

استخراج پروپیونیک اسید از آب در میکروکانال‌های T-شکل: اثر طول کانال اختلاط و دبی جریان

فردین حسینی کاکاوندی^۱، مسعود رحیمی^{۱*}، مریم بنی عامر^۲

۱. مرکز تحقیقات CFD، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
۲. مرکز تحقیقات کاتالیست، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

چکیده	مشخصات مقاله
<p>در این تحقیق، میکروکانال‌های T-شکل برای استخراج پروپیونیک اسید از آب با استفاده از حلال ۱-اکتانول به کار برده شده است. اثرات طول کانال اختلاط و دبی جریان سیال بر مشخصه‌های انتقال جرم بین دو فاز مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها در چهار میکروکانال با طول‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ cm در شدت جریان‌های بین ۲ و ۱۶ mL/min انجام شد. اثر افزایش طول کانال بر ضریب انتقال جرم، بازده استخراج و افت فشار مطالعه شد. نتایج نشان داد که افزایش طول کانال اختلاط باعث افزایش انتقال جرم می‌شود اما افت فشار در میکروکانال را نیز بیشتر می‌کند. در این راستا، معیار نسبت عملکرد تعریف شد که مقدار آن با افزایش طول کانال اختلاط تا ۳۰ cm افزایش و پس از آن کاهش یافت. این تحقیق بیانگر آن است که استفاده از سیستم‌های پیوسته میکروفلوئیدیک برای استخراج پروپیونیک اسید از آب می‌تواند جایگزین مناسبی برای سیستم‌های ناپیوسته متداول باشد.</p>	<p>تاریخچه مقاله: دریافت: ۳۰ آذر ۱۳۹۵ دریافت پس از اصلاح: ۱۰ اردیبهشت ۱۳۹۶ پذیرش نهایی: ۱۶ شهریور ۱۳۹۶</p> <p>کلمات کلیدی: میکروکانال استخراج پروپیونیک اسید طول کانال دبی جریان</p>

۱- مقدمه

میکروکانال‌ها یک جایگزین مناسب برای سیستم‌های متداول انتقال جرم و حرارت هستند که به دلیل مسیر نفوذ کوتاه و نسبت سطح به حجم بالا باعث افزایش انتقال جرم و انتقال حرارت در زمان‌های ماند پایین می‌شوند [۱-۴]. نرخ انتقال جرم در انواع مختلف میکروکانال‌ها در حدود دو یا سه مرتبه بالاتر از سیستم‌های انتقال جرم معمولی است [۵]. علاوه بر این، افزایش مقیاس میکروکانال‌ها آسان بوده که با موازی قرار دادن آن‌ها فراهم می‌شود [۶، ۷]. در استفاده از میکروکانال‌ها به معیایی همچون افت فشار بالا، عدم قابلیت انتقال خوراک شامل ذرات جامد و امکان انسداد کانال می‌توان اشاره کرد؛ با این حال، استفاده از میکروکانال‌ها در عملیات استخراج مایع-مایع بسیار مؤثر و کارآمد است. استخراج با حلال کاربردهای زیادی در صنایع مختلف شامل صنایع شیمیایی، غذایی و نفتی دارد.

الگوهای جریان و زمان ماند در میکروکانال دو عامل تأثیرگذار بر استخراج مایع-مایع هستند. الگوهای جریان در میکروکانال‌ها توسط پارامترهای آزمایشگاهی مانند سرعت ورودی فازها، نسبت دبی دو فاز، هندسه میکروکانال، خواص سیال و جنس ماده سازنده میکروکانال کنترل می‌شوند [۸]. الگوهای جریان رایج در جریان دو فازی مایع-مایع به صورت اسلاگ، قطره‌ای، موازی و حلقوی هستند. با توجه به ارتباط بین الگوهای جریان و مشخصه‌های انتقال جرم، هیدرودینامیک جریان دو فازی مایع-مایع و عملکرد انتقال جرم در میکروکانال‌ها در مراجع زیادی بررسی شده است [۹-۱۱]. تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه وجود دارد که در این میان تانگ^۱ و همکاران [۵]، الگوهای جریان دو فازی و استخراج مایع-مایع را در میکروکانال‌های عمودی بررسی کردند. در این میکروکانال‌ها، جریان موازی و قطره‌ای در کانال اختلاط تشکیل شد. آن‌ها اثر شرایط عملیاتی مختلف را بر اندازه متوسط قطره، بازده استخراج و ضریب کلی انتقال جرم حجمی مطالعه کردند. پلوف^۲ و همکاران [۱۲]، نرخ انتقال جرم در میکروراکتورهای پیچیده را در رژیم‌های جریان موازی، اسلاگ و قطره‌ای بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که افزایش شدت جریان و همچنین جریان قطره‌ای منجر به افزایش درصد تبدیل واکنش می‌شود.

پروپیونیک اسید یک کربوکسیلیک اسید مهم است که کاربردهای زیادی در صنایع غذایی، شیمیایی و دارویی دارد. فرآیند تخمیر به‌طور عمده برای تولید پروپیونیک اسید استفاده می‌شود [۱۳]. در این فرآیند، محصول تولید شده به‌صورت یک محلول آبی رقیق از پروپیونیک اسید است که غلظت اسید در این محلول کمتر از ۱۰ درصد وزنی می‌باشد و این یک مشکل در استفاده از تخمیر برای تولید کربوکسیلیک اسیدها محسوب می‌شود؛ بنابراین لازم است که با استفاده از یک روش جداسازی، اسید را از این محلول بازیابی کرد [۱۴، ۱۵]. استخراج با حلال یک روش بازیابی مهم است که به دلیل هزینه‌های انرژی پایین، برای بازیابی این اسیدها از آب استفاده می‌شود. تاکنون مطالعات مختلفی در زمینه استخراج پروپیونیک اسید از آب در سیستم‌های ناپیوسته انجام شده است. کشاو^۳ و همکاران [۱۳]، استخراج پروپیونیک اسید از آب را در یک سیستم ناپیوسته با استفاده از حلال‌های مختلف انجام دادند و ضرایب توزیع و درصد استخراج را تعیین کردند. همچنین قناد زاده و همکاران [۱۶]، استخراج پروپیونیک اسید را با استفاده از ایزو بوتیل استات در یک ظرف شیشه‌ای مورد مطالعه قرار دادند که مقادیر بالایی برای ضرایب توزیع و فاکتورهای جداسازی بدست آوردند. آینس^۴ و همکاران [۱۷]، استخراج پروپیونیک اسید از آب را در یک سیستم ناپیوسته بررسی کردند. آن‌ها فاکتورهای جداسازی و ضرایب توزیع را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که افزایش غلظت اسید در فاز آبی باعث کاهش فاکتور جداسازی می‌شود. با این وجود، معیایی مانند سطح تماس پایین و زمان اختلاط بالا در این سیستم‌ها وجود دارد.

تحقیقات بسیاری در زمینه فرآیند استخراج مایع-مایع در میکروکانال‌های T-شکل انجام شده است. به‌عنوان مثال ژائو^۵ و همکاران [۱۸]، عملکرد انتقال جرم مایع-مایع را در دو نوع میکروکانال T-شکل شامل جریان ناهمسو و جریان متقاطع بررسی کردند. یانگ^۶ و همکاران [۲]، نیز میکروکانال‌های T-شکل را برای استخراج مس از فاز آبی به فاز آلی به‌کار بردند و تأثیر شرایط عملیاتی مختلف را بر بازده استخراج مورد مطالعه قرار دادند.

با توجه به اینکه در سال‌های اخیر استخراج پروپیونیک اسید از آب در سیستم‌های ناپیوسته انجام شده است؛ لذا در

³ Keshav⁴ Ince⁵ Zhao⁶ Yang¹ Tang² Plouffe

جدول ۱- خواص فیزیکی فازهای آبی و آلی استفاده شده در آزمایش‌ها.

مواد	دانسیته (kg/m ³)	ویسکوزیته (mPa s)
محلول آبی پروپیونیک اسید (۴ درصد حجمی)	۹۹۷/۹	۱/۰۰۴
۱-اکتانول	۸۲۴	۷/۳۶

از یک پمپ سرنگی برای وارد کردن فازهای آبی و آلی به داخل میکروکانال استفاده شد. برای مشاهده الگوهای جریان دو فاز درون میکروکانال‌ها، تصاویر جریان سیال در کانال اختلاط با استفاده از یک میکروسکوپ دیجیتالی ثبت شد. میکروسکوپ دیجیتالی متصل به یک لپ‌تاپ، روی کانال اختلاط میکروکانال قرار گرفت. از حسگر^۲ فشار و نمایشگر دیجیتالی فشار نیز برای اندازه‌گیری افت فشار در کانال اختلاط استفاده شد. شکل (۱) شماتیک دستگاه آزمایشگاهی مورد استفاده را نشان می‌دهد.

۲-۳- روش آزمایشگاهی

در ابتدا محلول آبی پروپیونیک اسید با غلظت اولیه ۰/۵۳ mol/Lit (۴ درصد حجمی) آماده شد و ۱-اکتانول نیز به‌عنوان فاز آلی در نظر گرفته شد. به‌منظور استخراج پروپیونیک اسید از فاز آبی به فاز آلی، دو فاز با دبی‌های حجمی برابر با استفاده از پمپ سرنگی به داخل میکروکانال وارد شدند که پس از عبور از کانال‌های ورودی و رسیدن به نقطه اتصال دو فاز، با یکدیگر مخلوط شده و وارد کانال اختلاط شدند. انتقال پروپیونیک اسید به‌عنوان جزء منتقل‌شونده از فاز آبی به فاز آلی از نقطه اتصال کانال‌های ورودی آغاز شده و تا انتهای کانال ادامه یافت. به‌منظور بررسی اثر دبی جریان و طول کانال اختلاط بر بازده استخراج پروپیونیک اسید، آزمایش‌ها در مجموع دبی‌های حجمی دو فاز در محدوده ۱۶ - ۲ mL/min در همه‌ی میکروکانال‌ها انجام شد. به‌منظور تعیین غلظت پروپیونیک اسید موجود در فاز آبی، تیتراسیون این محلول با استفاده از محلول سدیم هیدروکسید ۰/۵ M در حضور شناساگر فنول فتالین انجام شد. هم‌چنین برای مشاهده بهتر الگوهای جریان در دبی‌های حجمی مختلف فازها در میکروکانال‌ها، مقدار کمی رنگ بنفش به فاز آبی اضافه شد.

۳- تعریف پارامترهای مربوطه

اساس استخراج مایع-مایع در این تحقیق، انتقال پروپیونیک اسید از فاز آبی به فاز آلی است. بازده استخراج، نسبت مقدار

این تحقیق، میکروکانال‌های T-شکل برای استخراج این اسید از آب با استفاده از حلال ۱-اکتانول به‌کار برده شدند. جایگزینی این روش پیوسته با روش‌های معمول ناپیوسته، نوآوری این تحقیق به‌شمار می‌رود. این روش به دلیل مزایایی مانند نسبت سطح به حجم بالا و مسیر نفوذ کوتاه (به علت سایز کوچک آن‌ها) باعث افزایش نرخ انتقال جرم بین دو فاز می‌شود و می‌تواند جایگزین حالت پیوسته برای سیستم‌های متداول پیشین باشد. بررسی تأثیر طول کانال اختلاط و دبی جریان به‌عنوان دو پارامتر مهم بر الگوهای جریان، مشخصه‌های انتقال جرم، افت فشار و نسبت عملکرد میکروکانال‌ها، موضوع اصلی در این تحقیق است. برای این منظور، چهار میکروکانال T-شکل با طول‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ cm به‌کار برده شد و آزمایش‌ها در دبی‌های جریان مختلف در محدوده ۱۶ - ۲ mL/min انجام شد.

۲- آزمایشگاهی

۲-۱- مواد

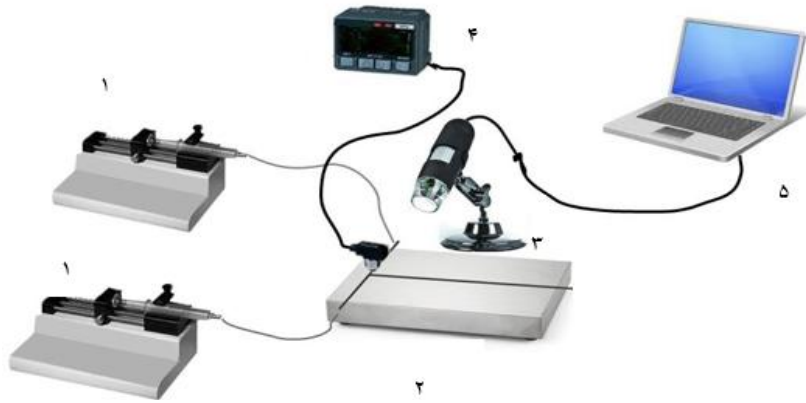
برای انجام فرآیند استخراج مایع-مایع درون میکروکانال، پروپیونیک اسید به‌عنوان جزء منتقل‌شونده از فاز آبی به فاز آلی و ۱-اکتانول به‌عنوان حلال آلی با خلوص بیشتر از ۹۹ درصد تهیه شدند. برای آماده‌سازی فاز آبی از آب مقطر استفاده شد. هم‌چنین برای آنالیز محلول خروجی از میکروکانال به‌وسیله تیتراسیون، از سدیم هیدروکسید و برای تعیین نقطه پایانی در تیتراسیون از شناساگر فنول فتالین با محدوده pH ۱۰ - ۸/۲ استفاده شد. همه‌ی مواد استفاده شده از شرکت مرک آلمان^۱ تهیه شدند. خواص فیزیکی فازهای آبی و آلی استفاده شده در آزمایش‌ها در جدول (۱) ارائه شده است.

۲-۲- دستگاه آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در چهار میکروکانال T-شکل با طول کانال‌های اختلاط مختلف ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ cm انجام شد. میکروکانال‌های با سطح مقطع دایره‌ای شکل به قطر ۰/۸ mm و طول کانال ورودی ۳ cm به‌کار برده شدند.

²-Sensor

¹-Merck company



شکل ۱- شماتیک دستگاه آزمایشگاهی: (۱) پمپ‌های سرنگی، (۲) میکروکانال، (۳) میکروسکوپ دیجیتال، (۴) حسگر فشار، (۵) لپ‌تاپ.

در این رابطه t_M زمان ماند^۱ مخلوط فازهای آبی و آلی در میکروکانال است و با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود: [۲۰، ۱۹]:

$$t_M = \frac{V}{Q_{org} + Q_{aq}} \quad (۳)$$

که در رابطه بالا V حجم کانال اختلاط میکروکانال است. به منظور بکارگیری یک طراحی اولیه، تعریف یک شاخص مناسب برای بررسی کارایی طرح می‌تواند مفید واقع شود. در این راستا، مقایسه بین عملکرد میکروکانال‌های با طول مختلف با استفاده از معیاری بنام نسبت عملکرد انجام شد. نسبت عملکرد با استفاده از بازده استخراج و ضریب اصطکاک بر اساس افزایش طول کانال به صورت زیر تعریف شده است [۲۱، ۲۲]:

$$\eta = (E / E_0) / (f / f_0)^{1/3} \quad (۴)$$

$$f = \frac{2\Delta P}{(L/D)\rho_M U_M^2} \quad (۵)$$

که E و f بازده استخراج و ضریب اصطکاک مربوط به میکروکانال‌های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ cm و E_0 و f_0 بازده استخراج و ضریب اصطکاک مربوط به میکروکانال ۱۰ cm (به عنوان میکروکانال مبنا) است. در رابطه (۵)، D قطر میکروکانال، L طول کانال اختلاط و ΔP افت فشار جریان در طول کانال اختلاط است. U_M و ρ_M نیز به ترتیب سرعت سطحی مخلوط فازهای آبی و آلی و دانسیته مخلوط هستند که با روابط زیر تعریف می‌شوند [۲۳، ۱۸]:

پروپیونیک اسید منتقل شده به بیشترین مقدار پروپیونیک اسید قابل انتقال است که می‌توان آن را به صورت رابطه زیر بیان کرد [۲۰، ۱۹]:

$$E = \frac{C_{aq,in} - C_{aq,out}}{C_{aq,in} - C_{aq}^*} \quad (۱)$$

که $C_{aq,out}$ و $C_{aq,in}$ غلظت‌های پروپیونیک اسید به ترتیب در فاز آبی ورودی و فاز آبی خروجی از میکروکانال هستند و C_{aq}^* غلظت تعادلی پروپیونیک اسید در فاز آبی است. برای اندازه‌گیری غلظت تعادلی پروپیونیک اسید، حجم‌های برابر از فازهای آبی و آلی در یک ظرف آزمایش ریخته شد و با استفاده از یک همزن مغناطیسی به مدت زمان ۴ ساعت همزده شد تا تعادل برقرار شود. سپس محلول حاصل به منظور جداسازی فازها به دکانتور منتقل گردید. پس از جداسازی فازها برای تعیین غلظت تعادلی پروپیونیک اسید در فاز آبی، تیتراسیون این محلول توسط محلول سدیم هیدروکسید ۰/۵ M در حضور شناساگر فنول فتالین انجام شد.

جهت ارزیابی نرخ انتقال جرم، ضریب انتقال جرم حجمی کل ($k_L a$) (که برای محاسبه آن باید حجم دستگاه مشخص باشد) تعریف شده است. ضریب انتقال جرم حجمی کل با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و معادله زیر قابل محاسبه است: [۲۰، ۱۹]:

$$k_L a = \frac{1}{t_M} \ln \left(\frac{C_{aq,in} - C_{aq}^*}{C_{aq,out} - C_{aq}^*} \right) \quad (۲)$$

^۱ Residence time

اسلاگ‌هایی محصور در فاز آلی جریان دارد. تغییر دبی از ۲ به ۵ mL/min باعث کاهش اندازه اسلاگ‌ها شده است که کوچک‌تر شدن اسلاگ‌ها باعث افزایش سطح تماس بین دو فاز می‌شود. در سرعت‌های پایین، کشش بین سطحی در مقایسه با نیروی اینرسی غالب بوده و نقش اصلی را در تشکیل جریان اسلاگ دارد.

با افزایش شدت جریان (۱۰ mL/min)، جریان موازی از طریق بهم‌پیوستن اسلاگ‌های با اندازه کوچک تشکیل شده است. در جریان موازی که در دبی‌های بالا ایجاد می‌شود فازهای آبی و آلی در کانال اختلاط در مجاورت هم جریان می‌یابند. در واقع افزایش سرعت جریان منجر به افزایش نیروی اینرسی شده است که بیانگر غالب بودن نیروی اینرسی بر نیروی کشش بین سطحی در جریان موازی می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۲) می‌توان مشاهده کرد در دبی‌های بالا (۱۰ و ۱۶ mL/min) تغییر طول میکروکانال اثری بر الگوی جریان نداشته و جریان همچنان موازی است. در دبی‌های پایین (۲ و ۵ mL/min) نیز با افزایش طول کانال از ۱۰ به ۴۰ cm، اندازه اسلاگ‌ها به میزان کمی افزایش یافته است.

۴-۲- مشخصه‌های انتقال جرم

۴-۲-۱- ضریب انتقال جرم

شکل (۳) اثر دبی جریان و طول کانال اختلاط بر ضریب انتقال جرم را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل در همه‌ی میکروکانال‌ها با افزایش دبی فازها، ضریب انتقال جرم افزایش می‌یابد. این بدان دلیل است که با افزایش دبی جریان، شدت آشفتگی بین سطحی فازها در میکروکانال افزایش می‌یابد؛ بنابراین مقاومت در مقابل انتقال جرم کاهش یافته و نرخ انتقال جرم از فاز آبی به فاز آلی بیشتر می‌شود. علاوه بر این، در جریان اسلاگ انتقال جرم بین فازها از طریق دو مکانیسم^۲ مختلف صورت می‌گیرد: (۱) انتقال جرم همرفتی^۳ مربوط به چرخش^۴ جریان در هر اسلاگ (۲) نفوذ مولکولی مربوط به گرادیان غلظت بین اسلاگ‌های مجاور [۸]. با افزایش دبی، علاوه بر افزایش شدت آشفتگی بین سطحی فازها، چرخش جریان در داخل اسلاگ‌ها هم زیاد می‌شود و در واقع دو عامل، همزمان به افزایش نرخ انتقال جرم کمک می‌کنند [۸].

$$U_M = \frac{Q_{aq} + Q_{org}}{A} \quad (6)$$

$$\rho_M = \left(\frac{x_{aq}}{\rho_{aq}} + \frac{1-x_{aq}}{\rho_{org}} \right)^{-1} \quad (7)$$

که x_{aq} کسر حجمی فاز آبی است و با رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۸]:

$$x_{aq} = \frac{Q_{aq}}{Q_{aq} + Q_{org}} \quad (8)$$

۴- نتایج و بحث

۴-۱- الگوهای جریان دو فازی مایع-مایع در میکروکانال‌ها

به‌منظور مشاهده الگوهای جریان در میکروکانال‌ها، عکس‌های واقعی از الگوهای جریان ایجاد شده در کانال اختلاط در شدت جریان‌های مختلف در میکروکانال گرفته شد. بزرگنمایی میکروسکوپ دیجیتالی در مقداری ثابت تنظیم گردید تا عکس برداری از رژیم جریان در شرایط یکسانی انجام شود. در این بخش برای مشاهده بهتر الگوهای جریان، مقدار کمی رنگ بنفش در فاز آبی حل شد. شکل (۲) تصاویر واقعی الگوهای جریان در کانال اختلاط میکروکانال‌ها را در شدت جریان‌های ۲، ۵، ۱۰، ۱۶ mL/min نشان می‌دهد. به دلیل مشابه بودن الگوهای جریان در میکروکانال‌های با طول مختلف، فقط تصاویر الگوهای جریان در میکروکانال با کمترین طول (۱۰ cm) و میکروکانال با بیشترین طول (۴۰ cm) در شکل (۲) نشان داده شده است.

برای دو سیال تراکم‌ناپذیر، الگوهای جریان وابسته به کشش بین سطحی، نیروی اینرسی و نیروی ویسکوز^۱ بوده که به دلیل اندازه کوچک میکروکانال‌ها، کشش بین سطحی و نیروی اینرسی تنش‌های غالب هستند [۲۴]. در واقع این دو تنش در حال رقابت با یکدیگر می‌باشند که باعث تغییر سطح مشترک دو فاز می‌شوند. با توجه به شکل (۲)، در دبی‌های پایین (۲ و ۵ mL/min)، جریان در میکروکانال‌ها به‌صورت اسلاگ است؛ چون در این دبی‌ها سرعت جریان پایین بوده و جریان اسلاگ نیز در سرعت‌های پایین تشکیل می‌شود. در این جریان، فاز آلی به‌عنوان فاز پیوسته است و فاز آبی به شکل

^۲-Mechanism

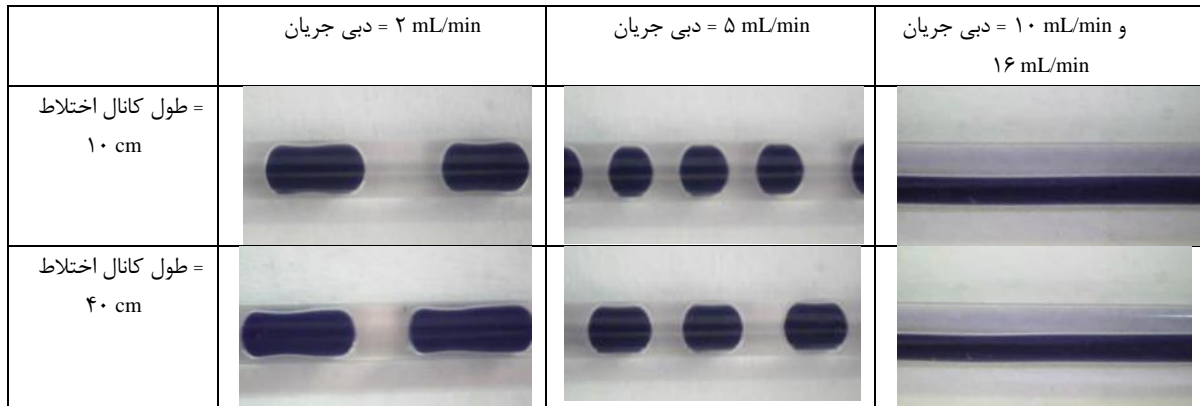
^۳-Convection

^۴-Circulation

^۱-Viscous force

میان ضرایب انتقال جرم در میکروکانال‌های با طول مختلف وجود دارد را می‌توان به تفاوت کمی که در اندازه اسلاگ‌ها و در نتیجه سطح تماس دو فاز وجود دارد، نسبت داد.

شکل (۳) نشان می‌دهد که در دبی‌های بالا (۱۰ و ۱۶ mL/min) تغییر طول میکروکانال‌ها اثر چندانی روی ضریب انتقال جرم نداشته است، چون همان‌طور که قبلاً گفته شد در این دبی‌ها با تغییر طول کانال اختلاط، الگوهای جریان تغییر نکرده‌اند. تفاوت اندکی که در دبی‌های پایین (۲ و ۵ mL/min)

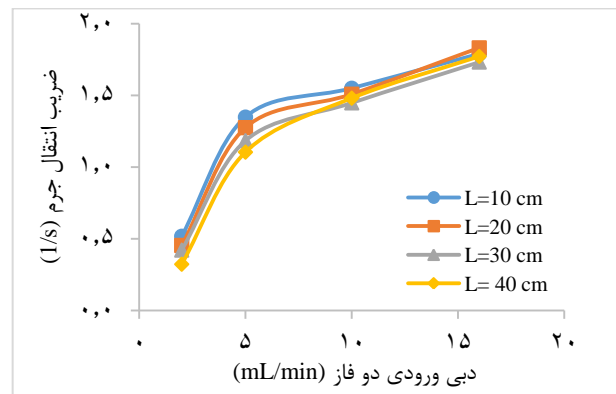


شکل ۲- اثر دبی جریان و طول کانال اختلاط بر الگوهای جریان تشکیل شده در میکروکانال.

بنابراین در جریان اسلاگ، افزایش ضریب انتقال جرم در مقایسه با کاهش زمان ماند اثر غالب بوده و منجر به افزایش بازده استخراج شده است. با افزایش بیشتر دبی و تشکیل جریان موازی (دبی ۱۰ mL/min و ۱۶ mL/min) بازده استخراج

کاهش یافته است؛ زیرا با وجود اینکه ضریب انتقال جرم بیشتر شده اما کاهش زمان ماند در مقایسه با افزایش ضریب انتقال جرم غالب بوده است.

شکل (۴) همچنین نشان می‌دهد که با افزایش طول میکروکانال، بازده استخراج افزایش می‌یابد. همان‌طور که قبلاً گفته شد، افزایش طول تأثیر اندکی بر ضریب انتقال جرم در میکروکانال دارد؛ بنابراین از آنجا که افزایش طول، زمان ماند سیال در میکروکانال را افزایش می‌دهد پس دو فاز زمان بیشتری برای انتقال جرم داشته و بازده استخراج افزایش می‌یابد.

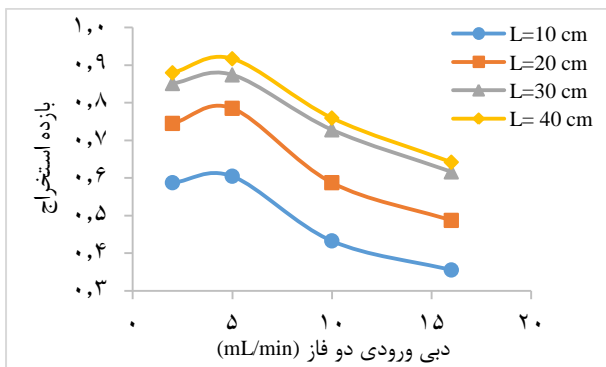


شکل ۳- اثر طول کانال بر ضریب انتقال جرم.

۴-۲-۲- بازده استخراج

شکل (۴) بازده استخراج پروپیونیک اسید از فاز آبی به فاز آلی بر حسب دبی جریان را در میکروکانال‌های مطالعه شده نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در همه‌ی میکروکانال‌ها بازده استخراج روند ثابتی با افزایش دبی جریان ندارد. در واقع با افزایش دبی، بازده استخراج ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. دلیل این امر وابستگی بازده استخراج به دو پارامتر ضریب انتقال جرم و زمان ماند سیال در میکروکانال است. با افزایش دبی، ضریب انتقال جرم افزایش و زمان ماند کاهش می‌یابد.

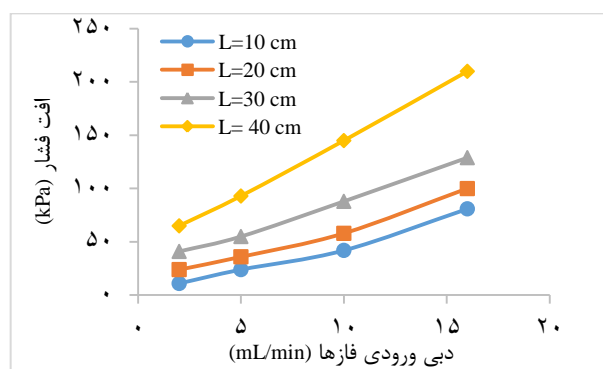
در دبی‌های پایین (۲ و ۵ mL/min) که جریان به صورت اسلاگ است، افزایش دبی باعث کاهش اندازه اسلاگ‌ها و بنابراین افزایش سطح تماس دو فاز می‌شود. همچنین با افزایش دبی، چرخش سیال در داخل اسلاگ‌ها نیز زیاد می‌شود؛



شکل ۴- اثر طول کانال بر بازده استخراج.

۴-۳- افت فشار

به‌طور کلی، افت فشار یک مسئله مهم در بررسی عملکرد میکروکانال‌ها است که منجر به مصرف انرژی بالایی در آن‌ها می‌شود. در طی انجام آزمایش‌ها، فشار در خروجی میکروکانال‌ها ثابت و برابر فشار اتمسفریک بود و افت فشار در طول میکروکانال با استفاده از حسگر فشار اندازه‌گیری شد. داده‌های افت فشار در میکروکانال‌های با طول‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ cm در دبی‌های حجمی مختلف در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵- افت فشار در میکروکانال‌های با طول‌های مختلف.

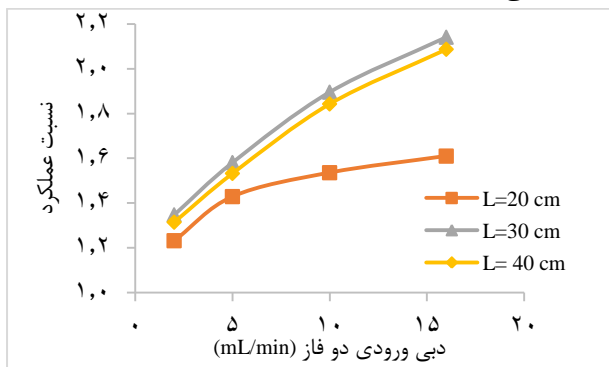
همان‌طور که در شکل (۵) می‌توان دید، در همه‌ی میکروکانال‌ها زمانی که دبی جریان افزایش می‌یابد افت فشار نیز زیاد می‌شود. در حقیقت افزایش دبی باعث افزایش سرعت سطحی سیال شده که در نتیجه آن افت فشار نیز زیاد می‌شود. همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد با افزایش طول میکروکانال، افت فشار نیز افزایش یافته است. در واقع با افزایش طول کانال، افت اصطکاکی در کانال اختلاط افزایش و سیال سخت‌تر جریان می‌یابد.

۴-۴- نسبت عملکرد

مقایسه بین عملکرد میکروکانال‌های با طول مختلف با استفاده از معیار نسبت عملکرد انجام شد. برای این منظور، میکروکانال با طول ۱۰ cm به‌عنوان مبنا در نظر گرفته شد و اثر افزایش طول نسبت به این میکروکانال مورد بررسی قرار گرفت. نسبت عملکرد مربوط به میکروکانال‌های با طول‌های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ cm در شدت جریان‌های مختلف در شکل (۶) نشان داده شده است.

مشاهده می‌شود که مقدار نسبت عملکرد برای این میکروکانال‌ها بزرگ‌تر از یک است. بدین معنا که میکروکانال‌های با طول‌های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ cm عملکرد بهتری

نسبت به میکروکانال با طول ۱۰ cm داشته‌اند. همچنین این شکل نشان می‌دهد که بهترین عملکرد مربوط به میکروکانال با طول ۳۰ cm است. با توجه به این امر نمی‌توان گفت که هرچه طول کانال اختلاط بیشتر شود میکروکانال عملکرد بهتری دارد؛ چون با افزایش طول کانال، افت فشار هم بیشتر می‌شود. به‌علاوه این شکل بیانگر افزایش نسبت عملکرد با افزایش دبی جریان است. این مسئله به دلیل نقش مؤثر افزایش



شکل ۶- اثر افزایش طول کانال بر نسبت عملکرد.

طول بر میزان استخراج در سرعت‌های بالای جریان است.

۵- جمع‌بندی

در این تحقیق، اثر شدت جریان و طول کانال اختلاط در میکروکانال‌های T-شکل بر الگوهای جریان، مشخصه‌های انتقال جرم و افت فشار بررسی شد. اثر شدت جریان کل بر تشکیل الگوهای جریان در دبی‌های ورودی برابر دو فاز مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به شدت جریان‌های اعمال شده، الگوهای جریان اسلاگ و موازی تشکیل شد. افزایش طول کانال اثر ناچیزی بر الگوهای جریان داشت و فقط در شدت جریان‌های پایین باعث تفاوت اندکی در اندازه اسلاگ‌ها شد؛ بنابراین ضرایب انتقال جرم در میکروکانال‌های مطالعه شده نیز تفاوت چندانی با یکدیگر نداشتند. نتایج نشان داد که بازده استخراج با افزایش طول کانال اختلاط بیشتر شده که البته افزایش طول با افت فشار بالاتری نیز همراه بوده است. علاوه بر این، معیار نسبت عملکرد با توجه به اهمیت رسیدن به انتقال جرم بالاتر و نیز صرفه‌جویی در مصرف انرژی تعریف و محاسبه شد. نسبت عملکرد با افزایش طول کانال اختلاط تا ۳۰ cm افزایش و پس از آن کاهش یافت که این به دلیل وجود افت اصطکاکی بالا در میکروکانال‌های با طول بلند است.

- [^۵] J. Tang, X. Zhang, W. Cai, and F. Wang (2013) "Liquid-liquid extraction based on droplet flow in a vertical microchannel", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 49, 185-192.
- [^۶] L. Zhang, F. Xie, S. Li, S. Yin, J. Peng, and S. Ju (2015) "Solvent extraction of Nd(III) in a Y type microchannel with 2-ethylhexyl phosphoric acid-2-ethylhexyl ester", *Green Processing and Synthesis*, 4.
- [^۷] M. N. Kashid, A. Gupta, A. Renken, and L. Kiwi-Minsker (2010) "Numbering-up and mass transfer studies of liquid-liquid two-phase microstructured reactors", *Chemical Engineering Journal*, 158, 233-240.
- [^۸] A.-L. Dessimoz, L. Cavin, A. Renken, and L. Kiwi-Minsker (2008) "Liquid-liquid two-phase flow patterns and mass transfer characteristics in rectangular glass microreactors", *Chemical Engineering Science*, 63, 4035-4044.
- [^۹] M. N. Kashid, A. Renken, and L. Kiwi-Minsker (2011) "Influence of Flow Regime on Mass Transfer in Different Types of Microchannels", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50, 6906-6914.
- [^{۱۰}] R. S. Boogar, R. Gheshlaghi, and M. A. Mahdavi (2013) "The effects of viscosity, surface tension, and flow rate on gasoil-water flow pattern in microchannels", *Korean Journal of Chemical Engineering*, 30, 45-49.
- [^{۱۱}] J. W. Coleman, and S. Garimella (1999) "Characterization of two-phase flow patterns in small diameter round and rectangular tubes", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42, 2869-2881.
- [^{۱۲}] P. Plouffe, D. M. Roberge, and A. Macchi (2014) "Liquid-liquid flow regimes and mass transfer in various micro-reactors", *Chemical Engineering Journal*, 300, 9-19.
- [^{۱۳}] A. Keshav, K. L. Wasewar, and S. Chand (2008) "Extraction of propionic acid using different extractants (tri-n-butylphosphate, tri-n-octylamine, and Aliquat 336)", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 47, 6192-6196.
- [^{۱۴}] Y. S. Aşçı, and İ. İnci (2009) "Extraction equilibria of propionic acid from aqueous solutions by Amberlite LA-2 in diluent solvents", *Chemical Engineering Journal*, 155, 784-788.
- [^{۱۵}] A. Keshav, K. L. Wasewar, and S. Chand (2008) "Extraction of propionic acid with tri-n-octyl amine in different diluents", *Separation and Purification Technology*, 63, 179-183.
- [^{۱۶}] H. Ghanadzadeh, A. Ghanadzadeh, M. Moein, S. Shekarsaraee, and Y. Jamshidi (2012) "Binodal curves and tie line data of the water-propionic acid-iso-butyl acetate at T=(298.2, 308.2, 318.2, and 328.2)K", *Thermochimica Acta*, 540, 116-122.
- [^{۱۷}] E. İnce, and Y. S. Aşçı (2014) "(Liquid+liquid) equilibria of the (water+carboxylic acid+dibasic esters mixture (DBE-2)) ternary systems", *Fluid Phase Equilibria*, 370, 19-23.
- [^{۱۸}] Y. Zhao, G. Chen, and Q. Yuan (2007) "Liquid-liquid two-phase mass transfer in the T-junction microchannels", *AIChE Journal*, 53, 3042-3053.
- [^{۱۹}] N. Assmann, and P. R. von Rohr (2011) "Extraction in microreactors: Intensification by adding an inert gas phase", *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 50, 822-827.

علائم اختصاری و نمادها

A	سطح مقطع میکروکانال (m ²)
a	سطح مشترک دو فاز (m ²)
C	غلظت پروپیونیک اسید (mol/Lit)
D _H	قطر هیدرولیکی میکروکانال (m)
E	بازده استخراج (بدون بعد)
f	ضریب اصطکاک (بدون بعد)
k _{LA}	ضریب انتقال جرم حجمی (1/s)
L	طول کانال (m)
ΔP	افت فشار (kPa)
Q	دبی حجمی (m ³ /s)
t _M	زمان ماند مخلوط دو فاز (s)
U _M	سرعت سطحی کلی دو فاز مایع امتزاج‌ناپذیر (m/s)
V	حجم کانال اختلاط (m ³)
x	کسر حجمی هر فاز (بدون بعد)

حروف یونانی

ρ	دانسیته (kg/m ³)
η	نسبت عملکرد (بدون بعد)

زیرنویس‌ها

aq	فاز آبی
in	ورودی
m	کانال اختلاط
M	مخلوط دو فاز مایع
org	فاز آلی
out	خروجی

مراجع

- [^۱] W. E. TeGrotenhuis, R. J. Cameron, M. G. Butcher, P. M. Martin, and R. S. Wegeng (1999) "Microchannel Devices for Efficient Contacting of Liquids in Solvent Extraction", *Separation Science and Technology*, 34, 951-974.
- [^۲] L. Yang, Y. Zhao, Y. Su, and G. Chen (2013) "An Experimental Study of Copper Extraction Characteristics in a T-Junction Microchannel", *Chemical Engineering & Technology*, 36, 985-992.
- [^۳] D. Das, S. Duraiswamy, Z. Yi, V. Chan, and C. Yang (2015) "Continuous Droplet-Based Liquid-Liquid Extraction of Phenol from Oil", *Separation Science and Technology*, 50, 1023-1029.
- [^۴] M. Sato, and M. Goto (2004) "Note: Gas Absorption in Water with Microchannel Devices", *Separation Science and Technology*, 39, 3163-3167.

- [۲۴] J. Jovanović, E. V. Rebrov, T. A. Nijhuis, M. T. Kreutzer, V. Hessel, and J. C. Schouten (2012) "Liquid-Liquid Flow in a Capillary Microreactor: Hydrodynamic Flow Patterns and Extraction Performance", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51, 1015-1026.
- [۲۰] D. Tsaoulidis, V. Dore, P. Angeli, N. V. Plechkova, and K. R. Seddon (2013) "Dioxouranium(VI) extraction in microchannels using ionic liquids," *Chemical Engineering Journal*, 227, 151-157.
- [۲۱] S. Eiamsa-Ard (2010) "Study on thermal and fluid flow characteristics in turbulent channel flows with multiple twisted tape vortex generators", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37, 644-651.
- [۲۲] M. Rahimi, S. R. Shabaniyan, and A. A. Alsairafi (2009) "Experimental and CFD studies on heat transfer and friction factor characteristics of a tube equipped with modified twisted tape inserts", *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 48, 762-770.
- [۲۳] Y. Su, Y. Zhao, G. Chen, and Q. Yuan (2010) "Liquid-liquid two-phase flow and mass transfer characteristics in packed microchannels", *Chemical Engineering Science*, 65, 3947-3956.

Extraction of propionic acid from water in T-shaped microchannels: effect of mixing channel length and flow rate

Fardin Hosseini Kakavandi¹, Masoud Rahimi^{1,*}, Maryam Baniamer²

1. CFD research center, Chemical Engineering Department, Razi University, Kermanshah, Ira

2. Catalyst Research Center, Chemical Engineering Department, Razi University, Kermanshah,

Iran

ABSTRACT

In this research, T- shaped microchannels have been utilized for extraction of propionic acid from water using 1-octanol solvent. Effects of mixing channel length and fluid flow rate on the mass transfer characteristics between two phases were investigated. Experiments were performed in four microchannels with lengths of 10, 20, 30 and 40 cm at flow rates between 2 and 16 mL/min. Effect of increasing channel length on the overall mass transfer coefficient, extraction efficiency and pressure drop was studied. Results showed that increasing mixing channel length enhances the mass transfer but it also increases the pressure drop in microchannels. In this regard, performance ratio criterion was defined which its value increased by increasing mixing channel length up to 30 cm and after that decreased. This research suggests that the use of continuous microfluidic systems for extraction of propionic acid from water can be a suitable replacement for conventional batch systems.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: December 20, 2016

Received in revised form: April 30, 2017

Accepted: September 7, 2017

Key words:

Microchannel

Extraction

Propionic acid

Channel length

Flow rate

All right reserved.

* Corresponding author

masoudrahimi@yahoo.com;

m.rahimi@razi.ac.ir
