

مطالعه تجربی فرآیند جذب دی اکسید کربن از هوا در بستر آکنده دوار

محمود رضا رحیمی^{۱*}، هجیر کریمی^۱، سلیمان مصلح^۱

۱. آزمایشگاه تحقیقاتی تشدید فرآیندها، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه یاسوج
(mrrahimi@mail.yu.ac.ir), (hakar@mail.yu.ac.ir), (soleiman.mosleh@yahoo.com)

چکیده

در این مطالعه با ساخت بستر آکنده دوار، فرآیند جذب دی اکسید کربن از هوا مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا آزمایشات هیدرودینامیک جهت تحلیل الگوی جریان و افت فشار در دو حالت تک فازی و دو فازی انجام شده است و سپس آزمایشات جذب با استفاده از آب و محلول‌های مونو اتانول آمین و دی اتانول آمین با درصدهای وزنی مختلف صورت گرفته است. نقش پارامترهایی نظیر سرعت چرخش روتور، نرخ جریان گاز و مایع، نوع و درصد وزنی محلول جاذب روی راندمان جذب بررسی شد و نتایج نشان داد که افزایش سرعت روتور موجب افزایش راندمان جذب می‌گردد. همچنین افزایش دبی مایع و غلظت محلول جاذب، راندمان جذب را افزایش داده و با افزایش شدت جریان گاز، راندمان جذب کاهش می‌یابد. نتایج مطالعه‌ی هیدرودینامیک نشان داد که افت فشار با افزایش نرخ جریان گاز و مایع، افزایش می‌یابد.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۰ مهر ۹۱
دریافت پس از اصلاح: ۴ تیر ۹۲
پذیرش نهایی: ۱۷ شهریور ۹۲

کلمات کلیدی:

بستر آکنده دوار
جذب دی اکسید کربن
مطالعه تجربی
جذب
هیدرودینامیک

* عهده دار مکاتبات

حقوق ناشر محفوظ است.

۱- مقدمه

مطالعات گوناگونی در زمینه تشدید فرآیندها در سیستم‌هایی با گرانش بالا مانند جذب و دفع، جذب سطحی و استخراج انجام شده است. عمده مطالعات روی بسترهای آکنده دوار، در مورد جذب مواد آلی فرار می‌باشد. سیستم گرانش بالا و بستر آکنده دوار نخستین بار توسط رامشو و مالیسون [۱] در سال ۱۹۸۱ بر اساس نیروی گریز از مرکز ارائه شد. آن‌ها برای اولین بار داده‌هایی را در سیستم higee برای جذب اکسیژن موجود در آب گزارش دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که ضرایب انتقال جرم حجمی فاز مایع (K_{La})، با افزایش سرعت چرخش روتور افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند. تحلیل جریان در بستر آکنده دوار توسط هاگو و همکارانش [۲] به کمک دینامیک سیالات محاسباتی انجام شده است. آن‌ها به بررسی افت فشار خشک در بستر آکنده دوار پرداخته‌اند و نتایج را برای سه هندسه مختلف مقایسه کرده‌اند. در بررسی آن‌ها، ورودی جریان گاز در جهت‌های محوری، شعاعی و مماسی در نظر گرفته شد و در هر جهت، به تحلیل الگوی جریان پرداخته شد. ونینگ یانگ و همکارانش [۳] نیز، جریان درون بستر آکنده دوار را بررسی کرده‌اند. آن‌ها به کمک نرم افزار fluent شبیه سازی‌های دو بعدی و سه بعدی را در مورد بستر آکنده دوار انجام دادند و پارامترهای مختلفی از جمله سرعت چرخش و نرخ جریان گاز را مورد تحلیل قرار داده و نقش این پارامترها روی میزان افت فشار بستر را بررسی کردند. نتایج کار آن‌ها جهت درک بهتر جریان RPB^۱ مفید واقع شد. عمده مطالعات تجربی در مورد بستر آکنده دوار، روی جذب مواد آلی فرار انجام شده است که به بررسی نقش پارامترهای عملیاتی مختلف روی ضرایب انتقال جرم پرداخته است. یو شاو چن و همکارانش [۴]، بکارگیری بستر آکنده دوار را در جذب محلول‌های آلی فراری مانند استون، اتیل استات و ایزوپروپیل الکل بررسی کرده‌اند. بر اساس نتایج آن‌ها، نیروی گریز از مرکز انتقال جرم را طی جذب محلول آلی فرار در بستر آکنده دوار تشدید می‌کند. غلظت محلول آلی فرار خروجی به طور چشمگیری با کمک نیروی گریز از مرکز در زمان تماس کوتاه کاهش می‌یابد. علاوه بر این، رابطه‌ای برای K_{Ga} در بستر آکنده دوار پیشنهاد کردند که نشان می‌دهد K_{Ga} به عدد گراشف گاز به توان ۰.۱۸ وابسته است. همچنین، با تجزیه و تحلیل اثر سطح

مشترک گاز- مایع به این نتیجه رسیدند که اثر سطح مشترک با سرعت روتور به توان ۰.۴ افزایش می‌یابد، در حالی که ضریب انتقال جرم فاز گازی تابع ضعیفی از نیروی گریز از مرکز است. مقادیر K_G در محدوده‌ای مشابه با مقدار آن در بسترهای پر شده متعارف است، بنابراین افزایش انتقال جرم با نیروی گریز از مرکز را می‌توان به افزایش در سطح مشترک گاز- مایع نسبت داد. مبحث ضرایب انتقال جرم در بسترهای آکنده دوار تاکنون توسط افراد مختلفی بررسی شده است و نتایج آن‌ها در نشریات مختلفی ذکر شده است. عمدتاً ضرایب انتقال جرم در فاز گاز، به دلیل نقش موثرتر جریان گاز مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نقش بستر آکنده دوار در جذب آمونیاک و ترکیبات آلی فرار توسط یو شاو چن [۵] مطالعه شده است و رابطه ضریب انتقال جرم در فاز گاز (K_{Ga}) مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعه آن‌ها روی تاثیرات نرخ جریان گاز، نرخ جریان مایع، ویسکوزیته مایع و شتاب گریز از مرکز نشان داد که K_{Ga} به نسبت مقاومت انتقال جرم در فاز گاز و مایع بستگی دارد. چیانگ و همکارانش [۶]، عملکرد جذب اتانول با محلول گلیسرول در بستر آکنده دوار را که با یک شبکه سیمی پر شده بود، بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد، K_{Ga} با نرخ جریان گاز، نرخ جریان مایع و شتاب گریز از مرکز به ترتیب به توان ۰.۶۵-۰.۸۷، ۰.۳۳-۰.۵۱، ۰.۲۸-۰.۳۵٪ متناسب است. آن‌ها همچنین متوجه شدند که K_{Ga} نسبت به افزایش ویسکوزیته مایع به توان ۰.۲۱-۰.۳۲٪ کاهش می‌یابد. اگر چه مدل‌های جریان گاز در RPB توسعه یافته‌اند و روابط تجربی متعددی برای K_{Ga} می‌توان در نشریات پیدا کرد، ولی معادلات مربوطه هنوز معتبر نیستند. چن و همکارانش [۷]، اثر ویسکوزیته مایع را بر نرخ انتقال جرم در اکسیژن زدایی از محلول گلیسرول (سیال نیوتنی) و محلول CMC (سیال غیر نیوتنی) بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که اثر نیروی گریز از مرکز سبب افزایش ضریب انتقال جرم مایع در Viscous media می‌شود. آن‌ها همچنین متوجه شدند وابستگی ضریب انتقال جرم به ویسکوزیته مایع در RPB نسبت به ستون پر شده معمولی ضعیف‌تر است. در مورد جذب مواد آلی فرار، مطالعات برای بررسی ضرایب انتقال جرم در فاز گاز و مایع و تاثیر پارامترهایی مانند نرخ جریان‌های گاز و مایع، ویسکوزیته مایع، شتاب گریز از مرکز و سطح مشترک گاز- مایع توسط منابع مختلفی انجام شده است [۸-۱۲]، با این وجود تاکنون در مورد جذب دی اکسید کربن از مخلوط‌های گازی مختلف و

^۱ Rotating Packed Bed

فرآیند جذب دی اکسید کربن در بستر آکنده دوار مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته و نتایج بیشتری در این زمینه حاصل شود.

۲- آزمایشات

آزمایشات به دو دسته تقسیم می‌شوند: آزمایشات هیدرودینامیک و آزمایشات جذب.

۲-۱- آزمایشات هیدرودینامیک

آزمایشات هیدرودینامیک جهت بررسی و تحلیل الگوی جریان درون بستر آکنده دوار و شناخت ظرفیت هیدرودینامیک دستگاه انجام می‌شود. شناخت ظرفیت هیدرودینامیک دستگاه برای مطالعه پدیده‌هایی نظیر طغیان مناسب خواهد بود. جهت این امر، به بررسی افت فشار خشک و مرطوب در نرخ‌های مختلف جریان گاز و مایع پرداخته می‌شود و از این طریق هیدرودینامیک دستگاه مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. نحوه انجام آزمایشات هیدرودینامیک بدین صورت می‌باشد که با استفاده از یک فشارسنج دیفرانسیلی که اختلاف فشار بین ورودی و خروجی جریان گاز را نمایش می‌دهد، می‌توان افت فشار را در نرخ‌های مختلف جریان گاز و مایع بدست آورد. جهت اطمینان از داده‌های بدست آمده، هر آزمایش ۵ بار تکرار شده است.

۲-۲- آزمایشات جذب

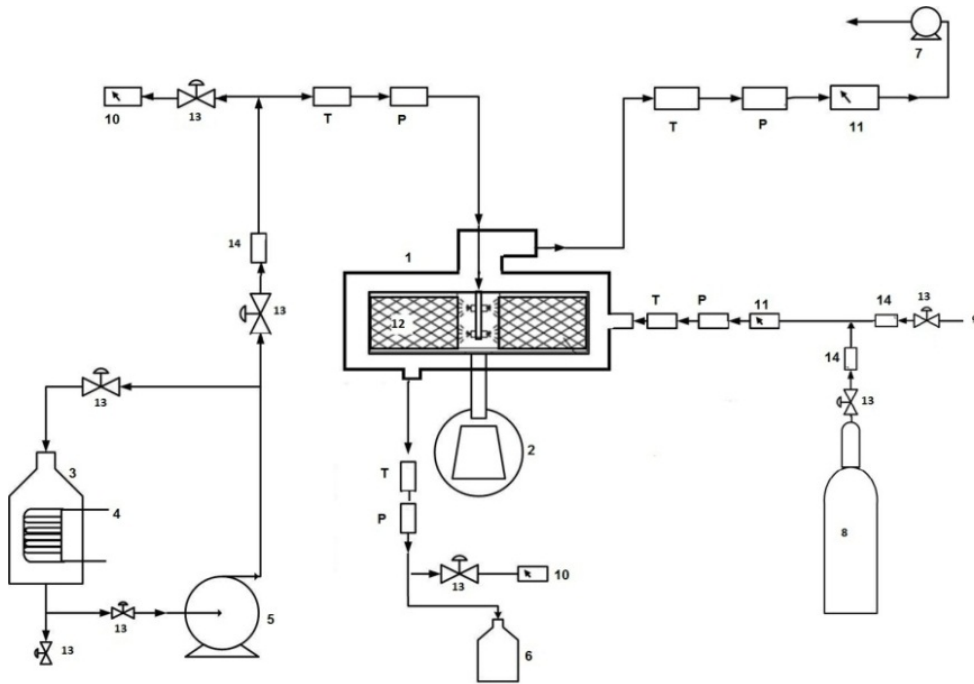
عملیات جذب دی اکسید کربن در بستر آکنده دوار، یک عملیات انتقال جرم ناهمسو می‌باشد. در این فرآیند که تحت شتاب گریز از مرکز بسیار بالا صورت می‌گیرد، نفوذ مولکولی بسیار سریع تر رخ می‌دهد و راندمان جذب بسیار بالاتر از روش‌های متداول در صنعت است. نحوه فرآیند به این صورت است که مخلوط گازی پس از ترکیب شدن و ثبت دبی، دما و فشار آن، از طریق یک خط لوله از جنس پلی پروپیلن به طرف دستگاه حرکت می‌کند. قبل از ورود به دستگاه نمونه گیری از آن به عمل می‌آید. گاز از دهانه بیرونی بستر به صورت شعاعی به سمت مرکز بستر حرکت می‌کند. مایع نیز که درون مخزن دارای هیتر نگهداری می‌شود، پس از رسیدن به دمای عملیاتی، از طریق یک پمپ به سمت بستر حرکت می‌کند. قبل از ورود مایع به بستر، از آن نمونه گیری به عمل آمده و دمای آن نیز ثبت می‌شود. دبی جریان مایع نیز توسط یک فلومتر جریان اندازه گیری می‌شود. به وسیله یک شیر تنظیم

استفاده از جاذب‌های متفاوت، مطالعه جامعی انجام نشده است. مطالعه ویژگی‌های انتقال جرم در بستر آکنده دوار با تخلخل بالا برای فرآیندهای دفع اکسیژن و جذب دی اکسید کربن توسط چیا چانگ لین و همکارانش [۱۳] انجام شده است. در مطالعه آن‌ها، مقادیر K_{GA} و K_{LA} برای این فرآیندها محاسبه شده است. نتایج آن‌ها نشان داد که مقادیر K_{LA} با سرعت روتور برای دفع اکسیژن افزایش می‌یابد، با این حال برای جذب دی اکسید کربن مقادیر K_{GA} هنگامی که سرعت روتور تا سرعت بحرانی افزایش می‌یابد، ثابت می‌ماند. مقادیر ضریب انتقال جرم با افزایش نرخ جریان مایع افزایش می‌یابد. در دفع اکسیژن، ضریب انتقال جرم فاز مایع به نرخ جریان گاز وابسته نیست، در حالی که در جذب دی اکسید کربن، ضریب انتقال جرم فاز گاز با افزایش نرخ جریان گاز و مایع افزایش می‌یابد. بنابراین مشاهده می‌شود که برای فرآیند دفع اکسیژن، مقاومت انتقال جرم در فیلم مایع می‌باشد. فی‌ی و همکارانش [۱۴]، جذب دی اکسید کربن با استفاده از محلول Benfield را در بستر آکنده دوار مطالعه کردند. در مطالعه تجربی آن‌ها، از شبکه سیمی ضد زنگ به عنوان آکنه استفاده شده است. سرعت چرخش روتور در آزمایشات آن‌ها از ۹۰۰ تا ۱۳۰۰ دور بر دقیقه متغیر است. آن‌ها اثر نرخ جریان گاز و مایع، سرعت چرخش و اثر تغییرات دمایی را روی ضریب انتقال جرم حجمی در فاز گاز (K_{GA}) بررسی کردند و نشان دادند که افزایش سرعت چرخش، افزایش نرخ جریان گاز و مایع و افزایش دما، سبب افزایش ضریب انتقال جرم حجمی در فاز گاز می‌شود. بررسی افت فشار درون بستر آکنده دوار در فرآیند جذب دی اکسید کربن توسط چیا چانگ لین و همکارانش [۱۵] انجام شده است. با بررسی‌های انجام شده مشاهده شد که نرخ جریان گاز، عامل مهم‌تری نسبت به سرعت روتور و نرخ جریان مایع به علت تجمع کمتر مایع در RPB جریان متقابل است. ضریب انتقال جرم حجمی فاز گاز (k_{GA}) به عنوان تابعی از سرعت روتور، نرخ جریان گاز و نرخ جریان مایع تعیین شده و وابستگی k_{GA} به نرخ جریان گاز و نرخ جریان مایع نشان داد که در RPB جریان متقابل، مقاومت انتقال جرم در فاز مایع برای جذب دی اکسید کربن از فاز گازی بیش‌تر است. با توجه به اینکه داده‌های تجربی کافی در مورد جذب دی اکسید کربن از مخلوط‌های گازی در بستر آکنده دوار با استفاده از جاذب‌های مختلف موجود نیست، بنابراین در مطالعه حاضر سعی شده است با ساخت بسترهای آکنده دوار و تحلیل داده‌های تجربی، نقش پارامترهای موثر در

آن، از طریق یک پمپ خلا به اتمسفر تخلیه می‌شود. جریان مایع خروجی نیز پس از نمونه‌گیری و ثبت دمای آن، برای نگهداری به سمت مخزن نگهداری حرکت می‌کند. سیستم جذب دی‌اکسید کربن با بکارگیری دستگاه بستر آکنده دوار در شکل (۱) نشان داده شده است. در این آزمایش از بستری به ارتفاع ۴ سانتیمتر، شعاع داخلی ۳ سانتیمتر و شعاع خارجی ۶ سانتیمتر استفاده شده است. آکنه به شکل شبکه توری بافته شده از جنس استیل ضد زنگ بوده و دارای تخلخل ۰/۷ می‌باشد. عملیات در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد انجام شده است.

در جدول شماره (۱)، مشخصات علائم نقشه ترسیم شده آورده شده است.

جریان می‌توان میزان جریان ورودی را تنظیم کرد. مایع از طریق یک توزیع کننده که در مرکز بستر قرار گرفته است از داخل به طرف بستر پاشیده می‌شود. بستر با سرعت دورانی زیادی در حال چرخش است. نیروی گریز از مرکز بالای تولید شده ناشی از چرخش بستر باعث می‌شود که مایع پس از پاشش به درون بستر به شکل قطرات ریزی درون شبکه آکنده پخش شده و در جهت مخالف با جریان گاز ورودی به بستر حرکت کند. بنابراین یک عملیات انتقال جرم ناهمسو تحت شتاب بسیار بالا، بین فاز گاز و مایع صورت می‌گیرد. طی این عملیات، دی‌اکسید کربن جذب مایع شده و از پایین دستگاه خارج می‌شود. جریان گاز نیز که میزان دی‌اکسید کربن آن تا حد زیادی کاهش یافته است، از مرکز بستر به سمت بالای دستگاه حرکت کرده و پس از نمونه‌گیری و ثبت دما و فشار



شکل ۱: سیستم جذب دی‌اکسید کربن از هوا در بستر آکنده دوار

جدول ۱: مشخصات علائم راهنمای شکل (۱)

| علائم | توضیحات | علائم | توضیحات |
|-------|------------------------------|-------|-----------------|
| ۱ | محفظه بیرونی بستر آکنده دوار | ۹ | جریان هوا |
| ۲ | موتور | ۱۰ | نمونه‌گیر مایع |
| ۳ | مخزن مایع جاذب | ۱۱ | نمونه‌گیر گاز |
| ۴ | هیتر | ۱۲ | بستر پر شده |
| ۵ | پمپ | ۱۳ | شیر تنظیم جریان |
| ۶ | مخزن نگهداری مایعات خروجی | ۱۴ | جریان سنج |
| ۷ | پمپ خلا | P | سنسور فشار |
| ۸ | کپسول دی‌اکسید کربن | T | سنسور دما |

هیدرودینامیک دستگاه و همچنین تعیین مشخصه‌های آکنه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳-۱-۱- افت فشار خشک

برای بررسی افت فشار خشک در سرعت‌های مختلف چرخش روتور، از نرخ جریان گاز در محدوده ۱۰-۴۰ لیتر بر دقیقه استفاده شده است. در شکل (۲) تغییرات افت فشار خشک در نرخ‌های مختلف جریان گاز بر حسب سرعت روتور، نشان داده شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش دبی جریان گاز، افت فشار خشک در بستر افزایش می‌یابد. افزایش سرعت چرخش روتور تاثیر ناچیزی بر افت فشار خشک دارد. آگاهی از تغییرات افت فشار خشک علاوه بر کمک به شناخت پدیده‌ی طغیان، در تعیین مشخصه‌های آکنه نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳-۱-۲- افت فشار مرطوب

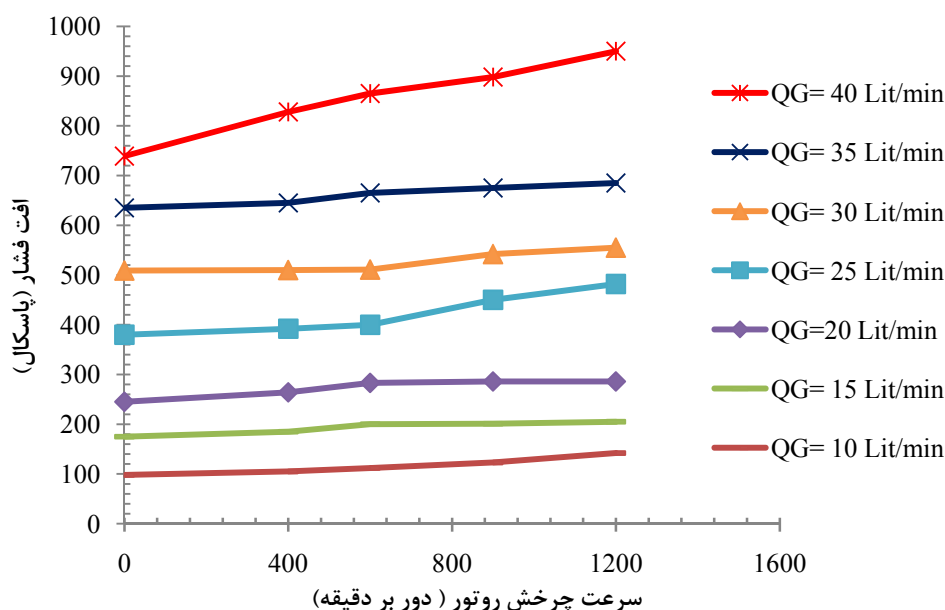
آزمایشات افت فشار مرطوب از مهم‌ترین آزمایشات بخش هیدرودینامیک دستگاه بستر آکنده دوار می‌باشد. از داده‌های این بخش جهت تحلیل پدیده‌های موجودی مایع، انباشتگی مایع و طغیان استفاده می‌شود. در شکل (۳) و (۴) تغییرات افت فشار مرطوب در نرخ‌های مختلف جریان مایع و سرعت روتور، بر حسب تغییرات نرخ جریان گاز نشان داده شده است.

داده‌های تجربی حاصل از آزمایش بعد از پایدار شدن عملیات که حدود ۵ تا ۱۰ دقیقه به طول می‌انجامد، گرفته شده است. آزمایشات ابتدا برای بررسی هیدرودینامیک بستر آکنده دوار انجام شد. در این مرحله با بررسی تغییرات نرخ جریان‌های گاز و مایع و سرعت روتور و تاثیرات آن بر میزان افت فشار به تحلیل جریان در بستر آکنده دوار پرداخته می‌شود. نتایج این مرحله می‌تواند در شناخت ظرفیت هیدرودینامیک دستگاه و مشاهده و بررسی پدیده‌های طغیان و ماندگی مایع مورد استفاده قرار گیرد. برای عملیات جذب نیز آزمایشات در هر مرحله با استفاده از محلول‌های جاذب مختلف با درصد وزنی مشخص انجام شد. در هر اجرا از آزمایشات، نقش پارامترهای مختلف از جمله نرخ جریان گاز و مایع، سرعت روتور و غلظت محلول جاذب بر روی راندمان جذب بررسی شد.

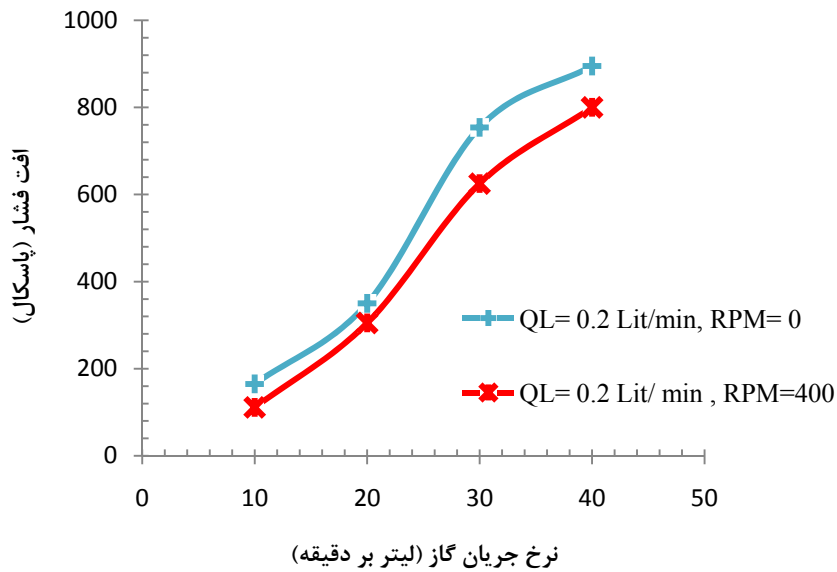
۳- نتایج

۳-۱- نتایج آزمایشات هیدرودینامیک

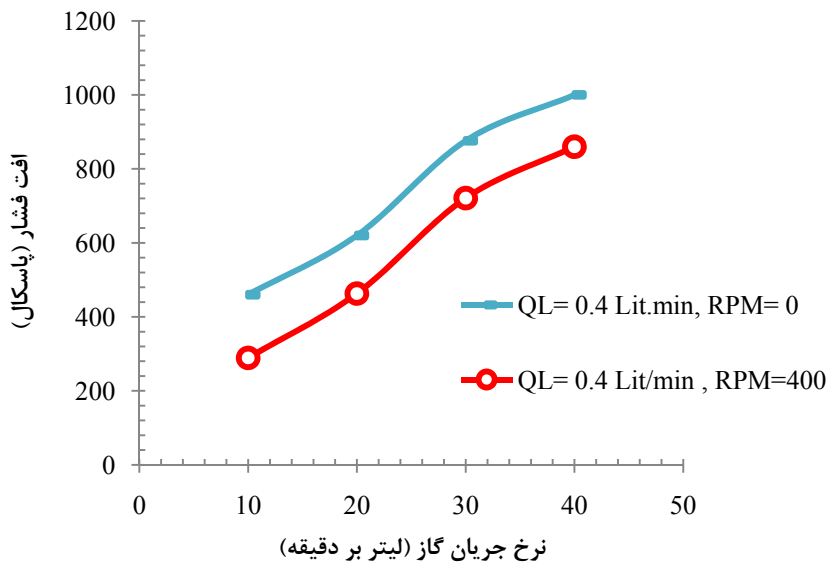
آزمایشات در دو مرحله برای بررسی افت فشار خشک و افت فشار مرطوب انجام شده است. افت فشار گاز نباید به حدی باشد که باعث طغیان گردد. به طور کلی افت فشار گاز بستگی به دبی جریان گاز و مایع دارد. اگر در بستر آکنده دوار اصلاً مایعی وجود نداشته باشد، بستر خشک نامیده می‌شود. مطالعات افت فشار خشک و مرطوب در مشخصات



شکل ۲: تغییرات افت فشار خشک



شکل ۳: تغییرات افت فشار مرطوب برای دبی جریان مایع ۰.۲ لیتر بر دقیقه



شکل ۴: تغییرات افت فشار مرطوب برای دبی جریان مایع ۰.۴ لیتر بر دقیقه

می‌یابد و در نتیجه باعث افزایش افت فشار می‌گردد. این پدیده را انباشتگی مایع می‌گویند. با افزایش بیشتر دبی گاز و یا مایع تغییرات افت فشار فوق العاده زیاد می‌شود که معرف پدیده‌ی طغیان است. مسئله‌ی افت فشار از لحاظ دیگری نیز قابل توجه است، اگر افت فشار گاز زیاد باشد توان لازم برای ورود و خروج گاز از سیستم زیاد خواهد شد و در نتیجه، هزینه‌ی عملیاتی دستگاه بالا خواهد رفت.

با افزایش نرخ جریان گاز و مایع، افت فشار افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت روتور افت فشار مرطوب کاهش می‌یابد، زیرا افزایش سرعت روتور، ماندگی (تجمع) مایع را کاهش می‌دهد و سبب کم شدن افت فشار می‌شود. در واقع با افزایش نرخ جریان مایع، مسیر عبور گاز کمتر شده و گاز برای عبور از بستر آکنده، نیاز به فشار بیشتری دارد. با انباشته شدن مایع در بستر، سطح مقطع موجود برای عبور گاز کاهش

۳-۲- نتایج آزمایشات جذب

گاز دی اکسید کربن پس از ترکیب شدن با گاز حامل، غلظت ورودی آن در مخلوط گازی اندازه گیری می شود و سپس به صورت شعاعی به طرفت بستر حرکت می کند. محلول جاذب پس از گرمایش تا دمای مورد نظر و تعیین غلظت آن، به طرف بستر پمپ می شود و از طریق یک توزیع کننده به طرف بستر پاشیده می شود. در اثر چرخش روتور و ایجاد نیروی گریز از مرکز، جریان مایع از درون بستر به سمت بیرون بستر پاشیده می شود و جریان گاز نیز از لبه بیرونی بستر به سمت داخل حرکت می کند، بنابراین تحت این شرایط یک عملیات انتقال جرم ناهمسو بین فاز گاز و مایع اتفاق می افتد و باعث جذب دی اکسید کربن از مخلوط گازی به محلول جاذب می گردد. جریان گاز سپس از مرکز روتور به سمت بالا حرکت می کند و از بستر خارج می شود. پس از خروج از بستر، غلظت خروجی دی اکسید کربن اندازه گیری شده و جریان گاز جهت تخلیه به سمت پمپ خلا می رود. جریان مایع جاذب نیز از پس از خروج از بستر از پایین دستگاه خارج شده و پس از اندازه گیری غلظت آن، جهت نگهداری به طرف مخزن جمع آوری هدایت می شود. آزمایشات در سرعت های مختلف روتور، نرخ های مختلف جریان گاز و مایع و غلظت های متفاوت دی اکسید کربن و محلول جاذب انجام شده است. پس از پایان هر مرحله از آزمایش، غلظت های ورودی و خروجی جریان های گاز و مایع اندازه گیری شده و بر اساس موازنه جرم، مطابق با رابطه شماره (۱)، راندمان جذب محاسبه می شود. که در این رابطه c_i غلظت دی اکسید کربن ورودی، c_o غلظت دی

اکسید کربن خروجی، u_i و u_o به ترتیب سرعت در مقطع ورودی و خروجی گاز، A_i و A_o به ترتیب سطح مقطع ورودی و خروجی گاز و E راندمان جذب است.

$$E = \frac{c_i u_i A_i - c_o u_o A_o}{c_i u_i A_i} \times 100 \quad (1)$$

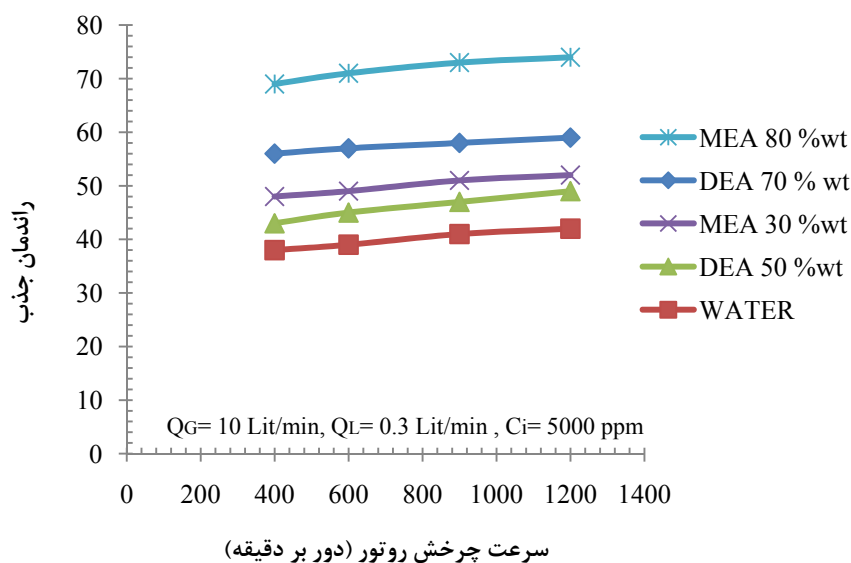
راندمان جذب بر اساس پارامترهای مختلفی مانند سرعت چرخش روتور، نرخ جریان گاز، نرخ جریان مایع و غلظت محلول جاذب بررسی شده است. در جدول شماره (۲) پارامترهای عملیاتی و محدوده تغییرات آن ها مشخص شده است. در جدول (۳) نیز نوع محلول های جاذب استفاده شده با درصد های وزنی مختلف نشان داده شده است.

جدول ۲: پارامترهای عملیاتی و محدوده تغییرات آن ها

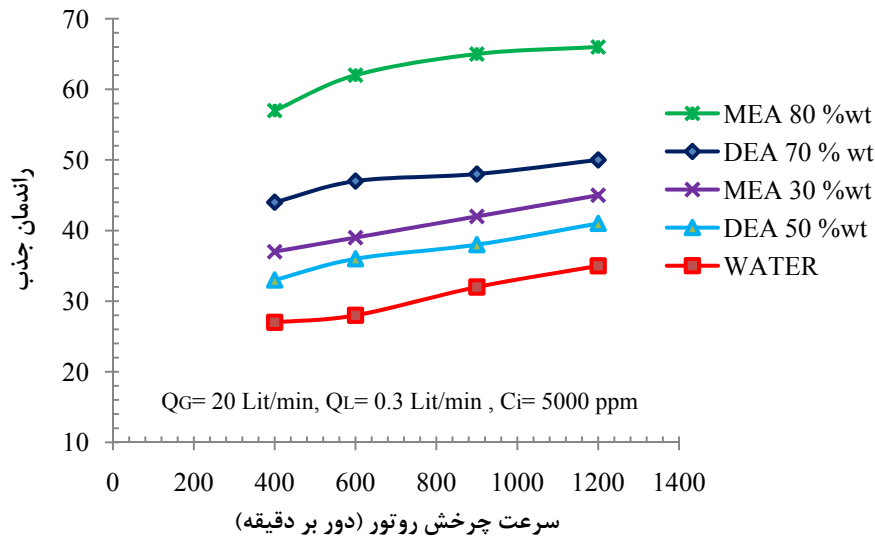
| پارامتر | محدوده تغییرات |
|-----------------|---------------------|
| سرعت چرخش روتور | ۰-۱۲۰۰ دور بر دقیقه |
| دبی جریان مایع | ۰-۰/۴ لیتر بر دقیقه |
| دبی جریان گاز | ۰-۴۰ لیتر بر دقیقه |

جدول ۳: مشخصات محلول های جاذب

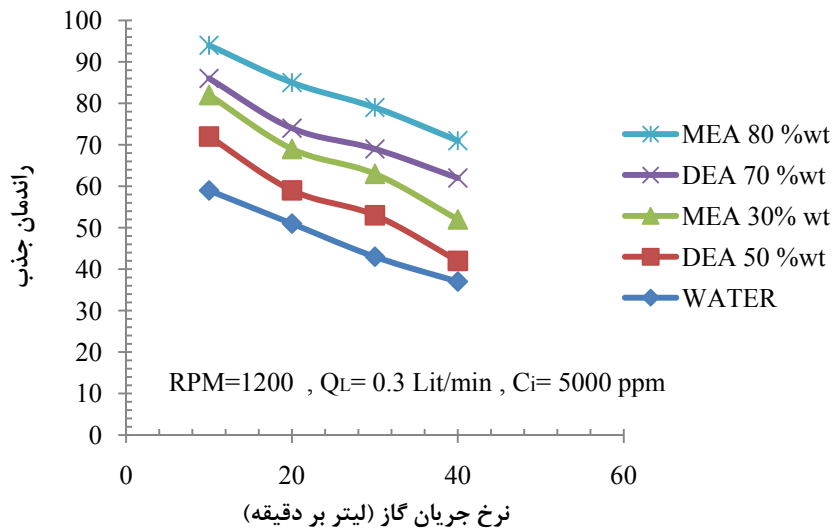
| نوع محلول جاذب | درصد وزنی |
|------------------|-----------|
| آب | ۱۰۰ |
| مونو اتانول آمین | ۳۰ |
| مونو اتانول آمین | ۸۰ |
| دی اتانول آمین | ۵۰ |
| دی اتانول آمین | ۷۰ |



شکل ۵: تغییرات راندمان جذب بر حسب سرعت چرخش روتور در نرخ جریان گاز ۱۰ لیتر بر دقیقه



شکل ۶: تغییرات راندمان جذب بر حسب سرعت چرخش در نرخ جریان گاز ۲۰ لیتر بر دقیقه



شکل ۷: تغییرات راندمان جذب بر حسب نرخ جریان گاز، نرخ جریان مایع ۰.۳ لیتر بر دقیقه

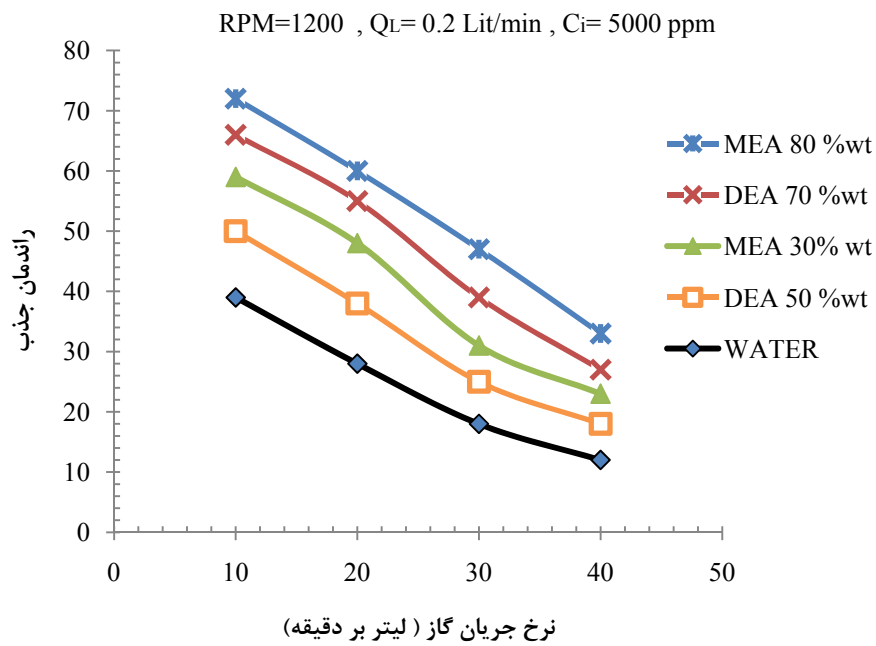
۲-۲-۲- تاثیر نرخ جریان گاز بر راندمان جذب

با افزایش نرخ جریان گاز، راندمان جذب کاهش پیدا می‌کند. در واقع وقتی که جریان گاز ورودی به بستر افزایش می‌یابد، با توجه به اینکه میزان دی اکسید کربن در بستر افزایش یافته است، میزان جذب دی اکسید کربن کاهش پیدا می‌کند. دلیل دیگر این امر کاهش زمان تماس در نرخ بالای جریان گاز است. در شکل (۷) تا (۹) تغییرات راندمان جذب بر حسب نرخ جریان گاز، رسم شده است. با بررسی این شکل ها می توان دریافت که با افزایش جریان گاز هرچه نرخ جریان مایع کاهش پیدا کند، راندمان جذب کاهش می یابد. دلیل این امر کاهش میزان محلول جاذب در تماس با جریان گاز جهت جذب دی اکسید کربن می باشد.

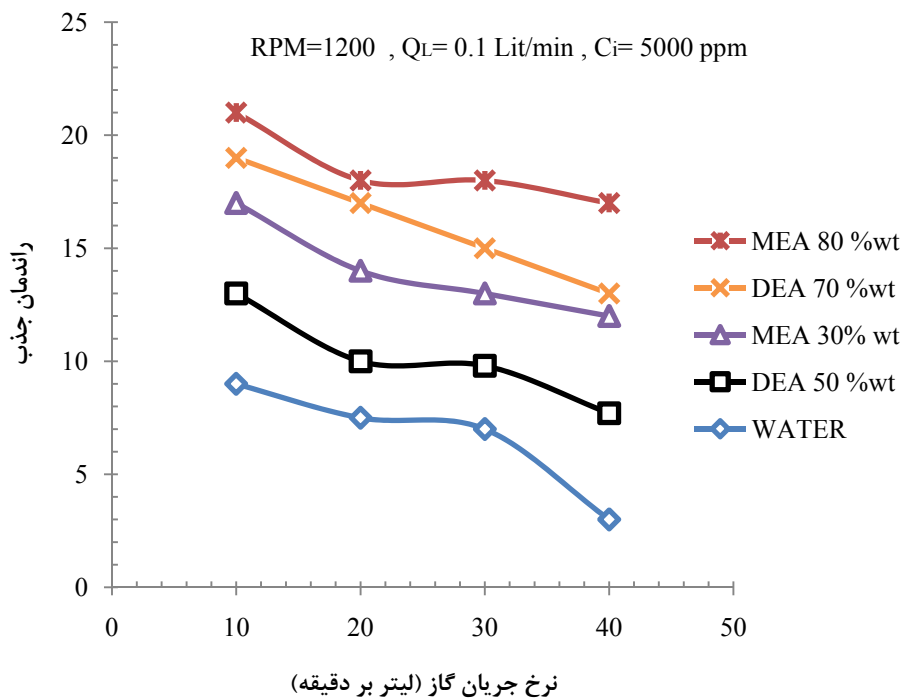
۲-۲-۱- تاثیر سرعت روتور بر راندمان جذب

در شکل (۵) و (۶) تغییرات راندمان جذب بر حسب سرعت چرخش روتور رسم شده است. با افزایش سرعت روتور میزان نیروی گریز از مرکز ایجاد شده افزایش می‌یابد. با بالا رفتن شتاب گریز از مرکز جریان مایع به صورت فیلم نازکی درآمد که این امر انتقال جرم بین فاز گاز و مایع را افزایش داده و سبب افزایش جذب دی اکسید کربن می‌شود. این پدیده به توجه به تئوری رسوخ در انتقال جرم قابل توجیه است. بنابراین با افزایش سرعت روتور راندمان جذب بالا می‌رود.

مدل سازی انتقال جرم در جذب مواد آلی فرار در بستره های آکنده دوار



شکل ۸: تغییرات راندمان جذب بر حسب نرخ جریان گاز، نرخ جریان مایع ۰.۲ لیتر بر دقیقه

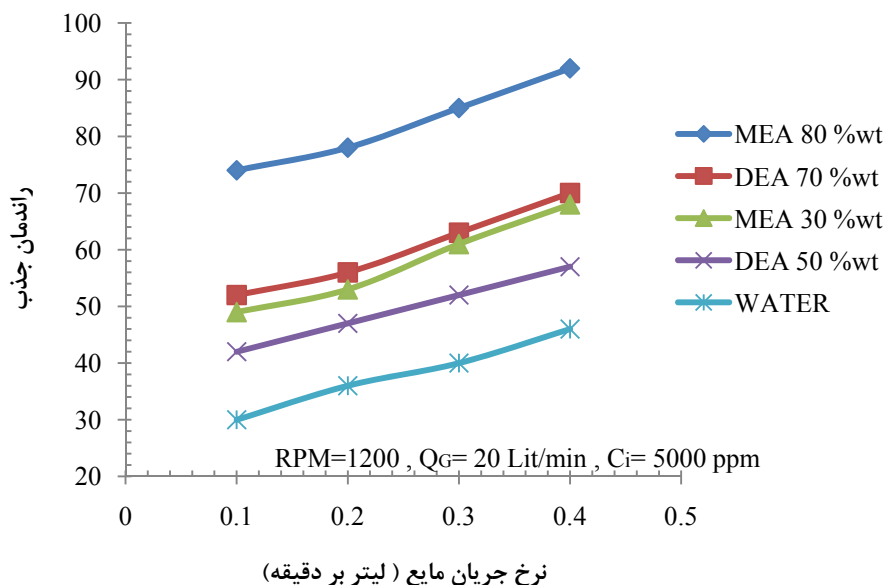


شکل ۹: تغییرات راندمان جذب بر حسب نرخ جریان گاز، نرخ جریان مایع ۰.۱ لیتر بر دقیقه

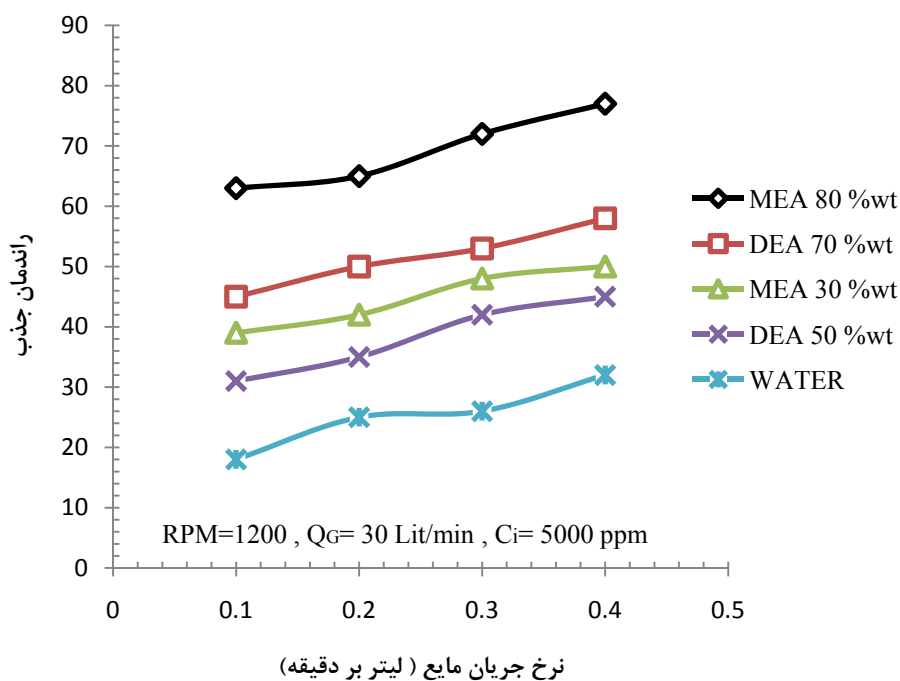
۳-۲-۳- تاثیر نرخ جریان مایع بر راندمان جذب

راندمان جذب دی اکسید کربن با افزایش نرخ جریان مایع افزایش می یابد. دلیل این امر را می توان این طور بیان کرد که افزایش نرخ جریان مایع، مقاومت انتقال جرم مایع و

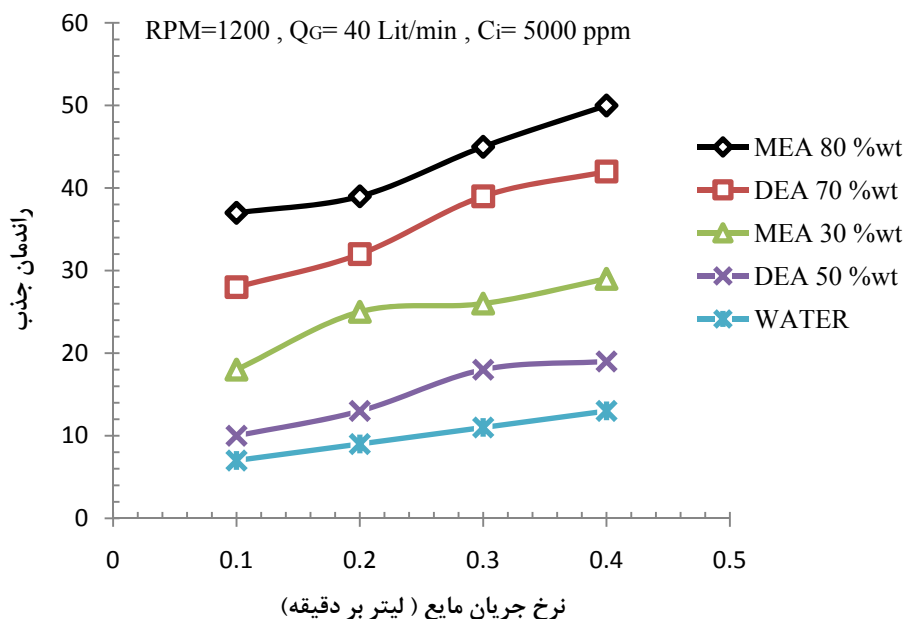
زمان تماس را کاهش داده و سبب افزایش انتقال جرم و جذب بیشتر دی اکسید کربن می شود. در شکل (۱۰) تا (۱۲) تغییرات راندمان جذب بر حسب نرخ جریان مایع رسم شده است.



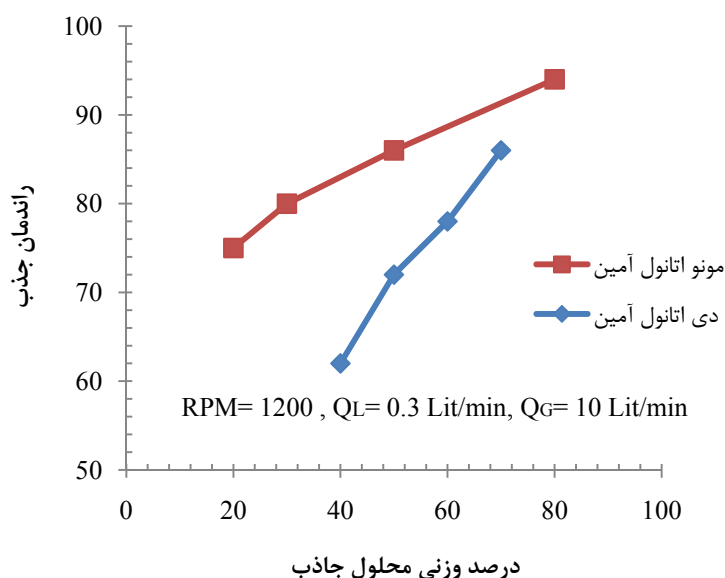
شکل ۱۰: تغییرات راندمان جذب بر حسب نرخ جریان مایع، نرخ جریان گاز ۲۰ لیتر بر دقیقه



شکل ۱۱: تغییرات راندمان جذب بر حسب نرخ جریان مایع، نرخ جریان گاز ۳۰ لیتر بر دقیقه



شکل ۱۲: تغییرات راندمان جذب بر حسب نرخ جریان مایع در نرخ جریان گاز و سرعت چرخش ثابت



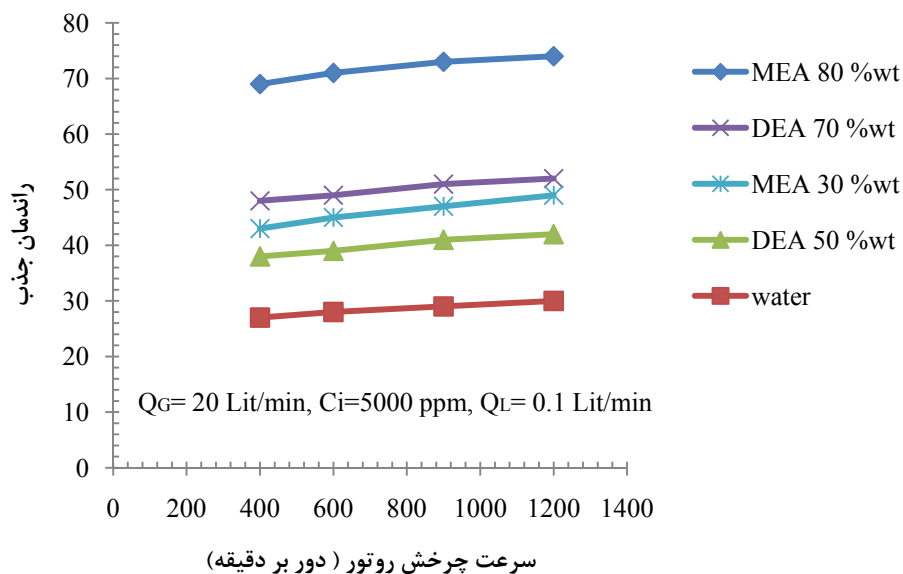
شکل ۱۳: تغییرات راندمان جذب بر حسب غلظت محلول جاذب

۳-۲-۵- تاثیر نوع جاذب بر راندمان جذب

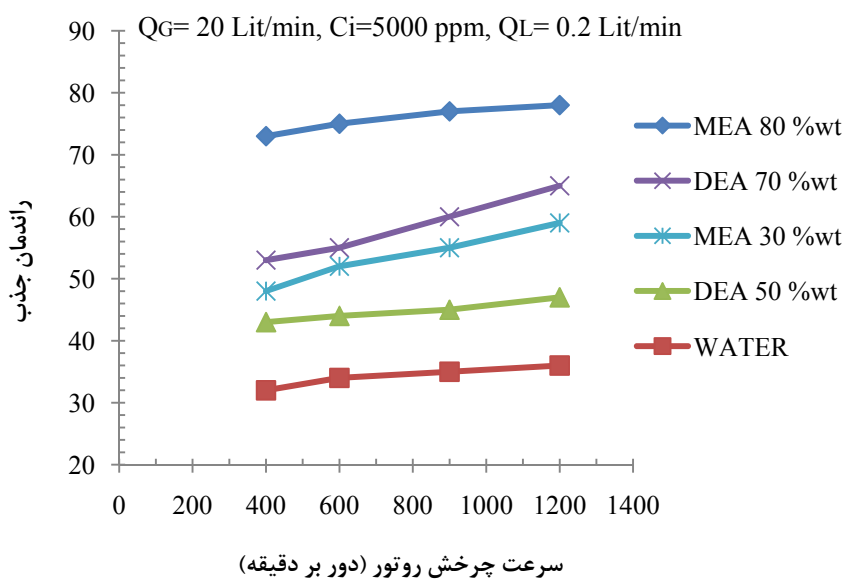
آزمایشات با سه نوع محلول جاذب یعنی آب، مونو اتانول آمین (MEA) و دی اتانول آمین (DEA) انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که راندمان جذب با استفاده از محلول مونو اتانول آمین بیشتر از دی اتانول آمین بوده و برای دی اتانول آمین نیز راندمان جذب بیشتر از آب است. در شکل‌های (۱۴) تا (۱۷) می‌توان تاثیر نوع محلول جاذب را بر راندمان جذب در شرایط مختلف عملیاتی مشاهده کرد.

۳-۲-۴- تاثیر غلظت محلول جاذب بر راندمان جذب

هنگامی که غلظت ماده جاذب درون محلول افزایش پیدا می‌کند، مقدار بیشتری از یون‌های این ماده برای واکنش در جذب دی اکسید کربن وجود دارد، بنابراین مقدار بیشتری دی اکسید کربن جذب شده و راندمان جذب افزایش پیدا می‌کند. در شکل (۱۳) تغییرات راندمان جذب بر حسب غلظت محلول‌های جاذب، رسم شده است.

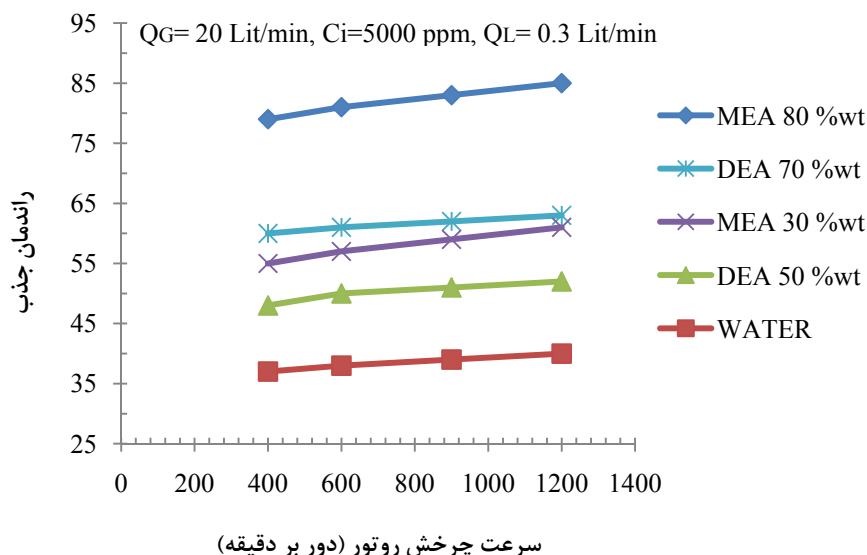


شکل ۱۴: راندمان جذب دی اکسید کربن برای محلول های جاذب مختلف بر حسب سرعت چرخش روتور در نرخ جریان مایع ۰/۱ لیتر بر دقیقه

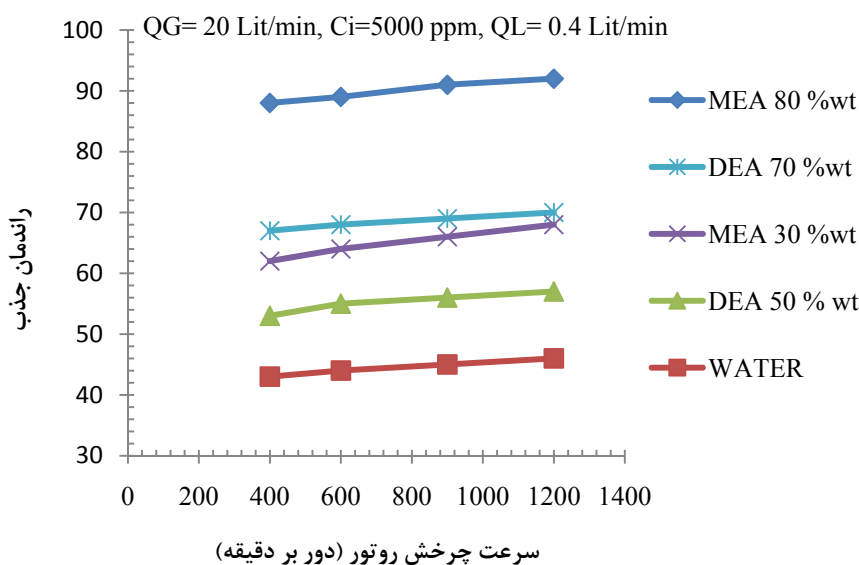


شکل ۱۵: راندمان جذب دی اکسید کربن برای محلول های جاذب مختلف بر حسب سرعت چرخش روتور در نرخ جریان مایع ۰/۲ لیتر بر دقیقه

مدل سازی انتقال جرم در جذب مواد آلی فرار در بستری آکنده دوار



شکل ۱۶: راندمان جذب دی اکسید کربن برای محلول های جاذب مختلف بر حسب سرعت چرخش روتور در نرخ جریان مایع ۰/۳ لیتر بر دقیقه



شکل ۱۷: راندمان جذب دی اکسید کربن برای محلول های جاذب مختلف بر حسب سرعت چرخش روتور در نرخ جریان مایع ۰/۴ لیتر بر دقیقه

آمین های مشابه، دارای بیشترین ظرفیت حمل گاز اسیدی در واحد حجم یا وزن می باشد. این به معنای میزان گردش کمتر محلول برای جداسازی مقدار معینی از دی اکسید کربن است. هستند. در هر حال، به دلیل واکنش پذیری بالاتر مونو اتانول آمین با دی اکسید کربن، نسبت به آب و دی اتانول آمین دارای ظرفیت جذب بالاتری است.

در میان آمین های مختلف، حلال مونو اتانول آمین قوی ترین باز است و بنابراین به سرعت با دی اکسید کربن واکنش می دهد. این حلال با کمترین وزن مولکولی در میان واکنش دی اتانول آمین با دی اکسید کربن آهسته تر از واکنش با مونو اتانول آمین می باشد. محلول های دی اتانول آمین پس از بازیابی دارای مقادیر بسیار کمتری از گازهای اسیدی باقیمانده نسبت به محلول های مونو اتانول آمین

۴- نتیجه گیری

که افزایش جریان مخلوط دی اکسید کربن و هوا، منجر به کاهش راندمان جذب می‌شود. هرچه میزان جریان گاز بیشتر شود میزان غلظت دی اکسید کربن بیشتر شده و لذا راندمان پایین می‌آید. افزایش دبی جریان مایع نشان داد که به دلیل افزایش سطح تماس و کاهش مقاومت در فیلم مایع، راندمان جذب افزایش می‌یابد. با افزایش درصد وزنی محلول‌های جاذب، از آن جا که یون‌های بیشتری از مواد جاذب در حضور با دی اکسید کربن قرار می‌گیرند راندمان جذب افزایش می‌یابد.

علائم اختصاری و نمادها

- A_i : سطح مقطع ورودی جریان گاز (m^2)
 A_0 : سطح مقطع خروجی جریان گاز (m^2)
 C_i : غلظت دی اکسید کربن در جریان گاز ورودی (ppm)
 C_0 : غلظت دی اکسید کربن در جریان گاز خروجی (ppm)
 Q_G : دبی جریان گاز (Lit/min)
 Q_L : دبی جریان مایع (Lit/min)
RPM: سرعت چرخش روتور (دور بر دقیقه)
 u_i : سرعت در مقطع ورودی جریان گاز (m/s)
 u_0 : سرعت در مقطع خروجی جریان گاز (m/s)

مراجع

- [1] Ramshoaw, C.; Mallison, R. H (1981), "Mass Transfer Process". U. S. Patent 4, 383, 255.
- [2] Hugo Lierena-Chavez, Faical Larachi (2009), "Analysis of flow in rotating packed beds via CFD simulations—Dry pressure drop and gas flow maldistribution" *Chemical Engineering. Science*, 64, 2113.
- [3] Wenjing Yang, Yundong Wang, Jianfeng Chen, Weiyang Fei (2010), "Computational fluid dynamic simulation of fluid flow in a rotating packed bed" *Chem. Eng. J.* 156 , 587.
- [4] Yu-Shao Chen and Hwai-Shen Liu (2002), "Absorption of VOCs in a Rotating Packed Bed" *Ind. Eng. Res.* 41, 1588.
- [5] Yu-Shao Chen (2011), "Correlations of Mass Transfer Coefficients in a Rotating Packed Bed" *Ind. Eng. Res.* 50, 1785.
- [6] Chiang, C. Y.; Chen, Y. S.; Liang, M. S.; Lin, F. Y.; Tai, C. Y.; Liu, H. S. J. Taiwan (2009), "Absorption of ethanol into water and glycol/water solution in a rotating packed bed" *Ind. Chem. Engrs.* 40, 418.
- [7] Chen, Y. S.; Lin, C. C.; Liu, H. S (2005), "Mass Transfer in a Rotating Packed Bed with Viscous Newtonian and Non-Newtonian Fluids" *Ind. Eng. Chem. Res.* 44, 1043.

فرآیند انتقال جرم در بسترهای آکنده با افزایش میدان گرانشی تشدید می‌شود، این بسترها بستر آکنده دوار نامیده می‌شوند. در بسترهای آکنده دوار، انتقال جرم با هیدرودینامیک فاز گاز و مایع، سرعت دوران و پارامترهای هندسی آکنه تحت تاثیر قرار می‌گیرد. هدف اصلی این مطالعه، سنجش توانایی دستگاه بستر آکنده دوار در جذب دی اکسید کربن از مخلوط‌های گازی بود. برای این منظور با ساخت دستگاه بستر آکنده دوار، جذب دی اکسید کربن از هوا با استفاده از محلول‌های جاذب MEA (با درصدهای وزنی ۳۰ و ۸۰) و DEA (با درصدهای وزنی ۵۰ و ۷۰) و آب خالص مورد مطالعه قرار گرفت و نقش پارامترهایی مانند نرخ جریان گاز و مایع، سرعت چرخش روتور و غلظت محلول جاذب مورد بررسی قرار گرفت. آزمایشات هیدرودینامیک برای بررسی الگوی جریان و تغییرات افت فشار خشک و مرطوب در بستر آکنده دوار انجام شد و نتایج نشان داد که افزایش دبی جریان‌های گاز و مایع سبب افزایش افت فشار می‌گردد. با افزایش نرخ جریان گاز و مایع، افت فشار افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت روتور افت فشار مرطوب کاهش می‌یابد، زیرا افزایش سرعت روتور، ماندگی مایع را کاهش می‌دهد و سبب کم شدن افت فشار می‌شود. در واقع با افزایش جریان مایع، مسیر عبور گاز کمتر شده و گاز برای عبور از بستر آکنده نیاز به فشار بیشتری دارد. انباشته شدن مایع در بستر، سطح مقطع موجود برای عبور گاز کاهش می‌یابد و در نتیجه باعث افزایش افت فشار می‌گردد. این پدیده را انباشتگی مایع می‌گویند. با افزایش بیشتر دبی گاز و یا مایع، تغییرات افت فشار فوق‌العاده زیاد می‌شود که معرف پدیده‌ی طغیان است. مسئله‌ی افت فشار از لحاظ دیگری نیز قابل توجه است، اگر افت فشار گاز زیاد باشد توان لازم برای ورود و خروج گاز از سیستم زیاد خواهد شد و در نتیجه هزینه‌ی عملیاتی دستگاه بالا خواهد رفت. آزمایشات جذب دی اکسید کربن از هوا با استفاده از آب خالص و محلول‌های مونو اتانول آمین با درصدهای وزنی ۳۰ و ۸۰ و محلول‌های دی اتانول آمین با درصدهای وزنی ۵۰ و ۷۰ انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت چرخش روتور، راندمان جذب افزایش می‌یابد. در واقع افزایش سرعت روتور منجر به ایجاد لایه‌های نازک و قطرات ریزی از مایع می‌شود که سطح تماس زیادی را جهت جذب دی اکسید کربن ایجاد می‌کنند و از این طریق راندمان جذب بالا می‌رود. نتایج برای افزایش دبی جریان گاز نشان داد

- [12] Nascimento, J. V. S., Ravagnani, T. M. K., & Pereira, J. A. F. R. (2009). Experimental study of a rotating packed bed distillation column. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 26(1), 219-226.
- [13] Chia-Chang Lin and Wen-Tzong Liu (2007) , "Mass Transfer Characteristics of a High-voidage Rotating Packed Bed", *Ind. Eng. Chem.* 1, 78.
- [14] Yi, F., Zou, H. K., Chu, G. W., Shao, L., & Chen, J. F. (2009). Modeling and experimental studies on absorption of CO₂ by Benfield solution in rotating packed bed. *Chemical Engineering Journal*, 145(3), 377-384.
- [15] Chia-Chang Lin, Bor-Chi Chen (2008), "Characteristics of cross-flow rotating packed beds" *J. Ind. Eng. Chem.* 14, 327.
- [8] Yu-Shao, Chen, Yi-Chun Hsu, Chian-Chang Lin, Clifford Yi-Der Tai, and Hwai-Shen Liu (2008), "Volatile Organic Compounds Absorption in a Cross-Flow Rotating Packed Bed" *Environ. Sci. Technol.* 42, 2636.
- [9] Yu-Shao Chen, Hwai-Shen Liu, Chia-Chang Lin and Wen-Tzong Liu (2004), "micromixing in a rotating packed bed" *J. Chem. Eng. Japan*, 9, 1128.
- [10] Chia-Chang Lin, Yu-Shao Chen, and Hwai-Shen Liu (2004) "Adsorption of dodecane from water in a rotating packed bed", *J. Chin. Inst. Chem. Engrs.* 5, 538.
- [11] Lin, C. C.; Wei, T. Y.; Hsu, S. K.; Liu, W. T (2006), "Performance of a pilot-scale cross-flow rotating packed bed in removing VOCs from waste gas streams", *Sep. Purif. Technol.* 52, 274-279.

Experimental Study of Carbon Dioxide Absorption from Air Stream in Rotating Packed Bed

Mahmood Reza Rahimi^{1,*}, Hajir Karimi¹, Soleiman Mosleh¹

1. Process Intensification Laboratory, School of Engineering, Chemical Engineering Department, Yasuj University
(mrrahimi@mail.yu.ac.ir), (hakar@mail.yu.ac.ir), (soleiman.mosleh@yahoo.com)

ABSTRACT

In this study the absorption of carbon dioxide from an air stream has been investigated in rotating packed bed. At first, hydrodynamics experiments have been done to determine the flow pattern and pressure drop at two cases, single phase and two phase flow. Then, absorption experiments have been done by using water, MEA and DEA solution with different weight percent. The effect of parameters such as rotational speed, gas and liquid flow rate, type and concentration of solution on absorption efficiency investigated. Results showed that increasing of rotational speed, liquid flow rate and solution concentration increases absorption efficiency. In contrast, increasing in gas flow rate leads to decreases in efficiency. Hydrodynamics analysis showed that pressure drop increases by liquid and gas flow rates.

ARTICLE INFO

Article history

Received: Oct. 01, 2012

Revised: June 25, 2013

Accepted: Sept. 08, 2013

Key words:

Rotating Packed Bed
Carbon Dioxide Absorption
Experimental Study
Absorption
Hydrodynamics

All right reserved.

* Corresponding author