

Experimental Study of CO₂ Absorption by MEA+ TiO₂ Nanofluid in a Microreactor

Arsalan Kianinezhad¹, Abdolreza Moghadassi², Babak Aghel³

1. Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.
E-mail: a.kianinezhad.97@phd.araku.ac.ir

E-

2. Corresponding author, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.
E-mail: a-moghadassi@araku.ac.ir

3. Corresponding author, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran. E-mail: b.aghel@kut.ac.ir

Article Info

Article type: research paper

Article history:

Received 11 August 2025

Received in revised form 16 October 2025

Accepted 18 November 2025

Published online 21 December 2025

ABSTRACT

Objective: This study investigates the effect of titanium dioxide (TiO₂) nanoparticles as performance enhancers for CO₂ absorption in an aqueous monoethanolamine (MEA) solution using a microreactor system.

Materials and Methods: CO₂ absorption experiments were conducted in a T-shaped microreactor with an inner diameter of 800 μm and a length of 25 cm under atmospheric pressure, using a gas feed containing 10 mol% CO₂. The main operating parameters included temperature, solvent flow rate, gas flow rate, inlet solvent concentration (5 and 10 vol% MEA), and metal-oxide nanoparticle concentrations (0.01, 0.05, and 0.1 wt%).

Results: Under the optimal operating conditions (25 °C, solvent flow rate of 200 ml/hr, and gas flow rate of 100 ml/min), the CO₂ absorption efficiencies of aqueous MEA solutions at 5 and 10 vol% were 75.6% and 84.8%, respectively. Under the same conditions, the absorption efficiencies obtained using MEA-based nanofluids (5 vol% MEA) containing 0.01, 0.05, and 0.1 wt% TiO₂ nanoparticles were 80.2%, 92.1%, and 94.2%, respectively. For nanofluids prepared with 10 vol% MEA, the corresponding efficiencies were 73.5%, 87.3%, and 92.1%. The optimal nanofluid consisted of 5 vol% MEA with 0.05 wt% TiO₂, achieving a CO₂ absorption efficiency of 92.1%, corresponding to a 16.5% improvement over the base solvent without nanoparticles. FESEM images and zeta-potential results confirmed a uniform dispersion of TiO₂ nanoparticles with no significant agglomeration. The presence of active hydroxyl groups in the FTIR spectra and a zeta potential of +16.1 mV indicated moderate and sufficient stability of the nanofluid during the experiments. Visual observations over a 12-hour period also confirmed stable and homogeneous dispersion.

Conclusion: The findings indicate that adding small amounts of TiO₂ nanoparticles enhances the CO₂ absorption performance of 5 vol% MEA solutions. In contrast, a reduction in absorption efficiency was observed in 10 vol% MEA due to the higher surface tension of the base solvent. This adverse effect was mitigated at higher nanoparticle loadings (0.05 and 0.1 wt%), where TiO₂ nanoparticles improved CO₂ absorption in both 5 vol% and 10 vol% MEA solutions.

Keywords:

Microreactor
Nanofluid
Absorption
MEA
TiO₂

Citation: Kianinezhad, Moghadassi, Aghel, (2025). Experimental Study of CO₂ Absorption by MEA+ TiO₂ Nanofluid in a Microreactor, Journal of Separation Science and Engineering, 17 (2), 49-73. <http://doi.org/10.22103/jsse.2025.5163>



© The Author(s).

Publisher: Shahid Bahonar University of Kerman

مطالعه تجربی جذب کربن دی اکسید با استفاده از نانوسیال $MEA+TiO_2$ در میکروآکتور

ارسلان کیانی نژاد^۱، عبدالرضا مقدسی^۲، بابک عاقل^۳

- ۱- گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران. رایانامه: a.kianinezhad.97@phd.araku.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران. رایانامه: a-moghadassi@araku.ac.ir
۳. نویسنده مسئول، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران. رایانامه: b.aghel@kut.ac.ir

چکیده

هدف: در این مطالعه، تاثیر نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم (TiO_2) به عنوان بهبود دهنده عملکرد جذب CO_2 در سیال پایه آبی مونو اتانول آمین (MEA) در یک میکروآکتور مورد بررسی قرار گرفته شده است.

مواد و روش: آزمایشات جذب در یک میکروآکتور T شکل با قطر داخلی ۸۰۰ میکرومتر و طول ۲۵ سانتی متر در فشار اتمسفریک و با خوراک گازی حاوی ۱۰ درصد مولی CO_2 انجام گرفتند. متغیرهای عملیاتی اصلی شامل دما، دبی حلال، دبی گاز، غلظت ورودی حلال (۵ و ۱۰ درصد حجمی MEA) و غلظت نانوذرات اکسید فلزی (۰،۰۱، ۰،۰۵، ۰،۱ درصد وزنی) بودند.

نتایج: در شرایط بهینه عملیاتی (دمای ۲۵ درجه سانتی گراد، دبی حلال ۲۰۰ میلی لیتر بر ساعت و دبی گاز ۱۰۰ میلی لیتر بر دقیقه)، راندمان جذب CO_2 با استفاده از حلال های آبی حاوی ۵ و ۱۰ درصد وزنی مونو اتانول آمین به ترتیب برابر با ۷۵،۶ و ۸۴،۸ درصد است. در حالی که در شرایط مشابه درصد جذب کربن دی اکسید با استفاده از نانو سیالات با سیال پایه مونو اتانول آمین ۵ درصد همراه با غلظت نانوذرات ۰،۰۱، ۰،۰۵ و ۰،۱ در صد وزنی از TiO_2 ، به ترتیب ۸۰،۲، ۹۲،۱ و ۹۴،۲ در صد و در نانو سیالات با مونو اتانول آمین ۱۰ در صد به ترتیب ۷۳،۵، ۸۷،۳ و ۹۲،۱ در صد به دست آمده است. نانو سیال بهینه، مطابق نتایج به دست آمده، از ترکیب حلال آبی مونو اتانول آمین ۵ درصد به عنوان سیال پایه همراه با ۰،۰۵ درصد وزنی نانوذرات TiO_2 حاصل شد، که موجب جذب ۹۲،۱ درصدی CO_2 شد، که نسبت به سیال پایه بدون نانوذره، به میزان ۱۶،۵ درصد افزایش در عملکرد جذب را نشان می دهد.

بر اساس تصاویر FESEM و نتایج پتانسیل زتا، توزیع ذرات TiO_2 در محلول یکنواخت بوده و هیچ گونه تجمع معنی داری مشاهده نشد. وجود گروه های هیدروکسیل فعال در طیف FTIR و مقدار زتای ۱۶،۱ mv + نشان دهنده پایداری متوسط و کافی نانوسیال در زمان انجام آزمایش ها است. بررسی تصویری در بازه ۰ تا ۱۲ ساعت نیز یکنواختی پراکندگی ذرات را تأیید کرد.

نتیجه گیری: بررسی نتایج جذب نانوسیال TiO_2 نشان می دهد که افزودن مقادیر کمی از نانوذرات اکسید فلزی در غلظت ۵ درصد مونو اتانول آمین سبب بهبود عملکرد جذب CO_2 شده ولی در غلظت ۱۰ درصد مونو اتانول آمین تاثیر معکوس داشته و درصد جذب را کاهش داده، که به دلیل کشش سطحی بالاتر حلال پایه آبی مونو اتانول آمین ۱۰ درصد می باشد. البته در غلظت های بالاتر نانوذرات (۰،۰۵ و ۰،۱ درصد وزنی) این وارونگی رفع شده و نانوذرات در هر دو حلال پایه ۵ درصد و ۱۰ درصد مونو اتانول آمین تاثیر مناسب و مثبتی بر روی عملکرد جذب دارند.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: علمی پژوهشی

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۰

دریافت فایل اصلاح شده نهایی: ۱۴۰۴/۰۷/۴۴

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۷

انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰

کلمات کلیدی:

میکرو راکتور
نانوسیال
جذب
مونو اتانول آمین
اکسید تیتانیوم

استناد: کیانی نژاد، مقدسی، عاقل (۱۴۰۴). مطالعه تجربی جذب کربن دی اکسید با استفاده از نانوسیال $MEA+TiO_2$ در میکروآکتور. نشریه

علوم و مهندسی جداسازی، (۲) ۱۷، ۷۳-۴۹. <http://doi.org/10.22103/jsse.2025.5163>



© نویسندگان

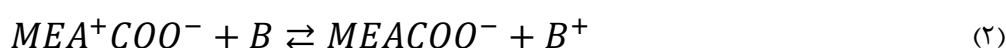
ناشر: دانشگاه شهید باهنر کرمان

۱. مقدمه

در چند دهه‌ی اخیر انتشار بی‌رویه‌ی CO₂ به یکی از اصلی‌ترین چالش‌های کشورهای توسعه یافته تبدیل شده است [۱-۳]. زیرا رشد روز افزون جمعیت و افزایش فعالیت‌های صنعتی موجب شده که سطح موجود دی‌اکسیدکربن^۱ در جو به میزان قابل توجهی افزایش یابد. انتشار بی‌رویه‌ی دی‌اکسیدکربن سبب افزایش دما و مشکلات محیط زیستی همچون خشکسالی، بالا آمدن سطح آب دریاها، تخریب لایه ازن و ... می‌شود. از طرفی دیگر، وجود گازکربن دی‌اکسید در ترکیبات گاز طبیعی سبب بروز مشکلاتی صنعتی مانند خوردگی، ایجاد رسوب، تشکیل نمک‌های مقاوم، پایین آمدن ارزش حرارتی گاز و .. شده که باعث بالا رفتن هزینه‌های عملیاتی واحدهای صنعتی می‌شوند [۴].

با افزایش هر چه بیشتر تولید CO₂ در جهان و نقش بالقوه‌ی آن (حدود ۶۴ درصد) در گرمایش زمین ضرورت کاهش این گاز برای ادامه‌ی زندگی روی کره زمین الزامی است [۵]. نتایج چندین مدل تخمین اقلیمی، نشان می‌دهد که دمای جهانی تا پایان قرن حاضر حدود ۵٫۸-۱٫۴ درجه سانتیگراد افزایش می‌یابد [۶]. اما بر طبق معاهده‌ی پاریس باید میزان افزایش دمای جهانی زیر ۲ °C حفظ شود [۷].

مونواتانول آمین^۲، آمینی نوع اول، که به دلیل واکنش پذیری بالای آن با CO₂، کارایی آسان و ارزان بودن، جزء شناخته شده‌ترین جاذب‌های آمینی است. در جذب شیمیایی (Absorption)، به طور کلی دی‌اکسیدکربن توسط حلال آمین هم جذب و هم واکنش می‌دهد. ابتدا آمین به دلیل انحلال پذیری CO₂ را جذب کرده و سپس واکنش بین آمین و CO₂ و تولید بی‌کربنات سبب جذب بیشتر CO₂ می‌شود. بر اساس نوع آمین مکانیسم‌های واکنشی متفاوتی در جذب CO₂ با آلکانوآمین‌ها رخ می‌دهد. آمین‌های نوع اول و دوم معمولاً CO₂ را با مکانیسم دو قطبی (Zwitterion Mechanism) و در یک واکنش دو مرحله‌ای جذب می‌کنند. واکنش مونواتانول آمین (MEA) با CO₂ به شکل زیر می‌باشد.



واکنش اول سبب تشکیل دو قطبی به عنوان یک محصول ابتدایی و آنی می‌شود. در واکنش دوم که به پروتون زدایی معروف است، کاربامات تشکیل می‌گردد. در واکنش دوم، B یک واکنشگر پایه می‌باشد که ممکن است آب، آمین و یا حتی OH⁻ باشد، با توجه به اینکه غلظت OH⁻ پایین بوده و آب نیز یک پروتون زدای ضعیف می‌باشد، بنابر این انتظار می‌رود که B یک آمین باشد. بنابراین واکنش کلی به شکل زیر می‌باشد [۸].



استفاده از نانو ذرات در سیستم های سیالاتی موجب افزایش ضریب نفوذ گرمایی، هدایت و ویسکوزیته^۲ و ضریب انتقال حرارت جابه جایی می شود. بررسی مطالعات انجام شده نشان می دهد که نانوسیالات در مقایسه با سیالات متداول، بهبود قابل توجهی در انتقال حرارت و انتقال جرم ایجاد می کنند. تأثیر نانوسیال بر افزایش میزان جذب دی اکسید کربن را می توان با مکانیسم های مختلفی که بر فرآیند انتقال و نفوذ این گاز در محلول مؤثر هستند، توجیه کرد.

در طول دهه های گذشته توسعه ی میکروراکتورها^۴، به عنوان یک ابزاری نوین در زمینه ی جذب گاز، به سرعت در سراسر جهان گسترش یافته است. میکروراکتورها تجهیزاتی با ابعاد بسیار کوچک هستند که با ایجاد سطح تماس وسیع در مقیاس میکرومتری، موجب تشدید فرآیند انتقال جرم گاز-مایع می شوند. بر اساس نتایج گزارش شده، استفاده از این تجهیزات سبب افزایش بازده انتقال جرم و گرما، بهبود کنترل فرآیند و کاهش زمان ماند می شود و از این رو، پتانسیل قابل توجهی در فرآیند جذب دارند [۱۰،۹].

استفاده از حلال ها برای جذب دی اکسید کربن از گاز طبیعی یا گاز دودکش، به عنوان متداول ترین روش در واحدهای صنعتی به کار گرفته می شود. در سال های اخیر، به کارگیری نانوسیالات به دلیل دستیابی به انتقال جرم بالاتر با مصرف کمتر حلال، مورد توجه زیادی قرار گرفته است.

لی^۵ و همکاران با استفاده از حلال NaCl حاوی نانو ذرات Al_2O_3 فرآیند جذب دی اکسید کربن را در یک راکتور حبابی مورد بررسی قرار دادند. نتایج به دست آمده نشان داد که غلظت بهینه ی نانو ذرات آلومینا ۰،۰۱ درصد جرمی و اثر نانو ذرات بر افزایش میزان جذب در حالت غیر اشباع به میزان چشمگیری از حالت اشباع بیشتر گزارش شده است [۱۱]. جیانگ^۶ و همکاران عملکرد حلال های MEA و MDEA همراه با نانو ذرات SiO_2 ، TiO_2 ، MgO و Al_2O_3 را برای جذب دی اکسید کربن مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایشات نشان دهنده بهبود قابل ملاحظه ی میزان انتقال جرم شده است. همچنین، برای تمامی نانوذرات بررسی شده، افزایش غلظت نانوذرات تا یک مقدار بهینه موجب افزایش انتقال جرم شد، در حالی که افزایش بیش از حد غلظت، تأثیری بر انتقال جرم نداشت [۱۲].

جیانگ و همکاران در یک مطالعه بر روی راکتور حبابی، عملکرد MEA همراه با نانوذرات Al_2O_3 و SiO_2 را بررسی کردند. نتایج نشان دهنده بهبود حدود ۸ درصد در میزان جذب با افزودن نانوذرات بود [۱۳]. همچنین، لی و همکاران در راکتور حبابی عملکرد حلال متانول همراه با نانوذرات Al_2O_3 و SiO_2 را مورد مطالعه قرار دادند و نتایج نشان داد که افزودن ۰،۰۱ درصد حجمی از نانوذرات، سرعت جذب را به ترتیب ۴،۵ و ۵،۶ درصد افزایش داده است [۱۴].

پیندا^۷ و همکاران نیز در یک برج سینی دار، عملکرد حلال متانول همراه با نانوذرات Al_2O_3 و SiO_2 را مورد بررسی قرار دادند. نتایج گزارش شده نشان داد که حداکثر سرعت جذب در حلال حاوی ۰،۰۵

Viscosity^۲Microreactor^۴Lee^۵Jiang^۶Pineda^۷

درصد حجمی نانوذرات، به ترتیب ۹،۴ و ۹،۷ درصد نسبت به متانول خالص افزایش می یابد [۱۵]. لی و همکاران با استفاده از راکتور حبایی و حلال متانول حاوی نانوذرات Al_2O_3 بهبود و افزایش سرعت جذب دی اکسید کربن را به دلیل افزودن نانوذرات گزارش کردند [۱۶].

پاشایی و همکاران، سیستم حلال پیرازین همراه با نانوذرات TiO_2 ، ZnO و ZrO_2 را برای جذب دی اکسید کربن مورد بررسی قرار دادند. در غلظت‌های بهینه، به ترتیب ۰،۱، ۰،۰۵ و ۰،۱ درصد حجمی برای سه نانوذره، سرعت جذب به میزان ۱۴،۷، ۱۶،۶ و ۳،۷ درصد نسبت به حلال پیرازین خالص افزایش یافت [۱۷]. عاقل و همکاران در یک مطالعه، جذب دی اکسید کربن با استفاده از حلال MDEA-پیرازین (PZ) را در یک میکروآکتور T شکل مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان دهنده تأثیر قابل توجه استفاده از میکروآکتور بر ضریب کلی انتقال جرم فاز گاز در فرآیند جذب با MDEA بود [۱۸]. سئو^۸ و همکاران از حلال MEA همراه با نانوذرات نیکل برای جذب دی اکسید کربن از گازهای حاصل از احتراق در یک میکروآکتور استفاده کردند. بر اساس گزارش آن‌ها، حضور نانوذرات نیکل موجب افزایش سرعت واکنش تا ۵۴ درصد شد [۱۹]. پاشایی و همکاران جذب دی اکسید کربن را با استفاده از حلال MEA در ستون حبایی همزده مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که بازدهی جذب در حضور نانوذرات ZnO ، TiO_2 و ZrO_2 به ترتیب ۱۲،۱، ۸ و ۱۳،۳ درصد بهبود یافته است [۲۰]. عاقل و همکاران در مطالعه‌ای دیگر، عملکرد سه نوع حلال شامل MEA، دی اتانول آمین (DEA) و متیل دی اتانول آمین فعال شده (a-MDEA) را در جذب دی اکسید کربن در یک میکروآکتور بررسی کردند. نتایج نشان داد که در نسبت مولی بهینه، میزان انتقال جرم حجمی برای سه نوع حلال به ترتیب ۱۲۸۲۶، ۱۱۳۷۴ و $8241 \text{ Kmol/m}^3\text{hr}$ می باشد [۸].

کشاورز و همکاران با عامل دار کردن نانوذرات مغناطیسی Fe_3O_4 با گروه‌های آمینی مختلف نشان دادند که این اصلاح سطحی می تواند ظرفیت جذب CO_2 را تا ۲۳ درصد و راندمان دفع را تا حدود ۴۸ درصد افزایش دهد [۲۱].

در مطالعه‌ای دیگر، لی و همکاران نانوجاذب‌های مبتنی بر متانول را بررسی کردند و گزارش دادند که افزودن نانوذرات SiO_2 موجب بهبود پایدار عملکرد جذب/دفع CO_2 در سیکل‌های متوالی شد، در حالی که استفاده از نانوذرات Al_2O_3 باعث کاهش راندمان گردید [۲۲]. پورطالبی و همکاران با شبیه‌سازی CFD در ستون‌های خیس شده نشان دادند که افزودن نانوذرات و مایعات یونی به محلول MEA موجب افزایش راندمان و نرخ جذب CO_2 تا حدود ۲۳ درصد می شود [۲۳].

کشاورز بهادری و همکاران نیز با ترکیب نانوذرات $\gamma-Al_2O_3$ ، Si-ZIF-8 و کربن فعال در یک سامانه هیبریدی شامل MDEA و سولفولان، بهبود چشمگیری در ظرفیت جذب CO_2 مشاهده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که نانوذرات Si-ZIF-8، کربن فعال و $\gamma-Al_2O_3$ به ترتیب موجب افزایش راندمان جذب تا ۵۰، ۲۷،۵ و ۳۰ درصد شده اند [۲۴]. همچنین اورندی و همکاران نشان دادند که نانوذرات نیکل می توانند نرخ جذب CO_2 در حلال MEA را به میزان ۴-۷ درصد افزایش داده و زمان اشباع

حلال را تا ۴۲٪ کاهش دهند. با این حال این نانوذرات نرخ تخریب اکسیداتیو و حرارتی MEA را نیز افزایش می‌دهند [۲۵].

اولین چالش استفاده از آلکانوآمین‌ها، تولید حجم بالای پساب صنعتی است. به‌عنوان مثال، استفاده از حلال با غلظت بالای آلکانوآمین موجب افزایش میزان COD و نیتروژن کل تولید شده می‌شود و در نتیجه، ویژگی‌های دو عملکردی بین الکل اولیه و آمین نیز افزایش می‌یابد [۲۶، ۲۷]. تصفیه این پساب‌ها مستلزم هزینه‌های بالای تصفیه، سختی فرآیند و همچنین آسیب‌های زیست‌محیطی است. چالش دوم هنگام استفاده از آلکانوآمین‌های با غلظت بالا به‌عنوان حلال، تشکیل فوم خورنده در طول فرآیند احیای حلال است که توانایی بالایی در ایجاد خوردگی و تخریب در مبدل‌های حرارتی، کندانسورها و ریبویلرهای ساخته شده از کربن استیل دارد [۲۸]. لذا، با توجه به دلایل ذکر شده، کاهش غلظت آمین یکی از مهم‌ترین اهداف صنعتی در راستای یافتن حلال بهینه محسوب می‌شود.

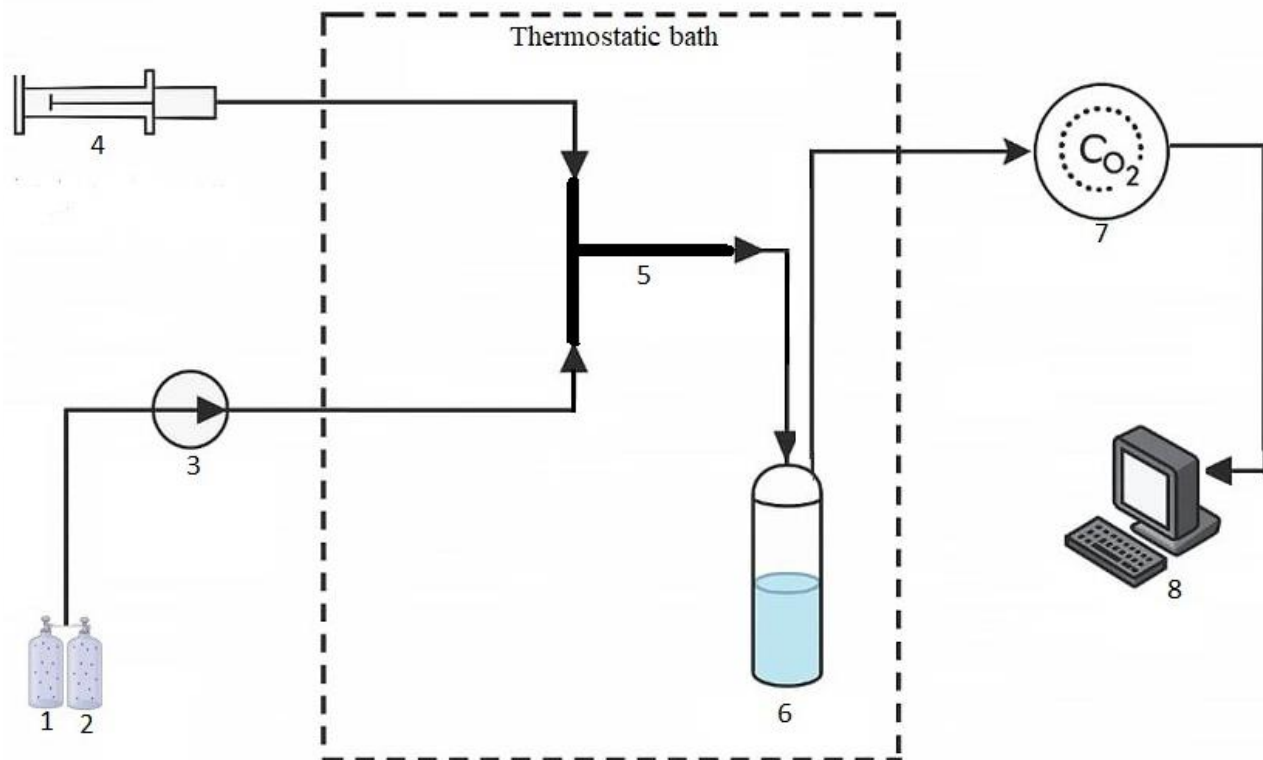
در این تحقیق، با استفاده از یک میکروآکتور T شکل با قطر داخلی ۸۰۰ میکرومتر، قصد داریم جذب دی‌اکسید کربن را با استفاده از نانوسیال TiO_2 در محلول‌های آبی MEA بررسی کنیم. با بهره‌گیری از مزایای میکروآکتور و استفاده از غلظت‌های بسیار پایین نانوذرات (۰٫۱-۰٫۱ درصد وزنی)، تلاش شده است تا غلظت آمین در محلول آبی نسبت به سیستم‌های مرسوم کاهش یابد و در عین حال بازدهی فرآیند جذب CO_2 افزایش پیدا کند. شایان ذکر است که این تحقیق برخلاف مطالعات پیشین، که عمدتاً بر غلظت‌های بالای MEA (۳۰-۴۰ درصد) تمرکز داشته‌اند، با ترکیب میکروآکتور و نانوسیال TiO_2 ، غلظت MEA را کاهش داده و بازدهی را افزایش می‌دهد، که از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی برتری دارد.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. مواد و تجهیزات

در این تحقیق از مونو اتانول آمین ۹۹ درصد محصول پتروشیمی شازند اراک و از نانو ذرات اکسید تیتانیوم (TiO_2) با اندازه متوسط ۲۰ نانومتر و خلوص بالاتر ۹۹ درصد از شرکت US Research Nanomaterials جهت تهیه نانوسیال استفاده شده است.

در این مطالعه، از مخلوط گازی شامل CO_2 ۱۰ درصد (N_2 ۹۰ درصد) تولید شده توسط شرکت Varian Gas استفاده شده است. برای انجام آزمایش‌های جذب، از یک میکروآکتور T شکل با زاویه ورودی ۱۸۰ درجه ساخته شده از استنلس استیل، با طول ۲۵ سانتی‌متر و مقطع دایره‌ای به قطر داخلی $800 \mu m$ استفاده گردید. برای آنالیز گاز ورودی و خروجی از آنالایزر CM-0123 ساخت شرکت Cozir و برای انتقال حلال از پمپ سرنگی SP1000HPM ساخت شرکت فناوران نانومقیاس استفاده شد. دمای عملیات جذب توسط حمام آب تنظیم می‌گردد. همچنین، برای تنظیم دبی گاز ورودی از دبی‌سنج MFC-EL-MODEL ساخت شرکت Bronkhorst هلند، استفاده شد. شماتیک آزمایش جذب در شکل ۱ نشان داده شده است.

شکل ۱: شماتیک تجهیزات در فرآیند جذب CO₂

(مانیتورینگ 8- آنالایزر 7- جداکننده گاز-مایع 6- میکروآکتور 5- پمپ سرنگی 4- دبی متر 3- کپسول نیتروژن 2- کپسول گاز کربن دی اکسید 1)

Figure 1: Schematic of the CO₂ Absorption operation system

(1- CO₂, 2- N₂, 3- Flow meter, 4- syringe pump, 5- Microreactor, 6- Separator, 7- CO₂ analyzer, 8- PC)

برای مطالعه عملکرد جذب CO₂ با نانوسیال TiO₂+MEA، یک کپسول گازی حاوی مخلوط CO₂ و نیتروژن (به عنوان شبیه ساز گازهای خروجی دودکش های صنعتی) به عنوان گاز خوراک استفاده شد. در تمامی آزمایش ها، غلظت دی اکسید کربن در حجم ثابت گاز ورودی، بر روی ۱۰ درصد تنظیم گردید. برای تهیه حلال جاذب، مخلوطی از مونو اتانول آمین و TiO₂ در غلظت های وزنی مختلف با آب مقطر به حجم کل ۶۰ میلی لیتر تهیه شد و از پمپ سرنگی برای انتقال آن به میکروآکتور استفاده گردید. در این تحقیق، جذب دی اکسید کربن در دبی های گاز ۲۵-۳۰۰ میلی لیتر بر دقیقه (اندازه گیری شده با دبی سنج روتاری) و دبی های حلال در محدوده ۲۵-۲۰۰ میلی لیتر بر ساعت مورد بررسی قرار گرفت.

با راه اندازی پمپ سرنگی و باز کردن مسیر گاز، جریان ها به درون میکروکانال T شکل هدایت می شوند که پیش تر در حمام آب برای تنظیم دما قرار داده شده است. در طول میکروکانال، با ایجاد تماس بین دو فاز گاز- مایع، جذب دی اکسید کربن توسط حلال انجام می گیرد. آزمایش ها در شرایط اتمسفریک انجام شد و در انتهای میکروکانال، با اندازه گیری میزان دی اکسید کربن در گاز خروجی و با استفاده از رابطه زیر، عملکرد جذب قابل ارزیابی است.

$$\text{CO}_2 \text{ Removal (\%)} = \frac{\text{CO}_{2in} - \text{CO}_{2out}}{\text{CO}_{2in}} \times 100 \quad (4)$$

CO₂ in: غلظت CO₂ در ورودی میکروکانال

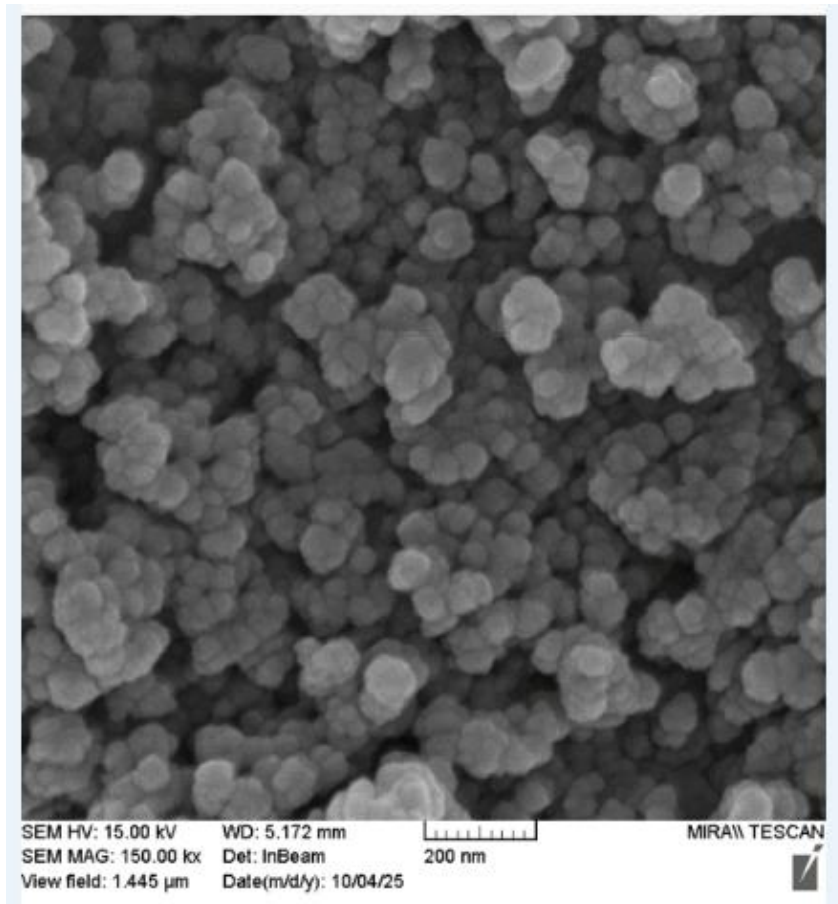
CO₂ out: غلظت CO₂ در خروجی میکروکانال

در آزمایش‌های جذب، از غلظت‌های ۰,۰۱، ۰,۰۵ و ۰,۱ درصد وزنی نانوذرات TiO₂ استفاده شد. انتخاب این محدوده غلظت بر اساس مطالعات پیشین و آزمایش‌های مقدماتی انجام گرفت تا از ته‌نشینی نانوذرات جلوگیری شود و جذب بهینه حاصل گردد [۱۱، ۱۴ و ۱۶]. هر آزمایش جذب سه بار تکرار شد و میانگین داده‌ها گزارش گردید. انحراف معیار نتایج کمتر از ۳٪ ± بود که نشان‌دهنده دقت و قابلیت اعتماد داده‌ها است.

۲-۲. پایداری نانو سیال

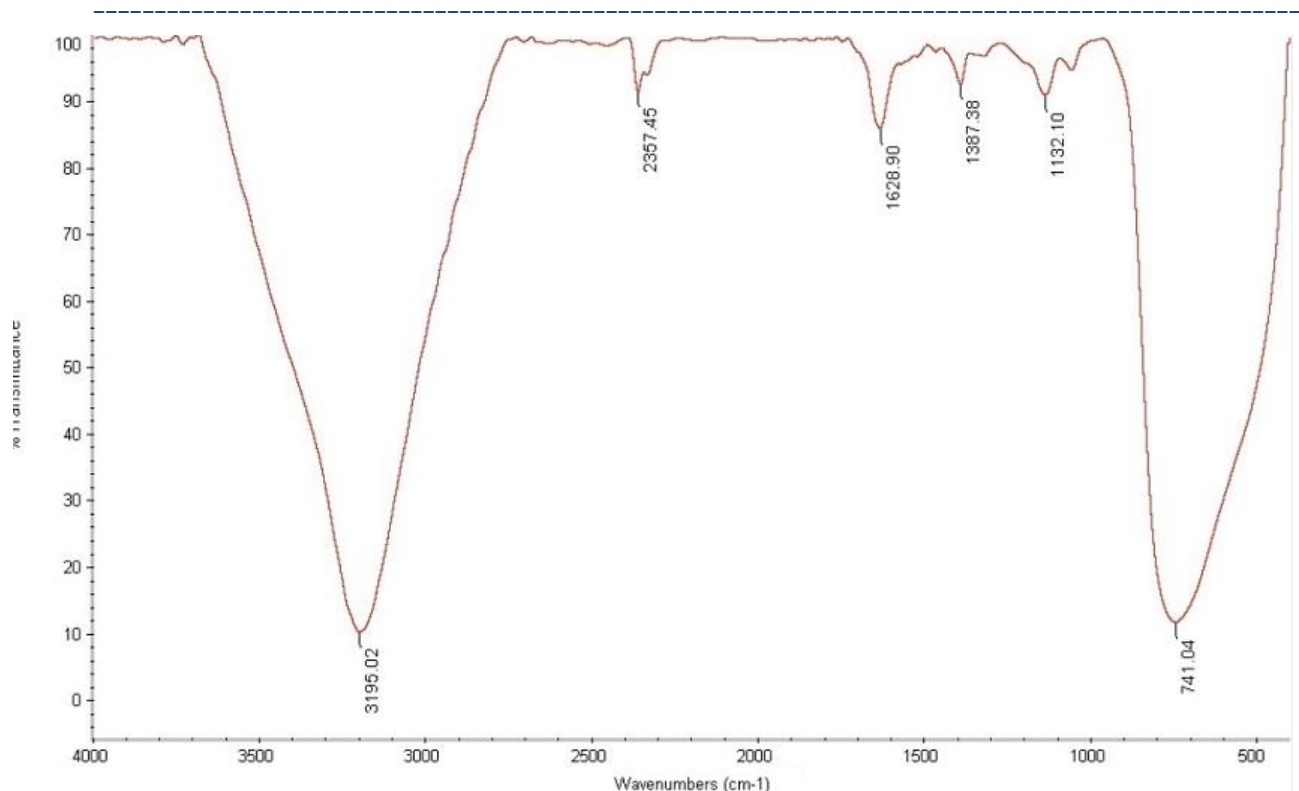
نانو سیالات با پراکنده سازی در صد های وزنی ۰,۰۱، ۰,۰۵ و ۰,۱ در صد وزنی از نانو ذرات TiO₂ در محلول های آبی MEA با غلظت ۵ و ۱۰ درصد حجمی تهیه شدند. برای دستیابی به توزیع یکنواخت نانوذرات در فاز مایع و جلوگیری از آگلومراسیون، از سونیکیشن به مدت ۳۰ دقیقه استفاده شد. همچنین مقدار کمی سورفکتانت غیر یونی به سیستم افزوده شد تا پایداری فیزیکی نانوسیال افزایش یابد.

شکل ۲ تصویر FESEM نانوذرات TiO₂ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ذرات دارای مورفولوژی تقریباً کروی با تجمع‌های خوشه‌ای هستند که به دلیل انرژی سطحی بالا ایجاد شده‌اند. سطح نسبتاً صاف و پراکندگی یکنواخت ذرات نشان‌دهنده‌ی فرآیند سنتز کنترل‌شده و خلوص بالا است. چنین ساختاری می‌تواند سطح ویژه‌ی بالایی فراهم کند که برای واکنش‌ها و جذب گاز در نانوسیالات مفید است.



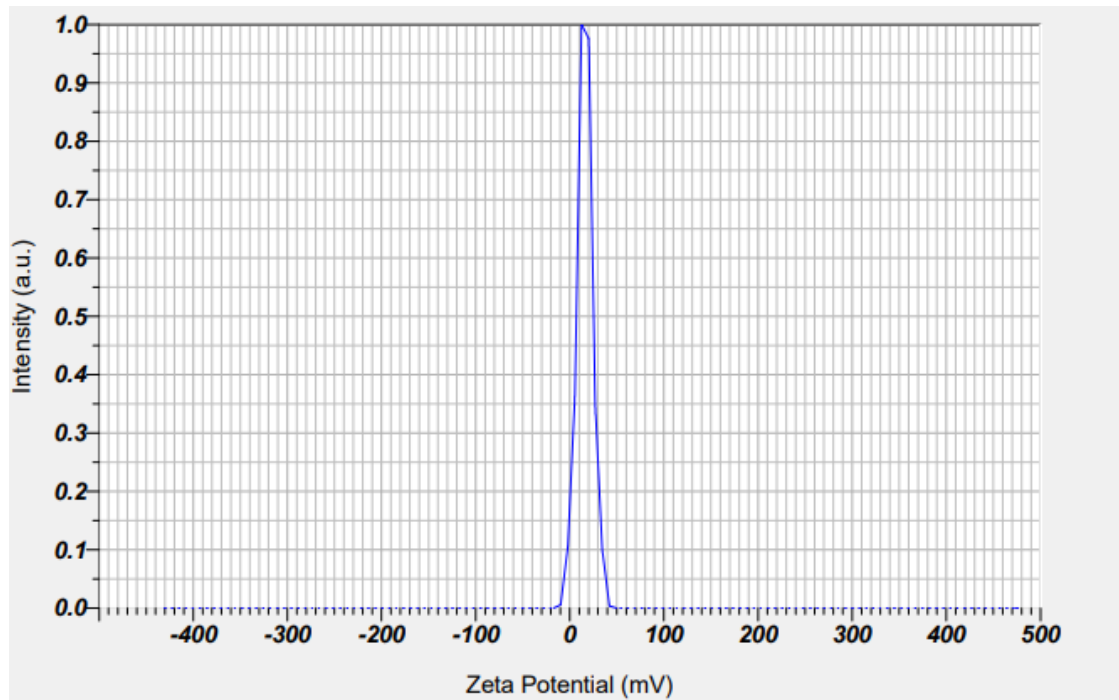
شکل ۲: تصویر FESEM نانوذرات TiO_2
Figure 2: FESEM image of TiO_2 nanoparticles

در شکل ۳ نمودار FTIR نانوذره TiO_2 ارائه شده است. باند جذبی در حدود 741 cm^{-1} مربوط به ارتعاش کششی پیوند Ti-O است که تشکیل ساختار کریستالی TiO_2 را تأیید می‌کند. باند پهن در ناحیه 3195 cm^{-1} ناشی از ارتعاش کششی گروه‌های هیدروکسیل (O-H) سطحی و جذب رطوبت از محیط است. این گروه‌ها موجب افزایش برهم‌کنش هیدروژنی با حلال مونواتانول آمین و پایداری نانوسیال در محیط آبی می‌شوند. باندهای مشاهده‌شده در 1628 و 1387 cm^{-1} به ارتعاش خمشی گروه‌های هیدروکسیل و جذب جزئی CO_2 نسبت داده می‌شوند [۳۰]. این نتایج بیانگر حضور گروه‌های فعال سطحی و پایداری شیمیایی مناسب نانوذرات می‌باشد.



شکل ۳: طیف FTIR نانوذرات TiO₂
Figure 3: FTIR spectrum of TiO₂ nanoparticles

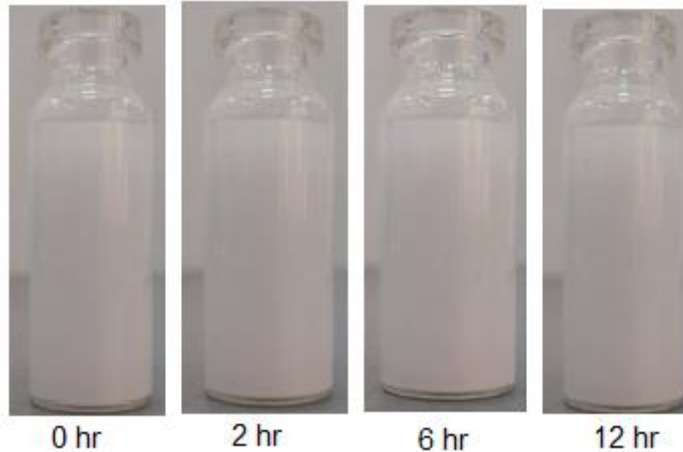
نمودار پتانسیل زتای نانوذره TiO₂ در شکل ۴ نشان می‌دهد که مقدار میانگین زتا +۱۶,۱ mV به دست آمده است که بیانگر پایداری متوسط سوسپانسیون نانوذرات در محیط آبی می‌باشد. با توجه به مقدار پتانسیل زتا، انتظار می‌رفت نانوسیال حاوی TiO₂ در طول زمان دچار افت پایداری و تجمع ذرات شود. به منظور رفع این مشکل و افزایش پایداری سیستم، از مقادیر کمی سورفکتانت غیریونی استفاده شد. مولکول‌های سورفکتانت با جذب فیزیکی بر سطح نانوذرات، لایه‌ای پلیمری نازک تشکیل می‌دهند که از تماس مستقیم بین ذرات جلوگیری کرده و یک مانع فضایی مؤثر ایجاد می‌کند. این مانع، در کنار دافعه‌ی الکترواستاتیکی (با توجه به بار مثبت سطحی)، موجب کاهش نیروهای جاذبه‌ی واندروالس و بهبود پراکندگی یکنواخت در نانوسیال می‌شود.



شکل ۴: پتانسیل زتا نانوذرات TiO₂

Figure 4: Zeta potential of TiO₂ nanoparticles

به منظور بررسی پایداری نانوسیال آبی MEA+TiO₂، نانوسیال TiO₂ با غلظت ۰,۰۵ درصد وزنی در بازه‌های زمانی مختلف از طریق مشاهده چشمی و عکسبرداری مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور نمونه‌ها بلافاصله پس از آماده‌سازی (زمان صفر) و سپس پس از گذشت ۲، ۶ و ۱۲ ساعت مورد مشاهده و تصویربرداری قرار گرفتند که در شکل ۵ نمایش داده شده است. نتایج نشان داد که در طول ۱۲ ساعت نخست، هیچ‌گونه ته‌نشینی قابل توجهی مشاهده نشد و نانوسیال به‌طور یکنواخت پایدار باقی ماند. تنها در بازه پایانی (۲۴ ساعت) مقدار اندکی رسوب در بخش پایین نمونه‌ها ظاهر گردید که قابل اغماض بوده و بر نتایج آزمایش‌های جذب که در بازه زمانی کوتاه‌تر انجام می‌شوند تأثیرگذار نمی‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نانوسیال TiO₂ در شرایط عملیاتی این پژوهش از پایداری مناسبی برخوردار بوده و توزیع یکنواخت ذرات در کل طول آزمایش حفظ شده است.



شکل ۵: پایداری نانو سیال TiO_2 در زمانهای مختلف

Figure 5: Stability of TiO_2 nanofluid at different time intervals

بر اساس تصاویر FESEM و نتایج پتانسیل زتا، توزیع ذرات TiO_2 در محلول یکنواخت بوده و هیچ‌گونه تجمع معنی‌داری مشاهده نشد. وجود گروه‌های هیدروکسیل فعال در طیف FTIR و مقدار زتای $+16.1\text{ mV}$ نشان‌دهنده پایداری متوسط و کافی نانوسیال در زمان انجام آزمایش‌ها است. بررسی تصویری در بازه ۰ تا ۱۲ ساعت نیز یکنواختی پراکندگی ذرات را تأیید کرد.

بطور کلی افزایش انتقال جرم ناشی از افزایش غلظت نانوذرات در کارایی جذب در اکسید کربن را می‌توان با بحث در مورد دو مکانیسم اصلی بهبود انتقال جرم توسط نانوذرات شامل اثر Grazing و حرکت براونی توضیح داد. با این حال، این مکانیسم‌ها هنوز به خوبی درک نشده‌اند و تنها برخی از نظریه‌ها در مقالات ارائه شده‌اند.

حرکت براونی Brownian motion: طبق این نظریه، حرکت براونی نانوذرات باعث ایجاد ریز اغتشاش در فاز مایع می‌شود. ریز اغتشاش‌ها ناشی از حرکت براونی، یک میدان سرعت در فاز مایع ایجاد می‌کنند که منجر به حرکت همرفتی مایع می‌شود و انتقال جرم مؤثر جزء جذب شده را می‌تواند بهبود بخشد. افزایش غلظت منجر به حرکات براونی اضافی توسط نانوذرات بیشتر می‌شود که انتقال جرم دی اکسید کربن را افزایش می‌دهد.

اثر Grazing: در این مکانیزم، نانوذرات به‌عنوان حامل عمل کرده و مولکول‌های CO_2 را روی سطح خود جذب کرده و به درون فاز مایع منتقل می‌کنند. در نتیجه، با افزایش غلظت نانوسیال‌ها، نانوذرات جاذب بیشتری در لایه مرزی مایع وجود دارند که منجر به افزایش اثر Grazing می‌شود. با توجه به سطح ویژه بالای نانوذرات TiO_2 ، این اثر سهم عمده‌ای در بهبود نرخ جذب دارد.

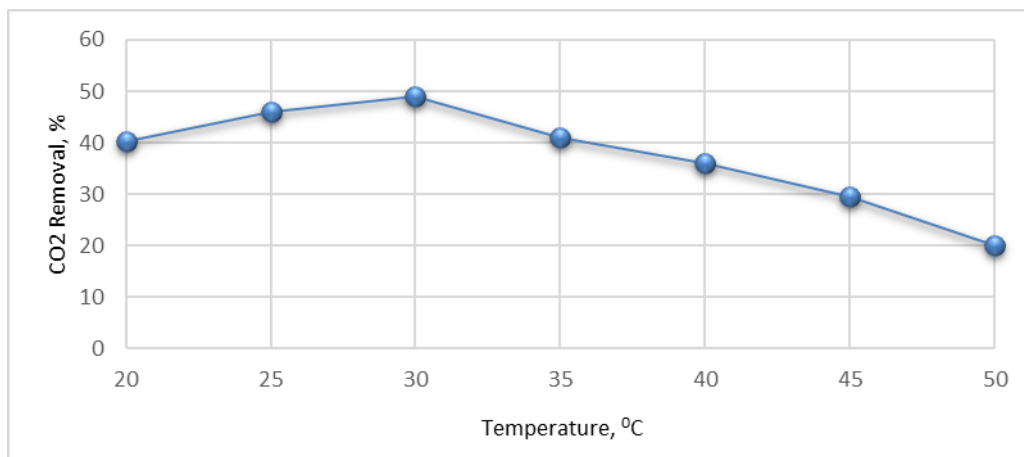
۳. تحلیل نتایج

۳-۱. نتایج آزمایش های جذب با مونو اتانول آمین

در پالایشگاه های گازی، معمولاً از محلول آمین با غلظت ۳۰ تا ۴۰ درصد برای جذب گازهای اسیدی نظیر CO_2 و H_2S استفاده می شود. هدف از این تحقیق، کاهش قابل توجه این غلظت به مقادیر ۵ و ۱۰ درصد با استفاده از مونو اتانول آمین و با بهره گیری از مزیت های نانوسیال و فناوری میکرواختلاط است.

۳-۱-۱. بررسی میزان جذب در دماهای مختلف

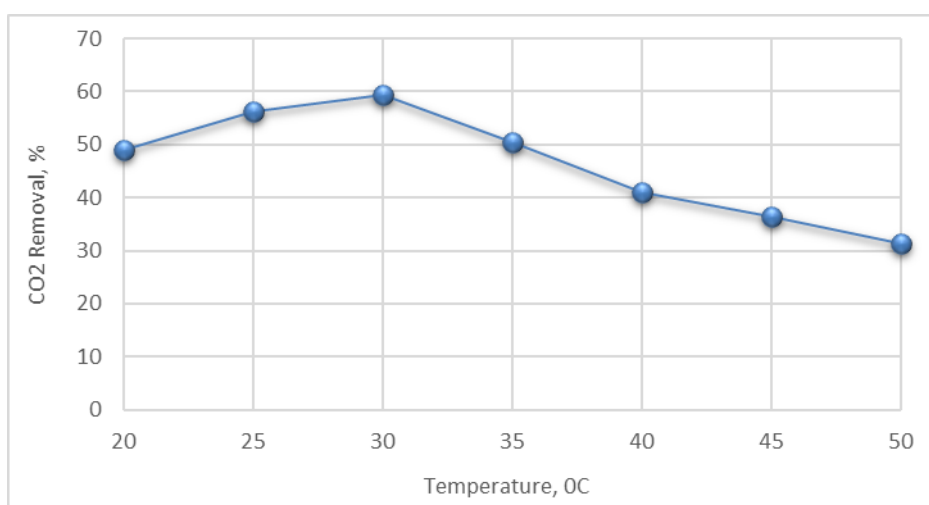
نتایج آزمایش های جذب CO_2 در دماهای مختلف برای حلال با غلظت های ۵ و ۱۰ درصد مونو اتانول آمین در شکل های ۶ و ۷ ارائه شده است. افزایش دما موجب افزایش برخوردهای مؤثر منجر به واکنش شده و سرعت واکنش را تقویت می کند، که در نتیجه سرعت جذب نیز افزایش می یابد. از سوی دیگر، افزایش دما باعث کاهش ویسکوزیته حلال می شود. کاهش ویسکوزیته، لایه مایع در تماس با گاز را کاهش داده و مساحت سطح مشترک گاز-مایع را افزایش می دهد. بنابراین، با افزایش سطح تماس دو فاز، سرعت انتقال جرم نیز افزایش می یابد. با این حال، همزمان با افزایش دما، حلالیت فیزیکی CO_2 در حلال کاهش می یابد که این خود عاملی بازدارنده برای جذب محسوب می شود. به طور کلی، جذب شیمیایی CO_2 در محلول در دو مرحله انجام می شود. مرحله اول شامل جذب فیزیکی CO_2 در حلال است که ناشی از حلالیت آن می باشد، و مرحله دوم شامل واکنش شیمیایی بین CO_2 و حلال است. افزایش دما، مرحله اول را تضعیف می کند اما باعث افزایش قابل توجه سرعت مرحله دوم می شود. بنابراین، اثر دما بر بازدهی جذب CO_2 یک اثر دوگانه است.



شکل ۶: جذب CO_2 با حلال مونو اتانول آمین ۵ درصد (دبی حلال مایع ۱۰۰ ml/hr و دبی گاز ۱۰۰ ml/min)

Figure 6: CO_2 absorption with 5% MEA solvent (solvent flow rate 100 ml/hr gas flow rate 100 ml/min)

همان طور که در شکل های ۶ و ۷ مشاهده می شود، افزایش دما از ۲۰ به ۳۰ درجه سانتی گراد موجب افزایش درصد جذب CO_2 از ۴۰,۱ به ۴۹,۱ درصد برای محلول ۵ درصد مونیو اتانول آمین و از ۴۹ به ۵۹,۳ درصد برای محلول ۱۰ درصد می شود. افزایش دما فراتر از ۳۰ درجه سانتی گراد به دلیل کاهش حلالیت فیزیکی CO_2 در حلال، منجر به کاهش درصد جذب می گردد. با توجه به تأثیر اندک افزایش دما از ۲۵ به ۳۰ درجه سانتی گراد بر جذب CO_2 ، دمای ۲۵ درجه سانتی گراد به عنوان دمای بهینه انتخاب شد و در ادامه، سایر آزمایش ها شامل تأثیر دبی گاز، دبی حلال و اثر نانوسیال در این دما مورد بررسی قرار می گیرد.

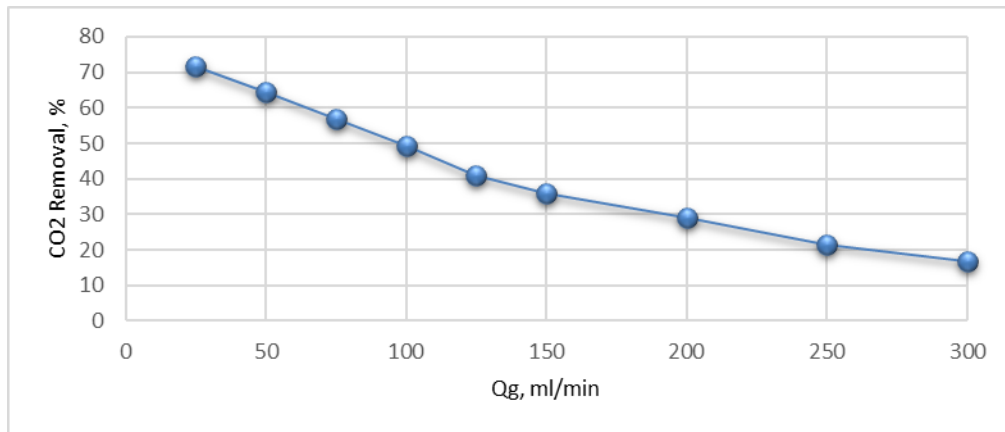


شکل ۷: جذب CO_2 با حلال مونیو اتانول آمین ۱۰ درصد (دبی حلال مایع ۱۰۰ ml/hr و دبی گاز ۱۰۰ ml/min)

Figure 7: CO_2 absorption with 10% MEA solvent (solvent flow rate 100 ml/hr and gas flow rate 100 ml/min)

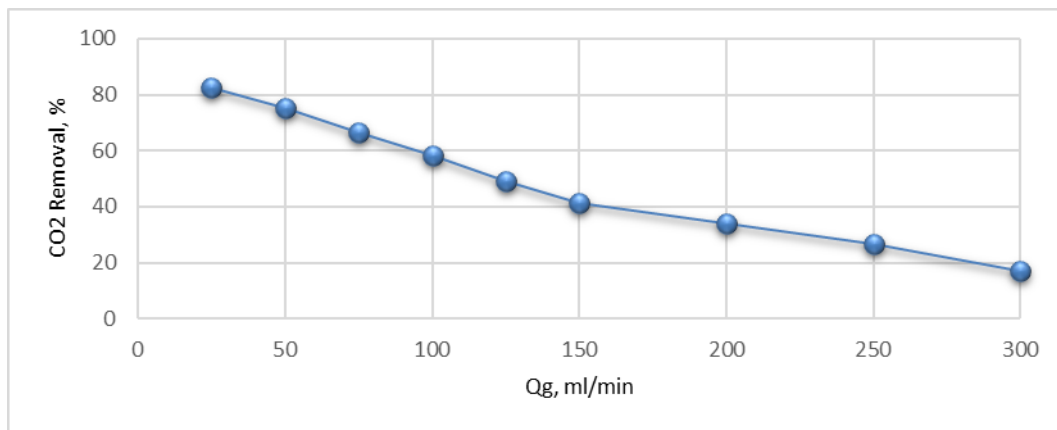
۳-۱-۲. بررسی میزان جذب در دبی های مختلف جریان گاز

نتایج آزمایش های جذب CO_2 در دبی های مختلف گاز برای حلال با غلظت های ۵ و ۱۰ درصد مونیو اتانول آمین در شکل های ۸ و ۹ ارائه شده است. افزایش دبی گاز از یک سو به دلیل افزایش مقدار CO_2 جذب شده توسط آمین، شار انتقال جرم را افزایش می دهد. اما از سوی دیگر، جریان بالاتر گاز موجب افزایش سرعت آن در میکروآکتور و در نتیجه کاهش زمان تماس بین فازهای گاز و مایع می شود، که منجر به افزایش غلظت CO_2 در خروجی میکروآکتور و کاهش درصد جذب CO_2 می گردد.



شکل ۸: جذب CO₂ در دبی های مختلف جریان گاز (حلال ۵ درصد مونو اتانول آمین، دما ۲۵ °C و دبی حلال ۱۰۰ ml/hr)

Figure 8: CO₂ absorption at different gas flow rates (solvent 5% MEA, temperature 25 °C and solvent flow rate 100 ml/hr)



شکل ۹: جذب CO₂ در دبی های مختلف جریان گاز (حلال ۱۰ درصد مونو اتانول آمین، دما ۲۵ °C و دبی حلال ۱۰۰ ml/hr)

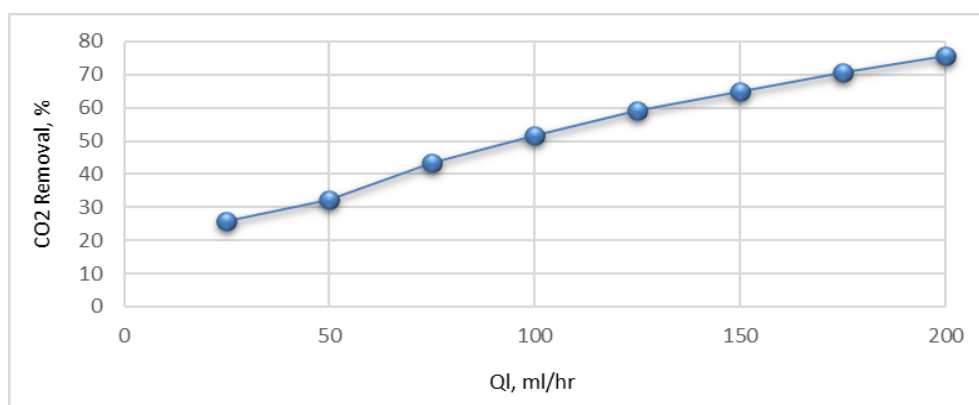
Figure 9: CO₂ absorption at different gas flow rates (solvent 10% MEA, temperature 25 °C and solvent flow rate 100 ml/hr)

همان طور که در شکل های ۸ و ۹ نشان داده شده است، افزایش دبی گاز از ۲۵ تا ۳۰۰ ml/min موجب کاهش درصد جذب CO₂ از ۷۱٫۷ به ۱۶٫۹ درصد برای محلول ۵ درصد مونو اتانول آمین و از ۸۲٫۵ به ۱۶٫۹ درصد برای محلول ۱۰ درصد می شود. همچنین، در شکل ها مشاهده می شود که میزان جذب CO₂ در دبی گاز ۱۰۰ ml/min به ترتیب برابر با ۴۹٫۱ و ۵۸٫۲ درصد برای محلول های ۵ و ۱۰ درصد مونو اتانول آمین است.

همان طور که نتایج آزمایش ها نشان می دهد، در دبی های بالای گاز، به دلیل زمان تماس بسیار کوتاه بین فازهای گاز و مایع، حلالیت CO₂ در فاز مایع کاهش قابل توجهی پیدا کرده و غلظت CO₂ در خروجی افزایش می یابد، که در نتیجه درصد جذب CO₂ بسیار پایین است. با این حال، به منظور بررسی سایر پارامترها و ادامه این تحقیق، از دبی گاز متوسط ۱۰۰ ml/min استفاده شد.

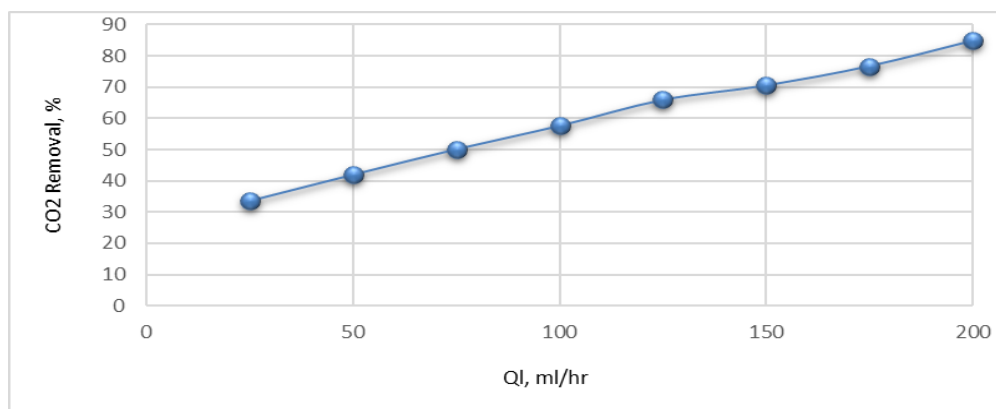
۳-۱-۳. بررسی میزان جذب در دبی های مختلف حلال مایع

نتایج آزمایش‌های جذب CO_2 در دبی‌های مختلف حلال برای محلول‌های ۵ و ۱۰ درصد مونسو اتانول‌آمین در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است. افزایش سرعت جریان حلال موجب افزایش قابل توجه شار انتقال جرم می‌شود. جریان بالاتر حلال، تعداد محل‌های فعال آمین برای پذیرش و جذب CO_2 را افزایش می‌دهد. همچنین، افزایش سرعت جریان حلال باعث کاهش میانگین بار آمین در طول میکروآکتور شده و در نتیجه سرعت جذب افزایش می‌یابد. علاوه بر این، گرادیان شار انتقال جرم در نرخ‌های جریان بالاتر کاهش می‌یابد. همان‌طور که انتظار می‌رود، افزایش سرعت جریان حلال می‌تواند مقادیر زیادی از گاز را به خارج از میکروآکتور منتقل کند و زمان ماند و زمان تعامل بین دو فاز را کاهش دهد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با افزایش دبی حلال مایع، به دلیل کاهش میانگین بار آمین در طول میکروآکتور، سرعت جذب به‌طور خطی و تقریباً یکسان افزایش می‌یابد. با این حال، به دلیل محدودیت‌های هیدرولیکی و افت فشار، نمی‌توان هر دبی را انتخاب کرد و لازم است دبی متناسب با میزان CO_2 موجود تعیین شود.



شکل ۱۰: جذب CO_2 در دبی‌های مختلف حلال با غلظت ۵ درصد MEA (دما 25°C و دبی گاز 100 ml/min)

Figure 10: CO_2 absorption at different solvent flow rates of 5% MEA (temperature 25°C and gas flow rate 100 ml/min)



شکل ۱۱: جذب CO_2 در دبی‌های مختلف حلال با غلظت ۱۰ درصد MEA (دما 25°C و دبی گاز 100 ml/min)

Figure 11: CO_2 absorption at different solvent flow rates of 10% MEA (temperature 25°C and gas flow rate 100 ml/min)

همان‌طور که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است، افزایش دبی حلال مایع از ۲۵ ml/hr به ۲۰۰ ml/hr موجب افزایش درصد جذب CO₂ از ۲۵,۹ به ۷۵,۶ درصد برای محلول ۵ درصد مونیو اتانول آمین و از ۳۳,۶ به ۸۴,۸ درصد برای محلول ۱۰ درصد می‌شود. همچنین، همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود، میزان جذب CO₂ در دبی حلال مایع ۱۰۰ ml/hr به ترتیب برابر با ۵۱,۵ و ۵۷,۶ درصد برای محلول‌های ۵ و ۱۰ درصد مونیو اتانول آمین است. بر اساس نتایج آزمایش‌های تجربی، افزایش سرعت جریان حلال موجب بهبود انتقال جرم و افزایش میزان جذب CO₂ می‌شود. با این حال، با توجه به محدودیت‌های هیدرولیکی و همچنین به منظور کاهش مصرف مواد شیمیایی، لازم است دبی حلال مایع در مقدار بهینه‌ای تنظیم گردد.

۳-۱-۴. مقایسه میزان جذب در دو غلظت مختلف مونیو اتانول آمین

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، واکنش شیمیایی نقش تعیین‌کننده‌ای در سرعت کلی جذب توسط آمین دارد. بنابراین، انتظار می‌رود که افزایش غلظت آمین در حلال، سرعت جذب را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد. مقایسه داده‌های جذب ارائه شده در جدول ۱ نشان می‌دهد که افزایش غلظت مونیو اتانول آمین از ۵ به ۱۰ درصد، میزان جذب CO₂ را بهبود می‌بخشد. افزایش غلظت آمین، مقدار آمین فعال موجود برای جذب CO₂ و سرعت جذب را افزایش می‌دهد. با این حال، افزایش غلظت آمین موجب افزایش ویسکوزیته حلال می‌شود که خود عاملی محدودکننده در افزایش میزان جذب است. علاوه بر این، استفاده از حلال با غلظت بالای آلکانوآمین موجب افزایش میزان COD و نیتروژن کل تولیدی می‌شود که تصفیه پساب آن‌ها علاوه بر هزینه‌بر بودن، می‌تواند به محیط زیست آسیب برساند. همچنین، به‌کارگیری آلکانوآمین‌های با غلظت بالا باعث تشکیل فوم خورنده در فرآیند احیای حلال می‌شود. لذا با توجه به دلایل ذکر شده، کاهش غلظت آمین یکی از مهم‌ترین الزامات در بخش صنعتی برای دستیابی به یک حلال بهینه است.

جدول ۱: مقایسه درصد جذب CO₂ در حلال با دو غلظت مختلف مونیو اتانول آمین (دما ۲۵ °C و دبی گاز ۱۰۰ ml/min)

Table 1: Percentage of CO₂ absorption in solvent with two different concentrations of MEA (temperature 25 °C and gas flow rate 100ml/min)

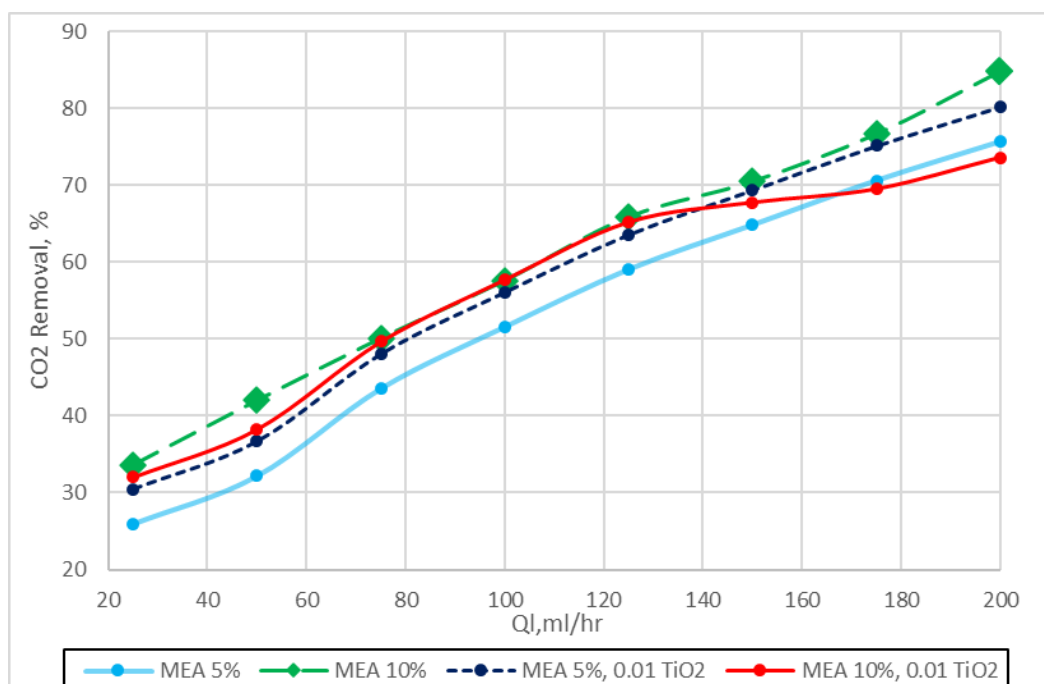
دبی حلال 200ml/hr Solvent flow rate	دبی حلال 100ml/hr Solvent flow rate	غلظت مونیو اتانول آمین MEA Concentration
75.6%	51.6%	5%
84.8%	57.6%	10%

۳-۲. نتایج آزمایش های جذب CO₂ با نانو سیال TiO₂

نانوسیالها از پراکندگی نانوذرات در سیالات پایه تشکیل شده و با افزایش سطح تماس بین جاذب و ماده جذب شونده، انتقال جرم را تسریع کرده و فرآیند جذب را بهبود می بخشد. وجود نانوذرات در حلال مونو اتانول آمین موجب افزایش نرخ جذب و دفع CO₂ می شود و علاوه بر این، به بهبود پایداری حلال و کاهش فشار بخار آن کمک می کنند [۳۰]. بسیاری از مطالعات نشان می دهند که افزودن بهبوددهنده ها یا پراکندگی فاز سوم مانند ذرات جامد، می تواند عملکرد جذب گاز را به طور قابل توجهی افزایش دهد [۳۱]. بنابراین، جایگزینی حلال های آمینی با جاذب های نانوسیالی مبتنی بر آمین که در فاز مایع پراکنده می شوند، می تواند صرفه جویی قابل توجهی در مصرف انرژی ایجاد کند، زیرا این جاذبها برای بازیابی حلال مایع نیاز به انرژی زیادی برای چرخه های گرمایش و سرمایش ندارند [۳۲]. در این تحقیق، تاثیر نانوذرات TiO₂ در سه غلظت ۰،۰۱، ۰،۰۵ و ۰،۱ درصد وزنی و در سیال پایه ۵ و ۱۰ درصد مونو اتانول آمین برای جذب CO₂ از مخلوط گازی در میکروآکتور مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۲-۱. نتایج آزمایش های جذب با نانو سیال با غلظت ۰،۰۱ درصد از TiO₂

نتایج آزمایش های جذب CO₂ با استفاده از نانوذرات TiO₂ در غلظت ۰،۰۱ درصد وزنی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در این آزمایش، نانوذرات در دو غلظت مختلف حلال مونو اتانول آمین (۵ و ۱۰ درصد) پراکنده شدند و داده ها با نتایج مربوط به حلال آمین خالص مقایسه شده اند.



شکل ۱۲: جذب CO₂ در دبی های مختلف نانوسیال TiO₂ (۰،۰۱ درصد وزنی TiO₂، دمای ۲۵ °C، دبی گاز ۱۰۰ ml/min)

Figure 12: CO₂ absorption at different flow rates of TiO₂ nanofluid (Qg=100 ml/min, T=25 °C, 0.01wt% TiO₂)

همان طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، در حلال ۵ درصد مونو اتانول آمین، افزودن ۰,۰۱ درصد وزنی نانوذرات CO₂ تأثیر قابل توجهی بر افزایش جذب CO₂ دارد و این روند افزایش تقریباً در تمامی دبی‌های حلال مشاهده می‌شود. ملاحظه می‌گردد که در دبی حلال ۲۰۰ ml/hr، درصد جذب CO₂ از ۷۵,۶ به ۸۰,۲ درصد افزایش یافته است، که نشان‌دهنده بهبود ۴,۶ درصدی جذب CO₂ ناشی از افزودن نانوذرات است.

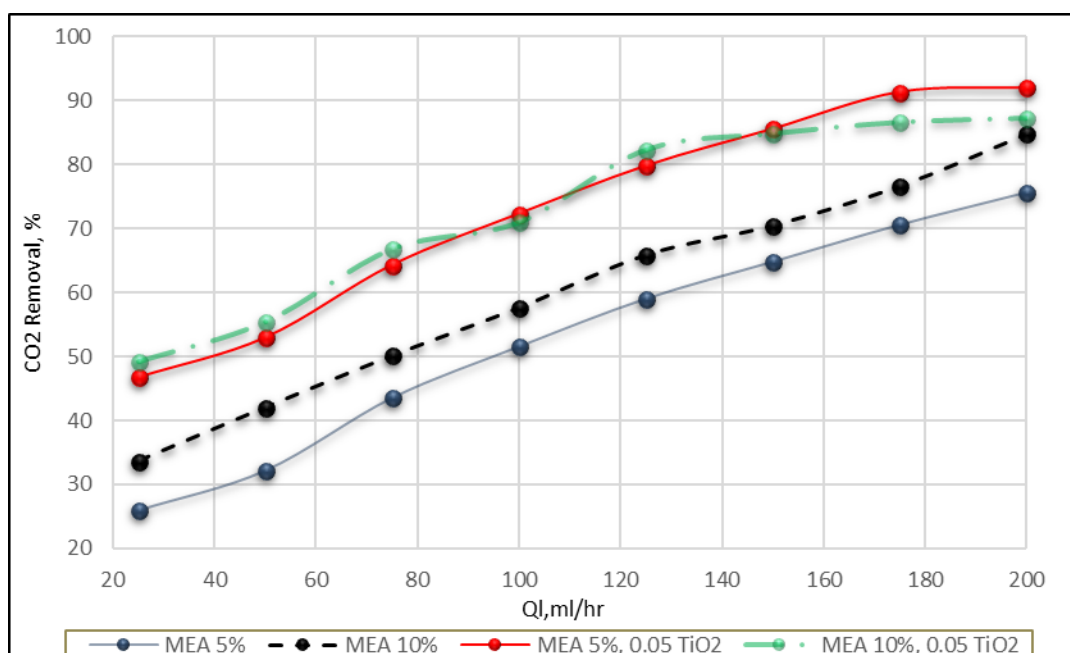
در حلال ۱۰ درصد مونو اتانول آمین، افزودن ۰,۰۱ درصد وزنی نانوذرات تأثیر مثبتی بر عملکرد جذب CO₂ نداشته است، به طوری که در اکثر دبی‌های حلال، درصد جذب CO₂ یا کاهش یافته یا تغییری نکرده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از نانوسیال در این غلظت برای این غلظت آمین موضوعیت ندارد. به عنوان مثال، در دبی حلال ۲۰۰ ml/hr، درصد جذب CO₂ برای محلول ۱۰ درصد مونو اتانول آمین بدون نانوسیال ۸۴,۸ درصد و با نانوسیال ۷۳,۵ درصد است که نشان‌دهنده کاهش ۱۱,۳ درصد در جذب CO₂ با افزودن نانوذرات به سیال پایه می‌باشد. البته در دبی‌های پایین‌تر حلال، این کاهش کمی کمتر است.

در مقایسه نانوسیال‌های حاوی ۰,۰۱ درصد وزنی TiO₂ با دو غلظت متفاوت سیال پایه مونو اتانول آمین (۵ و ۱۰ درصد)، مشاهده می‌شود که بسته به دبی حلال، عملکرد متفاوت است. در دبی‌های پایین حلال، عملکرد نانوسیال با آمین ۱۰ درصد اندکی بهتر است، در حالی که در دبی‌های بالاتر، نانوسیال با آمین ۵ درصد عملکرد بهتری نشان می‌دهد. همچنین، در مقایسه نانوسیال TiO₂ ۰,۰۱ درصد با حلال مونو اتانول آمین ۵ درصد و حلال مونو اتانول آمین ۱۰ درصد به تنهایی، همان طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، عملکرد محلول ۱۰ درصد به تنهایی اندکی بهتر است. به طور مثال، در دبی حلال ۲۰۰ ml/hr، درصد جذب CO₂ به ترتیب برای نانوسیال با آمین ۵ درصد و آمین ۱۰ درصد به تنهایی برابر با ۸۰,۲ و ۸۴,۸ درصد می‌باشد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که افزودن ۰,۰۱ درصد وزنی نانوذرات TiO₂ تنها در محلول مونو اتانول آمین ۵ درصد مؤثر است و در غلظت‌های بالاتر آمین، از نظر عملکردی توجیهی ندارد. به نظر می‌رسد این کاهش درصد جذب، ناشی از کشش سطحی بالاتر محلول ۱۰ درصد مونو اتانول آمین و آب (ویسکوزیته بیشتر) و همچنین ایجاد خاصیت ارتجاعی (الاستیسیته) محلول باشد [۳۳]. این کاهش ناشی از الاستیسیته بالاتر محلول ۱۰ درصد مونو اتانول آمین است که باعث کاهش نفوذ مطابق با مدل فیلم مایع می‌شود، در حالی که در محلول ۵ درصد مونو اتانول آمین، نانوذرات می‌توانند آزادانه‌تر عمل کنند.

۳-۲-۲. نتایج آزمایش‌های جذب با نانو سیال با غلظت ۰,۰۵ درصد از TiO₂

نتایج آزمایش‌های جذب CO₂ از جریان گاز با استفاده از نانوسیال حاوی ۰,۰۵ درصد وزنی TiO₂ در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در این آزمایش‌ها، نانوسیال‌ها در دو غلظت متفاوت سیال پایه مونو اتانول آمین (۵ و ۱۰ درصد) تهیه شده و نتایج با عملکرد حلال آمین پایه مقایسه شده‌اند. همان طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، افزودن نانوذرات TiO₂ در هر دو غلظت ۵ و ۱۰ درصد مونو اتانول آمین

موجب بهبود عملکرد جذب CO₂ شده است. در دبی حلال 200 ml/hr، درصد جذب CO₂ برای محلول‌های 5 و 10 درصد مونو اتانول آمین با افزودن نانوذرات به ترتیب از 75,6 و 84,8 درصد به 92,1 و 87,3 درصد افزایش یافته است. به عبارت دیگر، در غلظت 5 درصد مونو اتانول آمین، افزودن نانوذرات باعث افزایش 16,5 درصد و در غلظت 10 درصد مونو اتانول آمین باعث افزایش 2,5 درصد در جذب CO₂ شده است.



شکل ۱۳: جذب CO₂ در دبی‌های مختلف نانوسیال TiO₂ (0,05 درصد وزنی TiO₂، دمای 25 °C، دبی گاز 100 ml/min)

Figure 13: CO₂ absorption at different flow rates of TiO₂ nanofluid (Qg=100 ml/min, T=25 °C, 0.05 wt% TiO₂)

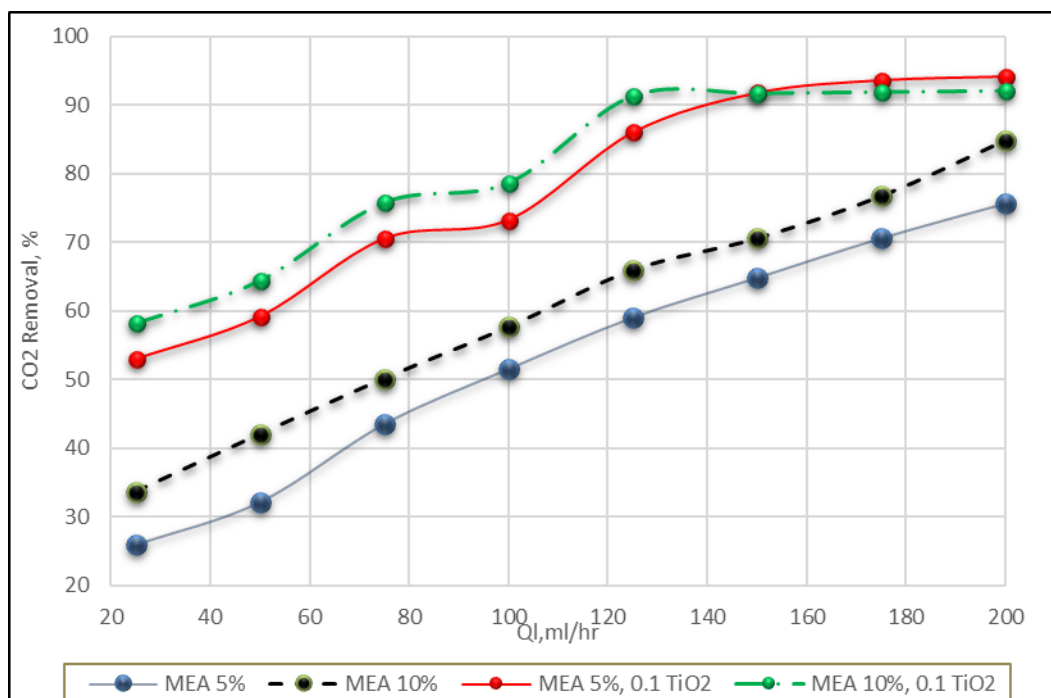
در مقایسه دو نانوسیال، همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، نانوسیال با مونو اتانول آمین 5 درصد در دبی‌های پایین حلال عملکردی تقریباً مشابه با نانوسیال 10 درصد نشان می‌دهد، اما در دبی‌های بالای حلال، عملکرد بهتری نسبت به نانوسیال با غلظت 10 درصد دارد. برای نانوسیال با غلظت 10 درصد مونو اتانول آمین، همان‌طور که دیده می‌شود، در دبی‌های پایین حلال اختلاف عملکرد بین نانوسیال و حلال آمین پایه بیشتر است، اما با افزایش دبی حلال، این اختلاف کاهش یافته و عملکردها به هم نزدیک می‌شوند.

به طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که در دبی‌های پایین حلال، به دلیل زمان تماس بالاتر، تأثیر نانوذرات افزایش یافته و نانوسیال‌ها عملکرد جذب بهتری نسبت به سیال پایه ارائه می‌دهند. با افزایش دبی حلال، میزان توربولانس و گرادیان غلظت افزایش می‌یابد و در نتیجه اختلاف عملکرد جذب بین سیال پایه و نانوسیال کاهش می‌یابد.

۳-۲-۳. نتایج آزمایش های جذب با نانو سیال با غلظت ۰,۱ درصد از TiO_2

نتایج آزمایش های جذب CO_2 در غلظت ۰,۱ درصد نانو ذره TiO_2 در شکل ۱۴ نشان داده شده است. در این آزمایش، نانوذرات در دو غلظت متفاوت محلول پایه مونیو اتانول آمین (۵ و ۱۰ درصد) پراکنده شده و داده ها با عملکرد حلال آمین پایه مقایسه شده اند.

همان طور که در داده های آزمایشگاهی شکل ۱۴ نشان داده شده است، افزودن ۰,۱ درصد وزنی نانوذرات TiO_2 در هر دو غلظت ۵ و ۱۰ درصد مونیو اتانول آمین موجب بهبود عملکرد جذب CO_2 شده است. در دبی حلال ۲۰۰ ml/hr، درصد جذب CO_2 برای محلول های ۵ و ۱۰ درصد مونیو اتانول آمین با افزودن نانوذرات به ترتیب از ۷۵,۶ و ۸۴,۸ درصد به ۹۴,۲ و ۹۲,۱ درصد افزایش یافته است. به عبارت دیگر، در غلظت ۵ درصد آمین، افزودن نانوذرات باعث افزایش ۱۸,۶ درصد و در غلظت ۱۰ درصد آمین باعث افزایش ۷,۳ درصد در جذب CO_2 شده است. در مقایسه دو نانوسیال، همان طور که در شکل مشاهده می شود، نانوسیال حاوی ۵ درصد مونیو اتانول آمین در دبی های پایین حلال عملکردی اندکی پایین تر و در دبی های بالای حلال عملکردی بهتر نسبت به نانوسیال با ۱۰ درصد مونیو اتانول آمین دارد. همان طور که پیش تر ذکر شد، این موضوع به دلیل کشش سطحی بالاتر محلول نانوسیال با غلظت ۱۰ درصد است، که باعث مقاومت بیشتر در پراکندگی پایدار و یکنواخت نانوذرات در حلال شده و در نتیجه میزان جذب کاهش می یابد.



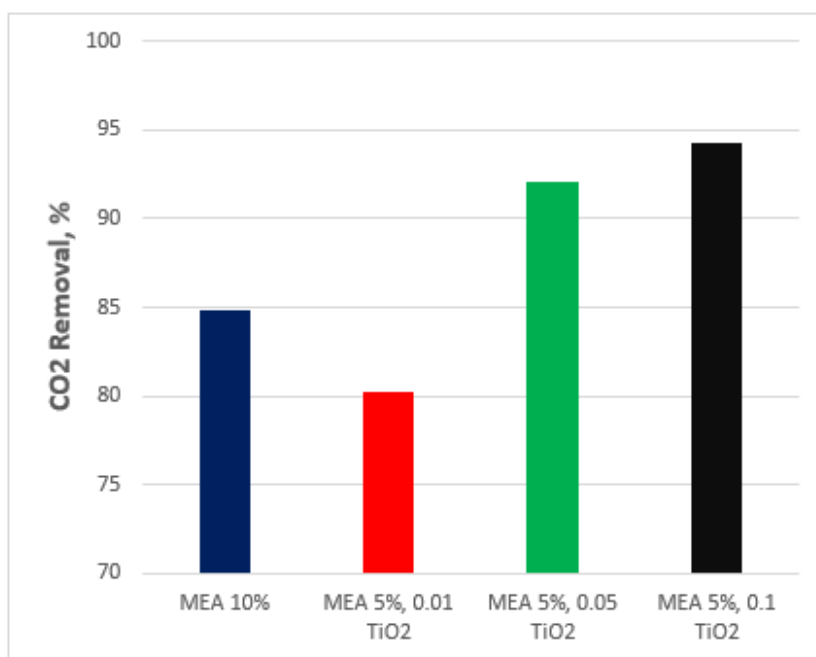
شکل ۱۴: جذب CO_2 در دبی های مختلف نانوسیال TiO_2 (۰,۱ درصد وزنی TiO_2 ، دمای $25^{\circ}C$ ، دبی گاز 100 ml/min)

Figure 14: CO_2 absorption at different flow rates of TiO_2 nanofluid ($Q_g=100\text{ ml/min}$, $T=25\text{ }^{\circ}C$, $0.1\text{ wt\% }TiO_2$)

3-2-4. مقایسه عملکرد جذب در سه غلظت متفاوت نانو سیال TiO_2

در این بخش، شرایط بهینه نانوسیالات مبتنی بر TiO_2 مورد مقایسه قرار گرفته و تأثیر غلظت نانوذرات بر درصد جذب CO_2 ارزیابی شده است. نتایج این مقایسه در شکل ۱۵ آورده شده است. در این شکل، سیستم حلال پایه مونو اتانول آمین با غلظت ۱۰ درصد، که در میکروآکتور عملکرد جذب مناسبی نشان داده است، با نانوسیالات حاوی سیال پایه مونو اتانول آمین ۵ درصد و نانوذرات با غلظت‌های ۰,۰۱، ۰,۰۵ و ۰,۱ درصد وزنی مقایسه شده است. در شرایط عملیاتی بهینه، درصد جذب CO_2 به ترتیب برابر با ۸۴,۸، ۸۰,۲، ۹۲,۱ و ۹۴,۲ درصد به دست آمده است.

همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، در غلظت ۰,۰۱ وزنی نانوسیال TiO_2 ، افزودن نانوسیال باعث بهبود عملکرد جذب و افزایش درصد جذب CO_2 تا ۴,۶ درصد برای حلال پایه مونو اتانول آمین ۵ درصد شده است؛ با این حال، این عملکرد همچنان کمتر از عملکرد حلال مونو اتانول آمین ۱۰ درصد است.



شکل ۱۵: مقایسه عملکرد جذب در سه غلظت متفاوت نانو سیال TiO_2 (دمای $25^{\circ}C$ ، دبی حلال ۲۰۰ ml/hr، دبی گاز ۱۰۰ ml/min)

Figure 15: Absorption performance at different concentrations of nanofluid ($Q_g=100$ ml/min, $Q_l=200$ ml/hr, $T=25^{\circ}C$)

افزایش غلظت نانوذره TiO_2 به ۰,۰۵ درصد وزنی موجب افزایش ۱۱,۹ درصد، در درصد جذب CO_2 شد که به‌طور قابل توجهی بالاست. افزایش غلظت نانوذره از ۰,۰۱ تا ۰,۱ درصد وزنی نیز موجب بهبود درصد جذب تا ۱۴ درصد شد که اندکی بیشتر از عملکرد نانوسیال با غلظت ۰,۰۵ درصد می‌باشد. مشاهده می‌شود که افزودن نانوذرات TiO_2 به حلال می‌تواند ظرفیت جذب CO_2 را افزایش دهد، که این امر به بهبود ضریب انتقال جرم ناشی از وجود گروه‌های عاملی هیدروکسیل بر سطح نانوذرات نسبت داده می‌شود [۳۴]. با این حال، باید توجه داشت که یکی از مشکلات اصلی نانوسیالات، پایداری

آن‌ها است. نیروهای واندروالس عامل اصلی ناپایداری نانوسیال‌ها هستند و با افزایش تعداد نانوذرات، به دلیل حرکت براونی و افزایش مساحت سطح، احتمال برخورد ذرات با یکدیگر افزایش یافته و ناپایداری تشدید می‌شود [۲۹]. بنابراین، افزایش غلظت نانوسیال از یک حد مشخص به بعد، تأثیر مورد انتظار بر بهبود عملکرد جذب را نخواهد داشت و به تدریج سبب ناپایداری حلال و کاهش عملکرد نانوسیال می‌گردد. افزودن نانوذرات موجب افزایش ویسکوزیته می‌شود. اگرچه در این مطالعه ویسکوزیته به‌طور مستقیم اندازه‌گیری نشد، اما مطالعات مشابه نشان داده‌اند که در غلظت‌های پایین نانوذرات، تغییرات ویسکوزیته ناچیز و قابل چشم‌پوشی است [۲۱].

۰۴. نتیجه گیری

در این پژوهش، عملکرد نانوسیال $MEA + TiO_2$ در یک میکرو راکتور برای جذب دی‌اکسید کربن به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزودن نانوذرات TiO_2 در غلظت‌های پایین (۰٫۱-۰٫۰۱ درصد وزنی) منجر به افزایش قابل توجه بازده جذب شد. این بهبود عمدتاً ناشی از مکانیزم‌هایی نظیر حرکت براونی، اثر grazing و تغییرات ریزمقیاس در لایه مرزی مایع است. آزمایش‌ها با تکرارپذیری مناسب انجام شد (انحراف معیار کمتر از $\pm 3\%$)، که اعتبار و قابلیت اعتماد نتایج را تأیید می‌کند.

در شرایط عملیاتی بهینه، درصد جذب دی‌اکسید کربن با استفاده از محلول‌های پایه مونو اتانول آمین با غلظت‌های ۵ و ۱۰ درصد به ترتیب ۷۵٫۶ و ۸۴٫۸ درصد به دست آمد. در حالی که برای نانوسیالات مبتنی بر مونو اتانول آمین ۵ درصد و با غلظت نانوذرات TiO_2 به ترتیب ۰٫۰۱، ۰٫۰۵ و ۰٫۱ درصد وزنی، درصد جذب CO_2 برابر با ۸۰٫۲، ۹۲٫۱ و ۹۴٫۲ درصد بود. همچنین در نانوسیالات مبتنی بر مونو اتانول آمین ۱۰ درصد و با همان غلظت‌های نانوذرات، درصد جذب به ترتیب ۷۳٫۵، ۸۷٫۳ و ۹۲٫۱ درصد حاصل شد. بررسی کلی نتایج نشان می‌دهد که نانوسیال بهینه در این پژوهش، شامل ۰٫۰۵ درصد وزنی نانوذرات TiO_2 و سیال پایه ۵ درصد مونو اتانول آمین است، که عملکرد جذب CO_2 را نسبت به محلول پایه خود ۱۶٫۵ درصد بهبود می‌دهد.

این مطالعه بینش جدیدی در مورد استفاده از میکرو راکتور همراه با نانوسیالات در غلظت‌های پایین MEA با TiO_2 ارائه داد و نشان داد که افزایش عملکرد فرآیند جذب CO_2 می‌تواند منجر به کاهش مصرف انرژی شود. با این حال، برای توسعه صنعتی این روش، تحقیقات بیشتری در زمینه پایداری بلندمدت نانوسیال، جنبه‌های اقتصادی و طراحی مقیاس بزرگ ضروری است.

References

- [1] Etemad E., Ghaemi A., Shirvani M. (2015) "Rigorous Correlation for CO₂ Mass Transfer Flux in Reactive Absorption Processes", *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 42: 288-295, <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.08.011>.
- [2] Mondal M.K., Balsora H.K., Varshney P. (2012) "Progress and Trends in CO₂ Capture/Separation Technologies: A Review", *Energy*, 46(1): 431-441, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.08.006>.
- [3] Pashaei H., Zarandi M.N., Ghaemi A. (2017) "Experimental study and modeling of CO₂ absorption into Diethanolamine solutions using stirrer bubble column", *Chemical Engineering Research and Design*, 121: 32-43, <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.03.001>.
- [4] Koytsoumpa E.I., Bergins C., Kakaras E. (2018) "The CO₂ Economy: Review of CO₂ Capture and Reuse Technologies", *Journal of Supercritical Fluids*, 132: 3-16, <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2017.07.029>.
- [5] Yadav S.K., Mishra G.C. (2013) "Global Energy Demand Consequences Versus Greenhouse Gases Emission", *International Journal of Engineering Science*, 6: 781-788.
- [6] Bajpai A., Mondal M.K. (2013) "Equilibrium solubility of CO₂ in aqueous mixtures of DEA and AEE", *Journal of Chemical & Engineering Data*, 58(6): 1490-1495, <https://doi.org/10.1021/jc3011776>.
- [7] Zhang Z.E., Yan Y.F., Zhang L., Ju S.X. (2014) "Hollow fiber membrane contactor absorption of CO₂ from the flue gas: review and perspective", *Global NEST Journal*, 16: 355-374, <https://doi.org/10.30955/gnj.001343>.
- [8] Aghel B., Heidarian E., Sahraei S., Mir S. (2019) "Application of microchannel reactor to carbon dioxide absorption", *Journal of Cleaner Production*, 231: 723-732, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.265>.
- [9] Guangwen C., Jun Y., and Quan Y. (2008) "Gas-Liquid Microreaction Technology: Recent Developments and Future Challenges" *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 16(5): 663-669, [https://doi.org/10.1016/S1004-9541\(08\)60138-X](https://doi.org/10.1016/S1004-9541(08)60138-X).
- [10] Löwe H., Ehrfeld W. (1999) "State-of-the-Art in Microreaction Technology: Concepts, Manufacturing and Applications", *Electrochimica Acta*, 44(21-22): 3679-3689, [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(99\)00071-7](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(99)00071-7).
- [11] Lee J.W., Kang Y.T. (2013) "CO₂ Absorption Enhancement by Al₂O₃ nanoparticles in NaCl aqueous solution", *Energy*, 53, 206-211, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.02.047>.
- [12] Jiang G. (2014) "Experimental study of CO₂ Absorption in aqueous MEA and MDEA solution enhanced by nanoparticles", *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 29: 135-141, <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2014.08.004>.
- [13] Jiang J. (2013) "Chemical Absorption kinetics in MEA solution with nanoparticles", *Energy Procedia*, 37: 518-524, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.138>.
- [14] Lee J.W., Jung J.Y., Lee, S.G., Kang Y.T. (2011) "CO₂ Bubble Absorption enhancement in methanol based nanofluids", *International Journal of Refrigeration*, 34(8): 1727-1733, <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2011.08.002>.
- [15] Pineda L.T. (2012) "CO₂ Absorption enhancement in methanol-based Al₂O₃ and SiO₂ nanofluids in a tray column absorption", *International Journal of Refrigeration*, 35(5): 1402-1409, <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2012.03.017>.
- [16] Jung J.Y., Lee J.W., Lee S.J. (2012) "CO₂ Absorption characteristics of nanoparticle suspensions in methanol", *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26: 2285-2290, <https://doi.org/10.1007/s12206-012-0609-y>.
- [17] Pashaei H., Ghaemi A., Nasiri M., Heydarifard M. (2018) "Experimental investigation of the effect of nano heavy metal oxide particles in piperazine solution on CO₂ Absorption using a stirrer bubble column", *Energy & Fuels*, 32(2):2037-2052, <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b03481>.
- [18] Aghel B., Heidarian E., Sahraei S., Varmira K. (2019) "Experimental study of carbon dioxide absorption by mixed aqueous solution of methyl diethanolamine (MDEA) and Piperazine (PZ) in a microreactor", *Process Safety and Environmental Protection*, 131: 152-159, <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.09.008>.
- [19] Seo S., Lages B., Kim M. (2020) "Catalytic CO₂ Absorption in an amine solvent using nickel nanoparticles for post-combustion carbon capture", *Journal of CO₂ Utilization*, 36: 244-252, <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.11.011>.
- [20] Pashaei, H., Ghaemi, A. (2020) "CO₂ 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: 104-110, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104110>.
- [21] Lee J.W., Pineda I.T., Lee J.H., Kang Y.T. (2016) "Combined CO₂ absorption/regeneration performance enhancement by using nanoabsorbents", *Applied Energy*, 178: 164-176, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.048>.
- [22] Pourtalebi B., Alizadeh R., Valibeknejad M. (2025) "Enhancements of CO₂ absorption in wetted/wetted-column using nanoparticles and ionic liquids: A CFD study", *Journal of Molecular Liquids*, 48: 126738, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.126738>.
- [23] Orendi H.W., Joby K., Šiller L. (2024) "Enhancements of monoethanolamine CO₂ absorption rate and degradation in the presence of nickel nanoparticles catalysts", *Journal of CO₂ Utilization*, 79: 102654, <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2023.102654>.
- [24] Zarei F., Keshavarz P. (2023) "High performance CO₂ Absorption/Desorption using Amine-Functionalized magnetic nanoparticles", *Separation and Purification Technology*, 323: 124438, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124438>.
- [25] Hafizi A., Hemmatzadeh Dastgerdi A., Khalifeh R. (2025) "Highly efficient CO₂ absorption using improved and functionalized magnetic nanoparticles in physical and chemical absorbents", *Journal of CO₂ Utilization*, 99: 103173, <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2025.103173>.
- [26] Shin J.W., Song Y.H., Park J.Y. (2014) "Energy recovery of ethanolamine in wastewater using an air-cathode microbial fuel cell", *International Biodeterioration & Biodegradation*, 95: 117-121, <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.05.021>.
- [27] Shin J.W., Song Y.H., Park J.Y. (2015) "The enhancement of ammonium removal from ethanol amine wastewater using an air-cathode microbial fuel cells coupled to ferric reduction", *Bioresour. Technol.*, 190: 466-473, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.048>.
- [28] Filimoon A. (2018) "Amino-silicones as active compounds in the detection and capture of CO₂ from the environmental alexandra bargan and maria cazacu, smart mater", *Design, Engineering Approaches and potential Application*.
- [29] Zhang Q., Ning Zh., Li X., Ning X., Wu F. Zhou J. (2023) "Experimental study of CO₂ capture by nanoparticle-enhanced 2-amino-2-methyl-1-propanol aqueous solution", *RSC Advances*, 13: 33644, <https://doi.org/10.1039/d3ra06767j>.
- [30] Krishnamurthy S., Bhattacharya P., Phelan P., Prasher R. (2006) "Enhanced Mass Transport in Nanofluids", *Nano letters*, 6(3): 419-423, <https://doi.org/10.1021/nl0522532>.
- [31] Sumin L.U.; Min X.; Yan S.U.N.; Xiangjun D. (2013) "Experimental and theoretical studies of CO₂ absorption enhancement by nano-Al₂O₃ and carbon nanotube particles", *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 21: 983-990, [https://doi.org/10.1016/S1004-9541\(13\)60550-9](https://doi.org/10.1016/S1004-9541(13)60550-9).
- [32] Arshadi M., Taghvaei H., Abdolmaleki M., Lee M., Eskandarloo H., Abbaspourrad A. (2019) "Carbon dioxide absorption in water/nanofluid by a symmetric amine-based nanodendritic adsorbent", *Applied Energy*, 242: 1562-1572, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.105>.
- [33] Komati S., Suresh A.K. (2008) "CO₂ absorption into amine solutions: A novel strategy for intensification based on the addition of ferrofluids", *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 83: 1094-1100, <https://doi.org/10.1002/jctb.1871>.
- [34] Irani V., Maleki A., Tavasoli A. (2019) "CO₂ absorption enhancement in graphene-oxide/MDEA nanofluid", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(1): 102782, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.11.027>.
- [35] Ilyas S.U., Pendyala R., Narahari M., Susin L. (2017) "Stability, rheology and thermal analysis of functionalized alumina-thermal oil-based nanofluids for advanced cooling systems", *Energy Conversion and Management*, 142: 215-229, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.01.079>.
- [36] Haghtalab A., Mohammadi M., Fakhroueian Z. (2015) "Absorption and solubility measurement of CO₂ in water-based ZnO and SiO₂ nanofluids", *Fluid Phase equilibria*, 392: 33-42, <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2015.02.012>.