

# مطالعه تجربی سینتیک جذب گاز دی‌اکسید کربن در مخلوط آبی متشکل از متیل دی‌اتانول آمین و ۲- (آمینو اتیل) آمینو اتانول

الهه ادیب‌پرور<sup>۱</sup>، علی تقی ذوقی<sup>۲\*</sup>، امید پورعلی<sup>۱</sup> و خالد فرصت<sup>۲</sup>

۱- گروه سیستم‌های انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۲- گروه فناوری‌های تصفیه گاز، پژوهشکده توسعه فناوری‌های فرآورش و انتقال گاز، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۲۷

## چکیده

در این مقاله سینتیک جذب گاز دی‌اکسید کربن به وسیله مخلوط آبی متشکل از متیل دی‌اتانول آمین و ۲- (آمینو اتیل) آمینو اتانول در یک برج دیواره مرطوب به صورت تجربی مطالعه شد. در آزمایش‌های صورت گرفته، گاز دی‌اکسید کربن توسط مخلوط آبی ۲- (آمینو اتیل) آمینو اتانول و متیل دی‌اتانول آمین با نسبت مولی ۰/۱ در غلظت کلی ۳/۳۶ M جذب گردید. آزمایش‌ها در بازه دمایی ۳۱۳/۱۵ تا ۳۴۳/۱۵ K و در سه فشار ۱۰۰، ۴۰۰ و ۷۰۰ kPa انجام شد. جهت تعیین رابطه‌ای برای محاسبه ثابت سرعت واکنش، با توجه به داده‌های به دست آمده از آزمایش‌ها مکانیسم جذب گاز دی‌اکسید کربن در مخلوط فوق به صورت واکنش مرتبه اول نسبت به غلظت گاز دی‌اکسید کربن در نظر گرفته شد و در نهایت، رابطه‌ای برای محاسبه ثابت سرعت واکنش در مخلوط مطالعه شده تعیین گردید. همچنین، نتایج تجربی بیانگر افزایش میزان جذب گاز دی‌اکسید کربن در اثر افزودن تسریع کننده ۲- (آمینو اتیل) آمینو اتانول است، به طوری که در دمای ۳۱۳/۱۵ K و فشار ۱۰۰ kPa اضافه نمودن ۰/۳ M دی آمین، ۲- (آمینو اتیل) آمینو اتانول به متیل دی‌اتانول آمین، میزان شار انتقال جرم را به مقدار ۸۵٪ نسبت به محلول مولار متیل دی‌اتانول آمین افزایش داد.

**کلمات کلیدی:** حلال‌های آمینی، سینتیک جذب، گاز دی‌اکسید کربن، متیل دی‌اتانول آمین، ۲- (آمینو اتیل) آمینو اتانول

## مقدمه

است. وجود این گازهای اسیدی در اتمسفر که تحت عنوان گازهای گلخانه‌ای<sup>۱</sup> شناخته می‌شوند، باعث ایجاد مشکلات زیست محیطی و آلودگی هوا خواهند شد [۱-۵].

با افزایش روز افزون فعالیت‌های بشری، تولید گازهای اسیدی به مقدار زیادی افزایش یافته

\*مسئول مکاتبات

zoghiat@ripi.ir

آدرس الکترونیکی

شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2020.3738.2705)

است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که افزودن مقداری از حلال دی‌اتانول آمین به‌عنوان یک آمین نوع دوم به حلال متیل‌دی‌اتانول آمین باعث افزایش نرخ جذب می‌شود [۱۵]. همچنین، در مطالعات انجام شده با در نظر گرفتن مکانیسم‌های مختلف برای واکنش‌های انجام شده مدل‌های متعددی پیشنهاد شده و نتایج به‌دست آمده از مدل‌های پیشنهادی و مقادیر تجربی با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته‌اند [۱۵ و ۱۶]. نوع دیگری از آمین‌ها که تاکنون به‌عنوان تسریع‌کننده بررسی شده‌اند آمین‌های حلقوی می‌باشند. از جمله مخلوط‌های آمینی مورد بررسی در این زمینه، مخلوطی از پپرازین و متیل‌دی‌اتانول آمین است که نتایج حاصله بیانگر افزایش نرخ و سرعت جذب بوده است [۱۷ و ۱۸].

علاوه بر آمین‌های نوع اول و دوم که به‌عنوان تسریع‌کننده واکنش‌های جذب مورد مطالعه قرار گرفتند، نوع دیگری از آمین‌ها به نام دی‌آمین‌ها<sup>۱</sup> نیز وجود دارند که می‌توانند به‌عنوان تسریع‌کننده مورد استفاده قرار گیرند. این آمین‌ها در ساختار خود دارای دو نوع آمین هستند و ظرفیت جذب بالاتری نسبت به آمین‌های نوع اول و دوم دارند. یکی از این دی‌آمین‌ها، ۲- ((آمینواتیل) آمینو) اتانول<sup>۲</sup> است که ظرفیت جذب آن ۱/۲ تا ۱/۳۵ مول گاز دی‌اکسیدکربن به‌ازای هر مول آمین است [۱۹-۲۲]. از جمله مخلوط‌های مورد استفاده در این زمینه می‌توان به مخلوطی از مونواتانول آمین و دی‌اتیل‌اتانول آمین [۲۳]، دی‌اتیل‌اتانول آمین و پپرازین، دی‌اتیل‌اتانول آمین و ۲- ((آمینواتیل) آمینو) اتانول [۲۲]، دی‌اتیل‌اتانول آمین و ۱ و ۴- بوتان‌دی‌آمین [۲۴] اشاره کرد که طبق مطالعات انجام شده، مخلوطی متشکل از متیل‌دی‌اتانول آمین و ۲- ((آمینواتیل) آمینو) اتانول تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است.

بنابراین جداسازی این گازها از اتمسفر، به‌خصوص گاز دی‌اکسیدکربن که بیش از ۶۰٪ سهم گازهای گلخانه‌ای متعلق به این گاز است، امری ضروری به نظر می‌رسد [۶-۹]. تاکنون روش‌های مختلفی مانند جذب سطحی، روش‌های غشایی، تقطیر و جذب توسط حلال‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند که از میان روش‌های ذکر شده، جذب توسط حلال‌ها بیشتر مورد توجه قرار گرفته است [۱۰]. در روش جذب توسط حلال، معمولاً از حلال‌های آمینی برای جداسازی گاز دی‌اکسیدکربن استفاده می‌شود. مونواتانول آمین، دی‌اتانول آمین و متیل‌دی‌اتانول آمین، سه آمین نوع اول، دوم و سوم پرکاربرد در این زمینه هستند [۱۱]. آمین‌های نوع سوم کاربرد زیادی در این زمینه دارند اما یکی از مشکلات اساسی در استفاده از حلال‌های آمینی نوع سوم سرعت و نرخ جذب پایین گاز دی‌اکسید کربن در آن‌ها است. بنابراین، پژوهش‌گران براساس مطالعاتی که بر روی حلال‌های آمینی انجام دادند، دریافتند که افزودن مقداری از آمین‌های نوع اول، دوم یا حلقوی به آمین‌های نوع سوم باعث افزایش نرخ جذب و ثابت سرعت واکنش گاز دی‌اکسیدکربن به مقدار زیادی خواهد شد [۱۲] و بر این اساس مطالعات گسترده‌ای برای استفاده از مخلوط آمین‌ها به‌جای تک آمین‌ها صورت گرفته است. یکی از مخلوط‌های مورد بررسی مخلوطی از مونو اتانول آمین و متیل‌دی‌اتانول آمین بود که در مطالعات انجام شده مشاهده گردید که افزودن مقداری از حلال مونواتانول آمین به حلال متیل‌دی‌اتانول آمین باعث افزایش نرخ جذب می‌شود. همچنین علاوه بر بررسی نرخ جذب، فاکتورهایی از قبیل ثابت انتقال جرم، ضریب نفوذ و ثابت هنری نیز مورد بررسی قرار گرفت، نتایج نشان داد که با افزایش غلظت حلال مونواتانول آمین، مقدار پارامترهای ذکر شده نیز افزایش می‌یابد [۱۳ و ۱۴]. مخلوطی از دی‌اتانول آمین و متیل‌دی‌اتانول آمین نیز از جمله مخلوط‌های مورد بررسی است که تاکنون مورد مطالعه قرار گرفته

1. Diamines

2. AEEA (2-(Aminoethyl) Amino) Ethanol

اطراف برج جریان یافته و در تماس با جریان گاز قرار می‌گیرد تا فرآیند جذب اتفاق افتد (جریان غیرهمسو).

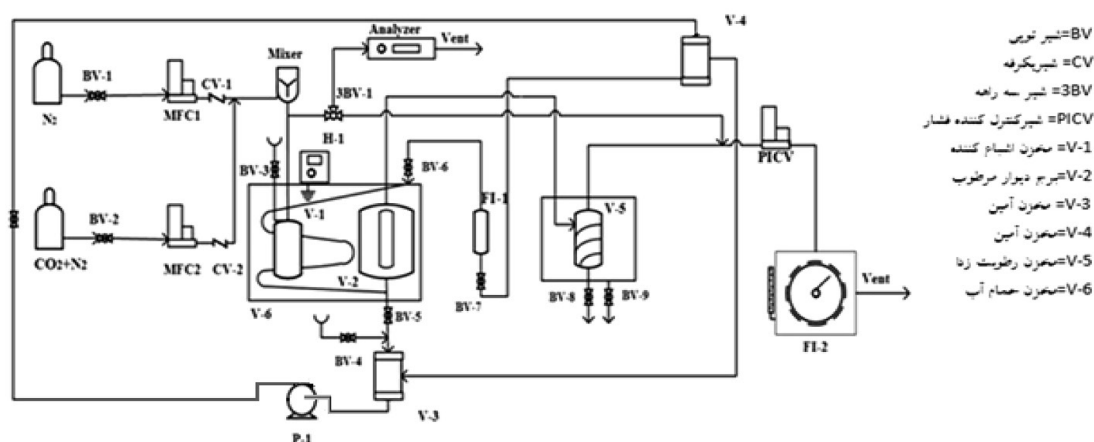
همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، در فاز گازی در ابتدا گاز دی‌اکسیدکربن با جریانی از گاز نیتروژن از کنترل‌کننده‌های جرم<sup>۱</sup> عبور کرده و وارد مخلوط‌کننده می‌شوند تا با یکدیگر مخلوط گردند. در واقع هدف از مخلوط کردن گاز دی‌اکسیدکربن با گاز نیتروژن تنظیم غلظت گاز دی‌اکسیدکربن ورودی به سیستم است. پس از مخلوط شدن گازها، جریان خروجی از مخلوط‌کننده به یک دستگاه تحلیل‌کننده غلظت<sup>۲</sup> وارد می‌گردد تا غلظت اولیه گاز دی‌اکسیدکربن برحسب درصد مولی اندازه‌گیری شود. پس از اندازه‌گیری غلظت ابتدایی گاز دی‌اکسیدکربن، شیر دستگاه تحلیل‌کننده غلظت بسته شده و جریان گاز به داخل یک اشباع‌کننده<sup>۳</sup> (V-1) هدایت می‌شود تا درون این اشباع‌کننده جریان گاز از آب اشباع گردد. در واقع چون مخلوط آمینی مورد استفاده یک مخلوط آب‌دار است، بنابراین برای جلوگیری از انتقال آب به داخل جریان گاز در برج دیواره مرطوب، یا به عبارت بهتر برای اینکه فقط گاز دی‌اکسیدکربن بین دو فاز انتقال یابد، جریان گاز از آب اشباع می‌گردد.

بنابراین در این مقاله، جذب گاز دی‌اکسیدکربن توسط مخلوطی از این دو آمین مورد بررسی قرار گرفته است. با در نظر گرفتن مدل انتقال جرم همراه با واکنش شیمیایی، تغییرات شار انتقال جرم گاز دی‌اکسیدکربن (میزان جذب) و اثر افزایش شار انتقال جرم در اثر افزودن تسریع‌کننده ۲- ((آمینواتیل) آمینو) اتانول بررسی شده و در نهایت، با در نظر گرفتن واکنش مرتبه اول برای جذب گاز دی‌اکسیدکربن، ثابت سرعت در این مخلوط تعیین شده است.

## روش انجام آزمایش

### سیستم آزمایشگاهی

در این مقاله برای اندازه‌گیری میزان جذب گاز دی‌اکسیدکربن در مخلوط آبی متیل‌دی‌اتانول آمین و ۲- ((آمینواتیل) آمینو) اتانول از یک برج دیواره مرطوب استفاده گردید که سامانه آزمایشگاهی مورد استفاده در شکل ۱ نمایش داده شده است. قسمت اصلی برج دیواره مرطوب از یک لوله شیشه‌ای عمودی ساخته شده که ارتفاع آن ۸۸/۷ mm و قطر داخلی آن برابر با ۱۳/۷ mm است. مایع جاذب از طریق پخش‌کننده‌ای که در قسمت بالایی برج قرار دارد به صورت یک فیلم نازک و یکنواخت در



شکل ۱ سامانه آزمایشگاهی مورد استفاده برای اندازه‌گیری سرعت جذب گاز دی‌اکسیدکربن در حلال‌های آمینی

1. MFC (Mass Flow Controller)

2. Analyzer

3. Saturator

و غلظت گاز دی‌اکسیدکربن در جریان خروجی از برج دیواره مرطوب اندازه‌گیری می‌گردد. این عمل توسط لوله‌کشی‌های انجام شده و شیر دو طرفه که در سیستم آزمایشگاهی تعبیه گردیده، به راحتی امکان پذیر است. به منظور اندازه‌گیری دبی گاز از یک کنتور گازی مرطوب<sup>۳</sup> استفاده شده است. بنابراین، برای یک محلول آمینی با غلظت مشخص و با اندازه‌گیری دبی جریان گاز و مایع و تعیین غلظت دی‌اکسیدکربن در گاز قبل و بعد از تماس با محلول و همچنین مشخص بودن سطح تماس گاز-مایع می‌توان با انجام محاسبات ریاضی شار انتقال جرم دی‌اکسیدکربن به فاز مایع را محاسبه نمود. فشار سیستم در سه آزمایش انجام شده در دماهای مختلف، در مقادیر ۱۰۰، ۴۰۰ و ۷۰۰ kPa ثابت نگه داشته شد. بعد از انجام آزمایش‌های مختلف و به‌دست آوردن داده‌های تجربی مانند غلظت اولیه و نهایی گاز دی‌اکسیدکربن، برای تعیین دبی جریان‌های گاز و مایع و همچنین خواصی از جمله ویسکوزیته و دانسیته محاسبات لازم صورت گرفت.

#### مواد مورد استفاده

مشخصات مواد مورد استفاده برای انجام آزمایش‌های مربوطه در جدول ۱ نشان داده شده است. کلیه محلول‌های آبی مورد استفاده به‌وسیله آب مقطر تهیه گردیده‌اند. برای بررسی صحت عملکرد سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده، ثابت سرعت واکنش گاز دی‌اکسیدکربن در محلول آبی ۲/۲ M متیل‌دی‌اتانول‌آمین در سه دمای ۳۱۳/۱۵، ۳۲۳/۱۵ و ۳۴۳/۱۵ K و سه فشار مختلف ۱۰۰ و ۴۰۰ و ۷۰۰ kPa محاسبه گردید و با مقادیر ثابت سرعت محاسبه شده توسط بنمار و همکارانش [۲۵] مقایسه شد که نتایج به‌دست آمده در جدول ۲ نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که متوسط خطای ثابت سرعت واکنش در هر سه دمای بررسی شده، برابر ۳/۱۳٪ است که خطای قابل قبولی است.

پس از آن، گاز وارد برج دیواره مرطوب (V-2) می‌شود تا با مخلوط آمینی در تماس قرار گیرد. برج دیواره مرطوب و اشباع‌کننده، در یک حمام آب (V-6) قرار دارند و دمای این حمام توسط یک کنترل‌کننده دما (H-1)، کنترل و ثابت نگه داشته می‌شود. گاز خروجی از برج دیواره مرطوب به‌سمت یک رطوبت‌زدا<sup>۱</sup> (V-5) هدایت می‌گردد تا رطوبت موجود در آن میعان شده و از گاز جدا شود. فشار کل سیستم آزمایشگاهی نیز توسط کنترل‌کننده فشار<sup>۲</sup> تنظیم می‌گردد و سپس جریان گاز خروجی از این کنترل‌کننده فشار وارد یک دبی‌سنج (FI-2) می‌شود تا دبی آن اندازه‌گیری گردد. از طرف دیگر، در فاز مایع، در ابتدا مایع آمینی ذخیره شده (V-3)، توسط پمپ (P-1) به مخزن (V-4) که در بالای سیستم آزمایشگاهی وجود دارد، انتقال می‌یابد و از آن‌جا به‌سمت یک کنترل‌کننده دبی (FI-1) ارسال می‌شود. علت انتقال آمین به مخزنی در ارتفاع بالاتر از سیستم آزمایشگاهی، ایجاد جریان خودبه‌خودی آمین از مخزن ذخیره به‌سمت سیستم آزمایشگاهی، توسط انرژی پتانسیل و نیروی وزن می‌باشد. همچنین، شایان ذکر است که کنترل‌کننده دبی بر اساس آب کالیبره شده و دبی واقعی آمین توسط استوانه مدرج و با اندازه‌گیری زمان لازم برای پر شدن این استوانه برای یک حجم معین از آمین محاسبه می‌شود. پس از عبور آمین از دبی‌سنج، آمین وارد برج دیواره مرطوب می‌گردد. در این برج، آمین‌ها از قسمت پایین برج دیواره مرطوب وارد برج شده و به‌صورت یک لایه بسیار نازک در اطراف برج جریان یافته و در تماس با جریان گاز قرار می‌گیرد تا به این ترتیب جداسازی و جذب گاز دی‌اکسید کربن انجام شود. پس از تماس گاز با مایع و انجام عمل جذب دی‌اکسیدکربن توسط حلال آمینی، برای اندازه‌گیری غلظت ثانویه دی‌اکسید کربن در گاز، جریان گاز خروجی از برج دیواره مرطوب مجدداً به‌سمت دستگاه تحلیل‌کننده غلظت فرستاده شده

1. Dehumidifier

2. Pressure Independent Control Valve (PICV)

3. Wet Gas Meter

جدول ۱ مشخصات مواد شیمیایی مورد استفاده برای انجام آزمایش‌ها

ماده شیمیایی	منبع	خلوص	CAS NO.
دی‌اکسیدکربن	رهام گاز	۹۹/۹۹٪ (مولی)	۱۲۴-۳۸-۹
متیل‌دی‌اتانول‌آمین	مرک	۹۸/۰٪ (وزنی)	۱۰۵-۵۹-۹
۲-((آمینواتیل) آمینو) اتانول	مرک	۹۹/۰٪ (وزنی)	۱۱۱-۴۱-۱

جدول ۲ نتایج آزمایش اعتبارسنجی سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده برای محلول آبی متیل‌دی‌اتانول‌آمین با غلظت معادل ۲/۲ M [۲۵]

درصد خطا (%)	ثابت سرعت مرجع [۲۵] (m <sup>3</sup> /kmol.s)	ثابت سرعت اندازه‌گیری شده (m <sup>3</sup> /kmol.s)	دما (K)
۴/۰	۹/۴۸	۹/۲۰	۳۰۳/۱۵
۳/۴	۲۸/۰۰	۲۸/۹۰	۳۲۳/۱۵
۲/۰	۷۳/۱۰	۷۰/۹۰	۳۴۳/۱۵
۳/۱	متوسط خطا =		

## تئوری

مکانیسم واکنش گاز دی‌اکسیدکربن در مخلوط آبی متشکل از متیل‌دی‌اتانول‌آمین و ۲-((آمینواتیل) آمینو) اتانول

با توجه به اینکه سینتیک واکنش‌های شیمیایی به‌صورت حاصل ضربی از ثابت سرعت واکنش در غلظت واکنش‌دهنده‌ها تعریف می‌شود، لذا در این پژوهش مدل سینتیکی جذب گاز دی‌اکسیدکربن در مخلوط آمینی به‌صورت رابطه ۱ در نظر گرفته شده که یک رابطه پیشنهادی است. سرعت واکنش جذب گاز دی‌اکسیدکربن در مخلوط آبی متیل‌دی‌اتانول‌آمین و ۲-((آمینواتیل) آمینو) اتانول، با اندازه‌گیری داده‌های تجربی شار جذب دی‌اکسیدکربن محاسبه شده و سپس با استفاده از مقادیر محاسبه شده برای سرعت جذب و غلظت گاز دی‌اکسیدکربن و عبور دادن یک خط برازش مستقیم از داده‌های رابطه ۱، ثابت سرعت واکنش ظاهری این گاز در مخلوط آمینی مورد نظر تعیین گردید.

$$r_{CO_2, mix} = k_{mix} [AEEA][MDEA][CO_2] \quad (1)$$

در رابطه ۱،  $r_{CO_2, mix}$  سرعت جذب گاز دی‌اکسیدکربن در مخلوط آبی متیل‌دی‌اتانول‌آمین و ۲-((آمینواتیل) آمینو) اتانول و  $k_{mix}$  ثابت سرعت واکنش ظاهری این گاز در مخلوط آمینی است. همچنین، این گاز در مخلوط آمینی است. همچنین، [MDEA] و [AEEA] به‌ترتیب غلظت حلال ۲-

((آمینواتیل) آمینو) اتانول، حلال متیل‌دی‌اتانول‌آمین و گاز دی‌اکسیدکربن می‌باشند. با توجه به رابطه ۱ و با محاسبه سرعت واکنش گاز دی‌اکسیدکربن در مخلوط آمینی مورد نظر ( $r_{CO_2, mix}$ ) و عبور دادن خط برازش مستقیم از داده‌های سرعت واکنش برحسب غلظت گاز دی‌اکسیدکربن و با در دست داشتن غلظت حلال‌های آمینی متیل‌دی‌اتانول‌آمین و ۲-((آمینواتیل) آمینو) اتانول مقدار  $k_{mix}$  در هر دما به‌دست می‌آید. در مرحله بعد، رابطه  $k_{mix}$  نسبت به دما توسط معادله ۲ به‌دست آمده که در این رابطه،  $T$  برحسب  $K$  و  $k_{mix}$  برحسب  $m^3 \cdot kmol^{-1} \cdot s^{-1}$  می‌باشند.

$$k_{mix} = 3.44 \times 10^{-4} \exp(-4545/RT) \quad (2)$$

برای محاسبه سرعت جذب گاز دی‌اکسیدکربن در یک برج دیواره مرطوب، جریانی از گاز حاوی دی‌اکسیدکربن با یک فیلم مایع حلال‌های آمینی در تماس قرار گرفته و از روی آن عبور می‌کند تا فرآیند جذب اتفاق افتد. جذب گاز دی‌اکسیدکربن در فیلم مایع باعث می‌شود که غلظت دی‌اکسیدکربن در فاز گاز کاهش یابد. بنابراین، از تفاضل دبی مولی دی‌اکسیدکربن در جریان‌های گازی ورودی و خروجی در ستون دیواره مرطوب، می‌توان میزان جذب گاز دی‌اکسیدکربن را محاسبه نموده و سپس

دی‌اکسیدکربن، در جدول ۳ گزارش شده است. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، با افزایش دما در فشار ثابت میزان شار انتقال جرم گاز دی‌اکسیدکربن در مخلوط آبی متیل‌دی‌اتانول آمین و ۲- ((آمینواتیل) آمینو) اتانول کاهش یافته است. از آنجایی که فرآیند جذب گاز دی‌اکسیدکربن در مخلوط آمینی یک فرآیند گرمازا است [۲۰] بنابراین طبق اصل لوشاتلیه، افزایش دما باعث پیشرفت واکنش معکوس (دفع گاز دی‌اکسید کربن از مخلوط آمینی) خواهد شد که این پدیده باعث کاهش میزان جذب می‌شود. از طرف دیگر، افزایش دما بر ویسکوزیته و دانسیته مخلوط نیز تأثیرگذار بوده و با افزایش دما، مقدار ویسکوزیته و دانسیته مخلوط آمینی کاهش می‌یابد که موجب افزایش میزان جذب گاز دی‌اکسیدکربن در مخلوط آمینی خواهد شد. بنابراین از آنجایی که افزایش دما در این مخلوط آمینی باعث کاهش شار انتقال جرم گاز دی‌اکسیدکربن شده است، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که افزایش دما بر تغییرات ویسکوزیته و دانسیته این مخلوط و به دنبال آن بر میزان شار انتقال جرم گاز دی‌اکسیدکربن در مخلوط آمینی، تأثیر کمتری در مقایسه با اثر گرمازا بودن واکنش بر شار انتقال جرم این گاز دارد و اثر گرمازا بودن واکنش در تعیین میزان جذب بیشتر بوده است.

**جدول ۳** شار و سرعت جذب گاز دی‌اکسید کربن در مخلوط آبی ۲- ((آمینواتیل) آمینو) اتانول + متیل‌دی‌اتانول آمین با غلظت M ۳/۳۶ و نسبت مولی ۰/۱

دما (K)	فشار کل (kPa)	غلظت گاز دی‌اکسید کربن (kmol/m <sup>3</sup> )	شار جذب (kmol/m <sup>2</sup> .s) × 10 <sup>5</sup>	سرعت جذب (kmol/m <sup>3</sup> .s) × 10 <sup>4</sup>
۳۱۳/۱۵	۱۰۰	۰/۰۱	۰/۶۰	۰/۷۱
	۴۰۰	۰/۲۶	۲/۲۵	۲/۵۳
	۷۰۰	۰/۷۳	۳/۵۳	۴/۰۴
۳۲۸/۱۵	۱۰۰	۰/۰۱	۰/۴۸	۰/۵۵
	۴۰۰	۰/۱۸	۱/۶۹	۱/۹۰
	۷۰۰	۰/۵۲	۲/۸۷	۳/۲۳
۳۴۳/۱۵	۱۰۰	۰/۰۱	۰/۴۲	۰/۴۷
	۴۰۰	۰/۱۵	۱/۳۹	۱/۵۶
	۷۰۰	۰/۴۰	۲/۲۴	۲/۵۲

از طریق تقسیم کردن آن به سطح مرطوب شده دیواره، شار متوسط جذب گاز دی‌اکسیدکربن را محاسبه نمود. همچنین با تقسیم نمودن شار جذب بر ارتفاع برج، می‌توان سرعت جذب گاز دی‌اکسیدکربن در مخلوط آمینی را تخمین زد.

## نتایج و بحث

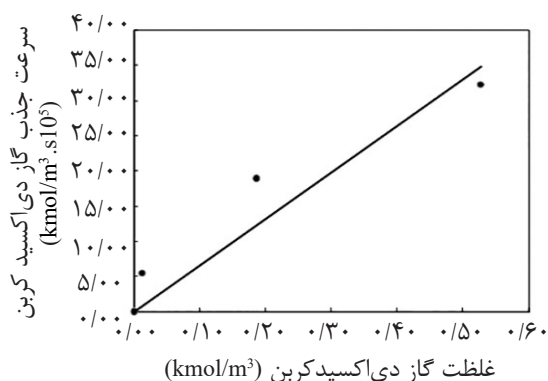
در این پژوهش برای بررسی جذب و جداسازی گاز دی‌اکسیدکربن، مخلوطی آبی متشکل از متیل‌دی‌اتانول آمین و ۲- ((آمینواتیل) آمینو) اتانول مورد استفاده قرار گرفته است. در کلیه آزمایش‌های انجام شده، مخلوط آمینی ۲- ((آمینو اتیل) آمینو) اتانول به متیل‌دی‌اتانول آمین (غلظت M ۳/۳۶) با نسبت مولی ۰/۱ استفاده شده و آزمایش‌ها در سه دمای ۳۱۳/۱۵، ۳۲۸/۱۵ و ۳۴۳/۱۵ K و سه سطح فشار ۱۰۰، ۴۰۰ و ۷۰۰ kPa و سه غلظت متفاوت از مخلوط گازی نیتروژن و دی‌اکسیدکربن (که غلظت گاز دی‌اکسیدکربن در این مخلوط گازی در سه حالت معادل ۲۶/۶۲٪، ۲۲/۱۰٪ و ۲۱/۸۸٪ (درصد مولی) است) انجام شده است. مقدارهای اندازه‌گیری شده برای شار انتقال جرم گاز دی‌اکسیدکربن در مخلوط آبی متیل‌دی‌اتانول آمین و ۲- ((آمینواتیل) آمینو) اتانول، سرعت جذب گاز دی‌اکسیدکربن در مخلوط آمینی مورد نظر و همچنین، غلظت گاز



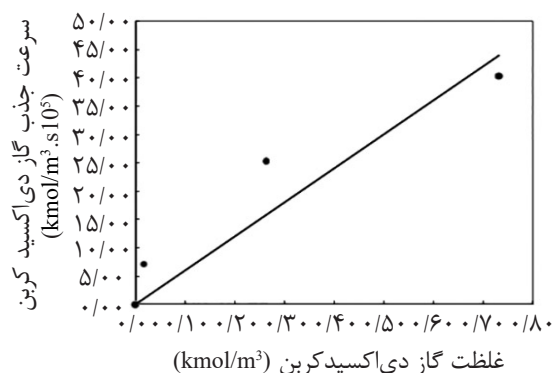
نمود که مدل پیشنهادی که به صورت یک رابطه خطی پیشنهاد شده، یک رابطه نسبتاً قابل قبول می باشد. مقادیر محاسبه شده برای  $k_{mix}$  نیز در جدول ۴ گزارش شده است. نتایج نشان می دهند که افزایش دما باعث افزایش سرعت ظاهری جذب گاز دی اکسید کربن در مخلوط آمینی می گردد.

همچنین می توان بر اساس اعداد به دست آمده در جدول ۵، میزان شار انتقال جرم در محلول آبی M ۳/۳۶ متیل دی اتانول آمین و در مخلوط آبی ۲- ((آمینواتیل) آمینو) اتانول و متیل دی اتانول آمین با غلظت M ۳/۳۶ را با هم مقایسه نمود و در نهایت، اثر افزودن فعال کننده ۲- ((آمینواتیل) آمینو) اتانول در افزایش شار انتقال جرم را مورد بررسی قرار داد.

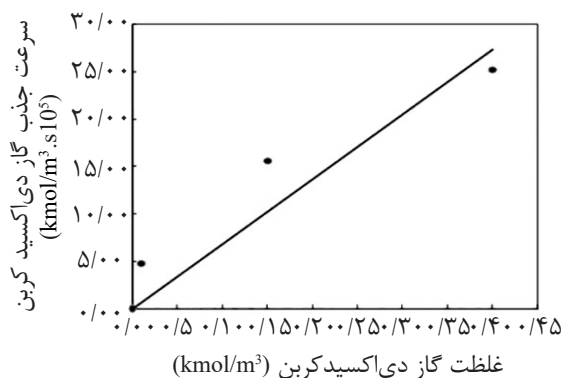
در نهایت، با رسم نمودار  $r_{CO_2mix}$  بر حسب غلظت گاز دی اکسید کربن و عبور دادن یک خط برازش در این نمودار و همچنین با در دست داشتن غلظت حلال های آمینی متیل دی اتانول آمین و ۲- ((آمینواتیل) آمینو) اتانول، مقدار ثابت سرعت جذب گاز دی اکسید کربن در مخلوط آبی متیل دی اتانول آمین و ۲- ((آمینواتیل) آمینو) اتانول در سه دمای ۳۱۳/۱۵ و ۳۲۸/۱۵ و ۳۴۳/۱۵ K ( $k_{mix}$ ) محاسبه می شود. شکل های ۲ تا ۴، نمودارهای  $r_{CO_2mix}$  بر حسب غلظت گاز دی اکسید کربن در سه دمای ۳۱۳/۱۵ و ۳۲۸/۱۵ و ۳۴۳/۱۵ K را نمایش می دهند. بر اساس مقادیر  $R^2$  به دست آمده (که بزرگتر از ۰/۸۵ بودند)، می توان نتیجه گیری



شکل ۳ سرعت جذب گاز دی اکسید کربن در محلول آبی متیل دی اتانول آمین و ۲- ((آمینواتیل) آمینو) اتانول در غلظت کل M ۳/۳۶ در دمای K ۳۲۸/۱۵



شکل ۲ سرعت جذب گاز دی اکسید کربن در محلول آبی متیل دی اتانول آمین و ۲- ((آمینواتیل) آمینو) اتانول در غلظت کل M ۳/۳۶ در دمای K ۳۱۳/۱۵



شکل ۴ سرعت جذب گاز دی اکسید کربن در محلول آبی متیل دی اتانول آمین و ۲- ((آمینواتیل) آمینو) اتانول در غلظت کل M ۳/۳۶ در دمای K ۳۴۳/۱۵

جدول ۴ ثابت سرعت جذب گاز دی‌اکسیدکربن در مخلوط آبی ۲- ((آمینواتیل) آمینو) اتانول + متیل‌دی‌اتانول آمین با غلظت  $3/36\text{ M}$  و نسبت مولی ۰/۱

ثابت سرعت ظاهری جذب در مخلوط آمینی $10^4 \times (\text{m}^3/\text{kmol}\cdot\text{s})$	(K)
۶/۰۶	۳۱۳/۱۵
۶/۶۶	۳۲۸/۱۵
۶/۸۹	۳۴۳/۱۵

جدول ۵ مقایسه شار انتقال جرم گاز دی‌اکسید کربن در حلال آبی  $3/36\text{ M}$  متیل‌دی‌اتانول آمین و در مخلوط آبی متیل‌دی‌اتانول آمین + ۲- ((آمینواتیل) آمینو) اتانول

دمای (K)	فشار (kPa)	شار انتقال جرم در حلال $3/36\text{ M}$ متیل‌دی‌اتانول آمین $10^6 \times (\text{kmol}/\text{m}^2\cdot\text{s})$	شار انتقال جرم در مخلوط $3/36\text{ M}$ آمینی $10^5 \times (\text{kmol}/\text{m}^2\cdot\text{s})$	میزان افزایش (%)
۳۱۳/۱۵	۱۰۰	۰/۹۰	۰/۶۰	۸۵
	۴۰۰	۲/۹۷	۲/۲۵	۸۶
	۷۰۰	۵/۰۶	۳/۵۳	۸۵
	متوسط میزان افزایش (%) =			۸۵/۳
۳۲۸/۱۵	۱۰۰	۱/۵۷	۰/۴۸	۶۷
	۴۰۰	۵/۲۲	۱/۶۹	۶۹
	۷۰۰	۸/۸۹	۲/۸۷	۶۹
	متوسط میزان افزایش (%) =			۶۸/۳
۳۴۳/۱۵	۱۰۰	۲/۴۶	۰/۴۲	۴۱
	۴۰۰	۸/۱۶	۱/۳۹	۴۱
	۷۰۰	۱۳/۹۰	۲/۲۴	۳۷
	متوسط میزان افزایش (%) =			۳۹/۷

بررسی‌ها غلظت کل محلول ثابت و برابر  $3/36\text{ M}$  با نسبت مولی ۰/۱ بود. آزمایش‌ها در سه دمای مختلف ۳۱۳/۱۵ K و ۳۲۸/۱۵ K و ۳۴۳/۱۵ K و سه فشار ۱۰۰، ۴۰۰ و ۷۰۰ kPa انجام پذیرفت. پس از برآزش داده‌های تجربی بر روی مدل پیشنهادی و انجام محاسبات لازم این نتیجه به دست آمد که افزودن فعال کننده‌ای مانند ۲- ((آمینواتیل) آمینو) اتانول به متیل‌دی‌اتانول آمین، قادر است یکی از مشکلات اساسی حلال متیل‌دی‌اتانول آمین را که کم بودن میزان سرعت جذب گاز دی‌اکسیدکربن می‌باشد را به میزان قابل توجهی افزایش دهد. نتایج نشان داد که افزودن این فعال کننده، موجب افزایش شار

با توجه به نتایج به دست آمده، افزودن این فعال کننده به مخلوط آمینی باعث می‌شود که در دمای ۳۱۳/۱۵ K و در سه سطح فشاری ۱۰۰، ۴۰۰ و ۷۰۰ kPa به طور متوسط شار انتقال جرم ۸۵٪ افزایش یابد که این مقدار افزایش در دمای ۳۲۸/۱۵ K به طور متوسط برابر با ۶۸٪ و در دمای ۳۴۳/۱۵ K به طور متوسط برابر با ۳۹٪ است.

### نتیجه گیری

در این پژوهش برای نخستین بار سرعت جذب گاز دی‌اکسیدکربن در مخلوطی آبی از متیل‌دی‌اتانول آمین و ۲- ((آمینواتیل) آمینو) اتانول بررسی شد. در این



پذیرد که در این پژوهش به دلیل عدم در اختیار بودن ثابت هنری این مقایسه امکان پذیر نبود.

### علائم و نشانه‌ها

$AEEA$ : غلظت حلال ۲- ((آمینواتیل) آمینو) اتانول  $\left(\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}\right)$

$CO_2$ : غلظت گاز دی‌اکسید کربن  $\left(\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}\right)$

$k_{mix}$ : ثابت سرعت جذب گاز دی‌اکسید کربن در مخلوط آبی متیل‌دی‌اتانول آمین و ۲- ((آمینواتیل) آمینو) اتانول  $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{kmol}\cdot\text{s}}\right)$

$MDEA$ : غلظت حلال متیل‌دی‌اتانول آمین  $\left(\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}\right)$

$R_{CO_2, Mix}$ : سرعت جذب گاز دی‌اکسید کربن در مخلوط آبی ۲- ((آمینواتیل) آمینو) اتانول و متیل‌دی‌اتانول آمین  $\left(\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3\cdot\text{s}}\right)$

$R$ : ضریب همبستگی

$T$ : دما (K)

انتقال جرم از ۴۰ تا ۸۵٪ در فشار ۱۰۰ kPa در محدوده دمایی ۳۱۳/۱۵ تا ۳۴۳/۱۵ K می‌گردد. لذا به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که دی‌آمین‌ها می‌توانند فعال کننده‌های مناسبی جهت افزایش میزان سرعت جذب گاز دی‌اکسید کربن در حلال‌های آمینی باشند. از طرفی، با برآزش معادله خط با داده‌های تجربی، در نهایت رابطه‌ای برای ثابت سرعت ظاهری واکنش گاز دی‌اکسید کربن در مخلوط آمینی مورد نظر به دست آمد. پیشنهاد می‌گردد که در پژوهش‌های آتی این بررسی‌ها در نسبت‌های مولی دیگری از ۲- ((آمینواتیل) آمینو) اتانول به متیل‌دی‌اتانول آمین انجام پذیرد. همچنین، تعیین حلالیت فیزیکی دی‌اکسید کربن در این مخلوط (اندازه‌گیری ثابت هنری) برای تعیین مکانیسم دقیق انجام گردد. به‌علاوه، مقایسه این فعال کننده با سایر فعال کننده‌های دیگر نیز انجام

### مراجع

- [1]. Bindoff N. L., Stott P. A., AchutaRao K. M., Allen M. R., Gillett N., Gutzler D., Hansingo K. and Hegerl G., "Detection and attribution of climate change: from global to regional", Climate Change 2013 – The Physical Science Basis, Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 867–952, 2014.
- [2]. Leilei H., Maohong M., Bryce M., Sheng C., Xiao-dong S., Yong K., Armistead G. R. and Patrick M., "Dynamic separation of ultradilute  $CO_2$  with a nanoporous amine-based sorbent", Chemical Engineering Journal, Vol. 189, pp.13-23, 2012.
- [3]. Sheng C., Weiwei C., Xiaodong S., Maohong F., Armistead Ted R., Zhanwu W. and Xibin Y., "Mesoporous amine-modified  $SiO_2$  aerogel: a potential  $CO_2$  sorbent", Energy & Environmental Science, Vol. 4, pp. 2070-2074, 2011.
- [4]. Dutcher B., Fan M., Leonard B., Dyar M. D., Tang J., Speicher E. A., Liu P. and Zhang Y., "Use of nanoporous  $FeOOH$  as a catalytic support for  $NaHCO_3$  decomposition aimed at reduction of energy requirement of  $Na_2CO_3/NaHCO_3$  based  $CO_2$  separation technology", The Journal of Physical Chemistry C, Vol. 115, No. 31, pp. 15532-15544, 2011.
- [5]. Zhang B., Fan M. and Bland A. E., " $CO_2$  separation by a new solid K-Fe sorbent", Energy & Fuels, Vol. 25, pp. 1919-1925, 2011.
- [6]. D'Alessandro D. M., Smit B. and Long J. R., "Carbon dioxide capture: prospects for new materials", Angewandte Chemie International Edition., Vol. 4, No. 2, pp. 6058-6082, 2010.
- [7]. Duke M.C., Ladewig B., Smart S., Rudolph V. and Diniz da Costa J. C., "Assessment of postcombustion carbon

- capture technologies for power generation*", *Frontiers of Chemical Engineering in China*, Vol. 4, No. 2, pp. 184-195, 2010.
- [8]. Albo J., Luis P. and Irabien A., "*Carbon dioxide capture from flue gases using a cross-flow membrane contactor and the ionic liquid 1-ethyl-3-methylimidazolium ethylsulfate*", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 49, No. 21, pp. 11045-11051, 2010.
- [9]. Oh T. H., "*Carbon capture and storage potential in coal-fired plant in Malaysia—A review*", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, No. 9, pp. 2697-2709, 2010.
- [10]. Bonenfant D., Mimeault M. and Hausler R., "*Estimation of the CO<sub>2</sub> absorption capacities in aqueous 2-(2-aminoethylamino) ethanol and its blends with MDEA and TEA in the presence of SO<sub>2</sub>*", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 46, No. 26, pp. 8968-8971, 2007.
- [11]. Kohl A. L. and Riesenfeld F. C., "*Gas purification*", 5<sup>th</sup> ed., Gulf Publishing Company, 1997.
- [12]. Chakravarty T., Phukan U. K. and Weiland R. H., "*Reaction of acid gases with mixtures of amines*", *Chemical Engineering Progress*, Vol. 81, pp. 32-36, 1985.
- [13]. Liao C. H. and Li M. H., "*Kinetics of absorption of carbon dioxide into aqueous solutions of monoethanolamine+N-methyldiethanolamine*", *Chemical Engineering Science*, Vol. 57, No.21, pp. 4569-4582, 2002.
- [14]. Hagewiesche D. P., Ashour S. S., Al-Ghawas H. A. and Sandall O. C., "*Absorption of carbon dioxide into aqueous blends of monoethanolamine and N-methyldiethanolamine*", *Chemical Engineering Science*, Vol.50, No.7, pp.1071-1079, 1995.
- [15]. Rinker E. B., Ashour S. S. and Sandall O. C., "*Absorption of carbon dioxide into aqueous blends of diethanolamine and methyldiethanolamine*", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 39, No. 11, pp. 4346-4356, 2000.
- [16]. Lin C. Y., Soriano A. N. and Li M., "*Kinetics study of carbon dioxide absorption into aqueous solutions containing N-methyldiethanolamine+ diethanolamine*", *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, Vol. 40, No.4, pp.403-412, 2009.
- [17]. Samanta A. and Bandyopadhyay S., "*Absorption of carbon dioxide into piperazine activated aqueous N-methyldiethanolamine*", *Chemical Engineering Journal*, Vol.171, No.3, pp.734-741, 2011.
- [18]. Zhang X. W., Jun Z., Cheng-fang Y., Yan-hua X. and Ji-jun S., "*Absorption rate into a MDEA aqueous solution blended with piperazine under a high CO<sub>2</sub> partial pressure*", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 34, No. 1, pp. 118-122, 2003.
- [19]. Blauwhoff P., Versteeg G. and Van Swaaij W., "*A study on the reaction between CO<sub>2</sub> and alkanolamines in aqueous solutions*", *Chemical Engineering Science*, Vol. 39, No. 9, pp. 1411-1429, 1983.
- [20]. Kim I. and Svendsen H. F., "*Heat of absorption of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) in monoethanolamine (MEA) and 2-(aminoethyl)ethanolamine (AEEA) solutions*", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 46, No. 17, pp. 5803-5809, 2007.
- [21]. Kierzkowska-Pawlak H., "*Kinetics of CO<sub>2</sub> absorption in aqueous N, N-diethylethanolamine and its blend with N-(2-aminoethyl) ethanolamine using a stirred cell reactor*", *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Vol.

37, pp. 76-84, 2015.

[22]. Sutar P. N., Vaidya P. D. and Kenig E. Y., "Activated DEEA solutions for CO<sub>2</sub> capture—A study of equilibrium and kinetic characteristics", Chemical Engineering Science, Vol. 100, pp. 234-241, 2013.

[23]. Conway W., Bruggink S., Beyad Y., Luo W., Melián-Cabrera I., Puxty G. and Feron P., "CO<sub>2</sub> absorption into aqueous amine blended solutions containing monoethanolamine (MEA), N,N-dimethylethanolamine (DMEA), N,N-diethylethanolamine (DEEA) and 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP) for post-combustion capture processes", Chemical Engineering Science, Vol. 126, pp. 446-454, 2015.

[24]. Xu Z., Wang S. and Chen C., "Kinetics study on CO<sub>2</sub> absorption with aqueous solutions of 1,4-butanedi-amine, 2-(diethylamino)-ethanol, and their mixtures", Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 52, No. 29, pp. 9790-9802, 2013.

[25]. Benamor A. and Aroua M. K., "An experimental investigation on the rate of CO<sub>2</sub> absorption into aqueous methyldiethanolamine solutions", Korean Journal of Chemical Engineering, Vol. 24, No. 1, pp. 16-23, 2007.



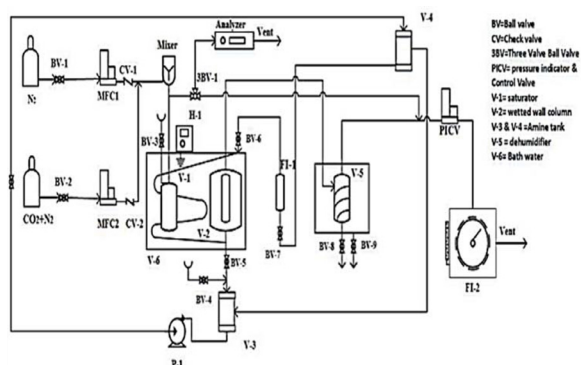


Fig. 1: Experimental setup.

**Theory**

The proposed kinetic model for carbon dioxide gas absorption in the studied amine mixture is described using the following equation:

$$r_{CO_2, mix} = k_{mix} [AEEA][MDEA][CO_2] \quad (1)$$

The reaction rate of carbon dioxide gas absorption in the aqueous mixture of methyldiethanolamine and 2-((amino ethyl)amino)ethanol can be calculated using the obtained experimental data, and then, the apparent reaction rate constant is determined using linear regression.

It should be also mentioned that the reaction rate constant of carbon dioxide gas absorption in the amine mixture ( $k_{mix}$ ) is a function of temperature which is determined using linear regression; moreover, the rate constant of the investigated reaction can be expressed by the following correlation:

$$k_{mix} = 3.44 \times 10^{-4} \exp(-4545 / RT) \quad (2)$$

**Results and Discussion**

To calculate the reaction rate constant at a desired temperature, the obtained reaction rates should be plotted against the absorbed carbon dioxide concentrations, and then fitting a first-order curve to the data; in addition, the slope of the fitting line represents the reaction rate constant. Figures 2 to 4 show the plots of absorption rates ( $r_{CO_2, Mix}$ ) versus carbon dioxide concentrations in the investigated aqueous amine mixture at the temperatures of 313.15, 328.15, and 343.15 K respectively.

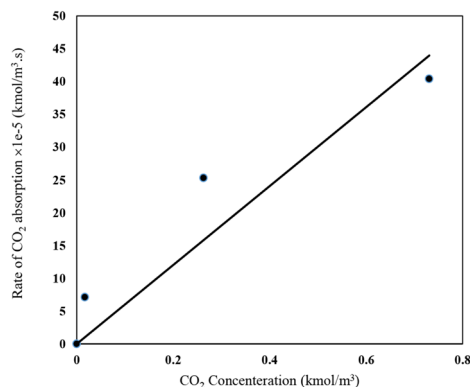


Fig. 2: Absorption rate of carbon dioxide gas in 3.36 M aqueous mixture of MDEA/AEEA at 313.15 K.

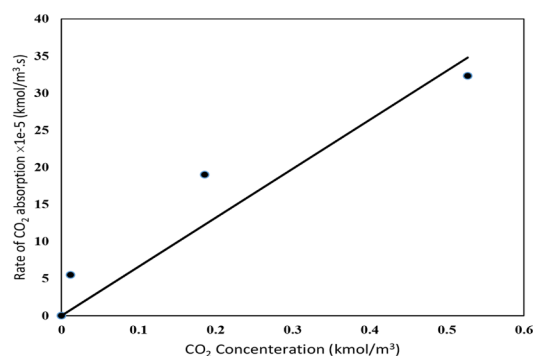


Fig. 3: Absorption rate of carbon dioxide gas in 3.36 M aqueous mixture of MDEA/AEEA at 328.15 K.

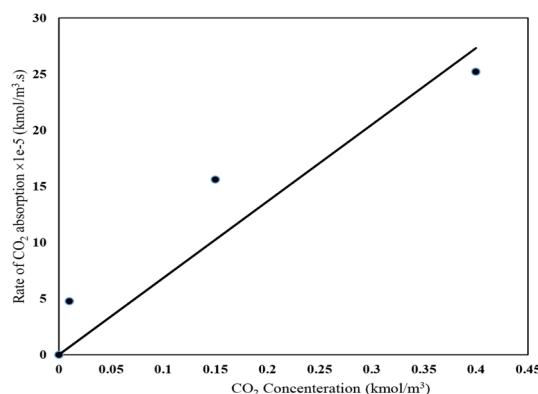


Fig. 4: Absorption rate of carbon dioxide gas in 3.36 M aqueous mixture of MDEA/AEEA at 343.15 K.

Based on the obtained  $R^2$  values (which are greater than 0.85), it can be concluded that the proposed model, as a linear equation, is a relatively acceptable one.

The calculated values of  $k_{mix}$  are also reported in Table 1. Results show that  $k_{mix}$  in the studied amine mixture increases when reaction temperature rises.

Table 1. Reaction rate constant.

T(K)	Reaction rate constant ( $m^3/kmol.s$ ) $\times 10^4$
313.15	6.06
328.15	6.66
343.15	6.89

In addition, the mass transfer fluxes in the 3.36 M aqueous solutions of methyldiethanolamine, and the mixture of 2-((aminoethyl)amino)ethanol and methyldiethanolamine are shown in Table 2. Results indicate that the effect of this activator on the performance of the studied amine mixture; the average mass transfer flux increases by 85% at the temperature of 313.15 K and at the pressures of 100, 400, and 700 kPa.

**Table 2:** The mass transfer flux of carbon dioxide gas in the aqueous solutions (3.36 M) of MDEA, and mixture of methyldiethanolamine and 2-((aminoethyl)amino)ethanol

$T$ (K)	$P$ (kPa)	$N_{CO_2, MDEA}$ (kmol/m <sup>2</sup> .s) $\times 10^6$	$N_{CO_2, Mixture}$ (kmol/m <sup>2</sup> .s) $\times 10^5$	Increasing Rate%
313.15	100	0.90	0.60	85
	400	2.97	2.25	86
	700	5.06	3.53	85
	Average increasing rate% =			85.3
328.15	100	1.57	0.48	67
	400	5.22	1.69	69
	700	8.89	2.87	69
	Average increasing rate% =			68.3
343.15	100	2.46	0.42	41
	400	8.16	1.32	41
	700	13.90	2.24	37
	Average increasing rate% =			39.7

## Conclusions

The analysis of the obtained experimental and calculated data revealed that the addition of an effective activator, such as 2-((aminoethyl)amino)ethanol, to methyldiethanolamine, increased significantly the absorption rate of carbon dioxide gas. Moreover, the results showed that the mass transfer flux increased from 40 to 85% at the pressure of 100 kPa and the temperature range of 313.15 to 343.15 K. Therefore, it can be generally concluded that diamines can be suitable activator to increase the rate of carbon dioxide gas absorption in amine solvents. On the other hand, by fitting a linear equation to the experimental data, a simple model was developed for estimation of the apparent reaction rate constant of carbon dioxide gas in the investigated amine mixture. Finally, it is necessary to mention that further studies should be conducted to evaluate the effects of molar ratios of the studied amines (2-((aminoethyl)amino)ethanol and methyldiethanolamine) on the carbon dioxide gas absorption rate, and determine the amount of physical solubility of carbon dioxide gas in the amine mixture (Henry's constant).

## References

1. Bindoff N L, Stott P A, AchutaRao K M, Allen M R, Gillett N, Gutzler D, Hansingo K, Hegerl G (2014) Detection and attribution of climate change: from global to regional, Climate Change 2013 – The Physical Science Basis, Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 867–952.
2. Leilei H, Maohong M., Bryce M., Sheng C, Xiao-dong S, Yong K, Armistead G R, Patrick M (2012) Dynamic separation of ultradilute CO<sub>2</sub> with a nanoporous amine-based sorbent, Chemical Engineering Journal, 189: 13-23.
3. Sheng C, Weiwei C, Xiaodong S, Maohong F, Armistead Ted R, Zhanwu W, Xibin Y. (2011) Mesoporous amine-modified SiO<sub>2</sub> aerogel: a potential CO<sub>2</sub> sorbent, Energy & Environmental Science, 4: 2070-2074.
4. Dutcher B, Fan M, Leonard B, Dyar M D, Tang J, Speicher E A, Liu P, Zhang Y. (2011) Use of nanoporous FeOOH as a catalytic support for NaHCO<sub>3</sub> decomposition aimed at reduction of energy requirement of Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/NaHCO<sub>3</sub> based CO<sub>2</sub> separation technology, The Journal of Physical Chemistry C, 115, 31: 15532-15544.
5. Zhang B, Fan M, Bland A. E. (2011) CO<sub>2</sub> separation by a new solid K– Fe sorbent, Energy & Fuels, 25: 1919-1925.
6. Kohl A L, Riesenfeld F C (1985) Gas purification, 4th ed., T.G. Houston.
7. Chakravarty T, Phukan U K, Weiland R H, (1985) Reaction of acid gases with mixtures of amines, Chemical Engineering Progress, 81, 32-36.
8. Liao C H, Li M H (2002) Kinetics of absorption of carbon dioxide into aqueous solutions of monoethanolamine+N-methyldiethanolamine, Chemical Engineering Science., 57, 21: 4569-4582.
9. Hagewiesche D P, Ashour S S, Al-Ghawas H A, Sandall O C (1995) Absorption of carbon dioxide into aqueous blends of monoethanolamine and N-methyldiethanolamine, Chemical Engineering Science, 50, 7: 1071-1079.
10. Rinker E B, Ashour S S, Sandall O C (2000) Absorption of carbon dioxide into aqueous blends of diethanolamine and methyldiethanolamine, Industrial & Engineering Chemistry Research, 39, 11: 4346-4356.
11. Lin C Y, Soriano A N, Li M (2009) Kinetics study of carbon dioxide absorption into aqueous solutions containing N-methyldiethanolamine+diethanolamine, Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 40, 4: 403-412.