

کاربرد آنالیز احتمال *Markov-Chain* و مدل تانک‌های همزده سری در مدلسازی ریاضی جذب فیزیکی غیرهمدمای گاز CO_2 در یک جذب‌کننده دارای جریان‌های برخوردی محوری

امیرحسین هرندی زاده^۱، امیر رحیمی^{۲*}، محمدرضا احسانی^۳

۱. کارشناس ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه اصفهان

۲. دانشیارمهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه اصفهان، (Rahimi@eng.ui.ac.ir)*

۳- دانشیارمهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده

باگذشت بیش از نیم قرن از تبیین و بسط تئوری و کاربرد راکتورهای دارای جریان‌های برخوردی، تاکنون تلاش‌های بسیار محدودی در زمینه مدلسازی عملکرد جذب‌کننده دارای جریان‌های برخوردی صورت پذیرفته است. در این مطالعه فرایند جذب فیزیکی غیرهمدمای گاز CO_2 در آب با استفاده از جذب‌کننده دارای جریان‌های برخوردی محوری بر اساس مدل احتمال مارکو - چین^۱ و مدل تانک‌های همزده سری مورد مدلسازی ریاضی قرار گرفته است. پارامترهای مورد نیاز در بسط هر مدل با استفاده از توزیع زمان ماند تجربی قطرات درون سیستم، تعیین و معادلات حاکم به روش عددی حل گردیده است. مقایسه نتایج به دست آمده با داده‌های تجربی گزارش شده مبین دقت مدل‌ها در پیش‌بینی عملکرد این سیستم می‌باشد. همچنین تاثیر پارامترهای عملیاتی شامل سرعت گاز ورودی، دمای گاز ورودی و اندازه قطرات، بر سرعت جذب تعیین شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد راندمان این جذب‌کننده در مقایسه با سایر جذب‌کننده‌های متداول بسیار بیشتر می‌باشد.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله :

دریافت ۳۰ خرداد ۱۳۸۸

دریافت پس از اصلاحات ۱ دی ۱۳۸۹

پذیرش نهایی ۱۵ دی ۱۳۸۹

کلمات کلیدی :

جریان‌های برخوردی

جذب گاز

آنالیز مارکو-چین

تانک‌های همزده سری

مدلسازی ریاضی

۱- مقدمه

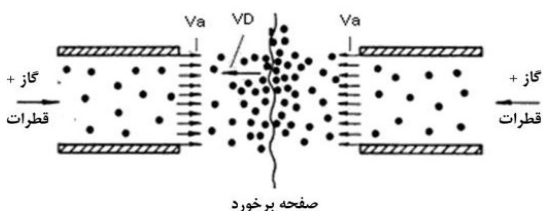
جذب یکی از فرایندهای مهم عملیات واحد است که در شیمی، پتروشیمی و صنایع فرایندی دیگر قابل به کارگیری است.

از اهداف مورد تعقیب محققین در طراحی واحدهای جذب گاز، خصوصاً جذب‌های همراه با واکنش که در آنها عمده مقاومت در مسیر انتقال جرم مقاومت نفوذ در فاز گاز است، طراحی واحدهای عملیاتی است که در آنها افزایش سرعت نسبی بین دو فاز و سطح تماس میسر گردد. بدیهی است واحدهای عملیاتی متداول فعلی نظیر برج‌های پرشده یا پاششی به دلیل برخی محدودیت‌های ساختاری و عملیاتی امکان حصول چنین خواسته‌هایی را ممکن نمی‌سازند. با عنایت به این دیدگاه و توسعه تئوری و کاربرد راکتورهای با جریان‌های برخوردی^۱ به نظر می‌رسد که امکان حصول خواسته پیش گفته در عملیات جذب نیز میسر خواهد شد. اصول راکتورهای با جریان‌های برخوردی در اوایل دهه ۶۰ به منظور بکارگیری در فرایندهای انتقال توسط الپیرین^۲ مورد بررسی قرار گرفت [۱]. با توجه به ویژگی‌های راکتورهای با جریان‌های برخوردی، این روش برای جذب گازها در مایعات توسط گدیس^۳، وگلف^۴، پونیکاروف^۵ و تامیر^۶ به کار برده شده و مشخصات رفتاری این سیستم‌ها شامل تقویت شدت جذب، نوع رژیم جریان و شرایط عملیاتی بهینه بررسی شد [۲،۳،۴،۵،۶].

تحقیقات روی جذب با جریان‌های برخوردی در اوایل دهه ۱۹۸۰ و به صورت عمده در اسرائیل متمرکز و آغاز شد. تا سال ۱۹۹۰ روی اساس و تئوری این سیستم‌ها به خصوص روی آنالیز و تایید افزایش شدت انتقال با جریان‌های برخوردی نسبت به سایر سیستم‌های مرسوم، مطالعات آزمایشی صورت گرفت. تعداد کمی از محققین بررسی‌های جزئی روی امکان سنجی یا کاربردی شدن جریان‌های برخوردی در فرایندهای مربوطه را انجام دادند و به طور عمده نتایج به دست

آمده نمی‌تواند به عنوان یک اساس برای پیشرفت‌های آتی به کار رود. هر چند تعدادی از این تحقیقات زمینه‌های ابتدایی برای تحقیقات اخیر و آتی را فراهم نموده‌اند.

در تکنیک جریان‌های برخوردی جهت عملیات جذب دو یا چند جریان گازی شامل قطرات مایع در مسیرهای متقابل به سمت هم جریان یافته و در ناحیه برخورد مطابق شکل (۱)، با یکدیگر برخورد می‌نمایند. قطرات با توجه به اینرسی خود در جریان مقابل نفوذ کرده و سرعت آنها تا رسیدن به ایستایی کامل روند نزولی خواهد داشت که این امر ناشی از اعمال نیروی دراگ گاز در خلاف جهت حرکت قطرات است. سپس قطرات در جهت حرکت جریان گاز شتاب گرفته و در جریان اصلی نفوذ می‌کنند و از مسیر جریان و محفظه برخورد خارج می‌شوند. به دلیل حرکت سریع و ناپایایی قطرات در محفظه برخورد، زمان ماند متوسط آنها در محفظه به طور قابل ملاحظه‌ای بالا می‌رود و برخورد‌های میان قطرات نیز افزایش می‌یابد که در نتیجه فرایندهای انتقال جرم و انتقال حرارت بین جریان گاز و قطرات شدت می‌گیرد. بنابراین سیستم حاوی جریان‌های برخوردی فرایند جذب را بسیار تشدید می‌کند در حالی که عملیات جذب در زمان کوتاهتری صورت می‌گیرد. راندمان بالا، کیفیت مناسب محصول و مصرف کم انرژی از مزیت‌های استفاده از راکتورهای دارای جریان‌های برخوردی به شمار می‌آیند و پیش‌بینی می‌شود استفاده از راکتورهای دارای جریان‌های برخوردی در فرایند جذب کاربردهای صنعتی بسیاری در دنیای مهندسی داشته باشد [۷].



شکل (۱): اساس جریان‌های برخوردی محوری

مشخصه جذب‌کننده‌ی با جریان‌های برخوردی این است که بخش اصلی فرایندهای انتقال جرم و حرارت در ناحیه برخورد دو فاز شامل قطرات صورت می‌گیرد. به

¹ Impinging Streams Reactors (ISR_S)

² Elperin

³ Gaddis

⁴ Vogelppohl

⁵ Ponikarov

⁶ Tamir

برخوردی از جمله مواردی است که کمک شایانی به ارائه مدل‌های ریاضی مناسب در این خصوص خواهد نمود.

از جمله مدل‌های پیشنهاد شده در این زمینه استفاده از مدل تانک‌های همزده سری به منظور پیش‌بینی رفتار گاز-مایع در فضای برخوردی است. بدین ترتیب فضای غیرایده‌ال برخورد جریان‌های مختلف در قالب تعداد مشخصی مخزن با اختلاط کامل مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد.

آنالیز مارکو -چین یک تابع احتمال است که در مطالعه سیستم‌های فیزیکی پیچیده همچون سیستم‌های دارای جریان‌های برخوردی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. توزیع زمان ماند خروجی به ازاء یک ورودی ضربانی یا پله‌ای ایده‌ال با توجه به آرایش جایگزینی مدل برای سیستم تحت بررسی می‌تواند پیش‌بینی شود و کمک شایانی در شناخت رفتار هیدرودینامیکی سیستم می‌نماید [۷].

با عنایت به موارد پیش گفته هدف از این مطالعه مدلسازی ریاضی عملکرد جذب‌کننده‌های دارای جریان‌های برخوردی محوری بر اساس قوانین بقای جرم و حرارت و خصوصیات فیزیکی این سیستم‌ها است. در این راستا سعی گردیده است تا به کمک مدل تانک‌های همزده سری و انجام مستقل آنالیز مارکو -چین و تعیین پارامترهای مرتبط بر اساس داده‌های تجربی موجود مربوط به توزیع زمان ماند، نتایج مدل‌های پیشنهادی مورد تجزیه، تحلیل و بررسی قرار گرفته و در صورت نیاز اصلاحات لازم بر روی مدل‌ها صورت گیرد.

۲- مدلسازی ریاضی

در شکل (۲) شماتیک جذب‌کننده دارای جریان‌های برخوردی مورد مطالعه ترسیم شده است. در این سیستم، فاز مایع و گاز از طریق نازل‌های پاششی غیرمخلوط‌کننده (اختلاط دو فاز بعد از خروج از نازل) به سیستم وارد شده و در فضای برخورد با همدیگر

استناد خواص هیدرودینامیکی منحصر به فرد این سیستم‌ها، برخی مشخصه‌ها در مقایسه با جذب‌کننده‌های رایج شدیدتر به نظر می‌رسند. از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: حرکت نوسانی قطرات مایع، تلاطم شدید در ناحیه برخورد، افزایش ضرایب انتقال حرارت و جرم، افت شدید ممنتوم و فشار در ناحیه برخورد.

راکتورهای دارای جریان‌های برخوردی با نازل‌های افشان در عملیات جذب و واکنش‌های شیمیایی دوفازی بازده قابل توجهی از خود نشان داده‌اند. این امر را می‌توان به پدیده‌های زیر مرتبط دانست: (۱) جریان متقابل قطرات باعث افزایش در سرعت نسبی فازها و از اینرو باعث کاهش مقاومت انتقال جرم در فاز گاز می‌گردد. (۲) حرکات نوسانی قطرات باعث افزایش در زمان ماند متوسط قطرات می‌شود. (۳) شکست قطرات به قطرات کوچک ناشی از فرایند برخورد و نیروی تنشی وارد از طرف فاز گازی به قطرات در صفحه برخورد باعث افزایش سطح بین‌فازی و همچنین پدیده تجدید سطوح می‌گردد. (۴) برخوردهای بین قطرات و تغییر شکل آنها بعلاوه‌ی نیروهای تنش سطحی باعث ایجاد یک گردش داخلی میان قطرات و از اینرو تشدید فرایند انتقال جرم می‌گردد [۸].

با عنایت به پیچیدگی الگوی حرکتی قطرات و اختلاط شدید فضای برخورد در سیستم‌های دارای جریان‌های برخوردی، پیش‌بینی ضرایب انتقال و زمان ماند قطرات در این سیستم‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است. با استفاده از داده‌های توزیع زمان ماند می‌توان رفتار هیدرودینامیکی غیرایده‌ال یک سیستم را با آرایشی از سیستم‌های ایده‌ال نظیر تانک همزده ایده‌ال یا راکتور با جریان قالبی شبیه‌سازی و از معادلات حاکم بر عملکرد این سیستم‌ها در قالب مدل‌های تانک‌های همزده سری و آنالیز احتمال مارکو -چین، برای مدلسازی رفتار سیستم واقعی استفاده کرد.

بدیهی است به دلیل انحراف عملکرد این سیستم‌ها از حالت‌های مربوط به رفتار ایده‌ال، تعیین تجربی توزیع زمان ماند قطرات درون جذب‌کننده دارای جریان‌های

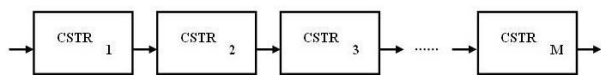
¹ RTD

دارای دو جریان برخوردی محوری با مدل تانک‌های همزده سری و آنالیز احتمال مارکو-چین ارائه می‌گردد.

۲-۱ مدل‌سازی ریاضی بر مبنای مدل تانک‌های

همزده سری

مدل تانک‌های همزده سری در مدل‌سازی راکتورهای غیر ایده‌آل به صورت وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. جهت مدل‌سازی جریان‌های متلاطم در جذب‌کننده دارای جریان‌های برخوردی محوری، به کارگیری مدل تانک‌های همزده سری می‌تواند الگوی مناسبی در این امر باشد. در این مدل، فضای سیستم تحت بررسی با M تانک همزده سری مطابق شکل (۳) شبیه سازی می‌شود.



شکل (۳): آرایش مخازن جایگزین جذب‌کننده دارای جریان‌های برخوردی با آرایش تانک‌های همزده سری

۲-۱-۱ معادلات حاکم بر مبنای مدل تانک‌های

همزده سری

در ادامه معادلات حاکم بر عملکرد تانک همزده جهت جذب فیزیکی استخراج و تبیین می‌گردد.

معادله موازنه جرم جزئی برای جزء جذب‌شونده در فاز گاز:

$$(G.y_A)|_{in} - (G.y_A)|_{out} - \sum_{i=1}^N N_{Ai} \cdot A_{Di} \cdot \bar{t}_j = 0 \quad (1)$$

معادله موازنه انرژی برای فاز گاز:

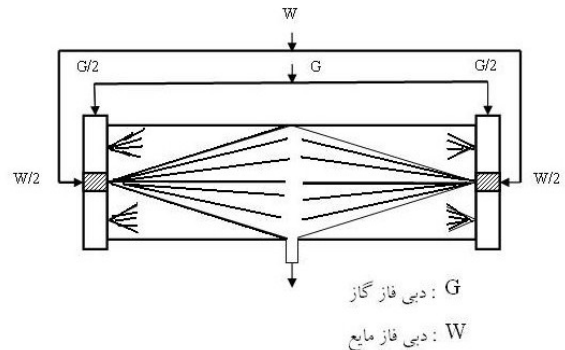
$$G_y (C_S(T_g - T_0))|_{in} - G_y (C_S(T_g - T_0))|_{out} - \sum_{i=1}^N h_{Di} \cdot A_{Di} \cdot \bar{t}_j (T_g - T_{Di})|_{out} = 0 \quad (2)$$

معادله موازنه انرژی برای قطره مایع:

$$\dot{m}_{Di} \cdot C_{PD} (T_{Di} - T_0)|_{in} - \dot{m}_{Di} \cdot C_{PD} (T_{Di} - T_0)|_{out} + h_{Di} \cdot A_{Di} \cdot \bar{t}_j (T_g - T_{Di})|_{out} - N_{Bi} \cdot M_B \cdot A_{Di} \cdot \bar{t}_j \cdot \lambda_0|_{out} = 0 \quad (3)$$

معادله موازنه جرم برای رطوبت سیستم:

برخورد می‌کنند. قطرات مایع با انجام حرکات نوسانی مکرر و برخورد با همدیگر و دیواره جذب‌کننده به تدریج انرژی جنبشی خود را از دست داده و از بخش پایینی سیستم خارج می‌شوند.



شکل (۲): شماتیک جذب‌کننده‌ی دارای دو جریان برخوردی محوری

با توجه به فیزیک و ساختار جذب‌کننده مدنظر، معادلات مربوط به بقای جرم، انرژی و ممنتوم با لحاظ توزیع اندازه قطرات برای فاز مایع در قالب مدل‌های ریاضی تانک‌های همزده سری و آنالیز احتمال مارکو-چین قابل تبیین است. بدین منظور فرضیات به کار رفته در مدل‌سازی جهت جذب فیزیکی به قرار زیر می‌باشند:

(۱) جریان دو فاز در درون راکتور به صورت قالبی می‌باشد لذا توزیع پارامترهای عملیاتی نظیر دما، سرعت و غلظت صرفاً در جهت محور سیستم در نظر گرفته می‌شود.

(۲) از رشد یا کاهش اندازه قطرات ناشی از برخورد قطرات به یکدیگر یا شکست قطرات اولیه صرف‌نظر می‌شود.

(۳) خواص ترموفیزیکی گاز از قبیل دانسیته، ظرفیت گرمایی، ویسکوزیته و ... تنها با تغییر دمای گاز تغییر می‌کنند.

(۴) سیستم نسبت به محیط آدیاباتیک فرض می‌شود.

(۵) از توزیع دمای درون قطره به دلیل کوچک بودن قطر قطرات صرف‌نظر می‌شود.

(۶) از گرمای انحلال ناشی از جذب توسط قطرات صرف‌نظر می‌شود.

در ادامه معادلات حاکم بر عملکرد یک جذب‌کننده

\bar{t}_j می‌بایست به کمک داده‌های تجربی توزیع زمان ماند مشخص شود، به نحوی که شرایط زیر برقرار شود:

$$\sigma_{exp}^2 = \sigma_{model}^2 \quad ; \quad \bar{t}_{exp} = \bar{t}_{model} \quad (11)$$

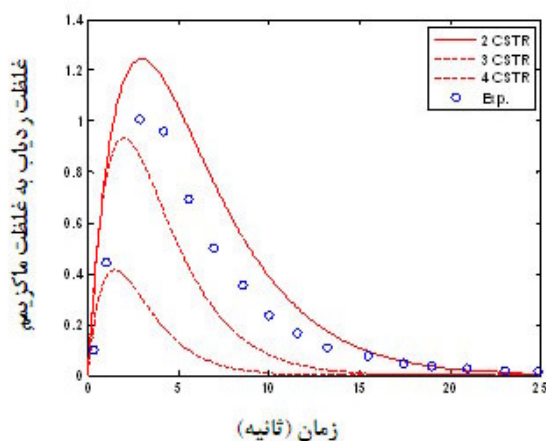
به طوریکه:

$$\sigma_{exp}^2(t) = \frac{\int_0^{\infty} (t - \bar{t}_{exp})^2 C dt}{\int_0^{\infty} C dt} \quad (12)$$

$$\bar{t}_{exp} = \frac{\int_0^{\infty} t C dt}{\int_0^{\infty} C dt} \quad (13)$$

بدین منظور داده‌های تجربی توزیع زمان ماند، جهت تعیین تعداد تانک‌های همزده سری مورد مطابقت قرار خواهد گرفت.

بدین منظور داده‌های تجربی توزیع زمان ماند، یک نمونه آزمایشگاهی که در شکل (۴) نشان داده شده است، با تعدادی تانک همزده سری مورد مطابقت قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با توجه به شرایط عملیاتی داده‌های تجربی، واریانس توزیع زمان ماند حاصل از ۲ تا ۳ تانک همزده سری به خوبی با مقادیر تجربی به دست آمده مطابقت خواهد داشت که در نهایت ۳ تانک همزده جهت شبیه‌سازی استفاده گردیده است.



شکل (۴): مقایسه زمان ماند تجربی قطرات در جذب‌کننده دارای جریان‌های برخوردی محوری [۸] با مدل تانک‌های همزده سری

$$G'_y Hu|_{in} - G'_y Hu|_{out} + \sum_{i=1}^N N_{Bi} \cdot M_B \cdot A_{Di} \cdot \bar{t}_j |_{out} = 0 \quad (4)$$

معادله موازنه جرم برای قطره مایع:

$$D_{Di}^3 |_{in} - D_{Di}^3 |_{out} - \frac{6N_{Bi} \cdot M_B \cdot \bar{t}_j}{\rho_D} D_{Di}^2 |_{out} = 0 \quad (5)$$

معادله موازنه جرم جزئی برای جزء جذب‌شونده تجمعی در قطره مایع:

$$(\dot{m}_{Di} x_A) |_{out} - (\dot{m}_{Di} x_A) |_{in} - N_{Ai} \cdot A_{Di} \cdot \bar{t}_j = 0 \quad (6)$$

A_{Di} ، سطح بر واحد زمان قطرات ورودی به سیستم G'_y ، Hu ، $(A_{Di} = \frac{Q_w}{\pi D_{Di}^2} \cdot P_i)$ ، $\frac{\pi D_{Di}^3}{6}$ ، دبی

جرمی گاز خشک، \bar{t}_j ($\bar{t} = M\bar{t}_j$) زمان ماند متوسط قطرات درون هر تانک همزده و N_{Ai} شار جذب فیزیکی جزء جذب‌شونده از فاز گاز در قطره نام می‌باشد که به صورت معادله زیر قابل محاسبه است.

$$N_{Ai} = k_{yAi} (y_A - y_A^*) \quad (7)$$

در این معادله y_A کسر مولی جزء جذب‌شونده در فاز گازی و y_A^* کسر مولی بخار اشباع جزء جذب‌شونده در حال تعادل روی سطح قطره است.، شار تبخیر از دسته قطره‌های اندازه نام است که به شکل زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$N_{Bi} = k_{yi} (y_B^* - y_B) \quad (8)$$

در این معادله، y_B^* کسر مولی رطوبت روی سطح قطره، و y_B کسر مولی رطوبت در توده جریان گازی است.

۲-۱-۲ کاربرد داده‌های زمان ماند برای تعیین

پارامترهای مدل تانک‌های همزده سری

در مورد M تانک همزده سری، معادله توزیع زمان ماند و همچنین واریانس تئوری، σ_{model}^2 چنین خواهند بود [۹]:

$$\bar{t}_{model} E = \left(\frac{t}{\bar{t}_{model}} \right)^{M-1} \frac{M^M}{(M-1)!} e^{-t/\bar{t}_{model}} \quad (9)$$

$$\sigma_{model}^2(t) = \frac{\bar{t}_{model}^2}{M} \quad (10)$$

در مدل تانک‌های همزده سری دو پارامتر مهم M و

۲-۲ مدل سازی ریاضی بر مبنای مدل آنالیز احتمال

مارکو-چین

مارکو-چین یک مدل احتمال است که در مورد سیستم های فیزیکی پیچیده، توزیع زمان ماند خروجی به ازاء یک ورودی ضربانی یا پله ای ایده آل را پیش بینی می کند. بر اساس این تحلیل با معلوم بودن ماتریس احتمال گذر P و بردار احتمال موقعیت قبل $S(m)$ ، بردار احتمال موقعیت جدید پس از یک گذر (پرش) $S(m+1)$ از رابطه زیر مشخص می گردد [۷]:

$$S(m+1) = S(m).P \quad (14)$$

به عبارت دیگر احتمال اینکه یک سیستم پس از $m+1$ گذر در موقعیت i قرار گیرد از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$s_i(m+1) = \sum_{j=1}^N s_j(m) p_{ij} \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (15)$$

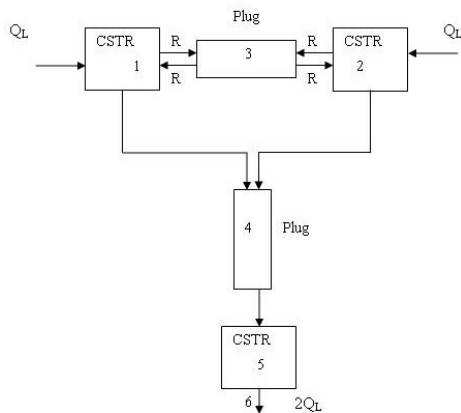
که در آن $s_i(m)$ عضو i بردار $S(m)$ و p_{ij} عضو i, j ماتریس احتمال P می باشند به طوریکه:

$$\sum_{i=1}^N s_i(m) = 1 \quad ; \quad \sum_{j=1}^N p_{ij} = 1 \quad (16)$$

بنابراین با معلوم بودن تابع احتمال هر پدیده فیزیکی P و شرایط اولیه موقعیت اشغال شده سیستم به راحتی می توان موقعیت احتمالی آتی و یا نقطه هدف فرایند مورد نظر را پیش بینی نمود. با بکارگیری مدل مارکو-چین می توان بدون افزایش پیچیدگی حل مسائل ناشی از بکارگیری روابط و معادلات پیچیده ریاضی، راه حل ساده و در بعضی مواقع تحلیلی در خصوص

سیستم های ناشناخته و نامنظم ارائه نمود. تعیین توزیع زمان ماند سیستم های مختلط به ازاء یک تغییر ضربانی یا پله ای در ورودی و همچنین امکان پیش بینی رفتار نهایی سیستم در حالت پایا از ویژگی های آنالیز مارکو-چین است [۷].

در شکل (۵) آرایش مخازن بکار رفته در مدل مارکو نشان داده شده است. در این شکل با توجه به رفتار حرکتی فازها در سیستم مدنظر، نواحی مربوط به اختلاط دو جریان (۳، ۴ و ۵) در قالب ترکیب تانک های همزده و راکتور با جریان قالبی و بخش های ورودی و خروجی سیستم (۱ و ۲) به صورت تانک های همزده لحاظ گردیده است.



شکل (۵): آرایش انتخابی آنالیز احتمال مارکو-چین

تابع احتمال سیستم شکل (۵) در معادله (۱۷) نشان داده شده است.

$$P = \begin{bmatrix} e^{-0.5n_v \Delta \theta} & 0 & \frac{R}{R+1}(1 - e^{-0.5n_v \Delta \theta}) & \frac{1}{R+1}(1 - e^{-0.5n_v \Delta \theta}) & 0 & 0 \\ 0 & e^{-0.5n_v \Delta \theta} & \frac{R}{R+1}(1 - e^{-0.5n_v \Delta \theta}) & \frac{1}{R+1}(1 - e^{-0.5n_v \Delta \theta}) & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-n_v \Delta \theta} & 1 - e^{-n_v \Delta \theta} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

چین (در اینجا ۵) است. در این ماتریس p_{ii} احتمال باقی ماندن ذره درون مخزن i پس از طی حداقل بازه زمانی Δt را نشان می دهد. بدیهی است $1 - p_{ii}$ احتمال خروج ذره از مخزن i پس از این بازه زمانی خواهد بود.

در این ماتریس R نسبت جریان برگشتی (r/m_s) ، $\Delta \theta$ نسبت حداقل زمان ماند ذرات در هر مخزن به زمان ماند متوسط ذرات درون خشک کن جریان مماسی $(\Delta t/\bar{t})$ و n_v تعداد مخازن بکار رفته در آنالیز مارکو-

$$\frac{dV_{Di}}{dz} = -\frac{0.75C_f \rho_a}{V_{Di} \cdot \rho_{Di} D_{Di}} |V_{Di} - V_a| (V_{Di} - V_a) \quad (25)$$

۲-۲-۲ کاربرد داده‌های زمان ماند برای تعیین

پارامترهای مدل آنالیز احتمال مارکو - چین

در مورد سیستم معرفی شده در شکل (۵)، $s_5(m)$ پاسخ جذب‌کننده دارای دو جریان برخوردی به یک ورودی ضربانی خواهد بود به طوریکه m تعداد گذر یا بازه‌های زمانی سپری شده از لحظه شروع نمونه‌گیری است. بنابراین ترسیم نمودار $s_5(m)$ بر حسب t ($m\Delta t$) به منحنی توزیع زمان ماند سیستم مورد نظر منجر خواهد شد. در این حالت:

$$E(t) = RTD = \frac{s_5(t)}{\int_0^\infty s_5(t) dt} \quad (26)$$

در این آنالیز مسئله اساسی تعیین پارامترهای بدون بعد مدل، R و $\Delta\theta$ به گونه‌ای است که بهترین مطابقت با داده‌های آزمایشگاهی توزیع زمان ماند حاصل شود. برای این منظور با سعی و خطا R و $\Delta\theta$ به نحوی تنظیم می‌شوند که شرایط رابطه (۱۱) برقرار شود. با توجه به

اینکه $s_5(m) = C_{5,m} / \sum_{i=1}^m C_{5,m}$ و $t_i = i\Delta t$ هستند، شرایط

تطبيق نتایج مدل با داده‌های تجربی و یا تنظیم

پارامترهای R و $\Delta\theta$ به صورت زیر تبدیل می‌شود [۷]:

$$\sigma_{mod el}^2 = \sum_{i=1}^m s_5(i) [i\Delta t - 1]^2 \quad (27)$$

$$1 = \Delta\theta \sum_{i=1}^m i s_5(i) \quad (28)$$

در شکل (۶) منحنی گوسی شکل توزیع زمان ماند حاصل از حل مدل مارکو-چین برای جذب‌کننده دارای دو جریان برخوردی محوری ترسیم شده است. علاوه بر این در این شکل داده‌های تجربی توزیع زمان ماند موجود برای جذب‌کننده دارای دو جریان برخوردی محوری نشان داده شده است. در این تحلیل در مورد نمونه آزمایشگاهی مورد بررسی، زمان ماند متوسط بکار رفته در مدل مارکو-چین برابر $\bar{t} = 5/91$ s در نظر گرفته شده است. نتایج آنالیز مارکو-چین نشان می‌دهد در صورتی که $R = 0/95$ و $\Delta\theta = 0/37$ انتخاب گردد،

همانطور که پیشتر ذکر گردید برای انجام آنالیز مارکو-چین علاوه بر تابع احتمال سیستم معلوم بودن بردار شرایط اولیه نیز ضروری است که در مورد سیستم مورد مطالعه به صورت زیر است:

$$S(0) = [0.5 \ 0.5 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (18)$$

۱-۲-۲ معادلات حاکم بر مبنای مدل آنالیز

احتمال مارکو - چین

همانطور که در شکل (۵) دیده می‌شود در مدل مارکو-چین مخازن همزده و جریان قالبی در کنار یکدیگر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در مورد تانک‌های همزده معادلات حاکم کاملاً مشابه با معادلاتی است که پیشتر در خصوص مدل تانک‌های همزده سری استخراج گردید. در ادامه معادلات حاکم بر عملکرد یک راکتور با جریان قالبی جهت جذب فیزیکی استخراج و تبیین می‌گردد.

معادله موازنه جرم جزئی برای جزء جذب‌شونده در فاز گاز:

$$\frac{dy_A}{dz} = -\sum_{i=1}^N \frac{A_{Di} \cdot N_{Ai}}{G \cdot V_{Di}} \left[1 + \frac{N_{Bi}}{N_{Ai}} y_A \right] \quad (19)$$

معادله موازنه انرژی برای فاز گاز:

$$\frac{dT_g}{dz} = -\sum_{i=1}^N \frac{h_{Di} \cdot A_{Di}}{G_y \cdot C_s \cdot V_{Di}} (T_g - T_{Di}) \quad (20)$$

معادله موازنه انرژی برای قطره مایع:

$$\frac{dT_{Di}}{dz} = \frac{[h_{Di} \cdot \pi D_{Di}^2 \cdot (T_g - T_{Di}) - N_{Bi} \cdot \pi D_{Di}^2 \cdot M_B \cdot \lambda_0]}{m_{Di} \cdot C_{PD} \cdot V_{Di}} \quad (21)$$

معادله موازنه جرم برای رطوبت سیستم:

$$\frac{dHu}{dz} = \sum_{i=1}^N \frac{N_{Bi} \cdot M_B \cdot A_{Di}}{G_y \cdot V_{Di}} \quad (22)$$

معادله موازنه جرم برای قطره مایع:

$$\frac{dD_{Di}}{dz} = -\frac{2N_{Bi} \cdot M_B}{\rho_L \cdot V_{Di}} \quad (23)$$

معادله موازنه جرم جزئی برای جزء جذب‌شونده

تجمعی در قطره مایع:

$$\frac{dx_A}{dz} = \frac{N_{Ai} \cdot \pi D_{Di}^2}{m_{Di} \cdot V_{Di}} \quad (24)$$

معادله موازنه مومنتوم برای قطره مایع [۲]:

معادلات حاکم از روابط زیر مشخص می‌شوند
 $(Sh_{Di} = Nu_{Di})$:

$$h_{Di} = \frac{k_a}{d_{Di}} Nu_{Di} \quad (31)$$

$$k_{yi} = k_g \frac{p_t}{RT_g} = \frac{D_{AB}}{d_{Di}} \frac{p_t}{RT_g} Sh_{Di} \quad (32)$$

سطح تماس موثر

همانطور که در معادلات استخراج شده مشاهده می‌شود حل این معادلات مشروط به تعیین زمان ماند متوسط قطرات درون هر مخزن از طریق تطبیق با داده‌های تجربی موجود است. بنابراین به نظر می‌رسد هر گونه تغییر در شرایط عملیاتی مورد بررسی منوط به وجود داده‌های تجربی در آن شرایط است که طبعاً به سبب محدودیت‌های موجود امکان‌پذیر نیست. تامیر^۱ برای رفع این مشکل در سیستم‌های دارای جریان‌های برخوردی سطح موثر انتقال جرم و حرارت را به صورت زیر تعریف کرد [۷].

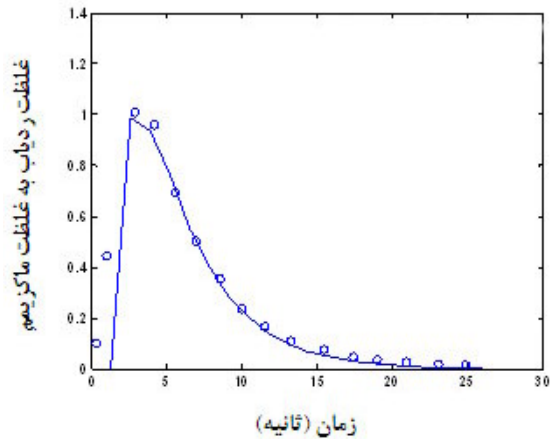
$$A_{eff,Di} = 6 \frac{V_r}{d_{Di}} \frac{W_a}{W_{Di}} \frac{\rho_a}{\rho_{Di}} \quad (33)$$

سپس بر مبنای $A_{eff,Di}$ و شرایط مختلف عملیاتی آزمایش شده، رابطه زیر را برای $Nu_{eff,Di}$ در سیستم مورد نظر ارائه داد:

$$Nu_{eff,Di} = 1.386 \times 10^{-8} Re_{Di}^{3.46} \quad (r = 0.983) \quad (34)$$

بنابراین در شرایط مختلف عملیاتی که داده‌های تجربی از قبیل توزیع زمان ماند، تجمع قطرات درون جذب‌کننده^۲ و در نتیجه زمان ماند متوسط قطرات درون جذب‌کننده در اختیار نیست، $A_{eff,Di}$ جایگزین سطح واقعی انتقال جرم و حرارت $(A_{Di} \bar{t}_j)$ شده و بر این مبنای ضریب انتقال حرارت جابجایی موثر با استفاده از معادله برازش شده فوق و $Nu_{eff,Di} = h_{eff,Di} D_{Di} / k_a$ محاسبه می‌شود. در معادله مربوط به $A_{eff,Di}$ ، V_r حجم مفید جذب‌کننده دارای جریان‌های برخوردی است.

کمترین میزان انحراف ممکن بین نتایج تئوری توزیع زمان ماند و داده‌های تجربی مربوطه مشاهده می‌شود. در ادامه از مقادیر به دست آمده برای پارامترهای R و $\Delta\theta$ در حل معادلات حاصل از مدل مارکو-چین استفاده می‌شود.



شکل (۶): مقایسه زمان ماند تجربی قطرات در جذب‌کننده دارای جریان‌های برخوردی محوری [۸] با زمان ماند منتج از آرایش منتخب مربوط به آنالیز مارکو-چین

با معلوم بودن پارامترهای مدل شامل نسبت جریان برگشتی $(R = \tau / m_D)$ و زمان ماند بدون بعد قطرات درون هر مخزن $(\Delta\theta = \Delta t / \bar{t})$ ، معادلات موازنه جرم، انرژی و ممنتوم در خصوص هر یک از مخازن بکار رفته در شکل (۵) حل شده است.

۲-۳ تعیین پارامترهای مورد نیاز

ضرایب انتقال جرم و حرارت

رابطه تجربی زیر برای محاسبه عدد ناسلت در مورد جریان‌های برخوردی قطره-گاز ارائه شده است [۷]:

$$Nu_{Di} = 1.96 \times 10^{-4} \left(\frac{L}{D_{Nozzle}} \right)^{-2.405} \left(\frac{V_r}{L} \right)^{-0.821} Re_{Di}^{1.512} \quad (29)$$

در این رابطه، D_{Nozzle} قطر نازل افشان است. عدد رینولدز هم به صورت زیر قابل بیان است:

$$Re_{Di} = \frac{|V_g - V_{Di}| D_{Di}}{\nu_a} \quad (30)$$

ضرایب انتقال جرم و حرارت مورد نیاز برای حل

¹ Tamir

² Hold-up

ضریب دراگ

C_f ، ضریب دراگ بوده و به صورت زیر به رینولدز قطره مرتبط است [۷]:

$$\begin{aligned} C_f &= 24 / Re_{Di} & : & Re_{Di} < 2 \\ C_f &= 18.5 / Re_{Di}^{0.6} & : & 2 < Re_{Di} < 1000 \\ C_f &= 0.44 & : & Re_{Di} > 1000 \end{aligned} \quad (35)$$

توزیع اندازه قطرات

برای هر نازل در فشار و سرعت جریان سیال مشخص یک توزیع اندازه واحد برای قطرات وجود دارد. این ویژگی معمولاً با منحنی‌های توزیع اندازه فرکانسی یا تجمعی برای هر شرایط عملیاتی نشان داده می‌شود. در این بررسی داده‌های توزیع اندازه و منحنی تجمعی خروجی از یک نازل اسپری غیر مخلوط‌کننده استفاده شده است. داده‌های توزیع اندازه برای این نازل‌ها برای فشار 1 bar و سرعت جریان آب 0.19 kg/s گزارش شده است. توزیع فرکانسی اندازه قطرات به عنوان تابعی از قطر قطره به طریق زیر به دست آورده شده است [۱۰]:

$$f(D) = \frac{0.0877 + 0.11237D - 0.000226D^2}{1 - 0.0153D + 8.765 \times 10^{-5}D^2 - 1.1 \times 10^{-7}D^3} \quad (36)$$

همچنین در مورد دیگر پارامترهای ترموفیزیکی مورد نیاز (شامل λ ، γ_A^* ، C_p ، ν_a ، ρ_a ، k_a) از روابط وابسته به دما ارائه شده در مراجع معتبر استفاده شده است [۱۳-۱۱].

۲-۴ شرایط و روش حل معادلات حاکم بر

مدل‌ها و محاسبات عددی

پس از تبیین معادلات حاکم برای آرایش‌های مختلف، به منظور حل این معادلات شرایط عملیاتی مربوط به جذب‌کننده حاوی CO_2 خالص با نازل‌های پاششی غیرمخلوط‌کننده (اختلاط دو فاز بعد از خروج از نازل) با قطر نازل $1.0 \times 10^{-3} \text{ m}$ برای فاز مایع و قطر نازل $3 \times 10^{-3} \text{ m}$ برای فاز گاز استفاده شده است. $z=0$ معرف

ناحیه برخورد و z منفی بیانگر بخش سمت چپ جذب‌کننده با جریان‌های برخوردی می‌باشد.

حل معادلات مربوط به آرایش راکتور با جریان قالبی به طور همزمان و به طریق عددی با استفاده از روش رانگکاتای مرتبه ۴ انجام می‌شود. معادلات حاکم بر عملکرد آرایش مدل تانک‌های همزده سری، نیز به صورت همزمان و با استفاده از روش‌های سعی و خطا حل انجام شده است. همچنین معادلات حاکم بر عملکرد آرایش آنالیز احتمال مارکو-چین، در هر راکتور با جریان قالبی معادلات موازنه جرم، حرارت و ممنتوم مربوطه به صورت همزمان و با استفاده از روش رانگکاتا مرتبه چهارم حل می‌شود و برای هر تانک همزده ایده‌آل معادلات به صورت همزمان و با استفاده از روش‌های سعی و خطا حل شده است. شرایط اولیه عبارتند از:

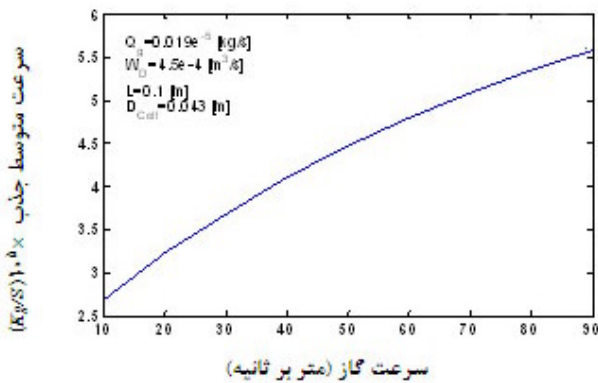
$$\begin{aligned} \text{at } t=0 : \quad T_g &= 30^\circ \text{C} & ; \\ T_{Di} &= 15^\circ \text{C} & ; \\ Hu &= 0 \text{ kg Moisture / kg Dry Gas} \\ x_B &= 0 \text{ (Mole of } CO_2 \text{) / (Mass of Droplet)} \\ V_{Di} &= 4 \text{ m/s} \end{aligned}$$

قابل ذکر است که D_{Di} با توجه به منحنی تجمعی به عنوان شرط اولیه در معادلات قرار می‌گیرد.

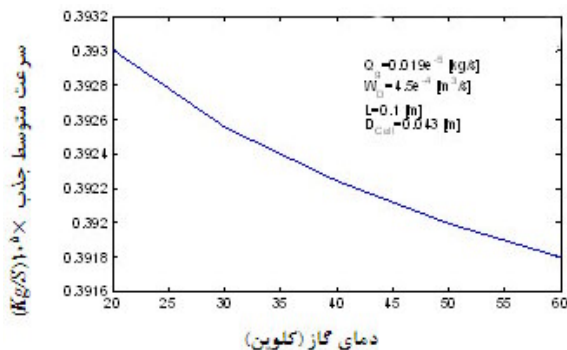
۳- ارائه نتایج و تحلیل یافته‌ها

در شکل (۷) تاثیر دبی جریان‌های گاز و مایع بر میزان سرعت جذب گاز ترسیم شده است. نتایج مدل‌ها با نتایج آزمایشگاهی موجود تطبیق قابل قبولی دارد. قابل مشاهده است که هر دو سرعت جریان گاز و مایع اثر افزایشی بر سرعت جذب طبق شکل دارند. در جذب CO_2 توسط آب مقاومت سمت مایع کنترل کننده می‌باشد و اثر سرعت جریان گاز روی سرعت جذب مشخصاً کمتر از اثر مقدار مایع است. افزایش دبی مایع در سرعت جریان ثابت گاز، سطح تبادل انتقال جرم را افزایش و انباشتگی CO_2 قطرات جذب در مایع را کاهش

قطرات درون سیستم جهت یکسان بودن شرایط فرض می‌شود که تحت تاثیر سرعت گاز قرار نخواهد گرفت. در این حالت با افزایش سرعت گاز میزان جزء مولی نهایی CO_2 در فاز گاز کاهش و سرعت جذب آن به علت افزایش آشفستگی سیستم و ضرایب انتقال افزایش می‌یابد



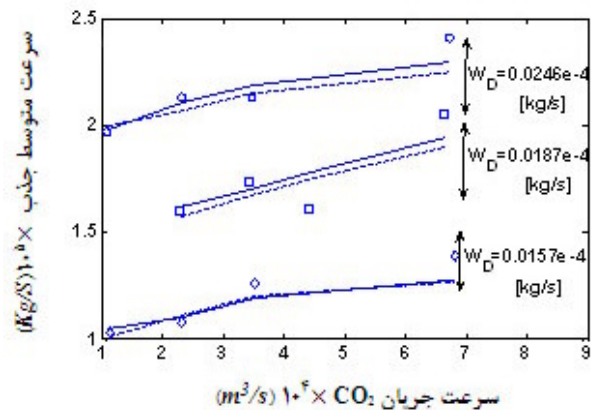
شکل (۸): تاثیر سرعت گاز بر سرعت جذب CO_2 در مدل مارکو - چین



شکل (۹): تاثیر دمای گاز بر سرعت جذب CO_2 در مدل مارکو - چین

در شکل (۹) تاثیر دمای گاز گرم بر میزان سرعت جذب گاز CO_2 ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود افزایش دما موجب کاهش جزئی سرعت جذب فیزیکی CO_2 در فاز آب می‌گردد.

می‌دهد و در نهایت سرعت جذب CO_2 را افزایش می‌دهد. عدم تطبیق داده‌های تجربی با نتایج مدل‌ها در سرعت بالای جریان گاز را می‌توان به پدیده اتمایزیشن و شکست قطرات مرتبط دانست [۵] که در مدل‌های ارائه شده منظور نگردیده است.



شکل (۷): تاثیر سرعت جریان‌های گاز و مایع بر میزان سرعت جذب گاز و مقایسه نتایج مدل‌ها با نتایج آزمایشگاهی [۵] (مدل مارکو-چین (خطوط پیوسته)، مدل تانک‌های هم‌رده سری (خط چین))

در جدول (۱) تاثیر طول دستگاه جذب‌کننده بر میزان سرعت جذب CO_2 در آب با دو مدل مذکور آورده و نتایج مدل با نتایج آزمایشگاهی [۵] موجود مقایسه گردیده است. مشاهده می‌شود که نتایج مدل‌ها تطابق قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی [۵] دارد. قابل مشاهده است که با افزایش سرعت جریان گاز ورودی به دستگاه، میزان سرعت جذب CO_2 به دلیل کاهش مقاومت انتقال جرم در طرف گازی افزایش می‌یابد هر چند به دلیل حلالیت کم گاز CO_2 در فاز آب و واقع شدن مقاومت کنترل‌کننده انتقال جرم در فاز مایع این افزایش چشمگیر نمی‌باشد.

در شکل (۸) تاثیر سرعت گاز بر سرعت جذب CO_2 برای مدل مارکو-چین ترسیم شده است. شرایط عملیاتی سیستم نیز بر روی شکل آمده است. زمان ماند

جدول (۱): بررسی تاثیر طول دستگاه جذب‌کننده بر میزان سرعت جذب CO_2 و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی [۵]

Q_{CO_2} ($\times 10^5 \text{ m}^3 / \text{s}$)	W_D ($\times 10^4 \text{ kg} / \text{s}$)	$D_{Cell} \times L$	سرعت جذب (کیلوگرم بر ثانیه)			خطای نسبی %	
			مدل تانک‌های همزده سری	مدل مارکو - چین	مدل تانک‌های همزده سری	مدل مارکو - چین	
۶/۷۵	۰/۰۱۹	۰/۰۴ × ۰/۰۴	۱/۶۸	۱/۶۵۲۰۸	۱/۶۶۱۴۷	۱/۶۶	۱/۱۰
۶/۷۵	۰/۰۱۹	۰/۰۴ × ۰/۰۸	۱/۸۰	۱/۶۵۲۵۱	۱/۶۶۱۵۲	۸/۱۹	۷/۶۹
۶/۷۵	۰/۰۱۹	۰/۰۴ × ۰/۱۵	۱/۹۵	۱/۶۵۲۹۹	۱/۶۶۱۶۱	۱۵/۲۳	۱۴/۷۹
۶/۷۵	۰/۰۱۹	۰/۰۴ × ۰/۲۰	۱/۶۶	۱/۶۵۳۲۴	۱/۶۷۲۵۴	۰/۴۱	۰/۷۶
۴/۵	۰/۰۱۹	۰/۰۴ × ۰/۰۴	۱/۵۶	۱/۶۵۱۱۱	۱/۶۶۱۴۱	۵/۸۴	۶/۵۰
۴/۵	۰/۰۱۹	۰/۰۴ × ۰/۰۸	۱/۸۳	۱/۶۵۱۳۴	۱/۶۶۱۵۶	۹/۷۶	۹/۲۰
۴/۵	۰/۰۱۹	۰/۰۴ × ۰/۱۵	۱/۷۳	۱/۶۵۱۵۹	۱/۶۶۱۷۵	۴/۵۳	۳/۹۵
۴/۵	۰/۰۱۹	۰/۰۴ × ۰/۲۰	۱/۶۴	۱/۵۶۱۷۱	۱/۶۶۱۸۳	۰/۷۱	۱/۳۳
۲/۳	۰/۰۱۹	۰/۰۴ × ۰/۰۴	۱/۵۳	۱/۶۵۰۴۴	۱/۶۶۱۴۶	۷/۸۷	۸/۵۹
۲/۳	۰/۰۱۹	۰/۰۴ × ۰/۰۸	۱/۶۸	۱/۶۵۰۵۱	۱/۶۶۱۸۲	۱/۷۶	۱/۰۸
۲/۳	۰/۰۱۹	۰/۰۴ × ۰/۱۵	۱/۴۵	۱/۶۵۰۳۵	۱/۶۶۲۲۲	۱۳/۸۲	۱۴/۶۴
۲/۳	۰/۰۱۹	۰/۰۴ × ۰/۲۰	۱/۶۲	۱/۶۵۰۵۹	۱/۶۶۲۴۱	۱/۸۹	۲/۶۲
ماکزیم خطای نسبی %					۳۳/۹۹	۱۵/۲۳	۱۴/۷۹
مینیم خطای نسبی %					۱/۱۶	۰/۴۱	۰/۷۶
متوسط خطای نسبی %					۱۵/۳۰	۵/۹۷	۶/۰۲

۴- نتیجه‌گیری

➤ نتایج حاصل از مدل‌ها با نتایج آزمایشگاهی گزارش شده با دقت قابل قبولی تطابق دارد که مبین دقت نسبی نتایج مدل‌های پیشنهادی است.

➤ متوسط سرعت جذب فیزیکی CO_2 تحت تاثیر افزایش سرعت گاز یا سرعت جریان گاز، سرعت جریان مایع و کاهش دمای گاز افزایش می‌یابد.

➤ تاثیر افزایش دبی مایع بر متوسط سرعت جذب فیزیکی CO_2 به لحاظ افزایش سطح تماس از سایر پارامترهای عملیاتی بیشتر می‌باشد.

➤ افزایش طول دستگاه جذب‌کننده به دلیل در تقابل بودن دو عامل افزایش زمان ماند و کاهش شدت اختلاط (کاهش ضرایب انتقال) تاثیر ناچیزی بر متوسط شدت جذب CO_2 از خود نشان می‌دهد.

نتایج مذکور و ویژگی‌های سیستم‌های دارای

جریان‌های برخوردی می‌تواند عاملی مهم در ترغیب محققین برای دستیابی به سیستم‌هایی بهینه، راندمان بالا و اقتصادی از لحاظ مصرف انرژی باشد.

علائم اختصاری و نمادها

m^2	سطح کل قطرات کلاس i ام	A_{Di}
-	ضریب دراگ	C_f
$J / kg \cdot ^\circ C$	گرمای ویژه مخلوط گاز	C_s
$J / kg \cdot ^\circ C$	گرمای ویژه گاز	C_{PB}
$J / kg \cdot ^\circ C$	گرمای ویژه قطره	C_{PD}
m	قطر جذب‌کننده	D_{Cell}
m	قطر قطره کلاس i ام	D_i
m	قطر اولیه قطره کلاس i ام	D_{ii}
$Kg \text{ mol gas} / s$	دبی گاز	G
$Kg \text{ dry gas} / s$	دبی گاز خشک	G'_y
$W / m^2 \cdot ^\circ C$	ضریب انتقال حرارت قطره	h_{Di}

	جزء مولی اشباع جزء	y_A^*		کلاس نام	
-	جذب شونده در سطح		$\text{mol} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$	ضریب انتقال جرم در فاز	k_y
	قطره در فاز گاز			گاز جهت تبخیر	
	کسر مولی بخار اشباع	y_B^*		ضریب انتقال جرم در فاز	k_{yB}
-	جزء جذب شونده در حال		$\text{mol} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$	گاز جهت جذب	
	تعداد روی سطح قطره		$W / \text{m} \cdot ^\circ C$	ضریب انتقال حرارت	k'_a
				هدایتی	
	علائم اختصاری یونانی		m	فاصله بین دو نازل	L
			kg	جرم قطره نام	m_{Di}
-	تابع توزیع حجمی فرکانسی	$f(D)$	$Kg / Kgmol$	جرم مولکولی	M
kg / m^3	چگالی هوا	ρ_a		شار جذب از قطره کلاس	N_{Ai}
kg / m^3	چگالی مایع	ρ_L	$Kmol / \text{m}^2 \cdot \text{s}$	نام	
$^\circ C$	گرادیان دما	ΔT		شار تبخیر در قطره کلاس	N_{Bi}
$N.s / m^2$	ویسکوزیته گاز	μ_a	$Kmol / \text{m}^2 \cdot \text{s}$	نام	
m^2 / s	ویسکوزیته سینماتیک فاز	ν_a	-	درصد حجمی کلاس نام	P_i
	گاز			قطرات	
kJ / kg	گرمای نهان تبخیر	λ_o	bar	فشار هوا	P_t
s^2	واریانس	σ^2	m^3 / s	سرعت جریان گاز	Q_g
			Kg / s	دبی جرمی آب	Q_w
	اعداد بدون بعد		m^3 / s	دبی حجمی آب	Q'_w
-	عدد پرانتل	Pr	s	زمان ماند متوسط	\bar{t}
-	عدد رینولدز	Re	K	دمای مبنا	T_o
-	عدد اشمیت	Sc	K	دمای قطره کلاس نام	T_{Di}
-	عدد شروود	Sh	K	دمای گاز	T_g
			m / s	سرعت هوا	V_a
	زیروندها		m / s	سرعت قطره نام	V_{Di}
	ماده جذب شونده	A	Kg/s	دبی جرمی مایع	W_D
	ماده جذب کننده	B		جزء مولی جزء جذب	X_A
	حالت مرجع	o	$kgmol / kg$	شونده در قطره بر مبنای	
	کلاس نام	i		جرم قطره	
	حالت اولیه	ii	-	جزء مولی جزء جذب	X_A
	گاز	a	--	شونده در قطره	
	قطره مایع	D		کسر مولی جزء جذب	y_A
	گاز	g	--	شونده در فاز گاز	
				کسر مولی رطوبت در فاز	y_B
				گاز	

مراجع

- [10] A. Rahimi, M. Taheri, j. Fathikalajahi, (2002) "Mathematical Modeling of Heat & Mass Transfer in Hot Gas Spray System", *Chem. Eng. Comm.*, 189, pp. 959-973.
- [11] R. H. Perry and D. Green, (1984), "*Perry's chemical engineer's handbook*", 6th Ed., McGraw Hill International Edition, New York, 1984.
- [12] J. P. Holman, (1943), "*Heat transfer*", 8th Ed. Mc Graw-Hill, New York.
- [13] J. M. Smith, H. C. Van ness and Abbott, M. M. (2001), "*Introduction to chemical engineering thermo dynamics*", 6th Ed., McGraw Hill.
- [1] I. T. Elperin, (1961) "Heat and Mass Transfer in Opposing Currents", *Journal of Engineering Physics*, 6, pp.62-68.
- [2] A. Tamir, K. Stephan, I. Elperin, (1984), Method, "Device and Apparatus for Carrying out Gas-Liquid Mass-Exchange Operations and Process Employing the Same", *Israeli Patent Application*.
- [3] D. Herskowits, V. Herskowits, A. Tamir, (1987) "Desorption of Acetone in a Two Impinging Streams Spray Desorber", *Chemical Engineering Science*, 42, 2331-2337.
- [4] A. Tamir, (1986) "Absorption of Acetone in a Two Impinging Streams Absorber", *Chemical Engineering Science*, 41, pp. 3023-3030.
- [5] A. Tamir, D. Herskowits, (1985) "Absorption of CO_2 in a New Two Impinging Stream Absorber", *Chemical Engineering Science*, 40, pp. 2149-2151.
- [6] E.S. Gaddis, D. Subramanian, S. Vogelpohal, Geissen, (1990) "Biologische Abwassereinigung: Turbulenzen fur den Umweltschutz", *Chemische Industrie*, 12, pp. 18-22.
- [7] A. Tamir, (1994), *Impinging-Stream Reactors: Fundamental and Applications*, Amsterdam. Elsevier.
- [8] M. Sohrabi, A.M. Jamshidi, (1997) "Studies on the Behavior and Application of the Continuous Two Impinging Streams Reactors in Gas-Liquid Reactions", *Journal of Chemical Technology Biotechnol*, 69, pp. 415-420.
- [9] O. Levenspiel, *Chemical Reaction Engineering*, 3d ed. John Wiley and Sons, New York, (1972).

Application of Markov-Chain analysis and tanks in series model in mathematical modeling of non-Isothermal gas absorption of CO₂ in a coaxial impinging streams absorber

Harandi Zadeh Amir Hossein¹, Rahimi Amir^{2*}, Ehsani Mohammad Reza³

1. MSc in Chemical Engineering, University of Isfahan.

2. Associate Professor of Chemical Engineering, University of Isfahan.

3. Associate Professor of Chemical Engineering, Isfahan University of Technology .

ARTICLE INFO

Article history :

Received 20 June 2009

Received in revised form 22 Dec. 2010

Accepted 5 January 2011

Keywords:

Impinging Streams

Gas Absorption

Markov-Chain Analysis

Tanks in Series Model

Mathematical Modeling

ABSTRACT

In spite of the fact that the principles of impinging stream reactors have been developed for more than half a century, the performance analysis of such devices, from a viewpoint of the mathematical modeling, has not been investigated extensively. In this study two models are proposed to describe the performance of non-isothermal gas absorption of CO₂ in a coaxial impinging streams absorber. The models are developed based on the Markov-chain analysis and the tanks in series model. The required parameters for each model are determined by using RTD data obtained in a coaxial impinging streams absorber and the governing equations are solved numerically. Comparison of the results of the models with available experimental data shows that the models successfully explain the behavior of a coaxial impinging streams absorber. Also, the effects of some operating parameters such as gas velocity, gas temperature and droplet size on the average rate of absorption are investigated. The results of this paper indicate that the efficiency of this system is higher than the conventional absorbers.

All rights reserved.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.daneprairie.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.