



حذف رنگ کریستال ویوله از پساب‌های سنتتیک با استفاده از فرایند

الکتروکواگولاسیون حاوی الکترودهای استیل-پلاتین

هیوا حسینی^۱، رویا جلیلیان^۲، حدیث فتاحی^۲، شهره حشمتی^۲، ابوالفضل نعیم آبادی^۳، هوشیار حسینی^{۴*}، سید امید رستگار^۴

۱- گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، مرکز مطالعات عوامل محیطی موثر بر سلامت، دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

۲- کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

۳- گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت و پیراپزشکی، دانشکده علوم پزشکی نیشابور، ایران

۴- گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه کرستان، سمنجان، ایران

چکیده

مقدمه

فرایند الکتروکواگولاسیون در بین فرایندهای اکسیداسیون به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد نظیر طراحی ساده سیستم و وسعت عمل برای تصفیه انواع پساب‌های صنعتی به‌عنوان یکی از تأثیرگذارترین روش‌های تصفیه معرفی شده است. برای ارتقا این فرایند محققان روش‌های مختلفی را پیشنهاد کرده‌اند. در این مطالعه فرایند الکتروکواگولاسیون با چیدمان الکترودی استیل اسفنجی-پلاتین و با هدف رنگ‌زدایی از پساب حاوی کریستال ویوله ارزیابی شد.

مواد و روش‌ها

به منظور تهیه پساب رنگی از پودر خشک کریستال ویوله در آب مقطر استفاده شد. برای تعیین میزان محتوای رنگ از روش اسپکتروفتومتری (۶۰۰ نانومتر) استفاده گردید. آزمایش‌های الکتروکواگولاسیون در یک بشر ۱۰۰۰ میلی‌لیتری و به صورت ناپیوسته انجام پذیرفت. سینتیک شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم برای مطالعات سینتیکی استفاده شد. آزمون سمیت نیز با استفاده از باکتری‌های گروه کلیفرم به منظور اطمینان از کاهش سمیت کریستال ویوله صورت پذیرفت.

یافته‌ها

نتایج نشان داد که فرایند مورد نظر در شرایط بهینه (pH ۹، زمان ۶۰ دقیقه، میزان جریان کاربردی ۰/۴ آمپر و غلظت رنگ ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر)، پساب حاوی کریستال ویوله را با کارایی بالا (حدود ۹۹/۶۳٪) از محیط آبی تصفیه نمود. آزمون سمیت میکروبی نیز نشان داد پساب تصفیه شده در این روش قابلیت استفاده مجدد یا تخلیه در محیط را داراست.

نتیجه‌گیری

براساس نتایج به دست آمده فرایند الکتروکواگولاسیون با چیدمان الکترودی استیل اسفنجی-پلاتین به طور مؤثری می‌تواند در تصفیه پساب رنگی صنایع استفاده گردد.

کلیدواژه‌ها

کریستال ویوله، الکتروکواگولاسیون، الکترودهای استیل-پلاتین، آزمون سمیت

مقاله پژوهشی اصیل

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۱۴

*نویسنده مسئول: هوشیار حسینی، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، مرکز مطالعات عوامل محیطی موثر بر سلامت، دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران
تلفن: ۰۸۳۳۸۲۷۳۰۶۸
پست الکترونیک: hoo.hosseini@gmail.com



مقدمه

صنایع نساجی و رنگرزی از صنایع مهم و پایه بوده و به عنوان یکی از صنایع مادر محسوب می‌گردند که نقش بسزایی در تولید و اقتصاد یک کشور دارند. علاوه بر استفاده از طیف وسیعی از رنگ‌های سنتتیک در فرآیندهای تولید و پردازش، حجم بسیار زیادی از پساب تولید می‌کنند که حاوی مقادیر بالایی از ترکیبات رنگی می‌باشند. میزان مصرف آب در این صنایع حدود ۵۲-۵۲ متر مکعب به ازای هر تن محصول تولید شده می‌باشد (۱). تحقیقات نشان داده است که حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد از رنگ مصرفی وارد پساب خروجی می‌شود. از این رو می‌تواند در صورت رهاسازی بدون تصفیه سبب افت شدید اکسیژن، ممانعت از عبور نور و اختلال در انجام فرآیند فتوسنتز در محیط‌های آبی گردد، همچنین ایجاد مناظر زشت و تولید بو در محیط می‌نماید. با این شرح پساب این صنایع قبل از تخلیه به بوم سازگان‌های حیاتی بایستی بی‌خطرسازی و رنگ‌زدایی شوند (۲). همچنین پساب‌های رنگی حاصل از صنایع رنگرزی و نساجی دارای سطح بالا در هر یک از موارد دما، میزان اکسیژن خواهی زیست-شیمیایی (BOD)، اکسیژن خواهی شیمیایی (COD)، جامدات معلق، مواد محلول، خاصیت اسیدیته و قلیائیت بالا می‌باشند (۳).

روش‌های مختلفی توسط محققان برای حذف رنگ از پساب پیشنهاد شده است که به چند دسته فیزیکی، فیزیکی-شیمیایی، زیستی و یا شیمیایی تقسیم‌بندی می‌شوند. انعقاد و لخته‌سازی، تصفیه بیولوژیکی، ازن زنی، اکسیداسیون شیمیایی و فرایندهای فتوکاتالیستی غشایی، نانو تکنولوژی، فتوشیمیایی و تصفیه آنزیمی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (۴). بسیاری از این روش‌های پیشنهادی در عین کارایی مناسب، به دلیل داشتن معایبی از قبیل هزینه‌های بهره برداری و مشکلات مربوطه، از کاربرد محدودی برخوردار می‌باشند و استفاده از هر کدام شرایط ویژه‌ای از نظر فنی و اقتصادی را می‌طلبد. استفاده از فرایندهای اکسیداسیون در

سال‌های اخیر بسیار مورد توجه محققان بوده است. این فرایند به دلیل کارایی بالا، بی‌خطرسازی و معدنی کردن ترکیبات آلی نظیر رنگ‌ها همواره به عنوان یک گزینه اصلی در تصفیه پساب‌های رنگی مورد نظر بوده است (۶، ۷). در بین فرایندهای اکسیداسیون فرایند الکتروکواگولاسیون به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد نظیر طراحی ساده سیستم، وسعت عمل برای تصفیه انواع پساب‌های صنعتی، هزینه کم راه‌اندازی و بهره‌برداری، عدم نیاز به مواد شیمیایی خاص و تولید لجن جانبی اندک، به عنوان یکی از تأثیرگذارترین روش‌های تصفیه معرفی شده است. از دیگر مزایای آن تولید لجنی با قابلیت ته‌نشینی مناسب و دارای فعالیت بالا در مقایسه با روش‌های سنتی است (۸). برای مثال: رنگ‌زدایی توسط فرایند الکتروکواگولاسیون در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته است (۳، ۹، ۱۰). قنبری و همکاران (۱۳۹۲) تأثیر فرآیند الکتروکواگولاسیون با استفاده از الکترودهای آلومینیوم/ آهن و آلومینیوم/ مس در حذف رنگ از فاضلاب صنعت رنگرزی مورد بررسی قرار دادند. در شرایط بهینه آنها موفق شدند پساب مورد نظر را با کارایی حدود ۹۷ درصد رنگ‌زدایی کنند (۱۱). مطالعه رحمانی و همکاران (۱۳۸۸) در رنگ‌زدایی اریوکروم بلاک تی از پساب ساختگی با استفاده از فرایند الکتروکواگولاسیون واجد الکترودهای آهن و آلومینیوم، نشان دادند که کارایی حذف رنگ با زمان تماس و ولتاژ رابطه مستقیم و با افزایش pH و فاصله الکترودها رابطه معکوس دارد. همچنین گزارش نمودند که کارایی حذف رنگ در استفاده از الکترودهای آهن و آلومینیوم حدود ۹۶ و ۸۶ درصد می‌باشد (۱۲). در مطالعه‌ای که توسط Mbacké و همکاران (۲۰۱۶) بر روی تصفیه پذیری پساب حاوی رنگ کریستال ویوله با استفاده از فرایند الکتروکواگولاسیون انجام شد. گزارش نمودند که فرایند مورد نظر قادر به رنگ‌زدایی کامل کریستال ویوله از پساب در کمتر از زمان یک ساعت است (۱۳). از نکات حائز اهمیت در فرایند الکتروکواگولاسیون می‌توان به نوع الکترو



و چیدمان آنها اشاره کرد. شکل، جنس و نحوه قرارگیری الکترودها از شرایط مهم در اجرای یک سیستم بیوالکتروشیمیایی مطلوب می‌باشد (۱۴). در روش الکتروشیمیایی، الکترودهای مسطح با شکل قرارگیری موازی معمول‌ترین سیستم الکترودی هستند اما برخی مطالعات، استفاده از فرم‌های غیر مسطح را با کارایی بالا گزارش نموده‌اند. مواد متخلخل مثل بسترهای آکنده، انواع توری مانند و مشبک، فلزات بسط یافته در هر دو شکل الکترودهای مسطح و استوانه‌ای در سیستم‌های الکتروشیمیایی مورد بررسی قرار گرفته‌اند (۱۵). در این مطالعه رنگ‌زدایی کریستال ویوله با استفاده از سیستم جدید استیل اسفنجی به عنوان آند و پلاتین میله‌ای به عنوان کاتد صورت پذیرفت. دلیل انتخاب استیل داشتن ویژگی‌هایی نظیر هزینه کم، خوردگی پایین نسبت به آهن، مقاومت الکتریکی داخلی ناچیز و هدایت الکتریکی نسبتاً بالا می‌باشد. همچنین برای افزایش میزان سطح، نوع اسفنجی آن مورد استفاده قرار گرفت (۱۶). از طرفی پلاتین به دلیل عدم خوردگی و نقش در تولید گونه‌های اکسیداتیو به کار گرفته شد. در پایان به منظور اطمینان از دور ریزی و تخلیه پساب تصفیه شده، تست سمیت بر روی باکتری‌های گروه کلیفرم صورت پذیرفت.

مواد و روش‌ها

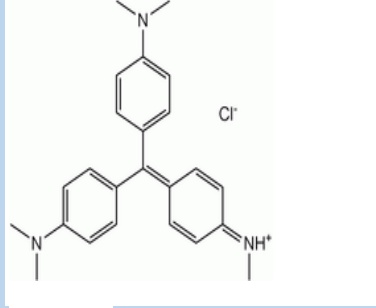
فاضلاب سنتتیک با انحلال یک گرم در لیتر از پودر خشک کریستال ویوله (مرک) در آب مقطر تهیه شد. جدول ۱ مشخصات و ساختار کریستال ویوله را نشان می‌دهد. در بررسی متغیرهای مورد نظر تعداد ۶۶ آنالیز به منظور اطمینان از نتایج در نظر گرفته شد. سنجش مقدار رنگ به روش اسپکتروفتومتری و در طول موج ۶۰۰ نانومتر انجام شد (۳). به منظور تنظیم pH از اسیدکلریدریک و سود یک مولار استفاده گردید. آزمایش‌های الکتروکواگولاسیون از یک بشر ۱۰۰۰ میلی‌لیتری به‌عنوان راکتور ناپیوسته استفاده گردید. تامین جریان الکتریسیته مورد نظر از منبع تغذیه

جریان مستقیم مدل TEK-8051 استفاده شد. در این سیستم از الکترودهای میله‌ای پلاتین در اندازه ۱۵ × ۰/۳ سانتی‌متر و استیل اسفنجی استفاده گردید. اسید سولفوریک ۶ نرمال و آب مقطر جهت زدودن ناخالصی سطح الکترودها بکار برده شد. برای ایجاد شرایط یکنواخت در کل الکترولیت از یک دستگاه همزن مغناطیسی (مدل آلفا HS-860) استفاده شد. در انجام تست سمیت، باکتری‌های گروه کلیفرم توسط محیط‌های لاکتوز براث و برلیانت گرین براث از فاضلاب جداسازی و تخلیص شدند. به منظور تعیین میزان رشد باکتری‌ها از محیط اتوزین متیلن بلو آگار استفاده و میزان کلنی در واحد سطح مشخص گردید. ابتدا باکتری‌های گروه کلیفرم در حدود یک ساعت در معرض کریستال ویوله و پساب تولیدی قرار گرفته، سپس حدود ۰/۵ میلی‌لیتر از محلول مخلوط شده در محیط کشت به مدت ۴۸ ساعت و در ۳۵ درجه سانتی‌گراد انکوبه گردید. نمونه برداری در این فرایند به‌صورت نمونه‌های ترکیبی به منظور فراهم سازی نمونه یکنواخت مورد نظر، انجام گرفت. در بررسی اثر فاکتورهای موثر بر فرایند الکتروکواگولاسیون، pH اولیه (۳-۹) و جریان اعمالی (۰/۱-۰/۴ آمپر) به عنوان یکی از تأثیرگذارترین مولفه‌ها بررسی شدند. دیگر پارامترهای مؤثر نظیر غلظت اولیه رنگ (۲۰-۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر)، زمان (صفر تا ۶۰ دقیقه) و فاصله بین الکترودها مطالعه شد. مطالعات سینتیک در شرایط بهینه مورد بررسی قرار گرفت و مشهورترین مدل‌های آن (سینتیک درجه اول و دوم فرعی) مورد استفاده قرار گرفتند. روابط ۱ و ۲ روابط سینتیکی درجه اول و دوم فرعی را نشان می‌دهند. آزمون سمیت نیز با توجه به میزان کلنی تشکیل یافته در مراحل مختلف در نظر گرفته شد (۳).

$$\ln C_t = \ln C_0 - k_1 t \quad (\text{معادله ۱})$$

$$\frac{1}{C_t} = k_2 t + \frac{1}{C_0} \quad (\text{معادله ۲})$$

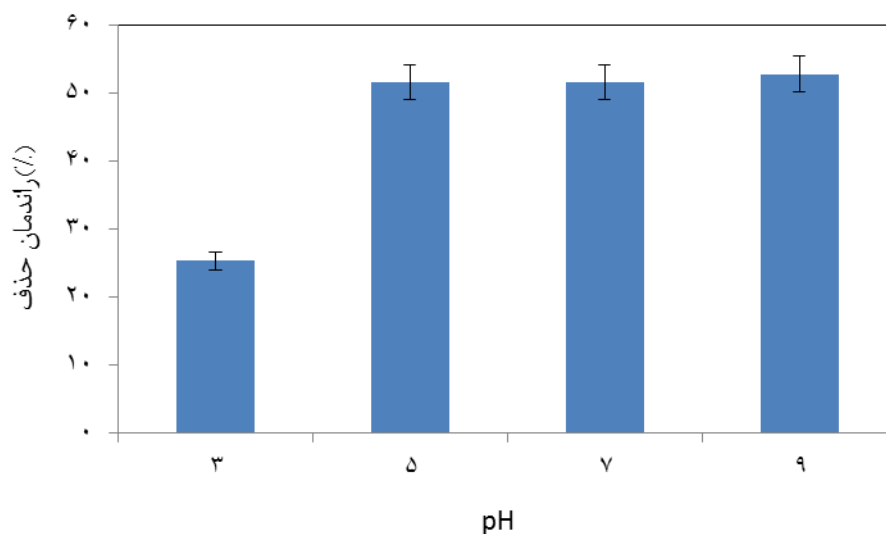
جدول ۱- مشخصات کریستال ویوله

شکل	فرمول شیمیایی	نام آیوپاک
	 $C_{25}H_{30}N_3Cl$	Tris(4-(dimethylamino)phenyl)methylium chloride

یافته‌ها

می‌توان دریافت در pH های ۵ و بالاتر، کارایی ۵۲/۷ درصد بود که نسبت به سایر pH های اسیدی، بیشترین کارایی را دارا بوده است.

تأثیر pH بر فرایند رنگ زدایی: نتایج حاصل از اثر pH اولیه در شکل ۱ نشان داده شده است که با توجه به آن



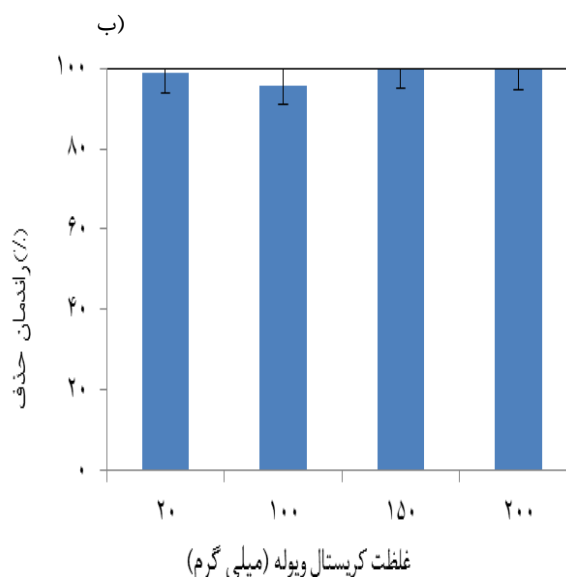
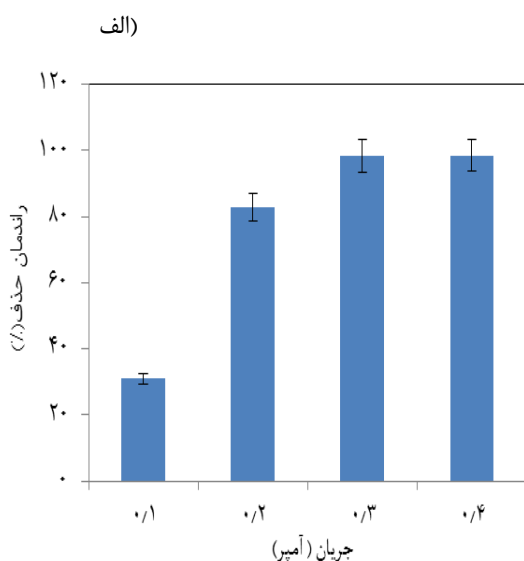
شکل ۱- تعیین اثر میزان pH اولیه بر کارایی فرآیند الکتروکواگولاسیون در زنگ‌زدایی از محلول حاوی کریستال ویوله (غلظت رنگ ۵۰ میلی گرم در لیتر، جریان کاربردی ۰/۱۵ آمپر، غلظت الکترولیت ۰/۱ گرم در لیتر، زمان ۶۰ دقیقه، فاصله بین الکترودها ۱/۵ سانتی‌متر)



تأثیر تغییرات جریان اعمالی و غلظت کریستال ویوله

بر کارایی فرایند الکتروکواگولاسیون

پس از تعیین مقدار بهینه pH، در مرحله‌ی نخست تأثیر تغییرات دانسیته جریان بر کارایی فرایند الکتروکواگولاسیون در محدوده‌ی ۰/۴-۰/۱ آمپر مورد بررسی قرار گرفت. در این مرحله غلظت اولیه ماده رنگ زا ۵۰ میلی گرم در لیتر، غلظت الکترولیت ۰/۱ گرم در لیتر بود و با استفاده از کلرید سدیم تنظیم شد. شکل ۲ الف بیانگر نتایج حاصل از اثر جریان‌های مختلف بر فرایند الکتروکواگولاسیون در حذف رنگ مذکور

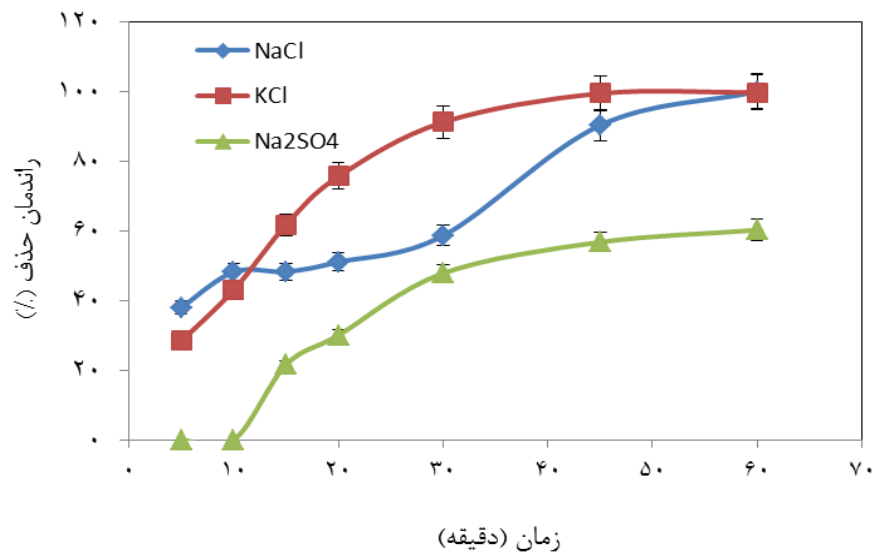


شکل ۲- الف) بررسی اثر تغییرات جریان بر کارایی فرایند الکتروکواگولاسیون در رنگ‌زدایی از محلول حاوی کریستال ویوله ب) تعیین اثر میزان غلظت اولیه کریستال ویوله بر کارایی فرایند الکتروکواگولاسیون (۳ pH، زمان ۶۰ دقیقه، غلظت الکترولیت ۰/۱ گرم در لیتر، فاصله بین الکترودها ۱/۵ سانتی متر)

میزان رنگ بری کریستال ویوله در حضور نمک‌های نظیر NaCl، KCl و Na_2SO_4 ارزیابی شد. شکل شماره ۳ نتایج این مرحله را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳ می‌توان دریافت که قابلیت رنگ زدایی در استفاده از دو نمک کلرید سدیم و پتاسیم بالاتر است.

تأثیر الکترولیت در اکسیداسیون کریستال ویوله:

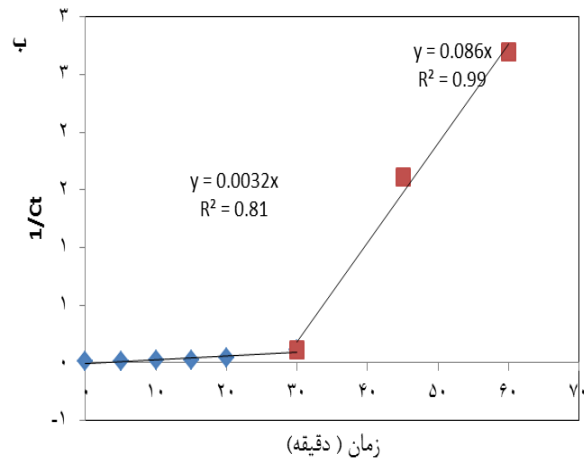
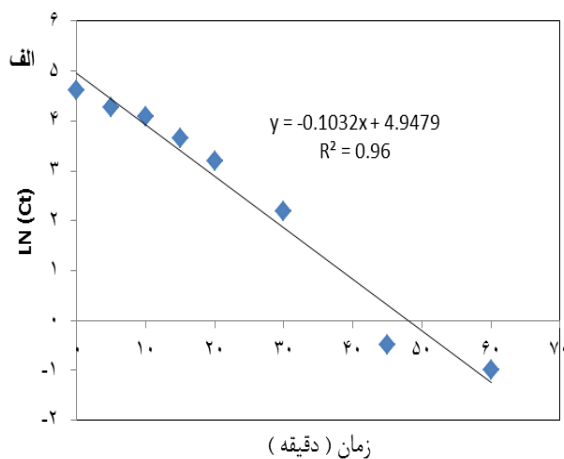
بهینه‌سازی نوع الکترولیت حمایت‌کننده به منظور افزایش قدرت هدایت الکتریکی پساب و در نتیجه کاهش میزان ولتاژ ورودی صورت پذیرفت. بسیاری از محققان از عواملی نظیر نمک‌های سدیم و پتاسیم استفاده نموده‌اند. در این



شکل ۳- تعیین اثر نوع الکترولیت بر کارایی فرآیند الکتروکواگولاسیون در رنگ زدایی از محلول حاوی کریستال ویوله (۳ pH، جریان کاربردی ۰/۴ آمپر، زمان ۶۰ دقیقه، فاصله بین الکترودها ۱/۵ سانتی متر، غلظت رنگ اولیه ۲۰۰ میلی گرم در لیتر)

ثابت سرعت واکنش مرتبه اول برابر ۱/۰۱ min⁻¹ و ثابت سرعت سینتیک درجه دوم برابر ۰/۰۳۲ L/g. min شد و در زمان ۳۰ تا ۶۰ دقیقه، طی فرایند حذف ثابت سرعت سینتیک ۰/۰۸۶ L/g. min فراهم شد.

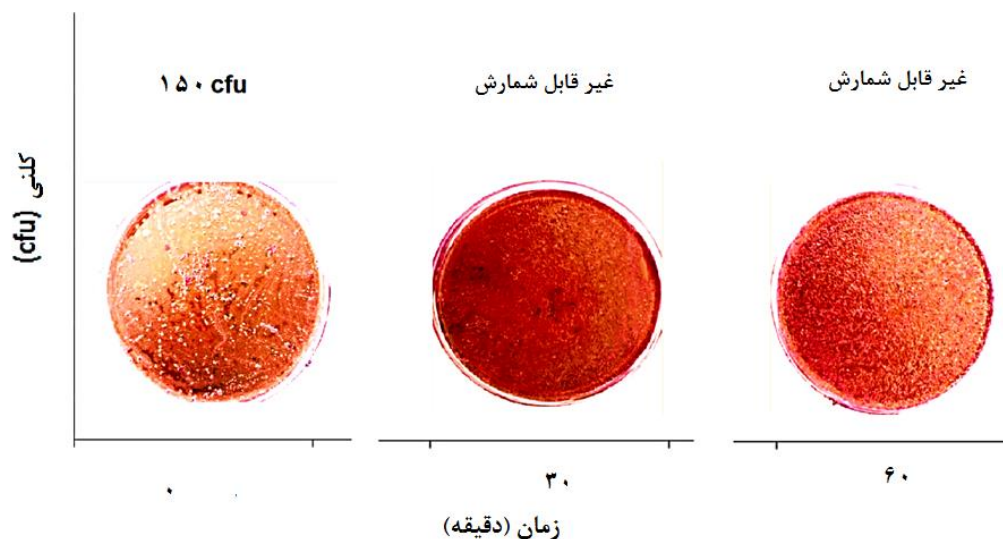
بررسی سینتیک واکنش: شکل ۴ نتایج ارزیابی سینتیک تصفیه الکتروکواگولاسیون را نشان می‌دهد. بر اساس معادله خطی حاصل از مدل‌های مرتبه اول (شکل الف) و دوم (شکل ب) میزان ثابت واکنش مرتبه اول ($k_1 \text{ min}^{-1}$) و دوم ($k_2 \text{ L/g. min}$) محاسبه گردید. در زمان صفر تا سی دقیقه



شکل ۴- سرعت رنگ زدایی کریستال ویوله با فرایند الکتروکواگولاسیون، سینتیک درجه اول فرعی (الف) و درجه دوم فرعی (ب)

کلنی‌های رشد یافته در حدود ۱۰۵ cfu در واحد سطح پلیت مورد استفاده، تعیین شد. اما میزان کلنی‌های رشد یافته در معرض پساب خروجی در زمان ۳۰ و ۶۰ دقیقه به صورت غیر قابل شمارش می‌باشند.

آزمون سمیت: شکل ۵ نتایج سمیت پساب خروجی فرایند الکتروکواگولاسیون بر روی باکتری‌های گروه کلیفرم را نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان دریافت، زمانی که باکتری‌ها در معرض کریستال ویوله قرار گرفتند میزان



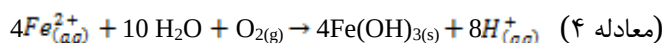
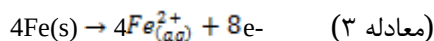
شکل ۵- آزمون سمیت کریستال ویوله و پساب تصفیه شده با روش الکتروکواگولاسیون

شیمیایی و الکتروشیمیایی دیگر می‌باشد (۱۷). چنانچه در فرآیند الکتروکواگولاسیون از الکترودهای آهن و یا مشتقات آن نظیر استیل استفاده شود، به دلیل اکسیداسیون آهن در سیستم الکترولیت، هیدروکسید آهن $Fe(OH)_n$ تولید می‌شود که تحت دو مکانیسم صورت می‌پذیرد (۱۸، ۱۹).

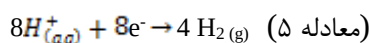
بحث

مهمترین واکنش‌های فیزیکو شیمیایی که ممکن است طی فرایند الکتروکواگولاسیون رخ دهد شامل: کاهش کاتدی، انعقاد ذرات کلوییدی، رسوب دهی الکتروفورتیک ذرات منعقد شده، احیای یون‌های فلزی در کاتد، فرآیندهای

۱- مکانیسم اول

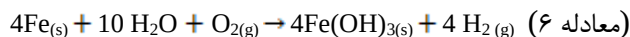


کاتد



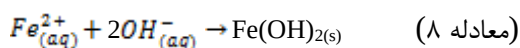
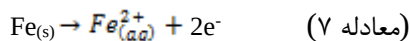


به طور کلی:

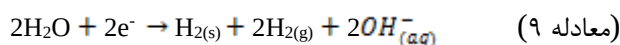


۲- مکانیسم دو:

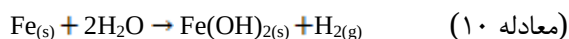
آند



کاتد



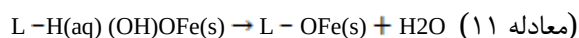
به طور کلی



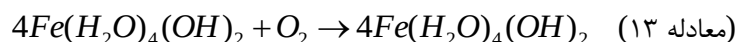
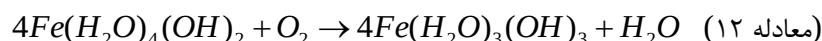
طبق یافته‌های این مطالعه بالاترین میزان کارایی فرایند الکتروکواگولاسیون در pH های ۵ و بالاتر، حاصل شد. به طور کلی فرایند الکتروکواگولاسیون فرایندی وابسته به pH و طبق نتایج بدست آمده، میزان حذف کاملاً تابع میزان pH محلول می‌باشد. این پدیده می‌تواند به دلیل حضور آهن سه ظرفیتی و فرم‌های هیدروکسیدهای دو و سه ظرفیتی در این محدوده pH باشند (۲۱).

این محدوده شرایط مناسبی را از لحاظ ته نشینی و حذف رنگ فراهم می‌نماید. روابط زیر شرح این پدیده را نشان می‌دهند. این پدیده توسط بسیاری از محققان از جمله خطایی، دانشور و ملا گزارش گردید (۲۱-۲۳). این محققان نتایج خود را در رنگ بری از پساب‌های حاوی رنگ‌های بازی گزارش نمودند. کریستال ویوله ویژگی‌های مشابهی نظیر طبقه‌بندی در دسته رنگ‌های بازی داشت.

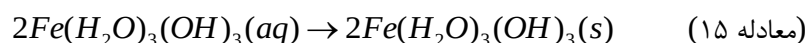
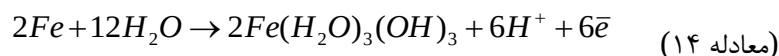
$\text{Fe}(\text{OH})_n$ تولید شده در محلول به صورت یک ماده معلق ژلاتینی باقی می‌ماند که جداسازی آلاینده، ایجاد کمپلکس و یا با جذب الکترواستاتیک سبب حذف ذرات و مواد آلاینده از فاز مائی می‌گردد. زمانی که فرایند حذف به شکل کمپلکس سطحی پیش می‌رود واکنش با آلاینده به فرم لیگاند با آهن هیدروس باند به صورت رابطه زیر انجام می‌پذیرد (۱۸).



هیدرولیز آب و تولید گاز H_2 در اثر واکنش‌های اکسیداسیون و احیا ممکن است آلاینده‌های محلول و یا هر ماده معلق و یا شناور را حذف کند. از اکسیداسیون الکترولیتیک الکترودهای آند، یون‌های فلزی در محلول آزاد می‌شوند و با یون‌های OH^- در کاتد واکنش می‌دهند. این هیدروکسیدهای فلزی آلاینده‌های کلوییدی و محلول را جذب و ته نشین می‌کنند. فلوک‌های تشکیل شده قدرت ته نشینی بالایی دارند (۲۰).



با این وجود محققانی چون سنجیل و همکاران مکانیسم‌های دیگری را نیز علاوه بر روابط فوق مطرح نموده‌اند (۲۴).



میزان جریان عبوری از طریق الکترولیت و پساب است. هر چه میزان جریان بیشتری در دسترس باشد میزان انعقاد افزایش می‌یابد (۲۲). از طرف دیگر با افزایش میزان جریان، میزان رشد فلاک و میزان گازهای تولیدی بسرعت افزایش یافته و آنها به نوبه خود بر میزان شناوری سازی و ته نشینی ذرات تأثیرگذار هستند. البته افزایش بیش از مقدار بهینه جریان، معایبی همچون مصرف بیشتر انرژی الکتریکی و در نتیجه افزایش دمای راکتور و هزینه‌های تصفیه را به همراه خواهد داشت.

در بررسی اثر غلظت رنگ اولیه نتایج نشان می‌دهد در شرایط بهینه میزان مناسبی از مواد منعقد کننده و گونه‌های اکسیداتیو کافی در دسترس بوده است (۲۹). این بدان معنی است که در حضور مقادیر بالاتر از مولکولهای رنگ یا آلاینده، مقادیر بالاتری در حجم آبی وجود دارند در نتیجه انتقال جرم با محدودیت کمتری همراه است و با عوامل اکسید کننده و یا منعقد کننده وارد واکنش می‌شود. از طرفی دیگر با توجه به نیمه عمر بسیار کوتاه رادیکال‌های اکسیداتیو هر چه آلاینده در دسترس‌تر باشد (غلظت بالاتری داشته باشد) واکنش‌های اکسیداتیو کامل‌تری رخ می‌دهد. از این رو با افزایش غلظت رنگ راندمان افزایش می‌یابد. به صورت کلی تفاوت معنی داری در کارایی فرایند در اکثر غلظت‌های مورد نظر وجود ندارد (اختلاف کارایی کمتر از ۵ درصد است). اما در غلظت ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر نسبت به

قنبری و همکاران (۲۰۱۴) گزارش نمودند که اثر pH بر فرایند الکتروکواگولاسیون در محدوده ۴ تا ۸ مؤثرتر از سایر دامنه‌ها می‌باشد. و در pH های کمتر از ۲ و بالاتر از ۸ کارایی فرایندی افت می‌نماید (۱۱). تأثیر pH بر کارایی فرایند الکتروکواگولاسیون در بسیاری مطالعات نشان داده شده و اغلب مطالعات محدوده ۸-۵ pH را به عنوان نقطه بهینه جهت رنگ‌زدایی از پساب گزارش کرده‌اند (۲۵، ۲۶). حفظ pH در این محدوده، با تولید بیشتر اکسیدان‌ها و عوامل منعقدکننده همراه است. اما از سویی دیگر نبایستی فراموش نمود که ماهیت آلاینده از عوامل بسیار تأثیرگذار بر کارایی فرایند است. برای مثال، در کاهش محتوای فلزات سنگین نظیر کروم و کادمیوم به کمک فرایند الکتروکواگولاسیون نتایج متفاوتی گزارش شده است. آخوندی و همکاران (۲۰۱۲) در بررسی پارامتر pH بر کارایی حذف کادمیوم با استفاده از فرایند الکتروکواگولاسیون مشاهده نمودند که بیشترین میزان حذف در pH حدود ۱۰ رخ داده است. آنها دلیل این پدیده را تشکیل رسوب هیدروکسید کادمیم در pH های بالا ذکر نمودند (۲۷). در حذف کروم از پساب به وسیله این فرایند، بذرافشان و همکاران (۲۰۰۷) گزارش نمودند که بیشترین کاهش کروم در pH حدود ۳ و به دلیل شرایط مناسب احیای کروم صورت گرفته است (۲۸). در فرایند الکتروکواگولاسیون، میزان انعقاد و ماده منعقدکننده تولیدی به صورت تابعی از



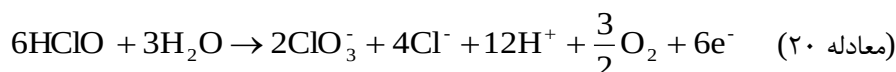
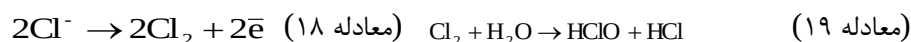
دیگر غلظت‌های رنگ راندمان کمتری مشاهده می‌شود، این کاهش می‌تواند در رابطه با خطای انسانی صورت گرفته باشد. عامل مهم در کارایی کمتر در غلظت‌های ۱۰۰ و ۲۰ نسبت به بالاتر محدود شدن پدیده انتقال جرم در انتقال آلاینده از بالک مایع به محل اکسیداسیون (آند) می‌باشد. از طرفی دیگر، عامل محدود کننده می‌تواند عدم توزیع یکنواخت و مناسب عوامل اکسیدان تولید شده و تماس کافی بین آلاینده و اکسیدان‌ها باشد. می‌توان طبق رابطه زیر فهمید که زمان بهره‌برداری، (حدود ۶۰ دقیقه) تقریباً مناسب بوده و فرصت کافی برای درگیر نمودن سازوکارهای غالب و رنگ‌بری در دوزهای بالا را فراهم کرده است.

$$A_w = \frac{C_i \cdot T \cdot M}{n \cdot C} \quad (\text{معادله ۱۷})$$

در بررسی اثر الکترولیت‌ها مشاهده گردید کلرید سدیم و پتاسیم بهترین عملکرد را دارا هستند. هدایت الکتریکی یک محلول به صورت مجموع تحت تأثیر هدایت یون‌ها، تعداد یون‌های موجود در محلول و قابلیت حرکت آنهاست. از طرفی دیگر ثابت یونش یک نمک در حلال می‌تواند هدایت

الکتریکی محلول را تغییر دهد. از آنجایی که نمک‌های NaCl و KCl نسبت به Na₂SO₄ درجه یونیزاسیون بالاتری دارند و همچنین شعاع یونی کلر کمتر از یون سولفات است، یون کلر حرکت بیشتری در محلول داشته و در نتیجه میزان جریان عبوری بیشتری را فراهم می‌نماید. جریان‌های بالاتر تولید مواد اکسیدان و منعقد کننده بیشتری به همراه دارند و کارایی بالاتری را فراهم می‌نمایند. در کارهای میدانی، به دلایل اقتصادی و هزینه پایین و همچنین قابلیت دسترسی، استفاده از کلرید سدیم بسیار اهمیت دارد.

از دلایل افزایش هدایت الکتریکی در حضور این نمک‌ها می‌توان به ثابت یونش بالا و حلالیت خوب آنها اشاره نمود (۲۳، ۳۰). در حضور این نمک‌ها میزان جریان اعمال شده در ولتاژ ثابت بالا رفته و در نتیجه راندمان فرایند ارتقا یافته است. همچنین با انحلال این نمک‌ها و احیا یون کلراید و تولید کلر و در نهایت تولید گونه‌های اکسیداتیو، کلر می‌تواند نقش مضاعفی در رنگ بری ایجاد کرده باشد (۲۵).



کریستال ویوله، غلظت الکترولیت ۰/۱ گرم در لیتر کلرید سدیم و جریان ۰/۴ آمپر کارایی بالاتر از ۹۹/۶٪ را نشان داده است. در مقایسه با سایر گزارشات می‌توان دریافت پساب رنگی حاوی کریستال ویوله به طور موفقیت آمیزی با راندمان بالاتر از ۹۵ درصد توسط فرایند الکتروکواگولاسیون قابل تصفیه می‌باشد. Mbacké و همکاران (۲۰۱۵) مطالعه‌ای با هدف حذف کریستال ویوله از پساب سنتتیک و با کمک الکترودهای آلومینیوم-استیل طراحی کردند (۳۱). نتایج نشان داد کریستال ویوله در pH حدود ۵، غلظت رنگ

در مطالعات سینتیکی معمولاً میزان سرعت واکنش‌های شیمیایی و عوامل مؤثر بر آنها بررسی می‌شوند. به همین دلیل به منظور ارزیابی میزان سرعت رنگ زدایی کریستال ویوله با فرایند الکتروکواگولاسیون مدل‌های سینتیکی درجه اول و دوم مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد کارایی حذف کریستال ویوله انطباق بیشتری با سینتیک درجه اول دارد (۳). به طور خلاصه جدول ۲ جزئیات بیشتری از مطالعات انجام شده توسط سایر محققان را نشان می‌دهد. در مطالعه حاضر در شرایط بهینه ۲۰۰ میلی گرم در لیتر



۱۰۰ میلی گرم در لیتر، جریان ۲۵۰ آمپر بر مترمربع در زمان ۱۵ دقیقه به میزان بیش از ۹۹ درصد از محلول حذف گردید. در مطالعه‌ای مشابه که توسط Ghosh و همکاران (۲۰۰۸) صورت پذیرفت مشاهده گردید کریستال ویوله در pH اندکی قلبایی نیز با کارایی بالاتر از ۹۹ درصد حذف می شود (۲۶). در این مطالعه جهت رسیدن به حداکثر کارایی در زمان ۱۵ دقیقه، میزان جریان به بیش از ۴ برابر نسبت به مطالعه Mbacké افزایش یافته است. در ارزیابی کارایی فرایند الکتروکواگولاسیون در کاهش محتوای رنگ، خطایی و همکاران (۲۰۰۹) مطالعه‌ای بر رنگ‌زدایی از پساب سنتتیک حاوی Acid Blue 9 انجام دادند (۲۳). آنها دریافتند فرایند مذکور قادر است زنگ را با غلظت ۲۰ میلی گرم در لیتر رنگ،

جریان ۲۵ آمپر بر متر مربع و زمان ۸ دقیقه با کارایی نسبتاً بالایی (۹۸ درصد) کاهش دهد. در شرایط یکسان از کارایی فرایندهای مختلف، بهترین ملاک برای استفاده شرایط بهره برداری و نوع مواد مصرفی می‌باشد. چیدمان و جنس الکتروود مصرفی در فرایندهای الکتروکواگولاسیون می‌تواند به عنوان معیاری اصلی در انتخاب نوع فرایند باشد. استفاده از چیدمان الکتروودی استیل-پلاتین با توجه به کارایی بالا و استفاده طولانی مدت از الکتروودها نسبت به دیگر فرایندها ارجحیت داشته باشد. در بسیاری از مطالعات نقطه منفی چیدمان الکتروودی آهن و آلومینیوم مصرف سریع، حجم بالای لجن تولید شده و مشکلات مربوط به این لجن‌ها گزارش شده است (۳۲).

جدول ۲- مطالعات انجام شده در استفاده از فرایند های الکتروشیمیایی در حذف ترکیبات زنگی

نوع فرایند	نوع پساب	آلاینده هدف	میزان کارایی (درصد)	شرایط بهینه	منبع
الکتروکواگولاسیون با چیدمان آلومینیوم-استیل	سنتتیک	کریستال ویوله	> ۹۹	pH ۵/۴۳، ۱۰۰ میلی گرم در لیتر کریستال ویوله، جریان ۲۵۰ آمپر بر متر مربع، زمان ۱۵ دقیقه	(۳۱)
الکتروکواگولاسیون با چیدمان آلومینیوم-آلومینیوم	سنتتیک	کریستال ویوله	۹۹/۷۵	pH ۸/۵، ۱۰۰ میلی گرم در لیتر کریستال ویوله، جریان ۱۱۱۲/۵ آمپر بر متر مربع، زمان ۱۵ دقیقه	(۲۶)
الکتروکواگولاسیون با چیدمان آهن-آلومینیوم	سنتتیک	کریستال ویوله	۱۰۰	pH ۵/۸، ۲۰۰ میلی گرم در لیتر کریستال ویوله، جریان ۲۸ آمپر بر متر مربع، زمان ۳۰ دقیقه، Na_2SO_4 ۲۳۴ میلی گرم در لیتر	(۱۹)
الکتروشیمیایی با الکتروود BDD	سنتتیک	کریستال ویوله	۱۰۰	pH ۷، ۱۳۷ میلی گرم در لیتر کریستال ویوله، جریان ۲/۵ میلی آمپر بر سانتی متر مربع، زمان ۳۰ دقیقه، Na_2SO_4 ۵۰ گرم	(۳۳)
الکتروکواگولاسیون با چیدمان آلومینیوم-آلومینیوم	سنتتیک	کریستال ویوله	۹۵	pH ۶، ۹۰ میلی گرم در لیتر کریستال ویوله، جریان ۱۷/۳۶ میلی آمپر بر سانتی متر مربع، زمان ۳۰ دقیقه	(۳۴)
اکسیداسیون پیشرفته	سنتتیک	Acid Blue 9	۹۸	pH ۶، ۲۰ میلی گرم در لیتر رنگ، جریان ۲۵ آمپر بر متر مربع، زمان ۸ دقیقه	(۲۳)
الکتروکواگولاسیون با چیدمان استیل-پلاتین	پساب سنتتیک	کریستال ویوله	۹۹/۶۳	pH ۳، ۲۰۰ میلی گرم در لیتر کریستال ویوله، کلرید سدیم ۰/۱g/L و جریان ۰/۴ آمپر، زمان ۷۰ دقیقه	مطالعه حاضر



در بررسی محتوای سمیت پساب تصفیه شده به منظور تخلیه پساب به محیط تست سمیت بروی باکتریهای گروه کلیفرم صورت پذیرفت. محتوای سمیت محصولات میانی گاهاً می‌تواند از سمیت ماده اولیه بیشتر باشد.

در بررسی سمیت از ارگانیسیم‌های زنده مختلف، نظیر گونه‌های باکتریایی به دلیل تعداد زیاد و کشت آسان می‌توان استفاده نمود. به دلیل ارزیابی سیستم‌های تصفیه‌ای با ارگانیسیم‌های شاخص در این مطالعه آزمایشات سمیت بر روی گونه‌های گروه کلیفرم در نظر گرفته شد. افزایش در تعداد ارگانیسیم‌ها تأیید کرد که پساب تصفیه شده با روش الکتروکواگولاسیون قابلیت تخلیه به محیط یا استفاده‌های ثانویه را داراست.

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج این پژوهش می‌توان دریافت که فرایند الکتروکواگولاسیون با چیدمان الکترودی استیل مش-

پلاتین، قادر است کریستال ویوله را با راندمان بالا از پساب و محیط آبی رنگ‌زدایی نماید. همچنین به منظور اطمینان از تخلیه پساب تصفیه شده و یا قابلیت استفاده مجدد شده، آزمون سمیت میکروبی انجام پذیرفت. افزایش تعداد کلنی‌های باکتری‌های گروه کلیفرم نشان داد سمیت کریستال ویوله در اثر اکسیداسیون توسط فرایند الکتروکواگولاسیون مشهود بوده و تخلیه آن به محیط پذیرنده با نگرانی کمتری همراه است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه به دلیل تامین امکانات مالی (شماره طرح ۹۵۴۹۲) تشکر و قدردانی می‌نمایند.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچگونه تعارض منافی با داده‌های این مقاله ندارند.

References

1. Khosravi R, Fazlzadehdavil M, Barikbin B, Hossini H. Electro-decolorization of Reactive Red 198 from aqueous solutions using aluminum electrodes systems: modeling and optimization of operating parameters. *Desalin Water Treat.* 2015;54(11):3152-60.
2. Ünnü BA, Gündüz G, Dükkancı M. Heterogeneous Fenton-like oxidation of crystal violet using an iron loaded ZSM-5 zeolite. *Desalin Water Treat.* 2016;57(25):11835-49.
3. Khosravi R, Hossini H, Heidari M, Fazlzadeh M, Biglari H, Taghizadeh A, et al. Electrochemical decolorization of reactive dye from synthetic wastewater by mono-polar aluminum electrodes system. *Int J Electrochem Sci.* 2017;12:4745-55.
4. Laskar N, Kumar U. Adsorption of crystal violet from wastewater by modified Bambusa tulda. *KSCE J Civil Eng.* 2018;22(8):2755-63.
5. Solano AMS, Martínez-Huitle CA, Garcia-Segura S, El-Ghenymy A, Brillas E. Application of electrochemical advanced oxidation processes with a boron-doped diamond anode to degrade acidic solutions of Reactive Blue 15 (Turquoise Blue) dye. *Electrochimica Acta.* 2016;197:210-20.
6. Holkar CR, Jadhav AJ, Pinjari DV, Mahamuni NM, Pandit AB. A critical review on textile wastewater treatments: possible approaches. *J Environ Manag.* 2016;182:351-66.
7. Sobhanardakani S, Jafari SM, Ehteshami M. Evaluation of efficiency of electrochemical process for COD and TSS removal from raisin finishing wastewater, *J Environ Sci Technol.* 2016;18 (2):493-506. (In Persian)



8. Mbacké MK, Kane C, Diallo NO, Baldé M, Diop CM. Modeling the Crystal Violet Kinetics Removal by Electrocoagulation Process for Wastewater Treatment. *Innovation and Interdisciplinary Solutions for Underserved Areas*: Springer; 2017. 16-30.
9. Khandegar V, Saroha AK. Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent—a review. *J Environ Manag*. 2013;128:949-63.
10. Anantha Singh TS, Ramesh ST. New trends in electrocoagulation for the removal of dyes from wastewater: a review. *Environ Engin Sci*. 2013;30(7):333-49.
11. Ghanbari F, Mazaheri TA, Mahdipour F, Mirshafiean S, Moradi M, Sharifi MH. Evaluation of electrocoagulation process effect in decolorization of dyeing wastewater by using Al/Fe & Al/Cu electrodes. *J Sabzevar Uni Med Sci*. 2014; 20 (5): 716-725. (In Persian)
12. Rahmani AR, Samarghandi MR. Electrocoagulation treatment of color solution containing colored index Eriochrome Black T. *J Water Wastewater*. 2009;69:52-8. (In Persian)
13. Mbacké MK, Kane C, Diallo NO, Diop CM, Chauvet F, Comtat M, et al. Electrocoagulation process applied on pollutants treatment- experimental optimization and fundamental investigation of the crystal violet dye removal. *J Environ Chem Eng*. 2016;4(4, Part A):4001-11.
14. Kobya M, Ulu F, Gebologlu U, Demirbas E, Oncel MS. Treatment of potable water containing low concentration of arsenic with electrocoagulation: Different connection modes and Fe–Al electrodes. *Sep Purif Technol*. 2011;77(3):283-93.
15. Hashemi H, Khodabakhshi A, Safari M, Farrokhzadeh H. Survey on electrode type effectiveness on electrocoagulation process as a method for polluted water treatment in emergencies. *Int J Health Syst Disaster Manag*. 2015;3(4):185- 188.
16. Li M, Zeng C, Luo S, Shen J, Lin H, Cao C. Electrochemical corrosion characteristics of type 316 stainless steel in simulated anode environment for PEMFC. *Electrochimica Acta*. 2003;48(12):1735-41.
17. Arroyo M, Pérez-Herranz V, Montanes M, García-Antón J, Guinon J. Effect of pH and chloride concentration on the removal of hexavalent chromium in a batch electrocoagulation reactor. *J Hazard Mater*. 2009;169(1-3):1127-33.
18. Kobya M, Gebologlu U, Ulu F, Oncel S, Demirbas E. Removal of arsenic from drinking water by the electrocoagulation using Fe and Al electrodes. *Electrochimica Acta*. 2011;56(14):5060-70.
19. Durango-Usuga P, Guzmán-Duque F, Mosteo R, Vazquez MV, Peñuela G, Torres-Palma RA. Experimental design approach applied to the elimination of crystal violet in water by electrocoagulation with Fe or Al electrodes. *J Hazard Mater*. 2010;179(1):120-6.
20. Mollah MYA, Schennach R, Parga JR, Cocke DL. Electrocoagulation (EC)—science and applications. *J Hazard Mater*. 2001;84(1):29-41.
21. Mollah MY, Pathak SR, Patil PK, Vayuvegula M, Agrawal TS, Gomes JA, et al. Treatment of orange II azo-dye by electrocoagulation (EC) technique in a continuous flow cell using sacrificial iron electrodes. *J Hazard Mater*. 2004;109(1-3):165-71.
22. Daneshvar N, Khataee A, Ghadim AA, Rasoulifard M. Decolorization of CI Acid Yellow 23 solution by electrocoagulation process: Investigation of operational parameters and evaluation of specific electrical energy consumption (SEEC). *J Hazard Mater*. 2007;148(3):566-72.

23. Khataee A, Vatanpour V, Ghadim AA. Decolorization of CI Acid Blue 9 solution by UV/Nano-TiO₂, Fenton, Fenton-like, electro-Fenton and electrocoagulation processes: A comparative study. *J Hazard Mater.* 2009;161(2-3):1225-33.
24. Şengil İA, Özacar M. The decolorization of CI Reactive Black 5 in aqueous solution by electrocoagulation using sacrificial iron electrodes. *J Hazard Mater.* 2009;161(2-3):1369-76.
25. Ahmadi M, Amiri H, Martínez SS. Treatment of phenol-formaldehyde resin manufacturing wastewater by the electrocoagulation process. *Desalin Water Treat.* 2012;39(1-3):176-81.
26. Ghosh D, Medhi C, Solanki H, Purkait M. Decolorization of crystal violet solution by electrocoagulation. *J Environ Protect Sci.* 2008;2(1):25-35.
27. Akhondi A, Khodadadi Darban A, Ganjidoust H. The effectiveness of electro coagulation process for the removal of cadmium from water. *J Water Wastewater.* 2012; 23(2): 86-93.
28. Bazrafshan A, Mahvi, A.H., Mesdaghinia, A.R., Nasseri, S., and Vaezi, F. . Study of electro coagulation with Alumina electrodes for Cr removal.” 10th Conf. of Environmental Health, Hamedan. 2007, 35-38.
29. Yıldız Y, Koparal A, Keskinler B. Effect of initial pH and supporting electrolyte on the treatment of water containing high concentration of humic substances by electrocoagulation. *Chem Eng J.* 2008;138(1-3):63-72.
30. Rezaee A, Hossini H, Masoumbeigi H, Darvishi Cheshma Soltani R. Simultaneous removal of hexavalent chromium and nitrate from wastewater using electrocoagulation method. *Int J Environ Sci Develop.* 2011;2:294-8.
31. Mbacké MK, Kane C, Diouf I, Diop CM. Removal of crystal violet by electrocoagulation: optimization and reaction mechanisms involved. *Journal de la Société Ouest-Africaine de Chimie.* 2015;39:64-76.
32. Chafi M, Gourich B, Essadki A, Vial C, Fabregat A. Comparison of electrocoagulation using iron and aluminium electrodes with chemical coagulation for the removal of a highly soluble acid dye. *Desalination.* 2011;281:285-92.
33. Palma-Goyes RE, Guzmán-Duque FL, Peñuela G, González I, Nava JL, Torres-Palma RA. Electrochemical degradation of crystal violet with BDD electrodes: Effect of electrochemical parameters and identification of organic by-products. *Chemosphere.* 2010;81(1):26-32.
34. Kuleyin A, Balchioglu E. Investigation of the removal of crystal violet dye by electrocoagulation method. *Fresenius Environ Bullet.* 2009;18:1597-602.



Decolorization of synthetic effluent containing Crystal Violet using Electrocoagulation process containing steel wool-platinum electrodes

Hiwa Hossaini¹, Roya Jalilian², Hadis Fattahi², Shohreh Heshmati², Abolfazl Naimabadi³, Hooshyar Hossini¹, Seyed Omid Rastegar⁴

1- Department of Environmental Health Engineering, Center for Environmental Health Effects, Faculty of Health, Kermanshah University of Medical Sciences, Kermanshah, Iran.

2- Student Research Committee, Kermanshah University of Medical Sciences, Kermanshah, Iran

3- Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health and Paramedicine, Neyshabur University of Medical Sciences, Neyshabur, Iran

4- Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.

Type of Article

Received: 18 Jun 2019

Accepted: 4 Jan 2020

*Corresponding Author:

Hooshyar Hossini

Department of

Environmental Health

Engineering, Center for

Environmental Health

Effects, Faculty of Health,

Kermanshah University of

Medical Sciences,

Kermanshah, Iran

TEL: 08338273068

Email:

hoo.hosseini@gmail.com

ABSTRACT

Introduction

The electrocoagulation process is one of the most effective treatment methods among the oxidation processes due to its unique properties such as simple design and extensive application for treating industrial wastewater. To promote this process, different ways have been proposed. In this study, the electrocoagulation process was incremented by the placement of steel wool and platinum electrodes and its potential were evaluated by decolorization of crystal violet (CV) from aqueous solution.

Materials and Methods

The colored solution was prepared from CV powder by its dissolution in distilled water. The spectrophotometric method (600 nm) was used to determine the color content. Electrocoagulation experiments were conducted in a 1000 mL beaker and at a batch method. To evaluate the kinetic studies, first and second-order models were used. Toxicity tests were also performed using coliform bacteria to ensure the reduction of crystal violet toxicity.

Results

The results showed that the process could remove the colored solution with a high percentage rate of about 99.63% under optimal conditions (pH 9, time of 60 minutes, applied current 0.4 amperes and color concentration about 200 mg/L). The microbial toxicity test also indicated that the treated wastewater in this method can be reused or discharged in the environment.

Conclusion

Based on the results, the electrocoagulation with steel wool-platinum electrode arrangement can be effectively used in the treatment of color containing industrial wastewater.

Keywords

Crystal violet, Electrocoagulation, Steel wool-platinum electrodes, Toxicity test

► **Please cite this article as:** Hossaini H, Jalilian R, Fattahi H, Heshmati S, Naimabadi A, Hossini H, Rastegar SO. Decolorization of synthetic effluent containing Crystal Violet using Electrocoagulation process containing steel wool-platinum electrodes. J Neyshabur Univ Med Sci 2020;8(1):88-102.