

جذب دی اکسید کربن توسط محلول آبی هیدروکسید سدیم

در ستون پرشده: ضریب انتقال جرم و میزان جذب

مریم اسدی، حسین ابوالقاسمی*، محمد اسماعیلی

تهران، دانشگاه تهران، دانشکده فنی، دانشکده مهندسی شیمی

پیام‌نگار: hoab@ut.ac.ir

چکیده

فرایند جذب گاز با واکنش شیمیایی توسط حلال‌های مایع به‌طور وسیعی در عملیات تصفیه گازهای اسیدی و خالص‌سازی گاز به‌کار می‌رود. در این تحقیق تجربی، آزمایش‌های جذب شیمیایی گاز دی اکسید کربن توسط محلول آبی هیدروکسید سدیم در یک برج پرشده با پرکن‌های حلقه راشیگ نامنظم انجام شده است. از نتایج آزمایشگاهی حاصل شده برای محاسبه میزان جذب دی اکسید کربن و ضریب انتقال جرم کلی حجمی^۱ استفاده شده است. به‌طور کلی، ضریب انتقال جرم کلی حجمی برای این سیستم به‌صورت تابعی از متغیرهای عملیاتی اصلی فرایند از قبیل شار حجمی مایع، جزء مولی دی اکسید کربن در جریان گاز ورودی و غیره می‌باشد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داده است که با دو برابر شدن غلظت حلال و شار حجمی مایع، ضریب انتقال جرم کلی حجمی به‌طور متوسط، به ترتیب، ۷۰٪ و ۹۰٪ افزایش یافته است. همچنین، با افزایش شدت جریان حجمی مایع و غلظت سود (دو برابر شدن هر کدام)، میزان جذب دی اکسید کربن، به ترتیب، به‌طور متوسط ۶۷٪ و ۶۵٪ بهبود یافته است.

کلمات کلیدی: میزان جذب، دی اکسید کربن، ضریب انتقال جرم کلی حجمی، برج پرشده

۱- مقدمه

یعنی علاوه بر انتقال جرم بین دو فاز، واکنش شیمیایی نیز بین اجزای گاز و مایع رخ می‌دهد. این واکنش‌ها برگشت پذیر یا برگشت ناپذیر می‌باشند. از واکنش‌های برگشت ناپذیر می‌توان جذب آمونیاک توسط اسیدهای رقیق و جذب دی اکسید کربن توسط هیدروکسیدهای قلیایی را نام برد. در این حالت، بازیابی جزء حل شونده امکان پذیر یا عملی نیست [۱-۳].

دی اکسید کربن به‌عنوان یک گاز مهم مصرفی در صنعت مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین، یک گاز مهم گلخانه‌ای است که سبب بالا رفتن دمای اتمسفر می‌شود. بنابراین جداسازی گاز دی اکسید کربن از گازهای زاید و بی مصرف صنایع که در اتمسفر،

از برج‌های پرشده به میزان وسیعی در انواع فرایندهای جداسازی، تبادل حرارتی و تبدیل شیمیایی استفاده می‌شود. این فرایندها شامل جذب گاز، عاری‌سازی (یا دفع گازی)، تقطیر، استخراج و انتقال گرما می‌باشد. بیشترین کاربرد برج‌های پرشده در فرایند جذب گاز است. جذب گاز فرایندی است که در آن یک مخلوط گازی با یک مایع (یا مخلوط چند مایع) تماس پیدا می‌کند و در طی این تماس یک یا چند جزء از مخلوط گازی به فاز مایع منتقل می‌شود. جذب گاز ممکن است همراه با واکنش شیمیایی باشد؛

1. KGa

پُرکننده‌های نامنظم نیز آزمایش‌های متعددی انجام داده‌اند که در این میان می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

در سال ۱۹۹۲، آقای پی. تونتی واچ وتیکول^۶ و همکارانش مقاله‌ای منتشر کردند که در آن نتایج تجربی نمودارهای غلظت و دما در طول برج برای جذب دی اکسید کربن از هوا در محلول آبی هیدروکسید سدیم، مونو اتانول آمین و (۲- آمینو-۲- متیل-۱- پروپانول) ارائه شده است. در این مقاله مدلی نیز براساس روش پاندیا ارایه شده و نتایج مدل با نتایج تجربی مقایسه گردیده که به دلیل موجود بودن روابط تجربی کافی در مورد حلال مونواتانول آمین، نتایج مدل مطابقت مناسبی با داده‌های آزمایشگاهی داشته است، ولی در مورد (۲- آمینو-۲- متیل-۱- پروپانول)، نداشتن اطلاعات تجربی کافی منجر به درصد خطای زیاد مدل شده است [۱۰].

ای. ابودهی^۷ و همکاران در سال ۲۰۰۳ جذب همراه با واکنش شیمیایی دی اکسید کربن را در محلول آبی مونو اتانول آمین بررسی کردند. نتایج نشان داد که مکانیسم ارائه شده توسط کروکس و دنلا تنها مکانیسمی است که برای تفسیر داده‌های آزمایشگاهی این کار می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد. آنها همچنین مدل جدیدی برای جذب دی اکسید کربن در حلال مونو اتانول آمین ارایه کرده‌اند که در مقایسه با مدل‌های پیشین، دقت بهتری داشته است [۱۱].

آبرت اشنایدر^۸ و همکاران در سال ۲۰۰۴ یک مدل غیر تعادلی انتقال جرم و گرما برای جذب شیمیایی آمونیاک، دی اکسید کربن و سولفید هیدروژن در محلول آبی حاوی هیدروکسید سدیم و آمونیاک ارائه کردند. در این مدل، اثر واکنش شیمیایی بر میزان انتقال جرم در سیستم الکترولیت توسط فاکتور افزایش در نظر گرفته شده است. همچنین برای نشان دادن اعتبار مدل، از نتایج کار آزمایشگاهی انجام شده در برجی در مقیاس پایلوت استفاده شده است. نتایج این مقاله گستره pH بهینه را برای فرایند جذب شیمیایی مشخص کرده است [۱۲].

اس.وی.ناکو^۹ و همکاران در سال ۲۰۰۷ اثر سطح مؤثر برخی از پرکن‌ها را در جذب گاز بررسی کردند. در این بررسی پرکننده‌های

تخلیه، و سبب ایجاد مشکلات محیط زیستی می‌شوند، ضروری به نظر می‌رسد. جداسازی گاز دی اکسید کربن می‌تواند با روش‌های گوناگونی از جمله جذب توسط حلال‌های مایع، جذب سطحی روی جامدات، نفوذ از میان غشاءها و تبدیل‌های شیمیایی انجام شود. برای حذف دی اکسید کربن از حجم‌های وسیع جریان‌های گازهای زاید، روش جذب گاز توسط حلال‌های مایع، فرایند مناسبی است. به طور کلی، جذب اجزای گازی توسط حلال‌های مایع مهمترین و متداول‌ترین روش تصفیه گازهاست. متداول‌ترین حلال‌های جذب که مورد مصرف قرار می‌گیرند، محلول‌های آبی الکانول آمین‌ها هستند. فرایند جذب گاز با واکنش شیمیایی به طور وسیعی در خالص‌سازی گاز و همچنین در بسیاری از فرایندهای شیمیایی و نفت در صنعت به کار می‌رود. از میان آن‌ها، فرایند جذب گاز در برج‌های پر شده به صورت نامنظم و با استفاده از محلول‌های قلیایی مانند محلول آبی هیدروکسید سدیم به طور متداول در فرایندهای تصفیه گازهای اسیدی به کار گرفته شده است [۴-۷].

محققان متعددی [۹-۷] در زمینه جذب گاز دی اکسید کربن در برج‌های پر شده با پُرکننده‌های منظم کار کرده‌اند، به طوری که تعدادی آزمایش‌های جذب دی اکسید کربن در سه واحد جذب با مقیاس‌های مختلف (آزمایشگاهی، پایلوت پلانت و صنعتی) و تحت شرایط عملیاتی مختلف توسط آنها انجام شده است. در این آزمایش‌ها از پُرکننده‌های منظم (سولزر ای ایکس)^۱، (جیم پک چهار آ)^۲ و (سولزر بی ایکس)^۳ استفاده شده است. محلول‌های آبی هیدروکسید سدیم، مونو اتانول آمین^۴ و (۲- آمینو-۲- متیل-۱- پروپانول)^۵ به عنوان حلال‌های جذب به کار برده شده و نتایج تجربی حاصل از آنها بر حسب ضریب انتقال جرم کلی حجمی در فاز گاز ارائه شده‌اند. نتایج حاصل شده از مطالعات تجربی این محققین نشان می‌دهند که تغییرات شدت جریان گاز اثر چندانی بر ضریب انتقال جرم ندارد، با افزایش شدت جریان مایع و غلظت حلال، ضریب انتقال جرم بیشتر، و با افزایش فشار جزیی دی اکسید کربن و بارگیری دی اکسید کربن در فاز مایع، ضریب انتقال جرم، کمتر می‌شود.

محققان مختلفی نیز در زمینه جذب گاز در برج‌های پر شده با

1. Sulzer EX
2. Gempak 4A
3. Sulzer BX
4. Mono Ethanol Amine (MEA)
5. 2-Amino 2-Methyl Propanol (AMP)

6. P. Tontiwachwuthikul
7. A. Aboudheir
8. O. Bretschneider
9. Sv. Nakov

۲-۲ دستگاه

برج جذب پر شده از دو بخش استوانه‌ای شیشه‌ای متصل به هم ساخته شده که هر قسمت، 0.7 m ارتفاع دارد. ارتفاع کل برج معادل 1.4 m و قطر داخلی برج معادل 7.5 cm است. بدنه برج از جنس شیشه ساخته شده است. برج شامل دو بستر است که با حلقه‌های راشیگی ($10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$) از جنس شیشه پر شده است. ارتفاع کل قسمت پُر شده معادل 1 m است. در جدول (۱) مشخصات فنی سیستم آزمایش و واحد برج جذب گاز ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات فنی دستگاه آزمایش جذب گاز

ظرفیت مخزن خوراک	۵۰/۰ لیتر
قطر ستون	۰/۰۷۵ متر
سطح مقطع عرضی ستون	۰/۰۰۴۴ مترمربع
ارتفاع برج جذب	۱/۴ متر
نوع پُر کننده	حلقه‌های راشیگی شیشه‌ای ۱۰×۱۰ میلی متر
ارتفاع کل بخش پُر کننده‌ها	۱ متر
ظرفیت کمپرسور هوا	۰/۱۵ متر مکعب در دقیقه در فشار ۰/۳ بار

دستگاه آزمایش دارای سه جریان سنج می‌باشد که برای اندازه گیری شدت جریان حجمی جریان‌های ورودی هوا و گاز دی اکسید کربن و محلول مایع بر روی سیستم تعبیه شده‌اند. همچنین، این دستگاه شامل دو فشارسنج برای اندازه گیری فشار است. از یک کمپرسور چرخشی برای پمپ کردن هوا به درون برج استفاده شده است. شکل (۱) نمودار اجمالی فرایند جذب گاز در سیستم آزمایش را نشان می‌دهد.

فلزی و بسپاری راشیگ سوپر رینگ، آی.ام.تی.پی و حلقه رالو در اندازه‌های ۲۰ الی ۷۰ میلی‌متر در جذب دی اکسید کربن در محلول آبی سود مورد استفاده قرار گرفتند. کار آزمایشگاهی صورت گرفته توسط این گروه نشان داد که راشیگ سوپر رینگ بالاترین سطح مؤثر را از میان پرکننده‌های مورد استفاده داشته است. همچنین، این نوع پرکننده کمترین افت فشار را نیز ایجاد کرده است. از نظر جنس نیز مشخص شده است که پرکننده‌های فلزی، سطح مؤثر بیشتری نسبت به پرکننده‌های بسپاری ایجاد می‌کنند [۱۳].

ام.آدرمی^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۸ نیز طی یک کار تجربی به همراه مدل‌سازی ریاضی، جذب دی اکسید کربن در محلول آبی سود را تحت شرایط ناپایدار بررسی کردند. نتایج حاصل از مدل، تطابق مناسبی با داده‌های آزمایشگاهی آن‌ها داشته است [۱۴].

ای. آرون ویلاس^۲ و همکارش در سال ۲۰۰۹ جذب دی اکسید کربن در مخلوط مونو اتانول آمین و (۲-آمینو-۲-متیل-۱-پروپانول) را بررسی کردند و نشان دادند که ضریب انتقال جرم کلی حجمی با افزایش شدت جریان مایع، دما و غلظت کلی آمین افزایش پیدا می‌کند، در حالی که میزان دی اکسید کربن بالا در ورودی برج باعث کاهش ضریب انتقال جرم کلی حجمی می‌شود [۱۵].

هم‌چنین در سال ۲۰۰۹ جی پلازا^۳ و همکارانش مدلی را برای جذب دی اکسید کربن توسط محلول آبی مونو اتانول آمین ارائه کرده‌اند. دقت مدل با استفاده از نتایج آزمایشگاهی حاصل از برج جذبی در مقیاس پایلوت و حلال مونو اتانول آمین با غلظت ۳۵٪ وزنی بررسی شده‌است. تفاوت مشاهده شده در نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از مدل، به‌طور متوسط، ۳/۸٪ بوده است [۱۶].

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱ مواد

برای انجام آزمایش‌های جذب از هیدروکسید سدیم میرک آزمایشگاهی با درجه خلوص ۹۹٪ و گاز دی اکسید کربن با درجه خلوص ۹۹/۹۵٪ استفاده شده و محلول کاربردی در آزمایش‌ها با استفاده از آب مقطر تهیه شده است. هم‌چنین برای تیتراسیون نمونه‌ها، از اسید هیدروکلریک و معرف‌های فنول فتالین و متیل اورانژ مرک آزمایشگاهی استفاده شده است.

1. M. Aderemi
2. A. Aroonwilas
3. J. Plaza

تیتراسیون با اسید هیدروکلریک استاندارد در طی دو مرحله به ترتیب در حضور معرف‌های فنل فتالین و متیل اورانژ تعیین شده است. از نتایج آنالیز برای تعیین غلظت جریان‌های خروجی از برج و محاسبه ضرایب انتقال جرم کلی حجمی مربوط به هر آزمایش جذب استفاده شده است.

جدول ۲- شرایط عملیاتی برای آزمایش‌های جذب دی اکسید کربن

شرایط	گستره مقیاس آزمایشگاهی
نوع حلال جذب	هیدروکسید سدیم (سود)
فاز گاز	
غلظت مولی دی اکسید کربن	۰٫۰۲، ۰٫۰۴، ۰٫۰۶، ۰٫۱۰، ۰٫۱۳٪
گذر جریان هوا	۳۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ لیتر در دقیقه
فشار سیستم	۱۰۱/۳ کیلو پاسکال
فاز مایع	
غلظت حلال	۰٫۰۵، ۰٫۱، ۰٫۱۵، ۰٫۲، ۰٫۲۵ مول بر لیتر
نرخ جریان مایع	۱، ۱٫۵، ۲، ۲٫۵، ۳ لیتر در دقیقه
دمای خوراک	۲۵°C
مایع	

۴-۲ تعیین میزان جذب دی اکسید کربن و ضریب انتقال جرم کلی حجمی
برای تعیین تعداد مول‌های دی اکسید کربن جذب شده از رابطه زیر استفاده شده است:

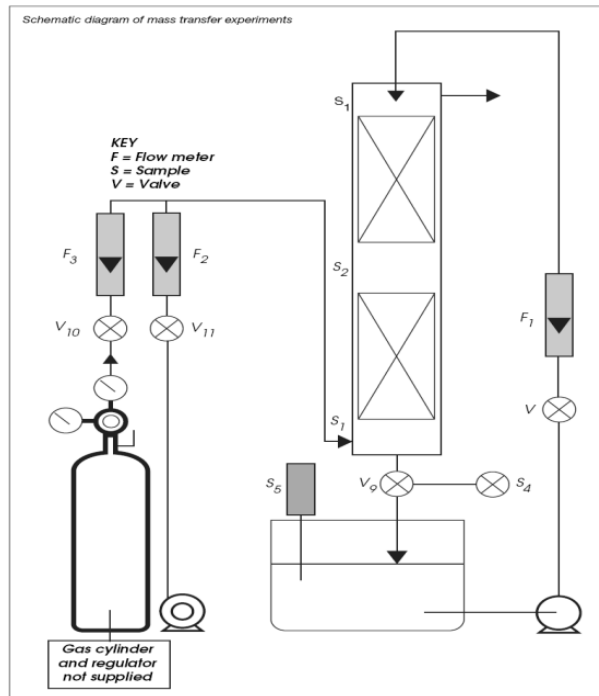
$$N_{CO_2} = (Q_{Liq}) (C_{Na_2CO_3, out}) \quad (1)$$

N_{CO_2} : تعداد مول‌های دی اکسید کربن جذب شده

Q_{Liq} : شدت جریان حجمی حلال جذب (سود)

$C_{Na_2CO_3, out}$: غلظت کربنات سدیم خروجی

برای انجام محاسبات از پنج جریان سنج حجمی مختلف حلال جذب (۱، ۱٫۵، ۲، ۲٫۵، ۳) استفاده شده است و غلظت کربنات سدیم موجود در مایع خروجی، حاصل از واکنش دی اکسید کربن و محلول سود، به روش تیتراسیون با اسید هیدروکلریک استاندارد



شکل ۱- نمودار اجمالی سیستم آزمایش جذب گاز

۳-۲ روش آزمایش

برای انجام آزمایش‌های جذب دی اکسید کربن، محلول هیدروکسید سدیم مورد نیاز برای فرایند با غلظت معین در یک مخزن خوراک با ظرفیت ۵۰ Lit تهیه و ذخیره می‌شود. از یک پمپ سانتریفیوژ برای انتقال مایع به بالای برج جهت ریزش بر روی پرکننده‌ها استفاده می‌شود. گاز دی اکسید کربن از جریان سنج عبور کرده و با جریان هوا مخلوط می‌شود و در یک خط گاز یکسان به درون پایین برج جریان می‌یابد. مخلوط گاز ورودی در پایین برج، از روی بستر پر شده بالا رفته و به صورت ناهمسو با مایع، در حال پایین آمدن در داخل برج، در تماس قرار می‌گیرد.

تعداد ۴۰ آزمایش جذب گاز دی اکسید کربن توسط حلال سود در برج پر شده در این تحقیق انجام شده است. در جدول (۲) شرایط عملیاتی برای آزمایش‌های جذب دی اکسید کربن داده شده است. برای انجام هر آزمایش، پس از روشن کردن پمپ و کمپرسور سیستم و تنظیم جریان سنج‌های هوا، گاز دی اکسید کربن و مایع در شدت جریان‌های مشخص، برای هر آزمایش مدت زمانی در حدود چند دقیقه صبر می‌کنند تا سیستم به شرایط حالت یکنواخت برسد و پس از آن نمونه‌گیری‌های لازم از فاز مایع انجام می‌شود. سپس میزان دی اکسید کربن جذب شده در نمونه مایع از روش

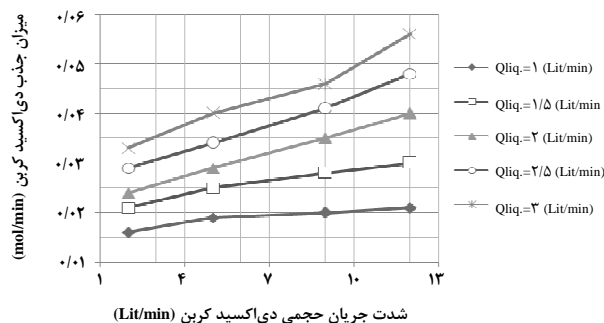
انتقال جرم کلی حجمی در فرایند جذب گاز دی اکسید کربن در برج پر شده با استفاده از داده‌های تجربی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$K_G a = \frac{G}{PZ} \ln\left(\frac{y_{CO_2, in}}{y_{CO_2, out}}\right) \quad (5)$$

۳- نتایج و بحث

در این تحقیق تعداد ۴۰ آزمایش جذب گاز دی اکسید کربن توسط حلال سود در برج پر شده انجام شده است. نتایج آزمایشگاهی حاصل شده به صورت نتایج تیتراسیون، نتایج آنالیز، میزان جذب و ضریب انتقال جرم کلی حجمی در شکل‌های (۲) تا (۵) آورده شده‌اند. مقادیر میزان جذب و ضریب انتقال جرم کلی حجمی به صورت توابعی از متغیرهای اصلی فرایند (شار حجمی مایع، شار مولی گاز، غلظت حلال و کسر مولی دی اکسید کربن ورودی) در نمودارهای مربوطه نشان داده شده‌اند.

شکل (۲) نمودار تغییر میزان جذب دی اکسید کربن را بر حسب شدت جریان حجمی دی اکسید کربن در شدت جریان‌های مختلف مایع و غلظت ۰/۰۵ نرمال سود نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش شدت جریان دی اکسید کربن و افزایش شدت جریان مایع، میزان جذب افزایش می‌یابد.



شکل ۲- نمودار تغییرات میزان جذب دی اکسید کربن بر حسب شدت جریان حجمی دی اکسید کربن در شدت جریان‌های مختلف مایع و غلظت ۰/۰۵ نرمال سود

در شکل (۳) نمودار تغییر میزان جذب بر حسب شدت جریان مایع در غلظت‌های مختلف حلال نشان داده شده است که بیانگر آن است که با افزایش شدت جریان مایع و غلظت حلال، میزان جذب بیشتر می‌شود.

محاسبه و با استفاده از رابطه (۱) میزان جذب دی اکسید کربن تعیین شده است.

برای تعیین ضریب انتقال جرم کلی حجمی از داده‌های تجربی، با در نظر گرفتن یک عنصر انتقال جرم با ارتفاع dz برای جزء i ($i = CO_2$) از فاز گاز به فاز مایع در یک برج پر شده و نوشتن موازنه جرم بر روی آن، رابطه (۲) ایجاد می‌شود:

$$N_i dz = K_G a P (y_i - y_i^*) dz = -G_I dy_i = G dy_i \quad (2)$$

$K_G a$: ضریب انتقال جرم کلی حجمی براساس فاز گاز

a : سطح تماس به ازای واحد حجم برج پر شده

P : فشار کل سیستم

y_i : کسر مولی جزء i در توده گاز

y_i^* : کسر مولی جزء i در فاز گاز در تعادل با توده مایع

$$Y_i: \text{کسر معادل } \frac{y_i}{1-y_i}$$

G : شدت جریان کل گاز

G_I : شدت جریان گاز بی اثر

اگر غلظت جزء i در فاز گاز خیلی کوچک باشد می‌توان از تقریب‌های زیر استفاده کرد:

$$G_I \approx G \quad \text{و} \quad \frac{y_i}{1-y_i} \approx y_i \quad (3)$$

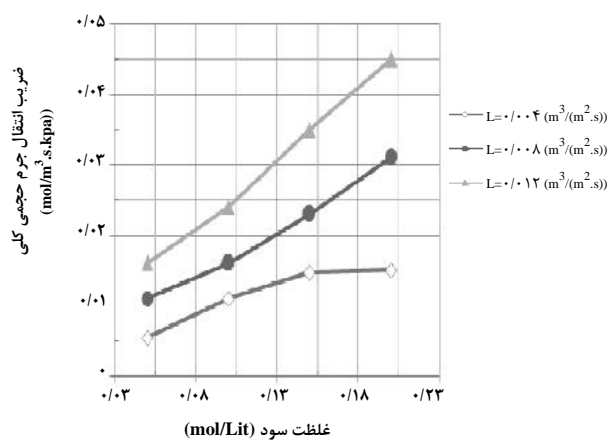
در این تحقیق تجربی به دلیل اینکه واکنش دی اکسید کربن با سود و آمین‌ها لحظه‌ای و سریع اتفاق می‌افتد، مقدار دی اکسید کربن در مایع صفر بوده و مقادیر y_i^* را می‌توان تقریباً معادل صفر فرض کرد [۱۷].

بنابراین، معادله (۲) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$-\frac{dy_i}{y_i} = \frac{K_G a P}{G} dz \quad (4)$$

که پس از انتگرال گیری از رابطه (۴) در طول ستون به ارتفاع Z و مرتب کردن آن بر اساس $K_G a$ فرمول نهایی برای محاسبه ضریب

شکل (۵) نمودار تغییر ضریب کلی انتقال جرم بر حسب غلظت محلول هیدروکسید سدیم در شارهای حجمی مختلف مایع را نشان می‌دهد و بیانگر آن است که با افزایش غلظت حلال و افزایش شار حجمی مایع ورودی به برج، ضریب کلی انتقال جرم افزایش می‌یابد. افزایش غلظت حلال بیانگر آن است که میزان بیشتری از مولکول‌های حلال به ازای واحد حجم قابل دسترس برای واکنش با دی‌اکسید کربن و جذب کردن بیشتر آن در سطح تماس (گاز-مایع) وجود دارند. در نتیجه، عملکرد فرایند جذب دی‌اکسید کربن بهتر شده و میزان ضریب انتقال جرم کلی حجمی افزایش می‌یابد.

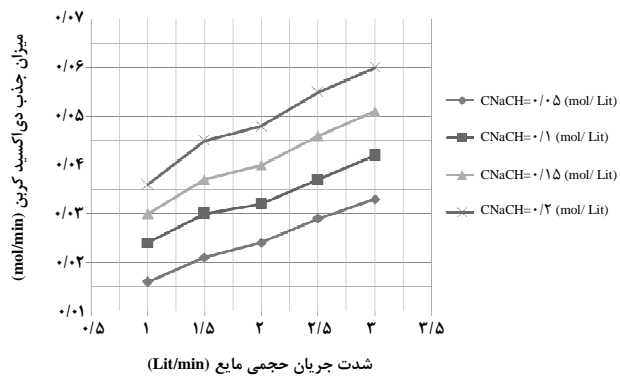


شکل ۵ - نمودار تغییرات ضریب کلی انتقال جرم بر حسب غلظت محلول هیدروکسید سدیم در شارهای حجمی مختلف مایع ($Y_{CO_2, in} = 0.13$)

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله جذب دی‌اکسید کربن توسط محلول آبی سود در مقیاس آزمایشگاهی در یک برج پر شده با پرکننده‌های نامنظم حلقه راشیگ بررسی شده است. آزمایش‌های مختلفی جهت بررسی اثر شدت جریان و غلظت فازهای گاز و مایع طراحی شده‌اند که مقادیر میزان جذب دی‌اکسید کربن و ضریب انتقال جرم کلی حجمی از نتایج آن‌ها به دست آمده‌اند. به‌طور کلی، می‌توان نتایج حاصل از این آزمایش‌ها را به‌صورت زیر خلاصه کرد:

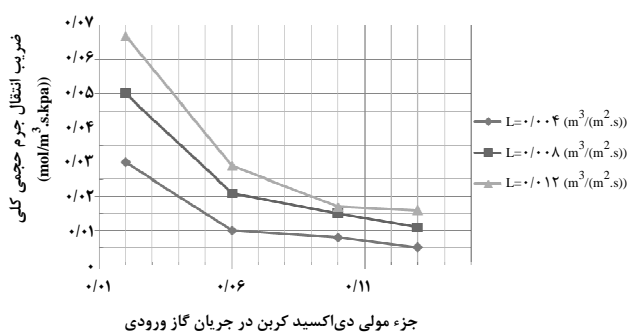
- افزایش شدت جریان حجمی مایع باعث افزایش میزان جذب می‌شود به‌گونه‌ای که دو برابر شدن شدت جریان حجمی مایع از ۱ (Lit/min) به ۲ (Lit/min) میزان جذب دی‌اکسید کربن را به‌طور متوسط ۶۷ درصد بهبود بخشیده است.



شکل ۳- نمودار تغییرات میزان جذب بر حسب شدت جریان مایع در غلظت‌های مختلف حلال جذب ($Q_{CO_2} = 2$ Lit/min)

در شکل (۴) نمودار تغییر ضریب کلی انتقال جرم بر حسب کسر مولی دی‌اکسید کربن ورودی در شارهای حجمی مختلف مایع و غلظت ۰/۰۵ نرمال سود نشان داده شده است. در این نمودار، همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش کسر مولی دی‌اکسید کربن ورودی ضریب کلی انتقال جرم کاهش می‌یابد. همچنین، مشاهده می‌شود که با افزایش شار حجمی مایع ورودی به برج، ضریب کلی انتقال جرم افزایش می‌یابد. چگونگی این رفتار به این دلیل است که شدت جریان مایع بیشتر به موارد زیر منجر می‌شود:

- ۱- افزایش ضریب انتقال جرم فاز مایع^۱، که مستقیماً با ضریب انتقال جرم کلی^۲ متناسب است، در حالتی که فاز مایع، کنترل‌کننده انتقال جرم است.
- ۲- افزایش سطح مؤثر انتقال جرم که از پراکنده شدن مایع بیشتر بر روی سطح پرکن ناشی می‌شود. حساسیت ضریب انتقال جرم کلی حجمی نسبت به تغییرات شدت جریان مایع متغیر است و به خصوصیات و ویژگی‌های سیستم‌های جذب بستگی دارد.



شکل ۴- نمودار تغییرات ضریب کلی انتقال جرم بر حسب کسر مولی دی‌اکسید کربن ورودی در شارهای حجمی مختلف مایع و غلظت ۰/۰۵ نرمال سود

1. KL
2. KG

- [7] Aroonwilas, A.; Tontiwachwuthikul, P., "Mass Transfer Coefficients and Correlation for CO₂ Absorption into 2-Amino-2-methyl-1-propanol (AMP) Using Structured Packing". *Ind. Eng. Chem. Res.*, 37, 569-575, (1998).
- [8] Adisorn Aroonwilas, Amornvadee Veawab, and Paitoon Tontiwachwuthikul, "Behavior of the Mass-Transfer Coefficient of Structured Packings in CO₂ Absorbers with Chemical Reactions", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 38, 2044-2050, (1999).
- [9] Aroonwilas, A.; Tontiwachwuthikul, P. "High-efficiency Structured Packing for CO₂ Separation Using 2-Amino-2-methyl-1-propanol (AMP)". *Sep. Purific. Technol.*, 12, 67-79, (1997).
- [10] P. Tontiwachwuthikul, A. Meisen and C. J. Lim, "CO₂ Absorption by NaOH, monoethanolamine and 2-amino-2-methyl-1-propanol solutions in a packed column", *Chemical Engineering Science*, 47, 381-390, (1992).
- [11] A. Aboudheir, P. Tontiwachwuthikul, A. Chakma, R. Idem, "Kinetics of the reactive absorption of carbon dioxide in high CO₂ -loaded, concentrated aqueous monoethanolamine solutions", *Chemical Engineering Science*, 58, 5195-5210, (2003).
- [12] O. Bretschneider, R. Thiele, R. Faber, H. Thielert, G. Wozny, "Experimental investigation and simulation of the chemical absorption in a packed column for the system NH₃-CO₂-H₂S-NaOH-H₂O", *Separation and Purification Technology*, 39, 139-159, (2004).
- [13] Sv. Nakov, N. Kolev, L. Ljutzkanov, D. Kolev, "Comparison of the effective area of some highly effective packings", *Chemical Engineering and processing*, 46, 1385-1390, (2007).
- [14] M. A. Olutoye and E. J. Eterigho, "Modeling of a gas absorption column for CO₂-NaOH system under unsteady-state regime", *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 12, 105-114, (2008).
- [15] A. Dey, A. Aroonwilas, "CO₂ absorption into MEA-AMP blend: mass transfer and absorber height index", *Energy Procedia*, 1, 211-215, (2009).
- [16] J. M. Plaza, D. V. Wagener, G. T. Rochelle, "Modeling CO₂ capture with aqueous monoethanolamine", *Energy Procedia*, 1, 1171-1178, (2009).
- [17] Jian-Gang Lu, You-Fei Zheng, Du-Liang He, "Selective absorption of H₂S from gas mixtures into aqueous solutions of blended amines of methyl-diethanolamine and 2-tertiarybutylamino-2-ethoxyethanol in a packed column", *Separation and Purification Technology*, 52, 209-217, (2006).
- نتایج نشان داده است که افزایش غلظت سود سبب بالا رفتن میزان جذب دی اکسید کربن خواهد شد. دو برابر شدن غلظت سود از ۰/۱ (mol/Lit) تا ۰/۲ (mol/Lit) باعث افزایش ۶۵ درصدی جذب دی اکسید کربن شده است.
 - ضریب انتقال جرم کلی حجمی با شار حجمی مایع ارتباط مستقیم دارد و با دو برابر شدن شار حجمی مایع از ۰/۰۴ (m³/m².s) تا ۰/۰۸ (m³/m².s) این ضریب، به طور متوسط، ۹۰ درصد افزایش یافته است.
 - افزایش غلظت حلال و شار حجمی مایع ورودی به برج منجر به افزایش ضریب کلی انتقال جرم شده است، به گونه‌ای که با دو برابر شدن غلظت حلال از ۰/۱ (mol/Lit) تا ۰/۲ (mol/Lit) ضریب انتقال جرم کلی حجمی به طور متوسط ۷۰ درصد افزایش یافته است.

مراجع

- [1] James T. Yeh and Henry W. Pennline and Kevin P. Resnik, "Study of CO₂ Absorption and Desorption in a Packed Column", *Energy & Fuels*, 15, 274-278, (2001).
- [2] B. P. Mandal, S. S. Bandyopadhyay, "Absorption of carbon dioxide into aqueous blends of 2-amino-2-methyl-1-propanol and monoethanolamine", *Chemical Engineering Science*, 61, 5440-5457, (2006).
- [3] Adisorn Aroonwilas and Amornvadee Veawab, "Characterization and Comparison of the CO₂ Absorption Performance into Single and Blended Alkanolamines in a Packed Column", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 43, 2228-2237, (2004).
- [4] B. P. Mandal, A. K. Biswas, S. S. Bandyopadhyay, "Absorption of carbon dioxide into aqueous blends of 2-amino-2-methyl-1-propanol and diethanolamine", *Chemical Engineering Science*, 58, 4137-4144, (2003).
- [5] B. P. Mandal, M. Guha, A. K. Biswas, S. S. Bandyopadhyay, "Removal of carbon dioxide by absorption in mixed amines: modeling of absorption in aqueous MDEA/MEA and AMP/MEA solutions", *Chemical Engineering Science*, 56, 6217-6224, (2002).
- [6] Chia-Chang Lin, Wen-Tzong Liu, and Chung-Sung Tan, "Removal of Carbon Dioxide by Absorption in a Rotating Packed Bed", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 42, 2381-2386, (2003).