

ارایه یک مدل برای ضریب کلی انتقال جرم فاز پراکنده در یک میکسر-ستلر افقی آزمایشگاهی

حسین ابوالقاسمی*⁺، فتح‌اله زاهدیان تجنکی، سید محمد مصلحی میلانی

تهران، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده مهندسی شیمی

چکیده: ضریب کلی انتقال جرم فاز پراکنده در یک میکسر-ستلر ده مرحله‌ای مجهز به هم‌زن نوع پیچی برای سیستم آب-تولون-استون اندازه‌گیری شده است. با استفاده از فن عکس‌برداری، قطر ساتر قطره‌ها اندازه‌گیری شده است. همچنین اثر پارامترهای عملیاتی مانند دور هم‌زن، دبی حجمی فاز پراکنده و دبی حجمی فاز پیوسته روی ضریب کلی انتقال جرم بررسی شده است. در این تحقیق، روشی که بر مبنای ارایه یک رابطه برای نفوذپذیری موثر است، استفاده شده است. این روش نشان می‌دهد که از مدل گروبر می‌توان برای پیش‌بینی شدت انتقال جرم در داخل قطره‌های واقعی استفاده کرد، اگر نفوذپذیری موثر به دست آمده از آزمایش جایگزین نفوذپذیری مولکولی شود. در نهایت با تصحیح مدل گروبر، مدلی برای ضریب کلی انتقال جرم فاز پراکنده برای این نوع میکسر-ستلر بر حسب پارامترهای عملیاتی مرتبط با آن ارایه شده است که چنین رابطه‌ای با این شرایط عملیاتی تاکنون برای میکسر-ستلرها ارایه نشده است.

واژه‌های کلیدی: ضریب کلی انتقال جرم فاز پراکنده، نفوذپذیری موثر، استخراج مایع-مایع، میکسر-ستلر.

KEY WORDS: Overall dispersed phase mass transfer coefficient, Effective diffusivity, Liquid-Liquid Extraction, Mixer-Settler.

مقدمه

هدف از استخراج مایع-مایع، جداسازی اجزای یک محلول است. بنابراین، میزان جداسازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همچنین شدت انتقال جرم بین دو مایع که در یک ظرف هم‌زن دار در تماس با هم هستند وابسته به تفاوت غلظت، سطح ویژه بین دو مایع و ضریب انتقال جرم است. از آنجا که مطالعات چندانی برای ضریب‌های انتقال جرم فازهای پیوسته و پراکنده در ظرف‌های هم‌زن دار وجود ندارد، در چنین شرایطی باید به شاهد‌های دیگری برای تخمین ضریب‌های انتقال جرم متوسل شد. هرچند رابطه‌هایی برای تخمین ضریب‌های انتقال جرم فاز پیوسته و پراکنده برای قطره‌های منفرد وجود دارد،

یکی از دستگاه‌های مهم استخراج با حلال، میکسر-ستلرها هستند که به دلیل انعطاف‌پذیری، ظرفیت بالا و بازده مناسب، به طور گسترده‌ای در فرایندهای متفاوت مورد استفاده قرار می‌گیرند. با وجود این که میکسر-ستلرها برای مدت زیادی است که مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما اطلاعات چندانی برای طراحی مستقیم آنها در غیاب داده‌های آزمایشگاهی وجود ندارد و این امر می‌تواند به خاطر رفتار پیچیده دیسپرسن‌های مایع-مایع و فرایندهای انتقال جرم باشد و این شرایط با تداخل سرعت انتقال جرم و رفتار پیچیده هیدرودینامیکی سیستم‌های دو فاز پیچیده‌تر خواهد شد [۱].

*E-mail: hoab@ut.ac.ir

*عقد دار مکاتبات

ضریب کلی انتقال جرم فاز پراکنده و پارامتر تصحیح کننده ضریب نفوذ مورد بررسی قرار می گیرند.

سرعت لغزشی

از آنجایی که جهت جریان‌ها در هر میکسر به صورت هم جهت می‌باشد، لذا سرعت لغزشی فازها برابر با تفاوت سرعت فاز قطره و فاز پیوسته است که به صورت زیر بیان می‌شود [۱۰]:

$$V_s = \frac{V_d}{A\phi} - \frac{V_c}{A(1-\phi)} \quad (1)$$

در این رابطه، A سطح عبوری جریان در داخل میکسر است که با داشتن ابعاد درونی میکسر و پره میکسر قابل محاسبه است.

ضریب کلی انتقال جرم فاز پراکنده

ضریب کلی انتقال جرم فاز پراکنده از راه موازنه جرم برای هر مرحله و بر اساس غلظت‌های ورودی و خروجی این فاز به صورت زیر تعیین شده است:

$$m_d(x_{in} - x_{out}) = K_d \left(\frac{\phi}{d_{pr}} \right) \rho_{av} (x_{out} - x^*) V \quad (2)$$

به طور کلی با استفاده از رابطه‌ی (۲) و منحنی تعادلی مربوطه و همچنین غلظت‌های اندازه‌گیری شده، ضریب کلی انتقال جرم فاز پراکنده به دست آمده است.

پارامتر تصحیح کننده ضریب نفوذ (R)

بهترین روش برای ارزیابی یک مدل مناسب برای ضریب‌های انتقال جرم، استفاده از پارامتر تصحیح کننده ضریب نفوذ در معادله‌ی گروبر است. برای قطره‌های ساکن که فقط نفوذ مولکولی دارند رابطه‌ی گروبر به صورت زیر است [۲]:

$$K_d = \frac{-d}{\phi t} \ln \left[\sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp \left(-\frac{\lambda_n^2 D_d t}{d^2} \right) \right] \quad (3)$$

جامع ترین رابطه‌ای که برای پارامتر تصحیح کننده ضریب نفوذ برای سیستم‌های تک قطره‌ای توسط اشتاینر ارزیابی شده است به این شکل است [۹]:

اما از آنجایی که فاکتورهای متفاوتی از قبیل ماندگی فاز پراکنده^(۱)، توان ورودی، ائتلاف، پارگی قطره‌ها و عامل‌های دیگر روی این رابطه‌ها در سیستم‌های تک قطره‌ای اعمال نشده است، لذا این رابطه‌ها برای دستگاه‌های استخراج هم‌زن دار درست نیست. البته بیشتر کارهای انجام شده برای فاز پیوسته بوده است و کار اندکی روی فاز پراکنده انجام شده است.

به‌طور کلی شناخت ضریب انتقال جرم فاز پراکنده هنوز به‌خوبی برای مخازن هم‌زن دار مشخص نیست و باید روی یکی از مدل‌های انتقال جرم که برای ضریب انتقال جرم فاز پراکنده پیشنهاد شده است، تکیه شود. پژوهشگران زیادی در این خصوص مطالعه کرده و مدل‌های متفاوتی را پیشنهاد کرده‌اند [۲-۷]، مهم‌ترین مدل‌هایی که برای پیش بینی ضریب انتقال جرم فاز پراکنده برای قطره‌های ساکن، قطره‌های با چرخش درونی پایین و قطره‌های با چرخش درونی بالا وجود دارد به ترتیب عبارت‌اند از: مدل گروبر، مدل کرونیگ - برینک و مدل هاندلوس - بارون. از آنجایی که این مدل‌ها برای سیستم‌های تک قطره‌ای ارزیابی شده است، لذا برای دستگاه‌های استخراج هم‌زن دار که قطره‌های زیادی در آن وجود دارد، درست نیست.

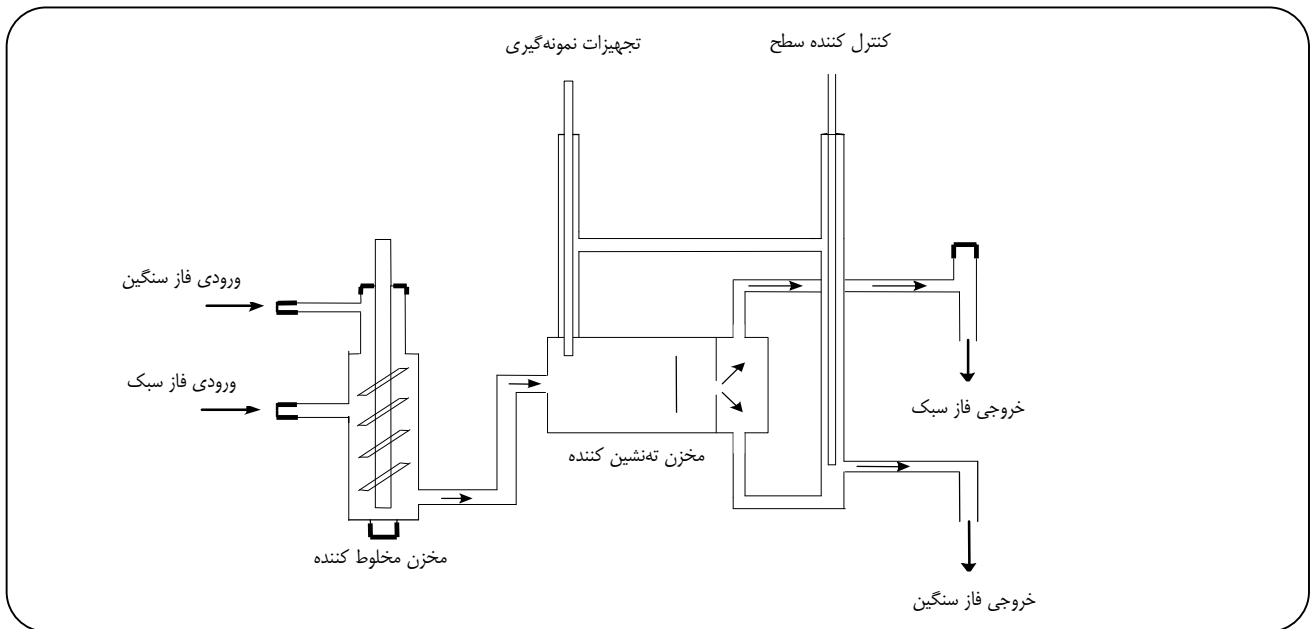
یک روش پیشنهادی موثر برای ارزیابی یک مدل مناسب، استفاده از ضریب نفوذ تصحیح شده RD_d در معادله گروبر است که این ایده توسط کلدرینک و کورچینسکی [۸] ارزیابی و توسط اشتاینر [۹] تصحیح شد.

اشتاینر با استفاده از داده‌های ۹ منبع متفاوت، رابطه‌ای برای پارامتر تصحیح کننده ضریب نفوذ R ارزیابی کرده است که برای سیستم‌های تک قطره‌ای با ماندگی فاز پراکنده پایین است. همچنین برای سیستم‌های با ماندگی فاز پراکنده بالا که با یک برج پاششی آزمایش شده است، رابطه‌ای برای پارامتر تصحیح کننده ضریب نفوذ توسط اشتاینر ارزیابی شده است.

در کار تجربی حاضر، به منظور تعیین ضریب کلی انتقال جرم فاز پراکنده و همچنین بررسی اثر پارامترهای عملیاتی متفاوت روی آن و در نهایت ارزیابی یک مدل مناسب برای ضریب کلی انتقال جرم فاز پراکنده برحسب پارامترهای مرتبط با آن، آزمایش‌های متعددی با یک دستگاه استخراج میکسر - ستلر ده مرحله‌ای انجام شده است.

قبل از بررسی دستگاه و روش انجام آزمایش، رابطه‌های مورد نیاز برای محاسبه برخی از پارامترها از قبیل سرعت لغزشی،

(۱) Hold-up



شکل ۱- نمای یک مرحله از میکسر - ستلر افقی.

بخش تجربی دستگاه مورد آزمایش

میکسر- ستلر مورد استفاده در آزمایش‌ها از نوع میکسر - ستلر افقی و در حد آزمایشگاهی^(۱) بوده و شامل ده مرحله است. جهت جریان فازها در کل دستگاه به صورت جریان مخالف بوده ولی در هر مرحله به صورت هم جهت است. جنس تمام مرحله‌ها از شیشه بوده و جریان فازها در آنها به راحتی قابل رویت است.

در شکل ۱ نمای یک مرحله از میکسر - ستلر افقی مورد استفاده نشان داده شده است. همچنین جدول ۱ مشخصات میکسر - ستلر مورد استفاده در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

ماده شیمیایی مورد آزمایش

از سیستم شیمیایی تولوئن - آب - استون برای آزمایش‌ها استفاده شده است. این سیستم شیمیایی برای فرایندهای استخراج مایع - مایع توسط فدراسیون اروپایی مهندسان شیمی^(۲) پیشنهاد شده است [۱۱]. خواص فیزیکی و داده‌های تعادلی این سیستم نیز از این مرجع تهیه شده و به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ آورده شده است. در این سیستم شیمیایی، تولوئن به عنوان فاز پراکنده، آب به عنوان فاز پیوسته و استون به عنوان جزء انتقال یابنده است.

$$R = 1 + 0.177 \text{Re}^{0.43} \text{Sc}_d^{0.23} \left(\frac{\mu_d}{\mu_c + \mu_d} \right)^{0.89} \quad (4)$$

همچنین برای سیستم‌های با ماندگی فاز پراکنده بالا نیز اشتاینر رابطه‌ی زیر را ارایه کرده است که آزمایش‌ها روی یک برج پاششی انجام شده است:

$$R = 5.56(10^{-5}) \left[\text{Re} \frac{2\mu_c}{\mu_c + \mu_d} \right]^{0.42} (1-\phi) \text{Sc}_d^{0.67} \text{Bo}^{0.12} \quad (5)$$

با توجه به رابطه‌ی (۴) که برای سیستم‌های تک قطره‌ای (ماندگی فاز پراکنده پایین) ارایه شده است، مشاهده می‌شود که اثر قطر قطره‌ها و سرعت لغزشی روی میزان نفوذ پذیری قطره یکسان است.

با توجه به توان‌های رابطه‌ی (۵) مشاهده می‌شود که اثر قطر قطره بیشتر از اثر سرعت لغزشی روی نفوذ پذیری قطره است. به طور کلی محققین زیادی پیشنهاد کردند که پارامتر تصحیح کننده ضریب نفوذ R در معادله‌های ضریب انتقال جرم اعمال شود [۸، ۹ و ۱۲]. با اعمال پارامتر R در ضریب نفوذ برای معادله‌ی گروبر خواهیم داشت:

$$K_d = \frac{-d}{\tau t} \text{Ln} \left[\frac{3}{8} \sum_{n=1}^{\infty} B_n^2 \exp\left(-\frac{16\lambda_n R D_d t}{d^2}\right) \right] \quad (6)$$

(۱) Bench scale

(۲) European Federation of Chemical Engineers

روش انجام آزمایش

قبل از انجام آزمایش، ابتدا دو فاز تولوئن و آب به طور کامل از یکدیگر اشباع شده تا از هر گونه حلالیت متقابل دو فاز در یکدیگر جلوگیری شود. سپس استون به فاز تولوئن با درصد جرمی مشخصی (در حدود ۳ درصد جرمی) اضافه می شود. به منظور انجام آزمایشها، ابتدا تمام مراحل از دو فاز پر شده و سپس پمپها و میکسرها روشن می شوند. با کنترل کردن سطح فصل مشترک در هر ستلر، همه مرحلهها پایدار می شود. منظور از پایدار کردن مرحلهها، در حقیقت کنترل و ثابت نگه داشتن مکان فصل مشترک دو فاز در ستلر است. به سیستم زمان کافی داده می شود تا کل دو فاز موجود در مراحل خارج شده و بعد از این زمان، نمونه برداری از هر دو فاز در تمام مراحل شروع می شود. نمونههای گرفته شده با سرعت به ظرفهای ویژه منتقل شده و غلظت استون در دو فاز به کمک دستگاه کروماتوگرافی گازی اندازه گیری می شود. همچنین دما در تمام مراحل ثابت بوده و در حدود ۲۰ درجه سانتی گراد است. لازم به ذکر است دما در تمام مرحلهها به کمک یک ترموکوپل دیجیتال و از مکان نمونه گیر ستلر، اندازه گیری شده است.

همچنین برای اندازه گیری قطر قطرههای داخل میکسر، با استفاده از یک دوربین دیجیتالی سونی ۸ مگا پیکسلی مدل DSC-FA۲۸ با سرعت عکس برداری ۱/۲۰۰۰ ثانیه و با به کارگیری لنز ماکرو، عکسهای زیادی از سیستم قطرهها در خروجی میکسر (لوله خروجی میکسر) گرفته شده است که در نهایت قطر ساتر قطرهها محاسبه شده است. یک نمونه از عکس گرفته شده در شکل ۲ نشان داده شده است.

در پایان هر آزمایش به منظور به دست آوردن ماندگی فاز پراکنده هر مرحله، پمپها و میکسرها را به طور همزمان خاموش کرده و به کمک یک پمپ مکش دو فاز از هر مرحله تخلیه شده و حجم آنها محاسبه شده است.

در این تحقیق، سه سری آزمایش انجام شده است که در جدولهای ۴ الی ۶ آورده شده است. در سری اول آزمایشها در دبی حجمی ثابت دو فاز، اثر دور همزن مورد بررسی قرار گرفت. در سری دوم آزمایشها در دور ثابت و دبی حجمی^(۱) ثابت فاز پیوسته، اثر افزایش دبی حجمی فاز پراکنده مورد بررسی قرار گرفت. در سری سوم آزمایشها اثر افزایش دبی حجمی فاز پیوسته در دور ثابت و دبی حجمی ثابت فاز پراکنده بررسی شد.

جدول ۱- ویژگیهای میکسر - ستلر مورد استفاده.

شدت جریان حجمی خوراک یا حلال	۰/۲ - ۵ لیتر در ساعت
ظرفیت حجمی میکسر	۱۴۰ میلی لیتر
قطر داخلی میکسر	۳۷ میلی متر
قطر همزن میکسر	۳۴ میلی متر
قطر میله وسط میکسر	۱۹ میلی متر
قطر لوله خروجی میکسر	۱۲/۹ میلی متر
گام پیچ همزن	۱۵ میلی متر
قطر بیرونی ستلر	۵۰ میلی متر
طول ستلر	۱۹۵ میلی متر
ظرفیت حجمی ستلر	۲۵۰ میلی لیتر
تعداد مراحل	۱۰
حداکثر بازده هر مرحله	۱۰۰

جدول ۲- ویژگیهای فیزیکی سیستم شیمیایی مورد استفاده.

خواص فیزیکی	تولوئن- آب - استن
μ_d (cp)	۰/۵۸
μ_c (cp)	۱/۰۴
ρ_d (gr/cm ^۳)	۰/۸۶۵
ρ_c (gr/cm ^۳)	۰/۹۹۶
σ (dyne/cm)	۳۲
D_c (m ^۲ /s)	$۱/۱۱ \times 10^{-۹}$
D_d (m ^۲ /s)	$۲/۷۳ \times 10^{-۹}$

جدول ۳- دادههای تعادلی برای سیستم شیمیایی تولوئن- آب - استون در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد.

x_e (wt %)	y_e (wt %)
۰	۰
۰/۲۱	۰/۲۷
۰/۷۸	۱/۰۸
۱/۱۳	۱/۵۴
۱/۷۴	۲/۴۳
۲/۳۸	۳/۱۳
۳/۳۸	۵/۱
۵/۳۳	۶/۲۷
۶/۱۳	۷/۶۷
۹/۲۰	۱۰/۵۸

(1) Volumetric flow rate

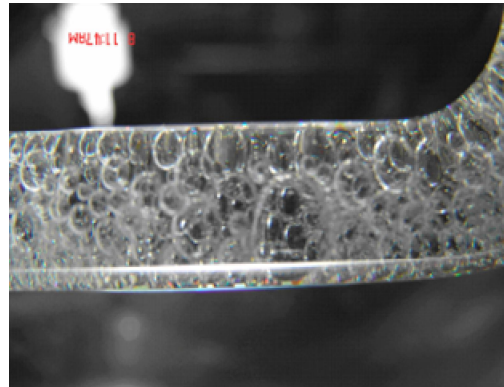
به طور کلی با توجه به اثر مستقیم دور همزن، دبی حجمی فاز پراکنده و دبی حجمی فاز پیوسته روی میزان انتقال جرم، بررسی تک تک پارامترهای بالا لازم است.

مدل سازی نتیجه‌ها

هدف از مدل سازی نتیجه‌ها، به دست آوردن یک مدل برای پارامتر تصحیح کننده ضریب نفوذ R است. R میزان نفوذپذیری قطره‌های واقعی نسبت به نفوذپذیری مولکولی قطره‌ها را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، هر چه R افزایش یابد، میزان نفوذپذیری قطره افزایش یافته و در نتیجه میزان انتقال جرم افزایش می‌یابد. بنابراین، پارامترهای تاثیر گذار بر انتقال جرم (یا ضریب انتقال جرم) بر R نیز تاثیرگذار هستند که از مهم‌ترین آنها می‌توان به قطره قطره، ماندگی فاز پراکنده، گرانروی و چگالی، کشش بین سطحی، ضریب‌های نفوذ و سرعت لغزشی اشاره کرد.

در این تحقیق برای ساخت مدل، از روش حداقل مربعات $OLS^{(1)}$ که یکی از مناسب‌ترین روش‌های شناخته شده در این زمینه است استفاده شده که دارای کاربرد وسیعی نیز است. در روش OLS ، اصل بر حداقل کردن مجموع مجذورهای پس‌ماندها (تفاوت بین مدل و مقدار واقعی) است. با توجه به توانمندی نرم‌افزار SPSS در این زمینه، تابع‌های مورد نظر با استفاده از روش OLS در این نرم‌افزار تهیه شده‌اند.

یکی از پارامترهایی که در روش OLS برای مدل سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد، R^2 و R_{adj}^2 هستند. با داشتن این پارامترها می‌توان تعیین کرد که چند درصد از تغییرهای متغیر وابسته به وسیله‌ی متغیرهای مستقل توضیح داده شده است. در حالت کلی، مقدار این پارامتر بین ۰ و ۱ قرار دارد و هرچه به ۱ نزدیک‌تر باشد، مطلوب‌تر خواهد بود. لازم به ذکر است که پارامتر R_{adj}^2 به جای انحراف‌ها، از واریانس‌ها در محاسبه میزان انطباق مدل و نتیجه‌های آزمایشگاهی استفاده می‌کند و بدین ترتیب از رشد کاذب R^2 جلوگیری می‌شود. این پارامترها قابلیت بررسی تک تک پارامترهای مورد استفاده در مدل را ندارد و صرفاً معتبر بودن عمومی مدل مربوط را تایید یا رد می‌کند. قبل از شروع عملیات مدل سازی، نیاز است که برخی از متغیرها تعیین شوند. برای تعیین k_c از یک رابطه‌ی تجربی که توسط بروئر^(۴) برای قطره‌های چرخنده ارایه شده استفاده شده است [۱۲]:



شکل ۲- نمونه عکس گرفته شده از میکسر- ستلر برای $N=1000\text{ rpm}$ ، $V_c=45/5\text{ ml/min}$ ، $V_d=69\text{ ml/min}$

جدول ۴- ویژگی‌های سری اول آزمایش‌ها برای سیستم تولوئن- آب - استون.

شماره آزمایش	V_d (ml/min)	V_c (ml/min)	N (rpm)
۱	۵۲	۴۵/۵	۸۰۰
۲	۵۲	۴۵/۵	۹۰۰
۳	۵۲	۴۵/۵	۱۰۰۰

جدول ۵- ویژگی‌های سری دوم آزمایش‌ها برای سیستم تولوئن- آب - استون.

شماره آزمایش	V_d (ml/min)	V_c (ml/min)	N (rpm)
۱	۳۴	۴۵/۵	۱۰۰۰
۲	۵۲	۴۵/۵	۱۰۰۰
۳	۶۹	۴۵/۵	۱۰۰۰

جدول ۶- ویژگی‌های سری سوم آزمایش‌ها برای سیستم تولوئن- آب - استون.

شماره آزمایش	V_d (ml/min)	V_c (ml/min)	N (rpm)
۱	۵۲	۲۹/۵	۸۰۰
۲	۵۲	۴۵/۵	۸۰۰
۳	۵۲	۶۴	۸۰۰

(۱) Ordinary Least Square

(۲) R- Squared

(۳) Adjusted R-Squared

(۴) Brauer

جدول ۷- ثابت‌های معادله گروبر.

Sh _d	λ ₁	λ ₂	λ ₃	λ ₄	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄
۴	۲,۰۲۹	۴,۹۱۳	۷,۹۷۹	۱۱,۰۸۶	۰,۱۵۹	۰,۰۰۶۳۴	-	-
۶	۲,۲۸۹	۵,۰۸۷	۸,۰۹۶	۱۱,۱۷۳	۰,۱۵۳	۰,۰۱۰۹	-	-
۸	۲,۴۵۶	۵,۲۳۳	۸,۲۰۵	۱۱,۲۵۶	-	-	-	-
۱۰	۲,۵۷	۵,۳۵۴	۸,۳۰۳	۱۱,۳۳۵	۰,۱۴۲	۰,۰۱۷۹	۰,۰۰۴۰۸	-
۱۲	۲,۶۵۴	۵,۴۵۴	۸,۳۹۱	۱۱,۴۰۹	-	-	-	-
۱۴	۲,۷۱۷	۵,۵۳۸	۸,۴۷	۱۱,۴۷۷	۰,۱۳۴	۰,۰۲۲	۰,۰۰۶	-
۱۶	۲,۷۶۵	۵,۶۰۸	۸,۵۴۱	۱۱,۵۴۱	-	-	-	-
۱۸	۲,۸۰۴	۵,۶۶۷	۸,۶۰۳	۱۱,۵۹۹	۰,۱۲۹	۰,۰۲۴۲	۰,۰۱۱۹	۰,۰۰۲۹۱
۲۰	۲,۸۳۶	۵,۷۱۷	۸,۶۵۹	۱۱,۶۵۳	-	-	-	-
۲۲	۲,۸۶۳	۵,۷۶۱	۸,۷۰۸	۱۱,۷۰۳	۰,۱۲۵	۰,۰۲۵۵	۰,۰۰۸۵۸	۰,۰۰۳۵۹
۳۲	۲,۹۴۸	-	-	-	۰,۱۱۸	-	-	-
۴۲	۲,۹۹۳	-	-	-	-	-	-	-
۶۲	۳,۰۴۱	-	-	-	۰,۱۱۱	-	-	-
۸۲	۳,۰۶۵	-	-	-	-	-	-	-
۱۰۲	۳,۰۸	-	-	-	۰,۱۰۷	-	-	-
∞	۳,۱۴۲	-	-	-	۰,۱۰۱	-	-	-

جدول ۸ - خلاصه نتیجه‌های به دست آمده.

N(rpm)-V _c -V _d (ml/min)	φ	× 10 ^{-۴} d _{rr} (m)	× 10 ^{-۲} V _s (m/s)	Re	× 10 ^{-۶} Kd(m/s)	R
۸۰۰-۴۵,۵-۵۲	۰,۴	۲,۳۵	۷,۲	۱۶,۲	۴,۸۸۹	۳,۴
۹۰۰-۴۵,۵-۵۲	۰,۳۹	۲,۰۲	۷,۸	۱۵,۱۵	۴,۳۲	۲,۲۵
۱۰۰۰-۴۵,۵-۵۲	۰,۳۷	۱,۶۴	۹,۱	۱۴,۳۵	۳,۴۷	۱,۵
۱۰۰۰-۴۵,۵-۳۴	۰,۳	۱,۴۷	۶,۵۵	۹,۲۲	۲,۷۸	۱,۲
۱۰۰۰-۴۵,۵-۶۹	۰,۴۲	۱,۷۱	۱۱,۴	۱۸,۷۴	۴,۴	۱,۹
۸۰۰-۲۹,۵-۵۲	۰,۵۵	۲,۵۶	۳,۸۸	۹,۵۲	۱,۷۴	۱,۱۵
۸۰۰-۶۴-۵۲	۰,۳۲۴	۲,۱۵	۸,۸	۱۸,۲۷	۷,۴۱۸	۴,۱

پارامتر تصحیح کننده ضریب نفوذ R محاسبه شده است. خلاصه نتیجه‌ها در جدول ۸ آورده شده است.

با محاسبه R برای همه آزمایش‌ها و با مشخص کردن پارامترهای موثر روی آن، که شامل ماندگی فاز پراکنده، قطر قطره‌ها، سرعت لغزشی، ویسکوزیته، چگالی، کشش بین سطحی و ضریب نفوذ فازها است، به کمک تجزیه ابعادی و نرم افزار SPSS رابطه‌ای بدون بعد برای R محاسبه شده است:

$$R = 0,7828 + 0,8953 Re^{1,644} (1 - 1,655\phi) Bo^{1,606} \quad (۸)$$

$$Sh_c = 2 + 0,0511 Re^{0,734} Sc_c^{0,7} \quad (۷)$$

که برای $1000 < Re < 4$ صادق است.

با استفاده از رابطه‌ی (۷) مقدار Sh_c را به دست آورده، سپس با استفاده از D_c و D_d مقدار Sh_d را محاسبه کرده و با استفاده از جدول ۷ مقدارهای B_n و λ_n که تابعی از Sh_d هستند و توسط لایبسونگ و بنچرو [۱۳] پیشنهاد شده‌اند، محاسبه می‌شوند. با قرار دادن ثابت‌های معادله گروبر و پارامترهای مربوطه دیگر از قبیل قطر ستر قطره‌ها و زمان اقامت قطره‌ها در سیستم در رابطه‌ی (۶)،

با توجه به رابطه‌ی به‌دست آمده (۸) مشاهده می‌شود که با افزایش عدد رینولدز، افزایش قطر قطره و کاهش ماندگی فاز پراکنده، مقدار R افزایش می‌یابد که موافق با رابطه‌ی (۵) است. با افزایش دور هم‌زن تا یک دور ویژه (حدود ۹۰۰ دور در دقیقه)، اثر افزایش سرعت لغزشی بیشتر از اثر کاهش قطر قطره است. یعنی افزایش سرعت لغزشی باعث افزایش نفوذ پذیری قطره می‌شود، ولی بعد از این دور ویژه، اثر کاهش قطر قطره بیشتر از اثر افزایشی سرعت لغزشی روی نفوذ پذیری قطره است و باعث کاهش نفوذ پذیری قطره شده و در نتیجه باعث کاهش ضریب کلی انتقال جرم فاز پراکنده می‌شود و ضریب کلی انتقال جرم فاز پراکنده به سمت ضریب کلی انتقال جرم گروبر نزدیک می‌شود. که در نهایت اندازه قطره به حالتی می‌رسد که در اصطلاح به آن قطره صلب^(۱) می‌گویند.

با افزایش R (افزایش نفوذ پذیری قطره)، ضریب کلی انتقال جرم فاز پراکنده افزایش یافته است و با توجه به تعریف R که میزان نفوذ پذیری قطره‌های واقعی را نسبت به نفوذ پذیری مولکولی قطره‌های نشان می‌دهد، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش R ضریب انتقال جرم فاز پراکنده به ضریب انتقال جرم قطره‌های توربولنت^(۲) که نفوذ پذیری و چرخش بالایی دارند (مدل هاندلوس - بارون) نزدیک می‌شود.

به‌طور کلی با توجه به نتیجه‌های به‌دست آمده، مدل به‌دست آمده تمام نتیجه‌های نظری و تجربی را تصدیق می‌کند و با توجه به این‌که برای دستگاه‌های میکسر - ستلر تاکنون چنین رابطه‌ای پیشنهاد نشده است، مدل ارایه شده دارای ارزش بسیار زیادی برای این نوع دستگاه‌های استخراج است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از آقایان مهندس سعیدرضا رادپور و مهندس بهزاد غلامی راد که در تدوین این مقاله همکاری کرده‌اند قدردانی و تشکر می‌نمایند.

فهرست علائم

A	سطح مقطع متناسب با جهت جریان (m^2)
B_n	مقدار ویژه (بدون بعد)
$Bo = \frac{(\rho_c - \rho_d)gd_{p,r}^2}{\sigma}$	عدد بوند (بدون بعد)

(۱) Rigid

مجموع مربع‌های خطا در محاسبه رابطه‌ی (۸) حدود ۰/۰۱ بوده است. همچنین مقادیرهای R_{adj} رابطه به‌دست آمده در حدود ۰/۹۹ است که نشان از هم‌پوشانی خوب داده‌های آزمایشگاهی با مدل به‌دست آمده دارد.

با جای گذاری رابطه‌ی (۸) در رابطه‌ی (۶)، رابطه‌ی نهایی زیر به‌دست می‌آید، که مدل مناسبی برای میکسر - ستلرها است:

$$K_d = \frac{-d}{\epsilon t} \ln \left[\frac{\sum_{n=1}^{\infty} B_n^2 \exp\left(-\frac{16\lambda_n D_d^4}{d^2} (0.7828 + 0.6953 Re^{1.644} (1 - 1.655\phi) Bo^{1.606})\right)}{\dots} \right] \quad (9)$$

بحث و نتیجه گیری

با توجه به جدول ۸ مشاهده می‌شود که با افزایش دبی حجمی فاز پراکنده (تولون)، ضریب کلی انتقال جرم فاز پراکنده افزایش یافته است. این امر به‌خاطر افزایش قطر قطره‌ها در سیستم است و این افزایش قطر قطره‌ها باعث افزایش میزان چرخش‌های درونی قطره و در نتیجه افزایش نفوذ پذیری قطره‌ها می‌شود که در نهایت منجر به افزایش ضریب کلی انتقال جرم فاز پراکنده شده است. با توجه به تعریف R که میزان نفوذپذیری قطره‌های واقعی را نسبت به نفوذپذیری مولکولی قطره‌ها نشان می‌دهد، چنین تاثیری را می‌توان مشاهده کرد.

لازم به ذکر است که فقط تا یک گستره‌ی ویژه‌ای، با افزایش دبی حجمی فاز پراکنده، ضریب انتقال جرم فاز پراکنده افزایش می‌یابد. چون با افزایش بیش از حد دبی حجمی فاز پراکنده تعداد قطره‌های بسیار زیاد شده، در نتیجه میزان غلظت جزء انتقال یابنده در فاز پیوسته افزایش یافته و به عبارت دیگر مقاومت در مقابل انتقال جرم افزایش می‌یابد که باعث کاهش ضریب انتقال جرم می‌شود. در حقیقت با افزایش تعداد قطره‌ها در اطراف هر قطره، مقدار عددی عدد شروود به کمتر از ۲ تقلیل می‌یابد که این خود باعث کاهش میزان انتقال جرم خواهد شد.

همچنین با افزایش دبی حجمی فاز پیوسته (آب)، ضریب کلی انتقال جرم فاز پراکنده افزایش یافته است. زیرا ماندگی فاز پراکنده سیستم کاهش یافته و سرعت لغزشی قطره افزایش یافته است که تاثیرشان از تاثیر کاهش قطر قطره بیشتر بوده است که این خود باعث افزایش نفوذ پذیری قطره می‌شود و در نهایت باعث افزایش ضریب کلی انتقال جرم فاز پراکنده خواهد شد.

(۲) Turbulent

V_s	سرعت لغزشی (m/s)	D_c	ضریب نفوذ فاز پیوسته (m^2/s)
x^*	جزء جرمی تعادلی حل شونده در فاز غنی از حل شونده متناظر با فاز استخراج کننده	D_d	ضریب نفوذ فاز پراکنده (m^2/s)
x_e	جزء جرمی تعادلی حل شونده در فاز غنی از حل شونده	d	قطر قطره (m)
x_{in}	جزء جرمی ورودی حل شونده به میکسر در فاز غنی از حل شونده	d_i	قطر هر قطره در سیستم (m)
x_{out}	جزء جرمی خروجی حل شونده از میکسر در فاز غنی از حل شونده	$d_{rr} = \sum_i d_i^r / \sum_i d_i^r$	قطر متوسط ساتر (m)
y_e	جزء جرمی تعادلی حل شونده در فاز استخراج کننده	g	شتاب جاذبه (m/s^2)
λ_n	مقدار ویژه (بدون بعد)	K_d	ضریب کلی انتقال جرم فاز پراکنده (m/s)
μ_c	گرانروی فاز پیوسته (N_s/m^2)	k_c	ضریب جزئی انتقال جرم فاز پیوسته (m/s)
μ_d	گرانروی فاز پراکنده (N_s/m^2)	\dot{m}_d	دبی جرمی فاز پراکنده (kg/s)
$\rho_{av} = \sum \omega_i \rho_i$	متوسط چگالی در هر فاز (kg/m^3)	N	دور هم‌زن (rps)
ρ_c	چگالی فاز پیوسته (kg/m^3)	R	پارامتر تصحیح کننده ضریب نفوذ (بدون بعد)
ρ_d	چگالی فاز پراکنده (kg/m^3)	RD_d	ضریب نفوذ تصحیح شده (m^2/s)
ρ_l	چگالی هر جزء در هر فاز (kg/m^3)	$Re = \rho_c V_s d_{rr} / \mu_c$	عدد رینولدز قطره (بدون بعد)
σ	کشش بین فازی (N/m)	$Sc_c = \mu_c / \rho_c D_c$	عدد شمیته فاز پیوسته (بدون بعد)
ϕ	ماندگی فاز پراکنده (بدون بعد)	$Sc_d = \mu_c / \mu_d D_c$	عدد شمیته فاز پراکنده (بدون بعد)
ω_i	جزء جرمی هر جزء در هر فاز (بدون بعد)	$Sh_c = k_c d / D_c$	عدد شروود فاز پیوسته (بدون بعد)
		$Sh_d = k_c d / D_d$	عدد شروود فاز پراکنده (بدون بعد)
		t	مدت زمان اقامت (s)
		V	حجم یک مرحله از میکسر - ستلر (m^3)
		V_c	دبی حجمی فاز پیوسته (m^3/s)
		V_d	دبی حجمی فاز پراکنده (m^3/s)

تاریخ دریافت: ۱۴/۳/۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۵/۳/۸

مراجع

- [۱] وکیلی‌نژاد، غلامرضا؛ شریعتی نیاسر، مجتبی؛ بررسی رفتار حالت گذرا در مخلوط‌کن‌ها (میکسر - ستلر)، نخستین کنگره مهندسی شیمی، ص ۲۰۹ و ۲۱۱، دانشگاه تربیت مدرس، تهران (۱۳۷۳).
- [2] Grober, H., *Z Ver Dtsch. Ing.*, Die Erwärmung und Abkühlung Einfacher Geometrischer Körper, **69**, p. 705 (1925).
- [3] Kronig, R., Brink, J.C., On the Theory of Extraction From Falling Drops, *Appl. Sci. Res.*, **A2**, p. 142 (1950).
- [4] Handlos, A. E., Baron, T., Mass and Heat Transfer from Drops in Liquid-Liquid Extraction, *AICHE J.*, **3**, p. 127 (1957).
- [5] Radu Z. Tudose, Gabriela Apreotesei, Mass Transfer Coefficient in Liquid-Liquid Extraction, *Chemical Engineering and Processing*, **40**, 477 (2001).
- [6] Xiaojin Tang, Wang, J., A Dynamic Forward Mixing Model for Evaluating the Mass Transfer Performances of an Extraction Column, *Chem. Eng. Sci.*, **59**, 4457 (2004).

- [7] Luo Guangsheng et al., An Improved Dynamic Combined Model for Evaluating the Mass Transfer Performances of an Extraction Column, *Chem. Eng. Sci.*, **60**, 4409 (2005).
- [8] Calderbank, P.H., Korchinsky, I.J.O., Circulation in Liquid Drops: A Heat Transfer Study, *Chem. Eng. Sci.*, **6**, p. 65 (1956).
- [9] Steiner, L. , Mass Transfer Rates from Single Drops and Drop Swarms, *Chem. Eng. Sci.*, **41**, p. 1979 (1986).
- [10] Susumunil et al., Mass Transfer Coefficients in Mixer-Settler Extraction Column, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, **30** (6), p.1083 (1997).
- [11] Misek,T., "Recommended Systems for Liquid Extraction Studies", European Federation of Chemical Engineers, I. Chem. E. London, **1**, p. 1 (1978).
- [12] Elzinga, E.R., Banchemo, J.T., Film Coefficients for Heat Transfer to Liquid Drops, *Chem. Eng. Prog. Symp. Ser.*, **55** (29), p. 149 (1959).
- [13] Kumar, A., Hartland, S., Correlations for Prediction of Mass Transfer Coefficients in Single Drop Systems and Liquid-Liquid Extraction Columns, *Trans. IchemE*, **77** , p. 372 A (1999).