

کاربرد فرآیند الکتروکواگولاسیون با استفاده از الکترودهای آلومینیومی در حذف فلز سنگین کادمیوم از محیط‌های آبی

تاریخ دریافت مقاله: ۸۶/۳/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۸۶/۶/۲۱

دکتر ادريس بذرافشان*، دکتر امير حسين محوی**

* دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی زاهدان، دانشکده بهداشت، گروه بهداشت محیط (مرکز تحقیقات توسعه اجتماعی و ارتقاء سلامت)

** دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی تهران، دانشکده بهداشت، مرکز تحقیقات محیط زیست

چکیده

زمینه و هدف: هدف این مطالعه ارزیابی راندمان حذف کادمیوم از محیط‌های آبی (آب و فاضلاب‌های صنعتی) از طریق فرآیند الکتروکواگولاسیون با استفاده از الکترودهای آلومینیومی بود.

مواد و روش کار: این بررسی یک مطالعه تجربی در مقیاس آزمایشگاهی است که بصورت پایلوت اجرا گردید. مخزن شیشه‌ای به حجم ۱/۸۷ لیتر (حجم موثر یک لیتر) و حاوی چهار الکترود صفحه‌ای آلومینیومی جهت انجام این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت. الکترودها به روش دو قطبی به یک منبع تغذیه (جهت تبدیل جریان برق متناوب به مستقیم) متصل شدند. در ابتدا مخزن با فاضلاب سنتتیک حاوی فلز سنگین کادمیوم در غلظت‌های اولیه ۵، ۵۰ و ۵۰۰ میلی گرم در لیتر پر می شد و سپس عملیات واکنش آغاز می شد. درصد حذف یون کادمیوم در مقادیر pH برابر ۳، ۷ و ۱۰ و در گستره پتانسیل الکتریکی ۲۰، ۳۰ و ۴۰ ولت در زمانهای واکنش ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه تعیین شد.

یافته‌ها: نتایج حاصله از انجام آزمایشات حاکی از آن است که بالاترین راندمان حذف یون کادمیوم در pH برابر ۱۰ و اختلاف پتانسیل ۴۰ ولت حاصل شد. از طرفی نتایج حاصله نشان داد که با افزایش غلظت یون کادمیوم زمان مورد نیاز برای دستیابی به راندمان حذف مناسب نیز بایستی افزایش یابد.

نتیجه‌گیری: در مجموع مشخص شد که فرآیند الکتروکواگولاسیون با استفاده از الکترودهای آلومینیومی روشی مناسب و مطمئن جهت تصفیه پسابهای حاوی فلز سنگین کادمیوم است و با توجه به راندمان بالای حذف می توان پساب خروجی را با اطمینان در محیط تخلیه نمود. (مجله طبیب شرق، سال نهم، شماره ۱، بهار ۱۳۸۶، ص ۶۱ تا ۷۰)

کل‌واژه‌ها: فرایند الکتروکواگولاسیون، الکترودهای آلومینیومی، کادمیوم، محیط آبی

مقدمه

امروزه یکی از چالش‌های عمده پیش روی بشر، تامین آب سالم برای جمعیت عظیمی از مردم در سرتاسر جهان می باشد. نیاز برای آب تمیز و سالم بویژه در کشورهای جهان سوم از اهمیت خاصی برخوردار است. رودخانه‌ها، کانالها، مصب‌ها و دیگر منابع آب بدلیل تخلیه کنترل نشده پسابهای صنعتی و دیگر فعالیتهای آتروپوژنیک و فرآیندهای طبیعی همواره در معرض انواع آلودگی‌ها قرار دارند.^(۱) فلزات سنگین از جمله

رایج‌ترین آلاینده‌هایی هستند که معمولاً در غلظت‌های بالا در فاضلاب صنایع یافت می شوند و موجب آسیب رساندن به محیط زیست آبی و به مخاطره افتادن سلامت انسانها می‌شوند.^(۲،۳) یکی از این فلزات سنگین، فلز سنگین کادمیوم است که در اثر عملیات صنعتی مختلف از قبیل حفر معدن و ذوب فلزات، آبکاری فلزات، سرامیک سازی و تولید رنگدانه‌های معدنی، پلاستیک سازی، رنگ پارچه و مواردی

دیگر وارد محیط می شود. ^(۴) از کل کادمیوم مورد مصرف در صنعت ۹۰ درصد در آبکاری، تولید رنگدانه ها، تثبیت کننده پلاستیک، آلیاژها و باتری ها و بیشتر از ۱۰ درصد باقیمانده برای تیوب فسفری تلویزیون، قارچ کشی و پوسته ها و میله های راکتور هسته ای استفاده می شود. ^(۵)

فلز سنگین کادمیوم از سمیت بالایی برخوردار بوده و مدارکی مبتنی بر سرطانزایی آن موجود است، به نحویکه سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا (USEPA) ^۱ کادمیوم را به عنوان یک سرطانزای محتمل در انسان (گروه B1) ^۲ بر اساس مثبت بودن آزمایش سرطانزایی طبقه بندی نموده است. ^(۴)

اثرات سوء بهداشتی کادمیوم بر انسان ثابت شده و مواردی از برونشیت، آمفیوزم، آنمی و سنگ های کلیوی در نتیجه مواجهه با این فلز سمی گزارش شده است. در مواردی که انسانها در معرض غلظت های بالایی قرار داشته اند، همچون مورد ژاپن، شیوع بیماری ایتا ایتای ^۳ (نوعی پوکی استخوان) و صدمات کلیوی غیر قابل بازگشت مخصوصاً در زنان سالخورده به وجود آمده است. مطابق استانداردهای موجود حداکثر غلظت مجاز این آلاینده در آب آشامیدنی برابر ۰/۰۰۵ میلی گرم در لیتر تعیین شده است. ^(۶)

به منظور حذف فلزات سنگین راهکارهای متعددی پیشنهاد شده و مورد استفاده قرار می گیرد. از جمله این راهکارها می توان به فرآیندهای تعویض یونی، احیاء الکتریکی، رسوب سازی، اسمز معکوس، ترسیب شیمیایی با کمک آهک همراه با جذب، استخراج با حلال، جذب سطحی و تبخیر اشاره نمود

1- United State, Environmental Protection Agency

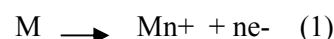
۲. بر اساس تقسیم بندی ارائه شده توسط سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده آمریکا برای ترکیبات شیمیایی مختلف، ترکیباتی در گروه B1 قرار می گیرند که بر مبنای مطالعات اپیدمیولوژیکی مدارک محدودی پیرامون سرطانزایی آنها در انسان موجود می باشد.
۳. ایتای ایتای یک واژه ژاپنی بوده که در فارسی آخ آخ ترجمه شده است. این عارضه اولین بار در حوضه رودخانه جین سو در ژاپن شناسایی شد. در افرادی که برای مدت زمان طولانی در معرض غلظت های نسبتاً بالای کادمیوم قرار می گیرند، با توجه به جایگزینی عنصر کلسیم با یون کادمیوم، نشانه های از پوکی استخوان با درجات مختلف بر حسب شدت آلودگی بروز می کند به نحویکه در موارد پیشرفته شکستگی های پی در پی استخوانها حادث می شود.

که هر یک دارای مزایا و معایبی هستند. ^(۷-۹) اگرچه استفاده از ترکیبات شیمیایی از دیرباز بمنظور حذف انواع فلزات سنگین مورد استفاده قرار گرفته اما بنا به دلایلی امروزه از مطلوبیت زیادی برخوردار نیست و علت امر را شاید بتوان به هزینه های بالاتر تصفیه شیمیایی نسبت داد (به عنوان مثال حجم زیاد لجن تولیدی، هزینه ترکیبات شیمیایی مصرفی، افزایش غلظت TDS ^۴ یا به عبارتی کل جامدات محلول پساب). اما در عین حال تعدادی از تکنیکهای نوید بخش و امیدوار کننده نیز بر مبنای تکنولوژی الکتروشیمیایی توسعه یافته اند که فاقد مشکلات ذکر شده هستند. یکی از این روشها فرآیندها الکتروکواگولاسیون (Electrocoagulation) یا به اختصار EC می باشد. ^(۱۱) EC یک فرآیند الکتروشیمیایی است که از جریان مستقیم برق (DC) به منظور حذف آلاینده ها از محلول استفاده می کند. ^(۱۰) در فرآیند EC، کواگولانت در محل و از طریق اکسیداسیون الکترولیتی یک آند از جنس مناسب تولید می شود. سپس گونه های یونی باردار، فلزات سنگین یا مواردی به غیر از این، از طریق فراهم نمودن امکان واکنش با یک یون با بار الکتریکی مخالف یا با هیدروکسیدهای فلزی تولیدی درون پساب حذف می شوند. ^(۱۱)

تکنولوژی الکتروکواگولاسیون سبب حذف آفت کش های مختلف (از جمله دیازینون و لیندن)، فلزات و از جمله فلزات سنگین، COD ^۵ (اکسیژن مورد نیاز شیمیایی)، جامدات کلوئیدی و ذرات معلق و آلاینده های غیر آلی محلول از محیط آبی می شود. در مواردی کاهش ۹۵-۹۹ درصدی آلاینده های موجود در فاضلابهای صنعتی، پالایشگاه ها و واحدهای پردازش مواد غذایی و کاهش ۹۵-۹۸ درصدی فلزات سنگین نظیر آرسنیک، کادمیوم، کروم، سرب، نیکل و روی از طریق استفاده از فرآیند الکتروکواگولاسیون (انعقاد الکتریکی) گزارش شده است. ^(۱۰،۷) برخی محققین کارایی این فرآیند را در حذف

آلاینده هایی نظیر ترکیبات فنلی، مس، روی و کادمیوم، آرسنیک، فلوراید و رنگ مورد بررسی قرار داده و نتایج قابل قبولی را گزارش نموده اند. ضمن آن که کارایی فرآیند در تصفیه فاضلاب های نساجی، دباغی و نفتی نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. ^(۱۱-۱۵) Nafaa و همکارانش در مطالعه ای رنگ زدایی و حذف ترکیبات فنلی را با استفاده از فرآیند الکتروکواگولاسیون و الکترودهای آلومینیومی مورد بررسی قرار دادند و در این ارتباط ۷۶ درصد حذف COD، ۹۱ درصد حذف پلی فنل ها و حذف ۹۵ درصد رنگ سیاه را تنها در طی ۲۵ دقیقه زمان واکنش گزارش نمودند. ^(۱۱) همچنین این پژوهشگر به اتفاق همکارانش کارایی این فرآیند را در تصفیه فاضلاب آبکاری حاوی روی، مس و کروم مورد بررسی قرار دادند که نتایج حاصله بیانگر دستیابی به مقادیر استاندارد تنها پس از گذشت ۲۵ دقیقه از شروع آزمایش بود. ^(۱۲)

در این روش یک جریان الکتریکی از میان دو الکترود صفحه ای موازی (از جنس آهن یا آلومینیوم) عبور کرده و سبب اکسید نمودن فلز (M) به کاتیون آن (Mn+) می شود (معادله ۱). از طرفی به طور همزمان آب به گاز هیدروژن و یون هیدروکسید (OH-) احیاء می شود (معادله ۲). از اینرو فرآیند EC سبب تولید کاتیونهای فلزی به طریقه الکتروشیمیایی، با استفاده از آندهای مصرف شدنی (معمولاً آهن یا آلومینیوم) می شود. ^(۱۶)



نیاز به تجهیزات ساده و سهولت بهره برداری؛ قابلیت ته نشینی خوب لجن تولیدی، قابلیت آبگیری مناسب، تولید حجم لجنی به مراتب کمتر در مقایسه با مکانیسم های معمول تصفیه شیمیایی، تولید فلوک های مقاوم و پایدار، تولید پسابی با TDS کمتر در مقایسه با تصفیه های شیمیایی متعارف، کاهش هزینه های بهره برداری و احتیاطات ایمنی جهت ذخیره سازی و نقل و انتقال مواد شیمیایی بدلیل عدم نیاز به ترکیبات

شیمیایی، کاهش قابل توجه میکروارگانیسمها و در نتیجه کاهش هزینه های گندزدایی آب از جمله مزایای کاربرد این فرآیند می باشد. ^(۱) در عین حال این فرآیند از محدودیتهای و معایبی نیز برخوردار است که از جمله می توان به نیاز به تعویض مرتب الکترودهای قربانی در نتیجه عمل اکسیداسیون در جریان فاضلاب و انحلال آنها، پرمزینه بودن استفاده از جریان الکتریکی در برخی مناطق، تشکیل یک لایه اکسید نفوذناپذیر بر روی کاتد که احتمالاً افت راندمان واحد فرآیند الکتروکواگولاسیون را به دنبال خواهد داشت، نیاز به هدایت پذیری بالای سوسپانسیون فاضلاب مورد تصفیه و در مواردی تمایل به انحلال هیدروکسیدهای ژلاتینی شکل اشاره نمود. ^(۱۶)

تحقیق حاضر با عنایت به این که در کشور بحران آب چه از نظر کمی و چه از نظر کیفی بارها تجربه شده است و به منظور حفظ منابع آب با توجه به آلودگی وسیع منابع آبی در نتیجه تخلیه کنترل نشده انواع فاضلابهای صنعتی و تحقق استانداردهای تصفیه و نهایتاً به منظور راه اندازی یک روش جدید در کشور صورت پذیرفت.

روش کار

مطالعه حاضر یک مطالعه آزمایشگاهی است که بصورت طرح پایلوت در محل آزمایشگاه شیمی آب و فاضلاب دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی تهران در سال ۱۳۸۵ انجام پذیرفت. تمامی ترکیبات شیمیایی از جمله نیترات کادمیوم، هیدروکسید سدیم، اسید سولفوریک و کلرید پتاسیم از نوع مرک مورد استفاده قرار گرفتند. محلول سنتتیک کادمیوم با غلظت های مورد نظر از طریق انحلال مقادیر معین نیترات کادمیوم با آب مقطر دوبار تقطیر تهیه شد. بمنظور افزایش هدایت الکتریکی محلول به ۱/۶ میلی زیمنس بر سانتیمتر، کلرید پتاسیم یک نرمال به محلول های کادمیوم اضافه شد. نمک کلرید اضافه شده به محلول از تشکیل لایه اکسید بر روی آند ممانعت بعمل آورده و بنابراین مشکل بی اثر شدن الکترودها را کاهش می دهد. به منظور تنظیم pH محلول اولیه از اسید

سولفوریک و هیدروکسید سدیم یک نرمال استفاده شد. تجهیزات مربوط به واحد انعقاد الکتریکی (الکتروکواگولاسیون) شامل یک منبع تغذیه (مبدل جریان متناوب به جریان مستقیم) و الکترودهای صفحه ای آلومینیومی با ابعاد ۱۱*۱۱ سانتیمتر است که درون یک مخزن شیشه ای با ابعاد ۱۲*۱۲*۱۳ سانتیمتر (طول*عرض*ارتفاع) نصب شد. اتصال الکترودها به منبع تغذیه بصورت دو قطبی صورت پذیرفت بدین مفهوم که تنها دو الکترود کناری به قطب های مثبت و منفی متصل شده و دو الکترود میانی تنها بر اساس مکانیسم خود القایی نقش خود را ایفا نمودند. فاصله بین الکترودها از یکدیگر برابر ۱۵ میلی متر و حجم خالص راکتور برابر یک لیتر بود.

محلول های سنتتیک کادمیوم با غلظت های ۵، ۵۰ و ۵۰۰ میلی گرم در لیتر پس از تنظیم pH (۳،۷،۱۰) و هدایت الکتریکی (۱/۶ میلی زیمنس بر سانتیمتر) به درون راکتور تزریق شد. انتخاب غلظت های فوق بر این اساس صورت گرفت که حضور کادمیوم در محیط های آبی یعنی آب و فاضلاب در شرایط مختلف غلظت پائین، متوسط و زیاد نظیر فاضلاب های صنعتی مورد بررسی قرار گیرد. از طرفی انتخاب مقادیر pH بصورت فوق جهت تعیین شرایط عملکردی مناسب فرآیند برای محیط های اسیدی، خنثی و قلیایی انجام پذیرفت. پس از برقراری جریان الکتریکی با ولتاژهای مختلف ۲۰، ۳۰ و ۴۰ ولت نمونه های ۲۵ میلی لیتری از میانه راکتور در فواصل زمانی ۲۰ دقیقه ای و در طی مدت زمان ۶۰ دقیقه برداشت شد. لازم به ذکر است که انتخاب محدوده ولتاژ ۲۰، ۳۰ و ۴۰ ولت و نیز زمان واکنش نیز بر مبنای برخی مطالعات قبلی که از ولتاژهای پائین استفاده کرده بودند انجام پذیرفت. سپس به منظور حذف لخته های تشکیل شده نمونه های برداشت شده از صافی غشایی با اندازه ۰/۴۵ میکرون عبور داده شد و درون بطری های پلاستیکی (در دمای ۴ درجه سانتیگراد) تا زمان قرائت نگهداری شد. در پایان غلظت یون کادمیوم باقی مانده با استفاده از دستگاه

جذب اتمی و مطابق روش استاندارد تعیین مقدار شد. درصد حذف کادمیوم تحت شرایط مختلف بر اساس غلظت اولیه و غلظت باقی مانده پس از فرآیند الکتروکواگولاسیون در زمان های واکنش تعیین شده و بر مبنای رابطه راندمان محاسبه گردید. لازم به ذکر است که الکترودها در پایان هر سری آزمایش با استفاده از ترازوی آنالیتیکال بطور دقیقی توزین می شدند. پس از تعیین شرایط بهینه (زمان، ولتاژ و pH در شرایط دستیابی به حداکثر راندمان حذف)، به منظور بررسی اثر حضور مواد آلی بر راندمان حذف فلز سنگین کادمیوم، به محلول های سنتتیک اولیه، COD (اکسیژن مورد نیاز شیمیایی) در غلظت های ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر تزریق شد و کارایی فرایند تحت شرایط بهینه مورد بررسی قرار گرفت و به همین ترتیب اثر کدورت بر راندمان حذف با تزریق کدورت های ۱۰، ۵۰ و ۲۰۰ واحد (NTU) یا واحد کدورت نفلومتری) به نمونه های اولیه در غلظت های مختلف بررسی شد.

یافته ها

در مطالعه حاضر، فرآیند انعقاد الکتریکی (الکتروکواگولاسیون) با استفاده از الکترودهای آلومینیومی به عنوان یک تکنولوژی تصفیه برای حذف کادمیوم از فاضلابهای صنعتی مورد استفاده و راندمان حذف کادمیوم در شرایط مختلف (pH، هدایت الکتریکی، حضور کدورت و مواد آلی) در زمانهای واکنش مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. درصد حذف فلز سنگین کادمیوم برای شرایط مختلف و در غلظت های ۵، ۵۰ و ۵۰۰ میلی گرم در لیتر در جدول شماره ۱ آورده شده است. همچنین میزان الکترود مصرفی و نیز جریان برق مورد استفاده در طول فرآیند الکتروکواگولاسیون تحت شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفته و نتایج مربوطه در جداول ۲ و ۳ نشان داده شده است.

جدول ۱- درصد مذف فلز سنگین کادمیوم در طول فرآیند الکتروکواگولاسیون در pH، ولتاژ و زمان تماس و غلظت های اولیه مختلف

غلظت اولیه ۵ mg/l				
pH	زمان تماس (دقیقه)	درصد حذف در غلظت های مختلف		
		۲۰ ولت	۳۰ ولت	۴۰ ولت
۳	۲۰	۹۸/۸۰	۹۹/۰۰	۹۹/۶۰
	۴۰	۹۹/۲۰	۹۹/۴۰	۹۹/۸۰
	۶۰	۹۹/۶۰	۹۹/۸۰	۹۹/۹۰
۷	۲۰	۹۸/۸۰	۹۸/۸۰	۹۹/۴۰
	۴۰	۹۹/۴۰	۹۹/۶۰	۹۹/۶۰
	۶۰	۹۹/۶۰	۹۹/۸۰	۹۹/۸۰
۱۰	۲۰	۹۹/۴۰	۹۹/۶۰	۹۹/۶۰
	۴۰	۹۹/۸۰	۹۹/۸۰	۹۹/۸۰
	۶۰	۹۹/۸۰	۹۹/۸۰	۹۹/۹۸
غلظت اولیه ۵۰ mg/l				
pH	زمان تماس (دقیقه)	درصد حذف در غلظت های مختلف		
		۲۰ ولت	۳۰ ولت	۴۰ ولت
۳	۲۰	۹۸/۸۰	۹۹/۰۰	۹۹/۶۰
	۴۰	۹۹/۲۰	۹۹/۴۰	۹۹/۸۰
	۶۰	۹۹/۶۰	۹۹/۸۰	۹۹/۹۰
۷	۲۰	۹۸/۸۰	۹۸/۸۰	۹۹/۴۰
	۴۰	۹۹/۴۰	۹۹/۶۰	۹۹/۶۰
	۶۰	۹۹/۶۰	۹۹/۸۰	۹۹/۸۰
۱۰	۲۰	۹۹/۴۰	۹۹/۶۰	۹۹/۶۰
	۴۰	۹۹/۸۰	۹۹/۸۰	۹۹/۸۰
	۶۰	۹۹/۸۰	۹۹/۸۰	۹۹/۹۸
غلظت اولیه ۵۰۰ mg/l				
pH	زمان تماس (دقیقه)	درصد حذف در غلظت های مختلف		
		۲۰ ولت	۳۰ ولت	۴۰ ولت
۳	۲۰	۹۸/۳۱۰	۹۸/۱۶۶	۹۹/۸۱۲
	۴۰	۹۹/۵۸۲	۹۹/۷۴۶	۹۹/۹۲۴
	۶۰	۹۹/۷۷۶	۹۹/۹۴۶	۹۹/۹۶۴
۷	۲۰	۹۸/۷۳۸	۹۹/۳۱۶	۹۹/۷۹۴
	۴۰	۹۹/۶۳۶	۹۹/۷۸۶	۹۹/۹۲۶
	۶۰	۹۹/۸۵۴	۹۹/۹۸۲	۹۹/۹۸۶
۱۰	۲۰	۹۹/۳۴۸	۹۹/۶۵۴	۹۹/۹۱۴
	۴۰	۹۹/۸۷۲	۹۹/۹۵۴	۹۹/۹۷۸
	۶۰	۹۹/۹۶۴	۹۹/۹۸۸	۹۹/۹۹۴

جدول ۲- میزان مصرف الکتروکواگولاسیون در طی فرآیند الکتروکواگولاسیون (گرم بر لیتر)

ولتاژ (ولت)	غلظت کادمیوم (میلی گرم بر لیتر)		
	وزن الکتروکواگولاسیون مصرفی (گرم)		
۲۰	۵/۰	۵۰/۰	۵۰۰/۰
	۲/۹۷	۴/۴۷	۲/۶۱
۳۰	۴/۳۷	۴/۹۳	۳/۶۶
	۹/۳۷	۹/۳۹	۸/۴۵

جدول ۳- میزان مصرف انرژی برق در طی فرآیند الکتروکواگولاسیون (Kwhg-1)* برای افتلاف پتانسیل معادل ۴۰ ولت

pH	غلظت کادمیوم (میلی گرم بر لیتر)		
	انرژی مصرفی (Kwhg-1)*		
۳	۵/۰	۵۰/۰	۵۰۰/۰
	۲۳/۴	۲/۷۱	۰/۳۲
۷	۲۹/۵۲	۲/۸۳	۰/۳۶
	۲۳/۸۴	۲/۳۷	۰/۳۵

* کیلو وات ساعت به ازای هر گرم

بحث

نتایج حاصله از کاربرد فرآیند الکتروکواگولاسیون با استفاده از الکترودهای آلومینیومی در مطالعه حاضر بیانگر حذف موثر کادمیوم از محیط های آبی تحت شرایط مختلف نظیر غلظت اولیه، pH، ولتاژ و زمان تماس است که در ادامه مورد بحث و بررسی قرار می گیرد.

این نکته در مطالعات قبلی به اثبات رسیده است که pH اثر قابل توجهی بر روی راندمان فرایند الکتروکواگولاسیون دارد و مقدار آن در طی انجام فرآیند تغییر می کند. دامنه تغییرات pH به جنس الکترودهای مورد استفاده و مقدار pH اولیه محلول مورد نظر بستگی دارد. (۱۷، ۱۸) در مطالعه حاضر به منظور بررسی اثر pH بر روی راندمان حذف کادمیوم، مطالعات پیلوت در سه محدوده pH (۱۰، ۷، ۳) بر اساس مطالعات سایر محققین انجام پذیرفت. (۱۷) در شرایطی که pH اولیه محلول پائین باشد (کمتر

از ۷)، افزایشی در مقدار pH نهایی حاصل می شود که این امر می تواند ناشی از متصاعد شدن گاز هیدروژن در کاتدها باشد. این افزایش pH توسط برخی دیگر از محققین بصورت آزادسازی گاز CO₂ از محلول و نیز تاثیرگذاری بر توزیع حبابهای گاز H₂ تشریح شده است.^(۱۸) علاوه براین، اگر pH اولیه اسیدی باشد، واکنشها در جهت افزایش در مقدار pH پیشرفت می کند. همچنین در محیط های قلیایی (pH بیشتر از ۸)، pH نهایی زیاد تغییر نمی کند و تنها یک افت ناچیز در مقدار آن رخ می دهد. اما در شرایطی که الکترودهای مورد استفاده (آندهای قربانی) از نوع آهنی باشند pH نهایی همواره بزرگتر از pH اولیه خواهد بود.^(۱۹) نتایج حاصل از مطالعه حاضر با پژوهش های منتشر شده قبلی منطبق بوده و این نکته را متذکر می شود که فرآیند الکتروکواگولاسیون می تواند به عنوان یک تنظیم کننده pH عمل نماید. تاثیر pH بر روی راندمان حذف فلز سنگین کادمیوم (جدول ۱)، توسط برخی از محققین به عنوان یک پارامتر تاثیر گذار بر راندمان حذف آلاینده ها ذکر شده، اما در مطالعه حاضر تاثیر چندانی بر راندمان حذف کادمیوم مشاهده نشد، هرچند که بهترین نتایج حذف در غلظت ها و اختلاف پتانسیل های مختلف در pH برابر ۱۰ (محیط قلیایی) حاصل شد، اما این اختلاف راندمان بین مقادیر مختلف pH چندان قابل ملاحظه نبود. این امر را می توان به عنوان یکی از مزایای فرآیند الکتروکواگولاسیون به علت عدم نیاز به تنظیم قطعی pH اولیه محلول با توجه به مقادیر pH متفاوت انواع فاضلاب های صنعتی محسوب نمود.

اثر شدت جریان الکتریسیته در فرآیند الکتروکواگولاسیون بخوبی مشخص شده است به طوری که نه تنها تعیین کننده میزان غلظت کواگولانت تزریقی به محلول است، بلکه همچنین بر روی میزان تولید حبابها و اندازه و رشد فلوکهای تولیدی نیز موثر است، که می تواند راندمان تصفیه فرآیند الکتروکواگولاسیون را تحت تاثیر قرار دهد.^(۲۰،۲۱) بنابراین اثر

ولتاژ برق بر روی حذف فلز سنگین کادمیوم مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که انتظار می رفت، مشاهده شد که برای یک زمان واکنش معین، با افزایش ولتاژ برق اعمال شده در فرآیند، راندمان حذف نیز بطور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. در مطالعه حاضر بالاترین اختلاف پتانسیل الکتریکی معادل ۴۰ ولت توانست سریع ترین تصفیه با بیش از ۹۹ درصد کاهش در غلظت یون کادمیوم را تنها در طی مدت زمان واکنش ۲۰ دقیقه حاصل نماید و از طرفی پائین ترین راندمان حذف کادمیوم در شرایطی حاصل شد که اختلاف پتانسیل الکتریکی در کمترین مقدار خود یعنی ۲۰ ولت قرار داشت. این امر بیانگر این حقیقت است که در شرایط اختلاف پتانسیل بالا، مقدار آلومینیوم اکسید شده افزایش می یابد که نتیجه آن تولید مقادیر بیشتر رسوبات و لخته های هیدروکسید جهت حذف آلاینده ها است. علاوه براین، این نکته به اثبات رسیده است که با افزایش در دانسیته جریان، دانسیته حبابها افزایش و اندازه آنها کاهش می یابد و این امر حذف سریع تر و بیشتر آلاینده ها را بدنبال خواهد داشت.^(۲۲) از طرفی با کاهش میزان جریان الکتریسیته (اختلاف پتانسیل، زمان مورد نیاز برای دستیابی به راندمانهای حذف مشابه بایستی افزایش یابد که این امر در مطالعه حاضر نیز مشاهده شد. این رفتار که راندمان تصفیه تا حدود زیادی تحت تاثیر بارگذاری جریان الکتریسیته است توسط برخی محققین به اثبات رسیده است.^(۱۸) به عنوان مثال Ranta Kumar و همکارانش در بررسی راندمان حذف آرسنیک از آب از طریق فرآیند الکتروکواگولاسیون با استفاده از الکترودهای آلومینیومی مشاهده نمودند که با افزایش دانسیته جریان (ولتاژ جریان الکتریسیته)، فلوک های هیدروکسید بیشتری تولید شده و نتیجه آن حذف موثرتر آرسنیک بود.^(۱۳) همچنین تحقیقات Nafaa و همکارانش نیز نشان داد که راندمان حذف با افزایش دانسیته جریان افزایش می یابد.^(۱۱،۱۲) با این حال، هزینه های مصرفی فرآیند بر اساس میزان الکترو مصرفی و انرژی الکتریکی تعیین

می شود که مصرف پائین آنها از مزایای اقتصادی فرآیند الکتروکواگولاسیون می باشد. در مجموع نتایج حاصله از انجام آزمایشات در تحقیق حاضر اختلاف پتانسیل ۴۰ ولت را نسبت به ولتاژهای دیگر (۲۰ و ۳۰ ولت) به عنوان ولتاژ بهینه به منظور تصفیه پسابهای صنعتی حاوی فلز سنگین کادمیوم پیشنهاد می نماید.

در مطالعه حاضر آزمایشات بر روی محلول های سنتتیک کادمیم با غلظت های اولیه مختلف انجام پذیرفت تا زمان مورد نیاز برای حذف تحت شرایط متفاوت فرآیند الکتروکواگولاسیون بررسی شود. نتایج حاصله از آزمایشات انجام شده در اختلاف پتانسیل های مختلف نشان داد که غلظت اولیه کادمیوم می تواند راندمان حذف را تحت تاثیر قرار دهد به نحوی که برای غلظت های اولیه بالاتر، اختلاف پتانسیل های بالاتر یا زمان واکنش طولانی تر نیاز است (جدول ۱). این امر با نتایج پژوهش های قبلی مطابقت دارد به طوری که دانشور و همکارانش در مطالعه ای که به بررسی کارایی فرآیند الکتروکواگولاسیون در حذف رنگ پرداختند مشاهده نمودند که نرخ حذف رنگ با افزایش غلظت آن به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد (۲۳). از طرفی نتایج ارائه شده توسط Chaudary و همکارانش نیز این مسئله را تایید می نماید که راندمان حذف با افزایش غلظت اولیه آلاینده کاهش می یابد (۲۴). در عین حال مطابق نتایج موجود در جدول ۱، در غلظت های اولیه بالاتر، کاهش غلظت فلز سنگین کادمیوم در مدت زمان کمتری نسبت به غلظت های اولیه پائین تر بوقوع پیوسته است. از این رو زمان مورد نیاز برای کاهش غلظت باقی مانده فلز سنگین کادمیوم نسبت به افزایش در غلظت آلاینده به کندی افزایش می یابد. این امر توسط تئوری محلول های رقیق قابل تفسیر است بدین ترتیب که در محلول های رقیق، تشکیل لایه پراکنده در نزدیکی الکترود سبب کندتر شدن واکنش می شود، اما در محلول های غلیظ لایه پراکنده اثری بر روی میزان انتشار یا مهاجرت یون های فلزی به سطح الکترود ندارد. (۲۴)

نتایج حاصله از اثر حضور مواد آلی و کدورت بر راندمان حذف کادمیوم در شرایط بهینه نشان داد که راندمان حذف برای غلظت های مختلف کادمیوم بدون تغییر باقی مانده و از این رو فرآیند الکتروکواگولاسیون می تواند به نحو موثری برای حذف یون کادمیوم حتی در صورت حضور مواد آلی و کدورت مورد استفاده قرار گیرد.

با توجه به این که اقتصادی بودن یکی از مهم ترین معیارها در انتخاب یک فرآیند مناسب جهت حذف فلزات سنگین می باشد پس از هر سری آزمایش الکترودهای آلومینیومی توزین می شدند و بدین ترتیب کمیت الکترود مصرفی تحت شرایط مختلف تعیین می شد (جدول ۲). از داده های موجود در جدول ۲ چنین استنباط می شود که با افزایش ولتاژ برق اعمال شده، کمیت الکترود مصرفی نیز افزایش می یابد. بیشترین کاهش وزنی الکترودها در ولتاژ ۴۰ ولت و کمترین کاهش وزنی در ولتاژ ۲۰ ولت مشاهده شد. نتایج مطالعه Nafaa و همکارانش در بررسی حذف ترکیبات فنلی از فاضلاب با استفاده از فرآیند الکتروکواگولاسیون بیانگر آن است که با افزایش دانسیته جریان (ولتاژ)، اگرچه راندمان حذف افزایش می یابد، اما در عین حال مصرف الکترود و انرژی نیز افزایش می یابد (۱۱، ۱۲). در عین حال مطابق نتایج موجود، در محلول های بسیار غلیظ (mg/l) ۵۰۰ فلز سنگین کادمیوم، نرخ مصرف الکترود با افزایش ولتاژ برق افزایش نمی یابد اما فرآیند فوق با همان راندمان قبلی بوقوع می پیوندد. این امر بر اساس تئوری محلول های رقیق قابل توجیه است که پیش از این مورد اشاره قرار گرفت. همچنین نتایج مطالعه فوق نشان داد که میزان انرژی برق مصرفی برای حذف یک گرم کادمیوم در پتانسیل الکتریکی ۴۰ ولت، در pH های مختلف تا حدودی متفاوت است (جدول ۳) و با افزایش غلظت اولیه کاهش می یابد که این امر نیز با توجه به تئوری محلول های رقیق که پیش از این اشاره شد قابل توضیح است. اما در عین حال نتایج مطالعات دانشور و همکارانش پیرامون حذف رنگ از محیط های آبی بیانگر آن است که انرژی مورد نیاز برای

دستیابی به یک درصد مطلوب حذف رنگ با افزایش غلظت رنگ افزایش می یابد

در نهایت چنین می توان نتیجه گیری نمود که فرآیند الکتروکواگولاسیون می تواند به عنوان یک روش مطمئن، قابل انعطاف، سریع، موثر و اقتصادی به منظور تصفیه پساب های حاوی فلز سنگین کادمیوم در غلظت های مختلف و در شرایط محیطی مختلف (بوژه در محیط قلیایی) مورد استفاده قرار گیرد هر چند که یکی از محدودیت های بارز این مطالعه بررسی تنها یک فلز سنگین در محیط آبی تحت شرایط مختلف بود در

حالی که ممکن است در فاضلاب یک واحد صنعتی چند نوع فلز سنگین وجود داشته باشد.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی مرکز تحقیقات محیط زیست دانشگاه علوم پزشکی تهران انجام گرفته است (شماره قرارداد ۱۳۲/۱۱۵۸۲ و شماره طرح ۲۷۱۱)، لذا لازم می دانیم در اینجا از این واحد دانشگاهی جهت همکاری صمیمانه شان سپاسگزاری نمائیم.

References

منابع

1. Yousuf M, Mollah A, Schennach R, et al. Electro coagulation (EC) – Science and Applications. Journal of Hazardous Materials 2004; B84: 29–41.
2. Dantas C, Neto T, Moura A. Removal of chromium from aqueous solution diatomittreated with microemulsion. J.wat.Res 2001; 35: 2219-2224.
3. Pak D, Chung D, Jeh B. Design parameters for an electrochemical cell with porous electrode to treat metal ion solution. J.Wat.Res 2001; 35: 57-68.
4. Hiatt V, Huff J. Environmental impact of cadmium. Int. J. Env. Studies 1975; 7: 277–285.
5. Butter T.J, Evison L.M, Hancock I.C, et al. The removal and recovery of cadmium from dilute Aqueous solution by Biosorption and electrolysis at Laboratory scale. J.Wat. Res 1998; 32: 400 - 406.
6. WHO. Cadmium in drinking water. Background document for preparation of WHO guidelines for drinking water. Geneva, World Health Organization, 2003.
7. Pansward T, chavalparit O, Sucharittham Y, et al. A Bench-Scale Study on chromium recovery from tanning wastewater, J.Wat.Sci.Tech 1995; 31: 73-81.
8. Echenfelder W.W. Industrial water pollution control. Mc Graw-Hill book CO., Newyork, 1998.
9. Nemerow NI, Dasgupta A. Industrial and hazardous waste treatment, Van Nostrand Reinhold, 1991; 150-8.
10. Jiantuan G, Jiuhui Q, Pengju L, et al. New bipolar electro coagulation–electro flotation process for the treatment of laundry wastewater. Separation and Purification Technology 2004; 36: 33–39.

11. Nafa[^]a A, Lotfi M. Decolourization and removal of phenolic compounds from olive mill wastewater by electro coagulation. *Chemical Engineering and Processing* 2004; 43: 1281–1287.
12. Nafa[^]a A, Lotfi M, Nizar B, et al. Treatment of electroplating wastewater containing Cu²⁺, Zn²⁺ and Cr(VI) by electro coagulation. *Journal of Hazardous Materials* 2004; 112: 207–213.
13. Ratna Kumar p, Chaudhari S, Khilar K, et al. Removal of arsenic from water by electro coagulation. *Chemosphere* 2004; 55: 1245–1252.
14. Hu C.Y, Lo S.L, Kuan W.H. Effects of co-existing anions on fluoride removal in electro coagulation (EC) process using aluminum electrodes. *Water Research* 2003; 37: 4513–4523.
15. Holt P, et al. Electro coagulation as a wastewater treatment, The Third Annual Australian Engineering Research Event. 23-26 November Castlemaine, Victoria 1999; 118-24.
16. Feng C, Sugiura N, Shimada S, et al. Development of a high performance electrochemical wastewater treatment system. *Journal of Hazardous Materials* 2003; 103: 65–78
17. Vik E.A, Carlson D.A, Eikum A.S, et al. Electro coagulation of potable water. *Water Res* 1984; 18: 1355–1360.
18. Chen X, Chen G, Po L.Y. Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation. *Sep. Purif. Technol* 2000; 19: 65–76.
19. Kobya M, Taner Can, Bayramoglu M. Treatment of textile wastewaters by electro coagulation using iron and aluminum electrodes. *Journal of Hazardous Materials* 2003; 100: 163–178.
20. Letterman R.D, Amirtharajah A, O'Melia C.R. *A Handbook of Community Water Supplies*. Fifth ed, AWWA, Mc Graw-Hill, New York. 1999; 55-9.
21. Holt P.H, Barton G.W, Wark M, et al. A quantitative comparison between chemical dosing and electrocoagulation, *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects* 2002; 211: 233–248.
22. Khosla N.K, Venkachalam S, Sonrasundaram P. Pulsed electro generation of bubbles for electroflotation. *J. Appl. Electrochem* 1991; 21: 986–990.
23. Daneshvar N, Ashassi Sorkhabi H, Kasiri M.B. Decolorization of dye solution containing Acid Red 14 by electrocoagulation with a comparative investigation of different electrode connections. *Journal of Hazardous Materials* 2004; 112: 55–62.
24. Chaudhary A.J, Goswami N.C, Grimes S.M. Electrolytic removal of hexavalent chromium from aqueous solutions. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 2003; 78: 877–883.

Removal of Cadmium from Aqueous Environments by Electrocoagulation process using Aluminum Electrodes

Bazrafshan E., PhD *; Mahvi AH., PhD**

Background: The purpose of this study was the evaluation of cadmium removal from industrial wastewater by electro coagulation process using aluminum electrodes.

Methods and Materials: For this study a glass tank with 1.87 liter volume containing four plate aluminum electrodes was used to do experiments. The electrodes were connected to the positive and negative poles of DC power supply (bipolar mode). The tank was filled with synthetic wastewater containing cadmium ion in concentration of 5, 50 and 500 mg/l and then it was started up. The amount of cadmium ion removal was measured at pH 3, 7 and 10 and in electric potential range of 20, 30 and 40 volts.

Results: The results obtained at different electrical potentials showed that initial concentration of cadmium can affect on efficiency removal; moreover, for higher concentration of cadmium, higher electrical potential or more reaction time is needed. On the other hand, if the initial concentration increased, the time required of process had to increase too. The final pH was always higher than initial pH. As expected, the results showed that in a given time, the removal efficiency increased significantly with the increase for the current density. The highest electrical potential (40 v) produced the quickest treatment with >99% cadmium reduction occurring after only 20 min.

Conclusions: The results showed that, in this process, the use of different electrical potentials can provide a wide range of pH for doing this process. The method was found to be highly efficient and relatively fast compared to conventional existing techniques and, it can also be concluded that the EC process has the potential to be utilized for the cost-effective removal of heavy metals from water and wastewater.

KEYWORDS : Electro coagulation process, cadmium, Aluminum electrodes, Aqueous environments

*Department of Environmental Health, School of Public Health, Zahedan University of Medical Sciences, Zahedan, Iran.

** Department of Environmental Health, Faculty of Health, Tehran University of Medical sciences and Health Services, Tehran, Iran.