

بررسی تأثیر فرآیند الکتروکواگولاسیون با استفاده از الکترودهای آلومینیوم/ آهن و آلومینیوم/ مس در حذف رنگ از فاضلاب رنگی

فرشید قنبری^۱، اشرف مظاهری^۲، فیاض مهدی پور^۳، سیمین دخت میرشفیعیان^۴، مهسا مردای^۵، هاجر شریفی ملکسری^۶

^۱ دانشجوی دوره دکترا، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور اهواز، اهواز، ایران.

^۲ مربی، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی کاشان، کاشان، ایران.

^۳ کارشناس ارشد مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران.

^۴ کارشناس مسئول آزمایشگاه آب و فاضلاب، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران.

^۵ کارشناس ارشد مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت و عضو کمیته پژوهشی دانشجویان دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران.

^۶ کارشناس ارشد مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران.

نشانی نویسنده مسئول: تهران - دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی - دانشکده بهداشت.

E-mail: h_sharifimalek@yahoo.com

وصول: ۹۲/۱۰/۷، اصلاح: ۹۲/۱۱/۲، پذیرش: ۹۲/۱۱/۲۹

چکیده

زمینه و هدف: فاضلاب رنگی، منشاء اصلی آلودگی منابع آبی است و اگر بدون تصفیه به محیط زیست تخلیه شود، اثرات قابل ملاحظه‌ای بر آن دارد. در سال‌های اخیر، به فرایند الکتروکواگولاسیون (EC) به‌عنوان یک روش مناسب برای تصفیه فاضلاب صنعتی توجه زیادی شده است. در این مطالعه، کارایی فرایند الکتروکواگولاسیون بر حذف رنگ از فاضلاب طبیعی رنگ‌رزی بررسی شده است.

مواد و روش‌ها: مطالعه‌ی حاضر، به‌صورت تجربی و در یک راکتور الکتروشیمیایی ناپیوسته شامل یک بشر با حجم ۰/۶ لیتر و مجهز به ۲ الکتروود آند و ۲ الکتروود کاتد انجام شده است. آند از جنس آلومینیوم و کاتد از جنس آهن یا مس بوده که به صورت موازی به هم متصل شده‌اند. در هر مرحله از آزمایش، ۴۰۰ ml از فاضلاب وارد راکتور شده و اثر ۳ پارامتر شدت جریان (۵۰-۵۰۰ mA)، زمان واکنش (۵-۴۰ min) و pH فاضلاب (۸-۴) بر کارایی فرایند بررسی گردیده است.

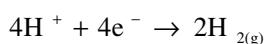
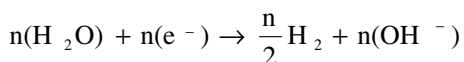
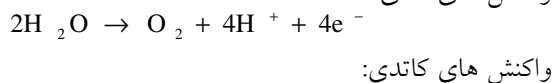
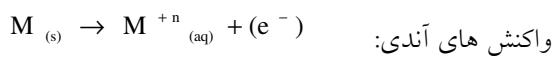
یافته‌ها: شرایط بهینه‌ی عملیاتی برای هر دو سیستم Al/Cu و Al/Fe در شدت جریان ۴۰۰ mA، زمان واکنش ۴۰ min و pH=۴ یافته شده است. در این شرایط EC با Al/Cu تقریباً به‌طور کامل رنگ را حذف نموده (۹۸٪) و کارایی حذف COD ۲۸٪ بود. در حالی که EC با Al/Fe توانست ۹۷٪ از رنگ و ۲۱٪ از COD را کاهش دهد. همچنین در این شرایط مصرف انرژی و کارایی جریان فرایند EC به ترتیب ۲/۹ kWh/m³ و ۱۱۰٪ بوده است.

نتیجه‌گیری: با توجه به نتایج به‌دست آمده، می‌توان اظهار داشت که فرایند EC می‌تواند به‌عنوان یک روش مؤثر و اقتصادی جهت حذف رنگ از فاضلاب باشد.

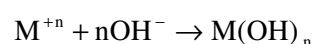
واژه‌های کلیدی: حذف رنگ، الکتروکواگولاسیون، تصفیه فاضلاب، آلومینیوم

مقدمه

مؤثر برای تصفیه‌ی انواع فاضلاب‌های صنعتی مطرح گردد. این فرایند از یک جریان الکتریکی مستقیم برای تولید یون‌های فلزی در محلول استفاده می‌کند. ماده‌ی منعقدکننده در این فرایند به وسیله‌ی انحلال آند قربانی تولید می‌شود (۷) و با تولید هیدروژن و یون هیدروکسیل در کاتد همراه است. هنگامی که یون‌های فلزی (اغلب موارد یون‌های ۳ ظرفیتی) به وسیله EC فراهم می‌شوند با یون‌های بارالکتریکی مخالف، ذرات آلاینده موجود در فاضلاب خنثی می‌شوند (بار سطحی معمولاً در pH بالای ۳ منفی است) و به صورت مواد جامد با مقاومت بالا ته نشین می‌گردند (۲). علاوه بر این، حباب‌های هیدروژن تشکیل شده، اجازه‌ی شناورسازی مواد معلق را می‌دهند. فرایند EC به دلیل مزیت تولید ترکیبی از کاتیون‌های چند ظرفیتی توسط اکسیداسیون آندهای قربانی و شناورسازی آلاینده‌ها در سطح محلول که می‌تواند جمع‌آوری و حذف آنها را آسان‌کند، ایده‌آل است. واکنش‌هایی که در طی فرایند الکتروکواگولاسیون رخ می‌دهند، به صورت ذیل است (۶).



که M ماده آند و n تعداد الکترون‌های مبادله شده در واکنش احیاء و یا اکسیداسیون می‌باشد. یون‌های فلزی محلول در آند تولید می‌شوند و با یون‌های هیدروکسیل تولید شده در کاتد واکنش می‌دهند و با توجه به pH می‌توانند رنج گسترده‌ای از هیدروکسیدهای فلزی را مطابق با واکنش ۵ تولید نمایند.



این هیدروکسیدهای فلزی نامحلول با جامدات کلوئیدی و معلق واکنش می‌دهند و ته‌نشین می‌گردند (۶). به علت نامحلول بودن هیدروکسیدهای آهن و یا آلومینیوم

تخلیه پساب رنگی به محیط زیست و اکوسیستم-های آبی، علاوه بر آسیب‌رساندن به مناظر زیبای طبیعت، شفافیت و انحلال گازها را در آب تحت تأثیر قرار می‌دهد (۱) و از نفوذ نور به اعماق آب جلوگیری می‌کند و این عمل، باعث کاهش سرعت فرایندهای فتوسنتتیک در آب‌های سطحی و از بین رفتن گیاهان آبی می‌شود (۱) و همچنین ممکن است حاوی مواد شیمیایی باشد که برای ماهی‌ها و انواع دیگر گونه‌های جانوری، سمی، سرطان‌زا و جهش‌زا باشد، بنابراین، حذف آنها از پساب قبل از تخلیه به محیط زیست ضروری است (۲). به طور معمول، فاضلاب رنگی به وسیله فرایندهای فیزیکی و شیمیایی شامل انعقاد شیمیایی، جذب بر روی کربن فعال، ترسیب (۳)، الترافیلتراسیون، اکسیداسیون شیمیایی، ازن-زنی (۴) و فرایند بیولوژیکی تصفیه می‌شوند، اما این فرایندها، اغلب دارای مشکلات اساسی هستند. فرایندهای تصفیه‌ی بیولوژیکی در حذف رنگ، غیرمؤثرند. زیرا رنگ‌ها برای ارگانوسم‌های موجود در فرایند سمی بوده و پلیمرهای به شدت ساختاریافته با قابلیت تجزیه‌پذیری پایین می‌باشند (۵). فرایند انعقاد شیمیایی به دلیل افزودن مقدار زیادی از مواد شیمیایی و تولید مقدار زیادی از لجن، تولید آلودگی می‌کند (۶). فرایند جذب با کربن فعال، هزینه‌ی بالایی دارد، لذا احیای آن مشکل و هزینه‌ی دفع زوائد آن بالاست (۴). هزینه‌های الترافیلتراسیون و ازن زنی معمولاً بالاتر از انعقاد شیمیایی است. تجزیه‌ی شیمیایی به وسیله‌ی عوامل اکسیدکننده مانند کلر، مهم‌ترین و مؤثرترین روش است، اما ترکیبات بسیار سمی مانند ارگانوکلره تولید می‌کند که سرطان‌زاست (۳). فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته مانند ازن‌زنی، UV/O₃، فوتواکسیداسیون توسط UV/TiO₂، UV/H₂O₂ و عامل فتون به افزودن مواد شیمیایی نیاز دارند و باعث آلودگی ثانویه می‌شوند (۵ و ۶). در سال‌های اخیر، فرایند الکتروکواگولاسیون (EC) توانسته است به عنوان یک روش

شرایط مختلف عملیاتی شامل دانسیته جریان، pH، فاضلاب و زمان الکترولیز در یک راکتور الکتروشیمیایی با سیستم Batch می‌باشد.

مواد و روش‌ها

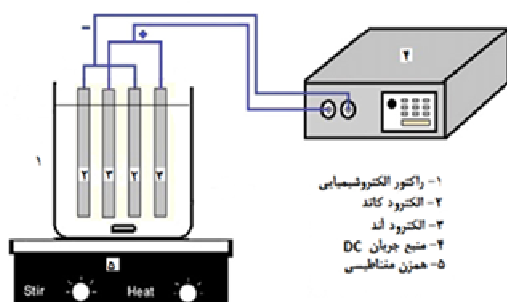
این مطالعه، به صورت تجربی و در مقیاس آزمایشگاهی در یک راکتور الکتروشیمیایی به صورت Batch انجام شده است. نمونه‌ی فاضلاب از یک کارگاه رنگ‌رزی الیاف واقع در استان مرکزی جمع‌آوری و در ظرف پلاستیکی در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد جهت انجام آزمایش‌های لازم نگهداری شده است. خصوصیات اولیه‌ی فاضلاب مورد نظر در جدول ۱ آمده است. کلیه‌ی مواد شیمیایی مورد استفاده در این مطالعه، از محصولات شرکت مرک (Merck) آلمان می‌باشد. همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده، سلول الکتروشیمیایی شامل یک بشر ۶۰۰ میلی‌لیتری می‌باشد که در آن، یک جفت صفحه‌ی آلومینیومی به عنوان الکتروود آند و یک جفت صفحه‌ی آهن به عنوان الکتروود کاتد به ابعاد $1 \times 14 \times 0.1$ سانتی‌متر با فاصله‌ی دو سانتی‌متر از یکدیگر قرار گرفته و به حالت تک قطبی به یک منبع تغذیه با جریان مستقیم (Zhaoxine 20V-2A) متصل گردیده‌اند. به منظور اختلاط نمونه در طول فرایند الکترولیز، کل سیستم بر روی همزن مغناطیسی با ۱۵۰ دور در دقیقه قرار گرفته است. در هر مرحله از آزمایش ۴۰۰ میلی‌لیتر از نمونه‌ی فاضلاب طبیعی وارد راکتور الکتروشیمیایی شده و اثر پارامترهای شدت جریان در محدوده‌ی ۵۰-۵۰۰ میلی‌آمپر، زمان واکنش ۵ تا ۴۰ دقیقه به دلیل مؤثر بودن این مقادیر بر فرایند و $pH=4.6$ ، به عنوان شاخص استاندارد pH و مؤثر بودن آن بر فرایند در حذف رنگ و COD مورد ارزیابی واقع شده است. سپس الکتروود مس جایگزین الکتروود آهن شده و فرایند فوق تکرار گردیده است. بعد از انجام آزمایش‌ها، به نمونه‌ها زمان داده شده تا فرایند ته‌نشینی لخته‌ها انجام و بعد از عبور از صافی واتمن ۴۲، پارامترهای مورد نظر اندازه‌گیری شود. رنگ فاضلاب بر

در آب و قیمت ارزان و در دسترس بودن این دو فلز نسبت به سایر فلزات دارای خواص مشابه، در این فرایند از صفحات الکتروود از جنس این دو فلز استفاده می‌شود (۸). تاکنون فرایند الکتروکوآگولاسیون به طور موفقیت‌آمیزی برای تصفیه‌ی فاضلاب‌های مختلفی از جمله: صنعت آبکاری (۹)، دباغی (۱۰)، روغن زیتون (۱۱)، کارخانه‌ی چیپس سیب‌زمینی (۱۲)، شیرابه‌ی محل دفن (۱۳)، فاضلاب رستوران (۱۴)، فاضلاب شهری (۱۵)، رختشوی‌خانه (۱۶) و نیز به طور گسترده برای حذف آرسنیک (۱۷)، فسفات (۱۸)، سولفید، سولفات و سولفیت (۱۹)، برم (۲۰)، فلوراید (۲۱)، نترات (۲۲) و کروم شش ظرفیتی (۲۳) استفاده شده است. بنابراین EC توانسته است بر عدم موفقیت تکنولوژی‌های تصفیه‌ی آب و فاضلاب معمول غلبه کند و یک روش هزینه‌ی اثربخش، قابل اعتماد، ساده و ارزان را برای تصفیه‌ی فاضلاب، بدون نیاز به افزودن مواد شیمیایی فراهم نماید (۲۴). علاوه بر این، مطالعات زیادی جهت تصفیه‌ی فاضلاب‌های رنگی به روش الکتروکوآگولاسیون انجام شده است. نتایج این مطالعات، نشان داده که رنگ، COD، کدورت و جامدات محلول در شرایط عملیاتی مختلف می‌توانند به مقدار قابل ملاحظه‌ای حذف گردند (۲۵، ۲۶، ۲۷ و ۲۸). به عنوان مثال: زاروآل و همکاران در مطالعه‌ی خود جهت حذف رنگ بازیک از فاضلاب نساجی به روش الکتروکوآگولاسیون با الکترودهای آهن توانستند رنگ را به طور کامل حذف کنند (۵). در مطالعه‌ی دیگر، بالا و همکاران توانستند ۷۰ تا ۹۰ درصد از رنگ و ۷۸ درصد از COD فاضلاب سنتتیک حاوی رنگ‌های ری‌اکتیو، دیسپرس و مخلوط آنها را حذف نمایند (۲۶).

بنابراین، با توجه به پتانسیل بالای فرایند الکتروکوآگولاسیون در حذف آلاینده‌های آلی و مقاوم به تجزیه بیولوژیکی، هدف از این مطالعه، حذف رنگ از فاضلاب طبیعی صنعت رنگ‌رزی الیاف با استفاده از الکترودهای آند آلومینیوم و کاتد آهن و مس، تحت

جدول ۱: خصوصیات کمی و کیفی فاضلاب مورد

پارامتر	واحد	متوسط مقدار
COD	mg/l	۱۹۲۰
BOD ₅	mg/l	۳۶۰
رنگ	ADMI	۱۲۸۰
pH	----	۵/۵
هدایت الکتریکی	mS/cm	۱/۶۵
(Cl) کلرور	mg/l	۲۸۰
رنگ ظاهری	----	قرمز



شکل ۱: راکتور الکتروشیمیایی مورد استفاده در مطالعه

pH نمونه‌ها برای هر مرحله از آزمایش، به وسیله‌ی هیدروکسید سدیم یک نرمال به مقدار مطلوب (۸ و ۶،۴ = pH) تنظیم و آزمایش‌ها در شدت جریان ۴۰۰ میلی آمپر و زمان واکنش ۴۰-۵ دقیقه برای هر دو جفت الکترودهای Al/Fe و Al/Cu انجام شده‌است. اثر pH بر کارایی فرایند الکتروکواگولاسیون در نمودار ۲ نشان داده شده‌است. در این مطالعه، حداکثر کارایی حذف رنگ در pH برابر با ۴ بعد از ۴۰ دقیقه زمان واکنش حاصل شده که در آن کارایی حذف رنگ ۹۷ درصد برای Al/Fe و ۹۸ درصد برای Al/Cu و میزان رنگ اندازه‌گیری شده به ترتیب ADMI ۴۱ و ۳۲ بوده‌است.

تأثیر فرایند الکتروکواگولاسیون بر کارایی حذف COD نمودار ۳، کارایی حذف COD در شدت جریان ۴۰۰ میلی آمپر و زمان واکنش ۴۰ دقیقه در pH های مطالعه را برای هر دو جفت الکترودهای Al/Fe و Al/Cu نشان می‌دهد.

مصرف انرژی الکتریکی و کارایی جریان

نمودار ۴، مصرف انرژی الکتریکی در شدت

اساس روش ADM1¹ Tristimulus Filter method به- وسیله دستگاه اسپکتروفوتومتر HACH- DR5000 در محدوده‌ی طول موج مرئی ۷۰۰-۴۰۰ نانومتر و COD براساس روش تقطیر برگشتی مطابق با کتاب روش‌های استاندارد برای انجام آزمایش‌های آب و فاضلاب تعیین مقدار گردیده‌است (۲۹). همچنین به منظور محاسبه‌ی میزان کارایی جریان، وزن الکتروود آلومینیوم قبل و بعد از هر مرحله از آزمایش، اندازه‌گیری شده‌است. همه‌ی آزمایش‌ها، ۲ بار تکرار و نتایج به صورت میانگین گزارش شده- است. انحراف معیار نتایج حاصل از آزمایش‌ها، کمتر از ± 0.05 بوده و نمودارهای مربوط توسط نرم‌افزار Excel نسخه ۲۰۰۳ ترسیم گردیده‌است. لازم به ذکر است که بعد از هر سری از آزمایش‌ها، الکتروودها به مدت ۱۵ دقیقه در محلول اسید کلریدریک ۱۵٪ قرار داده شده و سپس با آب شسته و خشک شده‌اند.

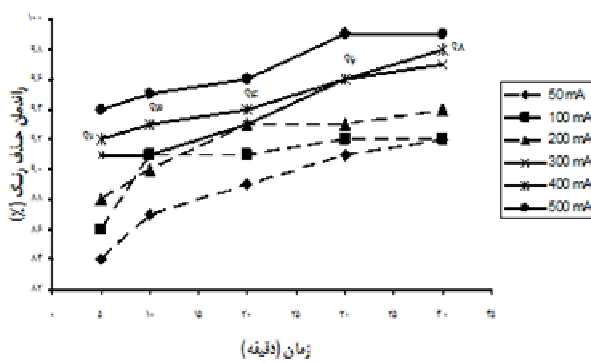
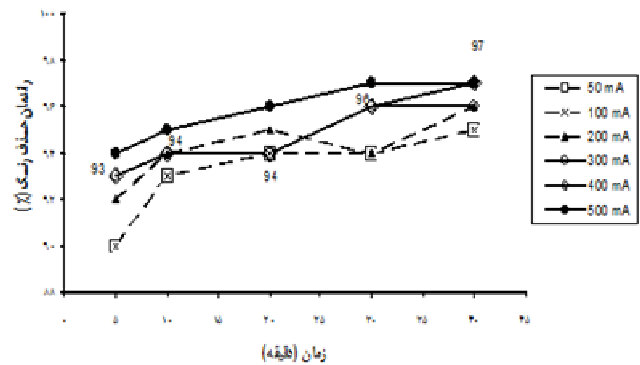
یافته‌ها

اثر شدت جریان الکتریکی و زمان واکنش

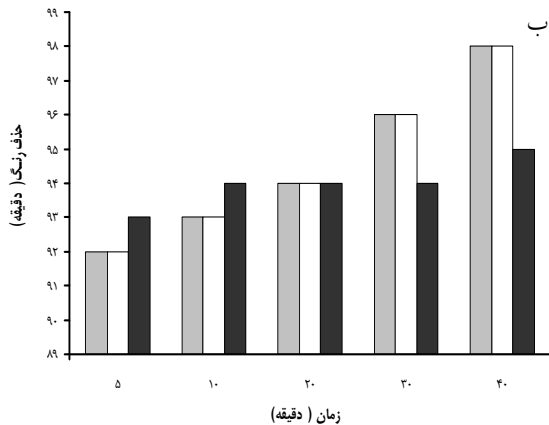
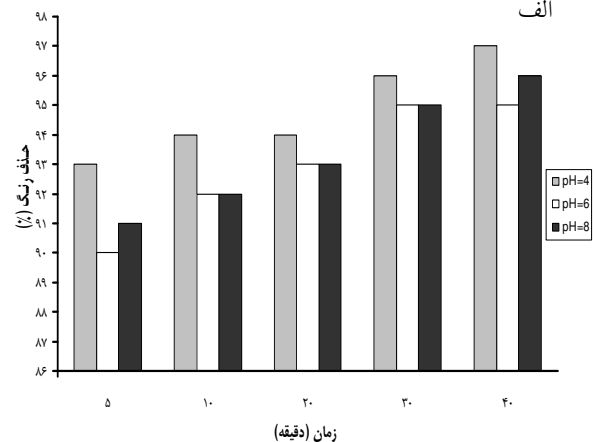
نمودار ۱ کارایی حذف رنگ نسبت به زمان را در شدت جریان‌های متفاوت نشان می‌دهد. همانطور که در نمودار مشاهده می‌شود، با افزایش شدت جریان الکتریکی، کارایی حذف رنگ نیز افزایش می‌یابد. در مورد جفت الکترودهای Al/Fe در شدت جریان‌های ۵۰۰-۵۰ میلی آمپر، کارایی حذف رنگ ۹۴ تا ۹۶ درصد تنها بعد از ۲۰ دقیقه زمان واکنش بود، که توانست رنگ را از ADMI ۱۲۸۰ به ADMI ۵۴-۸۲ برساند. همچنین برای جفت الکترودهای Al/Cu در شرایط مشابه کارایی حذف رنگ ۸۹ تا ۹۶ درصد بود که توانست رنگ را به میزان ADMI ۴۹-۱۳۹ برساند. حداکثر کارایی حذف رنگ در زمان واکنش ۴۰ دقیقه و شدت جریان ۵۰۰ میلی آمپر مشاهده گردیده‌است.

اثر pH

به منظور بررسی اثر pH بر کارایی حذف رنگ،



نمودار ۱: اثر شدت جریان و زمان واکنش بر کارایی حذف رنگ (الف) با جفت الکترودهای Al-Fe (pH=4) و (ب) با جفت الکترودهای Al-Cu (pH=4).



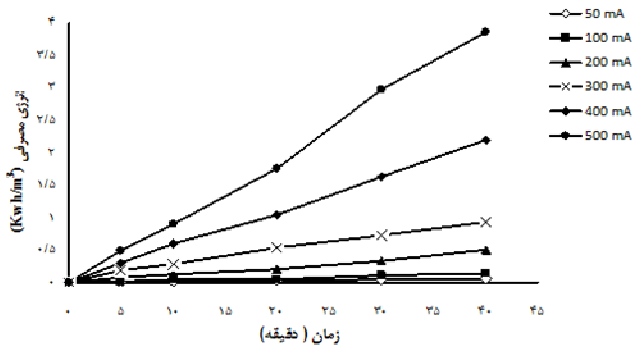
نمودار ۲: اثر pH بر کارایی فرایند الکتروکواگولاسیون با جفت الکترود (الف) Al/Fe و (ب) Al/Cu در شدت جریان ۵۰۰ میلی آمپر.

شرایط بهینه شدت جریان ۴۰۰ میلی آمپر، کارایی جریان ۱۱۰٪ بوده است.

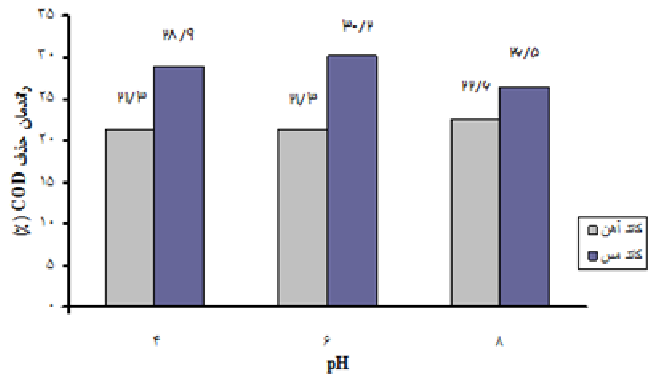
بحث

در این مطالعه در شرایط بهینه شدت جریان ۴۰۰ میلی آمپر، زمان واکنش ۴۰ دقیقه و pH=4 کارایی حذف رنگ و COD به ترتیب ۹۷ و ۲۱ درصد برای Al/Fe و ۹۸ و ۲۹ درصد برای Al/Cu بوده است. تحت این شرایط، مصرف انرژی و کارایی جریان به ترتیب $2/9 \text{ kWh/m}^3$ و ۱۱۰٪ بوده است. بنابراین می توان اظهار داشت که فرایند الکتروکواگولاسیون به نحو موثری می تواند رنگ را از فاضلاب حذف کند، اما قادر به حذف مطلوب COD از فاضلاب نمی باشد. در تمام فرآیندهای الکتروشیمیایی شدت جریان الکتریکی و زمان الکترولیز از مهم ترین

جریان ۵۰۰-۵۰ میلی آمپر در pH=4 را نشان می دهد. مطابق با نمودار فوق، با افزایش شدت جریان الکتریکی و زمان واکنش، میزان مصرف انرژی افزایش می یابد. حداقل مصرف انرژی $0/007 \text{ kWh/m}^3$ در شدت جریان ۵۰ میلی آمپر و زمان واکنش ۵ دقیقه بوده و به تدریج با افزایش شدت جریان و زمان واکنش به دلیل پولاریزه شدن الکترودها افزایش یافته است. حداکثر مصرف انرژی به میزان $3/85 \text{ kWh/m}^3$ در شدت جریان ۵۰۰ میلی آمپر و زمان واکنش ۴۰ دقیقه حاصل شده است. اما در شرایط بهینه آزمایشگاهی در شدت جریان ۴۰۰ میلی آمپر و زمان ۴۰ دقیقه، مصرف انرژی $2/9 \text{ kWh/m}^3$ بوده است. نتایج حاصل از محاسبه کارایی جریان فرایند در زمان واکنش ۴۰ دقیقه نشان داده که با افزایش شدت جریان تا ۳۰۰ میلی آمپر، کارایی جریان افزایش می یابد و از ۳۰۰ تا ۵۰۰ میلی آمپر این تغییرات بسیار ناچیز می باشد. در



شکل ۵: مصرف انرژی الکتریکی در شدت جریان ۵۰-۵۰۰ میلی آمپر.



نمودار ۶: کارایی حذف COD در زمان واکنش ۴۰ دقیقه و شدت جریان ۴۰۰ میلی آمپر با آند آلومینیوم.

پتانسیل بالاتر را می‌توان به قانون فارادی نسبت داد. زیرا مطابق با قانون فارادی ($m = \frac{MI t}{zF}$)، مقدار تولید یون‌های فلزی (m)، به شدت جریان کاربردی (I) و زمان الکترولیز (t) وابسته است (۲۴). هنگامی که یکی از این دو پارامتر افزایش می‌یابد، تراکم عوامل منعقدکننده نیز افزایش می‌یابد. اگر چه حداکثر کارایی حذف رنگ در شدت جریان ۵۰۰ میلی آمپر حاصل شده، اما همان میزان کارایی در شدت جریان ۴۰۰ میلی آمپر نیز مشاهده گردیده است. دانشور و همکاران نیز در مطالعات خود نشان داده‌اند که با افزایش دانسیته جریان از ۲۰ تا ۸۰ آمپر بر متر مربع، کارایی حذف رنگ افزایش می‌یابد و افزایش دانسیته جریان بیش از این مقدار تأثیر چندانی بر کارایی حذف رنگ ندارد (۳۱)؛ لذا به منظور کاهش هزینه‌های مربوط به مصرف انرژی، شدت جریان ۴۰۰ میلی آمپر برای مراحل بعدی مطالعات انتخاب شده است. پارامتر مهم تأثیرگذار دیگر بر کارایی، فرایند الکتروکواگولاسیون pH می‌باشد (۴، ۶ و ۲۳). زیرا گونه‌های منعقدکننده در محلول را تعیین می‌کند و بنابراین اثر ویژه‌ای بر مکانیسم رنگ‌زدایی دارد. همانطور که در نمودار ۲ نشان داده شده، کاهش کارایی فرایند الکتروکواگولاسیون با افزایش pH چندان محسوس نیست. زیرا هنگامی که pH مطالعه بین ۴ تا ۹ باشد، یون‌های Al^{3+} و OH^- ، گونه‌های متنوع مونومریک مانند $Al(OH)_2^+$ و $Al(OH)_2^{+2}$ و گونه‌های پلی مریک مانند $Al_6(OH)_{15}^{+3}$ ، $Al_7(OH)_{17}^{+4}$ و $Al_7(OH)_{17}^{+7}$

پارامترهای کنترل کننده سرعت واکنش درون راکتور الکتروشیمیایی می‌باشند (۲۵). نمودار ۱ نشان می‌دهد تغییر نوع کاتد تأثیر چشم‌گیری بر کارایی حذف رنگ ندارد. زیرا کاربرد انواع مختلف کاتدها، تنها بر انتشار هیدروکسیدهای آلومینیوم تأثیر می‌گذارند و تولیدکننده یون‌های هیدروکسید می‌باشند (۱۰). با افزایش شدت جریان الکتریکی، حلالیت الکترودهای آند نیز افزایش می‌یابد، در نتیجه، هیدروکسیدهای آلومینیوم تولیدی، میزان بیشتری از آلاینده‌ها را حذف نموده و به همین علت، میزان لجن حاصل از آن نیز افزایش می‌یابد. بنابراین، افزایش حذف رنگ با افزایش شدت جریان الکتریکی را می‌توان به افزایش پتانسیل انجام واکنش الکتروود نسبت داد (۳۰). همچنین مطالعه‌ی حاضر نشان داده که افزایش زمان الکترولیز تأثیری مشابه با افزایش شدت جریان الکتریکی بر راندمان حذف رنگ دارد. زیرا کارایی حذف رنگ مستقیماً به غلظت یون‌های فلزی تولید شده بر روی الکترودها وابسته است و با افزایش زمان الکترولیز، غلظت یون‌های فلزی و لخته‌های هیدروکسید آنها افزایش می‌یابد (۳۱)، به گونه‌ای که حداکثر کارایی حذف رنگ در زمان واکنش ۴۰ دقیقه و شدت جریان ۵۰۰ میلی آمپر مشاهده گردیده است. اودج و همکاران نیز در مطالعات خود نشان داده‌اند که افزایش زمان الکترولیز از ۱۰ به ۶۰ دقیقه، منجر به افزایش کارایی حذف رنگ از ۵۲/۲ به ۹۸/۲۸ می‌شود (۳۲). کارایی بالاتر حذف رنگ در زمان طولانی‌تر و

جریان می‌باشد. بنابراین در این مطالعه، انرژی مصرفی به- ازای حجم فاضلاب تصفیه شده بر اساس رابطه ۶ محاسبه

$$E = \left(\frac{UIt}{v} \right) \quad (۶)$$

$$E = \left(\frac{UIt}{v} \right) \quad (۶)$$

که در آن E انرژی الکتریکی مصرفی برحسب (kWh/m³)، U ولتاژ اعمالی به سلول الکترولیز بر حسب ولت، I شدت جریان عبور داده شده از مدار الکتریکی بر حسب آمپر، t زمان الکترولیز بر حسب ساعت و v حجم نمونه بر حسب لیتر می‌باشد (۱۲). کارایی جریان (۴) فرایند EC به وسیله معادله ۷ بر اساس مقایسه وزن تجربی آلومینیوم مصرف شده در طی فرایند (Δm_{exp}) با مقدار تئوری آلومینیوم حل شده (Δm_{theo}) مطابق با قانون فارادی (معادله ۸) محاسبه شده که در آن M جرم مولکولی آلومینیوم بر حسب گرم بر مول، I شدت جریان کاربردی بر حسب آمپر، t زمان الکترولیز برحسب ثانیه، n تعداد کاترون های مبادله شده و F عدد فارادی (C/mol) ۹۶۴۸۷ می‌باشد (۳۴).

$$\phi = \left(\frac{\Delta m_{exp}}{\Delta m_{theo}} \right) \times 100 \quad (۷)$$

$$\Delta m_{theo} = \frac{MI_{EC}t}{nF} \quad (۸)$$

که در مقایسه با مطالعه دانشور و همکاران (۳) و آلاتون و همکاران (۳۵) با مصرف انرژی کمتری توانست رنگ را به مقدار مطلوبی حذف نماید. کارایی جریان به- شدت جریان کاربردی و نوع آنیون های موجود در محلول بستگی دارد. کارایی جریان بیش از ۱۰۰٪ برای الکترولیز آلومینیوم به اثر خوردگی حفره ای نسبت داده می‌شود، به- ویژه زمانی که یون های کلرور در محلول موجود باشد و مقدار کاهش کارایی جریان در شدت جریان کمتر را می- توان به غیر فعال شدن آن در طول آزمایش نسبت داد (۳۶).

Al(OH)₃ را تولید می‌کند، که سرانجام به Al₁₃O₄(OH)₃₄ نامحلول از طریق کتیک های ترسیب/پلیمریزاسیون تغییر شکل می‌دهند (۷). لخته های Al(OH)₃ سطح بزرگتری دارند که برای جذب ترکیبات آلی محلول و به دام انداختن ذرات کلوئیدی مناسب هستند. در این محدوده از pH، تراکم عوامل منعقدکننده مؤثر مانند Al(OH)₂⁺ و Al(OH)₃ بیشتر می‌باشد، که منجر به کارایی بالای فرایند گردیده است. بنابراین می توان گفت که فرایند الکتروکواگولاسیون با الکترودهای آلومینیوم در محدوده وسیعی از pH مؤثر است (۶).

زید و همکاران نیز در مطالعات خود جهت حذف رنگ لیکور سیاه، اثر pH بر کارایی فرایند الکتروکواگولاسیون را بررسی کرده و گزارش داده اند که کارایی تصفیه در pH پایین تر از ۲ و بالاتر از ۸ ناچیز است و در محدوده ۴ تا ۸ بالاترین کارایی حذف مشاهده شده (۲۴)، که با نتایج مطالعه ی حاضر همخوانی داشته است. از نمودار ۳، چنین برمی آید که فرایند الکتروکواگولاسیون تأثیر چندانی بر کارایی حذف COD نداشته است. زیرا تنها ۳۰-۲۰ درصد از آن را کاهش داده که با توجه به مقدار COD فاضلاب (۱۹۲۰ mg/l) بسیار ناچیز است. میزان حذف کمتر COD نسبت به رنگ می- تواند به دلیل تجزیه ی رنگ ها و تبدیل آنها به سایر ترکیبات آلی و برهمکنش ضعیف محصولات با هیدروکسیدهای فلز باشد (۳۳). همچنین می توان اظهار داشت که بخش زیادی از COD فاضلاب به دلیل استفاده از مواد شیمیایی مختلف در طی فرایندهای انجام- شده در این صنعت مربوط به مواد آلی دیگری است که قابلیت حذف با فرایند الکتروکواگولاسیون را ندارند.

به منظور دستیابی به درجه ی مطلوبی از تصفیه که بتواند روش تصفیه را امکان پذیر نماید علاوه بر کارایی بالای حذف آلاینده ها، هزینه های عملیاتی نیز تعیین کننده می باشند. در فرایند الکتروکواگولاسیون، مهم ترین پارامتر تعیین کننده این هزینه ها، مصرف انرژی الکتریکی و کارایی

تقدیر و تشکر

مسئولین آزمایشگاه آب و فاضلاب دانشکده‌ی بهداشت
دانشگاه شهید بهشتی اعلام می‌دارند.

بدین‌وسیله نویسندگان مقاله مراتب سپاس خود را از

References

1. Sanroman MA, Pazos M, Ricart MT, Cameselle C. Electrochemical decolorization of structurally different dyes. *Chemosphere*. 2004; 57: 233-9.
2. Daneshvar N, Ashassi-Sorkhabi H, Tizpar A. Decolorization of orange II by electrocoagulation method. *Separation and Purification Technology*. 2003; 31(2):153-62.
3. Daneshvar N, Oladegaragoze A, Djafarzadeh N. Decolorization of basic dye solutions by electrocoagulation: An investigation of the effect of operational parameters. *Journal of Hazardous Materials* 2006; 129(1-3):116-22.
4. Can OT, Kobya M, Demirbas E, Bayramoglu M. Treatment of the textile wastewater by combined electrocoagulation. *Chemosphere*. 2006; 62(2): 181-7.
5. Zaroual Z, Azzi M, Saib N, Chainet E. Contribution to the study of electrocoagulation mechanism in basic textile effluent. *Journal of Hazardous Materials*. 2006; 131(1-3):73-8.
6. Merzouk B, Madani Kh, Sekki A. Using electrocoagulation-electroflotation technology to treat synthetic solution and textile wastewater, two case studies. *Desalination* 2010; 250(2):573-7.
7. Merzouk B, Gourich B, Sekki A, Madani K, Vial CH, Barkaoui M. Studies on the decolorization of textile dye wastewater by continuous electrocoagulation process. *Chemical Engineering Journal*. 2009; 149(1-3): 207-14.
8. Parga JR, Cocke DL, Valenzuela JL, Gomes JA, Kesmez M, Irwin G, Moreno H, Weir M. Arsenic removal via Electrocoagulation from heavy metal contaminated groundwater in La Comarca Lagunera Mexico. *Journal of Hazardous Material*. 2005; 124(1-3): 247-54.
9. Adhoum N, Monser L, Bellakhal N, Belgaied J. Treatment of electroplating wastewater containing Cu²⁺, Zn²⁺ and Cr(VI) by electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*. 2004; 112(3):207-13.
10. Feng JW, Sun YB, Zheng Z, Tian SLYC. Treatment of tannery wastewater by electrocoagulation. *Journal of Environmental Sciences* 2007; 19(12):1409-15.
11. Hanafi F, Assobhei O, Mountadar M. Detoxification and discoloration of Moroccan Olive mill wastewater by electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*. 2010; 174(1-3) : 807-12.
12. Kobya M, Hiz H, Senturk E, Aydinler C, Demirbas E. Treatment of potato chips manufacturing wastewater by electrocoagulation. *Desalination* 2006; 190(1-3): 201-11.
13. Ilhan F, Kurt U, Apaydin O, Gonullu MT. Treatment of leachate by electrocoagulation using aluminum and iron electrodes. *Journal of Hazardous Materials*. 2007; 154(1-3) : 381-9.
14. Chen X, Chen G, Yue PL. Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation. *Separation and Purification of Technology* 2000; 19(1-2): 65-76.
15. Pouet MF, Grasmick A. Urban wastewater treatment by electrocoagulation and flotation. *Water Science and Technology*. 1995; 31(3): 275-83.
16. Wang CT, Chou WL, Kuo YM. Removal of COD from laundry wastewater by electrocoagulation /electroflotation. *Journal of Hazardous Materials*. 2009; 164: 81-6.
17. Gomes JAG, Daida P, Kesmez M, Weir M, Moreno H, Parga JR, Irwin G, McWhinney H, Grady T, Peterson E, et al. Arsenic removal by electrocoagulation using combined Al-Fe electrode system and characterization of products. *Journal of Hazardous Materials*. 2007; 139(2): 220-31.
18. Bektas N, Akbulut H, Inan H, Dimoglo A. Removal of phosphate from aqueous solutions by electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*. 2004; 106(2-3): 101-5.
19. Murugananthan M, Raju G B, Prabhakar S. Removal of sulfide, sulfate and sulfite ions by electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*. 2003; 109(1-3): 37-44.
20. Yilmaz A E, Boncukcuoglu R, Kocakerim MM, Keskinler B. The investigation of parameters affecting boron removal by electrocoagulation method. *Journal of Hazardous Materials*. 2005; 125: 160-5.
21. Hua CY, Loa SK, Kuanb WH, Lee YD. Removal of fluoride from semiconductor wastewater by electrocoagulation-flotation. *Water Res*. 2005; 39(5): 895-901.
22. Koparal AS, Ogutveren UB. Removal of nitrate from water by electroreduction and electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*. 2002; 89(1): 83-94.
23. Zongo I, Leclerc JP, Maiga HM, Wethe J, Lopicque F. Removal of hexavalent chromium from industrial wastewater by electrocoagulation: A comprehensive comparison of aluminum and iron electrodes. *Separation and Purification Technology* 2006; 66(1) : 159-66.

24. Zaied M, Bellakhal N. Electrocoagulation treatment of black liquor from paper industry. *Journal of Hazardous Materials*. 2009; 1639(2-3): 995-1000.
25. Kobya M, Can OT, Bayramoglu M. Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. *Journal of Hazardous Materials*. 2003; 100(1-3): 163-78.
26. Balla W, Essadkia AH, Gouricha B, Dassaa A, Chenik H, Azzi M. Electrocoagulation/ electroflotation of reactive, disperse and mixture dyes in an external-loop airlift reactor. *Journal of Hazardous Materials*. 2010; 184(1-3): 710-6.
27. Bayramoglu M, Kobya M, Can OT, Sozbir M. Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater. *Separation and Purification Technology*. 2004; 37 (2) : 117-25.
28. Alinsafi A, Khemis M, Pons MN, Leclerc JP, Yaacoubi A, Benhammou A, Nejmeddine A. Electrocoagulation of reactive textile dyes and textile wastewater. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2005; 44(4): 461- 70.
29. APHA. *Standard Methods for the Examination of water and wastewater*. 20th edition. American public Health Association; 1998.
30. Rahmani AR, Samarghandi MR. Electrocoagulation treatment of color solution containing colored index Eriochrome Black T. *Journal of Water and Wastewater*. 2007; 1: 52-8.[Persian]
31. Daneshvar N, Khataee AR, Djafarzadeh N. The use of artificial neural networks (ANN) for modelling of decolorization of textile dye solution containing C. I. Basic Yellow 28 by electrocoagulation process. *Journal of Hazardous Materials*. 2006; 137(3): 1788-95.
32. Aoudj S, Khelifa A, Drouiche N, Hecini M, Hamitouche H. Electrocoagulation process applied to wastewater containing dyes from textile industry. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2010; 49(11):1176-82.
33. Dalvand A, Gholami M, Joneidi A, Mahmoodi NM. Investigation of electrochemical coagulation process efficiency for removal of reactive red 198 from colored wastewater. *Journal of Color science and technology*. 2009; 3: 97-105.[Persian]
34. Daneshvar N, Khataee AR, Ghadim A, Rasoulifard MH. Decolorization of C.I. Acid Yellow 23 solution by electrocoagulation process: Investigation of operational parameters and evaluation of specific electrical energy consumption (SEEC). *Journal of Hazardous Materials*. 2007;148(3): 566-72.
35. Alaton IA, Kabdash I, Sahin Y. Effect of operation parameters on the electrocoagulation of simulated Acid dyebath effluent. *the Open Environmental & Biological Monitoring Journal*. 2008; 1: 1-7.
36. Lio H, Zhou X, Qu J. *Electrocoagulation in water treatment*, New York: Springer; 2010: 245-62.

Evaluation of electrocoagulation processeffect in decolorization ofdying wastewater by using Al/Fe & Al/Cu electrodes

Farshid Ghanbari,

Ph.D student in Environmental Health Engineering, Faculty of Public Health, Ahvaz Jundishapur University of Medical Sciences, Ahvaz, Iran.

Ashraf Mazaheri Tehrani,

Instructor, Environmental Health Engineering, Department of Environmental Health Engineering, Kashan University of Medical Sciences, Kashan, Iran.

Fayyaz Mahdipour,

M.Sc. of Environmental Health Engineering, Faculty of Public Health, ShahidBeheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

Simin Mirshafeean,

M.Sc. of Environmental Health Engineering, Faculty of Public Health, ShahidBeheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

Mahsa Moradi,

Authority of water and wastewater laboratory, Faculty of Public Health, ShahidBeheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

Hajar Sharifi Maleksari

M.Sc. of Environmental Health Engineering, Member of student Research Committee, Faculty of Public Health, ShahidBeheshti University of Medical Sciences, Tehran,Iran.

Received:28/12/2013, Revised: 22/01/2014, Accepted:18/02/2014

Corresponding author:

Tehran, ShahidBeheshti University of Medical Sciences, Faculty of Public Health,
E-mail:
h_sharifimalek@yahoo.com

Abstract

Background: Colored wastewaters are major source of aquatic pollution which will cause considerable impacts to the environment if discharge without treatment. In recent years, Electrocoagulation (EC) process has been attracted a great attention for treatment of industrial wastewaters as an appropriate method. In this study, the efficiency of electrocoagulation process on color removal of natural dyeing wastewater was investigated.

Material and Methods: This study experimentally was run in a batch electrochemical reactor consisting of a 0.6 L glass beaker, two anodes and two cathodes. The anodes and the cathodes were made of aluminum and iron or copper respectively which installed in parallel. In each of test, 400 mL of wastewater add into the reactor, then effect of three parameters including the current (50-500 mA), reaction time (5-40 min) and the pH of wastewater (pH=4-8) on process performance were investigated.

Results: The results showed that optimal conditions for Al/Cu and Al/Fe systems was in 400 mA applied current, pH of 4 and 40 minutes. In these conditions, EC with Al/Cu electrodes were capable to remove of almost complete color (98%) and efficiency of COD removal was 28 %, whereas EC with Al/Fe resulted in 97% color removal and 21% COD reduction. Electrical energy consumption and current efficiency of EC process for optimal condition were found 2.9 kWhm⁻³ and 110% respectively.

Conclusion: According to our finding, it proposed that EC process is very efficient and economic process for color removal from wastewater.

Key words: Decolorization, Electrocoagulation, Wastewater treatment, Aluminum