مجله سلامت و محیط، فصلنامه‌ی علمی پژوهشی
انجمن علمی بهداشت محیط ایران
دوره چهارم، شماره اول، بهار ۱۳۹۰، صفحات ۱۱ تا ۲۲

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

آرش دالوند[۱]، احمد جنیدی[۲]، میترا غلامی[۳]، احمد عامری[۴]، نیازمحمد محمودی[۵]

نویسنده مسئول: تهران، میدان آرژانتین، انتهای خیابان الوند، دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی تهران، گروه بهداشت محیط *ahmad_jonidi@yahoo.com*

دریافت: ۸۹/۰۷/۱۰ پذیرش: ۸۹/۱۰/۰۸

چکیده

زمینه و هدف: *تخلیه فاضلاب رنگی صنایع نساجی به منابع آبی، بدون تصفیه کافی برای انسان ها و موجودات آبزی 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 الکترود آلومینیومی 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 الکترود آلومینیومی 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 الکترود مصرفی بررسی شد.*

یافته ها: *در شرایط عملیاتی بهینه با ولتاژ ۲۰ ولت و فاصله ۲ سانتی‌متر بین الکترودها طی زمان تماس۷۵ 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 ۲۹۸۶ریال 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 الکترود، pH نهایی پساب و راندمان حذف رنگزا افزایش می یابد.*

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

واژگان کلیدی: الکتروکواگولاسیون، الکترود آلومینیومی، رنگزای راکتیو

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد بهداشت محیط، دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی تهران
۲ – دکترای بهداشت حرفه ای، دانشیاردانشکده بهداشت محیط دانشگاه علوم پزشکی تهران
۳- دکترای بهداشت محیط، دانشیاردانشکده 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

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-11]

مقدمه

صنایع نساجی مقدار زیادی آب با کیفیت بالا مصرف می کنند (تقریبا 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 ۱۰۰۰۰ 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 رنگزا ها معمولا با مشکلات زیادی همراه است. معمولا رنگزاها از پایداری زیاد و قابلیت تجزیه زیستی کمی برخوردارند و در برابر تجزیه زیستی مقاومند. 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 رنگزا ها و محصولات ناشی از تخریب آنها دارای خواص سمی، سرطان زایی و جهش زایی برای انسان ها، گونه های میکروبی و آبزیان هستند(۳،۶و۷). 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 کواگولاسیون 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 آبگیری می شود (۱۴) و نیاز به فضای اندک جهت نصب تجهیزات است(۱۵). طی فرایند الکتروکواگولاسیون از طریق برقراری جریان الکتریکی بین الکترودها در اثر واکنش های آندیک و کاتدیک پیش سازهای لازم (یون آلومینیوم و یون هیدروکسید) برای تولید کواگولانت های هیدروکسید فلزی و حذف آلاینده ها در محل واکنش تولید می شوند. مکانیسم واکنش هایی که در طی فرایند الکتروشیمیایی با استفاده از الکترود آلومینیومی در آند و کاتد به وقوع می پیوندند و منجر به تولید کواگولانت ها می شود عبارتند از(۱۴):

واکنش آندیک: $AL \rightarrow AL^{3+} + 3\ e^-$

واکنش کاتدیک: $3H_2O + 3e^- \rightarrow 3OH^- + (3/2)\ H_{2\,(g)}$

واکنش کلی در محلول:

$AL + 3H_2O \rightarrow AL(OH)_{3(s)} + (3/2)\ H_{2\,(g)}$

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 الکتروکواگولاسیون با استفاده از الکترودهای آلومینیومی جهت حذف ماده رنگزای راکتیو از

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-11]

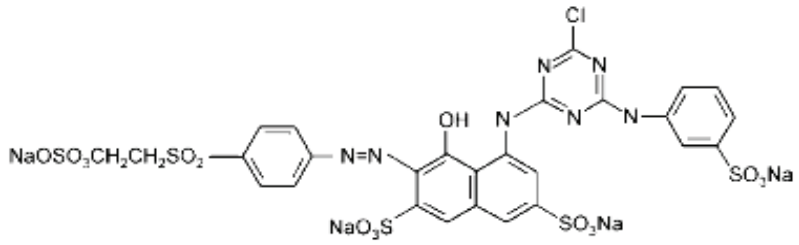
محیط آبی در مقیاس آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفت و شرایط بهینه عملیاتی جهت حذف مطلوب رنگ با توجه به میزان انرژی و الکترود مصرفی، با استفاده از روش تصفیه مذکور تعیین گردید.

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 $C_{۲۷}H_{۱۸}ClN_۷Na_۴O_{۱۵}S_۵$ و جرم مولکولی ۹۶۷/۵ گرم برمول به عنوان رنگزا استفاده شد (شکل ۱). طول موج حداکثرجذب این رنگزا ۵۱۸ نانومتر اندازه گیری شد. اسید هیدروکلریک مصرفی و مواد شیمیایی مورد استفاده برای انجام آزمایشCOD (اکسیژن مورد نیاز شیمیایی) ساخت شرکت مرک آلمان بود.



شکل ۱: ساختار مولکولی رنگزای راکتیو قرمز ۱۹۸

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 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 ۱۱/۲ × ۱۰/۸ 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 اندازی 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 ـ 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 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

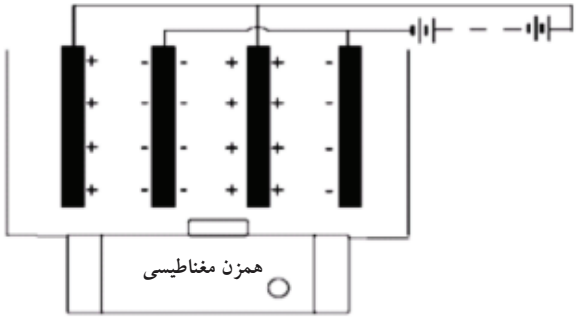
[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-11]

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 الکترود 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(۱۳و۱۷). 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)، Uولتاژ (ولت)، I جریان (آمپر)، t زمان واکنش(ساعت) و V حجم محلول بر حسب لیتر است.

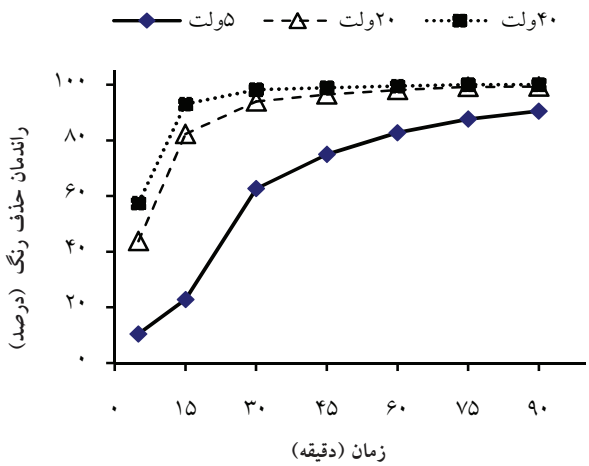


شکل ۲: نحوه قرار گرفتن الکترودها در درون راکتور

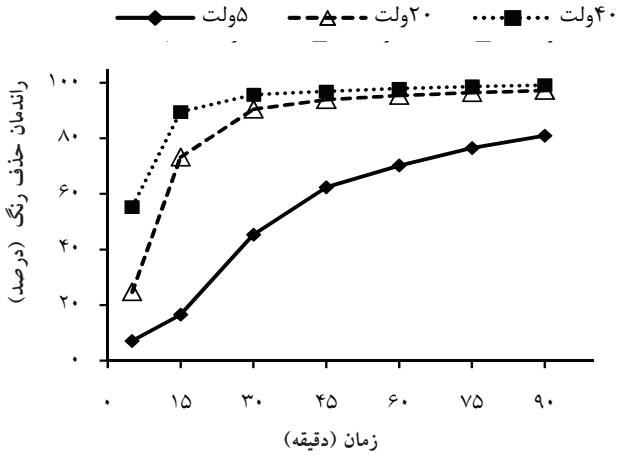
یافته ها

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 الکترود آلومینیومی به منظور تصفیه فاضلاب استفاده شد، pH اولیه بهینه در محدوده ۶ – ۵ بوده است (۱۱و۱۸). 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.

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-11]



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

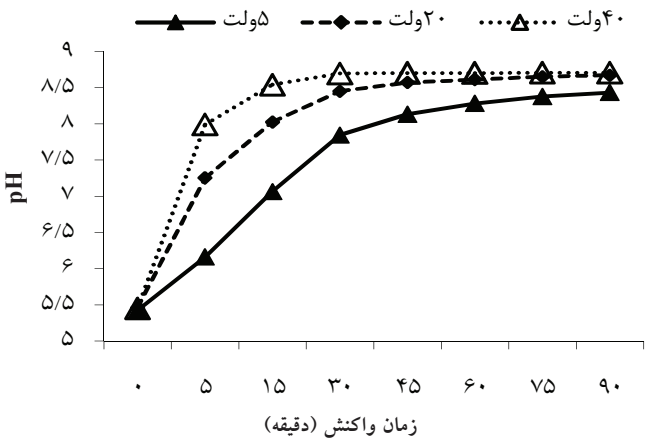


شکل ۴: ارتباط راندمان حذف رنگ با تغییرات ولتاز و زمان تماس (فاصله الکترود ها ۳ سانتی متر)

جدول۱: تاثیر تغییرات ولتاژ، زمان واکنش و فاصله بین الکترودها بر میزان انرژی الکتریکی مصرفی

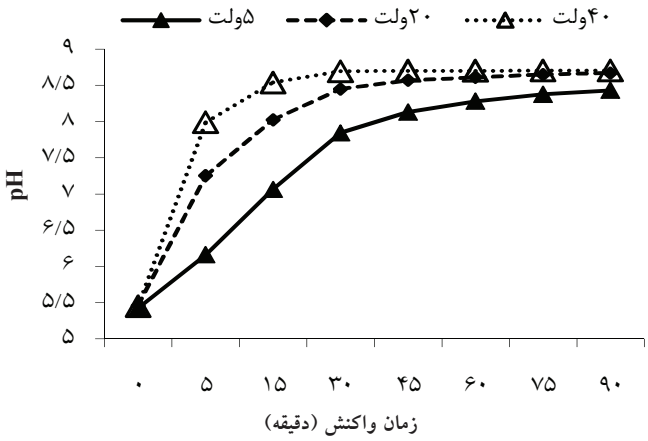
پارامتر		انرژی الکتریکی مصرفی در فواصل زمانی مختلف (کیلووات ساعت در مترمکعب فاضلاب تصفیه شده)						
ولتاژ	زمان (دقیقه) فاصله بین الکترودها	۵	۱۵	۳۰	۴۵	۶۰	۷۵	۹۰
۵ ولت	۲سانتی متر	۰/۰۰۶۲۴	۰/۰۱۸۷	۰/۰۳۷۵	۰/۰۵۶۲	۰/۰۷۵	۰/۰۹۳۷	۰/۱۱۲۵
	۳ سانتی متر	۰/۰۰۴۱۶	۰/۰۱۲۵	۰/۰۲۵	۰/۰۳۷۵	۰/۰۵	۰/۰۶۲۵	۰/۰۷۱۸
۲۰ ولت	۲سانتی متر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

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



شکل۵: تاثیر تغییرات ولتاژ بر pH نهایی پساب (فاصله الکترودها ۲ سانتی متر)

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-11]

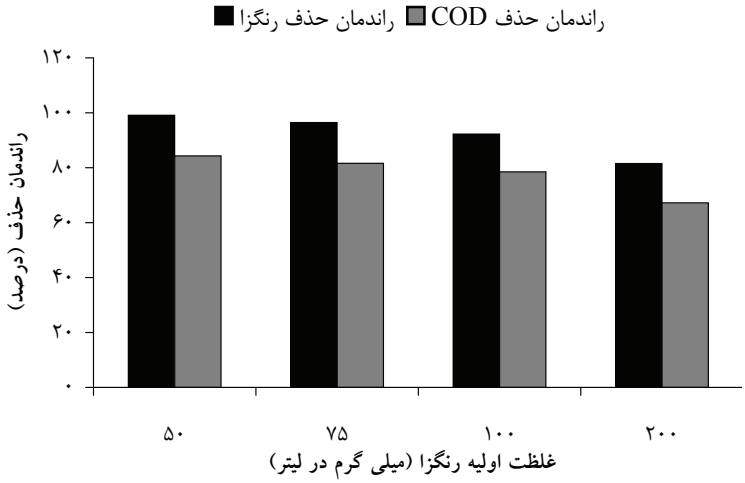


شکل ۶: تاثیر تغییرات ولتاژ بر pH نهایی پساب (فاصله الکترودها ۳ سانتی متر)

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

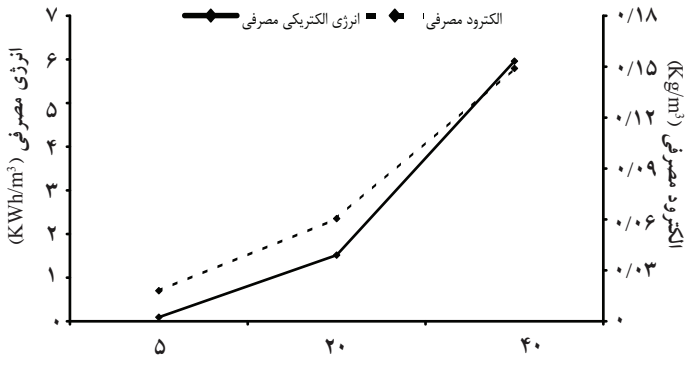


شکل ۷: تاثیر غلظت اولیه رنگزا بر راندمان حذف رنگ و COD در شرایط بهینه (ولتاژ ۲۰ ولت، فاصله ۲ سانتی متر، زمان واکنش ۷۵ دقیقه)

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):

$$Dye\text{-}H + (OH)\,OAL_{(s)} \rightarrow Dye\text{-}OAL_{(s)} + H_2O$$

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)

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-11]

می تواند باعث جذب ترکیبات آلی محلول و یا ذرات کلوییدی به آنها و به دام انداختن آنها شـده و باعث حذف و جداسازی آنها از محلول از طریق رسوب دهی شود(۴و۱۹).

لخته های سـبک نیز در اثر اتصال به حباب های گاز هیدروژن تولیدی در کاتد به سـطح پسـاب آمده و حذف می گردند که راندمـان حذف رنگ و COD، به مقدار آلومینیوم تولید شـده در محلول بسـتگی دارد، از آنجا که مقدار آلومینیوم تولیدی نیز به زمان واکنش و ولتاژ بسـتگی دارد، با افزایش یکی از این دو پارامتـر ، تولید مواد کواگولانت نیـز 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 بـالای رنگ اسـت(۴و۲۰). نتایج تحقیق صورت گرفتـه جهت حذف رنگ Bomaplex Red CR-L توسـط 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 سـریع افزایش یافته و به حدود ۹۰ درصد رسـید و بعد از آن، زمان تاثیر کمتری روی راندمان حذف رنگ داشته است (۲۱).

تاثیر فاصله بین الکترودها بر راندمان حذف رنگزا

دلیـل کاهـش راندمان حـذف رنگ بـا افزایـش فاصله بین الکترودها (شکل۳ و۴) اینگونه قابل توجیه است که با افزایش فاصله بین الکترودها مقاومت الکتریکی بین الکترودها افزایش می یابد و در نتیجه رسـانایی محلول کم شـده و میزان جریان و انـرژی مصرفی کاهش می یابد که این کاهش جریان سـبب عـدم تولید یون های آلومینیوم و هیدروکسـیل به مقدار کافی برای تشـکیل لخته و حذف رنگ است. علاوه بر آن با افزایش فاصله بین الکترودهـا انتظار می رود که از یک طرف برخورد کمتری بین یون های آلومینیوم تولیدی با یون های هیدروکسیل به وقوع بپیوندد و لخته های کمتری تشـکیل شـود و از طرف دیگر برخورد مولکول رنگ با پلیمرهای هیدروکسیدی کاهش یابد، در نتیجه جذب الکترواسـتاتیک کاهش و راندمان حذف رنگ کم شـود(۸). تحقیق صورت گرفته جهت حذف رنگزای راکتیو قرمز ۱۹۸ توسـط فرایند الکتروکواگولاسیون با استفاده از الکترود آهنی نیز نشان داده، با افزایش فاصله بین الکترودها از ۲ به ۳ سـانتی متر(در ولتاژ ۴۰ ولت، زمان ۶۰ دقیقه) انرژی مصرفی از ۹/۸ به ۵/۳ کیلووات سـاعت به ازای هرمتر 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

طبـق جدول ۱ با افزایش زمان واکنش در یک ولتاژ مشـخص و فاصله ثابت بین الکترودهـا، میزان انرژی الکتریکی مصرفی افزایـش می یابـد، همچنین با افزایش ولتـاژ از ۵ به ۴۰ ولت میزان انـرژی الکتریکـی مصرفـی افزایش پیدا کرده اسـت، به طـوری که در هر دو فاصله ۲ و ۳ سـانتی متر، میزان انرژی الکتریکـی مصرفـی در ولتاژ ۴۰ ولت تقریبا ۴ برابر بیشـتر از انرژی مصرفی در ۲۰ ولت بوده اسـت. افزایش مصرف انرژی با افزایش ولتاژ و زمان واکنش به این دلیل اسـت که با افزایش ولتاژ یا زمان واکنش میزان جریان عبوری از الکترودها افزایش و در نتیجـه مصرف انـرژی افزایش می یافت. طبق شـکل ۳ بالاترین راندمان حذف رنگزا به میزان ۱۰۰ درصد در فاصله ۲ سـانتی متر، ولتاژ ۴۰ ولت و طی زمان ۷۵ دقیقه بوقوع پیوسته اسـت، ولی از آنجا که با افزایش ولتاژ از ۲۰ به ۴۰ ولت طی ۷۵ دقیقـه واکنش، میزان انرژی الکتریکـی مصرفی۳/۹۳ برابر افزایش می یابد، در حالی که راندمان حذف رنگزا تنها به میزان ۰/۹ درصـد (با افزایش ولتـاژ از ۲۰به ۴۰ ولت راندمان حذف رنگزا از ۹۹/۱ به ۱۰۰ درصد افزایش می یابد) افزایش می یابد لـذا ولتاژ ۲۰ ولت، فاصله بین الکترودها ۲ سـانتی متر و زمان ۷۵ دقیقـه که در آن با در نظر گرفتـن انرژی مصرفی، راندمان حذف رنگ بالایی حاصل شـده بود، شرایط بهینه بهره برداری در نظر گرفته شـد. نتایج تحقیق صـورت گرفته جهت حذف مـواد هیومیکی از فاضلاب با اسـتفاده از الکترود آهنی در طی فرایند الکتروکواگولاسـیون نیز نشان داده که در شرایط یکسان طـی زمان ۶۰ دقیقه، با افزایـش ولتاژ از ۴۰ به ۵۰ ولت انرژی

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-11]

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 میزانpH 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 الکتروکواگولاسیون در خنثی سازی pH فاضلاب و خاصیت بافری هنگام استفاده از الکترود 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 کاهشpH شود(۱۷). این واکنش ها باعث کاهش pH و مانع بالارفتن آن به بالای ۸/۷ در طی فرایند می شود، که از این نظر هنگام استفاده از الکترود آلومینیومی استاندارد جهت تخلیه پساب به منابع آبی (استاندارد pH جهت تخلیه پساب به منابع آبی در محدوده ۹-۶ است) بدون نیاز به خنثی سازی pH تامین می شود. نتایج تحقیق دیگری جهت تصفیه فاضلاب رستوران با استفاده از فرایند الکتروکواگولاسیون توسط الکترود آلومینیومی نشان داد، در یک جریان ثابت، pH نهایی محلول، حتی زمانی که pH اولیه بالا و در محدوده ۸/۶-۹/۱ 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 و۲۵)، 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،

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-11]

هزینــه دفع لجن، هزینه نگه داری و بهره برداری از تاسیســات است. در طی فرایند الکتروکواگولاسیون مهم ترین پارامترهایی کــه هزینــه بهره برداری را تحــت تاثیر قرار مــی دهند، هزینه الکترود مصرفی و هزینه انرژی الکتریکی است. همان طور که در شــکل ۸ ملاحظه می شــود با افزایش ولتاژ، میزان مصرف الکترود و انــرژی به میزان قابل ملاحظه ای افزایش می یابد و در نتیجه باعث افزایش هزینه می شود. با توجه به این که هزینه هرکیلووات ســاعت برق برابر ۷۷۳ ریال(۲۷) و قیمت هر کیلو ورق آلومینیوم ۳۰۰۰۰ ریال اســت. بنابرایــن هزینه تصفیه هر مترمکعب فاضلاب ســنتتیک با روش مذکور در شــرایط بهینه عملیاتــی (ولتاژ ۲۰ ولت، فاصله بین الکترودها ۲ ســانتی متر، زمــان ۷۵ دقیقه) معادل با ۲۹۸۶/۸ ریال برآورد گردید. لازم به ذکر اســت که هزینه تصفیه هرمترمکعب فاضلاب در ولتاژ ۴۰ ولــت برابر بــا ۹۰۷۷ ریال بوده که ۳/۰۴ برابر بیشــتر از هزینه تصفیه با ولتاژ ۲۰ ولت اســت که این اختــلاف زیاد هزینه ها دلیل مناســبی برای دقــت در تعیین و انتخاب شــرایط بهینه عملیاتی هنگام استفاده از فرایند الکتروکواگولاسیون است.

نتیجه گیری

فرایند الکتروکواگولاســیون با استفاده از الکترود آلومینیومی در شــرایط بهینه عملیاتی (ولتاژ ۲۰ ولت، فاصله ۲ ســانتی متر بین الکترودها) طی زمان ۷۵ دقیقه توانســت رنگزا را به میزان ۹۹/۱ و COD را بــه میزان ۸۴/۳ درصد حذف کند. تحت این شــرایط انرژی الکتریکی مصرفی و الکترود مصرفی به ترتیب به میــزان ۱/۵۱ کیلووات ســاعت و ۰/۰۶۰۵ کیلوگرم به ازای هر مترمکعب فاضلاب تصفیه شــده بــود. نتایج آزمایش های صــورت گرفته نشــان داد که راندمان حذف رنــگ با افزایش ولتاژ و زمان تماس رابطه مســتقیم و بــا فاصله بین الکترودها و غلظــت اولیه رنگزا رابطه عکــس دارد. همچنین ولتاژ به کار گرفته شــده تاثیر مســتقیم بر میزان انرژی الکتریکی مصرفی، الکتــرود مصرفی و هزینه بهره برداری دارد. به طور کلی نتایج تحقیق نشان داد که روش تصفیه الکتروکواگولاسیون با استفاده از الکترود آلومینیومی، در مقیاس آزمایشــگاهی روش مناسب و موثــری بــرای حذف رنگزای راکتیــو از فاضلاب رنگی می باشد.

تشکر وقدردانی

بدینوسیله از حمایت های مالی معاونت تحقیقات و فناوری دانشــگاه علوم پزشــکی تهران و همچنین از زحمات پرســنل آزمایشــگاه شیمی دانشــکده بهداشت دانشــگاه علوم پزشکی تهران تشکر می گردد.

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-11]

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, Karuppiah 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 dyebath 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.

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-11]

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.

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-11]

Treatment of Synthetic Wastewater Containing Reactive Red 198 by Electrocoagulation Process

Dalvand A.[1], *Jonidi jafari A.[1],Gholami, M. [1], Ameri A.[1], Mahmoodi N. M.[2]

[1] Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health,Tehran، University of Medical Sciences, Tehran, Iran

[2] 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*
***Tel:** +98 935 5076730 **Fax:** +98 21 88779118*

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-11]