

حذف فوتوکاتالیستی رنگ رودامینبی از محیطهای آبی با استفاده از فوتوکاتالیست پلیمر مزدوج ایمیدی تحت نور مرئی

راضیه زندی پاک'، نادر بهرامیفر'، مجیب الله یونسی'، محمد علی زلفی گل

۱- گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران ۲- گروه شیمی آلی، دانشکده شیمی و علوم نفت، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

ــــــلاعـــــــات مقــــــــاله: چَ	چکــــیدہ
بخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۷ زمب بخ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۵ ^{دیگ} بناب بخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۹ از ^{از} بخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۲/۱۸	زمینه و هدف: رنگها آلاینده های مهمی هستند که منجر به ایجاد خطرات جدی برای انسان، دیگر حیوانات و موجودات زنده می شوند. رنگها با فرآیندهای تصفیه هوازی قابل تصفیه نیستند. بنابراین حذف آن ها از پسابهای صنعتی با استفاده از فرآیند فوتوکاتالیستی قابل توجه است. هدف از انجام این مطالعه سنتز فوتوکاتالیست پلیمر مزدوج ایمیدی برای اولین بار و در ادامه حذف رنگ رودامین بی از محلول آبی است.
رون رن روب کان کلیدی: آلایندههای آلی، پلیمر آلی- فور لانسیی، تخریب فوتوکاتالیستی، سینتیک، فتو	روش بررسی: در این مقاله پلیمر مزدوج ایمیدی سنتز و بهعنوان فوتوکاتالیست برای حذف رنگ رودامین بی استفاده شد. خصوصیات ظاهری فوتوکاتالیست با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)، میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)، دستگاه پراش پرتو ایکس (XRD)، آنالیز وزن سنجی حرارتی (TGA)، طیف سنجی مادون قرمز فوریه (FTIR) و طیف سنجی بازتابی نفوذی (DRS) بررسی شد. اثر متغیرهای Hq (۹-۴)، دوز فتوکاتالیست (۲۰۲۴ g/L)، و زمان تماس (To min)، بر اندمان حذف رنگ رودامین بی
مرئی برر یاف کارا نتی	بررسی گردید. یافتهها: نتایج نشان داد که با افزایش زمان تماس تا ۴۵ min و دوز فوتوکاتالیست تا P/۱۰۲ g/L کارایی حذف رنگ رودامین بی تحت نور مرئی تا ۹۹ درصد افزایش یافته است. بهترین pH برای حذف رودامین بی ۷ بود. نتیجه گیری: پلیمر مزدوج ایمیدی میتواند بهعنوان یک فوتوکاتالیست موثر و در دسترس جهت حذف رنگ رودامین بی از پسابهای صنعتی تحت نور مرئی مورد استفاده قرار گیرد.
ت الکترونیکی نویسنده مسئول:	

n.bahramifar@modare.ac.ir

Please cite this article as: Zandipak R, Bahramifar N, Younesi H, Zolfigol MA. Photocatalytic degradation of rhodamine B dye from aqueous media using imide conjugated polymer photocatalyst under visible light. Iranian Journal of Health and Environment. 2025;17(4):741-56.

Copyright © 2025 Iranian Association of Environmental Health, and Tehran University of Medical Sciences. Published by Tehran University of Medical Sciences. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://

مقدمه

آلودگی آب بهدلیل تخلیه نامناسب فاضلاب شهری و صنعتی، وجود آلایندههای سمی و مدیریت نامناسب مواد زائد جامد، سلامتی بشر را به صورت جدی تحت تاثیر قرار میدهد. با توجه به حجم عظیم فاضلابهای تولیدی، تلاش برای دستیابی به نحوه دفع مناسب فاضلاب در محیطزیست ضروری است (۱، ۲). تخلیه پسابهای رنگی صنایع مختلف مانند نساجی، کاغذ، چوب، آرایشی و بهداشتی، کشاورزی، پلاستیک و چرم معضلات محیطزیستی شدیدی را به وجود می آورند (۳). در بین صنایع نامبرده، صنعت نساجی بیشترین مصرف را دارد و حجم زیادی فاضلاب با غلظت بالای رنگ در گستره mg/L ۲۰۰ تولید میکند (۴). برآوردها نشان میدهد که ۲۰-۱۵ درصد رنگ مصرفی در این صنایع وارد فاضلاب می شود. رنگ ها ترکیبات آلی آروماتیکی هستند که نور را در طول موج ۳۵۰-۷۰۰ (ناحیه نور مرئی) جذب می کنند. تخلیه پساب حاوی مواد رنگی به محیطزیست و اکوسیستمهای آبی علاوه بر آسیب رساندن به مناظر زیبای طبيعي، از نفوذ نور به داخل اعماق آب جلوگيري ميكند و باعث مختل شدن فرآیند فتوسنتز و از بین رفتن گیاهان آبزی می شود (۵). همچنین این مواد منجر به پدیده اتریفیکاسیون و تداخل در اکولوژی آبهای پذیرنده شده و اثرات مخربی بر رشد موجودات آبزی خواهد داشت. عمدتا مواد رنگ زا دارای یک یا چند حلقه بنزنی هستند که به دلیل سمی بودن و دیر تجزیه بودن می توانند سرطانزا باشند و چنانچه بدون تصفیه وارد محیطزیست شوند صدمات جبران ناپذیری به محیط زیست وارد میکنند (۶، ۷). رودامین بی یک رنگ کاتیونی است که در صنایع چرم سازی و رنگسازی استفاده می شود. این رنگ اگر بلعیده و استنشاق شود بسیار سمی است و در مقابل نور و شستشو بسیار پایدار و مقاوم بوده و به آسانی قابل تجزیه نیست (۸، ۹). با توجه به اینکه این رنگ باعث تحریک چشم، مجاری تنفسی و مشکلات پوستی میشود برای انسانها و دیگر موجودات زنده بسیار خطرناک است. تا کنون

موارد تجربی از مشکلات بارداری، سرطان و مشکلات عصبی در سرتاسر جهان گزارش شده است. اکثر رنگهای مورد استفاده در صنایع بهدلیل ایجاد کمپلکسهای قوی غیر قابل تجزیه بیولوژیکی بوده و فرآیندهای تصفیه متداول فاضلاب مانند فيلترهاى غشايي، تبادل يوني، انعقاد، جذب، لختهسازى و اكسيداسيون روش موثرى براى حذف آنها محسوب نمى گردد (۱۱، ۱۰). همچنین این روشها معمولاً مقادیر توجهی لجن تولید مینمایند که مشکلات محیط زیستی دیگری را بهدنبال خواهد داشت. از اینرو، اکسیداسیون پیشرفته یکی از روشهای قابل تامل برای رفع این محدودیتها است که در آن با اتکا بر تولید گونههای بسیار فعال مانند رادیکالهای هیدروکسیل که قادرند دامنه وسیعی از آلایندههای آلی را به سرعت اکسید کنند، آلایندههای آلی در حضور عوامل اکسیدکننده مانند کاتالیزورها و پراکسیدها تخریب می شوند (۱۲). از روشهای اكسيداسيون پيشرفته ميتوان به فرآيند فنتون، فوتوفنتون، ازنزنی و اکسیداسیون با پراکسید هیدروژن و استفاده از فوتوکاتالیستهای نیمه هادی اشاره کرد (۱۳). فرآیندهای فتو کاتالیستی برای اولین بار در سال ۱۹۷۲ و به منظور شکست آب به هیدروژن و اکسیژن کشف شده و به بررسی تاثیر همزمان نور و کاتالیست در یک واکنش شیمیایی می پردازد (۱۴). در سالهای اخیر از این روش، به منظور حذف ترکیبات آلی و معدنی از فاز گاز و مایع استفاده شده است (۱۵). فرآیند فتوکاتالیست یک روش پاک، پایدار و سازگار با محیطزیست است که آلایندههای آلی را بدون تولید محصولات سمی از بین میبرد. واکنشهای فتوکاتالیستی از طریق تابش نوری با انرژی بزرگتر یا برابر با انرژی باند گپ، به یک ماده نیمه رسانا انجام می شود که سبب بر انگیخته شدن الکترون های لایه ظرفیت و انتقال آنها به لایه رسانش می شود (۱۶، ۱۷). در این فرآیند الکترون (⁻e) برانگیخته شده میتواند ملکولهای آلاينده را احيا كند يا با الكترون گيرندههايي نظير O_2 جذب شده روی سطح کاتالیست یا حل شده در آب واکنش داده و آنیون رادیکالی سوپراکسید (⁻-O) را تولید کند. حفره ایجاد

ملام ولخط _____ دوره هفدهم/ شماره چهارم/ فصلنامه علمى پژوهشى انَجَمن علمى بهداشت محيط اير ان ijhe.tums.ac.ir

شده در نوار رسانش نیز می تواند به طور مستقیم ملکول های آلاینده را اکسید کرده و با آب یا −OH واکنش داده و آنها را به رادیکالهای هیدروکسیل (·OH) تبدیل کند. در نهایت نیز آلایندههای آلی به ترکیبات سادهای مانند آب، دی اکسید کربن، گاز نیتروژن و همچنین اسیدهای معدنی تبدیل می شود (۱۸). لازم بهذکر است که انرژی مورد نیاز برای انجام فرآیند فتوكاتاليست به وسيله فوتونهايي در ناحيه فرابنفش (UV) و یا نور مرئی تامین میشود. تاکنون، تعدادی از نیمههادیها که با استفاده از نور مرئی و UV سبب تخریب تعداد زیادی از آلایندهها در سیستمهای آبی میشوند، معرفی شدهاند که در این میان می توان به دی اکسید تیتانیوم ((TiO_2) ، اکسید روی (CuO)، دی اکسید سریم (CeO₂) و اکسید مس (CuO) اشاره کرد که بیشتر آنها از کارایی کوانتومی کم و باند گپ گسترده برخوردار بوده و برای فعالسازی نور مرئی نامناسب و تنها برای فعال سازی و استفاده در منطقه UV مناسب هستند .(۲۰ . ۱۹)

در کنار کاتالیستهای فلزی، کاتالیستهای فاقد فلز از مواد ارزان قیمت و فراوان موجود در زمین از جمله کربن، ازت، اکسیژن، فسفر و گوگرد ساخته می شوند که دارای وزن کم و مقاوم در برابر خوردگی هستند. از کاتالیستهای بدون فلز می توان به پلیمرهای آلی مزدوج همچون کربن نیترید گرافیت (g-C₃N₄)، پلیمرهای خطی و نقاط پلیمری (Pdots) اشاره کرد (۲۱، ۲۲). پلیمرهای آلی مزدوج موادی غیرمضر، نیمه رسانا، از نظر شیمیایی بی اثر و از نظر مکانیکی بادوام بالا هستند که ماهیت آبگریزی آنها سبب تجمع آلایندههای آلی در سطح این ترکیبات و به تبع آن افزایش نرخ اکسیداسیون می شود (۲۴، ۲۳). بسیاری از پلیمرهای مزدوج در برابر اشعه ماورابنفش مقاوم بوده و بهراحتی اکسید نمی شوند و خصوصیتی که باعث می شود که پلیمرهای مزدوج ویژگی رسانایی داشته باشند، پیوندهای یگانه و دوگانه متناوب است که جایگاه این پیوندها به صورت دائم با یکدیگر عوض می شوند. بنابراین، حدواسطی میان پیوندهای مذکور بهوجود میآید که به پلیمرهایی با این

چنین ساختاری، پلیمرهای مزدوج می گویند (۲۵). ساختار بیان شده باعث می شود که یک ابر اوربیتالی π در تمام طول زنجیره یلیمری بوجود آید که به آن سامانه π مزدوج می گویند. با توجه به موارد بالا وجود پیوندهای دوگانه یک در میان برای یک پلیمر رسانا ضروری و قابل اهمیت است (۲۶). Zandipak و همکاران در سال ۲۰۲۴ کربن نیترید ترکیب شده با پلیمر آلی كووالانسى را بهعنوان فوتوكاتاليست جهت تخريب آلايندههاي آلی از محلول آبی به کار بردند و به راندمان حذف ۹۸ درصد دست یافتند (۱۳). در مطالعهای دیگر Hu و همکاران در سال ۲۰۲۲ چارچوب آلی-فلزی ترکیب شده با پلیمر آلی کووالانسی را بهعنوان فوتوكاتاليست بهمنظور تخريب آلايندههاى آلى از منابع آبی استفاده کردند و نتایج نشان داد که راندمان حذف قابل قبولی بدست آوردند (۲۷). در این مطالعه ابتدا پلیمر مزدوج ایمیدی تهیه شد و برای حذف فوتوکاتالیستی رنگ رودامین بی در محلول آبی مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه تاثیر پارامترهای مختلف نظیر pH اولیه، میزان فوتوکاتالیست و زمان تماس بر روی فرآیند فوتوکاتالیستی ارزیابی شد. بهعلاوه مطالعات سینتیکی با استفاده از مدل شبه مرتبه اول بررسی شد.

مواد و روشها

این مطالعه یک پژوهش بنیادی-کاربردی بوده و با توجه به ماهیت آن در مقیاس آزمایشگاهی و در شرایط بسته انجام یافت. مواد مورد استفاده در این پژوهش ۳ و ۴ و ۹ و ۱۰ پریلن تتراکربوکسیلیک دی انیدرید ($C_{24}H_{12}O_8$)، ترت ملامین ($C_{3}H_6N_6$)، بنزوکویین ($C_{2}H_4O_2$)، ترت بوتانول ($C_{3}H_6N_6$)، بنزوکویین ($C_{3}H_4O_2$)، ترت بوتانول ($C_{10}H_{10}O_2$)، اتیلن دی آمیت تترا استیک اسید $\mathcal{R}_{10}O_2$)، ایلن دی آمید ترا استیک اسید ($C_{10}H_{16}N_2O_8$)، ایلن دی آمید ($C_{3}H_7NO$)، ایلن (HCl) و هیدروکسید سدیم (HaOH) بوده و از شرکت مرک آلمان تهیه شدند. در پژوهش حاضر رنگ رودامین بی برای ساخت محلول استوک از شرکت مرک خریداری شد (شکل ۱).

الم من و کچط الدون و کچط صلنامه علمی پژوهشی انجمن علمی بهداشت محیط ایر آن ijhe.tums.ac.ir

استوک رودامین بی (C₂₈H₃₁ClN₂O₃) به وسیله انحلال g ۱ از ماده جامد کریستالی رودامین بی در L آب دوبار تقطیر تهیه شد. سایر محلول های مورد استفاده در این مطالعه با رقیق سازی استوک اولیه رودامین بی تهیه و بلافاصله در آزمایش های حذف فوتوکاتالیستی رودامین بی استفاده شدند. لامپ مرئی ۵۰ W مدل COB از شرکت نمانور، دستگاه اسپکتروفتومتر مدل مدل GOB از شرکت نمانور، دستگاه اسپکتروفتومتر مدل مدل Jenway متر PH متر Jenway مدل مدل عاد ۲۰۲۰۰۰ و ترازوی دیجیتال آزمایشگاهی با دقت g ۲۰۰۰۰ t مدل Sartorius ED124S مورد استفاده قرار گرفت.

نانوصفحات پلیمری مزدوج به روشی ساده تهیه شد. بدین

صورت که mg ۱۲۶ ملامین (۱ mmol)، mg ۵۸۸ از ۳ و ۴ و ۹ و ۱۰ پـریـلن تـتـراکـربـوکسیلـیک دی انـیـدریـد (۱/۵ mmol) و ۲۷۵ ۲۷ اسـتـات روی (۱/۵ mmol) بـه mg ۵۰۰۰ ایمیدازول در شرایط هـمزدن و تـحـت گاز نیـتروژن در دمای ۲۵ ۱۸۰ بهمدت ۲ ۲۱ قرار گرفت. پس از طی ایـن مـدت، رسـوب حاصـل در دمـای اتـاق سـرد و ممزدن به مدت ۲ ۵ قرار گرفت. در مرحله بعد، رسوب حاصل با دی متیل سولفوکسید ۳ مرتبه شستشو و در پایان پلیمر حاصل در فریز درایر به مدت ۲۴ خشک شد. در نهایت، ۲۵۸ از نانوصفحات پلیمری مزدوج ایمیدی بهدست آمد (شکل ۱).



شکل ۱- ساختار مولکولی پلیمر مزدوج ایمیدی

شناسایی ویژگیهای فتوکاتالیست سنتز شده بدینمنظور از آنالیزهای میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)، طیفسنج مادونقرمز تبدیل فوریه (FTIR)، طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس (XRD)، میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) و آنالیز وزن سنجی حرارتی (TGA) برای بررسی مرفولوژی و مشخصات ساختاری فتوکاتالیست تهیه شده استفاده شد. همچنین، برای تعیین شکاف انرژی از طیف سنجی بازتابی نفوذی (DRS) استفاده شد.

فرآيند حذف فتوكاتاليستي

به منظور بررسی کارائی فتو کاتالیست آماده شده برای حذف رنگ رودامین از محلول آبی، راکتوری حاوی ۱۰۰ از محلول رنگی با غلظت اولیه ۵۰ mg/L، مقدار مشخصی از فتو کاتالیست، لامپ مرئی و پمپ هوادهی که بر روی یک همزن مغناطیسی در دمای محیط قرار گرفته اند، طراحی شد. در زمان های مشخص نمونه برداری انجام و غلظت رنگ رودامین بی در محلول آبی توسط دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج MM ۴ ۵۵۴ سنجش شد. لازم به ذکر است که تمامی نمونه ها

مال می و کی دوره هندهم/ شماره ج فصلنامه علمى پژوهشى انُجمَن علمى بهداشت محيط اير ان ijhe.tums.ac.ir

ابتدا به مدت نیم ساعت در تاریکی قرار گرفته و میزان جذب آن را ثبت کرده و در نهایت نرخ حذف رنگ رودامین بی از محلول آبی با استفاده از معادله ۱ محاسبه شد (۱۳).

$$R(\%) = \frac{C0 - Ct}{C0} * 100$$
 (1)

₀C؛ غلظت رودامینبی در زمان صفر C_t؛ غلظت رودامینبی نهایی بعلاوه، به منظور دستیابی به حداکثر حذف رنگ رودامینبی، اثر پارامترهای تاثیر گذار در فرآیند فتوکاتالیستی نظیر pH محلول، دوز فتوکاتالیست و زمان واکنش بر نرخ حذف مورد بررسی قرار گرفت. همچنین آزمایشهای اسکاونجرها (Scavengers)

بهمنظور تعیین انواع اکسندههای فعال در فرآیند حذف رودامینبی از محلول آبی با استفاده از اسکاونجرهای مختلف همچون بنزوکینون (⁻O⁺)، ترت بوتانول (•OH) و اتیلن دی آمین تترا استیک (•H) اسید انجام شد.

يافتهها

تصاویر TGA و AFM ، TEM ، SEM از پلیمر مزدوج ایمیدی به منظور تعیین مرفولوژی و پایدارای حرارتی در شکل ۲ آورده شده است. ه.م.چنین نتایجی از آنالیزهای UV-Vis ، FTIR ، XRD و DRS از فوتوکاتالیست تهیه شده به منظور تعیین ساختار کریستالی، ترکیب شیمیایی و باند گپ در شکل ۳ آورده شدهاند.



شکل ۲- تصویر SEM (الف)، TEM (ب)، AFM (ج) و TGA (د) از پلیمر مزدوج ایمیدی

م/ شماره چهارم/ زمستان ۱۴۰۳ مل می و کول فصلنامه علمی پژوهشی انجمن علمی بهداشت محیط ایر آن ijhe.tums.ac.ir



شکل ۳- تصاویر FTIR (الف)، XRD (ب)، UV-Vis (ج) و DRS (د) از پلیمر مزدوج ایمیدی

نتایج ارزیابی تاثیر پارامترهای pH، دوز فوتوکاتالیست، مدت زمان تماس و اسکاونجرها بر نرخ حذف رنگ

رودامین بی به ترتیب در شکل های ۴ تا ۷ ارائه شده است.



شکل ۴- تاثیر مدت زمان تماس فوتوکاتالیست بر میزان حذف رنگ رودامینبی توسط پلیمر مزدوج ایمیدی (غلظت اولیه رودامین بی mg/L، میزان فوتوکاتالیست pH= ۷ ،۰/۰۲ g/L)

مام و کھ ____ دوره هفدهم/ شم

فصلنامه علمی پژوهشی انجمن علمی بهداشت محیط ایر ان ijhe.tums.ac.ir



شکل ۵- تاثیر pH اولیه محلول بر میزان حذف رنگ رودامینبی توسط پلیمر مزدوج ایمیدی (غلظت اولیه رودامین بی ۵۰ mg/L، میزان فوتوکاتالیست ۰/۰۲ g/L، زمان تماس ۴۵ min)



شکل ۶- تاثیر دوز فوتوکاتالیست بر میزان حذف رنگ رودامینبی توسط پلیمر مزدوج ایمیدی (غلظت اولیه رودامین بی ۵۰ mg/L (pH= ۷،۴۵ min)

ر شماره چهارم/ زمستان ۱۴۰۳ فصلنامه علمى پژوهشى انجمن علمى بهداشت محيط اير أن ijhe.tums.ac.ir



شکل ۷- تاثیر اسکاونجرها بر میزان حذف رنگ رودامینبی توسط پلیمر مزدوج ایمیدی (غلظت اولیه رودامین بی ۵۰ mg/L ۵۰ mg/L میزان قوتوکاتالیست pH= ۷ ،۰/۰۲ g/L)

فوتوکاتالیستهای مختلف ترسیم شد و ضریب رگرسیون هر منحنی بهعنوان معیار انتخاب،مدنظر قرار گرفت.مقادیر ثابتهای سرعت سینتیک مرتبه اول برای حذف رنگ رودامینبی توسط پلیمر مزدوج ایمیدی در جدول ۱ آورده شده است. بهمنظور بررسی سینتیک حذف،نتایج حاصل از تماس غلظتهای ۲۵، ۲۵ و ۱۰۰ mg/L رنگ رودامین بی با فوتوکاتالیستهای مختلف، توسط مدل سینتیک مرتبه اول مورد بررسی قرار گرفت. پس از آن، معادله مرتبه اول InC برحسب زمان برای

جدول ۱- ثابتهای سرعت سینتیک مرتبه اول برای حذف رنگ رودامینبی از محلول آبی توسط پلیمر مزدوج ایمیدی

غلظت اوليه رودامين			
۱۰۰ mg/L	٥٠ mg/L	۲٥ mg/L	پارامىر
•//\٩•	٠/٩٣٣	•/٨٧٩	R ²
•/•0٧	•/• ١٦٨	•/•171	K

الم الم المحلم الماره جهار الماره جهار فصلنامه علمى پژوهشى انَجَمَن علمى بهداشت محيط اير ان ijhe.tums.ac.ir

نتایج آزمایشات بررسی قابلیت بازیابی (استفاده مجدد) فوتوکاتالیست در فرآیند حذف رنگ رودامین بی در شکل ۸ نشان داده شده است. نتایج بیانگر آن است درصد است.





شکل ۸- نمودار قابلیت استفاده مجدد فوتوکاتالیست برای حذف رنگ رودامینبی

بحث

نتایج تصویر SEM از پلیمر مزدوج ایمیدی (شکل ۲-الف) نشان دهنده نانوورقه های نازک و مسطح از نانوصفحات پلیمری است. تصویر TEM (شکل ۲-ب) از پلیمر مزدوج ايميدى همچنين نشان مىدهد كه نانوورقههاى پليمرى صفحاتی شفاف با لبههای تیز و ساختاری دوبعدی با ورقههای کوچک، نازک و مسطح با چین و چروک است. نتایج آنالیز

میکروسکوپی AFM مرفولوژی ورقهای پلیمر مزدوج ایمیدی را تایید و همچنین نشان میدهد که اکثر این نانوصفحات تک لایه یا دو لایه با ضخامت متوسط nm ۴۵-۱۰، که نشاندهنده پیوند قوی بین الیههاست (شکل ۲-ج). نتایج حاصل از آنالیز حرارتی (TGA) از فوتوکاتالیست پلیمر مزدوج ایمیدی نشان داد که پلیمر سنتز شده از نظر حرارتی °C تا دمای $^\circ\mathrm{C}$ ۴۹۵ پایدار است. البته در دماهای ۳۷۵ تا

ijhe.tums.ac.ir

Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2025-03-12]

۱۹۹۵، کاهش وزن ۲۴ درصدی مشاهده می شود (شکل ۲-د). نتایج بررسی طیفهای مادون قرمز (IR) که توسط اسپکترومتر FTIR در ناحیه ¹-۴۰۰۰ cm تهیه شدند (شکل ۳-الف)، نشان می دهد که پیک موجود در ناحیه (شکل ۳-الف)، نشان می دهد که پیک موجود در ناحیه 1 -۳۵۰۰ cm⁻¹ ناشی از ارتعاشات کششی پیوندی گروههای آمینی است. پیک در ناحیه ¹⁻۲۹۰ در پریلن تترا کربوکسیلیک دی انیدرید را می توان به گروه کربونیل در انیدرید نسبت داد که در پلیمر به صورت گروههای کربونیل انیدرید نسبت داد که در پلیمر به صورت گروههای کربونیل امم۴ cm⁻¹ و نیز ¹⁻۳۵۰ شرودیل ایمیدی در ناحیههای ¹⁻۳۵۰ در اس مشاهده می شود. به علاوه، پیکهای ناحیه ¹⁻۲۰۰ مرتبط متاهده می شود. به علاوه، پیکهای ناحیه ¹⁻۲۰۰ مرتبط دانست. این نتایج با دستاورد مطالعه Inop و همکاران در (۲۰۲۰) مطابقت دارد (۲۸).

نتیجه آنالیز XRD (شکل ۳-ب) نیز نشاندهنده پیکهای ضعیف در ناحیههای ۸، ۱۱/۵ و ۱۴/۹ درجه است. همچنین درجه بالایی از کریستالیزاسیون و تشکیل ساختار π - π بین لایهای در ناحیه ۲۵/۴ درجه نشاندهنده یک سیستم کونژوگه (Conjugation) است.

عملکرد نوری فوتوکاتالیست توسط آنالیز طیف بینی جذب مرئی- فرابنفش (UV–Vis DRS spectra) از پلیمر مزدوج ایمیدی مورد بررسی قرار گرفته و در شکل ۳-ج و د نشان داده شده است. قابل توجه است که دو لبه جذب در نواحی ۳۸۰ nm و ۲۰۷ شکافهای انرژی ۲۰۱ ev و ۷۰ ۱/۳۱ را در نمودار ۲۵uc نشان میدهد. همان طور که قابل پیش بینی است با معرفی پریلن بهعنوان بلوکهای ساختمانی پلیمر و تشکیل سیستم کونژوگه، راندمان برداشت نور مرئی بسیار قابل توجه است.

زمان تماس از متغیرهای بسیار مهم در فرآیند حذف فوتوکاتالیستی است. نتایج بررسی تاثیر زمان تماس بر فرآیند حذف رنگ رودامینبی توسط پلیمر مزدوج ایمیدی نشان

داد که با افزایش زمان تماس تا min ۴۵ مبا تابش نور مرئی، کارایی حذف رنگ رودامینبی تا ۹۹ درصد افزایش یافته و در زمانهای بالاتر ثابت شده است (شکل ۴). بنابراین، میتوان نتیجه گرفت که عملیات حذف در دو مرحله انجام شده است. مرحله اول، مرحله جذب روی سطح فوتوکاتالیست و مرحله دوم، حذف رنگ رودامینبی توسط رادیکالهای آزاد تولید شده از جمله هیدروکسیل ناشی از برانگیختگی الکترونی پلیمر مزدوج ایمیدی در مدت زمان فرآیند بوده است. نتایج حاصل از مطالعه سینتیکی مرتبه اول نشان داد که ثابت سرعت مرتبه اول برابر با ۲۰۱۱، ۱۹۸۸ و ۱-۰۸۷ در سه غلظت اولیه ۲۵، ۵۰ و Low mg/L و ۵۰مان از رنگ رودامینبی است. این نتایج با دستاورد مطالعه پا ۱۰۰ همکاران این نتایج با دستاورد مطالعه یا ۱۰۰ مال ایی حذف رنگ رودامینبی توسط فوتوکاتالیست Iol افزایش یافته رنگ رودامینبی توسط فوتوکاتالیست Iol افزایش یافته است، مطابقت دارد (۲۹).

تاثیر PH اولیه بر کارایی حذف رنگ رودامین بی به ماهیت کاتیونی و آنیونی ساختار مولکولی رنگ و pH_{pzc} فوتوکاتالیست وابسته است. تاثیر PH بر روی حذف رنگ رودامین بی نشان داد که با افزایش PH از ۴ به ۷، کارایی حذف رنگ رودامین بی از ۵۲/۱۲ به ۹۹ درصد افزایش یافته است، به طوری که بیشینه ظرفیت حذف در PH برابر با ۷ مشاهده شد (شکل ۵). علاوه بر این، نتایج نشان داد که مشاهده شد (شکل ۵). علاوه بر این، نتایج نشان داد که بوده است؛ در نتیجه در ۵<PH سطح فوتوکاتالیست بوده است؛ در نتیجه در ۵ والای بار منفی و در ۵>PH، گروههای عاملی کربوکسیل مثبت بوده است. در ۵ و هیدروکسیل موجود بر سطح پلیمر پروتونه شده و سطح فوتوکاتالیست دارای بار مثبت میشود. بیشینه کارایی حذف در PH خنثی یعنی PH برابر با ۷ مشاهده شد. این موضوع در المیتوان با این واقعیت مرتبط دانست که دپروتونه بودن

> ال معلمی پژوهشی انجمن علمی بهداشت محیط ایر ان فصلنامه علمی پژوهشی انجمن علمی بهداشت محیط ایر ان ijhe.tums.ac.ir

Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2025-03-12]

(Deprotonation) سطح فوتوکاتالیست در این pH و ساختار کاتیونی رنگ رودامینبی به جذب این رنگ بر روی فوتوکاتالیست توسط نیروهای الکتروستاتیک و در نتیجه به حذف آن منجر میشوند. از سوی دیگر در pHهای بازی، غلظت یونهای ⁻OH در محیط زیاد است که با OH فاکنش داده و سبب کاهش گونههای فعال در فرآیند حذف فوتوکاتالیستی میشود. نتایج پژوهش Xu و همکار (۲۰۲۱) فوتوکاتالیستی میشود. نتایج پژوهش Xu و همکار (۲۰۲۱) نیبت به حذف رنگ رودامینبی از محلول آبی اقدام کردند نیز نشان داد که بیشینه کارایی حذف رنگ رودامینبی مربوط به pH خنثی بوده است (۳۰).

غلظت فوتوكاتاليست، عامل مهمى در تعيين ظرفيت حذف فوتوكاتاليست براى غلظت اوليه مشخص آلاينده است. نتايج بررسى تاثير غلظت فوتوكاتاليست بر فرآيند حذف رنگ رودامینبی توسط پلیمر ایمیدی مزدوج نشان داد که با افزایش مقدار غلظت فوتوکاتالیست تا g/L، کارایی حذف رودامین بی بهدلیل افزایش سطح و محل های جذب قابل دسترسی و همچنین تولید رادیکالهای هیدروکسیل برای حذف رنگ رودامین بی افزایش یافته است (شکل ۶). از سوی دیگر، افزایش مقدار اولیه فوتوکاتالیست با ایجاد كدورت بهنوبه خود باعث كاهش شدت نور مرئى و در نتيجه کاهش تولید رادیکالهای هیدروکسیل شده است. این نتایج با دستاورد یژوهش Ahmad و همکاران (۲۰۲۰) که گزارش كردند حذف رنگ رودامين بي از محيط آبي با افزايش غلظت فوتوكاتاليست نانوذرات اكسيد روى تزئين شده با طلا افزايش یافته است، مطابقت دارد (۳۱). از طرفی، Dao و همکاران (۲۰۲۱) نیز نتیجه گرفتند که حذف رنگ رودامین بی از محیط آبی با افزایش میزان فتوکاتالیست رابطه مستقیم داشته است (۳۲). نتایج بررسی حاصل از مطالعه اسکاونجرها نشان داد که هر سه اکسنده ··O₂· · H و OH نقش بسزایی در فرآیند تخریب رنگ رودامین بی از محلول آبی با استفاده از پلیمر

ایمیدی بازی می کنند. اما اکسنده ⁻ O[•] نقش قابل توجهتری نسبت به اکسندههای [•]H و [•]OH دارد (شکل ۲). نتایج بررسی قابلیت استفاده مجدد از فوتوکاتالیست سنتزشده نشان داد که پلیمر مزدوج ایمیدی بدون تغییر قابل توجهی در کارایی حذف رنگ رودامینبی تا پنج بار از

قابلیت استفاده مجدد برخوردار بوده و در چنین شرایطی استفاده از فوتوکاتالیست صرفه اقتصادی دارد (شکل ۸). از جمله محدودیتهای این پژوهش میتوان به کمبود اطلاعات الکتروشیمی مانند آنالیز امپدانس، فوتوکارنت و عدم تعیین باند رسانش و ظرفیت اشاره کرد؛ بنابراین پیشنهاد میشود، اثرات کاربرد این آنالیزها در تحلیل فرآیند حذف فوتوکاتالیستی مورد بررسی قرار گیرد.

نتيجهگيرى

در این مطالعه، پلیمر ایمیدی مزدوج سنتز و از آن در حذف رنـــگ رودامـیـنبی اســتـفـاده شــد. آنـالـیـزهـای UV-Vis ،FTIR ،XRD ،TGA ،AFM ،TEM ،SEM و DRS سنتز پلیمر را تائید کرد و نشاندهنده نانوورقههای نازک و مسطح از نانوصفحات پلیمری است. همچنین نتایج نشان داد که بیشینه کارایی حذف رودامینبی نیز در pH برابر با ۷، زمان تماس برابر با min ۴۵ و مقدار فوتوکاتالیست بــرابــر بـا ۲۰ mg/L حاصل شد. در مجموع، نتایج نشان داد که پلیمر ایمیدی مزدوج از ظرفیت حذف قابل توجه برای حذف رنگ رودامینبی تحت نور مرئی برخوردار بوده و کاربرد آن در تصـفیـه پـساب حـاوی ایــن رنـگهـا پـیشنهاد میشود.

ملاحظات اخلاقي

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

جهارم/ زمستان ۱۴۰۳ و کچط فصلنامه علمى پژوهشى انجمن علمى بهداشت محيط اير اُن ijhe.tums.ac.ir

پژوهشگران و فن آوران کشور با کد ۴۰۰۳۵۵۵ و با عنوان "حذف فوتوکاتالیستی رنگ رودامینبی از محیطهای آبی با استفاده از فوتوکاتالیست پلیمر مزدوج ایمیدی تحت نور مرئی" است.

تشكر و قدرداني

این مقاله مستخرج از رساله دکتری تخصصی علوم و مهندسی محیط زیست مصوب دانشگاه تربیت مدرس و صندوق حمایت از

References

 Liu D, Chen D, Hao Z, Tang Y, Jiang L, Li T, et al. Efficient degradation of Rhodamine B in water by CoFe2O4/H2O2 and CoFe2O4/PMS systems: A comparative study. Chemosphere. 2022;307:135935.

2. Rashtchi N, Sobhanardakani S, Cheraghi M, Goodarzi A, Lorestani B. Photocatalytic removal of amoxicillin from aqueous solution using magnetic graphene oxide functionalized with cerium dioxide nanocomposite. Iranian Journal of Health and Environment. 2022;15(2):307-20 (in Persian).

3. Sobhanardakani S, Zandipak R. Removal of methyl orange dye from aqueous solutions using NiFe2O4 nanoparticles: equilibrium and kinetic studies. Iranian Journal of Health and Environment. 2016;9(2):247-58 (in Persian).

4. Lin C-C, Hsiao H-H. Degradation of Rhodamine B in water by heat/persulfate process. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 2022;132:104190.

5. Phi Long B, Van Thiet D, Phi Hung P, Hoang Tuan N, Huu Bac L. Green synthesis of NiTiO3 nanoparticles and sonocatalytic degradation of Rhodamine B textile dye in water. Materials Letters.

2024;356:135581.

6. Reynoso de la Garza A, Zeghioud H, Benítez-Rico A, Romero-Nuñez A, Djelal H, Chávez-Miyauchi TE, et al. Visible LED active photocatalyst based on cerium doped titania for Rhodamine B degradation: Radical's contribution, stability and response surface methodology optimization. Materials Science in Semiconductor Processing. 2024;176:108349.

7. Lei X, Hu S, Liu K, Lv X, Chen Y, Zhang Q, et al. Electrochemical oxidation of Rhodamine B in dye wastewater by a novel boron-doped diamond electrode: parameter optimization and degradation mechanism. Desalination and Water Treatment. 2024;317:100243.

8. Li C-X, Wang R, Sun W, Cui K, Fu X-Z, Cui M, et al. Efficient degradation of Rhodamine B by visible-light-driven biomimetic Fe(III) complex/ peroxymonosulfate system: The key role of FeV=O. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2024:113288.

9. Sharma A, Makhija A, Saini L, Ohlan A, Dahiya S, Punia R, et al. Cost-effective and ecofriendly synthesis of thermally stable Sr2+ doped Bi2S3 nanoflowers for efficient adsorption and

مرا می و محط زر دوره هندهم/ شماره چهارم/ زمستان فصلنامه علمى پژوهشى انَجَمَن علمى بهداشت محيط اير ان ijhe.tums.ac.ir

visible-light-driven photocatalytic degradation of Rhodamine-B pollutant. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 2024;161:105534.

10. Rebekah A, Maddipatla R, Loka C, Sahoo S, Lee KS. Engineering effective separation of photoassisted charge carriers by provoking fenton-like reaction for degradation of rhodamine B dye. Applied Surface Science Advances. 2024;19:100576.

11. Fritah K, Khachane M, Bouddouch A, Akhsassi B, Bakiz B, Taoufyq A, et al. New insight for enhanced photocatalytic activity of Bi4-xLaxTi3O12 $(0 \le x \le 1)$ solid solution: A case study on degradation of Rhodamine B under UV light irradiation. Optical Materials. 2024;150:115182.

12. Gomathi A, Priyadharsan A, Handayani M, Kumar KAR, Saranya K, Kumar AS, et al. Pioneering superior efficiency in Methylene blue and Rhodamine b dye degradation under solar light irradiation using CeO2/Co3O4/g-C3N4 ternary photocatalysts. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2024;313:124125.

13. Zandipak R, Bahramifar N, Torabi M, Calero M, Muñoz-Batista MJ, Solís RR. Synergistic effect of graphitic-like carbon nitride and sulfur-based thiazole-linked organic polymer heterostructures for boosting the photocatalytic degradation of pharmaceuticals in water. Chemical Engineering Journal. 2024;494:152843.

Baimani N, Aberoomand Azar P, Husain
SW, Ahmad Panahi H, Mehramizi A. Providing

hyper-branched dendrimer conjugated with β -cyclodextrin based on magnetic nanoparticles for the separation of methylprednisolone acetate. Journal of Chromatography A. 2018;1571:38-46.

15. Wang H, Zhang J, Yuan X, Jiang L, Xia Q, Chen H. Photocatalytic removal of antibiotics from natural water matrices and swine wastewater via Cu(I) coordinately polymeric carbon nitride framework. Chemical Engineering Journal. 2020;392:123638.

16. Liu C, Cui X, Li Y, Duan Q. A hybrid hollow spheres Cu2O@TiO2-g-ZnTAPc with spatially separated structure as an efficient and energy-saving day-night photocatalyst for Cr(VI) reduction and organic pollutants removal. Chemical Engineering Journal. 2020;399:125807.

17. Vosoughi F, Habibi-Yangjeh A, Asadzadeh-Khaneghah S, Ghosh S, Maiyalagan T. Novel ternary g-C3N4 nanosheet/Ag2MoO4/AgI photocatalysts: Impressive photocatalysts for removal of various contaminants. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 2020;403:112871.

18. Jia Y, Liu P, Wang Q, Wu Y, Cao D, Qiao QA. Construction of Bi2S3-BiOBr nanosheets on TiO2 NTA as the effective photocatalysts: Pollutant removal, photoelectric conversion and hydrogen generation. Journal of Colloid and Interface Science. 2021;585:459-69.

Singh S, Mahalingam H, Singh PK.
Polymer-supported titanium dioxide photocatalysts
for environmental remediation: A review. Applied

دوره هفدهم/ شماره چهارم/ زمستان ۱۴۰۳ صلنامه علمی پژوهشی انجمن علمی بهداشت محیط ایر اُن ijhe.tums.ac.ir

Catalysis A: General. 2013;462-463:178-95.

20. Ghafoori M, Cheraghi M, Kiani Sadr M, Lorestani B, Sobhanardakani S. Removal of tetracycline from aqueous solution using magnetite graphene oxide modified with β -cyclodextrin as a novel adsorbent: equilibrium and kinetic studies. Iranian Journal of Health and Environment. 2023;16(2):257-72 (in Persian).

 Cooper AI. Conjugated Microporous
Polymers. Advanced Materials. 2009;21(12):1291-95.

22. Ashizawa M, Zheng Y, Tran H, Bao Z. Intrinsically stretchable conjugated polymer semiconductors in field effect transistors. Progress in Polymer Science. 2020;100:101181.

23. Wang X, Liang Y, An W, Hu J, Zhu Y, Cui W. Removal of chromium (VI) by a self-regenerating and metal free g-C3N4/graphene hydrogel system via the synergy of adsorption and photo-catalysis under visible light. Applied Catalysis B: Environmental. 2017;219:53-62.

24. Liu D, Dai L, Lin X, Chen JF, Zhang J, Feng X, et al. Chemical approaches to carbonbased metal-free catalysts. Advanced Materials. 2019;31(13):1804863.

25. Yang L, Peng Y, Luo X, Dan Y, Ye J, Zhou Y, et al. Beyond C3N4 π -conjugated metalfree polymeric semiconductors for photocatalytic chemical transformations. Chemical Society Reviews. 2021;50(3):2147-72. 26. Zandipak R, Bahramifar N, Younesi H, Zolfigol MA. Electro-photocatalyst effect of NS-doped carbon dots and covalent organic triazine framework heterostructures for boosting photocatalytic degradation of phenanthrene in water. Chemosphere. 2024;364:142980.

27. Hu SY, Sun YN, Feng ZW, Wang FO, Lv Yk. Design and construction strategies to improve covalent organic frameworks photocatalyst's performance for degradation of organic pollutants. Chemosphere. 2022;286:131646.

28. Zhou J, Wang Y, Cui Z, Hu Y, Hao X, Wang Y, et al. Ultrathin conjugated polymer nanosheets as highly efficient photocatalyst for visible light driven oxygen activation. Applied Catalysis B: Environmental. 2020;277:119228.

29. Chakraborty M, Bera KK, Chatterjee S, Ghosh A, Bhattacharya SK. Synthesis of mesoporous BiOI flower and facile in-situ preparation of BiOI/BiOC1 mixture for enhanced photocatalytic degradation of toxic dye, Rhodamine-B. Journal of Photochemistry and Photobiology. 2021;8:100077.

30. Xu D, Ma H. Degradation of rhodamine B in water by ultrasound-assisted TiO2 photocatalysis. Journal of Cleaner Production. 2021;313:127758.

31. Ahmad M, Rehman W, Khan MM, Qureshi MT, Gul A, Haq S, et al. Phytogenic fabrication of ZnO and gold decorated ZnO nanoparticles for photocatalytic degradation of Rhodamine B. Journal of Environmental Chemical Engineering.

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2025-03-12]

الم من و محطی دوره هندهم شماره چهارم زوستان در معندهم شماره چهارم زوستان فصلنامه علمى پژوهشى انَجَمَن علمى بهداشت محيط اير ان ijhe.tums.ac.ir

راضیه زندی پاک و همکاران

2021;9(1):104725.

32. Dao TBT, Ha TTL, Nguyen TD, Le HN, Ha-Thuc CN, Nguyen TML, et al. Effectiveness of photocatalysis of MMT-supported TiO2 and TiO2 nanotubes for rhodamine B degradation. Chemosphere. 2021;280:130802.

دوره هندهم/ شماره چهارم/ زمستان ۱۴۰۳ فصلنامه علمی پژوهشی انجمن علمی بهداشت محیط ایر آن ijhe.tums.ac.ir





Photocatalytic degradation of rhodamine B dye from aqueous media using imide conjugated polymer photocatalyst under visible light

Raziyeh Zandipak¹, Nader Bahramifar^{1,*}, Habibollah Younesi¹, Mohammad Ali Zolfigol²

Department of Environmental Science, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Nour, Iran
Department of Organic Chemistry, Faculty of Chemistry and Petroleum Sciences, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

ARTICLE INFORMATION:		ABSTRACT
Received:07 August 2024Revised:26 October 2024Accepted:30 October 2024Published:08 March 2025Keywords:Organic pollutants,Organic-covalent polymer, Pho-tocatalytic degradation, Kinetics,Visible light		Background and Objective: Dyes are significant pollutants that pose serious hazards to humans, animals and other organisms. They are not biodegradable through aerobic treatment processes, making their removal from industrial wastewater through photocatalytic processes essential. This research aimed to synthesize an imide-conjugated polymer photocatalyst for the first time and evaluate its effectiveness in removing Rhodamine B dye from aqueous solutions. Materials and Methods: In this applied research, an imide conjugated polymer was synthesized and employed as a photocatalyst for the removal of Rhodamine B from aqueous solutions. The polymer was characterized using Scanning Electronic Microscopy (SEM), Transmission electron microscopy (TEM), Atomic force microscopy (AFM), Y Ray Diffraction (XPD).
		X-Ray Diffraction (XRD), Thermogravimetric Analysis, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), and Diffuse reflectance spectroscopy (DRS) methods. The study also assessed the influence of variables, including pH (4-9), photocatalyst concentration (0.01-0.04 g/L), and contact time (0-120 min), on the removal efficacy of Rhodamine B. Results: The findings indicated that removal efficiency increased to 99% at a contact time of 45 minutes and a photocatalyst concentration of 0.02 g/L. The optimal pH for Rhodamine B removal was found to be 7. Conclusion: The imide conjugated polymer proved to be an effective and accessible photocatalyst for the removal of rhodamine B from industrial wastewater under visible light.
* Correspond n.bahramifar(ling Author: @modare.ac.ir	

Please cite this article as: Zandipak R, Bahramifar N, Younesi H, Zolfigol MA. Photocatalytic degradation of rhodamine B dye from aqueous media using imide conjugated polymer photocatalyst under visible light. Iranian Journal of Health and Environment. 2025;17(4):741-56.

Copyright © 2025 Iranian Association of Environmental Health, and Tehran University of Medical Sciences. Published by Tehran University of Medical Sciences. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://