BRIEF REPORT

Degradation of 4-chlorophenol by sunlight using catalyst of zinc oxide

Ramazan-Ali Dianati-Tilaki[1],
Mohammad-Ali Zazoli[1],
Jamshid Yazdani[2],
Mahdieh Alamgholilu[3],
Ehsan Rostamali[3]

[1] Associate Professor, Department of Environmental Health Engineering, Health Sciences Research Center, School of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran
[2] Assistant Professor, Department of Biostatistics, School of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran
[3] MSc Student of Environmental Health Engineering, Student Research Committee, School of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran

(Received November 30, 2013; Accepted February 23, 2014)

Abstract

Background and purpose: Chrophenols represent one of the most abundant toxic compounds of industrial which are resistant to biodegradation and persist in the environment for long time. Sunlight is the source of many photochemical reactions. The present study aimed to determine degradation of 4-chlrophenol as persistent organic compound by sunlight in the presence of zinc oxide as a catalyst.

Materials and methods: This study was performed in batch conditions. Determined amount of catalyst was added to defined volume of 4-chlorophenol solution which was adjusted pH. Effects of parameters such as ZnO loading, PH, and contact time were investigated. The remaining concentrations of 4-chlorophenol were analyzed by HPLC (high-performance liquid chromatography).

Results: The results showed that sunlight in present of zinc oxide as nanocatalyst lead to almost 75% degradation of 4-chlorophenol in optimum conditions (zinc oxide loading = 1.5 g/l, alkalin pH). Zinc Oxide loses photocatalytic property in acidic pH.

Conclusion: Sunlight using catalyst of zinc oxide lead to degradation of persistent organic compounds significantly. The catalyst is not consumed and reusable.

Keywords: 4-chlorophenol, sunlight, decomposition

J Mazand Univ Med Sci 2014; 23(Suppl 2): 196-201 (Persian).

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2025-10-18]

گزارش کوتاه

مجله دانشگاه علوم پزشکی مازندران
دوره بیست و سوم ویژه‌نامه ۲ اسفند سال ۱۳۹۲ (۲۰۱-۱۹۶)

تجزیه ۴-کلروفنل به وسیله نور خورشید با استفاده از کاتالیزور اکسید روی

رمضانعلی دیانتی تیلکی[۱]
محمدعلی ززولی[۱]
جمشید یزدانی[۲]
مهدیه علم قلیلو[۳]
احسان رستمعلی[۳]

چکیده

سابقه و هدف: کلروفنل‌ها یکی از فراوان‌ترین ترکیبات سمی صنایع هستند که نسبت به تجزیه بیولوژیکی مقاوم و مدت زمان طولانی در محیط پایدار می‌مانند. نور خورشید به عنوان یک منبع قادر است انرژی موردنیاز بسیاری از واکنش‌های فتوشیمیایی را تأمین نماید. هدف از این تحقیق، تعیین میزان تجزیه ترکیب آلی مقاوم ۴-کلروفنل به وسیله نور خورشید در حضور اکسید روی به عنوان کاتالیزور بود.

مواد و روش‌ها: مطالعه حاضر به صورت ناپیوسته انجام گرفت. حجم مشخصی از محلول ۴-کلروفنل پس از تنظیم pH همراه با مقادیر معینی از کاتالیزور به ظروف شیشه‌ای درب‌دار ریخته شد تا فرایند تجزیه در ساعات میانی روز زیر تابش مستقیم نور خورشید انجام گیرد. برای تماس مؤثر بین کاتالیزور و محلول، از دستگاه همزن استفاده گردید. در این مطالعه تأثیر عواملی مانند دوز کاتالیزور، pH و زمان تماس بررسی شد. برای تعیین غلظت باقی‌مانده ۴-کلروفنل، دستگاه HPLC (High-performance liquid chromatography) مورد استفاده قرار گرفت.

یافته‌ها: نور خورشید با استفاده از نانوکاتالیزور اکسید روی در شرایط بهینه به دست آمده (دوز کاتالیزور ۱/۵ گرم بر لیتر و pH قلیایی) قادر به حذف نزدیک به ۷۵ درصد ۴-کلروفنل بود. در مقادیر pH اسیدی، نانوذره اکسید روی خاصیت فتوکاتالیزوری خود را از دست می‌دهد.

استنتاج: خورشید به عنوان منبع انرژی در حضور کاتالیزور می‌تواند منجر به کاهش قابل ملاحظه آلاینده آلی مقاوم ۴-کلروفنل گردد. کاتالیزور مصرف نمی‌شود و قابل استفاده مجدد است.

واژه‌های کلیدی: نور خورشید، ۴-کلروفنل، تجزیه

مقدمه

کلروفنل‌ها در پالایشگاه‌ها و صنایع پتروشیمیایی، صنایع دارویی و تولید حشره‌کش‌ها و علف‌کش‌ها، صنایع تولید کننده عوامل ضد میکروبی محیط و حفاظت از چوب و... کاربرد دارند و وارد محیط زیست می‌شوند (۳-۱). کلروفنل‌ها به شدت توسط رسوبات رودخانه‌های پذیرنده جذب می‌شوند و بنابراین با ورود به منابع آب و جذب در رسوبات کف برای مدت‌های طولانی در محیط پایدار باقی می‌مانند (۴). ۴-کلروفنل با فرمول شیمیایی C_6H_5ClO یکی از مشتقات فنل است که از طریق منابع مختلف وارد محیط می‌شود و اثرات سوء متعددی ایجاد می‌کند. اثرات سمی ترکیبات فنلی روی انسان شامل استفراغ، دشواری در بلع، کم‌اشتهایی، صدمات

مولف مسئول: مهدیه علم قلیلو- ساری: بلوار ولی‌عصر، جنب مجتمع طوبی، خوابگاه نسیبه. E-mail: alam.mah67@yahoo.com

۱. دانشیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، مرکز تحقیقات علوم بهداشتی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران
۲. استادیار، گروه آمار زیستی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران
۳. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۹/۹ تاریخ ارجاع جهت اصلاحات: ۱۳۹۲/۱۱/۲ تاریخ تصویب: ۱۳۹۲/۱۲/۴

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2025-10-18]

کلیوی و کبدی و آسیب‌های ذهنی می‌باشد. بیشترین حد مجاز غلظت مشتقات فنل در آب آشامیدنی بر اساس استاندارد اتحادیه اروپا برابر با ۰/۵ میکروگرم بر لیتر و در استاندارد آمریکا ۱ میکروگرم بر لیتر تعیین شده است (۷-۵).

با توجه به محدودیت‌های موجود در روش‌های دیگر تصفیه مانند کارایی تجزیه بسیار کم در روش‌های بیولوژیکی و نیاز به مواد و روش‌های پیچیده و هزینه بالا، لزوم یافتن روش‌های ارزان‌تر و سازگارتر با محیط زیست مورد توجه محققان قرار گرفته است (۹، ۸). نانوذرات اکسید روی (ZnO) ترکیبی ارزان، ایمن و سالم با ویژگی جذب پرتو الکترومغناطیسی در طول موج بالا و نزدیک نور مرئی می‌باشد. این کاتالیست دارای باند گپ ۳/۲ الکترون ولت است و تحت تابش پرتو در محدوده طول موج ۴۰۰-۲۰۰ نانومتر، حتی در طول نور مرئی قابل تحریک است. این ماده در محدوده طول موج ۳۸۵-۳۶۰ نانومتر، بیشترین میزان جذب را نشان می‌دهد (۹). بزرگ‌ترین مزیت اکسید روی این است که بخش بزرگی از طیف خورشیدی را جذب می‌کند و جذب کوانتوم نور بیشتری را نسبت به دیگر نانوذرات متداول مانند TiO_2 دارد (۱۰). هدف از تحقیق حاضر، تعیین تجزیه ماده آلی مقاوم ۴-کلروفنل در محیط‌های آبی به وسیله نور خورشید در حضور نانوذره اکسید روی و تأثیر پارامترهای مختلف بر این فرایند بود.

مواد و روش‌ها

درصد خلوص ۹۹ درصد، اندازه ذرات ۳۰-۱۰ نانومتر، سطح ویژه ۶۰-۲۰ مترمربع در گرم، چگالی ۵/۶۰۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب، رنگ سفید مایل به زرد و شکل نزدیک به کروی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نانوذره اکسید روی بود. تصویر شماره ۱، نمایی از نانوذره اکسید روی در میکروسکوپ الکترونی روبشی (Scanning electron microscope یا SEM) را نشان می‌دهد.

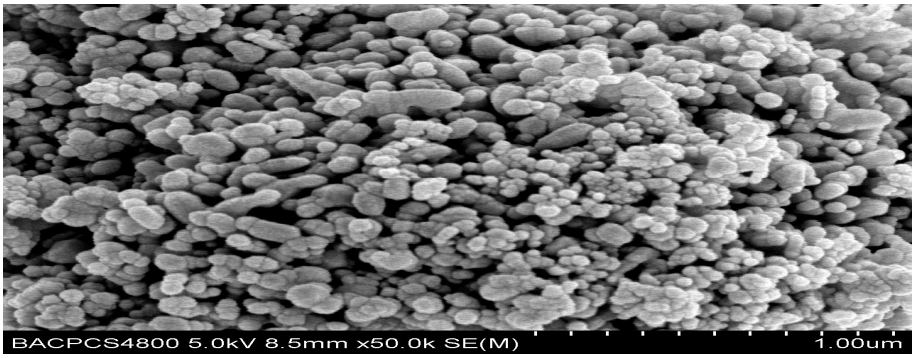
برای انجام آزمایش‌ها، محلول ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر ۴-کلروفنل (مطابق با بیشترین مقدار تخلیه در فاضلاب‌های صنعتی) تهیه شد (۱۱). از این محلول ۵۰ میلی‌لیتر در ظروف شیشه‌ای درب‌دار ریخته، مقادیر مشخصی از کاتالیست به آن‌ها اضافه شد تا فرایند زیر تابش مستقیم نور خورشید انجام گیرد. برای تماس مؤثر بین کاتالیست و محلول از دستگاه همزن استفاده شد. قبل از شروع فرایند، محلول تهیه شده به مدت ۳۰ دقیقه در محیط تاریک هم زده شد تا به تعادل برسد (۹). آزمایش‌ها در مرداد سال ۱۳۹۲ از ساعت ۱۰:۳۰ صبح تا ۱۵:۳۰ بعدازظهر در شهر ساری و در محل دانشگاه علوم پزشکی مازندران انجام گرفت. پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق شامل دوز کاتالیست (۳-۰/۰۵ گرم بر لیتر)، pH (برابر با ۵، ۷، ۹ و ۱۱) و زمان تماس (۳۰۰-۱۵ دقیقه) بود. در زمان‌های مختلف از محلول نمونه برداشته شد و به مدت ۳۰ دقیقه در دستگاه سانتریفوژ با قدرت ۱۴۰۰ دور در دقیقه قرار گرفت و سپس با فیلتر غشایی سرنگی ۰/۲ میکرون فیلتر گردید. تحلیل غلظت‌های استاندارد و مجهول توسط دستگاه HPLC (Knauer HPLC instrument) (High-performance liquid chromatography) با فاز معکوس و ستون C_{18} فاز متحرک ۳۰ درصد آب و ۷۰ درصد استونیتریل و دتکتور UV (Ultraviolet) در طول موج ۲۸۰ نانومتر صورت گرفت. نمایی از رآکتور مورد استفاده در این آزمایش در تصویر شماره ۲ آمده است.

یافته‌ها و بحث

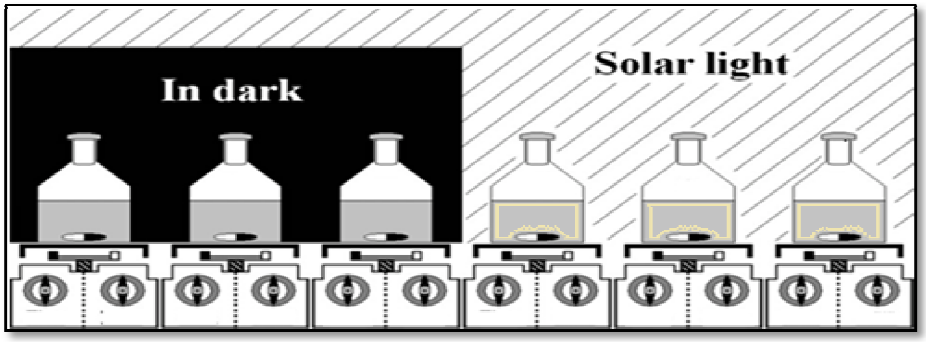
اثر دوز نانوذره اکسید روی بر کارایی حذف ۴-کلروفنل

مقدار کاتالیست عامل مهمی در فرایند فتوکاتالیستی است. برای تعیین دوز بهینه ZnO، مقادیر مختلف کاتالیست (۳-۰/۰۵ گرم بر لیتر) در pH خنثی به محلول حاوی ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر ۴-کلروفنل اضافه شد. نمودار شماره ۱ نشان می‌دهد که با افزایش دوز کاتالیست، کارایی حذف افزایش می‌یابد و زمانی که به مقدار ۱/۵ گرم در لیتر می‌رسد، کارایی حذف نیز به بیشترین میزان خود (۷۰ درصد) می‌رسد؛ ولی با افزایش دوز کاتالیست از مقدار ۱/۵ گرم بر لیتر، کارایی تا حدودی کاهش یافت که می‌تواند به دلیل کدورت ایجاد شده توسط خوشه‌های کاتالیست باشد و موجب کاهش نفوذ پرتو خورشید و افزایش اثر پراکندگی نور خورشید می‌گردد (۱۳، ۱۲).

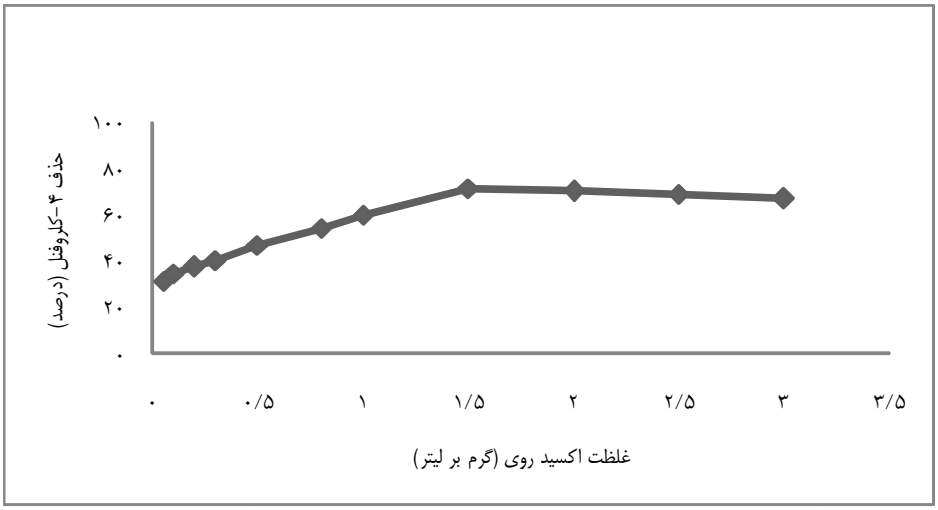
[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2025-10-18]



تصویر شماره ۱: نمای SEM (Scanning electron microscope) نانوذره اکسید روی



تصویر شماره ۲: روش انجام آزمایش‌ها



نمودار شماره ۱: راندمان حذف ۴-کلروفنل طی فرایند Sunlight/ZnO در دوزهای مختلف اکسید روی
(زمان: ۵ ساعت، غلظت اولیه ۴-کلروفنل: ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و pH خنثی)

در تحقیقی که به منظور تجزیه ماده ۴-کلروفنل با غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر با استفاده از نور خورشید در حضور کاتالیزور دی‌اکسید تیتانیوم به میزان ۱ گرم بر لیتر انجام شد؛ بیشترین راندمان تجزیه ۸۰ درصد و در مدت زمان تماس ۴ ساعت گزارش گردید (۲). در تحقیق دیگری که درباره اکسیداسیون فتوکاتالیستی ۴-کلروفنل تحت تابش نور مرئی با استفاده از کاتالیزور سنتزی اکسید لانتانیوم- اکسید تیتانیوم به نسبت‌های مختلف انجام شد، راندمان تجزیه بین ۸۰-۴۰ درصد بسته به نوع ترکیب درصد کاتالیست حاصل شد (۱۴). در پژوهشی به منظور تصفیه فاضلاب حاوی ۴۰۰ میلی‌گرم بر لیتر ماده ۴-کلروفنل، روش تلفیقی فتوکاتالیستی با استفاده از نور UV و بیولوژیک انجام شد و

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2025-10-18]

قبل از تصفیه بیولوژیک روش تجزیه فتوکاتالیستی با استفاده از کاتالیزور TiO_2 در دوزهای ۶-۱ گرم بر لیتر مورد آزمایش قرار گرفت که راندمان‌های حذف از ۷۵-۶۰ درصد بسته به غلظت کاتالیست به دست آمد (۱۵).

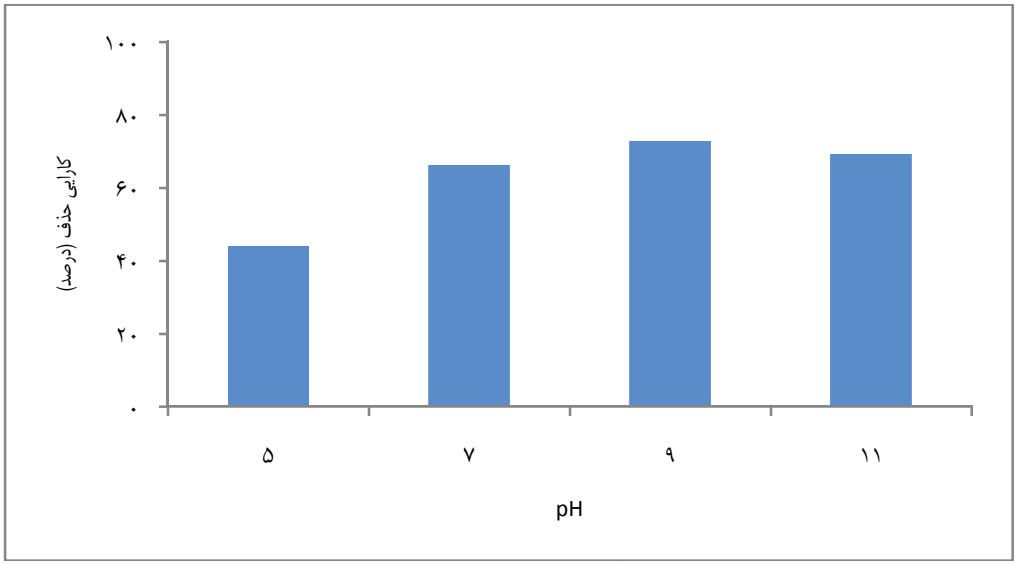
اثر pH محلول

جهت بررسی تأثیر pH محلول، ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر ۴-کلروفنل در pHهای مختلف (برابر با ۵، ۷، ۹ و ۱۱) تهیه شد و مقدار ۱/۵ گرم بر لیتر از کاتالیست به آن اضافه گردید. همان طور که در نمودار شماره ۲ مشاهده می‌شود، کارایی حذف ۴-کلروفنل در pH خنثی تا قلیایی نسبت به pH اسیدی بیشتر بود و pH برابر با ۹ به عنوان pH بهینه به دست آمد. تغییر pH محلول منجر به شارژ مثبت یا منفی نانوذرات اکسید روی می‌شود که در نتیجه بر عملکرد تجزیه‌ای نانوذرات تأثیر می‌گذارد (۱۶).

نانوذره اکسید روی در مقادیر pH اسیدی به دلیل از دست دادن اکسیژن خود (در واکنش با یون H^+)، در آب محلول می‌شود و در نهایت خاصیت فتوکاتالیستی خود را از دست می‌دهد (۱۶). در تحقیقی که درباره تجزیه فتوکاتالیزوری ۴-کلروفنل با استفاده از اکسید روی انجام گردید، گزارش شد که تجزیه این ماده در شرایط اسیدی قوی ($pH < ۴$) به دلیل انحلال اکسید روی متوقف می‌شود (۱۳). در تحقیقی که توسط دهقانی‌فرد و همکاران انجام گرفت؛ مشخص شد که با افزایش pH، کارایی حذف آنیلین توسط فرایند فتوکاتالیستی با نانوذره اکسید روی افزایش می‌یابد که این امر به دلیل تشکیل سریع‌تر و بیشتر رادیکال‌های آزاد هیدروکسیل می‌باشد و با مطالعه حاضر همخوانی دارد (۱۶).

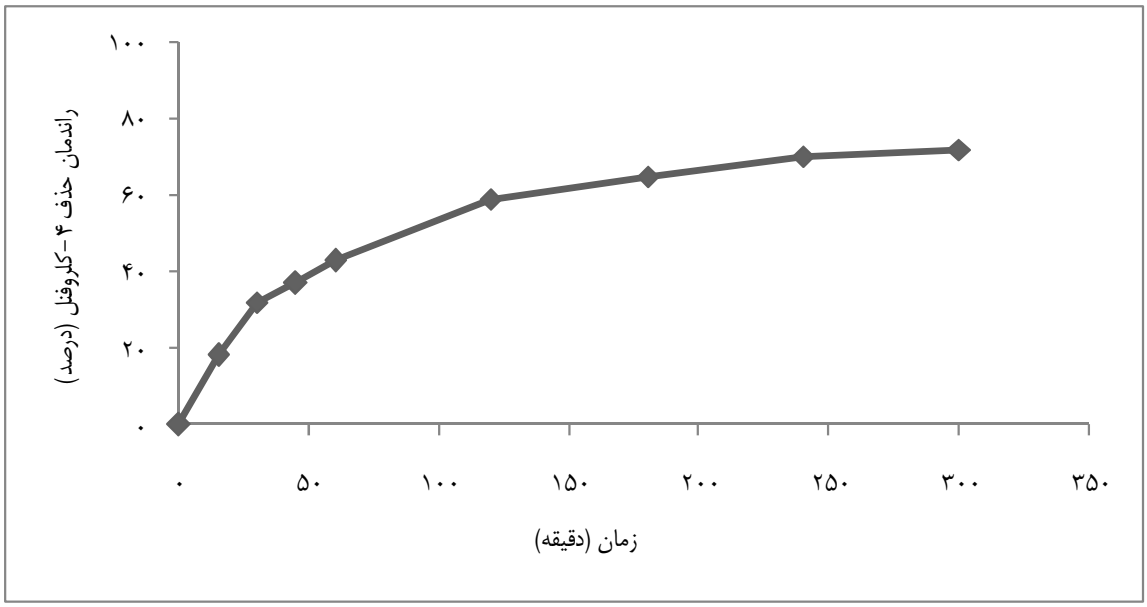
تغییرات راندمان حذف ۴-کلروفنل نسبت به زمان در شرایط بهینه فرایند فتوکاتالیستی

زمان ماند، یکی از متغیرهای مؤثر در افزایش عملکرد سیستم‌های فتوکاتالیستی است. نتایج مطالعه بیانگر آن است که با افزایش زمان ماند، راندمان حذف آلاینده افزایش یافت؛ ولی با گذشت زمان، روند افزایشی راندمان حذف آلاینده کاهش پیدا کرد. این امر را می‌توان به دلیل تجزیه سریع آلاینده در ۳ ساعت ابتدای فرایند توسط رادیکال‌های آزاد تولید شده ناشی از برانگیختگی الکترونی نانوذرات اکسید روی دانست. با افزایش زمان ماند، اگرچه روند برانگیختگی نانوذرات اکسید روی و تولید رادیکال‌های آزاد



نمودار شماره ۲: تأثیر مقدار pH بر کارایی حذف ۴-کلروفنل
(غلظت اولیه ۴-کلروفنل: ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و دوز اکسید روی: ۱/۵ گرم بر لیتر)

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2025-10-18]



نمودار شماره ۳: تغییرات راندمان حذف ۴-کلروفنل نسبت به زمان طی فرایند فتوکاتالیستی sunlight/ZnO
(غلظت اولیه ۴-کلروفنل: ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، دوز اکسید روی: ۱/۵ گرم بر لیتر و pH = ۹)

هیدروکسیل کاهش نیافت، اما به دلیل تشکیل ترکیبات آلی واسط ناشی از تجزیه آلاینده، مقداری از رادیکال‌های آزاد تولید شده صرف تجزیه این ترکیبات گردید و در نتیجه از سرعت حذف آلاینده کاسته شد (۱۶). بر اساس نمودار شماره ۳، این فرایند قادر به حذف ۷۵ درصد ۴-کلروفنل بود.

تحقیق مشابهی نشان داد که فرایند تجزیه فتوکاتالیستی sunlight/ZnO قادر است ترکیبات ۲-کلروفنل، ۲، ۴، ۶-تری کلروفنل، ۲ و ۴-دی‌کلروفنل و پنتاکلروفنل را به طور قابل ملاحظه‌ای تجزیه نماید و می‌تواند جایگزین مناسبی برای دیگر روش‌های تصفیه باشد (۱۷). همچنین تحقیق دیگری که در یک رآکتور فتوالکتروشیمیایی برای تجزیه ترکیبات آلی مقاوم از جمله ۴-کلروفنل در حضور نانوذره اکسید روی و نور خورشید صورت گرفت، بیان داشت که ترکیبات آلی در این رآکتور و در حضور نانوکریستال‌های اکسید روی به طور مؤثری حذف شدند (۱۸).

همان طور که نتایج نشان داد؛ به کارگیری شرایط بهینه معرفی شده، رآکتور را از کارایی بیشتر در حذف ۴-کلروفنل برخوردار می‌نماید. نتایج محققان دیگر نیز بیانگر این مطلب است که فرایند نانوفتوکاتالیستی در حضور نور خورشید کارایی بالایی در حذف کلروفنل‌ها از محیط‌های آبی دارد. عامل اصلی حذف ۴-کلروفنل در این فرایندها، رادیکال‌های هیدروکسیل می‌باشد که یک نوع اکسیدانت غیر گزینشی قوی برای حذف مواد آلی است؛ بنابراین برقراری هر گونه شرایطی که منجر به افزایش تولید رادیکال هیدروکسیل و افزایش مواجهه با مولکول‌های ۴-کلروفنل شود، موجب افزایش راندمان حذف می‌گردد. این فرایند در محیط قلیایی کارایی بیشتری نسبت به محیط‌های اسیدی و خنثی دارد. پس فرایند تجزیه فتوکاتالیستی توسط نانوذره اکسید روی در حضور نور خورشید می‌تواند منجر به کاهش قابل ملاحظه آلاینده آلی مقاوم ۴-کلروفنل گردد. از جمله مزایای این فرایند می‌توان به عملکرد بالا، هزینه تصفیه کمتر نسبت به سایر فرایندهای AOPs (Advanced oxidation processes)، عدم تولید لجن و راهبری ساده اشاره کرد.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از همکاری و مساعدت معاونت محترم پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی مازندران در تأمین بودجه تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2025-10-18]

References

1. Seid Mohammadi A, Movahedian Attar H. P-chlorophenol oxidation in industrial effluent by ultrasonic/fenton technology. Water and Wastewater 2011; 22(4): 43-9. (Persian).
2. Cheng Y, Sun H, Jin W, Xu N. Photocatalytic degradation of 4-chlorophenol with combustion synthesized TiO2 under visible light irradiation. Chemical Engineering Journal 2007; 128(2-3): 127-33.
3. Dixit A, Mungray AK, Chakraborty M. Photochemical Oxidation of Phenol and Chlorophenol by UV/H2O2/TiO2 Process: A Kinetic Study. Int J Chem Eng Appl 2010; 1(3): 247-50.
4. Mesdaghinia AR, Farrokhi M, Naseri S, Yazdanbakhsh AR. Biodegradability enhancement of 2,4,6 trichlorophenol (TCP) by fenton's oxidation process. Hakim Res J 2004; 7(2): 33-40. (Persian).
5. Gholizadeh A, Kermani M, Gholami M, Farzadkia MM. Comparative Investigation of 2-Chlorophenol and 4-Chrorophenol Removal Using Granulated Activated Carbon and Rice Husk Ash. Toloo e Behdasht 2013; 11(3): 66-78. (Persian).
6. Kermani M, Gholami M, Gholizade A, Farzadkia M, Esrafili A. Effectiveness of Rice Husk Ash in Removal of Phenolic Compounds from Aqueous Solutions, Equilibrium and Kinetics Studies. Iranian Journal of Health 2012; 5(1): 107-20. (Persian).
7. Pera-Titusa M, Garcia-Molina V, Banos MA, Giméneza J, Esplugas S. Degradation of chlorophenols by means of advanced oxidation processes: a general review. Applied Catalysis B: Environmental 2004; 47(4): 219-56.
8. Manshouri M, Yazdanbakhsh AR, Sardar M, Sheykh Mohammadi A. Investigation of Effective Factors for Fenton like Process in Para!Chlorophenol Removal from Aqueous Solutions. Iranian Journal of Health 2010; 3(4): 381-8. (Persian).
9. Moonsiri M, Rangsunvigit P, Chavadej S, Gulari E. Effects of Pt and Ag on the photocatalytic degradation of 4-chlorophenol and its by-products. Chemical Engineering Journal 2004; 97: 241-8.
10. Masoumbeigi H, Rezaee A, Khataee AR, Hashemian J. Photocatalytic removal of escherichia coli and streptococcus faecalis from water using immobilized zno nanoparticles. Qom Univ Med Sci J 2013; 6(4): 24-35. (Persian).
11. Alimoradzadeh R, Assadi A, Nasseri S, Mehrasbi MR. Photocatalytic degradation of 4-chlorophenol by UV/H2O2/NiO process in aqueous solution. Iran J Environ Health Sci Eng 2012; 9: 12. (Persian).
12. Chiou CH, Wu C, Juang RS. Influence of operating parameters on photocatalytic degradation of phenol in UV/TiO2 process. Chemical Engineering Journal 2008; 139(2): 322-9.
13. Gaya UI, Abdullah AH, Zainal Z, Hussein MZ. Photocatalytic treatment of 4-chlorophenol in aqueous ZnO suspensions: intermediates, influence of dosage and inorganic anions. J Hazard Mater 2009; 168(1): 57-63.
14. Cao G, Li Y, Zhang Q, Wang H. Synthesis and characterization of La2O3/TiO2-xFx and the visible light photocatalytic oxidation of 4-chlorophenol. J Hazard Mater 2010; 178(1-3): 440-9.
15. Goel M, Chovelon JM, Ferronato C, Bayard R, Sreekrishnan TR. The remediation of wastewater containing 4-chlorophenol using integrated photocatalytic and biological treatment. J Photochem Photobiol B 2010; 98(1): 1-6.
16. Dehghani Fard E, Jonidi Jafari A, Rezae Kalantari R, Gholami M, Esrafili A. Photocatalytic Removal of Aniline from Synthetic Wastewater using ZnO Nanoparticle under Ultraviolet Irradiation. Iran J Health Environ 2012; 5(2): 167-78. (Persian).
17. Ba-Abbad MM, Kadhum AH, Al-Amiery AA, Mohamad AB, Takriff MS. Toxicity evaluation for low concentration of chlorophenols under solar radiation using zinc oxide (ZnO) nanoparticles. International Journal of the Physical Sciences 2012; 7(1): 48-52.
18. Shinde SS, Shinde PS, Bhosale CH, Rajpure KY. Zinc oxide mediated heterogeneous photocatalytic degradation of organic species under solar radiation. J Photochem Photobiol B 2011; 104(3): 425-33.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2025-10-18]