
بررسی فلزات سنگین و روش های تصفیه آنها در صنعت

امیر حسین محمودی^۱

۱. کارشناسی ارشد مهندسی پلیمر دانشگاه آزاد واحد فراهان، ایران

چکیده :

در مطالعه حاضر به بررسی فلزات سنگین و انواع روش های تصفیه آنها در صنعت پرداخته شده است. حذف فلزات سنگین از فاضلاب برای حفظ محیط زیست و سلامت انسان از اهمیت بالایی برخوردار است. دفع آلایندهها در پسابها توسط پروتکل های خاصی کنترل میگردد. به دلیل وجود خواص ساکن، یک روش جداسازی قوی برای جداسازی آلایندهها مورد نیاز میباشد. بنابراین، صنایع با مشکلات زیادی در راستای کاهش تخلیه آلاینده، استفاده از آب و مصرف انرژی مواجه میشوند. بنابراین، به منظور حفظ ایمنی زیست محیطی، روشهای تصفیه مختلفی ارائه شدند که تبدیل به یک زمینه تحقیقاتی مهم شدند. هر تکنولوژی دارای مزایا و معایب خاصی است. تبادل یون، استخراج سیال فوق بحرانی، جذب سطحی، پالایش، تجزیه (دیالیز) الکتریکی، رسوبگذاری، سیستم میکروبی، فرآیند الکتروشیمیایی، یک فرآیند اکسیداسیون پیشرفته و راکتورهای زیستی غشایی بهترین و مطمئنترین راهکارهای دفع فلزات سنگین هستند. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که تحقیق مبتنی بر اجرای تکنولوژی تصفیه در مقیاس آزمایشگاهی به دلایل مختلف نظیر رشد سریع یافته صنعتی سازی، آلودگی ناشی از فلزات سنگین و دسترس پذیری فلزات سنگین در محیط زیست به مقیاس نمونه و مقیاس صنعتی گسترش یافته است. اما احتمال به وجود آمدن برخی مشکلات نامعلوم به دلیل پیشرفت فوقالذکر در تکنولوژی تصفیه وجود دارد. به دلیل اینکه اغلب مطالعات مورد بحث در اینجا مطالعات مقیاس آزمایشگاهی بودند. به منظور اعمال تکنیکهای تصفیه در مقیاس نمونه و مقیاس صنعتی، نیاز است تا مطالعات مربوط به این دوراندازهای آتی که بهترین جایگاه را در کاربردهای صنعتی و نیز سطح تجاری ارائه مینمایند تحلیل شوند. نیاز است تا این جنبه به منظور ارائه تکنولوژیهای تصفیه در مقیاس بزرگ بیشتر مورد بررسی قرار گیرد .

کلمات کلیدی: فلزات سنگین، آلاینده، صنعت، مصرف انرژی، مقیاس آزمایشگاهی.

مقدمه

آلاینده‌های حاصل از پساب به دو دسته آلاینده‌های آلی و غیر آلی تقسیم می‌شوند که دارای گستره متفاوتی از سطوح سمی بودن می‌باشند. روش‌های زیستی، فیزیکی و شیمیایی به طور گسترده در فرآوری آلاینده‌های آلی به کار می‌روند. اما این روش‌ها برای آلاینده‌های غیرآلی نظیر فلزات سنگین مناسب نمی‌باشند. به دلیل عوامل کیفی آنها همانند انحلالپذیری، مشخصات کاهش اکسیداسیون و ترکیب پیچیده، تجزیه فلزات سنگین یک مشکل اساسی می‌باشد. عنصری که دارای وزن اتمی بین ۶۳.۵ تا ۲۰۰.۶ و وزن مخصوص بیش از ۵ می‌باشد (۱۵) یک فلز سنگین می‌باشد. این عناصر به صورت طبیعی در محیط یافت می‌شوند. کلمه فلز سنگین اشاره به عنصری دارد که دارای چگالی و سمیت بیشتر حتی در غلظت‌های کم می‌باشد. در سالیان اخیر، فلزات سنگین در پساب یک مشکل اساسی در محیط بوده‌اند زیرا خطر زیادی در معرض اکوسیستم‌ها و سلامت انسان حتی در غلظت کم می‌باشد.

به دلیل انعطاف‌پذیری، انباشتگی، زیست تخریب‌ناپذیری و ماندگاری، آلودگی فلز سنگین یک خطر عمده زیست محیطی می‌باشد. صنایعی نظیر صنایع کاغذ، آفت کشها، دباغیها، صنایع فلزکاری، عملیات معدن و غیره پساب فلزات سنگین را به محیط تخلیه می‌نمایند که زیست تخریب ناپذیر و سمی بوده یا برای فیزیولوژی انسان یا دیگر سیستم‌های زیستی او مضر می‌باشد. اما می‌توان این پساب را به مواد کم ضررتر تبدیل نمود. فلزات سمی می‌توانند به صورت شیمیایی یا مخلوط باقی بمانند، بنابراین حذف آنها از پساب دشوار می‌باشد. برخی فلزات سنگین اجزای اساسی را می‌سازند که در مقادیر کم برای فعالیت‌های متابولیکی موجودات زنده مورد نیاز می‌باشند. با این وجود مقادیر بیشتری از این فلزات می‌تواند سمیت درمان ناپذیری را برای سلامت انسان ایجاد نماید. فلزات سنگین در آب‌های آزاد منجر به پایان بخشیدن به زندگی آبی، کمبود اکسیژن و شکوفایی جلبکی خواهند شد. با تخلیه این فلزات به رودخانه‌ها، فلزات سنگین به یونهای هیدراته شده‌ای تبدیل می‌گردند که بسیار سمی‌تر از اتم‌های فلزی هستند. این یونهای هیدراته شده باعث اختلال در فرآیند آنزیمی شده و همچنین جذب در آن سریع‌تر رخ می‌دهد؛ لذا حذف فلزات سنگین برای کاهش خطرات عمومی اجباری می‌باشد. به منظور محدودسازی آلودگی آب، سازمان سلامت جهانی (WHO) و آژانس حفاظت محیط زیست (EPA) بالاترین سطح مجاز تخلیه فلزات سنگین به محیط را تدوین نموده است. با این حال، غلظت فلزات سنگین در پساب تخلیه شده باز هم فراتر از حدهای مجاز بوده که منجر به ایجاد مشکلاتی برای سلامتی انسان و مشکلات زیست محیطی می‌گردد.

نانوذرات مغناطیسی، مخصوصاً مگنتیت این روزها هم از لحاظ علمی و هم از لحاظ تکنولوژیکی از اهمیت اساسی برخوردار هستند. کاربرد این نانوذر در جاهایی مثل ذخیره سازی اطلاعات، سنسورها، کاتالیست‌ها و مخصوصاً در بیوپزشکی محرکی قوی برای تحقیقات بر روی سنتز نانوذر مگنتیت با خواص مناسب باشد. (۹۸) دو روش مهم ساخت نانوذر مغناطیسی، روش مایسل معکوس و روش هم رسوبی است. در روش مایسل معکوس نانوذر درون حوضچه‌هایی با ابعاد چند نانومتر رسوب دهی می‌شوند و بنابراین می‌توان کنترل خوبی روی ابعاد نانوذر داشته و توزیع اندازه ذرات تیزتر است. اما معایب آن پرهزینه بودن و وقت گیر بودن آن است و همچنین ذرات سنتز شده از نظر مغناطیس اشباع ضعیف هستند. (۹۹)

روش هم رسوبی یکی از قدیمی ترین روشهای ساخت نانوذرات است که اولین بار جهت سنتز نانو ذرات مگنتیت استفاده شد. مزیت این روش ارزان بودن و وقت گیر نبودن آن است و همچنین می توان در حجم کم واکنش مقدار زیادی نانوذره ساخت. (۹۹)

استفاده از نانوذرات آهن، یک فناوری نوین در احیای ترکیبات محسوب میشود. تحقیقات نشان میدهند که نانوذرات آهن میتوانند به عنوان عامل احیاکننده و کاتالیزور در سمیت زدایی تعداد زیادی از آلایندههای محیط زیست، مانند حلالها، آفتکشهای آلیکلردار و بیفنیلها پلکیرید عمل کنند. با کوچک شدن اندازه ذرات آهن در مقیاس نانو، سطح ویژه و در نتیجه فعالیت سطحی ذرات افزایش مییابد. نانوذرات مغناطیسی به دلیل پتانسیل کاربردی بالا از قبیل کاتالیز، منبع ذخیره داده های مغناطیسی، فروفلویدها و دستگاههای اسپین الکترونیکی، سنسورها و دستگاهها با یکدیگر توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. از جمله کاربردهای بسیار متنوع این نانوذرات سوپرمغناطیس، میتوان به استفاده از آنها به عنوان حامل های دارو در پزشکی، رنگدانه، انواع کاتالیزورها، تهیه وسایل الکترونیکی، سرامیکها، ضبط کنندههای مغناطیسی، فرآیند ذخیره سازی اطلاعات در حافظه های مغناطیسی و جوهرهای چاپ اشاره کرد. به دلیل جذابیت و اهمیت فوق العاده این نانوذرات و قابلیت کاربرد بسیار بالای آنها در زمینه های گوناگون علمی و صنعتی، تاکنون تحقیقات فراوانی در جهت یافتن شیوه ای مناسب برای ساخت آنها صورت گرفته است.

نانوذرات اکسید آهن (Fe_2O_3) به دو روش رسوب شیمیایی و سل ژل، با استفاده از نمک های آهن (۲) و (۳) سنتز شده است بررسی نتایج به دست آمده از (XRD) با کارگیری فرمول دبی شر نشان داد که اندازه متوسط ذرات ۱۶، ۳.۸ نانومتر است که نتایج حاصل از SEM,PSA هم آن را تایید می کنند برای جلوگیری از آگلومره شدن و بهبود پایداری، سطح نانوذرات با سورفکتانت ها پلی اتیلن گلیکول، اولئیک اسید پوشش داده شد. در ضمن رفتارهای رئولوژیک نشان میدهد که اندازه نانوذرات اکسید آهن با قدرت مغناطیسی نسبت عکس داشته یعنی هرچه نانوذرات ریزتر قدرت مغناطیسی آنها بیشتر در حالیکه ویسکوزیته نانوذرات آهن با افزایش میدان مغناطیسی استفاده شده نسبت مستقیم داشته و افزایش می یابد اما با افزایش دما نسبت عکس داشته و کاهش می یابد. (۷۶)

انواع فلزات سنگین و اثرات آنها

برخی فلزات سنگین سمی همانند نیکل، آرسنیک، کروم، روی، مس، کادمیوم، کبالت، آنتیموان و غیره اثرات خطرناک و سمی بر روی محیط زنده دارند. گونه های یونی فلزات از جمله Hg^{2+} ، Ag^{2+} ، Cd^{2+} ، Pb^{2+} و As^{3+} ذرات زیستی در بدن واکنش میدهند و باعث تشکیل ترکیبات سمی میشوند که حتما باید جدا شوند. مشخصات سمی وابسته به بزرگنمایی زیستی و غلظت افزایش یافته تا این حد میباشد. لیگاند و اکسیداسیون نقشی اساسی را در دسترس پذیری زیستی فلزات سنگین ایفا می نمایند. هنگامی که غلظت فلزات سنگین از حد مجاز بیشتر باشد، آنگاه در صورتی که فلز متابولیسم سلول را مختل نماید فلزات سنگین سمی خواهند بود. سمیت فلزات منجر به افت عملکرد فکری و عصبی شده، به محتوای خون، ریه ها، کلیه ها و دیگر اندامها آسیب میرساند و باعث سستی میشود، حافظه را کاهش میدهد، آلرژیها را افزایش میدهد و باعث افزایش فشار خون در بدن انسان میگردد.

مردگی سلول به دلیل تشکیل رادیکالهای آزاد نیز رخ میدهد و این رادیکالها مسبب تنش اکسیدکننده هستند. به دلیل این اثرات مشکلات سلامتی در سراسر جهان در حال افزایش هستند و چندین بدنه تنظیمی، پساب تخلیه فلزات سنگین

را با حدهای مجاز تطبیق داده اند. همچنین محققان بر روی توسعه تکنیکهای تصفیه نیز به دلیل وجود اثرات بحرانی در پسابها تمرکز نموده اند.

این روش یک روش جدید و جایگزین موجود برای رسوبگذاری فلزات سنگین برای ایجاد ترکیبات با انحلالپذیری کم نظیر کربناتها، سولفیدها و هیدروکسیدها میباشد. (۴۰) یک کلئید مجموعه ای از اتمها /مولکولهای معلق میباشد که چگالی آنها برابر با چگالی آب میباشد. به دلیل این چگالی پایین، این ذرات قادر به ته نشینی نیستند. به منظور افزایش چگالی یا زدودن این ذرات کلئیدی، استراتژیهای فرآوری انعقادی صورت میگیرند. راندمان انعقاد بستگی به انواع منعقدکنندههای مورد استفاده، دز منعقدکننده، pH، دما، قلیائیت و شرایط اختلاط دارد. در این فرآیند، شناساگرهای شیمیایی یا فلوکولانتهای غیرآلی نظیر $Al_2(SO_4)_3$ و $FeCl_3$ و مشتقات این مواد همانند پلی آلومینیوم کلرید و پلی فریک کلرید به عنوان فلوکولانت در فرآیند تصفیه پساب بهکار رفتند. فلوکولانتهای به منظور انباشتگی ذرات ناپایدار برای تشکیل ذرات بزرگتر به کمک اختلاط یا به هم زدن افزوده میشوند. (۴۱)

کشیدگی یا شنآوری و پالایش برای جداسازی این ذرات بزرگتر به کار گرفته میشوند. نوع جدیدی از فلوکولانتهای ماکرومولکولی نظیر مرکاپتوسیتیل توسط چانگ و همکاران از طریق واکنش دادن کیتوسان با اسید مرکاپتواسیتیک به دست آمد که بر اساس گزارشات قادر به جداسازی فلزات سنگین و رفع تیرگی (گل آلودگی) میباشد. فلوکولانتهای دیگر نظیر پلی آلومینیوم روی سیلیکات کلرید در تصفیه پساب نفت (روغن) به کار میروند. نرخ رفع گلاودگی و COD به دست آمده با استفاده از این فلوکولانتهای به ترتیب در حدود ۹۸.۹ درصد و ۷۱.۸ درصد میباشد. CAX ها نمونههای از منعقدکنندهها و فلوکولانتهای پیچیده هستند و پلی آکریل آمید آنیونی راندمان جداسازی نفت (روغن) در پساب را افزایش میدهد. (۴۲)

مقایسه مزایا و معایب تکنیکهای مختلف تصفیه برای جداسازی فلزات سنگین از پساب جدول

روشن	مزایا	معایب
انعقاد	مقرون به صرفه بودن، کیفیتهای آگیری	تولید لجن، بهرهوری زیاد از مواد شیمیایی
پالایش غشایی	جداسازی زیاد فلزات سنگین، نیاز به فضای کمتر	بسیار پر هزینه بودن، رسوبگذاری غشایی، فرآیند کمپلکس
جذب سطحی	کارکرد آسان، تولید لجن کمتر، استفاده از جاذبهای ارزان	واجبی
فرآوری الکتروشیمیایی	کارآمد برای جداسازی یونهای فلزی مهم، استفاده کم از مواد شیمیایی	بالا بودن سرمایهگذاری اولیه، نیاز به برق زیاد
تراکافت الکتریکی	تفکیک زیاد فلزات	گرفتگی و هدررفت انرژی
تبادل یون	تبدیل زیاد اجزا	جداسازی تنها تعداد محدودی از یونهای فلزی، بالا بودن هزینه عملکردی

فوتوکاتالیز	حذف همزمان هر دو یونهای فلزی و آلایندهای آلی	طولانی بودن زمان مورد نیاز برای جداسازی فلزات
فرآوری زیستی	کارآمد در جداسازی فلزات سنگین	نیاز به تکامل
اکسیداسیون	عدم نیاز به برق	ایجاد زنگزدگی در سیستم به دلیل استفاده از اکسیدکننده

یان و همکاران جداسازی آرسنیک را از طریق فرآیند انعقاد به کمک آلومینیوم و نمکهای آهن مورد بررسی قرار دادند که مشخص شد منعقدکننده مناسبی برای جداسازی آرسنیک هستند. جداسازی آرسنیک با دز کمتری از منعقدکننده آهنی کارآمد بود. منعقدکننده ها ذرات کلوئیدی را از طریق خنثی نمودن آنها ناپایدار میسازند و باعث ته نشینی لجن میشوند. این ذرات کلوئیدی بر روی سطح فلز به تله افتاده و تشکیل رسوب میدهند. تشکیل لجن به دلیل استفاده از زیاد از مواد شیمیایی در این فرآیند جداسازی رخ میدهد که یکی از معایب عمده فرآیند انعقاد میباشد. گاهی اوقات فلوکولانتهای پلیمری انحلالپذیر همانند پلیمرهای اسید سولفونیک و اسید کاربوکسیل در این فرآیند جداسازی به جای شناساگرهای شیمیایی غیرآلی به کار میروند. مزایای این پلیمرها عبارتند از استفاده آسان، تشکیل لجن کم، دسترسی آسان و سازگاری با محیط زیست. برخی محققان سعی نمودند تا با استفاده از دوماه شیمیایی متداول همانند کلرید آهن و پلی کلرید آلومینیوم (PAC) فلزات سنگین را جدا نمایند که پی برده شد در غلظتهای نسبتاً بهینه یک منعقدکننده عالی میباشد. همچنین تحقیقی پیرامون جداسازی فلزات سنگین محصور توسط فرآیند انعقاد/لختگی انجام شد. جداسازی پیچیده فلز سنگین با استفاده از روش لختگی پلی الکترولیتی و سپس روش گریز از مرکز و فیلتراسیون صورت گرفت. فلزات سنگین نظیر روی و سرب با ماده اسید گیاهی وجود دارند و با کلرید پلیدیلایمیتیلآمونیم پلی الکترولیت کاتیونی منعقد میشود که یک روش انعقاد پلی الکترولیتی برای زدودن فلزات سنگین میباشد.

این تصفیه نمیتواند به طور کامل فلزات سنگین موجود در پساب را از بین ببرد، بنابراین به کارگیری دیگر روشهای تصفیه نظیر رسوبگذاری، کاهش خودانگیخته همراه با فرآیند انعقاد یا لختگی لازم میباشد. برای مثال، بوجیک و همکاران از یک تکنیک ترکیبی یعنی فرآیند کاهش خودانگیخته- انعقادی به منظور جداسازی فلز از پساب بر پایه ترکیب آلومینیوم میکروآلیاژی استفاده نمودند که میتواند منجر به کاهش موثر یونهای کس و روی در غلظتهای مختلف گردد. بر اساس تئوری انعقاد سمولوچوفسکی، نانوذرات میتوانند منجر به ته نشینی سریع کلوئیدهای موجود در سطح آب شوند. منعقدکننده نانو نظیر نانوذرات نقره باعث ته نشینی فلزات سنگین میگردد و قادر به کاهش غلظت TOC در پساب میباشد. مقدار زیاد فلوکهای ته نشین منجر به تشکیل لجن میشود که در فرآیند انعقاد به دلیل استفاده از منعقدکنندهایی نظیر آلومینیوم، آهن و غیره رخ میدهد. لجن تشکیل شده پس از فرآیند انعقاد حاوی فلزات سنگین نظیر کادمیوم، کروم، نیکل، سرب و روی بود. راهحل مدیریت لجن بازیابی، بازیافت و استفاده مجدد میباشد. اگرچه انعقاد/لختگی برای جداسازی فلزات سنگین از پساب موثر است، اما میتواند منجر به تولید محصولات ثانویه نظیر فلوکها که به عنوان آلاینده ثانویه شناخته میشوند گردد و حلالهای شیمیایی افزودنی کمتر قابلیت استفاده مجدد را دارند که برای انسان و محیط زیست مضر میباشد.

شناوری

شناوری یک روش جداسازی جامد- مایع می باشد که در آن قطرات کوچک به پساب جریان می یابند و فلزات سنگین با چسبیدن به حبابها از آب فرار میکنند. این حبابها در بالا معلق میشوند و ذرات هیدروفوبیک متمرکز حذف میشوند و برای فرآوری دیگری به کار میروند. این روش دارای پتانسیل بالایی در تصفیه پساب می باشد زیرا تشکیل لجن کم بوده و راندمان جداسازی بالا می باشد. این روش بیشتر برای ترکیبات دارای ماهیت فیزیکی و شیمیایی تغییر یافته مناسب می باشد. اندازه حباب، سرعت حباب و فرکانس تشکیل حباب مهمترین پارامترها در تنظیم فرآیند شناوری هستند. هزینه عملیاتی و نگهداری و تعمیرات بالا از معایب شناوری هستند.

پالایش غشایی

پالایش غشایی یک تکنیک جداسازی تحریک شده توسط فشار می باشد که در تصفیه پساب به کار می رود. به جز جداسازی فلزات سنگین، ضد عفونی نیز در این روش صورت می گیرد. پالایش غشایی ذرات را بر اساس اندازه آنها، غلظت محلول، pH و فشار اسمالی جدا مینماید. با استفاده از غشای فرآورشی به همراه عوامل شیمیایی، مکانیزم پالایش میتواند تحریک شود. غشا از مواد متخلخل خاص ساخته شده است که نقش مهمی را در جداسازی فلزات از آب آلوده ایفا مینماید. غشا دارای دو جنس سرامیکی و پلیمری می باشد. ماده عموماً به کار رفته برای تصفیه پساب صنعتی سرامیک می باشد که به دلیل مقاومت آن در برابر مواد شیمیایی بیشتر به کار می رود. همچنین این جنس دارای قابلیت آب گریزی نیز می باشد. ضعف اصلی جنس سرامیک سستی و هزینه بالای ساخت آن می باشد. جنس پلیمری همانند پلی وینیلیدین فلورید، پلی پروپیلین و پلی اتیلن به دلیل مقاومت شیمیایی آن جنس تجاری مورد استفاده است. این جنس یک غشای متخلخل است و میتواند به دلیل ماهیت آب گریزی آن به راحتی رسوب نماید. ارتباط بین غشای پلیمری و فلزات سنگین قوی می باشد. بسته به اندازه حفره ماده غشایی، نفوذپذیری غشا تعیین میگردد. محلول تمیز از یک طرف غشا و ماده حل شده نیز از طرف دیگر آن جدا میشود. این روش به دلیل راندمان، عملکرد آسان و نیاز به فضای کمتر آن در مقایسه با دیگر تکنولوژیهای خالص سازی یک تکنیک امیدوارکننده برای حذف فلزات سنگین می باشد. به علاوه، برای جداسازی جامدات معلق و ترکیبات آلی نیز کارآمد می باشد. اگرچه این روش دارای مزایای مشخصی است، پالایش غشایی به دلیل فرآیند پیچیده، ته نشینی غشایی، جایگزینی دوره های غشا و هزینه بالا محدود به حذف فلزات سنگین می باشد. رسوب اصلی موجود در غشا بخشی از ماده آلی حل نشده و ماده آلی می باشد. به منظور جلوگیری از حضور این عوامل، پیش تصفیه پساب مورد نیاز می باشد که عملکرد غشا را بهبود می بخشد. به منظور یافتن روش جداسازی بدون آلودگی، فرآیند پالایش غشایی تحریک شده با فشار همانند میکروپالایش، نانوفیلتراسیون و تجزیه معکوس برای جداسازی فلزات سنگین از پساب بر اساس اندازه فلزات مورد استفاده قرار گرفتند. این فرآیندها قادر به زدودن فلزات سنگین در حجم بزرگی از محلولهای آبی می باشند {۵۴-۵۶}

میکروپالایش

فرآیند میکروپالایش اساساً به عنوان یک پیش فرآورش برای جداسازی جامدات معلق به کار می رود. این فرآیند میتواند دارای دو حالت انتهایی مرده یا جریان متعادل باشد. این فرآیند ذرات با اندازه بین ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر را از بین میبرد. مزایای عمده روش میکروپالایش عبارتند از: پایداری بالای آن، امکان استفاده از غشا برای مدت طولانی و قابلیت فرآورش حجم زیادی از محلول آبی. گرفتگی به راحتی در غشای میکروپالایش رخ میدهد که عیب اصلی در غشای آنها می باشد. مولگورا و همکاران از تکنولوژی ترکیبی متشکل از انعقاد به همراه میکروپالایش برای حذف آرسنیک استفاده

نمودند. آنها پی بردند که ۹۷ درصد آرسنیک را میتوان با استفاده از این روش ترکیبی به صورت موثر در مقایسه با دیگر تکنیکهای پالایش از بین برد.

فراپالایش

فراپالایش یک تکنیک جداسازی میباشد و تنها نیازمند انرژی کمی برای فرآوری پساب میباشد. ذرات با اندازه حدود ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر را میتوان با استفاده از این روش از بین برد. به دلیل برهم کنشهای آبریز و الکترواستاتیک، ذرات به راحتی از محلولهای آبی جدا میشوند. معمولاً این روش به صورت تکنیک ترکیبی به کار میرود زیرا دارای یک غشا با اندازه حفره بزرگتر میباشد که بزرگتر از اندازه یونهای فلزی است. بنابراین غشای UF امکان عبور آسان یونهای فلزی را فراهم مینماید. برای تقویت فرآیند فراپالایش، عوامل شیمیایی و عوامل پلیمری به کار گرفته شدند و عموماً با نام فراپالایش بهبودیافته میسلی و فراپالایش بهبودیافته پلیمری شناخته شدند (58)

سکام هورن و همکاران در سال ۱۹۸۰ روش MEUF را برای جداسازی یونهای فلزی از پساب پیشنهاد نمودند. افزودن بیش از حد عامل بهبود دهنده منجر به تشکیل رسوب میگردد که با یونهای فلزی پیوند ایجاد میکنند و باعث تشکیل ساختار بزرگی از فلز و مجموعه روکشگر میگردد. این مجموعه توسط غشای UF نگه داشته میشود و تنها به ذرات انباشته اجازه عبور میدهد. هنگامی که بار روکشگر مخالف بار یونهای فلزی باشد، میتوان به نگهداشت بالایی از مجموعه روکشگر فلزی دست یافت. مجموعه میتواند مجدداً بازگردانده شود و برای کاربردهای زیستمحیطی مجدداً به کار رود. ضعف MEUF در این است که میتواند در صورت عدم دفع صحیح روکشگر فلزی منجر به تولید آلاینده ثانویه شود. فراپالایش بهبودیافته میسلری توسط لاندابورو- آگیره و همکاران برای از بین بردن فلزات سنگین از پساب دارای فسفر یک شرکت کود به کار رفت. آنها از روش سطح پاسخ برای بهبود ضریب استثنا (جداسازی) فلزات سنگین نظیر کادمیوم و مس استفاده نمودند. این تحقیق نشان داد که ضریب جداسازی کادمیوم و مس در حدود ۸۴.۳ و ۷۵ درصد میباشد. محققان از انواع مختلفی از روکشگرهای ترکیبی برای جداسازی فلزات سنگین در کاربردهای مقیاس کوچک استفاده نمودند. روکشگر ترکیبی با نام سدیم دودیسیل سولفات توسط برخیمحققان در MEUF روی از پساب ترکیبی مورد استفاده قرار گرفت. در غلظت بالاتر از غلظت بحرانی میسل SDS، زدودن روی افزایش مییابد. در این مطالعه، شبه مرتبه دوم جذب سطحی SDS را به درون یونهای فلزی توصیف مینماید. اما استفاده از این روکشگرها میتواند منجر به تولید آلاینده ثانویه گردد. در این حالت، روکشگر زیستی در اولویت میباشد که زیست تخریب پذیر و تجدیدپذیر میباشد. الزفتاوی و مولیگان تحقیقی را انجام دادند که نشان میدهد استفاده از رامنولیپید به عنوان یک روکشگر زیستی در فرآیند فراپالایش بهبودیافته میسلی برای زدودن مس، روی، نیکل، سرب و کادمیوم منجر به دستیابی به نسبت عدم پذیرش ۹۹ درصدی گردید و بهینهسازی از طریق روش سطح پاسخ صورت گرفت (۵۹)

PEUF نوعی تکنولوژی خالصسازی فراپالایش است که با استفاده از عوامل پلیمری محلول در آب به انجام میرسد. عوامل پلیمری به یونهای فلزی متصل میشوند تا ماکرومولکولها را به وجود آورند و این مولکولها قادر به عبور از میان غشا نخواهند بود زیرا اندازه غشا از اندازه ماکرومولکولهای به دام افتاده کوچکتر میباشد. ماکرومولکولهایی که حاوی یونهای فلزی هستند میتوانند بازیافت شوند و عوامل پلیمری میتوانند برای اهداف دیگر به کار روند. مواد پلیمری به سه نوع تقسیم میشوند. این سه نوع عبارتند از: پلیمرهای طبیعی، پلیمرهای مصنوعی و پلیمرهای تجاری. کاربرد پلیمر مصنوعی و طبیعی در کاربردهای مقیاس آزمایشگاهی بسیار زیاد است اما کاربرد آنها در مقیاس بزرگ محدود است. تکنیک PEUF دارای راندمان جداسازی و تشکیل ماکرومولکولهای بالا میباشد که مزیت اصلی این فرآیند پالایش

است. از آنجائیکه پلیمرها دارای ساختار پیچیده‌های هستند، جداسازی یونهای فلزی خاص مشکل بوده و ایجاد مجدد آن پلیمرها دشوار میباشد. از سوی دیگر، پلیمرهای طبیعی از انحلالپذیری کمتری در آب برخوردار هستند. روش PEUF بر روی پسابهای صنعتی حاصل از ساخت باتری، عملیات معدن، فرآیند کلارکالی تست شد. کی و همکاران کوپلیمر اسید مالئیک و اسید آکریلیک را به عنوان عامل پیچیده کننده در فرآیند پیچیدگی- فرایند لایش برای از بین بردن منگنز موجود در پساب اعمال نمودند. این مطالعه نشان داد که نرخ ممانعت از منگنز در حدود ۹۹.۶ درصد و جداسازی نشتی تنها ۲ درصد از کل فرآیند میباشد. زدودن فلزات سنگین نظیر (Zn(II), Cd(II), Fe(III), Pb(II), Ni(II), Co(II), Cu(II), I) توسط هوانگ و همکاران با استفاده از پلی وینیل آمین به عنوان یک عامل پلیمری در فرآیند PEUF تحت بررسی قرار گرفت. در ۰.۱ درصد از دز PVA، ۹۹٪، ۹۷٪ و ۹۹٪ (Pb(II), Cu(II), Fe(II) و (I) ممانعت به دست آمد و پی برده شد که در دز پایین PVA موثر میباشد. با افزایش دز PVA، ممکن است نرخ ممانعت یونهای فلزی نیز افزایش یابد. یک تحقیق مشابه توسط هوانگ و همکاران در سال ۲۰۱۵ برای جداسازی جیوه از پساب با استفاده از روش PEUF به کمک PVA انجام شد. جداسازی جیوه به میزان ۹۹ درصد به دست آمد اما این راندمان در فرایند لایش غیر ممکن بود. در این مطالعه، غلظت گداز آور بستگی به دز PVA دارد اما این دز جداسازی جیوه را تحت تاثیر قرار نمیدهد.

نانوپالایش

نانوپالایش مطمئنترین تکنیک تحریک شده توسط فشار در صنایع مختلف شیمیایی و زیستی میباشد. این روش یک تکنیک میانی بین فرایند لایش و تجزیه معکوس است. مزیت نانوپالایش عبارتند از: مصرف کم انرژی، کارآمدی در جداسازی فلزات سنگین، آسان بود کارکرد، نیاز به فشار کمتر در مقایسه با تجزیه معکوس. راندمان نانوپالایش بستگی به PH، فشار، دما، گیرایی غشا، ساختار غشا و غلظت ورودی دارد. غشاهای به کار رفته در فرآیند نانوپالایش معمولاً از پلیمرهای مصنوعی ساخته شده‌اند که بار مثبت یا منفی بر روی سطح به آنها داده میشود و این مسئله به جداسازی فلزات سنگین کمک مینماید یا عملکرد غشا را به دلیل ارتباط الکترواستاتیک بین غشا و یونهای فلزی بهبود میبخشد. مکانیزم جداسازی نانوپالایش بر اساس اندازه و بار میباشد. ژو و همکاران یک غشای تو خالی نانوپالایش دو لایه را با استفاده از پلی بنزیمیدازول، پلی اتر سولفون/ پلی وینیل پیرولیدون برای زدودن یونهای فلزات سنگین از پساب طراحی نمودند. آنها عملکرد جداسازی بین این غشا و این یونهای فلزی را مطالعه نمودند و پتانسیل غشای نانوپالایش تو خالی دو لایه را مورد بررسی قرار دادند. نرخ جداسازی Mg^{2+} و Cd^{2+} ۹۸ و ۹۵ درصد به دست آمد. با تغییر PH محلول، نرخ جداسازی $-CrO_4^{2-}$ و Pb^{2+} میتواند به ۹۸ و ۹۳ درصد برسد. در سال ۲۰۱۵ ژو و همکاران از غشای نانوپالایش مرکب فیلم نازک استفاده نمودند که از طریق پلی (آمیدو آمین) دیریمر برای زدودن فلزات سنگین منتشر شد. نرخ ممانعت در برابر فلزاتی نظیر Zn^{2+} ، Cd^{2+} ، Ni^{2+} ، Cu^{2+} ، Pb^{2+} و As^{5+} بررسی شد و به بیش از ۹۹.۲ درصد رسید. با تغییر pH محلول، نرخ جداسازی آرسنیک افزایش مییابد. این تحقیق نشان میدهد که PAMAM دارای فعالیت پایداری است که حاکی از خاصیت ضد رسوب مناسب آن است. به منظور افزایش ظرفیت جذب غشا، پلیمرهای کی لیت ساز یعنی گروههای عاملی با بار منفی نظیر (PAM, PAA) و (PDMD) بر روی زیرلایه‌های فیبری تو خالی ۸۴P صلیبی PEI با بار مثبت توسط ژائو و همکاران برای از بین بردن فلزات سنگین نظیر $Na_2Cr_2O_7$ ، $ZnCl_2$ ، $CdCl_2$ ، $NiCl_2$ ، $Pb(NO_3)_2$ و $CuSO_4$ انتخاب شدند و نرخ جداسازی حدود ۹۸ درصد را نتیجه دادند. علاوه بر این، این پلیمرهای کی لیت ساز اندازه حفره غشا و بار سطح غشا را تغییر میدهند. جنسهای مختلف پلیمر به کار رفته در

فرآیند نانوپالایش برای زدودن فلزات سنگین در جدول ۲-۲: ارائه گردیده است. رشدی و همکاران زدودن فلزات سنگین را با استفاده از غشای نانوپالایش NF ۲۷۰ مورد بررسی قرار دادند که حاکی از بالاتر بودن جداسازی در حالت کمتر بودن PH از نقطه ایزوالکتریک غشا میباشد. در غلظتهای پایینتر یونهای مس، نرخ جداسازی ۱۰۰ درصد است اما در حالت غلظت بالاتر یونهای مس، نرخ جداسازی به ۸۵ درصد کاهش مییابد که بدان معنی است که غشای NF ۲۷۰ برای زدودن غلظت کمتر از یونهای مس مناسب میباشد {۶۳-۷۱}

جدول ۲: انواع مواد پلیمری مورد استفاده در غشای نانوپالایش برای جداسازی فلزات سنگین از پساب

شماره	غشا	اندازه حفره غشا	فلزات سنگین جدا شده
۱	پلی بنزیمیدازول (PBI)	۰.۳۴۸ نانومتر	کرومات
۲	پلی (آمیدوآمین) دندریمر (PAMAM)	۰.۱ تا ۱.۴ نانومتر	As ^{۵+} و Zn ^{۲+} , Cd ^{۲+} , Ni ^{۲+} , Cu ^{۲+} , Pb ^{۲+}
۳	پلی سوفون تقویت شده با پلی آمیدمرکب غشا نازک	۰.۵۲ نانومتر	یون مس
۴	پلی آمید مرکب غشا نازک	-----	یونهای کادمیوم و نیکل
۵	غشای پلی آمیدی	-----	آرسنیک و فلورین
۶	پلی وینیلیدین فلورید (PVDF)	-----	Cr ^{۶+} و Cd ^{۲+} , Cu ^{۲+}
۷	غشای نانوپالایش پلی آمیدی	-----	سرب

تجزیه معکوس

تجزیه معکوس بر اساس قاعده تفکیک اندازه و بار عمل مینماید. این روش از غشای نیمه نفوذپذیر برای جداسازی گونههای حل نشده استفاده مینماید و تنها به آب امکان عبور از غشا را میدهد. اندازه حفرههای غشا از ۰.۱ تا ۱ نانومتر متغیر است. این روش به طور گسترده برای فرآیند نمکزدایی به کار میرود. استفاده از تجزیه معکوس در حال افزایش در کاربردهای پساب برای زدودن فلزات سنگین میباشد. خطای اصلی در این فرآیند این است که این روش نیازمند انرژی زیاد است. آزمایشات مختلفی در غشای RO برای بازیافت یا فرآورش پساب ورقکاری الکتریکی انجام شدند. قابلیت غشای RO بستگی به جنس غشا، pH، دما، فشار و مشخصات گرفتگی غشا دارد. به منظور پیشگیری از رسوبگذاری غشا، پساب تحت پیش پردازش قرار میگیرد که ذرات سطح و کلوئیدی را از پساب جدامینماید. این تکنولوژی به طور عمده در تصفیه آب برای حدود ۱۰ سال به کار رفته است. پترینیک و همکاران تصفیه پساب حاصل از صنعت پرداخت فلز را با استفاده از تکنیکهای ترکیبی غشا نظیر فراپالایش و تجزیه معکوس برآیرفع ذرات جامد معلق و فلزات سنگین از پساب مورد بررسی قرار دادند. فرآیند فراپالایش به عنوان یک فرآیند پیش پردازش برای حذف مشکل گرفتگی در غشای تجزیه معکوس به کار گرفته شد. آنها نشان دادند که این تکنولوژی غشای ترکیبی ۹۱/۳-۹۹.۸ درصد آلایندههای موجود در پساب نظیر عناصر فلزی، ترکیبات آلی و غیرآلی را از بین میبرد و همچنین نشان

دادند که فرآیند UF ته نشینی غشای RO را کاهش میدهد. چن و همکاران یک مطالعه نمونه را برای برآورد عملکرد تصفیه خانه پساب شهری که دارای فرآیند پالایش ترکیبی انعقاد- دیسک، میکروپالایش و غشاهای تجزیه معکوس میباشد انجام دادند. آنها زدودن مواد آلی، فلزات، شیبفلزات و مواد مغزی از پساب را با استفاده از تکنیکهای فوقالذکر آزمایش نمودند. نتایج نشان دادند که اغلب آلایندههای آب توسط غشای RO بیشتر از دیگر تکنیکها جدا شده اند (۶۹)

ته نشینی شیمیایی

این روش یک تکنیک نسبتاً ارزان و موثر است که در صنایع مختلف به کار میرود. به منظور تشکیل ته نشینی فلزی، مواد شیمیایی به محلول افزوده میشوند که باعث تغییر pH میگردد و نمیتواند اجازه حل نشدن رسوب در محلول را بدهد. در فرآیند ته نشینی، این رسوبات جدا شده و مابقی محلول برای برخی اهداف دیگر به کار میرود. رسوب شیمیایی در حذف ($Zn(II)$ ، $Cu(II)$ ، $Cd(II)$ ، $Mn(II)$) موثرترین است. تانونگ و همکاران مطالعاتی را پیرامون زدودن نیکل و منگنز از طریق افزودن سدیم کربنات انجام دادند که پی برده شد در pH برابر ۹ کاملاً ته نشین شده است. معمولاً، میتوان از این روش در پساب حاوی غلظت بالایی از یون فلز سنگین استفاده نمود اما در حالت غلظت کم یون فلز، این روش مناسب نمیشود. این روش میتواند منجر به تولید لجن اضافی با محتوای آب زیاد ناشی از ته نشینی فلزات غیر قابل حل گردد که فرآوری و دفع آن دشوار بوده و به عنوان پسماند خطرناک در نظر گرفته میشود. روشهای دیگر نظیر پالایش و فرآیند ته نشینی برای زدودن این رسوبات از آب مورد نیاز میباشد. سپس آب تصفیه شده میتواند مجدداً مورد استفاده قرار گیرد یا به محیط تخلیه شود. ته نشینی شیمیایی نیازمند مقدار زیادی از مواد شیمیایی برای ته نشین کردن فلزات میباشد. به دلیل سادگی و هزینه کم آن، این روشها معمولاً در کاربردهای مقیاس صنعتی به کار میروند. فرآیند ته نشینی مواد شیمیایی کنونی عبارت است از ته نشینی هیدروکسید و ته نشینی سولفید (۷۰)

ته نشینی هیدروکسید

ته نشینی هیدروکسید به دلیل فرآوری آسان و هزینه پایین آن یک روش برتر برای جداسازی فلز سنگین میباشد. اصلاح pH هیدروکسیدهای فلز را که در محیط قلیائی نامحلول هستند افزایش میدهد. در حالت یونهای سه ظرفیتی، هیدروکسیدهای دو لایه برای زدودن فلز سنگین تشکیل میگردند. انواع مختلفی از عوامل رسوب نظیر آهک، کلسیم هیدروکسید و سدیم هیدروکسید برای تشکیل رسوب هیدروکسید در دسترس میباشند. آهک و سنگ آهک به دلیل دسترسی آسان و هزینه پایین آنها به طور متداول مورد استفاده قرار میگیرند. جدهاو و همکاران یک مطالعه تفصیلی را پیرامون زدودن فلز سنگین فلورید از جریان پساب با استفاده از عوامل رسوبی نظیر کلسیم هیدروکسید، منگنز هیدروکسید و کلسیم کلرید انجام دادند. این مواد شیمیایی نتایج تاثیرگذاری را در بازه pH بین ۴ تا ۱۴ نشان دادند. در میان ۳ نمک، ثابت شد که نمک کلسیم تاثیرگذارترین نمک در ته نشینی فلورید بود. برخی محققان از تکنیک ترکیبی فرآیند الکترو- فنتون با رسوب شیمیایی برای کاهش COD و یونهای روی موجود در پسابهای صنعتی رایون استفاده نمودند. آنها پی بردند که ۸۸ درصد COD به دلیل فرآیند الکترو- فنتون کاهش یافته است اما اثری بر روی جداسازی روی نداشته است. گوش و همکاران از آهک به عنوان عامل رسوب برای جداسازی روی استفاده نمودند که نتیجه حاصل حاکی از راندمان ۹۹-۹۹/۳ درصدی جداسازی روی در بازه pH حدود ۹ تا ۱۰ بود و غلظت روی از ۳۲ به ۰.۲ میلیگرم بر لیتر کاهش یافت. راماکریشنیا و پرائیما یک مطالعه رسوبگذاری شیمیایی را برای جداسازی کروم از پسابهای صنعتی و مصنوعی با استفاده از ۱۰۰ و ۴۰۰ میلیگرم بر لیتر $Ca(OH)_2 + NaOH$ و $FeCl_3$ به عنوان عوامل رسوب انجام دادند. راندمان جداسازی کروم با استفاده از کلسیم هیدروکسید و سدیم هیدروکسید ۹۹/۷ درصد به دست آمد و

منجر به تولید حدود ۷ میلیگرم بر لیتر لجن شد. آنها به این نتیجه رسیدند که کلسیم هیدروکسید و سدیم هیدروکسید بهترین عوامل رسوب برای جداسازی کروم میباشند. اما استفاده از روش تهنشینی هیدروکسید محدود میباشد زیرا رسوب هیدروکسید فلز میتواند به هر دو صورت پایه و اسید واکنش دهد. ژانگ و همکاران از NaOH به عنوان یک عامل رسوبگذار برای تهنشینی هیدروکسید محلول پسماند لاتریت مصنوعی حاوی ۷ گرم بر لیتر Mn^{2+} ، ۱۵ گرم بر لیتر Mg^{2+} و ۰.۵ گرم بر لیتر Ca^{2+} استفاده نمودند. آنها نشان دادند که تهنشینی هیدروکسید برای جداسازی منگنز بر روی منیزیم کافی نمیشد نیاز به pH بالاتر از ۸/۵ برای دستیابی به Mn بیش از ۱۰۰ میلیگرم بر لیتر و pH بالاتر از ۹ برای دستیابی به Mn^{2+} بیش از ۱۰ میلیگرم بر لیتر با هم‌رسوبی اساسی منگنز مورد نیاز میباشد. (۷۱)

رسوب گذاری الکتریکی

هنگامی که الکتریسته به سطح الکترود اعمال میشود، یونها برای تبادل الکترود با بار مخالف در محلول مورد نیاز هستند. گریم شاو و همکاران تحقیق پیرامون فرآیند رسوبگذاری الکتریکی برای جداسازی نیکل از محلولهای اسیدی با استفاده از راکتور الکتروشیمیایی استوانهای را مورد بررسی قرار دادند. مدل عددی رسوبگذاری الکتریکی همانند مدل سینتیک تافل برای تحلیل رفتار تهنشینی الکتریکی نیکل انجام شد. آنها از سیستم هوادهی نیتروژن استفاده نمودند که راندمان جریان و رسوبگذاری الکتریکی نیکل را افزایش میدهد. در این مطالعه، نرخ رسوبگذاری الکتریکی نیکل با افزایش pH و دما افزایش مییابد. لامبرت فرآیند رسوبگذاری الکتریکی را در فرآورش ناپیوسته‌عصاره پسماند معدنکاری با استفاده از RuO₂/Ti به عنوان آند و مس (یا فولاد ضد زنگ) به عنوان کاتد اعمال نمود. نتایج نشان دادند که رسوبگذاری الکتریکی مس با الکترود مسی در چگالی جریان حدود ۱/۳ آمپر و زمان فرآوری ۸۰ دقیقه برابر با ۸۶ درصد میباشد. یک رهیافت کامل (یکپارچه) همانند فراصوت و فرآیند رسوبگذاری الکتریکی توسط چانگ و همکاران برای احیای پساب EDTA- مس گزارش شد. در این مطالعه ۹۵.۶ درصد وزنی مس در pH بین ۳ تا ۷ با بازه ولتاژ از ۰.۵ تا ۲ ولت بر سانتیمتر مربع جدا گردید و نتایج نشان دادند که این روش دارای بهترین پتانسیل در کاربردهای تصفیه پساب میباشد (۷۷)

(۷۸): انواع فلزات جدا شده در فرآیند انعقاد الکتریکی (جدول ۳)

ردیف	الکترودهای به کار رفته	چگالی جریان	PH	مدت زمان (دقیقه)	فلزات جدا شده
۱	الکترودهای آلومینیومی / آهنی	۵۶-۲۲۲ A/m ²	۳-۹	۲۰-۱۱۰	کروم
۲	الکترودهای گرافیتی و آهنی	-----	۶.۵	-----	آرسنیک
۳	آلیاژ آلومینیوم	۱/۰-۲ A dm	۷/۰	۹۰	فلورید
[۲]	الکترودهای آلومینیومی و آهنی	۲۰-۲ A m	----- --	۳۰	منگنز و آهن
[۲]	الکترو آلومینیومی	۶/۲۵ mA/cm ²	۷	۶۰	منگنز

شناوری الکتریکی / شناوری الکترولیتی

با فرآیند الکترولیز، حبابهای کوچک گازهای هیدروژن و اکسیژن تولید میشوند که منجر به بالا آمدن پسماند بر روی پساب میگردد. ساختار شبکه الکتروود در مخزن شناوری اختلاط مناسبی را در محلول آبی به وجود می آورد. این روش امکان جداسازی فلزات سنگین و ترکیبات آلی از پساب را فراهم می آورد. فرآیند شناوری الکتریکی میتواند به صورت کارآمد در سیستمهای خالصسازی آب محلی به کار رود زیرا این تکنیک منجر به تولید آلایندة ثانویه نميگردد. کولسنیکوف و همکاران روکشگرهای کاتدی، آندی و غیر یونی با غلظت ۱۰، ۵۰-۲ و ۱۰۰ میلیگرم بر لیتر در pH در بازه ۹.۵ تا ۱۰.۵ برای جداسازی هیدروکسیدهای مس، نیکل و روی مورد مطالعه قرار دادند. بیش از ۹۰ درصد جداسازی در فرآیند شناوری الکتریکی با چگالی جریان حدود ۰.۲ آمپر بر لیتر و مدت زمان ۲۰ دقیقه به دست آمد. برخی محققان نشان دادند که فرآیند شناوری الکتریکی تا ۹۷ درصد سرب، باریم و روی را با استفاده از الکترودهای شبکههای فولادی ضد زنگ با مصرف انرژی ۱۰ کیلووات ساعت بر مترمکعب جدا مینماید (۷۹)

۲-۱-۲: تراکافت الکتریکی

تراکافت الکتریکی (ED) یک روش غشای الکتریکی است که یونها را به کمک الکتریسیته اعمالی در امتداد غشا انتقال میدهد. توده ED در غشای تبادل آنیونی و غشای تبادل کاتیونی جای میگیرد که بین دو الکتروود قرار میگیرند. این توده تنها اجازه عبور آنیونها و کاتیونها را از درون غشا میدهد و بر روی غشای تبادل یون انباشته شوند. بنابراین، محلول آبی ورودی به غشا به دو قسمت عصاره و رقیق کننده تقسیم میشود. تراکافت الکتریکی دارای مزایایی نظیر استفاده کم از مواد شیمیایی و بازیافت زیاد آب میباشد. سادیراثوا از غشای مایع همراه با تری-ان-اکتیلیمین به علاوه مخلوطی از دی فسفریک اسید در دی کلرو اتان ۱ و ۲ برای جداسازی کروم از محلولهای آبی در فرآیند تراکافت الکتریکی استفاده نمود. استخراج کامل کروم در این مطالعه با تغییر جریان، زمان و غلظت مولفهها حاصل شد. ضعف عمده در فرآیند تراکافت الکتریکی انسداد و جرمگرفتگی غشا میباشد بنابراین محدود به کاربردهای پساب است (۷۹)

جذب سطحی

امروزه فرآیند جذب سطحی به عنوان یک روش کارآمد و قابل تحسین نسبت به دیگر تکنولوژیهای تصفیه پساب به منظور حذف فلزات سنگین شناخته شده است. این روش پساب تصفیه را با کیفیت بالایی عرضه مینماید. این فرآیند یک روش انتقال جرم میباشد که در آن پسماند از طریق عوامل فیزیکی و شیمیایی به درون محلهای فعال موجود بر روی جاذب سطحی به کار رفته انتقال مییابد. فرآیند جذب سطحی به دلیل هزینه عملیاتی کمتر، مشکلات رسوبگرفتگی کمتر و مقرون به صرفه بودن برای جداسازی فلزات سنگین از پساب یک روش جایگزین و مطمئن برای فرآورش سنتی میباشد. در فرآیند جذب سطحی، جاذبها میتوانند از طریق فرآیند دفع سطحی مجددا تولید شوند زیرا این تکنیک یک روش بازگشتپذیر میباشد و جاذب مجددا تولید شده میتواند برای اهداف مختلفی به کار رود. چندی روش برای احیای جاذب موجود هستند. به دلیل احیا، جذب سطحی به عنوان یک روش قابل قبول زیست محیطی شناخته شده است. احیای حرارتی، روش چرخش (نوسان) فشار و احیای الکتروشیمیایی روشهای موجودی هستند که به طور گسترده برای فرآیند احیا به کار میروند. بر این اساس، فرآیند جذب سطحی تبدیل به یکی از تکنیکهای پیشرو در حوزه تصفیه پساب شده است. تکنیک جذب سطحی آسان، انعطافپذیر و دارای طرحی ساده میباشد و آلایندهای سمی تولید نمی نماید. انواع مختلفی از جاذبها برای از بین بردن فلزات سنگین موجود در پساب توسعه یافته اند. جنبههای اصلی مورد نیاز برای انتخاب جاذبها از لحاظ هزینه حائز اهمیت هستند و مناسبترین جاذبهای این تکنولوژی میباشند. مساحت سطح

زیاد، توزیع اندازه حفره، گروههای عاملی و قطبیت جاذب سطحی راندمان فرآیند جذب سطحی را تعیین مینمایند (۸۱)

جاذبههای زیستی

جذب سطحی یک تکنیک ابداعی جدید برای حذف فلزات سنگین از پساب میباشد. این روش به عنوان یک روش کارآمد و فرآیند سمزدایی برای زدودن فلزات سنگین حتی در غلظتهای کم کاربرد دارد. جذب زیستی نوعی فرآیند جذب سطحی میباشد که متشکل از حالت جامد (جاذب) و حالت مایع (حلال) میباشد. هر دو ماده زیستی ماندگار و غیر ماندگار برای حذف فلزات سنگین مورد نیاز میباشد. ماده مورد نیاز به هیچگونه محیط رشدی برای رشد آنها ندارد که مزیت اصلی استفاده از ماده مورد نسبت به ماده زیستپذیر میباشد. در این روش، جاذبهایی نظیر باکتری، مخمر، قارچ، جلبک، خاک اره، پوسته های بذر، ژلهای پکتین چغندر قند و پوست سیب زمینی و غیره به دلیل راندمان بالا و هزینه کم آن به کار میروند. جاذبههای زیستی به عنوان یک جاذب سطحی کم هزینه مد نظر میباشد و میتوانند از صنایع مختلف به عنوان محصول پسماند به دست آیند. به دلیل وجود گروههای عاملی نظیر الکل، آلدهیدها، کتونها، کربوکسیلها، اتر، گروههای فنولیک فعالیت جذب سطحی را برای جداسازی فلز ارتقا میدهند. عوامل مهم موثر بر پتانسیل زیست توده در فرآیند جذب سطحی عبارتند از: pH، دما، دز جاذب سطحی، غلظت فلز و زمان تماس و غیره. پدیدههای اصلی در فرآیند جذب زیستی عبارتند از: جذب سطحی، تبادل یون، پیچیدگی و تهنشینی سطحی (۸۳)

(۸۴)ها CNT جدول ۴: مکانیزم برهمکنش در

ردیف	نوع CNT	فلزات جدا شده	PH	دز جاذب	مکانیزم برهمکنش	منطبق ترین مدل	R _۲
۱	MWCNT های خام	Cr(VI)	۳	۷۵ میلیگرم	برهمکنش الکترواستاتیکی	لانگمویر	۰/۹۷۳
۲	CNT های خام	Cd(II)	۷	۵۰ میلیگرم	برهمکنش الکترواستاتیکی	لانگمویر ، فرندلیچ	۰/۹۷۹ و ۰/۹۱۲
۳	MWCNT های تزئین شده با آلومینا	Cd(II)	۷	۵۰ میلیگرم	برهمکنش الکترواستاتیکی ، جذب سطحی فیزیکی ، تهنشینی سطحی ،برهمکنش واندروالس	لانگمویر ، فرندلیچ	۰/۹۹۷۲ ،۰/۹۸۳۰
۴	نانوتیوبهای کربن پوشیده شده با MnO _۲	Hg(II)	۵-۷	-----	برهمکنش الکترواستاتیک	فرندلیچ	۰/۹۹۷

نتیجه گیری

اثر تصفیه برای جداسازی فلزات سنگین موضوع مهمی است که باید مورد بحث قرار گیرد. تحقیق مبتنی بر اجرای تکنولوژی تصفیه در مقیاس آزمایشگاهی به دلایل مختلف نظیر رشد تسریع یافته صنعتی سازی، آلودگی ناشی از فلزات سنگین و دسترس پذیری فلزات سنگین در محیط زیست به مقیاس نمونه و مقیاس صنعتی گسترش یافته است. اما احتمال به وجود آمدن برخی مشکلات نامعلوم به دلیل پیشرفت فوق الذکر در تکنولوژی تصفیه وجود دارد. به دلیل اینکه اغلب مطالعات مورد بحث در اینجا مطالعات مقیاس آزمایشگاهی بودند. به منظور اعمال تکنیکهای تصفیه در مقیاس نمونه و مقیاس صنعتی، نیاز است تا مطالعات مربوط به این دوراندازه های آتی که بهترین جایگاه را در کاربردهای صنعتی و نیز سطح تجاری ارائه مینمایند تحلیل شوند. نیاز است تا این جنبه به منظور ارائه تکنولوژیهای تصفیه در مقیاس بزرگ بیشتر مورد بررسی قرار گیرد.

منابع

- [۱] M.R. Awual, M. Ismael, M.A. Khaleque, T. Yaita, Ultra-trace copper(II) detection and removal from wastewater using novel meso-adsorbent, J. Ind. Eng. Chem. ۲۰ (۲۰۱۴) ۲۳۳۲-۲۳۴۰.
- [۲] D. Mehta, S. Mazumdar, S.K. Singh, Magnetic adsorbents for the treatment of water/wastewater — a review, J. Water Process Eng. ۷ (۲۰۱۵) ۲۴۴-۲۶۰.
- [۳] J. Gao, F. Liu, P. Ling, J. Lei, L. Li, C. Li, A. Li, High efficient removal of Cu(II) by a chelating resin from strong acidic solutions: complex formation and DFT certification, Chem. Eng. J. ۲۲۲ (۲۰۱۳) ۲۴۰-۲۴۷.
- [۴] M.R. Awual, T. Yaita, S.A. El-Safty, H. Shiwaku, S. Suzuki, Y. Okamoto, Copper(II) ions capturing from water using ligand modified a new type mesoporous adsorbent, Chem. Eng. J. ۲۲۱ (۲۰۱۳) ۳۲۲-۳۳۰.
- [۵] W.W. Tang, G.M. Zeng, J.L. Gong, J. Liang, P. Xu, C. Zhang, B. Bin Huang, Impact of humic/fulvic acid on the removal of heavy metals from aqueous solutions using nanomaterials: a review, Sci. Total Environ. ۴۶۸-۴۶۹ (۲۰۱۴) ۱۰۱۴-۱۰۲۰.
- [۶] Y.T. Zhou, C. Branford-White, H.L. Nie, L.M. Zhu, Removal of Cu²⁺ from aqueous solution by chitosan-coated magnetic nanoparticles modified with α -ketoglutaric acid, J. Colloids Interface Sci. ۳۳۰ (۲۰۰۹) ۲۹-۷۳.
- [۷] D.J. Ennigrou, M. Ben Sik Ali, M. Dhahbi, Copper and Zinc removal from aqueous solutions by polyacrylic acid assisted-ultrafiltration, Desalination ۳۴۳ (۲۰۱۴) ۸۲-۸۷.
- [۸] B. An, Q. Liang, D. Zhao, Removal of arsenic(V) from spent ion exchange brine using a new class of starch-bridged magnetite nanoparticles, Water Res. ۴۵ (۲۰۱۱) ۱۹۶۱-۱۹۷۲.
- [۹] M.A. Barakat, New trends in removing heavy metals from industrial wastewater, Arab. J. Chem. ۴ (۲۰۱۱) ۳۶۱-۳۷۷.
- [۱۰] S.A. Abo-Farha, A.Y. Abdel-Aal, I.A. Ashour, S.E. Garamon, Removal of some heavy metal cations by synthetic resin purolite C۱۰۰, J. Hazard. Mater. ۱۶۹ (۲۰۰۹) ۱۹۰-۱۹۴.
- [۱۱] T. Motsi, N.A. Rowson, M.J.H. Simmons, Adsorption of heavy metals from acid mine drainage by natural zeolite, Int. J. Miner. Process. ۹۲ (۲۰۰۹) ۴۲-۴۸.

- [۱۲] H. Figueiredo, C. Quintelas, Tailored zeolites for the removal of metal oxyanions: overcoming intrinsic limitations of zeolites, J. Hazard. Mater. ۲۷۴ (۲۰۱۴) ۲۸۷-۲۹۹.
- [۱۳] B. Alyuz, S. Veli, Kinetics and equilibrium studies for the removal of nickel and zinc from aqueous solutions by ion exchange resins, J. Hazard. Mater. ۱۶۷ (۲۰۰۹) ۴۸۲-۴۸۸.
- [۱۴] H.S. Jamil, I.H.A. El-Maksoud, S.T.E. Wakeel, Application of zeolite prepared from Egyptian kaolin for the removal of heavy metals: i. Optimum conditions, Desalination ۲۵۸ (۲۰۱۰) ۳۴-۴۰.
- [۱۵] F. Pepe, B. de Gennaro, P. Aprea, D. Caputo, Natural zeolites for heavy metals removal from aqueous solutions: modeling of the fixed bed Ba^{2+}/Na^{+} ionexchange process using a mixed phillipsite/chabazite-rich tuff, Chem. Eng. J. ۲۱۹ (۲۰۱۳) ۳۷-۴۲.
- [۱۶] R.D. Ambashta, M. Sillanpaa, Water purification using magnetic assistance: a review, J. Hazard. Mater. ۱۸۰ (۲۰۱۰) ۳۸-۴۹.
- [۱۷] O.N. Kononova, G.L. Bryuzgina, O.V. Apchitaeva, Y.S. Kononov, Ion exchange recovery of chromium(VI) and manganese(II) from aqueous solutions, Arab. J. Chem. (۲۰۱۵), <http://dx.doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.05.021> (Article in press).
- [۱۸] M.R. Mahmoud, N.K. Lazaridis, K.A. Matis, Study of flotation conditions for cadmium(II) removal from aqueous solutions, Process Saf. Environ. Prot. (۲۰۱۴), <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2014.06.012> (Article in press).
- [۱۹] M. Karhu, T. Leiviska, J. Tanskanen, Enhanced DAF in breaking up oil-in-water emulsions, Sep. Purif. Technol. ۱۲۲ (۲۰۱۴) ۲۳۱-۲۴۲.
- [۲۰] H. Al-Zoubi, K.A. Ibrahim, K.A. Abu-Sbeih, Removal of heavy metals from wastewater by economical polymeric collectors using dissolved air flotation process, J. Water Process Eng. ۸ (۲۰۱۵) ۱۹-۲۲.
- [۲۱] J. Amaral Filho, A. Azevedo, R. Etchepare, J. Rubio, Removal of sulfate ions by dissolved air flotation (DAF) following precipitation and flocculation, Int. J. Miner. Process. ۱۴۹ (۲۰۱۶) ۱-۸.
- [۲۲] F.S. Hoseinian, M. Irannajad, A.J. Nooshabadi, Ion flotation for removal of Ni(II) and Zn(II) ions from wastewaters, Int. J. Miner. Process. (۲۰۱۵), <http://dx.doi.org/10.1016/j.minpro.2015.07.006> (Article in press).
- [۲۳] M.H. Salmani, M. Davoodi, M.H. Ehrampoush, M.T. Ghaneian, M.H. Fallahzadah, Removal of cadmium(II) from simulated wastewater by ion flotation technique, Iranian J. Environ. Health Sci. Eng. ۱۰ (۲۰۱۳) ۱۶.
- [۲۴] Z. Liu, F.M. Doyle, Ion flotation of Co^{2+} , Ni^{2+} , and Cu^{2+} using dodecyldiethylenetriamine (Ddien), Langmuir ۲۵ (۲۰۰۹) ۸۹۲۷-۸۹۳۴.
- [۲۵] X.Z. Yuan, Y.T. Meng, G.M. Zeng, Y.Y. Fang, J.G. Shi, Evaluation of tea-derived biosurfactant
- [۲۶] on removing heavy metal ions from dilute wastewater by ion flotation, Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp. ۳۱۷ (۲۰۰۸) ۲۵۶-۲۶۱.

- [۲۷] A. Salmani Abyaneh, M.H. Fazaelipoor, Evaluation of rhamnolipid (RL) as a biosurfactant for the removal of chromium from aqueous solutions by precipitate flotation, *J. Environ. Manage.* ۱۶۵ (۲۰۱۶) ۱۸۴-۱۸۷.
- [۲۸] S. Lyu, W. Chen, W. Zhang, Y. Fan, W. Jiao, Wastewater reclamation and reuse in China: opportunities and challenges, *J. Environ. Sci. (China)* (۲۰۱۵), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jes.2015.11.012> (Article in press).
- [۲۹] M.A. Barakat, E. Schmidt, Polymer-enhanced ultrafiltration process for heavy metals removal from industrial wastewater, *Desalination* ۲۵۶ (۲۰۱۰) ۹۰-۹۳.
- [۳۰] N.S.A. Mutamim, Z.Z. Noor, M.A.A. Hassan, G. Olsson, Application of membrane bioreactor technology in treating high strength industrial wastewater: a performance review, *Desalination* ۳۰۵ (۲۰۱۲) ۱-۱۱.
- [۳۱] N.H. an Tran, H.H. ao Ngo, T. Urase, K.Y. ew, H. Gin, A critical review on characterization strategies of organic matter for wastewater and water treatment processes, *Bioresour. Technol.* (۲۰۱۵), <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.091> (Article in press).
- [۳۲] C.C. Molgora, A.M. Domínguez, E.M. Avila, P. Drogui, G. Buelna, Removal of arsenic from drinking water: a comparative study between electrocoagulationmicrofiltration and chemical coagulation-microfiltration processes, *Sep. Purif. Technol.* ۱۱۸ (۲۰۱۳) ۶۴۵-۶۵۱.
- [۳۳] R. Moreno-tovar, E. Terrés, J.R. Rangel-mendez, Oxidation and EDX. elemental mapping characterization of an ordered mesoporous carbon: pb(II) and Cd(II) removal, *Appl. Surf. Sci.* ۳۰۳ (۲۰۱۴) ۳۷۳-۰۸۳
- [۳۴] Y. Kang, Z. Guo, J. Zhang, H. Xie, H. Liu, C. Zhang, Enhnsncement of Ni (II) removal by urea modified activated carbon derived from Pennisetum alopecuroides with phosphoric acid activation, *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* ۰۰۰ (۲۰۱۵) ۱-۷, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtice.2015.10.023> (Article in press).
- [۳۵] C.K. Ahn, D. Park, S.H. Woo, J.M. Park, Removal of cationic heavy metal from aqueous solution by activated carbon impregnated with anionic surfactants, *J. Hazard. Mater.* ۱۶۴ (۲۰۰۹) ۱۱۳۰-۱۱۳۱
- [۳۶] K. Marlene, M. Aguilar, Y. Amano, M. Machida, Ammonium persulfate oxidized activated carbon fiber as a high capacity adsorbent for aqueous Pb(II), *J. Environ. Chem. Eng.* ۴ (۲۰۱۶) ۴۶۴۴-۴۶۵۲.
- [۳۷] W.L. Sun, J. Xia, Y.C. Shan, Comparison kinetics studies of Cu(II) adsorption by multi-walled carbon nanotubes in homo and heterogeneous systems: effect of nano-SiO₂, *Chem. Eng. J.* ۲۵۰ (۲۰۱۴) ۱۱۹-۱۲۷.
- [۳۸] F.A. Al-Khaldi, B. Abu-Sharkh, A.M. Abulkibash, M.I. Qureshi, T. Laoui, M.A. Atieh, Effect of acid modification on adsorption of hexavalent chromium (Cr (VI)) from aqueous solution by activated carbon and carbon nanotubes, *Desalin. Water Treat.* ۵۷ (۲۰۱۵) ۷۲۳۲-۷۲۴۴.
- [۳۹] F.A. Al-Khaldi, B. Abu-Sharkh, A.M. Abulkibash, M.A. Atieh, Cadmium removal by activated carbon, carbon nanotubes, carbon nanofibers, and carbon fly ash: a comparative study, *Desalin. Water Treat.* ۵۳ (۲۰۱۳) ۱۴۱۷-۱۴۲۹.

- [۴۰] J. Liang, J. Liu, X. Yuan, H. Dong, G. Zeng, H. Wu, H. Wang, J. Liu, S. Hua, S. Zhang, Z. Yu, X. He, Y. He, Facile synthesis of alumina-decorated multi-walled carbon nanotubes for simultaneous adsorption of cadmium ion and trichloroethylene, Chem. Eng. J. ۲۷۳ (۲۰۱۵) ۱۰۱-۱۱۰.
- [۴۱] H.K. Moghaddam, M. Pakizeh, Experimental study on mercury ions removal from aqueous solution by MnO_۲/CNTs nanocomposite adsorbent, J. Ind. Eng. Chem. ۲۱ (۲۰۱۵) ۲۲۱-۲۲۹.
- [۴۲] P.H. Chen, C.-F. Hsu, D.D. Tsai, Y.-M. Lu, W.-J. Huang, Adsorption of mercury from water by modified multi-walled carbon nanotubes: adsorption behaviour and interference resistance by coexisting anions, Environ. Technol. ۳۵ (۲۰۱۴) ۱۹۳۵-۱۹۴۴.
- [۴۳] N. Sankararamakrishnan, A. Gupta, S. Vidyarthi, Enhanced arsenic removal at neutral pH using functionalized multiwalled carbon nanotubes, J. Environ. Chem. Eng. ۲ (۲۰۱۴) ۸۰۲-۸۱۰.
- [۴۴] H. Chen, J. Li, D. Shao, X. Ren, X. Wang, Poly(acrylic acid) grafted multiwall carbon nanotubes by plasma techniques for Co(II) removal from aqueous solution, Chem. Eng. J. ۲۱۰ (۲۰۱۲) ۴۷۵-۴۸۱.
- [۴۵] B.S. Tawabini, S.F. Al-Khalidi, M.M. Khaled, M. a Atieh, Removal of arsenic from water by iron oxide nanoparticles impregnated on carbon nanotubes, J. Environ. Sci. Health. A. Tox. Hazard. Subst. Environ. Eng. ۴۶ (۲۰۱۱) ۲۱۵-۲۲۲.
- [۴۶] B. Hayati, A. Maleki, F. Najafi, H. Daraei, F. Gharibi, G. McKay, Synthesis and characterization of PAMAM/CNT nanocomposite as a super-capacity adsorbent for heavy metal
- [۴۷] (Ni^{۲+}, Zn^{۲+}, As^{۳+}, Co^{۲+}) removal from wastewater, J. Mol. Liq. (۲۰۱۶), <http://dx.doi.org/10.1016/j.molliq.2016.10.053> (Article in press).
- [۴۸] V.K.K. Upadhyayula, S. Deng, M.C. Mitchell, G.B. Smith, Application of carbon nanotube technology for removal of contaminants in drinking water: a review, Sci. Total Environ. ۴۰۸ (۲۰۰۹) ۱-۳۱.
- [۴۹] F. Kaczala, M. Marques, W. Hogland, Lead and vanadium removal from a real industrial wastewater by gravitational settling/sedimentation and sorption onto Pinus sylvestris sawdust, Bioresour. Technol. ۱۰۰ (۲۰۰۹) ۲۳۵-۲۴۳.
- [۵۰] O.S. Amuda, F.E. Adelowo, M.O. Ologunde, Kinetics and equilibrium studies of adsorption of chromium(VI) ion from industrial wastewater using Chrysophyllum albidum (Sapotaceae) seed shells, Colloids Surf. B Biointerfaces ۶۸ (۲۰۰۹) ۱۸۴-۱۹۲.
- [۵۱] P. SenthilKumar, S. Ramalingam, V. Sathyaselvabala, S.D. Kirupha, S. Sivanesan, Removal of copper(II) ions from aqueous solution by adsorption using cashew nut shell, Desalination ۲۶۶ (۲۰۱۱) ۶۳-۷۱.
- [۵۲] M.A. Hossain, H.H. Ngo, W.S. Guo, T.V. Nguyen, Palm oil fruit shells as biosorbent for copper removal from water and wastewater: experiments and sorption models, Bioresour. Technol. ۱۱۳ (۲۰۱۲).

- [۵۴] Platinum, in Air Quality Guidelines- Second Edition. ۱۰۵۵: WHO Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark
- [۵۵] Craig, B.D. and D.S. Anderson, "Platinum, in Handbook of Corrosion Data", Asm international, ۲۰۲۱, p. ۹۹۹۸
- [۵۶] I.hussain,A.singh,S.singh," Green synthesis of nanoparticles and its potential application",Biotechnol Lett. ۲۰۱۶ Apr;۳۸(۴):۵۴۵-۰۶