کربن دی اکسید، محلول‌های هیدروکسیدی به‌عنوان جاذب کربن دی اکسید پیشنهاد می‌شود. شایان ذکر است که این حلال‌ها می‌توانند جایگزین مناسبی برای حلال‌های آمینی در فرایند شیرین سازی گاز طبیعی نیز باشند و با توجه به عیب‌های بیان شده برای حلال‌های آمینی مرسوم، افزون بر استفاده از حلال‌های هیدروکسیدی در جذب پس از احتراق کربن دی اکسید از گاز دودکش، می‌توان از برتری‌های استفاده از این حلال‌ها در فرایندهای شیرین سازی گاز طبیعی نیز بهره برد. در نتیجه در این مطالعه پتاسیم هیدروکسید که با توجه به مطالعه گوندال و همکاران ضریب انتقال جرم کلی در فاز گاز و ثابت سرعت واکنش کربن دی اکسید با یون هیدروکسید بالاتری نسبت به سدیم هیدروکسید و هیدروکسید لیتیم دارد به عنوان جاذب انتخاب شده و تأثیر پارامترهای عملیاتی بر روی میزان جذب کربن دی اکسید توسط این جاذب بررسی شده‌است.

واکنش‌های جذب کربن دی اکسید توسط محلول آبی پتاسیم هیدروکسید

پتاسیم هیدروکسید به دلیل خاصیت قلیائی بالا در آب به‌طور کامل حل شده و به یون‌های K^+ و OH^- تبدیل می‌شود. همان‌گونه که در ادامه بیان خواهد شد هیدروکسیدهای فلزهای قلیایی، در واکنش‌های جذب از طریق یون‌های OH^- شان حضور دارند و واکنش‌های جذب این حلال‌ها با یک‌دیگر تفاوتی ندارد. جدا از حل شدن فیزیکی کربن دی اکسید در محلول آبی که دارای سرعت بالایی است [۳۱]، سایر واکنش‌هایی که در جذب شیمیایی کربن دی اکسید در محلول‌های آبی هیدروکسیدهای قلیایی اتفاق می‌افتد در شکل ۱ قابل دیدن است. همان‌گونه که دیده می‌شود برای واکنش اول دو مسیر در شکل وجود دارد که به ترتیب به واکنش کربن دی اکسید حل شده با یون‌های هیدروکسید و مولکول‌های آب مربوط می‌شود. هر دو مسیر به تشکیل یون‌های بی کربنات منجر می‌شود که در واکنش بعدی به یون‌های کربنات تبدیل می‌شوند. شایان ذکر است که واکنش هیدراسیون در شاخه‌ی دوم می‌تواند به‌طور مستقیم پیش رود یا منجر به تشکیل کربنیک اسید شود. ولی از آن‌جا که نه لازم است و نه ممکن است که بین این دو امکان تمایزی قائل شد، مرسوم است که آن‌ها را مطابق شکل به یک واکنش کلی ساده کرد [۳۲].

نتیجه‌های به‌دست آمده نشان داد که سرعت جذب با افزایش دما افزایش می‌یابد و همچنین در دمای ۱۱ درجه سلسیوس، سدیم هیدروکسید به مقدار کمی کربن دی اکسید را سریع‌تر از پتاسیم هیدروکسید جذب کرد و در دو دمای دیگر جذب توسط پتاسیم هیدروکسید سریع‌تر بوده و با افزایش دما این تفاوت بیش‌تر شد [۲۷].

در سال ۱۹۹۸ میلادی حلالیت کربن دی اکسید در حلال‌های آبی شامل استیک اسید یا سدیم هیدروکسید در بازه‌ی دمای ۳۱۳-۴۳۳ کلین، فشار کلی تا ۱۰ MPa و مولالیت‌های سدیم هیدروکسید ۱ kg/mol توسط برند رامپف^(۱) و همکاران مورد مطالعه قرار گرفت و نتیجه‌ها نشان‌دهنده‌ی آن بود که حلالیت کربن دی اکسید در محلول سدیم هیدروکسید با افزایش دما در بازه‌ی بیان شده کاهش می‌یابد [۲۸]. در سال ۲۰۱۱ میلادی نیز بین چنگ^(۲) و همکاران در یک ستون پاششی جذب کربن دی اکسید توسط سدیم هیدروکسید و محلول آمونیاک را مطالعه کردند و تأثیر پارامترهای گوناگون را بر روی جذب مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه دیده شد که با افزایش دما در بازه‌ی ۵۴-۲۸ درجه سلسیوس راندمان جذب افزایش خواهد داشت [۲۹]. همان‌گونه که بیان شد سینتیک جذب کربن دی اکسید با جاذب‌های هیدروکسیدی از گذشته مورد مطالعه پژوهشگران قرار گرفته است. یکی از مطالعه‌های اخیر انجام شده در این زمینه که تأثیر دما بر روی ثابت سرعت واکنش‌های جذب را نیز مورد بررسی قرار داده است، مطالعه‌ی انجام شده توسط گوندال^(۳) و همکاران می‌باشد. در این مطالعه سینتیک جذب کربن دی اکسید توسط حلال‌های آبی سدیم، پتاسیم و لیتیم هیدروکسید و همچنین ترکیب هیدروکسیدها و کربنات‌ها در یک ستون جذب با رشته‌ای از دیسک‌های تماس دهنده مورد مطالعه قرار گرفته است و نتیجه‌ی به‌دست آمده نشان‌دهنده‌ی افزایش ثابت سرعت واکنش کربن دی اکسید با یون هیدروکسید و همچنین ضریب کلی انتقال جرم در فاز گاز و ضریب انتقال جرم بدون واکنش فاز مایع و کاهش ضریب انتقال جرم فاز گاز بوده است [۳۰].

بنابراین با توجه به ظرفیت جذب بالاتر محلول‌های هیدروکسیدی نسبت به حلال‌های آمینی مرسوم در صنعت و با توجه به فراوانی و ارزانی و در دسترس‌تر بودن این محلول‌ها نسبت به حلال‌های آمینی و همچنین با توجه به مسئله‌ی جایگزینی سوخت‌های فسیلی با زیست‌توده و به علت ترکیب و غلظت متفاوت گاز دودکش به دست آمده از احتراق زیست توده و امکان نامناسب بودن حلال‌های

(۱) Bernd Rumpf et al.

(۳) Gondal et al.

(۲) Yincheng et al.

همچنین افزایش غلظت یون کربنات اتفاق می‌افتد. در واقع بالاترین سرعت واکنش جذب مربوط به این بخش است و در این بخش همه کربن‌دی‌اکسید محلول در آب به سرعت به کربنات تبدیل می‌شود. در بخش دوم به دلیل کاهش OH^- و انباشت CO_3^{2-} ، واکنش برگشت واکنش (۲) بیشتر شده و در نتیجه واکنش رفت واکنش (۱) نیز تسریع می‌شود که سرانجام HCO_3^- افزایش و pH کاهش می‌یابد. میزان سرعت کلی جذب در بخش دوم کمتر از بخش اول است. سرانجام نیز با کاهش غلظت جاذب و پایان تقریبی یون هیدروکسید محلول جذب شیمیایی به اتمام رسیده و مقدار کمی از کربن‌دی‌اکسید به صورت فیزیکی جذب می‌شود (بخش سوم). با توجه به این تقسیم‌بندی در زمان‌های پایانی فرایند جذب کربن‌دی‌اکسید در محلول آبی هیدروکسیدی در یک سیستم نیمه پیوسته، واکنش‌های شیمیایی جذب با توجه به کاهش غلظت جاذب، تأثیر کم‌تری نسبت به جذب فیزیکی کربن‌دی‌اکسید خواهند داشت و حلالیت کربن‌دی‌اکسید در محلول عامل تعیین کننده‌ی میزان جذب خواهد بود [۳۳].

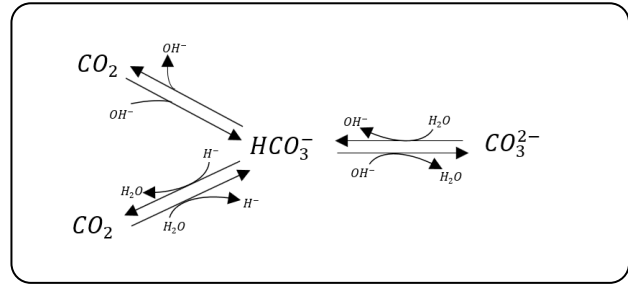
بخش تجربی

تهیه مواد

پتاسیم هیدروکسید استفاده شده در این کار از شرکت قطران شیمی تجهیز با خلوص بالای ۸۵٪ درصد تهیه شد که به صورت قرص مانند بود. برای تهیه‌ی محلول‌ها از آب مقطر استفاده شد و محلول‌ها در حجم‌های ۱۰۰ میلی‌لیتر با تعیین میزان گرم لازم برای ساخت محلول با غلظت مدنظر ساخته شدند. برای وزن کردن جاذب به منظور ساخت محلول از ترازویی با دقت چهار رقم اعشار استفاده شده و سپس جاذب وزن شده در بالن حجمی‌های صد ریخته شده و به حجم رسانده شدند. محلول‌ها برای جلوگیری از تماس با هوا درون این بالن‌ها نگهداری شدند و در ضمن برای همگن‌سازی محلول‌ها از همزن‌های مغناطیسی استفاده شد. گاز کربن‌دی‌اکسید نیز که به‌عنوان گاز جذب شونده مورد استفاده قرار گرفت از شرکت هم‌تگاز مهرآباد با خلوص بالای ۹۹٪ تهیه شد.

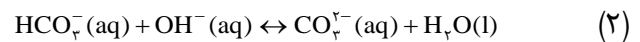
شرح دستگاه

آزمایش‌های تجربی جذب کربن‌دی‌اکسید توسط حلال پتاسیم هیدروکسید در یک دستگاه آزمایشگاهی که شمای کلی آن

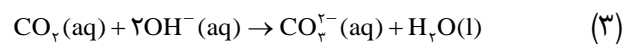


شکل ۱- واکنش کربن‌دی‌اکسید در محلول‌های آبی [۳۲].

میزان pH محلول تعیین کننده‌ی مسیر واکنش کربن‌دی‌اکسید در محلول‌های آبی می‌باشد. برای $\text{pH} > 10$ مسیر اول اتفاق می‌افتد. در این مطالعه با توجه به بازه‌ی غلظت جاذب مورد استفاده این مسیر مدنظر می‌باشد که شامل دو واکنش زیر است [۳۲].



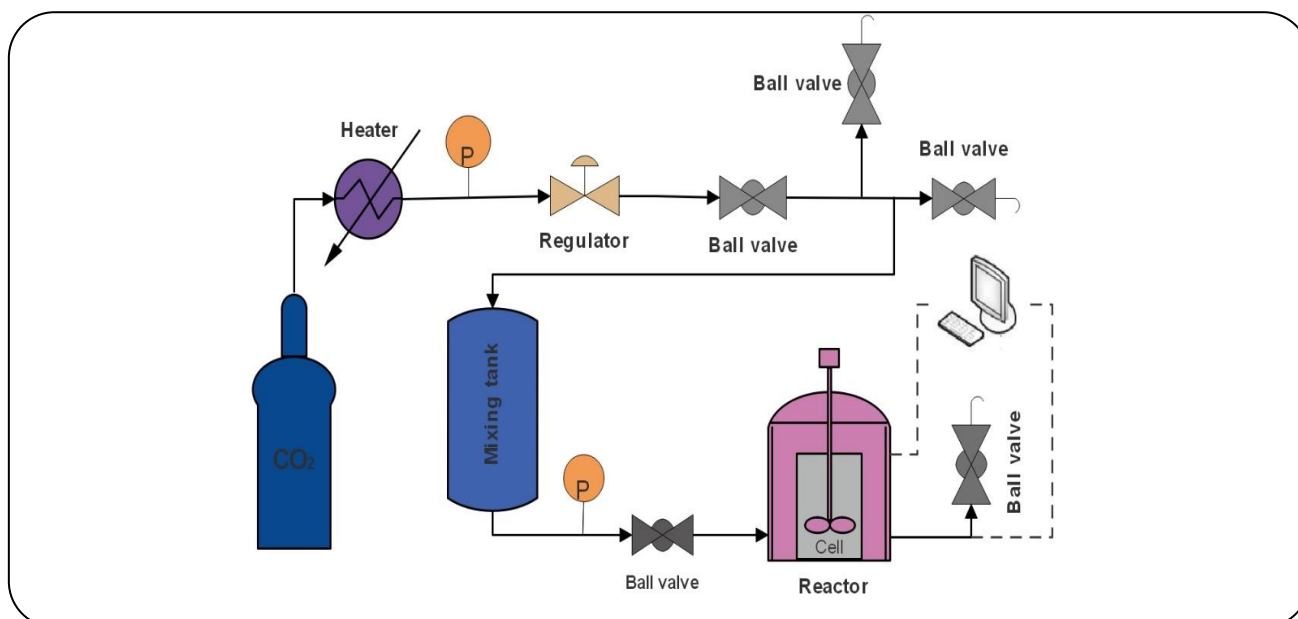
واکنش اول می‌تواند برگشت‌ناپذیر در نظر گرفته شود ولی با یک نرخ محدود پیشرفت می‌کند. واکنش دوم بی‌درنگ اتفاق می‌افتد ولی برگشت‌پذیر است. اگر تعادل واکنش دوم به سمت راست باشد که با توجه به مقدار بالای pH در مرحله‌ی اول فرایند شیمیایی قابل انتظار نیز هست، این دو واکنش را می‌توان با واکنش کلی برگشت‌ناپذیر زیر توصیف کرد [۳۲].



شایان ذکر است که در بسیاری از مطالعه‌های تجربی انجام شده، به دلیل سرعت بالای حل شدن فیزیکی گاز کربن‌دی‌اکسید در محلول و همچنین به دلیل به شدت بالا بودن ثابت سرعت واکنش (۲)، که در واقع یک واکنش انتقال پروتون است، نسبت به واکنش (۱)، واکنش (۱) بیان‌کننده‌ی نرخ کلی فرایند جذب کربن‌دی‌اکسید در نظر گرفته شده‌است. در هر دو مسیر بیان شده واکنش جداسازی آب نیز به‌صورت ناگهانی اتفاق می‌افتد [۳۲].

در مطالعه‌ی انجام شده در سال ۲۰۱۲ توسط میران یو^(۱) و همکاران که به جذب کربن‌دی‌اکسید با محلول سدیم هیدروکسید در یک سامانه نیمه‌پیوسته با مدت زمان فرایند بیش از ۶۰ دقیقه پرداخته است، جذب کربن‌دی‌اکسید توسط جاذب در طول فرایند به سه بخش تقسیم شده‌است. در بخش اول فرایند جذب واکنش (۲) غالب بوده و کاهش سریع یون هیدروکسید و در نتیجه pH و

(1) Miran Yoo



شکل ۲- شمای کلی دستگاه آزمایش جذب کربن دی‌اکسید با حلال ترکیبی.

آزمایش‌ها در دمای ثابت انجام می‌شوند و دما در طول هر آزمایش باید ثابت باشد، در ادامه‌ی کار دما تنظیم شده و سپس و با رسیدن دما به مقدار موردنظر با بستن شیر خروجی راکتور و باز کردن شیر ورودی، گاز با فشار موردنظر به داخل راکتور فرستاده می‌شود. مقدار این گاز از طریق شیر ورودی قابل کنترل است. پس از بستن شیر ورودی راکتور، همزن با سرعت مدنظر روشن می‌شود. از این لحظه جذب با کاهش فشار آغاز می‌شود. زمان انجام آزمایش‌ها یک ساعت در نظر گرفته شده‌است و پس از یک ساعت، شیر خروجی گاز را باز کرده تا کربن دی‌اکسید باقی‌مانده درون محفظه خارج شود و سپس با باز کردن درب محفظه، حلال مصرف‌شده خارج می‌شود. این روند برای انجام هر آزمایش تکرار می‌شود.

آزمایش‌های اولیه به‌منظور بررسی تأثیر دور همزن و یافتن سرعت همزن مناسب برای انجام آزمایش‌های اصلی، با محلول پتاسیم هیدروکسید 1 mol/L در دمای محیط و فشار اولیه‌ی 6 bar کربن دی‌اکسید در دور همزن‌های 50 rpm ، 100 rpm و 150 rpm انجام شدند. سپس تعدادی آزمایش در دماهای گوناگون با غلظت $1/2\text{ mol/L}$ محلول پتاسیم هیدروکسید و فشار 6 bar در دو دور همزن 150 rpm و 250 rpm انجام شدند.

آزمایش‌های بررسی دما در دماهای 23°C ، 28°C ، 45°C و 65°C با غلظت جذب $1/2\text{ mol/L}$ محلول پتاسیم هیدروکسید و فشار 6 bar و دور همزن 150 rpm انجام شدند که نتیجه‌های این آزمایش‌ها در بخش‌های بعدی آورده شده‌است.

در شکل ۲ نشان داده‌شده در دمای ثابت، به شکل بسته و با غلظت اولیه‌ی مشخص محلول جاذب و فشار اولیه‌ی مشخص گاز کربن دی‌اکسید ورودی، انجام‌شده‌اند. مطابق شکل، دستگاه آزمایشگاهی شامل یک کیپسول گاز همراه با رگلاتور، فشارسنج، هیتر و یک راکتور از جنس استیل ضدزنگ با حجم 176 میلی‌لیتر دارای همزن از بالا می‌باشد. قطر و ارتفاع داخلی راکتور به ترتیب 5 و 7 سانتی‌متر می‌باشد و همزن استفاده شده برای فاز مایع به قطر 25 میلی‌متر دارای دو تیغه‌ی صاف می‌باشد. ترموکوپل کالیبره و حسگر فشار به ترتیب برای اندازه‌گیری دما و فشار و شیرهای ورودی و خروجی برای انتقال کربن دی‌اکسید به درون راکتور و بیرون از آن در دستگاه تعبیه شده‌اند. افزون بر این دستگاه دارای یک پنل کنترلی است که دما و فشار داخلی راکتور را در زمان انجام آزمایش نشان می‌دهد. در واقع مقدار دما و فشار در کل بازه‌ی زمانی مورد آزمایش ثبت می‌شود و میزان بارگیری و درصد جذب کربن دی‌اکسید در طول آزمایش و در لحظه‌ی تعادل، براساس این مقادارها محاسبه می‌شود. میزان شار جذب نیز از همین اطلاعات خوانده شده قابل محاسبه است.

چگونگی انجام آزمایش

پس از تهیه‌ی محلول‌های آبی پتاسیم هیدروکسید با مولاریته‌ی مشخص و پس از همگن‌سازی، 20 میلی‌لیتر از این محلول درون سل نمونه ریخته شده و درون راکتور قرار داده می‌شود. با توجه به این‌که

جدول ۱- آزمایش‌های انجام شده به منظور تأثیر بررسی دور همزن.

دما (°C)	فشار (bar)	غلظت حلال (mol/L)	سرعت همزن (rpm)	α_{CO_2}	η_{CO_2} (%)	N (mol/m ² s)
۲۵	۶	۱	۵۰	۰/۶۳۸	۴۰/۵۹	۰/۰۰۱۶۸۴
۲۵	۶	۱	۱۰۰	۰/۸	۵۱/۷۴	۰/۰۰۲۱۳۴
۲۵	۶	۱	۱۵۰	۰/۸۴۹	۵۳/۴۵	۰/۰۰۲۲۹

تأثیر دور همزن بر روی بارگیری کربن دی اکسید با زمان و شار جذب با تناوب زمانی ۱۸۰s با زمان به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل نیز مطابق با جدول قابل دیدن است میزان بارگیری کربن دی اکسید و شار جذب با افزایش دور همزن، افزایش یافته است. در شکل ۱ مشخص است که با دور همزن ۵۰rpm در طول زمان آزمایش، امکان رسیدن به تعادل وجود نداشته است و میزان بارگیری و کربن دی اکسید در این دور همزن به شکل چشمگیری از دو دور همزن دیگر پایین تر است. در دور همزن ۱۰۰rpm فرایند جذب به تقریب به تعادل رسیده است و میزان بارگیری کربن دی اکسید در این دور همزن نزدیک به بارگیری کربن دی اکسید در دور همزن ۱۵۰rpm که در آن فرایند به طور کامل به تعادل رسیده است می‌باشد. در شکل ۴ نیز قابل دیدن است که با افزایش سرعت همزن شار انتقال جرم نیز افزایش یافته است. افزایش دور همزن در فاز مایع، افزون بر این که تاحدودی باعث افزایش سطح تماس گاز مایع و اختلاط این دو فاز می‌شود، باعث افزایش اختلاط در فاز مایع شده و سرعت فرایند جذب در این فاز را افزایش می‌دهد. با افزایش نرخ واکنش در فاز مایع، نیرو محرکه‌ی انتقال جرم به دلیل کاهش فشار جزئی تعادلی کربن دی اکسید در سطح مشترک گاز مایع افزایش یافته و ضریب انتقال جرم فاز مایع نیز افزایش می‌یابد. به این ترتیب با افزایش سرعت همزن میزان بارگیری و شار انتقال جرم کربن دی اکسید افزایش می‌یابد. شیان ذکر است که از یک سرعت همزن به بعد تأثیر مثبت سرعت همزن بسیار ناچیز شده و تنها مصرف انرژی با افزایش سرعت همزن بالا می‌رود. بنابراین با توجه به این که با افزایش سرعت همزن از ۱۰۰rpm به ۱۵۰rpm افزایش بارگیری کربن دی اکسید کم بوده است، نتیجه گرفته می‌شود که بالاتر از این محدوده، افزایش سرعت همزن تأثیر چندانی بر افزایش جذب نخواهد داشت و بنابراین سرعت همزن ۱۵۰rpm به عنوان سرعت همزن آزمایش‌های اصلی برای بررسی تأثیر دما انتخاب شد.

مقدار کربن دی اکسید جذب شده در آزمایش‌ها، با استفاده از معادله حالت زیر محاسبه شده است:

$$n_{CO_2} = \frac{(P_i - P_f) V}{RTz} \quad (4)$$

که در آن، V حجم گاز، P_i فشار اولیه، P_f فشار نهایی، R ثابت جهانی گازها، T دما و z ضریب تراکم پذیری می‌باشد. سپس راندمان حذف کربن دی اکسید (η_{CO_2}) و بارگیری کربن دی اکسید (α_{CO_2}) مطابق معادله‌های زیر محاسبه شده است:

$$\eta_{CO_2} = \frac{\text{میزان دی اکسید کربن جذب شده (mol)}}{\text{میزان دی اکسید کربن اولیه (mol)}} \quad (5)$$

$$\alpha_{CO_2} = \frac{\text{میزان دی اکسید کربن جذب شده (mol)}}{\text{میزان پتاسیم هیدروکسید (mol)}} \quad (6)$$

شار جذب نیز با تناوب زمانی ۱۸۰ ثانیه مطابق معادله‌ی (۷) محاسبه شده است.

$$N = \frac{\text{میزان دی اکسید کربن جذب شده (mol)}}{180 (s) \times A} \quad (7)$$

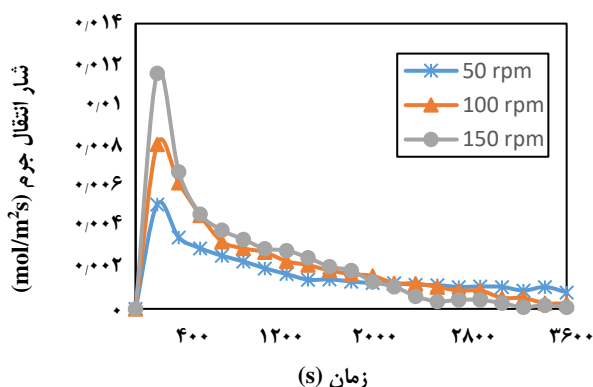
در این معادله مقدار سطح انتقال جرم (A) برابر با ۰/۰۰۲ m² می‌باشد و همچنین در صورت رابطه میزان کربن دی اکسید جذب شده در هر ۱۸۰ ثانیه در نظر گرفته می‌شود.

نتیجه‌ها و بحث

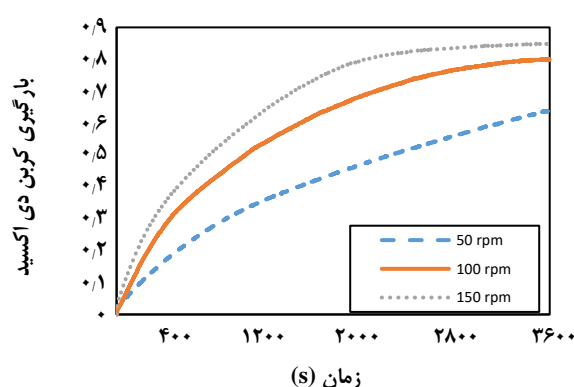
آزمایش‌های اولیه‌ی مربوط به بررسی تأثیر همزن در جدول ۱ آورده شده است. میزان بارگیری با زمان، درصد جذب با زمان و شار جذب با تناوب زمانی ۱۸۰ ثانیه برای آزمایش‌های ارائه شده در جدول با معادله‌های (۵) تا (۷) محاسبه شده‌اند و مقادیر میزان بارگیری و درصد جذب نهایی و همچنین شار جذب میانگین در جدول ۱ آورده شده‌اند. همان‌گونه که قابل دیدن است با افزایش دور همزن در شرایط عملیاتی ثابت، میزان بارگیری و درصد جذب تعادلی کربن دی اکسید و همچنین شار انتقال جرم میانگین افزایش یافته است.

جدول ۲- آزمایش‌های انجام شده به منظور بررسی تأثیر دور همزن در سه دما و دو دور همزن متفاوت.

دما (°C)	P _{CO2} (bar)	C _{KOH} (mol/L)	α _{CO2}		η _{CO2} (%)		N (mol/m ² s)	
			سرعت همزن (rpm)		سرعت همزن (rpm)		سرعت همزن (rpm)	
			۱۵۰	۲۵۰	۱۵۰	۲۵۰	۱۵۰	۲۵۰
۲۲	۶	۱/۲	۰/۷۰۹	۰/۷۰۱	۵۲/۲۵	۵۲/۱۱	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۲۳
۴۵	۶	۱/۲	۰/۶۲۰	۰/۵۷۳	۵۰/۱۸	۴۹/۹۰	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۲۰
۶۵	۶	۱/۲	۰/۶۰۵	۰/۵۶۹	۵۰/۱۴	۴۹/۵۶	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۲۰



شکل ۴- تغییر شار انتقال جرم با زمان در جاذب پتاسیم هیدروکسید ۱mol/L، دمای ۲۵°C و فشار ۶bar در سه دور همزن گوناگون.



شکل ۳- تغییر بارگیری کربن دی اکسید با زمان در جاذب پتاسیم هیدروکسید ۱mol/L، دمای ۲۵°C و فشار ۶bar در سه دور همزن گوناگون.

با نمودار ۵ از آوردن آن‌ها صرف نظر شده است. در شکل ۶ نیز نمودار تأثیر دور همزن بر میزان بارگیری با دو دور همزن ۱۵۰rpm و ۲۵۰rpm، در دمای ۲۲°C، فشار ۶bar و غلظت ۱/۲mol/L جاذب آورده شده است. همان گونه که دیده می‌شود افزایش دور همزن در زمان‌های اولیه‌ی فرایند جذب میزان بارگیری کربن دی اکسید را کمی افزایش داده است ولی در میزان نهایی آن همان گونه که انتظار می‌رفت تأثیری نداشته است.

با توجه به نتیجه‌های به دست آمده و تأثیر ناچیز افزایش دور همزن بیش از ۱۵۰rpm بر میزان جذب، آزمایش‌های تأثیر دما با این دور همزن انجام شدند. این آزمایش‌ها به همراه میزان بارگیری و درصد جذب تعادلی و شار انتقال جرم میانگین در جدول ۳ آورده شده‌اند.

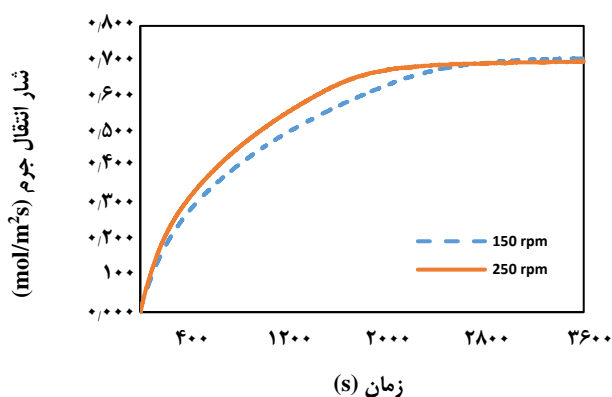
همان گونه که در جدول قابل دیدن است افزایش دما به مقدار ناچیزی تأثیر منفی روی میزان بارگیری و درصد جذب تعادلی و میانگین شار انتقال جرم گذاشته است. همان گونه که

برای اطمینان از سرعت همزن انتخاب شده، آزمایش‌هایی در شرایط مربوط به بررسی دما یعنی غلظت ۱/۲mol/L، فشار ۶bar، در دمای ۲۲°C، ۴۵°C و ۶۵°C با دو دور همزن ۱۵۰rpm و ۲۵۰rpm انجام شدند. آزمایش‌های انجام شده به همراه بارگیری و درصد جذب تعادلی و شار انتقال جرم میانگین در جدول ۲ آورده شده‌اند. همان گونه که دیده می‌شود تغییر با افزایش دور همزن از ۱۵۰rpm به ۲۵۰rpm میزان و درصد جذب تعادلی کربن دی اکسید و همچنین میانگین شار انتقال جرم تغییر چندانی نکرده است.

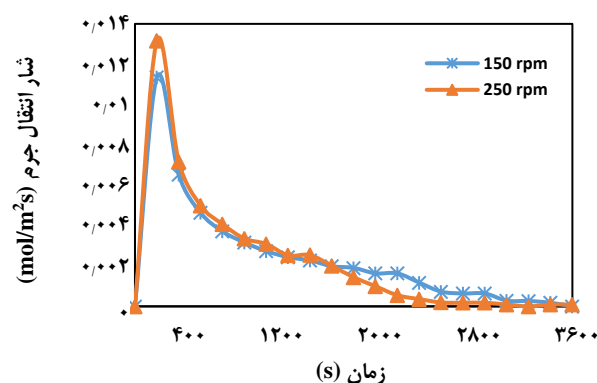
در نمودار ۵ تغییرهای شار انتقال جرم با زمان، در دمای ۲۲°C، فشار ۶bar و غلظت ۱/۲mol/L جاذب با دو دور همزن ۱۵۰rpm و ۲۵۰rpm برای بررسی بهتر تأثیر این دو دور همزن بر شار انتقال جرم در طول فرایند جذب آورده شده است. همان گونه که دیده می‌شود میزان شار انتقال جرم در آغاز فرایند به میزان کمی با افزایش دور همزن بیشتر شده است ولی این افزایش ناچیز است. این نمودارها برای آزمایش‌های دیگر جدول ۲ هم رسم شده‌اند که به دلیل شباهت

جدول ۳- آزمایش‌های انجام شده به منظور بررسی تأثیر دما در دمای گوناگون.

دما (°C)	فشار (bar)	غلظت حلال (mol/L)	سرعت همزن (rpm)	α_{CO_2}	η_{CO_2} (%)	N (mol/m ² s)
۲۲	۶	۱/۲	۱۵۰	۰/۷۰۹	۵۲/۲۵	۰/۰۰۲۳
۲۸	۶	۱/۲	۱۵۰	۰/۶۹۹	۵۲/۱	۰/۰۰۲۳
۴۵	۶	۱/۲	۱۵۰	۰/۶۲۰	۵۰/۱۸	۰/۰۰۲۰
۶۵	۶	۱/۲	۱۵۰	۰/۶۰۵	۵۰/۱۴	۰/۰۰۲۰



شکل ۶ - تغییر بارگیری کربن دی اکسید با زمان در جاذب پتاسیم هیدروکسید ۱/۲ mol/L، دمای ۲۲°C و فشار ۶ bar در دو دور همزن ۱۵۰ rpm و ۲۵۰ rpm.

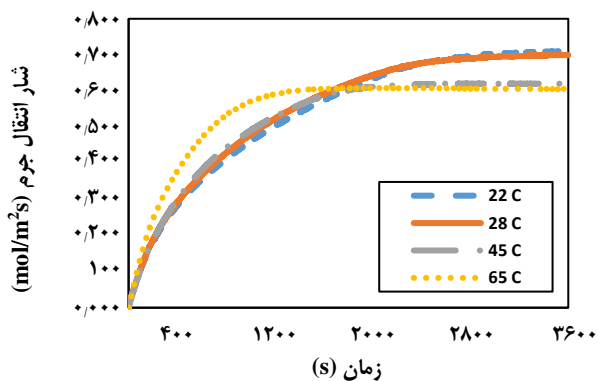


شکل ۵ - تغییر شار انتقال جرم با زمان در جاذب پتاسیم هیدروکسید ۱/۲ mol/L، دمای ۲۲°C و فشار ۶ bar در دو دور همزن ۱۵۰ rpm و ۲۵۰ rpm.

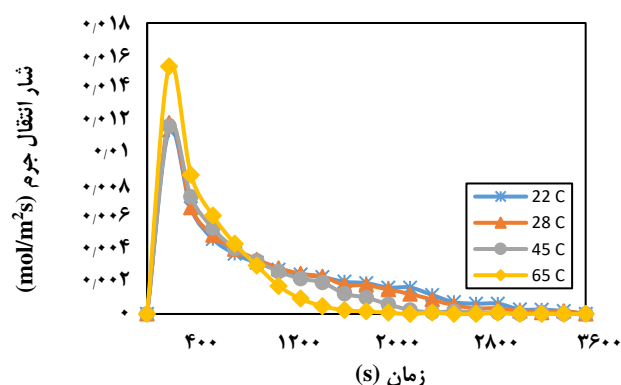
در دماهای بررسی شده نشان داده شده است. همان گونه که در شکل می توان دید تأثیر دما در ابتدای فرایند مثبت بوده و با گذشت زمان این تأثیر وارون شده است. یعنی در واقع افزایش دما در دقیقه های نخستین، میزان بارگیری را به مقدار چشمگیری افزایش داده است ولی سرانجام در بارگیری های تعادلی تأثیر منفی داشته است.

این مسئله را می توان با کمک کار انجام شده توسط میران یو و همکاران توضیح داد. همان گونه که بیان شد میران یو و همکاران جذب کربن دی اکسید با جاذب هیدروکسیدی در یک سامانه نیمه پیوسته را، به سه بخش تقسیم کردند که در دو بخش اول کربن دی اکسید حل شده در مایع به سرعت با جاذب وارد واکنش می شود و به یون های کربنات و بی کربنات تبدیل می شود. با گذشت زمان و کاهش غلظت جاذب تنها جذب فیزیکی کربن دی اکسید در محلول آبی اتفاق می افتد که این بخش، بخش سوم می باشد [۳۳]. در واقع در این جا نیز می توان فرایند جذب اتفاق افتاده را به همین صورت در نظر گرفت و تأثیر دما را به کمک این تقسیم بندی توضیح داد.

بیان شد در تعدادی از مطالعه های انجام شده اثر دما روی میزان جذب بررسی شده است و نتیجه ها نشان دهنده ی این بوده است که افزایش دما باعث افزایش راندمان جذب، یا میزان ثابت سرعت واکنش کربن دی اکسید با یون هیدروکسید و میزان شار کلی انتقال جرم در فاز گاز و همچنین ضریب انتقال جرم بدون واکنش فاز مایع شده است. ولی میزان ضریب انتقال جرم فاز گاز را کاهش داده است. در یکی از مطالعه ها نیز نتیجه های نشان دهنده ی کاهش حلالیت کربن دی اکسید با افزایش دما بودند. برای بررسی بهتر تأثیر دما روی میزان بارگیری و شار انتقال جرم و همچنین مقایسه ی بهتر نتیجه های به دست آمده با کارهای پیشین انجام شده، تغییرهای این دو پارامتر با زمان در نمودارهای ۷ و ۸ نشان داده شده است. در شکل ۷ تغییرهای میزان شار انتقال جرم با زمان در دماهای گوناگون قابل دیدن است. همان گونه که در شکل مشخص است افزایش دما در دقیقه های نخستین فرایند باعث افزایش شار انتقال جرم شده است. در شکل ۸ نیز تغییرهای میزان بارگیری با زمان



شکل ۸ - تغییر بارگیری کربن دی اکسید با زمان در جاذب پتاسیم هیدروکسید
۱/۲ mol/L، فشار ۶ bar، دور همزن ۱۵۰ rpm.



شکل ۷ - تغییر شار انتقال جرم با زمان در جاذب پتاسیم هیدروکسید
۱/۲ mol/L، فشار ۶ bar، دور همزن ۱۵۰ rpm.

فرایند جذب است و با نتیجه‌ی به دست آمده در این مطالعه تطابق دارد. بنابراین با توجه به این مطالعه و کارهای پیشین انجام شده می‌توان گفت با توجه به این که هدف دستیابی به جذب تعادلی باشد یا خیر می‌توان دمای مورد نظر برای فرایند جذب را انتخاب کرد و با توجه به این که بیش تر فرایند جذب در سامانه‌های پیوسته و بدون رسیدن به تعادل انجام می‌شود و با توجه به افزایش بارگیری و شار انتقال جرم کربن دی اکسید با افزایش دما در اوایل فرایند، دماهای بالاتر برای انجام فرایند جذب در سامانه‌های پیوسته مناسب ترند.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه جذب کربن دی اکسید با استفاده از جاذب پتاسیم هیدروکسید به منظور بررسی تأثیر دور همزن و دما بر میزان بارگیری، درصد جذب و شار انتقال جرم کربن دی اکسید در طول فرایند و در زمان تعادل انجام شد. به همین منظور آزمایش‌هایی در دور همزن‌های گوناگون و دماهای گوناگون انجام شد و نتیجه‌ها با یکدیگر مقایسه شد. نتیجه‌های به دست آمده نشان داد با افزایش دور همزن از ۵۰ rpm تا ۱۵۰ rpm در دمای ۲۵°C و فشار ۶ bar و غلظت ۱ mol/L پتاسیم هیدروکسید بارگیری، درصد جذب و شار انتقال جرم به شکل چشمگیری و به ترتیب ۳۳٪، ۳۲٪ و ۳۶٪ افزایش می‌یابند. افزایش دور همزن در فاز مایع، افزون بر این که تاحدودی باعث افزایش سطح تماس گاز مایع و اختلاط این دو فاز می‌شود، موجب افزایش اختلاط در فاز مایع شده و سرعت فرایند جذب در این فاز را افزایش می‌دهد. در شرایط عملیاتی ۲۳°C، ۴۵°C و ۶۵°C و فشار ۶ bar و غلظت ۱/۲ mol/L محلول پتاسیم هیدروکسید جذب

در زمان‌های اولیه‌ی فرایند که واکنش‌های شیمیایی جذب کنترل کننده‌ی سرعت جذب هستند، به دلیل افزایش ثابت سرعت واکنش کربن دی اکسید با یون هیدروکسید با افزایش دما و همچنین افزایش ضرایب انتقال جرم کلی فاز گاز و ضریب انتقال جرم بدون واکنش فاز مایع با افزایش دما، میزان بارگیری کربن دی اکسید و شار انتقال جرم افزایش یافته است. با گذشت زمان و کاهش غلظت جاذب و نزدیک شدن به بخش سه فرایند جذب، تنها جذب فیزیکی کربن دی اکسید در حلال اتفاق می‌افتد که در این زمان حلالیت فیزیکی کربن دی اکسید در حلال، نقش بیش تری در تعیین میزان جذب خواهد داشت. با افزایش دما، حلالیت فیزیکی کربن دی اکسید به دلیل افزایش فشار بخار با افزایش دما، کاهش می‌یابد. افزون بر کاهش حلالیت کربن دی اکسید با دما، گرمازا بودن واکنش‌های جذب کربن دی اکسید توسط یون‌های هیدروکسید که باعث کاهش تبدیل تعادلی با افزایش دما می‌شوند نیز می‌توانند در کاهش بارگیری تعادلی کربن دی اکسید با دما نقش مؤثری داشته باشند. نتیجه‌ی به دست آمده همانند نتیجه‌ی کار انجام شده توسط رامپف و همکاران در سال ۱۹۹۸ میلادی می‌باشد که کاهش حلالیت کربن دی اکسید با افزایش دما را گزارش کردند [۲۸]. در مطالعه‌ی انجام شده توسط بین چنگ در سال ۲۰۱۱ میلادی که تأثیر افزایش دما روی راندمان جذب کربن دی اکسید با جاذب هیدروکسیدی مثبت به دست آمد، دستگاه مورد استفاده ستون پاششی و یک سامانه پیوسته بوده است و همان گونه که مشخص است امکان دستیابی به تعادل در این سامانه‌ها ناچیز است [۲۹]. بنابراین نتیجه‌های به دست آمده در مطالعه‌ی بین چنگ نیز مربوط به زمان‌های اولیه‌ی

جذب و شار انتقال جرم تعادلی به ترتیب ۱۵٪، ۴/۲٪ و ۱۳٪ کاهش یافتند. علت این مسئله را می‌توان در افزایش ثوابت سرعت واکنش‌های جذب در فاز مایع و افزایش ضریب انتقال جرم کلی فاز گاز با افزایش دما دانست. در ادامه با کاهش غلظت جاذب، تنها حل فیزیکی کربن‌دی‌اکسید در محلول آبی اتفاق می‌افتد که در این مرحله با افزایش دما، به علت افزایش فشار بخار با افزایش دما، کاهش حلالیت کربن‌دی‌اکسید در محلول دیده می‌شود. علت دیگر کاهش جذب تعادلی کربن‌دی‌اکسید با افزایش دما را می‌توان گرمازا بودن واکنش‌های جذب کربن‌دی‌اکسید توسط یون‌های هیدروکسید که باعث کاهش تبدیل تعادلی با افزایش دما می‌شوند دانست.

با دو دور همزن ۱۵۰rpm و ۲۵۰rpm با یکدیگر مقایسه شدند و دیده شد که تأثیرافزایش دور همزن از ۱۵۰rpm به ۲۵۰rpm بر میزان بارگیری و درصد جذب و شار انتقال جرم به تقریب و دور همزن ۲۵۰rpm باعث افزایش مصرف انرژی می‌شود در حالی که تأثیر مثبتی بر میزان جذب نخواهد گذاشت. بنابراین دور همزن ۱۵۰rpm به‌عنوان دور همزن مناسب برای آزمایش‌های بررسی تأثیر دما انتخاب شد و با انجام آزمایش‌هایی در دمای ۲۲°C، ۲۸°C، ۴۵°C و ۶۵°C و فشار ۶bar و غلظت ۱/۲mol/L محلول پتاسیم هیدروکسید جاذب با دور همزن ۱۵۰rpm مشخص شد که با افزایش دما میزان بارگیری، درصد جذب و شار انتقال جرم در نیمه‌ی اولیه‌ی فرایند جذب افزایش می‌یابد در حالی که در ادامه تأثیر افزایش دما منفی شده و میزان جذب تعادلی با افزایش دما کاهش کمی را نشان می‌دهد. در واقع با افزایش دما از ۲۲°C به ۶۵°C میزان بارگیری، درصد

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸،۲،۲۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸،۶،۶

مراجع

- [1] Songolzadeh M., Soleimani M., Takht Ravanchi M., Songolzadeh R., [Carbon Dioxide Separation from Flue Gases: A Technological Review Emphasizing Reduction in Greenhouse Gas Emissions](#), *The Scientific World J.*, **2014**: 1-34 (2014).
- [2] Heydarifard M., Pashaei H., Ghaemi A., Nasiri M., [Reactive Absorption of CO₂ into Piperazine Aqueous Solution in a Stirrer Bubble Column: Modeling and Experimental](#), *Int. Journal Greenhouse Gas Control*, **79**: 91-116 (2018).
- [3] Mirzaei F., Ghaemi A., [An Experimental Correlation for Mass Transfer Flux of CO₂ Reactive Absorption into Aqueous MEA-PZ Blended Solution](#), *Asia-Pacific J. Chem. Eng.*, **13**(6): (2018).
- [4] Pashaei H., Ghaemi A., Nasiri M., [Modeling and Experimental Study on the Solubility and Mass Transfer of CO₂ into Aqueous DEA Solution Using a Stirrer Bubble Column](#), *RSC Advances*, **6**: 108075-108092 (2016).
- [5] Amiri M., Shahhosseini S., Ghaemi A., [Optimization of CO₂ Capture Process from Simulated Flue Gas by Dry Regenerable Alkali Metal Carbonate Based Adsorbent Using Response Surface Methodology](#). *Energy & Fuels*, **31**: 5286-5296 (2017).
- [6] Fashi F., Ghaemi A., Moradi P., [Piperazine-Modified Activated Alumina as a Novel Promising Candidate for CO₂ Capture: Experimental and Modeling](#), *Greenhouse Gases: Sci. Technol.*, **9**: 37-51 (2018).
- [7] Yilmaz, S., Selim H., [A Review on the Methods for Biomass to Energy Conversion Systems Design](#), *Renewable Sust. Energy Rev.*, **25**: 420-430 (2013).

- [8] Möllersten K., Yan J., Moreira J.R., [Potential Market Niches for Biomass Energy with CO₂ Capture and Storage—Opportunities for Energy Supply with Negative CO₂ Emissions](#), *Biomass and Bioenergy*, **25(3)**: 273-285 (2003).
- [9] Azar C., Lindgren K., Obersteiner M., Riahi K., van Vuuren D.P., Den Elzen K.M.G.J., Möllersten K., Larson E.D., [The feasibility of Low CO₂ Concentration Targets and the Role of Bio-Energy with Carbon Capture and Storage \(BECCS\)](#). *Climatic Change*, **100(1)**: 195-202 (2010).
- [10] Pashaei H., Ghaemi A., Nasiri M., [Experimental Study and Modeling of CO₂ Absorption into Diethanolamine Solutions Using Stirrer Bubble Column](#), *Chem. Eng. Res. Design*, **121**: 32-43 (2017).
- [11] Ghaemi A., [Mass Transfer and Thermodynamic Modeling of Carbon Dioxide Absorption into MEA Aqueous Solution](#), *Polish J. Chem. Technol.*, **19(3)**: 75-82 (2017).
- [12] Yu C.-H., Huang C.-H., Tan C.-S., [A Review of CO₂ Capture by Absorption and Adsorption](#), *Aerosol Air Qual. Res.*, **12(5)**: 745-769 (2012)
- [13] Pashaei H., Ghaemi A., Nasiri M., Heydarifard M., [Experimental Investigation of the Effect of Nano Heavy Metal Oxide Particles in Piperazine Solution on CO₂ Absorption Using Stirrer Bubble Column](#), *Energy Fuels*, **32 (2)**: 2037-2052 (2018).
- [14] Kazemi Sh., Ghaemi A., Tahvildari K., [Chemical Absorption of Carbon Dioxide into Aqueous Piperazine Solutions Using a Stirred Batch Reactor](#), *Iran. J. Chem. Chem. Eng. (IJCCE)*, **39(4)**: 253-267 (2020).
- [15] Gouedard C., Picq D., Launay F., Carrette P.L., [Amine Degradation in CO₂ Capture. I. A Review](#), *Int. J. Greenhouse Gas Control*, **10**: 244-270 (2012).
- [16] Lepaumier H., Picq D., Carrette P.-L., [Degradation Study of New Solvents for CO₂ Capture in Post-Combustion](#), *Energy Procedia*, **1(1)**: 893-900 (2009).
- [17] Ghaemi A., Jafari Z., Etemad E., [Prediction of CO₂ Mass Transfer Flux in Aqueous Amine Solutions Using Artificial Neural Networks](#), *Iranian J. Chemistry Chem. Eng. (IJCCE)*, **39(4)**: 269-280 (2020).
- [18] Mumford, K.A., Wu, Y., Smith, K.H. and Stevens, G.W., [Review of Solvent Based Carbon-Dioxide Capture Technologies](#), *Frontiers Chem. Sci. Eng.*, **9(2)**: 125-141 (2015).
- [19] Norfleet W., Horn W., [Carbon Dioxide Scrubbing Capabilities of Two New Non-Powered Technologies](#). *Habitation*, **9**: 67-78 (2003).
- [20] Matty C.M., "Overview of Long-Term Lithium Hydroxide Storage Aboard the International Space Station", *Int. Conference Environ. Sys.* (2008).
- [21] Zeman, F., [Energy and Material Balance of CO₂ Capture from Ambient Air](#), *Environ. Sci. Technol.*, **41(21)**: 7558-7563 (2007).

- [22] Mahmoudkhani M., Keith D.W., [Low-Energy Sodium Hydroxide Recovery for CO₂ Capture from Atmospheric Air-Thermodynamic Analysis](#), *Int. J. Greenhouse Gas Control*, **3(4)**: 376-384 (2009).
- [23] Baciocchi R., Storti G., Mazzotti M., [Process Design and Energy Requirements for the Capture of Carbon Dioxide from Air](#), *Chem. Eng. Proc.: Process Intensification*, **45(12)**: 1047-1058 (2006).
- [24] Stolaroff J.K., Keith D.W., Lowry G.V., [Carbon Dioxide Capture from Atmospheric Air Using Sodium Hydroxide Spray](#), *Environ. Sci. Technol.*, **42(8)**: 2728-2735 (2008).
- [25] Gomes J., Santos S., Bordado J., [Choosing Amine-Based Absorbents for CO₂ Capture](#), *Environ. Technol.*, **36(1)**: 19-25 (2015).
- [26] Tirandazi B., Yahyae A., Kianpour M., Shahhosseini S., [Experimental Investigation and Modeling of Viscosity Effect on Carbon Dioxide Absorption Using Sodium Hydroxide](#), *J. Environ. Chem. Eng.*, **5(3)**: 2597-2604 (2017).
- [27] Masaki, K., [On the CO₂ Absorption Velocity of NaOH-and KOH-Solutions](#). *The J. Biochem.*, **13(1)**: 211-217 (1931).
- [28] Rumpf B., Xia J., Maurer G., [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.*, **37(5)**: 2012-2019 (1998).
- [29] Yincheng G., Zhenqi N., Wenyi L., [Comparison of Removal Efficiencies of Carbon Dioxide Between Aqueous Ammonia and NaOH Solution in a Fine Spray Column](#), *Energy Procedia*, **4**: 512-518 (2011).
- [30] Gondal S., Asif N., Svendsen H.F., Knuutila H., [Kinetics of the Absorption of Carbon Dioxide into Aqueous Hydroxides of Lithium, Sodium and Potassium and Blends of Hydroxides and Carbonates](#), *Chem. Eng. Sci.*, **123**: 487-499 (2015).
- [31] Gondal S., Svendsen H.F., Knuutila H.K., [Activity Based Kinetics of CO₂-OH⁻ Systems with Li⁺, Na⁺ and K⁺ Counter Ions](#), *Chem. Eng. Sci.*, **151**: 1-6 (2016).
- [32] Krauß M., Rzehak R., [Reactive Absorption of CO₂ in NaOH: Detailed Study of Enhancement Factor Models](#), *Chem. Eng. Sci.*, **166**: 193-209 (2017).
- [33] Yoo M., Han S.-J., Wee J.-H., [Carbon Dioxide Capture Capacity of Sodium Hydroxide Aqueous Solution](#), *J. Environ. Management*, **114**: 512-519 (2013).