

بررسی تجربی ضریب کلی انتقال جرم و سطح تماس مخصوص در بسترهای پر شده نامنظم

فریبا زارعی¹، محمودرضا رحیمی^{2*}

¹ کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، کهگیلویه و بویراحمد، ایران

² دانشیار، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه یاسوج، کهگیلویه و بویراحمد، ایران

دریافت: 94/11/17 پذیرش: 95/8/25

چکیده

بررسی جامع متغیرهای اثرگذار بر انداز هسطح تماس مخصوص و ضریب کلی انتقال جرم با توجه به تابعیت ابعاد بهینه سیستم از این فاکتورها حائز اهمیت است. این امر با توجه به تعدد پارامترهای موثر، نیازمند بهره‌گیری از حجمبالای نتایج آزمایشگاهی می‌باشد. در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار طراحی آزمایش، تعداد آزمایش‌های مورد نیاز به منظور ارزیابی فاکتورهای فوق با بهره‌گیری از حداقل میزان واکنش‌دهنده‌ها و زمان مصرفی، انجام شده است. اثرپذیری این دو فاکتور از شدت و غلظت جریان‌های ورودی به سیستم بر پایه 30 داده تجربی اندازه‌گیری شده، مورد ارزیابی قرار گرفته شد. نتایج خروجی این نرم‌افزار به وضوح نشان دهنده تبیین کامل اثرپذیری هریک از کمیت‌ها از متغیرهای عملیاتی ذکر شده بوده است. به‌علاوه مطابقت قابل ملاحظه روند تغییرات نشان داده شده توسط نرم‌افزار با مبانی تئوری و شرایط عملیاتی، حاکی از عملکرد مطلوب این نرم‌افزار در بررسی سیستم‌های عملیاتی می‌باشد.

کلمات کلیدی: ضریب کلی انتقال جرم، سطح تماس مخصوص، بستر پر شده نامنظم، نرم‌افزار طراحی آزمایش

مقدمه

برج‌های پر شده با توجه به سرعت تجدید سطح بالا و همچنین افت فشار پایین‌تر نسبت به سایر تجهیزات، به‌طور گسترده در فرآیندهای شامل دو فاز گاز-مایع مورد استفاده قرار می‌گیرند [1 و 2]. در این اثنا دارا بودن سطح تماس بیش‌تر در واحد حجم، نسبت بالاتر سطح موثر به سطح کل، بالاتر بودن کیفیت توزیع فاز مایع و کم‌تر بودن نیروی وارده به دیواره موجب افزایش کارایی این سیستم‌ها در فرآیندهای مختلف

* mrrahimi@yu.ac.ir

صنعتی شده است [3]. با این حال، با وجود مزیت‌های قابل ملاحظه ذکر شده، پیش‌بینی مناسب ابعاد بخش پر شده در عملکرد مطلوب این سیستم‌ها به میزان قابل توجهی اثرگذار خواهد بود. در این میان دو فاکتور ضریب کلی انتقال جرم و سطح تماس مخصوص با توجه به تابعیت تعداد و ارتفاع واحدهای انتقال و به دنبال آن ابعاد نهایی بخش پر شده از این دو پارامتر، از مهم‌ترین کمیت‌های موثر در طراحی محسوب می‌شود. به طوری که ضریب کلی انتقال جرم را می‌توان به عنوان معیاری در تعیین کیفیت انتقال جرم صورت گرفته دانست که رابطه مستقیمی با سرعت انتقال جرم، سطح تبادل جرم دو فاز، تغییرات غلظت ایجاد شده و نیروی محرکه انتقال جرم دارد [4 و 5]. به علاوه ضریب کلی انتقال جرم فاکتوری اساسی در ارزیابی و تخمین میزان انتقال جرم بین دو فاز، حلالیت و اختلاط سیالات متعدد و یا سیال با یک جامد متخلخل می‌باشد. همچنین سطح تماس مخصوص بین دو فاز دیگر فاکتور کلیدی مورد بررسی می‌باشد که تابعیت قابل ملاحظه‌ای از نوع تجهیزات تماس‌دهنده‌ی گاز-مایع، شرایط عملیاتی و خواص دو فاز درگیر در فرآیند دارد. علاوه بر آن، اثرپذیری این پارامتر از الگوی جریان مربوط به هر دو فاز و نوع مقاومت حاکم بر سیستم انتقال جرم قابل چشم‌پوشی نمی‌باشد [6-8]. بنابراین لزوم بهره‌گیری از ابعاد بهینه در طراحی این سیستم-ها جهت دستیابی به میزان بازده مطلوب، تحت تاثیر پیش‌بینی مناسب سطح تماس موثر و ضریب کلی انتقال جرم به عنوان مهم‌ترین پارامترها و مشخصات طراحی بسترهای پر شده، حائز اهمیت است. به عبارت دیگر پیش‌بینی مناسب ضریب کلی انتقال جرم، با توجه به تابعیت مستقیم آن از میزان بازده سیستم و همچنین اثرگذاری این فاکتور بر ارتفاع و تعداد واحد انتقال مورد نیاز، در نهایت منجر به دستیابی به ابعاد بهینه سیستم و به دنبال آن حداقل میزان انرژی مصرفی خواهد شد. بنابراین با توجه به اهمیت قابل ملاحظه این دو پارامتر، حجم‌گسترده‌ای مطالعات انجام شده در این زمینه توسط محققین دور از انتظار نیست. شرود¹ و همکارانش طی چندین پژوهش در سال‌های 1938 تا 1940 میلادی با بهره‌گیری از سیستم جذبی اکسیژن-آب-هوا، بازده انتقال جرمی و هیدرودینامیک بسترهای آکنده را مورد مطالعه قرار دادند. این پژوهش‌ها در نهایت منجر به ارائه اولین رابطه‌ی موجود برای تعیین ضریب انتقال جرم در بسترهای پر شده نامنظم شد [9-11]. پس از آن ون کرولن² و هاف تیجر³ در سال 1947 میلادی تاثیر آکنه‌ها را در فرآیند انتقال جرم با استفاده از تئوری سنتیک عام واکنش‌های شیمیایی گاز-مایع برای سیستم‌های جذب حاوی واکنش شیمیایی، مورد بررسی قرار دادند [12 و 13]. در ادامه این بررسی‌ها، شولمن⁴ طی سال‌های 1952 تا 1971 میلادی، بازده بسترهای پر شده برای سیستم‌های آبی و غیرآبی را به صورت تجربی مورد مطالعه قرار داد. از جمله نتایج مطرح به دست آمده توسط او می‌توان به تعیین ضریب انتقال جرم مربوط به فاز بخار با استفاده از فرآیند تبخیر و استفاده از آن به منظور تعیین سطح تر شده آکنه‌ها و همچنین سطح تماس مخصوص بستر، اشاره کرد [14-23]. اولین و مهم‌ترین رابطه موجود در زمینه پیش‌بینی ضریب انتقال جرم

¹Sherwood

²Van Krevelen

³Hoftijzer

⁴Shulman

را می‌توان به اوند¹ و همکارانش در سال 1959 میلادی نسبت داد، که انتشار فرم اصلاح شده و نهایی این رابطه در سال 1968 میلادی توسط وی انجام شد [24-26]. از دیگر تلاش‌های صورت گرفته در زمینه مطالعه تئوری و تجربی ضریب کلی انتقال جرم می‌توان به مطالعات انجام شده توسط کورنل² و همکارانش [27 و 28]، بولز³ و فیر⁴ [29 و 30]، براوو⁵ و فیر [31]، زیچ⁶ و میرسمان⁷ [32-34]، مانگرز⁸ و پونتر⁹ [35] و بیلت¹⁰ و شولتر¹¹ [36 و 37] اشاره کرد. هم‌چنین پیش‌بینی ضریب کلی انتقال جرم در بسترهای پر شده نامنظم با بهره‌گیری از روش 12PNN از دیگر مطالعات انجام شده در این حوزه می‌باشد که در سال‌های 2001 تا 2003 میلادی توسط پیچ¹³ و همکارانش انجام شده است [38-40]. پس از آن سونگ¹⁴ و همکارانش در سال 2014 میلادی به بررسی تاثیر ویسکوزیته فاز مایع و ارائه مدل به منظور اعمال تاثیر ویسکوزیته بر روی ضریب انتقال جرم در بسترهای دیواره مرطوب پرداختند که در نهایت منجر به ارائه یک رابطه به منظور محاسبه ضریب انتقال جرم فاز مایع با در نظر گرفتن تاثیر پارامترهایی چون ضریب نفوذ، ثابت هنری و دانسیته علاوه بر ویسکوزیته فاز مایع، شد [41]. علاوه بر این حجم مطالعات صورت گرفته در زمینه بررسی تئوری و تجربی سطح تماس مخصوص نیز در جای خود قابل تامل است به‌طوری‌که طی سالیان اخیر پژوهش‌های متعددی توسط شمار زیادی از محققان در این زمینه صورت پذیرفته است. در سال 1955 میلادی برای نخستین بار سطح تماس موثر بسترهای پر شده برای فرآیندهای تبخیر، جذب و واجذب با محلول‌های آبی رقیق و یا آب، توسط شولمن و همکارانش اندازه‌گیری شد. آن‌ها هم‌چنین نتایج تجربی به‌دست آمده خود را طی چندین نمودار به منظور تشریح تابعیت این کمیت از شدت جریان دو فاز، ارائه کردند [16]. پس از آن پرانیک¹⁵ و وجیلپول¹⁶ در سال 1974 میلادی رابطه‌ای برای محاسبه سطح موثر تماس، بر اساس فرآیندهای تبخیر و جذب در سیستم‌های فاقد واکنش‌های شیمیایی، ارائه کردند. از جمله مزیت‌های قابل ملاحظه این رابطه، فراهم کردن امکان پیش‌بینی تاثیر پارامترهای عملیاتی بر روی سطح تماس با حداکثر دقت قابل قبول و هم‌چنین تمایز میان سطح تماس تر شده و سطح تماس مخصوص می‌باشد [42]. به‌علاوه، اوند¹ و همکارانش در سال 1978 میلادی طی مطالعاتی با بررسی تاثیرات

¹Onda²Cornell³Bolles⁴Fair⁵Bravo⁶Zech⁷Mersmann⁸Mangers⁹Ponter¹⁰Billet¹¹Schultes¹²artificial neuralnetwork¹³Piche¹⁴Song¹⁵Puranik¹⁶Vogelpohl

هیدرودینامیکی و خواص فیزیکی فاز مایعبر روی سطح ترشده آکنه‌ها، رابطه‌ای نسبتاً مقبول برای محاسبه سطح تماس موثر ارائه کردند که در جای خود رابطه‌ای قوی به منظور پیش‌بینی اینکمیت محسوب می‌شود. [26] مطالعات انجام شده توسط کولو و همکارانش و زیچ و میرسمان [32-34] بولز و همکارانش [43]، بیلت و شولتز [44 و 45] از مهم‌ترین تحقیقات انجام شده در این زمینه می‌باشد که نتایج به‌دست آمده از هر یک آن‌ها را می‌توان نقطه آغازی در گسترش مطالعات صورت گرفته در آن حوزه دانست. همچنین در سال 2006 میلادی مدل یک تجربی توسط وانگ¹ و همکارانش با هدف به‌دست آوردن یک مدل جدید در زمینه پیش‌بینی سطح تماس موثر ایجاد شده در بسترهای پرشده به واسطه اعمال تاثیر فشار بستر بر سطح تماس ویژه، دست به مطالعاتی زدند [46]. به‌علاوه، آفرکا² و همکارانش در سال 2011 میلادی با بهره‌گیری از روش توموگرافی میزان سطح تماس مخصوص مربوط به بسترهای پرشده را اندازه‌گیری و گزارش کردند [47]. همچنین لزوم مطالعه مبانی روش طراحی آزمایش به عنوان راه‌حل کلیدی مورد استفاده حائز اهمیت می‌باشد.

طراحی آزمایش شامل یک سری از آزمایش‌هایی می‌شود که به‌طور آگاهانه در متغیرهای ورودی یک فرآیند تغییراتی ایجاد می‌کند تا از این طریق میزان تغییرات حاصل در پاسخ خروجی فرآیند مشاهده و شناسایی شود [48]. این فرآیند را می‌توان ترکیبی از دستگاه‌ها، روش‌ها و افراد تصور نمود که متغیرهای ورودی را به یک محصول خروجی تبدیل می‌کنند. این محصول خروجی دارای یک یا چند مشخصه‌ی کیفی با پاسخ‌های قابل مشاهده است. طراحی آزمایش‌ها برای این منظور از ابزارهای آماری استفاده می‌کنند که عمده‌ترین ابزارهای این حوزه عبارتند از ابزارهای طراحی و تحلیل آزمایشات [49]. در این میان روش‌های پاسخ سطح که یکی از مدل‌های طراحی آزمایش محسوب می‌شود، مجموعه‌ای از روش‌های ریاضی و آماری هستند که برای مدل‌سازی و آنالیز یک یا چند پاسخ متأثر از چندمتغیر مختلف می‌باشد و در مواردی که حد فاصلی آن بهینه‌سازی پاسخ است، مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین مرحله اصلی در روش رویه پاسخ، پیدا کردن یک تقریب مناسب برای برقراری ارتباط بین توابع پاسخ‌ها و متغیرها می‌باشد [50]. در این راستا، با توجه به بالا بودن تعداد آزمایش‌ها و نتایج تجربی مورد نیاز به منظور بررسی اثرگذاری هر یک از متغیرهای عملیاتی بر فاکتورهای مورد بحث (سطح تماس مخصوص و ضریب کلی انتقال جرم فاز گاز) به عنوان معضل حل نشدن مطالعات صورت گرفته تا به امروز، سعی در بر طرف نمودن آن به واسطه ارائه راه‌کار مناسب و موثر شده است. در این پژوهش با بهره‌گیری از نرم‌افزار طراحی آزمایش اثر پذیری سطح تماس مخصوص و ضریب کلی انتقال جرم فاز گاز از چهار متغیر عملیاتی شدت جریان و غلظت دو فاز ورودی مورد مطالعه قرار گرفته است که محدوده تغییرات هر یک از متغیرهای مطرح شده در جدول 1 قابل مشاهده است. تعیین و تحلیل نتایج تجربی به‌دست آمده با استفاده از کم‌ترین تعداد آزمایش ممکن به ازای پنج سطح تغییرات تعریف شده برای هر متغیر عملیاتی، از مهم‌ترین مزایای روش مطرح شده در این کار می‌باشد. میزان مطلوبیت این

¹Wang

²Aferka

روش با توجه به کاهش هزینه و صرف جویی قابل ملاحظه در وقت توام با کاهش تاثیرات سوء زیست محیطی ترکیبات درگیر در واکنش کاملاً مشهود است. علاوه بر این امتناع از گزارش روند جامع و کامل روش آزمایشگاهی و روابط مربوط به تعیین تجربی سطح تماس مخصوص در تحقیقات پیشین، از دیگر نارسایی‌های قابل ملاحظه می‌باشد که در این مطالعه سعی در برطرف نمودن آن شده است.

روش تحقیق

1- سیستم آزمایشگاهی

شکل 1 نمای کلی سیستم آزمایشگاهی بستر پر شده نامنظم را نشان می‌دهد. آکنه‌های مورد استفاده در این بستر راشیگ رینگ 0/5 اینچی می‌باشد که در نهایت دو بخش به ارتفاع 0/3 متر و شعاع 0/08 با میزان تخلخل 0/67 و سطح 360 را شامل می‌شود. آزمایش‌های هیدرودینامیکی در ابتدای کار به منظور جلوگیری از وقوع پدیده‌های طغیان و حمل مایع انجام و با هدف تعیین حداکثر و حداقل میزان شدت جریان‌های دو فاز ورودی، انجام می‌شود.

تعداد بهینه آزمایش‌های لازم جهت بررسی کامل متغیرهای مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار طراحی آزمایش و با بهره‌گیری از روش پاسخ سطح و تقسیم بندی 5 سطح تغییرات برای هر یک از متغیرها، تعیین می‌شود. به علاوه، محدوده تغییرات هر یک از متغیرهای عملیاتی مورد بحث در جدول 1 ارائه شده است. همچنین دو فاز گاز و مایع خروجی از سیستم در نهایت به منظور محاسبه درصد حذف و درصد پیشرفت واکنش مورد آنالیز قرار می‌گیرد.

جدول 1. محدوده تغییرات متغیرهای عملیاتی مورد بررسی

متغیر عملیاتی	محدوده تغییرات
شدت جریان مایع ورودی (لیتر بر ساعت)	100 - 300
شدت جریان گاز ورودی (متر مکعب بر ساعت)	1 - 5
غلظت سدیم هیدروکسید در جریان مایع ورودی (مول بر لیتر)	0/2 - 1
درصد مولی کربن دی اکسید در جریان گاز ورودی	10% - 2%

غلظت کربن دی اکسید خروجی در جریان گاز با استفاده از دستگاه دیجیتالی تحت عنوان "CO₂ meter" و همچنین مقدار یون هیدروکسید و بی کربنات به واسطه تیتراسیون جریان مایع خروجی با استفاده از دو شناساگر متیل اورانژ (V₁) و فنل فتالین (V₂) و همچنین با بهره‌گیری از هیدروکلریک اسید به عنوان تیترانت مطابق با رابطه 1 و 2 تعیین می‌شود.

$$V_{CO_3^{2-}} = \frac{V_2 - V_1}{V_0} \times V_{HCL} \quad (1)$$

$$V_{OH^-} = \frac{V_1}{V_0} \times V_{HCL} \quad (2)$$

۲- روابط تئوری

ضریب کلی انتقال جرم فاز گاز مربوط به بسترهای پر شده از طریق رابطه‌ی متداول زیر که به عنوان رابطه معتبر به منظور تعیین تجربی اینکمیتبا استفاده از داده‌های آزمایشگاهی شناخته شده است، تعیین می‌شود:

$$K_G a = \frac{U_G}{Z} \ln \left(\frac{Y_{CO_2, in}}{Y_{CO_2, out}} \right) = \frac{Q_G}{Z A_C} \ln \left(\frac{Y_{CO_2, in}}{Y_{CO_2, out}} \right) \quad (3)$$

سطح تماس مخصوص فاکتور بعدی مورد بررسی می‌باشد که مطابق روابط زیر با استفاده از روش شیمیایی و بر پایه آنالیز واکنش شیمیایی و همچنین با بهره‌گیری از داده‌های مربوط به ضریب کلی انتقال جرم، محاسبه می‌شود:

$$a = \frac{K_G a}{K_G} \quad (4)$$

$$K_G = \frac{\sqrt{k_{OH^-} C_{OH^-} D_{CO_2}}}{H_{CO_2}} \quad (5)$$

$$\log_{10} D_{CO_2} = -8.1764 + \frac{712.5}{T} - \frac{2.591 \times 10^5}{T^2} \quad (6)$$

$$H_{CO_2} = \frac{1}{H} \quad (7)$$

$$\log \left(\frac{H}{H_0} \right) = -\sum hI \quad (8)$$

$$\log_{10} H_0 = 9.1229 - 5.9044 \times 10^{-2} T + 7.8857 \times 10^{-5} T^2 \quad (9)$$

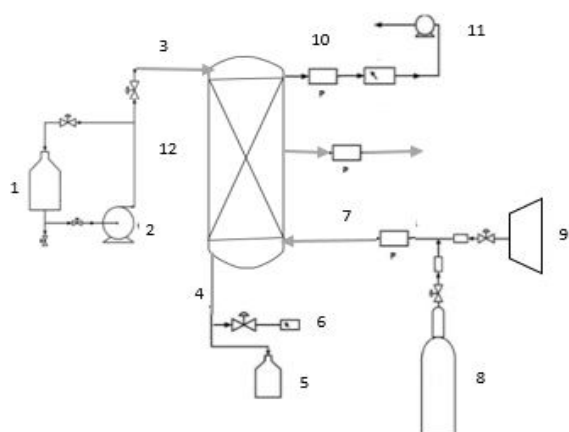
$$I = \frac{1}{2} \sum C_i Z_i^2 \quad (10)$$

$$h = h_+ + h_- + h_G \quad (11)$$

ثابت سرعت واکنش شیمیایی با استفاده از رابطه‌ی زیر که در سال 1988 توسط مونیوک¹ و همکارانش ارائه شده است تعیین می‌شود [51]:

$$\log_{10}(k_{OH^-}) = 11.895 - \frac{2832}{T} + 0.221 I_C - 0.0161 I_C^2 \quad (12)$$

¹Moniuk

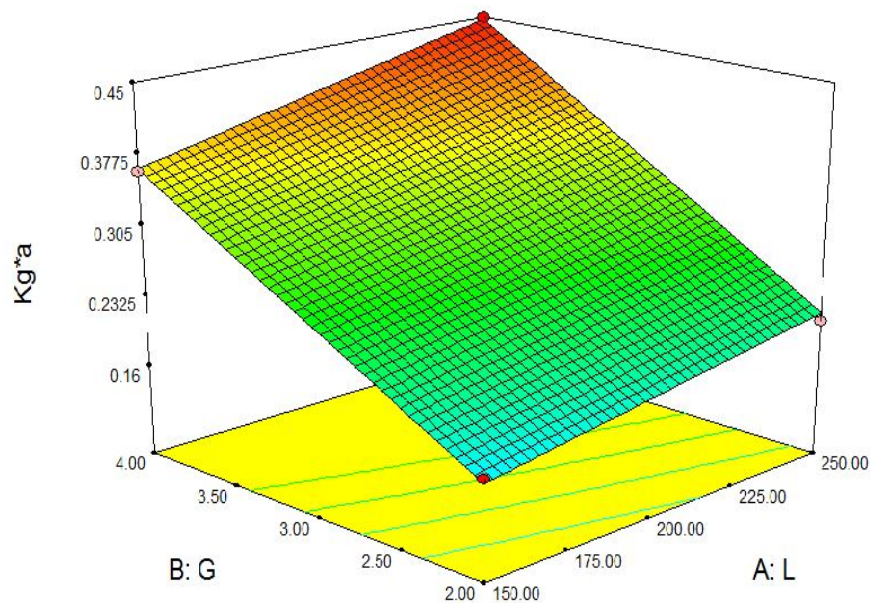


1	مخزن نگهداری مایع ورودی	7	ورودی جریان گاز
2	پمپ	8	مخزن کربن دی اکسید
3	ورودی جریان مایع	9	کمپرسور
4	خروجی جریان مایع	10	خروجی جریان گاز
5	مخزن نگهداری مایع خروجی	11	پمپ خلا
6	نمونه گیر مایع	12	بستر پر شده

شکل 1. نمای کلی از سیستم آزمایشگاهی بستر پر شده نامنظم

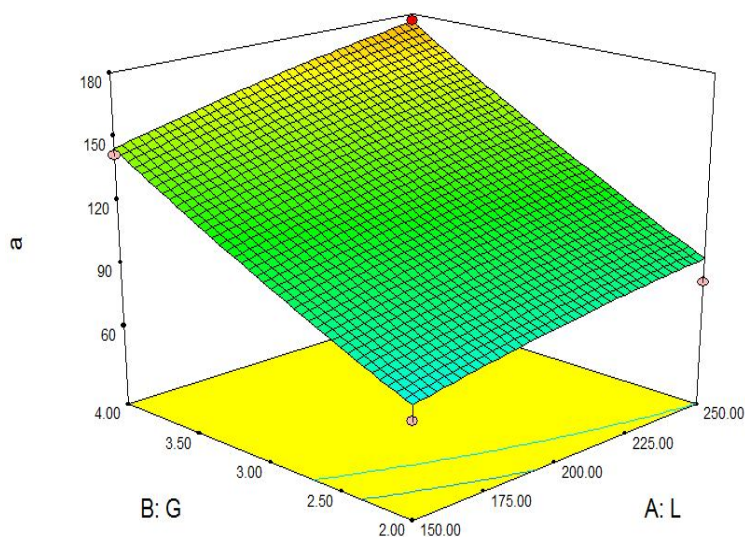
نتایج و بحث

تغییرات ضریب کلی انتقال جرم فاز گاز بر حسب نرخ جریان دو فاز ورودی در شکل 2 نشان داده شده است. همان طور که قابل مشاهده است از آنجایی که میزان حذف با افزایش شدت جریان مایع و همچنین نرخ جریان گاز افزایش می یابد، بنابراین بر اساس رابطه 3 ضریب کلی انتقال جرم نیز روند افزایشی را در پیش خواهد داشت. بیش تر بودن تاثیر افزایش نرخ جریان گاز ورودی نسبت به شدت جریان محلول جاذب مطابق شکل کاملا مشهود است. از آنجایی که جریان مایع به واسطه توزیع کننده تعبیه شده در ورودی بستر پراکنده می شود، بنابراین در این شرایط اهمیت توزیع مناسب تر جریان گاز در افزایش سطح تبادل جرم میان دو فاز بیش تر خواهد بود. افزایش نرخ فاز گاز ورودی در نهایت منجر به افزایش سرعت ظاهری جریان گاز در بستر و بالا رفتن میزان تنش مبادله شده بین دو فاز در محیط سیستم خواهد شد. علاوه بر این، افزایش میزان انتقال جرم صورت گرفته به واسطه بیش تر شدن شدت جریان محلول جاذب ورودی و به دنبال آن بهبود کیفیت عملکرد توزیع کننده موجود در ورودی جریان مایع و به دنبال آن کوچک تر شدن ابعاد قطره ها و فیلم مایع جاری در بستر توام با بیش تر شدن میزان جاذب در دسترس، کاملاً توجیه پذیر می باشد. به عبارت دیگر در اثر افزایش نرخ جریان های ورودی مربوط به دو فاز درگیر در فرآیند، درصد واکنش جذب به میزان قابل ملاحظه ای در اثر بیش تر شدن میزان واکنش دهنده های در دسترس و همچنین سطح تبادل جرم دو فاز، افزایش خواهد یافت.



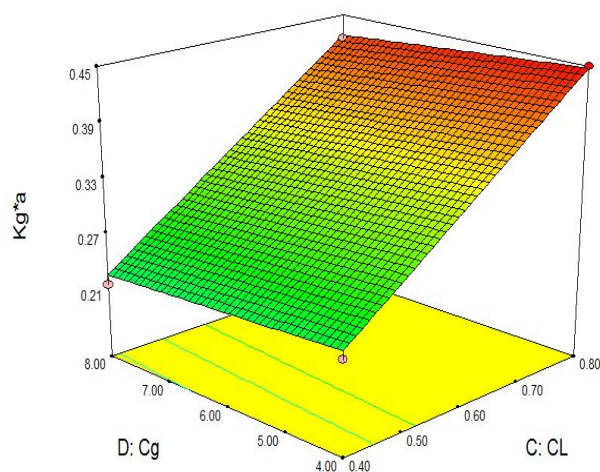
شکل 2. تغییرات ضریب کلی انتقال جرم فاز گاز بر حسب شدت جریان دو فاز ورودی در حداکثر غلظت محلول جاذب ورودی و حداقل کسر مولی کربن دی اکسید ورودی در جریان گاز

همچنین اثرپذیری سطح تماس مخصوص از شدت جریان دو فاز ورودی مطابق با شکل 3 نشان داده شده است. با توجه به افزایش سرعت ظاهری جریان گاز در اثر افزایش نرخ جریان گاز ورودی و به دنبال آن بالا رفتن میزان انرژی جنبشی در طی مسیر و همچنین افزایش قابلیت ایجاد اغشتاش و اختلاط در جریان محلول جاذب و آشفته تر شدن فاز پیوسته، همراه با بیش تر شدن میزان کربن دی اکسید در دسترس برای واکنش صورت گرفته در سیستم، سطح تماس مخصوص با بالا رفتن نرخ جریان گاز ورودی افزایش می یابد. به عبارت دیگر افزایش میزان انرژی جنبشی فاز گاز موجب می شود تا این جریان در طی مسیر خود با برخورد با جریان فاز مقابل موجب شکستن شدن توده های فاز مایع می شود و در نتیجه آن سطح تماس بین دو فاز به میزان قابل توجهی بیش تر می شود. همچنین، اثرپذیری سطح تماس مخصوص از شدت جریان محلول جاذب ورودی با توجه به روابط مطرح شده و تابعیت قابل ملاحظه این فاکتور از درصد پیشرفت واکنش و شدت جذب صورت گرفته مطابق با روابط ارائه شده در بخش تئوری کاملاً قابل درک می باشد. بیش تر شدن میزان حذف در اثر افزایش مقدار جاذب موجود در محیط در کنار کاهش ضخامت فیلم های جاری در بستر در اثر تغذیه مناسب تر توزیع کننده و بهبود عملکرد آن، در نهایت منجر به افزایش سطح تماس بین دو فاز خواهد شد.



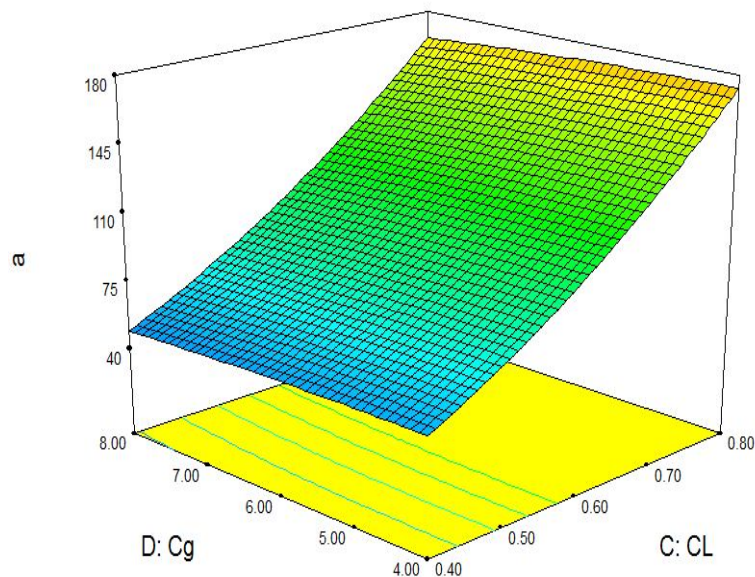
شکل 3. تغییرات سطح تماس مخصوص بر حسب شدت جریان دو فاز ورودی در حداکثر غلظت محلول جاذب ورودی و حداقل کسر مولی کربن دی اکسید ورودی در جریان گاز

با توجه به تابعیت فاحش دو فاکتور سطح تماس مخصوص و ضریب کلی انتقال جرم از میزان جذب صورت گرفته، بررسی اثرپذیری این دو فاکتور از میزان جاذب و جذب شونده ورودی حائز اهمیت می‌باشد. تاثیر غلظت محلول جاذب و میزان کربن دی اکسید موجود در جریان گاز ورودی به بستر بر میزان سطح تماس مخصوص و ضریب کلی انتقال جرم به دست آمده در شکل‌های 4 و 5 نشان داده شده است. بر اساس نتایج ارائه شده، با افزایش میزان جاذب ورودی به بستر و همچنین کاهش میزان کربن دی اکسید موجود در جریان گاز، درصد حذف افزایش می‌یابد.



شکل 4. تغییرات ضریب کلی انتقال جرم فاز گاز در غلظت‌های مختلف دو فاز ورودی در حداکثر شدت جریان دو فاز

عموماً انتظار می‌رود که با افزایش مقدار واکنش دهنده‌های موجود در محیط در اثر بیش‌تر شدن غلظت جاذب و جذب شونده موجود در جریان‌های ورودی، درصد پیشرفت واکنش و همچنین مقدار یون بی‌کربنات تولیدی بالا رود. این روند به‌طور کامل با تغییرات غلظت جاذب ورودی به سیستم هم‌خوانی دارد. به‌طوری که با بیش‌تر شدن آن میزان جذب به‌صورت چشمگیری بالا می‌رود. با این حال، منطق مطرح شده در مورد کسر مولی کربن دی‌اکسید ورودی بصورت متفاوتی رفتار می‌کند. مطابق نمودارهای ارائه شده میزان جذب با معکوس غلظت جذب شونده‌ی مورد نظر در فاز گاز، متناسب است. از آنجایی که در صورت کم‌تر بودن میزان کربن دی‌اکسید ورودی به محیط سیستم و کافی بودن زمان لازم به منظور انجام حداکثری واکنش، مقدار کربن دی‌اکسید خروجی به نسبت کسر مولی‌های بالاتر کم‌تر خواهد بود، در نتیجه انتظار می‌رود که میزان درصد جذب بالاتری مشاهده شود. به عبارت دیگر در شرایطی که میزان سدیم هیدروکسید موجود کافی باشد، کربن دی‌اکسید به عنوان واکنش دهنده محدود کننده عمل خواهد کرد و در نتیجه‌ی آن سیستم به منظور افزایش بازده نهایی سعی در استفاده حداکثری از CO_2 های موجود در محیط می‌کند. بنابراین نسبت کسر مولی کربن‌دی‌اکسید موجود در جریان ورودی به خروجی افزایش یافته و با توجه به رابطه لگاریتمی ضریب کلی انتقال جرم با این کسر، در نهایت موجب افزایش ضریب کلی انتقال جرم و همچنین سطح تماس مخصوص (با توجه به روابط ارائه شده و ارتباط درصد حذف با میزان سطح تماس مخصوص سیستم) خواهد شد. علاوه بر این، غلظت محلول جاذب ورودی فاکتور چالش برانگیز دیگری خواهد بود. به‌طوری که مطابق با نمودارهای ارائه شده در غلظت‌های پایین‌تر از محلول جاذب ورودی، تاثیر



شکل 5. تغییرات سطح تماس مخصوص در غلظت‌های مختلف دو فاز ورودی در حداکثر شدت جریان دو فاز

پارامترهای عملیاتی به دلیل کم بودن میزان جاذب موجود در بستر و به دنبال آن کاهش سرعت تولید محصولات، نامحسوس تر خواهد بود. این امر با توجه به نزدیکی نتایج به دست آمده در اثر تغییر هر یک از پارامترهای عملیاتی کاملاً مشهود است. بنابراین تعیین مقدار بهینه هر یک از چهار متغیر عملیاتی مطرح شده به عنوان پارامترهای تحت کنترل کاربر به منظور دستیابی به میزان بازده مورد انتظار در اثر بهره‌گیری از حداقل میزان انرژی و مواد مصرفی، به میزان قابل توجهی حائز اهمیت خواهد بود.

نتیجه‌گیری

هم‌خوانی و هماهنگی میان خروجی‌های ارائه شده توسط نرم‌افزار با مبانی تئوری-تجربی سیستم عملیاتی در بخش‌های قبل به وضوح قابل مشاهده است. تحلیل جامع و کامل به دست آمده با وجود کاهش 625 تست مورد نیاز به 30 آزمایش، خود شاهدهی بر کیفیت و بازده قابل توجه نرم‌افزارهای طراحی آزمایش در بررسی‌های تجربی سیستم‌های آزمایشگاهی می‌باشد. صرفه جویی در وقت و هزینه کاربر از جمله بارزترین مزیت‌های این روش کار می‌باشد. در این پژوهش علاوه بر ارائه روش مناسب در حداقل کردن تعداد آزمایش‌های مورد نیاز در ارزیابی فاکتورهای مورد نظر، روش تعیین تجربی سطح تماس مخصوص به طور کامل تشریح شده است و روابط و متغیرهای مورد نیاز ارائه شده است که از جمله ویژگی‌های بارز مطالعه انجام شده می‌باشد. علاوه بر این مقدار Adeq-precision برای ضریب کلی انتقال جرم برابر با 83/831 و همچنین برای سطح تماس مخصوص برابر با 24/080 بوده است که این مقادیر نشان دهنده مطلوبیت قابل ملاحظه نتایج به دست آمده می‌باشد. در نتیجه با توجه به مباحث مطرح شده در فوق، بالا بودن میزانتسلط و کنترل کاربر در نتایج اندازه‌گیری شده از دیگر ویژگی‌های قابل توجهی می‌باشد که به واسطه بهره‌گیری از این روش کار میسر شده است و در نهایت موجب برتری این روش در مطالعه و بررسی اثرپذیری فاکتورهای مختلف طراحی و عملیاتی در مقیاس‌های آزمایشگاهی شده است.

فهرست علائم و نشانه‌ها

a : سطح تماس مخصوص گاز-مایع در بستر (m^{-1})

C_{OH^-} و $C_{CO_3^{2-}}$: غلظت یون‌های بی‌کربنات و هیدروکسید در نمونه تهیه شده از مایع خروجی (mol/Lit)

D : ضریب نفوذ مربن دی اکسید در محلول جاذب (m^2/s)

H_0 و H : ضریب حلالیت کربن دی اکسید در محلول الکترولیت و آب خالص ($Kmol/m^3Mpa$)

h_+ و h_- : ثابت یونی

I : قدرت یونی

k_1 : ثابت سرعت واکنش درجه اول ($1/s$)

هیدروکسید و اکسید دی کربن بین دوم درجه واکنش سرعت ثابت k_2 : ($m^3/Kmol.s$)

k_2^∞ : ثابت سرعت واکنش در محلول رقیق سود ($m^3/Kmol.s$)

N_i : شدت جذب کربن دی اکسید ($Kmol/m^2.s$)

$y_{CO_2}^i$ و $y_{CO_2}^o$: سیسٹم به ورودی و خروجی گاز جریان در اکسید دی کربن مولی کسر

بستر حجم (m^3): V

یونی ظرفیت Z_i :

A : جرم انتقال جهت بر عمود سطح مساحت (m^2)

C_i و C_o : ورودی و خروجی هوای جریان در اکسید دی کربن غلظت (mol/Lit)

y_i و y_o : ورودی و خروجی هوای جریان در اکسید دی کربن مولی کسر

گاز جریان نرخ Q : (m^3/s)

R_o و R_i : شده بر بستر خارجی و داخلی شعاع (m)

u : سرعت متوسط فاز مایع در بستر (m/s)

Z : ارتفاع بستر پر شده (m)

منابع

1. Ali, A. Mohamed, P. J. Jansens, and Ž. Olujić. "Experimental characterization and computational fluid dynamics simulation of gas distribution performance of liquid (re) distributors and collectors in packed columns." *Chemical Engineering Research and Design* 81.1 (2003): 108-115.
2. Fourati, Manel, VéroniqueRoig, and LudovicRaynal. "Experimental study of liquid spreading in structured packings." *Chemical Engineering Science* 80 (2012): 1-15.
3. Aroonwilas, Adisorn, Amit Chakma, PaitoonTontiwachwuthikul, and AmornvadeeVeawab. "Mathematical modelling of mass-transfer and hydrodynamics in CO₂ absorbers packed with structured packings." *Chemical Engineering Science* 58, no. 17 (2003): 4037-4053.
4. Luo, Yong, Guang-Wen Chu, Hai-KuiZou, Zhi-Qiang Zhao, Milorad P. Dudukovic, and Jian-Feng Chen. "Gas-liquid effective interfacial area in a rotating packed bed." *Industrial & engineering chemistry research* 51, no. 50 (2012): 16320-16325.
5. Luo, Yong, Guang-Wen Chu, Hai-KuiZou, Yang Xiang, Lei Shao, and Jian-Feng Chen. "Characteristics of a two-stage counter-current rotating packed bed for continuous distillation." *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 52 (2012): 55-62.
6. Liu, Yacheng, Weidong Fan, Kang Wang, and Junchao Wang. "Studies of CO₂ absorption/regeneration performances of novel aqueous monoethanolamine (MEA)-based solutions." *Journal of Cleaner Production* 112 (2016): 4012-4021.
7. Qian, Zhi, LianbinXu, Huibo Cao, and Kai Guo. "Modeling study on absorption of CO₂ by aqueous solutions of N-methyldiethanolamine in rotating packed bed." *Industrial & Engineering Chemistry Research* 48, no. 20 (2009): 9261-9267..
8. York, Jesse Louis, and Harry Eugene Stubbs. "Photographic analysis of sprays." (1951).
9. Sherwood, T. K., G. H. Shipley, and F. A. L. Holloway. "Flooding velocities in packed columns." *Industrial & Engineering Chemistry* 30.7 (1938): 765-769.



10. Sherwood, T. K., and F. A. L. Holloway. "Performance of packed towers—experimental studies of absorption and desorption." *Trans. Am. Inst. Chem. Eng* 36 (1940): 21.
11. Sherwood, T. K., and F. A. L. Holloway. "Performance of packed towers-liquid film data for several packings." *Trans Am. Inst. Chem. Engrs* 36 (1940): 39-70.
12. Van Krevelen, D. W., and P. J. Hoftijzer. "Studies of gas absorption. I. Liquid film resistance to gas absorption in scrubbers." *Recueil des Travaux Chimiques des Pays-Bas* 66.1 (1947): 49-65.
13. Vankrevelen, DW, and P. J. Hoftijzer. "Kinetics of simultaneous absorption and chemical reaction." *Chemical Engineering Progress* 44.7 (1948): 529-536.
14. Shulman, H. L., and J. J. DeGouff. "Mass transfer coefficients and interfacial areas for 1-inch raschig rings." *Industrial & Engineering Chemistry* 44.8 (1952): 1915-1922.
15. Shulman, H. L., C. F. Ullrich, and N. Wells. "Performance of packed columns. I. Total, static, and operating holdups." *AICHe Journal* 1.2 (1955): 247-253.
16. Shulman, H. L., C. F. Ullrich, A. Z. Proulx, and J. O. Zimmerman. "Performance of packed columns. II. Wetted and effective-interfacial areas, gas-and liquid-phase mass transfer rates." *AICHe Journal* 1, no. 2 (1955): 253-258.
17. Shulman, H. L., C. F. Ullrich, N. Wells, and A. Z. Proulx. "Performance of packed columns. III. Holdup for aqueous and nonaqueous systems." *AICHe Journal* 1, no. 2 (1955): 259-264.
18. Shulman, H. L., and J. E. Margolis. "Performance of packed columns. IV. Effect of gas properties, temperature, and pressure on gasphase mass transfer coefficients." *AICHe Journal* 3.2 (1957): 157-161.
19. Shulman, H. L., and L. J. Delaney. "Performance of packed columns: V. Effect of solute concentration on gas-phase mass transfer rates." *AICHe Journal* 5.3 (1959): 290-294.
20. Shulman, H. L., and R. G. Robinson. "Performance of packed columns: VI. Mass transfer rates for dehumidification at high solute concentrations." *AICHe Journal* 6.3 (1960): 469-472.
21. Shulman, H. L., C. G. Savini, and R. V. Edwin. "Performance of packed columns VII. The effect of holdup on gas-phase mass transfer rates." *AICHe Journal* 9.4 (1963): 479-484.
22. Shulman, H. L., and W. G. Mellish. "Performance of packed columns: Part VIII. Liquid flow patterns and velocities in packed beds." *AICHe Journal* 13.6 (1967): 1137-1140.
23. Shulman, H. L., W. G. Mellish, and W. H. Lyman. "Performance of packed columns: IX. Simulation of a packed column." *AICHe Journal* 17.3 (1971): 631-640.
24. Onda, Kakusaburo, ElzôSada, and Yasuhiro Murase. "Liquid-side mass transfer coefficients in packed towers." *AICHe Journal* 5.3 (1959).
25. Onda, Kakusaburo, Hiroshi Takeuchi, and Yoshio Okumoto. "Mass transfer coefficients between gas and liquid phases in packed columns." *Journal of Chemical Engineering of Japan* 1.1 (1968): 56-62.
26. Onda, Kakusaburo, EizoSada, and Hiroshi Takeuchi. "Gas absorption with chemical reaction in packed columns." *Journal of Chemical Engineering of Japan* 1.1 (1968): 62-66.
27. Cornell, D., W. G. Knapp, and J. R. Fair. "Mass transfer efficiency packed columns part 1." *Chemical Engineering Progress* 56.7 (1960): 68-74.
28. Cornell, D., W. G. Knapp, and J. R. Fair. "Mass transfer efficiency packed columns part 1." *Chemical Engineering Progress* 56.7 (1960): 68-74.
29. Bolles, W. L., and J. R. Fair. "Performance and design of packed distillation columns." *Inst. Chem. Eng. Symp. Ser. Vol. 56. No. 3.3.* 1979.
30. Bolles, W. L., and J. R. Fair. "Improved Mass-Transfer Model Enhances Packed-Column Design." *Chemical Engineering* 89.14 (1982): 109-116.

31. Bravo, Jose L., and James R. Fair. "Generalized correlation for mass transfer in packed distillation columns." *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development* 21.1 (1982): 162-170.
32. Zech, J. B. "Liquid Flow and Mass Transfer in Irrigated Packings". Diss. Doctoral Dissertation, TU Munchen, Munchen, Germany, 1978.
33. Zech, J. B., and A. B. Mersmann. "Liquid flow and mass transfer in irrigated packed columns." *Chem. Ing. Tech* 50 (1978): 549.
34. Zech, J. B., and A. B. Mersmann. "Liquid flow and liquid phase mass transfer in irrigated packed columns." *Inst. Chem. Eng. Symp. Ser. Vol. 56*. 1979.
35. Mangers, Robert J., and Anthony B. Ponter. "Effect of viscosity on liquid film resistance to mass transfer in a packed column." *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development* 19.4 (1980): 530-537.
36. Mersmann, A., and A. Deixler. "Packed columns." *German chemical engineering* 9.5 (1986): 265-276.
37. Billet, R., and M. Schultes. "Advantage in correlating packed column performance." *INSTITUTION OF CHEMICAL ENGINEERS SYMPOSIUM SERIES. Vol. 128. HEMISPHERE PUBLISHING CORPORATION*, 1992.
38. Piché, Simon, Bernard PA Grandjean, Ion Iliuta, and FaïçalLarachi. "Interfacial mass transfer in randomly packed towers: a confident correlation for environmental applications." *Environmental science & technology* 35, no. 24 (2001): 4817-4822.
39. Piché, Simon, Bernard PA Grandjean, and FaïçalLarachi. "Reconciliation procedure for gas-liquid interfacial area and mass-transfer coefficient in randomly packed towers." *Industrial & engineering chemistry research* 41, no. 19 (2002): 4911-4920.
40. Piché, Simon, Stéphane Lévesque, Bernard PA Grandjean, and FaïçalLarachi. "Prediction of HETP for randomly packed towers operation: integration of aqueous and non-aqueous mass transfer characteristics into one consistent correlation." *Separation and purification technology* 33, no. 2 (2003): 145-162.
41. Song, Di, A. Frank Seibert, and Gary T. Rochelle. "Effect of Liquid Viscosity on the Liquid Phase Mass Transfer Coefficient of Packing." *Energy Procedia* 63 (2014): 1268-1286.
42. Puranik, S. S., and A. Vogelpohl. "Effective interfacial area in irrigated packed columns." *Chemical Engineering Science* 29.2 (1974): 501-507.
43. Bolles, W. L., and J. R. Fair. "Performance and design of packed distillation columns." *Inst. Chem. Eng. Symp. Ser. Vol. 56. No. 3.3*. 1979.
44. Billet, R., and M. Schultes. "Prediction of mass transfer columns with dumped and arranged packings: updated summary of the calculation method of Billet and Schultes." *Chemical Engineering Research and Design* 77.6 (1999): 498-504.
45. Billet, Reinhard, and Michael Schultes. "Predicting mass transfer in packed columns." *Chemical engineering & technology* 16.1 (1993): 1-9.
46. Wang, G. Q., X. G. Yuan, and K. T. Yu. "A method for calculating effective interfacial area of structured packed distillation columns under elevated pressures." *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 45, no. 8 (2006): 691-697.
47. Aferka, Saïd, Aurora Viva, ElisabettaBrunazzi, Pierre Marchot, Michel Crine, and Dominique Toye. "Tomographic measurement of liquid hold up and effective interfacial area distributions in a column packed with high performance structured packings." *Chemical engineering science* 66, no. 14 (2011): 3413-3422.
48. Miller, Jane Charlotte, and James N. Miller. "Statistics for analytical chemistry." (1988).



49. Hund, E., Y. Vander Heyden, M. Haustein, D. L. Massart, and J. Smeyers-Verbeke. "Comparison of several criteria to decide on the significance of effects in a robustness test with an asymmetrical factorial design." *Analytica chimica acta* 404, no. 2 (2000): 257-271.
50. Derringer, George. "Simultaneous optimization of several response variables." *Journal of quality technology* 12 (1980): 214-219.
51. Moniuk, Wadysaw, Pohorecki, Ryszard, "Kinetics of reaction between carbon dioxide and hydroxyl ions in aqueous electrolyte solutions." *Chemical Engineering Science* 43.7 (1988): 1677-1684.