

## اندازه‌گیری ضرایب انتقال جرم فاز گاز در برج رطوبت زنی با آکنه‌های نامنظم

مسعود خراسانی<sup>۱\*</sup>، مرتضی زیودار<sup>۱</sup>، فرشاد فرشچی تبریزی<sup>۱</sup>

۱. گروه مهندسی شیمی، دانشگاه شهید نیکبخت زاهدان، سیستان و بلوچستان، ایران

### مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۹ تیر ۹۳

دریافت پس از اصلاح: ۲ اردیبهشت ۹۴

پذیرش نهایی: ۶ خرداد ۹۴

کلمات کلیدی:

برج آکنده

آکنه‌های نامنظم

ضرایب انتقال جرم

سطح مؤثر

ماندگی مایع

برج رطوبت زنی.

### چکیده

برج‌های آکنده، قسمت مهمی از تجهیزات وسیع انتقال جرم و حرارت هستند. امروزه، استفاده از برج‌های آکنده به دلیل افت فشار کمتر، ظرفیت و انتقال جرم بالاتر نسبت به برج‌های سینی‌دار، در حال افزایش است. در این تحقیق پارامترهای مؤثر بر عملکرد برج مانند ماندگی مایع و ضرایب انتقال جرم فاز گاز در برج رطوبت‌زنی با استفاده از آکنه‌های نامنظم در برج‌هایی به قطر ۰/۲ و ۰/۱ متر و ارتفاع ۱ متر، اندازه‌گیری شد. در آزمایشات، از آب و هوا برای فاز گاز و مایع استفاده شد. دبی هوا بین ۱/۳۲ تا ۳/۹۳ مترمکعب بر ساعت و دبی مایع ۱۰ تا ۷۰ مترمکعب بر ساعت می‌باشد. یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر انتقال جرم سطح تماس مؤثر است. در این تحقیق از مدل Nakajima جهت محاسبه سطح تماس مؤثر استفاده شد، سپس مقادیر آزمایشگاهی ضرایب انتقال جرم فاز گاز با مدل‌های Zech, Onda, Billet, Shulman, Grouff, Shi مقایسه شد. درصد خطای نسبی میانگین این مدل‌ها با نتایج آزمایشگاهی به ترتیب ۷٪، ۱۵٪، ۲۹٪، ۲۱٪، ۴۵٪ و ۱۹۵٪ می‌باشد. نتایج نشان داد که با کاهش قطر برج، ضریب انتقال جرم فاز گاز (Kg.ae) افزایش می‌یابد. همچنین مقادیر ماندگی به دست آمده نشان داد که ماندگی در برج به قطر ۰/۱ بیشتر از برج به قطر ۰/۲ متر می‌باشد.

۱- مقدمه

اندازه‌گیری سطح واقعی بسیار پیچیده و خطای زیادی دارند [۹]. در این آزمایش از رابطه‌ی Nakajima et.al برای پیش‌بینی سطح تماس مؤثر استفاده شده است [۱۰]. Nakajima رابطه زیر را برای محاسبه  $a_e$  پیشنهاد کرد:

$$\frac{a_e}{a_p} = 0.6119 \left( \frac{u_L \mu_L}{\sigma_L} \right)^{0.4305} \left( \frac{\rho_g u_g}{a_p \mu_g} \right)^{1 - 0.192 \mu_L / \mu_L R} \quad (1)$$

۴- روش اندازه‌گیری ضرایب انتقال جرم

برای به دست آوردن ضرایب انتقال جرم، ابتدا باید تعداد واحدهای انتقال  $NTU_g$  را به دست آورد. از روش رطوبت زنی آدیاباتیک در آزمایشات استفاده شد. این یک حالت خاص است که در آن مایع در دمای اشباع آدیاباتیک گاز ورودی به سیستم وارد می‌شود. این تحول را می‌توان به‌طور مداوم و با وارد کردن پی‌درپی مایع خروجی از برج (بدون افزودن یا کاستن حرارت از آن) به داخل برج مطابق شکل ۱ انجام داد. شکل ۱ شماتیکی از برج رطوبت زنی را نشان می‌دهد. برای جلوگیری از اتلاف حرارت برج عایق کاری شده است [۱].

جدول ۱: روابط انتقال جرم فاز گاز

مدل	رابطه
Shulman and grouff [12]	$K_G = 0.0137(\rho_G u_G)^{0.65} Sc_G^{-\frac{2}{3}}$
Shulman et al [13].	$K_G = 1.195 u_G \left[ \frac{d_p \rho_G u_G}{\mu_G (1 - \epsilon)} \right]^{-0.36} Sc_L^{-\frac{2}{3}}$
Onda et al [14] bravo and fair [15]	$K_G = \left( \frac{D_G}{a_p d_p} \right) \left( \frac{\rho_G u_G}{a_p \mu_G} \right)^{0.7} Sc_G^{\frac{1}{3}}$
Zech and mersmann [16]	$K_G = \frac{D_G}{d_p} \frac{\epsilon + 0.12}{\epsilon(1 - \epsilon)^{-1}} \left[ \frac{\rho_G u_G d_p}{(1 - \epsilon) \mu_G} \right]^{\frac{2}{3}} Sc_G^{\frac{1}{3}}$
Shi and mersmann, [3]	$K_G = \frac{D_G}{d_{pe}} \left( \frac{\rho_G u_G d_{pe}}{\mu_G} \right)^{\frac{2}{3}} Sc_L^{\frac{1}{3}}$
Billet and schultes [17]	$K_G = \frac{a_p^{0.5} D_G}{\sqrt{d_h (\epsilon - h_L)}} \left( \frac{\rho_G u_G}{a_p \mu_G} \right)^{\frac{3}{4}} Sc_G^{\frac{1}{3}}$

تحقیقات و مطالعات گسترده‌ی بسیاری از سازمان‌های علمی و همچنین شرکت‌های سازنده آکنه‌ها بر روی آکنه‌های نامنظم از سال ۱۹۳۰ شروع شد. روابط انتقال جرم بر اساس داده‌های تئوری بیان شده‌اند که دقت‌ها، محدودیت‌ها و محدوده‌های عملیاتی متفاوتی دارند [۱].

شدت انتقال جرم مستقیماً متناسب با سطح مشترک مؤثر گاز-مایع در فرآیندهاست [۲]. در این قسمت روابط ارائه‌شده در مقالات برای پیش‌بینی سطح تماس مؤثر را مرور می‌کنیم. برای نخستین بار Onda و همکاران، در سال ۱۹۶۸ رابطه‌ای برای پیش‌بینی سطح مؤثر آکنه‌های نامنظم ارائه کردند، اساس این مدل بر مبنای مطالعات هیدرودینامیک و خصوصیات فیزیکی مایع می‌باشد [۳]. در سال ۱۹۹۳، Billet و Schultes، مدل تئوری بر اساس هندسه آکنه و خصوصیات فیزیکی مایع ارائه کردند. در این مدل اثر تغییرات کشش سطحی فاز مایع در طول برج روی مساحت مشترک گاز-مایع در نظر گرفته شد [۴]. در سال ۱۹۹۴ Hanley و همکاران، مدلی بر اساس تئوری پدیده‌های بحرانی و افت الکتریکی ارائه و صحت آن را با داده‌های به‌دست‌آمده از انجام آزمایش روی آکنه‌های نامنظم و منظم تعیین کردند [۵].

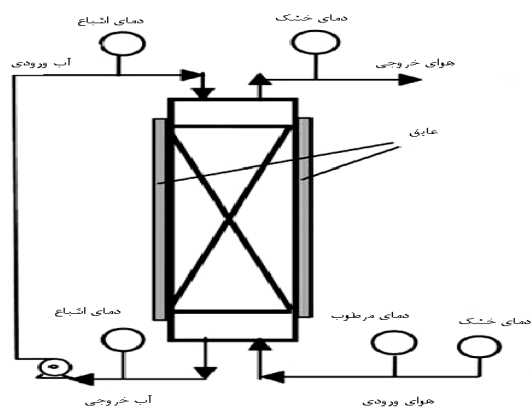
در این تحقیق ابتدا روابط انتقال جرم و پارامترهای وابسته به این روابط مانند سطح مؤثر انتقال جرم ارائه می‌شوند، سپس به ارائه و مقایسه مقادیر آزمایشگاهی با این مدل‌ها پرداخته می‌شود.

۲- روابط انتقال جرم فاز گاز

در این قسمت روابط ارائه‌شده برای پیش‌بینی ضرایب انتقال جرم فاز گاز را مرور می‌کنیم. این روابط در جدول ۱ آورده شده‌اند [۶ و ۷].

۳- سطح تماس مؤثر

سطح تماس مؤثر انتقال جرم یک پارامتر مهم در بازده انتقال جرم میان فازهای گاز و مایع است. برای سنجش میزان سطح مؤثر روابط زیادی در مقالات یافت می‌شود [۸]. در طراحی عملیاتی مهم‌ترین هدف در انتخاب آکنه برای تقطیر، مینیمم کردن افت فشار و ماکزیمم کردن سطح تماس می‌باشد. شدت انتقال جرم مستقیماً متناسب با سطح مشترک مؤثر گاز-مایع در فرآیندهاست. روش‌های آزمایشگاهی برای



شکل ۱: شماتیکی از برج رطوبت زنی برای اندازه‌گیری انتقال جرم

## اندازه گیری ضرایب انتقال جرم فاز گاز در برج رطوبت زنی با آکنه های نامنظم

جهت انجام این مقایسه دو مقدار ۳/۷ و ۰/۶۵ برای عدد لوئیس در نظر گرفته شده است.

### ۴-۱- ضرایب انتقال جرم فاز گاز

در آزمایشات، قطر برج ۰/۲ متر، ارتفاع آن ۱ متر، فاز مایع آب و فاز گاز هوا و دبی هوا بین ۱/۳۲ تا ۳/۹۳ مترمکعب بر ثانیه بود. در چهار دبی مایع (۱۰، ۳۰، ۵۰ و ۷۰ m<sup>3</sup>/hr) آزمایشات انجام شد. دقت دماسنج در آزمایشگاه ۰/۱ درجه سانتی گراد بود.

آکنه‌ی بکار برده شده در آزمایشات آکنه‌ی پال رینگ ۱۶ میلی متری پلاستیکی می‌باشد که شکل ۲ تصویر این آکنه از نماهای مختلف است. در جدول ۲ مشخصات این آکنه آورده شده است.

تعداد واحدهای انتقال NTU<sub>g</sub> با اندازه‌گیری دماها، از رابطه ۸ به دست می‌آید. رابطه ۱۳ ارتفاع واحدهای انتقال HTU<sub>g</sub> را می‌دهد [۱۹]. در شکل ۳، نمودار HTU<sub>g</sub> بر حسب  $F_s = U_s \sqrt{\rho}$  ضریب ظرفیت گاز نشان داده شده است.



شکل ۲: آکنه‌ی پال رینگ پلاستیکی مورد استفاده در آزمایش

جدول ۲: مشخصات آکنه‌ی پال رینگ پلاستیکی

۸۷	۳۴۱
----	-----

$$q_s = \frac{N_A M_A C_A}{1 - e^{-\frac{N_A M_A C_A}{h_g}}} (t_g - t_s) \approx h_g (t_g - t_s) \quad (2)$$

$$N_A = F \ln \frac{1 - P_{A,w}/P_t}{1 - \bar{P}_{A,G}/P_t} \approx K_g (\bar{P}_{A,G} - P_{A,w}) \quad (3)$$

برای به دست آوردن ضرایب انتقال جرم، ابتدا باید تعداد واحدهای انتقال NTU<sub>g</sub> را به دست آورد. روابط حاکم از موازنه آنتالپی در قسمت دیفرانسیل آکنه به دست می‌آید [۱۱ و ۱]:  
با فرض برابر بودن مساحت انتقال جرم و حرارت a<sub>H</sub>:

$$\int_{T_1}^{T_2} \frac{dT_g}{(T_s - T_g)} = \frac{h_g a_H}{G C_s} \int_0^z dz \quad (4)$$

به عبارت دیگر:

$$\ln \frac{T_1 - T_s}{T_2 - T_s} = \frac{h_g a_H z}{G C_s} \quad (5)$$

با رابطه زیر، HTU<sub>g</sub> به دست می‌آید.

$$HTU_g = \frac{u_g}{K_g a_H} \quad (6)$$

با استفاده از رابطه لوئیس:

$$K_g = \frac{h_g}{c_s} \quad (7)$$

با جایگذاری رابطه ۷ در رابطه ۶:

$$HTU_g = \frac{u_g c_s}{h_g a_H} \quad (8)$$

از رابطه زیر NTU<sub>g</sub> به دست می‌آید.

$$NTU_g = \frac{z}{HTU_g} = \frac{h_g a_H z}{G c_s} \quad (9)$$

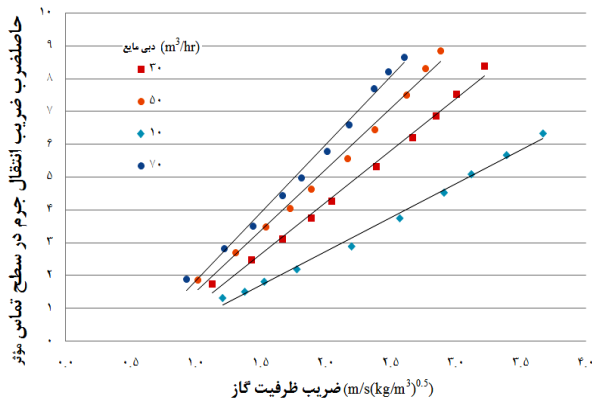
با مقایسه رابطه ۹ و ۵، NTU<sub>g</sub> به صورت تابعی از دما به دست می‌آید [۱۱].

$$NTU_g = \ln \frac{T_1 - T_s}{T_2 - T_s} \quad (10)$$

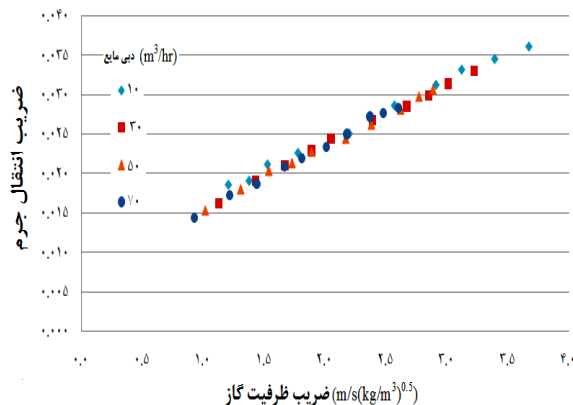
همان‌طور که مشاهده شد محاسبات بر اساس عدد لوئیس یک انجام شده است. برای مقدار غیر از یک نیز kg با استفاده از رابطه کلی لوئیس [۱۸]:

$$\frac{h_g}{K_g c_s} = \left(\frac{Sc}{Pr}\right)^{0.567} = (Le)^{0.567} \quad (11)$$

اندازه‌گیری شده و مقدار آن با مقدار K<sub>g</sub> زمانی که عدد لوئیس یک بود برای مقدار دبی مایع L=50(m<sup>3</sup>/hr) مقایسه شده است و نتایج در شکل ۱۰ آورده شده است.



شکل (۴) نمودار حاصل ضرب ضریب انتقال جرم در سطح تماس مؤثر بر حسب ضریب ظرفیت گاز، قطر برج ۰/۲ متر

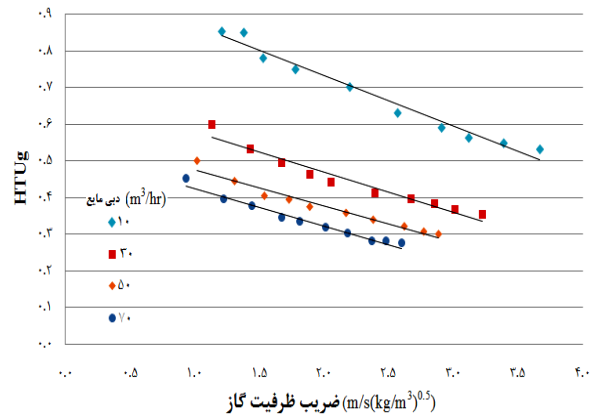


شکل (۶) مقادیر Kg آزمایشگاهی، قطر برج ۰/۲ متر

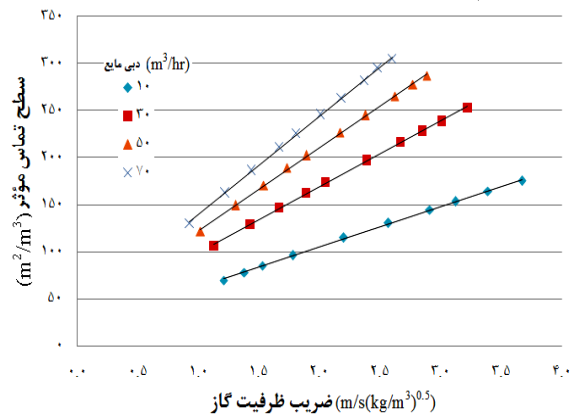
آزمایشگاهی، مدل‌های Shi, Shulman پایین‌تر از مقادیر آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌کنند؛ اما مدل Zech پیش‌بینی بهتری نسبت به سایر مدل‌ها داشته و مقادیر Kg به دست آمده از این مدل به مقادیر آزمایشگاهی نزدیک‌تر است. خطای محاسبه شده مدل Zech با مقادیر آزمایشگاهی برابر ۷٪ می‌باشد. در جدول ۳ درصد خطای نسبی کلیه مدل‌های مذکور آورده شده است.

### ۵- مقایسه ضرایب انتقال جرم در برج‌هایی به قطر ۰/۱ و ۰/۲ متر

برای پی بردن به تأثیر قطر برج در ضرایب انتقال جرم، آزمایش‌هایی با شرایط یکسان در برجی به قطر ۰/۱ متر انجام شد. در شکل ۸ مقادیر Kg در برج‌های با قطر ۰/۱ و ۰/۲ متر در دبی‌های مختلف مایع باهم مقایسه شده است



شکل (۳) نمودار HTU\_g بر حسب ضریب ظرفیت گاز، قطر برج ۰/۲ متر



شکل (۵)  $a_e$  به دست آمده از روابط Nakajima et.al، قطر برج ۰/۲ متر

مقدار  $K_g a_e$  از رابطه ۸ به دست می‌آید. شکل ۴ نمودار  $K_g a_e$  بر حسب  $F_s$  ضریب ظرفیت گاز را نشان می‌دهد.

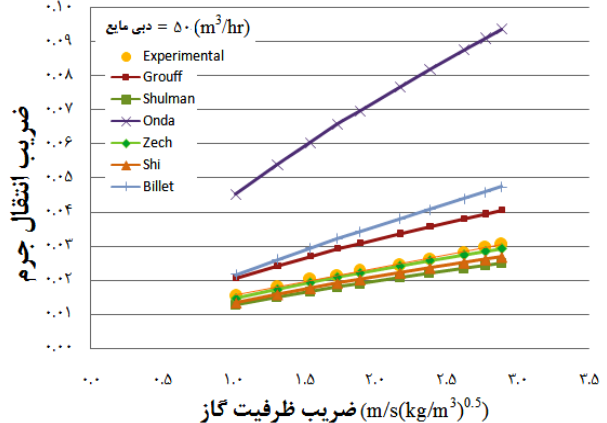
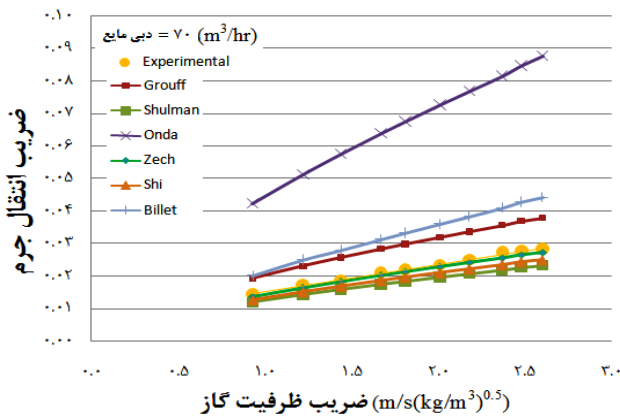
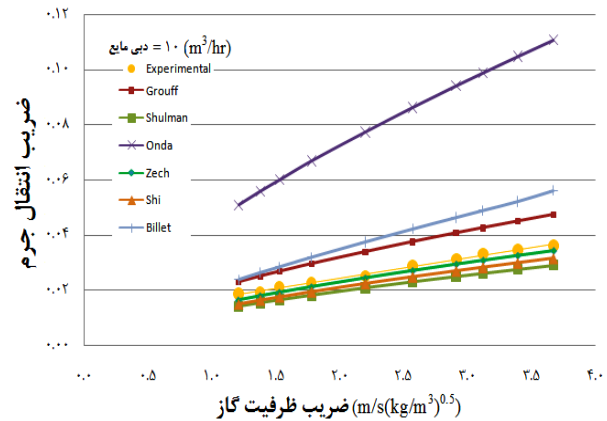
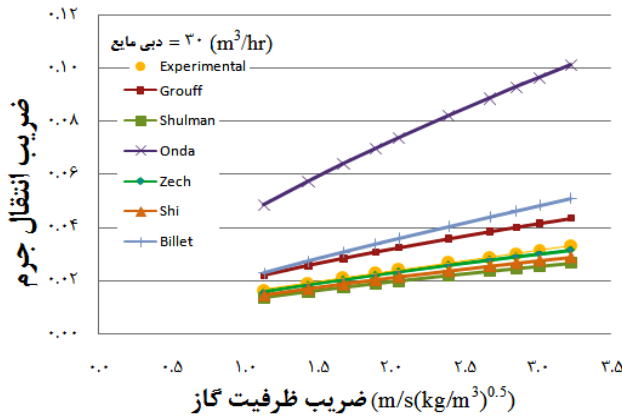
برای به دست آوردن  $K_g$  باید  $a_e$  سطح تماس مؤثر را محاسبه کنیم. در این قسمت از مدل Nakajima et.al جهت محاسبه  $a_e$  استفاده می‌شود. در شکل ۵،  $a_e$  محاسبه شده ارائه شده است.

با محاسبه سطح تماس مؤثر، ضرایب انتقال جرم فاز گاز به دست می‌آید. در شکل ۶ مقادیر آزمایشگاهی ضرایب انتقال جرم فاز گاز نشان داده شده است.

مقادیر  $K_g$  آزمایشگاهی با مقادیر به دست آمده مدل‌های Shulman, Grouff, Onda, Zech, Shi, Billet در دبی‌های مختلف مایع در شکل ۷ مقایسه شده است.

همان‌طور که در شکل‌های ۷ نشان داده شد، مدل‌های Onda, Billet, Grouff مقدار  $K_g$  را بالاتر از مقادیر

## اندازه گیری ضرایب انتقال جرم فاز گاز در برج رطوبت زنی با آکنه های نامنظم



شکل ۷: مقایسه ضرایب انتقال جرم با مدل های مختلف، قطر برج ۰/۲ متر

### ۶- نتیجه گیری

یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر انتقال جرم سطح تماس مؤثر است. در این مقاله از مدل Nakajima et.al جهت محاسبه  $a_e$  استفاده شد. با محاسبه سطح تماس مؤثر، ضرایب انتقال جرم محاسبه شدند، سپس مقادیر  $K_g$  آزمایشگاهی با مقادیر به دست آمده از مدل های Zech, Shi, Shulman, Billet, Onda, Grouff مقایسه شدند. نتایج نشان داد که در مدل های Onda, Billet, Grouff مقدار  $K_g$  را بالاتر از مقادیر آزمایشگاهی، مدل های Shi, Shulman پایین تر از مقادیر آزمایشگاهی پیش بینی می کنند؛ اما مدل Zech بهتری نسبت به سایر مدل ها داشته و مقادیر  $K_g$  به دست آمده از این مدل به مقادیر آزمایشگاهی نزدیک تر می باشد. خطای محاسبه شده مدل Zech با مقادیر آزمایشگاهی برابر ۷٪ می باشد.

برای پی بردن به تأثیر قطر برج در ضرایب انتقال جرم، آزمایش هایی با شرایط یکسان، در برجی به قطر ۰/۱ متر انجام شد. نتایج نشان داد که با کاهش قطر برج،  $K_g$  افزایش پیدا می کند. یکی از دلایل افزایش  $K_g$  این است که با کاهش

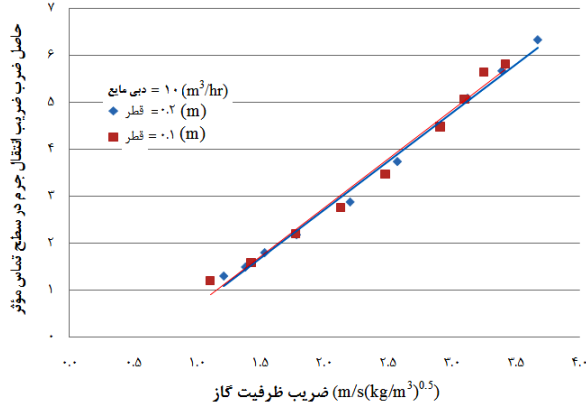
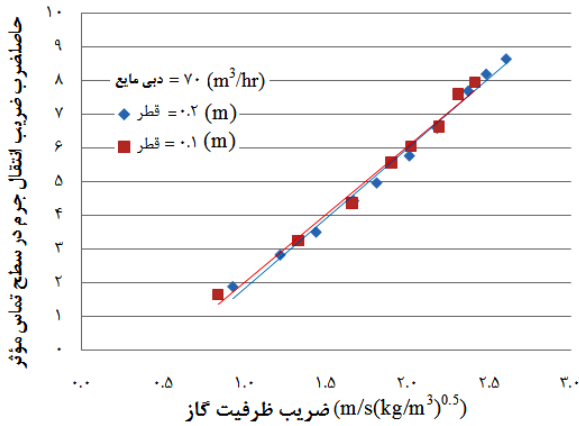
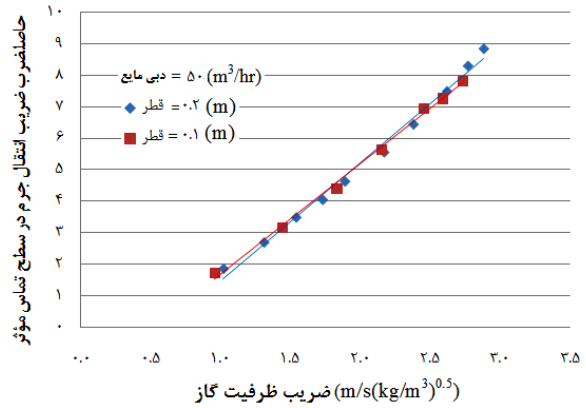
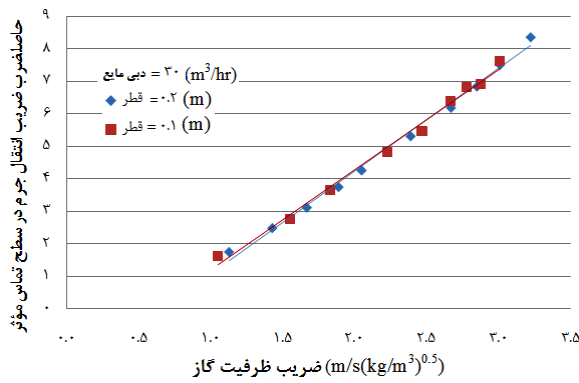
همان طور که در شکل ۸ نشان داده شد با کاهش قطر برج،  $K_g$  افزایش پیدا می کند. یکی از دلایل افزایش  $K_g$  این است که با کاهش قطر برج توزیع مایع بهتر انجام می شود و در نتیجه سطح تماس انتقال جرم بالا می رود. دلیل دیگر، تأثیر سطح دیواره برج در انتقال جرم است. رابطه ۱۲ نسبت سطح دیواره برج به سطح پکینگ را نشان می دهد [۲۰].

$$\frac{A_{wall}}{A_{packing}} = \frac{\pi D_T H}{\pi D_T^2 H a_p} = \frac{4}{D_T a_p} \quad (12)$$

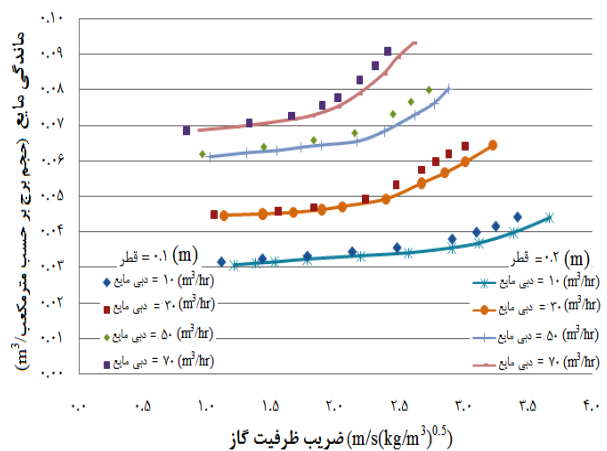
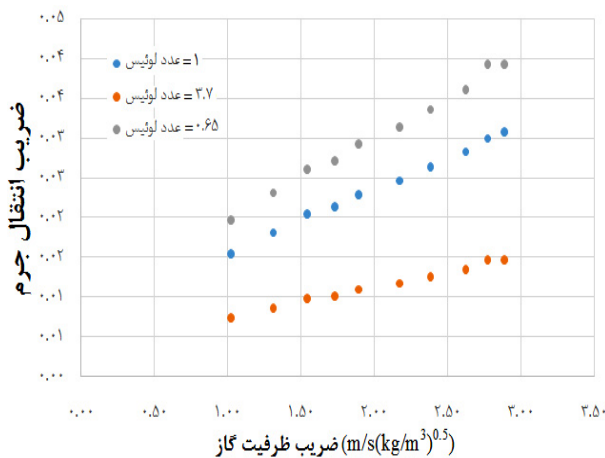
طبق رابطه بالا، وقتی قطر برج کاهش پیدا می کند، دیواره برج تأثیر بیشتری در ایجاد سطح تماس برای انتقال جرم دارد، در نتیجه با افزایش سطح تماس انتقال جرم،  $K_g$  افزایش پیدا می کند.

در شکل ۹ مقادیر ماندگی در دو برج مقایسه شده است.

همان طور که در شکل ۱۰ مشاهده می شود با افزایش عدد لوئیس از مقدار عددی یک به ۳/۷ مقدار  $k_g$  کاهش یافته و با کاهش عدد لوئیس به عدد ۰/۶۵ مقدار  $K_g$  افزایش می یابد.



شکل ۸: مقادیر Kg.ac در برج های با قطر ۰/۲ و ۰/۱ در دی های مختلف مایع



شکل ۱۰: مقایسه مقادیر kg به ازای مقادیر مختلف عدد لوئیس

شکل ۹: مقایسه ماندگی بر حسب  $F_s$  در برج هایی به قطر ۰/۲ و ۰/۱ متر

### علائم اختصاری و نمادها

$a_c (m^2/m^3)$	سطح مؤثر آکنه
$a_p (m^2/m^3)$	سطح ویژه آکنه
$d_{eq} (m)$	قطر معادل آکنه
$F_s (m/s (\sqrt{kg/m^3}))$	فاکتور ظرفیت جریان گاز
$g (m/s^2)$	شتاب جاذبه زمین
$G (kg/m^2.s)$	سرعت جرمی گاز

قطر برج توزیع مایع بهتر انجام می شود و در نتیجه سطح تماس انتقال جرم بالا می رود. دلیل دیگر، تأثیر سطح دیواره برج در انتقال جرم است. با کاهش قطر، دیواره برج تأثیر بیشتری در ایجاد سطح تماس برای انتقال جرم دارد، در نتیجه با افزایش سطح تماس انتقال جرم،  $Kg.ac$  افزایش پیدا می کند. در مورد استفاده از مقادیر مختلف عدد لوئیس، مشاهده شد که با افزایش عدد لوئیس مقدار  $kg$  کاهش می یابد.

## اندازه گیری ضرایب انتقال جرم فاز گاز در برج رطوبت زنی با آکنه های نامنظم

[7] Sherwood, T. K.; Holloway, F. A. L.(1940). "Performance of Packed Towers-Liquid Film Data for Several Packings". *Trans. Am. Inst. Chem. Eng.*, 36, 39.

[8] Kolev, N.(1976). "Operational Parameters of Randomly Packed Columns". *Chem. Ing. Tech.*, 48, 1105.

[۹] بهمنیار ح، (۱۳۸۶)، انتقال جرم، انتشارات جهاد دانشگاهی، ویرایش دوم، چاپ دوم.

[10] Nakajima, E. S.; Maffia, M. C.; Meirelles, A. J. A (2000). "Influence of Liquid Viscosity and Gas Superficial Velocity on Effective Mass Transfer Area in Packed Columns". *J. Chem. Eng. Jpn.*, 33, 561.

[11] Zivdar, M., HaghshenasFard, M., Princ, R.G.H (2006)., "Evaluation of pressure drop and mass transfer characteristic of a structured packing for production and separation of flood flavours, Part II, mass transfer characteristics", *Trans IchemE, Part C*, 84, 206-212.

[12] Shulman, H. L.; de Gouff, J. J.(1952) "Mass Transfer Coefficients and Interfacial Areas for 1-Inch Raschig Rings". *Ind. Eng. Chem.*, 44, 1915.

[13] Shulman, H. L.; Ullrich, C. F.; Proulx, A. Z.; Zimmerman, J.O.(1955). "Performance of Packed Columns. 2. Wetted and Effective Interfacial Areas, Gas- and Liquid-Phase Mass Transfer Rates". *AIChE J. I*, 253.

[14] Onda, K.; Takeuchi, H.; Okumoto, Y.(1968). "Mass Transfer Coefficients between Gas and Liquid Phases in Packed Columns". *J Chem. Eng. Jpn.*, 1, 56.

[15] Bravo, J. L.; Fair, J. R.(1982). "Generalized Correlation for Mass Transfer in Packed Distillation Columns". *Ind. Eng. Chem. Process Des.Dev.*, 21, 162.

[16] Zech, J. B.; Mersmann, A. B.(1979). "Liquid Flow and Liquid-Phase Mass Transfer in Irrigated Packed Columns". *Inst. Chem. Eng. Symp.Ser.*, 56, 39.

[17] Higbie, R.(1935). "The Rate of Absorption of a Pure Gas into a Still Liquid during Short Periods of Exposure". *Trans. Am. Inst. Chem. Eng.*, 31, 365.

[18] Henry, S. L., and R. E. (1975) Treybal: *Chem. Eng. Prog.*, 48, 717.

[19] McCabe, L. W., Smith, J. C(1993), "Harriott, P., Unit Operations of Chemical Engineering", 5th edition, McGraw-Hill, New York USA.,

[20] Rocha, J.A., Bravo, J.L., Fair, J.R(1993)., "Distillation Columns Containing Structured Packings: A Comprehensive Model for Their Performance.1. Hydraulic Models", *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 32, pp. 641-65.

[21] Xu, Z. (2000), "Predicting Mass Transfer in Packed Columns Containing Structured Packings", *Chem. Eng. Res. Des.*, 78, 91.

HETP(m) ارتفاع معادل یک واحد تئوری

HTU<sub>OG</sub> ارتفاع یک واحد کلی انتقال فاز گاز

K<sub>G</sub>(m/s) ضریب انتقال جرم در فاز گاز

L(kg/m<sup>2</sup>.s) سرعت جرمی مایع

Δp(Pa) افت فشار

t (s) زمان

T (°C) دما

a<sub>H</sub> (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>) سطح انتقال حرارت

ε تخلخل

μ(Kg/m.s) ویسکوزیته

ρ (kg/m<sup>3</sup>) چگالی

σ (N/m) کشش سطحی

Le = ( $\frac{Sc}{Pr}$ ) عدد لوئیس

Pr = ( $\frac{Cp \mu}{k}$ ) عدد پرانتل

Re = ( $\frac{\rho u}{a_p \mu}$ ) عدد رینولدز

Sc = ( $\frac{\mu}{\rho D}$ ) عدد اشمیت

Fr = ( $\frac{u^2 a_p}{s}$ ) عدد فرود

We = ( $\frac{\rho u^2}{a_p \sigma}$ ) عدد وبر

## مراجع

[1] Treybal, E. R.(1968), *Mass transfer operation*, Third Edition, McGraw-Hill, New York USA.

[2] Shetty, S., Cerro, R.L., (1997) "Fundamental liquid flow correlations for the computation of design parameters for ordered packings", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 36, 771-783.

[3] Shi, M. G.; Mersmann, A (1985). "Effective Interfacial Area in Packed Columns". *Ger. Chem. Eng.*, 8, 87.

[4] Billet, R. and Schultes, M., (1993) "Predicting Mass Transfer in Packed Columns", *Chem. Eng. Technol.* 16, 1-9.

[5] Hanley, B., A(1994) "Unified Model for Countercurrent Vapor/Liquid Packed Columns. 2. Equations for the Mass-Transfer Coefficients, Mass-Transfer Area, the HETP, and the Dynamic Liquid Holdup", *Ind. Eng. Chem. Res.* 33, 1222-1230.

[6] Wang, G. Q., Yuan, X. G., Tang, Z. L., Chen, J. B., Yu, K. T.(2005), "A shortcut method for estimation the HETP of structured packed distillation columns at elevated pressure", *Chem. Eng. Technol.*, 28, 7, 767-772.

## Measurement of mass transfer coefficients in the humidification column with random packing

Masoud Khorasani<sup>1,\*</sup>, Morteza Zivdar<sup>1</sup>, Farshad Farshchi Tabrizi<sup>1</sup>

1. Department of Chemical Engineering, University of Sistan & Baloochestan, Zahedan, Iran

---

### ABSTRACT

Packed columns are important parts of mass and heat transfer equipments, Nowadays, using packed columns is increasing due to lower pressure drop, higher capacity and mass transfer compared with tray columns.

In this survey, parameters affecting column performance were measured, these include: liquid hold up and gas-phase mass transfer coefficient in a humidification column using random packing in towers with 0.1m and 0.2m diameters and 1m height. In these experiments, liquid and gas phase were water and air, respectively. Air velocity was between 1.32 to 3.92 (m<sup>3</sup>/hr) and liquid velocity was between 10 and 70(m<sup>3</sup>/hr).

In this paper, Nakajima model was used to predict the effective area. Experimental data of gas-phase mass transfer coefficient was compared with Zech, Shi, Grouff, Shulman, Billet and Onda models. Average relative errors were 7%, 15%, 29%, 21%, 45% and 195% ,respectively. To predict mass transfer coefficients, Zech model was more accurate Also, by decreasing diameter of tower, gas-phase mass transfer coefficient(Kg.ae) increased.

---

### ARTICLE INFO

Article history:

Received in: June 30, 2014

Revised from: April 22, 2015

Accepted: May 25, 2015

---

Key words:

Packed column

Random packings

Mass transfer coefficients

Liquid hold up

Effective area

Humidification

---

All right reserved.

\* Corresponding author

msd.khorasani@yahoo.com

---