

Efficiency of Fenton Process in Removal of Basic Violet 16 (BV16) Dye from Aqueous Solutions

Kermani M¹, Bahrami Asl F², Dehghani A*³

1. Assistant Professor in Department of Environmental Health Engineering, School of public Health, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

2. PhD Student of Environmental Health Engineering, School of public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamedan, Iran

3. M.Sc. in Environmental Health Engineering, School of public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

* *Corresponding author.* Tel: +9886704627 Fax: +982188622707 E-mail: anahita_h662000@yahoo.com

Received: Apr 18, 2015 Accepted: Sep 28, 2015

ABSTRACT

Background & Objectives: Cationic dyes such as basic violet have various applications in different industries. This experimental study was conducted to investigate degradation of basic violet by fenton process.

Methods: To establish cost-efficient operating condition for potential application of fenton oxidation process, the influence of the main operating parameters such as iron sulphate and hydrogen peroxide doses, solution pH, and initial dye concentration have been studied in a laboratory scale.

Results: Complete removal of dye at initial concentration of 30 mg/L was obtained after 8 mins by fenton process. The optimum levels of iron, hydrogen peroxide and pH for complete removal of dye were determined at 0.4 mmol/L, 17 mmol/L, and 3, respectively. Every increase in concentration of dye led to a decrease in degradation rate. The results indicate that 99% decolorization and about 58% reduction in COD are achievable by fenton process. Other finding indicates that kinetic data to follow well the fake second order equation.

Conclusion: Regarding the results of this study fenton process can be used as an effective method to remove basic violet 16 and other resistant dyes from aqueous solutions

Keyword: Basic Violet 16; Advanced Oxidation; Aqueous Solutions.

ارزیابی کارایی فرآیند اکسیداسیون پیشرفته فنتون در تجزیه رنگزای کاتیونی بنفش ۱۶ از محیط‌های آبی

مجید کرمانی^۱، فرشاد بهرامی اصل^۲، آناهیتا دهقانی^{۳*}

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

۲. دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان

۳. کارشناس ارشد مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران

* نویسنده مسئول. تلفن: ۰۲۱ ۸۶۷۰۴۶۲۷ فکس: ۰۲۱ ۸۸۶۲۲۷۰۷ ایمیل: anahita_h662000@yahoo.com

چکیده

زمینه و هدف: رنگزاهای کاتیونی از جمله رنگزای کاتیونی بنفش کاربردهای بسیار زیادی در صنایع مختلف دارند. این مطالعه تجربی به منظور بررسی میزان تجزیه رنگزای کاتیونی بنفش ۱۶ توسط فرآیند فنتون انجام شد. **روش کار:** برای به دست آوردن شرایط عملکرد مقرون به صرفه برای کاربرد فرآیند اکسیداسیون فنتون، تاثیر پارامترهای اصلی مانند میزان سولفات آهن، آب اکسیژنه، pH محلول و غلظت اولیه رنگزا در مقیاس آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که راندمان حذف کامل رنگزا با غلظت اولیه ۳۰ میلی گرم در لیتر توسط فرآیند فنتون بعد از زمان حدود ۸ دقیقه به دست آمد. همچنین مشخص شد که میزان آهن بهینه جهت حذف کامل رنگزا ۰/۴ میلی مول در لیتر، پراکسید هیدروژن بهینه ۱۷ میلی مول در لیتر و میزان pH بهینه ۳ می‌باشد و هرگونه افزایش در غلظت اولیه رنگزا منجر به کاهش سرعت تخریب می‌شود. نتایج نشان داد که با فرآیند فنتون بیش از ۹۹٪ رنگبری و حدود ۵۸٪ کاهش COD قابل حصول می‌باشد. دیگر یافته‌ها نشان داد که داده‌های کینتیکی از معادله درجه دوم کاذب بهتر پیروی می‌کند.

نتیجه گیری: با توجه به نتایج حاصل از این مطالعه می‌توان از فرآیند فنتون به عنوان یک روش موثر جهت حذف رنگزای کاتیونی بنفش ۱۶ و سایر رنگزاهای مقاوم، از محیط‌های آبی استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: رنگزای کاتیونی بنفش ۱۶، فرآیند اکسیداسیون پیشرفته، محیط‌های آبی

پذیرش: ۹۴/۷/۶

دریافت: ۹۴/۱/۲۹

مقدمه

دنیا تولید می‌شوند که تخمین زده شده است ۱۰ تا ۱۵ درصد این رنگزاهای از طریق فاضلاب‌های فرآیندهای مختلف رنگرزی دفع می‌شوند (۴،۲) و حضور مقدار جزئی از رنگزاهای نیز در آب (کمتر از ۱ ppm) به دلیل درخشندگی آنها به خوبی قابل رویت بوده و زیباشناختی آب را تحت تاثیر قرار می‌دهند (۵)، بطوری که برداشت عمومی را از کیفیت آب، نامطلوب می‌سازند. بزرگترین نگرانی محیطی درباره رنگزاهای جذب و انعکاس نوری است که می‌خواهد وارد آب شود، چراکه جذب نور سبب کاهش فتوسنتز

حذف مواد خطرناک از قبیل ترکیبات آروماتیک، فلزات سنگین و رنگزاهای فاضلاب‌های صنعتی یکی از مسائل و نگرانی‌های بزرگ زیست محیطی می‌باشد (۱). رنگزاهای سنتتیک به طور گسترده‌ای در رنگرزی پارچه، به عنوان افزودنی در محصولات نفتی (۲)، پلاستیک سازی، تهیه مواد غذایی، مواد آرایشی، کاغذسازی و تولید فرش (۳) مورد استفاده قرار می‌گیرند. طبق اطلاعات موجود بیش از $10^5 \times 7$ تن و حدود ۱۰۰۰۰ نوع از رنگزاهای و پیگمنت‌ها سالیانه در

علاوه بر این نشان دادند که افزایش آهن و آب اکسیژنه تا حد مشخصی سبب کاهش رنگ می شود و افزایش غلظت پس از آن تاثیری در میزان حذف ندارد (۱۲). راندمان فرایندهای مختلف اکسیداسیون پیشرفته به میزان تولید رادیکالهای آزاد و شدت تماس بین این رادیکالها و ترکیبات آلی بستگی دارد (۱۳). در این روشها رادیکالهای هیدروکسیل تولید شده سبب تجزیه آلایندهای آلی می شود (۱۴). این مطالعه با هدف ارزیابی فرآیند فنتون در حذف رنگزای بازیک بنفش ۱۶ در مقیاس آزمایشگاهی انجام شده است. اثرات پارامترهای بهره برداری مانند pH، غلظت اولیه رنگزا، غلظت پراکسید هیدروژن و غلظت Fe^{2+} بر رنگدایی مورد مطالعه قرار گرفته است و شرایط بهینه به منظور حذف آلاینده، با استفاده از این فرآیندها محاسبه شده است.

روش کار

این مطالعه از نوع تجربی بوده که به منظور بررسی راندمان حذف رنگزای کاتیونی بنفش ۱۶ با استفاده از فرآیند فنتون انجام گردید. مراحل انجام تحقیق به شرح زیر بود:

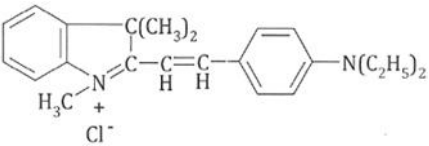
تهیه مواد شیمیایی مورد نیاز

رنگزای مورد استفاده با نام تجاری Basic Violet 16 از شرکت الوان ثابت و بقیه مواد شیمیایی مورد نیاز از شرکت مرک آلمان تهیه گردید. علت انتخاب این رنگ فراوانی مصرف و کاربرد زیاد آن در صنایع نساجی کشور می باشد. ماده اکسید کننده مورد استفاده در این مطالعه پراکسید هیدروژن (H_2O_2) ۳۰٪ بود. ساختار رنگ با فرمول شیمیایی $C_{23}H_{29}CLN_2$ در جدول ۱ نشان داده شده است.

در جلبکها شده و به طور جدی چرخه غذایی را تحت تاثیر قرار می دهد. بایستی به این امر نیز توجه کرد که رنگزها در دماهای بالا و حضور نور، پایدار بوده و می توانند مدت زمان زیادی را در محیط باقی بمانند (۶). رنگزای BV16^۱ در آب بسیار محلول و غیر فرار بوده و در گروه رنگزهای بازیک قرار دارد. رنگ آن بنفش مایل به قرمز روشن است و در دسته رنگزهای کاتیونی- استیلن جای می گیرد. این رنگزا خطرناک و سمی محسوب می شود و اگر توسط انسان و یا حیوانات بلعیده شود، باعث بروز حساسیت، واکنش بر روی پوست و چشم، حمله گاستروآنتریت، حمله تنفسی، سرطان زایی، سمیت برای دستگاه تناسلی و سیستم عصبی خواهد شد (۷). از روشهایی که برای حذف رنگزها استفاده می شود می توان به روشهای فیزیکوشیمیایی، بیولوژیکی و شیمیایی اشاره نمود که روشهایی مانند ترسیب، شناورسازی، تبادل یونی، جذب سطحی (۱)، اکسیداسیون با استفاده از کلر، ازن و یا سایر روشهای پیشرفته اکسیداسیون (۶) مانند الکترواکسیداسیون، فنتون، فتوکاتالیست، ترکیبی از این روشها (الکترو- فنتون، فتو- الکتروکاتالیست) (۵)، روشهای غشایی مانند اسمز معکوس، استخراج حلال (۸)، کاویتاسیون هیدرودینامیک (HC) (۶)، تجزیه بیولوژیکی هوازی، بی-هوازی، انوکسیک و بیوجذب توسط باکتریها و قارچها را شامل می شوند (۱). این فرآیندها فقط قادر به انتقال آلاینده از یک فاز به فاز دیگر می باشند و باعث تولید پسماندهای جامد می شوند. به همین دلیل فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته به منظور حذف و معدنی سازی این رنگزا در دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته است (۱۰،۹،۷). مطالعه مریک و همکاران جهت حذف رنگزای سیاه ۵ نشان داد که با استفاده از فرآیند فنتون می توان ۹۹٪ رنگ و ۷۱٪ معدنی سازی داشت (۱۱). امامی و همکاران با استفاده از فرآیند فنتون موفق به حذف ۹۹٪ از رنگزای قرمز ۱۲۰ در شرایط بهینه شدند،

^۱ Basic Violet 16

جدول ۱. مشخصات و ساختار شیمیایی رنگزای کاتیونی بنفش ۱۶

| | |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| ساختار شیمیایی |  |
| | رنگزای بازیک بنفش ۱۶ (BV16) |
| فرمول شیمیایی | C ₂₃ H ₂₉ CLN ₂ |
| وزن مولکولی (گرم در مول) | ۳۶۸/۵ |
| C. I. number | ۶۳۵۹-۴۵-۱ |
| λ _{max} (nm) | ۵۴۵ |

دست آمده از مراحل مختلف آزمایشات و نتایج حاصل از آنالیز نمونه‌ها و سایر پارامترهای اندازه‌گیری، به کمک نرم افزار Excel مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. هم چنین کینتیک واکنش نیز با معادله درجه دوم کاذب توصیف شد. این معادله به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$t / c_t = 1 / (k_0^2) + t / c_0 \quad (1)$$

که در آن C₀ غلظت اولیه رنگزا (بر حسب میلی گرم در لیتر)، C_t غلظت باقی مانده رنگزا پس از گذشت زمان t و K میزان ثابت سرعت واکنش (بر حسب عکس دقیقه) می‌باشد. به منظور محاسبه راندمان حذف رنگزا از رابطه زیر استفاده شده است:

$$R\% = (C_0 - C_t) / C_0 \times 100 \quad (2)$$

که در آن R% بیانگر میزان حذف رنگزا (بر حسب درصد)، C₀ غلظت رنگ در زمان صفر (بر حسب میلی گرم در لیتر) و C_t غلظت رنگ در زمان t (بر حسب میلی گرم در لیتر) می‌باشد.

یافته ها و بحث

بررسی تاثیر غلظت‌های مختلف H₂O₂

به منظور بررسی تاثیر غلظت‌های مختلف پراکسید هیدروژن، این ماده در غلظت‌های ۱۰ تا ۳۳ میلی‌مول بر لیتر به محلول رنگزا اضافه گردید. در غلظت ۱۷

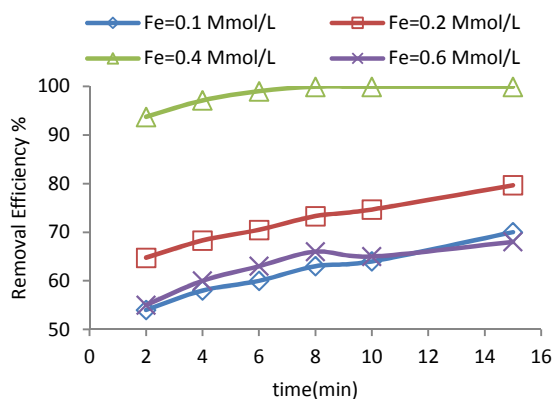
تهیه محلول استوک رنگزای کاتیونی بنفش ۱۶

محلول مادر رنگزای مورد مطالعه (۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر) با استفاده از حل کردن ۱ گرم رنگ در ۱ لیتر آب مقطر تهیه شد. برای جلوگیری از تغییرات غلظت، محلول استوک در یخچال نگهداری شد. میزان pH با استفاده از دستگاه (HQ40d (HACK)) و اضافه کردن اسید سولفوریک در ۳ و ۴/۵ تنظیم شد.

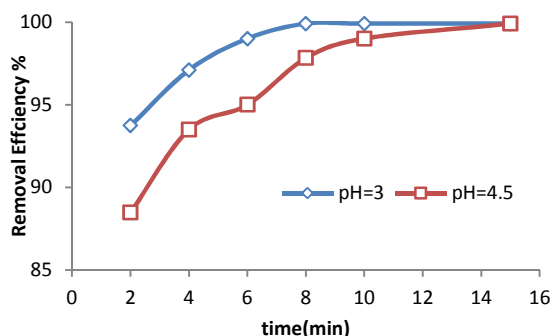
آزمایشات ناپیوسته

عوامل مورد بررسی در این پژوهش شامل مقدار اولیه H₂O₂ (۱۰، ۱۷، ۲۵، ۳۳) میلی‌مول در لیتر، pH اولیه (۴/۵ و ۳)، مقدار اولیه Fe²⁺ (۰/۶، ۰/۴، ۰/۲، ۰/۱) میلی‌مول در لیتر، غلظت اولیه رنگزا (۳۰، ۵۰، ۱۰۰) و زمان تماس ۱ تا ۱۵ دقیقه بود. برای آغاز آزمایشات غلظت ثابت ۳۰ میلی‌گرم در لیتر از رنگزا را تهیه کرده و سپس جهت تعیین غلظت بهینه پراکسید هیدروژن مقادیر ۱۰، ۱۷، ۲۵، ۳۳ میلی‌مول در لیتر به نمونه اضافه شد. بعد از تعیین غلظت بهینه پراکسید هیدروژن، آزمایشات با ثابت نگه داشتن ۳ متغیر و تغییر دادن ۱ متغیر انجام شد. به منظور اندازه گیری میزان رنگ زدایی، نمونه‌ها توسط دستگاه اسپکتروفتومتر UV/VIS (CECIL EC 7400, England) در طول موج ۵۴۵ نانومتر مورد ارزیابی قرار گرفتند. آزمایش COD (اکسیژن مورد نیاز شیمیایی) نیز با استفاده از روش ذکر شده در استاندارد متد محاسبه گردیده است. داده‌های به

انتخاب گردید. شکل ۳ اثر pH را در میزان حذف رنگزا نشان می‌دهد.



شکل ۲. بررسی اثر مقادیر مختلف آهن در حذف رنگزای کاتیونی بنفش ۱۶ در شرایط عمل $pH=3$, $H_2O_2=17\text{mmol/L}$, $C_0=30\text{mg/L}$

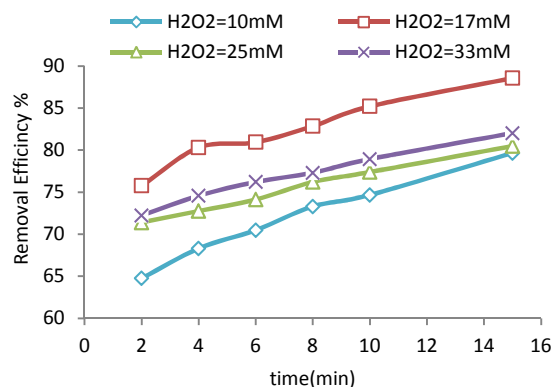


شکل ۳. بررسی اثر مقادیر مختلف pH در میزان حذف رنگزای کاتیونی بنفش ۱۶ در شرایط عمل $H_2O_2=17\text{mmol/L}$, $Fe=0.4\text{mmol/L}$, $C_0=30\text{mg/L}$

بررسی تاثیر غلظت رنگزا

به منظور بررسی تاثیر غلظت‌های مختلف رنگزا، ابتدا مقادیر پراکسید هیدروژن، آهن و pH در شرایط بهینه تنظیم شده و سپس غلظت‌های ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم در لیتر از رنگزا را تهیه کرده و میزان رنگزدایی را در مقادیر بهینه سنجیده شد. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت رنگ میزان حذف رنگ کاهش می‌یابد. شکل ۴ تاثیر غلظت رنگزا را در حذف رنگ نشان می‌دهد.

میلی مول در لیتر از پراکسید هیدروژن که به عنوان غلظت بهینه به دست آمد، راندمان حذف پس از گذشت ۱۰ دقیقه ۸۵٪ به دست آمد. نتایج نشان داد که افزودن بیش از مقدار بهینه پراکسید هیدروژن سبب کاهش راندمان حذف می‌گردد. شکل ۱ اثرات مقادیر مختلف H_2O_2 را در تجزیه رنگزای کاتیونی بنفش ۱۶ نشان می‌دهد.



شکل ۱. اثرات مقادیر مختلف H_2O_2 در میزان تجزیه رنگزای کاتیونی بنفش ۱۶ در شرایط عمل $pH=3$, $C_0=30\text{mg/L}$, $Fe=0.1\text{mmol/L}$

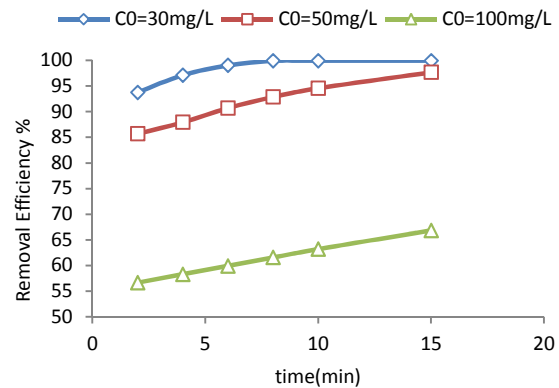
بررسی غلظت‌های مختلف آهن

به منظور بررسی تاثیر غلظت‌های مختلف آهن، ابتدا ۱۷ میلی مول در لیتر پراکسید هیدروژن به محلول اضافه کرده و سپس آهن در غلظت‌های ۰/۱، ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ میلی مول در لیتر به محلول اضافه شد. نتایج نشان داد که در غلظت ۰/۴ میلی مول در لیتر بعد از گذشت ۸ دقیقه میزان حذف رنگزا به ۹۹/۹٪ می‌رسد، لذا این مقدار به عنوان بهینه انتخاب گردید. شکل ۲ اثر غلظت آهن را در حذف رنگزا نشان می‌دهد.

بررسی تاثیر pH

در این مرحله از آزمایشات راندمان حذف رنگزا در pHهای ۳ و ۴/۵ مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که در pH ۳ بعد از گذشت زمان ۸ دقیقه راندمان حذف به بیش از ۹۹/۹٪ رسید. در صورتی در pH ۴/۵ بعد از گذشت زمان ۱۵ دقیقه راندمان حذف به ۹۹/۹٪ رسید. لذا pH ۳ به عنوان بهینه

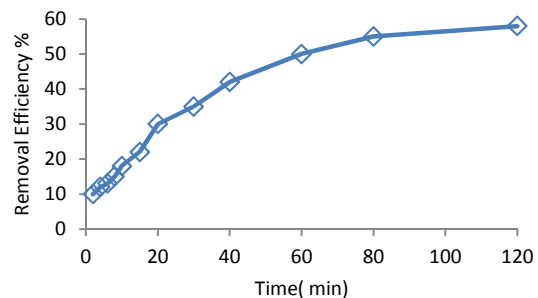
جهت حذف رنگزای کاتیونی بنفش ۱۶، ۱۷ میلی مول در لیتر می‌باشد. افزودن پراکسید هیدروژن به محلول رنگزا سبب افزایش سرعت و میزان رنگبری گردید که به علت تشکیل رادیکال‌های هیدروکسیل بیشتر است، ولی افزایش بیش از حد آن سبب کاهش راندمان می‌شود. انتخاب غلظت مناسب پراکسید هیدروژن از دو جنبه حائز اهمیت است، اول اینکه پراکسید هیدروژن گران است و افزایش بیش از اندازه آن سبب افزایش قیمت تمام شده فرآیند می‌شود. دوم اینکه افزایش بیش از اندازه پراکسید هیدروژن باعث تشکیل رادیکال کم فعال تر هیدروپراکسیل می‌شود و بازده فرآیند اکسیداسیون را کاهش می‌دهد (۱۶). مطالعه رحمانی و همکاران نیز نشان داده است که مقدار بهینه پراکسید هیدروژن جهت حذف رنگزای کاتیونی بنفش ۱۶، ۱۷ میلی مول در لیتر می‌باشد (۱۷). مطالعه ختایی و همکاران در حذف رنگزای اسید آبی ۱۱۳ از آب‌های آلوده نیز نشان داده است افزایش مقدار پراکسید هیدروژن میزان حذف رنگ را افزایش می‌دهد ولی افزایش بیش از حد آن، سبب کاهش راندمان می‌شود (۱۸). که دلیل آن ترکیب مجدد رادیکال‌های هیدروکسیل می‌باشد. پیشرفت تمامی واکنش‌ها در فرآیند فنتون، به صورت قابل توجهی تحت تاثیر pH محیط می‌باشد. در این مطالعه سریعترین فرآیند رنگبری در pH ۳ تعیین شد که این نتیجه مشابه نتایج امامی و همکاران در حذف رنگزای فعال قرمز ۱۲۰ (۱۲)، مریک و همکاران در حذف رنگزای فعال سیاه ۵ (۱۱)، لی و همکاران در حذف رنگ به روش فنتون از فاضلاب کشتارگاه (۱۹) بود. در pHهای بالاتر یا پایین‌تر از مقدار بهینه آهن به صورت لجن از محیط واکنش خارج می‌شود (۱۹، ۱۱). در pHهای بالاتر از ۳ آهن (III) به صورت $Fe(OH)_3$ رسوب می‌کند و سبب تجزیه پراکسید هیدروژن به صورت اکسیژن و آب می‌شود علاوه بر این تشکیل کمپلکس‌های آهن (II) در pHهای بالاتر سبب کاهش غلظت آن در محیط



شکل ۴. تاثیر غلظت‌های مختلف رنگزا در میزان حذف رنگزای کاتیونی بنفش ۱۶ در شرایط عمل $Fe=0.4 \text{ mmol/L}$, $H_2O_2=17 \text{ mmol/L}$ و $pH=3$

بررسی میزان معدنی سازی رنگزا

همان طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، راندمان حذف COD تولیدی توسط رنگزا با استفاده از فرآیند فنتون بعد از گذشت ۱۲۰ دقیقه ۵۸٪ می‌باشد. اگرچه راندمان حذف رنگزا بعد از گذشت ۱۵ دقیقه حدود ۹۹/۹٪ می‌باشد. ولی میزان حذف COD حاصل از رنگ در این زمان حدود ۲۲٪ می‌باشد.



شکل ۷. راندمان حذف COD در شرایط بهینه

کارایی فرآیند فنتون در حذف انواع آلاینده‌ها به چندین عامل مهم از جمله pH، غلظت پراکسید هیدروژن، غلظت یون فرو و غلظت اولیه یون فرو بستگی دارد (۱۵). در این مطالعه نیز اثر هر یک از پارامترهای فوق بر عملکرد فرآیند فنتون در حذف رنگزای کاتیونی بنفش ۱۶ بررسی شده است. در ادامه بر یافته‌های این مطالعه بحث شده است. نتایج این مطالعه نشان داد که میزان پراکسید هیدروژن بهینه

بود، بنابراین سرعت تجزیه در نمونه‌ای با غلظت کم از آلاینده، بیشتر خواهد بود (۲۱).

نتیجه گیری

نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که رنگ BV16، در یک محلول حاوی آهن و پراکسید هیدروژن قابل تجزیه می‌باشد. میزان تجزیه رنگ تحت تاثیر مقدار پراکسید هیدروژن، مقدار آهن، غلظت اولیه رنگ و مدت زمان واکنش می‌باشد. مقدار بهینه پراکسید هیدروژن و آهن در فرایند فنتون به دو عامل یعنی تولید رادیکال‌های هیدروکسیل و واکنش رادیکال‌های هیدروکسیل تولید شده با H_2O_2 بستگی دارد. به طوری که برای 30 mg/L از رنگ مقدار بهینه پراکسید هیدروژن 17 mM و مقدار بهینه آهن 0.4 mM می‌باشد. همچنین نتایج آزمایشات نشان داد که با افزایش رنگ میزان حذف رنگ با ثابت ماندن سایر شرایط به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. شرایط بهینه جهت حذف رنگزای کاتیونی بنفش ۱۶ در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲. شرایط بهینه جهت حذف رنگزا

| | |
|-------------------|----------------------------------------|
| 30 mg/L | غلظت اولیه رنگ |
| ۳ | pH |
| 17 mM | پراکسید هیدروژن |
| 0.4 mM | Fe^{2+} |
| ۴۲ | نسبت مولی بهینه پراکسید هیدروژن به آهن |
| $79/9\%$ | راندمان حذف بعد از گذشت ۱۰ دقیقه |

می‌شود (۲۰). همچنین در $pH=3$ یون‌های آهن (II) به صورت $Fe(OH)^+$ در می‌آیند که محلول بوده و فعالیت بیشتری در فرآیند فنتون از خود نشان می‌دهند (۲۱). علاوه بر این در pH اسیدی رادیکال‌های هیدروکسیل به عنوان یک اکسیدان غالب عمل می‌کنند و خاصیت اکسیدکنندگی بیشتری دارند که باعث افزایش در راندمان حذف رنگزا می‌شود (۲۲). نتایج مطالعه نشان داد که میزان بهینه آهن برای حذف رنگزا 0.4 میلی‌مول در لیتر می‌باشد. در مطالعات مختلف گزارش شده است که کاربرد غلظت‌های بالای یون فرو موجب خود خاموشی رادیکال‌های هیدروکسیل توسط یون‌های Fe^{2+} و راندمان حذف آلاینده را کاهش می‌دهد (۲۴،۲۳). در مطالعه کنگ و هونگ نیز با عنوان بررسی اثر عوامل موثر بر کارایی فرآیند فنتون گزارش شده است که افزایش بیش از اندازه غلظت یون فرو اثر بازدارندگی در تولید رادیکال‌های هیدروکسیل داشته و موجب کاهش سرعت و بازده تخریب مواد آلاینده هدف می‌شود (۲۵). نتایج این مطالعه نشان داد که با افزایش غلظت اولیه رنگزا میزان حذف رنگ کاهش می‌یابد. علت این امر بدین ترتیب توجیه می‌شود که چون در تمامی محلول‌ها مقدار پراکسید هیدروژن، یون فرو و pH یکسان است، در نتیجه تعداد رادیکال‌های هیدروکسیل تولید شده در تمام نمونه‌ها یکسان خواهد

References

- Celekli A, Yavuzatmaca M, Bozkurt H. Kinetic and equilibrium studies on the adsorption of reactive red 120 from aqueous solution on Spirogyra majuscula. Chemical Engineering Journal. 2009;152 (1):139-45.
- Senthilkumaar S, Kalaamani P, Porkodi K, Varadarajan P, Subburaam C. Adsorption of dissolved reactive red dye from aqueous phase onto activated carbon prepared from agricultural waste. Bioresource technology. 2006;97 (14):1618-25.
- Absal G, Asadi M, Kamran S, Sheikhan L, Goltz DM. Removal of reactive red-120 and 4-(2-pyridylazo) resorcinol from aqueous samples by Fe_3O_4 magnetic nanoparticles using ionic liquid as modifier. Journal of Hazardous Materials. 2011.
- Moussavi G, Mahmoudi M. Removal of azo and anthraquinone reactive dyes from industrial wastewaters using MgO nanoparticles. Journal of Hazardous Materials. 2009;168 (2-3):806-12.
- Saharan VK, Badve MP, Pandit AB. Degradation of Reactive Red 120 dye using hydrodynamic cavitation. Chemical Engineering Journal. 2011.

6. Daskalaki VM, Timotheatou ES, Katsaounis A, Kalderis D. Degradation of Reactive Red 120 using hydrogen peroxide in subcritical water. *Desalination*. 2011;274 (1–3):200-5.
7. Merouani S, Hamdaoui O, Saoudi F, Chiha M. Sonochemical degradation of Rhodamine B in aqueous phase: Effects of additives. *Chemical Engineering Journal*. 2010;158 (3):550-7.
8. Arica MY, Bayramoglu G. Biosorption of Reactive Red-120 dye from aqueous solution by native and modified fungus biomass preparations of *Lentinus sajor-caju*. *Journal of Hazardous Materials*. 2007;149 (2):499-507.
9. Gupta V, Carrott P, Ribeiro Carrott M, Suhas. Low-cost adsorbents: growing approach to wastewater treatment—a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2009;39 (10):783-842.
10. Gupta V, Mittal A, Gajbe V, Mittal J. Removal and recovery of the hazardous azo dye acid orange 7 through adsorption over waste materials: bottom ash and de-oiled soya. *Industrial & engineering chemistry research*. 2006;45 (4):1446-53.
11. Meriç S, Kaptan D, Ölmez T. Color and COD removal from wastewater containing Reactive Black 5 using Fenton's oxidation process. *Chemosphere*. 2004;54 (3):435-41.
12. emami.F, tehrani-bagha. A.R, gharanjig.K. Influence of Operational Parameters on the Decolorization of an Azo Reactive Dye (C.I. Reactive Red 120) by Fenton Process. *journal of color science and technology*. 2010; (4):105-114
13. Shemer H, Kunukcu YK, Linden KG. Degradation of the pharmaceutical Metronidazole via UV, Fenton and photo-Fenton processes. *Chemosphere*. 2006;63 (2):269-76.
14. Chen J, Qiu X, Fang Z, Yang M, Pokeung T, Gu F, et al. Removal mechanism of antibiotic metronidazole from aquatic solutions by using nanoscale zero-valent iron particles. *Chemical Engineering Journal*. 2012;181–182 (0):113-9.
15. biglary H, kord mostafapour F, joneidi jafari A, bazrafshan E. Removal of Humic acid from environmental aqueous by Fenton Oxidation Process. *Journal of North Khorasan University of Medical Sciences*. 2013;5 (1):46
16. Sun S-P, Li C-J, Sun J-H, Shi S-H, Fan M-H, Zhou Q. Decolorization of an azo dye Orange G in aqueous solution by Fenton oxidation process: Effect of system parameters and kinetic study. *Journal of Hazardous Materials*. 2009;161 (2):1052-7.
17. Rahmani Z, Kermani M, Gholami M, Jafari AJ, Mahmoodi NM. Effectiveness of photochemical and sonochemical processes in degradation of Basic Violet 16 (BV16) dye from aqueous solutions. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*. 2012;9 (1):1-7.
18. khatyee A, seyeddy K, investigation of fenton process efficient in removal of acid blue dye from contaminated water. *University of Science and Technology*. 2004
19. Lee H, Shoda M. Removal of COD and color from livestock wastewater by the Fenton method. *Journal of Hazardous Materials*. 2008;153 (3):1314-9.
20. Kušić H, Lončarić Božić A, Koprivanac N. Fenton type processes for minimization of organic content in coloured wastewaters: Part I: Processes optimization. *Dyes and pigments*. 2007;74 (2):380-7.
21. Daneshvar N, Khataee A. Removal of azo dye CI acid red 14 from contaminated water using fenton, UV/H₂O₂, UV/H₂O₂/Fe (II), UV/H₂O₂/Fe (III) and UV/H₂O₂/Fe (III)/oxalate processes: A comparative study. *Journal of Environmental Science and Health Part A*. 2006;41 (3):315-28.
22. Tauber A, Schuchmann H-P, von Sonntag C. Sonolysis of aqueous 4-nitrophenol at low and high pH. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2000;7 (1):45-52.
23. Neyens E, Baeyens J. A review of classic Fenton's peroxidation as an advanced oxidation technique. *Journal of Hazardous Materials*. 2003;98 (1):33-50.
24. Sun J-H, Sun S-P, Wang G-L, Qiao L-P. Degradation of azo dye Amido black 10B in aqueous solution by Fenton oxidation process. *Dyes and pigments*. 2007;74 (3):647-52.
25. Kang YW, Hwang K-Y. Effects of reaction conditions on the oxidation efficiency in the Fenton process. *Water Research*. 2000;34 (10):2786-90.