

## مدل سازی انتقال جرم در جذب مواد آلی فرار در بسترهای آکنده دوار

محمود رضا رحیمی<sup>۱\*</sup>، سلیمان مصلح<sup>۲</sup>

۱. استادیار گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج ([mrrahimi@mail.yu.ac.ir](mailto:mrrahimi@mail.yu.ac.ir))

۲. دانشجوی دکترای مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج ([soleiman.mosleh@yahoo.com](mailto:soleiman.mosleh@yahoo.com))

### چکیده

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 تأثیر قرار می‌گیرد. در این مطالعه داده‌های ضریب انتقال جرم برای جذب مواد آلی فرار در بسترهای آکنده دوار مدل سازی شدند. برای تصحیح رابطه ضریب انتقال جرم در بستر آکنده دوار، به جای شتاب گریز از مرکز، از فاکتور بدون بعد شتاب دورانی موثر ( $\beta$ )، که نسبت میانگین شتاب دورانی به شتاب گرانش است، استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد برای سیستم‌های مورد مطالعه، توافق خوبی میان داده‌های تجربی و مقادیر پیش بینی شده از روابط ارائه شده برای ضریب انتقال جرم مشاهده می‌شود. حداکثر خطای پیش بینی در مطالعه اخیر حدود ۲۰ درصد است که نسبت به کارهای پیشین از دقت بالاتری برخوردار است.

حقوق ناشر محفوظ است.

### مشخصات مقاله

#### تاریخچه مقاله

دریافت: ۴ شهریور ۹۱

دریافت پس از اصلاح: ۱۶ آذر ۹۱

پذیرش نهایی: ۱۹ اسفند ۹۱

#### کلمات کلیدی:

بستر آکنده دوار  
جذب ترکیبات آلی فرار  
مدل سازی  
ضریب انتقال جرم

\* عهده دار مکاتبات

۱- مقدمه

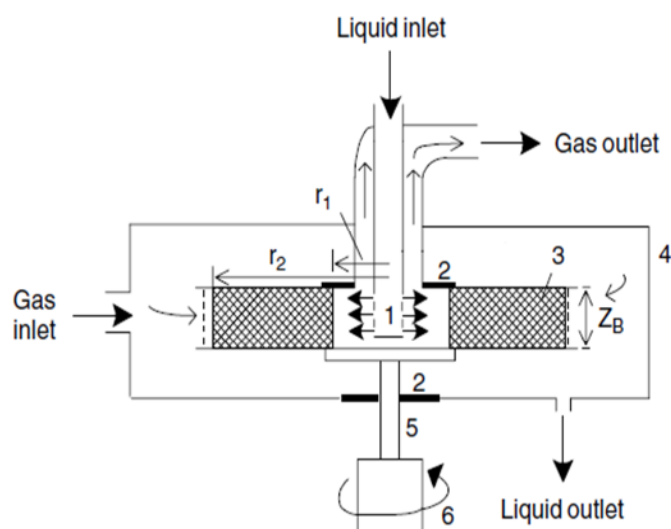
می‌باشد. بسیاری از ترکیبات آلی فرار حاصل از فرآیندهای صنعتی می‌توانند خطرات زیست محیطی فراوانی را ایجاد کنند که لازم است جهت حذف این ترکیبات مطالعاتی صورت گیرد. دستگاه بستر آکنده دوار می‌تواند در جذب این ترکیبات مورد استفاده قرار گیرد.

Chia-Chang Lin و همکاران [۱]، بکارگیری بستر آکنده دوار برای جذب ترکیبات آلی فرار از جریان گازهای زائد را مورد بررسی قرار دادند، در مطالعه‌ی آن‌ها ایزوپروپیل الکل به عنوان ترکیب آلی فرار مورد استفاده قرار گرفت و ضریب انتقال جرم حجمی کل در فاز گاز ( $K_G a$ ) در مقادیر مختلف پارامترهای عملیاتی شامل دور موتور، نرخ جریان گاز و مایع مورد بررسی قرار گرفت. Ling-Jung Hsu و همکاران [۲]، نیز انتقال جرم بستر آکنده دوار با آکنه‌های تیغه‌ای را جهت حذف متانول و ۱- بوتانول از مخلوط دو جزئی با استفاده از آب به عنوان جاذب مورد بررسی قرار دادند. در مطالعه آن‌ها وابستگی ضریب انتقال جرم کل در فاز گاز به غلظت ورودی متانول و ۱- بوتانول، سرعت چرخش و نرخ جریان‌های گاز و مایع مورد بررسی قرار گرفت. Yu-Shao chen و همکاران [۳]، به بررسی جذب و دفع آمونیاک و ترکیبات آلی فرار در بستر آکنده دوار پرداخته است و با استفاده از داده‌های تجربی مقالات دیگر، ضریب انتقال جرم حجمی کل در فاز گاز را محاسبه کرده و تاثیرات نرخ جریان گاز، نرخ جریان مایع و ویسکوزیته‌ی مایع را روی ضریب انتقال جرم حجمی کل در

بستر آکنده دوار یک دستگاه انتقال جرم فشرده می‌باشد که می‌تواند در زمینه حذف ترکیبات آلی فرار [۱-۴]، عملیات جذب و دفع [۵و۶]، پلیمریزاسیون [۷ و ۸]، تقطیر [۹ و ۱۰]، کریستالیزاسیون [۱۱]، جذب سطحی [۱۲]، و استخراج مایع-مایع [۱۲]، بکار گرفته شود. این دستگاه از شتاب گریز از مرکز

جهت تشدید فرآیندهای اختلاط و انتقال جرم استفاده می‌کند. نیروی گریز از مرکز تولید شده توسط چرخش، توانایی دستگاه را در عملیات انتقال جرم بسیار بالا می‌برد، تحت این شرایط نفوذ مولکولی بسیار سریعتر رخ می‌دهد. شماتیک دستگاه بستر آکنده دوار در شکل (۱) نشان داده شده است.

مایع جاذب از طریق یک توزیع کننده (۱)، که در مرکز بستر قرار گرفته است، به طرف بستر (۳) پاشیده می‌شود. چرخش ایجاد شده توسط محور روتور (۵) که توسط یک موتور (۶) می‌چرخد، نیروی گریز از مرکز زیادی را تولید می‌کند که در اثر شتاب ایجاد شده، مایع جاذب از داخل بستر به سمت بیرون، در خلاف جهت جریان هوای حاوی ترکیب آلی که از لبه‌ی محفظه بیرونی (۱) وارد بستر می‌شود، حرکت می‌کند. بنابراین در طی این عملیات، یک فرآیند انتقال جرم ناهمسو بین فاز گاز و مایع رخ می‌دهد که سبب حذف ترکیبات آلی فرار از هوا می‌شود. شعاع داخلی و خارجی بستر به ترتیب ۲ و ۴ سانتیمتر و ارتفاع محوری آن نیز ۲ سانتیمتر است. تخلخل بستر ۰.۴ و مساحت سطح مخصوص آکنه  $1200 \text{ m}^2/\text{m}^3$



شکل (۱): شماتیک بستر آکنده دوار [۱۴]

افزایش  $K_{Ga}$  با نیروی گریز از مرکز را به افزایش سطح مشترک گاز-مایع نسبت دادند. آن‌ها همچنین متوجه شدند که نوع حلال، تاثیر قابل توجهی بر راندمان انتقال جرم دارد، بنابراین نقش حلال را توسط ثابت هنری در رابطه‌ای به صورت زیر بیان کردند:

$$\frac{K_G a H_y^{0.27}}{D_G a_t^2} = 0.077 Re_G^{0.323} Re_L^{0.328} Gr_G^{0.18} \quad (2)$$

همچنین، نتایج نشان داد که ضریب انتقال جرم محلی گاز ( $K_G$ )، مستقل از سرعت چرخش بوده و مقدار آن مشابه با مقادیر آن در ستون پر شده معمولی می‌باشد. Lin و همکاران [۱۶]، راندمان انتقال جرم در بستر آکنده دوار را در فرآیند جذب ایزوپروپیل و اتیل استات با استفاده از آب بررسی کردند. در مطالعه‌ی آن‌ها از آکنه‌هایی با تخلخل بالا استفاده شده است. رابطه بدست آمده از مطالعه آن‌ها به شکل زیر است:

$$\frac{K_G a H_y^{0.315}}{D_G a_t^2} = 0.06 Re_G^{0.712} Re_L^{0.507} Gr_G^{0.326} \quad (3)$$

Tung و Mah [۱۷]، رابطه‌ای نظری را برای ضرایب انتقال جرم در بستر آکنده دوار به صورت زیر ارائه دادند:

$$K_L = \frac{D}{d_p} \left( \frac{2 \times 3^{\frac{1}{3}}}{\pi} \right) Sc^{\frac{1}{2}} Re^{\frac{1}{3}} \left( \frac{a_t}{a} \right)^{\frac{1}{3}} Gr^{\frac{1}{6}} \quad (4)$$

Chen و همکاران [۱۸] نیز رابطه‌ای را به شکل زیر، برای بسترهای آکنده دوار در شعاع‌های مختلف ارائه کردند:

$$\frac{k_L d_p}{D a_t} \left( 1 - 0.93 \frac{v_0}{v_t} - 1.13 \frac{v_i}{v_t} \right) = 0.65 Sc^{0.5} Re^{0.17} Gr^{0.3} We^{0.3} \quad (5)$$

این رابطه برای اندازه‌های متفاوت بسترهای آکنده دوار و سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی معتبر است. علاوه بر این، این رابطه می‌تواند برآوردی منطقی از  $k_L a$  با توجه به داده‌های منتشر شده در نشریات داشته باشد. در سال ۱۹۸۶، Onda و همکاران [۱۹] رابطه‌ای را برای ضریب انتقال جرم با چند نوع پرکن با اندازه مختلف به صورت زیر ارائه دادند:

$$k_L \left( \frac{\rho}{\mu_g} \right)^{\frac{1}{3}} = 0.0051 \left( \frac{L}{a \mu} \right)^{\frac{2}{3}} Sc^{\frac{-1}{2}} (a_t d_p)^{0.4} \quad (6)$$

بر اساس این رابطه، ضریب انتقال جرم با افزایش سطح مخصوص و کشش سطحی بحرانی پرکن، افزایش می‌یابد. Yu- Shao Chen و همکاران [۲۰]، ویژگی‌های پرکن (آکنه) و

فاز گاز بررسی کردند. Li Woyuan و همکاران [۴]، حذف ترکیبات آلی فرار از مایعاتی با ویسکوزیته بالا را در بستر آکنده دوار بررسی کردند؛ مطالعات آن‌ها نشان داد که راندمان حذف، با افزایش سرعت چرخش و افزایش غلظت مایع افزایش یافته و با افزایش ویسکوزیته مایع، راندمان حذف کاهش می‌یابد. بسیاری از روابط گزارش شده برای ضریب انتقال جرم در بسترهای آکنده دوار، بر اساس تعداد دور بستر مدل شده‌اند، از آن جایی که با تغییر دور بستر، در یک دور ثابت موتور، شتاب دورانی موثر وارد شده بر بستر تغییر می‌کند، لذا بهتر است به جای تعداد دور موتور، از شتاب دورانی موثر بستر استفاده شود. در مطالعه‌ی حاضر نقش نیروی گریز از مرکز در جذب ترکیبات آلی فرار در یک بستر آکنده دوار مورد بررسی قرار گرفته و مدل سازی برای تعیین رابطه‌ای مناسب برای ضریب انتقال جرم انجام شده است. به جای دور موتور یا شتاب گریز از مرکز، از فاکتور دورانی موثر ( $\beta$ )، جهت مدل سازی رابطه‌ی ضریب انتقال جرم استفاده شده است. در نهایت، اعتبارسنجی رابطه‌ی بدست آمده با مقایسه مقادیر پیش بینی شده توسط رابطه و مقادیر تجربی انجام گرفته است.

## ۲- مروری بر مدل سازی‌های گذشته

روابط متعددی از ضرایب انتقال جرم در بسترهای آکنده دوار پیشنهاد شده است. با این حال، این روابط برای تمامی سیستم‌های تجربی صادق نیستند و نمی‌توانند پیش بینی قابل قبولی را برای سیستم‌های مختلف ارائه دهند. اکثر روابط پیشنهاد شده، خطایی حدود ۳۰ درصد دارند، بنابراین مطالعه بیشتر برای استخراج یک رابطه مناسب جهت پوشش دادن گستره بیشتری از داده‌های تجربی سیستم‌های مختلف، می‌تواند در امر مدل سازی و پیش بینی در مباحث مختلفی از جمله فرآیندهای جذب و دفع در بسترهای آکنده دوار کمک شایانی کند. Liu و همکاران [۱۵]، رابطه‌ای را برای دفع اتانول از آب در بستر آکنده دوار به صورت زیر ارائه دادند:

$$\frac{K_G a}{D_G a_t^2} = 0.003 Re_G^{1.163} Re_L^{0.163} Gr_G^{0.25} \quad (1)$$

نتایج آن‌ها با توجه به رابطه بالا نشان می‌دهد که ضریب انتقال جرم ( $K_G a$ )، با افزایش نرخ جریان گاز، نرخ جریان مایع و سرعت چرخشی، افزایش می‌یابد. آن‌ها همچنین جذب مواد آلی فراری مانند ایزوپروپیل الکل، استون و اتیل استات را توسط حلال در بستر آکنده دوار مورد بررسی قرار داده و

می‌باشد. رابطه‌ی بالا در قالب گروه‌های بدون بعد، به شکل زیر در می‌آید:

$$\frac{K_G a R T}{D_G a_t^2} = A H_y^B Re_G^C Re_L^D Gr_G^E \quad (11)$$

که در این معادله، A, B, C, D, E ضرایب معادله هستند که از برازش خطی بدست می‌آیند.

#### 4- نتایج و بحث

برای مدل سازی از داده‌های تجربی Yu-Shao Chen [۲۱] استفاده شده است. با برازش داده‌های تجربی برای ترکیبات آلی فرار مختلف توسط حلال در بستر آکنده دوار و تعیین ضرایب معادله (۱۱)، معادله‌ای به صورت زیر حاصل شد:

$$\frac{K_G a R T}{D_G a_t^2} = 0.0667 H_y^{-0.346} Re_G^{0.412} Re_L^{0.387} Gr_G^{0.22} \quad (12)$$

با توجه به معادله (۱۲)، ضریب انتقال جرم با افزایش نرخ جریان گاز و مایع و همچنین افزایش شتاب دورانی افزایش می‌یابد. همچنین برازش رابطه (۱۱) نیز انجام شده است و رابطه‌ی ضریب انتقال جرم با کمیت‌های موثر بدست آمده است. نتایج نشان داد که ضریب انتقال جرم با نرخ جریان گاز با توان ۰.۳۳-۰.۶۵، برای نرخ جریان مایع با توان ۰.۲-۰.۴۱ و با فاکتور شتاب دورانی با توان ۰.۱۵-۰.۲۸ افزایش یافته و با ثابت هنری با توان ۰.۲-۰.۴۷ کاهش می‌یابد. تغییرات ضریب انتقال جرم ( $K_G a$ ) با فاکتور شتاب دورانی ( $\beta$ ) برای محلول‌های آلی فرار مختلف بررسی شده است. در شکل (۲)، وابستگی ضریب انتقال جرم نسبت به  $\beta$  برای نرخ‌های مختلف جریان مایع در جذب ایزوپروپیل الکل از هوا نشان داده شده است. ضریب انتقال جرم با افزایش  $\beta$  برای نرخ‌های مختلف جریان مایع افزایش می‌یابد. همچنین در یک دبی مشخص جریان گاز به میزان ۹.۱۶ L/min، با افزایش جریان مایع از ۲۵۸ ml/min به ۶۱۲ ml/min، ضریب انتقال جرم به میزان چشمگیری افزایش یافته است. حداکثر خطای پیش بینی با استفاده از مدل سازی انجام گرفته حدود ۲۰ درصد می‌باشد.

تاثیر آن بر انتقال جرم در بسترهای آکنده دوار را بررسی کردند. در مطالعه آن‌ها، جذب اکسیژن از گاز حامل نیتروژن توسط آب در یک جریان ناهمسو بررسی شد. جنس پرکن‌ها از مواد مختلفی مانند شیشه، سرامیک، اکریلیک و فولاد ضد زنگ انتخاب شد. هدف از کار آن‌ها، اصلاح رابطه‌ای برای  $k_L a$  شامل تاثیر انواع پرکن بود. رابطه‌ای به صورت زیر به عنوان نتیجه کار آن‌ها ارائه گردید:

$$\frac{K_L a d_p}{D_L a_t} \left( 1 - 0.93 \frac{v_0}{v_t} - 1.13 \frac{v_i}{v_t} \right) = 0.35 Sc_L^{0.5} Re_L^{0.17} Gr_L^{0.3} We_L^{0.3} \left( \frac{a_t}{a_p} \right)^{-0.5} \left( \frac{\sigma_c}{\sigma_w} \right)^{0.14} \quad (7)$$

این رابطه نه تنها برای انواع پرکن‌ها، بلکه برای بیشتر داده‌های تجربی در مورد  $K_L a$  معتبر است.

#### 3- مدل سازی

برای تصحیح رابطه ضریب انتقال جرم در بستر آکنده دوار، به جای شتاب گریز از مرکز از فاکتور بدون بعد شتاب دورانی ( $\beta$ )، که نسبت میانگین شتاب دورانی به شتاب گرانش است، مطابق با رابطه (۸) استفاده شده است.

$$\beta = \frac{r\omega^2}{g} \quad (8)$$

فاکتور ( $\beta$ ) با توجه به تغییرات شعاع تغییر می‌کند، با توجه به اینکه بستر دارای قطر داخلی و قطر خارجی می‌باشد، بنابراین می‌بایست یک مقدار میانگین طبق رابطه زیر استفاده شود.

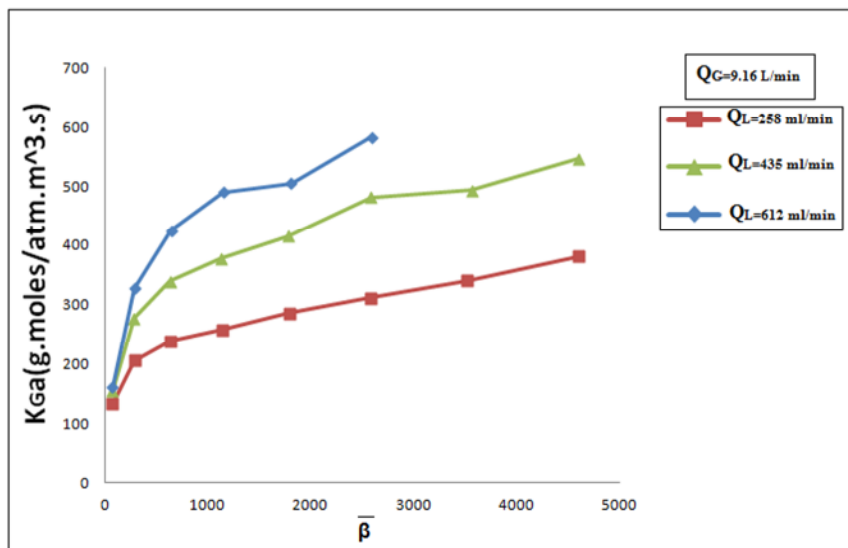
$$\bar{\beta} = \frac{\int_{r_1}^{r_2} \beta \cdot 2\pi r \cdot dr}{\int_{r_1}^{r_2} 2\pi r \cdot dr} = \frac{2\omega^2(r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2)}{3(r_1 + r_2)g} \quad (9)$$

ضریب انتقال جرم  $K_G a$  تابع شرایط هیدرودینامیکی بستر، شدت جریان‌های گاز و مایع، شتاب دورانی موثر، خصوصیات حلال و شرایط عملیاتی می‌باشد که می‌توان به صورت کلی زیر، این وابستگی را نشان داد:

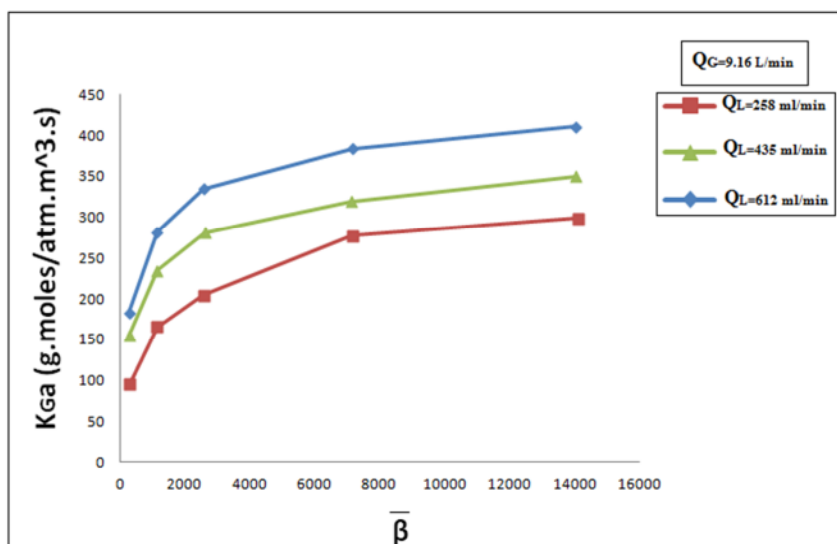
$$K_G a \propto Q_G^{a_1} Q_L^{a_2} \bar{\beta}^{a_3} H_y^{a_4} D_G^{a_5} a_t^{a_6} T^{a_7} \quad (10)$$

که در این رابطه،  $Q_G$  نرخ جریان گاز،  $Q_L$  نرخ جریان مایع،  $\bar{\beta}$  فاکتور بدون بعد شتاب دورانی،  $H_y$  ثابت هنری،  $D_G$  ضریب نفوذ گاز،  $a_t$  مساحت سطح مخصوص آکنه و  $T$  دمای عملیاتی

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



شکل (۲) وابستگی  $K_{Ga}$  به فاکتور  $\bar{\beta}$  در نرخ های مختلف جریان مایع برای جذب ایزوپروپیل الکل

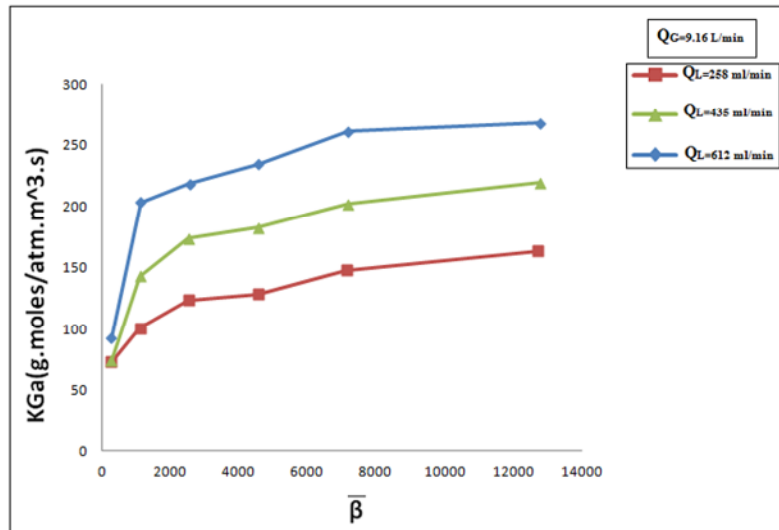


شکل (۳) وابستگی  $K_{Ga}$  به فاکتور  $\bar{\beta}$  در نرخ های مختلف جریان مایع برای جذب استون

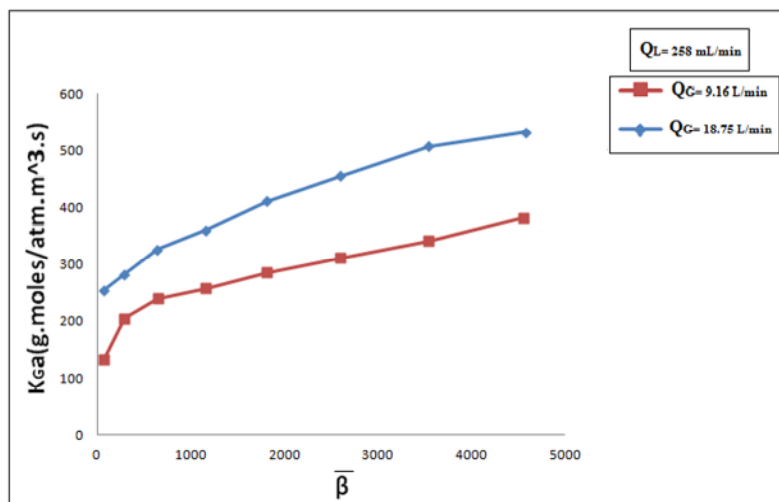
سبب افزایش ضریب انتقال جرم می شود. با افزایش جریان مایع، میزان ضریب انتقال جرم افزایش می یابد، به طوری که در نرخ ثابت جریان گاز، افزایش جریان مایع از ۲۵۸ ml/min به ۶۱۲ ml/min سبب افزایش قابل ملاحظه ای در ضریب انتقال جرم شده است.

در شکل (۳)، تغییرات ضریب انتقال جرم حجمی در فاز گاز، نسبت به فاکتور شتاب دورانی در فرآیند جذب استون از هوا توسط آب نشان داده شده است. با افزایش شتاب دورانی، ضریب انتقال جرم افزایش می یابد. این افزایش در نرخ های بالاتر جریان مایع بیشتر است.

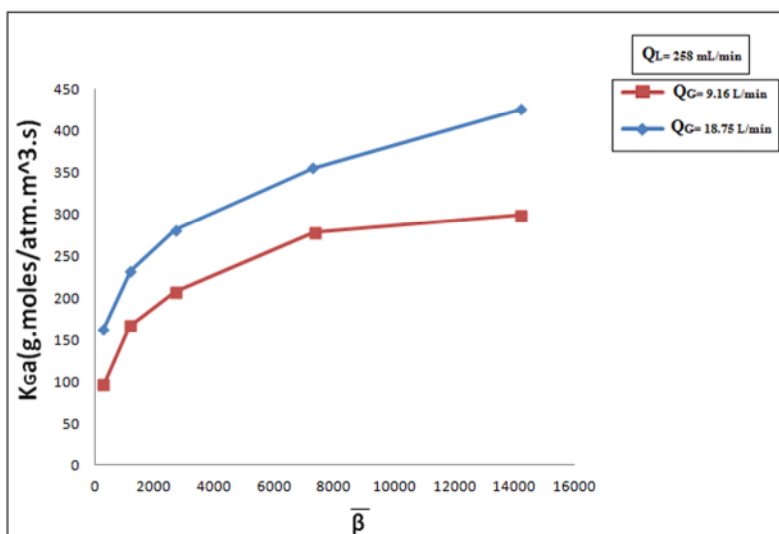
برای فرآیند جذب اتیل استات از هوا توسط آب نیز، وابستگی ضریب انتقال جرم حجمی فاز گاز نسبت به فاکتور شتاب دورانی در شکل (۴) رسم شده است. افزایش شتاب دورانی



شکل (۴) وابستگی  $K_{Ga}$  به فاکتور  $\beta$  در نرخ‌های مختلف جریان مایع برای جذب اتیل استات



شکل (۵) وابستگی  $K_{Ga}$  به فاکتور  $\beta$  در نرخ‌های مختلف جریان گاز برای جذب ایزوپروپیل الکل



شکل (۶) وابستگی  $K_{Ga}$  به فاکتور  $\beta$  در نرخ‌های مختلف جریان گاز برای جذب استون

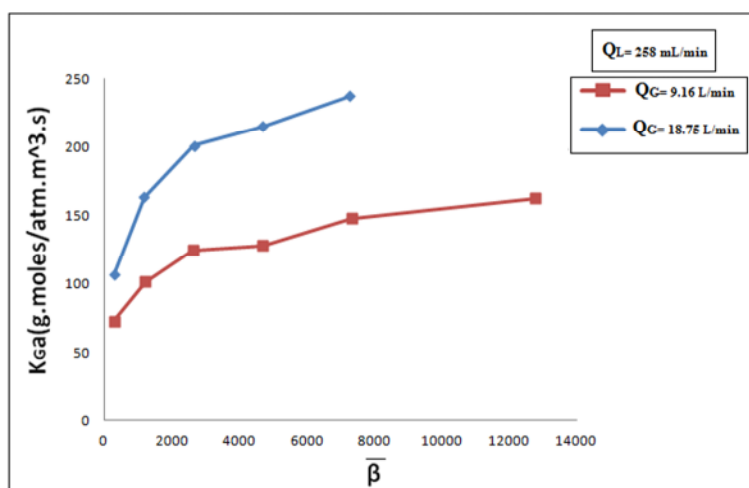
## مدل سازی انتقال جرم در جذب مواد آلی فرار در بسترهای آکنده دوار

در شکل (۷)، برای جذب اتیل استات از هوا، تغییرات ضریب انتقال جرم با شتاب دورانی رسم شده است. با افزایش شتاب دورانی ضریب انتقال جرم افزایش یافته است. این افزایش با بالا رفتن دبی گاز در یک جریان ثابت مایع، به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر شده است.

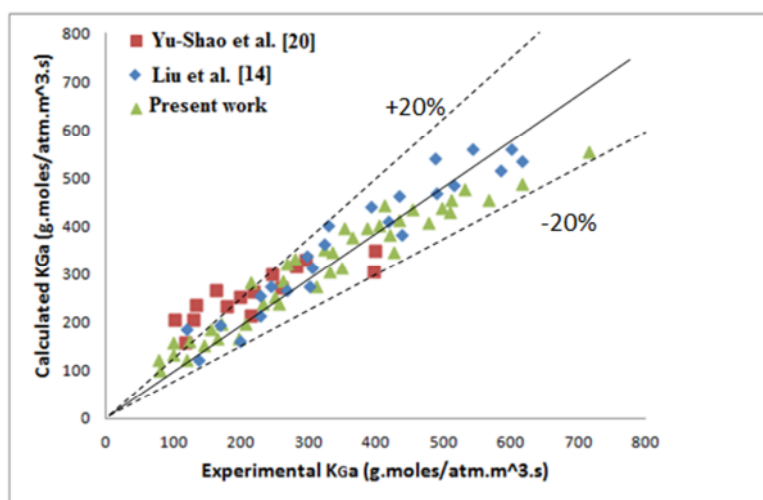
در شکل (۸)، مقایسه داده‌های تجربی با مقادیر محاسباتی توسط معادله (۱۲) انجام شده است. نتایج از دقت مناسب معادله برای پیش بینی ضرایب انتقال جرم حکایت دارد. حداکثر خطای پیش بینی شده با استفاده از این معادله ۲۰ درصد می‌باشد در حالی که در مطالعات انجام گرفته توسط سایرین، شاهد خطایی تا حدود ۳۰ درصد نیز هستیم.

برای نرخ‌های مختلف جریان گاز نیز، وابستگی ضریب انتقال جرم به فاکتور شتاب دورانی مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل (۵) برای جذب ایزوپروپیل الکل از هوا، تغییرات ضریب انتقال جرم با فاکتور  $\bar{\beta}$  رسم شده است. با افزایش نرخ جریان گاز از میزان ۹.۱۶ L/min به ۱۸.۷۵ L/min در یک جریان ثابت مایع، ضریب انتقال جرم به میزان زیادی افزایش یافته است.

برای فرآیند جذب استون نیز، وابستگی ضریب انتقال جرم به شتاب گریز از مرکز برای نرخ‌های مختلف جریان گاز در شکل (۶) رسم شده است. با افزایش نرخ جریان گاز در یک دبی ثابت جریان مایع، ضریب انتقال جرم حجمی در فاز گاز افزایش یافته است.



شکل (۷) وابستگی  $K_{Ga}$  به فاکتور  $\bar{\beta}$  در نرخ‌های مختلف جریان گاز برای جذب اتیل استات



شکل (۸) مقایسه مقادیر تجربی  $K_{Ga}$  با مقادیر محاسبه شده توسط معادله (۱۲)

## 5- نتیجه گیری

اهمیت دستگاه بستر آکنده دوار با توجه به ویژگی‌های منحصر به فردی مانند اندازه و وزن کم، راندمان عملیاتی و ایمنی بالا و کاربردهای وسیع در فرآیندهایی همچون جذب، دفع، تقطیر، کریستالیزاسیون، حذف مواد آلی فرار و بسیاری از واکنش‌ها، سبب شده است تا مطالعات تئوری و تجربی وسیعی در مورد آن صورت گیرد. در این مطالعه، مدل سازی رابطه انتقال جرم جهت ارزیابی تاثیر شتاب گریز از مرکز بر روی ضریب انتقال جرم ( $K_{Ga}$ ) در جذب محلول‌های آلی فرار انجام شد و نتایج نشان داد که رابطه بدست آمده دقت خوبی در پیش بینی مقادیر تجربی دارد. نقش شتاب گریز از مرکز با بکارگیری فاکتور دورانی ( $\beta$ )، که نسبت میانگین شتاب دورانی به شتاب گرانش است، بر روی ضریب انتقال جرم بررسی شد و نتایج نشان داد که افزایش شتاب دورانی باعث افزایش ضریب انتقال جرم حجمی در فاز گاز ( $K_{Ga}$ ) می‌شود. در واقع نیروی گریز از مرکز با افزایش سطح مشترک گاز-مایع، فرآیند انتقال جرم را طی جذب محلول‌های آلی فرار، در بستر آکنده دوار تشدید می‌کند. غلظت محلول آلی فرار خروجی به طور چشمگیری به کمک نیروی گریز از مرکز در زمان کوتاهی کاهش می‌یابد. ضریب انتقال جرم حجمی کل در فاز گاز با افزایش شتاب دورانی در نرخ جریان مایع و گاز، افزایش می‌یابد. ضرایب انتقال جرم تجربی در مقایسه با مقادیر پیش بینی شده نشان می‌دهد که توافق خوبی بین مقادیر تجربی و مقادیر پیش بینی شده وجود دارد. حداکثر خطای پیش بینی در این کار، حدود ۲۰ درصد می‌باشد که نسبت به کارهای پیشین از دقت بالاتری برخوردار است. همچنین مدل سازی ضریب انتقال جرم حجمی کل در فاز گاز به صورت رابطه‌ای متناسب با نرخ جریان گاز و مایع، فاکتور دورانی و ثابت هنری نشان می‌دهد که ضریب انتقال جرم با نرخ جریان گاز با توان ۰.۳۳-۰.۶۵، برای نرخ جریان مایع با توان ۰.۲-۰.۴۱ و با شتاب دورانی با توان ۰.۱۵-۰.۲۸ افزایش یافته و با ثابت هنری با توان ۰.۲-۰.۴۷ کاهش می‌یابد.

$$d_p: \text{ قطر معادل آکنه } \left( \frac{6(1-\varepsilon)}{\psi(m)a_t} \right)$$

$$G: \text{ شار جرمی گاز } (\text{kg/m}^2 \cdot \text{s})$$

$$g: \text{ شتاب گرانش } (\text{m/s}^2)$$

$$H_y: \text{ ثابت بی بعد هنری}$$

$$K_L: \text{ ضریب انتقال جرم سمت مایع } (\text{m/s})$$

$$L: \text{ شار جرمی مایع } (\text{kg/m}^2 \cdot \text{s})$$

$$r_i: \text{ شعاع داخلی بستر } (\text{m})$$

$$r_o: \text{ شعاع بیرونی بستر } (\text{m})$$

$$r_s: \text{ شعاع محفظه ساکن } (\text{m})$$

$$V_i: \text{ حجم درون شعاع داخلی بستر } (\text{m}^3)$$

$$V_o: \text{ حجم بین شعاع بیرونی بستر و محفظه ساکن: } (\pi(r_s^2 - r_o^2)z)$$

$$V_t: \text{ حجم کل بستر } (\pi r_s^2 z) (\text{m}^3)$$

### گروه‌های بدون بعد

$$Fr: \text{ عدد فرود } \left( \frac{L^2 a_t}{\rho^2 a_c} \right)$$

$$Gr: \text{ عدد گرافش } \left( \frac{d_p^3 a_c \rho^2}{\mu^2} \right)$$

$$Gr_G: \text{ عدد گرافش گاز } \left( \frac{d_p^3 a_c \rho_G^2}{\mu_G^2} \right)$$

$$Re_G: \text{ عدد رینولدز گاز } \left( \frac{G}{a_t \mu_G} \right)$$

$$Re_L: \text{ عدد رینولدز مایع } \left( \frac{L}{a_t \mu_L} \right)$$

$$Sc: \text{ عدد اشمیت } \left( \frac{\mu}{\rho D} \right)$$

$$We: \text{ عدد وبر } \left( \frac{L^2}{\rho a_t \sigma} \right)$$

### علائم یونانی

$$\beta: \text{ فاکتور بدون بعد شتاب دورانی}$$

$$\varepsilon: \text{ تخلخل بستر}$$

$$\mu_G: \text{ ویسکوزیته گاز } (\text{Pa} \cdot \text{s})$$

$$\mu_L: \text{ ویسکوزیته مایع } (\text{Pa} \cdot \text{s})$$

$$\rho_G: \text{ دانسیته گاز } \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

$$\rho_L: \text{ دانسیته مایع } \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

$$\omega: \text{ سرعت چرخش } \left( \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right)$$

$$\psi: \text{ کرویت آکنه}$$

$$\sigma: \text{ کشش سطحی } \left( \frac{\text{kg}}{\text{s}^2} \right)$$

$$\sigma_C: \text{ کشش سطحی بحرانی آکنه } \left( \frac{\text{kg}}{\text{s}^2} \right)$$

$$\sigma_W: \text{ کشش سطحی آب } \left( \frac{\text{kg}}{\text{s}^2} \right)$$

### مراجع

[1] Chia-Chang Lin, Tzu-Ying Wei, Shu-Kang Hsu, Wen-Tzong Liu (2006) "Performance of a pilot-scale cross-flow rotating packed bed in removing VOCs from waste gas streams", *separation and purification technology*, 52274-279.

[2] Ling-Jung Hsu, Chia-Chang Lin (2012) " Binary VOCs absorption in a rotating packed bed with blade packing", *Journal of Environmental Management*, 98, 175-182.

### علائم اختصاری و نمادها

a: مساحت فصل مشترک گاز- مایع (1/m)

a<sub>p</sub>: مساحت سطح مهره‌ای به قطر ۲ میلی‌متر بر واحد حجم مهره (1/m)

a<sub>c</sub>: شتاب گریز از مرکز (m/s<sup>2</sup>)

D: ضریب نفوذ (m<sup>2</sup>/s)



- [12] Bisschops MA, van der Wielen L, Luyben K. (1997) "Centrifugal adsorption technology for the removal of volatile organic compounds from water". In: *Semel J, ed. 2nd International Conference on Process Intensification in Practice. London: BHR Group*, 299–307.
- [13] Podbielniak WJ, Kaiser HR, Ziegenhorn GJ (1970) "Centrifugal solvent extraction", *Chem Eng Prog Symp Ser.* 66 (100), 43–50.
- [14] Yi-Hung Chen, Ching-Yuan Chang, Wei Ling-Su, Chun-Yu Chiu, Yue-Hwa Yu, Pen-Chi Chiang, Chiung-Fen Chang, Je-Lueng Shie, Chyow-San Chiou, Sally IM Chiang (2005) "Ozonation of CI Reactive Black 5 using rotating packed bed and stirred tank reactor", *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 80, 68-75.
- [15] Liu, H. S.; Lin, C. C.; Wu, S. C.; Hsu, H. W (1996) "Characteristics of a Rotating Packed Bed", *Ind. Eng. Chem. Res.* 35, 3590.
- [16] Lin, C. C.; Wei, T. Y. S.; Liu, W. T.; Shen, K. P (2004) "Removal of VOCs from Gaseous Stream in a High-Voidage Rotating Packed Bed", *J. Chem. Eng. Jpn.* 37, 1471.
- [17] Tung, H. H.; Mah, R. S. H (1985) "Modeling Liquid Mass Transfer in Higee separation process", *Chem. Eng. Commun.* 39, 147.
- [18] Chen, Y. S.; Lin, C. C.; Liu, H. S (2005) " Mass Transfer in a Rotating Packed Bed With Various Radii of the Bed", *Ind. Eng. Chem. Res.* 44,7868.
- [19] Onda, K.; Takeuchi, H.; Okumoto, Y (1968) "Mass Transfer Coefficient between Gas and Liquid Phases in Packed Column", *J. Chem. Eng. Jpn.* 1, 56.
- [20] Chen, Y. S.; Lin, F. Y.; Lin, C. C.; Tai, C. Y.; Liu, H. S (2000) "Packing Characteristic for Mass Transfer in a Rotating Packed Bed", *Ind. Eng. Chem. Res.* 45, 6846.
- [21] Yu-Shao Chen; Hwai-Shen Liu (2002) "Absorption of VOCs in a Rotating Packed Bed", *Ind. Eng. Chem. Res.* 41, 1583-1588.
- [3] Yu-Shao Chen (2011) "Correlation of Mass Transfer Coefficients in a Rotating Packed Bed", *Ind. Eng. Chem. Res.* 50, 1778-1785.
- [4] Li Woyuan, Wu Wei, Zou Hailui, Chu Guangwen, Shao Lei and Chen Jiafeng (2009) "Process Intensification of VOC Removal from High Viscous Media by Rotating Packed Bed", *Separation Science and Engineering, Chinese Journal of Chemical Engineering*, 17(3), 389-393.
- [5] Chia-Chang Lin, Bor-Chi Chen (2011) " Carbon dioxide absorption in a cross-flow Rotating Packed Bed", *CHEMICAL ENGINEERING RESEARCH AND DESIGN*, 89, 1722-1729.
- [6] Hsu-Hsiang Cheng, Chung-Sung Tan (2011) "Removal of CO<sub>2</sub> from indoor air by alkanolamine in a rotating packed bed", *separation and purification technology*, 82, 156-166.
- [7] Boodhoo KVK, Jachuck RJ, Ramshaw C (1997) "Spinning disc reactor for the intensification of styrene polymerization". In: *Semel J, ed. 2nd International Conference on Process Intensification in Practice. London: BHR Group*, 125–133.
- [8] Boodhoo KVK, Jachuck RJ, Ramshaw C. (1995) " Process intensification: spinning disc polymerizer for the manufacture of polystyrene". In: *Ramshaw C, ed. 1st International Conference on Process Intensification for the Chemical Industry. London: BHR Group*, 175–180.
- [9] J. V. S. Nascimento, T. M. K. Ravagnani and J. A. F. R. Pereira (2006) " Experimental study of a rotating packed bed distillation column", *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 26, No. 01, pp. 219-226.
- [10] LI Xiuping, LIU Youzhi, LI Zhiqiang WANG Xiaoli (2008) "Continuous Distillation Experiment with Rotating Packed Bed", *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 16(4) ,656-662.
- [11] Oxley P, Brechtelsbauer C, Ricard F, Lewis N, Ramshaw C. (2000) " Evaluation of spinning disk reactor technology for the manufacture of pharmaceuticals". *Ind Eng Chem Res*, 39, 2175–2182.

# Mass Transfer Modeling for Volatile Organic Compounds Absorption in Rotating Packed Beds

Mahmood Reza Rahimi<sup>1\*</sup>, Soleiman Mosleh<sup>2</sup>

1. Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Yasouj University  
([mrrahimi@mail.yu.ac.ir](mailto:mrrahimi@mail.yu.ac.ir))
2. Ph.D student of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Yasouj University  
([soleiman.mosleh@yahoo.com](mailto:soleiman.mosleh@yahoo.com))

---

## ABSTRACT

The process of mass transfer in packed beds by increasing the gravitational field is intensified, these beds called the rotating packed bed. In rotating packed beds, mass transfer affected by the hydrodynamics of gas and liquid phases, rotational speed and geometric parameters of packing. In this study, the mass transfer coefficient data for the absorption of volatile organic compounds in rotating packed beds were modeled. To correction of mass transfer coefficient in rotating packed bed, used dimensionless effective rotating acceleration factor ( $\beta$ ), instead of centrifugal acceleration. For the systems studied, good agreement between experimental data and predicted mass transfer coefficient is observed for the relationships presented. In this study, the maximum prediction error is about 20 percent that has higher accuracy than previous works.

---

## ARTICLE INFO

Article history:  
Received: 25 Aug. 2012  
Revised: 6 Dec. 2012  
Accepted: 9 Mar 2013

---

Key words:  
rotating packed bed  
volatile organic compounds  
absorption  
modeling  
mass transfer coefficient

---

All right reserved.

---

\* Corresponding author