

## تصفیه فاضلاب سنتتیک حاوی رنگزای راکتیو قرمز ۱۹۸ با استفاده از فرایند الکتروکواگولاسیون

آرش دالوند<sup>۱</sup>، احمد جنیدی<sup>۲</sup>، میترا غلامی<sup>۳</sup>، احمد عامری<sup>۴</sup>، نیازمحمد محمودی<sup>۵</sup>

نویسنده مسئول: تهران، میدان آرژانتین، انتهای خیابان الوند، دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی تهران، گروه بهداشت محیط [ahmad\\_jonidi@yahoo.com](mailto:ahmad_jonidi@yahoo.com)

پذیرش: ۸۹/۱۰/۰۸

دریافت: ۸۹/۰۷/۱۰

### چکیده

**زمینه و هدف:** تخلیه فاضلاب رنگی صنایع نساجی به منابع آبی، بدون تصفیه کافی برای انسان ها و موجودات آبرزی مضر بوده و خسارات جدی را به محیط زیست تحمیل می کند. از آنجا که اغلب روش های تصفیه متداول فاضلاب راندمان کافی برای حذف مواد رنگزای نساجی از فاضلاب رنگی را ندارند، در این تحقیق کارایی روش تصفیه الکتروکواگولاسیون با استفاده از الکتروکواگولاسیون برای تصفیه فاضلاب سنتتیک حاوی رنگزای راکتیو قرمز ۱۹۸ در یک راکتور ناپیوسته مورد مطالعه قرار گرفت.

**روش بررسی:** برای انجام آزمایش ها از یک راکتور از جنس پلکسی گلاس با حجم مفید ۲ لیتر که به ۴ الکتروکواگولاسیون مجهز شده بود، استفاده گردید. تاثیر پارامترهای بهره برداری مانند ولتاژ، زمان واکنش، غلظت اولیه رنگزا و فاصله بین الکترودها بر راندمان حذف رنگزا، میزان انرژی الکتریکی مصرفی و میزان الکتروکواگولاسیون مصرفی بررسی شد.

**یافته ها:** در شرایط عملیاتی بهینه با ولتاژ ۲۰ ولت و فاصله ۲ سانتی متر بین الکترودها طی زمان تماس ۷۵ دقیقه، میزان حذف رنگ و COD به ترتیب ۹۹/۱ و ۸۴/۳ درصد به دست آمد. تحت این شرایط، هزینه تصفیه هر متر مکعب فاضلاب ۲۹۸۶ ریال بود. با افزایش فاصله بین الکترودها و غلظت اولیه رنگزا راندمان حذف رنگ و COD کاهش می یابد. زمانی که ولتاژ و زمان واکنش افزایش می یابد، میزان مصرف انرژی، مصرف الکتروکواگولاسیون، pH نهایی پساب و راندمان حذف رنگزا افزایش می یابد.

**نتیجه گیری:** فرایند الکتروکواگولاسیون با استفاده از الکتروکواگولاسیون روش موثر و مناسبی برای حذف ماده رنگزای راکتیو از فاضلاب رنگی است.

**واژگان کلیدی:** الکتروکواگولاسیون، الکتروکواگولاسیون، رنگزای راکتیو

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد بهداشت محیط، دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی تهران

۲- دکترای بهداشت حرفه ای، دانشیار دانشکده بهداشت محیط دانشگاه علوم پزشکی تهران

۳- دکترای بهداشت محیط، دانشیار دانشکده بهداشت محیط دانشگاه علوم پزشکی تهران

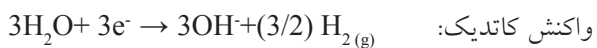
۴- دکترای بهداشت محیط، استاد دانشکده بهداشت محیط دانشگاه علوم پزشکی تهران

۵- دکترای شیمی، استادیار گروه پژوهشی پژوهشگاه رنگ و محیط زیست، پژوهشگاه علوم و فناوری رنگ

## مقدمه

صنایع نساجی مقدار زیادی آب با کیفیت بالا مصرف می کنند (تقریباً به ازای تولید ۱ کیلوگرم منسوجات ۱۰۰ تا ۲۰۰ لیتر آب مصرف می شود) و حجم زیادی فاضلاب رنگی تولید می کنند (۱). بنابراین برای بازیابی آب مصرفی، تصفیه مناسب فاضلاب این صنایع توصیه می شود. گزارش ها حاکی از افزایش مصرف جهانی رنگزاهای آلی در سال های اخیر بوده و میزان تولید و مصرف این مواد رنگزا بیش از ۷۰۰۰۰۰ تن در سال تخمین زده شده است (۲). بارزترین مشخصه پساب صنایع نساجی رنگی بودن پساب این صنایع است (۳). صنایع نساجی از حدود ۱۰۰۰۰۰ رنگزا و رنگ دانه جهت رنگرزی الیاف و پارچه های طبیعی و مصنوعی استفاده می کنند (۴). کاهش COD پساب و حذف مواد رنگزای آلی از این گونه پساب ها به دلیل ساختار شیمیایی حاوی حلقه های آروماتیک اغلب رنگزاها معمولاً با مشکلات زیادی همراه است. معمولاً رنگزاها از پایداری زیاد و قابلیت تجزیه زیستی کمی برخوردارند و در برابر تجزیه زیستی مقاومت مند. تخلیه پساب حاوی مواد رنگی به محیط زیست و اکوسیستم های آبی شفافیت و انحلال گازها در آب را تحت تاثیر قرار می دهند. و برای گونه های گیاهی و جانوری مضرند (۵). طبق مطالعات انجام شده تعدادی از این رنگزاها و محصولات ناشی از تخریب آنها دارای خواص سمی، سرطان زایی و جهش زایی برای انسان ها، گونه های میکروبی و آبزیان هستند (۶، ۷). رنگزاهای راکتیو دسته ای از رنگزاها هستند که به طور گسترده ای جهت رنگرزی الیاف سلولزی به ویژه پارچه های کتان (کتان بیشترین و گسترده ترین پارچه مصرفی در بین منسوجات است) استفاده می شوند (۸). به دلیل تمایل بیشتر این رنگزاها به واکنش با آب در مقایسه با هیدروکسیل موجود در الیاف کتان یا سلولزی، تثبیت رنگزاهای راکتیو روی الیاف کم است و مقدار زیادی از رنگزاهای راکتیو به صورت تثبیت نشده وارد فاضلاب می شود (۹). روش های مختلفی برای حذف مواد رنگزا از پساب های رنگی مورد مطالعه قرار گرفته اند اما اغلب دارای مشکلات اساسی هستند، روش

تصفیه با کربن فعال هزینه بر بوده و فرایند احیای آن مشکل و دفع زایدات آن نیز هزینه بر است (۷ و ۱۰). فوتواکسیداسیون توسط  $UV/H_2O_2$ ،  $UV/TiO_2$  به افزودن مواد شیمیایی اضافی به فاضلاب نیاز دارد، بنابراین باعث آلودگی ثانویه می شود. روش کوآگولاسیون شیمیایی علاوه بر نیاز به دستگاه های تزریق مواد شیمیایی، لجن زیادی تولید می کند (۱۱). فرایند الکتروشیمیایی روشی سازگار با محیط زیست است و از نظر هزینه با روش های دیگر تصفیه قابل رقابت است (۵). این روش دارای مزایایی نظیر: هزینه تجهیزات و بهره برداری پایین سیستم (۱۲)، کاهش تولید لجن به دلیل محتوای آب کم لجن تولیدی (۱۳، ۱۱)، تولید لجنی که به آسانی آگیری می شود (۱۴) و نیاز به فضای اندک جهت نصب تجهیزات است (۱۵). طی فرایند الکتروکوآگولاسیون از طریق برقراری جریان الکتریکی بین الکترودها در اثر واکنش های آندیک و کاتدیک پیش سازهای لازم (یون آلومینیوم و یون هیدروکسید) برای تولید کوآگولانت های هیدروکسید فلزی و حذف آلاینده ها در محل واکنش تولید می شوند. مکانیسم واکنش هایی که در طی فرایند الکتروشیمیایی با استفاده از الکتروکاتدیوم در آند و کاتد به وقوع می پیوندند و منجر به تولید کوآگولانت ها می شود عبارتند از (۱۴):



واکنش کلی در محلول:



با توجه به عدم تجزیه پذیری بیولوژیکی بسیاری از رنگزاهای راکتیو در محیط زیست و عدم کارایی مناسب روش های متداول تصفیه فاضلاب جهت حذف این رنگزاها از فاضلاب، لزوم استفاده از روشی مناسب جهت کاهش و حذف رنگزای راکتیو از پساب صنایع نساجی بیش از پیش مشهود است. بنابراین با توجه به مزایای فرایند الکتروشیمیایی، در این مطالعه امکان کاربرد روش تصفیه الکتروکوآگولاسیون با استفاده از الکترودهای آلومینیومی جهت حذف ماده رنگزای راکتیو از

و بعد از انجام آزمایش اندازه گیری شد (۱۶). برای اندازه گیری pH نمونه ها از pH متر (HACH-HQ-USA) و برای اندازه گیری میزان ولتاژ و جریان مصرفی از مولتی متر (DEC-RE 330 FC.Taiwan) استفاده شد. برای انجام آزمایش ها یک راکتور به شکل مکعب از جنس پلکسی گلاس با حجم مفید ۲ لیتر ساخته شد. از تعداد ۴ عدد صفحه فلزی (۲ عدد آند و ۲ عدد کاتد) از جنس آلومینیوم، به ابعاد  $11/2 \times 10/8$  سانتی متر که با فاصله ۲ سانتی متر از کف راکتور به صورت عمودی درون راکتور قرار داده شد به عنوان الکترود استفاده گردید. **نحوه انجام:** راه اندازه گیری راکتور در هر مرحله با ۲ لیتر فاضلاب سنتتیک با غلظت اولیه ۵۰ میلی گرم در لیتر ماده رنگزای راکتیو قرمز ۱۹۸ که از طریق انحلال رنگ مذکور در آب مقطر تهیه شده بود، صورت می گرفت. هدایت الکتریکی اولیه محلول رنگی ۴۴ - ۴۵ میکروزیمنس بر سانتی متر و pH اولیه آن ۵/۵ - ۵/۴ بود.

پس از تهیه نمونه حاوی ماده رنگزای راکتیو در غلظت مورد نظر، تنظیم فاصله الکترودها و ولتاژ مشخص (الکترودها به صورت ثابت و در مراحل مختلف با فاصله ۲ یا ۳ سانتی متر

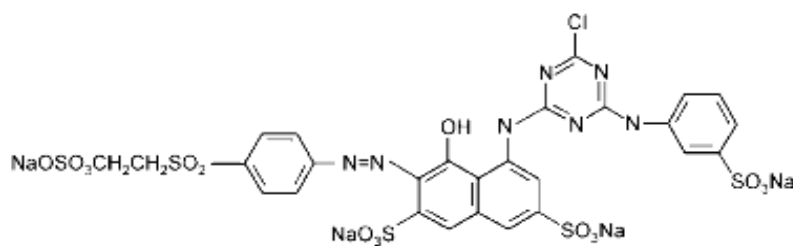
محیط آبی در مقیاس آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفت و شرایط بهینه عملیاتی جهت حذف مطلوب رنگ با توجه به میزان انرژی و الکترود مصرفی، با استفاده از روش تصفیه مذکور تعیین گردید.

## مواد و روش ها

در این تحقیق تجربی که بر پایه راه اندازی یک سیستم تصفیه بود، کارایی فرایند الکتروکواگولاسیون جهت حذف ماده رنگزای راکتیو در مقیاس آزمایشگاهی و در یک سیستم ناپیوسته (Batch) بر روی فاضلاب سنتتیک انجام گرفت.

### مواد شیمیایی مورد استفاده و وسایل

از رنگزای راکتیو قرمز ۱۹۸ (C.I. Reactive Red 198) ساخت شرکت هوخست آلمان با فرمول شیمیایی  $C_{27}H_{18}ClN_4Na_4O_{15}S_5$  و جرم مولکولی ۹۶۷/۵ گرم برمول به عنوان رنگزا استفاده شد (شکل ۱). طول موج حداکثر جذب این رنگزا ۵۱۸ نانومتر اندازه گیری شد. اسید هیدروکلریک مصرفی و مواد شیمیایی مورد استفاده برای انجام آزمایش COD (اکسیژن مورد نیاز شیمیایی) ساخت شرکت مرک آلمان بود.



شکل ۱: ساختار مولکولی رنگزای راکتیو قرمز ۱۹۸

درون راکتور قرار گرفته و توسط سیم به صورت تک قطبی به منبع تغذیه جریان مستقیم برق متصل شدند (شکل ۲) نمونه ها را درون راکتور (مجهز به الکترودهای آلومینیومی) وارد کرده و دستگاه ترانسفورماتور در ولتاژ مورد نظر روشن شد. از یک همزن مغناطیسی جهت اختلاط کافی فاضلاب در حین انجام

برای اندازه گیری COD از روش شماره 5220B کتاب روش های استاندارد آزمایشات آب و فاضلاب استفاده شد (۱۶). غلظت رنگ با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر مطابق روش 2120C کتاب روش های استاندارد آزمایشات آب و فاضلاب با اندازه گیری میزان جذب نور در طول موج حداکثر رنگزا، قبل

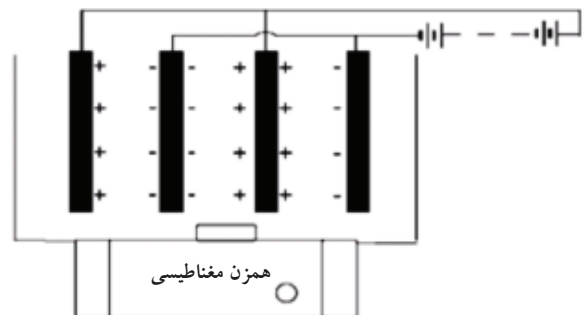
در شکل های ۳ و ۴ تاثیر متغیرهای ولتاژ، زمان واکنش و فاصله بین الکترودها بر کارایی فرایند الکتروکواگولاسیون جهت حذف رنگزا آمده است. همانگونه که مشاهده می شود، با افزایش ولتاژ و زمان واکنش راندمان حذف رنگ افزایش می یابد. در ولتاژهای ۵، ۲۰ و ۴۰ ولت (فاصله بین الکترودها ۲ سانتی متر، زمان ۷۵ دقیقه)، راندمان حذف رنگزا به میزان ۸۶، ۹۹/۱ و ۱۰۰ درصد بوده است. این شکل ها نشان می دهد، زمانی که فاصله بین الکترودها افزایش یافته، راندمان حذف رنگزا کاهش یافته است به طوری که با افزایش فاصله بین الکترودها از ۲ به ۳ سانتی متر (طی زمان ۷۵ دقیقه، ولتاژ ۲۰ ولت) راندمان حذف رنگزا از ۹۹/۱ به ۹۶/۴۴ درصد کاهش یافت. در جدول ۱ نیز، تاثیر متغیرهای مذکور بر میزان انرژی الکتریکی مصرفی ذکر شده است. همان طور که در این جدول ملاحظه می شود با افزایش ولتاژ و زمان واکنش میزان انرژی مصرفی به ازای هر متر مکعب فاضلاب افزایش می یابد. یکی از پارامترهایی که فرایند الکتروکواگولاسیون را تحت تاثیر قرار می دهد تغییرات pH اولیه است. مطالعات قبلی نشان داده اند، زمانی که از الکتروکواگولاسیون به منظور تصفیه فاضلاب استفاده شد، pH اولیه بهینه در محدوده ۶ - ۵ بوده است (۱۱ و ۱۸). pH اولیه محلول رنگی مورد استفاده در این تحقیق نیز در محدوده ۵/۵ - ۵/۴ بود. بنابراین در این تحقیق پارامتر مذکور مورد بررسی قرار نگرفت و تنها تاثیر تغییرات ولتاژ و زمان واکنش بر pH نهایی پساب مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل های ۵ و ۶ تاثیر تغییرات ولتاژ و زمان واکنش در فواصل مختلف بین الکترودها را، بر pH نهایی پساب نشان می دهد. همان طور که در شکل ها ملاحظه می شود با افزایش ولتاژ و زمان واکنش pH نهایی پساب از ۵/۵ تا حداکثر ۸/۷ افزایش می یابد. جهت تعیین تاثیر غلظت اولیه رنگزا بر راندمان حذف رنگ و COD در طی فرایند الکتروکواگولاسیون و در شرایط بهینه، چهار غلظت ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی گرم در لیتر، از رنگزا انتخاب شد.

فرایند، درون راکتور استفاده شد. پس از گذشت زمان تعیین شده برای انجام فرایند (۵، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵، ۹۰ دقیقه)، اقدام به نمونه برداری از محلول موجود در راکتور نموده و نمونه برداشتی به مدت ۳۰ دقیقه در حالت سکون قرار داده شد تا فلاک های تشکیل شده، ته نشین یا شناور شوند. سپس نمونه ها سانتریفیوژ شده (۴۰۰۰ دور، به مدت ۵ دقیقه) مورد آزمایش قرار گرفتند. برای تعیین جرم الکتروود مصرفی نیز، الکترودها قبل و بعد از انجام فرایند توسط ترازوی دیجیتال وزن شدند. لازم به ذکر است که هر دوره آزمایش حداقل دو بار تکرار شد و میانگین آن در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که میزان انحراف معیار نسبی (RSD) داده ها کمتر از ۱/۹ درصد بود که حاکی از میزان تکرار پذیری بالای داده ها بود. پس از اتمام هر دوره آزمایش، الکترودها به مدت ۳۰ دقیقه در اسید هیدروکلریک ۵ درصد حجمی قرار گرفته، سپس با برس پلاستیکی شسته و آبکشی شدند (۱۳ و ۱۷). جهت محاسبه انرژی الکتریکی مصرفی از معادله ۱ استفاده گردید.

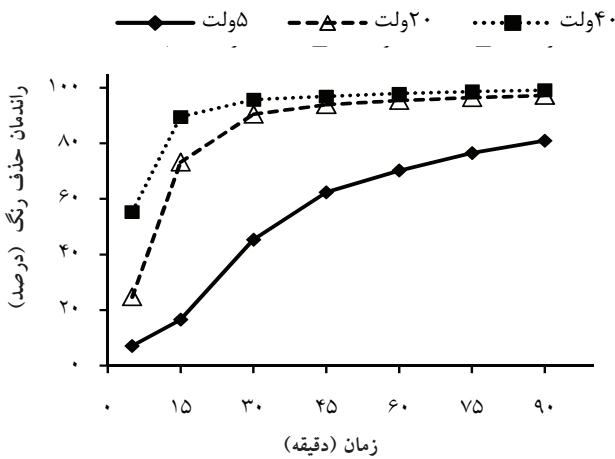
(۱)

$$E = \frac{U \times I \times t}{V}$$

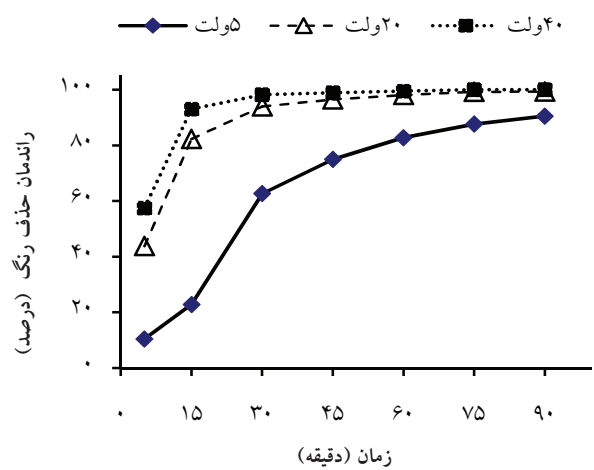
که E انرژی الکتریکی مصرفی (کیلووات ساعت) به ازای هر مترمکعب فاضلاب تصفیه شده، U ولتاژ (ولت)، I جریان (آمپر)، t زمان واکنش (ساعت) و V حجم محلول بر حسب لیتر است.



شکل ۲: نحوه قرار گرفتن الکترودها در درون راکتور یافته ها



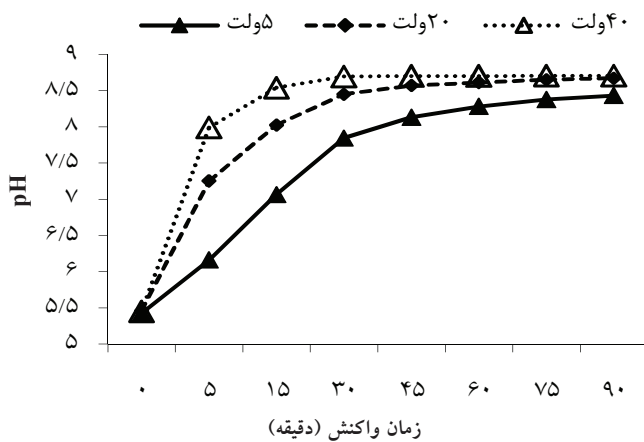
شکل ۴: ارتباط راندمان حذف رنگ با تغییرات ولتاژ و زمان تماس (فاصله الکترود ها ۳ سانتی متر)



شکل ۳: ارتباط راندمان حذف رنگ با تغییرات ولتاژ و زمان تماس (فاصله الکترود ها ۲ سانتی متر)

جدول ۱: تاثیر تغییرات ولتاژ، زمان واکنش و فاصله بین الکترودها بر میزان انرژی الکتریکی مصرفی

انرژی الکتریکی مصرفی در فواصل زمانی مختلف (کیلووات ساعت در مترمکعب فاضلاب تصفیه شده)							پارامتر	
۹۰	۷۵	۶۰	۴۵	۳۰	۱۵	۵	زمان (دقیقه) فاصله بین الکترودها	ولتاژ
۰/۱۱۲۵	۰/۰۹۳۷	۰/۰۷۵	۰/۰۵۶۲	۰/۰۳۷۵	۰/۰۱۸۷	۰/۰۰۶۲۴	۲ سانتی متر	۵ ولت
۰/۰۷۱۸	۰/۰۶۲۵	۰/۰۵	۰/۰۳۷۵	۰/۰۲۵	۰/۰۱۲۵	۰/۰۰۴۱۶	۳ سانتی متر	
۱/۷۹۱	۱/۵۱۶	۱/۲۴۱	۰/۹۶	۰/۶۶۶	۰/۳۵۳۹	۰/۱۲۲۸	۲ سانتی متر	۲۰ ولت
۱/۱۹۵	۱/۰۲	۰/۸۴۵	۰/۶۵۸	۰/۴۵۱	۰/۲۳۳	۰/۰۷۹	۳ سانتی متر	
۷/۰۶۷	۵/۹۶۷	۴/۸۵۵	۳/۷۳	۲/۵۹	۱/۳۸	۰/۴۷۸	۲ سانتی متر	۴۰ ولت
۵/۰۴	۴/۲۶	۳/۴۹	۲/۷۰۳	۱/۸۷۸	۰/۹۹۱	۰/۳۴۱۵	۳ سانتی متر	

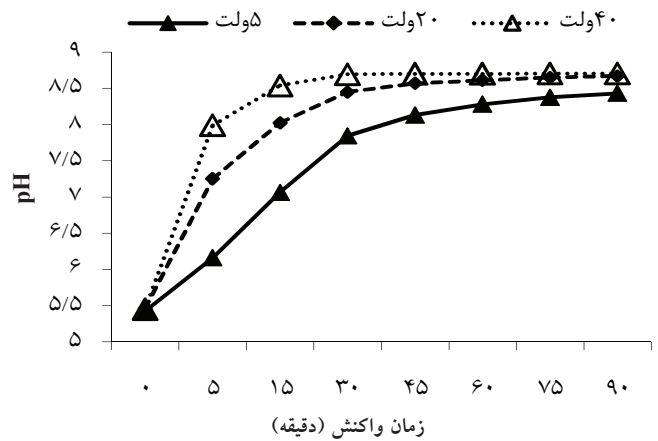


شکل ۵: تاثیر تغییرات ولتاژ بر pH نهایی پساب (فاصله الکترودها ۲ سانتی متر)

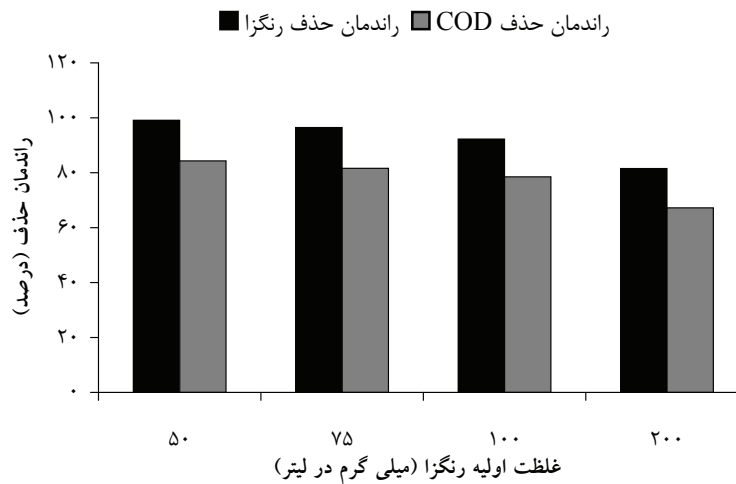
همان طور که در شکل ۷ مشاهده می شود با افزایش غلظت رنگزا از ۵۰ به ۲۰۰ میلی گرم در لیتر راندمان حذف رنگزا از ۹۹/۱ به ۸۱ درصد و راندمان حذف COD از ۸۳/۳ به ۶۷/۲ درصد کاهش یافته است. میزان مصرف الکترود و انرژی، در شرایط بهینه عملیاتی در شکل ۸ آمده است. مطابق با این شکل، با افزایش ولتاژ، میزان مصرف انرژی و الکترود افزایش می یابد.

### بحث

تاثیر تغییرات ولتاژ و زمان واکنش بر راندمان حذف رنگزا دلیل افزایش راندمان حذف رنگزا با افزایش ولتاژ (شکل های ۳ و ۴) را می توان با مکانیسم هایی که در آند و کاتد به وقوع می پیوندد، تفسیر کرد. مطابق مکانیسم های ذکر شده در بخش مقدمه، یون های هیدروکسید تولید شده در طی احیا آب در کاتد در واکنش با یون های آلومینیوم تولیدی در آند، تولید سوسپانسیون هیدروکسید آلومینیوم  $Al(OH)_3$  می کنند که می توانند از طریق مکانیسم های کمپلکس سازی سطحی و

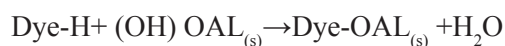


شکل ۶: تاثیر تغییرات ولتاژ بر pH نهایی پساب (فاصله الکترودها ۳ سانتی متر)

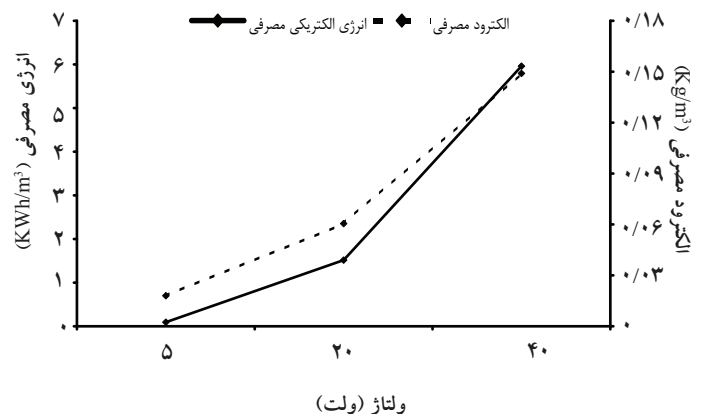


شکل ۷: تاثیر غلظت اولیه رنگزا بر راندمان حذف رنگ و COD در شرایط بهینه (ولتاژ ۲۰ ولت، فاصله ۲ سانتی متر، زمان واکنش ۷۵ دقیقه)

جذب الکترواستاتیک آلاینده های رنگی در محلول را به دام انداخته و یا حین ترسیب لخته های هیدروکسید آلومینیوم، ماده رنگزا توسط مکانیسم های فیزیکی جاروب کردن حذف شود کمپلکس سازی سطحی بین رنگزا و مشتقات آلومینیوم هیدروس طبق معادله زیر صورت می گیرد (۱۹):



در برهمکنش بالا پیوند مولکول های رنگزا و کاتیون های آلومینیوم منومریک و پلیمریک از طریق مکانیسم های جذب و رسوبدهی است. سطح بسیار وسیع فلاک های  $Al(OH)_3$



شکل ۸: تاثیر تغییرات ولتاژ بر مصرف انرژی و میزان الکترود مصرفی بر شرایط بهینه عملیاتی (فاصله ۲ سانتی متر، زمان واکنش ۷۵ دقیقه)

راکتیو قرمز ۱۹۸ توسط فرایند الکتروکواگولاسیون با استفاده از الکتروود آهنی نیز نشان داده، با افزایش فاصله بین الکتروودها از ۲ به ۳ سانتی متر (در ولتاژ ۴۰ ولت، زمان ۶۰ دقیقه) انرژی مصرفی از ۹/۸ به ۵/۳ کیلووات ساعت به ازای هر متر مکعب فاضلاب تصفیه شده کاهش یافته و راندمان حذف رنگزا از ۹۷ به ۹۴ درصد کاهش یافته است (۲۲).

### تاثیر تغییرات زمان واکنش و ولتاژ بر میزان انرژی الکتریکی مصرفی

طبق جدول ۱ با افزایش زمان واکنش در یک ولتاژ مشخص و فاصله ثابت بین الکتروودها، میزان انرژی الکتریکی مصرفی افزایش می یابد، همچنین با افزایش ولتاژ از ۵ به ۴۰ ولت میزان انرژی الکتریکی مصرفی افزایش پیدا کرده است، به طوری که در هر دو فاصله ۲ و ۳ سانتی متر، میزان انرژی الکتریکی مصرفی در ولتاژ ۴۰ ولت تقریباً ۴ برابر بیشتر از انرژی مصرفی در ۲۰ ولت بوده است. افزایش مصرف انرژی با افزایش ولتاژ و زمان واکنش به این دلیل است که با افزایش ولتاژ یا زمان واکنش میزان جریان عبوری از الکتروودها افزایش و در نتیجه مصرف انرژی افزایش می یابد. طبق شکل ۳ بالاترین راندمان حذف رنگزا به میزان ۱۰۰ درصد در فاصله ۲ سانتی متر، ولتاژ ۴۰ ولت و طی زمان ۷۵ دقیقه بوقوع پیوسته است، ولی از آنجا که با افزایش ولتاژ از ۲۰ به ۴۰ ولت طی ۷۵ دقیقه واکنش، میزان انرژی الکتریکی مصرفی ۳/۹۳ برابر افزایش می یابد، در حالی که راندمان حذف رنگزا تنها به میزان ۰/۹ درصد (با افزایش ولتاژ از ۲۰ به ۴۰ ولت راندمان حذف رنگزا از ۹۹/۱ به ۱۰۰ درصد افزایش می یابد) افزایش می یابد لذا ولتاژ ۲۰ ولت، فاصله بین الکتروودها ۲ سانتی متر و زمان ۷۵ دقیقه که در آن با در نظر گرفتن انرژی مصرفی، راندمان حذف رنگ بالایی حاصل شده بود، شرایط بهینه بهره برداری در نظر گرفته شد. نتایج تحقیق صورت گرفته جهت حذف مواد هیومیکی از فاضلاب با استفاده از الکتروود آهنی در طی فرایند الکتروکواگولاسیون نیز نشان داده که در شرایط یکسان طی زمان ۶۰ دقیقه، با افزایش ولتاژ از ۴۰ به ۵۰ ولت انرژی

می تواند باعث جذب ترکیبات آلی محلول و یا ذرات کلوییدی به آنها و به دام انداختن آنها شده و باعث حذف و جداسازی آنها از محلول از طریق رسوب دهی شود (۱۹ و ۴).

لخته های سبک نیز در اثر اتصال به حباب های گاز هیدروژن تولیدی در کاتد به سطح پساب آمده و حذف می گردند که راندمان حذف رنگ و COD، به مقدار آلومینیوم تولید شده در محلول بستگی دارد، از آنجا که مقدار آلومینیوم تولیدی نیز به زمان واکنش و ولتاژ بستگی دارد، با افزایش یکی از این دو پارامتر، تولید مواد کواگولانت نیز افزایش می یابد و حذف آلاینده ها کامل می شود. راندمان حذف اندک رنگ در ولتاژ کم و زمان واکنش اندک، حاکی از عدم تشکیل مقدار کافی رسوبات برای حذف بالای رنگ است (۴ و ۲۰). نتایج تحقیق صورت گرفته جهت حذف رنگ Bomaplex Red CR-L توسط روش تصفیه الکتروکواگولاسیون نشان داد که با افزایش شدت جریان و زمان واکنش راندمان حذف رنگزا افزایش یافته است و در ۳۰ دقیقه اول انجام فرایند راندمان حذف این رنگ بسیار سریع افزایش یافته و به حدود ۹۰ درصد رسید و بعد از آن، زمان تاثیر کمتری روی راندمان حذف رنگ داشته است (۲۱).

### تاثیر فاصله بین الکتروودها بر راندمان حذف رنگزا

دلیل کاهش راندمان حذف رنگ با افزایش فاصله بین الکتروودها (شکل ۳ و ۴) اینگونه قابل توجیه است که با افزایش فاصله بین الکتروودها مقاومت الکتریکی بین الکتروودها افزایش می یابد و در نتیجه رسانایی محلول کم شده و میزان جریان و انرژی مصرفی کاهش می یابد که این کاهش جریان سبب عدم تولید یون های آلومینیوم و هیدروکسیل به مقدار کافی برای تشکیل لخته و حذف رنگ است. علاوه بر آن با افزایش فاصله بین الکتروودها انتظار می رود که از یک طرف برخورد کمتری بین یون های آلومینیوم تولیدی با یون های هیدروکسیل به وقوع پیوندد و لخته های کمتری تشکیل شود و از طرف دیگر برخورد مولکول رنگ با پلیمرهای هیدروکسیدی کاهش یابد، در نتیجه جذب الکترواستاتیک کاهش و راندمان حذف رنگ کم شود (۸). تحقیق صورت گرفته جهت حذف رنگزای

می شود، که از این نظر هنگام استفاده از الکتروکاتالیز آلومینیومی استاندارد جهت تخلیه پساب به منابع آبی (استاندارد pH جهت تخلیه پساب به منابع آبی در محدوده ۹-۶ است) بدون نیاز به ختنی سازی pH تامین می شود. نتایج تحقیق دیگری جهت تصفیه فاضلاب رستوران با استفاده از فرایند الکتروکاتالیز آلومینیومی توسط الکتروکاتالیز آلومینیومی نشان داد، در یک جریان ثابت، pH نهایی محلول، حتی زمانی که pH اولیه بالا و در محدوده ۶/۸-۹/۱ بوده، بعد از انجام فرایند حداکثر به ۸/۴ - ۸/۹۵ می رسید (۲۴).

#### تاثیر غلظت اولیه رنگزا بر راندمان حذف رنگ و COD

نتایج تحقیق حاضر نشان داد که با افزایش غلظت اولیه رنگزا راندمان حذف رنگ کاهش یافته است. نتایج سایر مطالعات انجام شده نیز نشان داده که در فرایند الکتروشیمیایی در شرایط ثابت از نظر شدت جریان و زمان تماس، زمانی که غلظت اولیه رنگزا افزایش یافته، راندمان حذف رنگزا کاهش یافته است و دلیل آن این گونه قابل تفسیر است که در یک هدایت الکتریکی ثابت و ولتاژ ثابت، مقدار مشخصی ترکیبات هیدروکسید آلومینیوم در محیط تولید می شود و این مقدار هیدروکسید آلومینیوم تولیدی قادر به جذب و حذف مقدار مشخصی از مولکول های رنگزاست (۸ و ۲۵)، لذا در صورت افزایش غلظت رنگزا، مقدار لخته های هیدروکسید آلومینیوم موجود در محیط جهت حذف مولکول های رنگ اضافی کافی نیست، در نتیجه راندمان حذف رنگزا و COD کاهش می یابد. تحقیق صورت گرفته جهت حذف رنگزای اسیدی زرد ۲۳ با استفاده از فرایند الکتروشیمیایی نیز نشان داده که با افزایش غلظت رنگزا از ۲۰ به ۲۰۰ میلی گرم در لیتر راندمان حذف رنگ از ۱۰۰ درصد به ۷۵ درصد کاهش یافته است (۲۶).

#### هزینه بهره برداری

هزینه بهره برداری یکی از مهم ترین فاکتورهایی است که در انتخاب یک روش، به منظور تصفیه فاضلاب تاثیرگذار است. هزینه بهره برداری در تصفیه خانه های فاضلاب شامل هزینه انرژی مصرفی، مواد شیمیایی مورد استفاده، هزینه نیروی کار،

مصرفی از ۴ به ۹ کیلووات ساعت به ازای هر مترمکعب فاضلاب افزایش یافته است، همچنین در ولتاژ ثابت ۵۰ ولت با افزایش زمان واکنش از ۲۰ به ۸۰ دقیقه انرژی مصرفی از ۵ به ۱۲ کیلووات ساعت به ازای هر مترمکعب فاضلاب تصفیه شده افزایش یافته است (۲۳).

#### تاثیر تغییرات ولتاژ بر میزان pH نهایی پساب

دلیل افزایش pH با افزایش ولتاژ اینگونه قابل توجیه است که با افزایش ولتاژ میزان مصرف انرژی در طول زمان بیشتر شده و در نتیجه این افزایش مصرف انرژی، فعالیت های آندیک و کاتدیک افزایش یافته و میزان احیای مولکول آب در کاتد به شدت افزایش می یابد و باعث می شود مقدار یون های هیدروکسید در محیط به شدت افزایش یابد و از طرفی سرعت خروج یون های هیدروژن از محیط به صورت گاز  $H_2$  افزایش می یابد در نتیجه pH پساب با گذشت زمان به تدریج زیاد می شود (۳). نتایج مشاهدات حین انجام آزمایش ها نیز حاکی از افزایش تولید حباب های هیدروژن با افزایش ولتاژ بود. همان طور که در شکل های ۵ و ۶ مشاهده می شود، در زمان ۷۵ دقیقه و فاصله مشخص بین الکترودها (۲ سانتی متر)، با افزایش ولتاژ از ۵ به ۴۰ ولت میزان pH نهایی پساب از ۸/۳ به ۸/۷ افزایش می یابد و در ولتاژ ۴۰ ولت نیز با افزایش زمان به ۷۵ دقیقه pH از ۵/۴ به ۸/۷ افزایش یافته است و بعد از آن با گذشت زمان، دیگر افزایشی مشاهده نمی شود. دلیل عدم افزایش pH با گذشت زمان را می توان به توانایی روش الکتروکاتالیز آلومینیومی در ختنی سازی pH فاضلاب و خاصیت بافری هنگام استفاده از الکتروکاتالیز آلومینیومی نسبت داد که از دلایل اصلی عدم افزایش pH واکنش هیدروکسید فلزی  $Al(OH)_3$  با یون  $OH^-$  و تولید  $Al(OH)_4^-$  است (۲۴). علاوه بر آن واکنش های پارازیتیک آندیک احتمالی طی فرایند، مانند اکسیداسیون آب در آند  $(2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-)$  می تواند منجر به تولید یون  $H^+$  در محیط واکنش و کاهش pH شود (۱۷). این واکنش ها باعث کاهش pH و مانع بالارفتن آن به بالای ۸/۷ در طی فرایند



بین الکترودها) طی زمان ۷۵ دقیقه توانست رنگزا را به میزان ۹۹/۱ و COD را به میزان ۸۴/۳ درصد حذف کند. تحت این شرایط انرژی الکتریکی مصرفی و الکتروود مصرفی به ترتیب به میزان ۱/۵۱ کیلووات ساعت و ۰/۰۶۰۵ کیلوگرم به ازای هر مترمکعب فاضلاب تصفیه شده بود. نتایج آزمایش های صورت گرفته نشان داد که راندمان حذف رنگ با افزایش ولتاژ و زمان تماس رابطه مستقیم و با فاصله بین الکترودها و غلظت اولیه رنگزا رابطه عکس دارد. همچنین ولتاژ به کار گرفته شده تاثیر مستقیم بر میزان انرژی الکتریکی مصرفی، الکتروود مصرفی و هزینه بهره برداری دارد. به طور کلی نتایج تحقیق نشان داد که روش تصفیه الکتروکواگولاسیون با استفاده از الکتروود آلومینیومی، در مقیاس آزمایشگاهی روش مناسب و موثری برای حذف رنگزای راکتیو از فاضلاب رنگی می باشد.

### تشکر و قدردانی

بدینوسیله از حمایت های مالی معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی تهران و همچنین از زحمات پرسنل آزمایشگاه شیمی دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی تهران تشکر می گردد.

هزینه دفع لجن، هزینه نگه داری و بهره برداری از تاسیسات است. در طی فرایند الکتروکواگولاسیون مهم ترین پارامترهایی که هزینه بهره برداری را تحت تاثیر قرار می دهند، هزینه الکتروود مصرفی و هزینه انرژی الکتریکی است. همان طور که در شکل ۸ ملاحظه می شود با افزایش ولتاژ، میزان مصرف الکتروود و انرژی به میزان قابل ملاحظه ای افزایش می یابد و در نتیجه باعث افزایش هزینه می شود. با توجه به این که هزینه هر کیلووات ساعت برق برابر ۷۷۳ ریال (۲۷) و قیمت هر کیلو ورق آلومینیوم ۳۰۰۰۰ ریال است. بنابراین هزینه تصفیه هر مترمکعب فاضلاب سنتتیک با روش مذکور در شرایط بهینه عملیاتی (ولتاژ ۲۰ ولت، فاصله بین الکترودها ۲ سانتی متر، زمان ۷۵ دقیقه) معادل با ۲۹۸۶/۸ ریال برآورد گردید. لازم به ذکر است که هزینه تصفیه هر مترمکعب فاضلاب در ولتاژ ۴۰ ولت برابر با ۹۰۷۷ ریال بوده که ۳/۰۴ برابر بیشتر از هزینه تصفیه با ولتاژ ۲۰ ولت است که این اختلاف زیاد هزینه ها دلیل مناسبی برای دقت در تعیین و انتخاب شرایط بهینه عملیاتی هنگام استفاده از فرایند الکتروکواگولاسیون است.

### نتیجه گیری

فرایند الکتروکواگولاسیون با استفاده از الکتروود آلومینیومی در شرایط بهینه عملیاتی (ولتاژ ۲۰ ولت، فاصله ۲ سانتی متر

## منابع

1. Bechtold T, Burtscher E, Hung Y. Treatment of textile wastes. In: Wang L, Hung Y, editors. Handbook of industrial and hazardous wastes treatment. 3rd ed. New York: Marcel Dekker; 2004.
2. Robinson T, McMullan G, Marchant R, Nigam P. Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *J Bio Technol.* 2001;77:247-55.
3. Muthukumar M, Karuppiyah MT, Raju B. Electrochemical removal of CI Acid orange 10 from aqueous solutions. *J Sep Purif Technol.* 2007;55:198-205.
4. Daneshvar N, Oladegaragoze A, Djafarzadeh N. Decolorization of basic dye solutions by electrocoagulation: An investigation of the effect of operational parameters. *J Hazard Mater.* 2006;B129:116-22.
5. Sanroman MA, Pazos M, Ricart MT, Cameselle C. Electrochemical decolourisation of structurally different dyes. *Chemosphere.* 2004;57:233-39.
6. Manu B, Chaudhari S. Decolorization of indigo and azo dyes in semi continuous reactors with long hydraulic retention time. *Process Biochem.* 2003;38:1213-1221.
7. Dhaouadi H, M Henni F. Textile mill effluent decolorization using crude dehydrated sewage sludge. *J. Chem. Eng.* 2008;138:111-19.
8. Song S, He Z, Qiu J, Chen X. Ozone assisted electrocoagulation for decolorization of C.I. Reactive Black 5 in aqueous solution: An investigation of the effect of operational parameters. *Sep Purif Technol.* 2007;55:238-45.
9. Christie RM. Environmental Aspects of Textile Dyeing. England: WoodHead; 2007.
10. Kobya M, Bayramoglu M, Eyvaz M. Techno-economical evaluation of electrocoagulation for the textile wastewater using different electrode connections. *J Hazard Mater.* 2007;148:311-18.
11. Bayramoglu M, Eyvaz M, Kobya M. Treatment of the textile wastewater by electrocoagulation Economical evaluation. *J Chem Eng.* 2007;128:155-61.
12. Daneshvar N, Ashassi Sorkhabi H, Kasiri MB. Decolorization of dye solution containing Acid Red 14 by electrocoagulation with a comparative investigation of different electrode connections. *J Hazard Mater.* 2004;B112:55-62.
13. Essadki AH, Bennajah M, Gourich B, Vial C, Azzi M, Delmas H. Electrocoagulation/electroflotation in an external-loop airlift reactor—Application to the decolorization of textile dye wastewater: A case study. *Chem Eng Process.* 2008;47:1211-23.
14. Can O.T, Kobya M, Demirbas E, Bayramoglu M. Treatment of the textile wastewater by combined electrocoagulation. *J. Chemosphere.* 2006;62:181-187.
15. Kim T.H, Park C, Shin E.B, Kim S. Decolorization of disperse and reactive dyes by continuous electrocoagulation process. *Desalination.* 2002;150:165-175.
16. APHA, AWWA, WPCF. Standards Methods for the Examination of Water and Wastewaters. 20th ed. Washington DC: American Public Health Association; 1998.
17. Zidane F, Drogui P, Lekhlif B, Bensaid J. Decolourization of dye-containing effluent using mineral coagulants produced by electrocoagulation. *J Hazard Mater.* 2008;155:153-63.
18. Arslan. Alaton I, Kabdas I, Hanbaba D, Kuybu E. Electrocoagulation of a real reactive dye bath effluent using aluminum and stainless steel electrodes. *J Hazard Mater.* 2008;150:166-73.
19. Raghu S, Ahmed B. Chemical or electrochemical techniques, followed by Ion exchange, for recycle of textile dye wastewater. *J Hazard Mater.* 2007;149:324-30.
20. Zaroual Z, Azzi M, Saib N, Chainet E. Contribution to the study of electrocoagulation mechanism in basic textile effluent. *J Hazard Mater.* 2006;B131:73-78.
21. Yildiz YS. Optimization of Bomaplex Red CR-L dye removal from aqueous solution by electrocoagulation using aluminum electrodes. *J Hazard Mater.* 2008;158:194-200.
22. Dalvand A, Gholami M, Jonidi A, Mahmoodi NM. Investigation of Electrochemical Coagulation Process Efficiency for Removal of Reactive Red 198 from Colored Wastewater. *J Color Sci Tech.* 2009;3:97-105.
23. Yalcın S, Ali S, Koparal S, Ahset I, Bulent K.

- Electrocoagulation of synthetically prepared waters containing high concentration of NOM using iron cast electrodes. *J Hazard Mater.* 2007;B139:373-80.
24. Xueming C, Guohua C, Po Lock Y. Separation of pollutants from restaurant wastewater by Electrocoagulation. *Sep Purif Technol.* 2000;19:65-76.
25. Mollah M, Pathak S, Patil P, Vayuvegula M. Treatment of orange II azo-dye by electrocoagulation (EC) technique in a continuous flow cell using sacrificial iron electrodes. *J Hazard Mater.* 2004;B109:165-71.
26. Daneshvar N, Khatae AR, Amani Ghadim AR, 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). *J Hazard Mater.* 2007;148:566-72.
27. Water and electricity special magazine. *Iran Newspaper.* 2009 Dec;36.

## **Treatment of Synthetic Wastewater Containing Reactive Red 198 by Electrocoagulation Process**

**Dalvand A.<sup>1</sup>, \*Jonidi jafari A.<sup>1</sup>, Gholami, M.<sup>1</sup>, Ameri A.<sup>1</sup>, Mahmoodi N. M.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Department of Environmental Research, Institute for Color Science and Technology, Tehran, Iran

Received; 2 October 2010 Accepted; 29 Desember 2010

### **ABSTRACT**

**Background and Objectives:** Discharge of textile colored wastewater industries without providing enough treatment in water bodies, is harmful for human and aquatic organisms and poses serious damages to the environment. Most of conventional wastewater treatment methods don't have enough efficiency to remove textile dyes from colored wastewater; thus in this research the efficiency of electrocoagulation treatment process with aluminum electrodes for treatment of a synthetic wastewater containing C.I. Reactive Red 198 in batch reactor was studied.

**Material and Methods:** The experiment conducted in a Plexiglas reactor with a working volume of 2L that equipped with 4 aluminum electrodes. The effects of operating parameters such as voltage, time of reaction, initial dye concentration and interelectrode distance on the color removal efficiency, electrical energy consumption and electrode consumption were investigated.

**Results:** in the optimum operational condition electrocoagulation, is able to remove color and COD as high as 99.1 and 84.3% in aluminum electrode in 75 minutes at 20 volt and 2 cm interelectrode distance, respectively. Under this condition, operating cost was 2986 rails per cubic meter of treated wastewater. Increase in the interelectrode distance and initial dye concentration, lead to the decrease in efficiency of dye and COD removal. While as the voltage and time of reaction increased, energy consumption, electrode consumption, final pH and color removal, increased too.

**Conclusion:** electrocoagulation process by aluminum electrode is an efficient and suitable method for reactive dye removal from colored wastewater.

**Keywords:** Electrocoagulation, Aluminum electrode, Reactive dye

---

\*Corresponding Author: [arash.dalvand@gmail.com](mailto:arash.dalvand@gmail.com)

Tel: +98 935 5076730 Fax: +98 21 88779118