

بررسی آزمایشگاهی تاثیر نانوذره‌های Fe_2O_3 و TiO_2 بر جذب / واجذب CO_2

فریبا زارعی، عباس الهام بخش، پیمان کشاورز*

گروه مهندسی شیمی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

چکیده: در این مطالعه، از دو نانوذره Fe_2O_3 و TiO_2 به منظور افزایش بازده فرآیند جذب و واجذب کربن دی اکسید بهره‌گیری شده است. بر این اساس، دو نانوذره ذکر شده در کسر وزنی‌های مختلف و با به کارگیری محلول متیل دی اتانول آمین با کسر وزنی ۱۰ درصد، در فرآیند جذب و واجذب در یک برج حباب‌دار مورد مطالعه قرار گرفتند. در این راستا، ضمن بررسی پایداری نانوسیالات با استفاده از آنالیز *Zeta potential*، نتایج تجربی بدست آمده برای فرآیند جذب و واجذب کربن دی اکسید در حضور نانوذره‌های ذکر شده، گزارش شد. نتایج بدست آمده نشان داد که هرچند هر دو نانوذره در بهبود بازده فرآیند جذب به طور موثری عمل کردند، با این حال نانوسیال TiO_2 با کسر وزنی ۰/۱٪ به دلیل پایداری بالا، حداکثر بازده را ارایه کرد، به طوری که سرانجام منجر به افزایش میزان جذب کربن دی اکسید تا ۲۸/۴٪ نسبت به حلال پایه شد. علاوه بر این بررسی‌های صورت گرفته در فرآیند احیا نشان داد که هرچند ماهیت فلزی نانوذره‌های Fe_2O_3 در افزایش بازده واجذب کربن دی اکسید به میزان چشمگیری اثرگذار بوده است، اما پایداری پایین تر آن‌ها نسبت به نانوذره‌های TiO_2 سرانجام منجر به تاثیر کمتر آن‌ها در فرآیند احیا شد بر این اساس نتایج بدست آمده نشان داد که بازده واجذب کربن دی اکسید در حضور نانوذره‌های TiO_2 با کسر وزنی ۰/۰۵٪ به میزان ۲۵/۸٪ و در حضور نانوذره‌های Fe_2O_3 با کسر وزنی ۰/۰۵٪ به میزان ۲۸/۵٪ در دمای ۷۰ درجه سلسیوس بوده است.

واژه‌های کلیدی: نانوذره‌های TiO_2 و Fe_2O_3 ، کربن دی اکسید، جذب، واجذب

KEYWORDS: TiO_2 and Fe_2O_3 Nanoparticles, Carbon Dioxide, Absorption, Regeneration

مقدمه

منبع تولید کربن دی اکسید با منابع زیست سازگارتر به منظور تامین انرژی مورد نیاز فعالیت‌های صنعتی از جمله استراتژی‌های بکار گرفته شده در این زمینه می‌باشد [۳]. با این وجود، سوخت‌های فسیلی همچنان منبع اصلی برای انرژی مورد نیاز بیشتر فعالیت صنعتی محسوب می‌شوند. در نتیجه همین امر، بکارگیری تکنولوژی‌های موثر با هدف جذب کربن دی اکسید تولیدی و جلوگیری از انتشار آن‌ها به جو بسیار کارآمد

افزایش پیوسته دمای سطح کره زمین در نتیجه انتشار بی‌رویه گازهای گلخانه‌ای از مهمترین دغدغه‌های موجود در سطح جهانی می‌باشد و در این میان کربن دی اکسید به عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل موثر در تشدید این پدیده شناخته شده است [۱]. بدین منظور، تلاش‌های متعددی در زمینه کاهش کربن دی اکسید آزاد شده در جو صورت گرفته است [۲]. جایگزین شدن سوخت‌های فسیلی به عنوان اصلی‌ترین

* عهده‌دار مکاتبات

+E-mail: pkeshavarz@shirazu.ac.ir

محسوب می‌شود، منجر به انعطاف زیادی در دستیابی به بهترین مقدار برای خواص موثر در فرآیند انتقال جرم و انرژی می‌شود. از آنجایی که این ویژگی به میزان قابل ملاحظه‌ای تحت تاثیر برهمکنش بین نوع نانوذرات و ماهیت حلال پایه بکار رفته می‌باشد، انتخاب حلال پایه مناسب و کاربردی در فرآیندهای مختلف صنعتی و تعیین نوع نانوذره ساگاز با سیستم مذکور جهت دستیابی به شرایط بهینه بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

هرچند مطالعات انجام شده در زمینه تاثیر نانوذرات بر بهبود میزان جذب گاز بسیار گسترده است [۲۷-۳۱]، با این حال مطالعات انجام شده در زمینه بررسی تاثیر نانوذرات در بهبود فرآیند احیا بسیار محدود است. پژوهش انجام شده توسط لی و همکاران در سال ۲۰۱۵ میلادی از اولین مطالعات اساسی انجام شده در این حوزه می‌باشد [۳۲]. آن‌ها در این مطالعه ضمن استفاده از آب به عنوان حلال پایه از نانوذرات SiO_2 و Al_2O_3 به منظور تسریع در وا جذب کربن دی اکسید بهره‌گیری کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که نانوذرات SiO_2 به طور موثری منجر به بهبود بازده فرآیند جذب و دفع شدند. به طوری که بکارگیری این نانوذرات با کسر وزنی ۰/۰۱ درصد در آب، منجر به افزایش ۲۳/۵٪ برای فرآیند جذب و ۱۱/۸٪ در فرآیند دفع شد. با این حال بکارگیری نانوذرات آلومینیوم رفتار مغایری در حضور آب از خود نشان داد. این نانوذرات با وجود اینکه به ازای غلظت ۰/۰۱ درصد وزنی بازده فرآیند جذب را تا ۲۳/۵٪ افزایش دادند اما در فرآیند احیا عملکرد مطلوبی نداشتند و بازده را به میزان ۱۱/۲٪ کاهش دادند. یو و همکاران در سال ۲۰۱۶ میلادی در این زمینه مطالعاتی داشتند [۳۳]. آن‌ها با استفاده از سه حلال پایه مختلف همچون ۳۰ درصد وزنی مونواتانول آمین، ۳۰ درصد وزنی MEA و محلول ۱/۵ مولار پپیزین، تاثیر نانوذراتی همچون SiO_2 ، TiO_2 ، Al_2O_3 و CuO بر فرآیند جذب و وا جذب را مطالعه کردند. آن‌ها در این پژوهش ضمن استفاده از یک برج جداره مرطوب، نشان دادند که نانوسیال TiO_2 نسبت به سایر نانوذرات استفاده شده تاثیر بیشتری در بهبود فرآیند احیا داشتند. همچنین تاثیر اضافه کردن نانوذرات SiO_2 و Al_2O_3 در متانول به منظور بهبود فرآیند جذب و دفع کربن دی اکسید توسط لی و همکاران مورد مطالعه قرار گرفت [۳۴]. نتایج بدست آمده به وضوح حاکی از کاهش بازده نانوسیالات آلومینیوم به واسطه افزایش سیکل جذب / احیا بود. به طوری که از سیکل دوم به بعد با افزایش تعداد چرخه‌های بکارگیری نانوسیال طی فرآیند پیوسته جذب و دفع، بازده روند کاهشی از خود نشان داد. درحالی‌که این روند در حضور نانوذرات SiO_2 متفاوت بود و طی افزایش تعداد سیکل‌های بکارگیری این نانوسیال افت بازده

می‌باشد. در این راستا روش‌های متعددی نظیر تکنولوژی‌های غشایی، جذب سطحی، جذب با استفاده از حلال و... بکار گرفته شده است [۴-۸]. با این وجود، در این زمینه فرآیند جذب با استفاده از حلال نسبت به سایر روش‌های ارائه شده جایگاه در خور توجهی دارد. این روش به دلیل بازده بالا در عین سادگی در بسیاری از فرآیندهای مطرح بکار گرفته شده است [۹، ۱۰]. با این حال، جذب کربن دی اکسید با استفاده از حلال خالی از عیب نمی‌باشد و به دلیل ماهیت حلال‌های مرسوم مورد استفاده، مشکلاتی نظیر ایجاد خوردگی در تجهیزات از برجسته‌ترین چالش‌های موجود در زمینه بکارگیری این روش است [۱۱، ۱۲]. همچنین، احیا حلال‌های جاذب بخش جدا نشدنی از فرآیند جذب کربن دی اکسید محسوب می‌شود که به دلیل دمای بالا در شرایط عملیاتی آن، سرعت خوردگی تجهیزات به میزان چشمگیری بیشتر است [۱۳]. بر این اساس، ارائه راه‌کار موثر به منظور کاهش انرژی مصرفی و به دنبال آن دمای عملیاتی مربوط به بخش احیا حلال‌های مورد استفاده، حائز اهمیت می‌باشد. در این راستا تلاش‌های متعددی توسط محققین انجام گرفته است. روش‌هایی نظیر بکارگیری امواج فراصوت [۱۴-۱۷] و مایکروویو [۱۸-۲۲] و همچنین استفاده از افزودنی‌هایی نظیر کاتالیست‌ها [۲۳-۲۶] و نانوذرات به حلال پایه از جمله برجسته‌ترین راه‌کارها به شمار می‌آید. با این حال روش‌های ذکر شده در مقیاس صنعتی با معایبی همراه هستند که عملیاتی بودن آن‌ها را با محدودیت روبرو می‌کنند. بر اساس پژوهش‌های انجام شده، هرچند که بکارگیری امواج فراصوت و مایکروویو تاثیر چشمگیری در بهبود بازده احیا از خود نشان داد، با این حال هزینه بالا تولید این امواج در مقیاس عملیاتی از جمله برجسته‌ترین چالش‌های موجود در حوزه بکارگیری این روش‌ها محسوب می‌شود. علاوه بر این روش‌ها، استفاده از کاتالیست‌های مختلفی نظیر SAPO-34 ، $\text{SO}_4^{2-}/\text{TiO}_2$ که توان فراهم کردن سایت اسیدی در حلال جاذب را دارند، راه‌کار موثری به منظور کاهش انرژی مصرفی فرآیند احیا می‌باشد [۲۶]. با این حال، چون کاتالیست‌ها صرفاً بر کاهش انرژی مصرفی طی فرآیند احیا اثرگذار هستند و در بهبود فرآیند جذب تاثیر چندانی ندارند، نسبت به نانوذرات انتخاب برتری محسوب نمی‌شوند. بر این اساس، بکارگیری نانوذرات با توجه به هزینه پایین‌تر نسبت به اعمال امواج فراصوت و مایکروویو و همچنین تاثیر قابل توجه آن‌ها بر هر دو فرآیند جذب و احیا، را می‌توان به عنوان بهینه‌ترین راهکار دانست.

نانوذرات به واسطه بهبود مکانیسم‌های حاکم بر فرآیند انتقال جرم و حرارت به میزان قابل توجهی موجب بهبود بازده نهایی فرآیند جذب و احیا می‌شوند. این امر که برجسته‌ترین مزیت این روش

این بررسی محسوب می‌شود. مطابق با آنچه که مطرح شد، مکانیسم‌های ذکر شده در بهبود دو فرآیند جذب و احیا به شدت تابعی از نوع نانوذره بکار رفته می‌باشد، در نتیجه انتظار می‌رود که این دو نانوذره عملکرد متفاوتی از خود نشان دهند. همچنین با توجه به عدم بررسی تاثیر نانوذرات Fe_2O_3 بر فرآیند جذب کربن دی‌اکسید و احیا حلال‌های جاذب در پژوهش‌های پیشین، می‌توان پژوهش حاضر را از جمله شاخص‌ترین مطالعات انجام شده در این حوزه دانست. در این راستا پارامترهای نظیر نوع و غلظت نانوذرات بکار رفته و همچنین دمای فرآیند احیا به عنوان پارامترهای عملیاتی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده بر حسب میزان کربن دی‌اکسید موجود به ازای هر مول آمین در فاز مایع و همچنین غلظت کربن دی‌اکسید در جریان گاز خروجی و دبی جریان گاز خروجی بیان شد و ارزیابی نهایی بر اساس تحلیل آن‌ها صورت گرفت.

بخش تجربی

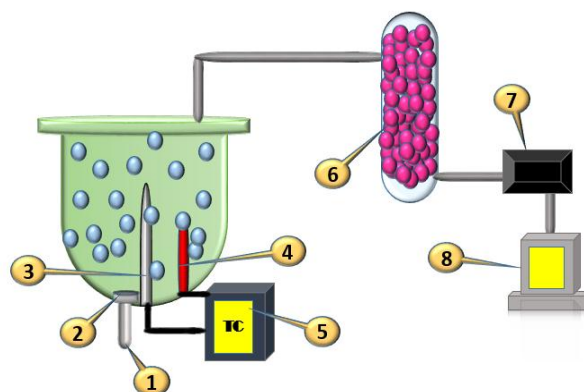
سیستم آزمایشگاهی

شکل ۱ سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده را نشان می‌دهد. بدین منظور از یک ستون از جنس پلکسی گلاس به ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر و قطر داخلی و خارجی ۱۴ و ۱۵ سانتی‌متر استفاده شده است. جریان هوای ورودی به ستون از طریق یک توزیع کننده هوا به صورت حباب وارد بستر می‌شود. لازم به ذکر است که دبی جریان گاز ورودی در هر دو فرآیند جذب (گاز ورودی کربن دی‌اکسید خالص) و دفع (جریان گاز ورودی هوا) در کل زمان فرآیند ثابت است. بنابراین دبی سنج پس از ثابت شدن شدت حجمی جریان گاز ورودی به واسطه تنظیم درجه کمپرسور و یا شیر کپسول گاز کربن دی‌اکسید، از مسیر جریان ورودی خارج می‌شود. همچنین مسیری برای جریان گاز خروجی در بالای ستون تعبیه شده است که به منظور حذف بخارات آمین و آب در ابتدا جریان گاز خروجی از یک ستون حاوی سیلیکاژل عبور می‌کند و پس از آن با هدف آنالیز جریان گاز خروجی یک آنالیزور گازی و یک دبی سنج حجمی گاز در مسیر جریان قرار می‌گیرد. همچنین یک شیر نمونه‌گیر در پایین ستون به منظور نمونه‌گیری جهت بررسی میزان کربن دی‌اکسید موجود در فاز مایع تعبیه شده است. علاوه بر این، با توجه به اینکه سیستم تشریح شده در فرآیند دفع نیز بکار گرفته می‌شود، یک المنت حرارتی با هدف تامین گرمای مورد نیاز فرآیند احیا در مرکز ستون نصب شده است. از آنجایی که کنترل دما در طی فرآیند احیا بسیار حائز اهمیت است، یک سیستم کنترل دمای شامل ترموسات و کنترلر دما در سیستم مورد استفاده بکار گرفته شده است.

مشاهده نشد. علاوه بر مطالعات ذکر شده، وانگ و همکاران طی پژوهشی تاثیر نانوذرات SiO_2 ، TiO_2 و Al_2O_3 در فرآیند جذب و واجذب کربن دی‌اکسید را به واسطه بکارگیری محلول آبی MEA مورد مطالعه قرار دادند [۳۵]. نتایج بدست آمده در این پژوهش نشان داد که حضور نانوذرات فوق علاوه بر بهبود فرآیند جذب، به طور موثری موجب افزایش بازده فرآیند احیا می‌شوند. به طوری که بر اساس نتایج گزارش شده میزان مدت زمان فرآیند احیا تا ۴۲٪ در حضور نانوذرات TiO_2 با کسر وزنی ۰/۱٪ کاهش پیدا کرد. همچنین در جدیدترین پژوهش ارائه شده در این زمینه، لی و همکاران به واسطه عامل‌دار کردن سطح نانو لوله‌های کربنی و بکارگیری ۲-۲-آمینواتیل آمین اتانول به عنوان حلال پایه، فرآیند واجذب کربن دی‌اکسید را مورد مطالعه قرار دادند [۳۶]. در این پژوهش به واسطه اضافه کردن دو گروه عاملی OH- و COOH- روی سطوح نانو لوله‌های کربنی، تاثیر هریک بر بهبود میزان جذب و واجذب کربن دی‌اکسید ارزیابی شد. نتایج بدست آمده در این مطالعه نشان داد که نانو لوله‌های کربنی با گروه‌های عاملی OH- به مراتب تاثیر بیشتری بر افزایش میزان واجذب کربن دی‌اکسید داشتند و سرانجام منجر به افزایش ۲۱/۴٪ واجذب کربن دی‌اکسید نسبت به نانو لوله‌های کربنی معمولی (در کسر وزنی ۰/۰۵٪) شد.

هرچند بررسی‌های انجام شده در این حوزه قابل اغماض نیست، با این وجود، چون نوع عملکرد نانوذرات به شدت تابعی از ماهیت حلال پایه بکار رفته می‌باشد، لزوم بررسی MDEA به عنوان یک حلال صنعتی پر کاربرد که در پژوهش‌های پیشین نادیده گرفته شده است، بسیار حائز اهمیت می‌باشد. علاوه بر این، حضور نانوذرات در فرآیند جذب و دفع با توجه به چندین مکانیسم اساسی بصورت چشمگیری اثرگذار خواهد بود. این مکانیسم‌ها که شامل اثرات انتقال جرمی (اثر شاتل، اثر هیدرودینامیکی و تقویت آشفته‌گی سیال در مقیاس میکروملکولی) و همچنین اثرات حرارتی (بهبود ضریب هدایت حرارتی و توزیع حرارتی) و همچنین مقاومت انتقال حرارت لایه تشکیل شده روی سطح حرارتی) می‌باشد، شاخص بسیار مهمی در بازده نهایی فرآیند جذب و دفع گاز در نانوسیالات مختلف می‌باشد. بنابراین، در این مطالعه دو نانوذره Fe_2O_3 و TiO_2 به عنوان عامل تحریک کننده در بهبود بازده فرآیند جذب و واجذب کربن دی‌اکسید بکار گرفته شد که هر کدام با توجه به مکانیسم‌های ذکر شده در فوق که در بخش‌های بعد به تفصیل مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد، به میزان قابل توجه‌ای منجر به ارتقا بازده هر دو فرآیند شدند. بر این اساس، مطالعه دو نانوذره با ماهیت فلزی و غیرفلزی در این پژوهش از برجسته‌ترین بخش

متیل دی اتانول آمین در آب استفاده شد. همچنین به منظور تهیه نانوسیالات مورد نظر از دو نانوذره Fe_2O_3 (تهیه شده از شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان) و TiO_2 (تهیه شده از شرکت مهندسی پایدار ابتکار آرمینا) استفاده شد که هر دو نانوذره خریداری شده است. بدین ترتیب، مقدار $0/171$ ، $0/855$ و $1/711$ گرم از هریک از نانوذرات فوق به 1700 میلی لیتر از محلول آمین اضافه شد که منجر به کسر وزنی معادل $0/01$ و $0/05$ و $0/1$ درصد برای نانوذرات در حلال پایه شد. به منظور پراکندگی نانوذرات در حلال پایه از همزن مکانیکی در سه مرحله بیست دقیقه‌ای استفاده شده است. علاوه بر این نانو محلول حاصل به منظور ارتقا سطح پایداری به مدت 30 دقیقه در معرض امواج فراصوت قرار گرفت. سرانجام محلول نهایی با هدف بررسی تاثیر نانوذرات در فرآیندهای جذب و واجذب کربن دی اکسید، در دستگاه تشریح شده بکار رفت.



شکل ۱- سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده.

(۱) مسیر ورودی جریان گاز (پمپ هوا در فرآیند احیا و مخزن کربن دی اکسید در فرآیند جذب) (۲) توزیع کننده هوا (۳) المنت حرارتی (۴) ترموستات (۵) کنترلر دمایی (۶) ستون سیلیکاژل (۷) آنالیزور کربن دی اکسید (۸) دبی سنج جریان گاز

روش کار

مطابق با توضیحات ارائه شده سیستم مذکور به منظور تعیین بازده فرآیند جذب و دفع کربن دی اکسید با استفاده از نانوسیال بکار گرفته شد. نانوسیال تهیه شده در ابتدا برای مدت زمان 45 دقیقه در معرض گاز کربن دی اکسید خالص با دبی 200 میلی لیتر بر دقیقه در دمای 293 کلوین و فشار 1 اتمسفر به منظور رسیدن به میزان بار مطلوب از کربن دی اکسید به ازای هر مول آمین قرار گرفت. سپس مقدار 20 میلی لیتر از مایع به عنوان نمونه اولیه جهت تعیین میزان بارگیری کربن دی اکسید در فاز مایع، تهیه شد. نمونه تهیه شده بر اساس روش توزین رسوب مورد بررسی قرار گرفت تا میزان کربن دی اکسید موجود در فاز مایع به ازای هر مول آمین مطابق با روش تشریح شده در فوق تعیین گردد. پس از اتمام فرآیند جذب، المنت حرارتی تعبیه شده در سیستم به منظور تامین حرارت مورد نیاز فرآیند احیا شروع به کار کرد. لازم به ذکر است که فرآیند احیا در فشار 1 اتمسفر و دو دمای 333 و 334 کلوین مورد مطالعه قرار گرفت و در این بازه زمانی حین فعال بودن المنت حرارتی، هوا به عنوان گاز رویش با دبی 220 میلی لیتر بر دقیقه به سیستم تزریق شد. بدین ترتیب برای مدت زمان 72 دقیقه میزان کسر حجمی کربن دی اکسید و همچنین شدت جریان گاز خروجی که به صورت مخلوطی از جریان هوا و کربن دی اکسید آزاد شده از محلول جاذب می باشد، به طور پیوسته هر 3 دقیقه یکبار ثبت شد. لازم به ذکر است که سیستم پس از گذشت مدت زمان 5 دقیقه به دمای عملیاتی مورد نظر رسید. پس از گذشت مدت زمان در نظر گرفته شده برای

تعیین مقدار بارگیری کربن دی اکسید در فاز مایع

بدین منظور از روش توزین رسوب استفاده می شود [37]. بر این اساس در ابتدا لازم است که یک نمونه 20 میلی لیتری از محلول مایع تهیه شود. پس از آن برای جلوگیری از آزاد شدن کربن دی اکسید حل شده در محلول، نمونه را با حجم اضافی از محلول 1 مولار سدیم هیدروکسید مخلوط می کنیم. سپس مقدار اضافی محلول 1 مولار باریم کلراید به نمونه اضافه می کنیم و آن را روی همزن مغناطیسی قرار می دهیم تا رسوب باریم بی کربنات ایجاد شود. پس از آن رسوب مورد نظر با استفاده از کاغذ صافی جدا شده و پس از خشک شدن توزین می شود. مقدار وزن رسوب بر اساس روابط زیر منجر به تعیین مقدار بارگیری کربن دی اکسید در فاز مایع بصورت مقدار مول کربن دی اکسید حل شده به ازای هر مول آمین می شود:

$$n_{CO_2} = \frac{m_{pre}}{MW_{BaCO_3}} \quad (1)$$

$$W_{amine} = W_{sample} \times C \quad (2)$$

$$n_{amine} = \frac{W_{amine}}{MW_{amine}} \quad (3)$$

$$CO_2 \text{ loading} = \frac{n_{CO_2}}{n_{amine}} \quad (4)$$

مواد

تهیه نانو محلول اولین قدم اساسی در زمینه مطالعه فرآیند جذب و دفع کربن دی اکسید است. بدین منظور از محلول 10 درصد وزنی

جدول ۱- مقدار مطلق پتانسیل زتا

مقدار مطلق پتانسیل زتا (mV)	غلظت نانوسیال Fe_2O_3 (درصد وزنی)	مقدار مطلق پتانسیل زتا (mV)	غلظت نانوسیال TiO_2 (درصد وزنی)
۳۷/۲	۰/۰۱	۴۶/۵	۰/۰۱
۲۹/۲	۰/۰۵	۵۳/۳	۰/۰۵
۱۹/۶	۰/۱	۵۸/۴	۰/۱

در فرآیند جذب، صرفاً بصورت بهبود شرایط انتقال جرم می‌باشد که بر این اساس، این تاثیرات را می‌توان در سه گروه دسته بندی کرد [۳۹]. بر اساس تئوری‌های ارائه شده در این زمینه، تقویت میزان اختلاط در محیط حلال به دلیل حرکت برونای نانوذرات از برجسته‌ترین تاثیرات حضور نانوذرات محسوب می‌شود [۴۰، ۴۱]. به عبارت دیگر نانوذرات به واسطه حرکت خود در مقیاس ملکولی آشفتگی قابل توجهی در لایه انتقال جرم اطراف حباب گاز ایجاد می‌کنند که سرانجام منجر به بهبود شرایط انتقال جرم بین دو فاز می‌شود. به عبارت دیگر، سطح بالای انرژی جنبشی نانوذرات و اثرات آن بر افزایش آشفتگی لایه انتقال جرم اطراف حباب‌های گاز سرانجام منجر به افزایش شدت انتقال جرم می‌شود. از سوی دیگر نانوذرات می‌توانند به عنوان حامل خوبی برای میکروملکول‌های کربن دی اکسید محسوب شوند [۴۲-۴۵]. به عبارتی، این ذرات میکروملکول‌های کربن دی اکسید در دسترس در سطح تماس گاز - مایع را روی سطح خود جذب کنند و آن‌ها را به لایه‌های عمقی حلال منتقل می‌کنند. بدین ترتیب، جز جذب شونده در لایه‌هایی از حلال که با فاصله بیشتری از تماس آزاد گاز - مایع قرار دارد، نیز در دسترس خواهد بود. بنابراین، میزان جذب بالاتر به دلیل ایجاد شرایط بهتر از نظر معرض‌گیری جاذب و جز جذب شونده، فراهم می‌شود. همچنین حرکت نامنظم نانوذرات موجب تقلیل در اندازه متوسط حباب‌های گازی ایجاد شده در نانوسیال می‌شود که در نتیجه آن سطح تماس موثر انتقال جرم بین دو فاز گاز و مایع به میزان چشمگیری افزایش پیدا می‌کند [۴۶، ۴۷]. در نتیجه، امکان تبادل جرم بین دوفاز افزایش می‌یابد. همچنین، میزان آشفتگی در مقیاس میکروملکولی به دلیل افزایش تعداد حباب‌های گاز موجود در سیال بیشتر می‌شود که تاثیر آن بر بهبود تبادل جرم بین دو فاز غیر قابل چشم‌پوشی است. بنابراین، با توجه به آنچه که ذکر شد، حضور نانوذرات تاثیرات قابل ملاحظه‌ای بر فرآیند انتقال جرم دارد که همگی آن‌ها به شدت به پایداری نانوذرات در محیط حلال مربوط هستند. بدین منظور از آنالیز Zeta potential برای بررسی میزان پایداری نانوسیالات استفاده شد. نتایج مربوط به آنالیز فوق در جدول ۱ گزارش شده است.

فرآیند احیا نمونه مایع دیگری با همان حجم به منظور تعیین مقدار نهایی بارگیری کربن دی اکسید در نانو محلول تهیه شد.

نتیجه‌ها و بحث

بررسی پایداری نانوسیالات

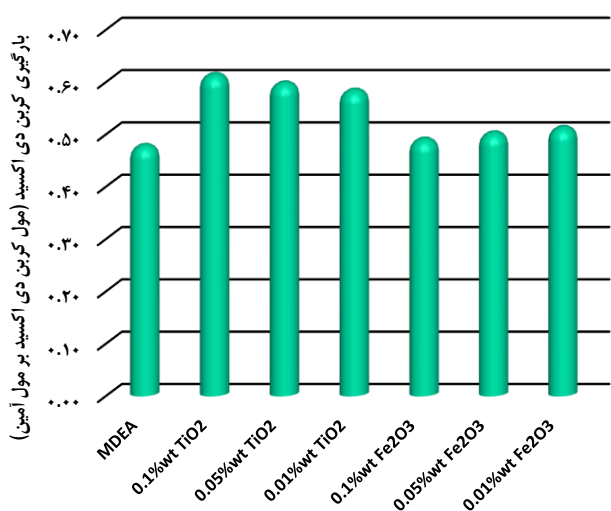
از آنجایی که عملکرد مطلوب نانوذرات به میزان قابل توجهی تحت تاثیر پایداری آن‌ها در نانوسیال است، بدین منظور مطالعه سطح پایداری نانوسیالات حائز اهمیت است. از آنجایی که تمایل نانوذرات به کلوخه شدن و ته نشینی با توجه به ماهیت آب‌دوستی و آب‌گریزی آن‌ها متفاوت است، بکارگیری روش آنالیز Zeta potential راه کار مطمئن و قابل قبولی در ارزیابی پایداری نانوسیالات مختلف است. بدین منظور در این مطالعه از این آنالیز به منظور بررسی پایداری نانوسیالات بکار گرفته شده بهره گیری شده است که نتایج آن در جدول ۱ قابل مشاهده است. مطابق با اصول مربوط به آنالیز Zeta potential در صورتی که مقدار مطلق پتانسیل زتا از 60 mV بیشتر باشد، نانوسیال از نظر پایداری در سطح بسیار بالایی قرار دارد. همچنین برای مقدار مطلق پتانسیل زتا بین 30 mV - 60 mV نانوسیال از پایداری مطلوبی برخوردار است و به ازای پتانسیل زتا در محدوده 20 mV - 30 mV نانوسیال از پایداری کمی برخوردار است و برای پتانسیل زتا کمتر از 20 mV نانوسیال را ناپایدار می‌باشد [۳۸]. بر این اساس، مطابق با جدول ۱ نانوسیالات TiO_2 در تمامی کسرهای وزنی مورد مطالعه از پایداری قابل قبولی برخوردار است. همچنین، این امر به وضوح مشهود است که با افزایش کسر وزنی نانوذرات TiO_2 پایداری نانوسیال کاهش نمی‌یابد. به عبارت دیگر می‌توان گفت که برای نانوذرات TiO_2 میزان کلوخه شدن و ته نشینی نانوذرات با افزایش مقدار آن‌ها در محلول افزایش نیافته است و تا کسر وزنی $0/1\%$ به صورت پیوسته پایداری نانوسیال روند افزایشی داشته است. با این وجود، نانوذرات Fe_2O_3 رفتار متفاوتی از خود نشان دادند. همانطور که در جدول ۱ قابل مشاهده است به افزایش کسر وزنی این نانوذرات در حلال پایه میزان پایداری نانوسیال کاهش پیدا می‌کند که این امر را می‌توان به تمایل بیشتر نانوذرات Fe_2O_3 برای کلوخه شدن و ایجاد خوشه‌های بزرگتر از نانوذرات نسبت داد.

تاثیر حضور نانوذرات بر فرآیند جذب کربن دی اکسید

به منظور بررسی نتایج تجربی بدست آمده برای فرآیند جذب و دفع، لازم است در ابتدا تاثیر حضور نانوذرات بر مکانیسم‌های حاکم بر هریک از دو فرآیند را مطالعه کرد. همانطور که ذکر شد تاثیر نانوذرات

جدول ۲- مقدار بارگیری کربن دی اکسید در انتهای فرآیند جذب برای نانوسیالات مختلف

غلظت نانوسیال TiO ₂ (درصد وزنی)	مقدار بارگیری کربن دی اکسید	مقدار افزایش بارگیری کربن دی اکسید (درصد)	غلظت نانوسیال Fe ₂ O ₃ (درصد وزنی)	مقدار بارگیری کربن دی اکسید	مقدار افزایش بارگیری کربن دی اکسید (درصد)
۰/۰۱	۰/۵۸	۱۷/۳۱	۰/۰۱	۰/۵۱	۶/۳۸
۰/۰۵	۰/۶۰	۱۹/۱۱	۰/۰۵	۰/۵۰	۴/۴۵
۰/۱	۰/۶۱	۲۷/۹۱	۰/۱	۰/۴۹	۱/۶۸



شکل ۲- میزان بارگیری کربن دی اکسید در انتهای فرآیند جذب در حلال پایه و نانوسیالات مختلف

بسیار کمتر از Fe₂O₃ می‌باشد که همین امر موجب شد تا اثرات هیدرودینامیکی بهتری حضور نانوذرات TiO₂ مشاهده شود و در نتیجه آن مقدار کربن دی اکسید بیشتری توسط نانوسیالات TiO₂ جذب می‌شود. به منظور بررسی دقیق‌تر مقدار بارگیری کربن دی اکسید در نانوسیالات مختلف جدول ۲ در زیر ارائه شده است که درصد افزایش بارگیری کربن دی اکسید در هریک از نانوسیالات نسبت به حلال پایه در آن گزارش شده است.

تأثیر حضور نانوذرات در فرآیند احیا

بررسی تأثیر نانوذرات در بهبود فرآیند احیا از دیگر پژوهش‌های انجام شده بود که با استفاده از دو نانوذره ذکر شده در غلظت‌های وزنی مختلف صورت گرفت. بدین منظور، علاوه بر آنالیز فاز مایع به منظور تعیین میزان افت بارگیری کربن دی اکسید در نانوسیال، جریان فاز گاز خروجی نیز مورد آنالیز قرار گرفت. بر این اساس نتایج مربوط به دبی جریان گاز خروجی و میزان کربن دی اکسید موجود در آن در شکل‌های ۳ تا ۶ نشان داده شده است. این بررسی‌ها که در دو دمای ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس انجام شده است،

همان‌طور که مشهود است میزان پایداری نانوسیالات TiO₂ بسیار بیشتر از Fe₂O₃ می‌باشد. بنابراین افزایش بیشتر میزان جذب کربن دی اکسید در حضور نانوذرات TiO₂ دور از انتظار نیست. لازم به ذکر است که هرچند که فرآیند جذب ماهیتاً فرآیند فشار بالا است و به عبارت دیگر در فشارهای بالا از بازده بالاتری برخوردار است، با این حال تأثیر حضور نانوذرات بر افزایش بازده جذب کربن دی اکسید در فشار اتمسفریک کاملاً مشهود بوده است که این روند به وضوح در شکل ۲ قابل مشاهده است. در این راستا از مقدار بارگیری کربن دی اکسید در فاز مایع به عنوان شاخص بررسی میزان کربن دی اکسید جذب شده به ازای هر مول آمین استفاده شد. مقدار بیشتر بارگیری کربن دی اکسید موجود در نانوسیال‌های حاوی TiO₂ در این شکل حاکی از پتانسیل بالاتر این نانوسیالات در جذب کربن دی اکسید است. از سویی از آنجایی که مقدار پایداری نانوسیالات TiO₂ با افزایش میزان غلظت نانوذرات در حلال پایه بیشتر می‌شود، بنابراین میزان جذب کربن دی اکسید و به دنبال آن بارگیری کربن دی اکسید به ازای هر مول آمین، افزایش خواهد یافت. به طوری که در غلظت ۰/۱ درصد وزنی از نانوذرات TiO₂ میزان بارگیری کربن دی اکسید از ۰/۴۸ (برای حلال پایه) به ۰/۶۱ مول کربن دی اکسید به مول آمین افزایش یافت. علاوه بر این، نانوذرات Fe₂O₃ نیز به منظور افزایش بازده جذب کربن دی اکسید مورد استفاده قرار گرفت. این نانوذرات که در سه غلظت وزنی مختلف به حلال پایه اضافه شدند، به طور نسبی در افزایش میزان جذب کربن دی اکسید موثر بودند. همچنین، غلظت ۰/۰۱ درصد وزنی به عنوان بهترین کسر وزنی از نانوذرات Fe₂O₃ شناخته شد که میزان بارگیری کربن دی اکسید را تا ۰/۵۱ مول کربن دی اکسید به مول آمین بهبود داد. با این وجود، مطابق با آنچه که در شکل زیر مشهود است، نانوسیالات Fe₂O₃ نسبت به نانوسیالات TiO₂ تأثیر کمتری بر افزایش میزان جذب کربن دی اکسید از خود نشان دادند.

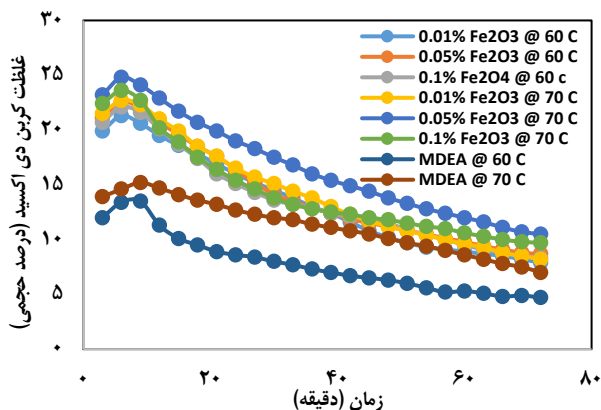
مطابق با نتایج بدست آمده از آنالیز Zeta potential که در جدول ۱ گزارش شده است، می‌توان ادعا کرد که نانوذرات TiO₂ در حلال پایه نسبت به نانوذرات Fe₂O₃ از پایداری بالاتری برخوردار می‌باشند. در نتیجه، میزان تجمع و کلوخه شدن نانوذرات TiO₂

هرچه میزان ضریب هدایت حرارتی نانوذرات بیشتر باشد، میزان مقاومت لایه متخلخل ایجاد شده کمتر می‌شود. به همین منظور، هرچند به واسطه افزایش غلظت نانوذرات TiO_2 در محیط میزان پایداری نانوسیال افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه همین امر تاثیرات هیدرودینامیکی به نحو مطلوب‌تری در محیط سیال ایفای نقش می‌کند. اما افزایش میزان نانوذرات موجود در محیط موجب افزایش ضخامت لایه متخلخل ایجاد شده روی سطح حرارتی نیز می‌شود. بنابراین، نمی‌توان ادعا کرد که الزاما با افزایش کسر وزنی نانوذرات TiO_2 میزان واجذب کربن دی‌اکسید افزایش پیدا می‌کند. بدین ترتیب این روند افزایشی تا غلظت ۵۰/۰۵ درصد وزنی ادامه پیدا می‌کند و از آنجا به بعد میزان واجذب به دلیل افزایش بیش از حد ضخامت لایه متخلخل روی سطح المنت حرارتی روند کاهشی از خود نشان می‌دهد.

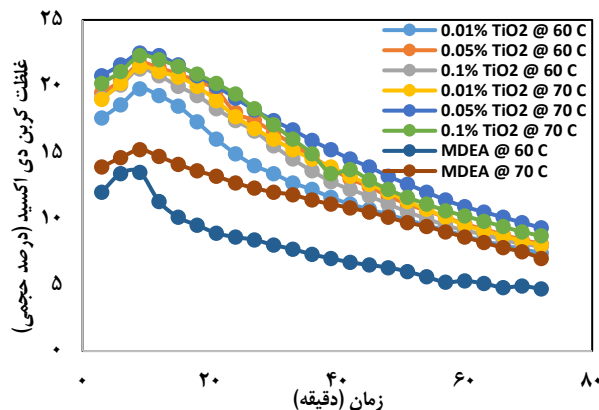
رفتار مشابه با نانوذرات TiO_2 برای Fe_2O_3 نیز مشاهده شد. همان‌طور که در شکل‌های ۵ و ۶ مشهود است، بهترین عملکرد نانوسیالات Fe_2O_3 مربوط به کسر وزنی ۰/۰۵٪ می‌باشد که در این غلظت، علاوه بر اینکه نانوسیال از پایداری قابل قبولی برخوردار است، ضخامت لایه متخلخل ایجاد شده روی سطح نیز نسبت به غلظت‌های بالاتر، کمتر است.

با این حال بررسی میزان تاثیر نوع نانوذرات بکارگرفته شده در فرآیند احیا، از دیگر مسایل کلیدی می‌باشد. شکل ۶ میزان دبی جریان گاز خروجی و کسر حجمی کربن دی‌اکسید موجود در آن را برای هر دو نانوذره مورد مطالعه در غلظت بهینه را نشان می‌دهد. مطابق با نتایج گزارش شده، همان‌طور که مشهود است در کسر وزنی ۰/۰۵٪ از هر دو نانوذره و دمای ۷۰ درجه سلسیوس میزان حداکثر غلظت کربن دی‌اکسید موجود در جریان گاز خروجی در حضور نانوذرات Fe_2O_3 مقدار بالاتری دارد. با این حال هرچند نانوذرات Fe_2O_3 تاثیرات مطلوب‌تری از جهت بهبود شرایط انتقال حرارت ارایه می‌کنند، اما پایداری کمتر نانوذرات Fe_2O_3 نسبت به TiO_2 منجر به افت نسبی عملکرد این نانوسیال به واسطه افزایش زمان است. با این حال نتایج مربوط به افت بارگیری کربن دی‌اکسید تصویر شفاف‌تری از عملکرد هریک از نانوذرات ارایه می‌کند. نتایج مربوط به افت بارگیری کربن دی‌اکسید در شکل ۷ ارایه شده است. همان‌طور که قابل مشاهده است در کسر وزنی بهینه ۰/۰۵٪ میزان افت بارگیری کربن دی‌اکسید برای نانوسیال TiO_2 و Fe_2O_3 به ترتیب برابر با ۲۵/۸٪ و ۲۴/۵٪ می‌باشد.

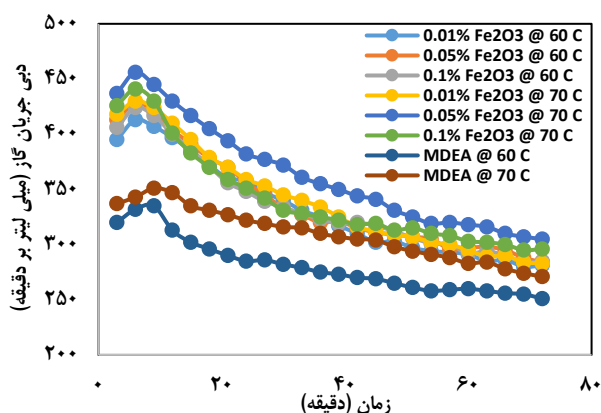
حاکی از این است که حضور نانوذرات در حلال پایه علاوه بر بهبود شرایط جذب، در فرآیند احیا نیز به‌طور موثری عمل می‌کنند. شکل ۳ و ۴ به ترتیب تغییرات غلظت کربن دی‌اکسید در جریان گاز خروجی و دبی جریان گاز خروجی برای نانوسیالات مختلف TiO_2 را نشان می‌دهد. همان‌طور که پیش از این مطرح شد، در فرآیند دفع علاوه بر تاثیرات انتقال جرمی، تاثیر حضور نانوذرات در بهبود فرآیند انتقال حرارت نیز مطرح خواهد بود. بدین منظور، نانوذرات بکار رفته علاوه بر فراهم کردن شرایط هیدرودینامیکی مطلوب، می‌بایست در بهبود مشخصه‌های انتقال حرارت نظیر تسریع در توزیع حرارتی در محیط سیال نیز به‌طور موثری عمل کنند. بدین ترتیب میزان واجذب کربن دی‌اکسید از نانوسیال جاذب به دلیل بهبود شرایط انتقال جرم و حرارت، به میزان چشمگیری افزایش خواهد یافت. همان‌طور که در هر دو شکل ۳ و ۴ مشهود است، تمامی نانوسیالات TiO_2 عملکرد مطلوب‌تری در حذف کربن دی‌اکسید نسبت به محلول MDEA از خود نشان دادند. دبی بیشتر جریان گاز خروجی و همچنین بالاتر بودن غلظت کربن دی‌اکسید موجود در آن، خود شاهدی بر این مدعا می‌باشد. با این حال تاثیر بکارگیری مقادیر مختلف از نانوذرات در بازده نهایی فرآیند احیا، از دیگر بررسی‌های انجام شده در این مطالعه بود که نتایج بدست آمده برای آن در دو شکل زیر به وضوح مشهود است. هرچند میزان پایداری نانوذرات TiO_2 با افزایش غلظت افزایش یافته است، اما تاثیر ماهیت این نانوذرات بر فرآیند انتقال حرارت غیرقابل چشم‌پوشی است. بررسی‌های انجام شده نشان داده است که مقدار ضریب هدایت حرارتی نانوذرات بکار رفته در فرآیند احیا از دو منظر قابل توجه است. از یک سوی سرعت توزیع حرارت در سیال به شدت تابعی از متوسط ضریب هدایت حرارتی نانوسیال است. به‌طوری‌که به واسطه اضافه شدن نانوذرات با ضریب هدایت حرارتی بالاتر نسبت به سیال پایه، سرعت پخش انرژی در محیط سیال افزایش می‌یابد و از آنجایی که فرآیند احیا ماهیتا نیاز به تامین انرژی فعالسازی اولیه برای شروع واکنش‌های واجذب دارد، طبیعتا افزایش سرعت توزیع انرژی در سطح سیال تاثیر مطلوبی بر سرعت واکنش واجذب دارد. با این حال از نشست نانوذرات روی سطح حرارتی نمی‌توان چشم‌پوشی کرد. طی فرآیند احیا به مرور زمان یک لایه متخلخل از جنس نانوذرات روی سطح حرارتی ایجاد می‌شود که این لایه عملا نوعی مقاومت حرارتی در برابر رسیدن حرارت تولید شده توسط المنت حرارتی به محیط سیال می‌باشد. از این رو،



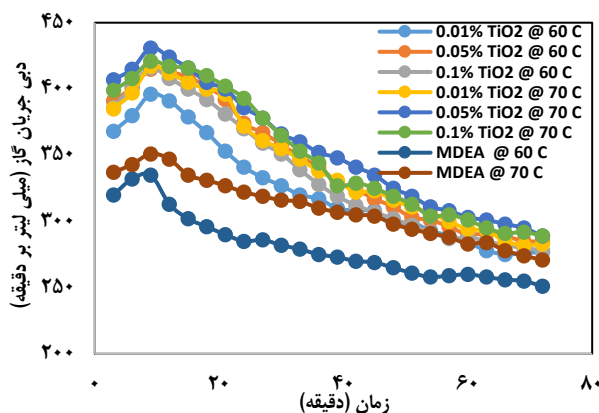
شکل ۵- غلظت کربن دی اکسید در جریان گاز خروجی حین فرآیند احیا برای نانوسیالات Fe_2O_3 در دماهای ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس



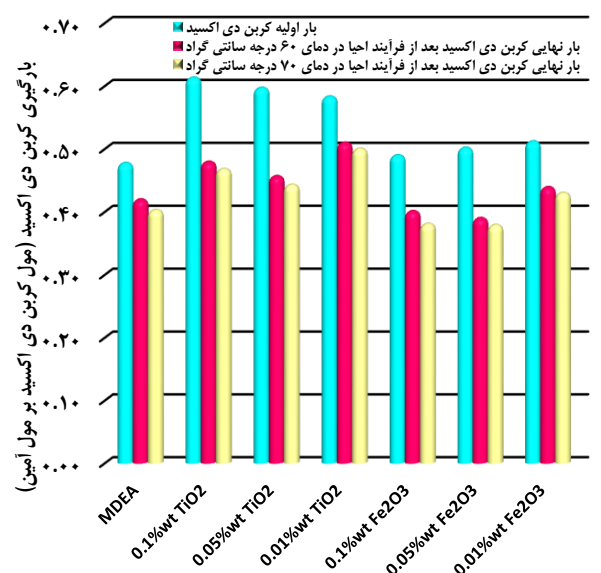
شکل ۳- غلظت کربن دی اکسید در جریان گاز خروجی حین فرآیند احیا برای نانوسیالات TiO_2 در دماهای ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس



شکل ۶- دبی جریان گاز خروجی حین فرآیند احیا برای نانوسیالات Fe_2O_3 در دماهای ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس



شکل ۴- دبی جریان گاز خروجی حین فرآیند احیا برای نانوسیالات TiO_2 در دماهای ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس



شکل ۷- میزان افت بارگیری کربن دی اکسید موجود در حلال پایه و نانوسیالات مورد مطالعه پس از اتمام فرآیند احیا

بر این اساس علاوه بر بالاتر بودن بار اولیه کربن دی اکسید در نانوسیالات TiO_2 نسبت به Fe_2O_3 ، پایداری بیشتر نانوذرات TiO_2 در طی زمان فرآیند و در نتیجه آن تاثیرات مطلوب هیدرودینامیکی ناشی از حضور آن‌ها در حلال، سرانجام موجب شد تا نانوذرات TiO_2 به مراتب تاثیر بیشتری برافت بارگیری کربن دی اکسید در طی زمان احیا، از خود نشان دهند. جدول ۳ مقادیر مربوط به افت بارگیری کربن دی اکسید در هر دو دمای عملیاتی فرآیند احیا (۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس) برای تمامی نانوسیالات مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

بر اساس بررسی‌های انجام گرفته عملکرد مطلوب هر دو نانوذره مورد مطالعه در بهبود بازده فرآیند جذب و احیا به وضوح مشهود بود. مطابق با نتایج تجربی بدست آمده نانوسیالات TiO_2 به مراتب تاثیر بهتری در بهبود فرآیند جذب و دفع از خود نشان دادند. به طوری که، نتایج بدست آمده نشان داد نانوذرات TiO_2 با افزایش کسر وزنی به دلیل

جدول ۳- میزان افت بارگیری کربن دی اکسید طی فرآیند احیا

افت بارگیری کربن دی اکسید در دمای ۷۰ درجه سلسیوس	افت بارگیری کربن دی اکسید در دمای ۶۰ درجه سلسیوس	مقدار بارگیری اولیه کربن دی اکسید	نانو سیال
۰/۵۰	۰/۵۱	۰/۵۸	نانوسیال TiO_2 با غلظت ۰/۰۱ درصد وزنی
۰/۴۴	۰/۴۶	۰/۶۰	نانوسیال TiO_2 با غلظت ۰/۰۵ درصد وزنی
۰/۴۶	۰/۴۸	۰/۶۱	نانوسیال TiO_2 با غلظت ۰/۱ درصد وزنی
۰/۴۳	۰/۴۴	۰/۵۱	نانوسیال Fe_2O_3 با غلظت ۰/۰۱ درصد وزنی
۰/۳۷	۰/۳۹	۰/۵۰	نانوسیال Fe_2O_3 با غلظت ۰/۰۵ درصد وزنی
۰/۳۸	۰/۴۰	۰/۴۹	نانوسیال Fe_2O_3 با غلظت ۰/۱ درصد وزنی

فهرست نمادها

مول کربن دی اکسید	n_{CO_2}
وزن رسوب اندازه گیری شده	m_{pre}
وزن ملکولی باریم بی کربنات	MW_{BaCO_3}
وزن آمین	W_{amine}
وزن نمونه	W_{sample}
غلظت محلول آمین	C
مول آمین	n_{amine}
وزن ملکولی آمین	MW_{amine}

پایداری بالا توانایی بیشتری در جذب کربن دی اکسید دارند. تا جایی که در کسر وزنی ۰/۱٪ میزان بارگیری کربن دی اکسید را تا ۲۸/۵٪ افزایش دادند. با این وجود روند مشاهده شده در حضور نانوذرات Fe_2O_3 متفاوت بود. نتایج بدست آمده حاکی از آن بود که نانوذرات Fe_2O_3 در کسر وزنی ۰/۰۱٪ پایداری مطلوب تری داشتند و منجر به افزایش ۸٪ مقدار بارگیری کربن دی اکسید شدند و از این کسر وزنی به بعد با افزایش غلظت نانوذرات موجود در حلال توانایی نانوسیال برای جذب کربن دی اکسید کاهش می یافت. علاوه بر این عملکرد هر دو نانوذره در بهبود بازده فرآیند احیا نیز مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج بدست آمده نشان داد که هرچند ماهیت فلزی نانوذرات Fe_2O_3 غیر قابل چشم پوشی است و این امر تاثیر قابل ملاحظه ای در افزایش بازده واجذب کربن دی اکسید داشت، اما سرانجاما پایداری کمتر نانوسیالات Fe_2O_3 منجر به بازده پایین تر این نانوسیالات نسبت به TiO_2 شد. در این راستا نانوسیالات TiO_2 و Fe_2O_3 در کسر وزنی ۰/۰۵٪ به ترتیب منجر به افت بارگیری کربن دی اکسید معادل با ۲۵/۸٪ و ۲۴/۵٪ شدند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۲۶

مراجع

- [1] Jayanthakumaran, K., Verma R., Liu, Y.J.E.P., *CO₂ Emissions, Energy Consumption, Trade and Income: A Comparative Analysis of China and India. Energy Policy.* **42**: 450-460 (2012)
- [2] Rangwala, H.A.J.I.o.M.S., *Absorption of Carbon Dioxide into Aqueous Solutions Using Hollow Fiber Membrane Contactors. Journal of Membrane Science.* **112(2)**: 229-240 (1996)
- [3] Jiang, J., Zhao, B., Zhuo, Y., Wang, S., *Experimental Study of CO₂ Absorption in Aqueous MEA and MDEA Solutions Enhanced by Nanoparticles. International Journal of greenhouse gas control.* **29**: 135-141 (2014)
- [4] Sepehri, A., Sarrafzadeh, M.-H., *Effect of Nitrifiers Community on Fouling Mitigation and Nitrification Efficiency in a Membrane Bioreactor. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification.* **128**: 10-18 (2018)

- [5] Wong, S., R.J.A.R.C., Bioletti, Carbon Dioxide Separation Technologies. *Alberta Research Council*, (2002)
- [6] Davison, J., K.J.G.g.c.t., Thambimuthu, Technologies for capture of carbon dioxide. *Greenhouse gas control technologies*, 3-13 (2005)
- [7] Mondal, M.K., Balsora, H.K., Varshney, P.J.E., Progress and Trends in CO₂ Capture/Separation Technologies: A Review. *Energy*. **46(1)**: 431-441 (2012)
- [8] Sayari, A., Belmabkhout, Y., Serna-Guerrero, R.J.C.E.J., Flue Gas Treatment Via CO₂ Adsorption. *Chemical Engineering Journal*. **171(3)**: 760-774 (2011)
- [9] Zhang, Z., Cai, J., Chen, F., Li, H., Zhang, W., Qi, W., Progress in Enhancement of CO₂ Absorption by Nanofluids: A Mini Review of Mechanisms and Current Status. *Renewable energy*. **118**: 527-535 (2018)
- [10] Said, S., Govindaraj, V., Herri, J.M., Ouabbas, Y., Khodja, M., Belloum, M., Sangwai, J.S. Nagarajan, R., A Study on the Influence of Nanofluids on Gas Hydrate Formation Kinetics and Their Potential: Application to the CO₂ Capture Process. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. **32**: 95-108 (2016)
- [11] Yu, C.H., Huang, C.H., Tan, C.S., A review of CO₂ capture by absorption and adsorption. *Aerosol and Air Quality Research*. **12(5)**: 745-769 (2012)
- [12] Seddigh, E., Azizi, M., Sani, E.S., Mohebbi-Kalhor, D., Investigation of Poly (ether-b-amide)/Nanosilica Membranes for CO₂/CH₄ Separation. *Chinese Journal of Polymer Science*. **32(4)**: 402-410 (2014)
- [13] Plaza, M.G., García, S., Rubiera, F., Pis, J.J., Pevida, C., Post-combustion CO₂ capture with a commercial activated carbon: comparison of different regeneration strategies. *Chemical Engineering Journal*. **163(1-2)**: 41-47 (2010)
- [14] Gantert, S., Möller, D.J.C.e., Ultrasonic desorption of CO₂—a new technology to save energy and prevent solvent degradation. *Chemical engineering & technology*. **35(3)**: 576-578 (2012)
- [15] Liu, H., Zhao, S., Zhou, F., Yao, C., Chen, G., Ultrasonic enhancement of CO₂ desorption from MDEA solution in microchannels. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. **58(4)**: 1711-1719 (2019)
- [16] Ying, J., Haverkort, J.W., Eimer, D.A., Haugen, H.A., Ultrasound enhanced CO₂ Stripping from Lean MEA Solution at Pressures from 1 to 2.5 bar (a). *Energy Procedia*. **114**: 139-148 (2017)
- [17] Ying, J., Eimer, D.A., Brakstad, F., Haugen, H.A., Ultrasound intensified CO₂ desorption from pressurized loaded monoethanolamine solutions. I. parameters investigation and modelling. *Energy*, **163**: 168-179 (2018)
- [18] Bougie, F., Fan, X.J.E.P., Analysis of the Regeneration of Monoethanolamine Aqueous Solutions by Microwave Irradiation. *Energy Procedia*. **142**: 3661-3666 (2017)
- [19] Yang, J., Tan, H. Y., Low, Q. X., Binks, B. P., Chin, J. M., CO₂ capture by dry alkanolamines and an efficient microwave regeneration process. *Journal of Materials Chemistry*. **3(12)**: 6440-6446 (2015)

- [20] McGurk, S. J., Martín, C. F., Brandani, S., Sweatman, M. B., Fan, X., [Microwave swing regeneration of aqueous monoethanolamine for post-combustion \$\text{CO}_2\$ capture](#). *Applied energy*. **192**: 126-133 (2017)
- [21] Bougie, F. Fan, X.J.I.J.o.G.G.C., [Microwave regeneration of monoethanolamine aqueous solutions used for \$\text{CO}_2\$ capture](#). *International Journal of Greenhouse Gas Control*. **79**: 165-172 (2018)
- [22] Chronopoulos, T., Fernandez-Diez, Y., Maroto-Valer, M.M., Ocone, R., Reay, D.A., [\$\text{CO}_2\$ desorption via microwave heating for post-combustion carbon capture](#). *Microporous and mesoporous materials*. **197**: 288-290 (2014)
- [23] Srisang, W., Pouryousefi, F., Osei, P. A., Decardi-Nelson, B., Akachuku, A., Tontiwachwuthikul, P., Idem, R., [\$\text{CO}_2\$ capture efficiency and heat duty of solid acid catalyst-aided \$\text{CO}_2\$ desorption using blends of primary-tertiary amines](#). *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **69**: 52-59 (2018)
- [24] Liang, Z., Idem, R., Tontiwachwuthikul, P., Yu, F., Liu, H., Rongwong, W., [Experimental study on the solvent regeneration of a \$\text{CO}_2\$ -loaded MEA solution using single and hybrid solid acid catalysts](#). *AIChE Journal*, **62(3)**: 753-765 (2016)
- [25] Osei, P. A., Akachuku, A., Decardi-Nelson, B., Srisang, W., Pouryousefi, F., Tontiwachwuthikul, P., Idem, R., [Mass transfer studies on catalyst-aided \$\text{CO}_2\$ desorption from \$\text{CO}_2\$ -loaded amine solution in a post-combustion \$\text{CO}_2\$ capture plant](#). *Chemical Engineering Science*. **170**: 508-517 (2017)
- [26] Zhang, X., Zhang, X., Liu, H., Li, W., Xiao, M., Gao, H., Liang, Z. , [Reduction of energy requirement of \$\text{CO}_2\$ desorption from a rich \$\text{CO}_2\$ -loaded MEA solution by using solid acid catalysts](#). *Applied Energy*. **202**: 673-684 (2017)
- [27] Rashidi, H., Sohrabi, R.J.E.P., Energy, S., [Detailed performance model of carbon dioxide absorption utilizing titanium dioxide nanoparticles in a wetted wall column](#). *Environmental Progress & Sustainable Energy*, **38(6)**: 13211 (2019)
- [28] Rashidi, H., Ma mivand, S.J.E., [Experimental and numerical mass transfer study of carbon dioxide absorption using \$\text{Al}_2\text{O}_3\$ water nanofluid in wetted wall column](#). *Energy*, **238**: 121670 (2022)
- [29] Pashaei, H., Ghaemi, A., Behroozi, Mashhadimoslem, A.H., [Hydrodynamic and mass transfer parameters for \$\text{CO}_2\$ absorption into amine solutions and its blend with nano heavy metal oxides using a bubble column](#). *Separation Science and Technology*, 1-16 (2021)
- [30] Pashaei, H., Ghaemi, A.J.J.o.E.C.E., [\$\text{CO}_2\$ absorption into aqueous diethanolamine solution with nano heavy metal oxide particles using stirrer bubble column: Hydrodynamics and mass transfer](#), *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **8(5)**: 104110 (2020)
- [31] Pashaei, H., Ghaemi, A., Nasiri, M., Heydarifard, M., [Experimental investigation of the effect of nano heavy metal oxide particles in Piperazine solution on \$\text{CO}_2\$ absorption using a stirrer bubble column](#). *Energy & Fuels*, **32(2)**: 2037-2052 (2018)
- [32] Lee, J.S., Lee J.W., Kang, Y.T.J.A.e., [\$\text{CO}_2\$ absorption/regeneration enhancement in DI water with suspended nanoparticles for energy conversion application](#). *Applied energy*, **143**: 119-129 (2015)

- [33] Yu, W., Wang, T., Fang, M. X., Hei, H., Luo, Z.Y., [CO₂ Absorption/Desorption Enhanced by Nanoparticles in Post-combustion CO₂ Capture](#). in *International Symposium on Coal Combustion*. Springer. In *International Symposium on Coal Combustion*, Springer, Singapore, 591-596 (2015)
- [34] Lee, J.W., Pineda, I.T., Lee, J.H., Kang, Y.T., [Combined CO₂ absorption/regeneration performance enhancement by using nanoabsorbents](#). *applied energy*. **178**: 164-176 (2016)
- [35] Wang, T., Yu, W., Liu, F., Fang, M., Farooq, M., Luo, Z., [Enhanced CO₂ absorption and desorption by monoethanolamine \(MEA\)-based nanoparticle suspensions](#). *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **55(28)**: 7830-7838 (2016)
- [36] Li, X., Zhang, Y., Chen, S., [Enhancement of CO₂ Desorption from Reinforced 2-\(2-Aminoethylamine\) Ethanol Aqueous Solution by Multi-walled Carbon Nanotubes](#). *Energy & Fuels*, **33(7)**: 6577-6584 (2019)
- [37] Santos, S.P.d., [Comparative study of amine solutions used in CO₂ absorption/desorption cycles](#). *Doctoral dissertation*, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. (2013)
- [38] Ali, N., J.A. Teixeira, Addali, A.J.J.o.N., [A review on nanofluids: fabrication, stability, and thermophysical properties](#). *Journal of Nanomaterials*. 2018 Jan 1;(2018)
- [39] Bolourchian Tabrizi, S.Z., Shahhosseini, S., Ghaemi, A., [Insights Into the Mass Transfer Mechanisms of Nanofluids: A CO₂ Absorption Study](#). *Energy & Fuels*, **35(24)**: 20172-20184 (2021)
- [40] Yoon, S., Chung, J.T., & Kang, Y.T., [The particle hydrodynamic effect on the mass transfer in a buoyant CO₂-bubble through the experimental and computational studies](#). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **73**: 399-409 (2014)
- [41] Kim, J.H., Jung, C.W., Kang, Y.T. , [Mass transfer enhancement during CO₂ absorption process in methanol/Al₂O₃ nanofluids](#). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **76**: 484-491 (2014)
- [42] Kluytmans, J.H.J., Van Wachem, B.G.M., Kuster, B.F.M., Schouten, J.C., [Mass transfer in sparged and stirred reactors: influence of carbon particles and electrolyte](#). *Chemical Engineering Science*, **58(20)**: 4719-4728 (2003)
- [43] Alper, E. Öztürk, S.J.T.C.E.J., [The effect of activated carbon loading on oxygen absorption into aqueous sodium sulphide solutions in a slurry reactor](#). *The Chemical Engineering Journal*, **32(2)**: 127-130 (1986)
- [44] Tinge, J., Drinkenburg, A.J.C.e.s., [Absorption of gases into activated carbon—water slurries in a stirred cell](#). *Chemical engineering science*, **47(6)**: 1337-1345 (1992)
- [45] Linek, V., M. Kordač, Soni, M.J.C.e.s., [Mechanism of gas absorption enhancement in presence of fine solid particles in mechanically agitated gas–liquid dispersion. Effect of molecular diffusivity](#). *Chemical engineering science*, **63(21)**: 5120-5128 (2008)
- [46] Pineda, I. T., Lee, J. W., Jung, I., Kang, Y. T. , [CO₂ absorption enhancement by methanol-based Al₂O₃ and SiO₂ nanofluids in a tray column absorber](#). *International journal of refrigeration*, **35(5)**: 1402-1409 (2012)
- [47] Kim, W.G., Kang, H.U., Jung, K.M., Kim, S.H., [Synthesis of silica nanofluid and application to CO₂ absorption](#). *Separation Science and Technology*, **43(11-12)**: 3036-3055 (2008)