

بهینه‌سازی پارامترهای موثر بر فرایند فنتون در حذف رنگزای اسید آبی ۲۵ با هدف کاهش آهن مصرفی

سبحان هوشمند^۱

بینا آیتی^{۲*}

Ayati_bi@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۷/۷/۱۰

تاریخ دریافت: ۹۷/۴/۱۱

چکیده

زمینه و هدف: فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته، روش‌هایی امیدبخش و کارا برای حذف و تجزیه مواد سخت تجزیه پذیر از جمله رنگ‌ها از محیط‌های آبی هستند. روش فنتون یکی از مناسب‌ترین روش‌های اکسیداسیون پیشرفته است که به طور موثر برای حذف مواد سمی بدون تولید محصولات جانبی استفاده شده است.

روش بررسی: در این تحقیق به منظور بررسی فرایند فنتون در حذف رنگزای اسید آبی ۲۵ از راکتور آزمایشگاهی مکعب مستطیل شکل از جنس پلکسی‌گلاس به حجم مفید ۵۰۰ میلی لیتر استفاده شد. پارامترهای اصلی موثر بر فرایند شامل نسبت $[Fe^{2+}]/[H_2O_2]$ ، غلظت پراکسید هیدروژن، pH، زمان ماند، غلظت ماده رنگزا، دما و دور همزن بودند که به روش OFAT بهینه شدند.

یافته‌ها: نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که فرایند فنتون قابلیت حذف ۹۶ درصدی رنگزای اسید آبی ۲۵ از محیط آبی را در مدت زمان ۱۰ دقیقه در شرایط بهینه شامل pH=۳، نسبت $[Fe^{2+}]/[H_2O_2]=0/3$ ، غلظت اولیه رنگزا ۱۵۰ mg/L، غلظت آهن ۱۰۰ mg/L، سرعت چرخش همزن ۱۰۰ rpm و دمای ۴۳ °C داراست.

بحث و نتیجه گیری: فرایند فنتون برای حذف رنگزای اسید آبی ۲۵ به عنوان روش مناسب پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: رنگزا، آهن، دما، پراکسید هیدروژن.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. * (مسئول مکاتبات)

Optimization of Effective Parameters in Removal of Acid Blue 25 by Fenton Process with the Aim of Reducing Iron Consumption

Sobhan Hooshmand¹

Bitā Ayati^{2*}

Ayati_bi@modares.ac.ir

Admission Date: October 2, 2018

Date Received: July 2, 2018

Abstract

Background & Objective: Advanced oxidation processes (AOPs) are recognized as the most effective and capable available methods to remove and degrade different kind of dyes. Among various advanced oxidation processes, Fenton process is one of the most effective techniques that are used successfully to remove dyes without producing additional toxic by-products.

Method: In the present study, all experiments were performed in a 500 mL rectangular plexiglass cubic reactor. The effect of different system parameters including pH, $[\text{Fe}^{2+}]$ to $[\text{H}_2\text{O}_2]$ ratio, initial dye concentration, H_2O_2 concentration, stirrer velocity and temperature were examined and optimized using one-factor-at-a-time (OFAT) method.

Findings: The results obtained from this study showed that Fenton process can remove 96 percent of Acid Blue 25 from aqueous solution. The optimal condition using Fenton process included initial concentration of 150 mg/l, pH= 3, molar ratio of $[\text{Fe}^{2+}]/[\text{H}_2\text{O}_2] = 0.3$, stir. vel.= 100 rpm, temperature 43°C and 10 min contact time.

Discussion and Conclusions: Fenton process is suggested as a suitable method for the removal of Acid Blue 25.

Keywords: Dye, Iron, Temperature, Hydrogen Peroxide.

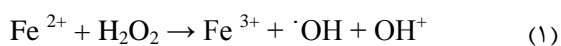
1- M.Sc., Student of Environmental Engineering, Tarbiat Modares University

2-Associate Professor, Civil and Environmental Engineering Faculty, Tarbiat Modares University.

*(Corresponding Author)

مقدمه

آب اکسیژنه برای شکستن ساختار آلاینده به کار برده می‌شود. پتانسیل اکسیدکنندگی رادیکال هیدروکسیل از ازن (جزء قوی-ترین مواد اکسیدکننده) نیز بیشتر می‌باشد (۵-۷). اکسیداسیون مواد آلی با محلول فنتون (H_2O_2/Fe^{2+}) که به واکنش فنتون شناخته می‌شود، یکی از فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته است که برای اولین بار توسط Fenton در سال ۱۹۸۴ میلادی کشف شد. فرایند فنتون ترکیبی از اکسیداسیون و انعقاد است که منجر به تولید لجن کمتری نسبت به فرایندهای انعقاد و لخته‌سازی می‌شود. کارایی این روش تحت تاثیر عوامل مختلفی مانند دما، غلظت آهن، پراکسید هیدروژن، pH و زمان بررسی می‌شود. در فرایند فنتون یون-های آهن به ویژه شکل فرو با نقش کاتالیست در یک محیط اسیدی ضمن واکنش با ماده پراکسید هیدروژن، موجب تولید رادیکال‌های هیدروکسیل می‌شوند، در واقع پراکسید به تنهایی عاملی قوی در انتقال اکسیژن نمی‌باشد و اکسیداسیون مواد آلی با حضور یون‌های Fe^{2+} بهبود می‌یابد (۹،۸). ساز و کار کلی فرایند فنتون، به عنوان روش مناسب برای تصفیه فاضلاب و حذف رنگزا با تشکیل رادیکال هیدروکسیل بر طبق واکنش کلاسیک فنتون (۱) مطرح شد (۱۱،۱۰).



معادله (۱) اصلی‌ترین واکنش فرایند فنتون است. علاوه بر واکنش ذکر شده، واکنش‌های دیگری نیز باید مدنظر قرار بگیرد تا کل فرایند قابل درک باشد. یون آهن (III) تولید شده طی واکنش (۱) با پراکسید هیدروژن اضافی، کاهش یافته و دوباره یون فرو و رادیکال بیشتر تولید می‌شود. این واکنش که مطابق با واکنش (۲) است واکنش شبه فنتون نامیده می‌شود و سرعت آن کمتر از واکنش فنتون و امکان تولید Fe^{2+} در یک مکانیسم متناوب را فراهم می‌کند (۱۱،۱۰).



شیمی فرایند فنتون شامل واکنش‌های (۳) تا (۵) نیز می‌باشد (۱۱،۱۲).

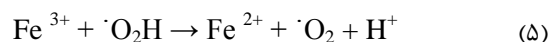
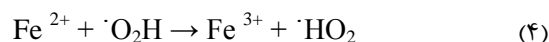
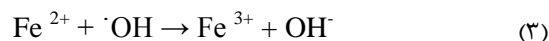
رنگ‌ها در صنایع مختلف نساجی، غذایی، کاغذ، مواد آرایشی، دارویی و ... استفاده می‌شوند و توسعه سریع این صنایع باعث شده که این ترکیبات یکی از منابع اصلی آلودگی آب به شمار آیند. به طور کلی، تصفیه فاضلاب‌های حاوی رنگزا به دلیل دارا بودن ساختارهای آروماتیک پایدار نسبت به نور و گرما دشوار است. پژوهش‌های مرتبط به تصفیه فاضلاب‌های حاوی رنگزا، بیشتر بر گسترش فناوری‌های ساده، ایمن، کارا و اقتصادی برای تخریب کامل این آلاینده‌ها متمرکز هستند. ساده‌ترین و ارزان‌ترین آن‌ها، روش‌های تصفیه متداول هستند که می‌توان آن‌ها را به دو گروه سیستم‌های جداسازی/تفکیک و بر پایه روش‌های فیزیکی و شیمیایی و فناوری‌های تبدیل تحت روش‌های شیمیایی و بیولوژیکی تقسیم‌بندی کرد. روش‌های پالایش فیزیکی-شیمیایی سنتی، ترکیب‌های مقاوم را از محیط آبی جدا می‌کنند، بدون این‌که در ساختار شیمیایی آن‌ها تغییری انجام گیرد. این روش‌های غیرتخریبی شامل جذب سطحی، انعقاد و ته‌نشینی، شناورسازی و فرایندهای غشایی و غیره هستند در صورتی که روش‌های تبدیلی، سبب شکستن پیوندهای ساختاری و تبدیل آلاینده نخستین به چندین واسطه می‌شوند. از میان آن‌ها، رایج‌ترین روش‌های شیمیایی، ازن زنی و کلرزنی هستند. به طور کلی هر کدام از این روش‌ها مزایا و معایب خاص خود را دارند ولی با توجه به محدودیت‌هایی از جمله اقتصادی نبودن و کارایی محدود آنها در حذف آلاینده-های سمی می‌توان از روش‌های دیگر مانند فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته^۱ استفاده کرد (۴-۱).

طی دهه گذشته، فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته به عنوان روش‌هایی توانمند و امیدبخش برای حذف آلاینده‌های مقاوم از آب توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. به طور کلی اکسیداسیون پیشرفته فرایندهایی هستند که تصفیه آب در فشار و دمای محیط توسط عامل اکسنده بسیار قوی، مانند رادیکال هیدروکسیل انجام می‌شوند. رایج‌ترین اکسیداسیون شیمیایی، روش فنتون است که در آن مخلوطی از یون فرو و

با توجه به تحقیقات صورت گرفته و کارایی روش فنتون در حذف مواد سخت تجزیه پذیر، هدف از این تحقیق بهینه‌سازی پارامترهای موثر بر فرایند فنتون به روش تک فاکتوری در پایین‌ترین غلظت ممکن یون آهن (و در نتیجه کمترین حجم تولید لجن) با بالاترین راندمان حذف اسید آبی ۲۵ بوده است.

روش بررسی

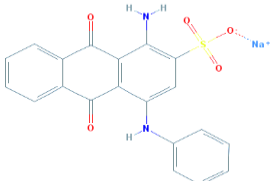
به منظور بررسی فرایند فنتون در حذف رنگزا از رآکتور آزمایشگاهی مکعب مستطیل شکل از جنس پلکسی‌گلاس به حجم مفید ۵۰۰ میلی لیتر و به ابعاد ۷*۶*۱۵ استفاده شد. به منظور اختلاط و همگن بودن نمونه از یک همزن مغناطیسی با سرعت‌های مختلف استفاده شد. میزان حذف رنگزای اسید آبی ۲۵ (جدول ۱) با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج حداکثری جذب (۶۰۲) آن قرائت شد و از نمودار کالیبراسیون به فرمول $y = 0.177x$ (y میزان جذب و x غلظت رنگزا)، غلظت‌های رنگزا به دست آمد.



تحقیقاتی در زمینه حذف رنگزا اسید آبی ۲۵ و فرایند فنتون صورت گرفته که در ادامه به چند مورد اشاره می‌شود. در پژوهش **کرمانی** و همکاران (۱۳۹۴)، حذف بیش از ۹۹ درصدی رنگزای اسید بنفش ۱۶ و حذف ۵۸ درصدی COD از محیط‌های آبی به روش فنتون گزارش شد (۱۳). در مطالعات **Sohrabi** و همکاران (۲۰۱۷) رنگ خوراکی Carmoisine در سیستم فنتون و فتوفنتون به ترتیب ۹۲/۲ و ۹۵ درصد حذف شد (۱۴). **روحانی مقدم** و همکاران (۱۳۹۷) در شرایط بهینه فرایند تخریب الکتروشیمیایی رنگزای اسید آبی ۲۵ به حذف ۱۰۰ درصدی این رنگزا دست یافتند (۱۵). در تحقیق **Gupta** و همکاران (۲۰۱۷) نیز حذف بیش از ۹۹ درصدی اسید آبی ۲۵ توسط رنگ‌بری فتوکاتالیستی در مدت زمان ۱۸۰ دقیقه گزارش شد (۱۶).

جدول ۱- مشخصات رنگزای اسید آبی ۲۵

Table 1. Specifications of acid blue 25

عنوان	شرح
نام‌های شیمیایی	<ul style="list-style-type: none"> Sodium 1-amino-4-anilino-9,10-dioxoanthracene-2-sulfonate Acid Blue 25 2-Anthraquinonesulfonic acid
نوع رنگزا	آزو- اسیدی
فرمول شیمیایی	$\text{C}_{20}\text{H}_{13}\text{N}_2\text{NaO}_5\text{S}$
ساختار شیمیایی	
pH رنگزا	۷/۹۳

گرفت. برای تنظیم pH نمونه‌ها از اسید سولفوریک و هیدروکسید سدیم استفاده شد. پارامترهای اصلی موثر بر واکنش فنتون شامل نسبت $[\text{Fe}^{2+}]/[\text{H}_2\text{O}_2]$ و غلظت

برای انجام آزمایش‌های سیستم فنتون، محلول استوک حاوی مقدار مشخصی از رنگزا آماده و محلول به پایلوت مذکور اضافه و با اختلاط به وسیله همزن مغناطیسی آزمایش‌های لازم انجام

مورد استفاده شامل دستگاه اسپکتروفوتومتر Hach مدل 4000 DR، ترازوی دیجیتال Kern مدل PLS 360-3، همزن مغناطیسی IKA مدل RH-Bassic 2 و pH متر Metrohm مدل 691 بودند.

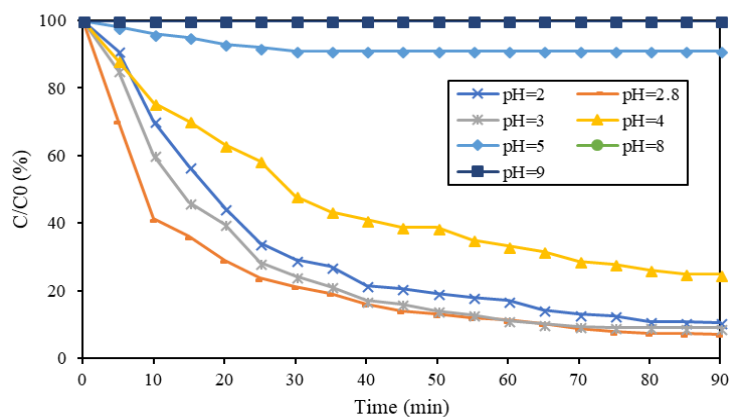
یافته‌ها

تعیین pH بهینه

جهت تعیین pH بهینه، به عنوان یکی از پارامترهای اصلی در فرایند فنتون، نتایج آزمایش حذف رنگزا در شکل‌های ۱ و ۲ در فواصل زمانی ۵ دقیقه ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر راندمان حذف رنگزا به میزان ۹۲/۵ درصد در $\text{pH}=2/8$ و در مدت زمان معین ۹۰ دقیقه صورت می‌گیرد. همچنین ملاحظه می‌شود که راندمان سیستم و درصد حذف رنگزا، در صورت کاهش pH به کمتر از این مقدار به صورت ملایم کاهش می‌یابد لذا pH بهینه واکنش بین ۲ تا ۴ است چون در این محدوده Fe(III) تولید شده به صورت Fe^{3+} در محلول مانده و به صورت هیدروکسیدهای آهن، $\text{Fe}(\text{OH})_3$ یا FeOOH ته‌نشین نمی‌شود (۱۷).

پراکسید هیدروژن، pH، زمان ماند، غلظت ماده رنگزا، دما، دور همزن می‌باشد که در این تحقیق تمامی این پارامترها به روش OFAT بهینه شدند. به منظور بهینه‌کردن هر کدام از این عوامل به روش تک‌فاکتوری تمامی عوامل موثر به جز یکی ثابت می‌ماند و اثر تغییرات این عامل بر حذف رنگزا بررسی می‌شد. بدین منظور بر اساس مطالعات صورت گرفته، ماده رنگزا در چهار غلظت (۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر)، پراکسید هیدروژن در پنج غلظت (۲۷۲، ۳۴۰، ۴۰۸، ۴۷۶ و ۵۴۴ میلی‌گرم بر لیتر)، pH در هفت سطح (۲، ۲/۸، ۳، ۴، ۵، ۷ و ۹)، سرعت چرخش همزن در پنج سطح (۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ rpm)، دما در هشت سطح (۱۲، ۲۱، ۳۳، ۴۳، ۵۲، ۶۲، ۷۳ و ۸۵ درجه سلسیوس) و در نسبت‌های (۰/۰۹، ۰/۱۵، ۰/۳، ۰/۴۵، ۰/۶، ۰/۹، ۱/۲ و ۱/۳) $[\text{Fe}^{2+}]/[\text{H}_2\text{O}_2]$ مورد آزمایش و آنالیز قرار گرفت. تمامی آزمایش‌های انجام گرفته سه بار تکرار شده و معیار نسبی یک درصد به‌دست آمد که نشان از تکرار پذیر بودن آزمایش‌ها بود.

رنگزای مورد مطالعه از شرکت الوان ثابت و دیگر مواد مورد نیاز شامل اسیدسولفوریک، هیدروکسید سدیم، پراکسید هیدروژن و سولفات آهن محصول شرکت Merck بودند. تجهیزات عمده

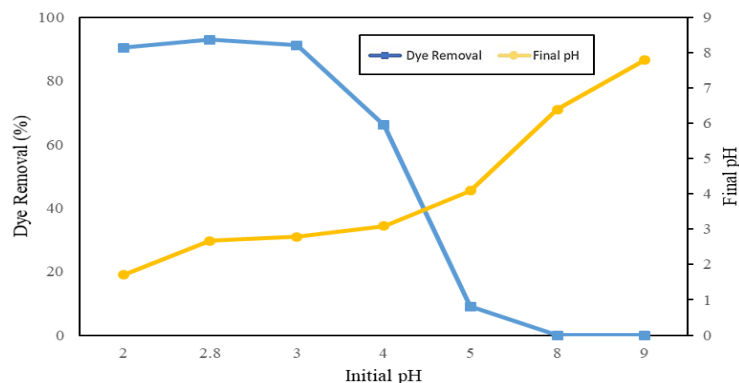


شکل ۱- تاثیر pH بر راندمان حذف رنگزا

$T=21^\circ\text{C}$, $\text{Stir. Vel.}=100\text{rpm}$, $[\text{H}_2\text{O}_2]=600\text{mg/L}$, $[\text{Dye}]=100\text{mg/L}$, $[\text{Fe}^{2+}]/[\text{H}_2\text{O}_2]=0/05$

Figure 1. Effect of pH on dye removal efficiency

$[\text{Fe}^{2+}]/[\text{H}_2\text{O}_2]=0.05$, $[\text{Dye}]=100\text{mg/L}$, $[\text{H}_2\text{O}_2]=600\text{mg/L}$, $\text{Stir. Vel.}=100\text{rpm}$, $T=21^\circ\text{C}$



شکل ۲- نهایی واکنش و میزان حذف رنگزا به عنوان تابعی از pH در زمان ۹۰ دقیقه

$T=21^{\circ}\text{C}$, Stir. Vel. = 100 rpm, $[\text{H}_2\text{O}_2]=600\text{ mg/L}$, $[\text{Dye}]=100\text{ mg/L}$, $[\text{Fe}^{2+}]/[\text{H}_2\text{O}_2]=0.05$

Figure 2. Final pH of the reaction and the amount of dye removal as a function of pH after 90 minutes

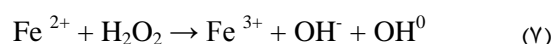
$[\text{Fe}^{2+}]/[\text{H}_2\text{O}_2]=0.05$, $[\text{Dye}]=100\text{ mg/L}$, $[\text{H}_2\text{O}_2]=600\text{ mg/L}$, Stir. Vel.= 100 rpm, $T=21^{\circ}\text{C}$

تبدیل آن به آب و اکسیژن راندمان سیستم به شدت پایین آمده و حتی به صفر می‌رسد. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود pH نهایی واکنش محلول تغییر محسوسی ندارد و تنها به دلیل تولید واکنش‌های واسطه در انتهای واکنش کمی کاهش می‌یابد. در این آزمایش‌های مقدار ۳ به دلیل رعایت مسائل اقتصادی به عنوان pH بهینه انتخاب شد.

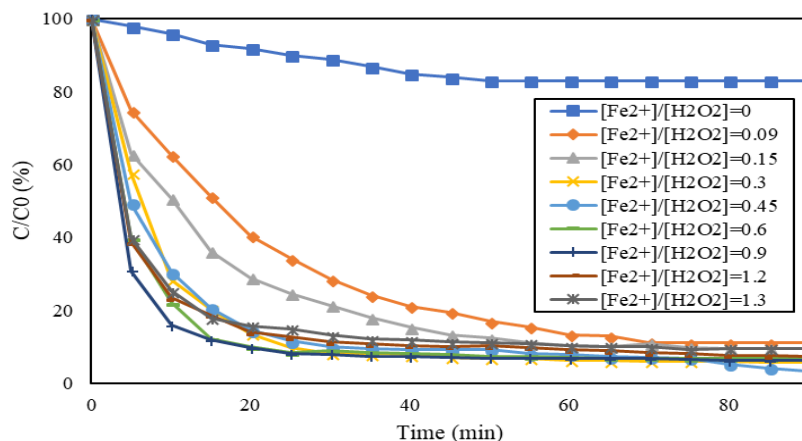
تعیین نسبت بهینه $[\text{Fe}^{2+}]/[\text{H}_2\text{O}_2]$

آزمایش‌های تعیین نسبت بهینه $[\text{Fe}^{2+}]/[\text{H}_2\text{O}_2]$ ، در مقادیر مختلف Fe^{2+} و مقدار بهینه pH و با ثابت نگاه‌داشتن دیگر پارامترها انجام شد. نتایج این آزمایش‌های در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده است.

در مقادیر پایین pH، گونه‌های آهن با H_2O_2 کمپلکس پایدار تشکیل می‌دهند و در نتیجه خنثی‌سازی کاتالیزور آهن به وقوع می‌پیوندد و راندمان حذف کاهش می‌یابد. همان‌گونه که در واکنش (۶) مشاهده می‌شود، ثابت ماندن پراکسید هیدروژن به صورت H_3O_2^+ باعث عدم مشارکت H_2O_2 در واکنش (۷) و کاهش تولید رادیکال هیدروکسیل و کاهش راندمان حذف رنگزا در سیستم می‌شود (۹).



با افزایش مقدار pH از ۳ به ۵ بار دیگر اما این بار با شیب بیشتری، راندمان سیستم کاهش می‌یابد به‌گونه‌ای که در pH بیش از ۵ به دلیل ناپایدار بودن پراکسید هیدروژن در محلول و



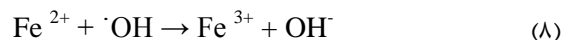
شکل ۳- تاثیر $[Fe^{2+}]/[H_2O_2]$ بر راندمان حذف رنگزا

$T=21\text{ }^\circ\text{C}$, Stir. Vel.=100rpm, $[H_2O_2]=600\text{ mg/L}$, $[Dye]=100\text{ mg/L}$, pH=3

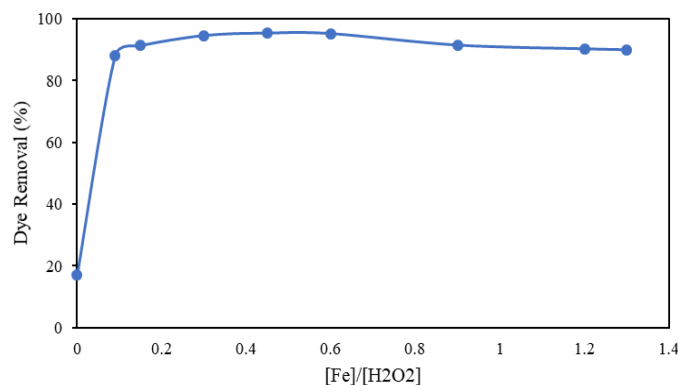
Figure 3. Effect of $[Fe^{2+}]/[H_2O_2]$ on dye removal efficiency
pH=3, $[Dye]=100\text{ mg/L}$, $[H_2O_2]=600\text{ mg/L}$, Stir. Vel.= 100 rpm, $T=21\text{ }^\circ\text{C}$

سیستم می‌گردد. با افزایش نسبت $[Fe^{2+}]/[H_2O_2]$ به $1/3$ راندمان سیستم تقریباً ۶ درصد کاهش می‌یابد و به $90/3$ درصد می‌رسد. این روند نزولی ادامه پیدا می‌کند به گونه‌ای که در نسبت $1/3$ به $89/3$ درصد کاهش می‌یابد. شکل ۴ روند تغییرات حذف رنگزا را نسبت به زمان برای نسبت‌های مختلف $[Fe^{2+}]/[H_2O_2]$ نشان می‌دهد و دارای تفسیر کاملاً مشابهی با شکل ۳ است. با توجه به تفاوت اندک میزان راندمان سیستم یا درصد حذف رنگزا در نسبت‌های $0/3$ و $0/45$ و به دلیل رعایت مسائل اقتصادی و به منظور کاهش هزینه استفاده از مواد شیمیایی، از پایین‌ترین غلظت ممکن سولفات آهن استفاده شد. به همین دلیل در این بخش از تحقیق نسبت $[Fe^{2+}]/[H_2O_2]=0/3$ به عنوان نسبت بهینه انتخاب شد و در ادامه تحقیق مورد استفاده قرار گرفت.

در شکل ۳ مشاهده می‌شود که در صورت فقدان یون Fe^{2+} در محیط، راندمان سیستم بسیار ناچیز و در حدود ۲۰ درصد می‌باشد. بدیهی است راندمان سیستم مورد بررسی به دلیل افزودن یون Fe^{2+} مطابق واکنش (۸) به دلیل تولید رادیکال هیدروکسیل افزایش یافته و باعث اکسیداسیون مواد آلی می‌گردد.



با افزایش نسبت $[Fe^{2+}]/[H_2O_2]$ ، از $0/09$ به $0/15$ ، راندمان حذف رنگزا از $88/1$ به $93/1$ افزایش یافته و در نهایت حداکثر راندمان سیستم برابر $96/2$ درصد در نسبت $0/45$ $[Fe^{2+}]/[H_2O_2]$ حاصل می‌شود. راندمان سیستم در صورت افزایش این نسبت تا $0/6$ تغییر محسوسی نشان نمی‌دهد و تقریباً ثابت است. افزایش بیش از حد غلظت Fe^{2+} بر اساس واکنش (۸) باعث مصرف رادیکال هیدروکسیل و کاهش راندمان



شکل ۴- میزان حذف رنگزا به عنوان تابعی از $[Fe^{2+}]/[H_2O_2]$ در زمان ۹۰ دقیقه

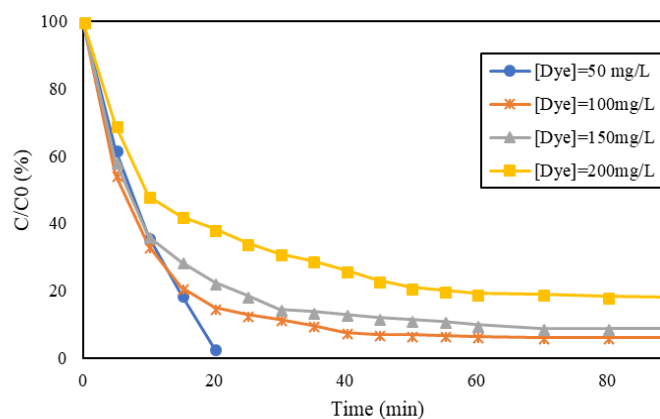
$T=21^\circ C$, Stir. Vel.= ۱۰۰rpm, $[H_2O_2]=340$ mg/L, $[Dye]=100$ mg/L, $pH=3$

Figure 4- Dye removal rate as a function of $[Fe^{2+}]/[H_2O_2]$ after 90 minutes
 $pH=3$, $[Dye]=100$ mg/L, $[H_2O_2]=340$ mg/l, Stir. Vel.= 100 rpm, $T=21^\circ C$

تعیین غلظت اولیه بهینه رنگزا

انجام شد. نتایج این آزمایش‌ها در شکل ۵ ارائه شده است.

آزمایش‌ها در غلظت‌های اولیه مختلف رنگزا به منظور تعیین مقدار بهینه این پارامتر موثر، در شرایط بهینه pH و نسبت $[Fe^{2+}]/[H_2O_2]$ و ثابت نگه‌داشتن دیگر پارامترها



شکل ۵- تاثیر غلظت رنگزا بر راندمان حذف رنگزا

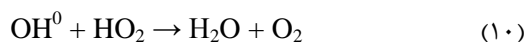
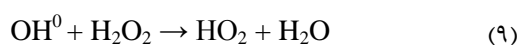
$T=21^\circ C$, Stir. Vel.= ۱۰۰rpm, $[H_2O_2]=340$ mg/L, $[Fe^{2+}]/[H_2O_2]=0.3$, $pH=3$

Figure 5. Effect of dye concentration on dye removal efficiency
 $pH=3$, $[Fe^{2+}]/[H_2O_2]=0.3$, $[H_2O_2]=340$ mg/L, Stir. Vel.= 100 rpm, $T=21^\circ C$

۲۰ دقیقه نشان می‌دهد، در حالی که برای حذف ۹۶ درصد از رنگزا با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر ۹۰ دقیقه زمان ماند مورد نیاز است. دلیل این امر در تولید رادیکال‌های هیدروکسیل است به صورتی که در غلظت بالاتر رنگزا، تولید رادیکال‌های OH بر

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، سرعت حذف رنگزا با افزایش غلظت اولیه آن کاهش می‌یابد و برای داشتن راندمان حذف ثابت به زمان بیشتری نیاز است به طوری که سیستم حذف ۹۹ درصدی را برای غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر رنگزا در مدت زمان

غلظت‌های بالاتر H_2O_2 ، به اندازه کافی رادیکال‌های هیدروکسیل تولید و تقریباً به‌طور کامل رنگ‌زدایی انجام می‌شود (۲۲). این روند تا غلظت 408 mg/l ادامه داشته و راندمان حذف در حداکثر مقدار خود به $94/9$ درصد می‌رسد. سپس راندمان سیستم با افزایش بیشتر غلظت پراکسید هیدروژن تغییر چندانی نداشته و تقریباً ثابت می‌ماند. حتی طبق گزارش Hasan و همکاران (۲۰۱۱) در غلظت‌های بالاتر از حد مطلوب راندمان حذف پایین‌تر می‌آید. این امر به دلیل مصرف رادیکال هیدروکسیل طبق واکنش‌های (۹) و (۱۰) می‌باشد که منجر به کاهش راندمان حذف می‌شود (۲۳). بنابراین مهم است که غلظت اولیه H_2O_2 کنترل شود زیرا غلظت بالای آن در حذف رنگزا نتیجه عکس می‌دهد و هزینه‌های تصفیه فاضلاب را نیز افزایش می‌دهد. شکل ۷ با نمایش روند تغییرات حذف رنگزا نسبت به زمان برای غلظت‌های مختلف پراکسید هیدروژن، دارای تفسیر کاملاً مشابهی با شکل ۶ می‌باشد.



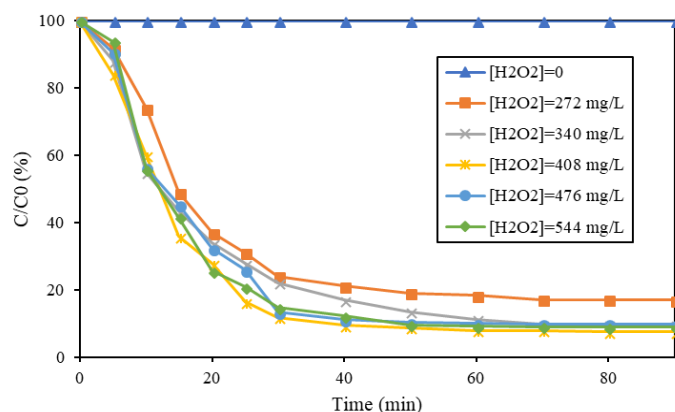
با توجه به نتایج به دست آمده بیشترین حذف رنگزا در غلظت 408 mg/l پراکسید هیدروژن اتفاق می‌افتد در حالی در غلظت 340 mg/l پراکسید هیدروژن حذف نزدیک به 90 درصد می‌باشد. با توجه به نزدیکی راندمان حذف در دو غلظت و مسائل اقتصادی و هزینه کمتر برای خرید مواد شیمیایی، غلظت 340 میلی‌گرم بر لیتر در نسبت $[Fe^{2+}]/[H_2O_2] = 0/3$ به عنوان غلظت بهینه انتخاب شد.

روی سطح کاتالیزور کاهش می‌یابد زیرا سایت‌های فعال، ممکن است توسط یون‌های رنگزا اشغال شوند و با وجود افزایش تعداد مولکول‌های رنگزا، تعداد مولکول‌های رادیکال OH افزایش نمی‌یابد (۱۸). علاوه بر این، محصولات میانی که در طول اکسیداسیون رنگزا تشکیل شده، احتمالاً با مولکول‌های رنگی برای سایت‌های فعال Fe^{2+} رقابت می‌کنند (۱۹). بنابراین، واکنش بین کاتالیزور و H_2O_2 مهار شده و باعث کاهش راندمان سیستم می‌شود (۲۰). هرچند در تحقیق Hassan و همکاران (۲۰۱۱)، در تضاد با این موضوع، گزارش دادند که حذف رنگزا با افزایش غلظت اولیه رنگزا افزایش می‌یابد که دلیل این پدیده را بر اساس نظریه برخورد^۱ توجیه کردند. بدین معنی که با افزایش تعداد مولکول‌های رنگی در واحد حجم، احتمال برخورد بین ماده آلی و اکسیدکننده به طور منطقی افزایش می‌یابد و در نتیجه منجر به افزایش کارایی رنگ‌بری می‌شود (۲۰). با توجه به نتایج حاصل، در مدت زمان 90 دقیقه به میزان 97 و 93 درصد حذف در غلظت‌های 100 و 150 میلی‌گرم بر لیتر رنگزا مشاهده می‌شود. با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی و تفاوت اندک در مقدار حذف رنگزای بیشتر در مدت زمان معین، غلظت 150 میلی‌گرم بر لیتر رنگزا به عنوان مقدار بهینه انتخاب شد.

تعیین غلظت بهینه H_2O_2

پراکسید هیدروژن و آهن به عنوان دو پارامتر موثر، به ترتیب نقش عامل اکسنده و کاتالیزور را در سیستم فنتون ایفا می‌کنند. آزمایش‌ها برای به دست آوردن غلظت بهینه H_2O_2 در شرایط بهینه pH، نسبت $[Fe^{2+}]/[H_2O_2]$ ، غلظت رنگزا و با ثابت نگه داشتن پارامتر دور همزن انجام شد که نتایج آن در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شده است.

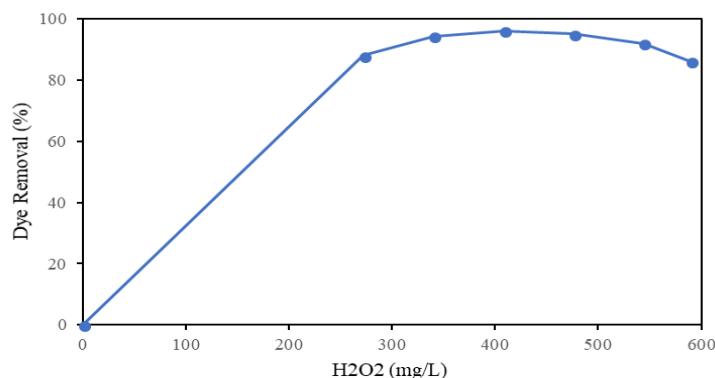
همان‌گونه که شکل ۶ مشاهده می‌شود در عدم حضور پراکسید هیدروژن راندمان سیستم صفر است اما با افزایش غلظت پراکسید هیدروژن مطابق واکنش (۱) رادیکال هیدروکسیل تولید شده و کاهش غلظت رنگزا نیز به وقوع می‌پیوندد زیرا در



شکل ۶- تاثیر غلظت H_2O_2 بر راندمان حذف رنگزا

$T=21\text{ }^\circ\text{C}$, $\text{Stir. Vel.}=100\text{ rpm}$, $[\text{Dye}]=150\text{ mg/L}$, $[\text{Fe}^{2+}]/[\text{H}_2\text{O}_2]=0/3$, $\text{pH}=3$

Figure 6. Effect of H_2O_2 concentration on dye removal efficiency
 $\text{pH}=3$, $[\text{Fe}^{2+}]/[\text{H}_2\text{O}_2]=0.3$, $[\text{Dye}]=150\text{ mg/L}$, $\text{Stir. Vel.}=100\text{ rpm}$, $T=21\text{ }^\circ\text{C}$



شکل ۷- میزان حذف رنگزا به عنوان تابعی از $[H_2O_2]$ در زمان ۹۰ دقیقه

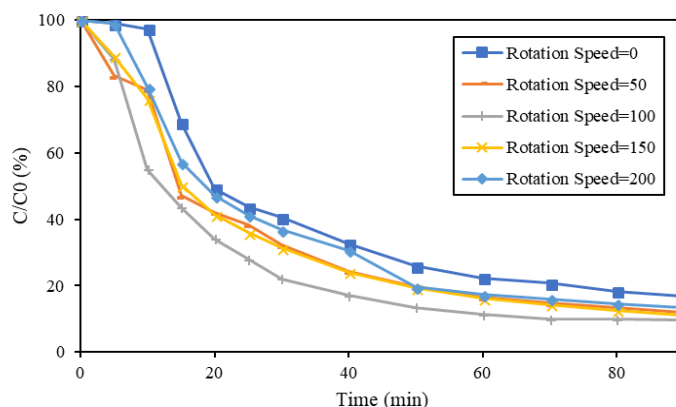
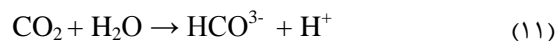
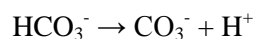
$T=21\text{ }^\circ\text{C}$, $\text{Stir. Vel.}=100\text{ rpm}$, $[\text{Fe}^{2+}]/[\text{H}_2\text{O}_2]=0/3$, $[\text{Dye}]=150\text{ mg/L}$, $\text{pH}=3$

Figure 7- Dye removal rate as a function of $[H_2O_2]$ in 90 minutes
 $\text{pH}=3$, $[\text{Dye}]=150\text{ mg/L}$, $[\text{Fe}^{2+}]/[\text{H}_2\text{O}_2]=0.3$, $\text{Stir. Vel.}=100\text{ rpm}$, $T=21\text{ }^\circ\text{C}$

تعیین سرعت چرخش بهینه همزن

می‌یابد و در سرعت 100 rpm به حداکثر مقدار خود به میزان $94/8$ درصد می‌رسد. دلیل این پدیده را می‌توان این‌گونه توضیح داد که سرعت‌های مختلف چرخش همزن منجر به ویژگی‌های مختلف انتقال جرم گونه‌های شیمیایی می‌شود. یکی دیگر از دلایل این نوسانات ممکن است به خاطر ورود گازهایی مانند CO_2 و O_2 به محلول باشد. تحت تاثیر چرخش، مطابق واکنش (۱۱) و (۱۲)، CO_2 حل شده در محلول به HCO_3^- و CO_3^{2-} تبدیل می‌شود (۲۴).

به منظور بررسی تاثیر و یافتن سرعت بهینه چرخش همزن سری آزمایش‌ها در سرعت‌های مختلف چرخش همزن (rpm) تا 200 و در شرایط بهینه pH ، نسبت $[\text{Fe}^{2+}]/[\text{H}_2\text{O}_2]$ ، غلظت رنگزا و غلظت H_2O_2 انجام شد. نتایج این آزمایش‌ها در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در صورت فقدان همزن راندمان حذف رنگزا پس از ۹۰ دقیقه و در شرایط بهینه پارامترهای دیگر، $71/9$ درصد می‌باشد. با افزایش سرعت همزن این مقدار افزایش

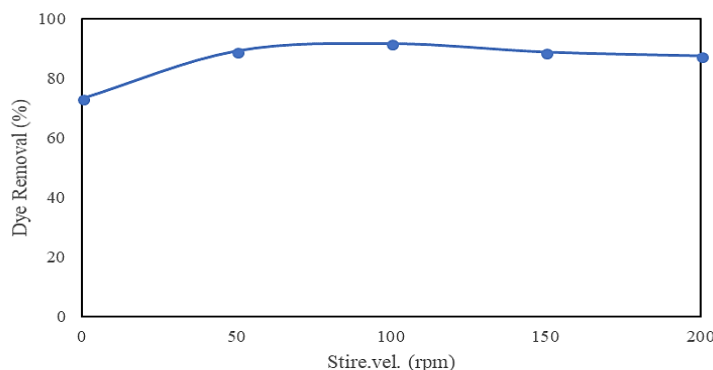


شکل ۸- تاثیر دور همزن بر راندمان حذف رنگزا

$T=21^\circ\text{C}$, $[\text{H}_2\text{O}_2]=340\text{ mg/L}$, $[\text{Dye}]=150\text{ mg/L}$, $[\text{Fe}^{2+}]/[\text{H}_2\text{O}_2]=0.3$, $\text{pH}=3$

Figure 8. Effect of stirring velocity on dye removal efficiency

$\text{pH}=3$, $[\text{Fe}^{2+}]/[\text{H}_2\text{O}_2]=0.3$, $[\text{Dye}]=150\text{ mg/L}$, $[\text{H}_2\text{O}_2]=340\text{ mg/L}$, $T=21^\circ\text{C}$



شکل ۹- میزان حذف رنگزا به عنوان تابعی از دور همزن

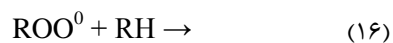
$T=21^\circ\text{C}$, $[\text{H}_2\text{O}_2]=340\text{ mg/L}$, $[\text{Fe}^{2+}]/[\text{H}_2\text{O}_2]=0.3$, $[\text{Dye}]=150\text{ mg/L}$, $\text{pH}=3$

Figure 9- Dye removal rate as a function of stirring velocity

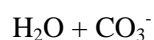
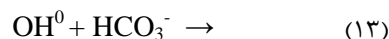
$\text{pH}=3$, $[\text{Dye}]=150\text{ mg/L}$, $[\text{Fe}^{2+}]/[\text{H}_2\text{O}_2]=0.3$, $[\text{H}_2\text{O}_2]=340\text{ mg/L}$, $T=21^\circ\text{C}$

راندمان حذف رنگزا در سیستم می‌شود. از سوی دیگر، ورود اکسیژن در محلول باعث افزایش راندمان حذف رنگزا با تولید رادیکال‌های هیدروکسیل در واکنش‌های (۱۵) تا (۱۸) می‌شود

(۲۴)

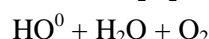
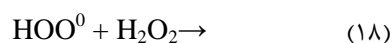
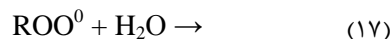


یون‌های HCO_3^- و CO_3^{2-} نقش مخربی ایفا کرده و با رادیکال‌های هیدروکسیل مطابق معادله (۱۳) و (۱۴)، واکنش می‌دهند (۲۴).



این واکنش‌ها با مصرف رادیکال‌های هیدروکسیل باعث کاهش

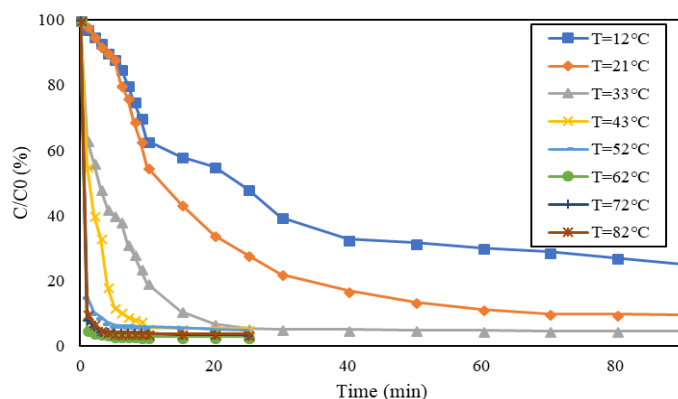
محلول میزان راندمان حذف رنگزا در مدت زمان بسیار کمتری به دلیل افزایش سرعت واکنش رادیکال‌های هیدروکسیل و افزایش میزان برخورد (بین مولکول‌های رنگزا و این رادیکال‌ها) به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد (۲۳) و در دمای ۶۲ درجه و مدت زمان تنها ۲ دقیقه تقریباً به ۹۶ درصد می‌رسد. حداکثر درصد حذف ۹۹ درصدی رنگزا در همین دما و در مدت زمان ۵ دقیقه می‌باشد. اما با افزایش دمای محلول تا ۷۰ درجه سلسیوس راندمان حذف تغییر محسوسی نمی‌کند و در ۸۰ درجه راندمان حذف رنگزا به دلیل تجزیه حرارتی پراکسید هیدروژن و کاهش غلظت موثر آن در جهت تولید رادیکال‌های هیدروکسیل با شیب بسیار کمی کاسته می‌شود (۲۵). طبق نتایج حاصل، دمای بهینه آزمایش ۶۳ درجه سلسیوس می‌باشد اما با توجه به مصرف بالای انرژی برای رساندن دمای محیط آبی به دمای مذکور و با توجه به میزان حذف مشابه در مدت زمان ۱۰ دقیقه برای دمای ۴۳ درجه، دمای ۴۳ درجه سلسیوس به عنوان دمای بهینه انتخاب شد.



این دو اثر مختلف در رقابت با یکدیگر منجر به نوسان حذف رنگزا در سرعت‌های مختلف چرخش همزن می‌شوند. در نهایت، چرخش بهینه همزن در ۱۰۰ rpm به عنوان چرخش بهینه همزن انتخاب شد.

تعیین دمای بهینه

برای به دست آوردن دمای بهینه، آزمایش‌ها در دماهای مختلف از ۱۲ تا ۸۰ درجه سلسیوس و در شرایط بهینه شده pH، نسبت $[\text{Fe}^{2+}]/[\text{H}_2\text{O}_2]$ ، غلظت پراکسید هیدروژن، غلظت اولیه رنگزا و سرعت چرخش همزن انجام شد. نتایج این آزمایش‌ها در شکل ۱۰ است. مطابق شکل ۱۰، در ۲۱ درجه سلسیوس دمای اصلی محلول رنگزا (دمای اتاق)، میزان راندمان حذف ۹۱/۴ درصد در مدت زمان ۹۰ دقیقه می‌باشد که با کاهش آن تا ۱۲ درجه راندمان حذف به ۷۴ درصد می‌رسد. اما با افزایش دمای



شکل ۱۰- تاثیر دما بر راندمان حذف رنگزا

Stir. Vel. = ۱۰۰ rpm, $[\text{H}_2\text{O}_2] = 340 \text{ mg/L}$, $[\text{Dye}] = 150 \text{ mg/L}$, $[\text{Fe}^{2+}]/[\text{H}_2\text{O}_2] = 0.3$, pH=3

Figure 10- Effect of temperature on dye removal efficiency

pH=3, $[\text{Fe}^{2+}]/[\text{H}_2\text{O}_2] = 0.3$, $[\text{Dye}] = 150 \text{ mg/L}$, $[\text{H}_2\text{O}_2] = 340 \text{ mg/L}$, Stir. Vel. = 100 rpm

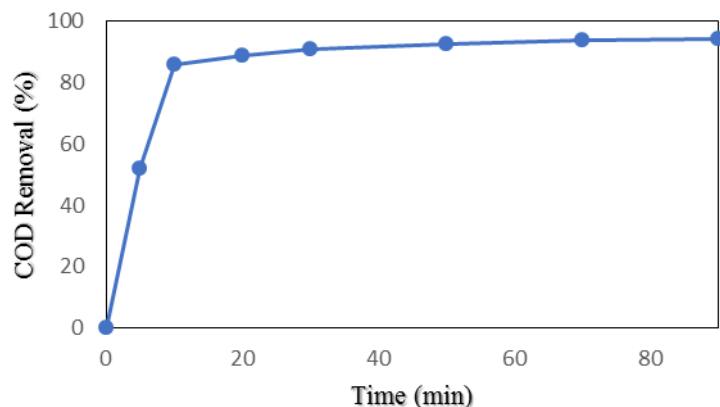
بررسی میزان حذف COD در شرایط بهینه

می‌شود و هنوز احتمال خطرات زیست محیطی آن وجود خواهد داشت (۲۶). پس از بررسی پارامترهای سیستم موردنظر و بهینه‌سازی و بدست آوردن بیشترین و اقتصادی‌ترین راندمان

اگرچه رنگبری ماده رنگزا را می‌توان حذف رنگزا از محلول آبی برشمرد اما این رنگبری به منزله تجزیه کامل آلاینده نمی‌باشد، به طوری که در این حالت تنها پیوندهای عامل رنگزا شکسته

حذف رنگزا، آزمایش COD، برای شرایط بهینه انجام شد که نتایج آن در شکل ۱۱ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در طول واکنش، COD محلول در ابتدا با شیب تند و سپس با شیب ملایم‌تری کاهش می‌یابد و در زمان ۱۰ دقیقه، میزان حذف به ۸۶/۱ درصد حذف می‌رسد.

حذف رنگزا، آزمایش COD، برای شرایط بهینه انجام شد که نتایج آن در شکل ۱۱ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در طول واکنش، COD محلول در ابتدا با شیب تند و سپس با شیب ملایم‌تری کاهش می‌یابد و در زمان ۱۰ دقیقه، میزان حذف به ۸۶/۱ درصد حذف می‌رسد.



شکل ۱۱- میزان حذف COD در طول زمان واکنش

$T=43^{\circ}\text{C}$, Stir. Vel.=100 rpm, $[\text{H}_2\text{O}_2]=340\text{ mg/L}$, $[\text{Dye}]=150\text{ mg/L}$, $[\text{Fe}^{2+}]/[\text{H}_2\text{O}_2]=0.3$, $\text{pH}=3$

Figure 11 - COD removal rate during reaction time

$\text{pH}=3$, $[\text{Fe}^{2+}]/[\text{H}_2\text{O}_2]=0.3$, $[\text{Dye}]=150\text{ mg/L}$, $[\text{H}_2\text{O}_2]=340\text{ mg/L}$, Stir. Vel.= 100 rpm, $T=43^{\circ}\text{C}$

نتیجه‌گیری

در این پژوهش فرایند فنتون به عنوان یک سیستم کارا و سریع برای حذف ماده رنگزای اسید آبی ۲۵ مورد استفاده قرار گرفت و پارامترهای موثر در آن به روش تک فاکتوری مورد بررسی قرار گرفته و بهینه شدند. با توجه به تولید لجن در فرایند فنتون و مصرف بالای مواد شیمیایی سعی بر استفاده از مقدار آهن در پایین‌ترین غلظت ممکن با درصد حذف مطلوب بود که نتایج آزمایش‌ها نشان داد، در مدت زمان ۱۰ دقیقه و در شرایط بهینه $\text{pH}=3$, $[\text{Fe}^{2+}]/[\text{H}_2\text{O}_2]=0.3$, غلظت $\text{H}_2\text{O}_2=340$ میلی‌گرم بر لیتر، غلظت اولیه رنگزا ۱۵۰ میلی‌گرم بر لیتر، سرعت چرخش همزن ۱۰۰ و دمای ۴۳ درجه سلسیوس، راندمان حذف ماده رنگزا تقریباً ۹۶ درصد و راندمان حذف COD در ۸۶/۱ درصد می‌باشد. در این تحقیق مشخص شد افزایش $[\text{Fe}^{2+}]/[\text{H}_2\text{O}_2]$ ، غلظت H_2O_2 ، دما و pH و دور همزن تا مقدار مشخصی به عنوان مقدار بهینه باعث افزایش راندمان حذف می‌شوند.

در این پژوهش فرایند فنتون به عنوان یک سیستم کارا و سریع برای حذف ماده رنگزای اسید آبی ۲۵ مورد استفاده قرار گرفت و پارامترهای موثر در آن به روش تک فاکتوری مورد بررسی قرار گرفته و بهینه شدند. با توجه به تولید لجن در فرایند فنتون و مصرف بالای مواد شیمیایی سعی بر استفاده از مقدار آهن در پایین‌ترین غلظت ممکن با درصد حذف مطلوب بود که نتایج آزمایش‌ها نشان داد، در مدت زمان ۱۰ دقیقه و در شرایط بهینه $\text{pH}=3$, $[\text{Fe}^{2+}]/[\text{H}_2\text{O}_2]=0.3$, غلظت $\text{H}_2\text{O}_2=340$ میلی‌گرم بر لیتر، غلظت اولیه رنگزا ۱۵۰ میلی‌گرم بر لیتر، سرعت چرخش همزن ۱۰۰ و دمای ۴۳ درجه سلسیوس، راندمان حذف ماده رنگزا تقریباً ۹۶ درصد و راندمان حذف COD در ۸۶/۱ درصد می‌باشد. در این تحقیق مشخص شد افزایش $[\text{Fe}^{2+}]/[\text{H}_2\text{O}_2]$ ، غلظت H_2O_2 ، دما و pH و دور همزن تا مقدار مشخصی به عنوان مقدار بهینه باعث افزایش راندمان حذف می‌شوند.

جدول ۲- پارامترها و مقادیر بهینه به دست آمده به روش تک فاکتوری در سیستم فنتون

Table 2. Obtained optimal parameters and values by single-factor method in Fenton system

مقادیر بهینه (دمای اتاق)	مقادیر بهینه (دمای 43°C)	پارامتر
۳	۳	pH
۰/۳	۰/۳	نسبت $[\text{Fe}^{2+}]/[\text{H}_2\text{O}_2]$
۱۵۰	۱۵۰	غلظت اولیه رنگزا (mg/L)

۳۴۰	۳۴۰	غلظت H_2O_2 (mg/L)
۱۰۰	۱۰۰	سرعت چرخش همزن (rpm)
۲۱/۱	۴۳/۳	دما
۵۰	۱۰	زمان (min)
۹۱/۷	۹۶/۱	راندمان حذف رنگزا (%)
۸۴/۴	۸۶/۱	راندمان حذف COD (%)

2012. Trends in electro-Fenton process for water and wastewater treatment: an overview. *Desalination*, 299, pp.1-15.

7. Malakootian M., Heidari M., Asadi F. 2017. Removal of phosphor from aqueous solution by Fenton oxidation process, *Journal of Environmental Science and Technology*, 19 (2), pp. 63-72 (in Persian).
8. Cruz-González, K., Torres-Lopez, O., García-León, A.M., Brillas, E., Hernández-Ramírez, A. and Peralta-Hernández, J.M., 2012. Optimization of electro-Fenton/BDD process for decolorization of a model azo dye wastewater by means of response surface methodology. *Desalination*, 286, pp.63-68.
9. Sun, J.H., Shi, S.H., Lee, Y.F. and Sun, S.P., 2009. Fenton oxidative decolorization of the azo dye Direct Blue 15 in aqueous solution. *Chemical Engineering Journal*, 155(3), pp.680-683.
10. Babuponnusami, A. and Muthukumar, K., 2014. A review on Fenton and improvements to the Fenton process for wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(1), pp.557-572.
11. Bokare, A.D. and Choi, W., 2014. Review of iron-free Fenton-like systems for activating H_2O_2 in advanced oxidation processes. *Journal of Hazardous Materials*, 275, pp.121-

Reference

1. Brillas, E., Sirés, I. and Oturan, M.A., 2009. Electro-Fenton process and related electrochemical technologies based on Fenton's reaction chemistry. *Chemical reviews*, 109(12), pp.6570-6631.
2. Kumar, P.S., Ramalingam, S., Senthamarai, C., Niranjanaa, M., Vijayalakshmi, P. and Sivanesan, S., 2010. Adsorption of dye from aqueous solution by cashew nut shell: Studies on equilibrium isotherm, kinetics and thermodynamics of interactions. *Desalination*, 261(1-2), pp.52-60.
3. Ghalebizade, M. and Ayati, B., 2016. Solar photoelectrocatalytic degradation of Acid Orange 7 with ZnO/TiO₂ nanocomposite coated on stainless steel electrode. *Process Safety and Environmental Protection*, 103, pp.192-202.
4. Chequer, F.M.D., de Oliveira, G.A.R., Ferraz, E.R.A., Cardoso, J.C., Zanoni, M.V.B. and de Oliveira, D.P., 2013. Textile dyes: dyeing process and environmental impact. In *Eco-friendly textile dyeing and finishing*. InTech.
5. Thanh, B.X., Quyen, V.T.K. and Dan, N.P., 2011. Removal of non-biodegradable organic matters from membrane bioreactor permeate by oxidation processes. *Journal of Water Sustainability*, 1(3), pp.31-41.
6. Nidheesh, P.V. and Gandhimathi, R.,

- the azo dye CI Acid Red 14 by heterogeneous Fenton reaction. *Journal of Hazardous Materials*, 186(1), pp.745-750.
19. Panda, N., Sahoo, H. and Mohapatra, S., 2011. Decolorization of methyl orange using Fenton-like mesoporous Fe₂O₃-SiO₂ composite. *Journal of Hazardous Materials*, 185(1), pp.359-365.
20. Ji, F., Li, C., Zhang, J. and Deng, L., 2011. Efficient decolorization of dye pollutants with LiFe(WO₄)₂ as a reusable heterogeneous Fenton-like catalyst. *Desalination*, 269(1), pp.284-290.
21. Hassan, H. and Hameed, B.H., 2011. Decolorization of Acid Red 1 by heterogeneous Fenton-like reaction using Fe-ball clay catalyst. *International Conference on Environment Science and Engineering IPCBEE IACSIT Press, Singapore*.
22. Dükkancı, M., Gündüz, G., Yılmaz, S. and Prihod'ko, R.V., 2010. Heterogeneous Fenton-like degradation of Rhodamine 6G in water using CuFeZSM-5 zeolite catalyst prepared by hydrothermal synthesis. *Journal of Hazardous Materials*, 181(1), pp.343-350.
23. Nidheesh, P.V., Gandhimathi, R. and Ramesh, S.T., 2013. Degradation of dyes from aqueous solution by Fenton processes: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(4), pp.2099-2132.
24. Bouasla, C., Samar, M.E.H. and Ismail, F., 2010. Degradation of methyl violet 6B dye by the Fenton process. *Desalination*, 254(1-3), pp.35-41.
25. Dutta, K., Mukhopadhyay, S., 135.
12. Khan, J., Sayed, M., Ali, F. and Khan, H.M., 2018. Removal of Acid Yellow 17 Dye by Fenton Oxidation Process. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 232(4), pp.507-525.
13. Kermani M., Dehghani A., Bahrami Asl F., 2014. Evaluation of the efficiency of Fenton advanced oxidation process in decomposition of cationic purple 16 from aqueous solution, *The First Electronic Conference on New Findings in The Environment and Agricultural Ecosystems, Research Institute of New Energy and Environment, University of Tehran (In Persian)*.
14. Sohrabi, M.R., Khavaran, A., Shariati, S. and Shariati, S., 2017. Removal of Carmoisine edible dye by Fenton and photo Fenton processes using Taguchi orthogonal array design. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, pp.S3523-S3531.
15. Rouhani Moghaddam M., Talebizadeh Rafsanjani A.R., Salehi L., 2018. Optimization of electrochemical degradation process of acid blue 25 using central composite design, 13 (46), pp. 269- 282 (In Persian).
16. Gupta, S.S. and Chakraborty, D., 2017. Photocatalytic decolourisation of a toxic dye, Acid Blue 25, with graphene based N-doped titania. [Indian Journal of Chemistry](#), 56A(12), 1293-1301.
17. Eckenfelder, W. and Musterman, J., 1998. Activated sludge: Treatment of industrial wastewater. CRC Press.
18. Idel-aouad, R., Valiente, M., Yaacoubi, A., Tanouti, B. and López-Mesas, M., 2011. Rapid decolourization and mineralization of

2018. Removal of rhodamine B dye from aqueous solution by electro-Fenton process using iron-doped mesoporous silica as a heterogeneous catalyst. *Chemosphere*, 200, pp.446-454.

Bhattacharjee, S. and Chaudhuri, B., 2001. Chemical oxidation of methylene blue using a Fenton-like reaction. *Journal of Hazardous Materials*, 84(1), pp.57-71.

26. Jinisha, R., Gandhimathi, R., Ramesh, S.T., Nidheesh, P.V. and Velmathi, S.,