

اثر شرایط عملیاتی بر راندمان استخراج مایع-مایع سرب در میکروکانال

مهناز یاسمی*

گروه مهندسی شیمی، واحد ایوان غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، ایوان غرب، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده



واژه‌های کلیدی:

میکروکانال، استخراج مایع-مایع، نانوذرات، گاز بی اثر، فراصوت، حذف سرب.

Keywords:

Microchannel,
Liquid-Liquid extraction,
Nanoparticles, Inert gas,
Ultrasonic, Lead removal.

دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۷

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۸

نوع مقاله: علمی - پژوهشی

سرب، فلز سنگینی است که به دلیل خواص منحصر به فردش در صنایع مختلف کاربرد گسترده‌ای دارد. با این حال یکی از سمی‌ترین عناصر شناخته شده برای انسان است. میکروکانال رویکردی نوین در استخراج مایع-مایع ارائه می‌دهد که در آن فرآیند انتقال جرم بسیار سریع، توان عملیاتی بالا و کنترل بهتر الگوی جریان را داریم. فرایندهای جداسازی به کمک میکروکانال در دو دهه گذشته به دلیل افزایش نسبت سطح به حجم، کاهش زمان استخراج، کاهش مصرف حلال و بهبود راندمان استخراج مورد توجه قرار گرفته است. در مطالعه حاضر، حذف سرب (II) از محلول آبی در یک میکرومیکسر با استفاده از حلال D2EHPA انجام شد. تأثیر زاویه برخورد میکروکانال (90° ، 135° ، 180°)، نسبت شدت جریان دو فاز (۰/۵، ۱ و ۲)، غلظت نانوذرات (۰/۰۱ w/v، ۰/۰۲، ۰/۰۳ و ۰/۰۴)، شدت جریان گازی اثر (۶۴، ۲ mL/min) و تابش امواج فراصوت و ترکیب آنها برای بهبود حذف سرب و افزایش میزان انتقال جرم بررسی شد. نتایج نشان داد که استفاده از گاز بی اثر، نانوذرات تحت میدان مغناطیسی و فراصوت میزان اختلاط و انتقال جرم را افزایش داد. راندمان حذف سرب (II) به ۹۶/۸۸٪ افزایش یافت.

مقدمه

بیشتر از سایر آلاینده‌ها مشهود است. فلز سنگین به هر عنصری با وزن اتمی بین ۶۳/۵ تا ۲۰۰/۶ و وزن مخصوص بیشتر از ۵ اشاره دارد. کادمیوم، روی، سرب، نیکل، آرسنیک، جیوه و کروم نمونه‌هایی از فلزات سنگین هستند که از فعالیت آبخاری فلزات، معدن کاری، باتری‌سازی، پالایش نفت و رنگ‌سازی سرچشمه می‌گیرند. با توجه به اثرات سمی و نامطلوب فلزات سنگین، به صنایع توصیه می‌شود که فاضلاب‌ها را به طور سیستماتیک تصفیه کنند تا محتوای فلز

آلودگی آب امروزه نگرانی بزرگی را ایجاد کرده، زیرا آب یک ضرورت اساسی در زندگی و توسعه صنایع مختلف است. آلاینده‌های مختلف و زباله‌های صنعتی به طور مداوم در فاضلاب تخلیه می‌شوند و به دلیل اثرات کشنده آنها، اکوسیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهند [۱]. در این میان آلودگی آب بوسیله فلزات سنگین، به ویژه هنگامی که فلزات سنگین در معرض اکوسیستم طبیعی قرار می‌گیرند

*E-mail: mahnaz.yasemi@iaui.ac.ir

*عهددار مکاتبات

مایع-مایع یا استخراج با حلال یکی از مهمترین و کارآمدترین روش‌های جداسازی است. به طور گسترده در فرآیندهای مختلف از جمله جداسازی فلزات، بازیابی ترکیبات زیستی مانند پروتئین‌ها، آنزیم‌ها و اسیدهای آمینه، بازیابی و خالص‌سازی مولکول‌های زیستی از آبگوشت تخمیر شده، تصفیه فاضلاب صنعتی و بازفرآوری سوخت هسته‌ای مصرف شده به کار می‌رود [۸]. تکنیک‌های استخراج با حلال به عنوان یک روش تحلیلی مؤثر، ساده، ارزان، سریع و انتخابی به طور گسترده برای جداسازی، خالص‌سازی و حذف یون‌های فلزی مختلف استفاده می‌شوند [۹]. این جداسازی بر اساس حلالیت ترکیبات مورد نظر در دو مایع غیر قابل امتزاج، یک فاز آبی و یک حلال آلی است. گزینش‌پذیری و کارایی فرآیندهای استخراج با حلال عمدتاً توسط استخراج‌کننده مورد استفاده کنترل می‌شود. انتخاب یک استخراج‌کننده مناسب امکان دستیابی به جداسازی گروهی یا جداسازی انتخابی عناصر کم با راندمان بالا را فراهم می‌کند. کاربرد لیگاندهای اسیدی مورد استفاده در استخراج با حلال فرصتی را برای تنظیم گزینش‌پذیری فرآیند با کنترل pH فاز آبی فراهم می‌کنند [۱۰]. با وجود پتانسیل تکنیک‌های استخراج با حلال برای استخراج و جداسازی یون‌های فلزی، به ویژه آنهایی که مبتنی بر کاربرد لیگاندهای اسیدی هستند، تحقیقات کمی در مورد استخراج یون‌های سرب توسط این عصاره‌گیرها وجود دارد [۱۱]. برای غلبه بر معایب تجهیزات مرسوم، می‌توان در استخراج مایع-مایع از فرآیندهایی با دستگاه‌های کوچک مقیاس مانند میکروکانال‌ها استفاده کرد. مطالعات نشان داده‌اند که در جریان‌های چند فاز در کانال‌های کوچک، اندازه حباب/قطره تشکیل شده کوچکتر و توزیع جریان باریکی شکل می‌گیرد. بنابراین می‌توان به سطوح مشترک بزرگ و انتقال جرم بیشتری دست یافت [۱۲]. در کانال‌های کوچک، نیروهای مشترک و ویسکوز بر گرانش غلبه می‌کنند. فواصل انتشار کوتاه به دلیل لایه‌های نازک و سطوح مشترک بزرگ باعث بهبود اختلاط می‌شود. تجهیزات استخراج مایع-مایع مانند ستون‌های مخلوط‌کن، رسوب‌گر، ستون‌های پر شده، اسپری، پالسی و دیسکی چرخان، معایب زیادی مانند حجم زیاد حلال، استخراج چند مرحله‌ای و زمان طولانی دارند [۱۳]. علاوه بر این سطح مشترک مربوط به اندازه قطره در تجهیزات مرسوم، به راحتی قابل کنترل نیست و توزیع اندازه قطره اغلب گسترده است و منجر به طیف وسیعی از زمان‌های مورد نیاز و نرخ‌های استخراج متفاوت می‌شود. نرخ استخراج با کاهش اندازه قطره افزایش می‌یابد زیرا سطح مشترک افزایش می‌یابد. با این حال، با کاهش بیشتر اندازه قطره، میزان استخراج کم می‌شود زیرا قطرات کوچک مانند کره‌های سفت و سخت رفتار می‌کنند که در آن نفوذ مولکولی و انتقال جرم را کاهش می‌دهد [۱۴]. ژائو^۱ و همکاران [۱۵] ویژگی‌های انتقال جرم جریان دو فاز مایع-مایع

در فاضلاب‌ها به حداقل برسد [۲]. روش‌های مرسوم مختلفی مانند رسوب شیمیایی، تبادل یونی، فیلتراسیون و تصفیه الکتروشیمیایی برای حذف فلزات سنگین به کار گرفته شده است. اکثر این روش‌ها فقط برای تصفیه در مقیاس بزرگ مناسب هستند و هزینه بالایی برای اجرا داشته و معایبی مانند حذف ناقص فلزات سنگین، نیاز به انرژی بالا و تولید لجن سمی می‌کنند [۳]. سرب بیش از ۵۰۰۰ سال است که توسط بشر مورد استفاده قرار گرفته است. نقش آن در صنایع مختلف مانند کود، کاغذ، آفت‌کش‌ها، باتری‌های قابل شارژ بزرگ، رنگدانه‌ها، محصولات نورد شده و اکستروود شده، غلاف کابل، آلیاژها، ساچمه و مهمات، ورق‌های تابشی و تثبیت‌کننده‌ها اهمیت اقتصادی سرب و آلیاژهای سرب را نشان می‌دهد [۴]. در کنار این نقش‌های صنعتی، سرب به عنوان یک فلز سنگین سمی شناخته شده است. این فلز یک خطر عمده زیست‌محیطی و عمومی، به ویژه برای نوزادان و کودکان دارد. تجمع سرب در اندام‌های حیاتی انسان و حیوانات باعث آسیب شدید خونی، آسیب مغزی و عصبی مرکزی، آسیب به عملکرد تولید مثل، اختلال عملکرد کلیه، سقط جنین، علائم کم‌خونی و ضعف عضلانی می‌شود. به دلیل کاربرد گسترده سرب و عوارض جانبی تأثیرگذار بر محیط زیست و موجودات زنده، تعیین، حذف و بازیابی [۵-۷] این فلز از پساب‌های صنعتی، جزء موضوعات مهم در مطالعات مختلف صنعتی و زیست‌محیطی است. فلزات سنگین در خاک نشأت گرفته از فاضلاب صنعتی، ذوب فلزات و بازیافت زباله‌های الکترونیکی هستند که بر زنجیره غذایی تأثیر می‌گذارد. بنابراین، آب آلوده به سرب قبل از تخلیه به جریان‌های آبی باید تصفیه شود. تکنیک‌های جداسازی مبتنی بر غشای پلیمری در شش دهه گذشته به طور قابل توجهی بر فرآیندهای تصفیه پساب مبتنی بر فلز تأثیر گذاشته‌اند. در فرآیند رزین تبادل یونی، یک رزین پلیمری به عنوان واسطه عمل می‌کند و تبادل یون‌ها را با آنیون‌ها یا کاتیون‌ها در محلول آبی تسهیل می‌کند. این رزین‌های تبادل یونی که از پلیمرهای به هم پیوسته آغشته به اجزای ساختاری اسیدی یا بازی ساخته شده‌اند، تبادل آنیون‌ها یا کاتیون‌ها را پس از تعامل با محلول تسهیل می‌کنند. آن‌ها قابلیت اتصال به کاتیون‌های تک ظرفیتی و دو ظرفیتی مختلف را دارند. رزین‌های تبادل کاتیونی بر اساس کاتیون خاص (هیدروژن، آمونیوم، سدیم، پتاسیم و کلسیم) که در طول ستر رزین برای اشباع گروه‌های سولفونیک یا کربوکسیلیک استفاده می‌شود، طبقه‌بندی می‌شوند. انعقاد الکتریکی یکی دیگر از روش‌های بسیار مؤثر در حذف یون‌ها و فلزات سنگین موجود در آب و پساب‌ها است. البته این روش گران بوده و اجرای آن در محیط‌های بزرگ خیلی سخت و زمان‌بر است. در حالت کلی هر یک از روش‌های بالا دارای مزایا و معایبی هستند. به همین دلیل لازم است بر اساس شرایط محیطی، اقتصادی، مقدار آب و دما روش مناسب انتخاب شود. استخراج

(۱) Zhao

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. لو^۵ و همکاران [۲۳]، 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 [۲۴]. سیگ^۶ و همکاران عملکرد سه میکروکانال مختلف و استخراج کننده‌های مرحله‌ی معمولی را برای استخراج مایع-مایع با استفاده از سیستم آب-سوکسینیک اسید و n-بوتانول به عنوان یک سیستم فاز استاندارد مقایسه کردند. در میکروکانال اختلاط به دلیل کارکرد در جریان‌های کم رینولدز، یکی از روش‌های کارآمد برای افزایش اختلاط و سرعت انتقال جرم در این دستگاه‌ها است [۲۵]. تلاش برای یافتن روشی کم‌هزینه و کارآمد برای حذف یون‌های سرب از محیط‌های آبی قطعاً ضروری است. استخراج با حلال یکی از تکنیک‌های مؤثری است که به طور فزاینده‌ای در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته و در بازیابی و جداسازی یون‌های فلزی مانند سرب از محلول‌های آبی استفاده می‌شود [۲۶]. در استخراج کننده‌های مایع-مایع سایز بزرگ، مقدار زیادی حلال لازم بوده و اختلاط چندان مؤثر نیست. بنابراین راندمان استخراج پایین است. علاوه بر اندازه بزرگ، فرآیندهای مرسوم زمان‌بر و گران هستند. استفاده از دستگاه‌های با سایز کوچک ابزارهای مناسبی برای بهبود کارایی فرآیندهای استخراج و در حال تبدیل شدن به روش‌های کارآمد برای انتقال جرم هستند [۲۷]. در این مقاله، هدف اصلی بررسی فرآیند حذف سرب به روش استخراج مایع-مایع از فاز آبی به فاز آلی در یک میکرومیکسر است. شرایط مختلف عملیاتی مانند تغییر زاویه میکروکانال، اثر اولتراسوند، اثر میدان مغناطیسی، اثر غلظت نانوذره، دبی گاز، نسبت شدن جریان فاز آبی و آلی بر روی راندمان استخراج سرب بررسی شده است. لازم به ذکر است جهت جلوگیری از اشتباه و اطمینان از نتایج هر آزمایش ۳ بار تکرار شد.

بخش تجربی

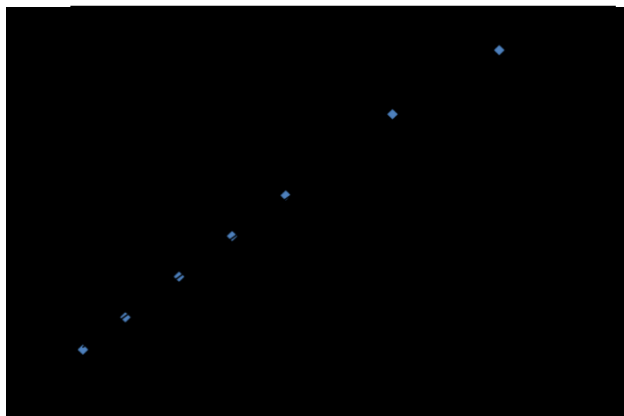
مواد و تجهیزات

در این تحقیق از نمک نیترات سرب^۷ (مرک آلمان با خلوص $\leq 99\%$)، دی-۲-اتیل هگزیل فسفریک اسید^۸ (D2EHPA) (مرک آلمان با خلوص $\leq 99\%$)، نانوذرات Fe_3O_4 (از شرکت US NANO با خلوص $\leq 99/5\%$)، نفت سفید به عنوان رقیق کننده و آب دیونیزه شده استفاده شد. غلظت اولیه سرب در محلول آبی ۲۰۰ ppm و pH بهینه برابر با ۵ بود. محلول سرب از انحلال نمک نیترات سرب (II) تهیه گردید.

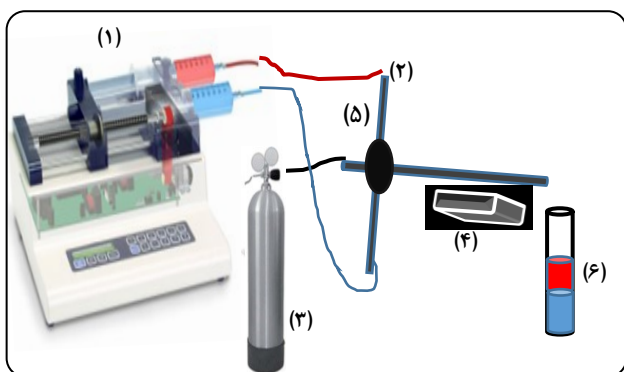
امتزاج‌ناپذیر را در میکروکانال‌های T شکل مطالعه کردند. مشخص شد که ضرایب کلی انتقال جرم حجمی میکروکانال‌ها دو یا سه مرتبه بزرگتر از کنتاکتورهای مایع-مایع معمولی بودند. جهاندار^۱ و همکاران [۱۶] عملکرد انتقال جرم دو سیال امتزاج‌ناپذیر را در میکروکانال‌های شیشه‌ای با اتصال Y و T شکل بررسی کردند. کشید^۲ و همکاران [۱۷] ویژگی‌های انتقال جرم سیستم‌های گاز-مایع و مایع-مایع را در راکتورهای ریزساختار خلاصه کردند. جوادی/افضل^۳ و همکاران [۱۸] از یک گاز بی اثر برای شکستن جریان موازی در میکروکانال و دستیابی به ضرایب انتقال جرم مایع-مایع بسیار بالاتر در مقایسه با حالت بدون گاز بی اثر استفاده کردند در حالی که این فرآیند توسط نانوذرات Fe_3O_4 تحت میدان مغناطیسی تشدید شده بود. مشخص شد که ضریب انتقال جرم و راندمان استخراج افزایش یافته است. فناوری استخراج میکروفلوئیدیک در زمینه‌های پزشکی، زیست‌شناسی، شیمی و آزمایش‌های تحلیلی توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۱۹]. کارایی این سیستم‌ها بدلیل بزرگ بودن نسبت سطح به حجم، فاصله انتشار کوتاه‌تر، پردازش ایمن‌تر، عدم امولسیون‌سازی یا تشکیل فاز سوم به دلیل حالت جریان آرام توسط تحقیقات متعدد تأیید شده است. میکروکانال‌ها یک جایگزین مناسب برای سیستم‌های متداول انتقال جرم و انتقال حرارت هستند که باعث افزایش انتقال جرم و نرخ انتقال حرارت در زمان‌های ماند پایین می‌شوند. راندمان حدود دو یا سه مرتبه بالاتر از سیستم‌های انتقال جرم معمولی است. علاوه بر این افزایش مقیاس میکروکانال‌ها آسان بوده که با موازی قرار دادن آنها فراهم می‌شود. از معایب میکروکانال‌ها می‌توان به مواردی همچون افت فشار بالا، عدم قابلیت انتقال خوراک شامل ذرات جامد و امکان انسداد کانال اشاره کرد. با این حال، استفاده از میکروکانال‌ها در عملیات استخراج مایع-مایع بسیار مؤثر و کارآمد است [۲۰]. 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 می‌شود. الگوهای جریان رایج در جریان دو فازی مایع-مایع به صورت اسلاگ، قطره‌ای، موازی و حلقوی هستند. 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 [۲۱]. در این میان تانگ^۴ و همکاران [۲۲] الگوهای جریان دو فازی و استخراج مایع-مایع را در میکروکانال‌های عمودی بررسی کردند. در این میکروکانال‌ها، جریان موازی و قطره‌ای

(۱) Jahandar
(۲) Javaid Afzal
(۳) Liu
(۴) Pb(NO₃)₂

(۲) Kashid
(۴) Tang
(۶) Sing
(۸) Di-2-ethylhexyl phosphoric acid



شکل ۱ - منحنی کالیبراسیون سرب



شکل ۲ - شماتیک دستگاه آزمایشگاهی: (۱) پمپ سرنگی، (۲) میکروکانال، (۳) کیسول هوا (۴) آهن ربا (۵) پیزوالکتریک دیسکی (۶) ظرف جمع‌آوری نمونه

تهیه سیال نانومغناطیسی تثبیت شده یک ساعت طول کشید. اگرچه پس از گذشت یک روز نانو سوسپانسیون پایدار بود و هیچ رسوب قابل توجهی نشان نداد اما برای جلوگیری از رسوب احتمالی، برای هر آزمایش یک سوسپانسیون جدید تهیه و بلافاصله استفاده شد.

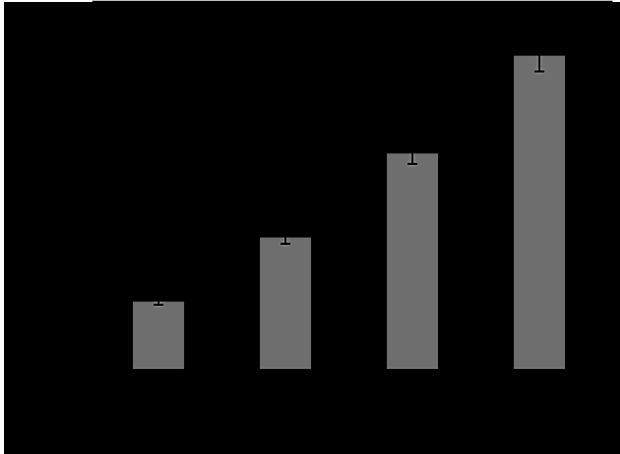
pH بهینه

pH از جمله عوامل مهم و تأثیر گذار بر جداسازی سرب با حلال D2EHPA است. نتایج بررسی pH در شکل ۳ آورده شده است. پایین بودن راندمان استخراج در pH های زیر ۵ می‌تواند بدلیل رقابت یون‌های H^+ با کاتیون سرب در برهمکنش و انتقال به حلال باشد. همچنین، سرب ممکن است به صورت کاتیون‌های هیدراته در فاز آبی باقی بماند. راندمان استخراج در pH بالاتر از ۵ بصورت نزولی است زیرا یون‌های هیدروکسید نیز می‌توانند با سرب واکنش داده و ترکیبات نامحلولی مثل $Pb(OH)_2$ تشکیل دهند. این ترکیبات به راحتی با D2EHPA جدا نمی‌شوند و در نتیجه استخراج سرب روند کاهشی دارد. بر اساس نتایج به دست آمده، $pH = 5$ به عنوان مقدار بهینه انتخاب شد. واکنش نمک نیترات سرب با دی-۲-اتیل هگزیل فسفریک اسید (D2EHPA) یک واکنش استخراج فلز است که طی آن یون سرب II از فاز آبی به فاز آلی حاوی D2EHPA منتقل می‌شود.

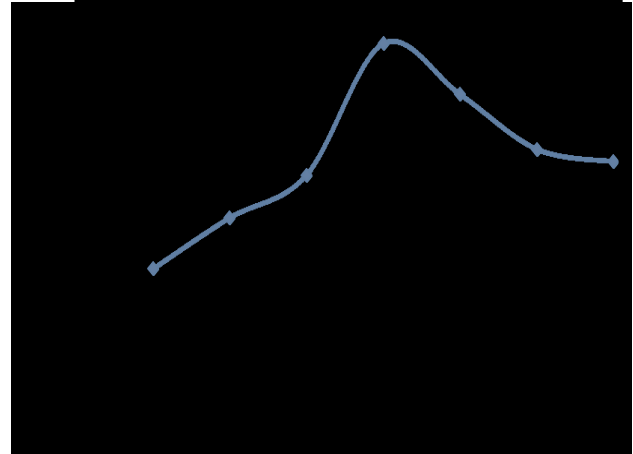
برای جلوگیری از اثر تداخلی آلودگی های فلزی و دقت آزمایش تمام ظروف به کار رفته با HNO_3 نیم نرمال و آب دو بار تقطیر شسته شدند. pH هر محلول به وسیله اسید نیتریک ۰/۲ نرمال و سود با غلظت ۰/۲ نرمال تنظیم گردید. سپس از محلول مادر غلظت‌های استاندارد در محدوده مورد نظر فراهم گردید. پس از تزریق به دستگاه جذب اتمی منحنی کالیبراسیون سرب (شکل ۱) با ضریب همبستگی مناسب به دست آمد. جهت اندازه گیری غلظت فلزات از دستگاه جذب اتمی مجهز به شعله مدل NOVA A350 استفاده شد. یون‌های سرب از فاز آبی توسط D2EHPA به عنوان حلال استخراج شده‌اند. برای ارزیابی راندمان استخراج سرب، اثر پارامترهایی مانند شدت جریان فاز آبی در محدوده ۲-۶ mL/min، دبی گاز بی اثر ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ mL/min و زاویه برخورد در میکروکانال 45° ، 90° ، 135° ، 180° ، اثر غلظت نانوذرات مغناطیسی (w/v) ۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۳ و ۰/۰۴ و اثر اولتراسوند بررسی شد. جداسازی فازهای آبی و آلی در خروجی میکروکانال با استفاده از کیف جداکننده و در دمای اتاق بود. پس از جداسازی فازها، غلظت سرب (II) در نمونه‌های فاز آبی با استفاده از طیف‌سنجی جذب اتمی تعیین شد. برای تهیه فاز آلی، ۱۵٪ (v/v) از D2EHPA در نفت سفید به عنوان رقیق کننده حل شد. میکرومیکسر مورد استفاده شامل یک کانال با قطر $800 \mu m$ و طول ۷۰ mm در محل اتصال بود که توسط یک پیزوالکتریک دیسکی سرامیکی با قطر ۱۰ mm و فرکانس ۲ مگاهرتز به عنوان یک ساطع کننده فراصوت عمل می‌کند. کنترل دبی جریان‌های سیال با استفاده از شیرهای تعبیه شده در پمپ سرنگی انجام گرفت. هوا در کانال میانی و جریان‌های آبی و آلی از ورودی‌های متفاوت جریان یافت. دو پمپ سرنگی به عنوان نیروی محرکه لازم جهت پیش بردن فازهای آلی و آبی استفاده شد که به طور مداوم کار می‌کرد. فازها در محل اتصال و در امتداد کانال اختلاط با هم تماس داشته، سپس محلول از خروجی با یک لوله آزمایش جمع‌آوری شد. نانوذرات Fe_3O_4 با قرار دادن مسیر اختلاط در یک میدان مغناطیسی ساکن به قدرت ۱۱۰۰ گاوس و به فاصله ۵ میلی‌متر در سمت ورودی فاز آبی قرار داشت، برانگیخته شدند (شکل ۲). نانوذرات به سمت آهن ربا منحرف شده که خود منجر به اختلاط مؤثرتری در مسیر کانال شده و نهایتاً میزان انتقال جرم و درصد استخراج را افزایش می‌دهد.

نانوذرات مغناطیسی

به منظور تهیه سوسپانسیون غلظت‌های مختلف (w/v) ۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۳ و ۰/۰۴ از نانوذرات Fe_3O_4 در فاز آلی پراکنده شد. برای جلوگیری از ته‌نشینی نانوذرات، نانو سوسپانسیون تهیه شده با همزن فراصوت (Hielscher Germany) همگن شد. نمونه با فرکانس ۲۴ کیلوهرتز و توان اسمی ۴۰۰ وات سونیکاسیون شد. دما در طول سونیکاسیون با حمام خنک کننده آب-یخ کنترل شد.



شکل ۴- اثر زاویه برخورد میکروکانال بر استخراج سرب (دبی گاز بی اثر ۲ mL/min، نسبت شدت جریان فازآبی به فاز آلی برابر با یک، دمای محیط، غلظت اولیه سرب ۲۰۰ ppm، pH=۵)



شکل ۳- اثر pH بر استخراج سرب (دبی گاز بی اثر ۲ mL/min، نسبت شدت جریان فازآبی به فاز آلی برابر با یک، دمای محیط، غلظت اولیه سرب ۲۰۰ ppm، زاویه میکروکانال ۱۸۰°)

نتایج

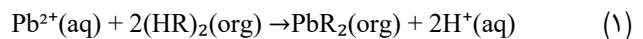
بهینه سازی زاویه برخورد میکروکانال

زاویه برخورد تأثیر بسزایی در اختلاط دو فاز آبی و آلی دارد. میکروکانال با زاویه‌های ۴۵°، ۹۰°، ۱۳۵°، ۱۸۰° مورد آزمایش قرار گرفت. شرایط انجام آزمایش دمای محیط، دبی گاز بی اثر ۲ mL/min و نسبت شدت جریان فازآبی به فاز آلی برابر با یک در نظر گرفته شد. شکل ۴ نشان می‌دهد میکروکانال با زاویه ۱۸۰° (میکروکانال T شکل) بیشترین راندمان استخراج را می‌دهد. زیرا در میکروکانال T شکل جریان اسلاگ بین فاز آبی و آلی با حضور گاز بی اثر شکسته شده و قطرات کوچکتری از فاز آبی در فاز آلی پراکنده می‌شوند. این قطرات کوچک نسبت سطح به حجم بالایی دارند و می‌توانند سطح مشترک بین فازهای آبی و آلی را افزایش دهند که تأثیر مثبتی بر انتقال جرم دارد. در حالیکه در زوایای کمتر از ۱۸۰° درجه جریان بیشتر حالت موازی داشته که با حضور گاز بی اثر تبدیل به اسلاگ شده و سطح انتقال جرم به اندازه حالت قطره‌ای افزایش نمی‌یابد.

بهینه‌سازی نسبت شدت جریان‌های فاز آبی و فاز آلی

نسبت شدت جریان‌های فازآبی و آلی یکی از پارامترهای مؤثر در استخراج می‌باشد. بنابراین به منظور بررسی این اثر، نسبت‌های سرعت جریان فاز آبی به حلال مقادیر ۰/۵، ۱ و ۲ انتخاب شد. با توجه به نتایج بدست آمده همانطوریکه از شکل ۵ مشخص است از نسبت شدت جریان ۰/۵ تا ۱ میزان راندمان افزایش یافته است علاوه بر آن حجم حلال مصرفی نیز کمتر شده است. با توجه به مقیاس فرآیند و اینکه استخراج زمانی آغاز می‌شود که دو سیال در تماس با هم قرار می‌گیرند محل تماس دو سیال اثر بسیار زیادی بر بازده استخراج دارد بنابراین افزایش بازده در نسبت شدت جریان ۱ را می‌توان به برخورد مؤثر در محل تقاطع میکروکانال نسبت داد.

دی-۲-اتیل هگزیل فسفریک اسید یک اسید ضعیف است و در حضور یون‌های سرب، یک کمپلکس فلزی تشکیل می‌دهد. این کمپلکس فلزی (Pb-D2EHPA) در فاز آلی محلول است در حالی که یون‌های نیترات در فاز آبی باقی می‌مانند. به طور خلاصه، واکنش به شکل زیر است:



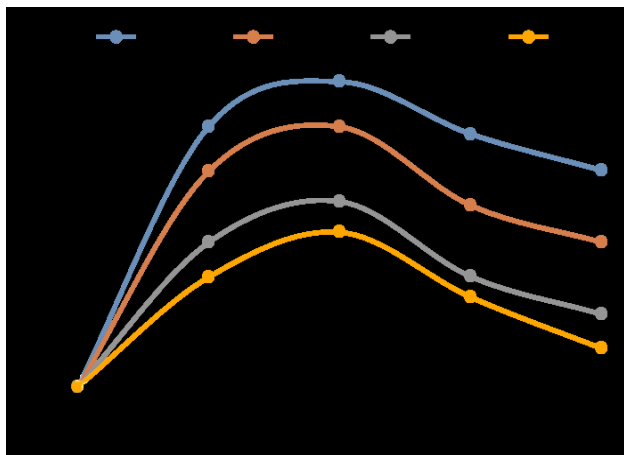
که در این واکنش $\text{Pb}^{2+}(\text{aq})$ یون سرب در فاز آبی، $(\text{HR})_2$ فرم دی-۲-اتیل هگزیل فسفریک اسید در فاز آلی، PbR_2 کمپلکس سرب با حلال و $\text{H}^+(\text{aq})$ یون هیدروژن در فاز آبی می‌باشند.

تعریف راندمان استخراج

در فرآیند انتقال جرم مایع-مایع، سرب (II) از فاز آبی به فاز آلی منتقل شد. فاز آبی و آلی دو فاز غیرقابل امتزاج هستند. راندمان استخراج سرب از معادله ۲ محاسبه می‌شود [۲۴]:

$$E = \frac{C_{aq, out} - C_{aq, in}}{C_{aq, out}^* - C_{aq, in}} \quad (2)$$

$C_{aq, out}$ و $C_{aq, in}$ به ترتیب غلظت سرب در ورودی و خروجی فاز آبی و $C_{aq, out}^*$ غلظت تعادلی سرب در فاز آبی است. از آنجایی که غلظت اولیه سرب در فاز آبی و همچنین مقدار حلال در فاز آلی در تمام آزمایش‌ها ثابت است، برای به دست آوردن مقدار $C_{aq, out}$ ، حجم‌های مساوی از دو فاز در یک ظرف در بسته مجهز به همزن ریخته شده و اختلاط انجام شد. در طول اختلاط غلظت سرب در فاز آبی چندین بار اندازه‌گیری و هنگامی که غلظت سرب تقریباً ثابت ماند، غلظت تعادلی اندازه‌گیری شد.

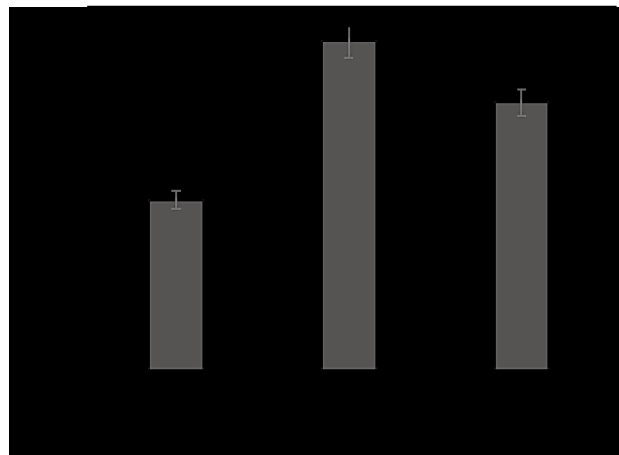


شکل ۶ - مقایسه میزان استخراج در دبی‌های مختلف گاز بی اثر و حالت بدون گاز بی اثر (نسبت شدت جریان فاز آبی به فاز آلی برابر با یک، دمای محیط، $pH=5$ ، غلظت اولیه سرب 200 ppm ، زاویه میکروکانال 180°)

طوری که زمان کافی برای انتقال یون‌های سرب به فاز دیگر و رسیدن به حالت تعادل به دست نمی‌آید و در نتیجه راندمان استخراج افزایش می‌یابد. افزودن گاز بی اثر به طور کلی میزان انتقال جرم را در مقایسه با حالتی بدون گاز بی اثر افزایش می‌دهد. در واقع با افزودن گاز بی اثر، تکه‌های بزرگی که قبل از تزریق گاز به سیستم تشکیل شده بودند، شکسته شده قطرات کوچکتری ایجاد و اختلاط مؤثرتری را بین فازهای آبی و آلی برقرار می‌کند.

اثر افزودن نانوذره Fe_3O_4 بر راندمان استخراج

در این بخش اثر غلظت‌های مختلف نانوذره (w/v) 0.1 ، 0.2 ، 0.3 و 0.4 بر راندمان مورد بررسی قرار گرفته است. برخورد مؤثر بین فازها با حرکت نانوذرات به سمت میدان مغناطیسی باعث می‌شود فاز آلی به فاز آبی کشیده شده و امکان برخورد بین دو فاز تنها به فصل مشترک محدود نشود. نتایج در شکل ۷ نشان داده که حضور نانوذرات مغناطیسی در فاز آلی و اعمال میدان مغناطیسی، اثر مثبت بر اختلاط فازهای غیر قابل امتزاج آبی و آلی دارد. با افزایش غلظت نانوذرات تا یک غلظت خاص، قطرات فاز آلی ریزتر شده و به همین دلیل سطح تماس دو فاز و در نتیجه ضریب انتقال جرم افزایش می‌یابد. اما با رسیدن غلظت نانوذرات به 0.4 دیگر با افزایش غلظت نانوذرات، قطرات فاز آلی ریزتر نشده زیرا میزان نانوذرات تجمع یافته در جداره میکروکانال افزایش می‌یابد که نانوذرات تجمع یافته مانند سد، بخشی از فضای میکروکانال را هر چند ناچیز، اشغال می‌کنند. این مانع با افزایش غلظت نانوذرات اثرش بیشتر مشخص شده و در شدت جریان ثابت فازهای آبی و آبی، منجر به کاهش سطح مقطع میکروکانال و در نتیجه کاهش زمان اقامت فازهای جاری و نهایتاً کاهش میزان انتقال جرم و راندمان استخراج می‌شود.

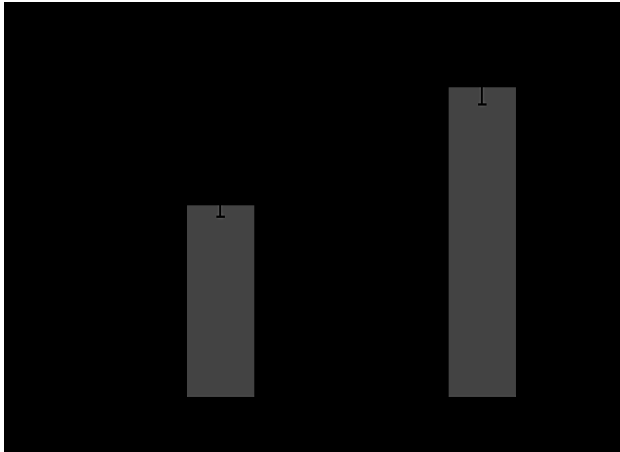


شکل ۵ - اثر نسبت‌های شدت جریان فاز آبی به فاز آلی (دبی گاز بی اثر 2 mL/min ، دمای محیط، $pH=5$ ، غلظت اولیه سرب 200 ppm ، زاویه میکروکانال 180°)

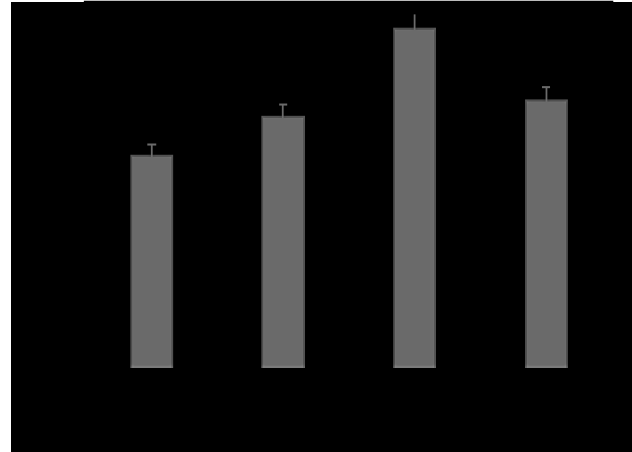
هنگامی که سرعت جریان‌ها برابر باشد دو فاز آلی و آبی دقیقاً در محل تقاطع کانال با یکدیگر برخورد می‌کنند اما افزایش شدت جریان فاز آبی باعث می‌شود فاز آبی وارد کانال و مسیر فاز آلی شده و آن را پس بزند و نقطه اختلاط جابجا شده و راندمان کم شود. از سوی دیگر مشاهده رفتار کاهش شدیدی بازده در نسبت جریان‌های بیشتر از ۱ تأییدی بر صحت این فرضیه است. این کاهش شدید ناشی از وجود دو عامل کاهنده راندمان یعنی کاهش حلال استخراج از یک سو و مکان نامناسب آغاز اختلاط از سوی دیگر است. بنابراین با توجه به نتایج بدست آمده نسبت جریان‌های برابر، به عنوان مقدار بهینه در نظر گرفته شد.

تأثیر شدت جریان گاز بی اثر

گاز بی اثر باعث ایجاد حباب‌هایی در فاز آبی شده که شکسته و به صورت قطرات کوچکتر در فاز آلی پراکنده می‌شوند. این قطرات کوچک نسبت سطح به حجم بیشتری ایجاد کرده و می‌توانند سطح مشترک و سطح تبادل جرم بین فازهای آبی و آلی را افزایش دهند. فاز آبی، فاز آلی و گاز بی اثر رژیم‌های جریان سه فاز را در میکروکانال‌ها ایجاد می‌کنند. با افزایش سرعت گاز، فاز آبی به قطرات ریزتر تبدیل و در کل میکروکانال پراکنده می‌شود. با افزایش نسبت شدت جریان فاز آبی و فاز آلی، قطرات به هم می‌چسبند و دو فاز به صورت موازی با هم حرکت می‌کنند. اگر سرعت جریان گاز بیشتر افزایش یابد در حالی که دو فاز دیگر دارای دبی بالایی هستند، اختلاط بین فازها آنقدر زیاد می‌شود که تشخیص فازها دشوار است. شکل ۶ اثر مقادیر 2 ، 4 و 6 mL/min دبی گاز بی اثر را نشان می‌دهد. با افزایش سرعت جریان گاز بی اثر، نیروی محرکه انتقال جرم برای انتقال یون‌های سرب به فاز آلی افزایش و راندمان استخراج صعودی شد. به عبارتی زمان ماند دو فاز مایع در کانال اختلاط کاهش،



شکل ۸ - اثر اولتراسوند بر راندمان استخراج سرب (دبی گاز بی اثر ۶ mL/min، نسبت شدت جریان برابر با یک، دمای محیط، pH=۵، غلظت اولیه سرب ۲۰۰ ppm، زاویه میکروکانال ۱۸۰°)



شکل ۷ - اثر غلظت‌های مختلف نانوذره بر راندمان استخراج (دبی گاز بی اثر ۶ mL/min، نسبت شدت جریان برابر با یک، دمای محیط، pH=۵، غلظت اولیه سرب ۲۰۰ ppm، زاویه میکروکانال ۱۸۰°)

جدول ۱ - مقایسه میزان غلظت باقی مانده سرب با حضور نانوذره، گاز بی اثر و فراصوت

روش جداسازی سرب	غلظت اولیه سرب (ppm)	غلظت باقی مانده سرب (ppm)
میکروکانال ساده	۲۰۰	۳۷/۳۸ ± ۰/۰۴
میکروکانال+نانوذره	۲۰۰	۲۸/۸۰ ± ۰/۰۲
میکروکانال+فراصوت	۲۰۰	۱۷/۶۲ ± ۰/۰۶
میکروکانال+نانوذره+فراصوت	۲۰۰	۶/۲۴ ± ۰/۰۳

اثر همزمان گاز بی اثر، نانو ذره و فراصوت

مقایسه اثرات نانو ذره، اولتراسوند و گاز بی اثر بر استخراج میکروکانال در جدول ۱ نشان داده شده است. بیشترین راندمان استخراج زمانی بدست آمد که همه عوامل نانو ذره، اولتراسوند و گاز بی اثر استفاده شده‌اند. قرار گرفتن نانوذرات در معرض امواج فراصوت تحریک نانوذرات را تشدید کرده است. همان‌طور که از این نتایج می‌توان دریافت، کاربرد همزمان نانوذرات Fe_3O_4 و منبع فراصوت باعث افزایش چشمگیر نیروی محرکه شده است. به عبارت دیگر، موج فراصوت علاوه بر تحریک فازهای مایع، نقش مهمی در حرکت و انتقال نانوذرات بین فازها دارد و تنها به فصل مشترک محدود نمی‌شود. کمترین عملکرد انتقال جرم به شرایطی نسبت داده می‌شود که میکروکانال به تنهایی داشته باشیم. در واقع، دو دلیل اصلی، نانوذرات آهن را به حذف مؤثر سرب قادر می‌سازد، دلیل اول، انتقال نانوذرات از فاز آلی به فاز آبی است که این رفتار باعث اختلاط مؤثر شده و انتقال جرم را افزایش می‌دهد. دلیل دوم به قابلیت جذب نانوذرات که باعث حذف جزئی یون‌های سرب از فاز آبی می‌شود. در کنار نانوذرات استفاده از اولتراسوند از تجمع نانو ذرات خودداری و باعث افزایش اختلاط، سطح تماس، انتقال جرم و افزایش راندمان استخراج خواهد شد.

اثر فراصوت بر اختلاط در میکروکانال

به منظور بررسی اثر فراصوت بر بازده استخراج از پیزوالکتریک دیسکی با فرکانس ۲ مگاهرتز و قطر ۱۰ میلی‌متر به عنوان ساطع‌کننده فراصوت استفاده شد. فراصوت با تولید کاویتاسیون قوی، اختلال، شتاب بالا، خرد کردن و تکان دادن، افزایش فرکانس حرکت مولکولی و سرعت نفوذ حلال را افزایش می‌دهد. زمانی که نانوذرات در یک مایع مخلوط می‌شوند، تمایل زیادی به کلوخه شدن دارند. ابزارهای مؤثری برای کاهش اندازه و پراکندگی نانو ذرات نیاز داریم تا پس از خیس شدن پودر، بر نیروهای پیوندی غلبه کند. خردایش التراسونیک کلوخه‌ها در سوسپانسیون‌های آبی و آلی امکان استفاده از ظرفیت کامل مواد نانوسایز را فراهم می‌کند. زمانی که مایعات را در معرض تابش امواج التراسونیک بگذارید، موج‌های صوتی که در مایع منتشر می‌شوند، باعث تناوب چرخه‌های فشار بالا و پایین می‌شوند که باعث اعمال تنش مکانیکی بر نیروهای جاذب بین ذرات می‌گردد. کاویتاسیون باعث تشکیل جریان سربعی از مایع شده که با فشار زیاد بین ذرات عبور کرده و آنها را از یکدیگر جدا می‌کند. ذرات کوچک با جت‌های مایع شتاب می‌گیرند و با سرعت بالا با دیگر ذرات برخورد می‌کنند. علاوه بر این، برای ارزیابی تأثیر تابش فراصوت بر دمای سیال، تغییرات دما در ورودی‌ها و خروجی میکروکانال اندازه‌گیری شد. با توجه به مقدار کم انرژی ورودی و همچنین زمان اقامت کوتاه سیال در میکروکانال تغییرات دما ناچیز بود. در واقع، اختلاط مؤثر بالا در این سیستم را می‌توان به کاربرد همزمان امواج فراصوت و نانوذرات نسبت داد. اختلاط دو فاز در سیستم حاوی نانوذرات و امواج فراصوت به میزان زیادی بهبود یافته به طوری که مرز بین فازهای مایع قابل تشخیص نیست. از شکل ۸ می‌توان مشاهده کرد که تشدید امواج فراصوت، اختلاط و در نتیجه راندمان حذف سرب (II) و نیروی محرکه انتقال جرم را افزایش می‌دهد. میزان اختلاف در راندمان حذف در این حالت، ۳۱٪ در مقایسه با حالت بدون اولتراسوند بود.

نتیجه گیری

در میکروکانال، جداسازی بر مبنای نفوذ مولکولی انجام شود. در سیستم‌های میکروفلوئیدیک ابعاد کانال کوچک بوده جریان‌هایی با عدد رینولدز کم می‌توانند بکار برده شوند. کاهش مقیاس طولی، نیرویی سطحی ایجاد می‌کند که در آن تأثیرات الکترونیکی بسیار مهم و نیروهای جبری و گرانشی بی‌اهمیت می‌باشند. در این سیستم پیوسته از قرار دادن چند میکروکانال موازی می‌توان به تولید انبوه دست یافت بدون ایجاد خطاهای ناشی از افزایش حجم تولید که در سیستم‌های ناپیوسته شایع است. در سیستم‌های ماکرو قسمت اعظم انتقال جرم ناشی از جابجایی بوده و با ایجاد اغتشاش میزان انتقال جرم افزایش می‌یابد. همین عامل باعث ایجاد خطا هنگام افزایش اندازه سیستم می‌شود زیرا با افزایش اندازه امکان ایجاد اختلاط یکنواخت کاهش می‌یابد. بررسیها نشان می‌دهد استفاده از میکروکانال، نه تنها به دلیل مزایای ذکر شده بلکه به دلیل همسویی با اصول شیمی سبز، مانند به حداقل رساندن استفاده از مواد شیمیایی، بهبود بهره‌وری انرژی، سرعت انجام فرآیند و کاهش ضایعات، یک روش مناسب برای حذف سرب می‌باشد. در روش‌های متداول مثل روش زیستی، فلز سرب را می‌توان با استفاده از باکتری‌های شیمیولیتوتروپ تحت استخراج زیستی اکسید کرد. اما این فرآیند معمولاً بسیار کند است و حداقل یک روز زمان نیاز دارد تا به درصد بالای استخراج برسد. استخراج شیمیایی سرب [۸] معمولاً سریع‌تر است و می‌تواند با واکنش با عوامل کیلیت‌ساز یا اسیدهای معدنی انجام شود. با این حال، بر اساس ماهیت خوردگی آنها، راکتور مورد استفاده باید با استفاده از مواد مقاوم در برابر اسید ساخته شود که هزینه‌بر است و pH محصول نهایی باید با مقدار زیادی ترکیبات بازی خنثی شود. بیشتر روش‌های جداسازی سرب مانند انعقاد، رسوب شیمیایی [۳]، فیلتراسیون غشایی،

منابع

- [1] Siti N., Azlan K., Wiwid P., Fauziah I., **Removal of Cu(II), Pb(II) and Zn(II) Ions from Aqueous Solutions Using Selected Agricultural Wastes**. *Journal Of Environmental Protection*, **5(5)**: 289-300 (2014).
- [2] Nadiri A.A., Gharekhani M., Lotfinia P., Asadi Fuzzy M., **Modeling of Arsenic Removal Process from Groundwater by Iron Oxide Nanoparticles**, *Journal of Irrigation and Water Engineering*, **12(2)**: 242-254 (2022).
- [3] Jaishankar M., Tseten T., Anbalagan N., Mathew B.B., Beeregowda K.N., **Toxicity, Mechanism and Health Effects of Some Heavy Metals**, *Interdiscip Toxicol.*, **7**: 60-72 (2014).
- [۴] مهدی اسدی، سهیلا آزرده، حذف یون فلزهای سنگین Pb²⁺ و Cd²⁺ از آب با نانو مواد متخلخل، نشریه شیمی

و مهندسی شیمی ایران، ۳۹(۴): ۱۳ تا ۲۳ (۱۳۹۹).

- [5] Azordeh S., Asadi M., [Recovery of the Fixing Solution Waste and Silver, as Well as the Direct Synthesis of Silver Nanoparticles from the Solution Waste](#), *Pollution*, **9(3)**: 1074-1081 (2023).
- [6] Kumar V., Dwivedi S.K., Seungdae O., [Critical Review on Lead Removal from Industrial Wastewater: Recent Advances and Future Outlook](#), *Journal of Water Process Engineering*, **45(1)**: 132-142 (2022).
- [7] Fuerhacker M., Haile T.M., Kogelnig D., Stojanovic A., Keppler B., [Application of Ionic Liquids for the Removal of Heavy Metals from Wastewater and Activated Sludge](#), *Water Sciences & Technology*, **65(10)**: 1765-1773 (2012).
- [8] Dos Santos N.V., de Carvalho V., Santos-Ebinuma A. Pessoa Junior., Pereira J.F.B., [Liquid-Liquid Extraction of Biopharmaceuticals from Fermented Broth: Trends and Future Prospects](#). *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, **93(7)**: 1845-1863 (2018).
- [9] Abdelfattah N.A., Mahmoud S.M., Salman H.M., [Liquid - Liquid Extraction of Uranium from Sulfate Leach Liquor of RamletHemeyir, Ferruginous Sandstone Orematerial, Southwestern, Sinai, Egypt](#), *Physical Chemistry And Indian Journal*, **9(9)**: 322-329 (2014) .
- [10] Tsaoulidis D., Dore V., Angeli P., Plechkova N.V., Seddon K.R., [Extraction of Dioxouranium\(VI\) in Small Channels Using Ionic Liquids](#), *Chemical Engineering Research and Design*, **91(4)**: 681-687 (2013).
- [11] Tsaoulidis D., Dore V., Angeli P., Plechkova N.V., Seddon K.R., [Dioxouranium\(VI\) Extraction in Microchannels Using Ionic Liquids](#), *Chemical Engineering Journal*, **227**: 151-157 (2013).
- [12] Wang K., Luo G., [Microflow Extraction: A Review of Recent Development](#), *Chemical Engineering Science*, **169**: 18-33 (2017).
- [13] Morshedaski N., [Optimization of Y and T-Shaped Microchannels for Liquid-Liquid Extraction](#), *Scientific Reports*, **13(1)**: 1-13 (2023)
- [14] Jensen K.F., [Flow Chemistry—Microreaction Technology Comes of Age](#), *AIChE Journal*, **63(3)**: 858-869 (2017).
- [15] Zhao Y., Su Y., Chen G., [An Experimental Study of Copper Extraction Characteristics in a T-Junction Microchannel](#), *Chemical Engineering & Technology*, **36(6)**: 985-992 (2013).
- [16] Jahandar Lashaki M., Movahedirad S., Rahbar-Kelishami A., [A Variational Applied Approach for Cr \(III\) Removal by Y-Y Shaped Microchannel; Experimental and CFD Simulation Studies](#), *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, **181**: 1-15 (2022).
- [17] Kashid M.N., Renken A., Lioubov K.M., [Influence of Flow Regime on Mass Transfer in Different Types of Microchannels](#), *Chem. Eng. Sci.*, **50(11)**: 6906-69014 (2011).
- [18] Javaid Afzal M., Tayyaba S., Waseem Ashraf M., Khan M. I., Basher M. K., Khalid Hossain M., [A Review on Microchannel Fabrication Methods and Applications in Large-Scale and Prospective Industries](#), *Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy*, **9(3)**: 764-808 (2022)
- [19] Yasemi M., Heydarinasab A., Rahimi M. Ardjmand M., [Microchannels Effective Method for the Extraction of Oleuropein Compared with Conventional Methods](#), *Journal of Chemistry*, **3**: 1-8 (2017).
- [20] Yang L., Zhao Y., Su Y., Chen G., [Liquid-Liquid Microextraction in a Rotating Microchannel Extractor](#), *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, **151**: 107916-107928 (2020).

- [21] Azimi N., Rahimi M., Abdollahi N., [Using Magnetically Excited Nanoparticles for Liquid–Liquid Two-Phase Mass Transfer Enhancement in a Y-Type Micromixer](#), *Chemical Engineering and Processing*, **97**: 12-22 (2015).
- [22] Tang J., Zhang X., Cai W., Wang F., [Liquid–Liquid Extraction Based on Droplet Flow in a Vertical Microchannel](#), *Experimental Thermal and Fluid Science*, **49**: 185-192 (2013).
- [23] Liu G., Wang K., Lu Y., Luo G., [Liquid–Liquid Microflows and Mass Transfer Performance in Slit-Like Microchannels](#), *Chemical Engineering Journal*, **258**: 34-42 (2014).
- [24] Jafari O., Rahimi M., Hosseini Kakavandi F., Azimi N., [Cu \(II\) Removal Intensification Using Fe₃O₄ Nanoparticles Under Inert Gas and Magnetic Field in a Microchannel](#), *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, **14(8)**: 13-23 (2017).
- [25] Singh H., Renjith A.U., Shenoy K.T., [Liquid–Liquid Extraction in Microchannels and Conventional Stage-Wise Extractors: A Comparative Study](#), *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, **98**: 95-105 (2015).
- [26] Biquan X., Feng J., Shaohua Y., Libo Zh., Jinhui P., Shaohua J., Lihua Zh., [Fast Separation of Cu²⁺ and Ni²⁺ in Sulfate Solution by Lix984N Extraction Using a Microchannel Chip](#), *Green Process Synth.*, **7(3)**: 207-216 (2018).
- [27] Meterfi S., Meniai A-H., Chikhi M., [Elimination of Cu \(II\) from Aqueous Solutions by Liquid-Liquid Extraction Test of sodium diethyldithiocarbamate \(SDDT\) as an Extracting Agent](#), *Energy Procedia.*, **18**: 1165-1174 (2012).