

Evaluation of Electro-Fenton Process Performance for Dye Removal from Industrial Wastewater

Sima Zamand

MSc, Department of Environmental Health Engineering, School of Health, Mashhad University of Medical Sciences, Mashhad, Iran.

Hossein Alidadi

professor, Department of Environmental Health Engineering, School of Health, Mashhad University of Medical Sciences, Mashhad, Iran.

Abolfazl Naimabadi

Assistant professor, Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Neyshabur University of Medical Sciences, Neyshabur, Iran.

Vahid Taghavimanesh

* MSc, Department of Environmental Health Engineering, School of Health, Mashhad University of Medical Sciences, Mashhad, Iran. (corresponding author):
Email: vahid.taghavi18@gmail.com.

Received: 2019/10/30

Accepted: 2020/01/09

Document Type: Research article

ABSTRACT

Background and Aim: Produced wastewater by various industries is a dangerous and considerable pollution resource for the environment. The presence of non-biodegradable dyes in effluents of dyeing industries is regarded as a major problem. The purpose of this study was to evaluate the efficiency of electro-fenton process in dye removal from the wastewater of dyeing industries.

Materials and methods: In the present experimental study conducted in 2017, wastewater sampling was performed according to the Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. The samples were transferred to the electrochemical cell reactor and the effect of different parameters such as applied voltage, iron concentration, pH, and reaction time on dye removal efficiency were investigated.

Results: According to the results, optimum conditions of Electro-Fenton process in dye removal was determined. Accordingly, in applied voltages of 25 and 35 V in 100 and more than 200 mg/L dye concentrations, reaction time of 50 - 60 minutes, Fe^{2+} concentration of 0.3 mg/L and pH of 3 the dye removal efficiency of 99.8 % was achieved.

Conclusion: The electro-fenton process is able to remove dye with different concentrations and maximum efficiency. Based on the results, the applied voltage and the concentration of Fe^{2+} were the parameters that are more efficient and pH along with reaction time demonstrated less impact on the efficiency of the electro-fenton process in dye removal from industrial wastewater.

Keywords: Electro-Fenton, dye, Industrial wastewater, dyeing industries.

► **Citation:** Zamand S, Alidadi H, Naimabadi A, and Taghavimanesh V. Evaluation of Electro-Fenton process performance for Dye removal from industrial wastewater . *Iranian Journal of Research in Environmental Health*. Winter 2020;5 (4): 283-291.

ارزیابی عملکرد فرآیند الکتروفتون در حذف رنگ حاصل از فاضلاب تولیدی در واحدهای صنعتی

چکیده

زمینه و هدف: فاضلاب تولیدی حاصل از صنایع مختلف، یک منبع آلاینده خطرناک و قابل توجه در آلودگی محیط زیست به شمار می‌روند. مشکل عمده فاضلاب تولیدی صنایع رنگرزی، مواد رنگی غیرقابل تجزیه بیولوژیکی است، لذا مطالعه حاضر با هدف ارزیابی کارایی فرآیند الکتروفتون در حذف رنگ از فاضلاب صنایع انجام شد.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه تجربی که در سال ۱۳۹۶ انجام گرفت، نمونه برداری از فاضلاب بر اساس کتاب استاندارد آزمایش‌های آب و فاضلاب انجام گرفت. نمونه به درون سلول الکتروشیمیایی انتقال یافته و تأثیر پارامترهای مختلف مانند میزان جریان الکتریکی، مقدار مصرفی یون‌های آهن، pH و زمان واکنش در راهبری فرآیند مورد نظر بررسی گردید.

یافته‌ها: بر اساس نتایج حاصل، در شدت جریان ۲۵ ولت برای غلظت رنگ ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و شدت جریان ۳۵ ولت برای غلظت رنگ ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر به بالا، در زمان ۵۰-۶۰ دقیقه، غلظت یون‌های آهن ۰/۳ میلی‌گرم بر لیتر و $pH=3$ حذف ۹۹/۸ درصدی رنگ به دست آمد.

نتیجه‌گیری: فرآیند الکتروفتون، قادر به حذف رنگ با غلظت‌های متفاوت با بازده بالا می‌باشد. بر اساس نتایج حاصل، شدت جریان الکتریکی و غلظت یون‌های آهن، پارامترهای مؤثر بر فرآیند الکتروفتون در حذف رنگ هستند و پارامترهای pH و زمان الکترولیز، تأثیر کمتری بر کارایی فرآیند الکتروفتون در حذف رنگ حاصل از فاضلاب دارند.

کلید واژه‌ها: الکتروفتون، رنگ، رنگرزی، فاضلاب صنعتی

سیما ضماند

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مشهد، مشهد، ایران.

حسین علیدادی

استاد، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مشهد، مشهد، ایران.

ابوالفضل نعیم‌آبادی

استادیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی نیشابور، نیشابور، ایران.

وحید تقوی‌منش

* کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مشهد، مشهد، ایران. (نویسنده مسئول):

پست الکترونیک: vahid.taghavi18@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۱۹

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

◀ **استناد:** ضماند س، علیدادی ح، نعیم‌آبادی الف، تقوی‌منش و، ارزیابی عملکرد فرآیند الکتروفتون در حذف رنگ حاصل از فاضلاب تولیدی در واحدهای صنعتی. *فصلنامه پژوهش در بهداشت محیط*. زمستان ۱۳۹۸؛ ۵(۴): ۲۸۳-۲۹۱.

مقدمه

فاضلاب تولیدی حاصل از صنایع مختلف، یک منبع آلاینده خطرناک و قابل توجه در ایجاد آلودگی محیط زیست به شمار می‌رود (۱، ۲). برخی از این صنایع حد استاندارد تخلیه فاضلاب به منابع پذیرنده را رعایت نکرده و عواقب جدی و بسیار خطرناکی بر روی سیستم اکولوژیکی آب‌های پذیرنده ایجاد می‌کنند (۳). رنگ‌ها معمولاً در صنایع نساجی، رنگرزی، غذایی، کاغذسازی و ... با اهداف متفاوتی استفاده می‌شوند (۴). یکی از این صنایع صنعت رنگرزی بوده که از مواد رنگی فراوانی در خط تولید استفاده می‌کند. فاضلاب این صنایع حاوی انواع رنگ‌ها و مواد مختلف شیمیایی آلی و معدنی است (۵). مهم‌ترین آلودگی مرتبط با رنگ موجود در فاضلاب این صنایع، کاهش نفوذ نور در آب‌های پذیرنده می‌باشد (۶). بنابراین تخلیه مداوم و مستمر فاضلاب صنایع رنگرزی به منابع آبی، موجب ایجاد پدیده اوتریفیکاسیون و اختلال در زندگی موجودات آبی خواهد شد (۵). نگرانی عمده زیست‌محیطی از فاضلاب این صنایع مربوط به میزان رنگ بسیار شدید آنهاست. آلاینده‌های مقاوم موجود در فاضلاب این صنایع معمولاً برای موجودات زنده سمی بوده و باعث بازدارندگی رشد آنها می‌شود. به دلیل خواص ویژه فاضلاب این صنایع، سیستم‌های تصفیه بیولوژیکی متداول قادر به تصفیه این فاضلاب‌ها نمی‌باشند (۶، ۷)، به همین دلیل دارای محدودیت‌های سخت‌گیرانه‌تری جهت تخلیه به محیط زیست و منابع پذیرنده می‌باشند (۸). تاکنون فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی مختلفی مانند جذب، ترسیب شیمیایی، الکتروکواگولاسیون و ... جهت تصفیه این فاضلاب‌ها مورد آزمایش قرار گرفته است (۹)، اما یکی از مشکلات عمده روش‌های مذکور، عدم توانایی تخریب آلاینده‌های موجود در فاضلاب و تنها تبدیل آلودگی از یک شکل به شکل دیگر است که خود نوع جدید و متفاوتی از آلودگی به‌شمار رفته و منجر به تصفیه اضافی می‌شود (۱۰). رویکرد جدید و مناسب در مورد فاضلاب این صنایع، استفاده مجدد از آنها بعد از اجرای عملیات تصفیه به جای تخلیه آنها به محیط زیست است و این در حالی

است که هزینه‌های مواد شیمیایی، تأمین انرژی و آب همواره در حال افزایش است. مقدار عددی نسبت BOD^2_5 / COD^1 (نسبت اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی به اکسیژن مورد نیاز شیمیایی) نمایانگر میزان توانایی تجزیه بیولوژیکی مواد آلی است که در مورد رنگ‌های موجود در فاضلاب صنایع رنگرزی این نسبت بین ۰/۱ - ۰/۲۵ است که نشان‌دهنده این است که فاضلاب حاوی مقادیر زیادی مواد آلی غیرقابل تجزیه بیولوژیکی است. بنابراین تجزیه مواد آلی مقاوم به تجزیه بیولوژیکی در فاضلاب صنایع رنگرزی به‌وسیله روش‌هایی که توانایی تجزیه بیولوژیکی مواد آلی را افزایش می‌دهند، انجام‌پذیر خواهد بود (۱۱). فرآیندهای اکسیداسیون الکتروشیمیایی یک روش نسبتاً جدید و مؤثر، انتخابی، اقتصادی، با تولید لجن کمتر، عدم مصرف مواد شیمیایی و همچنین دارای راهبری و تجهیزات ساده بوده و یک جایگزین پاک برای کاهش و حذف ترکیبات آلی با بارهای بالا به‌خصوص آلاینده‌های آلی مقاوم به تصفیه بیولوژیکی است که به‌صورت موفقیت‌آمیزی برای تصفیه فاضلاب‌های صنعتی مختلف استفاده شده است (۱۱، ۱۲). محصولات نهایی فرآیندهای اکسیداسیون الکتروشیمیایی آب و CO_2 است (۱۳). علاوه بر این، فرآیندهای بر پایه فتون به دلیل داشتن عملکرد بالا در تولید رادیکال‌های آزاد هیدروکسیل که دارای قدرت اکسیداسیون بالایی بعد از عنصر فلئور می‌باشند، کاربرد فراوانی داشته‌اند (۱۴). رادیکال‌های آزاد هیدروکسیل به میزان مؤثری با مواد آلی واکنش داده و منجر به تبدیل و تولید مواد معدنی کم‌خطر می‌شود (۱۵). فرآیندهایی که در آنها رادیکال‌های آزاد هیدروکسیل به‌وسیله انرژی الکتریکی تولید شود، فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته الکتروشیمیایی ($EAOPs^2$) نامیده می‌شوند (۱۶). فرآیندهای تصفیه فاضلاب مذکور در سال‌های اخیر در تصفیه انواع فاضلاب‌ها مورد استفاده قرار گرفته است (۱۵، ۱۶). این روش به‌دلیل سرعت بالای انجام واکنش‌ها

1. Chemical Oxygen Demand

2. Biochemical Oxygen Demand

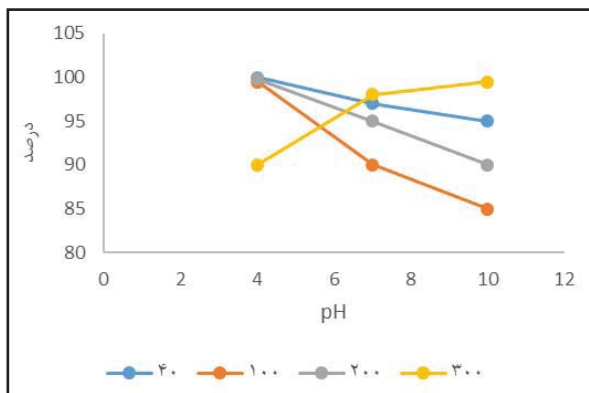
3. Electrochemical Advanced Oxidation Process

و به دلیل سهولت اجرا و بازده بالا برای تصفیه انواع پساب‌های صنعتی باید به‌طور ویژه مورد توجه قرار گیرد (۱۷، ۱۸). در فرآیند الکتروفنتون که از روش‌های غیرمستقیم الکتروشیمیایی است، رادیکال‌های آزاد هیدروکسیل که دارای یک الکترون جفت نشده و دارای عمر کوتاهی است، به کمک نیروی الکتریکی و در یک محیط ملایم اسیدی و در محل انجام آزمایشات تولید می‌شوند، بنابراین مشکلات مربوط به ذخیره و حمل H_2O_2 وجود نخواهد داشت و هزینه‌های مصرف مواد شیمیایی نیز کاهش چشمگیری خواهد یافت (۱۹، ۲۰). از فرآیند الکتروفنتون تاکنون در تصفیه فاضلاب‌های صنعتی مختلفی مانند صنایع نساجی و دباغی، حذف تارتراژین و آتازین از محلول‌های آبی، حذف مواد آلی مقاوم، حذف رنگ از فاضلاب‌های تولیدی، تصفیه فاضلاب‌های حاوی سم آنیلین و تصفیه فاضلاب‌های حاوی هگزامین استفاده شده است (۲۲). مطالعه حاضر با هدف ارزیابی کارایی حذف رنگ **Blue19 Reactive** از فاضلاب صنایع رنگرزی توسط فرآیند الکتروفنتون و یافتن شرایط بهینه حذف رنگ از فاضلاب صنایع رنگرزی به‌وسیله این فرآیند انجام شد.

روش کار

این مطالعه تجربی در سال ۱۳۹۶ در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد انجام گرفت. در این مطالعه جهت اندازه‌گیری جذب نور از دستگاه Spectrophotometer UV-Vis مدل PU 8740 و برای اندازه‌گیری pH، از pH متر مدل مترموم ۶۹۰ استفاده شد (۲۳). سلول الکتروشیمیایی استفاده شده به‌صورت استوانه‌ای بوده و دارای حجم ۵۰۰ میلی‌لیتر می‌باشد. همچنین دارای دو الکتروود آند از جنس آهن و کاتد از جنس کربن گرافیت بوده که به دستگاه تولید الکتروسیته متصل گردید. در این مطالعه از سولفات آهن هفت آب ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) و سولفات سدیم ساخت شرکت مرک آلمان استفاده گردید. نمونه‌برداری از فاضلاب بر اساس کتاب استاندارد آزمایش‌های آب و فاضلاب انجام گرفت (۲۴). فاضلاب خام به مقدار ۱۰۰ لیتر از یک واحد صنعتی رنگرزی واقع

در شهرک صنعتی خیام برداشت شد و در شرایط استاندارد به محیط آزمایشگاه پژوهشکده هوا خورشید دانشگاه فردوسی مشهد انتقال یافت. نمونه فاضلاب برداشت شده در زمان نمونه‌گیری فقط حاوی رنگ **Reactive Blue 19** بود. برای تعیین میزان رنگ در نمونه فاضلاب خام ابتدا با استفاده از پودر رنگ، غلظت‌های مختلف و مشخصی از محلول رنگی آماده و میزان جذب آنها با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر در طول موج ۵۰۰ نانومتر بررسی و نمودار منحنی استاندارد رسم گردید (۲). سپس میزان جذب نور در فاضلاب خام اندازه‌گیری و با استفاده از منحنی استاندارد غلظت رنگ در فاضلاب خام که حدود ۴۰ میلی‌گرم بر لیتر بود، به‌دست آمد. علاوه بر فاضلاب خام، نمونه‌های سنتتیک با استفاده از پودر رنگ و با سه غلظت ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر تهیه و مورد آزمایش قرار گرفت. ابتدا نمونه فاضلاب را به سلول الکتروشیمیایی منتقل کرده، سپس جهت شروع واکنش‌های فرآیند فنتون مقدار لازم از ماده کاتالیزور Fe^{3+} به نمونه اضافه گردید (۲۵). سپس با برقراری جریان الکتریکی در سلول، عمل الکترولیز محلول انجام شده و واکنش اکسیداسیون الکتروفنتون آغاز شد. جهت بالا بردن قدرت یونی و افزایش هدایت الکتریکی محلول، ماده الکترولیت Na_2SO_4 به مقدار ۰/۰۵ مول به محلول اضافه گردید. بعد از انجام مراحل آزمایش و در زمان‌های مشخص شده، از سلول الکتروشیمیایی نمونه لازم برداشت و سپس غلظت رنگ باقی‌مانده در آن محاسبه شد (۲۶، ۲۷). در محدوده غلظت‌های استفاده شده در این مطالعه، ارتباط خطی بین غلظت رنگ و جذب نور در طول موج مورد آزمایش مشاهده گردید. انجام آزمایشات مورد نظر در سه محدوده pH ۴ (اسیدی)، ۷ (خنثی) و ۱۰ (قلیایی)، غلظت آهن مصرفی در سه محدوده ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر، زمان انجام واکنش در ۴ سطح ۵، ۱۵، ۳۰ و ۶۰ دقیقه، شدت جریان الکتریکی در سه محدوده متفاوت ۱۵، ۲۵ و ۳۵ ولت و با توجه به منحنی استاندارد غلظت رنگ در فاضلاب خام که حدود ۴۰ میلی‌گرم بر لیتر بود، میزان غلظت رنگ نیز در سه غلظت متفاوت ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر به همراه فاضلاب خام انجام شد که



نمودار ۱. میزان حذف رنگ در pHهای مختلف

نمودار ۲ تأثیر زمان واکنش در شرایط بهینه آزمایش بر حذف رنگ را نشان می‌دهد. بر این اساس، در زمان‌های کمتر از ۱۵ دقیقه، میزان حذف رنگ بسیار کم است، اما با گذشت زمان و در نتیجه تولید بیشتر رادیکال‌های هیدروکسیل، میزان حذف رنگ به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد؛ به‌طوری‌که در بیشتر حالات آزمایش بعد از گذشت زمان ۳۰ دقیقه و در غلظت‌های مختلف رنگ، بیش از ۵۰٪ راندمان حذف رنگ حاصل می‌شود و در پایان زمان ۶۰ دقیقه و در شرایط بهینه فرآیند، تا حدود ۹۹/۵٪ حذف رنگ صورت می‌گیرد. در نمونه‌های فاضلاب خام نیز در شرایط بهینه و بعد از گذشت زمان ۳۰ دقیقه، ۹۰٪ و در زمان ۳۵ دقیقه تقریباً تمام رنگ موجود در نمونه حذف می‌گردد.

نمودار ۳ میزان تأثیر شدت جریان در حذف رنگ را نشان می‌دهد. بر این اساس نتیجه‌گیری می‌شود با افزایش شدت جریان، میزان حذف رنگ به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. در شدت جریان‌های پایین (۱۵ ولت)، برای هیچ‌کدام از غلظت‌های رنگ و نمونه فاضلاب خام، حداکثر حذف رنگ حاصل نشد. در شدت جریان ۲۵ ولت، در نمونه فاضلاب خام به حذف ۹۹/۵٪ رنگ و در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر رنگ به حذف ۹۸/۵٪ به‌دست آمد، اما برای افزایش غلظت‌های رنگ هنوز بازده حداکثری حاصل نشد. در شدت جریان ۳۵ ولت در تمام غلظت‌ها حذف حداکثری رنگ به‌دست آمد؛ به‌عنوان مثال در شدت جریان ۱۵ ولت و غلظت رنگ ۱۰۰ میلی‌گرم، میزان حذف رنگ در بهترین شرایط ۵۹٪ و

در این میان میزان بهینه پارامترهایی چون میزان جریان الکتریکی، دوز مصرفی یون‌های آهن، pH و زمان الکترولیز در راهبری فرآیند تعیین شدند. در پایان تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS، ورژن ۱۸ انجام گرفت. همچنین جهت رسم نمودارها از نرم‌افزار اکسل استفاده شد.

یافته‌ها

جدول ۱ میزان حذف رنگ در pHهای مختلف را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، راندمان کلی فرآیند الکتروفتون در pHهای اسیدی نسبت به pHهای قلیایی کارایی بیشتری دارد، اما در غلظت رنگ ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر با ثابت در نظر گرفتن بقیه عوامل بازده، حذف رنگ در pHهای قلیایی در مقایسه با pHهای اسیدی اندکی بیشتر است. در نمونه فاضلاب خام نیز میزان حذف رنگ در pH=۴ بیشتر از pHهای قلیایی است. در نتیجه، در محدوده pH مورد آزمایش (۴-۱۰) و در حالت‌های بهینه، بازده حذف ۹۰ درصد تا ۱۰۰ درصد قابل دستیابی است. نتایج حاصل از تغییرات غلظت رنگ در شرایط بهینه آزمایش در نمودار ۱ نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که افزایش غلظت رنگ تأثیری در راندمان فرآیند مورد بررسی ندارد. به‌طور مثال در غلظت رنگ ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و نمونه فاضلاب خام و تحت شرایط بهینه به‌دست آمده از آزمایشات، حداکثر بازده به‌دست می‌آید، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در شرایط بهینه مورد آزمایش، غلظت رنگ Reactive Blue 19 عامل تأثیرگذاری بر کارایی فرآیند الکتروفتون نیست.

جدول ۱. میزان حذف رنگ در pHهای مختلف (درصد)

غلظت رنگ		pH		
۱۰	۷	۴		
۹۵	۹۷	۱۰۰	۴۰ میلی‌گرم بر لیتر (فاضلاب خام)	
۸۵	۹۰	۹۹/۵	۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر	
۹۰	۹۵	۹۹/۸	۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر	
۹۹/۵	۹۸	۹۰	۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر	

لیتر یون‌های آهن و در غلظت‌های رنگ ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و نمونه فاضلاب خام، حذف ۱۰۰٪ رنگ و در غلظت رنگ ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نیز حذف ۹۵٪ و ۹۰٪ قابل دستیابی بود. با افزایش غلظت یون‌های آهن به ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر، در غلظت‌های رنگ ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و نمونه فاضلاب خام، بازده حذف رنگ کاهش و در غلظت‌های بالاتر از ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر رنگ، بازده حذف رنگ افزایش یافت.

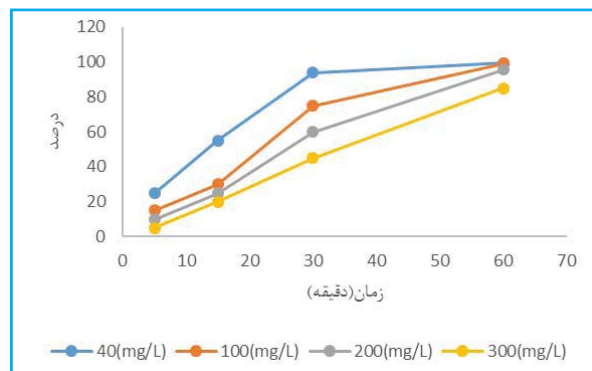
جدول ۲. میزان حذف رنگ در غلظت‌های مختلف آهن

غلظت یون آهن (میلی‌گرم بر لیتر)			غلظت رنگ
۰/۵	۰/۳	۰/۱	
۹۸	۱۰۰	۹۰	۴۰ میلی‌گرم بر لیتر (فاضلاب خام)
۹۵	۱۰۰	۸۵	۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر
۹۸	۹۵	۷۰	۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر
۹۵	۹۰	۶۰	۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر

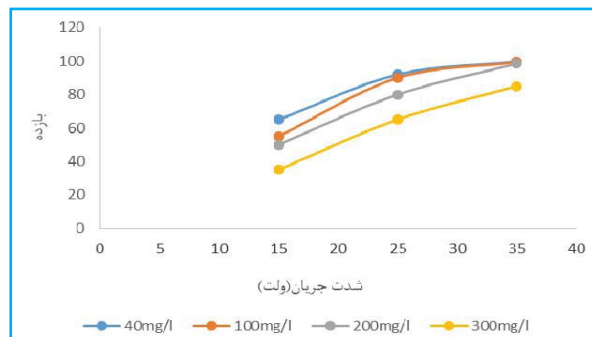
بحث

غلظت یون‌های آهن، یک پارامتر بسیار مهم در فرآیندهای الکتروفنتون و فنتون محسوب می‌شود. Fe^{2+} معمولاً به عنوان یک ماده کاتالیزور با هدف بهبود میزان هدایت الکتریکی به محلول افزوده می‌شود و قدرت اکسیدکنندگی H_2O_2 تولید شده به روش الکتریکی را افزایش می‌دهد. در مطالعه حاضر در pHهای اسیدی، میزان یون آهن کمتری مورد نیاز بود و در pHهای قلیایی، میزان یون آهن بیشتری برای رسیدن به راندمان مشابه نیاز بود، بنابراین نتیجه‌گیری می‌شود با افزایش pH به مراتب میزان یون آهن مورد نیاز بیشتر می‌شود. همچنین در شدت جریان پایین، میزان یون آهن بیشتر و در شدت جریان بالاتر، میزان یون آهن کمتری برای رسیدن به راندمان مشابه مورد نیاز است. پژوهش‌چو و همکاران نشان داد که غلظت یون‌های آهن، عامل تأثیرگذاری در کارایی فرآیند می‌باشد (۲۱). در مطالعه حاضر در اکثر مراحل آزمایش، غلظت ۰/۳ میلی‌گرم بر لیتر یون‌های آهن بسیار مؤثرتر عمل کرد و بازده حذف بالاتری نسبت به غلظت ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر

به همین ترتیب در شدت جریان‌های ۲۵ و ۳۵ ولت، میزان حذف رنگ در بهترین شرایط ۹۸٪ و ۱۰۰٪ حاصل شد. به طور کلی با فراهم نمودن شرایط بهینه آزمایش مورد نظر، تا غلظت‌های ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر رنگ و شدت جریان ۲۵ ولت، حداکثر حذف رنگ قابل دستیابی بود و در غلظت رنگ بالاتر از ۲۰۰ و شدت جریان ۳۵ ولت، حذف ۱۰۰ درصدی رنگ نیز قابل دستیابی بود.



نمودار ۲. تأثیر زمان‌های متفاوت بر کارایی فرآیند الکتروفنتون



نمودار ۳. تأثیر شدت جریان بر کارایی فرآیند الکتروفنتون

بر اساس نتایج مطالعه، در حذف رنگ از فاضلاب صنایع رنگرزی، میزان یون آهن تأثیر مناسبی دارد. بر این اساس در غلظت ۰/۱ میلی‌گرم بر لیتر یون آهن و تحت شرایط بهینه، حذف ۱۰۰ درصدی رنگ حاصل نشد، اما بین غلظت ۰/۳ و ۰/۵ یون‌های آهن، در کارایی فرآیند تفاوت بسیار کمی وجود داشت و حتی در برخی شرایط بازده فرآیند در غلظت ۰/۳ یون‌های آهن نسبت به بازده در غلظت ۰/۵ یون‌های آهن بالاتر به دست آمد. جدول ۲ رابطه غلظت یون آهن با بازده فرآیند در شرایط بهینه آزمایش را نشان می‌دهد که بر اساس نتایج، در غلظت ۰/۳ میلی‌گرم بر

یون‌های آهن داشتند. همچنین با افزایش شدت جریان، میزان یون آهن مورد نیاز برای رسیدن به بازده مشابه کمتر بود، بنابراین غلظت مناسب Fe^{2+} ، پارامتر تأثیرگذاری در واکنش الکتروفنتون است. در پژوهش چپو و همکاران نیز نتایج مشابه مطالعه فوق حاصل شد (۹). مطابق نتایج حاصل از مطالعه حاضر، میزان pH بهینه آزمایش برابر با ۴ به دست آمد. مقدار pH در اکسیداسیون ترکیبات آلی و اثر مستقیم و غیرمستقیم در تولید رادیکال‌های هیدروکسیل، کارایی اکسیداسیون را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بنابراین پایین بودن pH پساب‌ها در فرآیند فنتون به دلیل تشکیل رادیکال‌های هیدروکسی و کمپلکس‌های هیدروکسیل با آهن در محیط اسیدی، ضروری به نظر می‌رسد (۵). در pH‌های پایین‌تر از ۲، تشکیل $Fe(OH)_2$ (هیدروکسید آهن) که با H_2O_2 به آرامی واکنش می‌دهد، باعث کاهش مقدار رادیکال‌های OH^\bullet شده و در نتیجه بازدهی فرآیند الکتروفنتون به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. در pH‌های قلیایی نیز Fe^{2+} به Fe^{3+} تبدیل شده و به صورت $Fe(OH)_3$ رسوب کرده و از چرخه کاتالیستی واکنش خارج می‌شود (۹). در مطالعه حاضر بازده حذف رنگ در غلظت‌های پایین رنگ و در pH اسیدی به میزان اندکی بالاتر بود، اما با افزایش غلظت‌های رنگ، بازده در pH‌های قلیایی نسبت به pH‌های اسیدی به میزان اندکی بیشتر می‌شد که دلیل اصلی آن، ویژگی و ساختار شیمیایی ویژه رنگ Reactive Blue 19 است، اما به طور کلی بازده فرآیند در pH‌های اسیدی نسبت به pH‌های قلیایی بیشتر است. بنابراین در حذف رنگ Reactive Blue 19 به کمک فرآیند الکتروفنتون، pH نقش زیادی در بازده فرآیند الکتروفنتون ندارد. نتایج مطالعه کراز گونزالز و همکاران نشان داد بازده فرآیند در pH‌های اسیدی نسبت به pH‌های قلیایی بسیار بالاتر است (۲۴). در مطالعه دانشور و همکاران که حذف رنگ به وسیله فرآیند الکتروفنتون انجام شد، pH بهینه برابر ۳ به دست آمد و با افزایش pH، راندمان فرآیند کاهش یافت (۱). نتایج مطالعه حاضر نشان داد با افزایش غلظت رنگ در فرآیند، زمان مورد نیاز برای حذف رنگ نیز افزایش می‌یابد؛ به طوری که در غلظت‌های

پایین رنگ (۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) و در شرایط بهینه فرآیند، در زمان ۴۵ دقیقه می‌توان به بازده حذف رنگ تا بیشتر از ۸۵٪ دست یافت، اما با افزایش غلظت رنگ (۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر)، در پایان ۶۰ دقیقه زمان واکنش، می‌توان به این میزان حذف رنگ رسید، اما مطالعه آنوتای و همکاران نشان داد که با افزایش غلظت رنگ، کارایی فرآیند و میزان حذف رنگ به میزان زیادی کاهش می‌یابد (۱۶). زمان واکنش، یکی از عوامل تأثیرگذار در انجام فرآیندهای الکتروفنتون است. با گذشت زمان، میزان محصولات حد واسط ناشی از تجزیه هیدروژن پراکسید افزایش یافته و از طرفی دیگر با ایجاد اختلاط در محیط آزمایش، میزان تماس یون‌های آهن با محصولات حد واسط تجزیه هیدروژن پراکسید افزایش یافته و در نتیجه روند تولید رادیکال هیدروکسیل در محیط نیز بیشتر شده و بنابراین بازده فرآیند به میزان زیادی بهبود می‌یابد (۱۰). میزان حذف رنگ در زمان ۶۰ دقیقه به حداکثر خود می‌رسد و در مدت زمان ۳۰ دقیقه به طور میانگین میزان حذف رنگ ۵۰ درصد تا ۶۰ درصد می‌باشد. همچنین با افزایش غلظت رنگ، زمان مورد نیاز برای رسیدن به درصد حذف مشابه رنگ بیشتر است. نتایج مطالعه خوفی و همکاران نشان داد که با افزایش زمان، کارایی فرآیند نیز افزایش می‌یابد (۲۰). در مطالعه درویش متولی و همکاران حداکثر حذف TOC و COD در $pH=7/69$ ، زمان واکنش $30/71$ دقیقه و ولتاژ $7/41$ ولت، به ترتیب $68/49\%$ و $98/78\%$ به دست آمد (۲۸).

نتیجه گیری

فرآیند اکسیداسیون الکتروفنتون توانایی حذف رنگ Reactive Blue 19 در شرایط مختلف را دارد و در غلظت‌های مختلف آزمایش و تحت شرایط مناسب، حذف حداکثری رنگ به دست آمد. عواملی مانند شدت جریان، غلظت یون آهن، زمان واکنش و pH در فرآیند الکتروفنتون تأثیرگذار می‌باشند. بر اساس این نتایج، مهم‌ترین عامل در حذف رنگ Reactive Blue 19 به وسیله فرآیند الکتروفنتون، شدت جریان الکتریکی است؛ به طوری که با افزایش شدت جریان، بازده حذف رنگ افزایش می‌یابد. به عبارت

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان تمام نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند. همچنین هرگونه تضاد منافع حقیقی یا مادی که ممکن است بر نتایج یا تفسیر مقاله تأثیر بگذارد را رد می‌کنند.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی مشهد و شرکت شهرک‌های صنعتی استان خراسان رضوی تقدیر و تشکر می‌گردد.

دیگر با افزایش جریان الکتریکی از ۱۵ به ۲۵ ولت، بازده فرآیند به میزان قابل توجهی افزایش یافت و در ولتاژ ۳۵ ولت، حداکثر حذف رنگ به دست آمد. غلظت یون‌های آهن، دومین عامل تأثیرگذار در کارایی فرآیند بعد از شدت جریان است. بازده فرآیند الکتروفنتون در حذف رنگ حاصل از صنایع رنگرزی، در غلظت ۰/۳ میلی‌گرم بر لیتر یون‌های آهن نسبت به بازده فرآیند در غلظت ۰/۱ میلی‌گرم بر لیتر یون‌های آهن، میزان بالاتری به دست آمد. همچنین نتایج نشان داد میزان حذف رنگ در pHهای اسیدی نسبت به pHهای قلیایی بیشتر است، اما با افزایش غلظت رنگ، کارایی فرآیند الکتروفنتون در pHهای قلیایی بیشتر می‌شود.

References

- Daneshvar, N, Vatanpour, S.A., Rasoulifard, M.H., 2008. Electro-Fenton treatment of dye solution containing Orange II: Influence of operational parameters. *Electro analytical Chemistry*, vol.615, pp.165-174.
- Al-kdasi, A., Idris, A., Saed, K., Guan, C.T., 2004. Treatment of textile wastewater by advanced oxidation process. *Global Nest*, vol.6 (3), pp.222-230.
- Kurt, U., Apaydid, O., Talha Gonullu, M., 2007. Reduction of COD in wastewater from an organized tannery industrial region by Electro-Fenton process. *Hazardous materials*, vol. (1- 2), pp.33-40.
- Alinsafi, A., Khermis, M., Ponsa, M.N., 2005. Electro-coagulation of reactive textile dyes and textile wastewater. *Chemical Engineering and Processing*, vol. 44, pp. 461-470.
- Bellakhal, N., Dachraoui, M., Oturan, M., 2006. Degredation of tartrazine in water by electro-fenton process. *De la Société Chimique de Tunisie*, vol. 8, pp. 223-228.
- Ventura, A., Jacquet, G., Bermond, A., Camel, V., 2002. Electrochemical generation of the Fenton's reagent: application to atrazine degradation. *Water research*, vol.36 (14), and pp.3517-3522.
- Oturan, M.A., Sires, I., Parochial, S., 2008. Sonoelectro-Fenton process: A novel hybrid technique for the destruction of organic pollutants in water. *electroanalytical chemistry*, vol.624 (1-2), pp. 329-322.
- Hammami, S., Oturan, N., Bellakhal, N., 2007. Oxidative degradation of direct orange 61 by electro-Fenton process using a carbon felt electrode: Application of the experimental design methodology. *Electro analytical Chemistry*, vol. 610(1), pp. 75-84.
- Chiou, C.S., Chang, C.Y., Shie, J.L., 2006. Decoloration of reactive black 5 in aqueous solution by electro-fenton reaction. *Environmental engineering and management*, vol.16 (4), pp.243-248.
- Kos, L., Perkowski, J., 2008. Decolouration of Real Textile Wastewater with Advanced Oxidation Processes. *Institute of Knitting Technology and Techniques ul. Piotrkowska*, vol. 270.
- Mantzavinos, D., Kassinos, D., parsons, S.A., 2009. Applications of advanced oxidation processes in wastewater treatment. *Water research*.vol. 43, pp. 3901-3909.
- Edalahi, M.C., Oturan. Bermond, A., 2004. Degredation of diuron by the electro-fenton process. *Environ chem Lett*, vol. 1, pp. 233-236.
- Radha, K.V., Sridevi, K., Kalaivani, k., 2009. Electrochemical oxidation for the treatment of textile industry wastewater. *Bioresource Technology*, vol.100 (2), pp. 987-990.
- Lingling, H., Kang, H., Lih shyu, H., 2007. Optimisation of an ultrasound-Assisted nanoscale Fe/fenton process for dye wastewater through a statistical experiment design method. *Environmental informatics archives*.vol. 5, pp.664-673.
- Panizza, M., Cerisola, G., 2001. Removal of organic pollutants from industrial wastewater by electrogenerated Fenton's reagent. *Water research*, vol. 35(16), pp. 3987-3992.
- Anotaia, J., Chun, M., 2006. Kinetics of aniline degradation by Fenton and electro-Fenton processes. *Water research*, vol. 40(9), pp. 1841-1847.
- Carlos, M., Sánchez, S., 2007. Goethite as a more effective iron dosage source for mineralization of organic pollutants by electro-Fenton process. *Electrochemistry Communications*, vol. 9(1), pp. 19-24.
- Virkutytea, J., Rokhina, E., 2009. Optimisation of Electro-Fenton denitrification of a model wastewater using a response surface methodology. *Bioresource Technology*, vol. 101(5), pp.1440-1446.

19. Boye, B., Morieme, M., Brillas, E., 2003. Anodic oxidation, electro-fenton and photoelectron-fenton treatments of 2, 4, 5-trichlorophenoxyacetic acid. *Electro analytical chemistry*, vol. 557, pp.135-146.
20. Khoufi, S, Aloui, F, Sayadi, S, 2006. Treatment of olive oil mill wastewater by combined process electro-Fenton reaction and anaerobic digestion. *Water research*, vol.40 (10), and pp.2007-2016.
21. Chou, S., Huang, Y, Lee, S, 1999. Treatment of high strength hexamine-containing wastewater by electro-Fenton method. *Water research*, vol. 33(3), and pp.751-759.
22. Clesceria L.S., Greenberg A.E., and Eaton A.D. Standard method for the examination of water and wastewater. 20th Ed. Washington DC: APHA, WEF, AWWA, 1998, PP67-89
23. Y.H. Huang, Y.F. Huang, P.S. Chang, C.Y. Chen, Comparative study of Oxidation of dye-Reactive Black B by different advanced oxidation processes: Fenton, Electro-Fenton and photo-Fenton, *J. Hazard. Mater.* 154 (2008) 655–662.
24. K. Cruz-González, O. Torres-Lopez, A.M. García-León, E. Brillas, A. Hernández-Ramírez, J.M. Peralta Hernández, Optimization of Electro-Fenton/BDD process for decolorization of a model azo dye wastewater
25. K. Szafnicki, C. Narce, J. Bourgois, towards an integrated tool for control, Supervision and operation training-application to industrial wastewater Detoxication plants, *Control Eng. Practice* 12 (2005) 729–738.
26. Y. Gaoa, M. Yang, J. Hu, Y. Zhang, Fenton's process for simultaneous Removal of TOC and Fe²⁺ from acidic waste liquor, *Desalination* 160 (2004) 123–130.
27. K. Cruz-Gonzalez, O. Torres-Lopez, A. Garcia-Leon, J.L. Guzman-Mar, L.H. Reyes, A. Hernandez- Ramirez, J.M. Peralta-Hernandez, Determination of Optimum operating parameters for Acid Yellow 36 decolorization by Electro-Fenton process using BDD cathode, *Chem. Eng. J.* 160 (2010) 199–206.
28. M. Darvishmotevalli, A. Zarei, M. Moradnia, M. Noorisepehr, H. Mohammadi, Optimization of saline wastewater treatment using electrochemical oxidation process: Prediction by RSM method, *MethodsX* 6 (2019)1101-1113.