



Journal of Applied Research of Chemical-Polymer Engineering

journal homepage: www.arcpe.modares.ac.ir

Research Paper

Photocatalytic removal of potassium amyl xanthate over g-C₃N₄/CuO polymer/metal oxide nanocomposite under visible light

Amirreza Ojagh¹, Reza Poursalehi^{1,*}¹ Department of Materials Engineering, Faculty of Mining and Materials Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

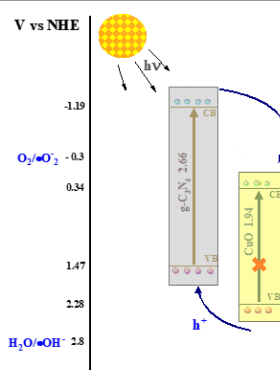
ARTICLE INFO

Received 2025-07-31
Accepted 2025-08-31
Available online 2025-12-13
ISSN: 2588-5316
Online ISSN: 2588-5324

Keywords:

Photocatalyst
heterojunction
optical properties
g-C₃N₄
copper oxide

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

Research subject: In this study, a heterojunction nanostructure composed of graphitic carbon nitride (g-C₃N₄) and copper oxide (CuO) was synthesized and investigated to evaluate its photocatalytic efficiency in degrading organic dyes (such as Rhodamine B) and potassium amyl xanthate (PAX) under visible light irradiation. The main objective was to enhance photocatalytic performance by combining these two semiconductors and studying various parameters, including calcination temperature.

Research approach: To synthesize the g-C₃N₄/CuO heterojunction nanostructure, the calcination method was employed. In this process, g-C₃N₄ was synthesized through the polymerization of urea at 550 °C. For fabricating the heterojunction nanocomposite, different amounts of CuO nanoparticles were mixed with urea and calcined at various temperatures for 4 hours in a furnace. XRD analysis was used to identify the crystalline phases, UV-vis spectroscopy was performed to measure optical transmittance, and FE-SEM was applied to examine the surface morphology. The electron-hole recombination rate was studied using photoluminescence (PL) spectroscopy. Finally, the photocatalytic activity of the composites was evaluated by the degradation of Rhodamine B and potassium amyl xanthate under visible light irradiation, and scavenger tests were conducted to identify the active species involved in the degradation process.

Main results: XRD analysis confirmed the successful formation of the g-C₃N₄/CuO heterojunction. UV-vis spectra showed that incorporating CuO into g-C₃N₄ decreased visible light transmittance compared to pure g-C₃N₄. FE-SEM images revealed morphological changes and a reduction in the thickness of g-C₃N₄ layers as a result of heterojunction formation, contributing to improved photogenerated charge transfer. The g-C₃N₄/CuO composite degraded 88% of potassium amyl xanthate within 180 minutes and 96% of Rhodamine B within 80 minutes, whereas pure g-C₃N₄ achieved only 68% degradation of potassium amyl xanthate and 90% of Rhodamine B. Scavenger test results indicated that superoxide radicals ([•]O₂⁻) were the main active species in the photocatalytic degradation process. These findings demonstrate the enhanced performance of the g-C₃N₄/CuO nanocomposite in light absorption, charge separation, and efficient pollutant degradation, suggesting its potential as an effective photocatalyst for industrial wastewater treatment.

* Corresponding author: poursalehi@modares.ac.ir



نشریه پژوهش‌های کاربردی مهندسی شیمی- پلیمر

آدرس صفحه: www.arcpe.modares.ac.ir

مقاله تحقیقاتی

حذف فوتوکاتالیزوری پتاسیم آمیل زنتات با استفاده از نانوکامپوزیت بسیار/اکسید فلزی $g-C_3N_4/CuO$ تحت نور مرئی

سید امیررضا اجاق^۱، رضا پورصالحی^{۱*}

^۱ دانشکده معدن و مواد، گروه نانو مواد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

موضوع تحقیق: در این مطالعه، نانوساختار اتصال ناهمگون بسیار/اکسید فلزی کربن-نیتريد گرافیتی ($g-C_3N_4$) و اکسیدمس (CuO) با هدف ارزیابی کارایی فوتوکاتالیزوری آن در تجزیه رنگ‌های آلی (مانند رودامین-بی) و پتاسیم آمیل زنتات (PAX) زیر تابش نور مرئی سنتز و مطالعه شد. هدف اصلی، بهبود عملکرد فوتوکاتالیزوری از طریق ترکیب این دو نیمه‌رسانا و مطالعه عوامل مختلف دمای عملیات حرارتی بود.

روش تحقیق: برای سنتز نانوساختار اتصال ناهمگون $g-C_3N_4/CuO$ ، از روش عملیات حرارتی استفاده شد. $g-C_3N_4$ از طریق پراش اوره در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس سنتز شد و برای سنتز اتصال ناهمگون کربن-نیتريد گرافیتی/اکسیدمس مقادیر مختلفی از نانوذرات اکسیدمس با اوره ترکیب شدند و در دماهای مختلف به مدت ۴ ساعت درون کوره حرارت داده شدند تا نانوکامپوزیت مورد نظر سنتز شود. واکاوی پراش پرتو ایکس برای شناسایی فازهای کریستالی، طیف‌سنجی مرئی-فرابنفش برای اندازه‌گیری طیف عبور نوری و FE-SEM برای تحلیل ریخت سطحی استفاده شدند. برای مطالعه آهنگ بازترکیب الکترون-حفره، از واکاوی نوررخشایی (PL) استفاده شد. در نهایت، عملکرد فوتوکاتالیزوری کامپوزیت‌ها با آزمون تجزیه رودامین-بی و پتاسیم آمیل زنتات در حضور نور مرئی ارزیابی شد و با آزمون‌های مهارکننده، گونه‌های فعال در واکنش تخریب شناسایی شدند.

نتایج اصلی: نتایج حاصل از واکاوی پراش پرتو ایکس نشان داد که اتصال ناهمگون $g-C_3N_4/CuO$ به صورت موفقیت‌آمیز تشکیل شده است. طیف مرئی-فرابنفش نشان داد که ترکیب CuO با $g-C_3N_4$ باعث کاهش عبور نور مرئی نسبت به $g-C_3N_4$ شده است. تصاویر FE-SEM نشان‌دهنده تغییر در ریخت و کاهش ضخامت لایه‌های $g-C_3N_4$ در اثر تشکیل اتصال ناهمگون بودند که این ویژگی به بهبود انتقال بارهای نوری کمک می‌کند. $g-C_3N_4/CuO$ توانست ۸۸٪ از آلاینده پتاسیم آمیل زنتات را در مدت ۱۸۰ دقیقه و ۹۶٪ از آلاینده رودامین-بی را در ۸۰ دقیقه تجزیه کند، در حالی که $g-C_3N_4$ خالص تنها ۶۸٪ برای پتاسیم آمیل زنتات و ۹۰٪ برای رودامین-بی کارایی داشت. نتایج آزمون‌های مهارکننده نیز مشخص کرد که رادیکال‌های سوپراکسید ($O_2^{\cdot-}$)، مهم‌ترین گونه فعال در فرایند تجزیه فوتوکاتالیزوری است. این نتایج عملکرد بهبودیافته نانوکامپوزیت $g-C_3N_4/CuO$ در جذب نور، جدایش بارهای الکتریکی و تخریب مؤثر آلاینده‌ها را نشان می‌دهد. این کامپوزیت می‌تواند به عنوان فوتوکاتالیزوری کارآمد برای تصفیه پساب‌های صنعتی مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها

فوتوکاتالیزور

اتصال ناهمگون

خواص نوری

کربن-نیتريد گرافیتی

اکسیدمس

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۹

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۹

دسترس آنلاین: ۱۴۰۴/۰۹/۲۲

ISSN: 2588-5316

Online ISSN: 2588-5324

* نویسنده مسئول: poursalehi@modares.ac.ir

۱ مقدمه

امروزه آلودگی و کمبود منابع آبی به‌عنوان دو چالش مهم جهانی شناخته می‌شوند. یکی از عوامل اصلی آلودگی منابع آبی، ورود فاضلاب حاوی رنگ‌های صنعتی به محیط زیست است. این رنگ‌ها از صنایع گوناگونی مانند نساجی، تولید کاغذ، صنایع غذایی، آرایشی و دارویی به فاضلاب راه می‌یابند [۱]. براساس مطالعات انجام‌شده، سالانه حدود ۱۰ تا ۱۲ درصد از رنگ‌هایی همچون رودامین‌بی، متیلن‌بلو و متیل‌اورنج در صنعت نساجی به کار می‌روند که نزدیک به ۲۰ درصد از آن‌ها مستقیم وارد چرخه فاضلاب می‌شوند [۲]. این رنگ‌ها به‌دلیل پایداری بالا، سمیت و شدت رنگ زیاد، به‌سختی در محیط آبی تجزیه می‌شوند. حضور آن‌ها در آب از عبور نور خورشید جلوگیری می‌کند و می‌تواند تعادل زیستی موجودات آبی را بر هم بزند [۳]. صنایع معدنی سهم چشم‌گیری در رشد و توسعه جوامع ایفا می‌کنند [۴]. با افزایش فعالیت‌های فراوری مواد معدنی، فرایند شناورسازی به یکی از مراحل کلیدی در این حوزه تبدیل شده است [۵]. هر ساله حدود ۲ میلیون تن ماده معدنی زیر فرایند شناورسازی قرار می‌گیرد. حدود نیمی از زنتات‌های به‌کاررفته در این فرایند مصرف شده و باقی‌مانده آن‌ها وارد فاضلاب می‌شود، به‌طوری‌که غلظت آن‌ها در فاضلاب به‌طور معمول بین ۵ تا ۴۰ میلی‌گرم در لیتر گزارش شده است [۶]. زنتات‌ها ترکیباتی هستند که می‌توانند به اندام‌هایی مانند کبد و سامانه عصبی انسان و موجودات آبی آسیب رسانده، کیفیت آب را کاهش داده و بوی ناخوشایندی ایجاد کنند [۴]. از آنجا که این ترکیبات از نظر شیمیایی ناپایدارند، به دی‌سولفید کربن (CS_2) تجزیه می‌شوند؛ ماده‌ای سمی، خطرناک و قابل اشتعال [۷]. بنابراین، حذف مؤثر زنتات‌های باقی‌مانده از فاضلاب ضروری و حیاتی به‌شمار می‌رود [۸]. روش‌های متعددی برای حذف آلاینده‌های آلی و معدنی طراحی شده‌اند؛ مانند جذب سطحی، جداسازی غشایی، تصفیه الکتروشیمیایی، فرایندهای زیستی، الکترولیز و اکسایش شیمیایی [۹]. با این حال، این روش‌ها با محدودیت‌هایی نظیر ایجاد آلودگی ثانویه، هزینه‌های عملیاتی بالا، ظرفیت جذب محدود و مصرف زیاد انرژی مواجه هستند [۱۰]. یکی از راه‌حل‌های امیدبخش، استفاده از نیمه‌رساناها به‌عنوان فوتوکاتالیزور است که روشی مقرون‌به‌صرفه، ساده و پایدار برای حذف آلاینده‌ها با کمک انرژی خورشیدی به‌شمار می‌رود [۱۱]. فوتوکاتالیزورهای نیمه‌رسانا با جذب فوتون‌هایی که انرژی آن‌ها برابر یا بیشتر از گاف نواری ماده باشد، الکترون‌هایی (e^-) با خاصیت کاهش در نوار رسانش و حفره‌هایی (h^+) با خاصیت اکسایش در نوار ظرفیت ایجاد می‌کنند [۱۲]. جفت‌های الکترون/حفره تولیدشده با اکسیژن (O_2) و آب (H_2O) واکنش می‌دهند و گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) از جمله رادیکال‌های سوپراکسید ($O_2^{\cdot-}$)، رادیکال‌های هیدروکسیل ($OH^{\cdot}$) و دیگر گونه‌های واکنش‌پذیر تولید می‌کنند که قادرند آلاینده‌های آلی و معدنی را به ترکیبات غیرسمی مانند آب (H_2O) و دی‌اکسید کربن (CO_2) تجزیه کنند [۸]. $g-C_3N_4$ نیمه‌رسانای پلیمری دوبعدی، فاقد فلز، متشکل از واحدهای تری‌آزین یا هپتازین و هیبریداسیون sp^2 بین اتم‌های کربن و نیتروژن است [۱۳ و ۱۴]. این ماده به‌دلیل ساختار لایه‌ای، ویژگی‌هایی مانند پایداری گرمایی و شیمیایی بالا، غیرسمی بودن، هزینه پایین و سادگی سنتز دارد [۱۵]. کربن‌نیتريد گرافیتی دارای گاف نواری باریک eV ۲/۷ بوده و ساختار نوارهای انرژی آن شامل

$1/1eV$ - در نوار رسانش و $1/6 eV$ در نوار ظرفیت است که آن را برای فعالیت‌های فوتوکاتالیزوری مناسب می‌سازد [۱۶ و ۱۷]. با این حال، $g-C_3N_4$ به‌دلیل ساختار $\pi-\pi$ مزدوج خود، با بازترکیب سریع جفت‌های الکترون/حفره همراه است که منجر به نورخشایی شدید می‌شود [۱۵]. افزون بر این، فوتوکاتالیزور $g-C_3N_4$ تنها فوتون‌هایی با طول موج کمتر از ۴۵۰ نانومتر را جذب می‌کند که باعث کاهش بهره‌برداری از نور مرئی می‌شود [۱۸]. در مطالعه‌ای، $g-C_3N_4/CuO$ با استفاده از روش شیمیایی سنتز شد تا فعالیت فوتوکاتالیزوری آن برای تجزیه تتراسیکلین مطالعه شود. فعالیت فوتوکاتالیزوری و اتصال ناهمگون $g-C_3N_4/CuO$ طی ۳۰ دقیقه تخریب بالاتری نسبت به دو نیمه‌رسانا CuO و $g-C_3N_4$ به‌صورت تکی داشته که نشان‌دهنده نقش مؤثر اتصال ناهمگون در بهبود عملکرد فوتوکاتالیزوری است [۱۹]. در مطالعه‌ای دیگر، کامپوزیت نانولایه‌ای $CuO/g-C_3N_4$ از طریق روش ساده عملیات حرارتی سنتز شد. اتصال ناهمگون $CuO/g-C_3N_4$ فعالیت فوتوکاتالیزوری بالاتری نسبت به CuO و $g-C_3N_4$ در تجزیه ۴-نیتروفتول ($4-NP$) نشان داد [۲۰]. برای تجزیه فوتوکاتالیزوری زنتات، اتصال ناهمگون نوع S از $CuO/g-C_3N_4$ با استفاده از روش‌های گرمایی و عملیات حرارتی سنتز شد. این نانوکامپوزیت توانست تخریب زنتات بهتری نسبت به کربن‌نیتريد گرافیتی داشته باشد [۲۱].

در جدول ۱ میزان فعالیت فوتوکاتالیزوری این مواد با مواد سنتز شده در این پژوهش مقایسه شده است. هدف از این پژوهش، سنتز و ارزیابی کارایی فوتوکاتالیزوری ساختار اتصال ناهمگون $g-C_3N_4/CuO$ در تجزیه پتاسیم آمیل زنتات و رنگ‌های آلی دیگر نظیر رودامین بی (RhB) زیر تابش نور مرئی است. در این مطالعه همچنین تأثیر مقدار CuO و دمای عملیات حرارتی بر سنتز نانوکامپوزیت $g-C_3N_4/CuO$ و عملکرد فوتوکاتالیزوری آن مورد مطالعه قرار گرفت. در این پژوهش، نانوساختار اتصال ناهمگون $g-C_3N_4/CuO$ با استفاده از روش ساده عملیات حرارتی سنتز شد. بر اساس پژوهش‌های موجود در منابع علمی تاکنون استفاده از $g-C_3N_4/CuO$ برای تجزیه زنتات پتاسیم آمیل (PAX) زیر نور مرئی گزارش نشده است. تعیین غلظت بهینه نانوذرات CuO و دمای مناسب برای سنتز ساختار اتصال ناهمگون $g-C_3N_4/CuO$ می‌تواند راهکاری مؤثر برای کاربرد عملی این ساختار در فعالیت‌های فوتوکاتالیزوری ارائه دهد.

۲ بخش تجربی

۲-۱ مواد

اوره ($CO(NH_2)_2$) با خلوص ۹۹/۹٪ از شرکت مرک، رودامین بی (RhB)، نمک دو سدیمی دی‌هیدرات اتیلن‌دی‌آمین تترااستیک اسید ($EDTA-2Na$)، سدیم سولفات (Na_2SO_4) و ایزوپروپیل‌الکل (IPA) از شرکت مرک بدون خالص‌سازی بیشتر مورد استفاده قرار گرفتند. زنتات پتاسیم آمیل (PAX) با درجه خلوص صنعتی مورد استفاده در شناورسازی در مطالعات فوتوکاتالیزوری به‌کار گرفته شد.

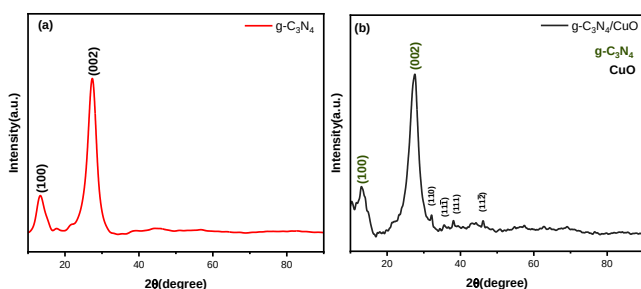
۲-۲ سنتز کربن‌نیتريد گرافیتی

برای تهیه کربن‌نیتريد گرافیتی مقدار ۱۰ گرم اوره درون یک کروزه ۵۰ میلی‌لیتری قرار داده شد و به‌مدت ۴ ساعت در کوره در دمای ۵۵۰ درجه

۳ بحث و نتایج

۳-۱ ساختار بلوری

در شکل ۱a، الگوی پراش پرتو ایکس کربن‌نیتريد گرافیتی دو قله متمایز را نشان می‌دهد. قله اصلی در زاویه 2θ ۲۷/۳۰ درجه به صفحه بلوری (۰۰۲) مربوط بوده و بیانگر ساختار لایه‌ای $g-C_3N_4$ است. قله فرعی در زاویه 2θ ۱۳/۲۸ درجه نیز به صفحه بلوری (۱۰۰) نسبت داده می‌شود که به نظم درون‌صفحه‌ای واحدهای تری-اس-تری‌آزین اشاره دارد. این نتایج به‌خوبی حضور و تشکیل ساختار $g-C_3N_4$ را تأیید می‌کنند. [۲۴]. الگوی پراش پرتو ایکس در شکل ۱b مربوط به نانوساختار ۵۲۰-۰۱ نشان می‌دهد که CuO دارای چهار بیشینه در صفحات (۰۱۱)، (۱۱۱)، (۱۱۱) و (۱۱۲) است، در حالی که $g-C_3N_4$ دارای دو بیشینه در صفحات (۰۰۲) و (۱۰۰) است. این نتایج حضور هم‌زمان CuO و $g-C_3N_4$ را نشان داده و دلالت بر تشکیل نانو ساختارهای اتصال ناهمگون $g-C_3N_4/CuO$ دارد [۲۵]. بر اساس نتایج واکاوی پراش پرتو ایکس، نانوساختارهای $g-C_3N_4$ و $g-C_3N_4/CuO$ با موفقیت سنتز شده‌اند و هیچ بیشینه پراشی ناشی از ناخالصی در الگوهای پراش پرتو ایکس مشاهده نشد.



شکل ۱ پراش پرتو ایکس (a) کربن‌نیتريد گرافیتی، (b) کربن‌نیتريد گرافیتی/اکسیدمس

Figure 1 X-ray diffraction pattern of (a) graphitic carbon nitride, (b) graphitic carbon nitride/copper oxide

۳-۲ خواص نوری

یکی از عوامل موثر در فعالیت فوتوکاتالیزوری، توانایی جذب نور است. با ایجاد اتصال ناهمگون بین دو نیمه‌رسانا و کاهش انرژی گاف باند، نیمه‌رسانا قادر خواهد بود فوتون‌هایی با انرژی کمتر را نیز جذب کند که می‌تواند موجب افزایش فعالیت فوتوکاتالیزوری شود [۲۶]. برای مطالعه خواص نوری و محاسبه مقادیر گاف انرژی مواد، $g-C_3N_4$ و $g-C_3N_4/CuO$ از طیف‌سنجی مرئی-فرابنفش استفاده شد که در شکل ۲a نشان داده شده است. در کامپوزیت ۵۲۰-۰۱ که ترکیبی از $g-C_3N_4$ و CuO است، میزان عبور نور نسبت به $g-C_3N_4$ کاهش یافته است. این کاهش می‌تواند به انتقال در d-d یون $Cu(II)$ نسبت داده شود و موجب بهبود قابل توجه عملکرد تجزیه رنگ در فرایند فوتوکاتالیزوری نمونه ۵۲۰-۰۱ شده است. لبه‌ی جذب در حدود ۴۶۰ نانومتر قرار دارد که معادل گاف انرژی ۲/۷ eV است [۲۷]. همچنین، $g-C_3N_4/CuO$ جذب نوری وسیع‌تری نسبت به $g-C_3N_4$ دارد که می‌تواند به دلیل تشکیل اتصال ناهمگون بین $g-C_3N_4$ و CuO باشد [۲۸]. تأثیر دمای عملیات حرارتی بر عبور نور کامپوزیت در شکل ۲b نشان داده شده است. افزایش دمای عملیات حرارتی به‌وضوح منجر به بسپارش کامل‌تر $g-C_3N_4$ و

سلسیوس با آهنگ افزایش دما برابر با ۵ درجه در دقیقه گرمادهی شد [۲۲]. پس از رسیدن دمای کوره به دمای محیط، ماده سنتز شده از کوره خارج شد. به‌طور معمول، رنگ $g-C_3N_4$ سنتز شده از زرد کم‌رنگ تا زرد لیمویی متغیر است. هرچه بازده سنتز $g-C_3N_4$ کاهش یابد، رنگ ماده به زرد پررنگ‌تری تمایل پیدا می‌کند. بازده $g-C_3N_4$ به‌طور معمول در محدوده ۲ تا ۴ درصد قرار دارد.

جدول ۱ مقایسه نیمه‌رساناهای سنتز شده در این پژوهش با پژوهش‌های مشابه

Table 1 Comparison of the synthesized semiconductors in this study with similar research

No.	Material	Pollutant	Time	Degradation	Reference
1	$g-C_3N_4/CuO$ (500 ppm)	Tetracycline (10 ppm)	30	32%	[19]
2	$g-C_3N_4/CuO$ (1000 ppm)	4-Nitrophenol (10 ppm)	10	98%	[20]
3	$g-C_3N_4/CuO$ (600 ppm)	Xanthate (50 ppm)	120	80%	[21]
4	$g-C_3N_4/CuO$ (500 ppm)	Potassium Amyl Xanthate (50 ppm)	180	88%	This work

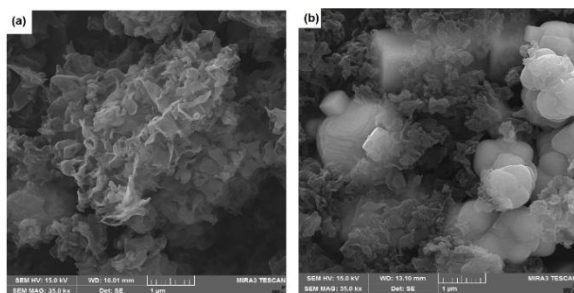
۳-۲ سنتز اتصال ناهمگون کربن‌نیتريد گرافیتی / اکسیدمس

برای سنتز اتصال ناهمگون $g-C_3N_4/CuO$ ، نانوذرات CuO در غلظت‌های مختلف ۱، ۳، ۵، ۷ و ۱۰ میلی‌گرم با ۱۰ گرم اوره ترکیب شده و در بوتله‌ای به حجم ۵۰ میلی‌لیتر قرار گرفتند. این مخلوط در کوره در دماهای ۴۵۰، ۴۷۵، ۵۰۰ و ۵۲۰ درجه سلسیوس به مدت ۴ ساعت و با آهنگ گرمایش ۵ درجه در دقیقه گرما داده شد. پس از آنکه دمای کوره به دمای محیط رسید، نانوساختارهای حاصل بدون انجام هیچ‌گونه فراوری اضافی مورد استفاده قرار گرفتند [۲۳]. نمونه‌ها با نماد X-Y نام‌گذاری شدند، که در آن «X» نشان‌دهنده دمای عملیات حرارتی و «Y» بیانگر مقدار CuO بر حسب میلی‌گرم است. به‌عنوان مثال، نمونه ۵۲۰-۰۱ به اتصالی ناهمگون اشاره دارد که در دمای ۵۲۰ درجه سلسیوس و با مقدار ۱ میلی‌گرم CuO سنتز شده است.

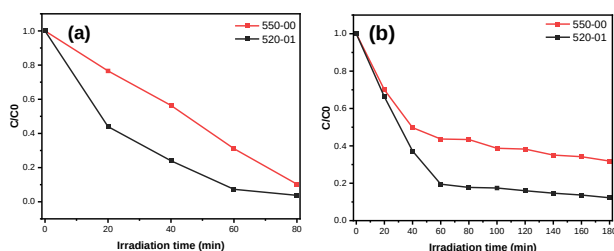
۴-۲ دستگاه‌ها

برای مطالعه ساختار بلوری فوتوکاتالیزورهای سنتز شده، از دستگاه پراش پرتو ایکس مدل PANalytical با تابش $Cu - K\alpha$ و طول موج $1.5406 \text{ \AA}$ در شرایط کاری ۴۰ کیلوولت و ۴۰ میلی‌آمپر استفاده شد. برای مطالعه ریخت نمونه‌ها و نقشه‌برداری عنصری، از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM) مدل TESCAN MIRA3 همراه با طیف‌سنجی پاشندگی انرژی پرتو ایکس (EDS) استفاده شد. برای مطالعه طیف‌های نوررخشایی و فرابنفش-مرئی فوتوکاتالیزورها، از طیف‌سنج فیبر نوری مدل PHYSTEC tiny UVS-2500 در طول موج تحریک ۳۶۵ نانومتر استفاده شد.

می‌شود، پس از ۸۰ دقیقه تابش نور مرئی، در حدود ۹۶٪ از رنگ رودامین بی به‌طور مؤثری توسط ۵۲۰-۰۱ تجزیه شد، در حالی که میزان تخریب رودامین بی با $g-C_3N_4$ خالص تنها ۹۰٪ بود. این موضوع، کارایی بالای فوتوکاتالیزوری نمونه ۵۲۰-۰۱ را نشان می‌دهد. همچنین با توجه به شکل ۴b در طول ۱۸۰ دقیقه تابش نور مرئی، مقدار تخریب رنگ پتاسیم آمیل زنتات توسط $g-C_3N_4$ تنها ۶۸٪ بود، با این حال، با تشکیل پیوند بین $g-C_3N_4$ و CuO ، آهنگ تخریب به ۸۸٪ افزایش یافت [۳۱].



شکل ۳ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (a) کربن‌نیتريد گرافیتی (b) کامپوزيت کربن‌نیتريد گرافیتی/اکسیدمس
Figure 3 FE-SEM images of (a) $g-C_3N_4$ and (b) $g-C_3N_4/CuO$ composite



شکل ۴ نمودار تخریب فتوکاتالیزوری (a) رودامین بی، (b) پتاسیم آمیل زنتات توسط نمونه‌های ۵۵۰-۰۰، ۵۲۰-۰۱
Figure 4 Photocatalytic degradation curves of (a) Rhodamine B and (b) PAX by samples 550-00 and 520-01

شکل ۵ نمودارهای ارزیابی سینتیکی تخریب رودامین بی و پتاسیم آمیل زنتات را نمایش می‌دهد. شیب این نمودارها به‌عنوان نمایانگر ثابت‌های سرعت (k) عمل می‌کند. همان‌طور که در شکل ۵a دیده می‌شود، برای رنگ رودامین بی، اتصال ناهمگون ۵۲۰-۰۱ ($k = 0.041 \text{ min}^{-1}$) در مقایسه با $g-C_3N_4$ ($k = 0.027 \text{ min}^{-1}$) برابر افزایش ثابت سرعت را نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۵b برای آلایند پتاسیم آمیل زنتات، ثابت سرعت از $k = 0.005 \text{ min}^{-1}$ برای نمونه ۵۵۰-۰۰ به $k = 0.010 \text{ min}^{-1}$ برای نمونه اتصال ناهمگون ۵۲۰-۰۱ رسیده است که نشان می‌دهد با ایجاد اتصال ناهمگون سرعت تخریب آلایند افزایش پیدا می‌کند [۳۲].

۳-۵ گونه‌های فعال در فعالیت فتوکاتالیزوری

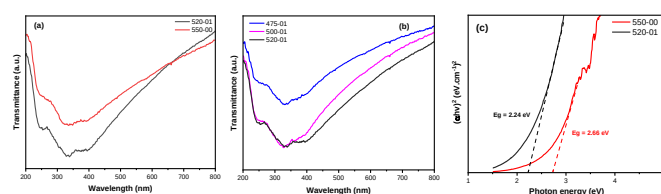
برای مطالعه نقش گونه‌های فعال در فرایند فوتوکاتالیزوری و درک سازوکارهای موثر در عملکرد نوری نمونه ۵۲۰-۰۱، از چند ماده مهارکننده (Scavenger) استفاده شد. به‌طور مشخص، اسید اتیلن‌دی‌آمین تتراسنتیک

تشکیل ذرات CuO شده و در نتیجه باعث کاهش عبور نور می‌شود. نمونه ۵۲۰-۰۱ عبور نوری کمتری نسبت به ۵۰۰-۰۱ و ۴۷۵-۰۱ از خود نشان داده است.

برای تعیین گاف انرژی مستقیم نمونه‌ها از معادله تاوک استفاده شده است [۲۹]:

$$(\alpha h\nu)^2 = A (h\nu - E_g) \quad (1)$$

که در آن h ثابت پلانک، α ضریب جذب، ν بسامد فوتون، A ثابت وابسته به جرم مؤثر الکترون در نوارهای ظرفیت و رسانش و E_g گاف انرژی است. همان‌طور که در شکل ۲c نشان داده شده است، مقادیر تخمینی انرژی گاف انرژی برای نمونه‌های ۵۵۰-۰۰ و ۵۲۰-۰۱ به ترتیب برابر با ۲/۶۶ eV و ۲/۲۴ eV بوده‌اند. گاف انرژی نمونه $g-C_3N_4/CuO$ کمتر از $g-C_3N_4$ بوده است، که این موضوع منجر به جذب مؤثرتر فوتون‌ها و در نتیجه بهبود فعالیت فوتوکاتالیزوری شده است.



شکل ۲ طیف عبور نوری نمونه‌های (a) کربن‌نیتريد گرافیتی و کربن‌نیتريد گرافیتی/اکسیدمس، (b) نانوکامپوزيت کربن‌نیتريد گرافیتی/اکسیدمس در دماهای متفاوت عملیات حرارتی (c) شکاف انرژی نمونه‌های ۵۵۰-۰۰، ۵۲۰-۰۱
Figure 2 (a) UV-vis absorption spectra of $g-C_3N_4$ and $g-C_3N_4/CuO$ nanocomposites calcined at different temperatures; (b) UV-Vis absorption spectra of $g-C_3N_4/CuO$ nanocomposites calcined at different temperatures; (c) Band gap of samples 550-00 and 520-01

۳-۳ اندازه و ریخت

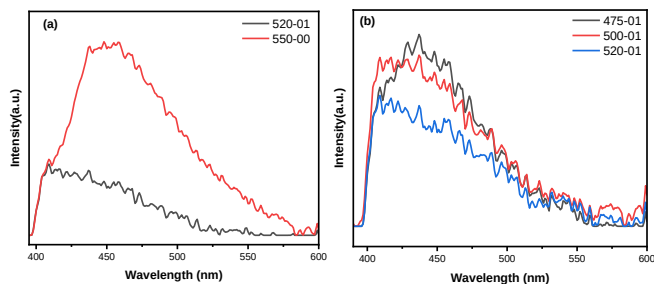
ساختار و ریخت $g-C_3N_4$ و کامپوزیت $g-C_3N_4/CuO$ با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM) مورد مطالعه قرار گرفت که در شکل ۳ نمایش داده شده است. شکل ۳a نشان می‌دهد که $g-C_3N_4$ دارای ساختاری لایه‌ای و دوبعدی با ضخامت متوسط 30 ± 3 نانومتر است. همان‌طور که در شکل ۳b مشاهده می‌شود، با تشکیل کامپوزیت و ایجاد اتصال ناهمگون بین $g-C_3N_4$ و CuO ، ساختار ناهمگون نانو ساختار $g-C_3N_4/CuO$ ایجاد شد. ساختار لایه‌ای $g-C_3N_4$ در اثر تغییر در واحدهای s-triazine دچار اعوجاج شده است که این موضوع ناشی از تمایل ساختار به پیچش و فروپاشی بر روی سطوح منحنی است. علاوه بر این، ضخامت لایه‌های $g-C_3N_4$ به 28 ± 4 نانومتر کاهش یافته است که این موضوع به دلیل نقش نانوذرات CuO به‌عنوان کاتالیزور در فرایند بسپارش $g-C_3N_4$ و فراهم آوردن سطحی مناسب برای بسپارش سریع‌تر آن است [۳۰].

۳-۴ فعالیت فتوکاتالیزوری

در مقایسه با $g-C_3N_4$ طیف‌های عبور نوری محلول رودامین بی در طول فرایند تخریب آن توسط نمونه ۵۲۰-۰۱ نشان‌دهنده فعالیت فوتوکاتالیزوری قابل توجهی بودند. همان‌طور که در شکل ۴a مشاهده

۳-۶ نور رخشایی و آهنگ باز ترکیب

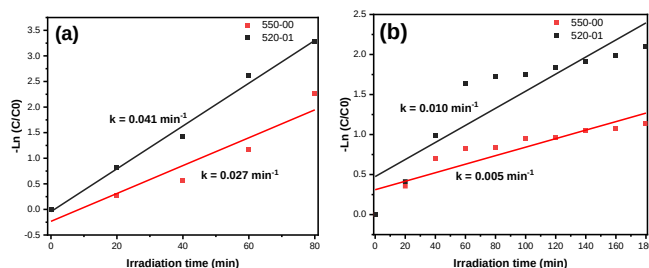
طیف‌های نوررخشایی (Photoluminescence) نمونه‌های ۵۵۰-۰۰ و ۵۲۰-۰۱ به‌منظور ارزیابی آهنگ باز ترکیب و همچنین کارایی انتقال و مهاجرت زوج‌های الکترون-حفره تولید شده زیر تابش نور، اندازه‌گیری شدند. شکل ۷(a) طیف نوررخشایی کربن‌نیتريد گرافیتی و ساختارهای ناهمگون کربن‌نیتريد گرافیتی/اکسیدمس را زیر تحریک با طول موج ۳۶۵ نانومتر نشان می‌دهد. هنگام تحریک با نور به طول موج ۳۶۰ نانومتر، محدوده تابش طیف‌های ۵۲۰-۰۱ و ۵۵۰-۰۰ بین ۴۰۰ تا ۵۰۰ نانومتر قرار دارد. بیشینه اصلی تابش نمونه ۵۵۰-۰۰ در حدود ۴۶۶ نانومتر واقع شده است که با گاف انرژی ۲/۶۶ eV مطابقت دارد. یکی از ویژگی‌های بارز طیف نوررخشایی مربوط به $g-C_3N_4$ همین بیشینه تابشی است که بیشتر به پدیده‌های تابش بین نواری و به‌ویژه انتقالات الکترونی نوع $n-\pi^*$ نسبت داده می‌شود. در این فرایند، هنگامی که الکترون‌های برانگیخته شده از نوار ظرفیت (VB) به نوار رسانش (CB) به‌صورت تابشی باز ترکیب می‌شوند، فوتون‌هایی با انرژی معادل گاف انرژی ماده آزاد می‌شوند. این انتقالات که مشخصه ساختار الکترونی ذاتی $g-C_3N_4$ هستند و ماهیت نیمه‌رسانای آن را نشان می‌دهند، شامل جفت‌های تنها الکترون‌های موجود بر روی اتم‌های نیتروژن هستند [۳۵]. در مقایسه با $g-C_3N_4$ ، با افزودن CuO به این ماده، شدت بیشینه نور رخشایی به‌وضوح کاهش یافته است. این کاهش ناشی از افزایش جداسازی زوج‌های الکترون-حفره‌ای تولید شده و کاهش آهنگ باز ترکیب الکترون-حفره است [۳۶]. آهنگ باز ترکیب زوج‌های الکترون-حفره ایجاد شده زیر تابش نور با استفاده از مشخصه‌یابی نوررخشایی در دماهای مختلف عملیات حرارتی و با مقدار ثابت CuO مطالعه شده است. همان‌طور که در شکل ۷(b) مشاهده می‌شود، با افزایش دمای عملیات حرارتی در فرایند سنتز، شدت طیف‌های نوررخشایی مربوط به ساختارهای ناهمگون کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده کاهش آهنگ باز ترکیب زوج‌های الکترون-حفره است. این امر به‌دلیل آن است که با افزایش دما، اوره به‌عنوان پیش‌ماده سنتز $g-C_3N_4$ به‌طور کامل‌تری بسپار شده و ساختارهای حلقوی اس-تری‌آزین را به‌طور کامل‌تری تشکیل می‌دهد. در دماهای پایین‌تر، میزان تجمع ذرات $g-C_3N_4$ بیشتر بوده که منجر به کاهش تشکیل اتصالات ناهمگون بین $g-C_3N_4$ و CuO می‌شود. در نتیجه، کارایی جداسازی حامل‌های بار که وابسته به انتقال آن‌ها در ناحیه مرزی بین دو ماده است، کاهش یافته و باعث افزایش باز ترکیب الکترون-حفره می‌شود. بنابراین، شدت بیشینه نوررخشایی افزایش می‌یابد [۳۷].



شکل ۷ طیف نوررخشایی نمونه‌های (a) ۵۲۰-۰۱ و ۵۵۰-۰۰، (b) نمونه‌های ۵۲۰-۰۱، ۴۷۵ و ۵۰۰-۰۱

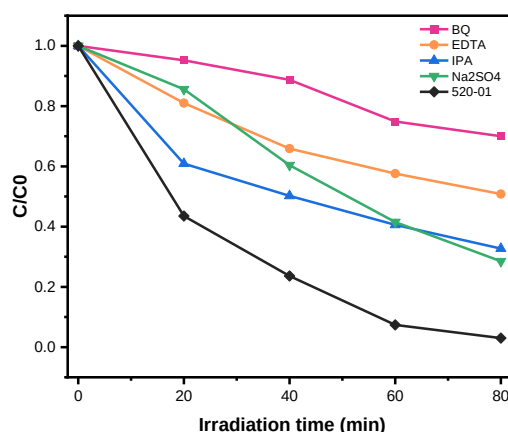
Figure 7 Photoluminescence (PL) spectra of (a) samples 520-01 and 550-00; (b) samples 475-01, 500-01, and 520-01

(EDTA)، سولفات سدیم (Na_2SO_4)، بنزو کوبینون (BQ) و ایزوپروپیل الکل (IPA) به‌ترتیب برای شناسایی حفره‌های مثبت (+h)، الکترون‌های آزاد (e^-)، آنیون‌های سوپراکسید ($O_2^{\cdot-}$) و رادیکال‌های هیدروکسیل ($OH^{\cdot}$) به‌کار گرفته شدند [۳۳]. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده، این مهارکننده‌ها برای تعیین گونه‌های فعال اصلی مؤثر در فرایند تخریب آلاینده استفاده شدند. تمام آزمایش‌های مهارکننده در شرایط مشابه با آزمون فوتوکاتالیزوری اصلی انجام شد. در مدت ۸۰ دقیقه، در غیاب هرگونه مهارکننده، نمونه ۵۲۰-۰۱ توانست ۹۶٪ از رنگ رودامین بی را تجزیه کند. با افزودن IPA به‌عنوان مهارکننده، بازدهی تخریب به ۷۰٪ کاهش یافت که نشان می‌دهد رادیکال‌های OH تأثیر اندکی در فعالیت فوتوکاتالیزوری دارند. استفاده از Na_2SO_4 نیز موجب کاهش بازدهی تخریب به ۷۴٪ شد که نشان می‌دهد الکترون‌های آزاد نقش محدودی در این فرایند دارند. استفاده از EDTA به‌عنوان مهارکننده منجر به کاهش بازدهی تخریب به ۵۴٪ پس از ۸۰ دقیقه شد که اهمیت زیاد حفره‌های مثبت در تجزیه آلاینده‌های آلی را نشان می‌دهد. در نهایت، افزودن BQ به‌عنوان مهارکننده تنها به ۳۲٪ تخریب رودامین بی انجامید، که نشان می‌دهد رادیکال‌های سوپراکسید بیشترین تأثیر را در فعالیت فوتوکاتالیزوری ایفا می‌کنند [۳۴].



شکل ۵ نمودار سرعت واکنش تخریب فوتوکاتالیزوری (a) رودامین بی، (b) پتاسیم آمیل زنتات توسط نمونه‌های ۵۵۰-۰۰، ۵۲۰-۰۱

Figure 5 Kinetics of photocatalytic degradation rate of (a) Rhodamine B and (b) PAX by samples 550-00 and 520-01



شکل ۶ اثر مهارکننده‌ها بر میزان فعالیت فوتوکاتالیزوری نمونه ۵۲۰-۰۱ در تخریب رنگ رودامین بی

Figure 6 Effect of scavengers on the photocatalytic activity of sample 520-01 in the degradation of Rhodamine B

۳-۷ سازوکار فرایند فتوکاتالیزوری

یافته‌های آزمایش جذب‌کننده‌ها و تحلیل طیف‌های نورخشایی که پیش‌تر ذکر شد، در شکل ۸ سازوکار فوتوکاتالیزور اتصال ناهمگون g-C₃N₄/CuO را نشان می‌دهد. گاف انرژی رودامین بی برابر است با ۲/۳۷ eV [۳۸]. به‌منظور تعیین لبه‌های نوار و مطالعه جدایش حامل‌های بار در نانوذرات g-CuO و g-C₃N₄، باید پتانسیل نوار ظرفیت (EVB) و نوار رسانش (ECB) با رابطه‌های زیر محاسبه شوند:

$$EVB = \chi + 0.5E_g - E_c \quad (2)$$

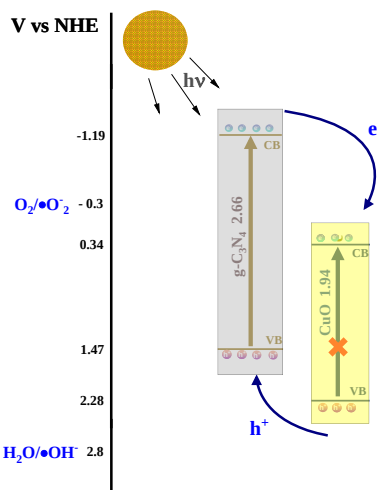
$$ECB = EVB - E_g \quad (3)$$

که در آن، E_g گاف انرژی برای g-C₃N₄ و CuO است، E_c انرژی الکترون آزاد نسبت به هیدروژن است که مقدار آن ۴/۵ eV است. χ یا الکترون‌گاتیویته نیمه‌رسانا، برای CuO برابر ۵/۸۱ eV و برای g-C₃N₄ برابر ۴/۶۴ eV است [۱۹]. الکترون‌های تولیدشده توسط نور در نوار رسانش g-C₃N₄ (۱/۱۹ eV) - به نوار رسانش CuO منتقل می‌شوند، زیرا نوار رسانش CuO در سطح انرژی پایین‌تری (۰/۳۴ eV) نسبت به g-C₃N₄ قرار دارد. این انتقال الکترونی باعث کاهش بازترکیب جفت‌های الکترون-حفره شده و تضمین می‌کند که الکترون‌های CuO همیشه برای فرایندهای فوتوکاتالیزوری در دسترس باشند [۳۹]. به‌طور مشابه، حفره‌های تولید شده توسط نور در نوار ظرفیت CuO (۲/۲۸ eV) به نوار ظرفیت g-C₃N₄ (۱/۴۷ eV) منتقل می‌شوند، زیرا نوار ظرفیت CuO در سطح انرژی بالاتری نسبت به g-C₃N₄ قرار دارد. این انتقال حفره نیز به جدایش مؤثر جفت‌های الکترون-حفره کمک می‌کند [۴۰]. الکترون‌های موجود در نوار رسانش CuO قادرند اکسیژن محلول (O₂) را کاهش داده و رادیکال‌های سوپراکسید (O₂⁻) را تشکیل دهند که در آزمایش فوتوکاتالیزوری، این رادیکال‌ها به‌عنوان گونه‌های فعال اصلی عمل می‌کنند. علاوه بر این، رادیکال‌های هیدروکسیل (OH[•]) می‌توانند از اکسایش آب یا یون‌های هیدروکسید (OH⁻) توسط حفره‌های موجود در نوار ظرفیت g-C₃N₄ تولید شوند. این رادیکال‌های هیدروکسیل و سوپراکسید با مولکول‌های رودامین بی واکنش داده و آن‌ها را به ترکیبات کوچک‌تر و غیرسمی مانند آب (H₂O) و دی‌اکسید کربن (CO₂) تبدیل می‌کنند [۴۱]. به‌دلیل حضور دو نوع نیمه‌رسانا با موقعیت‌های متفاوت نوار رسانش و ظرفیت، این سازوکار انتقال الکترون و حفره در اتصال ناهمگون کارایی تخریب رنگ‌ها را افزایش می‌دهد. اتصال ناهمگون g-C₃N₄/CuO به‌خاطر ویژگی‌های ساختاری و الکتریکی خاص خود، اثربخشی تخریب رودامین بی را بهبود می‌بخشد. جدایش مؤثر جفت‌های الکترون-حفره، تولید گونه‌های فعال واکنشی و کاهش بازترکیبی الکترون-حفره دلایل اصلی این بهبود کارایی هستند [۴۲].

۴ نتیجه‌گیری

نانوساختار اتصال ناهمگون g-C₃N₄/CuO با استفاده از عملیات حرارتی و تخلیه الکتریکی در مایع سنتز شد. این نانوساختار برای تجزیه رنگ‌های RhB و PAX در حضور نور مرئی با توان کم مورد استفاده قرار گرفت. در مقایسه با g-C₃N₄، ترکیب g-C₃N₄/CuO عملکرد بهتری در تخریب آلاینده‌ها نشان داد که به‌ترتیب برای رنگ‌های RhB و PAX به مقادیر ۹۶٪، ۸۸٪ رسید.

تشکیل اتصال ناهمگون بین دو نیمه‌رسانا باعث کاهش بازترکیب جفت‌های الکترون-حفره تولید شده توسط نور و افزایش کارایی انتقال آن‌ها می‌شود که عامل اصلی این عملکرد برجسته است. الگوهای پراش پرتو ایکس نشان داد که نمونه ۵۲۰-۰۱ شامل فازهای CuO و g-C₃N₄ است. طیف‌های مرئی-فرابنفش نشان دادند که جذب نور با تشکیل اتصال ناهمگون در مقایسه با CuO و g-C₃N₄ خالص افزایش یافته است. تصاویر FE-SEM نشان دادند که g-C₃N₄ به‌صورت ورقه‌های دوبعدی با ضخامت ۳±۳۰ نانومتر سنتز شده است که پس از تشکیل اتصال ناهمگون با CuO به ۲۸ نانومتر کاهش یافته است. آزمایش جذب‌کننده‌ها ابزار اصلی برای مطالعه سازوکار تخریب کامپوزیت ۵۲۰-۰۱ بود و نتایج نشان دادند که رادیکال‌های O₂⁻ و حفره‌های h⁺ نقش اصلی را در فرایند تخریب ایفا می‌کنند. علاوه بر این، طیف‌های نورخشایی نشان دادند که اتصال ناهمگون در نمونه ۵۲۰-۰۱ بازترکیب جفت‌های الکترون-حفره تولید شده توسط نور را کاهش داده که می‌تواند فعالیت فوتوکاتالیزوری را افزایش دهد. این یافته‌ها راهکاری برای طراحی اتصال ناهمگون‌های g-C₃N₄/CuO با عملکرد فوتوکاتالیزوری بالا برای حذف رنگ‌های آلی و آلودگی‌های زیست‌محیطی مانند انواع زئنتات‌ها را ارائه می‌دهند.



شکل ۸ طرح‌واره عملکرد انتقال بار در نمونه اتصال ناهمگون ۵۲۰-۰۱

Figure 8 Schematic illustration of charge transfer mechanism in the 520-01 heterojunction sample

مراجع

1. S. Lotfi, M. El Ouardi, H. A. Ahsaine, And A. Assani, Recent Progress On The Synthesis, Morphology And Photocatalytic Dye Degradation Of Bivo₄ Photocatalysts: A Review, *Catal. Rev. - Sci. Eng.*, Vol. 66, No. 1, Pp. 214–258, 2024.
2. A. Rafiq Et Al., Photocatalytic Degradation Of Dyes Using Semiconductor Photocatalysts To Clean Industrial Water Pollution, *J. Ind. Eng. Chem.*, Vol. 97, No. February, Pp. 111–128, 2021.
3. M. Saeed, M. Muneer, A. Ul Haq, And N. Akram, Photocatalysis: An Effective Tool For Photodegradation Of Dyes—A Review, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, Vol. 29, No. 1, Pp. 293–311, 2022.
4. Q. Nie, L. Jia, G. Zhang, J. Xie, And J. Liu, Micro-Spherical Bioi Photocatalysts For Efficient Degradation Of Residual Xanthate And Gaseous Nitric Oxide, *Nanomaterials*, Vol. 14, No. 7, 2024.
5. Y. Qi Et Al., Visible-Light-Driven Biobr-TiO₂-Attapulgite Photocatalyst With Excellent Photocatalytic Activity For Multiple

- Development Of Versatile Cdmo_{0.4}/G-C₃N₄ Nanocomposite For Enhanced Photoelectrochemical Oxygen Evolution Reaction And Photocatalytic Dye Degradation Applications, *Mater. Today Chem.*, Vol. 19, No. January, 2021.
25. A. Muthuganesh et al., Efficient Methylene Blue Dye Degradation Via Visible Light-Activated G-C₃N₄/CuO Nanocomposites,” *Hybrid Adv.*, vol. 9, no. December 2024, p. 100420, 2025.
26. M. Xiao, B. Luo, S. Wang, And L. Wang, Solar Energy Conversion On G-C₃N₄ Photocatalyst: Light Harvesting, Charge Separation, And Surface Kinetics, *J. Energy Chem.*, Vol. 27, No. 4, Pp. 1111–1123, 2018.
27. S. Hong, Y. Yu, Z. Yi, H. Zhu, W. Wu, And P. Ma, Highly Efficient And Recyclable G-C₃N₄/CuO Hybrid Nanocomposite Towards Enhanced Visible-Light Photocatalytic Performance, *Nano*, Vol. 11, No. 11, Pp. 7–10, 2016.
28. P. Senthil Kumar, S. Sobiya, M. Selvakumar, S. Ganesh Babu, And S. Karuthapandian, Hierarchically Structured CuO/G-C₃N₄ Heterogeneous Semiconductor Photocatalyst With Improved Photocatalytic Activity And Stability, *Energy Environ. Focus*, Vol. 5, No. 2, Pp. 139–149, 2016.
29. V. Mursyalaat, V. I. Variani, W. O. S. Arsyad, And M. Z. Firihi, The Development Of Program For Calculating The Band Gap Energy Of Semiconductor Material Based On Uv-Vis Spectrum Using Delphi 7.0, *J. Phys. Conf. Ser.*, Vol. 2498, No. 1, Pp. 0–5, 2023.
30. S. M. Hosseini H Et Al., One-Pot Microwave Synthesis Of Hierarchical C-Doped CuO Dandelions/G-C₃N₄ Nanocomposite With Enhanced Photostability For Photoelectrochemical Water Splitting, *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 530, No. June, P. 147271, 2020.
31. E. Arulkumar, S. Thanikaikarasan, and E. V. Siddhardhan, Results in Chemistry Synthesis and Characterization of CuO @ NiO / g-C₃N₄ Nanocomposite for Photocatalytic and Electrochemical Application, *Results Chem.*, vol. 7, no. December 2023, p. 101439, 2024.
32. A. M. Hamza and H. A. Alshamsi, Design of Novel Z-scheme g-C 3 N 4 / for Efficient Visible Light-Driven Photocatalytic Degradation of Rhodamine B, *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 23596, pp. 1–16, 2024.
33. H. Degefu, T. Mengist, and N. Belachew, “Results in Chemistry Enhanced Photocatalytic Degradation of Methylene blue Dye using fascily Synthesized g-C 3 N 4 / CoFe 2 O 4 Composite Under Sun Light Irradiation,” *Results Chem.*, vol. 7, no. January, p. 101306, 2024.
34. L. Zhu, J. Luo, and G. Dong, Enhanced Photocatalytic Degradation of Organic Contaminants Over a CuO/g-C₃N₄ p–n Heterojunction Under Visible Light Irradiation, *RSC Adv.*, vol. 11, no. January, pp. 33373–33379, 2021.
35. S. Asadzadeh-Khaneghah, A. Habibi-Yangjeh, M. Shahedi Asl, Z. Ahmadi, And S. Ghosh, Synthesis Of Novel Ternary G-C₃N₄/SiC/C-Dots Photocatalysts And Their Visible-Light-Induced Activities In Removal Of Various Contaminants, *J. Photochem. Photobiol. A Chem.*, Vol. 392, No. November 2019, P. 112431, 2020.
36. E. Boorboor Azimi, A. Badieli, And M. Hossaini Sadr, Dramatic Visible Photocatalytic Performance Of G-C₃N₄-Based Nanocomposite Due To The Synergistic Effect Of AgBr And ZnO Semiconductors, *J. Phys. Chem. Solids*, Vol. 122, No. June, Pp. 174–183, 2018.
37. J. Wang, J. Huang, H. Xie, And A. Qu, Synthesis Of G-C₃N₄/TiO₂ With Enhanced Photocatalytic Activity For H₂ Evolution By A Simple Method, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 39, No. 12, Pp. 6354–6363, 2014.
38. A. I. Molla, I. Tateishi, M. Furukawa, H. Katsumata, And T. Suzuki, Evaluation Of Reaction Mechanism For Photocatalytic Degradation Of Dye With Self-Sensitized TiO₂ Under Visible Light Irradiation, Pp. 1–7, 2017.
39. G. Zhi, S. Ling, V. B. Oh, C. Y. Haw, L. Tan, and W. Ong, “G-C 3 N 4 Photocatalysts : Utilizing Electron – Hole Pairs for Boosted Redox Capability in Water Splitting,” *Energy Mater.* Xanthates, *Catalysts*, Vol. 13, No. 12, 2023.
6. M. R. Tamtam, R. Koutavarapu, G. S. Choi, And J. Shim, Z-Scheme Photocatalytic Degradation Of Potassium Butyl Xanthate By A 2d/2d Heterojunction Of Bi₂WO₆ Using MoS₂ As A Co-Catalyst, *Catalysts*, Vol. 13, No. 9, 2023.
7. Y. Shen Et Al., Synthesis Of High-Efficient TiO₂/Clinoptilolite Photocatalyst For Complete Degradation Of Xanthate, *Miner. Eng.*, Vol. 159, No. September, P. 106640, 2020.
8. A. De Barros Lima, I. B. A. Falconi, J. A. S. Tenório, And M. Dos Passos Galluzzi Baltazar, Xanthate Degradation At Neutral And Basics Ph By Cu-Fenton-Like Process, *J. Photochem. Photobiol. A Chem.*, Vol. 441, No. January, 2023.
9. H. Kumari Et Al., A Review On Photocatalysis Used For Wastewater Treatment: Dye Degradation, *Springer International Publishing*, Vol. 234, No. 6, 2023.
10. M. Shen Et Al., Visible-Light-Driven Photodegradation Of Xanthate In A Continuous Fixed-Bed Photoreactor: Experimental Study And Modeling, *Chem. Eng. J.*, Vol. 461, No. October 2022, 2023.
11. H. Yang, A Short Review On Heterojunction Photocatalysts: Carrier Transfer Behavior And Photocatalytic Mechanisms, *Mater. Res. Bull.*, Vol. 142, No. April, 2021.
12. M. Fallahpour, R. Poursalehi, And A. Yourdkhani, Highly Efficient Photocatalytic Removal Of Concentrated Pex, Pax And Sipx Xanthates Collectors By An Immobilized Nanostructured G-C₃N₄/ZnO Low Power Backlighted Module, *Miner. Eng.*, Vol. 204, No. October, 2023.
13. Y. Zhao, X. Liang, X. Hu, And J. Fan, Colloids And Surfaces A : Physicochemical And Engineering Aspects Green And Efficient Photodegradation Of Norfloxacin With Cspbb₃-Rgo/Bi₂WO₆ S-Scheme Heterojunction Photocatalyst, *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, Vol. 626, No. June, P. 127098, 2021.
14. Y. Karbalaemmorad, A. Saadati, And S. Sheibani, Photocatalytic Activity Enhancement Of G-C₃N₄ Nanosheets Through Simultaneous Inter- And Intra-Layer Charge Separation Using A Facile Mechano-Thermal Method, *Mater. Res. Bull.*, Vol. 173, No. January, P. 112687, 2024.
15. Y. Guo, G. Liu, W. Yin, Y. Zhang, And L. Shi, Precise Defect Engineering G-C₃N₄ Fabrication To Improve Hydrogen Production Performance, *Fuel*, Vol. 362, No. October 2023, P. 130743, 2024.
16. Y. Tian, D. Zeng, T. Shen, R. Guan, And W. Shi, One-Step Synthesis Of S-Doped C-Vacancy G-C₃N₄ With Honeycomb Porous Nanosheets Structure For Efficient Visible-Light-Driven Hydrogen Evolution, *Fuel*, Vol. 357, No. Pb, P. 129927, 2024.
17. R. Tamilselvan And A. I. Selwynraj, A Novel G-C₃N₄ Photocatalytic Pretreatment For Reducing Silica And Modifying The Structure Of Rice Straw For Sustainable Biofuel Production, *Fuel*, Vol. 357, No. Pb, P. 129901, 2024.
18. W. Liu, C. Jiang, J. Feng, L. Zhang, Q. Hou, And X. Ji, Enhancing Photocatalytic Destruction Of Lignin Via Cellulose Derived Carbon Quantum Dots/G-C₃N₄ Heterojunctions, *Int. J. Biol. Macromol.*, Vol. 260, No. P2, P. 129587, 2024.
19. S. J. Singh, S. Sellaiyan, And P. Chinnamuthu, Physica B : Condensed Matter Synthesis And Characterization Of CuO/G-C₃N₄ Nanocomposite For Efficient Photocatalytic Activities Under Natural Sunlight, *Phys. B Condens. Matter*, Vol. 650, No. September 2022, P. 414543, 2023.
20. R. Suresh, N. S. Karthikeyan, L. Gnanasekaran, S. Rajendran, And M. Soto-Moscoso, Facile Synthesis Of CuO/G-C₃N₄ Nanolayer Composites With Superior Catalytic Reductive Degradation Behavior, *Chemosphere*, Vol. 315, No. January, P. 137711, 2023.
21. D. Meng Et Al., Study On CuO/G–C₃N₄ S–Scheme Heterojunction For Enhanced Visible-Light-Driven Photocatalytic Degradation Of Xanthate, *Opt. Mater. (Amst.)*, Vol. 143, No. May, 2023.
22. A. Banu, B. Sinha, and S. Sikdar, Heliyon Synthesis Of Polymeric 2D-Graphitic Carbon Nitride (g-C₃N₄) Nanosheets For Sustainable Photodegradation of Organic Pollutants, *Heliyon*, vol. 10, no. 13, p. e33354, 2024.
23. D. Limthin et al., Enhancement in Sensitivity and Selectivity of Electrochemical Technique with CuO / g-C₃N₄ Nanocomposite Combined with Molecularly Imprinted Polymer for Melamine Detection, *Polymers (Basel)*, vol. 16, no. 13, p. 1800, 2024.
24. A. Gandamalla, S. Manchala, P. Anand, Y. P. Fu, And V. Shanker,

- Adv.*, vol. 4, no. Jul, pp. 1–27, 2023.
40. S. A. Shabbir, I. Ali, M. Haris, H. Latif, A. Sabah, and A. S. Alshomrany, Bifunctional $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{g-C}_3\text{N}_4$ Hetrostructures for Photoelectrochemical Water Splitting, *ACS Omega*, vol. 9, no. April, pp. 21450–21458, 2024.
 41. J. Pei and H. Li, “G-C₃N₄-Based Heterojunction for Enhanced Photocatalytic Performance: A Review of Fabrications, Applications, and Perspectives,” *Catal. Today*, vol. 14, no. November, pp. 1–23, 2024.
 42. P. Riazati and S. Sheibani, “Enhancing Photocatalytic Water Remediation By G-C₃N₄ Through Controlled CuO Content in an S-scheme g-C₃N₄/CuO Nanocomposite,” *J. Alloys Compd.*, vol. 1016, no. February, p. 179008, 2025.