

مقایسه عملکرد جاذب‌های اصلاح شده کربن فعال و آلومینا با محلول‌های هیدروکسیدی برای افزایش شدت جذب گاز کربن دی‌اکسید

نیوشا کربلایی محمد

دانشکده شیمی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

احمد قائمی**

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

چکیده: در این پژوهش برای افزایش شدت جذب سطحی گاز کربن دی‌اکسید، جاذب‌های کربن فعال و آلومینای فعال با محلول‌های سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید اصلاح یافتند. تأثیر پارامترهای گوناگون عملیاتی از جمله مقدار جاذب، غلظت محلول هیدروکسیدی، دما و فشار بر فرایند جذب سطحی بررسی شد. نتیجه‌های آزمایش‌های جذب نشان داد که با کاهش دما و افزایش فشار، ظرفیت جذب گاز کربن دی‌اکسید افزایش می‌یابد و شرایط بهینه جذب کربن دی‌اکسید مربوط به دمای ۲۰ درجه سلسیوس، فشار ۶ بار، مقدار ۲ گرم جاذب و غلظت ۳۰ درصد وزنی سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید می‌باشد. در این شرایط عملیاتی، ظرفیت جذب کربن دی‌اکسید برای کربن فعال اصلاح شده با محلول‌های هیدروکسیدی سدیم و پتاسیم به ترتیب برابر با ۱۰۴/۳۲ و ۸۴/۰۰ میلی‌گرم بر گرم جاذب به دست آمد که نشان دهنده افزایش ۸۳ و ۴۸ درصدی کربن فعال اصلاح یافته در مقایسه با کربن فعال اصلاح نیافته می‌باشد. این در حالیست که ظرفیت جذب کربن دی‌اکسید برای آلومینای فعال اصلاح شده با محلول‌های هیدروکسیدی سدیم و پتاسیم به ترتیب برابر با ۱۴۶/۷۰ و ۱۳۰/۸۴ میلی‌گرم بر گرم جاذب به دست آمد که نشان دهنده افزایش ۶۵ و ۴۷ درصدی آلومیناهای فعال اصلاح یافته در مقایسه با آلومینای فعال اصلاح نیافته می‌باشد. در حالت کلی جاذب آلومینای فعال اصلاح یافته در مقایسه با کربن فعال اصلاح یافته دارای ظرفیت جذب کربن دی‌اکسید بالاتری می‌باشد.

کلمات کلیدی: جذب شیمیایی، کربن دی‌اکسید، سدیم هیدروکسید، پتاسیم هیدروکسید، کربن فعال، آلومینای فعال.

KEYWORDS: Chemical Adsorption, CO₂, NaOH, KOH, Activated Carbon, Activated Alumina.

مقدمه

باعث ایجاد مشکل‌های زیست محیطی شامل افزایش دما، آسیب دیدن لایه‌ی اوزون و تغییر سطح آب دریاها شده است. کربن دی‌اکسید مهم‌ترین

امروزه نگرانی‌های جهانی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای و تغییرهای آب و هوایی ناشی از آن در حال افزایش است. افزایش گازهای گلخانه‌ای

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

* عهده‌دار مکاتبات

گوناگونی مانند مواد معدنی متخلخل، کربن فعال، آلومینای فعال، اکسیدهای بازی و پایه آمینی برای جذب آلودگی کربن دی‌اکسید از محیط زیست مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۷، ۱۹-۲۴]. در تلاش برای پیدا کردن جاذب‌های کارآمد و مؤثر برای جذب گاز کربن دی‌اکسید، مطالعه‌های اندکی برای استفاده از کربن فعال و آلومینای فعال اصلاح شده صورت گرفته شده است. از سوی دیگر ثابت شده است که سایت‌های فعال فیزیکی و شیمیایی بر روی سطح این جاذب‌ها نهفته شده که گرایش به مولکول‌های CO₂ دارد. از آنجایی که گاز کربن دی‌اکسید یک گاز اسیدی است اصلاح سطح این جاذب‌های جامد با ترکیبات بازی می‌تواند بخش‌های عامل‌دار فعال‌تری را برای جذب CO₂ فراهم کند. اصلاح سطح جاذب‌ها با آمین‌ها روشی امیدوارکننده برای افزایش ظرفیت جذب CO₂ می‌باشد، ولی جاذب‌ها با پایه‌ی آمینی نیاز به انرژی بالایی دارند و دارای تهدید تخریب با اکسایش می‌باشند که منجر به خوردگی می‌شود [۲۶، ۲۵، ۱۶]. اصلاح جاذب‌های متخلخل با محلول‌های هیدروکسیدی از جمله NaOH و KOH روش به‌نسبت نوینی به شمار می‌آید که پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی جذب گاز CO₂ توسط جاذب‌های متخلخل اصلاح شده با محلول‌های هیدروکسیدی بیانگر اهمیت کاربرد این روش در جذب گاز CO₂ است [۲۵، ۲۲، ۲۰]. نتیجه‌های گوناگون نشان می‌دهد که شدت جذب جاذب‌های معدنی با اصلاح هیدروکسیدهای گوناگون افزایش یافته است. به‌عنوان نمونه *اسرنسک نازال*^۱ و *همکاران* [۲۴] اصلاح کربن فعال تجاری را با محلول‌های KOH، ZnCl₂ و K₂CO₃ انجام دادند. در فشار عملیاتی ۴۰ بار و دمای ۴۰ درجه سلسیوس شدت جذب کربن دی‌اکسید برای کربن فعال تجاری خالص، اصلاح شده با محلول‌های KOH، ZnCl₂ و K₂CO₃ به ترتیب ۸/۰۷، ۱۴/۴۴، ۹/۱۵ و ۸/۷۰ میلی‌گرم بر گرم به‌دست آمد. در مطالعه‌ای دیگر تن^۲ و *همکاران* [۲۰] کربن فعال گرانولی را با محلول NaOH در غلظت‌های ۲۰، ۳۲، ۴۰ و ۴۸ درصد برای حذف کربن دی‌اکسید در راکتور بستر ثابت مورد استفاده قرار دادند. مقدار شدت جذب ۲۷/۱۰، ۲۴/۰۳ و ۱۶/۶۲ میلی‌گرم بر گرم در دمای ۳۵، ۴۵ و ۵۵ درجه سلسیوس به دست آمد. در گزارشی دیگر آوتا^۳ و *همکاران* [۲۲] آلومینای فعال را محلول‌های با غلظت گوناگون از NaOH (۱۰-۴۰٪) اصلاح کردند و آزمایش‌ها را با تغییر در پارامترهای دما و غلظت ورودی گاز پیش بردند. مقدار شدت جذب کربن دی‌اکسید در غلظت

منبع ایجاد آلودگی و انتشار گازهای گلخانه‌ای است که با فعالیت‌های بشری در حال افزایش در جو می‌باشد [۴-۱]. برای کاهش اثرهای زیست‌محیطی گازهای گلخانه‌ای باید از وارد شدن این گازها به اتمسفر جلوگیری کرد. به طور کلی حذف CO₂ به چهار روش تقطیر برودتی، خالص‌سازی غشایی، جذب با استفاده از مایعات و جذب سطحی با استفاده از جامدات محدود می‌شود [۹-۶]. تقطیر برودتی در جداسازی گازها بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد ولی استفاده از این فناوری برای گاز CO₂ به علت نیاز به انرژی زیاد رد شده است. غشا یک عامل جداسازی مؤثر برای نمونه‌های توده‌ای (زمانی که مقدار گاز زیاد باشد) می‌باشد ولی زمانی که مقدار CO₂ در مخلوط گازی جزئی باشد، کارایی غشا کاهش یافته و جداسازی مشکل می‌شود [۱۱-۹]. از میان این روش‌ها، فرایند جذب با مایعات یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای جذب CO₂ در مقیاس بالا با استفاده از محلول‌های آلکیل آمین مانند مونواتانول آمین و دی‌اتانول آمین و یا سیالات دیگر با ماهیت بازی می‌باشد [۱۴-۱۲]. با این وجود، این روش نیز دارای عیب‌هایی از جمله بالا بودن سرعت خوردگی تجهیزها به علت فرایند تبخیر، تخریب اکسایشی جاذب، مصرف انرژی بالا برای بازتولید آمین، کاهش تأثیر آن با گذشت زمان به دلیل پایداری گرمایی پایین و ایجاد کف در ناحیه‌ی تماس مایع با گاز می‌باشد [۱۷-۱۵].

برای دوری از عیب‌های یاد شده در استفاده از جاذب‌های آمینی محلول، یکی از فناوری‌های جایگزین و مؤثر برای حذف CO₂، جذب سطحی با استفاده از جاذب‌های متخلخل جامد می‌باشد که از این روش به دلیل تطبیق‌پذیری و کارایی بالای آن به طور گسترده استفاده می‌شود. به طور مثال یکی از کاربردهای جاذب‌های جامد برای غنی کردن بیهیدروژن دارای ناخالص‌های گازی به‌ویژه کربن دی‌اکسید است که عملکرد بسیار مناسبی از خود نشان می‌دهد [۱۸]. به طور کلی جذب گاز CO₂ با استفاده از جاذب‌های جامد روش کاربردی می‌باشد زیرا این روش منجر به کاهش پتانسیل هزینه‌های انرژی برای احیای دوباره در مقایسه با فرایند جذب به وسیله‌ی جاذب‌های آمینی مایع برای شیرین‌سازی گاز طبیعی می‌شود. همچنین این روش توانایی بالا برای احیا، ظرفیت بالای جذب CO₂ و خوردگی پایین دارد [۲۱-۱۹، ۱۷، ۱۶]. به‌طور کلی جذب CO₂ توسط جاذب‌های جامد به صورت فیزیکی یا شیمیایی در حال توسعه می‌باشد، ولی پیش از طراحی یک فرایند جذب، انتخاب یک جاذب مناسب با ظرفیت بالا برای جذب CO₂ موضوع خیلی مهمی است که باید در انتخاب آن دقت شود. در فرایند جذب سطحی، جاذب‌های

(۱) Sreñscek-Nazzal et al

(۳) Auta et al.

(۲) Tan et al.

نخست غلظت‌های گوناگون ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد از محلول سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید تهیه شد و سپس ۳۰ گرم جاذب، در ۱۰۰ میلی‌لیتر از غلظت‌های گوناگون محلول آبی NaOH و KOH (۱۰-۴۰ درصد) غوطه‌ور شد و به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط باقی ماند تا جاذب به خوبی آغشته شود. سپس صاف کردن جاذب به کمک کاغذ صافی انجام شد و سپس برای خشک شدن، نمونه‌ها در آون با دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس به مدت ۶ ساعت قرار گرفتند. نام‌گذاری نمونه‌ها با توجه به درصد مصرفی محلول‌های سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید به ترتیب برای درصد وزنی‌های گوناگون ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد برای جاذب آلومینای فعال به صورت: 10NaOH-AA، 20NaOH-AA، 30NaOH-AA، 40NaOH-AA، 10KOH-AA، 20KOH-AA، 30KOH-AA و 40KOH-AA برای جاذب کربن فعال به صورت: 10NaOH-AC، 20NaOH-AC، 30NaOH-AC، 40NaOH-AC، 10KOH-AC، 20KOH-AC، 30KOH-AC و 40KOH-AC انجام شد.

شرح دستگاه جذب

برای به‌دست آوردن داده‌های تجربی برای بررسی پارامترهای گوناگون عملیاتی، یک سامانه جذب سطحی در مقیاس آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفت. این سامانه شامل یک راکتور بسته از جنس استیل ضد زنگ برای انجام فرایند جذب سطحی است که شامل یک ورودی و یک خروجی برای عبور گاز از سطح جاذب می باشد. درب این محفظه به گونه‌ای طراحی شده است که محیط به طور کامل عایق باشد و اتلاف گاز در زمان فرایند به کم‌ترین مقدار ممکن برسد. جاذب مورد نظر نیز در داخل یک ظرف توری در محل تعبیه شده در داخل محفظه قرار گرفت. حجم وسل با استفاده از روش جابجایی آب تخمین زده شد [۲۸]. حجم اتاق گاز ۱۶۰ سانتیمتر مکعب بود. این محفظه به یک پنل کنترلی برای نمایش دما و فشار درونی در زمان فرایند متصل است. برای دستیابی به کنترل بهتر دما، که برای آزمایش‌ها ضروری است، دمای راکتور با استفاده از یک کنترل‌کننده آبخاری^۱ کنترل می‌شد. همچنین ورودی گاز از یک کپسول دارای فشارسنج بود که با یک شیرکنترل میزان ورود آن قابل تنظیم است. شمای کلی دستگاه شبیه‌سازی فرایند جذب سطحی در شکل ۱ نشان داده شده است.

گاز ورودی ۱۲، ۱۵ و ۱۸ درصد به ترتیب ۲۴/۶۴، ۵۱/۹۲ و ۳۳/۰۱ میلی‌گرم بر گرم حاصل شد. شاه‌کرمی و همکاران [۲۷] با اصلاح کربن فعال با محلول KOH با نسبت جرمی ۰/۸۱ (کربن به جرم KOH) در یک راکتور بستر ثابت بیش‌تر مقدار جذب ۷۸ میلی‌گرم بر گرم را در دمای ۲۵ درجه سلسیوس به‌دست آوردند. بنابراین محلول‌های هیدروکسیدی حلال‌های مناسبی برای اصلاح جاذب‌های معدنی می‌باشند.

در این پژوهش جاذب‌های کربن فعال و آلومینای فعال که دوست‌دار محیط زیست و به صرفه می‌باشد با آغشته‌سازی با محلول‌های هیدروکسیدی NaOH و KOH اصلاح ساختاری شدند و پتانسیل جذب گاز کربن دی‌اکسید با استفاده از جاذب‌های اصلاح نشده و اصلاح شده با محلول‌های هیدروکسیدی مورد مطالعه قرار گرفت. برای انجام آزمایش‌ها، یکواحد پایلوت بستر ثابت طراحی و راه اندازی شد. با انجام آزمایش‌های جذب اثر پارامترهای گوناگون عملیاتی فرایند از جمله مقدار گرم جاذب، دما و فشار عملیاتی بر روی جذب CO₂ به طور تجربی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتیجه‌های این پژوهش می‌تواند در افزایش مقیاس این فرایند از واحد آزمایشگاهی به واحد صنعتی سودمند و مفید باشد.

بخش تجربی

مواد

در این پژوهش جاذب‌های کربن فعال و آلومینای فعال به شکل گرانولی در اندازه ۲/۲-۰/۵ میلی‌متر با توجه ظرفیت جذب بالا، پایداری شیمیایی و گرمایی و همچنین فراوانی و بهای مناسب به عنوان جاذب مورد آزمایش انتخاب شد. سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید از شرکت مرک خریداری شدند. همچنین گاز کربن دی‌اکسید با خلوص بالا ۹۹/۹۹ درصد به عنوان گاز جذب شونده مورد استفاده قرار گرفت که توسط شرکت سبلان گاز تهران تأمین شد.

آماده سازی و اصلاح جاذب

در این پژوهش، کربن فعال و گرانول‌های آلومینای فعال تجاری با استفاده از روش آغشته‌سازی، با محلول سدیم هیدروکسید (NaOH) و محلول پتاسیم هیدروکسید (KOH) اصلاح شدند. بدین ترتیب که

(۱) Cascade

با مقدارهای ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ وزنی و اثر مقدار جاذب با مقدارهای ۲، ۴، ۶ و ۱۰ مورد بحث و بررسی قرار گرفتند. شایان ذکر است که تأثیر پارامترهای ذکر شده با ثابت نگه داشتن هنه پارامترها و تغییر دادن یکی از آنها مورد بررسی قرار گرفت.

تأثیر مقدار جاذب

برای به دست آوردن اثر مقدار جاذب، پنج آزمایش در شرایط ثابت یعنی دمای 20°C و فشار ۶ بار در مقدارهای گوناگون ۲، ۴، ۶ و ۸ گرم به صورت جداگانه یکبار برای کربن فعال و بار دیگر برای آلومینای فعال انجام شد.

تأثیر غلظت محلول سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید

نخست پایه‌ها با روشی که در قسمت آماده‌سازی جاذب‌های اصلاح‌یافته توضیح داده شد، آماده شدند و سپس آزمایش‌ها برای بررسی اثر غلظت محلول‌های هیدروکسیدی بر میزان جذب و تعیین غلظت بهینه برای ۲ گرم جاذب در دمای 20°C درجه سلسیوس و فشار ۶ بار انجام شدند.

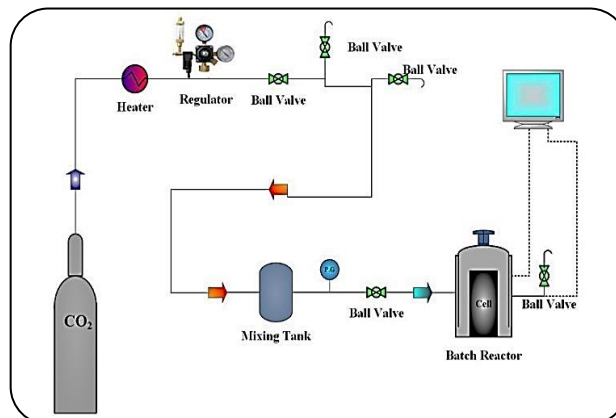
تأثیر دما

با توجه به کارهای پیشین انجام شده در این زمینه و هم چنین علاقه به داشتن اطلاعات در دماهای بیشتر و بررسی رفتار این جاذب‌ها در دمای پایین و بالای آزمایشگاه مقدارهای دما ۲۰، ۳۵، ۵۰ و 80°C درجه سلسیوس انتخاب شدند.

تأثیر فشار

فرایند جذب سطحی به منظور حذف کربن دی‌اکسید وابسته به تغییرات فشار می‌باشد و تعیین نوع هم‌دما در شناخت ویژگی‌های یک جاذب نقش کلیدی دارد همچنین با توجه به اینکه رفتار جاذب متناسب با کدام نوع هم‌دما می‌باشد وابسته به نوع رفتار آن در فشارهای بالا و پایین می‌باشد، تأثیر فشار در مقدارهای ۲، ۴، ۶ و ۸ بار بر میزان جذب و فشار بهینه عملیات جذب در دمای 20°C درجه سلسیوس برای ۲ گرم جاذب مورد مطالعه قرار گرفت.

با استفاده از نرم افزار متلب، تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایشگاهی انجام شد. با شرایط آزمایشگاهی یادشده، نتیجه‌های آزمایش‌ها نشان داد که حالت بهینه برای جاذب‌های بررسی شده زمانی هست که مقدار جاذب ۲ گرم، غلظت محلول‌های هیدروکسیدی ۳۰٪ وزنی، دما 20°C درجه سلسیوس و فشار ۶ بار باشد. در جدول ۱ متغیرهای عملیاتی و مقدارهای آن‌ها آورده شده است.



شکل ۱- شمای کلی دستگاه فرایند جذب سطحی کربن دی‌اکسید

روش انجام آزمایش

نخست ۲ گرم جاذب وزن شده و در ظرف ویژه خود در درون راکتور بارگذاری شد و درب راکتور محکم بسته شد. سپس دمای عملیاتی تنظیم شده و سپس با استفاده از فشارسنج نصب شده بر روی کپسول فشار گاز ورودی روی مقدار اولیه مورد نظر تنظیم شد. پس از ورود گاز کربن دی‌اکسید و رسیدن فشار داخلی محفظه به مقدار مورد نظر کلیه شیرهای ورود و خروج گاز را بسته و اجازه داده شد تا با گذشت زمان فرایند جذب به آرامی صورت گیرد. ثبت فشار داخلی در زمان‌های گوناگون ادامه یافت تا جایی که فشار به تقریب به مقدار ثابتی برسد. تغییر نکردن فشار نشان‌دهنده این است که فرایند جذب به پایان رسیده است. بنابراین شیرهای خروجی گاز را باز کرده تا کربن دی‌اکسید باقی مانده درون محفظه خارج شود و سپس درب محفظه را باز کرده و جاذب مصرف شده خارج شد و دستگاه برای آزمایش بعدی تمیز و به طور کامل آب بندی شد. این فرایند برای شرایط عملیاتی گوناگون تکرار شد.

آزمایش‌های تجربی جذب

آزمایش‌های تجربی جذب در یک راکتور انجام شد و تأثیر پارامترهای گوناگون عملیاتی از جمله مقدار جاذب، غلظت محلول هیدروکسیدی، دما و فشار بر فرایند جذب سطحی برای به دست آوردن بیش‌ترین میزان جذب کربن دی‌اکسید توسط جاذب‌های کربن فعال و آلومینای فعال اصلاح‌یافته با محلول‌های هیدروکسیدی سدیم و پتاسیم مورد بررسی قرار گرفت. اثر پارامترهای عملیاتی گوناگون از جمله اثر دماهای گوناگون با مقدارهای ۲۰، ۳۵، ۵۰، ۶۵ و ۸۰ درجه سلسیوس، اثر فشارهای متفاوت با مقدارهای ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ بار، اثر غلظت‌های گوناگون محلول سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید

جدول ۱- متغیرهای عملیاتی و مقادیر آنها

واحد متغیر	مقدار متغیر					نام متغیر
	۱۰	۸	۶	۴	۲	
gr						مقدار جاذب (m)
% وزنی		۴۰	۳۰	۲۰	۱۰	غلظت محلول (C)
°C	۸۰	۶۵	۵۰	۳۵	۲۰	دما (T)
bar	۱۰	۸	۶	۴	۲	فشار (P)

جدول ۲- مشخصات تست BET جاذب‌های استفاده شده

پارامتر	واحد	AC	30NaOH-AC	30KOH-AC	AA	30NaOH-AA	30KOH-AA
سطح ویژه (SBET)	m ² /g	۷۹۸/۰۶	۴۸۳/۹۱	۵۹۳/۸۳	۱۱۰/۰۸	۹۲/۴۰	۱۰۳/۰۲
حجم کل حفره‌ها	cm ³ /g	۰/۲۰	۰/۲۷	۰/۳۳	۰/۱۸	۰/۲۳	۰/۲۵
حجم حفره (V _P)	cm ³ /g	۰/۰۹	۰/۱۱	۰/۱۳	۰/۲۰	۰/۲۵	۰/۲۷
میانگین قطر حفرات	nm	۱/۶۸	۲/۲۷	۲/۲۳	۶/۶۹	۱۰/۳۰	۹/۸۴

نیترژن مایع (۷۷ درجه کلوین) با استفاده از آنالیز BELSORP-miniII انجام شد. در جدول (۲) نتیجه‌های حاصل از آنالیز BET برای هر شش جاذب AC، 30NaOH-AC، 30KOH-AC، AA، 30NaOH-AA و 30KOH-AA ارائه شده است. همانطور که از جدول ۳ دیده می‌شود، مقادیر سطح BET پس از اصلاح جاذب‌های کربن فعال و آلومینای فعال با محلول‌های سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید به طور چشمگیری در مقایسه با AC و AA تغییر یافته است که این مشاهده‌ها به تغییر ساختار جاذب‌ها ناشی از جذب هیدروکسید در ناحیه میکروپور مربوطه می‌شود که سطح نهایی جاذب‌ها را در طی اصلاح کاهش می‌دهد. از سوی دیگر، بعد از اصلاح با سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید اندازه روزنه‌های کربن فعال به ترتیب از ۱/۶۸ نانومتر به ۲/۲۷ و ۲/۲۳ نانومتر و اندازه روزنه‌ها آلومینای فعال به ترتیب از ۶/۶۹ نانومتر به ۱۰/۳۰ و ۹/۸۴ نانومتر افزایش می‌یابد که مکانیسم احتمالی پشت اندازه بزرگ روزنه‌ها به دلیل فعال شدن سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید می‌باشد که منجر به افزایش جذب کربن دی‌اکسید می‌شود [۳۰].

ظرفیت و درصد جذب CO₂ با پیروی از قانون گاز غیرایده‌آل با اندازه‌گیری افت فشار ناشی از جذب CO₂ با استفاده از معادله‌های (۱) و (۲) محاسبه شد [۲۹].

$$q_e = \frac{(P_i - P_e)VM_{CO_2}}{RTmz} \times 1000 \quad (1)$$

$$\text{Adsorption (\%)} = \frac{(P_i - P_f)}{P_i} \times 100 \quad (2)$$

که در آن‌ها q_e ظرفیت جذب برحسب (mg/g)، P_i فشار اولیه برحسب (bar)، P_e فشار تعادلی برحسب (bar)، P_f فشار نهایی برحسب (bar)، V حجم راکتور برحسب (L)، M_{CO_2} جرم مولکولی کربن دی‌اکسید، R ثابت جهانی گازها برحسب (۸۳/۱۴۵ L.mbar/mol.K)، T دما برحسب (K)، m جرم جاذب برحسب (g) و z ضریب تراکم پذیری می‌باشند.

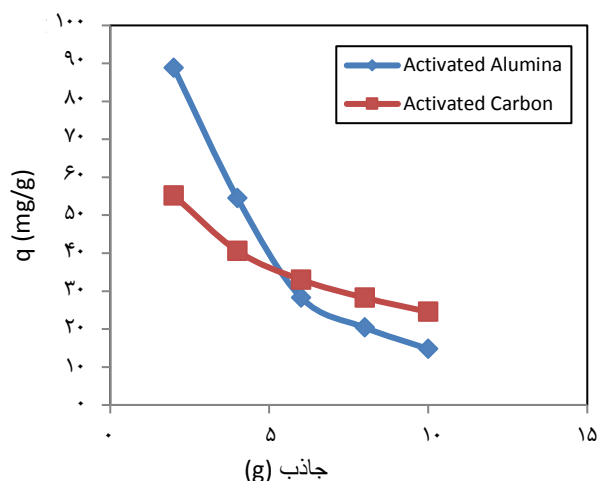
نتیجه‌ها و بحث

اثر مقدار جاذب بر میزان جذب CO₂

به منظور بررسی اثر مقدار جاذب در این فرایند، پنج تست به صورت جداگانه برای کربن فعال و آلومینای فعال در شرایط ثابت برای تمام پارامترها به جز مقدار جاذب، طراحی و در شرایط دمای ۲۰ °C و فشار ۶ بار انجام شد که در آن‌ها مقدار جاذب ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ گرم متغیر بوده است.

برای تعیین مساحت سطح جاذب‌های کربن فعال و آلومینای فعال اصلاح شده با محلول‌های سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید از آزمون BET^۱ استفاده شد که سامانه BET بر اساس سنجش حجم گاز نیترژن جذب و واجذب شده توسط سطح جاذب در دمای ثابت

(۱) Brunauer-Emmett-Teller



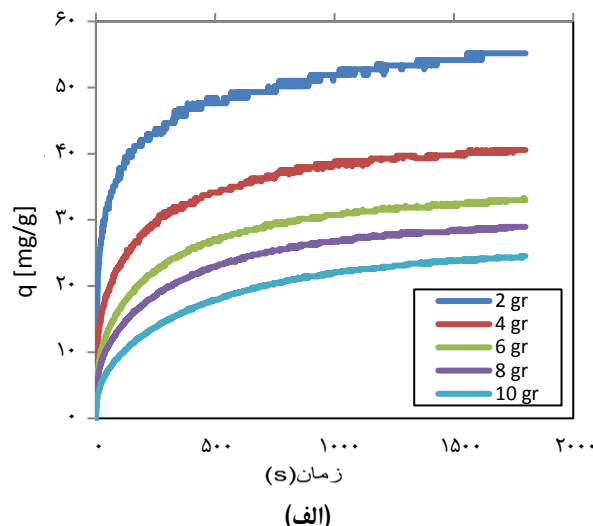
شکل ۳- مقایسه نمودار خطی اثر مقدار جاذب کربن فعال و آلومینای فعال بر میزان ظرفیت جذب کربن دی‌اکسید

که مقدار کربن دی‌اکسید جذب شده بر گرم جاذب می‌باشد، کاهش می‌یابد [۲۰]. همان‌گونه که شکل ۳ نشان می‌دهد، میزان جذب با افزایش مقدار جاذب کاهش می‌یابد زیرا زمانیکه مقدار جاذب افزایش می‌یابد، CO_2 را جذب کرده ولی مانع نفوذ کربن دی‌اکسید به لایه‌های دیگر جاذب می‌شود. درحالی‌که، در گرم‌های پایین، سطح جاذبی که در معرض کربن دی‌اکسید است، زیاد می‌باشد و این باعث می‌شود که گاز CO_2 بتواند در سطوح بیشتر به ازای گرم جاذب نفوذ کرده و جذب را افزایش بدهد. در نتیجه کمترین مقدار جاذب یعنی ۲ گرم کربن فعال و ۲ گرم آلومینای فعال نشان دهنده بالاترین ظرفیت جذب CO_2 به ترتیب معادل $56/89 \text{ mg/g}$ و $88/82 \text{ mg/g}$ می‌باشد.

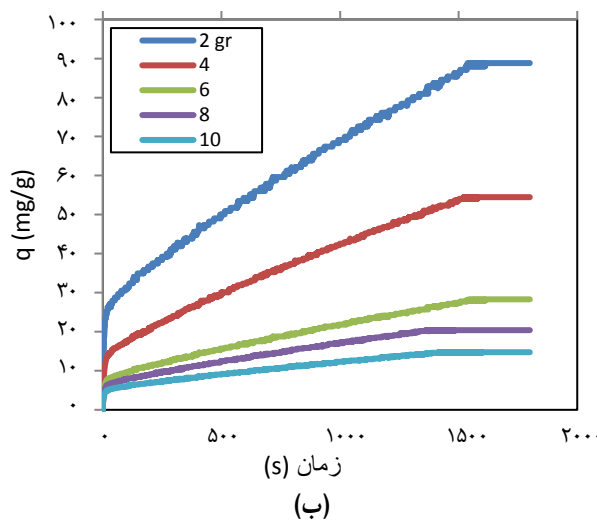
مهمترین دلیل برای انتخاب جاذب، بخش هزینه و بار اقتصادی جاذب می‌باشد. در شکل (۳) با توجه به این که برای هر دو جاذب کربن فعال و آلومینای فعال، مقدار ۲ گرم جاذب بیش‌ترین میزان جذب تعادلی را از خود نشان داد، انتخاب مقدار ۲ گرم جاذب کربن فعال و آلومینای فعال برای بررسی ظرفیت جذب کربن دی‌اکسید بار اقتصادی کم‌تری دارد بنابراین همه آزمایش‌ها بر مبنای ۲ گرم جاذب صورت گرفت.

تأثیر درصد وزنی محلول‌های هیدروکسیدی بر میزان جذب CO_2

برای بررسی عملکرد نمونه‌های کربن فعال و آلومینای فعال اصلاح‌شده با (۴۰-۱۰٪) محلول‌های هیدروکسیدی NaOH و KOH به‌عنوان جاذب برای جذب CO_2 ، در شکل‌های ۴ و ۵ نمودار اثر درصد وزنی بر شدت جذب کربن دی‌اکسید کربن به ترتیب بر روی جاذب‌های کربن فعال و آلومینای فعال اصلاح‌شده با سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید



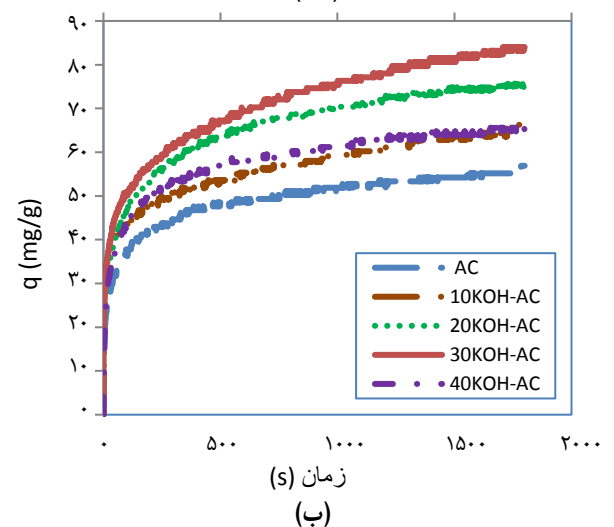
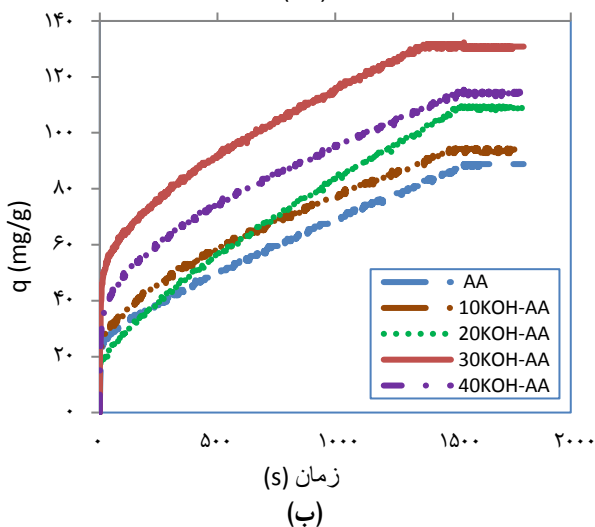
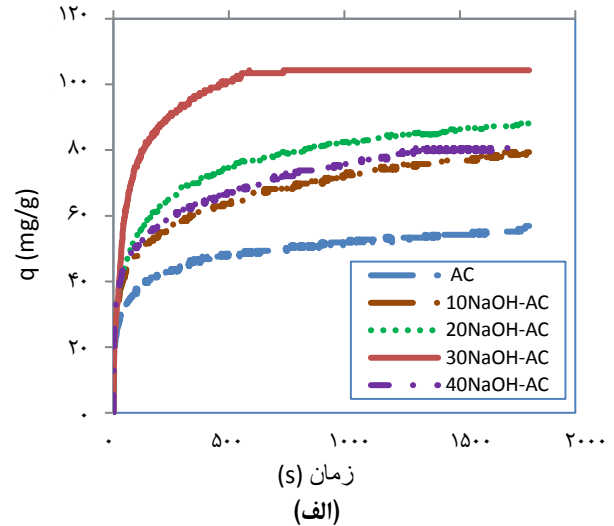
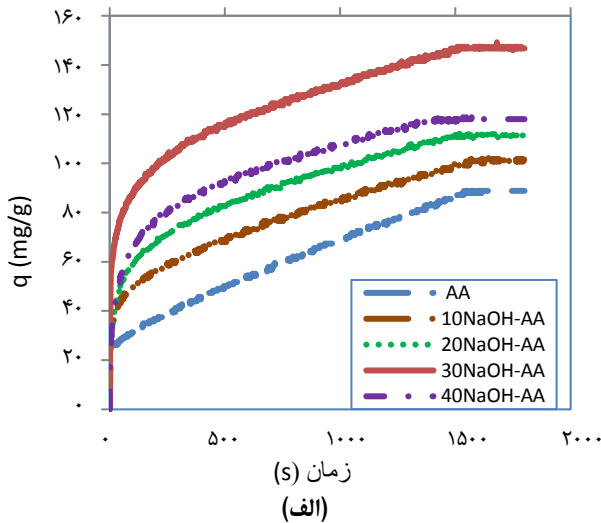
(الف)



(ب)

شکل ۲- اثر مقدار جاذب بر میزان ظرفیت جذب کربن دی‌اکسید در جاذب‌های (الف) کربن فعال (ب) آلومینای فعال

با توجه به شکل (۲) (الف) و (ب)، پنج مقدار ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ گرم یک‌بار برای جاذب کربن فعال و بار دیگر برای آلومینای فعال انتخاب شدند که در فشار ۶ بار و دمای ۲۰ درجه سلسیوس بررسی شده‌اند. نتیجه‌ها نشان داد که برای هر دو جاذب، افزایش جرم جاذب در شرایطی که پارامترهای دیگر ثابت باشد تأثیر مثبتی بر میزان جذب CO_2 ندارد و میزان جذب CO_2 به تدریج کاهش می‌یابد. این مسئله می‌تواند به این دلیل باشد که با افزایش مقدار گرم جاذب، تعداد سایت‌های آزاد برای جذب CO_2 افزایش می‌یابد تا جایی که همه مولکول‌های کربن دی‌اکسید جذب سایت‌های فعال موجود بر سطح جاذب‌ها می‌شوند. در مقدارهای بالای جاذب، مقدار افت فشار بیشتر است ولی با توجه این که معیار، ظرفیت جذب CO_2 می‌باشد، در گرم‌های بیش‌تر، شدت جذب



شکل ۵- تأثیر درصد‌های وزنی گوناگون محلول‌های هیدروکسیدی بر اصلاح جاذب آلومینای فعال و جذب CO_2 در دمای (20°C) و فشار 6 bar (الف) NaOH-AA (ب) KOH-AA

شکل ۴- تأثیر درصد‌های وزنی گوناگون محلول‌های هیدروکسیدی بر اصلاح جاذب کربن فعال و جذب CO_2 در دمای (20°C) و فشار 6 bar (الف) NaOH-AC (ب) KOH-AC

نتیجه‌ها نشان داد که افزایش درصد غلظت محلول‌های هیدروکسیدی NaOH و KOH تا ۳۰٪ وزنی در اصلاح جاذب‌های کربن فعال و آلومینای فعال منجر به افزایش ظرفیت جذب CO_2 شده است. با این حال، با افزایش درصد غلظت این محلول‌های هیدروکسیدی به ۴۰٪ وزنی ظرفیت جذب CO_2 کاهش می‌یابد. این مسئله می‌تواند به این دلیل باشد که مولکول‌های سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید با افزایش از یک مقدار روزنه‌ها کربن فعال و آلومینای فعال را به طور کامل مسدود کرده و از سویی دیگر همچنین نمک‌های تولید شده از واکنش محلول سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید با کربن فعال و آلومینای فعال، منجر به اثر وارون شده است. در نتیجه افزایش درصد محلول هیدروکسیدی از یک مقدار بیش‌تر، بهبود ظرفیت جذب CO_2 را به دنبال نخواهد داشت [۲۲، ۲۰].

برای ۲ گرم جاذب در دمای $293/15$ کلوین و فشار ۶ بار مورد بررسی قرار گرفت. به علاوه مقایسه نمودارهای مربوط به تأثیر درصد وزنی برای این دو جاذب در شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب برای کربن فعال و آلومینای فعال اصلاح شده نمایش داده شده است. همچنین نمودار مقایسه‌ای تأثیر درصد‌های وزنی گوناگون محلول‌های هیدروکسیدی NaOH و KOH برای جاذب‌های کربن فعال و آلومینای فعال به ترتیب در شکل ۴ (الف) و (ب) نمایش داده شده است.

داده‌های به دست آمده از آزمایش‌های مقایسه تأثیر درصد‌های وزنی گوناگون محلول‌های هیدروکسیدی NaOH و KOH برای جاذب‌های کربن فعال و آلومینای فعال در جدول ۳ آورده شده است.

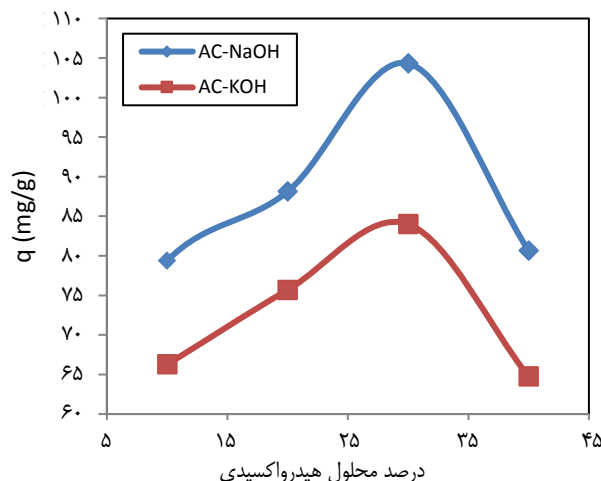
جدول ۳- ماتریس طراحی تجربی و نتیجه‌های مربوط به کربن فعال و آلومینای فعال اصلاح‌نشده و اصلاح‌شده با محلول‌های هیدروکسیدی NaOH و KOH

ظرفیت جذب کربن دی‌اکسید (q) به دست‌آمده بر حسب mg/g با جاذب‌های زیر				درصد محلول هیدروکسیدی
KOH-AA	NaOH-AA	KOH-AC	NaOH-AC	
۸۸/۸۲	۸۸/۸۲	۵۶/۸۹	۵۶/۸۹	۰
۹۳/۶۰	۱۰۱/۶۴	۶۶/۲۶	۷۹/۳۶	۱۰
۱۰۹/۵۷	۱۱۵/۳۰	۷۵/۶۸	۸۸/۱۱	۲۰
۱۳۰/۸۴	۱۴۶/۷۰	۸۴/۰۰	۱۰۴/۳۲	۳۰
۱۱۴/۶۸	۱۱۸/۰۱	۶۴/۷۳	۸۰/۶۳	۴۰

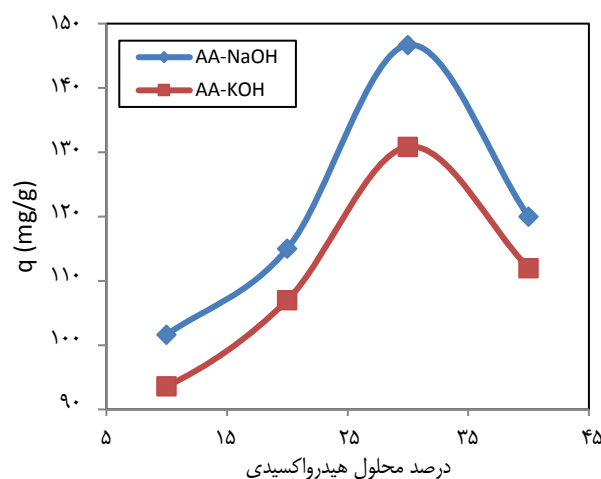
اثر دما بر ظرفیت جذب CO₂

در این قسمت، شدت جذب کربن دی‌اکسید در دماهای ۲۰، ۳۵، ۵۰، ۶۵ و ۸۰ درجه سلسیوس و با ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها (فشار ۶ بار و مقدار ۲ گرم جاذب) بررسی شد. در شکل (۷) مقایسه اثر دما بر ظرفیت جذب CO₂ بین جاذب‌های (الف) کربن فعال خام و اصلاح شده با محلول‌های هیدروکسیدی NaOH و KOH و (ب) آلومینای فعال خام و اصلاح شده با محلول هیدروکسیدی NaOH و KOH صورت گرفته است. به طور کلی، افزایش دما، به گرم‌گیر و گرم‌زا بودن فرایند جذب وابسته است و همان‌گونه که دیده می‌شود، برای همه جاذب‌ها به ازای ۲ گرم جاذب، کاهش ظرفیت جذب گاز کربن دی‌اکسید با گذشت زمان و افزایش دما از ۲۰ به ۸۰ درجه سلسیوس و فشار ۶ بار به خوبی نمایان است و بیش‌ترین میزان جذب گاز کربن دی‌اکسید در دمای ۲۰ °C (۲۹۳/۱۵ K) رخ داده است. این امر نشان دهنده گرم‌زا بودن واکنش توسط این جاذب‌ها می‌باشد که با افزایش دما میزان جذب CO₂ کاهش می‌یابد. در دمای پایین‌تر میزان جذب بیش‌تری دیده می‌شود که یکی از ویژگی‌های جاذب سطحی فیزیکی است، زیرا در دماهای بالاتر تحرک و آشفته‌گی مولکول‌های گاز بیش‌تر می‌شود و کم‌تر روی سطح جاذب نشست می‌کنند. در نتیجه با توجه به شرایط انجام آزمایش‌ها، دمای ۲۰ درجه سلسیوس به‌عنوان دمای بهینه انتخاب شد.

همچنین همان‌گونه که دیده شد در هر دو جاذب کربن فعال و آلومینای فعال، اصلاح سطح جاذب با هیدروکسیدهای NaOH و KOH منجر به افزایش جذب گاز کربن دی‌اکسید نسبت به حالت استفاده از جاذب خام شده است. بدین ترتیب که با توجه به شکل (۷) (الف) میزان جذب CO₂ با کربن فعال اصلاح شده با NaOH (30NaOH-AC) به ترتیب برابر با ۱۰۴/۳۱۹، ۱۰۴/۳۱۹، ۳۰/۵۶۹ و ۱۲/۵۴۸ mg/g برای دماهای ۲۹۳/۱۵، ۳۲۳/۱۵ و ۳۵۳/۱۵ درجه کلون می‌باشد و میزان جذب CO₂ با کربن فعال اصلاح شده با KOH (30KOH-AC) به ترتیب برابر با



(الف)



(ب)

شکل ۶- مقایسه تأثیر درصدهای وزنی گوناگون محلول‌های هیدروکسیدی NaOH و KOH بر جذب CO₂ در دمای (۲۰ °C) و فشار ۶ bar و اصلاح جاذب‌های (الف) کربن فعال (ب) آلومینای فعال

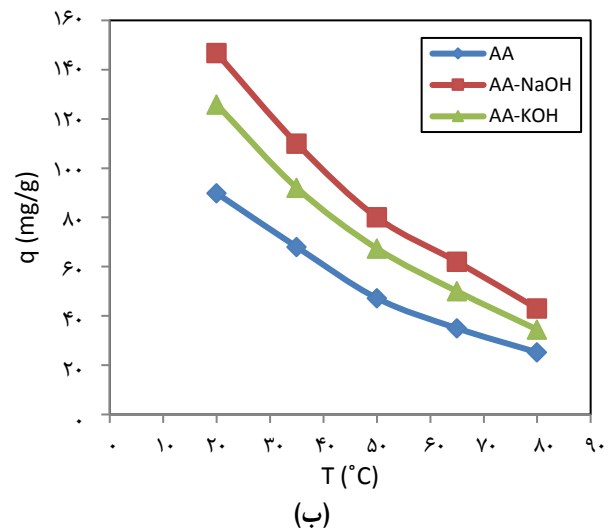
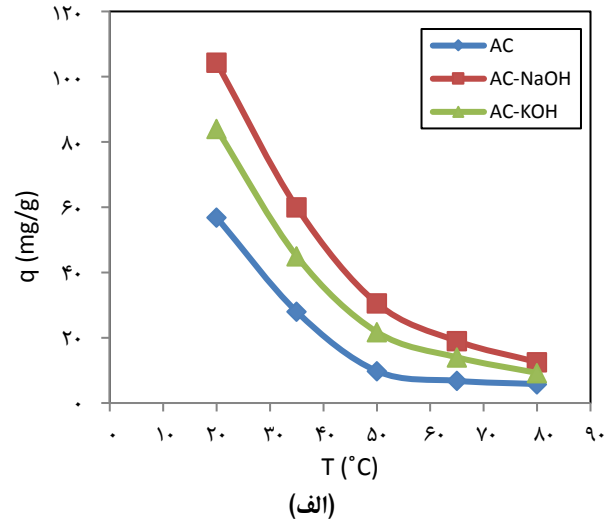
همان‌گونه که دیده می‌شود از میان این جاذب‌ها، آلومینای فعال اصلاح شده با ۳۰ درصد وزنی NaOH (30NaOH-AA) بهترین و بالاترین کارایی را برای جذب CO₂ دارد که معادل ۱۴۶/۷۰ mg/g می‌باشد. در حالی که ظرفیت جذب CO₂ برای 30KOH-AA و آلومینای فعال خام به ترتیب معادل ۱۳۰/۸۴ mg/g و ۸۸/۸۲ mg/g می‌باشد. همچنین در رابطه با کربن فعال، 30NaOH-AC بالاترین ظرفیت را برای جذب CO₂ دارد که معادل ۱۰۴/۳۲ mg/g می‌باشد، در حالی که ظرفیت جذب CO₂ برای 30KOH-AC و کربن فعال خام به ترتیب معادل ۸۴/۰۰ و ۵۶/۸۹ mg/g می‌باشد.

و $25/21$ mg/g می‌باشد. با توجه به نتیجه‌های به دست آمده، برای همه جاذب‌ها، کاهش میزان جذب CO_2 با افزایش دما از $293/15$ تا $353/15$ کلون دیده می‌شود که این نشان دهنده گرمازا بودن واکنش توسط هر شش جاذب می‌باشد.

تأثیر فشار بر شدت جذب

همان‌گونه که اثر افزایش دما در اصلاح جاذب بررسی شد، اثر افزایش فشار نیز بایستی برای شناخت بهتر جاذب مورد توجه و بررسی قرار بگیرد. آزمایش‌ها در چهار فشار گوناگون ۲، ۴، ۶ و ۸ بار با ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها (دمای ۲۰ درجه سلسیوس، مقدار ۲ گرم جاذب، غلظت محلول سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید ۳۰ درصد وزنی) برای بررسی اثر فشار بر شدت جذب کربن دی‌اکسید و به دست آوردن شرایط بهینه انجام شد. به طور کلی جذب سطحی زمانی اتفاق می‌افتد که مولکول‌های موجود در فاز گاز یا مایع به سطح جامد رسیده، فرایند جذب و پیوند میان جذب شونده و جاذب اتفاق می‌آید. در هر بستر حجم ثابت و بسته‌ای افزایش فشار منجر به افزایش جنبش مولکول‌ها، افزایش سرعت رسیدن به تعادل شده و واکنش انجام می‌شود بدین معنی که فشار بالاتر، نزدیکتر شدن بیش‌تر مولکول‌های گاز را به سطح جاذب‌ها به دنبال دارد. بنابراین افزایش فشار در این سیستم مستقل از نوع جاذب و فرایند جذب فیزیکی و شیمیایی منجر به افزایش ظرفیت جذب می‌شود. در شکل ۸ مقایسه اثر فشار بر ظرفیت جذب CO_2 بین جاذب‌های (الف) کربن فعال خام و اصلاح شده با محلول‌های هیدروکسیدی NaOH و KOH و (ب) آلومینای فعال خام و اصلاح شده با محلول هیدروکسیدی NaOH و KOH صورت گرفته است.

با توجه به شکل ۸ (الف) و (ب) نتیجه‌های حاصل از این نمودارها نشان داد که افزایش فشار با ظرفیت جذب CO_2 نسبت مستقیم دارد، به طوری که در شکل ۸ (الف) میزان جذب CO_2 برای جاذب (30NaOH-) $117/755$ mg/g و $104/319$ $62/274$ ، $45/565$ ، $45/565$ و $104/319$ mg/g و $94/124$ برابر با $30/145$ ، $30/145$ ، $50/569$ و $84/00$ برابر با $94/124$ mg/g برای فشارهای ۲، ۴، ۶ و ۸ درجه سلسیوس می‌باشد. این درحالی‌است که برای جاذب کربن فعال خالص ظرفیت جذب CO_2 به ترتیب برابر با $20/361$ ، $32/927$ ، $56/893$ و $76/675$ mg/g در این فشارها می‌باشد. همچنین با توجه به شکل ۸ (ب) میزان جذب CO_2 برای جاذب (30NaOH-AA) به ترتیب برابر با $81/59$ و $116/59$ ، $146/69$ و $238/07$ mg/g و برای جاذب (30KOH-AA) به ترتیب برابر با $130/84$ ، $97/76$ ، $64/04$ و $221/95$ mg/g برای



شکل ۷- بررسی تغییرات ظرفیت جذب کربن دی‌اکسید با دما در فشار ثابت ۶ بار با جاذب‌های (الف) کربن فعال اصلاح نشده و اصلاح شده با NaOH و KOH و (ب) آلومینای فعال اصلاح نشده و اصلاح شده با NaOH و KOH

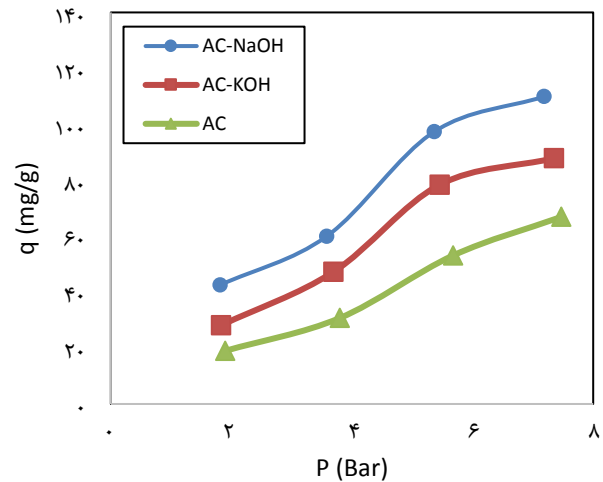
$84/00$ ، $24/770$ و $7/221$ mg/g در این دماها می‌باشد. این در حالی است که برای کربن فعال خام میزان جذب CO_2 به ترتیب برابر با $56/893$ ، $9/804$ و $5/801$ mg/g می‌باشد.

همچنین با توجه به شکل ۷ (ب) میزان جذب CO_2 با آلومینای فعال اصلاح شده با NaOH (30NaOH-AA) به ترتیب برابر با $146/70$ ، $75/90$ و $42/98$ mg/g برای دماهای $293/15$ ، $323/15$ و $353/15$ درجه کلون می‌باشد و میزان جذب CO_2 با آلومینای فعال اصلاح شده با KOH (30KOH-AA) به ترتیب برابر با $130/84$ ، $67/36$ و $34/44$ mg/g در این دماها می‌باشد. این در حالی‌است که برای آلومینای فعال خام میزان جذب CO_2 به ترتیب برابر با $88/82$ و $47/07$

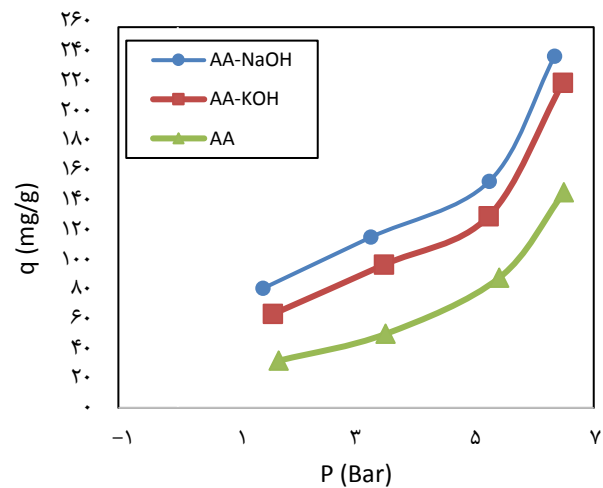
همان‌گونه که دیده شد، اصلاح سطح جاذب‌های کربن فعال و آلومینای فعال به واسطه حضور سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید منجر به افزایش ظرفیت جذب گاز دی‌اکسید کربن در هر نقطه از فشار نسبت به حالت بدون اصلاح شده است و برای همه جاذب‌ها، با گذشت زمان افزایش فشار از ۲ به ۸ بار پیشرفت جذب کربن دی‌اکسید را به دنبال دارد. این بدین معنی است که با افزایش فشار، ظرفیت جذب CO₂ افزایش می‌یابد و بیش‌ترین کارایی جذب CO₂ برای هر شش جاذب در فشار نزدیک ۸ بار می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اصلاح جاذب‌های مقرون به صرفه کربن فعال و آلومینای فعال با محلول‌های هیدروکسیدی NaOH و KOH به منظور بهینه‌سازی و بررسی جذب کربن دی‌اکسید در یک راکتور بستر ثابت انجام شد. برای تعیین شرایط بهینه تأثیر پارامترهای عملیاتی گوناگون از جمله مقدار جاذب، غلظت محلول هیدروکسیدی، دما و فشار بر شدت جذب گاز کربن دی‌اکسید توسط جاذب‌های یاد شده مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه‌های آزمایش‌ها نشان داد که با کاهش دما و افزایش فشار، ظرفیت جذب گاز کربن دی‌اکسید افزایش می‌یابد و شرایط بهینه جذب کربن دی‌اکسید مربوط به دمای ۲۰ درجه سلسیوس، فشار ۶ بار، مقدار ۲ گرم جاذب و غلظت ۳۰ درصد وزنی سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید می‌باشد. همچنین نتیجه‌ها این مطالعه نشان داد که اصلاح جاذب‌های کربن فعال و آلومینای فعال با محلول‌های هیدروکسیدی منجر به افزایش ظرفیت جذب CO₂ می‌شود. در حالت کلی جاذب آلومینای فعال اصلاح یافته در مقایسه با کربن فعال اصلاح یافته دارای میزان جذب بالاتری می‌باشد که این امر می‌تواند ناشی از قدرت بیشتر آلومینای فعال برای پذیرش گاز کربن دی‌اکسید در سطح خود باشد.



(الف)



(ب)

شکل ۸- بررسی تغییرهای ظرفیت جذب کربن دی‌اکسید با فشار در دمای ۲۰ درجه سلسیوس با جاذب‌های الف) کربن فعال اصلاح نشده و اصلاح شده با NaOH و KOH ب) آلومینای فعال اصلاح نشده و اصلاح شده با NaOH و KOH

فشارهای ۲، ۴، ۶ و ۸ درجه سلسیوس می‌باشد در حالی که برای جاذب آلومینای فعال خالص ظرفیت جذب CO₂ به ترتیب برابر با ۳۲/۲۵، ۵۰/۵۵، ۸۸/۸۲ و ۱۶۵/۲۹ mg/g در این فشارها می‌باشد. در نتیجه

مراجع

- [1] Pashaei H., Ghaemi A., Nasiri M., *Experimental Investigation of CO₂ Removal Using Piperazine Solution in a Stirrer Bubble Column*, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **63**: 226-240 (2017).
- [2] Sayari A., Belmabkhout Y., Serna-Guerrero R., *Flue Gas Treatment via CO₂ Adsorption*, *Chemical Engineering Journal*, **171**: 760-774 (2011).

- [3] Norouzbahari S., Shahhosseini S., Ghaemi A., [Modeling of CO₂ Loading in Aqueous Solutions of Piperazine: Application of an Enhanced Artificial Neural Network Algorithm](#), *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **24**: 18-25 (2015).
- [4] Elkhalfah A.E., Bustam M.A., Shariff A., Murugesan T., [Selective Adsorption of CO₂ on a Regenerable Amine-Bentonite Hybrid Adsorbent](#), *Applied Clay Science*, **107**: 213-219 (2015).
- [۵] زهرا رستگار، احد قائمی، منصور شیروانی، مطالعه تجربی کربن دی اکسید با استفاده از محلول آبی پتاسیم هیدروکسید، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۱) ۴۰: ۱۱۵ تا ۱۲۶ (۱۴۰۰).
- [6] Taheri F.S., Ghaemi A., Maleki A., Shahhosseini S., [High CO₂ Adsorption on Amine-Functionalized Improved Mesoporous Silica Nanotube as an Eco-Friendly Nanocomposite](#), *Energy and Fuels*, **33**: 5384-5397 (2019).
- [7] Taheri F.S., Ghaemi A., Maleki A., Shahhosseini S., [High CO₂ Adsorption on Amine-Functionalized Improved Mesoporous Silica Nanotube as an Eco-Friendly Nanocomposite](#), *Energy and Fuels*, **33**: 5384-5397 (2019).
- [8] Naeem S., Ghaemi A., Shahhosseini S., [Experimental Investigation of CO₂ Capture Using Sodium Hydroxide Particles in a Fluidized Bed](#), *Korean Journal of Chemical Engineering*, **33**: 1278-1285 (2016).
- [9] C.E. Powell, G.G. Qiao, [Polymeric CO₂/N₂ Gas Separation Membranes for the Capture of Carbon Dioxide from Power Plant Flue Gases](#), *Journal of Membrane Science*, **279**: 1-49 (2006).
- [10] Zhang Z., Chen F., Rezakazemi M., Zhang W., Lu C., Chang H., Quan X., [Modeling of a CO₂-Piperazine-Membrane Absorption System](#), *Chemical Engineering Research and Design*, **131**: 375-384 (2018).
- [11] Shirazian S., Marjani A., Rezakazemi M., [Separation of CO₂ by Single and Mixed Aqueous Amine Solvents in Membrane Contactors: Fluid Flow and Mass Transfer Modeling](#), *Engineering with Computers*, **28**: 189-198 (2012).
- [12] Norouzbahari S., Shahhosseini S., Ghaemi A., [Chemical Absorption of CO₂ into an Aqueous Piperazine \(PZ\) Solution: Development and Validation of a Rigorous Dynamic Rate-Based Model](#), *RSC Advances*, **6**: 40017-40032 (2016).
- [13] Ghaemi A., Torab-Mostaedi M., Maragheh M.G., Shahhosseini S., [Kinetics and Absorption Rate of CO₂ into Partially Carbonated Ammonia Solutions](#), *Chemical Engineering Communications*, **198**: 1169-1181 (2011).
- [14] Gao J., Yin J., Zhu F., Chen X., Tong M., Kang W., Zhou Y., Lu J., [Experimental Study of a Hybrid Solvent MEA-Methanol for Post-Combustion CO₂ Absorption in an Absorber Packed With Three Different Packing: Sulzer BX500, Mellapale Y500, Pall Rings 16×16](#), *Separation and Purification Technology*, **163**: 23-29 (2016).
- [15] Díez N., Álvarez P., Granda M., Blanco C., Santamaría R., Menéndez R., [CO₂ Adsorption Capacity and Kinetics in Nitrogen-Enriched Activated Carbon Fibers Prepared by Different Methods](#), *Chemical Engineering Journal*, **281**: 704-712 (2015).
- [16] Karbalaeei Mohammad N., Ahad Ghaemi, Kambiz Tahvildari, Amir Abdollah Mehrdad Sharif, [Experimental Investigation and Modeling of CO₂ Adsorption Using Modified Activated Carbon](#), *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)*, **39(1)**: 177-192 (2020).

- [17] Wang, Q. Luo, J. Zhong, Z. Borgna, A. [CO₂ Capture by Solid Adsorbents and Their Applications: Current Status and New Trends](#), *Energy & Environmental Science*, **4**: 42-55 (2011).
- [18] Karbalaeei Mohammad, N. Ghaemi, A. Tahvildari, K., [Hydroxide Modified Activated Alumina as an Adsorbent for CO₂ Adsorption: Experimental and Modeling](#), *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **88**: 24-37 (2019).
- [19] Samanta, A. Zhao, A. Shimizu, G.K. Sarkar, P. Gupta, R. [Post-Combustion CO₂ Capture Using Solid Sorbents: A Review](#), *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **51**: 1438-1463 (2011).
- [20] Tan, Y. Islam, M.A. Asif, M. Hameed, B. [Adsorption of Carbon Dioxide by Sodium Hydroxide-Modified Granular Coconut Shell Activated Carbon in a Fixed Bed](#), *Energy*, **77**: 926-931 (2014).
- [21] Lee, S.-Y. Park, S.-J. [A Review on Solid Adsorbents for Carbon Dioxide Capture](#), *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **23**: 1-11 (2015).
- [22] Auta, M. Darbis, N.A. Din, A.M. Hameed, B. [Fixed-Bed Column Adsorption of Carbon Dioxide by Sodium Hydroxide Modified Activated Alumina](#), *Chemical Engineering Journal*, **233**: 80-87 (2013).
- [23] García, S. Gil, M. Martín, C. Pis, J. Rubiera, F. Pevida, C. [Breakthrough Adsorption Study of a Commercial Activated Carbon for Pre-Combustion CO₂ Capture](#), *Chemical Engineering Journal*, **171**: 549-556 (2011).
- [24] Dali, A.M. Ibrahim, A.S. Hadi, A. [General Study About Activated Carbon for Adsorption Carbon Dioxide](#), *Journal of Purity, Utility Reaction and Environment*, **1**: 236-251 (2012).
- [25] Sreńscek-Nazzal, J. Narkiewicz, U. Morawski, A. Wróbel, R. Gęsikiewicz-Puchalska, A. Michalkiewicz, B. [Modification of Commercial Activated Carbons for CO₂ Adsorption](#), *Acta Physica Polonica, A.*, 129 (2016).
- [26] Wei, L. Jing, Y. Gao, Z. Wang, Y. [Development of a Pentaethylenehexamine-Modified Solid Support Adsorbent for CO₂ Capture from Model Flue Gas](#), *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **23**: 366-371 (2015).
- [27] Shahkarami, S. Azargohar, R. Dalai, A.K. Soltan, J. [Breakthrough CO₂ Adsorption in Bio-Based Activated Carbons](#), *Journal of Environmental Sciences*, **34**: 68-76 (2015).
- [28] Chen, J.H. Wong, D.S.H. Tan, C.S. Subramanian, R. Lira, C.T. Orth, M. [Adsorption and Desorption of Carbon Dioxide Onto and from Activated Carbon at High Pressures](#), *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **36**: 2808-2815 (1997).
- [29] Saeidi, M. Ghaemi, A. Tahvildari, K. Derakhshi, P. [Exploiting Response Surface Methodology \(RSM\) as a Novel Approach for the Optimization of Carbon Dioxide Adsorption by dry Sodium Hydroxide](#), *Journal of the Chinese Chemical Society*, (2018).
- [30] Durán-Valle, C.J. [Techniques Employed in the Physicochemical Characterization of Activated Carbons](#), in: "Lignocellulosic Precursors Used in the Synthesis of Activated Carbon-Characterization Techniques and Applications in the Wastewater Treatment", InTech, (2012).