



Experimental Investigation of the Efficiency of the Regeneration Process of Amine Solutions for the Removal of Carbon Dioxide Using a $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ Catalyst

P. Keshavarz^{1*}, M. Bardide²

1- Professor of Chemical Engineering, Shiraz University

2- M. Sc. Student of Industrial Chemical Engineering, Shiraz University

Email: pkeshavarz@shirazu.ac.ir

Abstract

In this study, the effect of the presence of $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ catalyst in 3 M methyl diethanolamine solution for removing carbon dioxide and regenerating the solution has been investigated. According to the results obtained from this research, this catalyst has caused an increase of 6.3 to 17.9 percent in the amount of carbon dioxide removal. Also, in this research, the effect of adding monoethanolamine with a concentration of 1 M and also piperazine with a concentration of 0.5 M to a base solution of 3 M methyldiethanolamine has been investigated. The results of this research showed that by adding different amines with specific concentrations to the methyldiethanolamine solution, it is possible to increase the amount of carbon dioxide removal. The amount of carbon dioxide removal increased to 26.1% in this stage. In all the experiments, the highest amount of carbon dioxide removal was related to the three-amine mixture and applying 45 grams of $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ catalyst, which increased the amount of removal to 39.3%.

Received: 12 February 2024

Accepted: 9 September 2024

Page Number: 27-37

Keywords:

Absorption,
Carbon Dioxide,
Catalyst,
Desorption

Please Cite this Article Using:

Keshavarz, P., & Bardide, M. (2025). Experimental Investigation of the Efficiency of the Regeneration Process of Amine Solutions for the Removal of Carbon Dioxide Using a $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ Catalyst. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 24(140), 27-37, [In Persian].



بررسی آزمایشگاهی بازده فرایند احیای محلول‌های آمینی برای دفع کربن‌دی‌اکسید بابره‌گیری از کاتالیست گاما-آلومینا

پیمان کشاورز^{۱*}، مسعود بردیده^۲

۱- استاد مهندسی شیمی، دانشگاه شیراز

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه شیراز

پیام نگار: pkeshavarz@shirazu.ac.ir

چکیده

در این مطالعه، تأثیر حضور کاتالیست $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ در محلول پایه ۳ مولار متیل‌دی‌اتانول آمین برای دفع کربن‌دی‌اکسید و احیای محلول بررسی شد. با توجه به نتایج این پژوهش، این کاتالیست موجب افزایش ۶/۳ تا ۱۷/۹ درصدی میزان دفع کربن‌دی‌اکسید شده است. در این پژوهش، به بررسی تأثیر افزودن مونو اتانول آمین با غلظت ۱ مولار و همچنین پیپرازین با غلظت ۰/۵ مولار به محلول پایه پرداخته شده است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که با افزودن آمین‌های مختلف با غلظت‌های مشخص به محلول پایه، میزان دفع کربن‌دی‌اکسید افزایش یافت. میزان دفع کربن‌دی‌اکسید تا ۲۶/۱ درصد در این مرحله بیشتر شد. در تمامی آزمایش‌ها، بیشترین میزان دفع کربن‌دی‌اکسید مربوط به مخلوط سه‌آمینی و استفاده از ۴۵ گرم کاتالیست $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ بود که میزان دفع تا ۳۹/۳ درصد افزایش یافت.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۹

شماره صفحات: ۲۷ تا ۳۷

کلیدواژه‌ها:

جذب،
کربن‌دی‌اکسید،
کاتالیست،
دفع

* تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده شیمی

استناد به مقاله:

کشاورز، پیمان، و بردیده، مسعود. (۱۴۰۴). بررسی آزمایشگاهی بازده فرایند احیای محلول‌های آمینی برای دفع کربن‌دی‌اکسید بابره‌گیری از کاتالیست گاما-آلومینا، نشریه مهندسی شیمی ایران، ۲۴(۱۴۰)، ۲۷-۳۷.

۱. مقدمه

بالافتن دمای کره زمین در اثر انتشار گازهای گلخانه‌ای و غلظت روبه‌افزایش آن‌ها، از مهم‌ترین مسائل زیست‌محیطی است که سبب بروز تغییراتی در شرایط جوی جهانی شده‌است. در این میان، کربن‌دی‌اکسید بیشترین درصد را به‌خود اختصاص می‌دهد. یافتن راه‌کارهای اقتصادی و پربازده برای کاهش این آلاینده، از مهم‌ترین اهداف پیش رو است. جلوگیری از انتشار بیش‌ازحد و جداسازی کربن‌دی‌اکسید امری ضروری است. از این رو، فناوری و روش‌های متعددی ارائه شده‌است. به‌طور کلی، می‌توان سه فرایند اصلی را برای جذب کربن‌دی‌اکسید تعریف کرد: پیش‌احتراقی، احتراق اکسیژنی و پس‌احتراق [۱،۲].

جداسازی و حذف کربن‌دی‌اکسید از جریان خروجی حاصل از احتراق سوخت‌های فسیلی، بهترین و مناسب‌ترین روش به‌حساب می‌آید. به‌همین منظور، روش‌های مختلفی برای جذب کربن‌دی‌اکسید نظیر روش‌های زیستی [۲،۶]، جذب فیزیکی [۷]، جذب شیمیایی [۸،۹]، استفاده از غشاهای [۱۰]، جذب سطحی [۱۱]، تقطیر برودتی [۱۲] و غیره وجود دارد.

آیدم^۱ و همکارانش، جزء نخستین کسانی بودند که در سال ۲۰۰۶ از محلول مونواتانول آمین و کاتالیست‌های اسیدی جامد استفاده کردند. با افزودن کاتالیست‌های اسیدی جامد مانند $5-HZSM-TiO_2$ و $\gamma-Al_2O_3$ و غیره به محلول آمینی ۵ مولار مونواتانول آمین، انرژی لازم برای فرایند احیا را به حد قابل توجهی کاهش دادند [۲]. یان^۲ و همکارانش در سال ۲۰۱۳ اغلب تمرکز خود را بر روی نانوذرات و کاتالیست‌های MgO ، SiO_2 و TiO_2 و Al_2O_3 گذاشتند و نشان دادند که انرژی لازم برای فرایند احیای محلول آلکانول آمین که به‌عنوان حلال پایه استفاده شده‌بود، تا ۳۵٪ کم شد [۳].

در ادامه تحقیقات، لیانگ^۳ و همکارانش در سال ۲۰۱۶ با آزمایش بر روی محلول ۵ مولار مونواتانول آمین اثبات کردند که استفاده از ترکیبی از کاتالیست‌های زیبویتی تأثیر بیشتری نسبت به تک‌کاتالیست در فرایند دارد. آنان، در این پژوهش نشان دادند که میزان دفع کربن‌دی‌اکسید ۲۰/۱٪ تا ۳۰/۲٪ افزایش و میزان مصرف

انرژی ۱۳٪ تا ۳۶٪ کاهش یافت [۴]. بهاتی^۴ و همکارانش در سال ۲۰۲۰ با آزمایش بر روی محلول ۵ مولار مونواتانول آمین در دمای ۸۲°C با استفاده از ترکیبی از کاتالیست‌های زیبویتی میزان مصرف انرژی را برای احیا ۲۴٪ تا ۳۱٪ کاهش دادند [۵].

در سال‌های اخیر، زارعی و همکارانش برای افزایش بازده فرایند جذب و دفع کربن‌دی‌اکسید از نانوذرات TiO_2 ، SiO_2 ، ZnO ، CuO و Fe_3O_4 و محلول ۱۰ درصد وزنی متیل‌دی‌اتانول آمین استفاده کردند. آنان نشان دادند که در فرایند دفع دو نانوذره CuO و Fe_3O_4 در کسر وزنی‌های ۰/۵ درصد بیشترین اثرگذاری را بر افزایش دفع کربن‌دی‌اکسید داشتند. نتایج آنان نشان داد که دو نانوسیال به‌ترتیب منجر به افزایش ۵/۵٪ و ۴۶/۷٪ در بازده فرایند احیا شد [۱۹].

بعدها جذب کربن‌دی‌اکسید، جداسازی آن و احیای محلول یکی از عوامل بسیار مهم در این فرایند محسوب می‌شود؛ به‌طوری‌که، ۷۰-۸۰ درصد هزینه کل، صرف این فرایند شده که این یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها است [۱۳].

در این پژوهش از MDEA به‌عنوان حلال مادر به‌جای MEA و افزودنی پپیرازین و مونواتانول آمین با غلظت‌های مشخص، برای افزایش راندمان دفع استفاده شده‌است.

PH مخلوط‌های سه‌آمینی PZ، MEA و MDEA حدود ۱۱ است (در مقدار پایین CO_2). این مقدار PH از بیشترین حد PZC برای $\gamma-Al_2O_3$ که برابر با ۹/۷ است، بیشتر است. در نهایت، سطح $\gamma-Al_2O_3$ بار منفی خواهد داشت. این شرایط به پذیرش H^+ از $AmineH^+$ و انتقال آن به آمین کمک می‌کند تا انتقال H^+ به آب. هم‌چنین، میزان بازی بودن آمین نسبت به آب بیشتر است. در مقدارهای بالای CO_2 ، مقدار PH محیط کمتر است و در نهایت، روی بار $\gamma-Al_2O_3$ تأثیرگذار خواهد بود و تأثیر منفی در فرایند دارد [۱۷]. پس $\gamma-Al_2O_3$ در مقدار پایین CO_2 و محیط بازی تر بهتر عمل می‌کند. در این حالت $\gamma-Al_2O_3$ به‌عنوان گیرنده الکترون عمل می‌کند. به‌عنوان نقش کاتالیست، جای‌گزین HCO_3^- ، به‌صورت AlO_2^- در آمده و آماده پذیرش H^+ است [۱۸].

از مشکلات فرایند دفع کربن‌دی‌اکسید و احیای محلول آمین‌ها- به‌دلیل بالا بودن دما- تولید بخارات خورنده و آسیب به تجهیزات است. انرژی مصرفی بالا برای این فرایند، چالشی مهم و بزرگ است [۱۴].

1. Idem
2. Yan
3. Liang

4. Bhatti

برای محاسبه کربن‌دی‌اکسید خروجی در فاز گاز از آنالایزر کاتالیست گاما آلومینا برای دفع بیشتر کربن‌دی‌اکسید با ظرفیت بالا و همچنین، دفع بهتر، راحت‌تر و احیای کم‌هزینه‌تر است.

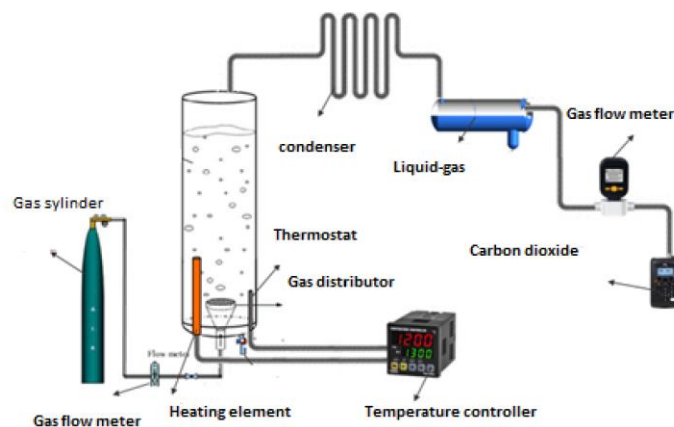
۲. موادها و روش‌ها

۲-۱ مواد اولیه مورد استفاده

مواد شیمیایی استفاده شده در این پژوهش شامل موارد زیر است: پودر جامد گاما آلومینا ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) با جرم مولکولی $101/9$ گرم بر مول، سطح ویژه 190 متر مربع بر گرم، قطر و حجم حفره‌ها به ترتیب 2 تا 50 نانومتر و 7 میلی‌لیتر بر گرم تهیه شده از شرکت مرک^۱ آلمان، مونواتانول آمین ($\text{C}_2\text{H}_7\text{NO}$) با جرم مولکولی $61/08$ گرم بر مول تهیه شده از شرکت نوترون ایران، متیل‌دی‌اتانول آمین ($\text{CH}_3\text{N}(\text{C}_2\text{H}_4\text{OH})_2$) با جرم مولکولی $119/16$ گرم بر مول تهیه شده از شرکت مرک آلمان، پودر جامد پیپرازین ($\text{C}_4\text{H}_{10}\text{N}_2$) با جرم مولکول $86/14$ گرم بر مول تهیه شده از شرکت مرک آلمان، هیدروکسید سدیم (NaOH) با جرم مولی 40 گرم بر مول تهیه شده از شرکت مرک آلمان، آب مقطر (H_2O)، پودر جامد باریم کلرید 2 آبه ($\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) با جرم مولی $208/2$ گرم بر مول و چگالی $3/86$ گرم بر سانتیمتر مکعب تهیه شده از شرکت مرک آلمان.

۲-۲ تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده

تجهیزات آزمایشگاهی به کاررفته در این پژوهش چنین است: ترازو، فلومتر، کوره، پمپ آکواریوم، همزن مغناطیسی، کندانسور، بشر، کاغذ صافی، بورت، آنالایزر کربن‌دی‌اکسید.



شکل ۱. طرحواره سامانه آزمایشگاهی مورد استفاده.

Figure 1. Schematic of the laboratory system used.

1. Merck

۲-۴ مراحل انجام آزمایش

مراحل انجام این آزمایش به صورت زیر است:

مرحله ۱: در ابتدا حجم ۲ لیتر از محلول آزمایش را با غلظت‌های مختلف و مشخص تهیه و وارد فلاسک می‌کنیم.

مرحله ۲: کربن‌دی‌اکسید خالص را با فلوی ثابت ۲۲۰ ml/min از راه سنگ هوای تعبیه شده در سامانه، در دمای محیط و فشار ۱ اتمسفر وارد محلول می‌کنیم تا عملیات جذب به وسیله آمین آغاز شود.

مرحله ۳: پس از گذشت زمان، در بازه‌های ۱۰ و ۲۰ و ۳۰ و ۴۰ دقیقه بعد از شروع آزمایش، مقدار ۱۰ میلی‌لیتر از محلول را به عنوان نمونه برای تعیین میزان بار کربن‌دی‌اکسید در فاز مایع از سامانه خارج می‌کنیم. نمونه جدا شده از سامانه، طبق روش توزین رسوب بررسی می‌شود.

مرحله ۴: پس از اتمام زمان و فرایند جذب، سنگ هوا را از کپسول کربن‌دی‌اکسید جدا می‌کنیم.

مرحله ۵: مقدار ۱۵ گرم کاتالیست گاما-آلومینا را وارد محلول و به سامانه اضافه می‌کنیم.

مرحله ۶: کنترلر دما را بر روی ۹۰ درجه سلسیوس تنظیم می‌کنیم.

مرحله ۷: به وسیله پمپ اکواریوم مسیر آب کندانسور را که دبی آن ۳۰۰ لیتر بر ساعت است، برقرار می‌کنیم.

مرحله ۸: سنگ هوا را به پمپ هوا وصل و دبی آن را روی ۲۴۰ میلی‌لیتر بر دقیقه تنظیم می‌کنیم.

هیتر استفاده شده در سامانه باید به گونه‌ای عمل کند که حین ۲ ساعت آزمایش دما بین محدوده ۸۵-۹۵ درجه سلسیوس باشد.

مرحله ۹: جریان گاز خروجی از کندانسور را به آنالایزر کربن‌دی‌اکسید متصل می‌کنیم تا شاهد تغییرات غلظت کربن‌دی‌اکسید خروجی در جریان گاز باشیم.

مرحله ۱۰: جریان گاز خروجی از آنالایزر را به فلومتر یا دبی‌سنج گازی برای مشاهده تغییرات دبی گاز خروجی متصل می‌کنیم.

مرحله ۱۱: در بازه زمان‌های ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، تا ۱۲۰ دقیقه دبی گاز خروجی سامانه به وسیله فلومتر اندازه‌گیری می‌شود.

۳. ارائه نتایج

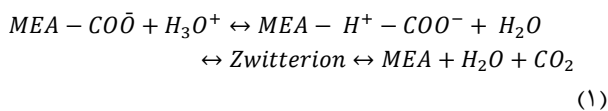
تأثیر حضور کاتالیست و استفاده از مخلوطی از آمین‌ها برای افزایش و بهبود بازده فرایند دفع و احیا، هدف اصلی و نقطه تمرکز این

پژوهش است. در این قسمت به ارائه نتایج به دست آمده در آزمایش‌ها می‌پردازیم. همه آزمایش‌های مربوط به دفع کربن‌دی‌اکسید در مدت زمان ۲ ساعت انجام شده و PH تمامی محلول‌های مورد آزمایش بین ۹/۹ و ۱۱/۲ است.

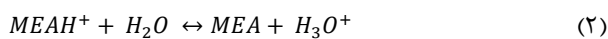
۳-۱ تأثیر مخلوط آمین‌ها در بهبود بازده فرایند احیای حلال و دفع کربن‌دی‌اکسید

سازوکار احیای حلال برای یک آمین نوع اول نظیر مونواتانول آمین شامل دو مرحله است: (الف) تجزیه کربمات^۱ تشکیل شده با پروتون و (ب) حذف پروتون از AmineH⁺ [۱۵]. این سازوکار که به عنوان Zwitterion شناخته می‌شود به صورت زیر است:

مرحله الف - شکست پیوند کربمات و آزاد شدن کربن‌دی‌اکسید

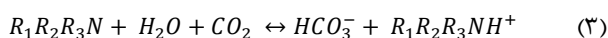


مرحله ب - انتقال پروتون از آمین



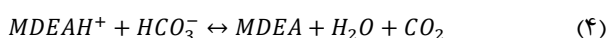
در اینجا دو دلیل برای بالا بودن میزان مصرف انرژی برای احیای MEA وجود دارد. یکی این که هر دو واکنش به شدت گرماگیر است و انرژی زیادی برای انجام واکنش لازم دارد. دوم این که انتقال پروتون از آمین به آب بسیار سخت است، زیرا به دلیل خنثی بودن H₂O نسبت به AmineH⁺ واکنش دومی در آزادسازی پروتون برای انجام واکنش اول، به ندرت رخ می‌دهد [۱۶].

آمین نوع سوم در حضور کربن‌دی‌اکسید گونه‌ای متفاوت از واکنش را دارد که در زیر آمده است. بنابراین، آمین نوع سوم با کربن‌دی‌اکسید به طور مستقیم وارد واکنش می‌شود و در نهایت، منجر به ایجاد آمین پروتئینه و بی‌کربنات می‌شود.



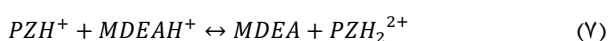
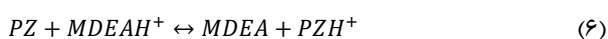
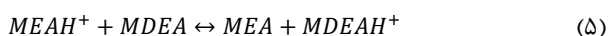
1. Carbamate

با اضافه کردن MDEA، HCO_3^- در محلول حاضر می‌شود و نقش بسیار مهمی را برای ما در فرایند احیا اجرا می‌کند.

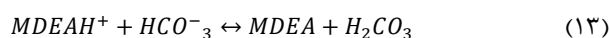
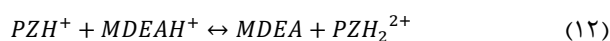
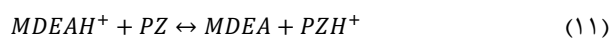
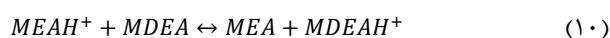
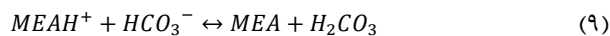


وقتی از پیپرازین و متیل‌دی‌اتانول‌آمین در محلول مونواتانول‌آمین استفاده‌شود، واکنش انتقال پروتون از آمین به صورت چهار واکنش زیر درمی‌آید که انرژی فعال‌سازی را برای محلول مخلوط کاهش ۲ می‌دهد و در نهایت، نیروی محرکه افزایش می‌یابد. انتقال پروتون از $MEAH^+$ به آمین‌های اساسی نظیر MDEA و PZ از آب آسان‌تر و راحت‌تر است.

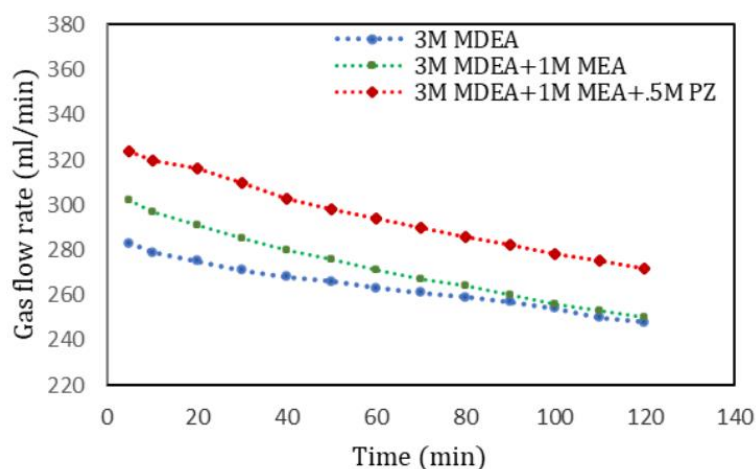
مخلوط‌های سه‌آمینی بدون حضور بی‌کربنات:



مخلوط سه‌آمینی در حضور بی‌کربنات:



در محلول‌های آمینی دو گیرنده پروتون وجود دارد؛ یکی H_2O و دیگری HCO_3^- . محلول MEA فقط یک پروتون می‌تواند مهیا و آزاد کند ($MEAH^+$) در حالی که برای مخلوط سه‌آمینی چهار پروتون آزاد داریم ($MEAH^+$, $MDEAH^+$, PZH^+ , PZH_2^{2+}). بنابراین، در محلول MEA دو الگو برای انتقال پروتون و در محلول مخلوط سه‌آمینی، هشت الگو برای انتقال پروتون وجود دارد. پس افزودن پیپرازین و متیل‌دی‌اتانول‌آمین به محلول مونواتانول‌آمین، انرژی فعال‌سازی را برای انتقال پروتون به شدت کم می‌کند. همان‌طور که در شکل (۲) پیدا است، بیشترین میزان دفع مربوط به زمانی است که از مخلوط آمین‌های ۳ مولار متیل‌دی‌اتانول‌آمین، ۱ مولار مونواتانول‌آمین و ۵/۱ مولار پیپرازین استفاده شده. میزان دفع در این حالت برابر با ۲۶/۱ درصد است.



شکل ۲. تغییرات نرخ جریان گاز خروجی برحسب زمان در طی فرایند احیا برای آمین‌های مختلف با غلظت مشخص در دمای $90^\circ C$ و فشار ۱ اتمسفر.

Figure 2. Variations of the exhaust gas flow rate in terms of time during the reduction process for different amines with a certain concentration at a temperature of $90^\circ C$ and a pressure of 1 atmosphere.

۳-۲-۱ تأثیر حضور کاتالیست گاما آلومینا در بهبود بازده فرایند احیای محلول‌های مختلف

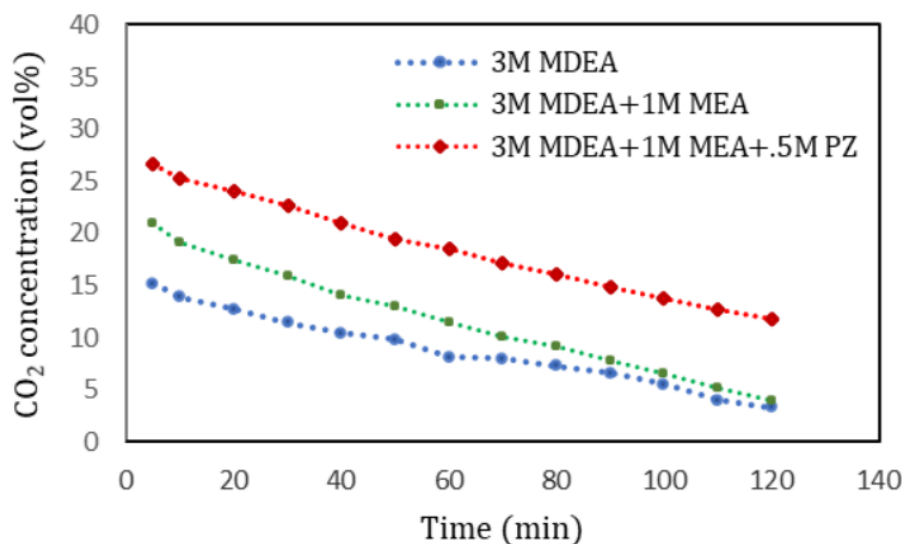
در شکل (۴) و (۵) برای مشاهده تأثیر حضور کاتالیست در فرایند دفع و احیا، تغییرات نرخ جریان گاز خروجی سامانه در حین فرایند دفع و احیا برای محلول‌های مختلف با غلظت‌های معین و مقدارهای متغیر کاتالیست، تغییرات کسر حجمی کربن‌دی‌اکسید در جریان گاز خروجی سامانه برحسب زمان در طی فرایند آمده‌است.

در شکل (۵) پیدااست که با افزودن کاتالیست به محلول، نمودار جدید از نمودار اولیه- که بدون کاتالیست است- بالاتر و میزان جریان گاز خروجی از سامانه، بیشتر است. این امر بیانگر دفع بیشتر کربن دی‌اکسید از محلول و احیای بهتر است. باتوجه‌به شکل (۵) هرچه مقدار کاتالیست در سامانه بیشتر باشد، گاز خروجی و درنهایت دفع کربن‌دی‌اکسید بیشتر است که در این تست، بیشترین دفع مربوط به زمانی است که از ۴۵ گرم کاتالیست استفاده شده‌است. از شکل (۴) و (۵) این نتیجه به دست می‌آید که علاوه بر افزودن کاتالیست به سامانه، افزایش بهینه مقدار کاتالیست و استفاده از مخلوط آمین‌های مناسب، باعث افزایش دفع کربن‌دی‌اکسید از سامانه، احیای بهتر حلال و درنهایت افزایش راندمان خواهد شد.

در شکل (۳)، میزان غلظت کربن‌دی‌اکسید در فاز گاز برحسب کسر حجمی نشان داده شده‌است. باگذشت زمان برای هر محلول، میزان غلظت کربن‌دی‌اکسید موجود در فاز گاز در حال کاهش است که حاکی از آن است که دفع در حال انجام و کربن‌دی‌اکسید در حال خروج از سامانه است. باتوجه‌به شکل (۳) میزان غلظت کربن‌دی‌اکسید در ابتدا برای محلول ۳ آمینی، سپس محلول ۲ آمینی به ترتیب از محلول تک‌آمینی بیشتر است، پس نتیجه گرفته می‌شود که مخلوط آمین‌ها عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند و میزان دفع کربن‌دی‌اکسید را بیشتر می‌کنند.

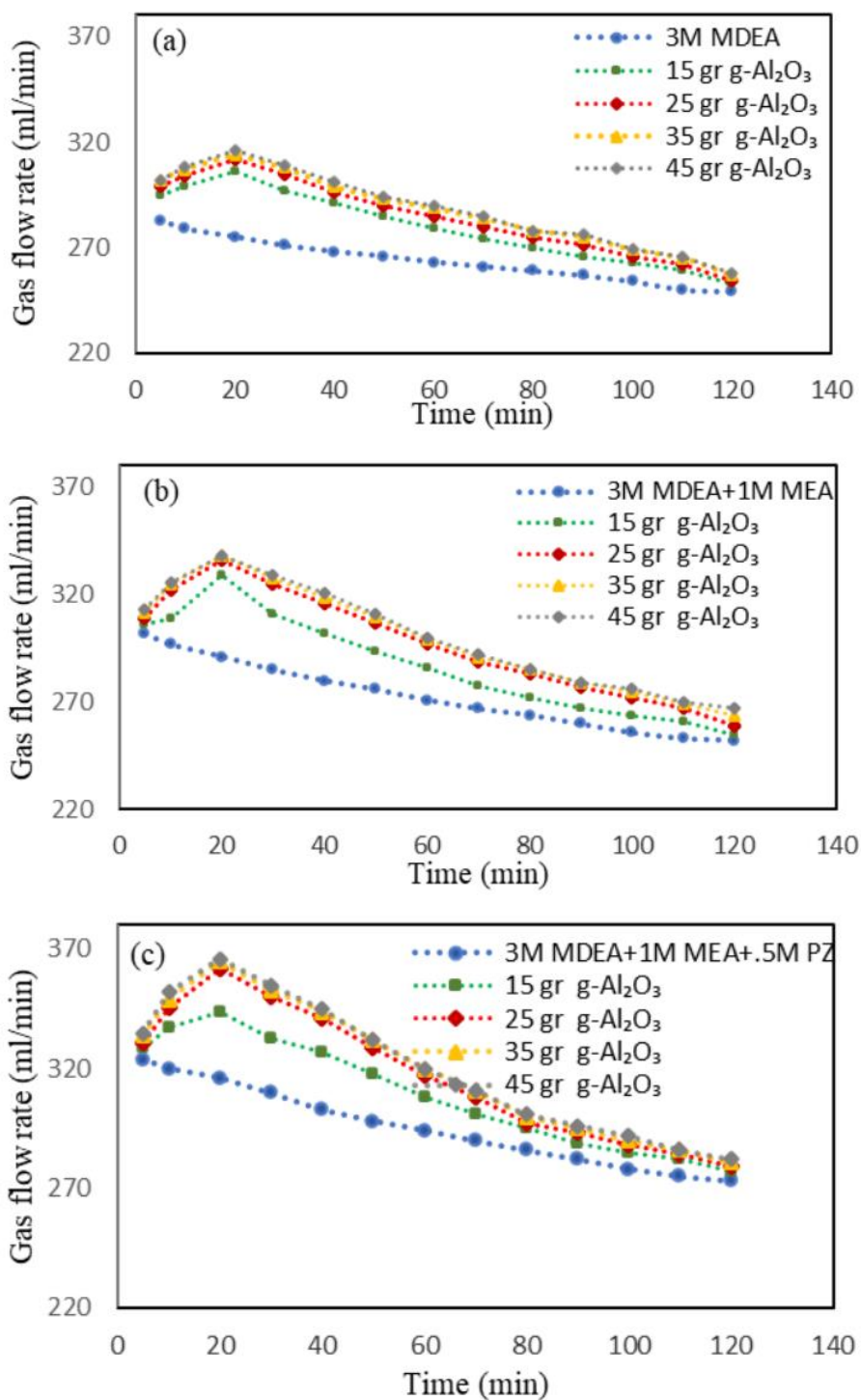
۳-۲ تأثیر حضور کاتالیست گاما آلومینا در بهبود بازده فرایند احیای حلال و دفع کربن‌دی‌اکسید

در فرایند احیای حلال و دفع کربن‌دی‌اکسید علاوه بر تأثیرات انتقال جرمی، تأثیر حضور کاتالیست نیز در بهبود فرایند انتقال حرارت مطرح است. به همین سبب، کاتالیست استفاده شده علاوه بر مهیا کردن شرایط هیدرودینامیکی مناسب، باید در بهبود مشخصه‌های انتقال حرارت مانند تسریع در توزیع حرارت در محیط سیال نیز به طور قابل توجهی مؤثر باشد. از این‌رو، میزان دفع کربن‌دی‌اکسید در حضور کاتالیست به دلیل بهبود شرایط انتقال جرم و حرارت، به میزان چشم‌گیری افزایش می‌یابد.



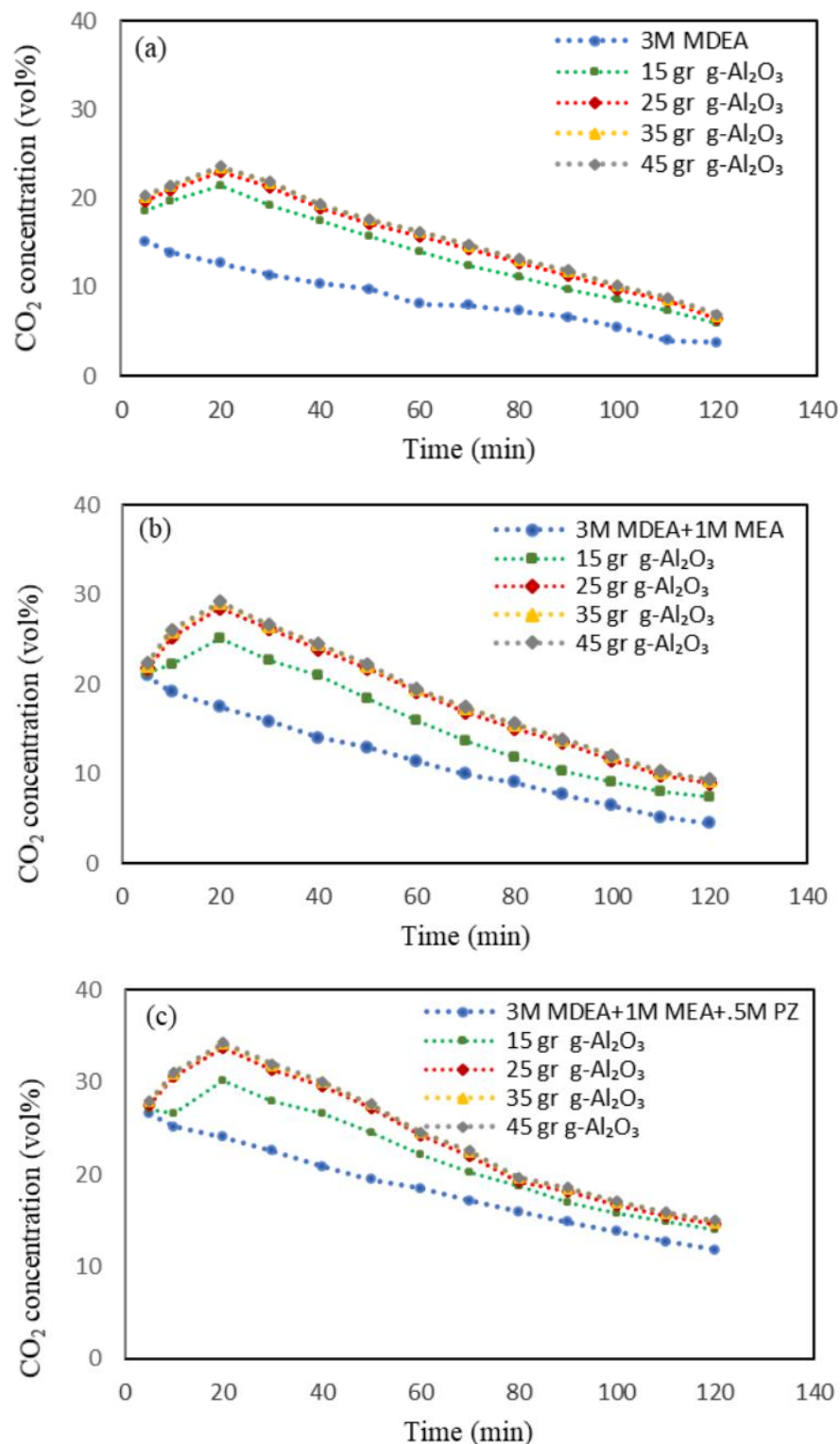
شکل ۳. تغییرات کسر حجمی کربن‌دی‌اکسید در جریان گاز خروجی برحسب زمان در طی فرایند احیا برای آمین‌های مختلف با غلظت مشخص در دمای ۹۰°C و فشار ۱ اتمسفر.

Figure 3. Changes in volume fraction of carbon dioxide in the exhaust gas flow in terms of time during the reduction process for different amines with a certain concentration at a temperature of 90°C and a pressure of 1 atmosphere.



شکل ۴. تغییرات نرخ جریان گاز خروجی درحین فرایند احیا با مقادیر مختلف کاتالیست گاما آلومینا در دمای ۹۰°C و فشار ۱ اتمسفر، (a) محلول متیلدی اتانول آمین، (b) محلول متیلدی اتانول آمین و مونواتانول آمین، (c) محلول متیلدی اتانول آمین و مونواتانول آمین و پپرازین.

Figure 4. Variations in the output gas flow rate during the regeneration process with different amounts of gamma alumina catalyst at a temperature of 90°C and a pressure of 1 atmosphere, (a) MDEA, (b) MDEA, MEA, (c) MDEA, MEA, PZ.



شکل ۵. تغییرات کسر حجمی کربن‌دی‌اکسید در جریان گاز خروجی در حین فرایند احیا با مقادیر مختلف کاتالیست گاما آلومینا در دمای ۹۰ °C و فشار ۱ اتمسفر، (a) محلول متیل‌دی‌اتانول‌آمین، (b) محلول متیل‌دی‌اتانول‌آمین و مونواتانول‌آمین، (c) محلول متیل‌دی‌اتانول‌آمین، مونواتانول‌آمین و پیپرازین.

Figure 5. Changes in the volume fraction of carbon dioxide in the exhaust gas flow during the regeneration process with different amounts of gamma alumina catalyst at a temperature of 90°C and a pressure of 1 atmosphere, (a) MDEA, (b) MDEA, MEA, (c) MDEA, MEA, PZ.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، علاوه بر بررسی تأثیر کاتالیست $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ در دمای 90°C و فشار اتمسفری بر روی فرایند دفع کربن‌دی‌اکسید و احیای محلول، به بررسی تأثیر مونواتانول‌آمین ۱ مولار و پیپرازین ۰/۵ مولار به‌عنوان افزودنی به محلول پایه متیل‌دی‌اتانول‌آمین ۳ مولار برای ایجاد مخلوط مناسب پرداخته شده‌است. از این‌رو، مشاهده شد که با افزودن مونواتانول‌آمین ۱ مولار به سیال پایه (متیل‌دی‌اتانول‌آمین ۳ مولار) و هم‌چنین، افزودن هم‌زمان مونواتانول‌آمین ۱ مولار و پیپرازین ۰/۵ مولار به سیال پایه (متیل‌دی‌اتانول‌آمین ۳ مولار)، میزان جذب کربن‌دی‌اکسید زیاد می‌شود و میزان جذب به ترتیب ۹٪ و ۱۴/۶٪ افزایش می‌یابد. در این حالت، میزان دفع کربن‌دی‌اکسید، به دلیل دفع بهتر به ترتیب ۱۵٪ و ۲۶/۱٪ افزایش یافته‌است. هم‌چنین، با افزودن کاتالیست $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ با مقادیر مختلف به محلول‌ها، میزان دفع کربن‌دی‌اکسید بین ۶/۳٪ تا ۱۷/۹٪ افزایش یافت. بیشترین افزایش میزان دفع کربن‌دی‌اکسید مربوط به مقدار ۴۵ گرم کاتالیست در مخلوط سه‌آمینی متیل‌دی‌اتانول‌آمین ۳ مولار، مونواتانول‌آمین ۱ مولار و پیپرازین ۰/۵ مولار است که نسبت به سیال پایه ۳۹/۳٪ افزایش یافته‌است.

مراجع

- [5] Bhatti, U. H., Shah, A., Khan, H., Park, C., Nam, S., & Baek, I. (2020). Catalytic activity of facilely synthesized mesoporous HZSM-5 catalysts for optimizing the CO₂ desorption rate from CO₂-rich amine solutions., *Chemical Engineering Journal*, 389, 123439.
- [6] Bui, M., Adjiman, C., Anthony, E., Brown, S., Fuss, S., Galindo, A., & Hackett, L. (2018). Carbon capture and storage (CCS): the way forward., *Energy & Environmental Science*, 11(5), 1062-1176.
- [7] Yin, J., Qin, C., Feng, B., Ge, L., Luo, C., Liu, W., & An, H. (2014). Calcium looping for CO₂ capture at a constant high temperature., *Energy & Fuels*, 28(1), 307-318.
- [8] Noble, R. R., Stalker, L., Wakelin, S., Wakelin, S., Leybourne, M., Hortle, A., & Michael, K. (2012). Biological monitoring for carbon capture and storage—a review and potential future developments., *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 10, 520-535.
- [9] Bhattacharyya, S., Filippov, A., & Shah, F. (2016). Insights into the effect of CO₂ absorption on the ionic mobility of ionic liquids., *Physical Chemistry Chemical Physics*, 18(41), 28617-28625.
- [10] Wang, M., Joel, A., Ramshaw, C., Eimer, D., & Musa, N. (2015). Process intensification for post-combustion CO₂ capture with chemical absorption: A critical review., *Applied Energy*, 158, 275-291.
- [11] Plechkova, N. V. and Seddon, K. (2008). Applications of ionic liquids in the chemical industry., *Chemical Society Reviews*, 37(1), 123-150.
- [12] Smit, B. (2016). Carbon capture and storage: introductory lecture., *Faraday discussions*, 192, 9-25.
- [13] Bairq, Z. A. S., Gao, H., Murshed, F., Tontiwachwuthikul, P., & Liang, Z. (2020). Modified heterogeneous catalyst-aided regeneration of CO₂ capture amines: a promising perspective for a drastic reduction in energy consumption., *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(25), 9526-9536.
- [14] Srisang, W., Pouryousefi, F., Osei, P., Decardi-Nelson, B., Akachuku, A., Tontiwachwuthikul, P., & Idem, R. (2018). CO₂ capture efficiency and heat duty of solid acid catalyst-aided CO₂ desorption using blends of primary-tertiary amines., *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 69, 52-59.
- [15] Zhang, X., Liu, H., Li, W., Xiao, M., Gao, H., & Liang, Z. (2017). Reduction of energy requirement of CO₂ desorption from a rich CO₂-loaded MEA solution by using solid acid catalysts., *Applied Energy*, 202, 673-684.
- [1] Babamohammadi, S., Shamiri, A., & Aroua, M. (2015). A review of CO₂ capture by absorption in ionic liquid-based solvents., *Reviews in Chemical Engineering*, 31(4), 383-412.
- [2] Idem, R., Wilson, M., Tontiwachwuthikul, P., Chakma, A., & Gelowitz, D. (2006). Pilot plant studies of the CO₂ capture performance of aqueous MEA and mixed MEA/MDEA solvents at the University of Regina CO₂ capture technology development plant and the boundary dam CO₂ capture demonstration plant., *Industrial & engineering chemistry research*, 45(8), 2414-2420.
- [3] Yan, S., He, Q., Ai, P., Wang, Y., & Zhang, Y. (2013). Regeneration performance of concentrated CO₂-rich alkanolamine solvents: The first step study of a novel concept for reducing regeneration heat consumption by using concentration swing absorption technology., *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 70, 86-94.
- [4] Liang, Z., Idem, R., Tontiwachwuthikul, P., Yu, F., Rongwong, W., & Liu, H. (2016). Experimental study

- [16] Zhang, X., Huang, Y., Gao, H., Luo, X., Liang, Z., & Tontiwachwuthikul, P. (2019). Zeolite catalyst-aided tri-solvent blend amine regeneration: An alternative pathway to reduce the energy consumption in amine-based CO₂ capture process., *Applied Energy*, 240, 827-841.
- [17] Shi, H., Naami, A., Idem, R., & Tontiwachwuthikul, P. (2014). Catalytic and non catalytic solvent regeneration during absorption-based CO₂ capture with single and blended reactive amine solvents., *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 26, 39-50.
- [18] Zhang, S. and Lu, Y. (2017). Surfactants facilitating carbonic anhydrase enzyme-mediated CO₂ absorption into a carbonate solution., *Environmental science & technology*, 51(15), 8537-8543.
- [19] Zarei, F., Jahromi, F., Elhambakhsh, A., & Keshavarz, P. (2023). Enhanced CO₂ absorption and reduced regeneration energy consumption using modified magnetic NPs., *Energy*, 278, 127776.
- [20] Sodeifian, G. (1389). Comparison of absorption methods and permeable membranes for carbon dioxide recovery from post combustion processes., *Juornal of iranian chemical engineering*, 9(49), 52-60, [In persian].
- [21] Bahoush, M., Shokrollahzadeh, S., & Kashi, I. (1395). An overview of the applications of direct osmosis membrane process, *Juornal of iranian chemical engineering*, 15(89), 18-34, [In persian].