

مطالعه تجربی تعداد واحد انتقال و ارتفاع واحد انتقال در بستر آکنده دوار و بستر پر شده معمولی

فریبا زارعی^۱، محمود رضا رحیمی*^۲، سلیمان مصلح^۳

۱. کارشناسی ارشد گروه مهندسی شیمی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران
۲. دانشیار گروه مهندسی شیمی، آزمایشگاه تحقیقاتی تشدید فرآیندها، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران
۳. دانشجوی دکتری گروه مهندسی شیمی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

مشخصات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: دریافت: ۱۵ فروردین ۹۵ دریافت پس از اصلاح: ۱۳ دی ۹۵ پذیرش نهایی: ۱۹ بهمن ۹۵	میزان ابعاد بهینه بسترهای پر شده به شدت تحت تاثیر تعداد و ارتفاع واحد انتقال است. با توجه به ضعف‌های موجود در بررسی دو کمیت فوق در بسترهای آکنده دوار، در این مطالعه با بهره‌گیری از سیستم‌های مختلف از جمله CO_2 -MDEA، CO_2 -MEA، CO_2 -AMP، CO_2 -PZ، CO_2 -NaOH و همچنین جذب ترکیبات آلی فرار نظیر ایزوپروپیل الکل، استن، اتیل استات، متانول، ایزو بوتانول و اتانول، ارتفاع و تعداد واحد انتقال در بستر پر شده معمولی و بستر آکنده دوار بررسی شد. در این راستا، نوع آکنه مورد استفاده، ابعاد فیزیکی بخش پر شده و نوع تماس دو جریان به عنوان پارامترهای موثر مورد ارزیابی در نظر گرفته شد. نتایج بدست آمده، بر خلاف تصور مرسوم، به وضوح حاکی از تابعیت قوی ابعاد بهینه سیستم از پارامترهای مورد بررسی بود. همچنین، مقایسه نتایج اندازه‌گیری شده از این دو سیستم عملکرد مطلوب‌تر بستر آکنده دوار نسبت به بسترهای آکنده معمولی (در کاهش ابعاد سیستم و ارائه بازدهی بالاتر) را نشان داد.
کلمات کلیدی: بستر آکنده دوار ارتفاع واحد انتقال تعداد واحد انتقال بستر پر شده	
* عهده دار مکاتبات mrrahimi@yu.ac.ir	حقوق ناشر محفوظ است.

۱- مقدمه

استفاده از بسترهای پر شده در فرآیندهای مختلف جداسازی سابقه‌ای طولانی دارد. ویژگی‌هایی نظیر دارا بودن سطح تبادل جرم بالا توام با افزایش زمان تماس دو فاز، کاهش افت فشار، کاهش محدوده مربوط به طغیان و حمل مایع، موجب تمایز و برتری این تجهیزات نسبت به سایر روش‌های جداسازی شده است. با این حال، اعمال نیروی دورانی به بخش پر شده موجب کاهش قابل ملاحظه ابعاد فاز پراکنده و در نتیجه دست یابی به بازده بالاتر می‌شود. این ایده برای اولین بار توسط رامشاو و ملیسون مطرح شد و در سال ۱۹۸۱ طراحی و مورد آزمایش قرار گرفت [۱]. این سیستم امروزه تحت عنوان بسترهای آکنده دوار جایگاه درخور توجهی در فرآیندهای مختلف صنعتی نظیر عریان‌سازی [۲-۴]، جذب [۵-۸]، تقطیر [۹-۱۱]، جذب سطحی [۱۲] و واجذب [۱۳، ۱۴] پیدا کرده است. در این میان، حساسیت قابل توجه این سیستم از ابعاد فیزیکی بخش پر شده غیر قابل انکار است. همین امر لزوم اهمیت پیش‌بینی مناسب دو فاکتور تعداد و ارتفاع واحدهای انتقال مورد نیاز را نشان می‌دهد. بنابراین، لزوم تعریف و بررسی دقیق و شفاف‌سازی پارامترهای عملیاتی موثر بر این دو فاکتور کاملا روشن است. با این حال، با وجود اهمیت پیش‌بینی دقیق تعداد و ارتفاع واحدهای انتقال در طراحی و تعیین میزان بازده و ابعاد بهینه سیستم‌های شامل بخش پر شده، مطالعات صورت گرفته در این حوزه، به ویژه در سیستم بستر آکنده دوار، بسیار محدود می‌باشد.

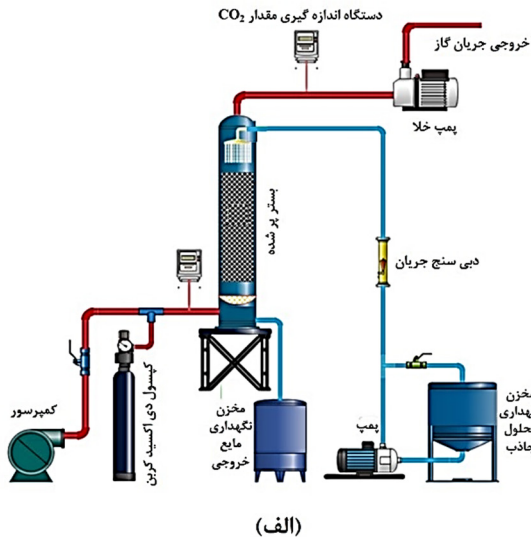
لی و لیو در سال ۲۰۱۰ با بهره‌گیری از بستر آکنده دوار با جریان متقابل حاوی آکنه‌های تیغه‌ای دست به مطالعاتی زدند. آن‌ها با استفاده از سیستم اتانول-آب، اثر پذیری تعداد واحدهای انتقال از ضریب گرانشی متوسط، نسبت فلاکس مایع و همچنین فلاکس خوراک ورودی را بررسی کردند [۱۵]. بعلاوه، بررسی ارتفاع واحدهای انتقال مربوط به حذف ترکیبات آلی فرار نظیر بوتانول و متانول از جریان گازی با استفاده از آب، توسط لین و تعدادی از همکارانش در سال ۲۰۱۰ صورت گرفت [۱۶]. آن‌ها با بهره‌گیری از بستر آکنده‌ی دوار شامل آکنه‌های تیغه‌ای، تاثیر سرعت چرخش بستر و نرخ جریان دو فاز ورودی بر میزان ارتفاع واحد انتقال را نشان دادند. مطالعات صورت گرفته توسط این گروه از محققان حاکی از رابطه‌ی معکوس میان این پارامتر با سرعت چرخش بستر و شدت جریان مایع ورودی و همچنین رابطه‌ی مستقیم آن با نرخ جریان گاز بود. علاوه بر این، تاثیر پارامترهای سرعت چرخش

بستر و همچنین شدت جریان دو فاز ورودی، بر میزان ارتفاع واحد انتقال با استفاده از دو نوع متفاوت از آکنه، توسط رحیمی و مصلح در سال ۲۰۱۵ بررسی شد [۱۷]. بررسی‌های صورت گرفته حاکی از بیشتر بودن ارتفاع واحد انتقال بدست آمده مربوط به آکنه‌های آلومینیومی نسبت به آکنه‌های ساخته شده از جنس استیل ضد زنگ بود. با این وجود، عدم بررسی اثرپذیری فاکتورهای تعداد واحد انتقال و ارتفاع واحد انتقال از وضعیت تماس بین جریان‌ها و نوع فرآیند مورد استفاده در سیستم و همچنین نوع آکنه بکار برده شده در بخش پر شده، خود شاهده‌ی بر ناکارآمدی و عدم جامعیت مطالعات صورت گرفته است. در این پژوهش ضمن بهره‌گیری از مجموعه‌های مختلف از نتایج تجربی گزارش شده توسط سایر محققین [۱۸-۲۵] اثر پذیری تعداد و ارتفاع واحد انتقال از فاکتورهای متعددی نظیر وضعیت تماس دو جریان، نوع آکنه مورد استفاده، ضخامت و ارتفاع بخش پر شده، نوع فرآیند حاک در سیستم، سرعت چرخش بستر و شدت جریان دو فاز ورودی به عنوان متغیرهای عملیاتی، مورد مطالعه قرار گرفت که نتایج بدست آمده به وضوح حاکی از تاثیر قابل توجه پارامترهای ذکر شده بر مقدار دو فاکتور مطالعاتی بود. بنابراین، لزوم مطالعه جامع تمامی پارامترهای موثر، جهت دستیابی به میزان بهینه فاکتورهای طراحی ذکر شده، حائز اهمیت است که این امر با توجه به حساسیت قابل ملاحظه بسترهای آکنده دوار نسبت به ابعاد فیزیکی بخش پر شده، واضح است. همچنین در این مطالعه، بازده عملیاتی بسترهای آکنده دوار نسبت به برج‌های پر شده معمولی، مورد مقایسه گرفت که ارزیابی نهایی صورت گرفته بر اساس این نتایج تاییدی بر مطلوبیت بیشتر عملکرد بسترهای آکنده دوار نسبت به برج‌های پر شده معمولی است.

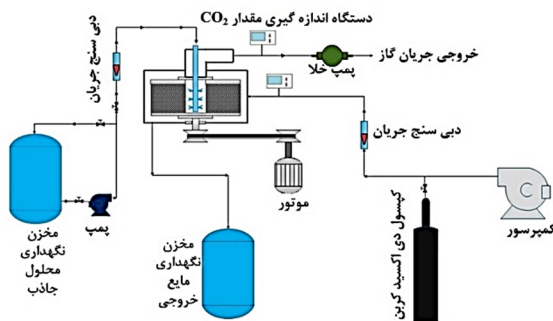
۲- روش تجربی

۲-۱- سیستم آزمایشگاهی

شکل (۱) نشان دهنده سیستم آزمایشگاهی مربوط به بستر آکنده دوار و بستر پر شده نامنظم است. این دو سیستم در تعیین بخشی از نتایج تجربی اندازه‌گیری شده مربوط به اندازه ارتفاع و تعداد واحد انتقال، بکار گرفته شدند. سیستم اول بستر آکنده دواری با جریان متقابل به شعاع داخلی ۳ سانتیمتر، شعاع خارجی ۶ سانتیمتر و ارتفاع ۴ سانتیمتر بود که با استفاده از آکنه‌هایی موسوم به شبکه توری بافته شده از جنس استیل ضد زنگ با میزان تخلخل ۰/۹ و سطح ۱۴۰۰ (یک بر متر) تجهیز شده بود. همچنین سیستم دوم بستر پر



(الف)



(ب)

شکل (۱): نمای کلی سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده. (الف) بستر پر شده معمولی، (ب) بستر آکنده دوار

جریان‌های ورودی) بر مقادیر مربوط به هر دو فاکتور مورد بحث است، بنابراین اندازه تعداد و ارتفاع واحدهای انتقال مورد نیاز به ازای میزان جذب مشخص (مقادیر گزارش شده در مراجع استفاده شده و همچنین مقادیر درصد جذب اندازه‌گیری شده با بهره‌گیری از سیستم آزمایشگاهی بستر آکنده دوار و بستر پر شده نامنظم) با بکارگیری روابط ۱ تا ۴ محاسبه، گزارش و مورد بررسی قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

با توجه به اهمیت بررسی بستر آکنده دوار در این پژوهش، در بخش نخست تحلیلی بر بخشی از داده‌های منتشر شده در پژوهش‌های انجام گرفته در این حوزه ارائه شد. برای نمایش کیفی اطلاعات منتشر شده توسط سایر محققین، از داده‌های مراجع [۶ و ۲۱] استفاده شد و کمیت‌های موجود در جداول (۱) تا (۳) استخراج و پارامترهای مطالعاتی محاسبه شد. تابعیت تعداد و ارتفاع واحد انتقال از نوع فرآیند حاکم در

شده نامنظم شامل آکنه‌های ۰/۵ اینچی راشینگ رینگ با میزان تخلخل ۰/۶۷ و مساحت سطح ۳۶۰ (یک بر متر) بود که در بستری به قطر ۸ سانتیمتر و در دو ارتفاع ۳۰ سانتی متر قرار گرفت. در نهایت، آزمایش‌های مورد نظر با هدف اندازه‌گیری میزان درصد جذب CO₂ با استفاده از محلول جاذب ۱ مولار سدیم هیدروکسید، در هر دو سیستم انجام شد. پیش از انجام آزمایشات جذب، آزمایشات هیدرودینامیکی به منظور تعیین محدوده شدت جریان دو فاز ورودی و سرعت چرخش بستر (در بستر آکنده دوار) انجام گرفت. میزان درصد جذب اندازه‌گیری شده در هر دو سیستم در نهایت با استفاده از روابط ارائه شده در بخش تئوری بصورت پارامترهای مورد بحث (ارتفاع واحد انتقال و تعداد واحد انتقال) محاسبه و مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج اندازه‌گیری شده از دو سیستم تشریح شده، با هدف مقایسه عملکرد بسترهای آکنده دوار و بسترهای پر شده نامنظم (جدول ۴) گزارش شد و نتایج حاصله به ازای مقادیر یکسان از سایر پارامترهای موثر (نوع و شدت جریان دو فاز ورودی به سیستم جداساز) تعیین و پس از انجام محاسبات مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

۲-۲- روابط تئوری

ارتفاع واحد انتقال یکی از پارامترهای مهم در طراحی سیستم‌های شامل بخش پر شده است که رابطه عمومی این کمیت در تمامی مراجع علمی بصورت نسبت سرعت ظاهری جریان گاز در بستر به ضریب کلی انتقال جرم است. همچنین، رابطه ضریب کلی انتقال جرم فاز گاز، مطابق با موازنه جرم انجام شده در بسترهای پر شده بصورت زیر است:

$$K_G a = \frac{G}{\pi(R_o^2 - R_i^2)Z} \ln\left(\frac{C_i}{C_o}\right) \quad (1)$$

که در نتیجه‌ی آن میزان ارتفاع واحد انتقال مطابق با رابطه ۲ است [۲۶ و ۲۷]:

$$HTU_G = \frac{V_G}{K_G a} \quad (2)$$

بعلاوه، رابطه‌ی مربوط به تعیین تعداد واحد انتقال از مقایسه رابطه (۱) و معادله ارائه شده توسط جاسیم و همکارانش [۲۷] بطور تجربی و مطابق با رابطه‌ی (۴) است.

$$K_G a = \frac{G}{\pi(R_o^2 - R_i^2)Z} NTU_G \quad (3)$$

$$NTU_G = \ln\left(\frac{C_i}{C_o}\right) \quad (4)$$

از آنجایی که روابط فوق نشان دهنده تاثیر تمامی پارامترهای در نظر گرفته شده (نوع و ابعاد آکنه‌های استفاده شده و همچنین نوع تماس دو فاز، سرعت چرخش بستر و نرخ

خارجی ۶/۲۵ سانتیمتر و ارتفاع ۲/۹۵ سانتیمتر شامل آکنه- های تیغه‌ای، بدست آمد. بعلاوه، هم‌خوانی روند تغییرات مربوط به تعداد و ارتفاع واحد انتقال در هر تست موجود در جداول ارائه شده، از دیگر نکات مورد توجه بود که این امر در نتیجه نزدیکی مفاهیم مربوط به تعریف این دو پارامتر کلیدی است. همچنین میزان ارتفاع و تعداد واحد انتقال بدست آمده با استفاده از نتایج تجربی گزارش شده توسط چن و تن [۱۸] در جدول (۳) ارائه شد. این نتایج که مربوط به فرآیند جذب کربن دی اکسید با استفاده از محلول‌های آبی ۰٫۷ مولار PZ و ۱ مولار AMP و MEA و MDEA است، با استفاده از بستری به شعاع داخلی ۷/۶ سانتی متر، شعاع خارجی ۱۶ سانتی متر و ارتفاع ۲ سانتی متر، با جریان‌های متقابل و آکنه‌های توری بافته شده بدست آمد.

همانطور که نشان داده شد، روند تغییرات بطور کامل با قابلیت هر یک از محلول‌های جاذب مصرفی در جذب کربن دی اکسید از جریان هوای در تماس با فاز مایع، مطابقت داشت. بطوریکه در اثر افزایش پتانسیل جذب محلول جاذب، ارتفاع واحد انتقال معادل، بیشتر شد. به عبارتی با سیستمی با ابعاد کوچکتر امکان دستیابی به همان میزان بازدهی فراهم شد. پس از آن تاثیر نوع آکنه‌ی مورد استفاده در بخش پر شده، به واسطه‌ی مطالعه‌ی صورت گرفته بر روی نتایج تجربی گزارش شده توسط چن [۶] و همچنین نتایج حاصل از مطالعات انجام شده توسط لین [۲۱] (شکل‌های ۲ و ۳) نشان داده شد.

سیستم از مهم‌ترین ارزیابی‌های صورت گرفته در این مطالعه بود. در این راستا، جداول (۱) و (۲) با هدف بررسی تاثیر نوع دو فاز درگیر در فرآیند بر فاکتورهای مورد بحث ارائه شد. این جداول نشان دهنده اثر پذیری هر دو فاکتور ذکر شده از نوع جاذب استفاده شده (در ازای نوع سیستم، شدت جریان و غلظت یکسان از دو فاز ورودی و همچنین مقادیر مشابه سرعت چرخش بستر) است.

تحلیل این نتایج نشان داد که مقدار ضریب نفوذ و میزان حلالیت و ثابت هنری مربوط به هر یک از دو فاز به میزان قابل ملاحظه‌ای بر فاکتورهای ذکر شده تاثیرگذار است، بطوریکه بیشتر بودن این مقادیر، در نهایت منجر به افزایش اندازه‌ی ارتفاع واحد انتقال و به دنبال آن کاهش تعداد واحد انتقال و ابعاد سیستم شد. به عبارت دیگر، در اثر افزایش میزان ثابت هنری و ضریب حلالیت ترکیب مورد نظر، میزان بازدهی فرآیند افزایش یافت و به دنبال آن ضریب کلی انتقال جرم فاز گاز بیشتر شد. بنابراین، این تغییرات در نهایت منجر به کاهش حجم و ضخامت مورد نیاز بخش پر شده (جهت دستیابی به میزان مشخصی از جداسازی) شد. علاوه بر این، بررسی نتایج تجربی گزارش شده توسط لین و همکارانش [۲۱ و ۱۶] نیز این روند را تایید کرد. بالاتر بودن میزان حلالیت اتانول و متانول به ترتیب در جداول (۱) و (۲) تغییرات مشاهده شده را بطور کامل تبیین کرد. نتایج تجربی گزارش شده در این جداول با استفاده از بستری به شعاع داخلی ۱/۹۵ سانتیمتر، شعاع

جدول (۱): تعداد واحد انتقال و ارتفاع واحد انتقال محاسبه شده برای سیستم جذب اتانول، استن و اتیل استات در آب

مرجع	اتیل استات		استن		اتانول		دور موتور (دور بر دقیقه)	دبی جریان گاز (لیتر بر دقیقه)	دبی جریان مایع (لیتر بر دقیقه)
	تعداد واحد انتقال	ارتفاع واحد انتقال (متر)	تعداد واحد انتقال	ارتفاع واحد انتقال (متر)	تعداد واحد انتقال	ارتفاع واحد انتقال (متر)			
لین و همکاران ۲۰۰۸ [۲۱]	۰/۳۵۲۹	۰/۱۲۱۸	۱/۲۳۵۲	۰/۰۳۴۸	۱/۵۸۸۱	۰/۰۲۷۱	۶۰۰	۲۰	۰/۱۴
	۰/۴۸۵۲	۰/۰۸۸۶	۱/۳۲۳۴	۰/۰۳۲۵	۱/۸۰۸۷	۰/۰۲۳۸	۱۰۰۰	۲۰	۰/۱۴
	۰/۷۰۵۸	۰/۰۶۰۹	۱/۴۵۵۷	۰/۰۲۹۵	۱/۹۴۱۱	۰/۰۲۲۲	۱۴۰۰	۲۰	۰/۱۴
	۰/۷۴۹۹	۰/۰۵۷۳	۱/۴۹۹۸	۰/۰۲۸۷	۲/۱۶۱۶	۰/۰۱۹۹	۱۸۰۰	۲۰	۰/۱۴
	۱/۱۴۶۹	۰/۰۰۸۷	۱/۸۹۶۹	۰/۰۰۵۳	۲/۳۸۲۲	۰/۰۰۴۲	۶۰۰	۲۰	۰/۶۵
	۱/۳۲۳۴	۰/۰۰۷۶	۱/۹۴۱۰	۰/۰۰۵۱	۲/۵۱۴۵	۰/۰۰۳۹	۱۰۰۰	۲۰	۰/۶۵
	۱/۴۱۱۶	۰/۰۰۷۱	۲/۱۶۱۶	۰/۰۰۴۶	۲/۶۰۲۷	۰/۰۰۳۸	۱۴۰۰	۲۰	۰/۶۵
	۱/۵۸۸۱	۰/۰۰۶۳	۲/۳۳۸۱	۰/۰۰۴۳	۲/۹۵۵۶	۰/۰۰۳۴	۱۸۰۰	۲۰	۰/۶۵
	۰/۳۱۷۶	۰/۰۳۱۴	۰/۹۱۷۶	۰/۰۱۰۹	۱/۲۱۷۶	۰/۰۰۸۲	۶۰۰	۵۰	۰/۱۴
	۰/۲۹۹۹	۰/۰۳۳۳	۱/۰۴۱۱	۰/۰۰۹۶	۱/۳۷۶۴	۰/۰۰۷۳	۱۰۰۰	۵۰	۰/۱۴
	۰/۴۵۸۷	۰/۰۲۱۷	۱/۰۷۶۴	۰/۰۰۹۳	۱/۵۵۳۰	۰/۰۰۶۵	۱۴۰۰	۵۰	۰/۱۴
	۰/۵۸۲۳	۰/۰۱۷۱	۱/۱۹۹۹	۰/۰۰۸۳	۱/۶۴۱۱	۰/۰۰۶۱	۱۸۰۰	۵۰	۰/۱۴

مطالعه تجربی تعداد و ارتفاع واحد انتقال در بستر آکنده دوار و بستر پر شده معمولی

جدول (۲): ارتفاع واحد انتقال و تعداد واحد انتقال محاسبه شده برای سیستم جذب متانول و بوتانول در آب

مرجع	متانول		بوتانول		دبی جریان گاز (لیتر بر دقیقه)	دبی جریان مایع (لیتر بر دقیقه)
	تعداد واحد انتقال	ارتفاع واحد انتقال (متر)	تعداد واحد انتقال	ارتفاع واحد انتقال (متر)		
لین و همکاران ۲۰۱۰ [۱۶]	۰/۰۲۴۴	۱/۷۶۴۶	۰/۰۴۸۷	۰/۸۸۲۳	۲۲	۰/۱۶۵
	۰/۰۱۹۹	۱/۱۶۵۶	۰/۰۳۸۳	۱/۱۲۲۹	۲۲	۰/۱۶۵
	۰/۰۱۷۹	۲/۴۰۶۲	۰/۰۳۳۵	۱/۲۸۳۳	۲۲	۰/۱۶۵
	۰/۰۱۶۳	۲/۶۴۶۸	۰/۰۳۲۵	۱/۳۲۳۴	۲۲	۰/۱۶۵
	۰/۰۲۹۸	۱/۴۴۳۷	۰/۰۶۳۸	۰/۶۷۳۷	۵۵	۰/۱۶۵
	۰/۰۲۷۷	۱/۵۵۶۰	۰/۰۶۰۹	۰/۷۰۵۸	۵۵	۰/۱۶۵
	۰/۰۲۶۳	۱/۶۳۶۲	۰/۰۵۹۵	۰/۷۲۱۹	۵۵	۰/۱۶۵
	۰/۰۲۰۷	۲/۰۸۵۴	۰/۰۴۷۹	۰/۸۹۸۳	۵۵	۰/۱۶۵
	۰/۰۱۴۷	۲/۹۴۰۹	۰/۰۳۶۶	۱/۱۷۶۴	۶	۰/۱۶۵
	۰/۰۲۵۴	۱/۶۹۶۷	۰/۰۵۷۶	۰/۷۴۶۶	۳۹	۰/۱۶۵
	۰/۰۱۴۰	۳/۰۸۸۰	۰/۰۲۶۶	۱/۶۱۷۵	۶	۰/۱۶۵
	۰/۰۱۸۱	۲/۳۷۵۴	۰/۰۴۷۵	۰/۹۰۴۹	۳۹	۰/۱۶۵
	۰/۰۴۴۷	۰/۹۶۲۵	۰/۱۰۷۲	۰/۴۰۱۰	۵۵	۰/۱۴
	۰/۰۴۱۲	۱/۰۴۲۷	۰/۰۷۰۵	۰/۶۰۹۶	۵۵	۰/۲۴
	۰/۰۳۳۵	۱/۲۸۳۳	۰/۰۶۷۰	۰/۶۴۱۷	۵۵	۰/۴۵
	۰/۰۳۱۹	۱/۳۴۷۵	۰/۰۷۴۵	۰/۵۷۷۵	۵۵	۰/۱۴
۰/۰۲۷۹	۱/۵۳۹۹	۰/۰۶۵۴	۰/۶۵۷۷	۵۵	۰/۲۴	
۰/۰۲۶۳	۱/۶۳۶۳	۰/۰۵۴۷	۰/۷۸۶۰	۵۵	۰/۴۵	

جدول (۳) تغییرات ارتفاع واحد انتقال و تعداد واحد انتقال محاسبه شده برای سیستم جذب کربن دی اکسید در هوا به کسر مولی ۱۰ درصد

مرجع	پایپرازین ۰/۷ مولار		I M AMP		دبی جریان گاز (لیتر بر دقیقه)	دبی جریان مایع (لیتر بر دقیقه)
	تعداد واحد انتقال	ارتفاع واحد انتقال (متر)	تعداد واحد انتقال	ارتفاع واحد انتقال (متر)		
تان و چن ۲۰۰۶ [۱۸]	۱۲/۹۱۱۹	۰/۰۰۴۸	۶/۴۷۳۷	۰/۰۰۹۶	۶	۰/۰۵
	۸/۶۸۳۵	۰/۰۰۷۲	۴/۳۷۵۱	۰/۰۱۴۲	۷	۰/۰۵
	۵/۶۴۳۸	۰/۰۱۱۰	۳/۳۶۱۴	۰/۰۱۸۵	۸	۰/۰۵
	۳/۷۳۴۸	۰/۰۱۶۷	۲/۴۸۹۹	۰/۰۲۵۰	۹	۰/۰۵
	۱۲/۹۱۱۹	۰/۰۰۴۸	۱/۷۹۲۸	۰/۰۳۴۷	۱۰	۰/۰۵
	۴/۵۵۶۵	۰/۰۱۳۷	۲/۰۹۱۵	۰/۰۲۹۷	۱۰	۰/۰۶
	۵/۷۵۱۷	۰/۰۱۰۸	۲/۳۱۵۶	۰/۰۲۶۹	۱۰	۰/۰۷
	۷/۰۲۱۵	۰/۰۰۷۷	۲/۵۳۹۷	۰/۰۲۴۵	۱۰	۰/۰۸
	۶/۶۶۴۹	۰/۰۰۷۱	۲/۸۳۸۵	۰/۰۱۲۹	۱۰	۰/۰۹
	۵/۵۲۷۶	۰/۰۱۱۳	۳/۷۳۴۸	۰/۰۱۶۷	۱۰	۰/۰۸
۴/۴۸۱۸	۰/۰۱۳۹	۴/۴۸۱۸	۰/۰۱۳۹	۱۰	۰/۰۸	
۳/۱۶۶۲	۰/۰۲۸۸	۲/۱۶۶۲	۰/۰۲۸۸	۱۰	۰/۰۸	
۲/۶۵۵۹	۰/۰۲۳۴	۲/۶۵۵۹	۰/۰۲۳۴	۱۰	۰/۰۸	
۳/۴۵۴۷	۰/۰۱۸۱	۳/۴۵۴۷	۰/۰۱۸۱	۱۰	۰/۰۸	
۴/۱۶۱۷	۰/۰۱۴۹	۴/۱۶۱۷	۰/۰۱۴۹	۱۰	۰/۰۸	
۵/۲۲۸۸	۰/۰۱۱۹	۵/۲۲۸۸	۰/۰۱۱۹	۱۰	۰/۰۸	

آکنه‌های تیغه‌ای با شعاع داخلی ۲ سانتیمتر، شعاع خارجی ۶ سانتیمتر و ارتفاع ۳ سانتیمتر بود. در تعیین هر دو مجموعه نتایج تجربی ذکر شده از فرآیند جذب استن و اتیل استات در آب استفاده شد. بنابراین با توجه به نزدیکی نسبی ابعاد بخش پر شده و همچنین یکسان بودن فرآیند در نظر گرفته شده در

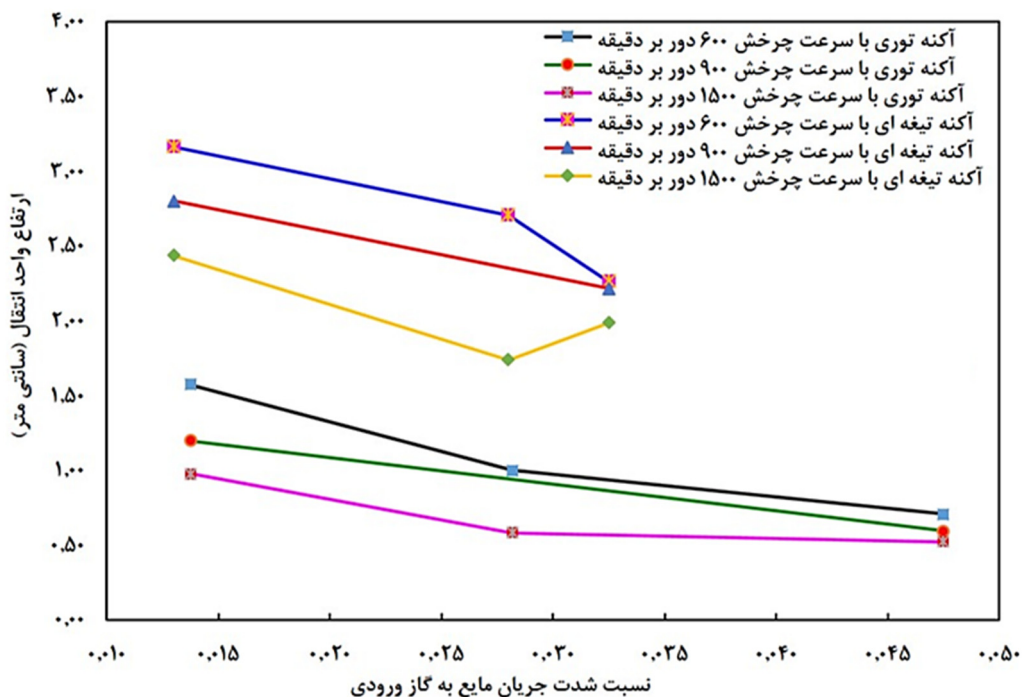
سیستم مورد استفاده توسط چن و همکارانش شامل آکنه‌های موسوم به شبکه‌های توری بافته شده از جنس استیل ضد زنگ، با شعاع داخلی ۲ سانتیمتر، شعاع خارجی ۴ سانتیمتر و ارتفاع ۲ سانتیمتر بود. همچنین بخش پر شده مربوط به سیستم مورد استفاده توسط لین و همکارانش شامل

آشفته‌تر شدن فاز پیوسته و به دنبال آن افزایش سطح تماس دو فاز و سطح انتقال جرم در دسترس بود. روند مشاهده شده در این شکل به میزان قابل توجهی با منطق حاکم بر تماس دو فاز در فرآیندهای انتقال جرم مطابقت داشت.

در بخش دوم از این مطالعه، آزمایشات متعدد با استفاده از سیستم آزمایشگاهی شکل (۱) با هدف ارزیابی بازده نهایی بدست آمده انجام گرفت و نتایج حاصله برای بستر پر شده معمولی (ثابت) و بستر پر شده دوار جمع‌آوری گردید که پارامترهای محاسبه شده در جدول (۴) گزارش شد. مطابق با نتایج بدست آمده در مقادیر یکسان از نسبت جریان مایع به گاز ورودی، تعداد واحد انتقال به منظور دستیابی به درصد حذف مطلوب، در بسترهای آکنده دوار به مراتب کمتر بود. علاوه بر این زمان مورد نیاز و انرژی مصرفی جهت رسیدن به حداکثر میزان جذب با استفاده از بستر آکنده دوار به میزان قابل توجهی در مقایسه با بستر معمولی کاهش یافت. مزیت‌های ذکر شده در کنار کوچک‌تر بودن حجم سیستم عملیاتی همگی حاکی از برتری بسترهای آکنده دوار نسبت به سیستم‌های پر شده معمول مورد استفاده در فرآیندهای انتقال جرم است که مقایسه نتایج ارائه شده در این جدول به وضوح مبین این امر است.

هر دو سیستم، امکان مقایسه عملکرد آکنده‌های تیغه‌ای و شبکه استیل بافته شده وجود داشت. نتایج گزارش شده در این دو نمودار، عملکرد مطلوب‌تر شبکه استیل بافته شده در بخش پر شده نسبت به آکنده‌های تیغه‌ای را نشان داد. ارائه سطح تبادل جرم بالاتر در استفاده از آکنده‌های شبکه توری بافته شده نسبت به آکنده‌های تیغه‌ای خود شاهدهی بر این مدعا بود که نتایج بدست آمده را تایید کرد. علاوه بر این، مطالعات صورت گرفته توسط سایر محققین [۲۱] نیز نشان دهنده کمتر بودن میزان ارتفاع واحد انتقال مورد نیاز در استفاده از این نوع آکنده‌ها است. تاثیر نوع تماس بین دو جریان ورودی فاکتور دیگری بود که در این مطالعه مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل (۴) به منظور ارزیابی عملکرد دو سیستم با جریان متقابل و متقاطع مورد استفاده قرار گرفت. مقایسه صورت گرفته در این شکل با استفاده از نتایج تجربی گزارش شده توسط لین و همکارانش برای سیستم با جریان متقابل [۲۳] و سیستم با جریان متقاطع [۲۵] مربوط به جذب کربن دی اکسید صورت گرفت.

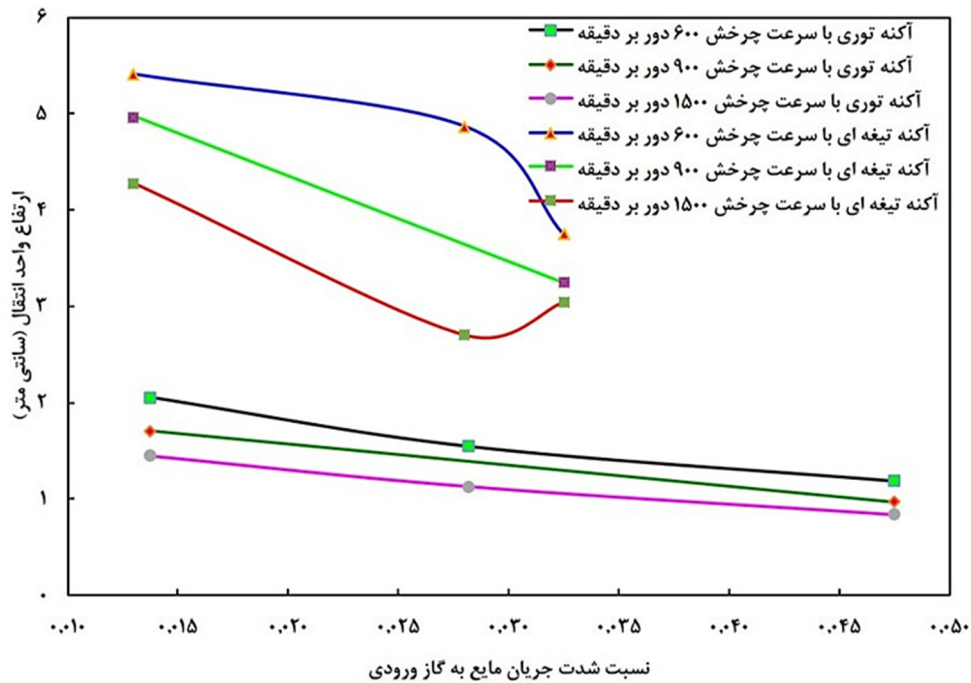
نمودارهای نشان ارائه شده در این شکل به وضوح نشان دهنده عملکرد مطلوب‌تر سیستم‌های با جریان متقاطع در افزایش میزان انتقال جرم و نفوذ پذیری ترکیبات مورد نظر بود که این امر در نتیجه افزایش میزان تنش بین دو فاز درگیر،



شکل (۲): ارتفاع واحد انتقال: بررسی عملکرد دو نوع آکنه بافته شده با استفاده از فولاد ضد زنگ و آکنه تیغه‌ای برای سیستم جذب استن

در آب، محاسبه شده بر اساس داده‌های تجربی چنگ چان [۶] و لین و چین [۲۱]

مطالعه تجربی تعداد و ارتفاع واحد انتقال در بستر آکنده دوار و بستر پر شده معمولی



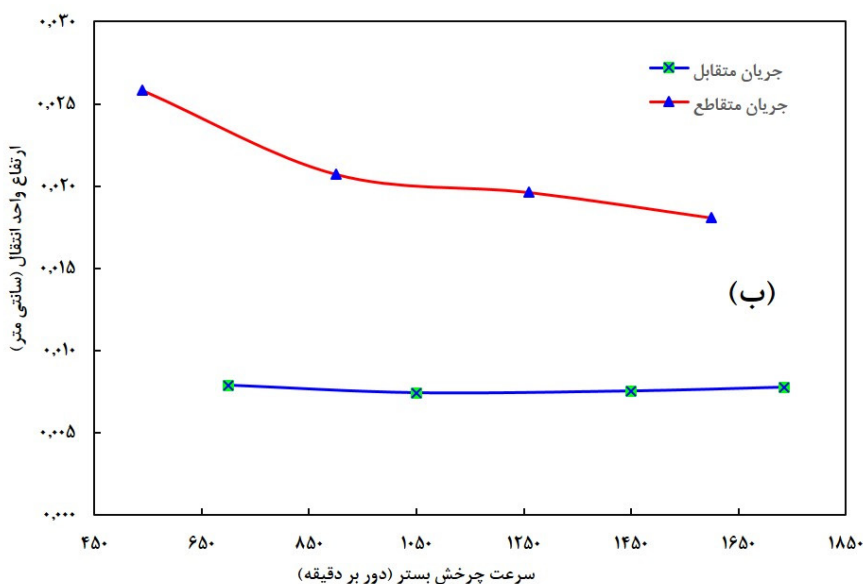
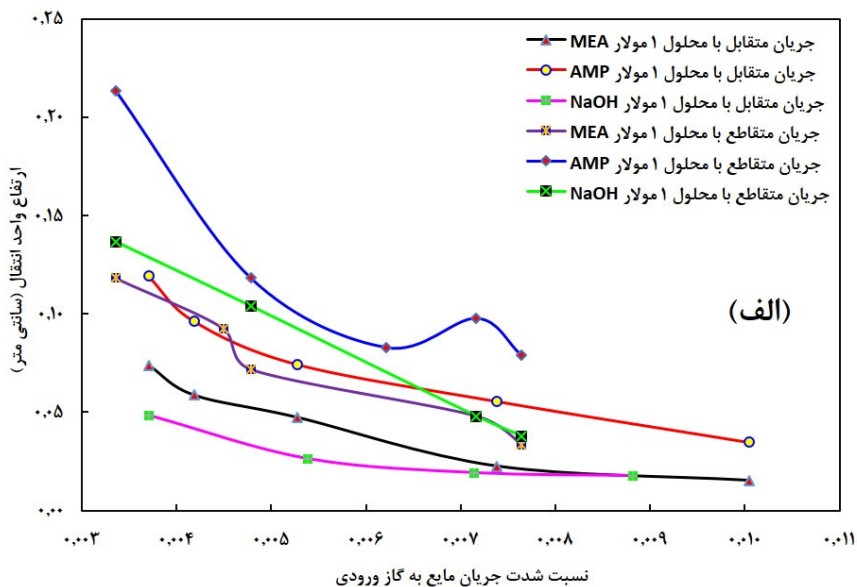
شکل (۳): ارتفاع واحد انتقال: بررسی عملکرد دو نوع آکنه بافته شده با استفاده از از فولاد ضد زنگ و آکنه تیغه‌ای برای سیستم جذب اتیل استات در آب، محاسبه شده بر اساس داده‌های تجربی چنگ چان [۶] و لین و چین [۲۱]

جدول (۴) مقایسه عملکرد بسترهای آکنده دوار و بستر پر شده نامنظم در مقادیر مشابه از نسبت شدت جریان های دو فاز ورودی

بستر پر شده نامنظم				بستر آکنده دوار				
نسبت جریان مایع به گاز ورودی	درصد حذف	ارتفاع واحد انتقال (متر)	تعداد واحد انتقال	نسبت جریان مایع به گاز ورودی	سرعت چرخش بستر (دور بر دقیقه)	درصد حذف	ارتفاع واحد انتقال (متر)	تعداد واحد انتقال
۰/۰۲	۴۲/۲	۰/۰۲۵۴۸	۲۳/۵۵۴۴	۰/۰۲	۴۰۰	۶۵/۸	۰/۰۱۴۵۴	۱/۰۳۱۹۴
				۰/۰۲	۹۰۰	۷۱/۵	۰/۰۱۲۴۳	۱/۲۰۷۲۹
				۰/۰۲	۱۲۰۰	۷۸/۲	۰/۰۱۰۲۴	۱/۴۶۵۰۴
				۰/۰۲	۱۵۰۰	۷۹/۹	۰/۰۰۹۷۲	۱/۵۴۳۱۳
۰/۰۳	۴۵/۱	۰/۰۴۱۳۳	۱۹/۵۱۸۵۶	۰/۰۳	۴۰۰	۷۸	۰/۰۱۰۳۰	۱/۴۵۶۲۶
				۰/۰۳	۹۰۰	۸۴/۴	۰/۰۰۸۵۱	۱/۷۶۲۵۴
				۰/۰۳	۱۲۰۰	۸۷/۹	۰/۰۰۷۳۸	۲/۰۳۱۲۴
				۰/۰۳	۱۵۰۰	۸۷/۸	۰/۰۰۷۴۱	۲/۰۲۳۳۲
۰/۰۴	۴۹/۴	۰/۰۳۶۳۸	۱۶/۴۹۳۲۹	۰/۰۴	۴۰۰	۸۲/۹	۰/۰۰۸۸۴	۱/۶۹۸۵۹
				۰/۰۴	۹۰۰	۸۶/۱	۰/۰۰۷۹۱	۱/۸۹۷۸۶
				۰/۰۴	۱۲۰۰	۹۰/۳	۰/۰۰۶۷۸	۲/۲۱۴۵۸
				۰/۰۴	۱۵۰۰	۹۲/۷	۰/۰۰۵۹۶	۲/۵۱۷۲۶

۴- نتیجه‌گیری

ارتفاع واحد انتقال و تعداد واحد انتقال به میزان قابل ملاحظه‌ای متاثر از ضریب کلی انتقال جرم فاز گاز (به دنبال آن میزان جذب و غلظت جذب شونده‌ی مورد نظر در جریان گاز ورودی و خروجی) است. با توجه به روابط ارائه شده در این پژوهش، کاهش ارتفاع واحد انتقال و در نتیجه‌ی آن



شکل (۴): مقایسه عملکرد دو سیستم جریان متقابل و متقاطع در جذب کربن دی اکسید. (الف): با استفاده از سه محلول جاذب مختلف. (ب): مقایسه عملکرد دو سیستم برای جریان متقابل و متقاطع در مقادیر متفاوت از سرعت چرخش بستر و نسبت شدت جریان مایع به گاز ورودی برابر با ۰/۰۰۹۵۴۵ و محلول جاذب سدیم هیدروکسید ۱ مولار، محاسبه شده بر اساس داده‌های تجربی لین و همکاران [۲۳ و ۲۵]

دوار نسبت به بسترهای پر شده معمولی (نظیر ارائه بازدهی بالاتر، کوتاه‌تر بودن زمان اتمام فرآیند، اثرپذیری قابل توجه بازده این سیستم‌ها از ابعاد و نوع بخش پر شده و مکانسیم تعامل دو جریان) لزوم بررسی پارامترهای موثر در تعیین ابعاد بهینه این سیستم، حائز اهمیت است که در نتیجه موجب فراگیری هر چه بیشتر این دستگاه در فرآیندهای مختلف صنعتی است. بنابراین، مطابق با نتایج ارائه شده در این پژوهش، کاهش میزان ارتفاع واحد انتقال، در نهایت منجر به عملکرد مطلوب‌تر این سیستم است، بطوری‌که در این سیستم‌ها با کاهش ۱۰ برابری تعداد واحد انتقال مورد نیاز،

عملکرد بهتری در کاهش میزان ارتفاع واحد انتقال داشت که این امر مطابق پژوهش‌های صورت گرفته توسط سایر محققین نیز قابل اثبات بود. بررسی نوع تماس جریان‌ها از دیگر اهداف این پژوهش بود. در این راستا، کمتر بودن ارتفاع واحد انتقال بدست آمده در اثر تماس متقاطع میان دو جریان ورودی، در نهایت موجب کمتر شدن حجم سیستم مورد نیاز شد که علاوه بر اثبات برتری این نوع سیستم‌ها نسبت به سیستم‌های متقابل، مطابقت قابل توجهی را با سایر مطالعات صورت گرفته و منطق حاکم بر فرآیند نشان داد. همچنین، با وجود برتری‌های قابل توجه بسترهای آکنده

- (2008) "Continuous Distillation Experiment with Rotating Packed Bed", *Chin. Jour. Chem. Eng.*, 16(4), 656-662.
- [11] G.Q. Wang, Z.C. Xu, Y.L. Yu, J.B. Ji, (2008) "Performance of a rotating zigzag bed—a new HIGEE", *Chem. Eng. Process.* 47 2131–2139.
- [12] Kim S, Ida J, Gulians VV, Lin JYS. (2005). "Tailoring pore properties of MCM-48 silica for selective adsorption of CO₂", *J. Phys. Chem. B*; vol: 109; 6287–93.
- [13] C.S. Tan, P.L. Lee, (2008) "Supercritical CO₂ desorption of activated carbon loaded with 2,2,3,3-tetrafluoro-1-propanol in a rotating packed bed" *Environ. Sci. Technol.* 42 2150.
- [14] C.C. Lin, G.S. Jian, (2007) "Characteristics of a rotating packed bed equipped with blade packing" *Sep. Puri. Technol* 54 51.
- [15] X. Li, Y. Liu, (2010) "Characteristics of fin baffle packing used in rotating packed bed" *Chin. J. Chem. Eng.* 18 55.
- [16] C.C. Lin, Y.C. Lin, S.C. Chen, L. J. Hsu, (2010) "Evaluation of rotating packed bed equipped with blade packing for methanol and 1-butanol removal" *J. Ind. Eng. Chemis.*, 16 1033.
- [17] M. R. Rahimi, S. Mosleh, (2015) "CO₂ removal from air in a countercurrent rotating packed bed" experimental determination of height of transfer unit, *Adv. Enviro. Sci. Technol.* 1 19.
- [18] C. S. Tan, J. E. Chen, (2006) "Absorption of carbon dioxide with piperazine and its mixture in rotating packed bed" *Sep. Puri. Technol.* 49 174.
- [19] Y. Luo, G. W. Chu, H. K. Zou, Z. Q. Zhao, M. P. Dudukovic, J. F. Chen (2012) "Gas-liquid effective interfacial area in a rotating packed bed" *Ind. Eng. Chem. Res.* 51(50), 16320-16325.
- [20] C. C. Lin, B. C. Chen, (2008) "Characteristics of cross-flow rotating packed bed" *J. Ind. Eng. Chemis.* 14 322.
- [21] C. C. Lin, K. S. Chien, (2008) "Mass transfer performance of rotating packed beds equipped with blade packings in VOCs absorption into water" *Sep. Puri. Technol.* 63 138.
- [22] C. C. Lin, H. T. Lin, (2013) "Removal of carbon dioxide from indoor air using a cross flow rotating packed bed" *Energy. Procedia* 37 1187.
- [23] C. C. Lin, W. T. Liu, C. S. Tan, (2003) "removal of carbon dioxide by absorption in rotating packed bed" *Ind. Eng. Chem. Res.* 42 2381.
- [24] C. C. Lin, B. C. Chen, Y. S. Chen, S. K. Hsu, (2008) "Feasibility of cross flow rotating packed bed in removing of carbon dioxide from gaseous streams" *Sep. Puri. Technol.* 62 507.
- [25] C. C. Lin, B. C. Chen, (2011) "Carbon dioxide absorption in a cross flow rotating packed bed" *Chem. Eng. Res. Des.* 89 1722.
- [26] L. L. Zhang, J. X. Wang, Y. Xiang, X. F. Zeng, J. F. Chen, (2011) "absorption of carbon dioxide with ionic liquid in a rotating packed bed contactor: mass transfer study" *Ind. Eng. Chem. Res.* 50 6957.
- [27] M. S. Jassim, G. Rochelle, D. Eimer, C. Ramshaw, (2007) "Carbon dioxide absorption and desorption in aqueous monoethanolamine solution in a rotating packed bed" *Ind. Eng. Chem. Res.* 46 2823.

مقدار بازده بطور قابل ملاحظه‌ای نسبت به بسترهای پر شده معمولی افزایش یافت. با توجه به اهمیت غیر قابل انکار سیستم بستر آکنده دوار به عنوان جایگزین مناسبی نسبت به سیستم‌های جداسازی متداول است که نتایج مطالعه اخیر می‌تواند مرجع مناسبی به منظور شناسایی و ارائه تمامی متغیرهای موثر در دستیابی به بیشترین مقدار بازده (همراه با کاهش چشمگیر هزینه‌های عملیاتی و زمان فرآیندهای) باشد.

علائم اختصاری و نمادها

C_{O_2} و C_i	غلظت CO ₂ در جریان هوای خروجی و ورودی (mol/L)
$K_G a$	ضریب کلی انتقال جرم فاز گاز (1/s)
Q	نرخ جریان گاز (m ³ /s)
R_i و R_o	شعاع داخلی و خارجی بستر پر شده (m)
V_G	سرعت ظاهری فاز گاز (m/s)
Z	ارتفاع بستر پر شده (m)
HT	ارتفاع واحد انتقال (m)
NTU	تعداد واحد انتقال

مراجع

- [1] Ramshaw, Colin, and Roger H. Mallinson. (1981) "Distillation." U.S. Patent No. 4,283,255. 11 Aug.
- [2] Y.S. Chen, C.C. Lin, H.S. Liu, (2005) "Mass transfer in a rotating packed bed with viscous newtonian and non-newtonian fluids". *Ind. Eng. Chem. Res.* 44 1043
- [3] Y.S. Chen, C.C. Lin, H.S. Liu, (2005) "Mass transfer in a rotating packed bed with various radii of the bed" *Ind. Eng. Chem. Res.* 44 7868.
- [4] Y.S. Chen, F.Y. Lin, C.C. Lin, C.Y. Tai, H.S. Liu, (2006) "Packing characteristics for mass transfer in a rotating packed bed". *Ind. Eng. Chem. Res.* 45 6846.
- [5] Chia-Chang Lin, Bor-Chi Chen (2011) "Carbon dioxide absorption in a cross-flow Rotating Packed Bed", *Chem. Eng. Res. Des.*, 89, 1722-1729.
- [6] Hsu-Hsiang Cheng, Chung-Sung Tan (2011) "Removal of CO₂ from indoor air by alkanolamine in a rotating packed bed", *Sep. Puri. Technol*, 82, 156-166.
- [7] 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". *Chem. Eng. J.*, 145, 377–384.
- [8] C.Y. Chiang, Y.S. Chen, M.S. Liang, F.Y. Lin, C.Y. Tai, H.S. Liu, (2009) "Absorption of ethanol into water and glycerol/water solution in a rotating packed bed" *J. Taiwan Inst. Chem. Engrs.* 40 418.
- [9] J. V. S. Nascimento, T. M. K. Ravagnani and J. A. F. R. Pereira (2009) "LLM Experimental study of a rotating packed bed distillation column", *Braz. Jour. Chem. Eng.*, Vol. 26, No. 01, pp. 219-226.
- [10] LI Xiuping, LIU Youzhi, LI Zhiqiang WANG Xiaoli

Experimental Study of Height and Number of Transfer Unit in Rotating Packed Bed and Conventional Column

Fariba Zarei ¹, Mahmood Reza Rahimi ^{2,*}, Soleiman Mosleh ³

¹ MSc of Chemical Engineering, Chemical Engineering Department, Yasouj University

² Process Intensification Research Lab, Chemical Engineering Department, Yasouj University

³ Ph.D. Candidate of Chemical Engineering, Chemical Engineering Department, Yasouj University

ABSTRACT

Height of transfer unit (HTU) and number of transfer unit (NTU) are important factors to achieve maximum possible efficiency in pecked beds. In this work, in order to eliminate lack of previous studies, HTU and NTU were investigated for many absorption systems, such as CO₂-MDEA, CO₂-MEA, CO₂-AMP, CO₂-PZ, CO₂-NaOH, and volatile organic compounds including iso propyl alcohol, acetone, ethyl acetate, methanol, ethanol and iso butanol. The effects of various inner packed radius, outer packed radius and height of packed zone, different packing type and contact flow regimes on the height and number of transfer unit were investigated in mentioned systems. The results indicated deep influence of operating parameters on the HTU and NTU in rotating packed bed (RPB). Also, the performance of RPB and conventional packed bed was evaluated. It was found that higher transfer unit and efficiency with lower volume of experimental setup is distinguished factors cause to preferred RPB in comparison to conventional packed beds.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: April 03, 2016

Revised in: January 02, 2017

Accepted: February 07, 2017

Key words:

Rotating packed bed

Height of Transfer Unit

Number of Transfer Unit

Packed Column

All right reserved.

* Corresponding author
mrrahimi@yu.ac.ir