

Investigation of Acid Brown 14 Removal from Aqueous Solutions Using a Catalytic Ozonation Process with CaO₂/TiO₂

Fatemeh Sahraei

Msc, Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran.

Abdolmotalleb

Seydmohammadi

*Professor, Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Research Center for Health Sciences, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran.

(Corresponding Author)
sidmohammadi@umsha.ac.ir

Fatemeh Bayat

BSc, Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran.

Shilan Hoseini

BSc, Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran.

Abstract

Background and Purpose: Untreated dye-containing wastewater poses severe environmental hazards due to the persistence, toxicity, and resistance to biodegradation of dyes. This study aimed to evaluate the efficiency of catalytic ozonation using calcium peroxide (CaO₂) and titanium dioxide (TiO₂) to remove Acid Brown 14 from aqueous solutions.

Materials and Methods: Laboratory-scale experiments were performed using a batch ozonation reactor. The influence of catalyst dosage, initial dye concentration, pH, and contact time on removal efficiency was assessed. Chemical oxygen demand (COD) was measured to evaluate dye degradation. Dye concentration was determined spectrophotometrically at 461 nm.

Results: Optimal removal of Acid Brown 14 was achieved at pH 9, a contact time of 60 minutes, an initial dye concentration of 50 mg/L, and a catalyst dose of 0.4 g/L, resulting in a decolorization efficiency of 97.25%. Under these conditions, COD removal efficiency reached 58.9% after 60 minutes.

Conclusion: The findings confirm that CaO₂ and TiO₂ exhibit high catalytic activity in the ozonation process and represent promising agents for decolorising textile wastewater.

Keywords: *Catalytic ozonation, Acid Brown 14, Calcium Peroxide, Titanium Dioxide*

Open Access Policy: This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Received: 2024/10/22

Accepted: 2025/03/11

Doi:10.22038/jreh.2025.26124

► **Citation:** Sahraei F, Seydmohammadi A, Bayat F, Hoseini Sh. Investigation of Acid Brown 14 Removal from Aqueous Solutions Using a Catalytic Ozonation Process with CaO₂/TiO₂. *Iranian Journal of Research in Environmental Health*. 11(1):11-19.

بررسی حذف رنگ اسید قهوه‌ای ۱۴ از محلول‌های آبی با استفاده از فرآیند ازن‌زنی کاتالیزوری با $\text{CaO}_2/\text{TiO}_2$

فاطمه صحرانی

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

عبدالمطلب صیدمحمدی

* استاد، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، مرکز تحقیقات علوم بهداشتی، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران. (نویسنده مسئول)

sidmohammadi@umsha.ac.ir

فاطمه بیات

دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران.

شیلان حسینی

دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران.

چکیده

زمینه و هدف: فاضلاب‌های حاوی مواد رنگی به دلیل ویژگی‌هایی مانند دیر تجزیه‌پذیر و سمی بودن، چنانچه بدون تصفیه به محیط وارد شوند خسارات جبران‌ناپذیری به محیط زیست وارد می‌کنند. لذا، این مطالعه با هدف بررسی کارایی فناوری ازن‌زنی کاتالیزوری با استفاده از کلسیم پراکساید و تیتانیم دی‌اکسید در حذف رنگ اسید قهوه‌ای ۱۴ از محلول‌های آبی انجام گرفت.

مواد و روش‌ها: مطالعه‌ی حاضر در مقیاس آزمایشگاهی و با استفاده از یک راکتور ازن‌زنی به صورت ناپیوسته انجام گرفت. تاثیر دوز کاتالیست، غلظت اولیه رنگ، pH اولیه و زمان تماس در راندمان ازن‌زنی کاتالیستی مورد بررسی قرار گرفت. جهت بررسی میزان تجزیه‌پذیری رنگ از آنالیز COD استفاده شد. تغییرات شدت رنگ توسط دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۶۱ نانومتر قرائت گردید.

یافته‌ها: مطابق با نتایج حاصل از آنالیز داده‌ها، شرایط بهینه حذف رنگ اسید قهوه‌ای ۱۴ در زمان تماس ۶۰ دقیقه، pH برابر با ۹، غلظت اولیه آلاینده ۵۰ میلی گرم بر لیتر و دوز کاتالیزور برابر با ۰/۴ گرم بر لیتر به دست آمد. در شرایط مذکور راندمان حذف رنگ ۹۷/۲۵ درصد گزارش شد. هم‌چنین راندمان حذف COD در طی زمان ۶۰ دقیقه و تحت شرایط بهینه به ۵۸/۹ درصد رسید.

نتیجه‌گیری: نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد کلسیم پراکساید و تیتانیم دی‌اکسید با پتانسیل کاتالیستی بالایی می‌توانند به عنوان یک گزینه پیشنهادی جهت حذف رنگ از پساب فاضلاب نساجی در فرآیند ازن‌زنی کاتالیزوری مورد استفاده قرار گیرند.

کلیدواژه‌ها: ازن‌زنی کاتالیزوری، رنگ اسید قهوه‌ای ۱۴، پراکساید کلسیم، تیتانیم دی‌اکسید

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۱

نوع مقاله: پژوهشی

◀ **استناد:** صحرانی ف، صیدمحمدی ع، بیات ف، حسینی ش. بررسی حذف رنگ

اسید قهوه‌ای ۱۴ از محلول‌های آبی با استفاده از فرآیند ازن‌زنی کاتالیزوری با $\text{CaO}_2/\text{TiO}_2$. فصلنامه‌ی پژوهش در بهداشت محیط. بهار ۱۴۰۴؛ ۱۱(۱): ۱۱-۱۹.

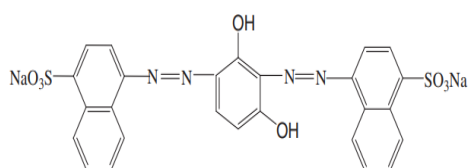
مقدمه

در راستای حفظ محیط زیست، قوانین و استانداردهای زیست محیطی وضع شده‌اند که در آن‌ها کیفیت منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی همواره مورد توجه قرار گرفته است. یکی از موارد مورد توجه در این قوانین در رابطه با غلظت ترکیبات گوناگون در فاضلاب خروجی از تصفیه‌خانه‌های کارخانه‌های صنعتی است. صنایع نساجی به دلیل مصرف بالای آب و مواد شیمیایی رنگی یکی از اصلی‌ترین منابع تولید فاضلاب‌های رنگی می‌باشد (۱). فاضلاب‌های تولید شده توسط صنایع نساجی دارای مقادیر قابل توجهی رنگ‌های سمی و آروماتیک به‌ویژه رنگ‌های آزو هستند (۲).

فاضلاب‌های رنگی حاوی انواع مختلفی از رنگ‌های مصنوعی هستند که عمدتاً سمی بوده و پایداری بسیار بالایی در برابر تجزیه بیولوژیکی دارند (۳). رنگ‌های مصنوعی دارای ساختارهای آروماتیکی پیچیده‌ای می‌باشند که در مقابل تصفیه‌ی زیستی مقاوم هستند (۴). طبق نتایج حاصل از مطالعات نسبت BOD^1 به COD^2 فاضلاب‌های نساجی پایین و معمولاً کمتر از ۰/۱ می‌باشد که این امر ماهیت غیرقابل تجزیه‌ی بیولوژیکی رنگ‌ها را نشان می‌دهد (۵).

تخلیه‌ی پساب‌های رنگی به آب‌های پذیرنده موجب اثرات زیان‌آوری مانند بروز پدیده‌ی اتروفیکاسیون، کاهش نفوذ نور خورشید و ایجاد تداخل در اکولوژی آب‌های پذیرنده می‌شود که این امر بر میزان شدت فتوسنتز گیاهان آبی و جلبک‌ها اثر گذاشته و منجر به آسیب به محیط زیست نیز می‌شود (۵).

رنگ‌های آزو بزرگترین گروه رنگ‌های مورد استفاده در صنعت نساجی هستند. ساختار پیچیده آروماتیک مزدوج در آن‌ها مسئول حلالیت بالا در آب، پایداری بالا در برابر اکسیدان‌ها، نور و تخریب بیولوژیکی می‌باشد. رنگ‌های اسیدی، رنگ‌های آنیونی محلول در آب هستند و بیشترین کاربرد را برای رنگ‌آمیزی ابریشم، پشم، نایلون و الیاف اکلیریک اصلاح‌شده دارند (۶). اسید قهوه‌ای ۱۴ (AB14) با فرمول مولکولی $C_{26}H_{16}N_4Na_2O_8S_2$ یک آلاینده و رنگ آزو است که ساختار آن در شکل ۱ نشان داده شده است (۲).



شکل ۱- ساختار مولکولی رنگ اسید قهوه‌ای ۱۴

تاکنون از روش‌های متفاوتی مانند روش‌های شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی جهت حذف رنگ استفاده شده است. روش‌های فیزیکی و جذب سطحی سبب تخریب و از بین بردن مولکول‌های آلاینده نمی‌شوند بلکه فقط آن را از محیطی به محیط دیگر انتقال می‌دهند (۷). از معایب روش‌های زیستی نیز می‌توان به پایین بودن راندمان اشاره نمود (۸). از معایب فرآیند ته‌نشینی و جذب به ترتیب می‌توان به زمان‌بر و گران‌قیمت بودن اشاره نمود (۹).

امروزه جهت تجزیه‌ی مواد دیر تجزیه‌پذیر و مقاوم به تصفیه‌ی بیولوژیکی، فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs) کاربرد فراوانی پیدا کرده‌اند. به نحوی که کاربرد موفقیت‌آمیز روش‌های اکسیداسیون پیشرفته توسط مطالعات متعددی گزارش شده است. از جمله این روش‌ها می‌توان به ازن – فرابنفش، ازن-پراکسید هیدروژن و غیره اشاره کرد. مبنای تمامی روش‌های فرآیند اکسیداسیون پیشرفته تولید رادیکال هیدروکسیل می‌باشد. از جمله مزایای رادیکال هیدروکسیل، واکنش‌پذیری و قدرت اکسیداسیون بالا و همچنین عملکرد غیرانتخابی می‌باشد که منجر به تخریب آلاینده‌ها می‌شود (۹). در بین تمامی روش‌های اکسیداسیون، ازن‌زنی امیدوارکننده‌ترین روش برای حذف پساب‌های رنگی است (۱۰).

ازن یک اکسیدکننده‌ی قوی است که می‌تواند باعث حذف بسیاری از آلاینده‌های گوناگون در محیط‌های آبی شود. ولی به دلایلی مانند تولید محصولات جانبی و حلالیت پایین، کاربرد این اکسیدکننده با محدودیت‌هایی مواجه است (۹). به همین جهت در سال‌های اخیر فرآیند ازن‌زنی کاتالیزوری به عنوان یک سیستم جدید اکسیداسیون پیشرفته توجهات فراوانی را به خود جلب کرده است (۱۱). از ناسیون کاتالیستی سبب افزایش راندمان از ناسیون ساده و کاهش هزینه‌های اقتصادی می‌شود (۹). کاتالیزورهایی که معمولاً در فرآیند از ناسیون کاتالیزوری مورد استفاده

¹ Biochemical Oxygen Demand

² Chemical Oxygen Demand

قرار می‌گیرند، اکسیدهای فلزی یا کامپوزیتی از این اکسیدها می‌باشند. با استفاده از یک کاتالیزور مناسب می‌توان کارایی فرآیند ازن‌زنی را افزایش داد (۴).

افزودن کاتالیست به فرآیند ازن‌زنی مزایایی مانند افزایش میزان اکسیداسیون، کاهش تولید محصولات فرعی و سمی، کاهش مدت زمان لازم و کاهش میزان ازن مصرفی را در پی دارد. افزایش تولید رادیکال‌های هیدروکسیل، سوپراکساید و هیدروپراکسیل که پتانسیل اکسیداسیون بیشتری نسبت به ازن دارند نیز یکی دیگر از اهداف ازن‌زنی کاتالیزوری قلمداد می‌گردد (۱۲).

کلسیم پراکسید^۱، یک پراکسید غیرآلی چند منظوره، سازگار با محیط زیست و دارای پایداری حرارتی مناسب است و به‌عنوان منبعی برای تولید پراکسید هیدروژن^۲ شناخته می‌شود (۱۳، ۱۴).

هم‌چنین دی‌اکسید تیتانیوم^۳ نیمه‌رسانایی است که در دهه‌های پیشین به‌علت دارا بودن مزایایی از جمله پایداری فیزیکی و شیمیایی، غیر سمی بودن، فعالیت فتوکاتالیستی بالا، طول عمر بالا و هزینه کم آن مورد توجه و استفاده قرار گرفته است (۱۵). با توجه به اهمیت موضوع، مطالعه‌ی حاضر با هدف حذف رنگ اسید قهوه‌ای ۱۴ با استفاده از فرآیند ازن‌زنی کاتالیزوری از محلول‌های آبی انجام شد.

روش کار

مواد و تجهیزات

جهت تهیه‌ی محلول استاندارد رنگ، ۱ گرم از رنگ اسید قهوه‌ای ۱۴ (فرآورده‌ی شرکت مرک آلمان) در یک لیتر آب مقطر تهیه و سپس غلظت‌های مورد نظر از محلول استوک تهیه شد. اسید قهوه‌ای ۱۴ ($C_{26}H_{16}N_4Na_2O_8S_2$) دارای بیشترین میزان جذب در طول موج ۴۶۱ نانومتر است. در این پژوهش پراکسید کلسیم با مولاریته ۷۲/۰۷ گرم بر مول (فرآورده‌ی شرکت مرک آلمان) و تیتانیوم دی‌اکسید با مولاریته ۷۹/۹ گرم بر مول (فرآورده‌ی شرکت مرک آلمان) جهت اکسیداسیون رنگ تهیه شدند. سولفات نقره^۴، سولفات جیوه^۵، سولفوریک اسید^۶ ۹۸ درصد و دی

کرومات پتاسیم^۷ (فرآورده‌ی شرکت مرک آلمان) جهت اندازه‌گیری COD مورد استفاده قرار گرفتند. دستگاه ازن ژنراتور مدل COGA1 (ساخت شرکت آردا فرانسه) جهت تولید ازن و جهت سنجش غلظت رنگ از دستگاه اسپکتروفتومتر مدل DR5000 (ساخت شرکت HACH آمریکا) استفاده شد. جهت اندازه‌گیری pH از pH متر رادلب (ساخت ایران) و جهت هضم نمونه‌ها از راکتور COD مدل AL38 (ساخت شرکت آکوالیتیک آلمان) استفاده گردید. از ترازوی دیجیتال مدل PT210 Sartorius (ساخت کشور آلمان) نیز جهت توزین کاتالیست‌های مطالعه استفاده شد.

روش کار

مطالعه‌ی حاضر یک مطالعه‌ی تجربی و آزمایشگاهی بود که به‌صورت سیستم ناپیوسته در آزمایشگاه آب و فاضلاب دانشکده‌ی بهداشت دانشگاه علوم پزشکی همدان در سال ۱۴۰۲ صورت گرفت. تمامی آزمایشات در این مطالعه در دمای اتاق (۲۵ درجه سانتی‌گراد) انجام شد و تاثیر پارامترهای مختلف مانند دوز کاتالیست (۰/۵ تا ۰/۵ میلی گرم بر لیتر)، غلظت اولیه رنگ (۲۵ تا ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر)، pH (۷-۱۱) و زمان تماس (۵ تا ۶۰ دقیقه) مورد مطالعه قرار گرفت. جهت انجام آزمایشات از یک گازشوی به حجم ۵۰۰ میلی لیتر به‌عنوان راکتور استفاده شد. شماتیک راکتور مورد استفاده در شکل ۲ نشان داده شده است.

گازشوی مورد استفاده از جنس پیرکس و به‌صورت استوانه بوده و دو روزنه در بالای آن قرار داشت که یکی از آن‌ها جهت ورود و تزریق ازن و دیگری جهت تخلیه‌ی گاز خروجی تعبیه شدند. جهت پخش یکنواخت و موثر ازن یک دیفیوزر به انتهای لوله ورودی ازن متصل گردید. جهت سنجش غلظت رنگ با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر و بعد از تعیین طول موج بیشینه ۴۶۱ نانومتر از طریق اسکن و سپس رسم منحنی کالیبراسیون در این طول موج صورت پذیرفت. جهت انجام آزمایشات، پس از تعیین مقدار جذب حداکثر رنگ‌زا و تعیین ارتباط میان میزان جذب و غلظت ماده‌ی رنگ‌زا، از معادله ۱ جهت بررسی میزان حذف رنگ استفاده شد (۲).

^۱ CaO₂

^۲ H₂O₂

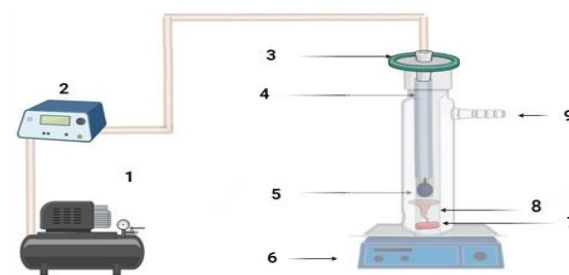
^۳ TiO₂

^۴ Ag₂SO₄

^۵ Hg₂SO₄

^۶ H₂SO₄

^۷ K₂Cr₂O₇



شکل ۲. شماتیک راکتور مورد استفاده در مطالعه

- ۱- پمپ هوا
- ۲- ازن ژنراتور
- ۳- راکتور ازن زنی
- ۴- لوله ورودی ازن به داخل راکتور
- ۵- دیفیوزر
- ۶- شیکر
- ۷- مغنت
- ۸- چرخش جریان
- ۹- لوله خروجی گاز ازن

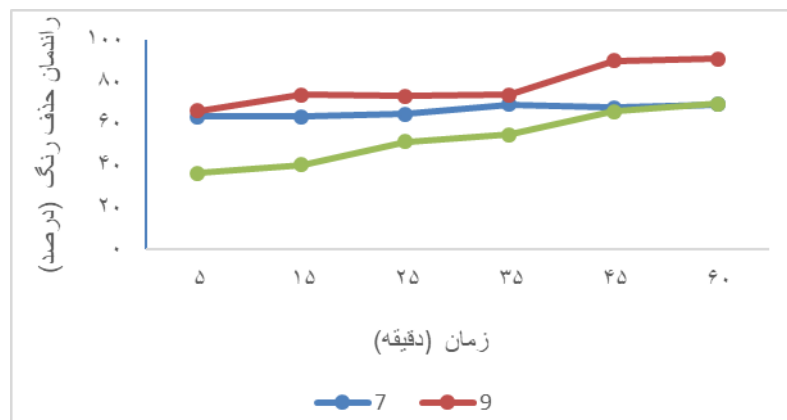
یافته‌ها

تعیین تاثیر pH بر کارایی حذف رنگ:

جهت بررسی پارامترهای موثر بر فرآیند ازناسیون کاتالیزوری، تعیین تاثیر pH در بازه‌ی ۷ تا ۱۱ تحت شرایط ثابت غلظت رنگ ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر، زمان ۶۰ دقیقه و دوز کاتالیز ۰/۴ گرم بر لیتر مورد بررسی قرار گرفت. مطابق نمودار ۱ در این مرحله در pH برابر ۷، ۹، ۱۱ راندمان حذف رنگ به ترتیب برابر ۶۹/۱۰، ۹۰/۹۴، ۶۹/۴۰ درصد به دست آمد.

$$R(\%) = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100 \quad (۱)$$

در این معادله C_0 و C_t به ترتیب غلظت نمونه‌ی اولیه و نمونه‌ی تصفیه شده می باشد (۲). حذف ماده‌ی رنگ‌زا به معنی تجزیه‌ی کامل ترکیب‌های حلقوی میانی و حذف بار آلی به صورت کامل نیست. بنابراین حذف COD طبق دستورالعمل ۵۲۲۰ جهت اطمینان از مناسب بودن محلول برای تخلیه به محیط انجام شد (۱۶). هم چنین جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها و هم چنین رسم نمودارهای مناسب از نرم افزار اکسل استفاده گردید.



نمودار ۱. تاثیر pH بر کارایی حذف رنگ AB14 در فرآیند ازن زنی کاتالیزوری: غلظت رنگ ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر، دوز کاتالیز ۰/۴ گرم بر لیتر، دوز ازن ۱/۸ لیتر بر دقیقه

تعیین تاثیر دوز کاتالیز بر کارایی حذف رنگ

نمودار ۲ نتایج تعیین تاثیر دوز کاتالیز را نشان می دهد. مطابق با نمودار تحت شرایط غلظت رنگ ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر، زمان ۶۰ دقیقه و pH بهینه برابر با ۹ با افزایش دوز کاتالیز از ۰/۰۵ به ۰/۵ گرم بر لیتر راندمان حذف رنگ از ۶۰/۱۷ درصد به ۹۸/۸۸ درصد رسیده است. دوز بهینه کاتالیز نیز با توجه به مسائل اقتصادی و کاهش هزینه برابر با ۰/۴ گرم بر لیتر تعیین شد.

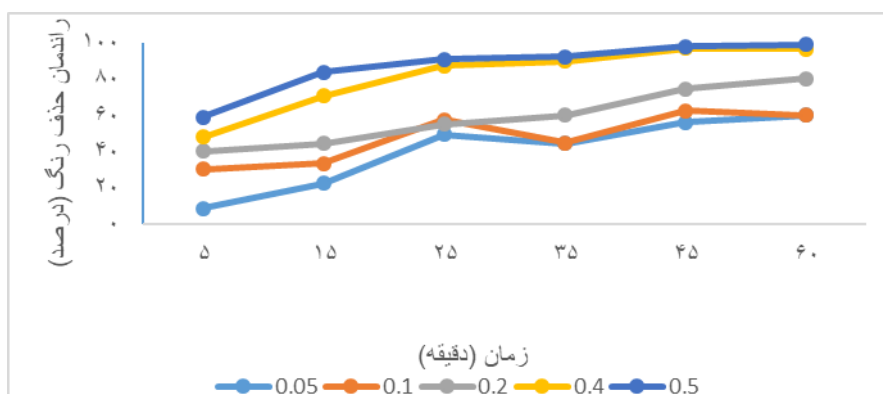
تعیین تاثیر غلظت اولیه رنگ بر کارایی حذف آن

نتایج مربوط به تعیین تاثیر غلظت اولیه رنگ در نمودار ۳ نشان داده شده است. مطابق با نمودار تحت شرایط ثابت واکنش با افزایش غلظت اولیه رنگ از ۲۵ به ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر راندمان حذف رنگ در فرآیند ازناسیون کاتالیزوری از ۹۷/۸۹ درصد به ۹۴/۹۱ درصد کاهش یافته است.

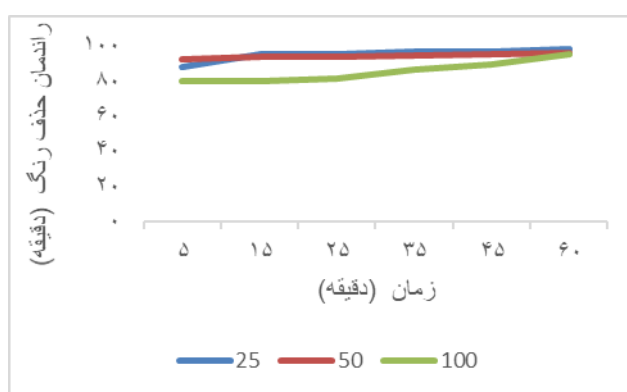
تعیین تاثیر فرآیند ازن زنی کاتالیزوری در حذف COD

در نمودار ۴ نتایج حاصل از تاثیر فرآیند ازن زنی کاتالیزوری در حذف COD نشان داده شده است.

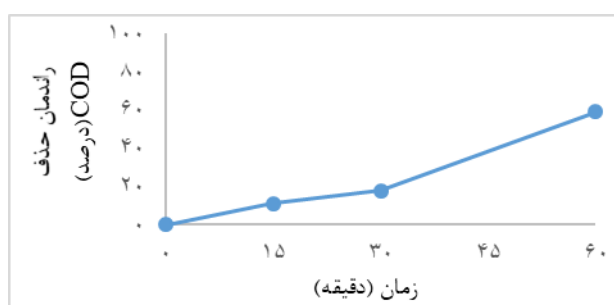
همان گونه که نتایج نشان می دهد، کارایی حذف COD تحت شرایط بهینه آزمایش و پس از گذشت ۶۰ دقیقه ۵۸/۹ درصد کاهش یافته است.



نمودار ۲. تاثیر دوز کاتالیست بر کارایی حذف رنگ AB14 در فرآیند ازن زنی کاتالیزوری: غلظت رنگ ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر، pH برابر با ۹، دوز ازن ۱/۸ لیتر بر دقیقه



نمودار ۳. تاثیر غلظت اولیه رنگ بر کارایی حذف رنگ AB14 در فرآیند ازن زنی کاتالیزوری: pH=۹، دوز کاتالیست ۰/۴ گرم بر لیتر، دوز ازن ۱/۸ لیتر بر دقیقه



نمودار ۴. تاثیر فرآیند ازن زنی کاتالیزوری در حذف COD: غلظت رنگ ۵۰ میلی گرم بر لیتر، pH=۹، دوز کاتالیست ۰/۴ گرم بر لیتر، دوز ازن ۱/۸ لیتر بر دقیقه

به صورت ناهمگن هستند نقش چشمگیری در تجزیه ی ازن و تعیین خصوصیات سطح کاتالیست دارد (۹). طبق نتایج به دست آمده در نمودار ۱، بالاترین میزان حذف در

بحث

در فرآیند ازن زنی کاتالیزوری، pH یک پارامتر کلیدی و موثر است که در سیستم های ازن زنی کاتالیزوری که

مولکول‌های رنگ در غلظت‌های بالا به کندی انجام می‌شود (۲۳). نتایج حاصل از مطالعه‌ی موسوی و همکاران که به بررسی حذف رنگ راکتیو رد ۱۹۸ با ازن‌زنی کاتالیستی با نانوکریستال‌های اکسید منیزیم پرداختند، نتایج حاصل از مطالعه‌ی حاضر را تایید می‌کند (۲۴). مطابق با نتایج حاصل از نمودار ۴، فرایند ازن‌زنی کاتالیزوری با کلسیم پراکساید و دی‌اکسیدتانیوم باعث تجزیه‌ی رنگ و هم‌چنین باعث معدنی شدن آن می‌گردد. با توجه به این موضوع که COD شاخصی جهت تجزیه ترکیبات آلی می‌باشد، بنابراین نتایج نشان می‌دهد که فرایند ازن‌زنی کاتالیزوری باعث تجزیه کامل به جای تجزیه جزئی قسمت عمده‌ای از رنگ می‌گردد. این در حالی است که اکسیدکننده‌های معمول و متداول مانند ازن در برخی موارد سبب افزایش COD یا تجزیه‌ی جزئی آلاینده می‌شوند (۲۳). در مطالعه‌ای که توسط هو و همکاران صورت گرفت پس از گذشت ۶۰ دقیقه، حذف COD در سیستم ازن‌زنی کاتالیزوری ۴۶ درصد گزارش شد (۲۵).

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که فرایند ازن‌زنی کاتالیزوری با $\text{CaO}_2/\text{TiO}_2$ ، راندمان بالایی در کاهش غلظت رنگ دارد و با احتمال بالا می‌تواند به عنوان یک روش کارآمد برای فاضلاب نساجی استفاده گردد. هم‌چنین استفاده از کاتالیست $\text{CaO}_2/\text{TiO}_2$ به دلایلی مانند سازگاری با محیط زیست، پایداری فیزیکی و شیمیایی، دسترسی آسان و هزینه‌ی کم می‌تواند به عنوان یک کاتالیزور موثر و کارآمد جهت فرایند ازن‌زنی کاتالیزوری مورد استفاده قرار گیرد.

تشکر و قدردانی: نویسندگان این مقاله از عوامل دانشگاه علوم پزشکی همدان نهایت تشکر و قدردانی را دارند.

تعارض منافع: نویسندگان هیچ گونه تعارض منافع با یکدیگر ندارند.

حمایت مالی: این مقاله حاصل پروژه دانشجویی بوده و نویسندگان از عوامل دانشگاه علوم پزشکی همدان کمال تشکر و قدردانی را دارند.

ملاحظات اخلاقی: نویسندگان این مقاله تمام نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند.

pH ۹ به دست آمده و راندمان حذف در pH‌های بالاتر و پایین‌تر از این مقدار کاهش پیدا کرده است. در فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته رادیکال‌های هیدروکسیل عامل اکسیداسیون هستند. بنابراین افزایش تولید این عوامل باعث افزایش حذف ترکیبات آلی می‌شوند (۱۷، ۱۸). در شرایط اسیدی تولید رادیکال‌های هیدروکسیل محدود می‌شود ولی شرایط قلیایی منجر به فعال شدن ازن و افزایش تولید رادیکال‌های هیدروکسیل می‌گردد (۱۸). از طرفی کلسیم پراکساید منجر به تولید پراکسید هیدروژن می‌شود. افزایش بیش از حد pH ($\text{pH} > 9$) باعث تبدیل پراکسید هیدروژن به آب و اکسیژن می‌شود. بنابراین OH° (عامل اکسیداسیون) کاهش می‌یابد که باعث کاهش راندمان حذف مواد آلی می‌شود (۱۸). نتایج حاصل از مطالعه‌ی حاضر با نتایج حاصل از مطالعه‌ی اکبری و همکاران در حذف رنگ راکتیو بلاک ۵ در فرایند ازن‌زنی کاتالیزوری هم‌خوانی دارد (۱). هم‌چنین ایرول و همکاران طی مطالعه‌ای به بررسی تاثیر ازن‌زنی کاتالیزوری به وسیله آلومینای باند شده غیرقطبی پرداختند که به دلیل تولید رادیکال‌های هیدروکسیل، حذف رنگ در pH قلیایی بیشتر از اسیدی صورت گرفته است (۱۹).

مطابق با نتایج به دست آمده از نمودار ۲ با افزایش دوز کاتالیست راندمان حذف رنگ افزایش می‌یابد. با افزایش دوز کاتالیست، مساحت سطحی آن افزایش یافته، سایت‌های فعال جهت تجزیه‌ی ازن نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه موجب تولید بیشتر رادیکال هیدروکسیل می‌گردد (۲۰). نتایج حاصل از مطالعه‌ی موسوی و همکاران نشان داد که با افزایش دوز کاتالیست از ۲/۵ به ۲۰ گرم بر لیتر، درصد حذف فنل از ۵۰ به ۹۷ درصد افزایش یافته است (۲۱). هم‌چنین نتایج حاصل از مطالعه‌ی کای و همکاران نشان داد که ارتباط مستقیمی بین دوز کاتالیست و راندمان ازن‌زنی وجود دارد (۲۲). نتایج حاصل از نمودار ۳ نشان داد که با افزایش غلظت اولیه رنگ، راندمان حذف رنگ کاهش می‌یابد. افزایش غلظت رنگ باعث افزایش میزان مولکول‌های رنگ در محیط واکنش می‌گردد. از سویی به دلیل ثابت بودن میزان رادیکال‌های هیدروکسیل که به علت تجزیه‌ی ازن در سطح کاتالیزور شکل می‌گیرند، روند تجزیه و تخریب

سهم نویسندگان: تمام نویسندگان به طور یکسان در اجرا و انجام تحقیق مشارکت داشته‌اند و پژوهش حاضر را مطالعه و تأیید نمودند.

References

1. Akbari S, Ghanbari F, Almasi H, Asgari G. Investigation into catalytic potential of marble powder in catalytic ozonation of reactive black 5. 2017 (In Persian).
2. Parsa JB, Vahidian HR, Soleymani A, Abbasi M. Removal of Acid Brown 14 in aqueous media by electrocoagulation: Optimization parameters and minimizing of energy consumption. Desalination. 2011;278 (1-3):295-302(In Persian). <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.05.040>
3. MT G, MH E. Study of eggshell performance as a natural sorbent for the removal of reactive red 198 dye from aqueous solution. 2011.
4. Hosseini SMP, Chaibakhsh N. Effective removal of Acid Blue 113 dye from industrial effluents using natural coagulant and $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MnO}_2$ in coagulation/ozonation combined treatment system. Journal of Color Science and Technology. 2022;16 (3):211-23(In Persian).
5. Ghaneian M, Ehrampoush M, Ghanizadeh G, Dehvary M, Abootoraby M, Jasemizad T. Application of solar irradiation/ $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ photochemical oxidation process for the Removal of reactive blue 19 dye from aqueous solutions. Iranian Journal of Health and Environment. 2010;3 (2):165-76(In Persian).
6. Bassyouni D, Hamad H, El-Ashtoukhy EZ, Amin N, Abd El-Latif M. Comparative performance of anodic oxidation and electrocoagulation as clean processes for electrocatalytic degradation of diazo dye Acid Brown 14 in aqueous medium. Journal of hazardous materials. 2017;335:178-87. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.04.045> PMID:28458079
7. Aguedach A, Brosillon S, Morvan J. Photocatalytic degradation of azo-dyes

همچنین هر گونه تضاد منافع حقیقی یا مادی که ممکن است بر نتایج یا تفسیر مقاله تأثیر بگذارد را رد می کنند.

reactive black 5 and reactive yellow 145 in water over a newly deposited titanium dioxide. Applied Catalysis B: Environmental. 2005;57 (1):55-62. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2004.10.009>

8. Arslan I, Balcioglu IA, Bahnemann DW. Advanced chemical oxidation of reactive dyes in simulated dyehouse effluents by ferrioxalate-Fenton/UV-A and $\text{TiO}_2/\text{UV-A}$ processes. Dyes and pigments. 2000;47 (3):207-18. [https://doi.org/10.1016/S0143-7208\(00\)00082-6](https://doi.org/10.1016/S0143-7208(00)00082-6)
9. Asgari G, Akbari S, Faradmali J, Almasi H, Daraee Z. Removal of Methylene Blue Dye from Wastewater of Textile Industry in Catalytic Ozonation Process by Pumice Modified by Magnesium Nitrate. Journal of Rafsanjan University of Medical Sciences. 2017;15 (12):1095-106(In Persian).
10. Pirgalioglu S, Özbelge TA. Comparison of non-catalytic and catalytic ozonation processes of three different aqueous single dye solutions with respect to powder copper sulfide catalyst. Applied Catalysis A: General. 2009;363 (1-2):157-63. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2009.05.011>
11. Farzadkia M, Norieh N. Efficiency of aerobic digester for sludge stabilization in Serkan city sewage treatment plant. Avicenna Journal of Clinical Medicine. 2004;10 (4):31-7(In Persian).
12. Nickel K, Neis U. Ultrasonic disintegration of biosolids for improved biodegradation. Ultrasonics Sonochemistry. 2007;14 (4):450-5. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2006.10.012> PMID:17289422
13. Ma Y, Zhang BT, Zhao L, Guo G, Lin JM. Study on the generation mechanism of reactive oxygen species on calcium peroxide by chemiluminescence and

UV-visible spectra. Luminescence: The journal of biological and chemical luminescence. 2007;22 (6):575-80.

<https://doi.org/10.1002/bio.1003>

PMid:17768715

14. Massalimov I, Shayakhmetov A, Mustafin A. Specific features of thermal decomposition of mechanically activated calcium peroxide. Russian Journal of Applied Chemistry. 2010;83:1794-8.

<https://doi.org/10.1134/S1070427210100113>

15. Rismanchian M, Barakat S, Khoshzat N, Keshavarzi R. Investigatethe photocatalytic activity of titanium dioxide combined with the zeolite at safranin dye removal in the water. Journal of Health System Research. 2015;11 (3):659-70(In Persian).

16. Association APH. Standard method for the examination of water and wastewater 17th ed. (ed. by LS Clesceri, AE Greenberg, RR Trussell), Washington DC. 1989.

17. Bali U, Çatakaya EÇ, Şengül F. Photochemical degradation and mineralization of phenol: a comparative study. Journal of Environmental Science and Health, Part A. 2003;38 (10):2259-75.

<https://doi.org/10.1081/ESE-120023373>

PMid:14524680

18. Gholikandi GB, Zakizadeh N, Masihi H. Application of peroxy monosulfate-ozone advanced oxidation process for simultaneous waste-activated sludge stabilization and dewatering purposes: a comparative study. Journal of environmental management. 2018;206:523-31.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.10.070> PMid:29127924

19. Erol F, Özbelge TA. Catalytic ozonation with non-polar bonded alumina phases for treatment of aqueous dye solutions in a semi-batch reactor. Chemical Engineering Journal. 2008;139 (2):272-83.

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.07.100>

20. Rahmani A, Asgar G, Samiee F. Evaluation of performance catalytic

ozonation with activated Alumina in the removal of pentachlorophenol from aqueous solutions and study of the intermediates. Avicenna Journal of Clinical Medicine. 2013;20 (1):77-85(In Persian).

21. Moussavi G, Khavanin A, Alizadeh R. The investigation of catalytic ozonation and integrated catalytic ozonation/biological processes for the removal of phenol from saline wastewaters. Journal of hazardous materials. 2009;171 (1-3):175-81(In Persian).

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.05.113> PMid:19560265

22. Qi F, Xu B, Chen Z, Ma J, Sun D, Zhang L. Influence of aluminum oxides surface properties on catalyzed ozonation of 2, 4, 6-trichloroanisole. Separation and Purification Technology. 2009;66 (2):405-10.

<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2009.01.013>

23. Rahmani A, Asgari G, Barjasteh Askari F, Samadi M, Godini K. Investigation of the catalytic ozonation performance using copper coated zeolite in the removal of reactive red 198 from aqueous solutions. Scientific Journal of Ilam University of Medical Sciences. 2012;21 (3):11(In Persian).

24. Moussavi G, Mahmoudi M. Degradation and biodegradability improvement of the reactive red 198 azo dye using catalytic ozonation with MgO nanocrystals. Chemical Engineering Journal. 2009;152 (1):1-7(In Persian).

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.03.014>

25. Hu E, Wu X, Shang S, Tao X-m, Jiang S-x, Gan L. Catalytic ozonation of simulated textile dyeing wastewater using mesoporous carbon aerogel supported copper oxide catalyst. Journal of Cleaner Production. 2016;112:4710-8.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.127>