

مطالعه و تحقیق بر ضریب انتقال جرم درون قطره در سیستمهای استخراج مایع-مایع (سیستم تولوئن-اسیداستیک-آب و بوتانل-اسیداستیک-آب)

حسین بهمنیار

استادیار گروه مهندسی شیمی - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

سهیلا شکراله زاده

کارشناسی ارشد دانشکده فنی - دانشگاه تهران

چکیده

در یک کار تجربی ضرائب انتقال جرم قطرات در حال تشکیل در یک ستون از فاز پیوسته اندازه‌گیری شده‌اند. جهت ایجاد ناحیه وسیعی از اندازه قطره از پنج نازل با اندازه های مختلف استفاده شده و سیستمهایی انتخاب گردیده‌اند که تمامی مقاومت در برابر انتقال جرم آنها در فاز پراکنده نهفته شده باشد. این سیستمها عبارتند از تولوئن - اسیداستیک - آب و بوتانل - اسیداستیک - آب - در این سیستمها آب فاز پیوسته^(۱) حلال آلی فاز قطره^(۲) و اسید استیک جزء انتقال یابنده^(۳) را تشکیل می دهند. به منظور بدست آوردن انتقال جرم در مرحله تشکیل قطره از روش برون یابی تا ارتفاع ستون یا زمان صعود صفر استفاده شده است. نحوه تغییر ضرائب انتقال جرم با عوامل مختلف بررسی شده و نیز نتایج بدست آمده با مدلهای موجود مقایسه گردیده و مورد بحث قرار گرفته اند.

میزان استخراج در سیستم تولوئن - اسیداستیک - آب در ناحیه $0.06 < E < 0.22$ و در سیستم بوتانل - اسیداستیک - آب در ناحیه $0.275 < E < 0.35$ قرار گرفته است. نتایج تحقیقات نشان داد مدل نفوذ مولکولی برای سیستم بوتانل - اسیداستیک - آب و مدل چرخش درونی برای سیستم تولوئن - اسیداستیک - آب قابل استفاده می شود. اندازه قطرات معیاری برای دستیابی به ضرایب انتقال جرم درون قطرات خواهد بود.

مقدمه

اطمینان مواجه می‌باشد. تغییر ضرائب انتقال جرم تشکیل قطره با زمان تشکیل هنوز بطور کامل درک نشده است. حضور عوامل فعال کننده سطحی و آلودگیها یا نوسانات سطحی می‌تواند دارای اثر مهمی بر این ضرائب باشد. (Liang-Slater, 1990) در کار حاضر انتقال جرم در مرحله تشکیل قطره مورد مطالعه قرار گرفته و ضرایب انتقال جرم به عنوان تابعی از پارامترهای اساسی در دو سیستم شیمیایی عاری از آلودگی بصورت تجربی بدست آورده شده‌اند.

انتقال جرم بین قطرات مایع و فاز مایع غیرقابل امتزاج اطراف آن، اساس عملیات استخراج صنعتی است و طراحی خوب تجهیزات استخراج نیازمند به درک اساسی مکانیسم انتقال بین فازهای پیوسته و پراکنده می‌باشد. در زندگی یک قطره سه مرحله مهم وجود دارد. (Skelland and Minhas, 1971)

- ۱ - تشکیل قطره در فاز پیوسته
 - ۲ - صعود یا سقوط آزاد قطره از میان فاز پیوسته
 - ۳ - پیوند قطرات در انتهای صعود یا سقوط آزاد
- توضیح مسئله انتقال جرم به و یا از یک قطره مسئله پیچیده است و تخمین ضرائب انتقال جرم آن یا عدم

بررسی انتقال جرم تشکیل قطره

۱- مدل‌های انتقال جرم نفوذی

بسیاری از محققین در مدلسازی انتقال جرم تشکیل قطره فرض نمودند که این انتقال تنها توسط نفوذ انجام می‌گیرد و به حل ریاضی آن پرداختند. نفوذ جزء انتقال یابنده از یک قطره در حال تشکیل به یک محیط پیوسته ساکن با استفاده از موازنه جرم و قانون فیک در مختصات کروی بدست می‌آید:

$$\frac{\delta c}{\delta t} + V_r \frac{\delta c}{\delta r} = D_d \left(\frac{\delta^2 c}{\delta r^2} + \frac{2}{r} \frac{\delta c}{\delta r} \right) \quad (1)$$

برای حل معادله فوق شرایط مرزی زیر در نظر گرفته می‌شود:

الف) غلظت اولیه در فاز پیوسته مقدار یکنواخت C_0 است.
 $C = C_0, t = 0, r > R$

ب) غلظت قطره در سطح تماس با شعاع R (که شعاع قطره کروی است) در تعادل با غلظت فاز پیوسته در کلیه زمانهاست.
 $C = C^*, t > 0, r = R$

ج) فاز پیوسته یک محیط نامتناهی است.
 $C = C_0, t > 0, r = \infty$

در بدست آوردن حل معادله فوق بسیاری از افراد فرضیات زیر را در نظر گرفتند.

– جریان جابجایی سیال اطراف قطره که به علت انبساط آن بوجود آمده، قابل صرف نظر کردن است.
 $(V_r = 0)$

– لایه مرزی مسطح است لذا مسئله را به صورت یک سطح تماس تخت با سطحی برابر سطح کره در نظر گرفتند و به همین علت معادله تبدیل شده به:

$$\frac{\delta c}{\delta t} = D_d \frac{\delta^2 c}{\delta x^2} \quad (2)$$

که در آن X فاصله از سطح تماس است.

– غلظت داخل قطره را می‌توان ثابت در نظر گرفت.
 در بدست آوردن روابط انتقال جرم علاوه بر فرضیات فوق الذکر در کلیه حالات این فرضیات نیز بطور ضمنی انجام گرفته که در فرآیند نفوذ در

مقایسه با فرآیند رشد سطح آهسته است و تغییرات در ضریب نفوذ در جهت جریان قابل صرف نظر کردن است. به منظور حل ریاضی انتقال جرم توسط نفوذ، لازم است پدیده فیزیکی واقع شده در قطره با توجه به لایه مجاور سطح مشخص باشد. از آنجاکه این پدیده‌ها قابل اندازه‌گیری نمی‌باشند باید با استفاده از مدل‌های فرضی مورد تحلیل قرار گیرند. با فرض کردن مکانیسم‌های متفاوت برای رفتار لایه مرزی در حال رشد یک سطح ناپایدار میتوان معادلاتی برای فرآیند انتقال جرم تشکیل بدست آورد. Licht-Pansing, (1953) با دستیابی سطح قطره در فاصله زمانی t و $t+dt$ معادله بدست آورده‌اند که از نظر تجربی مورد تأیید واقع نشده است.

Heertjes-Holve-Halsma, (1954) با استفاده از اجزاء جدید سطحی رابطه‌ای بدست آورده‌اند که با نام مدل Groothuis-Kramers, (1955) سطح تازه مشهور است. تشکیل سطح جدید بدون اختلاط سطوح با سنین مختلف را فرض نمودند. این فرض توسط Walia, (1964) و Popovich et al, (1964) مورد استفاده قرار گرفته و منجر به روابطی شده است.

آقایان Groothuis-Kramers در کارشان بجای در نظر گرفتن شدت رشد حجمی ثابت، شدت رشد سطحی ثابت را فرض نموده‌اند و از ضریب تصحیحی جهت اثر حرکت محلول اطراف کره در حال رشد استفاده کرده‌اند. این روش بعنوان «مدل امتداد سطح»^(۱) تفسیر شده است که در آن حرکت سطح، ضخامت لایه نفوذی را تحت تأثیر قرار داده و باعث امتداد آن تا اطراف سطح می‌شود. این مدل در حالت امتداد آن افزایش می‌یابد. نام دیگر آن «مدل بالن»^(۲) است. Michels (1960) ضریب انتقال جرم در دو ناحیه جلویی و پشتی قطره مورد بررسی قرار داده‌اند. براساس این مدل در لایه مرزی، شکلی از جریان توسعه می‌یابد که در آن شدت امتداد در حال تغییر واقع می‌گردد. Angelo et al, (1966) فرض ناچیز بودن جریان جابجایی را حذف کرده ولی حذف فرضیات لایه مرزی مسطح و نیروی رانش ثابت را ادامه دادند. لذا معادله انتقال جرم به صورت زیر درآمد:

نظیر زمان تشکیل، تعداد قطرات در ثانیه، سرعت سیال ورودی و یا عدد رینولدز داده شده‌اند.

توسط Heertjes et al مشاهده شده بود که قطراتی با زمان تشکیل ۱/۳ ثانیه یا کمتر دارای چرخش داخلی محسوس هستند. در حالیکه برای زمانهای تشکیل بزرگتر از ۱/۵ ثانیه هیچ چرخشی مشاهده نشد.

Garner et al, (1955) در یک کار آزمایشی، تجربه نمودند که در شدتهای تشکیل بسیار پائین (یک تا دو قطره در دقیقه) هیچ چرخشی مشاهده نکردید. در شدتهای ۱۰ تا ۳۰ قطره در دقیقه چرخش جزئی مشاهده شد و در شدتهای تشکیل بالا (۳۰ تا ۴۵ قطره در دقیقه) یک شکل کاملاً چنبره‌ای که یک جت باریک مرکزی را احاطه کرده بود، تشکیل گردید.

Groothuis-Kramers جذب دی اکسید گوگرد به داخل آب را از یک محیط دی اکسید گوگرد خاص مطالعه نمودند و دریافتند که در اثر چرخش داخلی، میزان جذب در اعداد رینولدز ۴۰ تا ۵۰ شروع به افزایش می‌نماید. در مطالعه مشابهی از جذب دی اکسید کربن Dixon-Russel افزایش در جذب توسط قطرات مایع را در عدد رینولدز حدود ۵۰ مشاهده نمودند. Rajan-Heideger, (1971) در یک مطالعه عکسبرداری از تشکیل قطره، اثر مهم چرخش داخلی بر ضرائب انتقال جرم اندازه‌گیری شده حتی در مواقعی که مقاومت فاز پیوسته کنترل کننده است را گزارش نمودند. بدنبال آن، Heideger - Du Bois (1985) اثر مشابهی را برای مقاومت فاز پراکنده بدست آوردند.

Heideger - Wright, (1986) اثر زمان تشکیل بر چرخش داخلی قطره و نتیجتاً بر استخراج را مطالعه نمودند. آنها اثر مهم جابجائی داخلی را بر ضریب انتقال جرم اندازه‌گیری شده برای هر دو حالت مقاومت فاز پیوسته کنترل کننده و مقاومت فاز پراکنده کنترل کننده را در مورد قطراتی با اندازه تقریبی ۳ تا ۵ میلیمتر گزارش نمودند. آنها دو ناحیه زمانی مجزا را با وابستگی واحد ضرایب انتقال جرم متوسط به زمان تشکیل مشاهده نموده و آنرا بعنوان نتیجه‌ای از تغییر در مکانیسم انتقال جرم در نظر گرفتند.

Liang - Slater, (1990) حالات کاربردی زیر را در

$$\frac{\delta c}{\delta t} + V_x \frac{\delta c}{\delta r} = D_d \left(\frac{\delta^2 c}{\delta r^2} \right) \quad (3)$$

آنها صرفاً کار تئوری انجام داده و مدل آنها توسط آزمایشات بر روی قطرات در حال رشد اثبات نشده است. Angelo-Lightfoot, (1968) نشان دادند که نتایج آنها با روابط مدل امتداد سطح انطباق بهتری دارد. ضرائب انتقال جرم متوسط در زمانهای تشکیل به ازای مدل‌های مختلف در جدول (۱) آمده است. Walia-Vir, (1976) با حذف هر سه فرض ناچیز بودن جریان جابجایی اطراف قطره، لایه مرزی مسطح و نیروی رانش ثابت و با حل معادله دیفرانسیل رابطه دیگری را ارائه نموده‌اند. معادله ارائه شده توسط این محققین جهت پیش بینی کسر استخراج شده جزء انتقال یابنده در مرحله تشکیل معرفی شده است.

جدول ۱: معادلات پیشنهاد شده جهت استخراج یا جذب از قطرات در حال تشکیل

Authors	Equation
Licht and Pansing	$K_{df} = (6/7)(D_d/\pi r_f)^{1/2}$
Heertjes et al.	$K_{df} = (24/7)(D_d/\pi r_f)^{1/2}$
Groothuis and Kramers	$K_{df} = (4/3)(D_d/\pi r_f)^{1/2}$
Ilkovic	$K_{df} = 1.31(D_d/\pi r_f)^{1/2}$
Heertjes and DeNie	$K_{df} = 2(a_0/a_r + 2/3) \times (D_d/\pi r_f)^{1/2}$

۲ - چرخش داخلی در قطرات در حال تشکیل و اثر آن بر انتقال جرم

مدلهای ارائه شده در فوق تنها برای حالاتی اعتبار دارند که هیچ انتقال جرم اضافی در اثر جریان مایع داخل قطره یا آشفتنگی‌های سطحی واقع نشود.

چرخش داخلی در قطراتی که در حال رشد سریع هستند انتقال جرم را شدیداً تحت تأثیر قرار می‌دهد. این چرخشها در بسیاری از موارد مشاهده شده‌اند. آستانه شروع این چرخشها در نواحی مختلف توسط محققین داده شده و براساس پارامترهای مختلف

$$\left(\frac{K_{df}^{ff}}{d}\right) = 0.0432 \left(\frac{V_N}{d.g}\right)^{0.089} \left(\frac{d^2}{t_f D_d}\right)^{-0.334} \left(\frac{\mu d}{\rho_d.d.\delta}\right)^{-0.601}$$

$$(N_{MI}) \quad (N_{FT}) \quad (N_T) \quad (N_{oh})$$

(۵)

Skelland - Minhas این رابطه را نمایانگر کل انتقال جرم واقع شده حین تشکیل قطره شامل انتقال جرم طی رشد، جدایی و تاثیر قطره باقیمانده پس از جدایش معرف نمودند.

شرح کار تجربی انجام شده

هدف از کار تجربی حاضر، بدست آوردن ضریب انتقال جرم (از فاز پراکنده به پیوسته) قطره منفرد در حال تشکیل بدون حضور عوامل فعال سطحی و آلاینده‌ها بوده است.

در آزمایشات با کوچک کردن سطح پیوند اثر آنرا کوچک کرده و لذا از انتقال جرم حین پیوند قطرات صرف نظر شد. از سیستم‌هایی استفاده شد که کلیه مقاومت در برابر انتقال جرم در فاز قطره نهفته شده باشد برای اینکار باید حلالیت جزء انتقال یابنده در فاز پیوسته بسیار بیشتر از حلالیت آن در فاز پراکنده باشد و نیز نباید غلظت جزء انتقال یابنده در فاز پیوسته افزایش یافته و مقاومت ایجاد نماید.

جزء انتقال یابنده در فاز پراکنده حل شده و جهت انتقال جرم از فاز پراکنده به فاز پیوسته بوده است. تجهیزات مورد استفاده به صورت ترسیمی در شکل (۱) نشان داده شده و از چهار قسمت اساسی تشکیل یافته است. قسمت اول ستون استخراج یا ستون تماس دوفاز است که از فاز پیوسته پر می‌شود و از لوله شیشه‌ای به قطر داخلی ۸ سانتی متر و ارتفاع ۵۰ سانتی متر ساخته شده و بر روی جداره خارجی ستون علائمی جهت تعیین فواصل صعود قرار داده شده است. قسمت دوم نازلها می‌باشند که از لوله‌های موئین شیشه‌ای ساخته شده و توسط اتصالات شیشه‌ای به قسمت تحتانی ستون متصل می‌شوند.

انتقال جرم تشکیل قطره دسته بندی نمودند.

الف ($Re < 10$) نفوذ مولکولی کنترل کننده

ب ($10 < Re < 34$) نفوذ مولکولی به همراه چرخش داخلی کنترل کننده

ج ($Re > 34$) چرخش داخلی کنترل کننده

اغلب افرادی که انتقال جرم در قطرات در حال تشکیل را مطالعه نموده‌اند، مشاهده کرده‌اند که حرکات داخل قطره، شدت‌های انتقال جرم را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

۳- روابط انتقال جرم تجربی: از آنجا که مدلهای انتقال جرم نفوذی اثر چرخش داخلی را بر انتقال جرم در نظر نمی‌گیرند انتظار می‌رود که حد پایین انتقال جرم تشکیل قطره را پیش بینی نمایند.

Skelland - Minhas, (1971) از جمله کارهای تجربی در این زمینه می‌توان به کار آنان اشاره نمود که شدت‌های انتقال جرم تشکیل قطره را در یک سیستم دوجزئی و دو سیستم سه جزئی که در آنها فاز پراکنده کنترل کننده بود، اندازه گیری نمودند. این افراد با روش ترسیم داده‌ها و محاسبات ریاضی انتقال جرم حین تشکیل، صعود و پیوند را از یکدیگر مجزای نموده و سپس داده‌های تجربی را با مدلهای انتقال جرم نفوذی مقایسه نموده و دریافتند که انتقال جرم اندازه گیری شده بطور قابل ملاحظه‌ای بزرگتر از مقادیر پیش بینی شده تئوری بوده و نتیجه گرفتند که در مدلهای نفوذی اثر چرخش داخلی به هنگام رشد قطره، آشفتگی سطحی، تاثیر قطره باقیمانده پس از جدایی و آشفتگی مربوط به جدایی قطره در نظر گرفته نشده‌اند. بر این اساس اظهار داشتند که یک مدل واقعی علاوه بر زمان تشکیل و ضریب نفوذ باید شامل سایر پارامترهای نظیر دانسیته، ویسکوزیته و تنش بین سطحی نیز باشد لذا:

$$K_{df} = f(t_f, d, d_N, V_N, D_d, \delta, \rho_c, \rho_d, \Delta\rho, \mu_c, \mu_d) \quad (۴)$$

سپس با استفاده از گروه‌های بدون بعد و آنالیز کامپیوتری به معادله زیر دست یافتند.

می‌باشد جهت به تله انداختن قطرات بکارگرفته شده است. این قیف می‌تواند در فواصل مختلف صعود در ستون قرار داده شده و قطرات را توسط پیپت فیلر که در بالای ساقه آن نصب می‌شود بداخل بکشاند. به منظور به حداقل رسانیدن انتقال جرم پیوند قطرات سعی شد سطح مقطع قیف در نقطه پیوند قطرات در حدود ۱ سانتی متر مربع نگاهداری شود. لازم به تذکر است که به منظور جلوگیری از حضور آلاینده‌ها در شیرها از هیچ نوع گریسی استفاده نشد.

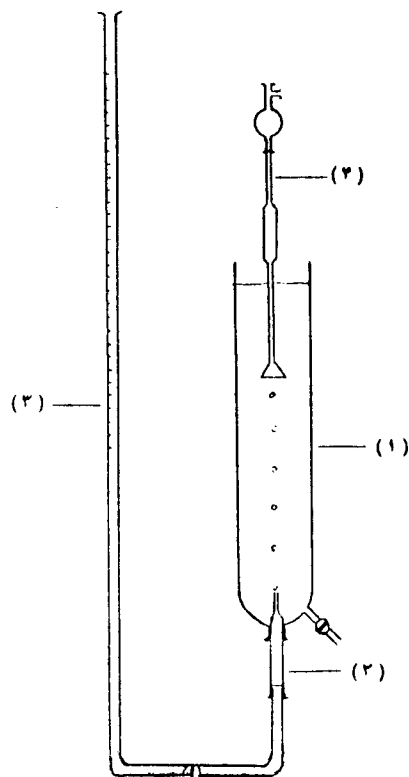
سیستم‌ها و موارد مورد استفاده

در آزمایش‌ها از دو سیستم شیمیایی استفاده شد. سیستم‌ها بگونه‌ای انتخاب شدند که علاوه بر متمرکز کردن مقاومت انتقال جرم در فاز قطره، دارای تنش بین سطحی متفاوت (و در نتیجه اندازه قطره متفاوت) باشند. دو سیستم انتخابی عبارتند از تولوئن - اسید استیک - آب و بوتانل نرمال - اسیداستیک - آب. در این موارد نام فاز قطره در ابتدا جزء انتقال یابنده در وسط و فاز پیوسته در انتها آورده شده است.

کلیه حلالهای آلی از نوع آزمایشگاهی خالص و از تولیدات شرکت Merck انتخاب شدند. آب مقطر یکبار تقطیر بعنوان فاز پیوسته استفاده شد. جهت تیتراسیون محلول سود ۰/۱N. (Titrisol ۰/۱ N) ساخت Merck و بعنوان معرف فنل فتالئین بکاررفت.

خواص فیزیکی

اندازه گیری خواص فیزیکی در شرایط شروع آزمایش (یعنی اشباع بودن دو فاز از یکدیگر و در غلظت اولیه از جزء انتقال یابنده) و دمای 22 ± 2 درجه سانتی گراد انجام گردید. دانسیته دوفاز از طریق توزین حجم معینی از محلول توسط ترازوئی با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم و ویسکوزیته‌ها از طریق ویسکومتر آزمایشگاهی مدل Cannon - Fenske انجام گردید. ضرایب نفوذ مولکولی از مقادیر داده شده در مراجع



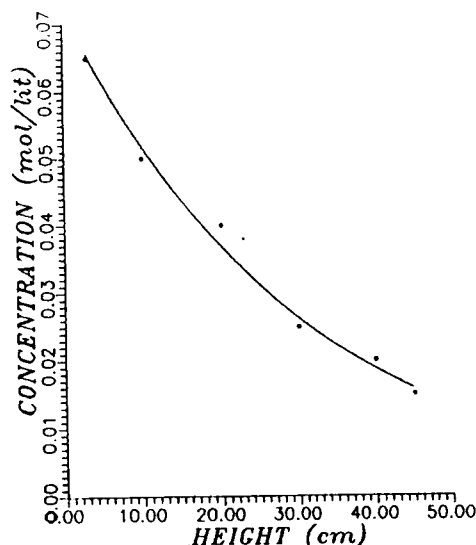
شکل ۱: شکل شماتیک ستون استخراج.

در آزمایشات از پنج اندازه نازل با قطر داخلی ۰/۴-۰/۶-۰/۸-۱ و ۲ میلی متر استفاده شده است. قسمت سوم ستون نگهدارنده فاز پراکنده است که جهت ایجاد هد لازم برای فاز قطره ارتفاع آن بلند در نظر گرفته شده و در واقع یک بورت ۱۰۰ سانتی‌متری مکعبی با دقت $\pm 0/2$ سانتی‌متر مکعب می‌باشد که به قسمت تحتانی آن لوله‌ای شیشه‌ای به همان قطر و ارتفاع ۵۵ سانتی‌متر متصل شده است. در انتهای این ستون شیری نصب شده که ارتباط این ستون را با نازلها فراهم نموده است و شدت جریان فاز پراکنده از طریق آن تنظیم می‌گردد. قسمت چهارم وسیله جمع اوری کننده قطرات رها شده است. بدین منظور قیف شیشه‌ای وارونه کوچکی که متصل به ساقه شیشه‌ای بلندی

$$E = (C_0 - C_f) / C_0 \quad (۸)$$

ضریب انتقال جرمی که بدین ترتیب بدست می آید یک مقدار متوسط در مدت زمان تشکیل قطره می باشد. در کار تجربی حاضر انتقال جرم در دو مرحله تشکیل و صعود واقع می گردد. به منظور جداسازی اثر هریک از این مراحل و بدست آوردن Cf محققین مختلف روشهای گوناگونی ارائه نموده اند که بسیاری از آنها بر مبنای برون یابی داده ها تا ارتفاع صعود یا زمان صعود صفر قرار دارد. در این میان عده ای اعتقاد دارند که ترسیم داده ها باید به گونه ای باشد که خط مستقیم نتیجه داده برون یابی از رقت بیشتری برخوردار باشد. بدین منظور روشهای مختلفی پیشنهاد شده اند:

الف) ترسیم منحنی غلظت خروجی قطره برحسب ارتفاع صعود و برون یابی آن تا ارتفاع صعود صفر (شکل ۲)



شکل ۲: تغییرات غلظت خروجی قطره برحسب ارتفاع صعود.

ب) ترسیم جزء استخراج شده بر حسب مجذور زمان صعود و اکستراپولاسیون تا زمان صعود صفر (شکل ۳)

ج) ترسیم $\ln(1-E)$ برحسب زمان صعود و برون یابی تا زمان صعود صفر (شکل ۴)

و نیز رابطه Wilke Chang بدست آمده و تنش های بین سطحی باتوجه به مقادیر مندرج در مراجع تحقیقاتی تعیین شده اند. کلیه خواص فیزیکی در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲: خواص فیزیکی سیستمهای مورد استفاده

سیستم	ρ_c	ρ_d	μ_c	μ_d	σ	D_M
	g/cm ³	g/cm ³	cp	cp	dyn/cm	cm/s
۲- تولونن - سیدستیک - آب	0/857۹	0/۹۹۵۶	0/۶۲۳۳	0/۹۳۰۷	۲۲	۷/۲۶۵×۱۰ ^{-۵}
۲- کیومن - سیدستیک	0/۸۵۶۹	0/۹۹۲۸	0/۷۷۳۷	0/۹۱۷۸	۲۲	۷/۷۷۷×۱۰ ^{-۵}
۳- بوتانل - سیدستیک - آب	0/۸۱۲۷	0/۹۷۹۲	۷/۲۵۳۱	0/۹۹۵۹۲	۱/۲	۲/۵۶×۱۰ ^{-۵}

نتایج آزمایشگاهی

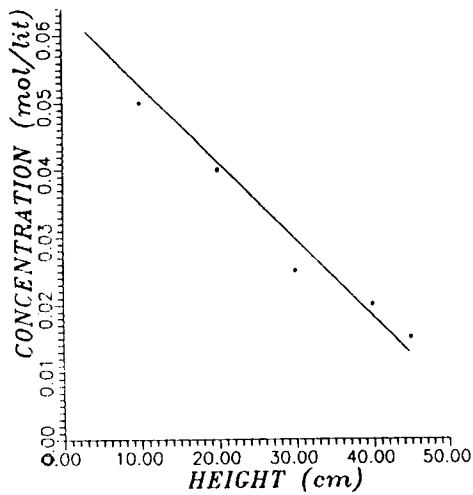
قطر قطره برابر با قطر کره ای با حجم مساوی قطره محاسبه شد. ضرائب انتقال جرم تجربی نیز بادر نظر گرفتن: $K_{oD} = K_d$ و بانوشتن موازنه جرم حول قطره (با ثابت در نظر گرفتن ضریب انتقال جرم در مدت زمان انتقال) رابطه زیر بدست آمد:

$$K_{df} = - (d/6t_f) \ln(1-E) \quad (۶)$$

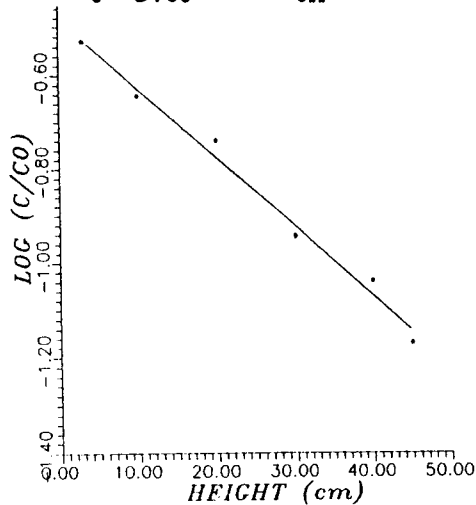
E کسر استخراج شده یا بازده استخراج حین تشکیل قطره بوده و چنین محاسبه می گردد.

$$E = (C_0 - C_f) / (C_0 - C^*) \quad (۷)$$

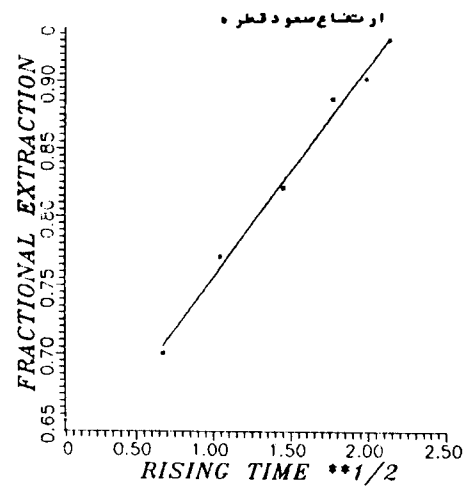
که در آن Cf غلظت اسید استیک در قطره به هنگام جدایی از نازل، Co غلظت اولیه قطره و غلظت تعادلی می باشند. از آنجاکه در ابتدای مقدار از جزء انتقال یابنده در آب وجود ندارد می توان C را برابر صفر در نظر گرفت لذا:



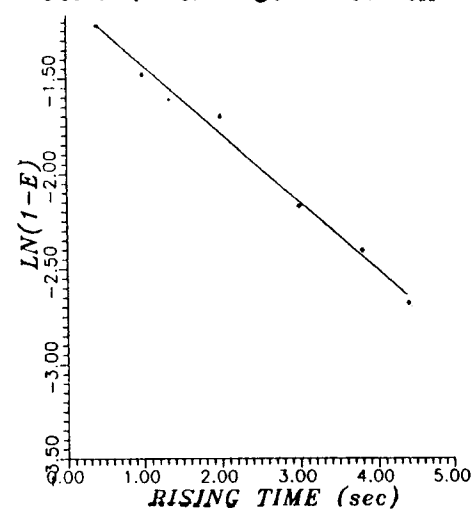
شکل ۵: تغییرات غلظت خروجی قطره.



شکل ۶: تغییرات لگاریتم ماده.



شکل ۳: تغییرات جزء استخراج شده برحسب مجذور زمان صعود.



شکل ۴: تغییرات لگاریتمی کسر استخراج نشده برحسب زمان صعود.

$$Re = \rho_d V_N d_N / \mu_d \quad (9)$$

در شرایط یکسان آزمایش (از نظر دما، غلظت، قطر نازل و شدت جریان) قطر قطره تولوئن در حدود سه برابر قطر بوتانل بوده و این به علت تنش بین سطحی بالا در این سیستم می باشد. منحنی قطر قطره برحسب شدت جریان حجمی فاز پراکنده در مورد قطره تولوئن در شکل (۷) آورده شده است. در مورد سیستم آزمایشی، افزایش قطر با افزایش شدت جریان مشاهده می گردد. چنین منحنی‌هایی در مورد سیستم‌هایی با ویسکوزیته پایین فاز پیوسته باید دارای یک ماکزیمم باشند ولی به علت محدود بودن تعداد داده‌ها در هر نازل، این نقطه فقط در مورد قطرات بوتانل مشاهده گردید.

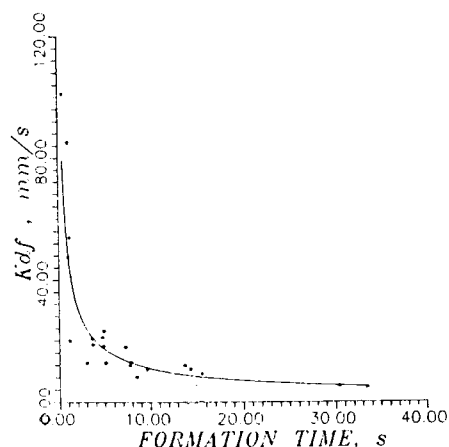
د) ترسیم غلظت خروجی قطره برحسب ارتفاع صعود و انطباق داده‌ها با خط مستقیم و سپس اکستراپولاسیون تا ارتفاع صعود صفر (شکل ۵)
ه) ترسیم لگاریتم جزء ماده انتقال نیافته $\frac{C}{C_0}$ برحسب ارتفاع صعود و برون یابی تا ارتفاع صعود صفر (شکل ۶)

برای هر سری از داده‌های تجربی بدست آمده، روشهای الف تا ه بکاررفته و از میان آنها روشی که بهترین تطابق با داده‌ها را داشت انتخاب شده و برآن اساس اکستراپولاسیون انجام گرفت تا مقادیر E ، C_f و نهایتاً K تجربی محاسبه شوند. در محاسبات انتقال جرم تشکیل قطره، عدد رینولدز قطره به صورت زیر محاسبه می گردد:

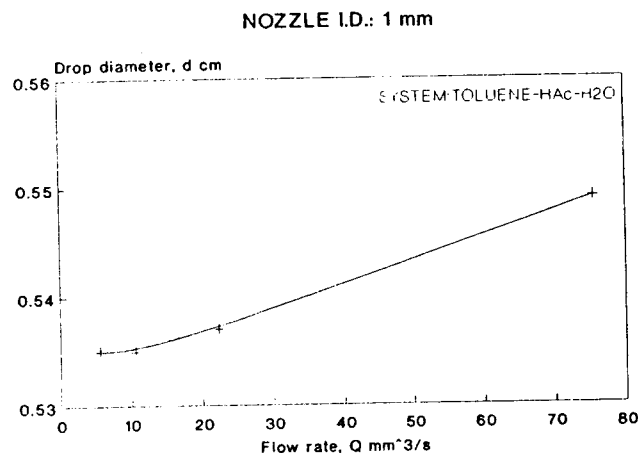
داده‌های تجربی در مورد هردو سیستم نشان می‌دهند که در هر نازل معین، با افزایش زمان تشکیل میزان کسر استخراج یافته برحسب زمان تشکیل قطره تولوئن (شکل ۸) مشخص گردید که شیب منحنی در زمانهای تشکیل کوتاه بسیار تند بوده و پس از مدت زمان کوتاهی شیب به تدریج کم می‌شود که چرخشی داخلی و دیگر اثرات سطح مشترک که در مراحل اولیه تشکیل قطره بوجود می‌آیند (و باعث افزایش انتقال جرم می‌شوند) بتدریج با زمان از بین رفته و قطره تبدیل به قطره ساکن می‌شود.

ضریب انتقال جرم تشکیل قطره

نحوه تغییر ضریب انتقال جرم با زمان تشکیل قطره در مورد قطرات تولوئن و بوتانل در اشکال (۹) و (۱۰) ترسیم شده‌اند. در هر دو مورد افت شدید اولیه در ضریب انتقال جرم مشاهده می‌شود و علت آن فروکش نمودن چرخش داخلی قطره با افزایش عمر قطره می‌باشد لذا انتقال جرم بالائی که در اثر آشفتگی داخل قطرات بوجود آمده بود سریعاً افت پیدا می‌کند.



شکل ۹: تغییرات ضرایب انتقال جرم تشکیل قطره برحسب زمان تشکیل در سیستم تولوئن - اسیداستیک - آب



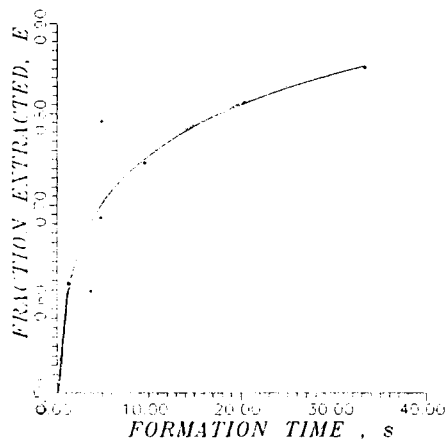
شکل ۷: تغییرات قطر قطره فاز پراکنده.

اعداد رینولدز تشکیل قطره در دو سیستم در نواحی زیر تغییر می‌نمودند.

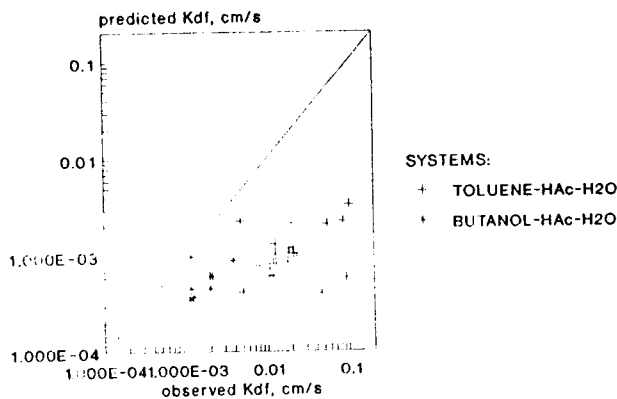
الف) تولوئن - اسیداستیک - آب $5/2 < Re < 227/4$
 ب) بوتانل - اسیداستیک - آب $0/13 < Re < 1/09$

میزان کسر استخراج شده

کسر استخراج یافته در سیستم تولوئن - اسیداستیک - آب در ناحیه $0/86 < E < 0/22$ و در سیستم بوتانل - اسیداستیک - آب در ناحیه $0/275 < E < 0/25$ قرار می‌گیرد.



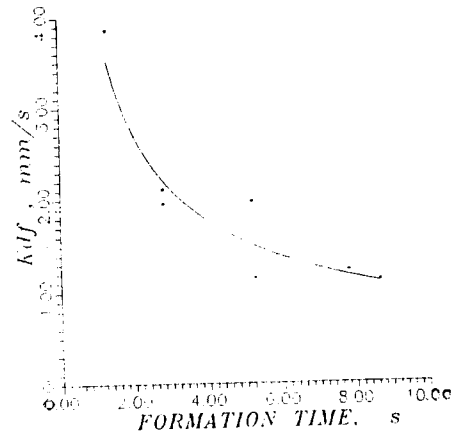
شکل ۸: منحنی تغییرات کسر استخراج یافته با زمان تشکیل در نازل ۴ mm در سیستم تولوئن - اسیداستیک - آب



شکل ۱۱: مقایسه ضرایب انتقال جرم تشکیل تجربی با مدل

Licht - Panasing

قرار دارند. که تطابق مشابهی را نشان داده و بالاخره مدل Licht - Panasing بدترین تطابق با داده‌ها را نمایش می‌دهد. از این اشکال مشاهده می‌شود که در مورد سیستم تولوئن - اسیداستیک - آب مدل‌های نفوذی مقادیر بسیار پائین تری نسبت به ضرایب تجربی پیش بینی می‌نمایند و باتوجه به اینکه اعداد رینولدز این سیستم در نواحی بالای عدد رینولدز بحرانی قرار می‌گیرند بطور منطقی می‌توان نتیجه گرفت که در این حالت آشفتگی‌های حاصل باعث افزایش انتقال جرم گردیده و علاوه بر نفوذ مولکولی، چرخانه‌های موجود در قطره نیز نقش مهمی ایفا می‌نماید و نمی‌توان فقط انتقال جرم نفوذی را در نظر گرفت. بهترین تطابق از نقاط ضرایب کوچکتری پیش‌بینی می‌نماید. باوجود اینکه برخی از مقادیر N_{IT} , N_{Oh} , N_{Fr} در ناحیه متغیرهای قابل استفاده از این رابطه قرار نمی‌گیرند. ولی نتایج بهتری نسبت به مدل‌های نفوذی پیش‌بینی می‌کند. علت انحراف بیشتر برخی از نقاط تجربی از این رابطه اینست که به علت شدت جریانهای کم فاز قطره، اعداد رینولدز آنها زیر رینولدز بحرانی قرار گرفته و احتمال مشارکت آشفتگی‌ها در انتقال جرم ضعیف‌تر می‌شود. در مجموع نتایج کلی زیر حاصل شده است.



شکل ۱۰: تغییرات ضرایب انتقال جرم تشکیل قطره برحسب زمان

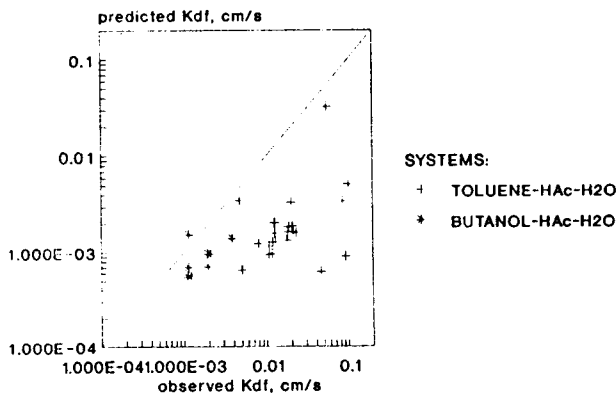
تشکیل در سیستم بوتانل - اسیداستیک - آب

بحث و نتیجه گیری

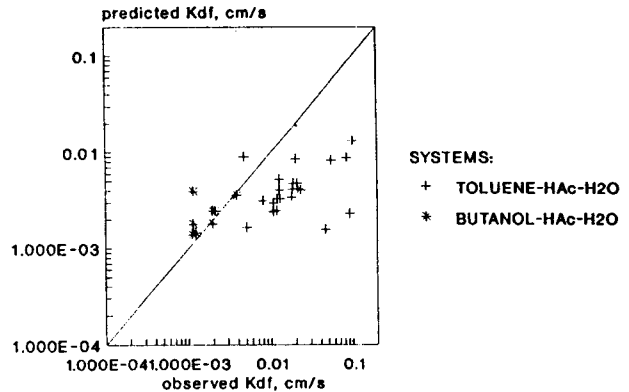
مقایسه ضرایب انتقال جرم تجربی با مدل‌های نفوذی Licht - Panasing, Ilkovic - Baird, Groothuis - Kramers, Heertjes et al. و رابطه تجربی Mainhas - Skelland به ترتیب در اشکال (۱۱) تا (۱۵) انجام پذیرفته است.

بطور کلی نتایج مربوط به سیستم بوتانل - اسیداستیک - آب تطابق بهتری با مدل‌های انتقال جرم نفوذی نشان می‌دهند. باتوجه به ناحیه اعداد رینولدز آنها که در زیر محدوده شروع چرخش داخلی قرار می‌گیرند می‌توان فرض نمود که در این سیستم انتقال جرم صرفاً توسط نفوذ مولکولی انجام می‌گیرد و به همین علت داده‌های تجربی به هیچ وجه تطابق خوبی با رابطه Skelland - Mainhas ندارند. مقادیر N_{IT} , N_{Oh} , N_{Fr} در مورد این سیستم در نواحی مجاز استفاده از این رابطه قرار نمی‌گیرند و طبیعی است که جوابهای خوبی هم مورد انتظار نباشد. از میان مدل‌های نفوذی داده‌های تجربی قطره بوتانل بهترین تطابق را با مدل Heertjes et al نشان میدهند.

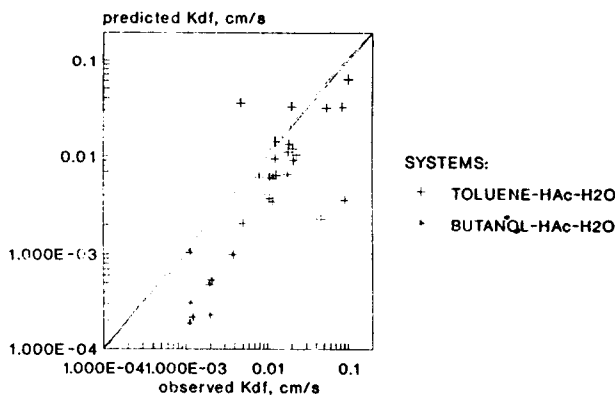
پس از آن مدل‌های Ilkovic - Baird, Groothuis - Kramers,



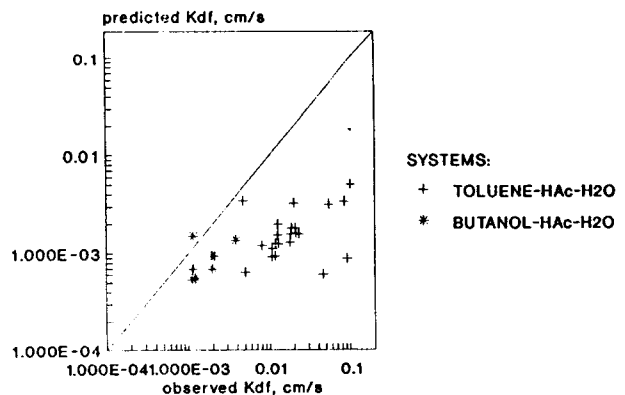
شکل ۱۳: مقایسه ضرایب انتقال جرم تشکیل تجربی با مدل
Grootbuis - Kramers



شکل ۱۲: مقایسه ضرایب انتقال جرم تشکیل تجربی با مدل
Heertjes et al.



شکل ۱۵: مقایسه ضرایب انتقال جرم تشکیل تجربی با
رابطه تجربی Skelland - Minhas



شکل ۱۴: مقایسه ضرایب انتقال جرم تشکیل تجربی با مدل
Ilkovic - Baird

– نتایج تجربی ضرایب انتقال جرم سیستم تولوئن – اسیداستیک – آب بسیار بزرگتر از مقادیر پیش بینی شده توسط مدل‌های نفوذی است و علت آن آشفتگی‌های داخلی قطره است زیرا اعداد رینولدز تشکیل در مورد این سیستم بالا است. لذا این سیستم تطابق بهتری با رابطه تجربی Skelland - Mainhas (که آشفتگی داخل قطره را در نظر می‌گیرد) دارد.

از طرفی با توجه به مقدار عدد Re در این سیستم $227/4 < Re < 5/2$ ملاحظه می‌شود که آشفتگی تولید

– نحوه رشد قطره وابسته به شدت جریان فاز پراکنده است.

– چرخش داخلی در قطرات که در مراحل اولیه تشکیل بوجود می‌آید و باعث ترقی شدید ضریب انتقال جرم تشکیل می‌شود با افزایش عمر قطره از بین رفته و ضریب طی چند ثانیه سریعاً افت می‌کند.

– باتوجه به عدد رینولدز تشکیل قطرات بوتانل ($Re < 1$) و تطابق بهتر آنها با مدل‌های نفوذی می‌توان در این ناحیه مکانیسم انتقال جرم را صرفاً نفوذ مولکولی در نظر گرفت.

در ادامه این کار تحقیقاتی می توان بررسی چرخش های درونی را برای منطقه آرام چرخش و منطقه متلاطم چرخش توصیه نمود.

شده در سیستم برخلاف نظر محققین قبل (Slater 1990) از $Re < 24$ کمتر نیز شروع می شود (نظر Slater, $Re > 24$ آشفتهکی شروع می شود) لذا نتایج این تحقیق نشان می دهد که دامنه ارائه شده زیر دقیق تر است.

$Re < 1$ مدل نفوذ مولکولی

مراجع

- 1 - Angelo, J. B., and Light foot, E. N. (1968). "Liquid - Liquid extraction from single drops." *AICHE. J.*, 14, 531.
- 2 - Angelo, J. B., Light foot, E. N., and Howard, D. W. (1966). "Generalization of the application theory for surface stretch." *AICHE. J.*, 12, 751-760.
- 3 - Burkhardt, L., Weathers, P. W., and Sharer, P. C. (1976). "Mass transfer and interfacial circulation in forming drops." *AICHE. J.*, 22, 6.
- 4 - Garner, F. H., and Skelland, A. H. P. (1954). "Some factors affecting droplets behavior in liquid - liquid systems." *Int. Eng. Chem.* 46, 61, 1255.
- 5 - Groothuis, H., and Kramers, H. (1955). "Extraction from single forming drops." *Chem. Eng. Sci.*, 4, 17.
- 6 - Heertjes, P. M., and De Nie, L. H. (1966). "The mechanism of drops mass transfer during formation, release and coalescence." *Chem. Eng. Sci.*, 21, 755.
- 7 - Heideger, W. J., and Wright, M. W. (1986). "Liquid extraction during drop formation, effect of formation time." *AICHE. J.*, 32(8), 1372-1376.
- 8 - Heertjes, P. E., Holve, W. A., and Talsma, H. (1954). "Mass transfer between isobutanol and water in spray column." *Chem. Eng. Sci.*, 3, 122.
- 9 - Ilkovic, D. (1934). "Polarographic studies with the mercury cathode." *Colln. Czech, Chem. Eng.*, 6, 498-503.
- 10 - Light, W., and Pansing, W. F. (1953). "Solute transfer from single drops in liquid-liquid extraction." *Ind. Eng. Chem.*, 45, 1885-1896.
- 11 - Liang, T. B., and Slater, M. J. (1990). "Liquid - Liquid extraction drop forming mass transfer and the influence of surfactants." *Chem. Eng. Sci.*, 41, 97.
- 12 - Laddha, G. S., and Degaleesan, T. E. (1976). "Transport Phenomena in liquid extraction." 131-208.
- 13 - Michels, H. H. (1960). *The mechanism of mass transfer during bubble formation*. Ph.D. Thesis, University of Delaware.
- 14 - Poprich, A. T., Jervis, R. E., and Trass, O. (1964). "Mass transfer during drop formation." *Chem. Eng. Sci.*, 19, 357-365.
- 15 - Skelland, A. H. P., and Minhas, S. S. (1971). "Dispersed phase mass transfer during formation and coalescence in liquid-liquid extraction." *AICHE. J.* 17, 1316-1324.
- 16 - Walia, D. S., and Vir, D. (1976). "Extraction from single forming drops." *Chem. Eng. j.*, 12, 133-141.
- 17 - Walia, D. S., and Vir, D. (1976). "Interphase mass transfer during drop or bubble formation." *Chem. Eng. Sci.*, 31, 525-533.

