



Journal of Applied Research in Chemical-Polymer Engineering

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

Research Paper

Experimental Investigation of Foaming Behavior and Carbon Dioxide Absorption in an MDEA–DAP Blended System

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

¹ Institute of Petroleum Engineering, School of Chemical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

² School of Chemical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

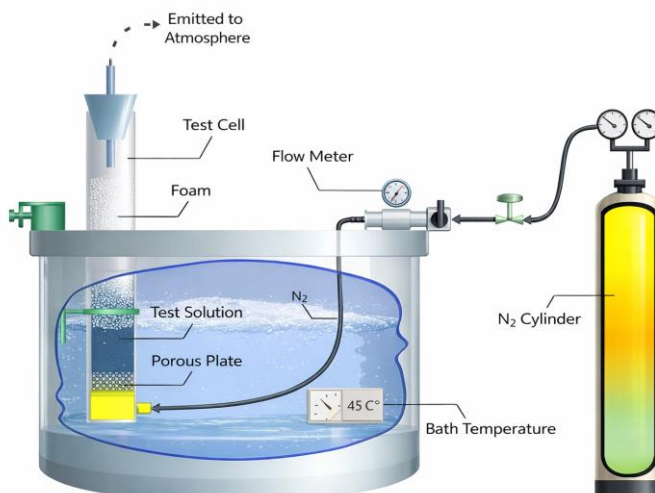
ARTICLE INFO

Received 2026-02-07
Revised 2026-05-19
Accepted 2026-05-20
Available online 2026-09-08
ISSN: 2588-5316
Online ISSN: 2588-5324

Keywords:

Foaming
Methyldiethanolamine (MDEA)
1,3-Diaminopropane (DAP)
Carbon dioxide absorption
Gas sweetening

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

Research subject: Foaming is one of the major challenges in natural gas sweetening units, as it can lead to reduced absorption efficiency and serious operational problems. Blended amine solutions have emerged as a promising approach to improve the performance of CO₂ absorption systems. Despite extensive studies on single amine solvents, the foaming behavior and CO₂ absorption performance of blended systems containing methyl diethanolamine (MDEA) and 1,3-diaminopropane (DAP) have not yet been comprehensively investigated. In particular, the mutual effects of these two amines on foaming characteristics and absorption capacity remain insufficiently understood.

Research approach: The main objective of this study was to investigate the foaming behavior and CO₂ absorption performance of MDEA–DAP-blended solutions and to determine optimal operating conditions. Blended solutions were prepared at three total amine concentrations (23, 31.5, and 40 wt.%) with three different MDEA-to-DAP ratios. All experiments were conducted at 30 °C. Nitrogen gas was injected into the foaming apparatus at a constant flow rate of 1.5 L/min, and foam volume and foam break time were measured. CO₂ absorption experiments were carried out at a pressure of 620 kPa, and both absorption capacity and absorption kinetics were evaluated for all solvent compositions.

Main results: The results indicated that both foaming behavior and absorption performance are strongly dependent on total amine concentration and the MDEA-to-DAP ratio. Due to its tertiary amine structure, MDEA was identified as the primary contributor to foaming. In contrast, DAP, owing to its two primary amine groups, played a key role in enhancing CO₂ absorption capacity at a total concentration of 31.5 wt.% with 5 wt.% DAP, the best balance between reduced foaming and high absorption capacity was achieved, corresponding to a foam volume of 318.45 mL, a foam break time of 6 s, and an absorption capacity of 0.927 mol CO₂ per mol amine. The optimal condition was identified as a blend containing 26.5 wt.% MDEA and 5 wt.% DAP at a total amine concentration of 31.5 wt%, which is recommended for industrial CO₂ absorption applications.

* 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 تجربی رفتار کف‌زایی و جذب دی‌اکسید کربن در سامانه مخلوط MDEA-DAP

رضا نوروزی^۱، مژگان عباسی^۲، سیاوش ریاحی^{۳*}

^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: کف‌زایی یکی از چالش‌های عمده در واحدهای شیرین‌سازی گاز طبیعی است که می‌تواند منجر به کاهش بازده جذب و مشکلات عملیاتی جدی شود. محلول‌های مخلوط آمینی رویکردی نوین برای بهبود عملکرد سامانه‌های جذب CO₂ هستند. باوجود مطالعات گسترده بر روی آمین‌های تک‌جزئی، رفتار کف‌زایی و عملکرد جذب CO₂ در سامانه مخلوط متیل دی‌تانول آمین (MDEA) و ۳-دی‌آمینو پروپان (DAP) هنوز به طور جامع بررسی نشده و تأثیر متقابل این دو آمین بر خصوصیات کف‌زایی و ظرفیت جذب ناشناخته است.

روش تحقیق: هدف اصلی این پژوهش، بررسی هم‌زمان خصوصیات کف‌زایی و عملکرد جذب CO₂ در محلول‌های مخلوط MDEA-DAP و تعیین شرایط بهینه است. محلول‌های مخلوط در سه سطح غلظت کل (۲۳، ۳۱/۵ و ۴۰ درصد وزنی) با سه نسبت مختلف MDEA به DAP تهیه شدند. آزمایش‌ها در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. گاز نیتروژن با نرخ جریان ثابت ۱/۵ لیتر بر دقیقه در دستگاه کف تزریق شد و حجم کف و زمان شکست اندازه‌گیری شدند. همچنین فشار استفاده شده در دستگاه جذب ۶۲۰ کیلوپاسکال بود و ظرفیت جذب CO₂ و سینتیک جذب برای تمامی ترکیب‌ها ارزیابی شد.

نتایج اصلی: نتایج نشان داد که رفتار کف‌زایی و جذب به‌شدت به غلظت کل و نسبت MDEA به DAP وابسته است. MDEA به‌دلیل ساختار آمین درجه سوم، عامل اصلی کف‌زایی است، درحالی‌که DAP به‌دلیل دو گروه آمین اولیه، نقش کلیدی در افزایش ظرفیت جذب ایفا می‌کند. در غلظت کل ۳۱/۵ درصد با ۵٪ درصد وزنی DAP، بهترین تعادل بین کاهش کف‌زایی و حفظ ظرفیت جذب بالا حاصل شد؛ حجم کف به ۳۱۸/۴۵ میلی‌لیتر، زمان شکست به ۶ ثانیه و ظرفیت جذب به ۰/۹۲۷ مول دی‌اکسید کربن بر مول آمین رسید. شرایط بهینه با ترکیب ۲۶/۵٪ درصد وزنی MDEA و ۵٪ درصد وزنی DAP در غلظت کل ۳۱/۵٪ شناسایی شد که برای کاربردهای صنعتی جذب CO₂ توصیه می‌شود.

کلیدواژه‌ها

کف‌زایی

متیل دی‌تانول آمین (MDEA)

۳-دی‌آمینو پروپان (DAP)

جذب دی‌اکسید کربن

شیرین‌سازی گاز

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۸

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۲۹

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۳۰

دسترس آنلاین: ۱۴۰۵/۰۶/۱۷

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

حذف گازهای اسیدی (Acid Gas Removal) از جریان گاز طبیعی یکی از فرایندهای اصلی در صنعت نفت و گاز است که طی آن ترکیباتی همچون دی‌اکسیدکربن (CO_2)، هیدروژن سولفید، مرکاپتان‌ها و کربونیل سولفید از گاز طبیعی جداسازی می‌شوند [۱]. حضور دی‌اکسیدکربن در جریان گاز طبیعی در غلظت بالا می‌تواند باعث خوردگی تجهیزات و خطوط لوله شده، ارزش اقتصادی گاز طبیعی را کاهش دهد. این فرایند که به شیرین‌سازی گاز (Gas Sweetening) نیز معروف است، نقش کلیدی در فناوری جذب کربن ایفا می‌کند و به‌عنوان گام نخستین در جمع‌آوری، بهره‌برداری و ذخیره‌سازی کربن (Carbon Capture, Utilization and Storage: CCUS) شناخته می‌شود. فناوری‌های متعددی برای جذب CO_2 وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به جذب با حلال، جذب سطحی، غشا، تبدیل مستقیم و تفکیک برودتی اشاره کرد. در میان این فناوری‌ها، جذب شیمیایی با استفاده از حلال‌ها رایج‌ترین روش مورد استفاده در صنعت است [۲]. روش جذب با استفاده از آلکانول‌آمین‌ها (Alkanolamines) رایج‌ترین شیوه برای حذف دی‌اکسیدکربن و هیدروژن سولفید به شمار می‌رود. متیل‌دی‌اتانول‌آمین (MDEA)، به دلیل قابلیت بالای جذب، مقرون به‌صرفه بودن، خوردگی کم‌تر و انرژی کمتر برای بازیابی در مقایسه با سایر آلکانول‌آمین‌ها، به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳]. محدودیت‌های ذاتی حلال‌های آمینی شامل: سرعت جذب پایین، خوردگی بالا، انرژی بازیابی زیاد و پایداری حرارتی محدود است که موجب شده است که تحقیقات را به سمت بهبود حلال‌ها سوق دهد [۴]. در این راستا، استفاده از مخلوط‌های آمینی به‌عنوان رویکردی نوین و امیدبخش مطرح شده است که قادر به تلفیق مزایای حلال‌های مختلف و جبران نقاط ضعف آن‌ها است [۵، ۶]. مطالعاتی برای ارزیابی ظرفیت جذب و حلالیت CO_2 در محلول‌های آمینی تک‌جزئی انجام شده است. Santos و همکاران [۷] ظرفیت جذب CO_2 در محلول MDEA با غلظت ۲۰ درصد وزنی را در سه مقیاس مختلف آزمایشگاهی، پایلوت کوچک و پایلوت بزرگ‌تر بررسی کردند و نشان دادند که ظرفیت جذب تجربی به‌دست‌آمده (۰/۹۷۹) با ظرفیت نظریه (۱/۰) مطابقت دارد. Huertas و همکاران [۸] ظرفیت جذب CO_2 توسط MEA را در غلظت‌های مختلف بررسی کردند و نشان دادند که ظرفیت جذب با کاهش غلظت MEA از ۳۰ به ۲/۵ درصد وزنی، از ۴۴۷/۹ به ۵۸۱/۳ گرم CO_2 بر کیلوگرم MEA افزایش یافته، به ظرفیت اسمی ۷۲۰ گرم CO_2 بر کیلوگرم MEA نزدیک می‌شود. همچنین، مطالعات اخیر نشان داده‌اند که افزودن فعال‌کننده به محلول MDEA می‌تواند ظرفیت جذب و ظرفیت چرخی را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد [۹].

باین‌حال، استفاده از حلال‌های آمینی با چالش‌های عملیاتی مهمی همراه است که می‌تواند بر عملکرد کلی فرایند تأثیر منفی بگذارد. یکی از معضلات اساسی، تخریب تدریجی حلال آمینی تحت شرایط عملیاتی است که منجر به تشکیل محصولات تخریب مختلفی می‌شود [۵]. این محصولات تخریب شامل اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم، آمیدها، آمینواسیدها و نمک‌های پایدار حرارتی (Heat Stable Salts) است که نه‌تنها ظرفیت جذب حلال را کاهش می‌دهند، بلکه به‌عنوان عوامل کف‌زا عمل کرده، باعث ایجاد کف‌های

پایدار در سامانه می‌شوند [۱۰، ۱۱].

پدیده کف‌زایی (Foaming) در برج‌های جذب یکی از چالش‌های عمده در واحدهای تصفیه و شیرین‌سازی گاز طبیعی محسوب می‌شود [۶]. علاوه بر محصولات تخریب و ناخالصی‌ها، خود محلول‌های آمینی نیز می‌توانند رفتار کف‌زایی ذاتی از خود نشان دهند. مطالعات نشان داده‌اند که محلول‌های آمینی مختلف دارای تمایل متفاوتی به تشکیل کف هستند و این رفتار تحت تأثیر نوع آمین، غلظت، دما، بارگذاری CO_2 و نرخ جریان گاز قرار دارد. Thitakamol و Veawab [۱۲] رفتار کف‌زایی را در فرایند جذب CO_2 با استفاده از محلول‌های آبی آلکانول‌آمین‌های تک‌جزئی بررسی کردند و نشان دادند که MEA و MDEA تمایل به کف‌زایی دارند، درحالی‌که DEA و AMP تمایل کمتری به تشکیل کف نشان می‌دهند. همچنین، آن‌ها گزارش کردند که ضریب کف‌زایی (Σ) با افزایش غلظت آلکانول‌آمین ابتدا افزایش یافته، سپس کاهش می‌یابد و دمای بالاتر محلول باعث کاهش Σ می‌شود. کف‌های تشکیل‌شده با کاهش کشش سطحی محلول آمینی، موجب پایدارسازی حباب‌های گازی و تشکیل کف‌های با ساختار کشسان می‌شوند. گرانشی حجمی نقش مهمی در بالا آمدن حباب‌ها از طریق فاز مایع و تشکیل لایه کف ایفا می‌کند [۱۳]. کف‌ها نه‌تنها سطح مؤثر تماس گاز - مایع را کاهش می‌دهند، بلکه می‌توانند منجر به طغیان ستون (Flooding)، حمل مکانیکی حلال به تجهیزات پایین‌دست، کاهش زمان ماند گاز و در نهایت افت شدید بازده جذب شوند [۱۴، ۱۵]. علاوه بر این، کف‌زایی می‌تواند باعث نوسانات فشار، مشکلات عملیاتی در مرحله بازیابی حلال و افزایش هزینه‌های نگهداری تجهیزات شود [۱۶].

در این پژوهش، مخلوط متیل دی اتانول آمین و ۳۰/۱ دی آمینو پروپان (DAP) برای جذب CO_2 مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به این که مطالعات موجود عمدتاً بر روی محلول‌های آمینی تک‌جزئی متمرکز بوده‌اند و رفتار کف‌زایی و ظرفیت جذب مخلوط MDEA-DAP هنوز به‌طور جامع مورد مطالعه قرار نگرفته است، لذا هدف اصلی این تحقیق بررسی جامع خصوصیات مخلوط MDEA-DAP شامل: (۱) ظرفیت جذب CO_2 ، (۲) سینتیک جذب و (۳) خصوصیات کف‌زایی و شناسایی عامل‌های کلیدی مؤثر بر پایداری کف (Foam Stability) است.

۲ بخش تجربی

۲-۱ مواد

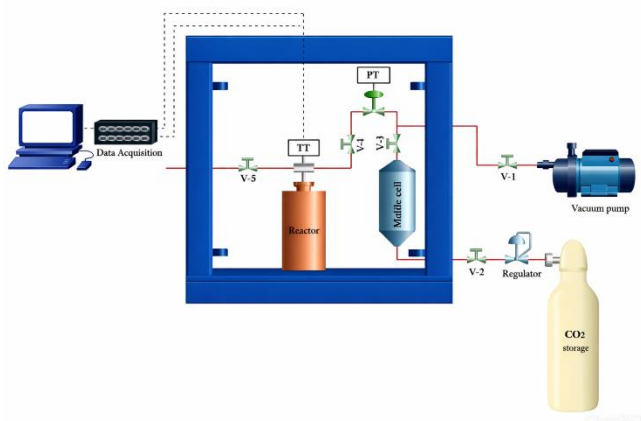
متیل‌دی‌اتانول‌آمین با درجه خلوص ۹۸ درصد، جرم مولکولی ۱۱۹/۱۶ گرم بر مول و چگالی ۱/۰۴ کیلوگرم بر لیتر از شرکت Merck تأمین شد. ۳۰/۱ دی آمینو پروپان با خلوص ۹۹ درصد، وزن مولکولی ۷۴/۱۳ گرم بر مول و چگالی ۰/۸۸۷ کیلوگرم بر لیتر از شرکت Sigma-Aldrich خریداری شد. آب یون‌زدوده برای تهیه محلول‌های موردنیاز در کلیه آزمایش‌ها به کار گرفته شد.

گاز دی‌اکسیدکربن با درجه تجاری از شرکت رهام گاز تأمین شد و در تمامی آزمایش‌های جذب مورد استفاده قرار گرفت. گاز نیتروژن (N_2) با درجه خلوص ۹۹/۹۹۹ درصد نیز از شرکت رهام گاز تهیه و در تمامی آزمایش‌های کف‌زایی استفاده شد. انتخاب گاز نیتروژن برای بررسی رفتار کف‌زایی به‌جای گازهای اسیدی یا گازهای دودکش (Flue Gas) به دلایل متعددی صورت

۲-۲-۲ آزمایش جذب

شکل ۲ طرح‌واره‌ای از سامانه آزمایشگاهی مورد استفاده برای جذب در این پژوهش را نشان می‌دهد. آزمایش‌های جذب CO_2 با استفاده از دستگاه روش حجم‌سنجی شامل سه بخش اصلی انجام شد: سلول جذب، سلول میانی و خطوط لوله اتصال. سلول جذب به‌عنوان محفظه اصلی تماس گاز و مایع، محل انجام فرایند جذب دی‌اکسیدکربن در محلول آمینی است و سلول میانی به‌منظور تنظیم فشار سامانه و اندازه‌گیری تغییرات حجم گاز به کار گرفته می‌شود.

به‌منظور 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 موردنیاز پر شد. گاز دی‌اکسیدکربن سپس به واکنشگاه جذب منتقل شد. هنگامی که تعادلی فشار و دمایی حاصل شد، شیر ۷-۴ برای شروع جذب باز شد و اجازه داده شد تا CO_2 به سلول جذب جریان یابد. آزمایش‌ها در فشار اولیه ۶۲۰ کیلوپاسکال و دمای ۳۰۳/۱۵ کلون انجام شدند. در طول جذب، فشار سامانه به‌تدریج کاهش یافته، در نهایت تثبیت شد که نشان‌دهنده رسیدن به تعادل و تکمیل فرایند بود.



شکل ۲ طرح‌واره‌ی دستگاه اندازه‌گیری جذب

Figure 2 Schematic of the absorption apparatus

مقدار CO_2 جذب‌شده با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد:

$$n_{CO_2} = \frac{V_{gas\ container}}{R} \left(\frac{P_1}{Z_1 T_1} - \frac{P_2}{Z_2 T_2} \right) \quad (1)$$

که در آن زیرنویس‌های ۱ و ۲ به‌ترتیب حالت اولیه و تعادل (نهایی) را نشان می‌دهند. همچنین، P (پاسکال)، V (مترمکعب)، T (کلون)، n_{CO_2} (مول) و R (۸/۳۱۴ ژول بر مول بر کلون) به‌ترتیب نشان‌دهنده فشار، حجم، دما، ظرفیت جذب CO_2 و ثابت جهانی گازها هستند. ضریب تراکم‌پذیری (Z) با استفاده از معادله حالت پنگ-رابینسون تعیین شد [۲۱].

اندازه‌گیری خواص فیزیکوشیمیایی نظیر گرانی و کشش سطحی محلول‌های مخلوط MDEA-DAP در غلظت‌ها و دماهای مختلف می‌تواند درک عمیق‌تری از سازوکارهای کف‌زایی و انتقال جرم فراهم آورد و تفسیرهای ارائه‌شده را با پشتوانه تجربی قوی‌تری همراه سازد. اندازه‌گیری این عامل‌ها و کنترل دقیق‌تر شرایط آزمایش در مطالعات آتی توصیه می‌شود. همچنین مانند هر مطالعه تجربی، خطاهای آزمایشگاهی ناشی از

گرفت. گازهای دودکش معمولاً حاوی ناخالصی‌هایی نظیر SO_2 و O_2 هستند که می‌توانند موجب تخریب حرارتی و اکسیدی شدن آلکانول‌آمین‌ها شده، بر نتایج آزمایش تأثیر بگذارند [۱۷، ۱۸]. استفاده از گاز نیتروژن امکان بررسی خصوصیات ذاتی کف‌زایی محلول‌های آمینی را بدون تداخل واکنش‌های شیمیایی و تخریب حلال فراهم می‌آورد و قابلیت تکرارپذیری و صحت داده‌ها را تضمین می‌کند [۱۹].

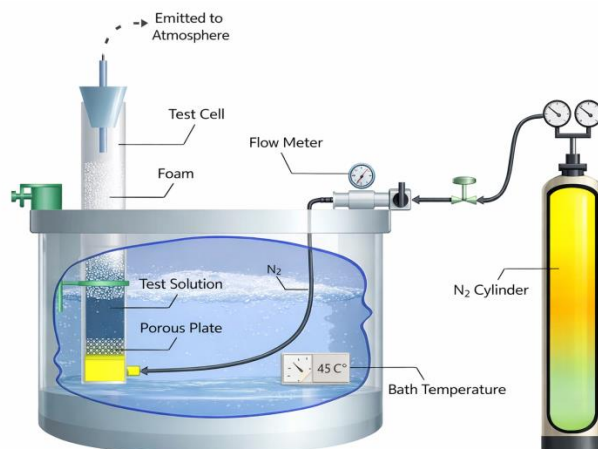
۲-۲-۲ روش آزمایش

۲-۲-۱-۱ آزمایش کف

شکل ۱ طرح‌واره دستگاه آزمایشگاهی مورد استفاده برای کف‌زایی را نشان می‌دهد که شامل رآکتور استوانه‌ای شیشه‌ای، حمام گرمایش با کنترل دما و جریان‌سنج برای تنظیم دبی گاز است. واکنشگاه (Reactor) از جنس شیشه شفاف با ارتفاع کل ۶۷ سانتی‌متر و قطر داخلی ۴/۱۰ سانتی‌متر ساخته شده است. در قاعده واکنشگاه، صفحه متخلخل شیشه‌ای از نوع G2 با قطر حفرات در محدوده ۴۰ تا ۱۰۰ میکرومتر نصب شده است که وظیفه توزیع یکنواخت گاز نیتروژن در داخل محلول را بر عهده دارد.

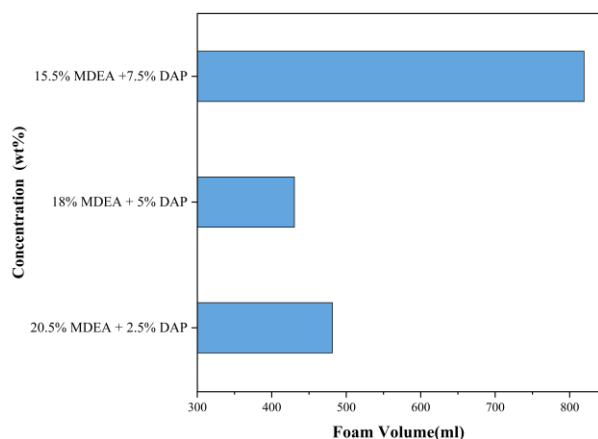
آزمایش کف‌زایی بر اساس استاندارد ASTM D892 که برای ارزیابی خصوصیات کف‌کنندگی روغن‌های روانکاری طراحی شده است، انجام شد. در هر آزمون، ۲۵ میلی‌لیتر از محلول آماده‌شده به درون واکنشگاه منتقل شد. دمای حمام آب در ۳۰ °C تنظیم و واکنشگاه حاوی محلول به مدت حداقل ۲۰ دقیقه در حمام قرار داده شد تا تعادل حرارتی کامل برقرار شود [۲۰].

پس از رسیدن به تعادل حرارتی، گاز نیتروژن با نرخ جریان ثابت ۱/۵ لیتر بر دقیقه به سامانه وارد شد. گاز خروجی از طریق مجرای در قسمت فوقانی واکنشگاه به اتمسفر تخلیه می‌شد. قابلیت تشکیل کف با اندازه‌گیری حجم کف در فواصل زمانی یک دقیقه در طول مدت تزریق گاز تعیین شد تا تغییرات دینامیکی ارتفاع کف مورد بررسی قرار گیرد و خطای اندازه‌گیری کاهش یابد. پس از قطع تزریق گاز، پایداری کف با ثبت زمان شکست که به‌عنوان مدت‌زمان لازم برای تخریب کامل کف و ناپدیدشدن آخرین حباب تعریف می‌شود، با استفاده از زمان‌سنج دیجیتال اندازه‌گیری شد.



شکل ۱ طرح‌واره دستگاه اندازه‌گیری کف‌زایی

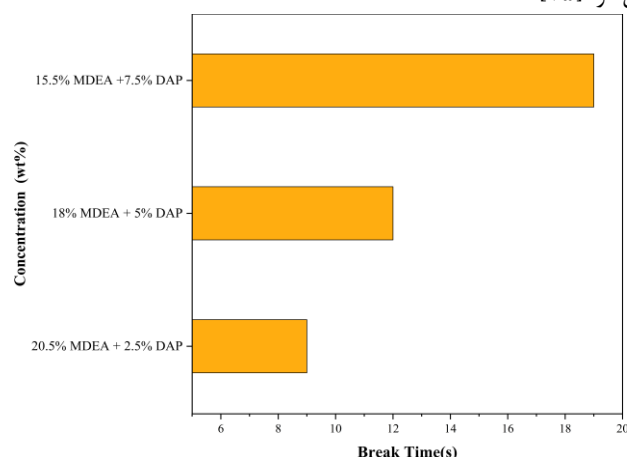
Figure 1 Schematic of the foaming apparatus



شکل ۳ تأثیر غلظت DAP بر حجم کف در غلظت کل ۲۳ درصد وزنی مخلوط MDEA+DAP
Figure 3 Effect of DAP concentration on foam volume in 23 wt.% MDEA-DAP mixture

باین حال، با افزایش بیشتر غلظت DAP به ۷/۵٪ وزنی، حجم کف به طور چشمگیری به ۸۱۹/۳۴ میلی لیتر افزایش می یابد. این افزایش شدید نشان می دهد که در نسبت های بالای DAP به MDEA، رفتار سامانه به طور اساسی تغییر می کند. در این شرایط، DAP خود به عنوان عامل سطح فعال قوی عمل کرده، با MDEA تشکیل کمپلکس های سطحی پایدار می دهد [۲۴].

شکل ۴ زمان شکست کف را در مخلوط MDEA-DAP با غلظت کل ۲۳ درصد وزنی نشان می دهد. زمان شکست از ۹ ثانیه در غلظت DAP ۲/۵٪ به ۱۲ ثانیه در DAP ۵٪ و سپس به ۹ ثانیه در DAP ۷/۵٪ افزایش می یابد. این افزایش بیانگر تشکیل کف های بسیار پایدار در نسبت های بالای DAP است. پایداری بالای کف در این شرایط ناشی از تقویت اثر مارانگونی است که در آن گرادین های کشش سطحی ناشی از توزیع ناهمگن مولکول های DAP و MDEA در سطح، مانع از تخلیه مایع از لایه های نازک کف می شود [۲۵].



شکل ۴ تأثیر غلظت DAP بر زمان شکست در غلظت کل ۲۳ درصد وزنی مخلوط MDEA+DAP
Figure 4 Effect of DAP concentration on break time in 23 wt.% MDEA-DAP mixture

دقت محدود تجهیزات اندازه گیری نظیر جریان سنج و دماسنج، خطای دید در قرائت حجم کف و نوسانات جزئی دمایی حمام آب اجتناب ناپذیر بوده است.

۳ نتایج و بحث

در این بخش، نتایج آزمایش های کف زایی و جذب CO₂ در محلول های مخلوط MDEA-DAP در سه سطح غلظت کل (۲۳، ۳۱/۵ و ۴۰) درصد وزنی ارائه و تحلیل می شود. بدین ترتیب، برای هر سطح غلظت کل، غلظت DAP در سه مقدار ثابت (۲/۵، ۵ و ۷/۵) درصد وزنی تنظیم شد و غلظت متناظر MDEA در هر حالت به صورت تفاضل غلظت DAP از غلظت کل تعیین شد. جدول ۱ ترکیب دقیق مخلوط های مورد مطالعه را نشان می دهد.

جدول ۱ ترکیب محلول های مخلوط MDEA-DAP مورد مطالعه

Table 1 Composition of MDEA-DAP blended solutions studied

Total Conc. (wt.%)	MDEA (wt.%)	DAP (wt.%)
23	20.5	2.5
23	18	5
23	15.5	7.5
31.5	29	2.5
31.5	26.5	5
31.5	24	7.5
40	37.5	2.5
40	35	5
40	32.5	7.5

۳-۱ بررسی رفتار مخلوط MDEA+DAP در غلظت کل ۲۳ درصد وزنی

۳-۱-۱ رفتار کف زایی در مخلوط

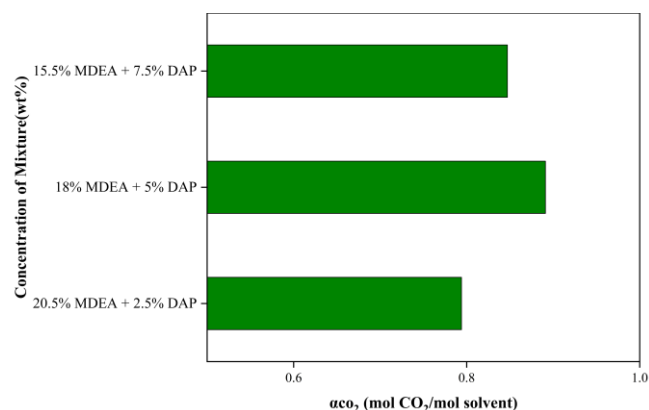
شکل ۳ حجم کف تشکیل شده در مخلوط MDEA-DAP با غلظت کل ۲۳ درصد وزنی را نشان می دهد. با افزایش غلظت DAP از ۲/۵٪ به ۵٪ وزنی، حجم کف از ۴۸۱/۳۶ میلی لیتر به ۴۳۰/۴۰ میلی لیتر کاهش یافته است. علت این پدیده به برهم کنش بین گروه های دی آمین DAP و گروه آمین نوع سوم MDEA مربوط است که منجر به اختلال در ساختار منظم مولکول های MDEA در سطح مشترک گاز - مایع می شود. DAP با دو گروه عاملی آمین اولیه، می تواند پیوندهای هیدروژنی قوی تری نسبت به MDEA تشکیل دهد و از تجمع مولکول های MDEA در سطح جلوگیری کند. این برهم کنش باعث می شود که کشش سطحی محلول افزایش یابد و پایداری لایه های نازک کف کاهش پیدا کند [۲۳، ۲۲].

باین حال، با افزایش بیشتر غلظت DAP به ۷/۵٪ وزنی، حجم کف به طور چشمگیری به ۸۱۹/۳۴ میلی لیتر افزایش می یابد. این افزایش شدید نشان می دهد که در نسبت های بالای DAP به MDEA، رفتار سامانه به طور اساسی تغییر می کند. در این شرایط، DAP خود به عنوان عامل سطح فعال قوی عمل کرده، با MDEA تشکیل کمپلکس های سطحی پایدار می دهد [۲۴].

۳-۱-۲ رفتار جذب در مخلوط

شکل ۵ ظرفیت جذب CO_2 را برای مخلوط MDEA-DAP با غلظت کل ۲۳ درصد وزنی در برابر غلظت DAP نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت DAP از ۲/۵ به ۵ درصد وزنی، ظرفیت جذب از ۰/۷۹۴ به ۰/۸۹۱ افزایش می‌یابد که معادل افزایش ۱۲/۲ درصدی است. سازوکار افزایش ظرفیت جذب به واکنش سریع گروه‌های آمین اولیه DAP با CO_2 مربوط است. آمین‌های اولیه به دلیل داشتن دو اتم هیدروژن فعال، می‌توانند به‌صورت مستقیم با CO_2 واکنش داده، کربامات پایدار تشکیل دهند. این در حالی است که MDEA به‌عنوان آمین درجه سوم، فاقد هیدروژن فعال بوده، واکنش آن با CO_2 از طریق سازوکار غیرمستقیم و کندتری صورت می‌گیرد.

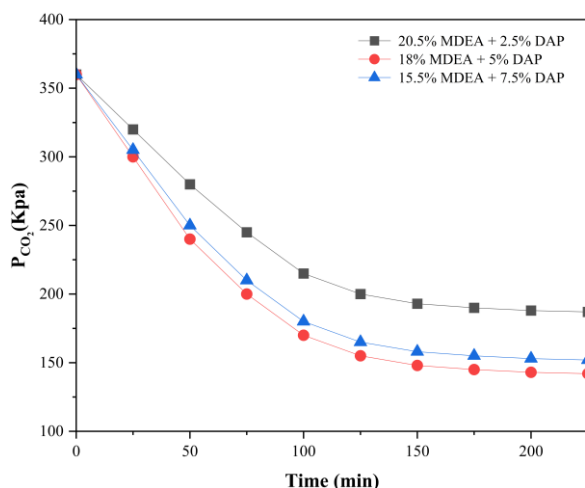
بالین‌حال، افزایش بیشتر غلظت DAP به ۷/۵ درصد وزنی، باعث کاهش ظرفیت جذب به ۰/۸۴۷ می‌شود. این کاهش نشان می‌دهد که در نسبت‌های بالای DAP، اثرات منفی بر عملکرد جذب تأثیرگذار می‌شوند. یکی از دلایل این کاهش، افزایش گرانی محلول در اثر تشکیل کربامات‌های متعدد است که می‌تواند انتقال جرم CO_2 در محلول را محدود کند [۲۶].



شکل ۵ تأثیر غلظت DAP بر ظرفیت جذب CO_2 در غلظت کل ۲۳ درصد وزنی مخلوط MDEA+DAP

Figure 5 Effect of DAP concentration on CO_2 loading capacity in 23 wt.% MDEA-DAP mixture

شکل ۶ نمودار سینتیکی جذب CO_2 را برای محلول‌های مخلوط MDEA-DAP با غلظت کل ۲۳ درصد وزنی نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش غلظت DAP، شیب اولیه منحنی‌های جذب افزایش می‌یابد که بیانگر سرعت بالاتر واکنش CO_2 با گروه‌های آمین اولیه DAP است. در غلظت ۲/۵ درصد وزنی DAP، شیب اولیه نسبتاً کم است و منحنی به‌آرامی به سمت تعادل پیش می‌رود. با افزایش غلظت DAP به ۵/۵ درصد، شیب اولیه افزایش‌یافته، منحنی جذب سریع‌تری را نشان می‌دهد. در این شرایط، منحنی در فشار تعادلی پایین‌تری قرار می‌گیرد که تأییدکننده ظرفیت جذب بالاتر است. با افزایش غلظت DAP به ۷/۵ درصد، شیب اولیه بیشترین مقدار خود را نشان می‌دهد، اما منحنی در فشار تعادلی بالاتری قرار می‌گیرد. این رفتار نشان می‌دهد که اگرچه DAP سرعت اولیه جذب را افزایش می‌دهد، اما در غلظت‌های بالا، ظرفیت نهایی جذب کاهش می‌یابد.



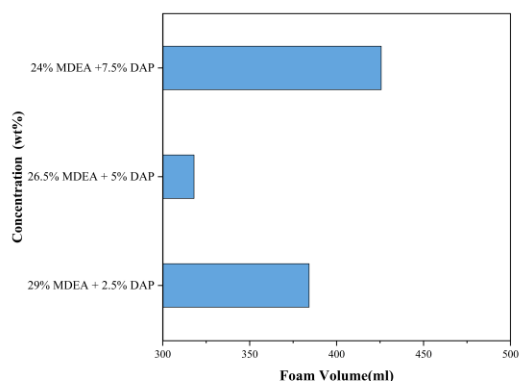
شکل ۶ تأثیر غلظت DAP بر نرخ جذب CO_2 در غلظت کل ۲۳ درصد وزنی مخلوط MDEA+DAP

Figure 6 Effect of DAP concentration on absorption rate capacity in 23 wt.% MDEA-DAP mixture

۳-۲ بررسی رفتار مخلوط MDEA+DAP در غلظت کل ۳۱/۵ درصد وزنی

۳-۲-۱ رفتار کف‌زایی در مخلوط

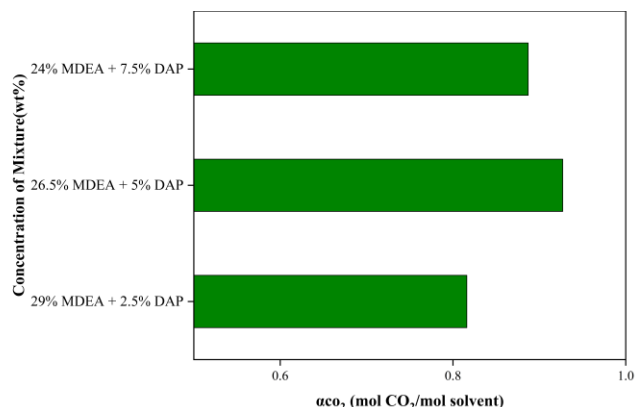
شکل ۷ حجم کف تشکیل شده در مخلوط MDEA-DAP با غلظت کل ۳۱/۵ درصد وزنی را نشان می‌دهد. رفتار کف‌زایی به‌طور واضحی نشان‌دهنده اثر ضدکف DAP است. با افزایش غلظت DAP از ۲/۵ به ۵ درصد وزنی، حجم کف از ۳۸۴/۹۸ میلی‌لیتر به ۳۱۸/۴۵ میلی‌لیتر کاهش می‌یابد که معادل کاهش ۱۷/۳ درصدی است. این کاهش نشان می‌دهد که در این غلظت کل، DAP به‌طور مؤثرتری به‌عنوان عامل ضدکف عمل می‌کند. با افزایش بیشتر غلظت DAP به ۷/۵ درصد وزنی، حجم کف مجدداً به ۴۲۵/۶۷ میلی‌لیتر افزایش می‌یابد. این افزایش نشان می‌دهد که اثر ضدکف DAP در غلظت‌های بالاتر از ۵ درصد وزنی کاهش‌یافته، DAP شروع به ایفای نقش به‌عنوان عامل سطح‌فعال می‌کند. در این غلظت، نسبت DAP به MDEA به‌اندازه‌ای است که مولکول‌های DAP می‌توانند ساختارهای سطحی مستقری تشکیل دهند که به پایداری کف کمک می‌کند [۲۷]. این رفتار غیرخطی بیانگر وجود نقطه مطلوب برای غلظت DAP است.



شکل ۷ تأثیر غلظت DAP بر حجم کف در غلظت کل ۳۱/۵ درصد وزنی مخلوط MDEA+DAP

Figure 7 Effect of DAP concentration on foam volume capacity in 31.5 wt.% MDEA-DAP mixture

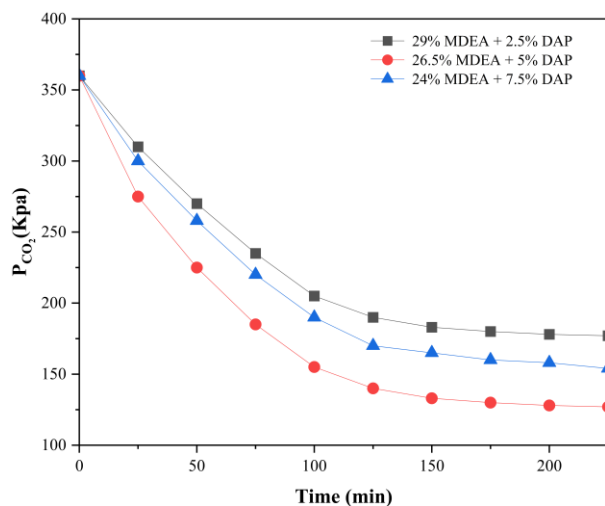
کف‌زایی، بلکه بهترین عملکرد جذب را نیز ارائه می‌دهد.



شکل ۹ تأثیر غلظت DAP بر ظرفیت جذب CO_2 در غلظت کل ۳۱/۵ درصد

وزنی مخلوط MDEA+DAP

Figure 9 Effect of DAP concentration on CO_2 loading capacity in 31.5 wt.% MDEA-DAP mixture



شکل ۱۰ تأثیر غلظت DAP بر نرخ جذب CO_2 در غلظت کل ۳۱/۵ درصد وزنی

مخلوط MDEA+DAP

Figure 10 Effect of DAP concentration on absorption rate capacity in 31.5 wt.% MDEA-DAP mixture

۳-۳ بررسی رفتار مخلوط MDEA+DAP در غلظت کل ۴۰ درصد

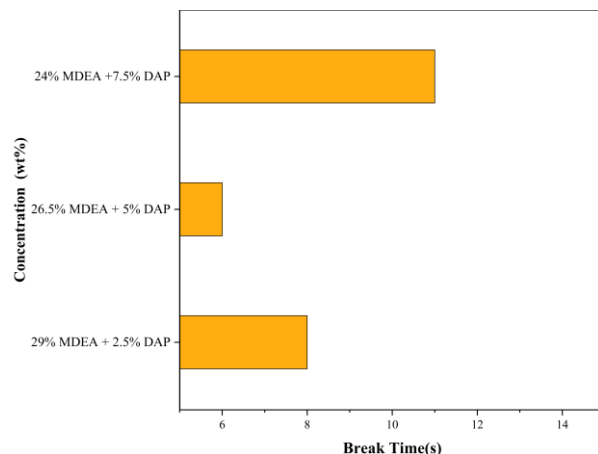
وزنی

۳-۳-۱ رفتار کف‌زایی در مخلوط

شکل ۱۱ حجم کف را برای محلول‌های با غلظت کل ۴۰ درصد وزنی از MDEA-DAP نشان می‌دهد. در این غلظت، رفتار کف‌زایی متفاوت از دو غلظت قبلی است. حجم کف از ۴۹۴/۵۶ میلی‌لیتر در ۲/۵٪ DAP به ۵۴۸/۹۵ میلی‌لیتر در ۵٪ DAP افزایش یافته، سپس به ۵۵۵/۸۲ میلی‌لیتر در ۷/۵٪ DAP می‌رسد. این افزایش تدریجی و ملایم نشان می‌دهد که در غلظت‌های بالای کل آمین، اثر ضدکف DAP به‌طور قابل‌توجهی تضعیف شده است.

افزایش غلظت کل اجزای محلول می‌تواند منجر به تغییر پاسخ دینامیکی سامانه در برابر فرایند کف‌زایی شود، به‌طوری‌که هم فرایند تشکیل کف و هم پایداری آن تحت‌تأثیر قرار گیرند. در نتیجه، تشکیل لایه‌های سطحی کندتر صورت می‌گیرد؛ اما لایه‌های تشکیل‌شده پایدارتر هستند؛ زیرا تخلیه

شکل ۸ زمان شکست کف را در مخلوط MDEA-DAP با غلظت کل ۳۱/۵ درصد وزنی نشان می‌دهد. روند مشابهی با بقیه غلظت‌ها مشاهده می‌شود به‌طوری‌که زمان شکست از ۸ ثانیه در غلظت DAP ۲/۵٪ به ۶ ثانیه در ۵٪ کاهش یافته، سپس به ۱۱ ثانیه در ۷/۵٪ افزایش می‌یابد. کاهش زمان شکست در غلظت مطلوب DAP نشان‌دهنده تسریع فرایند تخریب حباب‌ها و کاهش پایداری کف است. این رفتار با مطالعات قبلی در زمینه اثر آمین‌های چندعاملی بر دینامیک کف هم‌خوانی دارد [۲۸].



شکل ۸ تأثیر غلظت DAP بر زمان شکست کف در غلظت کل ۳۱/۵ درصد وزنی

مخلوط MDEA+DAP

Figure 8 Effect of DAP concentration on foam break time in 31.5 wt.% MDEA-DAP mixture

۳-۲-۲ رفتار جذب در مخلوط

شکل ۹ ظرفیت جذب CO_2 را برای محلول‌های مخلوط MDEA-DAP با غلظت کل ۳۱/۵ درصد وزنی نشان می‌دهد. با افزایش غلظت DAP از ۲/۵ به ۵ درصد وزنی، ظرفیت جذب از ۰/۸۱۶ به ۰/۹۲۷ افزایش می‌یابد که معادل افزایش ۱۳/۶ درصدی است. این افزایش بیشتر از غلظت ۲۳ درصد است که نشان می‌دهد در این غلظت کل، اثر هم‌افزایی بین MDEA و DAP قوی‌تر عمل می‌کند.

با افزایش بیشتر DAP به ۷/۵٪ وزنی، ظرفیت جذب به ۰/۸۸۷ کاهش می‌یابد. این روند مشابه آنچه در غلظت ۲۳ درصد مشاهده شد است و تأیید می‌کند که غلظت بهینه DAP برای حداکثر ظرفیت جذب در حدود ۵ درصد وزنی قرار دارد. در غلظت‌های بالاتر، محدودیت‌های انتقال جرم اثر منفی بر عملکرد جذب دارند.

نمودار سینتیکی جذب CO_2 برای غلظت کل ۳۱/۵ درصد در شکل ۱۰ ارائه شده است. برای ترکیب با ۲/۵ درصد وزنی DAP، سرعت اولیه جذب نسبتاً کم بوده، منحنی به تدریج به فشار تعادلی بالاتری می‌رسد. افزودن DAP به ۵٪ منجر به افزایش چشمگیر شیب اولیه منحنی شده، سینتیک جذب تسریع می‌شود. مهم‌تر این‌که، منحنی در فشار تعادلی پایین‌تری نسبت به سایر ترکیب‌ها قرار دارد که نشان‌دهنده بالاترین ظرفیت جذب در این غلظت است. این رفتار بیانگر اثر هم‌افزایی بهینه بین MDEA و DAP در این نسبت است. با افزایش DAP به ۷/۵٪، شیب اولیه بیشتر می‌شود که نشان‌دهنده سرعت جذب بالاتر است، اما فشار تعادلی افزایش یافته است. این نتایج تأیید می‌کنند که ترکیب MDEA=۲۶/۵ و DAP=۵٪ نه تنها بهترین عملکرد

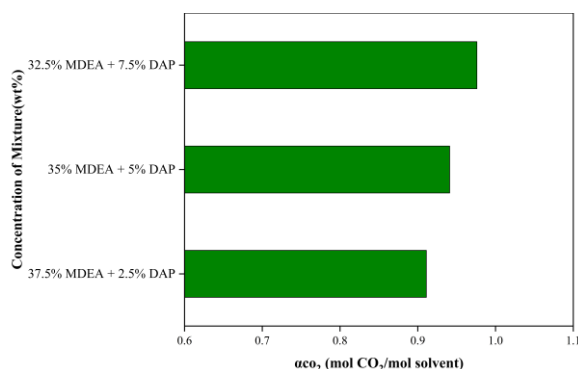
۳-۳-۲ رفتار جذب در مخلوط

شکل ۱۳ ظرفیت جذب CO_2 را برای محلول‌های با غلظت کل ۴۰ درصد وزنی نشان می‌دهد. با افزایش غلظت DAP از ۲/۵ به ۵ درصد وزنی، ظرفیت جذب از ۰/۹۱۱ به ۰/۹۴۱ افزایش می‌یابد. این افزایش نسبت به غلظت‌های پایین‌تر کمتر است که نشان می‌دهد در غلظت‌های بالای کل آمین، اثر افزودن DAP بر ظرفیت جذب محدودتر می‌شود.

نکته جالب توجه این‌که با افزایش غلظت DAP به ۷/۵٪ وزنی، ظرفیت جذب به ۰/۹۷۶ افزایش می‌یابد که بالاترین مقدار در بین تمام ترکیب‌های مورد مطالعه است. این رفتار متفاوت از غلظت‌های ۲۳ و ۳۱/۵ درصد است که در آن‌ها افزایش DAP به ۷/۵٪ منجر به کاهش ظرفیت جذب شد. این پدیده را می‌توان به دو عامل نسبت داد:

۱- در غلظت‌های بالای کل آمین، تعداد کافی از مولکول‌های DAP وجود دارد که می‌توانند به‌طور مؤثر با CO_2 واکنش دهند بدون این‌که محدودیت‌های انتقال جرم جدی ایجاد شود.

۲- افزایش غلظت DAP در این سطح، منجر به تشکیل شبکه‌های کربامات گسترده‌تری می‌شود که می‌توانند مقدار بیشتری CO_2 را ذخیره کنند [۲۹، ۳۰].



شکل ۱۳ تأثیر غلظت DAP بر ظرفیت جذب CO_2 در غلظت کل ۴۰ درصد وزنی مخلوط MDEA+DAP

Figure 13 Effect of DAP concentration on CO_2 loading capacity in 40 wt.% MDEA-DAP mixture

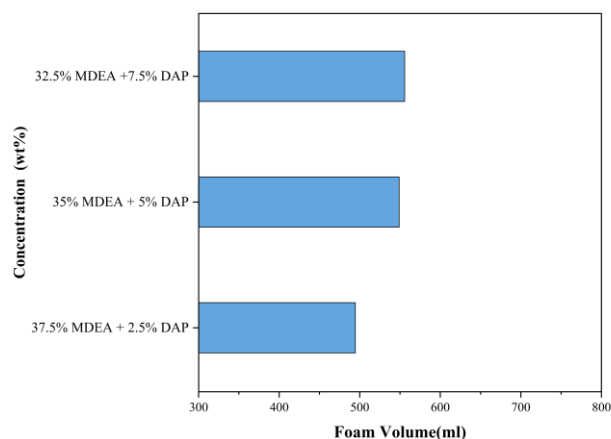
شکل ۱۴ نشان می‌دهد که سینتیک جذب در غلظت کل ۴۰ درصد رفتار متفاوتی نسبت به غلظت‌های پایین‌تر دارد. با افزایش تدریجی DAP از ۲/۵ به ۷/۵٪، شیب اولیه منحنی‌های جذب به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد که بیانگر تسریع مستمر سینتیک جذب است. نکته قابل توجه این‌که در غلظت بالا، تمامی منحنی‌ها در فشارهای تعادلی پایین‌تری نسبت به غلظت‌های ۲۳ و ۳۱/۵ درصد قرار می‌گیرند. در ترکیب ۷/۵٪ وزنی DAP بالاترین شیب اولیه و پایین‌ترین فشار تعادلی را نشان می‌دهد که بالاترین ظرفیت جذب مطابقت دارد. این رفتار نشان می‌دهد که در غلظت‌های بالای کل آمین، افزایش DAP نه تنها سرعت جذب را افزایش می‌دهد، بلکه ظرفیت نهایی جذب را نیز بهبود می‌بخشد.

۳-۴ ارزیابی جامع رفتار مخلوط

مقایسه نتایج به‌دست آمده در سه غلظت کل نشان می‌دهد که رفتار کف‌زایی و جذب CO_2 در سامانه MDEA-DAP تابعی غیرخطی از غلظت کل آمین، نسبت DAP به MDEA و خواص فیزیکوشیمیایی محلول است. MDEA

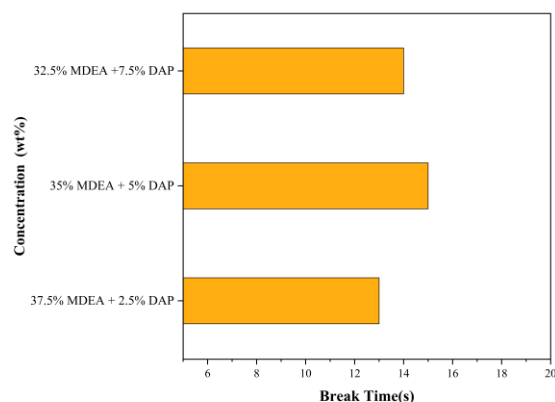
مایع از بین لایه‌های نازک کف با سرعت کمتری انجام می‌شود [۲۹]. این دو اثر متضاد منجر به رفتار پیچیده‌تری در غلظت‌های بالا می‌شود.

علاوه بر این، در غلظت ۴۰ درصد، تعداد مولکول‌های MDEA به‌اندازه‌ای زیاد است که افزودن DAP نمی‌تواند به‌طور قابل توجهی ساختار سطحی غالب MDEA را تغییر دهد. نسبت MDEA به DAP در این غلظت به‌اندازه‌ای کم است که DAP نمی‌تواند اثر ضدکف قابل‌ملاحظه‌ای ایجاد کند [۱۰]. در عوض، DAP به‌صورت جزئی در سامانه عمل کرده، ممکن است به افزایش جزئی کف‌زایی کمک کند.



شکل ۱۱ تأثیر غلظت DAP بر حجم کف در غلظت کل ۴۰ درصد وزنی مخلوط MDEA+DAP
Figure 11 Effect of DAP concentration on foam volume in 40 wt.% MDEA-DAP mixture

شکل ۱۲ زمان شکست کف را در مخلوط MDEA-DAP با غلظت کل ۴۰ درصد وزنی نشان می‌دهد. زمان شکست کف در این غلظت از ۱۳ ثانیه به ۱۵ ثانیه افزایش یافته، سپس به ۱۴ ثانیه کاهش جزئی می‌یابد. این تغییرات نسبتاً کم نشان می‌دهد که در غلظت‌های بالای کل آمین، سامانه نسبت به تغییرات نسبت MDEA به DAP کمتر حساس است. این رفتار پایدار را می‌توان به غلبه اثرات گرانشی و تعاملات بین‌مولکولی قوی در محلول‌های غلیظ نسبت داد [۱۱].



شکل ۱۲ تأثیر غلظت DAP بر زمان شکست کف در غلظت کل ۴۰ درصد وزنی مخلوط MDEA+DAP
Figure 12 Effect of DAP concentration on foam break time in 40 wt.% MDEA-DAP mixture

۴ نتیجه‌گیری

در این پژوهش، رفتار کف‌زایی و عملکرد جذب CO_2 در محلول‌های مخلوط MDEA-DAP به طور هم‌زمان بررسی شد. نتایج نشان داد که MDEA و DAP نقش‌های متفاوت و مکمل ایفا می‌کنند. MDEA به‌دلیل ساختار آمین درجه سوم، تمایل ذاتی به تجمع در سطح مشترک گاز - مایع دارد که کف‌زایی را افزایش می‌دهد، درحالی‌که DAP با دو گروه آمین اولیه، می‌تواند مستقیماً و سریع با CO_2 واکنش داده و کربامات پایدار تشکیل دهد و نقش کلیدی در افزایش ظرفیت جذب ایفا می‌کند.

در غلظت بهینه ۵ درصد وزنی DAP، برهم‌کنش‌های مولکولی بین DAP و MDEA منجر به اختلال در آرایش منظم مولکول‌های MDEA در سطح شده، پایداری کف را کاهش می‌دهد. در غلظت‌های بالاتر از این نقطه، DAP خود به‌عنوان عامل سطح‌فعال قوی عمل کرده، کف‌زایی را تشدید می‌کند. همچنین در غلظت‌های بالای DAP، تغییرات گرانیروی ناشی از تشکیل کربامات‌های متعدد بر انتقال جرم CO_2 تأثیر گذاشته، ظرفیت نهایی جذب را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد.

مقایسه کمی نتایج در سه غلظت کل نشان داد که در غلظت ۲۳ درصد وزنی، ترکیب ۱۸٪ MDEA و ۵٪ DAP با حجم کف ۴۳۰/۴۰ میلی‌لیتر و ظرفیت جذب ۰/۸۹۱ بهترین عملکرد را داشت. در غلظت ۴۰ درصد وزنی، اگرچه ظرفیت جذب به ۰/۹۴۱ افزایش یافت، حجم کف به ۵۴۸/۹۵ میلی‌لیتر رسید که از نظر عملیاتی نامطلوب است.

بر اساس تحلیل جامع، غلظت کل ۳۱/۵ درصد وزنی با ترکیب ۲۶/۵٪ وزنی MDEA و ۵٪ وزنی DAP به‌عنوان شرایط بهینه شناسایی شد که بهترین تعادل بین کاهش کف‌زایی و حفظ ظرفیت جذب بالا را فراهم می‌آورد؛ کمترین حجم کف، کوتاه‌ترین زمان شکست و ظرفیت جذب ۰/۹۲۷ به طور هم‌زمان در این ترکیب حاصل شد. نتایج سینتیک نیز تأیید کردند که در این شرایط، هم سرعت اولیه جذب بالاست و هم منحنی جذب در فشار تعادلی پایین‌تری قرار می‌گیرد. این یافته‌ها می‌تواند مبنایی برای طراحی و بهینه‌سازی سامانه‌های مخلوط آمینی در کاربردهای صنعتی جذب CO_2 و شیرین‌سازی گاز طبیعی فراهم کند.

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 داشته‌اند.

به‌دلیل داشتن گروه آمین نوع سوم و خواص سطح‌فعالی ذاتی خود، عامل اصلی کف‌زایی در سامانه است. DAP به‌دلیل داشتن دو گروه آمین اولیه، نقش اصلی در افزایش ظرفیت و سرعت جذب CO_2 را ایفا می‌کند. این یافته‌ها با مطالعات قبلی هم‌خوانی دارد؛ برای مثال، در بررسی جذب CO_2 در مخلوط‌های MDEA با آمین‌های آلکیلی چندآمینی (مانند MAPA، DETA، TETA و TEPA)، مشاهده شده که افزودن آمین دوم ظرفیت جذب را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد (حداکثر ۰/۷۵۳ مول CO_2 بر مول جاذب در MDEA/TEPA) و ظرفیت چرخشی را تا سه برابر MEA بهبود می‌بخشد [۳۱].

جدول ۲ خلاصه‌ای از شرایط مطلوب برای هر سه غلظت کل را نشان می‌دهد که شامل داده‌های کف‌زایی و جذب است.

جدول ۲ شرایط مطلوب کف‌زایی و جذب برای محلول‌های مخلوط MDEA-DAP

Table 2 Optimal foaming and absorption conditions for MDEA-DAP blended solutions

Total conc.(wt%)	MDEA (wt%)	DAP (wt%)	Foam volume (mL)	Break time (s)	CO ₂ loading (mol CO ₂ /mol amine)
23	18	5	430.40	12	0.891
31.5	26.5	5	318.45	6	0.927
40	35	5	548.95	15	0.941

در مخلوط‌های MDEA با آمین دوم مانند TEPA، اضافه‌کردن آمین دوم ظرفیت جذب را افزایش می‌دهد و نرخ جذب را از MDEA تنها بالاتر می‌برد [۳۱]. در مخلوط‌های PZ/MEA، افزودن PZ به MEA کف‌زایی را افزایش می‌دهد؛ اما ظرفیت جذب را بهبود می‌بخشد که نیاز به کنترل کف‌زایی را برجسته می‌کند [۱۹].

در غلظت کل ۲۳٪ و غلظت DAP ۵٪، کف‌زایی نسبتاً کنترل‌شده، ظرفیت جذب قابل‌قبولی ارائه می‌دهد، اما سامانه حساسیت بالایی به تغییرات نسبت DAP به MDEA دارد. افزایش غلظت DAP به ۷/۵٪ منجر به کف‌زایی شدید و کاهش جذب می‌شود که مشابه افزایش کف‌زایی در PZ + MEA است [۱۹]. در غلظت ۳۱/۵٪، عملکرد بهینه حاصل می‌شود؛ کمترین کف‌زایی همراه با بالاترین ظرفیت جذب نسبی مشاهده شد. نسبت DAP به MDEA اثر هم‌افزایی (Synergistic) بهینه‌ای ایجاد می‌کند که هم DAP به‌طور مؤثر ساختار سطحی MDEA را مختل می‌کند و کف را کاهش می‌دهد و هم سرعت و ظرفیت جذب را به حداکثر می‌رساند [۳۱]. در غلظت ۴۰٪، اثر ضدکف DAP تضعیف می‌شود و کف‌زایی به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد، اما غلبه MDEA در سطح باعث می‌شود که DAP نتواند ساختار سطحی را به‌طور مؤثر تغییر دهد که با محدودیت‌های انتقال جرم در غلظت‌های بالا در مخلوط‌های MEA/MDEA هم‌خوانی دارد.

بر اساس تحلیل جامع، غلظت کل ۳۱/۵٪ با ترکیب ۲۶/۵٪ وزنی MDEA و ۵٪ وزنی DAP به‌عنوان شرایط بهینه تعیین می‌شود که بهترین تعادل بین کاهش کف‌زایی و حفظ ظرفیت جذب بالا را فراهم می‌آورد.

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

- Kidnay, A.J., W.R. Parrish, And D.G. McCartney, *Fundamentals of Natural Gas Processing*. 2019: CRC Press, 2019.
- Dubey, A. And A. Arora, Advancements in Carbon Capture Technologies: A Review, *Journal of Cleaner Production*, 373, 133932, 2022.
- Faiz, R., and M. Al-Marzouqi, Mathematical Modeling for the Simultaneous Absorption of CO₂ And H₂S Using MEA in Hollow Fiber Membrane Contactors, *Journal of Membrane Science*, 342, 269-278, 2009.
- ochelle, G.T., Amine Scrubbing for CO₂ Capture, *Science*, 325, 1652-1654, 2009.
- Alhseinat, E., et al., Effect of MDEA Degradation Products on Foaming Behavior and Physical Properties of Aqueous MDEA Solutions, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 37, 280-286, 2015.
- Alhseinat, E., et al., Foaming Study Combined with Physical Characterization of Aqueous MDEA Gas Sweetening Solutions, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 17, 49-57, 2014.
- Santos, S.P., J.F. Gomes, and J.C. Bordado, Scale-Up Effects of CO₂ Capture by Methyldiethanolamine (MDEA) Solutions in Terms of Loading Capacity, *Technologies*, 4, 19, 2016.
- Huertas, J.I., et al., CO₂ Absorbing Capacity of MEA, *Journal of Chemistry*, 965015, 2015.
- Xiao, L. et al., Carbon Dioxide Absorption and Desorption Experiments Based on MDEA, *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 204, 109931, 2024.
- Lepaumier, H., D. Picq, And P.-L. Carrette, New Amines for CO₂ Capture. I. Mechanisms of Amine Degradation in the Presence of CO₂, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48, 9061-9067, 2009.
- Closmann, F., T. Nguyen, And G.T. Rochelle, MDEA/Piperazine as a Solvent for CO₂ Capture, *Energy Procedia*, 1, 1351-1357, 2009.
- Thitakamol, B. And A. Veawab, Foaming Behavior in CO₂ Absorption Process Using Aqueous Solutions of Single and Blended Alkanolamines, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 47, 216-225, 2008.
- Ashok, A., et al., Capillary Microreactor for Initial Screening of Three Amine-Based Solvents for CO₂ Absorption, Desorption, and Foaming, *Frontiers in Chemical Engineering*, 4, 779611, 2022.
- Rohani, M., H. Jazayeri-Rad, And R.M. Behbahani, Continuous Prediction of the Gas Dew Point Temperature for the Prevention of the Foaming Phenomenon in Acid Gas Removal Units Using Artificial Intelligence Models, *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 10, 165-175, 2017.
- Dupart, M., T. Bacon, and D. Edwards, Understanding Corrosion in Alkanolamine Gas Treating Plants: Part 1, *Hydrocarbon Processing; (United States)*, 72(4), 75-80, 1993.
- Heldebrant, D.J., et al., Water-Lean Solvents for Post-Combustion CO₂ Capture: Fundamentals, Uncertainties, Opportunities, and Outlook, *Chemical Reviews*, 117, 9594-9624, 2017.
- Knudsen, J.N., et al., Experience with CO₂ Capture from Coal Flue Gas in Pilot-Scale: Testing of Different Amine Solvents, *Energy Procedia*, 1, 783-790, 2009.
- Yan, W., et al., Carbon Dioxide Capture by Amine-Impregnated Mesocellular-Foam-Containing Template, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51, 3653-3662, 2012.
- Chen ,X., S.A. Freeman, And G.T. Rochelle, Foaming of Aqueous Piperazine and Monoethanolamine for CO₂ Capture, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 5, 381-386, 2011.
- Thitakamol, B., A. Veawab, And A. Aroonwilas, Foaming in Amine-Based CO₂ Capture Process: Experiment, Modeling and Simulation, *Energy Procedia*, 1, 1381-1386, 2009.
- Rooney, P., M. Dupart, And T. Bacon, Oxygen's Role in Alkanolamine Degradation, *Hydrocarbon Processing (International Ed.)*, 77, 109-113, 1998.
- Chakma, A. And A .Meisen, Methyl-Diethanolamine Degradation—Mechanism and Kinetics, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 75, 861-871, 1997.
- Paul, S., A.K. Ghoshal, And B. Mandal, Kinetics of Absorption of Carbon Dioxide into Aqueous Solutions of 2-Amino-2-Hydroxymethyl-1, 3-Propanediol, *Separation And Purification Technology*, 68, 422-427, 2009.
- Dugas, R., and G. Rochelle, Absorption and Desorption Rates of Carbon Dioxide with Monoethanolamine and Piperazine, *Energy Procedia*, 1, 1163-1169, 2009.
- Li, H ,et al., Thermodynamic Modeling of Piperazine/2-Aminomethylpropanol/CO₂/Water, *Chemical Engineering Science*, 117, 331-341, 2014.
- Mandal, B. And S. Bandyopadhyay, Absorption of Carbon Dioxide into Aqueous Blends of 2-Amino-2-Methyl-1-Propanol and Monoethanolamine, *Chemical Engineering Science*, 61, 5440-5447, 2006.
- Abu-Zahra, M.R., et al., CO₂ Capture from Power Plants: Part I. A Parametric Study of the Technical Performance Based on Monoethanolamine, *International Journal of Greenhouse Gas Control* 1(1), 37-46, 2007.
- Versteeg, G.F. And W.P. Van Swaaij, Solubility and Diffusivity of Acid Gases (Carbon Dioxide, Nitrous Oxide) in Aqueous Alkanolamine Solutions, *Journal of Chemical & Engineering Data*, 33, 29-34, 1988.
- Khan, S.N., et al., Thermophysical Properties of Concentrated Aqueous Solution of N-Methyldiethanolamine (MDEA), Piperazine (PZ), And Ionic Liquids Hybrid Solvent for CO₂ Capture, *Journal of Molecular Liquids*, 229, 221-229, 2017.
- Samanta, A. And S.S. Bandyopadhyay, Density and Viscosity of Aqueous Solutions of Piperazine and (2-Amino-2-Methyl-1-Propanol+ Piperazine) from 298 to 333 K, *Journal of Chemical & Engineering Data*, 51, 467-470, 2006.
- Choi, S.Y., et al., Carbon Dioxide Absorption into Aqueous Blends of Methyldiethanolamine (MDEA) and Alkyl Amines Containing Multiple Amino Groups, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53, 14451-14461, 2014.