



Journal of Applied Research in Chemical-Polymer Engineering

journal homepage: www.arcpe.modares.ac.ir

Research Paper

Investigation of carbon dioxide absorption behavior in aqueous solutions of MDEA and DAP in the presence of acetic acid impurity

Reza Noroozi¹, Mojgan Abbasi², Siavash Riahi^{2,*}

¹ School of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

² Institute of Petroleum Engineering, School of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

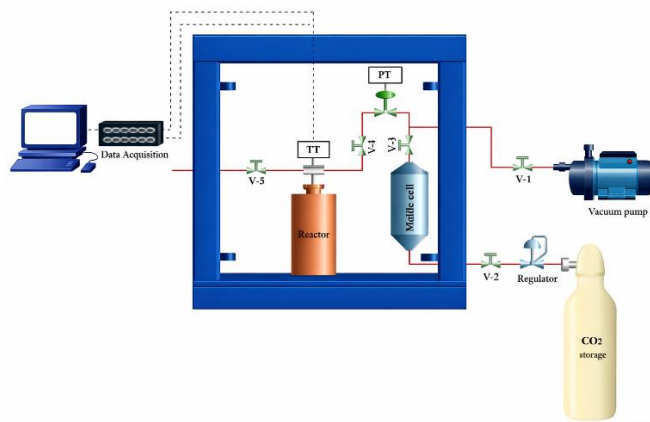
ARTICLE INFO

Received 2026-02-15
Revised 2026-06-17
Accepted 2026-06-20
Available online 2026-10-24
ISSN: 2588-5316
Online ISSN: 2588-5324

Keywords:

carbon dioxide absorption
methyldiethanolamine
heat-stable salts
absorption kinetics
1,3-diaminopropane

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

Research subject: Oxidative degradation of amine solvents represents a major challenge in carbon dioxide absorption processes, leading to the formation of heat-stable salts (HSS) and consequent reductions in CO₂ absorption capacity and kinetics. This study examines the effect of acetic acid, as one of the major degradation products, on the CO₂ absorption performance of aqueous methyldiethanolamine (MDEA) solutions. In addition, the potential remedial role of 1,3-diaminopropane (DAP) as a reactive diamine additive is evaluated.

Research approach: CO₂ absorption experiments were carried out using a volumetric method at 303.15 K and an initial pressure of 620 kPa. First, the effect of acetic acid at three different weight percentages on equilibrium absorption capacity, kinetic behavior, and solution pH of MDEA was investigated. Subsequently, DAP was added to the degraded MDEA solution at concentrations of 2.5, 6, and 10 wt.%, and the resulting changes in absorption capacity, kinetics, and pH were systematically analyzed.

Main results: The results demonstrate that acetic acid significantly deteriorates the CO₂ absorption performance of aqueous MDEA solutions. Specifically, the presence of acetic acid led to a reduction of about 20% in the CO₂ absorption capacity and a significant weakening of the absorption kinetics, accompanied by a noticeable decrease in pH and an increase in equilibrium pressure. These detrimental effects are mainly attributed to the formation of HSS and the reduction of the effective alkalinity of the solution. In contrast, the addition of DAP as a reactive additive successfully compensated for much of the performance loss induced by degradation. Quantitative analysis revealed that at a DAP concentration of 10 wt.%, the CO₂ absorption capacity increased by about 69%, while the equilibrium pressure decreased by 44%. This significant improvement was observed in both thermodynamic and kinetic performance. The underlying mechanism of this enhancement arises from the direct reaction of DAP with CO₂, the recovery of solution alkalinity through interaction with degradation products, and the release of free MDEA molecules. These quantitative and qualitative results confirm the effectiveness of DAP as a promising mitigation strategy against the negative impacts of HSS and highlight its potential for developing more sustainable and cost-effective CO₂ absorption processes.

* Corresponding author: riahi@ut.ac.ir – ORCID: 0000-0002-5160-5582



نشریه پژوهش‌های کاربردی مهندسی شیمی-پلیمر

آدرس صفحه: www.arcpe.modares.ac.ir

مقاله تحقیقاتی

بررسی رفتار جذب دی‌اکسیدکربن در محلول آبی MDEA و DAP در حضور ناخالصی اسیداستیک

رضا نوروزی^۱، مژگان عباسی^۲، سیاوش ریاحی^{۲*}

^۱ دانشکده مهندسی شیمی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ انستیتو مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

موضوع تحقیق: تخریب اکسایشی حلال‌های آمینی یکی از چالش‌های مهم در فرایندهای جذب دی‌اکسیدکربن است که منجر به تشک‌یل نمک‌های پایدار حرارتی (HSS) و کاهش ظرفیت و سینتیک جذب CO_2 می‌شود. این مطالعه اثر اسیداستیک، به‌عنوان یکی از محصولات عمده تخریب، بر عملکرد جذب CO_2 در محلول آبی متیل‌دی‌اتانول‌آمین (MDEA) و پتانسیل اصلاحی ۳،۱ دی‌آمینوپروپان (DAP) به‌عنوان افزودنی واکنش‌پذیر را بررسی می‌کند.

روش تحقیق: آزمایش‌های جذب CO_2 به روش حجم‌سنجی در دمای ۳۰۳/۱۵ کلوین و فشار اولیه ۶۲۰ کیلوپاسکال انجام شد. ابتدا تأثیر افزودن اسیداستیک در ۳ غلظت وزنی بر ظرفیت تعادلی، رفتار سینتیکی و pH محلول MDEA بررسی شد. سپس، DAP در غلظت‌های ۲/۵، ۶ و ۱۰ درصد وزنی به محلول MDEA تخریب‌شده افزوده شد و تغییرات ظرفیت جذب، سینتیک و pH مورد تحلیل قرار گرفت.

نتایج اصلی: یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که اسیداستیک به‌طور قابل‌توجهی بر عملکرد جذب CO_2 تأثیر منفی می‌گذارد؛ به‌طوری‌که حضور آن منجر به کاهش حدود ۲۰ درصدی ظرفیت جذب CO_2 و تضعیف قابل‌ملاحظه سینتیک جذب شد که با کاهش pH و افزایش فشار تعادلی همراه بود. این اثرات مخرب، ناشی از تشکیل نمک‌های پایدار حرارتی و کاهش قلیانیت مؤثر محلول است. باین‌حال، افزودن ۳،۱ دی‌آمینوپروپان (DAP) به‌عنوان افزودنی واکنش‌پذیر، توانست بخش عمده‌ای از افت عملکرد را جبران کند. نتایج کمی نشان داد که در غلظت ۱۰ درصد وزنی DAP، ظرفیت جذب CO_2 حدود ۶۹ درصد افزایش یافته، فشار تعادلی ۴۴ درصد کاهش یافته‌است. این بهبود چشمگیر، هم در رفتار ترمودینامیکی و هم در سینتیک جذب مشاهده شد. سازوکار اصلی این بهبود، شامل واکنش مستقیم DAP با CO_2 ، احیای قلیانیت محلول از طریق واکنش با محصولات تخریب و آزادسازی مولکول‌های پروتونه‌شده MDEA است. این نتایج کیفی و کمی، کاربرد DAP را به‌عنوان راهکاری مؤثر برای کاهش اثرات منفی نمک‌های پایدار حرارتی تأیید می‌کند و قابلیت آن را در توسعه فرایندهای جذب CO_2 پایدارتر و اقتصادی‌تر برجسته می‌سازد.

کلیدواژه‌ها

جذب دی‌اکسیدکربن

متیل‌دی‌اتانول‌آمین

نمک‌های پایدار حرارتی

سینتیک جذب

۳،۱ دی‌آمینوپروپان

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۶

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۲۷

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۳۰

دسترس آنلاین: ۱۴۰۵/۰۸/۰۲

ISSN: 2588-5316

Online ISSN: 2588-5324

* نویسنده مسئول: riahi@ut.ac.ir – ORCID: 0000-0002-5160-5582

کپی‌رایت © ۲۰۲۵، نویسندگان. این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد. بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.

۱ مقدمه

فناوری جذب، استفاده و ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن به‌عنوان یکی از مؤثرترین راهکارهای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و مقابله با تغییرات اقلیمی جهانی شناخته می‌شود. گاز دی‌اکسیدکربن به‌عنوان اصلی‌ترین عامل افزایش میانگین دمای زمین معرفی شده‌است و از این‌رو، توسعه‌ی روش‌های کارآمد برای جذب و حذف آن از جریان‌های گازی صنعتی، به‌ویژه در صنایع سوخت فسیلی، همواره موردتوجه پژوهشگران بوده است [۱-۳]. در میان روش‌های گوناگون جذب دی‌اکسیدکربن، فرایند جذب پس از احتراق با استفاده از محلول‌های آمینی یکی از فناوری‌های بالغ و کاربردی در مقیاس صنعتی به شمار می‌رود. در این فرایند، گاز دی‌اکسیدکربن به‌صورت شیمیایی و از طریق یک واکنش برگشت‌پذیر گرمازا در بخش جذب‌کننده با محلول آمینی واکنش می‌دهد. سپس، در بخش بازجذب‌کننده، واکنش گرماگیر معکوس موجب آزادسازی دی‌اکسیدکربن و بازیابی محلول آمینی می‌شود. محلول حاصل که دارای بار دی‌اکسیدکربن پایین‌تری است، به‌عنوان آمین رقیق (Lean Amine) مجدداً به برج جذب بازگردانده می‌شود تا چرخه‌ی فرایند کامل شود [۴-۶].

در میان انواع آمین‌های مورداستفاده، متیل‌دی‌اتانول آمین (MDEA-Methyldiethanolamine) به‌دلیل برخورداری از فشار بخار پایین، پایداری حرارتی و اکسایشی بالا، خاصیت خوردگی کم و نیاز کمتر به انرژی بازجذب نسبت به آمین‌های اولیه و ثانویه، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌است. با این حال، یکی از چالش‌های اصلی در استفاده‌ی طولانی‌مدت از MDEA، پدیده‌ی تجزیه‌ی حرارتی و شیمیایی در طول چرخه‌های جذب و بازجذب است که منجر به تشکیل محصولات جانبی ناخواسته، افزایش کف‌زایی، خوردگی تجهیزات و کاهش بازده جذب می‌شود.

تجزیه‌ی محلول‌های آمینی معمولاً از طریق تجزیه‌ی حرارتی، اکسایش و واکنش‌های کاتالیزشده توسط اسیدها رخ می‌دهد و نتیجه‌ی آن، تشکیل اسیدهای آلی و نمک‌های پایدار در برابر حرارت (Heat Stable Salts - HSSs) است. این ترکیبات در چرخه‌ی محلول تجمع‌یافته و در فرایند بازجذب معمولی به‌طور کامل جدا نمی‌شوند؛ بنابراین موجب کاهش ظرفیت جذب گاز دی‌اکسیدکربن (CO_2) و افزایش هزینه‌های بهره‌برداری سامانه می‌شوند [۷-۱۱].

در این میان، اسیداستیک (Acetic Acid) به‌عنوان یکی از اسیدهای آلی سبک و متداول که از طریق تجزیه اکسایشی تولید می‌شود، می‌تواند با مولکول‌های آمینی مانند MDEA یا دی‌آمین‌ها واکنش داده، نمک‌های پایدار حرارتی تشکیل دهد. تجمع این نمک‌ها در محلول، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن را از جمله گرانی، pH و حلالیت دی‌اکسیدکربن تغییر داده، بر عملکرد جذب و بازجذب تأثیر منفی می‌گذارد.

با توجه به محدودیت‌های عملیاتی مرتبط با استفاده از محلول خالص MDEA، از جمله ظرفیت جذب نسبتاً پایین‌تر، سرعت جذب محدود و حساسیت به پدیده‌های تجزیه حرارتی و شیمیایی، به‌کارگیری راهبردهای اصلاحی برای ارتقای عملکرد این حلال ضروری به نظر می‌رسد. یکی از رویکردهای مؤثر در این زمینه، ترکیب‌سازی آمین‌ها یا افزودن آمین‌های ثانویه است؛ راهکاری که می‌تواند ضمن افزایش ظرفیت جذب و بهبود

سینتیک فرایند، مشکلاتی نظیر کف‌زایی و کاهش پایداری را نیز کنترل کند [۱۲، ۱۳].

در ارتباط با محدودیت‌های عملکردی حلال‌های آمینی در شرایط تخریب اکسایشی، پژوهش‌هایی به بررسی اثر نمک‌های پایدار حرارتی بر کارایی جذب گازهای اسیدی پرداخته‌اند. Ling و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۹ اثر اسیدهای حاصل از تخریب اکسایشی را بر عملکرد محلول آبی مونواتانول آمین در فرایند جذب CO_2 مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که حضور اسیدهای آلی و تشکیل نمک‌های پایدار حرارتی موجب کاهش ظرفیت جذب و احیای دی‌اکسیدکربن می‌شود. همچنین Abd و همکاران [۱۵] با استفاده از شبیه‌سازی فرایندی در نرم‌افزار Aspen Hysys، تأثیر محصولات اسیدی ناشی از تخریب متیل‌دی‌اتانول آمین را بر جذب CO_2 و H_2S بررسی کردند و نشان دادند که حضور این ترکیبات، از طریق تشکیل نمک‌های پایدار، منجر به کاهش کارایی کلی سامانه جذب می‌شود. این یافته‌ها نشان می‌دهد که تجمع محصولات تخریب اکسایشی می‌تواند به‌عنوان عامل محدودکننده جدی در عملکرد پایدار حلال‌های آمینی مطرح باشد و ضرورت بررسی راهکارهای اصلاحی برای حفظ کارایی این سامانه‌ها را برجسته می‌سازد.

در میان آمین‌های افزودنی، ۳،۱ دی‌آمینوپروپان (DAP) به‌دلیل ساختار دوگانه آمینی و ویژگی‌های شیمیایی منحصر به فرد خود، به‌عنوان گزینه‌ای امیدوارکننده مطرح است. این ترکیب با دارا بودن دو گروه آمین اولیه، قادر است سازوکارهای واکنشی متفاوتی نسبت به آمین‌های درجه سوم ارائه دهد و بنابراین قابلیت بهبود عملکرد سامانه‌های جذب را دارد. علاوه بر این، ترکیب آمین‌های درجه اول و سوم در سامانه می‌تواند از طریق ایجاد اثرات هم‌افزایی، محدودیت‌های هر یک را جبران کرده، عملکرد کلی فرایند را ارتقا دهد.

تاکنون مطالعات جامعی در خصوص کاربرد افزودنی ۳،۱ دی‌آمینوپروپان (DAP) به محلول‌های متیل‌دی‌اتانول آمین (MDEA) به‌منظور اصلاح عملکرد، به‌ویژه در حضور نمک‌های پایدار حرارتی، صورت نگرفته‌است. با وجود توجه مطالعات پیشین به آثار تخریب اکسایشی و تشکیل نمک‌های پایدار حرارتی بر حلال‌های آمینی، همچنان خلأهای قابل‌توجهی در زمینه نقش اسیدهای آلی مشخص بر سامانه‌های مبتنی بر MDEA و امکان بازیابی کارایی این سامانه‌ها از طریق افزودنی‌های مناسب وجود دارد. از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف بررسی منظم کیفی و کمی تأثیر اسیداستیک، به‌عنوان یکی از محصولات رایج تخریب اکسایشی، بر ظرفیت و سینتیک جذب CO_2 در محلول‌های آبی MDEA طراحی شده‌است. در گام بعدی، نقش DAP به‌عنوان آمین افزودنی و واکنش‌پذیر در بهبود و بازیابی عملکرد MDEA در حضور این ناخالصی به‌صورت پارامتری و با غلظت‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. این مطالعه با تمرکز بر درک تعامل بین سه جزء کلیدی MDEA، اسید استیک و DAP، و بررسی کمی اثر هر یک بر ظرفیت جذب و سینتیک، به دنبال ارائه راهکاری عملی و مبتنی بر داده‌های تجربی برای حفظ عملکرد سامانه‌های جذب CO_2 در شرایط تخریب اکسایشی است. این رویکرد کمی و پارامتری، تصویری دقیق و کاربردی از عملکرد حلال‌های MDEA در شرایط حضور HSS ارائه می‌دهد و می‌تواند مبنایی برای طراحی راهبردهای عملیاتی برای حفظ پایداری فرایندهای

انجام شده، استات به عنوان یکی از مهم‌ترین و رایج‌ترین گونه‌های الفاکنده HSS در سامانه‌های MDEA شناخته شده است [۱۸].

۲ بخش تجربی

۲-۱ مواد

مشخصات فیزیکی و شیمیایی مواد مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۲ ارائه شده است. متیل‌دی‌اتانول آمین (MDEA) و ۳،۱ دی‌آمینوپروپان (DAP) با درجه خلوص آزمایشگاهی ۹۹٪ از شرکت مرک تهیه شدند. MDEA به عنوان حلال آلکانول آمین اصلی و DAP به عنوان ترکیب دی‌آمین افزودنی برای مطالعات جذب CO₂ انتخاب شدند. هر دو آمین بدون خالص سازی بیشتر مورد استفاده قرار گرفتند. اسیداستیک با خلوص ۹۹٪ از شرکت مرک تهیه شد و به عنوان ناخالصی در مطالعات جذب CO₂ مورد استفاده قرار گرفت. گاز دی‌اکسیدکربن با درجه تجاری توسط شرکت رهاگاز تأمین شد. آب یون زدوده برای تهیه محلول‌های آمین با غلظت موردنظر در تمامی آزمایش‌های جذب به کار رفت.

۲-۲ دستگاه‌ها و روش‌های آزمایش

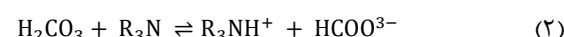
شکل ۱ طرح‌واره‌ی تجهیزات سامانه آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. آزمایش‌های جذب CO₂ با استفاده از دستگاه روش حجم‌سنجی شامل سه بخش اصلی انجام شد: سلول جذب، سلول میانی و خطوط لوله اتصال. سلول جذب به عنوان محفظه اصلی تماس گاز و مایع، محل انجام فرایند جذب دی‌اکسیدکربن در محلول آمینی است. گاز دی‌اکسیدکربن مورد نیاز آزمایش‌ها از طریق کپسول دی‌اکسیدکربن تأمین شده، انتقال آن به سامانه توسط پمپ انجام می‌شود. تمامی اجزا از فولاد ضدزنگ ساخته شده بودند تا مقاومت شیمیایی و استحکام مکانیکی مناسب را فراهم آورند. به منظور انجام آزمایش، کل سامانه شامل تمامی سلول‌ها و اتصالات با استفاده از پمپ خلأ تخلیه شد تا هوا یا گازهای باقی‌مانده که در اندازه‌گیری جذب تداخل ایجاد کنند، حذف شوند. سپس، دی‌اکسیدکربن در سلول میانی تا رسیدن به دما و فشار مورد نیاز پر شد. گاز دی‌اکسیدکربن سپس به واکنشگاه جذب منتقل شد. فشار در سلول میانی و واکنشگاه به طور مستمر با استفاده از فشارسنج‌های بادقت بالا (دقت ± 0.1) پایش شد، درحالی‌که دمای سلول میانی، واکنشگاه و خطوط لوله اتصال با استفاده از کنترل‌کننده دمای آن در محدوده ± 0.2 کلوین حفظ شد.

هنگامی که تعادلی فشار و دمایی حاصل شد، CO₂ به سلول جذب جریان می‌یابد. آزمایش‌ها در فشار اولیه ۶۲۰ کیلوپاسکال و دمای ۳۰۳/۱۵ کلوین انجام شدند. در طول جذب، فشار سامانه به تدریج کاهش یافته، در نهایت تثبیت شد که نشان‌دهنده رسیدن به تعادل و تکمیل فرایند بود. مقدار CO₂ جذب شده با استفاده از رابطه (۷) محاسبه شد:

$$n_{CO_2} = \frac{V_{gas\ container}}{R} \left(\frac{P_1}{Z_1 T_1} - \frac{P_2}{Z_2 T_2} \right) \quad (7)$$

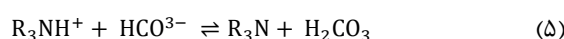
جذب CO₂ در مقیاس صنعتی باشد.

MDEA به عنوان آمین درجه سوم، به دلیل فقدان هیدروژن متصل به اتم نیتروژن، به طور مستقیم با CO₂ واکنش نمی‌دهد و نمی‌تواند کاربامات تشکیل دهد؛ بلکه به عنوان کاتالیزور بازی عمل کرده، آب‌پوشی CO₂ را تسریع می‌کند. در این سازوکار، CO₂ ابتدا با آب واکنش داده، اسیدکربنیک (H₂CO₃) تشکیل می‌دهد، سپس MDEA به عنوان باز، پروتون را از اسیدکربنیک می‌پذیرد و بی‌کربنات تولید می‌کند:



که در آن R₃N نمایانگر MDEA است و R₃NH⁺ شکل پروتونه شده آن است.

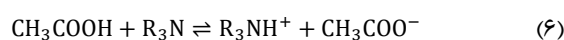
در مرحله اول در بارگذاری پایین CO₂، واکنش اصلی، واکنش آب‌پوشی کاتالیزشده بازی CO₂ و تشکیل غالب یون بی‌کربنات (HCO₃⁻) است. در این شرایط، جذب CO₂ عمدتاً تحت کنترل سینتیک واکنش قرار دارد. در مرحله دوم در بارگذاری بالای CO₂، با افزایش غلظت گونه‌های یونی در محلول، واکنش‌های تعادلی بین بی‌کربنات (HCO₃⁻) و کربنات (CO₃²⁻) غالب می‌شوند و توزیع گونه‌ها بیش از پیش تابع شرایط تعادلی سامانه خواهد بود [۱۶، ۱۷]:



نمک‌های پایدار حرارتی از واکنش MDEA و اسیدهای ناشی از تخریب اکسایشی و حرارتی MDEA تولید می‌شوند. یکی از مسیرهای عمده تخریب MDEA منجر به تشکیل اسیداستیک می‌شود. اسیداستیک، به عنوان یکی از محصولات اصلی تخریب، می‌تواند با MDEA نمک پایدار حرارتی (استات) تشکیل دهد که در دمای بالا تجزیه نمی‌شود [۱۸].

محصولات عمده تخریب MDEA شامل مونواتانول آمین (MEA)، متیل آمینواتانول (MAE)، دی‌اتانول آمین (DEA)، آمینوآسیدهای بایسین و گلایسین، و نمک‌های پایدار حرارتی شامل فرمات، استات، گلیکولات، و اگزالات هستند [۱۸، ۱۹]. مطالعات نشان می‌دهند که تشکیل استات از تخریب MDEA به صورت زنجیره‌ای اکسایش رادیکالی انجام می‌شود که در آن رادیکال پراکسید ابتدا تولید شده و بیشتر با MDEA و O₂ واکنش داده تا هیدروپراکسید تشکیل دهد و سپس تجزیه شده تا اسیداستیک را تشکیل دهد [۱۹، ۲۰].

اسیداستیک که از تخریب MDEA تولید می‌شود، با MDEA واکنش داده، نمک پایدار حرارتی استات را تشکیل می‌دهد:

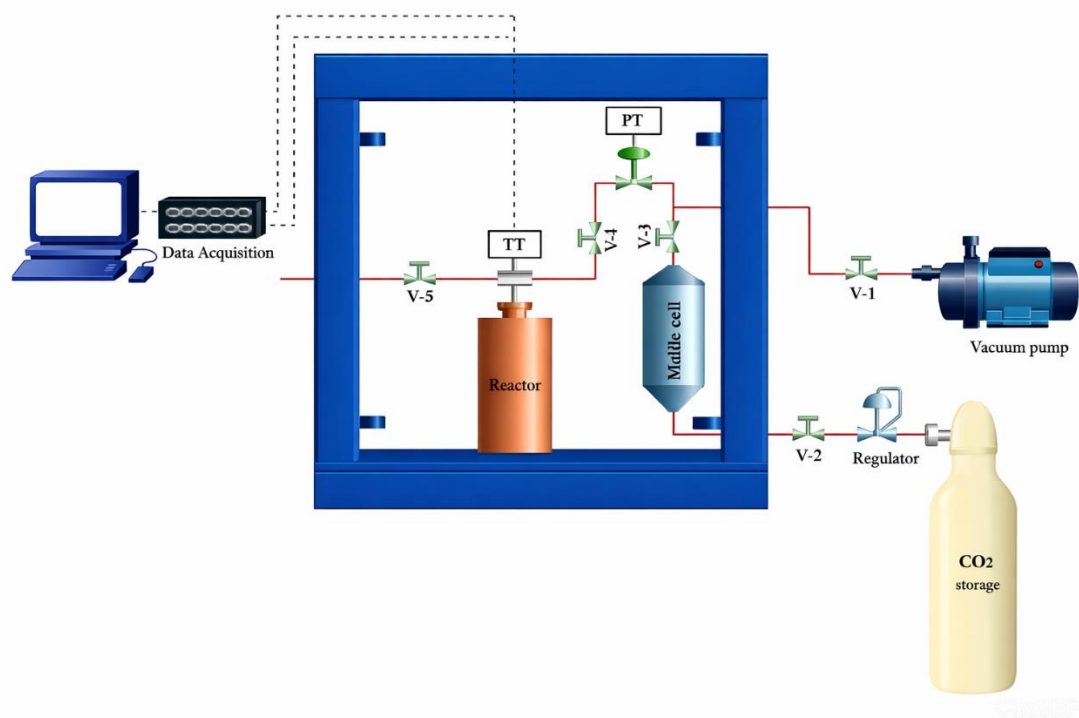


این نمک‌های پایدار حرارتی در دمای بالا تجزیه نشده و در سامانه تجمع یافته، باعث کاهش ظرفیت جذب CO₂، افزایش خوردگی، افزایش گرانروی محلول و افزایش مشکلات کف‌زایی می‌شوند. بر اساس مطالعات

جدول ۱ مشخصات مواد

Table 1 Material Specifications

Material	Concentrations (wt%)	Chemical Formula	Molecular Weight (g/mol)	Density (g/mL)	Boiling Point (°C)
Methyldiethanolamine (MDEA)	23%	C ₅ H ₁₃ NO ₂	119.164	1.038	247.1
1,3-Diaminopropane (DAP)	(2.5-6-10) %	C ₃ H ₁₀ N ₂	74.12	0.884	139.2
Acetic Acid	(1-2-3)%	CH ₃ COOH	60.05	1.049	118.1



شکل ۱ طرح‌واره سامانه اندازه‌گیری جذب

Figure 1 Schematic of the absorption apparatus

DAP به سامانه اضافه شده، اثر آن بر عامل‌های جذب CO₂ در سامانه ترکیبی MDEA+DAP ارزیابی شده‌است. این روش تحلیلی، امکان مقایسه مستقیم بین سامانه پایه و بهبودیافته را فراهم کرده، درک بهتری از رفتار آمین کمکی در حضور نمک‌های پایدار حرارتی ارائه می‌دهد. به‌طور کلی، نتایج این بخش دیدگاه جامعی از نقش اسیداستیک در کاهش کارایی جذب CO₂ و تأثیر بهبود ترکیب آمینی با افزودن DAP به سامانه ارائه می‌کند و می‌تواند پایه‌ای برای ارائه راهکارهای کاربردی در بهینه‌سازی فرایند جذب گاز اسیدی در مقیاس صنعتی باشد.

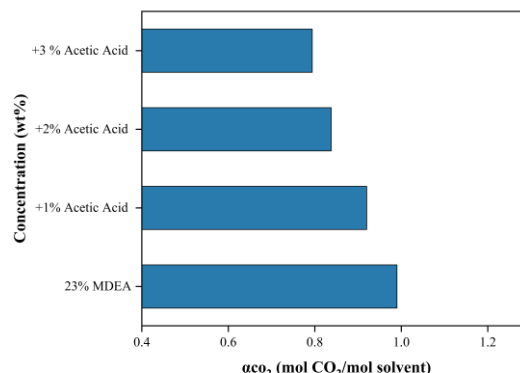
۳ نتایج و بحث

در این بخش، یافته‌های حاصل از اثر اسیداستیک به‌عنوان یکی از رایج‌ترین ناخالصی‌های ناشی از فرایند تخریب اکسایشی حلال‌های آمینی بر ظرفیت جذب دی‌اکسیدکربن در محلول‌های آمینی ارائه و مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. این ترکیب اسیدی با تشکیل نمک‌های پایدار حرارتی از طریق واکنش اسید-باز با آمین‌ها، تأثیر قابل توجهی بر عملکرد جذب CO₂ دارد. تحلیل داده‌ها در دو گام اصلی صورت گرفته است. در گام اول، تأثیر اسیداستیک بر عامل‌های جذب CO₂ در محلول خالص MDEA شامل ظرفیت جذب، سرعت جذب مورد بررسی قرار گرفته‌است. در گام دوم، به‌منظور بهبود عملکرد جذب در حضور ناخالصی اسیدی، آمین کمکی

۳-۱ تأثیر اسیداستیک بر جذب CO₂ در محلول MDEA

۳-۱-۱ میزان جذب

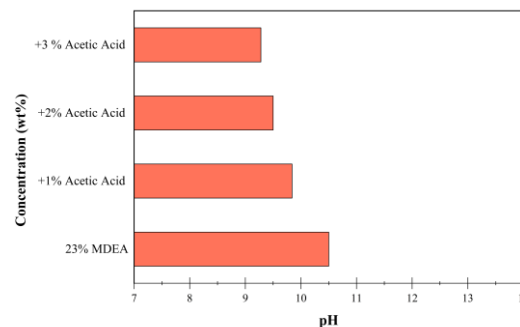
شکل ۲ تأثیر افزودن اسیداستیک با غلظت‌های مختلف (۱، ۲ و ۳ درصد وزنی) بر ظرفیت جذب CO₂ در محلول MDEA را نشان می‌دهد. همان‌طوری‌که مشاهده می‌شود با افزایش غلظت اسیداستیک، ظرفیت جذب CO₂ به‌طور پیوسته و قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. این روند کاهش نشان‌دهنده رابطه مستقیم بین غلظت نمک پایدار حرارتی و کاهش عملکرد جذب است. نتایج نشان داد که در بالاترین غلظت اسیداستیک (۳ درصد وزنی)، ظرفیت جذب تا حدود ۲۰ درصد نسبت به محلول خالص MDEA کاهش یافت که این مقدار بیانگر تأثیر منفی قابل‌توجه نمک‌های پایدار حرارتی بر فرایند جذب است [۱۶].



شکل ۲ تأثیر افزودن اسیداستیک بر میزان جذب محلول MDEA در دمای ۳۰۳/۱۵ کلوین

Figure 2 Effect of acetic acid addition on the absorption capacity of the MDEA solution at a temperature of 303.15 K

شکل ۳ تغییرات pH محلول MDEA را در حضور غلظت‌های مختلف اسیداستیک نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، محلول MDEA دارای pH حدود ۱۰/۵ است که نشان‌دهنده خاصیت قلیایی قوی آن است. با افزودن اسیداستیک، pH محلول به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش یافته، در بالاترین غلظت (۳ درصد) به حدود ۸/۸ می‌رسد. این کاهش تدریجی pH نشان می‌دهد که اسیداستیک به‌طور مؤثر خاصیت بازی محلول را خنثی می‌کند و این خنثی‌سازی رابطه مستقیمی با کاهش ظرفیت جذب CO₂ دارد [۵].



شکل ۲ تأثیر افزودن اسیداستیک بر pH محلول MDEA در دمای ۳۰۳/۱۵ کلوین

Figure 3 Effect of acetic acid addition on pH the MDEA solution at a temperature of 303.15 K

این کاهش قابل‌توجه در عملکرد جذب را می‌توان به چند علت کلیدی نسبت داد. اولین دلیل، مربوط به ماهیت شیمیایی اسیداستیک است. این اسید به‌دلیل داشتن کوتاه‌ترین زنجیره کربنی در میان اسیدهای کربوکسیلیک، از بالاترین قدرت اسیدی برخوردار است. دومین دلیل، مرتبط با واکنش اسید - باز بین اسیداستیک و MDEA است. این واکنش منجر به تشکیل استات (CH_3COO^-) و پروتونه‌شدن MDEA (MDEAH^+) می‌شود [۱۹]. در غلظت‌های بالای اسیداستیک، بخش قابل‌توجهی از مولکول‌های MDEA آزاد به شکل پروتونه تبدیل می‌شوند که قادر به واکنش مستقیم با CO₂ نیستند. این تبدیل، ظرفیت بازی مؤثر محلول را به‌شدت کاهش می‌دهد. از آنجاکه MDEA به‌عنوان آمین درجه سوم، از طریق سازوکار کاتالیز بازی عمل می‌کند و آب‌پوشی CO₂ را تسریع می‌کند؛ کاهش غلظت MDEA آزاد به معنای کاهش مستقیم در سرعت و ظرفیت جذب CO₂ است [۱۷].

سومین علت، به تأثیرات ترمودینامیکی و تعادلی مربوط می‌شود. کاهش pH محلول نشان‌دهنده کاهش غلظت یون هیدروکسید (OH^-) و افزایش غلظت یون هیدرونیوم (H_3O^+) است. این تغییرات در pH، تعادل واکنش‌های جذب CO₂ را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۵]. در محلول‌های MDEA، CO₂ ابتدا با آب واکنش داده، اسیدکربنیک (H_2CO_3) تشکیل می‌دهد، سپس MDEA به‌عنوان باز عمل کرده، پروتون را از اسیدکربنیک دریافت می‌کند که منجر به تشکیل بی‌کربنات (HCO_3^-) می‌شود [۱۷]. با کاهش pH محلول در حضور اسید استیک، این تعادل به سمت کاهش تشکیل بی‌کربنات سوق داده می‌شود [۲۲]. به عبارت دیگر، شرایط اسیدی‌تر محلول، نیروی محرکه ترمودینامیکی برای جذب CO₂ را کاهش می‌دهد و باعث می‌شود که فرایند جذب کمتر مطلوب باشد. علاوه بر این، تشکیل نمک‌های پایدار حرارتی می‌تواند بر خواص فیزیکی محلول نیز تأثیر بگذارد و منجر به تغییر در گرانی و ضرایب انتقال جرم شود [۱۶].

اگرچه اسیداستیک خاصیت سطح‌فعالی ضعیفی دارد و می‌تواند کشش سطحی محلول را تا حدودی کاهش دهد، اما این اثر مثبت بالقوه در مقایسه با تأثیرات مخرب شیمیایی آن بر ظرفیت جذب کاملاً ناچیز است و نمی‌تواند کاهش عملکرد ناشی از تشکیل نمک‌های پایدار حرارتی را جبران کند. این یافته‌ها به‌وضوح نشان می‌دهد که کنترل و حذف اسیدهای کربوکسیلیک کوتاه زنجیره، به‌ویژه اسیداستیک که یکی از محصولات رایج تخریب اکسایشی محلول‌های آمینی است، از اهمیت بسیار بالایی در حفظ عملکرد بهینه و پایدار سامانه‌های جذب CO₂ بر پایه آمین برخوردار است [۱۶، ۱۹].

۳-۱-۲ نرخ جذب

شکل ۴ تغییرات فشار CO₂ بر حسب زمان را برای بررسی نرخ جذب در محلول خالص و در حضور غلظت‌های مختلف اسیداستیک در دمای ۳۰۳/۱۵ کلوین نشان می‌دهد.

همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، تغییرات فشار در طول زمان برای تمامی نمونه‌ها روندی نزولی را نشان می‌دهد که علت آن، جذب گاز دی‌اکسیدکربن توسط محلول آمینی و به دنبال آن کاهش فشار درون سلول جذب است. در ابتدای فرایند، سرعت جذب بالا بوده، شیب کاهش فشار تند است، اما با گذشت زمان و نزدیک‌شدن سامانه به حالت تعادل، این

عملکرد کلی سامانه‌های جذب بر پایه MDEA به خوبی نشان می‌دهد [۱۹].

این یافته‌ها با نتایج Ling و همکاران [۱۳] که بر روی محلول MEA گزارش کرده‌اند، همخوانی کامل دارد. آن‌ها نشان دادند حضور اسیدهای آلی ناشی از تخریب اکسایشی، ظرفیت جذب را تا ۱۸ درصد کاهش می‌دهد. در مطالعه حاضر، کاهش ۲۰ درصدی در حضور ۳ درصد وزنی اسیداستیک مشاهده شد که تفاوت جزئی آن به علت غلظت بالاتر اسیداستیک در پژوهش حاضر به پژوهش قبلی است.

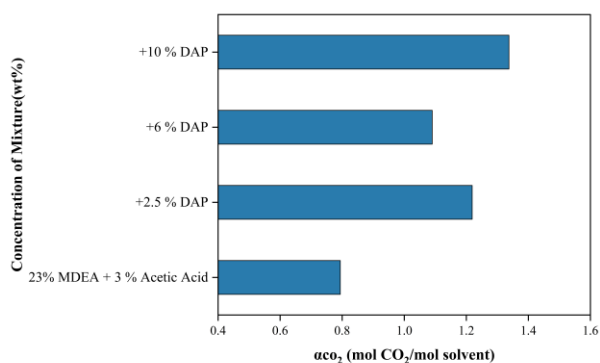
علاوه بر این، Abd و همکاران [۱۴] در شبیه‌سازی خود گزارش کردند که تجمع محصولات اسیدی در محلول MDEA می‌تواند ظرفیت جذب را تا ۱۵ درصد کاهش دهد. مقدار ۲۰ درصدی در مطالعه حاضر که بر اساس داده‌های تجربی به دست آمده، اندکی بالاتر است و اعتبار بیشتری دارد، زیرا داده‌های تجربی نسبت به شبیه‌سازی، شرایط واقعی را بهتر منعکس می‌کنند.

۳-۲ تأثیر DAP بر جذب CO₂ در محلول MDEA با اسیداستیک

۳-۲-۱ میزان جذب

باتوجه به نتایج بخش قبل که نشان داد اسیداستیک با غلظت ۳ درصد وزنی بیشترین کاهش در ظرفیت و سرعت جذب CO₂ را ایجاد می‌کند، این غلظت برای بررسی اثر آمین‌های افزودنی انتخاب شد. در این بخش، DAP با غلظت‌های مختلف (۲/۵، ۶ و ۱۰ درصد وزنی) به محلول MDEA حاوی ۳ درصد اسیداستیک افزوده شد تا نقش آن در بهبود عملکرد جذب مورد ارزیابی قرار گیرد.

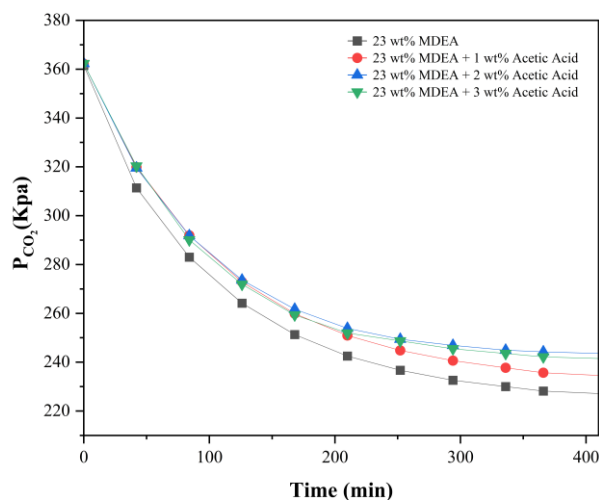
شکل ۵ تأثیر افزودن DAP با غلظت‌های مختلف بر ظرفیت جذب CO₂ را در محلول MDEA حاوی ۳ درصد اسیداستیک را در دمای ۳۰۳/۱۵ کلوین و فشار ۶۲۰ کیلوپاسکال نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که افزودن DAP به طور قابل توجهی ظرفیت جذب محلول را افزایش می‌دهد و این بهبود با افزایش غلظت DAP تشدید می‌شود. ظرفیت جذب از ۰/۸۰ در محلول فاقد DAP به ۱/۳۵ در حضور ۱۰ درصد DAP افزایش یافت که معادل بهبود ۶۹ درصدی است. این نتایج نشان می‌دهد که DAP نه تنها توانسته کاهش ظرفیت ناشی از اسیداستیک را جبران کند، بلکه ظرفیت جذب را فراتر از محلول اولیه MDEA ارتقا داده است.



شکل ۴ تأثیر افزودن DAP بر میزان جذب دی‌اکسیدکربن در محلول مرجع در دمای ۳۰۳/۱۵ کلوین

Figure 5 Effect of DAP addition on the carbon dioxide absorption capacity of the reference solution at 303.15 K

سرعت کاهش یافته، شیب نمودار ملایم‌تر می‌شود. در نهایت با اشباع حلال و رسیدن به تعادل، شیب نمودار به صفر میل کرده، فشار در مقدار ثابتی باقی می‌ماند [۱۶].



شکل ۳ تأثیر افزودن اسیداستیک بر نرخ جذب دی‌اکسیدکربن در محلول MDEA در دمای ۳۰۳/۱۵ کلوین

Figure 4 Effect of acetic acid addition on absorption rate the MDEA solution at a temperature of 303.15 K

در این نمودار، اثر افزودن اسیداستیک به عنوان ناخالصی و در غلظت‌های مختلف بر سینتیک جذب CO₂ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به وضوح نشان می‌دهد که حضور اسیداستیک تأثیر منفی و قابل توجهی بر سرعت جذب دارد. با مقایسه منحنی‌ها مشخص می‌شود که شیب کاهش فشار در محلول MDEA خالص بیشترین مقدار را دارد که نشان‌دهنده بالاترین سرعت جذب است. با افزودن اسیداستیک، شیب نمودارها به تدریج کاهش یافته، فرایند جذب کندتر می‌شود. در غلظت‌های پایین اسیداستیک (تا حدود ۱ درصد وزنی)، پروتونه شدن MDEA و کاهش قلیائیت مؤثر محلول به سرعت رخ می‌دهد و افت چشمگیری در سرعت جذب ایجاد می‌کند. با افزایش غلظت به ۲ درصد و بالاتر، سامانه وارد ناحیه بافری اسیداستیک/استات شده و pH محلول تثبیت می‌شود؛ در نتیجه، غلظت MDEA آزاد به مقداری تقریباً ثابت می‌رسد و افزایش بیشتر اسیداستیک تأثیر محسوسی بر تعادل شیمیایی محلول نخواهد داشت [۱۷، ۱۸]. این پدیده، همگرایی شیب منحنی‌های فشار در غلظت‌های ۲ و ۳ درصد وزنی در شکل ۴ را توجیه می‌کند.

این کاهش سرعت با افزایش غلظت اسیداستیک نیز کاهش می‌یابد، به طوری که در غلظت ۳ درصد وزنی، کندترین سرعت جذب مشاهده می‌شود. با افزایش غلظت اسیداستیک، نه تنها سرعت اولیه جذب کاهش می‌یابد، بلکه زمان رسیدن به تعادل نیز افزایش می‌یابد. همچنین، فشار تعادلی در حضور اسیداستیک بالاتر از محلول خالص MDEA است. این افزایش فشار تعادلی به معنای کاهش مقدار کل CO₂ جذب شده است.

به طور کلی، نتایج سینتیکی نشان می‌دهد که حضور اسیداستیک به عنوان ناخالصی، نه تنها ظرفیت جذب بلکه سرعت جذب CO₂ را نیز به طور هم‌زمان و قابل توجهی کاهش می‌دهد. این کاهش هم‌زمان در هر دو عامل کلیدی، تأثیرات مخرب نمک‌های پایدار حرارتی ناشی از تخریب اکسایشی را بر

فراهم می‌کند [۲۵، ۲۸]. آمین‌های اولیه به دلیل داشتن هیدروژن متصل به نیتروژن، سرعت واکنش بسیار بالاتری نسبت به آمین‌های نوع سوم دارند [۲۸]. افزایش pH محلول نیز سینتیک واکنش آب‌پوشی CO₂ را تسریع می‌کند، زیرا در pH بالاتر، غلظت یون هیدروکسید که به عنوان کاتالیزور عمل می‌کند، بیشتر است [۲۴، ۲۹]. علاوه بر این، افزایش غلظت آمین فعال در محلول ناشی از حضور DAP، مستقیماً بر سرعت جذب تأثیر می‌گذارد [۲۷]. حضور دو گونه آمینی با ویژگی‌های متفاوت (MDEA با ظرفیت بالا و DAP با سینتیک سریع) اثر تکمیلی ایجاد می‌کند که عملکرد کلی سامانه را بهبود می‌بخشد [۳۰، ۳۱].

نتایج این مطالعه نشان داد که افزودن DAP به عنوان آمین افزودنی، راهکاری مؤثر برای جبران اثرات مخرب نمک‌های پایدار حرارتی ناشی از تخریب اکسایشی محلول‌های MDEA است. DAP توانست کاهش ۲۰ درصدی ظرفیت جذب ناشی از اسیداستیک را به طور کامل جبران کرده، در بالاترین غلظت، ظرفیت را ۶۹ درصد افزایش دهد. این یافته با مطالعه Aronu و همکاران [۲۴] که نشان دادند دی‌آمین‌ها به دلیل ساختار دو عاملی خود ظرفیت جذب بالاتری نسبت به آمین‌های نوع سوم دارند، مطابقت دارد.

این بهبود از طریق سه علت اصلی حاصل شد: واکنش مستقیم CO₂، بازیابی pH محلول از ۹/۲ به ۱۰/۹، و افزایش غلظت آمین فعال. تحلیل سینتیکی نشان داد که DAP نه تنها ظرفیت بلکه سرعت جذب را نیز به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد، به طوری که فشار تعادلی ۴۴ درصد کاهش و زمان رسیدن به تعادل نیز کوتاه‌تر شد. رابطه مستقیم بین افزایش pH و بهبود هر دو عامل ظرفیت و سرعت، اهمیت حفظ خاصیت قلیایی محلول را در سامانه‌های جذب برجسته می‌سازد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که استفاده از آمین‌های افزودنی با ویژگی‌های مناسب می‌تواند به عنوان راهبردی عملی برای حفظ و ارتقای عملکرد سامانه‌های جذب CO₂ در شرایط تخریب اکسایشی مورد استفاده قرار گیرد.

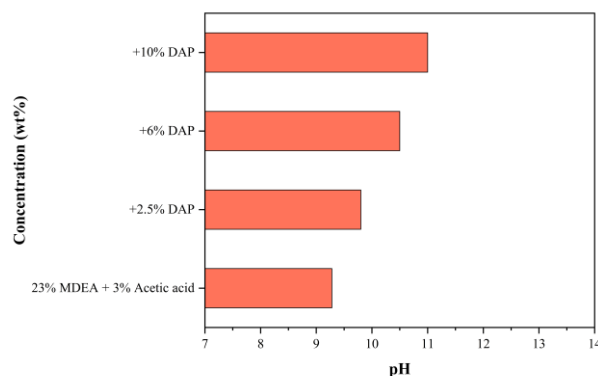
۴ نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه به روشنی نشان داد که حضور اسیداستیک و تشکیل نمک‌های پایدار حرارتی، به ویژه استات‌ها، اثر نامطلوب قابل توجهی بر عملکرد جذب CO₂ در سامانه‌های مبتنی بر MDEA دارد. افزودن اسیداستیک موجب کاهش ظرفیت تعادلی جذب، تضعیف رفتار سینتیکی و افزایش فشار تعادلی شد که این افت عملکرد عمدتاً ناشی از کاهش قلیائیت محلول و مصرف گونه‌های فعال آمینی است.

در مقابل، افزودن ۳،۱ دی‌آمینوپروپان (DAP) به عنوان افزودنی واکنش‌پذیر توانست بخش عمده‌ای از افت عملکرد ناشی از تخریب را جبران کند. حضور DAP منجر به افزایش ظرفیت جذب CO₂، بهبود نرخ جذب و بازیابی pH محلول شد که بیانگر بهبود هم‌زمان ویژگی‌های ترمودینامیکی و سینتیکی سامانه است. این رفتار را می‌توان به نقش مکمل MDEA به عنوان آمین ثالث با عملکرد کاتالیزوری و DAP به عنوان آمین اولیه با واکنش‌پذیری بالا نسبت داد.

از منظر کاربردی، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده هدفمند از افزودنی‌های دی‌آمین می‌تواند راهکاری عملی و کم‌هزینه برای حفظ یا بازیابی عملکرد سامانه‌های آمینی تخریب‌شده در واحدهای جذب CO₂

شکل ۶ تغییرات pH محلول را با افزودن غلظت‌های مختلف DAP نمایش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که افزودن DAP روند افزایشی قابل توجهی در pH محلول ایجاد می‌کند. با افزایش غلظت DAP از صفر به ۱۰ درصد، pH محلول از ۹/۲ به ۱۰/۹ افزایش یافت. این افزایش pH نشان‌دهنده بازیابی خاصیت قلیایی محلول است که توسط اسیداستیک خنثی شده بود. رابطه مستقیمی بین افزایش pH و بهبود ظرفیت جذب مشاهده شد که تأییدکننده نقش کلیدی pH در فرایند جذب CO₂ است [۲۳، ۲۴].



شکل ۵ تأثیر افزودن DAP بر pH در محلول مرجع در دمای ۳۰۳/۱۵ کلون
Figure 6 Effect of DAP addition on pH of the reference solution at 303.15 K

این بهبود در عملکرد جذب را می‌توان به چند عامل اصلی نسبت داد. DAP به عنوان دی‌آمین با دو گروه آمین اولیه، قادر است به طور مستقیم با CO₂ واکنش داده، کاربامات تشکیل دهد [۲۵]. این ویژگی، مسیر اضافی برای جذب CO₂ فراهم می‌کند که MDEA به دلیل ساختار آمین نوع سوم فاقد آن است [۱۶]. همچنین، DAP می‌تواند با نمک‌های پایدار حرارتی تشکیل شده تعامل کرده، بخشی از MDEA پروتونه شده را به شکل فعال بازگرداند [۲۶، ۲۷]. افزایش pH ناشی از حضور DAP نیز تعادل واکنش‌های جذب CO₂ را به سمت تشکیل بیشتر محصولات جذب سوق می‌دهد و نیروی محرکه ترمودینامیکی فرایند را تقویت می‌کند [۲۳، ۲۴].

۳-۲-۲ نرخ جذب

شکل ۷ تغییرات فشار CO₂ بر حسب زمان را برای محلول MDEA حاوی ۳ درصد اسیداستیک و غلظت‌های مختلف DAP نشان می‌دهد. نتایج به وضوح نشان می‌دهد که افزودن DAP سینتیک جذب CO₂ را به طور چشمگیری بهبود می‌بخشد. شیب اولیه منحنی‌ها که نشان‌دهنده سرعت جذب است، با افزایش غلظت DAP به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. این بهبود سرعت با کاهش زمان رسیدن به تعادل و کاهش فشار نهایی همراه است. فشار تعادلی محلول از ۲۴۸ کیلوپاسکال در غیاب DAP به ۱۳۸ کیلوپاسکال در حضور ۱۰ درصد DAP کاهش یافت که این کاهش ۴۴ درصدی نشان‌دهنده افزایش قابل توجه در مقدار CO₂ جذب شده است و با یافته‌های بخش قبلی در خصوص افزایش ظرفیت جذب هم‌خوانی کامل دارد. همچنین، زمان رسیدن به تعادل به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافت که نشان‌دهنده افزایش کارایی کلی فرایند است.

بهبود نرخ جذب را می‌توان به عوامل متعددی نسبت داد. واکنش سریع DAP با CO₂ برای تشکیل کاربامات، مسیر سینتیکی سریعی برای جذب

10. Demontigny D, Tontiwachwuthikul P, Chakma A. Parametric studies of carbon dioxide absorption into highly concentrated monoethanolamine solutions. *The Canadian journal of chemical engineering*. 2001;79(1):137–42.
11. Maneeintr K, Idem RO, Tontiwachwuthikul P, Wee AG. Comparative mass transfer performance studies of CO₂ absorption into aqueous solutions of DEAB and MEA. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2010;49(6):2857–63.
12. Edalatpour A, Abbasi M, Riahi S, Sabet NSM, Tavakoli O. Investigation of foaming tendency of aqueous mixture of MDEA+ IPAE for carbon dioxide absorption. *Journal of CO₂ Utilization*. 2022;62:102079.
13. Khodadadi MJ, Riahi S, Abbasi M. Experimental modeling of the solubility of carbon dioxide in aqueous solution of monoethanolamine + 1,3-diaminopropane. *Journal of Molecular Liquids*. 2019;281:415–22.
14. Ling H, Liu S, Gao H, Liang Z. Effect of heat-stable salts on absorption/desorption performance of aqueous monoethanolamine (MEA) solution during carbon dioxide capture process. *Separation and Purification Technology*. 2019;212:822–33.
15. Abd AA, Naji SZ, Othman MR, Tye CT. Effect of acidic products from degradation of N-methyldiethanolamine amine on CO₂/H₂S capturing from natural gas. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2021;23(7):2133–44.
16. Sema T, Naami A, Liang Z, Shi H, Rayer AV, Sumon KZ, Wattanaphan P, Henni A, Idem R, Saiwan C. Part 5b: Solvent chemistry: reaction kinetics of CO₂ absorption into reactive amine solutions. *Carbon Management*. 2012;3(2):201–20.
17. Donaldson TL, Nguyen YN. Carbon dioxide reaction kinetics and transport in aqueous amine membranes. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*. 1980;19(3):260–6.
18. Pal P, AbuKashabeh A, Al-Asheh S, Banat F. Role of aqueous methyldiethanolamine (MDEA) as solvent in natural gas sweetening unit and process contaminants with probable reaction pathway. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2015;24:124–31.
19. Lepaumier H, Picq D, Carrette P-L. New amines for CO₂ capture. I. Mechanisms of amine degradation in the presence of CO₂. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2009;48(20):9061–7.
20. Rooney P, Dupart M, Bacon T. Oxygen's role in alkanolamine degradation. *Hydrocarbon Processing (International ed)*. 1998;77(7):109–13.
21. Ardali NS, Riahi S, Abbasi M, Mohammadpour N. Experimental investigation of carbon dioxide adsorption using functionalized MWCNTs with 1, 6-diaminohexane. *Fuel*. 2023;338:127213.
22. Vevelstad SJ, Grimstvedt A, Elnan J, da Silva EF, Svendsen HF. Oxidative degradation of 2-ethanolamine: The effect of oxygen concentration and temperature on product formation. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2013;18:88–100.
23. Puxty G, Rowland R, Allport A, Yang Q, Bown M, Burns R, Maeder M, Attalla M. Carbon dioxide postcombustion capture: a novel screening study of the carbon dioxide absorption performance of 76 amines. *Environmental science & technology*. 2009;43(16):6427–33.
24. Conway W, Wang X, Fernandes D, Burns R, Lawrance G, Puxty G, Maeder M. Comprehensive kinetic and thermodynamic study of the reactions of CO₂ (aq) and HCO₃⁻ with monoethanolamine (MEA) in aqueous solution. *The Journal of Physical Chemistry A*. 2011;115(50):14340–9.
25. Aronu UE, Hartono A, Hoff KA, Svendsen HF. Kinetics of carbon dioxide absorption into aqueous amino acid salt: potassium salt of sarcosine solution. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2011;50(18):10465–75.
26. Paul S, Ghoshal AK, Mandal B. Kinetics of absorption of carbon dioxide into aqueous solution of 2-(1-piperazinyl)-ethylamine.

باشد، بدون آن که نیاز به تعویض کامل حلال باشد. این نتایج می‌تواند مبنایی برای توسعه راهبردهای مؤثرتر در مدیریت حلال و افزایش پایداری فرایندهای صنعتی جذب دی‌اکسیدکربن فراهم آورد.

قدردانی نویسندگان

نویسندگان این پژوهش مراتب قدردانی خود را از امکانات پژوهشی فراهم شده توسط انیستیتو نفت دانشگاه تهران ابراز میدارند.

تعارض منافع

برای نویسندگان تعارض منافی وجود ندارد.

سهم نویسندگان

رضا نوروزی، به عنوان پژوهشگر اصلی (انجام آزمایشها، تحلیل دادهها و نگارش متن) با سهم ۴۰٪، مژگان عباسی به عنوان پژوهشگر فرعی (ایده پردازی، اصلاح و بازبینی مقاله) با سهم ۳۰٪ و سیاوش ریاحی به عنوان پژوهشگر فرعی (مدیریت پروژه، اصلاح و بازبینی مقاله، ایدهپردازی) با سهم ۳۰٪ در این پژوهش سهم داشته اند.

منابع مالی

منابع مالی مورد استفاده در این پژوهش از گرنت پژوهشی استاد می‌باشد.

بیانیه هوش مصنوعی

در ویرایش چکیده انگلیسی از هوش مصنوعی استفاده شده است.

مراجع

1. Mac Dowell N, Fennell PS, Shah N, Maitland GC. The role of CO₂ capture and utilization in mitigating climate change. *Nature Climate Change*. 2017;7(4):243–9.
2. Xiao M, Liu H, Idem R, Tontiwachwuthikul P, Liang Z. A study of structure–activity relationships of commercial tertiary amines for post-combustion CO₂ capture. *Applied Energy*. 2016;184:219–29.
3. Markewitz P, Kuckshinrichs W, Leitner W, Linssen J, Zapp P, Bongartz R, Schreiber A, Müller TE. Worldwide innovations in the development of carbon capture technologies and the utilization of CO₂. *Energy & Environmental Science*. 2012;5(6):7281–305.
4. Hedin N, Andersson L, Bergström L, Yan J. Adsorbents for the post-combustion capture of CO₂ using rapid temperature swing or vacuum swing adsorption. *Applied Energy*. 2013;104:418–33.
5. Rochelle GT. Amine scrubbing for CO₂ capture. *Science*. 2009;325(5948):1652–4.
6. Xiao S, Liu H, Gao H, Xiao M, Luo X, Idem R, Tontiwachwuthikul P, Liang Z. Kinetics and mechanism study of homogeneous reaction of CO₂ and blends of diethanolamine and monoethanolamine using the stopped-flow technique. *Chemical Engineering Journal*. 2017;316:592–600.
7. Laddha S, Diaz J, Danckwerts P. The N₂O analogy: the solubilities of CO₂ and N₂O in aqueous solutions of organic compounds. *Chemical Engineering Science*. 1981;36(1):228–9.
8. Versteeg GF, Van Swaaij WP. Solubility and diffusivity of acid gases (carbon dioxide, nitrous oxide) in aqueous alkanolamine solutions. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 1988;33(1):29–34.
9. Wang Y, Xu S, Otto F, Mather A. Solubility of N₂O in alkanolamines and in mixed solvents. *The Chemical Engineering Journal*. 1992;48(1):31–40.

- Chemical Engineering Science*. 2009;64(2):313–21.
27. Dubois L, Thomas D. Screening of aqueous amine-based solvents for postcombustion CO₂ capture by chemical absorption. *Chemical engineering & technology*. 2012;35(3):513–24.
 28. Versteeg G, van Swaaij WPM. On the kinetics between CO₂ and alkanolamines both in aqueous and non-aqueous solutions—I. Primary and secondary amines. *Chemical Engineering Science*. 1988;43(3):573–85.
 29. Pohorecki R, Moniuk W. Kinetics of reaction between carbon dioxide and hydroxyl ions in aqueous electrolyte solutions. *Chemical Engineering Science*. 1988;43(7):1677–84.
 30. Singto S, Supap T, Idem R, Tontiwachwuthikul P, Tantayanon S, Al-Marri MJ, Benamor A. Synthesis of new amines for enhanced carbon dioxide (CO₂) capture performance: The effect of chemical structure on equilibrium solubility, cyclic capacity, kinetics of absorption and regeneration, and heats of absorption and regeneration. *Separation and Purification Technology*. 2016;167:97–107.
 31. Hartono A, Mba EO, Svendsen HF. Physical properties of partially CO₂-loaded aqueous monoethanolamine (MEA). *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2014;59(6):1808–16.