

Investigation of the Effect of $H_3PW_6Mo_6O_{40}/g-C_3N_4$ Photocatalyst in the Degradation of Rhodamine B Dye Under Visible Light Irradiation

Razieh Nejat

Chemistry Department, Faculty of science, Kosar University of Bojnord, P.O. Box: 9415615458, Bojnord, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 13-08-2021

Accepted: 02-01-2022

Available online: 11-12-2022

Print ISSN: 1735-8779

Online ISSN: 2383-2169

DOR: 20.1001.1.17358779.1401.16.3.5.1

Keywords:

Graphitic carbon nitride

Keggin

Photocatalyst

Rhodamine B

Visible light

ABSTRACT

This work has fabricated a nanohybrid catalyst containing $H_3PW_6Mo_6O_{40}$ heteropolyacid supported on graphitic carbon nitride ($PW_6Mo_6/g-C_3N_4$) via a facile approach. It was developed as a highly active and stable photocatalyst for cationic Rhodamine B dye degradation under visible light irradiation. Graphitic carbon nitride ($g-C_3N_4$) is an emerging metal-free catalyst and has attracted considerable research interests in photocatalysis. Compared to pristine $g-C_3N_4$ and pristine $H_3PW_6Mo_6O_{40}$, POMs modified sample ($PW_6Mo_6/g-C_3N_4$) demonstrated enhanced efficiencies in the photodegradation of rhodamine B dye under visible light irradiation. Also, $PW_6Mo_6/g-C_3N_4$ displays higher photocatalytic activity under visible light irradiation for the photodegradation of this dye compared with $PW_{12}/g-C_3N_4$ and $PMO_{12}/g-C_3N_4$. The influence of reaction parameters such as time, the dependence of degradation on the presence of the catalyst and light irradiation, pH, and the photocatalyst's reusability on the degradation yield have been investigated. The catalyst showed high photocatalytic activity for the degradation of cationic Rhodamine B solution at a concentration of 20 ppm in pH=3 under visible light irradiation.



بررسی اثر کاتالیزور نوری $H_3PW_6Mo_6O_{40}/g-C_3N_4$ در تخریب رنگ رودامین B تحت تابش نور مرئی

راضیه نجات

استادیار، بخش شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه کوثر بجنورد، بجنورد، ایران، صندوق پستی: ۹۴۱۵۶۱۵۴۵۸.

چکیده

در این تحقیق، یک کاتالیزور نانو هیبریدی شامل پلی‌اکسومتالات حمایت شده بر روی نیتريد کربن گرافیتی ($PMOs/g-C_3N_4$) با استفاده از یک رویکرد آسان ساخته و به عنوان کاتالیزور نوری بسیار فعال و پایدار در تخریب رنگ کاتیونی رودامین B تحت تابش نور مرئی، به کار برده شد. نیتريد کربن گرافیتی ($g-C_3N_4$) یک کاتالیزور نوظهور بدون فلز است و علائق تحقیقاتی قابل توجهی را در زمینه کاتالیزور نوری به خود جلب کرده است. در مقایسه با ($g-C_3N_4$) خالص و هتروپلی‌اسید $H_3PW_6Mo_6O_{40}$ خالص، نمونه اصلاح شده هتروپلی‌اسید بر نیتريد کربن گرافیتی ($PW_6Mo_6/g-C_3N_4$)، کارایی بیشتری را در تجزیه نوری این رنگ نشان داده است. همچنین $PW_6Mo_6/g-C_3N_4$ در مقایسه با $PW_{12}/g-C_3N_4$ و $PMO_{12}/g-C_3N_4$ ، فعالیت کاتالیزور نوری بالاتری را تحت تابش نور مرئی برای تجزیه نوری این رنگ نشان می‌دهد. عوامل مختلف مانند زمان، وابستگی تخریب رنگ کاتالیزور و تابش نور، pH و همچنین قابلیت استفاده مجدد کاتالیزور نوری بر عملکرد تخریب، بررسی شده است. کاتالیزور مذکور فعالیت کاتالیزور نوری بالایی جهت تخریب رنگ رودامین B با غلظت ۲۰ ppm در $pH=3$ تحت تابش نور مرئی نشان داد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۵/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۲

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۱/۹/۲۰

شاپا چاپی: ۱۷۳۵-۸۷۷۹

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۱۶۹

DOR: 20.1001.1.17358779.1401.16.3.5.1

واژه‌های کلیدی:

رودامین B

کاتالیزور نوری

کگین

نیتريد کربن گرافیتی

نور مرئی



۱- مقدمه

امروزه، یکی از دغدغه‌های بزرگ پیش روی جامعه، یافتن کاتالیزورهای جدید، موثر، مقرون به صرفه اقتصادی و قابل بازیافت به منظور تصفیه آب از جمله حذف رنگ‌های خطرناک و ترکیبات آلی سمی از فاضلاب است [۱]. در مجموع از عمده منابع تولید آلاینده‌های آب، می‌توان به صنایع مربوط به نساجی، لوازم آرایشی، رنگ، کاغذ، چرم، پلاستیک، شرکت‌های دارویی و مواد غذایی اشاره کرد. دولت‌ها مجبور می‌شوند برای حل این مشکلات، بودجه زیادی پرداخت کنند زیرا اثرات مخرب این مواد بر سلامت انسان یا محیط‌زیست کاملاً مشهود می‌باشد. در میان راهبردهای کاربردی اخیر جهت تصفیه آب از جمله فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی، فتوشیمیایی و میکروبیولوژیکی، به جرات می‌توان گفت یکی از موثرترین و کارآمدترین روش‌ها، استفاده از فرآیندهای اکسید شدن پیشرفته (AOP)، می‌باشد. به دلیل تجزیه کامل مواد آلی به دی اکسید کربن و آب با راندمان بالا، فرآیندهای اکسید شدن پیشرفته (AOP)، به طور گسترده‌ای برای تصفیه فاضلاب استفاده می‌شود. در بین AOP‌های مختلف، فرآیند کاتالیزوری نوری ناهمگن به دلیل کم هزینه بودن، سازگاری با محیط‌زیست و پایداری به عنوان یک روش بهبود دهنده و امیدوار کننده، در نظر گرفته شده است [۲، ۳]. از طرفی، استفاده از نور به عنوان منبع انرژی، این روش را از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه کرده و منبعی ارزان و فراوانی بوده و همچنین می‌توان گفت در طی این فرآیند، تقریباً هیچگونه محصول جانبی مضر از محیط واکنش به محیط‌زیست وارد نمی‌گردد [۴]. در راستای همین موضوع، یعنی مشکلات اقتصادی و زیست‌محیطی، در دهه‌های اخیر رویکرد "شیمی سبز" در طراحی برای بهره‌وری انرژی به عنوان یک اصل اساسی در شیمی سبز، به سرعت رو به گسترش است. بنابراین، استفاده از نور مرئی به عنوان منبع انرژی نامحدود، ارزان و سبز، یکی از بهترین گزینه‌ها برای واکنش‌های شیمیایی می‌باشد [۵-۱۱]. در راستای توسعه کاتالیزورهای نوری ناهمگن، اکسیدهای فلزی (ZnO , TiO_2 و غیره)، [۱۵-۱۲] سولفیدهای فلزی (ZnS , CdS و غیره) [۱۶-۲۰]، و فلزات نجیب (Pt , Ag , Au ، و غیره) [۲۱]، استفاده شده است. هزینه بالای یون‌های فلزی، مانعی برای کاربرد وسیع آنها به عنوان کاتالیزور نوری می‌باشد. اخیراً، نیتريد کربن گرافیتی به دلیل ساختار منحصر به فرد و خواص فیزیکی و شیمیایی قابل توجه، مانند هدایت الکترونیکی عالی و استحکام مکانیکی بالا، بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۲۲]. در سال ۲۰۰۹ وانگ و همکارانش [۲۳] نشان دادند که $g-C_3N_4$ ، به عنوان یک نیمه هادی پلیمری با انرژی باندی حدود ۲٫۷ الکترون ولت، دارای پتانسیل بسیار بالایی در تبدیل و ذخیره انرژی خورشیدی در طی فرآیند کاتالیزوری نوری می‌باشد. برای بهبود فعالیت کاتالیزور نوری $g-C_3N_4$ ، راهبردهای مختلفی برای اصلاح $g-C_3N_4$ ، استفاده شده است. پلی اکسومتالات‌ها

(POM) یک گروه وسیع از خوشه‌های فلز-اکسیژن، با ساختاری عظیم و عملکردهای متعدد می‌باشند که می‌توانند سهم بسزایی در توسعه مواد به عنوان کاتالیزور در واکنش‌های فتوشیمیایی داشته باشد [۲۴]. گزارش شده است که POM‌ها نه تنها ترکیبات اکسند قوی نوری می‌باشند، بلکه اسیدهای برونستد قوی نیز هستند، بنابراین آلاینده‌های زیست محیطی را می‌توان با POM در محلول تحت تابش خورشید اکسید کرد [۲۵]. انواع POM‌های پشتیبانی شده بر روی بسترهای مختلف مانند دی اکسید تیتانیوم [۲۶]، بر روی MOF [۲۷] و غیره برای واکنش‌های کاتالیزور نوری استفاده شده‌اند. قابل ذکر است که علی‌رغم خواص مطلوب کاتالیزورهای مذکور، فعالیت کاتالیزوری آنها تحت تأثیر محدودیت‌های انتقال جرم ناشی از میکروحفره‌های کوچک‌شان است [۲۸، ۲۹]. بنابراین، سنتز کاتالیزور با کارایی بالا، چالش مهمی در علم کاتالیزور و مواد به حساب می‌آید [۳۰]. کاهش اندازه بلور به حدود نانو می‌تواند روشی مناسب برای غلبه بر این مشکلات باشد که منجر به کاهش مسیرهای نفوذ داخلی، افزایش ناحیه سطحی خارجی کاتالیزور و بهبود انتقال جرم می‌شود [۳۱]. پژوهش‌ها نشان داده است که هر چه میزان بلورینگی بالاتر و اندازه بلور کوچک‌تر می‌شود، عملکرد کاتالیزورهای نانوساختار بیشتر می‌گردد [۳۲].

تلاش‌هایی در جریان است که POM‌ها را بر روی کاتالیزور نوری نوظهور نوری $g-C_3N_4$ ، بدون فلز و با ساختار دو بعدی قرار داد. رودامین B رنگینه‌ای است که غالباً به عنوان ردیاب برای تعیین جهت و مقدار جریان آب استفاده شده و خصلت فلوروسان دارد. پژوهش‌ها نشان داده این رنگینه که به طور گسترده در برنامه‌های زیست فناوری مانند میکروسکوپ فلوروسان استفاده می‌گردد، ماده سرطان‌زایی برای جانداران به ویژه انسان است. در اینجا، سنتز و کاربرد کاتالیزور نوری پلی اکسومتالات $PW_6Mo_6O_{40}$ بر $g-C_3N_4$ در جهت تخریب رنگ کاتیونی رودامین B گزارش شده است.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد

ملامین با خلوص ۹۹ درصد، اسید فسفومولیبدیک آبدار ($PMo_{12}O_{40}$ \cdot xH_2O)، با خلوص ۹۹ درصد و اسید فسفوتونگستیک آبدار با خلوص ۹۹ درصد ($PW_{12}O_{40}$ \cdot xH_2O) از شرکت سیگما-آلدردیج خریداری شد. تمامی حلال‌ها و مواد مصرف شده از شرکت مرک بدون خلص‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند. مشخصات ماده رنگزای رودامین B و ساختار شیمیایی آن به ترتیب در جدول ۱ و شکل ۱ نشان داده شده است.

گرافیتی در ۳۰ میلی لیتر اتانل ریخته شد و به مدت ۲ ساعت تحت امواج فراصوت قرار گرفت. سپس ۰٫۸ گرم از هتروپولی اسید PMo_6W_6 به مخلوط فوق اضافه شد. ظرف آب بندی و مخلوط به مدت ۲۰ ساعت هم زده شد. پس از آن، فاز جامد صاف شد و در دمای ۷۵ درجه سانتی گراد خشک شد. مراحل آماده سازی فتوکاتالیست در شکل ۲ نشان داده شده است.

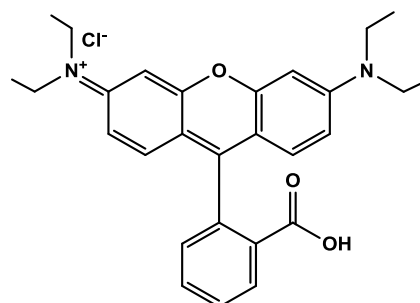
۲-۲-۲- مشخصه یابی نمونه ها

طیف FTIR در محدوده $4000-500\text{ cm}^{-1}$ با دستگاه مدل (NICOLET IR100) با استفاده از قرص KBr به دست آمده است. از پراش سنجی پرتو ایکس (XRD) مدل فیلیپس جهت تجزیه و تحلیل فاز و ساختار بلوری نمونه ها استفاده شده است. (با $CuK\alpha$ ($\alpha=0.154056\text{ \AA}$)). تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با استفاده از دستگاه با مدل Philips XL-300 ثبت شده است. طیف سنجی بازتابی (UV/Vis DRS) با استفاده از دستگاه طیف سنجی فرابنفش- مرئی مدل UV-Visible Thermo Scientific Evolution 300/600 (USA) به دست آمده است. نور مرئی توسط یک لامپ ۴۰۰ وات (لامپ بخار جیوه با فشار بالا و $\lambda = 546.8$ نانومتر) فراهم شده است.

جدول ۱: مشخصات ماده رنگزای کاتیونی متیلن آبی.

Table 1: Specifications of the cationic dye rhodamine B.

Molecular Weight	Molecular Formula	λ_{max} (nm)	Chemical Name
479.02	$C_{28}H_{31}ClN_2O_3$	550-552	Rhodamine B



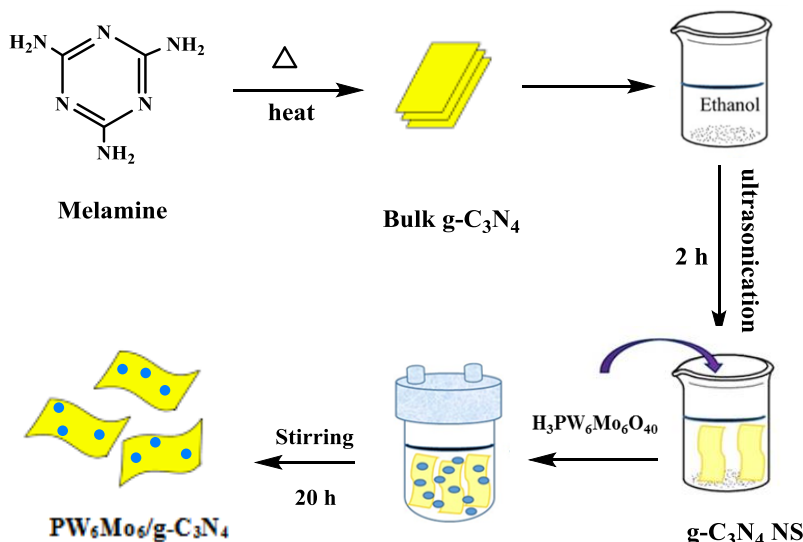
شکل ۱: ساختار شیمیایی ماده رنگزای رودامین B.

Figure 1: The Chemical structure of Rhodamine B dye.

۲-۲-۲- روش کار

۲-۲-۲-۱- سنتز کاتالیزور $PW_6Mo_6/g-C_3N_4$

ابتدا نیتريد کربن گرافیتی با استفاده از روش تراکم حرارتی ملامین مطابق روش گزارش شده در مقالات قبلی، سنتز شد [۲۸]. سپس نانوذرات هتروپولی اسیدی، براساس مرجع گزارش شده تهیه شدند [۲۹]. جهت سنتز $PW_6Mo_6/g-C_3N_4$ ، نیم گرم از نیتريد کربن



شکل ۲: طرح شمایی روند ساخت نانو هیبرید $PW_6Mo_6/g-C_3N_4$.

Figure 2: Schematic representation of the synthesis of $PW_6Mo_6/g-C_3N_4$ nanohybrid.

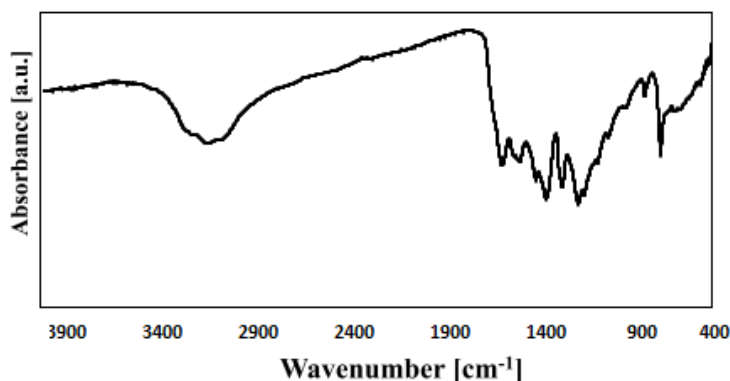
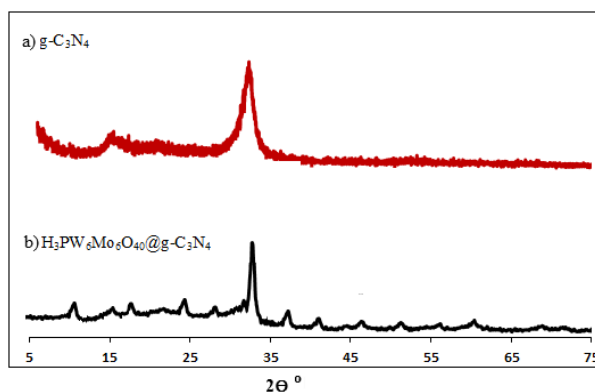
۳- نتایج و بحث

۳-۱- تحلیل آنالیز طیف‌سنجی زیر قرمز تبدیل فوریه (FTIR)

طیف‌سنجی تبدیل فوریه زیر قرمز (FTIR) از کاتالیزور $PW_6Mo_6@g-C_3N_4$ در محدوده $4000-500\text{ cm}^{-1}$ مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۳). قله‌های اصلی در کاتالیزور واقع در 1025 cm^{-1} و 920 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات پیوند $P=O$ ، در ناحیه $830-935\text{ cm}^{-1}$ مربوط به ارتعاشات پیوند (فلز-اکسیژن)، در ناحیه 770 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات پیوند (فلز-اکسیژن-فلز) و در ناحیه $3100-3300\text{ cm}^{-1}$ به ارتعاشات کششی $N-H$ و OH اختصاص داده می‌شود. و همچنین قله‌های بین $1150-1750\text{ cm}^{-1}$ به ارتعاشات پیوند $C-N$ در هتروسیکل‌های آروماتیک، نسبت داده می‌شوند. شدت نوارهای مخصوص POM کم است، زیرا مقدار کمی از هتروپولی اسید بر روی $g-C_3N_4$ وجود دارد [۳۵، ۳۶].

۳-۲- تحلیل الگوهای آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD)

تجزیه و تحلیل آنالیز XRD جهت بررسی میزان بلورینگی و خلوص نمونه‌های $g-C_3N_4$ و $PW_6Mo_6@g-C_3N_4$ صورت گرفت (شکل ۴). الگوی XRD از نمونه $g-C_3N_4$ در شکل 3a، شامل قله‌های پراش در 13.1 و 27.5 درجه به ترتیب مربوط به صفحات بازتاب (100) و (002) می‌باشد که با شماره کارت (JCPDS 65-3107) مطابقت می‌کند [۳۷، ۳۸]. شدت صفحه (100) بسیار خوب است که وجود ساختاری شبیه گرافیت را تأیید می‌کند. آنالیز XRD از نمونه $PW_6Mo_6@g-C_3N_4$ در شکل 3b، قله‌هایی در $10-17$ ، $23-25$ و $36-43$ درجه که مربوط به ساختار خانواده کگین است را نشان می‌دهد [۳۹]. حضور قله پراش قوی در الگوی XRD از کاتالیزور در 27.5 درجه نشان‌دهنده چیدمان بین لایه‌ای مربوط به سیستم‌های آروماتیک می‌باشد. بنابراین الگوی مربوط به $PW_6Mo_6@g-C_3N_4$ ، هم قله‌های پراش مرسوم پلی اکسومتالات خانواده کگین و هم قله‌های پراش $g-C_3N_4$ را نشان می‌دهد و بیانگر آن است که $H_3PW_6Mo_6O_{40}$ روی $g-C_3N_4$ بارگذاری شده است.

شکل ۳: طیف FTIR از کاتالیزور $PW_6Mo_6@g-C_3N_4$.Figure 3: The FT-IR spectrum of $PW_6Mo_6@g-C_3N_4$ catalyst.شکل ۴: الگوهای پراش پرتو ایکس (XRD) از نمونه‌های (a) $g-C_3N_4$ و (b) کاتالیزور.Figure 4: XRD of a) $g-C_3N_4$ and b) catalyst..

کرده و منجر به فعالیت نوری گردد.

۵-۳- بهینه‌سازی شرایط تخریب رنگ رودامین B

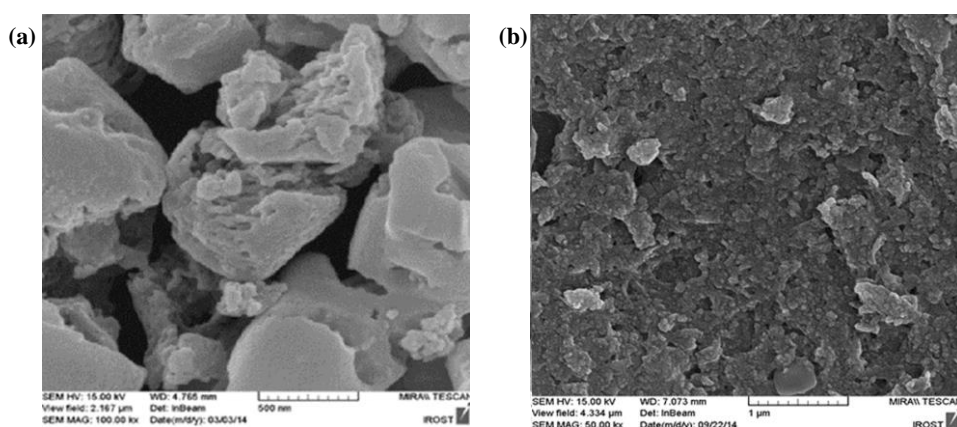
ابتدا جهت بهینه‌سازی، شرایط مختلف روی عملکرد کاتالیزور نوری در تخریب رنگ رودامین B از جمله استفاده از مقادیر متفاوت کاتالیزور، کاتالیزورهای مختلف، وابستگی تخریب به حضور کاتالیزور و تابش نور و pH های مختلف محلول، مورد بررسی قرار گرفت. مطابق نتایج جدول ۲، مشخص شد که واکنش بدون کاتالیزور انجام نشده و هیچ فعالیتی در حضور $g-C_3N_4$ خالص مشاهده نمی‌شود (ردیف‌های ۱ و ۲). به طور کلی، فعالیت $POMs/g-C_3N_4$ در شرایط کاتالیزوری در تخریب رنگ بیشتر از هتروپلی اسید خالص (ردیف‌های ۴ و ۵) و فعالیت کاتالیزوری $PW_6Mo_6/g-C_3N_4$ بیشتر از $PMo_{12}@g-C_3N_4$ ، $PW_{12}@g-C_3N_4$ بود. کاهش مقدار کاتالیزور منجر به کاهش عملکرد می‌شود (ردیف ۱۴) و افزایش آن تاثیری بر عملکرد ندارد. بنابراین، این واکنش بهترین عملکرد را تحت تابش نور مرئی، با استفاده از 0.03 گرم از کاتالیزور $PW_6Mo_6/g-C_3N_4$ دارد.

۳-۳- تحلیل نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

ریخت‌شناسی و ویژگی‌های ساختاری نانوهیبرید $PW_6Mo_6@g-C_3N_4$ با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۵ a مربوط به $g-C_3N_4$ خالص می‌باشد و همان‌طور که در شکل مربوط به کاتالیزور ۵ b، دیده می‌شود، $g-C_3N_4$ توسط بلورهای پوشانده شده است. شواهد نشان می‌دهد که نانو ذرات PW_6Mo_6 بروی سطح $g-C_3N_4$ به صورت نقاط برجسته ظاهر شده و به‌طور یکنواخت بر روی آن پخش شده‌اند.

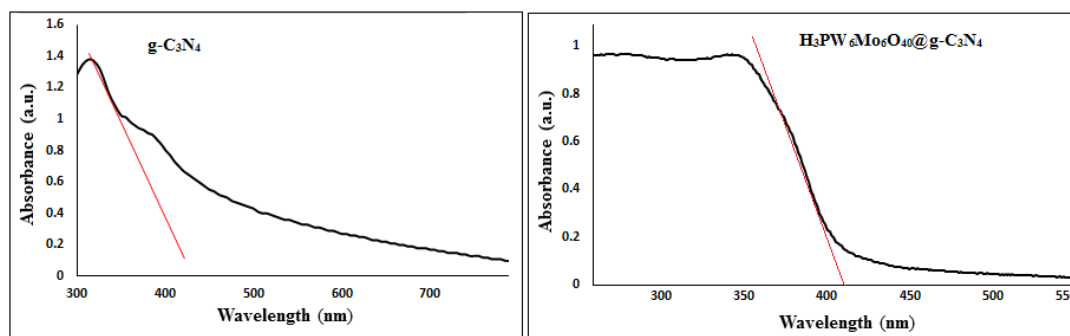
۴-۳- تحلیل نتایج آنالیز طیف‌سنجی بازتابی (DRS)

در فرآیند کاتالیزور نوری، ویژگی نوری به طور گسترده ای برای ارزیابی آستانه جذب نور و انرژی شکاف باندی کاتالیزور نوریهای توسعه یافته، استفاده شده است. در شکل ۶، طیف DRS به منظور مطالعه خواص نوری $g-C_3N_4$ و $PW_6Mo_6@g-C_3N_4$ نشان داده شده است. انرژی شکاف باندی $g-C_3N_4$ و $PW_6Mo_6@g-C_3N_4$ به ترتیب 2.80 eV و 3.02 برآورد شده است. انرژی شکاف باند $PW_6Mo_6@g-C_3N_4$ نشان می‌دهد کاتالیزور می‌تواند نور را در ناحیه مرئی جذب



شکل ۵: تصاویر SEM از نمونه‌های (a) گرافن اکسید و (b) کاتالیزور.

Figure 5: SEM images of (a) $g-C_3N_4$ and (b) catalyst.



شکل ۶: طیف DRS از نمونه‌های (a) $g-C_3N_4$ و (b) کاتالیزور.

Figure 6: DRS of (a) $g-C_3N_4$ and (b) catalyst.

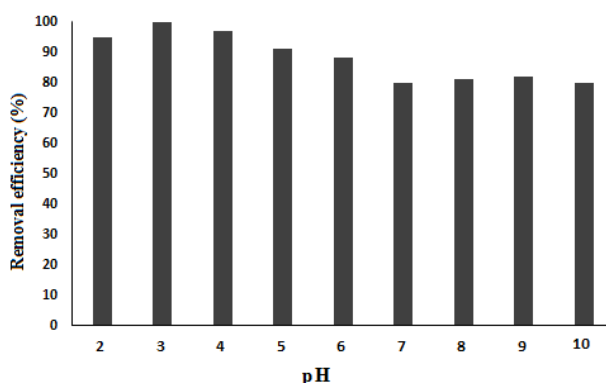
جدول ۲: بهینه‌سازی شرایط تخریب رنگ رودامین B با غلظت ۲۰ ppm تحت تابش نور مرئی.

Table 2: Optimization of rhodamine B dye degradation with a concentration of 20 ppm under visible light irradiation.

Entry	Catalyst	Catalyst amount (g)	Time (min)	Yield (%)
1	none	-	60	-
2	g-C ₃ N ₄	0.01	60	-
3	PW ₆ Mo ₆	0.03	60	78
4	PW ₁₂ @g-C ₃ N ₄	0.03	150	82
5	PMo ₁₂ /g-C ₃ N ₄	0.03	150	86
6	PW ₆ Mo ₆ /g-C ₃ N ₄	0.02	150	93
7	PW ₆ Mo ₆ /g-C ₃ N ₄	0.03	150	100
8	PW ₆ Mo ₆ /g-C ₃ N ₄	0.04	150	100

۳-۷- اثر pH محلول در فرآیند تخریب رنگ رودامین B

بررسی نقش pH در تخریب آلاینده‌های آلی مانند رنگ‌ها بسیار حائز اهمیت می‌باشد زیرا pH بر خاصیت سطح کاتالیزورهای نوری تاثیرگذار بوده و از آنجایی که واکنش روی سطح کاتالیزور اتفاق می‌افتد، بررسی pH، عامل بسیار مهمی خواهد بود. وضعیت اسید و بازی بودن سطوح کاتالیزور نوری می‌تواند تأثیر زیادی بر عملکرد جذب و تخریب کاتالیزور نوری داشته باشد. در این پژوهش، اثر pH های مختلف مانند ۲ تا ۱۰ طی مدت ۱۵۰ دقیقه، مورد مطالعه قرار گرفت. برای تنظیم pH از محلول‌های رقیق اسید کلریدریک و سود استفاده گردید. شکل ۸ درصد تخریب را به عنوان تابعی از pH نشان می‌دهد. تخریب رنگ رودامین B در شرایط اسیدی (pH=3) مطلوب است، این ممکن است به این واقعیت نسبت داده شود که مقدار pH می‌تواند بر میزان رادیکال‌های هیدروکسیل OH تشکیل شده [۴۰] و پایداری هتروپولی اسید تأثیر بگذارد. بنابراین pH بهینه محلول ۳ است.



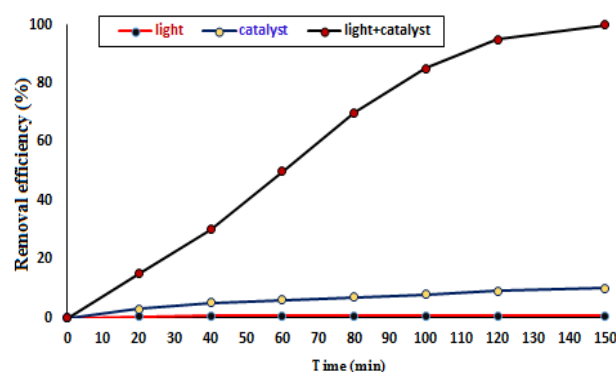
شکل ۸: اثر pH محلول برای تخریب رنگ رودامین B در حضور

$PW_6Mo_6@g-C_3N_4$.

Figure 8: Effect of solution pH for degradation of rhodamine B dye in the presence of $PW_6Mo_6@g-C_3N_4$.

۳-۶- اثر نور و کاتالیزور در تخریب رنگ رودامین B

وابستگی تخریب رنگ رودامین B به حضور کاتالیزور و تابش نور در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در غیاب کاتالیزور نوری و تحت تابش نور مرئی، هیچ تخریب رنگی مشاهده نشد. اما پس از انجام واکنش در حضور کاتالیزور و در غیاب تابش نور، مقدار جزئی از غلظت رنگ رودامین B در تاریکی کاهش نشان داده است. این کاهش جزئی در غلظت رنگ، می‌تواند به جذب جزئی مولکول‌های آلی در سطح ذرات کاتالیزور نوری مربوط باشد. اما وقتی مخلوط رنگ رودامین B با کاتالیزور نوری در معرض تابش نور مرئی قرار گرفت، بازده تخریب تا ۱۰۰ درصد افزایش یافت. بازده تخریب تا ۱۰۰ درصد افزایش یافت که به علت جذب زیاد نور مرئی و انتقال سریع الکترون‌ها که دارای اثرات متقابل می‌باشند، نسبت داده می‌شود.

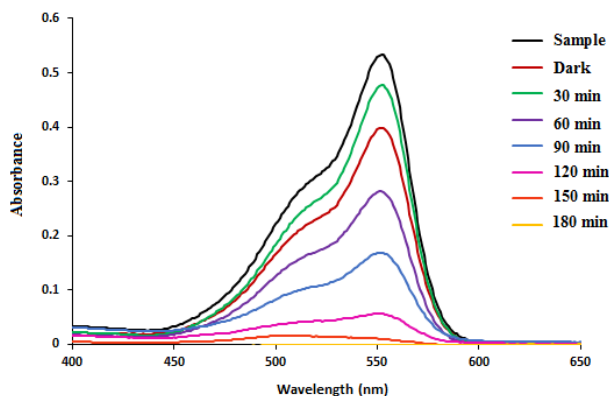


شکل ۷: اثرات نور، کاتالیزور و (نور + کاتالیزور) برای تخریب رنگ رودامین B.

Figure 7: Effects of light, catalyst and (light + catalyst) to degrade rhodamine B dye.

۸-۳- ایزوترم تجزیه نوری رنگ رودامین B

مقایسه نتایج کار فعلی با نتایج مقالات مشابه در تخریب رنگ رودامین B در نظر گرفته شده است [۴۱].



شکل ۹: طیف جذبی UV-Vis از تخریب رنگ رودامین B در $pH = 3$ و در حضور نور و کاتالیزور.

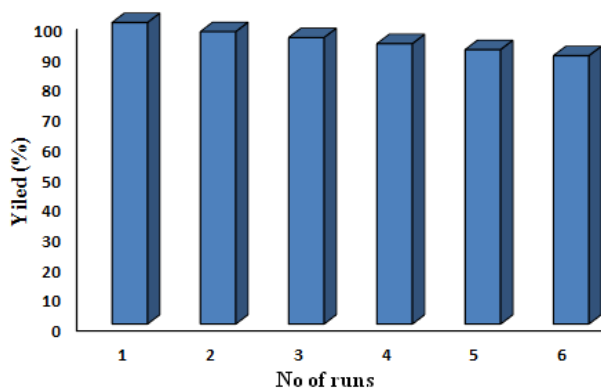
Figure 9: UV-Vis absorption spectrum of rhodamine B dye degradation at $pH = 3$ and in the presence of light and catalyst.

جهت بررسی فعالیت‌های کاتالیزور نوری برای $PW_6Mo_6@g-C_3N_4$ ، ۰٫۰۳ گرم کاتالیزور را در ۵۰ میلی لیتر محلول آبی رنگ رودامین B با غلظت ۲۰ ppm اضافه می‌کنیم. ابتدا، مخلوط مذکور به مدت ۳۵ دقیقه در تاریکی تحت هم زدن مغناطیسی قرار می‌گیرد تا تعادل جذب / واجذب بین آلاینده رنگی و سطح کاتالیزور ایجاد گردد. سپس مخلوط مذکور، تحت تابش نور مرئی لامپ جیوه فشار بالای 400 W قرار گرفت و پخش کننده هوا (پمپ هوا، جریان: ۳٫۵ لیتر در دقیقه ۱) در انتهای راکتور قرار داشت تا هوا را به طور یکنواخت در محلول پخش کند. دمای این فرآیند کاتالیزور نوری با استفاده از فن‌های خنک کننده در دمای ۲۵-۳۵ درجه سانتی‌گراد ثابت نگه داشته شد تا از هرگونه اثر حرارت بر کاتالیزور جلوگیری شود. طیف جذب پرتو فرابنفش تخریب رنگ رودامین B در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که در منحنی‌ها نشان داده شده است، پیک‌های مشخصه ترکیب رنگ رودامین B در ۵۵۲ نانومتر ظاهر شده است. نتایج حاکی از آن است که شدت پیک مشخصه با گذشت زمان تابش، کاهش یافته و پس از ۱۵۰ دقیقه تحت تابش نور، ناپدید می‌گردد. بنابراین رنگ رودامین B می‌تواند به طور موثر توسط سیستم کاتالیزور نوری مذکور تجزیه شود. جدول ۳ به منظور

جدول ۳: مقایسه نتایج کار فعلی با نتایج مقالات مشابه در تخریب رنگ رودامین B

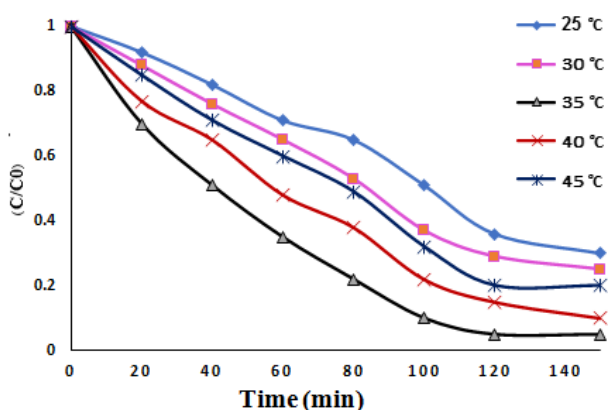
Table 3: Comparison of the results of the current work with the results of similar articles on the degradation of rhodamine B dye

Entry	catalyst	amount (gr)	source of light	PH	Volume (ml)	Initial concentration	Time (min)	Yield (%)
1	$PW_6Mo_6/g-C_3N_4$	0.03	A 400 W high-pressure Hg Lamp (λ max D 546.8 nm)	3	50	20mg/l	150	100
2	$PW_{12}O_{40}^{3-}$ / anionic exchangeresin	0.25	A 500 W halogen lamp (equipped with a 450 nm cut-off filter, visible light)	2.5	60	0.02 mM	240	95 >
3	$PW_{11}-SiO_2$ film	$1.25 \times 12 \times 45$ mm	A 125 W high-pressure Hg Lamp (λ max D 313.2 nm)	-	150	1 m M/l	240	87
4	$H_3PW_{12}O_{40}/TiO_2$	0.25	A 400 W Xe lamp ($\lambda > 420$ nm)	-	200	50 mg/l	60	98
5	$H_3PW_{12}O_{40}/TiO_2$ film	two pieces of quartz (4.5) mg	A 300 W Xe lamp (with an IR cut filter, λ D 320-780, 200 mW/cm ²)	4/4	120	25 mg/l	240	98 >
6	$H_3PW_{12}O_{40}/TiO_2$	100 mg	A 350 W Xe lamp	-	100	25 mg/l	240	80
7	$PW_{11}O_{39}Mn^{II}(H_2O)^{5-}/D301R$ resin	100 mg	A 200 W metal halide lamp (equipped with a 420 nm cut-off filter)	-	250	10 μ M/l	40	100



شکل ۱۰: قابلیت استفاده مجدد از کاتالیزور جهت تخریب نوری رنگ رودامین B.

Figure 10: Reusability of the catalyst for optical degradation of rhodamine B dye.



شکل ۱۱: اثر دما بر روی خاصیت تخریب رنگ رودامین B کاتالیزور.

Figure 11: Effect of temperature on the degradation of rhodamine B dye.

جدول ۴: معادلات سینتیکی.

Table 4: Kinetic equations.

Kinetic type	Linear form
First order	$\ln [A]_t / [A]_0 = K_1 t$
SECOND grade	$1/[A]_t - 1/[A]_0 = K_2 t$

جدول ۵: ضرایب مدل‌های جذب سینتیکی رنگ رودامین B بر روی



Table 5: Coefficients of kinetic adsorption models of rhodamine B dye on $PW_6Mo_6@g-C_3N_4$.

Second grade			first order		
R^2	q_e	K_2	R^2	q_e	K_1
0.9714	0.27	0.0603	0.9319	1.035	0.0757

۹-۳- بررسی بازیابی کاتالیزور

به منظور سنجش پایداری و بازیابی کاتالیزور، آزمایشات مربوط به تخریب نوری رنگ رودامین B تحت شرایط بهینه صورت گرفت (شکل ۱۰). بعد از جداسازی کاتالیزور از مخلوط واکنش، کاتالیزور سه مرتبه توسط آب دیونیزه، شستشو داده شد، سپس خشک و در نهایت مستقیماً به منظور تخریب محلول رنگ بعدی، استفاده شد. همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، مشاهده شد که کاتالیزور بازیافت شده، حتی پس از استفاده از کاتالیزور بازیافت شده برای بار ششم، کاهش قابل ملاحظه‌ای در فعالیت نشان نداده است.

۱۰-۳- اثر دما

به منظور ارزیابی اثر دما بر روی خاصیت رنگبری کاتالیزور در pH اسیدی برابر ۳، آزمایش‌ها در دماهای مختلف ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰ و ۴۵ درجه انجام شد. همان‌طور که شکل ۱۱ نشان می‌دهد، افزایش دما تا دمای ۳۵ °C باعث افزایش سرعت رنگبری می‌شود اما دماهای بالاتر باعث کاهش بازده رنگبری شده است. تا دمای ۳۵ °C به نظر می‌رسد که افزایش دما باعث افزایش نفوذ و حرکت سریع‌تر مولکول‌های ماده رنگزا به سمت نانوذرات شده است. بنابراین با افزایش دما امکان تشکیل مکان‌های جذبی بیشتری روی نانوذرات به وجود می‌آید که می‌تواند فرآیند جذب را کنترل کند و مکان‌های جذب ماده رنگزا بر روی نانوذرات راحت‌تر در دسترس مولکول‌های ماده رنگزا قرار گیرند. از طرفی نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که افزایش دما تا یک مقدار خاص، جذب و بازده حذف رنگ از محلول را افزایش می‌دهد و افزایش بیشتر دما موجب کاهش بازده جذب می‌گردد. زیرا فرآیند جذب می‌تواند برگشت‌پذیر بوده و امکان شکست پیوندهای تشکیل شده بین نانوذرات و رنگینه مورد نظر، در دماهای بالاتر وجود دارد. بنابراین بازده حذف رنگ کاهش می‌یابد.

مطالعات سینتیکی

بررسی سینتیک جذب نانوذرات $PW_6Mo_6@g-C_3N_4$ با استفاده از مدل‌های سینتیکی شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم صورت گرفت [۴۲]. معادلات مربوط به سینتیک‌ها و ضرایب مدل‌های سینتیکی در جدول ۴ و ۵ آورده شده است. جدول شماره ۵ مقادیر K_1 ، K_2 ، q_{eq} و R^2 را در بر می‌گیرد. با مقایسه ضرایب رگرسیون رابطه‌های مذکور مشخص شد که فرآیند جذب سطحی رودامین B روی نانوذرات $PW_6Mo_6@g-C_3N_4$ با مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم مطابقت بیشتری دارد که بیشتر جاذب‌ها با کارایی بالا از این سینتیک پیروی می‌کنند [۴۳-۴۵].

جدول ۶: مشخصه‌های ترمودینامیکی جذب رنگ رودامین B بر روی $PW_6Mo_6@g-C_3N_4$

Table 6: Thermodynamic parameters of rhodamine B dye adsorption on $PW_6Mo_6@g-C_3N_4$.

$^{\circ}S\Delta$ (kJ/mol)	$^{\circ}H\Delta$ (kJ/mol)	$^{\circ}G\Delta$ (kJ/mol)	دما (درجه سلسیوس)
		-1/92	25
		-3/24	30
0.046	9.76	-6/01	35
		-4/67	40
		-3/96	45

جذب رودامین B توسط $PW_6Mo_6@g-C_3N_4$ ثابت‌های ترمودینامیکی همچون انرژی آزاد، آنتالپی و آنتروپی که از روابط ۱ تا ۳ به دست می‌آیند، در دماهای مختلف ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰ و ۴۵ درجه، مورد بررسی قرار گرفت.

$$\ln K_c = \Delta S^{\circ}/R - \Delta H^{\circ}/RT \quad (1)$$

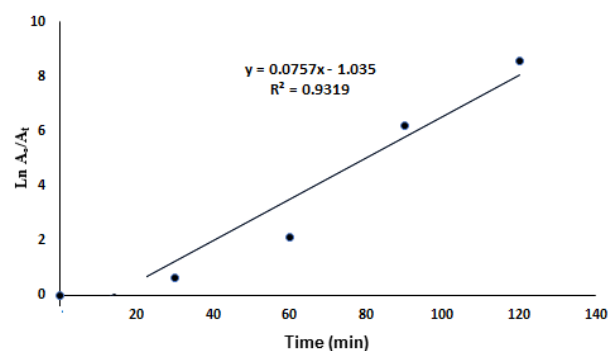
$$K_c = (C_0 - C_e)/C_e \quad (2)$$

$$\Delta G^{\circ} = -RT \ln K_c \quad (3)$$

ثابت‌های ترمودینامیکی جذب رنگزا بر روی $PW_6Mo_6@g-C_3N_4$ در جدول ۶ آورده شده است. مقدار مثبت برای آنتالپی ΔH° بیانگر این است که فرآیند جذب رنگزا گرماگیر است که دلیلی بر تشکیل پیوند شیمیایی قوی بین مولکولهای رنگ و سطح جاذب می‌باشد [۴۷]. همچنین مقدار مثبت آنتروپی (ΔS°) بیان کننده پیوستگی جاذب با ماده جذب شونده و افزایش بازده با افزایش دما در فاز مشترک جامد و مایع در طول فرآیند جذب است. اما مقادیر برای تغییرات انرژی آزاد ΔG° نشان‌دهنده این است که فرآیند جذب رنگ رودامین B بر روی $PW_6Mo_6@g-C_3N_4$ ، یک واکنش خودبخودی است. افزایش مقادیر منفی انرژی آزاد با افزایش دما می‌تواند به علت تاثیر آب‌زدایی هر دو ماده جاذب و جذب شونده باشد که واکنش بین آنها را تسهیل کرده و نهایتاً جذب را در دمای بالا مطلوب‌تر می‌سازد [۴۶، ۴۷].

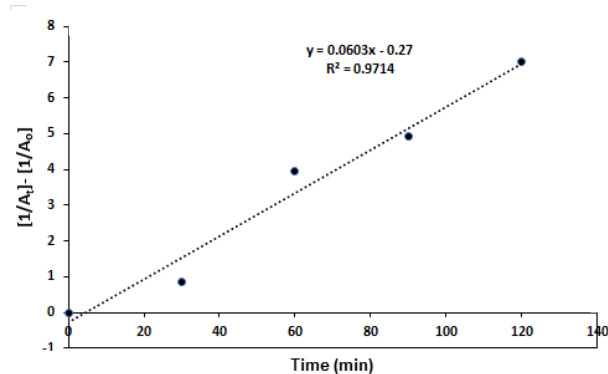
۴- نتیجه‌گیری

یک کاتالیزور نوری موثر از طریق نشان دادن پلی اکسومتالات PW_6Mo_6 بر روی نیتريد کربن گرافیتی سنتز شد. عملکرد فتوکاتالستی $PW_6Mo_6@g-C_3N_4$ نسبت به $g-C_3N_4$ خالص، PW_6Mo_6 خالص، $PMO_{12}/g-C_3N_4$ و $PW_{12}/g-C_3N_4$ در تخریب رودامین B تحت تابش نور مرئی عملکرد بهتری نشان داده که به خاطر جذب زیاد نور مرئی



شکل ۱۲: مدل سینتیکی شبه مرتبه اول، برای جذب رنگ رودامین B بر روی $PW_6Mo_6@g-C_3N_4$.

Figure 12: Quasi-first-order kinetic model for adsorption of rhodamine B dye on $PW_6Mo_6@g-C_3N_4$.



شکل ۱۳: مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم، برای جذب رنگ رودامین B بر روی $PW_6Mo_6@g-C_3N_4$.

Figure 13: A quasi-second-order kinetic model for adsorption of rhodamine B dye on $PW_6Mo_6@g-C_3N_4$.

مطالعات ترمودینامیکی

به منظور ارزیابی پارامترهای ترمودینامیک جذب شامل تعیین خودبخودی بودن، گرماگیر یا گرمازا بودن فرآیند جذب سه مشخصه آنتالپی استاندارد ΔH° ، انرژی آزاد گیبس استاندارد ΔG° و آنتروپی استاندارد ΔS° باید مشخص گردد. بنابراین برای بررسی اثر دما بر

می‌باشند. مطالعه این دسته از هیبریدهای موثر در فعالیت‌های نوری، نقطه امیدوار کننده‌ای برای تصفیه آب از طریق تجزیه نوری آلاینده‌های آلی موجود در آب مانند رنگ‌ها می‌باشد.

تشکر و قدردانی

این پژوهش از طرف دانشگاه کوثر با شماره قرارداد (۰۰۰۶۱۰۱۶۱۳): NO حمایت شده است و بدین‌وسیله نویسندگان این مقاله مراتب قدردانی و سپاس خود را از مسئولین ذیربط اعلام می‌دارد.

و انتقال سریع الکترون‌ها بوده که دارای اثرات متقابل هستند. بهترین عملکرد جهت تخریب رنگ رودامین B با غلظت ۲۰ ppm تحت تابش نور مرئی، با استفاده از ۰.۳ گرم از کاتالیزور $PW_6Mo_6/g-C_3N_4$ در شرایط اسیدی با $pH=3$ و بعد از گذشت ۱۵۰ دقیقه در دمای ۳۵ درجه مشاهده شد. فرآیند کاتالیزور نوری پیشرفته این کاتالیست را می‌توان ناشی از ساختار اصلاح شده و ساختارهای نواری منطبق بین POM ها و $g-C_3N_4$ دانست. پیشنهاد می‌شود که افزایش سطح ویژه، حجم متخلخل و انتقال بار موثر، می‌توانند عامل بهبود فعالیت کاتالیزور نوری شده باشد. بازده عملکرد بالا، زمان کم واکنش، قابلیت بازیافت و غیر سمی بودن کاتالیزور از مهم‌ترین مزایای این روش

۵- مراجع

- S. Kachbouri, E. Elaloui, Y. Moussaou, the effect of surfactant chain length and type on the photocatalytic activity of mesoporous TiO_2 nanoparticles obtained via modified sol-gel process. *Iran. J. Chem. Chem. Eng.* 38 (2019), 17-26.
- H. Q. Sun, Y. Bai, W. Q. Jin, N. P. Xu, Visible-light-driven TiO_2 catalysts doped with low concentration nitrogen species. *Sol. Energy Mater Sol. Cells.* 92 (2008), 76-83.
- C. C. Chen, P. X. Lei, H. W. Ji, W. H. Ma, J. C. Zhao, H. Hidaka, N. Serpone, Photocatalysis by titanium dioxide and polyoxometalate/ TiO_2 cocatalysts. Intermediates and mechanistic study. *Environ. Sci. Technol.* 38 (2004), 329-337.
- B. Rani, S. Punniyakoti, N. K. Sahu, Polyol asserted hydrothermal synthesis of SnO_2 nanoparticles for the fast adsorption and photocatalytic degradation of methylene blue cationic dye. *New J. Chem.* 42 (2018), 943-954.
- X. Li, J.L Shi, H. Hao, X. Lang, Visible light-induced selective oxidation of alcohols with air by dye-sensitized TiO_2 photocatalysis. *Appl. Catal. B.* 235 (2018), 260-267.
- S. Liang, L. Wen, S. Lin, J. Bi, P. Feng, X. Fu, L. Wu, Monolayer HNb_3O_8 for Selective Photocatalytic Oxidation of Benzylic Alcohols with Visible Light Response. *Angew. Chem. Int.* 53 (2014), 2951-2955.
- Y. Gao, H. Xu, S. Zhang, Y. Zhang, C. Tang, W. Fan, Visible-light photocatalytic aerobic oxidation of sulfides to sulfoxides with a perylene diimide photocatalyst, *Org. Biomol. Chem.* 17 (2019), 7144-7149.
- J. Jiang, R. Luo, X. Zhou, Y. Chen, H. Ji, Photocatalytic properties and mechanistic insights into visible light-promoted aerobic oxidation of sulfides to sulfoxides via Tin porphyrin-based porous aromatic frameworks. *Adv. Synth. Catal.* 360 (2018), 4402-4411.
- L. Zhang, G. Wang, X. Hao, Z. Jin, Y. Wang, MOFs-derived $Cu_3P@CoP$ pn heterojunction for enhanced photocatalytic hydrogen evolution. *Chem. Eng. J.* 395 (2020), 125113-125125.
- Z. Jin, H. Wang, Q. Ma. High electron conductivity of Ni/Ni_3C nanoparticles anchored on c-rich graphitic carbon nitride for obviously improving hydrogen generation. *Ind. Eng. Chem. Res.* 59 (2020), 8974-8983.
- Z. Jin, L. Zhang, Performance of Ni-Cu bimetallic co-catalyst $g-C_3N_4$ nanosheets for improving hydrogen evolution. *Sci. Technol.* 49 (2020), 144-156.
- H. Sun, S. Liu, S. Liu, S. Wang, A comparative study of reduced graphene oxide modified TiO_2 , ZnO and Ta_2O_5 in visible light photocatalytic/photochemical oxidation of methylene blue. *Appl. Catal. B.* 146 (2014), 162-168.
- H. Sun, G. Zhou, S. Liu, H. M. Ang, M. O. Tade, S. Wang, Visible light responsive titania photocatalysts codoped by nitrogen and metal (Fe, Ni, Ag, or Pt) for remediation of aqueous pollutants. *Chem. Engin. J.* 231 (2013), 18-25.
- O. Ounas, B. Lekhlif, J. Jamal-Eddine, Effect of three operating variables on degradation of direct blue 199 by TiO_2 immobilized into a polymer surface: Response surface methodology. *Prog. Color Colorants Coat.* 14 (2021), 161-178.
- F. Shokoofehpoor, S. H. Mousavi, A. Mohammadi, M. A. Zanjanchi, γ -CD-Functionalized TiO_2 Nanoparticles for the Photocatalytic Degradation of Organic Dyes. *Prog. Color Colorants Coat.* 13 (2020), 23-39.
- A. Mehrzad, P. Gharbani, Photocatalytic Degradation of rhodamine 6G by Sm Doped-CdS nanoparticles under visible light. *J. Color Sci. Tech.* 13 (2019), 201-210.
- M. Honarmand, M. Golmohammadi, J. Hafezi Bakhtiari. Green synthesis of SnO_2 Nanoparticles on Bentonite and study of its photocatalytic activity for degradation of eriochrome black T. *J. Color Sci. Tech.* 14 (2020), 247-254.
- A. D. Khalaji, Use of CuO/Cu_2O nanocomposite to removal of methyl orange dye from aqueous solution. *J. Color. Sci. Tech.* (2021), JCST-2101-1127.
- Z. karimi, A. Allahverdi, F. Oshani, Investigation on the removal of dyes from wastewater using alumina composite nano adsorbent. *J. Stud. Color World.* 10 (2020), 41-59.
- Z. Khan, T. R. Chetia, M. Qureshi, Rational design of hyperbranched 3D heteroarrays of SrS/CdS : synthesis, characterization and evaluation of photocatalytic properties for efficient hydrogen generation and organic dye degradation. *Nanoscale.* 4 (2012), 3543-3550.
- Z. G. Xiong, L. L. Zhang, J. Z. Ma, X. S. Zhao, Photocatalytic degradation of dyes over graphene-gold nanocomposites under visible light irradiation. *Chem. Comm.* 46 (2010), 6099-6101.
- M. Groenewolt, M. Antonietti, Synthesis of $g-C_3N_4$ nanoparticles in mesoporous silica host matrices. *Adv. Mater.* 17 (2005), 1789-1790.
- X. C. Wang, K. Maeda, A. Thomas, K. Takanabe, G. Xin, J. M. Carlsson, K. Domen, M. Antonietti, A metal-free

- polymeric photocatalyst for hydrogen production from water under visible light. *Nat. Mater.* 8 (2009), 76-80.
24. A. Troupis, A. Hiskia, E. Papaconstantinou, Synthesis of metal nanoparticles by using polyoxometalates as photocatalysts and stabilizers. *Angew. Chem., Int. Ed.* 41 (2002), 1911-1912.
 25. W. Liu, W. Mu, M. J. Liu, X. D. Zhang, H. L. Cai, Y. L. Deng, Solar-induced direct biomass-to electricity hybrid fuel cell using polyoxometalates as photocatalyst and charge carrier. *Nat. Comm.* 5 (2014), 1-8.
 26. A. Pearson, H. D. Zheng, K. Kalantar-zadeh, S. K. Bhargava, V. Bansal, Decoration of TiO₂ nanotubes with metal nanoparticles using polyoxometalate as a UV-switchable reducing agent for enhanced visible and solar light photocatalysis. *Langmuir.* 28 (2012), 14470-14475.
 27. X. L. Wang, Z. H. Chang, H. Y. Lin, A. X. Tian, G. C. Liu, J. W. Zhang, Assembly and photocatalysis of two novel 3D Anderson-type polyoxometalate-based metal organic frameworks constructed from isomeric bis(pyridylformyl) piperazine ligands. *Dalton Transac.* 43 (2014), 12272-12278.
 28. J. Ahmadvpour, M. Taghizadeh, Selective production of propylene from methanol over high-silica mesoporous zsm-5 zeolites treated with naoh and naoh/ tetrapropylammonium hydroxide. *C. R. Chim.* 18 (2015), 834-847.
 29. S. Abelló, A. Bonilla, J. Pérez-Ramírez, Mesoporous ZSM-5 Zeolite Catalysts prepared by desilication with organic hydroxides and comparison with naoh leaching. *Appl. Catal. A.* 364 (2009), 191-198.
 30. Q. Yu, X. Meng, J. Liu, C. Li, Q. Cui, A fast organic template-free, ZSM-11 seed-assisted synthesis of ZSM-5 with good performance in methanol-to-olefin. *Microporous Mesoporous Mater.* 181 (2013), 192-200.
 31. Z. Hu, H. Zhang, L. Wang, H. Zhang, Y. Zhang, H. Xu, W. Shen, Y. Tang, Highly stable boron-modified hierarchical nanocrystalline ZSM-5 zeolite for the methanol to propylene reaction. *Catal. Sci. Technol.* 4 (2014), 2891-2895
 32. T. Dong-Ge, C. Wei, L. Yong-Yue, J. Xiao-Yang, H. Yi, Effect of crystallinity on the catalytic performance of amorphous Co-B particles prepared from cobalt nitrate and potassium borohydride in the cinnamaldehyde hydrogenation. *J. Mol. Catal. A: Chem.* 265 (2007), 195-204.
 33. L. Ye, J. Liu, Z. Jiang, T. Peng, L. Zan, Facets coupling of BiOBr-g-C₃N₄ composite photocatalyst for enhanced visible-light-driven photocatalytic activity. *Appl. Catal. B.* 142 (2013), 1-7.
 34. H. Wu, M. Zhou, Y. Qu, H. Li, H. Yin, Preparation Chemical Society Reviews and Characterization of tungsten-substituted molybdophosphoric acids and catalytic cyclodehydration of 1,4-butanediol to tetrahydrofuran. *Chinese J. Chem. Eng.* 17 (2009), 200-206.
 35. Y. J. Zhang, A. Thomas, M. Antonietti, X. C. Wang, Activation of carbon nitride solids by protonation: morphology changes, enhanced ionic conductivity, and photoconduction experiments. *J. Am. Chem. Soc.* 131 (2009), 50-51.
 36. F. R. Pomilla, F. Fazlali, E. I. García-Lopez, G. Marci, A. R. Mahjoub, I. Kritsov, L. F. Liotta, L. Palmisano, Keggin heteropolyacid supported on BN and C₃N₄: Comparison between catalytic and photocatalytic alcohol dehydration. *Mater. Sci. Semicond. Process.* 112 (2020), 104987.
 37. K. Li, Z. Zeng, L. Yan, S. Luo, X. Luo, M. Huo, Y. Guo, Fabrication of platinum-deposited carbon nitride nanotubes by a one-step solvothermal treatment strategy and their efficient visible-light photocatalytic activity. *Appl. Catal. B.* 165 (2015), 428-437.
 38. S. Patnaik, S. Martha, G. Madras, K. Parida, the effect of sulfate pre-treatment to improve the deposition of Au-nanoparticles in a gold-modified sulfated g C₃N₄ plasmonic photocatalyst towards visible light induced water reduction reaction. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 18 (2016), 28502-28514.
 39. Y. Hua, C. Wang, J. Liu, B. Wang, X. Liu, C. Wu, X. Liu Visible photocatalytic degradation of rhodamine B using Fe (III)-substituted phosphotungstic heteropolyanion. *J. Mol. Catal. A: Chem.* 365 (2012), 8-14.
 40. Q. J. Xiang, J. G. Yu, W. G. Wang, M. Jaroniec, Nitrogen self-doped nanosized TiO₂ sheets with exposed 001 facets for enhanced visible-light photocatalytic activity. *Chem. Commun.* 47 (2011), 6906-6908.
 41. A. Nikoonahad, B. Djahed, S. Norzaee, H. Eslami, Z. Derakhshan, M. Miri, Y. Fakhri, E. Hoseinzadeh, S. M. Ghasemi, D. Balarak, R. A. Fallahzadeh, M. Zarrab, M. Taghavi, An overview report on the application of heteropoly acids on supporting materials in the photocatalytic degradation of organic pollutants from aqueous solutions. *PeerJ.* 6 (2018), 1-20.
 42. J. H. Espenson, Chemical kinetics and reaction mechanisms New York: McGraw-Hill. 102 (1995), 296. (1995).
 43. M. A. Zazouli, D. Balarak, Y. Mahdavi, M. Barafrashtehpour, M. Ebrahimi, Adsorption of bisphenol from industrial wastewater by modified red mud. *J. Health Development.* 2 (2013), 1-11.
 44. A. F. Bertocchi, M. Ghiani, R. Peretti, A. Zucca, Red mud and fly ash for remediation of mine sites contaminated with As, Cd, Cu, Pb and Zn. *J. Hazard. Mater.* 134 (2006), 112-119.
 45. T. V. N. Padmesh, k. Vijayaraghavan, G. Sekaran, M. Velan, Application of Azolla rongpong on biosorption of acid red 88, acid green 3, acid orange 7 and acid blue 15 from synthetic solutions. *Chem. Eng. J.* 122 (2006), 55-63.
 46. A. Asfaram, M. R. Fathi, Removal of direct red 12b dye from aqueous solutions by wheat straw: isotherms, kinetics and thermodynamic studies. *J. Color Sci. Tech.* 7 (2014), 223-235.
 47. B. Kakavandi, R. R. Kalantary, A. Esrafiy, A. Jonidi Jafari, Isotherm, kinetic and thermodynamic of reactive blue 5 (rb5) dye adsorption using Fe₃O₄ nanoparticles and activated carbon magnetic composite. *J. Color Sci. Tech.* 7(2014), 237-248.

How to cite this article:

R. Nejat, Investigation of the Effect of $H_3PW_6Mo_6O_{40}/g-C_3N_4$ Photocatalyst in the Degradation of Rhodamine B Dye under Visible Light Irradiation. *J. Color Sci. Tech.* 16, 3(2022), 225-236.

DOR: 20.1001.1.17358779.1401.16.3.5.1