بررسی عملکرد فرایند فعالسازی پرسولفات توسط کربن فعال مغناطیسی در تجزیه بنزوتریازول در محلول آبی

مهدی عمیدنیا[،]، افشین تکدستان^۲، محبوبه چراغی^۱*، بابک کاکاوندی^{۲و،}، رضا جلیل زاده ینگجه ^۱

^۱ گروه مهندسی محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهواز، ایران ۲ مرکز تحقیقات فناوری های محیطی، دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور اهواز، اهواز، ایران ۳ مرکز تحقیقات بهداشت، ایمنی و محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی البرز، کرج، ایران ۶ گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی البرز، کرج، ایران

تاریخ دریافت : ۱٤-۱/۰۷/۱۸ ؛ تاریخ پذیرش : ۱٤-۱/۰۹/۲۰

چکیدہ

زمینه و هدف: اخیراً تلاش های قابل توجهی برای حذف آلاینده های نوظهور از منابع آبی انجام شده است. در این بین، بنزوتریازول به عنوان یک آلاینده نوظهور به طور گسترده در محیط های آبی شناسایی شده است که دارای اثرات بهداشتی و زیست محیطی مخربی می باشد به طوریکه روش های مختلفی به منظور حذف آن ها پیشنهاد شده است. در حال حاضر، استفاده از فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته به عنوان یک روش کارآمد به منظور تخریب و معدنی سازی این آلاینده ها از محلول های آبی توجه زیادی را به خود جلب کرده اند. لذا، در این پژوهش عملکرد فرآیند فعالسازی پرسولفات با استفاده از کاتالیست مغناطیسی اکسید آهن –کربن فعال حاصل از پوست نارگیل در حذف بنزوتریازول و همچنین تأثیر پارامتر های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش ها: این پژوهش، مطالعه ای تجربی- آزمایشگاهی است. در این مطالعه تجربی تأثیر متغیر های مختلفی ازجملـه pH محلول (۲ تا ۱۰)، دوز کاتالیست (۰/۱ تا ۰/۵ گرم بر لیتر)، غلظت پرسولفات و غلظت اولیه بنزوتریازول (۱۰ تا ۵۰ میلـی گـرم بـر لیتر) مورد بررسی قرار گرفت. غلظت نهایی بنزوتریازول با استفاده از دستگاه اسپتکتروفتومتر اندازه گیری شد. همچنین خصوصیات کاتالیست سنتز شده با استفاده از آنالیز های مختلفی شامل EDX ،XRD ،FESEM، BET و VSM مورد بررسی قرار گرفت.

ید بروی بروی و بروی و بروی و می سوی می و یافته ها: نتایج نشان داد که بیشترین کارایی فرآیند در حذف بنزوتریازول در ۹۲ =pH، دوز کاتالیست ۰/۰ گرم بر لیتر، غلظت بهینـه پرسولفات ۳ میلی مولار بود که بیش از ۸۰ درصد بنزوتریازول در غلظت اولیه ۱۰ میلی گرم بر لیتر حذف شد. از طرفی نتـایج آنـالیز ها نشان داد که کاتالیست مد نظر به درستی سنتز شده است و قابلیت استفاده مجدد در ۵ سیکل متوالی را داشت.

نتیجه گیری: بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، فرآیند تلفیقی مورد نظر می تواند کارایی قابل توجهی در حذف آلاینده های آلی داشته باشد.

كليد واژه: اكسيداسيون پيشرفته، بنزوتريازول، پرسولفات، پوست نارگيل، راديكال سولفات

* گروه مهندسی محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهواز، ایران ایمیل نویسنده مسئول: m.cherghi.iau@gmail.com ، شماره تماس : 09163422047

مقدمه

اخیرا آلاینده های نوظهور (ECs) در آب های آشامیدنی شناسایی و به عنوان تهدید بالقوه بر سلامت عمومی در نظر گرفته شده اند ^۱ . از بین این آلاینده ها، بنزوتریازول (BTA)^۲ به دلیل سمیت ذاتی می تواند بر محیط زیست و ارگانیسم ها تأثير منفى بگذارد به طوريكه، BTA مى تواند سبب مهار رشد و تولید مثل گیاهان آبزی و بی مهرگان، تحریک چشم، پوست و دستگاه تنفسی انسان و حیوانات و همچنین جهش زایی و سرطان زایی شود ۲. با توجه به اینکه بنزوتریازول دارای کاربرد های گسترده ای همچون استفاده به عنوان افزودنی های ضد خوردگی، محصولات ضد یخ و شوینده های ماشین ظرفشویی استفاده می شود و تولید سالانه جهانی آن بیش از ۹۰۰۰ تن است، BTA به یک آلاینده فراگیر در محیط های مختلف تبدیل شده است ۳. به طوریکه بر اساس نتايج مطالعات پيشين به طور منظم در فاضلاب هـا، آب هـاي سطحی، آبهای آشامیدنی و آب هایی با هدف استفاده مجدد در غلظت هایی با محدوده نانوگرم بر لیتر در آبهای طبیعی تـا ۱۰۰ میکروگرم در لیتر در فاضلاب پایش شدهاند^٤. لـذا بـا توجه به ویژگیهای شیمیایی این آلاینده و پیامدهای بهداشتی -زیست محیطی ناشی از آن، بکارگیری و استفاده از روش های پیشرفته و موثر در حذف آن ضروری است. به طور کلی فرايندهاي متداول در اين زمينه عمدتاً شامل فوتوكاتاليست °، فوتو فنتون 7، جـذب ۲، فراينـد هـاي غشـائي ۷، روش هـاي الكتروشيمي ۲ و فرايند هاي اكسيداسيون پيشرفته ۸ مي باشند. برخی معایب روش های فوق الذکر شامل انتقال آلاینده از فاز مايع به جامد به ويژه براي فرايند جذب سطحي، توليد لجن، مصرف بالای مواد شیمیایی، عدم تجزیه کامل ترکیبات آلی برای این روش ها ذکر شده است. همچنین بـرای فراینـدهای بيولوژيكي كارامدي پايين در تجزيـه تركيبـات آلـي سـمي و

سخت تجزیه پذیر و صرف زمان بالا و بهره برداری مشکل نیز ارایه شده است ^{۹, ۱۰}. پس می توان نتیجه گرفت که روشهای متداول تصفیه برای حذف ترکیبات آلی به دلیل سمیت بالا و پایداری شیمیایی مؤثر نیستند، از این رو از بین روش های ذکر شده، فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs)^۳ به دلیل غیر انتخابی بودن و پتانسیل ردوکس بالای رادیکال هیدروکسیل (OH[•]) در تخریب مواد آلی پایدار، نسبت به روشهای دیگر برتری دارند ^{۱۱}. در سال های اخیر، فرایند های اکسیداسیون پیشرفته بر پایه رادیکال های سولفات به دلیل راندمان و پایداری نسبتاً بالا و هزینه نسبتاً پایین به طور فزاینده ای مورد توجه قرار گرفته است ^۳ همچنین رادیکال های سولفات در مقایسه با هیدروکسیل پایدارتر، استاهای تر و طول عمر نسبتاً طولانی تری دارد بنابراین امکان فراهم می کند^{۲۱}.

مطالعات قبلی نشان می دهد، پرسولفات (PS) در دمای اتاق توانایی کمی در تجزیه مواد آلی را دارد، در واقع در دمای اتاق سرعت تجزیه کم است، لذا برای تسریع فرآیند اکسیداسیون با پرسولفات لازم است عملیات فعال سازی انجام گیرد ^{۱۲, ۱۲}. برای تولید رادیکال های سولفات، ابتدا باید یک اکسیدان مناسب فعال شود به این ترتیب، پراکسی مونو سولفات (PMS) و پراکسی دی سولفات (PDS)، دو مورد از قوی ترین اکسیدان های مورد استفاده در کاربردهای زیست محیطی هستند. متداولترین روشهای فعالسازی نیز شامل استفاد از کاتالیزورهای فلزی یا غیرفلزی، گرما، VV یا نور می باشد ^{۱۰}. علاوه بر موارد ذکر شده، از کربن فعال نیز به دلیل پایداری، و غیر سمی بودن، سطح ویژه بالا به عنوان یک قرار می گیرد است. اما با ین حال، نتایج مطالعات قبلی نشان

³ Advanced oxidation processes

¹ Emerging contaminants

² Benzotriazole

۴۱۸ 🔶 مجله مهندسی بهداشت محیط، سال نهم، شماره ۴، تابستان ۱۴۰۱

[[] Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-08-01

مىدهد مكانيسمهاى فعالسازى پرسولفات توسط انواع مختلف کربن فعال به طور کامل شناخته نشده است ۲۰. تحقيقات مختلفي در خصوص تجزيه بنزوتريازول با استفاده از انواع فرایند های اکسیداسیون پیشرفته در طی سالیا اخیر مورد بررسی قرار گرفته است. امروزه به کار گیری فرایند اکسیداسیون پیشرفته بر پایه تولید رادیکال هیدروکسیل جهت اکسیداسیون ترکیبات مختلف سمی و پایدار صورت گرفته اما بر اساس دانش اولیه نویسندگان، تا کنون مطالعه ای در ارتباط با تجزیه بنزوتریازول به روش رادیکال سولفات و با استفاده از کاتالیست مغناطیسی نانوذرات اکسید آهن و کربن فعال حاصل از پوست نارگیل صورت نگرفته است. لذا مطالعه حاضر قصد دارد به منظور بهرهگیری از مزایای فرایند پرسولفات و همچنین جداسازی آسان کاتالیست مغناطیسی از محلول، نانو ذرات مغناطیسی اکسید آهن (Fe₃O₄) را بر روی کربن فعال به دست آمده از پسماند های ارزان قیمت (پوست نارگیل) (MNPs-ACC) تثبیت و از آن به عنوان یک کاتالیست هتروژن برای تجزیه بنزو تریازول از محلول های آبی استفاده نماید. همچنین در این مطالعه اثر پارامترهای زمان واکنش، دوز کاتالیست، غلظت اوليه بنزوتريازول، pH، غلظت اوليه پرسولفات بر راندمان حذف آلاينده، سينتيک واکنش، قابليت استفاده مجدد از کاتاليست سنتز شده و آزمایشات مقایسهای نیز مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش کار

مواد شیمایی

این پژوهش یک مطالعه تجربی-کاربردی به منظور بررسی کارایی فرایند اکسیداسیون پیشرفته بر پایه پرسولفات فعال شده با نانوکاتالیست مغناطیسی اکسید آهن-کربن فعال حاصله از پوست نارگیل می باشد که در مقیاس آزمایشگاهی و در آزمایشگاه دانشکده اهواز انجام شد. در این مطالعه بنزوتریازول (C6H5N3) با خلوص ۹۹ درصد به عنوان آلاینده

⁴ Magnetic nanoparticles

هدف، اسید نیتریک (۲۵،HNO₃ درصد) نیترات آهن Fe (NO₃)3.9H₂O) از شرکت مرک–آلمان خریداری شد. تمام مواد خریداری شده دارای درجه خلوص بالا بودند و بدون آماده سازی در آزمایشات مورد استفاده قرار گرفتند. در تمامی آزمایش ها به منظور آماده سازی غلظت های مختلف آلاینده از آب دیونیزه دوبار مقطر استفاده گردید. همچنین کنترل PH با استفاده از محلول های ۱ نرمال از سدیم هیدروکسید و اسید سولفوریک (مرک، آلمان) انجام شد.

سنتز کربن فعال پودری از پوسته نارگیل

به منظور سنتز کربن فعال به دست آمده از پوسته نارگیل، مطابق با مطالعه Aljeboree و همکاران (۲۰۱۷) ۱۷ با کمی تغییرات انجام گردید. به طور خلاصه، نارگیل ابتدا با آب مقطر به منظور خذف ناخالصی ها شسته و سپس در دمای ۱۱۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲۶ ساعت خشک شدند. در مرحله بعدی، یوست نارگیل خشک شده جدا گردید و سیس تا اندازه ذرات بين ١ تا ٢ ميلي متر توسط آسياب الک شدند. در ادامه به منظور فعال سازی کربن فعل از سید سولفوریک استفاده گردید به طوریکه در ابتدا کربنه شدن عامل پیشساز (پوست نارگیل) به وسیله خشک کردن در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۲ ساعت در غیاب هوا با استفاده از کوره انجام گردید. سپس بعد از خارج کردن از موره و خنک شدن، نمونه ی کربنه شده با وزن مشخصی (۲۰گرم) با مقداری اسید سولفوریک (۲۰ گرم) و آب مقطر مخلوط (۱۰۰ میلی لیتر) به مدت ۲٤ ساعت در دمای اتاق غوطه ور شد و بلافاصله در دمای ۱۱۰ درجه سانتی گراد خشک شد. به منظور فرایند فعال سازی کربن دست آمده در در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس به مدت ٤ ساعت نمونه خشک گردید. در نهایت، نمونه آماده شده چندین بار با آب مقطر شسته و سیس در دمای ۱۱۰ درجه سلسيوس خشک گرديد.

مجله مهندسی بهداشت محیط ٬ سال نهم، شماره ۴، تابستان ۱۴۰۱ 🔹 ۴۱۹

به منظور سنتز کاتالیست مغناطیسی اکسید آهن-کربن فعال از روش co-precipitation مطابق مطالعه کاکاوندی و همکاران (۲۰۱٤) استفاده گردید ^{۱۸}. به طور خلاصه، ابتدا مقدار مشخصی از پودر کربن فعال سنتز شده در محلول اسید نیتریک ٦٥ درصد حل نموده و سپس نمونه را به مدت ٣ ساعت و در دمای ۸۰ درجه سلسیوس در داخل حمام التراسونيک به منطور هموژن سازی مناسب محلول قرار گرفت. در مرحله بعد، نمونه ها را با استفاده از فیلتر های کاغذی با کمک پمپ خلاء عبور و سپس مقادیر معینی از نيترات آهن(Fe(N0₃)₃.9H₂O) و ۲۰۰ ميلي ليتر آب مقطر به نمونه اضافه شد و سپس نمونه ها مجددا به دستگاه حمام التراسونيک برای مدت يک ساعت منتقل گرديدند. مجددا نمونه را از فیلتر کاغذی عبور و در نهایت نمونه ها به کوره الکتریکی تحت گاز نیتروژن به مدت ۳ ساعت و در دمای ۷۵۰ درجه سلسیوس قرار داده شدند. پس انجام این مراحل نمونه كاتاليست مغناطيسي سنتز شده را قبل از استفاده بايستي چندین بار با آب مقطر و در مجاورت آهنربای خارجی شستشو داد.

شناسایی مشخصات کاتالیست

به منظور شناسایی ویژگی های کاتالیست سنتز شده از آنالیز های مختلفی استفاده گردید. برای تعیین خصوصیات مغناطیسی کاتالیست سنتز شده و تعیین حضور ذرات اکسید آهن (Fe₃O₄) در ساختار کربن فعال از آنالیز دستگاه مغناطیسی سنج لرزشی (VSM)^ه استفاده شد. آنالیز مورد بررسی قرار گرفت. برای تعیین مساحت سطح ویژه، حجم و اندازه منافذ موجود در سطح MNPs-ACC از آنالیز TBET استفاده شد. خصوصیات و موفورفوژی سطح کامپوزیت سنتز شده نیز با میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی

MNPs-ACC ^۷، بررسی خواصکریستالی ساختار FESEM) (FESEM) از آنالیز XRD ^۸ و همچنین برای شناسایی عناصر موجود در کاتالیست سنتز شده از آنالیز EDX ^۹ استفاده گردید.

فرايند اكسيداسيون كاتاليستى

در این مطالعه فاکتورهای اصلی متغیر مورد مطالعه شامل زمان تعادل فرایند، pH (۲ تا ۱۰)، دوز کاتالیست (۱/۰ تا ۰/۰ گرم در لیتر)، بنزوتریازول (۱۰ تا ۵۰ میلی گرم در لیتر) و پرسولفات سديم (۱ تا ٥ ميلي مولار) مي باشد. در اين مرحله ابتدا آزمایشات مربوط به فرایند جذب بنزوتریازول بر روی MNPs-ACC تحت شرایط خاص (غلظت مشخصی از جاذب و آلاینده، pH خنثی و دمای محیط) برای تعیین و مشخص نمودن زمان تعادل انجام شد به طوریکه در فاصله زمانی های مشخصی، غلظت های باقیمانده بنزوتریازول سنجش و نهایتا زمان تعادل مشخص گردید. سپس میزان حذف بنزوتريازول توسط دو فرايند (MNPs-ACC و UV/PS/MNPs-ACC) تحت شرايط يكسان مورد ارزيابي قرار گرفت. در این پژوهش برای سنجش غلظت های باقیمانده بنزوتریازول از دستگاه اسپتکتروفتوکتر (XIPU Co.) (Chinaدر غلظت ۲۵۹ نانومتر استفاده شد. در فرایند اکسیداسیون پرسولفات از یک لامپ UVC با شدت 7 وات به عنوان منبع نوری استفاده گردید.

نتايج

ویژگی های کاتالیست سنتز شده

تجزیه و تحلیل ویژگیهای فیزیکوشیمیایی نمونههای مختلف به منظور بررسی سطح ویژه کاتالیست MNPs-ACC توسط آنالیز BET بهدست آمد. نتایج حاکی از آن است که سطح ویژه کاتالیست سنتز شده ۵۲۲/۷ متر مربع بر گرم بود. از طرفی توزیع اندازه منافذ نشان میدهد که میانگین قطر

⁷ Field Emission Scanning Electron Microscope

⁸ X-ray Powder Diffraction

⁹ Energy Dispersive X-Ray

⁵ Vibrating sample magnometer

⁶ Brunauer–Emmett–Teller

۴۲۰ 🔶 مجله مهندسی بهداشت محیط، سال نهم، شماره ۴، تابستان ۱۴۰۱

آنالیز EDS شکل ۲-ب نشان داد که هر دو عنصر آهن و اکسیژن در ساختار کامپوزیت سنتز شده ارائه شدهاند. علاوه بر این، یک پیک بلند اختصاص داده شده به کربن نیز در طیف EDS مشاهده گردید که تأیید کننده این موضوع است که محتوای کربن پس از فرآیند مغناطیسی همچنان در سطح کامپوزیت وجود دارد. بر اساس اندازه گیری VSM نمونه (شکل-۳) که یک مشخصه خوب برای نشان داد ماهیت مغناطیسی نانوکاتالیست مغناطیسی مربوط به MNPs-ACC در شد که بیشترین درجه مغناطیسی مربوط به MNPs-ACC در مدود gliیست مغناطیسی مربوط به محاکه شده ساخته شده با استفاده از میدان مغناطیسی خارجی به راحتی از ماتریس آبی قابل جداسازی میباشد. منافذ در محدوده تقریبی ۲ تا ۵۰ نانومتر بوده که نشاندهنده ساختار مزوپور آن بر اساس طبقهبندی IUPAC است. ایزوترم جذب-واجذب کاتالیست نیز ایزوترم نوع IV را ارائه می دهد (شکل ۱) که توسط IUPAC طبقه بندی شده است که ساختارهای مزوپور کاتالیست آماده شده را تایید میکند. مورفولوژی سطح نانوکاتالیست آماده شده است. بر اساس مورفولوژی سطح نانوکاتالیست MNPs-ACC بر اساس انالیز مورفولوژی سطح نانوکاتالیست See منده است. بر اساس مرفولوژی سطح نانوکاتالیست مغناطیسی ۶۵ بر اساس میتز شده رسوب کرده اند. وجود برخی مکانهای واکنش پذیر در ساختار نیز می توان به تخلخل نسبتاً خوب برای چذب آلایندهها نسبت داد. همچنین نتایج تجزیه و تحلیل



شكل **١**. ايزوترم جذب–واجذب N₂ مربوط به MNPs/ACC



شكل Y. الف) تصوير FESEM و ب) EDX مربوط به MNPs-ACC

مجله مهندسی بهداشت محیط، سال نهم، شماره ۴، تابستان ۱۴۰۱ 🔸 ۲۱



شکل ۳. آنالیز VSM مربوط به MNPs-ACC

شکل ٤ نشان داده شده است. همانطوری که از شکل واضح است، بیشترین حذف بنزوتریازول بعد از ۹۰ دقیقه زمان تماس در شرایط pH برابر با ٦ مشاهده شده است.

تاثیر پارامترهای اثر گذار بر عملکرد فرایند اثر pH در این قسمت، اثر پارامتر های مختلفی همچون pH، دوز کاتالیست، غلظت پرسولفات و غلظت اولیه بنزوتریازول بر کارایی سیستم در بازه زمانی ۱۲۰ دقیقه مورد بررسی قرار

گرفته است. تاثیر نتایج تغییرات pH در دامنه ۲ الی ۱۰ در

1 • pH=2 **-** pH=4 0.8 - pH=6 - pH=8 0.6 C₁/C₀ pH=10 0.4 0.2 0 0 20 40 60 80 100 120 Reaction time (min)

شکل ٤. تاثیر pH در زمان های مختلف بر روی عملکرد فرایند MNPs-ACC/PS/UV در شرایط ثابت (دوز کاتالیست: ۳/۰ گرم بر لیتر، غلظت پرسولفات: ۳ میلی مولار و غلظت اولیه بنزوتریازول: ۳۰ میلی گرم بر لیتر)

۴۲۲ 🔶 مجله مهندسی بهداشت محیط، سال نهم، شماره ۴، تابستان ۱۴۰۱

اثر دوز كاتاليست

در این مطالعه اثر تغییرات دوز (۰/۱ تا ۰/۵ گرم بر لیتر) کاتالیست سنتز شده به منظور حذف بنزوتریازول با استفاده از فرایند MNPs-ACC/PS/UV در شکل ۵ نشان داده شده است. بر اساس داده های به دست آمده مشخص گردید که

بیش از تقریبا ۸۰ درصد از حذف BTA زمانی به دست آمد که دوز کاتالیست در حداکثر مقدار (۰/۰ گرم بر لیتر) خود در ۱۲۰ دقیقه تحت شرایط ثابت غلظت اولیه بنزوتریازول: ۳۰ میلی گرم بر لیتر، غلظت پرسولفات: ۳ میلی مول بر لیتر و pH برابر با ٦ باشد.



شکل ۵. تاثیر دوز کاتالیست در زمان های مختلف برروی عملکرد فرایند MNPs-ACC/PS/UV در شرایط ثابت (غلظت اولیه بنزوتریازول: ۳۰ میلی گرم بر لیتر، غلظت پرسولفات: ۳ میلی مولا و pH برابر با ٦)

اثرغلظت اوليه پرسولفات

یکی دیگر از پارامتر های مهم و تاثیر گذار بر فرایند تجزیه آلاینده های آلی غلظت پرسولفات می باشد. لذا نتایج تأثیر غلظت های متفاوت پرسولفات در دامنه ۱ تا ۵ میلی مولار در زمان های مختلف بر فرایند MNPs-ACC/PS/UV در شرایط ثابت دوز کاتالیست: ۲۶۰ گرم بر لیتر، غلظت بنزوتریازول: ۳۰ میلی گرم بر لیتر و PH برابر با ۲) در شکل ۲

نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، زمانی که غلظت پرسولفات از ۱ به ۵ میلی مولار افزایش یافت، راندمان تخریب به طور قابل توجهی از مقادیر کم به بیش تر از ۸۰ درصد افزایش یافت. اما لازم به ذکر است که راندمان تخریب بنزوتریازول زمانی که غلظت پرسولفات از ۳ به ۵ میلی مولار افزایش یافت، راندمان حذف بنزوتریازول دارای افزایش کمی بود.

مجله مهندسی بهداشت محیط ، سال نهم، شماره ۴، تابستان ۱۴۰۱ 🔹 ۴۲۳



شکل ۶. تاثیر غلظت پرسولفات در زمان های مختلف برروی عملکرد فرایند MNPs-ACC/PS/UV در شرایط ثابت (دوز کاتالیست: ۰/٤ گرم بر لیتر، غلظت بنزوتریازول: ۳۰ میلی گرم بر لیتر و pH **برابر با** ۲)

اثرغلظت اوليه بنزوتريازول

چشمگیری با افزایش غلظت BTA کاهش یافت. در این مطالعه، با افزایش غلظت اولیه BTA از ۱۰ به ۵۰ میلیگرم در لیتر، زمانی که مقدار بقیه پارامترها در شرایط بهینه ثابت نگه داشته شد، سرعت حذف BTA بعد از ۹۰ دقیقه زمان واکنش از تقریبا ۸۰ به نزدیک ۲۰ درصد کاهش یافت.

اثرات غلظتهای اولیه BTA (۱۰ الی ۵۰ میلی گرم بر لیتر) بر روی درصد تخریب BTA تحت ثابت بودن بقیه پارامترها (دوز کاتالیست: ۲/۰ گرم بر لیتر، غلظت پرسولفات: ۳ میلی مولار و pH برابر با ٦) در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده نشان داد که که درصد تخریب BTA به طور



شکل ۲. تاثیر غلظت اولیه بنزوتریازول در زمان های مختلف برروی عملکرد فرایند MNPs-ACC/PS/UV در شرایط ثابت (دوز کاتالیست: ٪۰ گرم بر لیتر، غلظت پرسولفات: ۳میلی مولار و pH برابر با ۲)

۴۲۴ 🔶 مجله مهندسی بهداشت محیط، سال نهم، شماره ۴، تابستان ۱۴۰۱

قابليت استفاده مجدد

در این مطالعه، پتانسیل استفاده مجدد از کاتالیست MNPs/ACC به شرح زیر انجام شد: پس از هر چرخه تجزیه کاتالیزوری، کاتالیزور مورد استفاده از محلول واکنش با سانتریفیوژ و آهنربا جمع آوری شد، سپس ۲ تا ۳ بار با اتانول و آب دیونیز شده شستشو داده شد تا ناخالصیهای باقیمانده از بین برود. سپس در دمای ۸۰ درجه سلسیوس به مدت ۸ ساعت خشک گردید. همان مقدار پودر خشک شده برای آزمایشات بعدی استفاده شد. در اینجا، قابلیت استفاده مجدد

کات الیزور برای تخریب BTA با استفاده از سیستم MNPs/ACC/PS/UV برای پنج سیکل متوالی تحت شرایط بهینه سازی شده و مدت زمان ۹۰ دقیقه اعمال شد که نتایج آن در شکل ۸ نشان داده شده است. بر اساس این شکل، مشخص است که راندمان تخریب BTA پس از پنج چرخه متوالی به طور ناچیز از حدود ۸۱/۳۵ به ۳۸/۲۵ درصد کاهش MNPs/ACC به ۳۸/۲۵ درصد کاهش یافته است. به طور کلی، این نتایج تأیید کرد که MNPs/ACC دارای پتانسیل قابلیت استفاده مجدد مناسب است و می تواند چندین بار مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۸. پتانسیل استفاده مجدد از کاتالیست سننز شده MNPs/ACC تحت شرایط بهینه و مدت زمان ۹۰ دقیقه

آزمایشات مقایسه ای

از طرفی، برای روشن شدن بیشتر تاثیر فرآیندهای مختلف بر تخریب BTA، هفت فرآیند PS، VU، کاتالیزور، کاتالیزور /VU، VV/ PS، کاتالیزور/PS، و همچنین ترکیبی از سیستم کاتالیزور/VUV در ۹۰ دقیقه و تحت شرایط ثابت غلظت اولیه آلاینده: ۱۰ میلی گرم بر لیتر، دوز کاتالیست: ۲/۰ گرم بر لیتر و PH اولیه برابر با ۲ مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۹). همانطور که واضح است، PS و VU تأثیر ناچیزی (با ۱۱٫٦٤ و ۱۳٫۹۱٪) بر تخریب BTA داشتند. با این حال، ترکیب

PS/UV منجر به افزایش تخریب BTA به ۵۰٪ شد. پس از آن، هنگامی که کاتالیزور به محلول حاوی BTA تحت تابش اشعه ماوراء بنفش اضافه شد، راندمان حذف سیستم تنها حدود ۲٫۳۵٪ بهبود یافت و به ۵٤٫۳۳ رسید. علاوه بر این، افزودن کاتالیزور و PS اثر سینرژیک قابل اعتمادی داشت به طوری که راندمان تخریب BTA به ۲۳ درصد افزایش یافت. در نهایت سیستم تحت تأثیر کاتالیزور/PS/UV انجام شد و نتایج نشان داد که بیش از ۹۵ درصد AT حذف شده است. به طور کلی، می توان نتیجه گرفت که تابش نور PS یا UV بررسی عملکرد فرایند فعالسازی پرسولفات توسط کربن فعال مغناطیسی در تجزیه بنزوتریازول در محلول آبی

نمی تواند در ایجاد رادیکال های واکنشی کافی باشد. به عنوان مقایسه، ادغام کاتالیزور/UV و کاتالیزور/UV/PS اثر افزایشی را برای تخریب BTA نشان میدهد. نتایج فوق بیانگر تأثیر

مثبت فرآیند یکپارچه سازی نسبت به فرآیندهای جداگانه (تنها UV و کاتالیزور) است.



شکل ۹. مقایسه عملکرد فرایندهای مختلف در حذف BTA تحت شرایط بهینه مختلف بر تجزیه BTA

بحث

بر اساس موارد ذکر شده، به کار گیری فرایند MNPs/ACC/PS/UV تحت تاثیر عوامل مختلفی قرار می گیرد. سرعت واکنش های شیمیایی به pH محیط بستگی داشته و pH محلول به طور مستقیم و غیر مستقیم بر اکسیداسیون مواد شیمیایی تأثیرگذاراست ^{۹۱} . در فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته، تغییرات pH از طریق تولید رادیکال های متنوع بر میزان اکسیداسیون مواد آلی تأثیرگذار است. به طور کلی، زمانی که pH محلول کمتر از پتانسیل زتای کاتالیزور باشد، بار سطحی مثبتی را نشان میدهد که میتواند به جذب بیشتر رادیکاالهای ⁻⁻SOX برای حذف آلاینده کمک</sup> کند ^{۰۲} . از سوی دیگر، مطالعات نشان داده اند که طول عمر رادیکالهای -SO4 و ⁻⁻SOX در محلولهای قلیایی کاهش می باید و بنابراین انتشار نامناسبی از رادیکال به داخل محلول برای

تغییرات PH در حـذف بنزوتریازول از محلول های آبی پرداخته اند. Liu و همکارانش در سال ۲۰۲۰ از نانوذرات Cu پرسولفات در حذف بنزوتریازول پرداختند. در این مطالعه پرسولفات در حذف بنزوتریازول پرداختند. در این مطالعه BTA در Hq اولیه ۷–۵ تقریباً در مدت زمان ۲۱۰ دقیقه کاملا حذف شد ولی با افزایش Hq از ۷ به ۹ راندمان تخریب در همان شرایط به ۸۵ درصد کاهش یافت. در همین حال، مشخص شد که به ترتیب ۳۳ درصد و ۲۳ درصد از BTA در شرایط اسید قوی (PH=۲) و باز قوی (II)=H) تجزیه شد که شرایط اسید قوی (PH=۲) و باز قوی (II)=H) تجزیه شد که برای تخریب BTA در Hq ۵ تا ۹ بود ^{۲۲}. اما مطالعه Ma و این نتایج نشان می دهد مای کا و باز قوی (II)=H) تجزیه شد که برای تخریب BTA در Hq ۵ تا ۹ بود ^{۲۲}. اما مطالعه AM و این نتایج این (۲۰۱۹) که از نانوکمپوزیت مغناطیسی -γ برای تخریب Hq ای در مقادیر مختلف Hq اولیه از ۵/3 تا ۵/۹

غلظت اولیه پرسولفات در محدوده ۱ تا ۵ میلی مولار بر کارایی فرایند MNPs-ACC/PS/UV مورد بررسی قرار گرفت به طوریکه راندمان حذف رابطه مثبتی با افزایش غلظت پرسولفات داشت و بیش از ۸۰ درصد از بنزوتریازول در غلظت های بالا از پرسولفات حذف شد اما لازم به ذکر است افزایش راندمان حذف در غلظت ۳ الی ٦ میل مولار از پرسولفات چندان زیاد نبود. یکی از دلایل اصلی میتواند مربوط به این باشد که خود مصرفی رادیکال و واکنش های جانبی بین رادیکال و پرسولفات دارای نسبت به واکنش های رادیکال-مواد آلی در غلظت نسبتاً بالاتر پرسولفات دارای اولویت باشد ۲۷، لذا در این مطالعه، ۳ میلی مولار به عنوان غلظت بهینه پرسولفات انتخاب شد. در مطالعه Jorfi و همکاران در سال ۲۰۱۷، راندمان حذف بنزوتریازول با استفاده از کاتالیست کربن فعال مغناطیسی عامل دار شدہ با TiO2 به منظور فعال سازي پراكسي مونوسولفات مورد بررسي قرار گرفت. نتایج مطالعـه نشـان داد کـه بـا افـزایش همزمـان دوز كاتاليست و غلظت اوليه پراكسي مونوسولفات، راندمان حذف بنزوتریازول نیز افزایش یافت و در شـرایط بهینـه بـا حـدود ۷۱/٦ درصد تخريب بنزوتريازول همراه بود ". همچنين نتایج مطالعه Ma و همکارانش در سال ۲۰۱۹ نشان داد که نرخ تخریب رنگ رودامین بی با افزایش دوز پرسولفات از ۲۰ میلی گرم در لیتر به ۵۰ میلی گرم در لیتر به طور قابل توجهی افزایش یافت و در دوز بالاتر پرسولفات فقط اندکی تغییر کرد که با نتایج مطالعه حاضر تطابق دارد ۲۳. از طرفی نتایج به دست آمده از داده های مربوط به ارتباط بین کارایی فراینـد و غلظت اوليه BTA نشان داد كه راندمان حذف اين آلاينده دارای ارتباطی معکوس با افزایش غلظت BTA می باشد که این نتایج با داده های به دست آمده از مطالعات پیشین نیز همخواتی دارد. نتایج مطالعه Ma و همکارانش در سال ۲۰۲۱ نشان داد که افزایش غلظت اولیه BTA از ۰/۰۵ به ۲/۰ میلی مولار سبب مهار اکسیداسیون BTA می شود به طوریکه بـرای

دقیقه، راندمان حذف رودامین بی به ترتیب ۹۷/۵، ۲۲٬۹۵،۲/٦ و ۲۳/۸ درصد تحت pH اولیه ۲۵/۵، ۱/۵، ۷ و ۹/۹ بود. دلیل كاهش راندمان با افزایش pH می تواند به خاطر خصوصیات سطحی کاتالیزور و گونه های پرسولفات موجود در محلول باشد ۳۳. دوز کاتالیست از دیگر عوامل مهم و تاثیر گذار بر تغييرات كارايي فرايند MNPs/ACC/PS/UV مرياشد. همانطوری که اشاره گردید، در ایـن مطالعـه رانـدمان حـذف آلاينده بنزوتريازول با افزايش دوز كاتاليست افزايش يافت. یکی از دلایل اصلی افزایش راندمان حذف با افزایش دز كاتاليست مي تواند بـ دليـل افـزايش نـرخ جـذب آلاينـده و مولکولهای پرسولفات در سطح کاتالیزور از طریق مکانیسم های مختلف همجون افزایش سایت های واکنش پذیر باشد ^{۲٤}. به طور کلی، دوز بالای کاتالیزور برای تسریع در فرآیند تجزیه مفید است. به طوریکه Li و همکاران در سال ۲۰۲۰ نشان دادنـد وقتـی کـه دوز کاتالیسـت CoFe₂O4 روی آئروژل های گرافن سه بعدی ۲/۲ گرم در لیتر است، تخریب BTA می تواند در عرض ۲/۵ ساعت به ۱۰۰ درصد برسد با این حال، هنگامی که دوز به ۰/٤ گرم در لیتر افـزایش یافـت، بهبود در تخریب BTA ناچیز بود، که ناشبی از کاهش مکانهای فعال به دلیل تجمع کاتالیست اضافی بود. به همین دلیل دوز کاتالیست بهینه در این مطالعه ۰/۲ گـرم بـر لیتـر در نظر گرفته شد ^{۲۰}. در مطالعه ای دیگر که توسط Li و همکارانش در سال ۲۰۲۰ انجام شد، از کاتالیست آهان و نیتروژن دو په شده با ذغال به منظور فعال سازی پرسولفات در تجزیه آلاینده های آلی استفاده کردند. نتایج مطالعه نشان داد که هم جذب و هم تخریب acid orange با افزایش دوز Fe, N-BC افزایش یافت. به طوریکه در دوز ۱/۰گرم در لیتر از کاتالیست، ٥٨/٥٪ از رنگ در ٩٠ دقیقه حذف شد و هنگامی که دوز به ۲/۰گرم در لیتر افزایش یافت، رانـدمان حـذف نیـز به۹۸/۲۸٪ افزایش یافت که نشان دهنده تاثیر مثبت افزایش دوز كاتاليست در بهبود راندمان حذف آلاينده مي باشد ٢٦.

شرایط تصفیه با دوز پرسولفات یکسان تحت شرایط واکنش یکسان، مقدار کلی رادیکال تولید شده ثابت بود. از طرفی تصفیه فرایند با غلظت بالاتر BTA دارای سهم کمتری از BTA برای اکسیده شدن توسط رادیکال نسبت به مقدار کل BTA دارد، بنابراین می توان نتیجه گرفت که فرایند تصفیه با فلظت های BTA بالاتر معمولاً نرخ تخریب کمتری دارد ^۳. در مطالعه ای دیگر که توسط IL و همکارانش در سال ۲۰۲۰ به این نتیجه رسیدند زمانی که غلظت ATH بیشتر از ۱۰۰ میلی گرم در لیتر باشد، BTA نمی تواند به طور کامل در عرض ۳ ساعت تجزیه شود. با افزایش غلظت ATH به می میلی گرم در لیتر، نسبت تخریب ATH به ۷۳ درصد کاهش میلی گرم در لیتر، نسبت تخریب ATH به ۷۳ درصد کاهش ایفت. همچنین گزارش شده است که در سایر سیستم های اکسیداسیون پیشرفته با افزایش غلظت اولیه، راندمان تخریب آلاینده های آلی کاهش مییابد ^{۲۸}.

نتیجه گیری

در این مطالعه، از کاتالیست مغناطیسی MNPs/ACC با استفاده از یک پیش ساز مقرون به صرفه (پوسته نارگیل و

- Ahmadi M, Rahmani K, Rahmani A, Rahmani H. Removal of benzotriazole by Photo-Fenton like process using nano zero-valent iron: response surface methodology with a Box-Behnken design. Polish Journal of Chemical Technology 2017;19(1): 104--12.
- 7. Wang S, Pei S, Zhang J, et al. Flow-through electrochemical removal of benzotriazole by electroactive ceramic membrane. Water Research 2022;218: 118454.
- Roshani B, Leitner NKV. Effect of persulfate on the oxidation of benzotriazole and humic acid by e-beam irradiation. Journal of Hazardous Materials 2011;190(1-3): 403-8.
- Jaafarzadeh N, Kakavandi B, Takdastan A, et al. Powder activated carbon/Fe 3 O 4 hybrid composite as a highly efficient heterogeneous catalyst for Fenton oxidation of tetracycline: degradation mechanism and kinetic. RSC Advances 2015;5(103): 84718-28.
- Jonidi Jafari A, Kakavandi B, Jaafarzadeh N, et al. Fenton-like catalytic oxidation of tetracycline by AC@Fe3O4 as a heterogeneous persulfate activator:

نیترات آهن) برای فعال سازی پرسولفات در تجزیه BTA تحت سیستم MNPs/ACC/PS/UV مورد استفاده قرار گرفت. سیستم اعمال شده عملکرد فوق العاده ای را برای تخریب BTA نشان داد به طوریکه مهم ترین نتایج مطالعه حاضر به شرح زیر می باشد:

• همه ویژگی های کاتالست تهیه شده تایید کردند که این کاتالیست به طور مطلوب سنتز شده است.

• شرایط اسیدی نزدیک به خنثی (pH برابر بـا ٦) بهتـرین عملکرد را برای فعالسازی PS نشان داد.

 بالاترین راندمان تجزیه (تا ۸۰٪) در ۹۰ دقیقه در دوز کاتالیست: ۶/۰ گرم در لیتر، غلظت PS برابر با ۳ میلی مول، pH برابر با ٦، غلظت اولیه آلاینده برابر با ۱۰ میلی گرم در لیتر به دست آمد.

قدردانی و تشکر

نویسندگان مقاله از حمایت مالی مرکز تحقیقات فناوریهای محیطی دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور اهواز کمال تشکر را دارند.

References

- Ghanbari F, Khatebasreh M, Mahdavianpour M, Lin K-YA. Oxidative removal of benzotriazole using peroxymonosulfate/ozone/ultrasound: Synergy, optimization, degradation intermediates and utilizing for real wastewater. Chemosphere 2020;244: 125326.
- Deng J, Li X, Wei X, et al. Sulfamic acid modified hydrochar derived from sawdust for removal of benzotriazole and Cu (II) from aqueous solution: Adsorption behavior and mechanism. Bioresource Technology 2019;290: 121765.
- 3. Ma J, Ding Y, Chi L, et al. Degradation of benzotriazole by sulfate radical-based advanced oxidation process. Environmental technology 2021;42(2): 238-47.
- Bahnmüller S, Loi CH, Linge KL, et al. Degradation rates of benzotriazoles and benzothiazoles under UV-C irradiation and the advanced oxidation process UV/ H2O2. Water research 2015;74: 143-54.
- Xu J, Li L, Guo C, et al. Removal of benzotriazole from solution by BiOBr photocatalysis under simulated solar irradiation. Chemical Engineering Journal 2013;221: 230-7.

۴۲۸ 🔶 مجله مهندسی بهداشت محیط، سال نهم، شماره ۴، تابستان ۱۴۰۱

Adsorption and degradation studies. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 2017;45: 323-33.

- 11. Jorfi S, Kakavandi B, Motlagh HR, et al. A novel combination of oxidative degradation for benzotriazole removal using TiO2 loaded on FeIIFe2IIIO4@ C as an efficient activator of peroxymonosulfate. Applied Catalysis B: Environmental 2017;219: 216-30.
- 12. Oh W-D, Lua S-K, Dong Z, Lim T-T. A novel threedimensional spherical CuBi 2 O 4 consisting of nanocolumn arrays with persulfate and peroxymonosulfate activation functionalities for 1 H-benzotriazole removal. Nanoscale 2015;7(17): 8149-58.
- Hasanbeiki A, Hasanbeiki O. Evaluation The Performance of 4-Chlorophenol Removal from Contaminated Waters Using a Monopolar Electrochemical Cell. Journal of Jiroft University of Medical Sciences 2015;1(1): 37-48.
- Oturan MA, Sirés I, Oturan N, et al. Sonoelectro-Fenton process: a novel hybrid technique for the destruction of organic pollutants in water. Journal of Electroanalytical Chemistry 2008;624(1-2): 329-32.
- Giannakis S, Lin K-YA, Ghanbari F. A review of the recent advances on the treatment of industrial wastewaters by Sulfate Radical-based Advanced Oxidation Processes (SR-AOPs). Chemical Engineering Journal 2021;406: 127083.
- 16. Yao C, Zhang Y, Du M, et al. Insights into the mechanism of non-radical activation of persulfate via activated carbon for the degradation of p-chloroaniline. Chemical Engineering Journal 2019;362: 262-8.
- Aljeboree AM, Alshirifi AN, Alkaim AF. Kinetics and equilibrium study for the adsorption of textile dyes on coconut shell activated carbon. Arabian journal of chemistry 2017;10: S3381-S93.
- 18. Kakavandi B, Esrafili A, Mohseni-Bandpi A, et al. Magnetic Fe3O4@ C nanoparticles as adsorbents for removal of amoxicillin from aqueous solution. Water science and technology 2014;69(1). ΔΔ-ΥΨΥ:
- Rahmani A, Asgari G, Leili M, Aazami Gilan R. Degradation of methylene blue dye using fenton/ photofenton-peracetic acid (UV/Fe3+-CH3COOH- H2O2) processes from aqueous solutions. Journal of Mazandaran University of Medical Sciences 2017;27 (153:95-111).

- V. Chandra JP, Y. Chun, J.W. Lee, I.C. Hwang, K.S. Kim. Water-dispersible magnetite-reduced graphene oxide composites for arsenic removal. Acs Nano 2010;4.
- 21. Z. Li ZC, J. Fang, C. Shang. Bromate formation in bromide-containing water by the cobalt-mediated activation of peroxymonosulfate: Roles of sulfate radicals and Co(III). Acs National Meeting & Exposition 2014.
- 22. Liu Y, Guo W, Guo H, et al. Cu (II)-doped V2O5 mediated persulfate activation for heterogeneous catalytic degradation of benzotriazole in aqueous solution. Separation and Purification Technology 2020;230: 115848.
- Ma Q, Zhang X, Guo R, et al. Persulfate activation by magnetic γ-Fe2O3/Mn3O4 nanocomposites for degradation of organic pollutants. Separation and Purification Technology 2019;210: 335-42.
- 24. Oh W-D, Lua S-K, Dong Z, Lim T-T. Performance of magnetic activated carbon composite as peroxymonosulfate activator and regenerable adsorbent via sulfate radical-mediated oxidation processes. Journal of hazardous materials 2015;284: 1-9.
- 25. Li X, Liu Z, Zhu Y, et al. Facile synthesis and synergistic mechanism of CoFe2O4@ three-dimensional graphene aerogels towards peroxymonosulfate activation for highly efficient degradation of recalcitrant organic pollutants. Science of The Total Environment 2020;749: 141466.
- 26. Li X, Jia Y, Zhou M, et al. High-efficiency degradation of organic pollutants with Fe, N co-doped biochar catalysts via persulfate activation. Journal of Hazardous Materials 2020;397: 122764.
- Guan K, Zhou P ,Zhang J, Zhu L. Catalytic degradation of Acid Orange 7 in water by persulfate activated with CuFe2O4@ RSDBC. Materials Research Express 2020;7(1): 016529.
- Li X, Zhang D, Liu Z, et al. Enhanced catalytic oxidation of benzotriazole via peroxymonosulfate activated by CoFe2O4 supported onto nitrogen-doped three-dimensional graphene aerogels. Chemical Engineering Journal 2020;400: 125897.

مجله مهندسی بهداشت محیط، سال نهم، شماره ۴، تابستان ۱۴۰۱ ♦ ۴۲۹

Investigating of the performance of persulfate activation process by magnetic activated carbon in the decomposition of benzotriazole in aqueous solution

Mehdi Amidnia¹, Afshin Takdestan², Mahboubeh Cheraghi^{1*}, Babak Kakavandi^{3, 4}, Reza Jalilzadeh yengejeh¹

¹ Department of Environmental Engineering, Islamic Azad University, Ahvaz Branch, Iran
² Environmental Technologies Research Center, Ahvaz Jundishapur University of Medical Sciences, Ahvaz, Iran
³ Research Center for Health, Safety and Environment, Alborz University of Medical Sciences, Karaj, Iran
⁴ Department of Environmental Health Engineering, Alborz University of Medical Sciences, Karaj, Iran

* m.cherghi.iau@gmail.com Received: 28 June 2022 ; Accepted: 1 August 2022

ABSTRACT

Background and Objective: Recently, significant efforts have been performed for the removal of various emerging pollutants (EPs) from water sources. Among these EPs, benzotriazole has been widely identified in aquatic environments, which has harmful health and environmental effects, so it is necessary to apply various methods to remove it. Up to date, the use of advanced oxidation processes (AOPs) as an efficient method for the degradation and mineralization of EPs pollutants from aqueous solutions has attracted so much attention. Therefore, in this research, the performance of the persulfate activation process using magnetic nanocatalyst iron oxide-activated carbon prepared from coconut shell for the removal of benzotriazole from aqueous solution, and also the effect of different parameters have been investigated.

Materials and Method: This research is an experimental-laboratory study. The effect of various variables such as solution pH (2-10), catalyst dose (0.1-0.5 g/L), persulfate concentration (1-5 mM), and initial concentration of benzotriazole (10-50 mg/L) was investigated. The final concentration of benzotriazole was measured using a spectrometer. Also, the characteristics of the synthesized catalyst were investigated using numerous analyzes such as BET, FESEM, XRD, EDX and VSM, and

Results: The results showed that the highest efficiency of the process for the removal of benzotriazole was attained at pH: 6, initial concentration: 10 mg/L, catalyst dosage: 0.5 g/L, persulfate concentration: 3 mM, and more than 80% of benzotriazole was removed. On the other hand, the results of catalyst characterization showed that the catalyst was perfectly synthesized and could be reused in five consecutive cycles.

Conclusion: Based on the results of this research, this catalyst had a high performance for the removal of organic pollutants from aqueous solution.

Keywords: advanced oxidation, benzotriazole, persulfate, coconut shell, sulfate radical

http://jehe.abzums.ac.ir