



Sustainable Cyanide Removal from Water via CuO/AC Catalyst Derived from Polymeric Waste

Behzad Aghabarari ^{1*}, Amir Hossein Afshar ²

1. Assoc. Prof., Dept. of Nanotechnology and Advanced Materials, Materials and Energy Research Center (MERC), Karaj, Iran (Corresponding Author) b.aghabarari@merc.ac.ir

2. PhD. Student, Dept. of Nanotechnology and Advanced Materials, Materials and Energy Research Center (MERC), Karaj, Iran



<https://doi.org/10.22093/wwj.2025.544710.3512>

Original Paper

Abstract

In this study, polymeric waste was utilized to produce a stable and environmentally compatible catalyst for the removal of high concentrations of cyanide from water. A heterogeneous Fenton-like process was employed, in which activated carbon derived from polymeric waste served as the catalytic support and was impregnated with copper oxide (CuO) nanoparticles. The catalyst was characterized by X-ray diffraction, confirming the presence of crystalline CuO and AC phases. Field-emission scanning electron microscopy combined with energy-dispersive spectroscopy demonstrated a uniform dispersion of CuO nanoparticles (~50 nm) across the porous carbon surface, while Brunauer Emmett Teller analysis demonstrated a high specific surface area (2174 m²/g in AC and 1332 m²/g in CuO/AC) and mesoporous structure (average pore diameter ≈ 2.2 nm). Catalytic performance tests revealed that under optimized conditions (pH ≈ 11, ambient temperature, H₂O₂-to-cyanide molar ratio of 3, and a catalyst dosage of 15 g/L), the cyanide removal efficiency exceeded 98%. The catalyst maintained its activity over three successive reaction cycles, indicating excellent structural stability and reusability. This work highlights that employing polymeric waste for catalyst fabrication provides an efficient, sustainable, and low-cost strategy for cyanide remediation, while simultaneously contributing to waste management and environmental protection. Under optimized conditions (pH ≈ 11, ambient temperature, H₂O₂-to-cyanide molar ratio = 3 and catalyst dosage = 15 g/L), the cyanide removal efficiency exceeded 98%. The CuO/AC catalyst maintained excellent activity over three consecutive cycles, indicating good structural stability and reusability. This work highlights a sustainable and economical strategy for cyanide remediation using polymer-derived CuO/AC catalysts, simultaneously addressing waste management and environmental protection.

Keywords:

Heterogeneous Fenton, Cyanide Removal, Polymer Waste, Copper Oxide, Activated Carbon.



Received: Mar. 14, 2025

Revised: May 27, 2025

Accepted: June 26, 2025

To cite this article:

Aghabarari, B., Afshar, A. H., 2025. Sustainable cyanide removal from water via CuO/AC catalyst derived from polymeric waste. *Water and Wastewater*, 36(3), 19-35. <https://doi.org/10.22093/wwj.2025.544710.3512>.

Use your device to scan and read the article online



© The Author(s).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



1. Introduction

Cyanide is among the most toxic pollutants, causing acute respiratory failure, neurological damage, and even death (Kuyucak and Akcil, 2013). Its widespread use in electroplating and gold mining leads to extremely high effluent concentrations (10,000–30,000 mg/L), compared with natural levels (0.001–0.05 mg/L) (Akci, 2010). Traditional methods such as alkaline chlorination are limited by sludge formation and high cost (Brisbin, 2020). Advanced oxidation processes, particularly heterogeneous Fenton-like systems, have emerged as efficient alternatives due to recyclability and operation under milder conditions (Ranjbar et al., 2023; Bolisetty and Mezzenga, 2016).

Copper-based catalysts are of special interest due to their favorable redox potential ($E^\circ_{\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}^+}=0.17$ V) compared to $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ ($E^\circ=0.77$ V), enabling efficient hydroxyl radical production (Chen et al., 2023b). Activated carbon¹ is an excellent support material owing to its high surface area and porosity (Senthil Rathi et al., 2024; Fadaei et al., 2024). Using polymeric waste as the precursor for AC not only reduces costs but also supports circular economy strategies. This study reports the development of a CuO/AC catalyst derived from polymeric waste for efficient cyanide degradation.

2. Methodology

Polymeric waste from carpet industries was carbonized via KOH activation and pyrolysis at 800 °C. The AC obtained (SSA=2174 m²/g) was impregnated with Cu²⁺ from CuSO₄ solution and precipitated at pH 10 to form CuO nanoparticles on the surface. Characterization techniques included X-ray diffraction² (phase identification), FESEM/EDS (morphology and elemental distribution) and BET analysis (surface area and pore structure).

Cyanide degradation tests were performed at 15,000 mg/L CN⁻ concentration, with variable pH (10–12), catalyst dosage (5–25 g/L) and H₂O₂-to-cyanide ratios (1–3). Cyanide concentration was measured by AgNO₃ titration (APHA, 1926). Kinetic modeling employed pseudo-first-order and pseudo-second-order equations.

3. Discussion and results

3.1. Extended structural properties

The XRD patterns of AC and the CuO/AC catalyst (Fig. 1) exhibit broad amorphous peaks in

the 2θ range of 10–25°, confirming the amorphous nature of the carbon structure. In addition, distinct diffraction peaks are observed in the CuO/AC catalyst at 2θ values of 35.5°, 38.7°, 48.6°, 58.3° and 61.5°, which correspond to the (–111), (111), (–202), (202) and (–311) crystallographic planes of CuO, respectively.

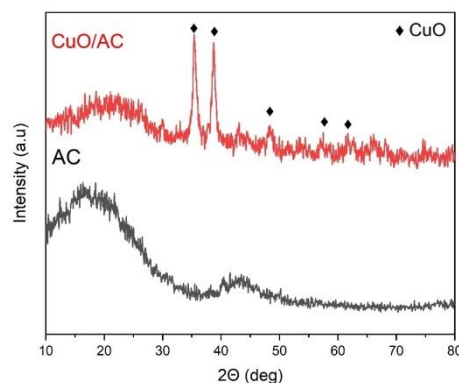


Fig. 1. XRD spectra of AC and CuO/AC catalyst

Comparison of these diffraction peaks with the standard reference card No. 96-901-6058 confirms the presence of the copper oxide phase. These results indicate the successful impregnation and loading of CuO onto the surface of AC. Field-emission scanning electron microscopy³ images illustrate the surface morphology of the carbon support and the synthesized catalyst (Fig. 2). The AC sample exhibits a highly porous surface with a relatively uniform structure. In contrast, the CuO/AC sample shows the presence of aggregated spherical particles with an average size of approximately 50 nm. These nanoparticles are relatively uniformly distributed over the catalyst surface, which can effectively increase the number of active sites and facilitate contact with reactant molecules. The visible pores in the micrographs further confirm a porous structure that is favorable for mass transfer. Nitrogen adsorption–desorption isotherms and pore size distribution curves for AC and CuO/AC are presented in Fig. 3. The AC derived from polymeric waste exhibits a very high specific surface area of 2174 m²/g and a total pore volume of 1.06 cm³/g, indicating a highly developed microporous structure. After CuO loading, the specific surface area decreases to 1332 m²/g and the total pore volume to 0.734 cm³/g, while the average pore diameter is approximately 2.2 nm, suggesting the predominance of a mesoporous structure (Table 1).

¹ Activated Carbon (AC)

² X-Ray Diffraction (XRD)

³ Field-Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM)



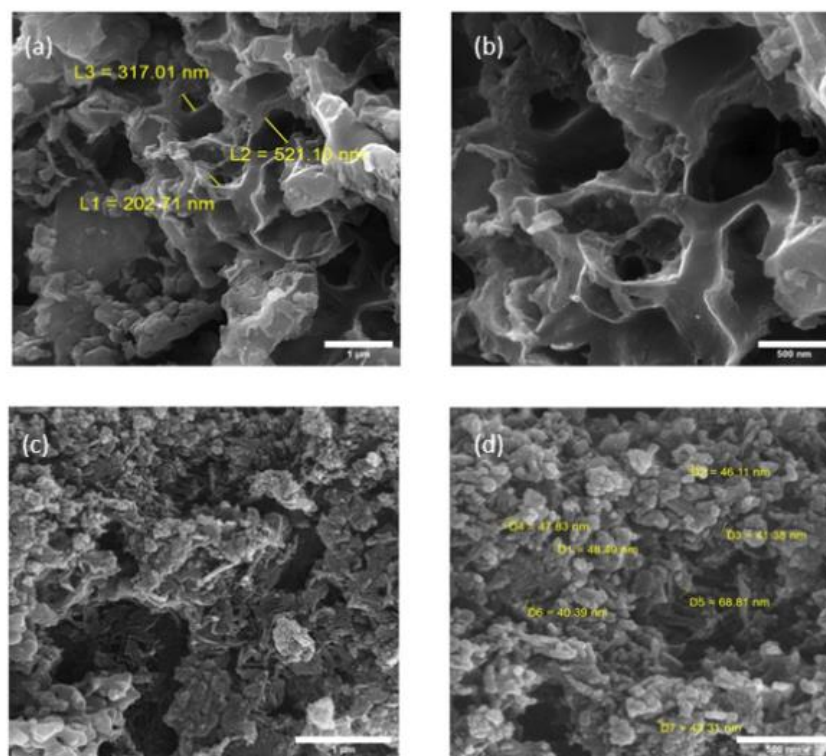


Fig. 2. Field-emission scanning electron microscopy images of a) and b) AC synthesized from polymeric waste, c) and d) CuO/AC catalyst

Table 1. Physical properties of carbon-based material and synthesized catalyst

Composition	D_{ap} (nm)	V_{meso} (cm ³ /g)	V_t (cm ³ /g)	SSA (m ² /g)
AC	1.95	0.879	1.06	2174
CuO/AC	2.20	0.489	0.734	1332

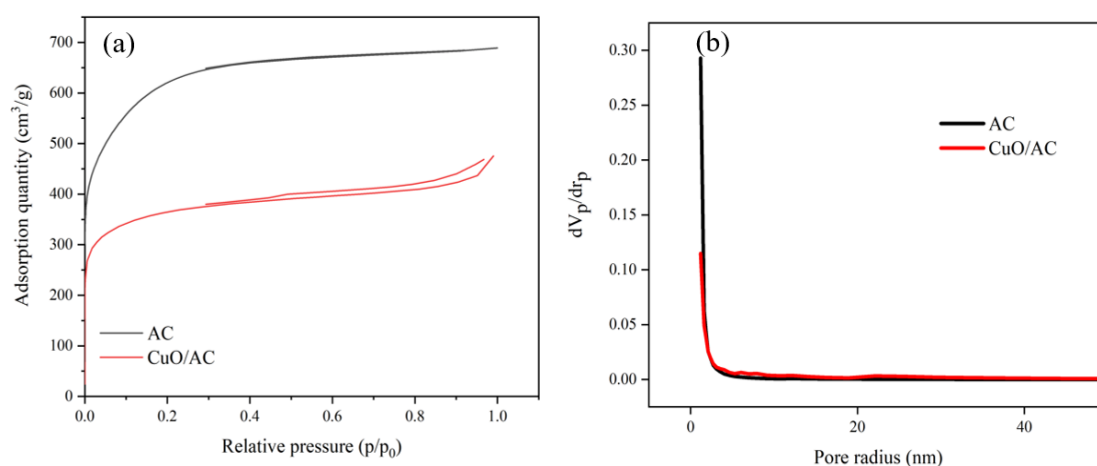


Fig. 3. Nitrogen adsorption-desorption isotherm and pore size distribution of the AC carbon base and CuO/AC catalyst



The significant reduction in specific surface area after metal loading can be attributed to partial blockage of micropores and the accumulation of CuO nanoparticles within the carbon framework. Similar behavior has been reported in previous studies. For instance, Feijoo et al. observed that the formation of nickel–ferrite oxide phases on AC resulted in an approximately 35% reduction in the initial surface area; however, the presence of mesopores ensured efficient mass transfer and satisfactory catalytic activity (Feijoo et al., 2021). Based on these findings and the present results, the decrease in surface area in the CuO/AC sample can be primarily ascribed to physical pore blockage. Nevertheless, the remaining mesopores with an average diameter of approximately 2 nm allow effective diffusion of reactant solutions (cyanide and hydrogen peroxide).

3.2. Catalytic performance

As shown in Fig. 4, the CuO/AC–H₂O₂ system achieved >98% cyanide removal within 60 min under optimal conditions, outperforming H₂O₂ alone (28%) and CuO/AC alone (31%). The system maintained efficiency across alkaline conditions (pH=10–12), unlike Fe-based catalysts restricted to acidic media. Increasing catalyst dosage up to 15 g/L enhanced removal, while further addition gave no significant improvement. An H₂O₂-to-cyanide ratio of 3 ensured maximum radical production without side reactions.

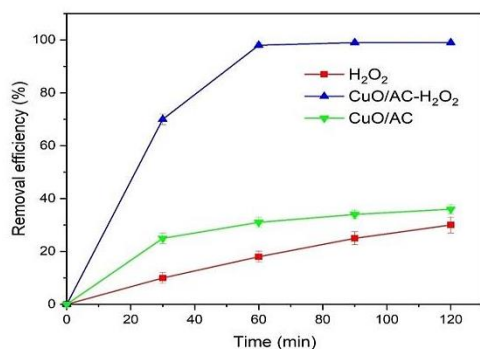


Fig. 4. Cyanide removal efficiency under various catalytic conditions. (Reaction conditions: pH=11, cyanide concentration=15,000 ppm, catalyst dosage=15 g/L, hydrogen peroxide to cyanide ratio=3, temperature=298 K, reaction time=120 min)

3.3. Reusability and kinetics

Catalyst stability and reusability are of great importance from both economic and environmental perspectives. In this study, after each catalytic run, the recovered catalyst was collected, washed, and dried prior to reuse. Over

three consecutive cycles, the removal efficiency gradually decreased from 98% to 92% and subsequently to 87%. Atomic absorption spectroscopy¹ analysis performed after each cycle revealed that copper leaching from the catalyst was negligible, with concentrations of approximately 1 ppm detected after each run.

This slight decline in performance can be attributed to partial blockage of surface active sites, a reduction in effective contact area, and minor copper leaching from the catalyst surface (De la Torre et al., 2018; Chen et al., 2023a). The limited loss of activity observed in the second and third cycles indicates the structural durability of the catalyst and demonstrates its potential for multiple reuse cycles in industrial-scale applications. Kinetic modeling (Table 2) indicated a pseudo-first-order reaction with $k=1.0107 \text{ min}^{-1}$ ($R^2 \approx 0.95$), confirming that hydroxyl radical-mediated surface reactions governed cyanide degradation. The proposed mechanism involves Cu²⁺/Cu⁺ cycling, activation of H₂O₂, generation of •OH radicals, and stepwise conversion of CN⁻ to cyanate, ammonium, and carbonate (Ninh Pham et al., 2013; Zhao et al., 2015).

Table 2. Kinetic model parameters for cyanide removal using various systems

System	K ₁ (min ⁻¹)	R ² (pseudo first order)	K ₂ (C ⁻¹ .min ⁻¹)	R ² (pseudo second order)
CuO/AC–H ₂ O ₂	1.0107	0.9496	1.3×10 ⁻³	0.8981
CuO/AC	0.0706	0.9733	8×10 ⁻⁶	0.9745
H ₂ O ₂	0.0706	0.9733	6×10 ⁻⁶	0.9647

4. Conclusions

This work demonstrates the successful synthesis of a CuO/AC catalyst derived from polymeric waste for efficient cyanide degradation. The catalyst exhibited high cyanide removal (>98% in 60 min), stability under alkaline conditions (pH=10–12), reusability over multiple cycles with minor efficiency loss, and favorable pseudo-first-order kinetics ($k=1.0107 \text{ min}^{-1}$).

These results highlight a sustainable and low-cost approach to treating industrial cyanide wastewater, while simultaneously valorizing polymeric waste. Further work should focus on semi-industrial scale studies and long-term stability in complex effluents.

¹ Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)





حذف پایدار سیانید از آب با استفاده از کاتالیست CuO/AC حاصل از ضایعات پلیمری

بهزاد آقابراری^{۱*}، امیرحسین افشار^۲

۱- دانشیار، پژوهشکده نانو مواد و مواد پیشرفته، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران

(نویسنده مسئول) b.agherbari@merc.ac.ir

۲- دانشجوی دکترا، پژوهشکده نانو مواد و مواد پیشرفته، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران



<https://doi.org/10.22093/wj.2025.544710.3512>

مقاله پژوهشی

چکیده

واژه‌های کلیدی:
فنتون ناهمگن، حذف
سیانید، ضایعات پلیمری،
اکسید مس، کربن فعال

در این پژوهش برای حذف سیانید با غلظت بالا از آب، از ضایعات پلیمری برای تولید یک کاتالیست پایدار و سازگار با محیط‌زیست استفاده شد. برای حذف سیانید از آب، فرایند شبه‌فنتون ناهمگن به کار گرفته شد که در آن، کربن فعال حاصل از ضایعات پلیمری به‌عنوان پایه کاتالیستی استفاده شد و با اکسید مس (CuO) از طریق روش تلقیح بارگذاری شد. شناسایی کاتالیست سنتز شده با استفاده از پراش پرتویکس انجام شد که وجود فازهای بلوری CuO و کربن فعال را تأیید کرد. همچنین، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی و طیف‌سنجی انرژی تفکیکی توزیع یکنواخت نانو ذرات CuO با اندازه حدود ۵۰ نانومتر بر سطح متخلخل کربن را نشان داد. آنالیز BET سطح ویژه بالا (۲۱۷۴ m²/g) در کربن فعال و ۱۳۳۲ m²/g در CuO/AC و ساختار مزوحفره‌ای (میانگین قطر ۲/۳ نانومتر) را تأیید کرد. نتایج عملکرد کاتالیست سنتز شده نشان داد که تحت شرایط بهینه فرایند (pH حدود ۱۱، دمای محیط، نسبت مولی ۳ برای H₂O₂ به سیانید و دوز کاتالیست ۱۵ گرم در لیتر)، کارایی حذف سیانید بالاتر از ۹۸ درصد است. همچنین، عملکرد خوب کاتالیست در سه چرخه متوالی فرایند حذف سیانید بیانگر پایداری شیمیایی و ساختار مناسب آن برای این فرایند است. این پژوهش نشان داد که استفاده از ضایعات پلیمری برای تولید این کاتالیست، رویکردی کارآمد، پایدار و کم‌هزینه برای حذف سیانید فراهم می‌آورد که هم‌زمان به مدیریت پسماند و حفاظت زیست‌محیطی کمک می‌کند.



دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۴

اصلاح: ۱۴۰۴/۳/۶

پذیرش: ۱۴۰۴/۴/۵

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

آقابراری، ب.، افشار، ا. ح.، ۱۴۰۴، حذف پایدار سیانید از آب با استفاده از کاتالیست CuO/AC

حاصل از ضایعات پلیمری، آب و فاضلاب، ۳۶(۳)، ۳۵-۱۹.

<https://doi.org/10.22093/wj.2025.544710.3512>



© The Author(s).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



۱- مقدمه

سیانیدها از جمله ترکیبات بسیار سمی برای انسان و محیط زیست هستند که می‌توانند علائمی همچون تنگی نفس سریع، آسیب‌های عصبی و حتی مرگ را به دنبال داشته باشند (Thomas et al., 2013). این ترکیبات به‌طور گسترده در صنایع آبکاری و استخراج فلزات استفاده شده و موجب تولید پساب‌هایی با غلظت‌های بالای سیانید می‌شوند که می‌توانند در شرایط خاص به گاز بسیار سمی سیانید هیدروژن تبدیل شوند (Bolisetty and Mezzenga, 2016). اگرچه میزان سیانید در منابع آبی طبیعی بین ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۵ میلی‌گرم در لیتر است، در صنایع آبکاری و فلزکاری این مقدار به ۱۰۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر می‌رسد (Akcil, 2010). روش‌های سنتی تصفیه مانند کلر زنی قلیایی و زیست تخریب پذیری با محدودیت‌هایی مانند کارایی کم، هزینه زیاد و تولید آلودگی ثانویه مواجه هستند (Brisbin, 2020).

فرایندهای اکسایش پیشرفته^۱ به ویژه فنتون^۲، از گزینه‌های مؤثر در تجزیه سیانید محسوب می‌شوند، اما محدودیت‌هایی از جمله وابستگی به pH و تولید لجن دارند (Thomas et al., 2021, Joo et al., 2016, Chen et al., 2023c). در مقابل، فرایندهای شبه فنتون ناهمگن با بهره‌گیری از کاتالیست‌های جامد، امکان بازیابی کاتالیست، کاهش آلودگی و عملکرد تحت شرایط ملایم‌تر را فراهم می‌کنند (Bolisetty and Mezzenga, 2016, Brisbin, 2020, Ranjbar et al., 2023).

کاتالیست‌های مبتنی بر فلزات واسطه نظیر کبالت، مس، منگنز و آهن به دلیل قابلیت مقیاس پذیری، بازده بالا و مصرف انرژی کم در سامانه‌های فنتون کاربرد گسترده‌ای دارند (Chen et al., 2023b). از میان این فلزات، کاتالیست‌های مس به واسطه پتانسیل احیای استاندارد پایین‌تر ($E^0=0.17\text{ V}$) برای $\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}^+$ در مقابل $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ ($E^0=0.77\text{ V}$) عملکرد بالاتری در تولید رادیکال‌های فعال دارند (Chen et al., 2023b). اکسید مس (CuO) به دلیل ساختار الکترونی ویژه و فعالیت کاتالیستی بالا، به‌عنوان فعال‌کننده پراکسید هیدروژن در تولید رادیکال‌های واکنشی و اکسیداسیون آلاینده‌ها کاربرد دارد (Alonso-González et al., 2009, Estay, 2020).

(2018) با این حال، تمایل CuO به تجمع یا انحلال در محیط آبی، استفاده از مواد نگهدارنده پایدار مانند گرافن، اکسیدهای فلزی خاص و کربن فعال^۳ را ضروری می‌سازد (Lan et al., 2025, Adams et al., 2008).

در این میان، کربن فعال با سطح ویژه زیاد، ساختار میکرو حفره‌ای، پایداری بالا و قابلیت جذب مطلوب، گزینه‌ای مناسب به‌عنوان پایه کاتالیست محسوب می‌شود (Senthil Rathi et al., 2024, Fadaei et al., 2024). به‌منظور ارتقای پایداری و کاهش هزینه، در این پژوهش از ضایعات پلیمری برای تولید کربن فعال استفاده شد. این اقدام نه تنها موجب کاهش آلودگی ضایعات پلیمر می‌شود بلکه با رویکرد اقتصاد چرخشی نیز هم‌راستا است. بر اساس گزارش‌ها، در سال ۲۰۲۰ پس از همه‌گیری کووید-۱۹ تولید جهانی پلیمرهای پلاستیکی از ۲۸۰ میلیون تن در سال گذر کرده و افزایش مصرف پلاستیک‌های یک‌بار مصرف پس از همه‌گیری کووید-۱۹ و نرخ پایین بازیافت، نگرانی‌های زیست‌محیطی را تشدید کرده‌اند (Wang et al., 2023).

بنابراین، هدف این پژوهش توسعه نوآورانه یک کاتالیست فنتون ناهمگن بر پایه CuO-AC حاصل از ضایعات پلیمری، برای حذف مؤثر و کم‌هزینه سیانید از آب بود که کمتر بررسی شده است. برخلاف پژوهش‌های پیشین، این کار پژوهشی با رویکردی نوآورانه به استفاده از پسماند پلیمری به‌عنوان منبع پایه کاتالیستی پرداخت و در کنار حذف سیانید، به معضل زباله‌های پلیمری نیز پاسخ داد. اهداف اصلی شامل بهینه‌سازی شرایط واکنش، بررسی عملکرد حذف سیانید و تحلیل سینتیک واکنش بود. به این ترتیب، این پژوهش گامی در جهت توسعه فرایندهای سبز و پایدار برای تصفیه پیشرفته پساب‌های صنعتی به شمار می‌رود.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، به‌منظور تهیه یک کاتالیست پایه کربنی برای حذف سیانید از محلول‌های آبی از روش‌های سنتز شیمیایی کنترل شده و آنالیزهای ساختاری استفاده شد. کلیه مواد شیمیایی مورد استفاده دارای درجه خلوص آزمایشگاهی بوده و بدون انجام عملیات خلص سازی بیشتر به کار گرفته شدند. آب دیونیزه در تمام مراحل

³ Activated Carbon (AC)

¹ Advanced Oxidation Processes (AOPs)

² Fenton



توسط فیلتر غشایی ۰/۴۵ میکرون، محلول‌ها در دمای ۴ درجه سلسیوس برای آنالیز ذخیره شدند. تمامی آزمایش‌ها سه بار تکرار شدند.

شناسایی و مشخصه‌یابی نمونه‌ها با استفاده از مجموعه‌ای از روش‌های تحلیلی انجام شد. آنالیز پراش پرتو ایکس^۱ با دستگاه Philips-PW3710 و تابش Cu-K α ($\lambda=1.54\text{\AA}$) برای شناسایی فازهای بلوری استفاده شد. بررسی ریزساختار و مورفولوژی نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی^۲ مدل TESCAN MAIA3 انجام شد. ترکیب عنصری سطح از طریق طیف‌سنجی انرژی تفکیکی^۳ دستگاه مذکور تعیین شد. آنالیز سطح ویژه و ویژگی‌های بافتی نمونه‌ها نیز بر اساس داده‌های جذب و اجذب نیتروژن در دمای ۱۹۶- درجه سلسیوس با استفاده از دستگاه II BELSORP-mini انجام شد و پارامترهایی همچون سطح ویژه^۴ با معادله BET حجم حفرات مزوپور و توزیع اندازه آن‌ها با روش BJH^۵ و حجم کل منافذ و میانگین قطر حفرات محاسبه شد. همچنین از طیف‌سنج اتمی GBC 932 plus برای اندازه‌گیری مقدار مس شسته شده از کاتالیست استفاده شد.

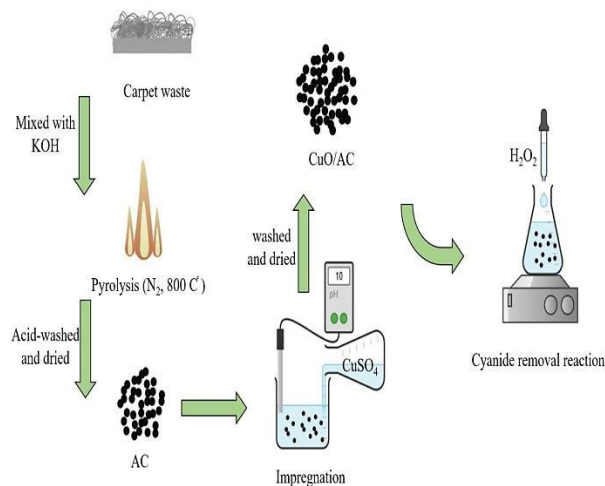


Fig. 1. Schematic of CuO/AC catalyst synthesis

شکل ۱- طرح‌واره سنتز کاتالیست CuO/AC

¹ X-Ray Diffraction (XRD)

² Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM)

³ Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)

⁴ Specific Surface Area (SSA)

⁵ Barrett Joyner Halenda (BJH)

تهیه محلول‌ها و شست‌وشوها استفاده شد. ضایعات پلیمری استفاده شده در این پژوهش ضایعات مربوط به صنایع تولید موکت بودند.

برای تهیه کربن فعال، ابتدا ۳۰ گرم پتاسیم هیدروکسید در ۲۰۰ میلی‌لیتر آب دیونیزه حل شد و سپس ۱۰ گرم ضایعات پلیمری به آن افزوده شد. این مخلوط به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط نگهداری شد. پس از جداسازی و خشک‌سازی، مواد در یک بوتله آلومینایی قرار گرفت و تحت اتمسفر نیتروژن، در دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس و با نرخ گرمایش ۵ درجه بر دقیقه در کوره تیوبی کربونیزه شدند. برای حذف بقایای بازی، نمونه در محلول هیدروکلریک اسید ۱۰ درصد یک ساعت هم زده شد، سپس با سانتریفیوژ جداسازی و با آب دیونیزه داغ شست‌وشو داده شد تا pH به حالت خنثی برسد. نمونه در ۷۰ درجه به مدت ۸ ساعت خشک و سپس آسیاب و الک شد.

کاتالیست CuO/AC از طریق تلقیح نمک مس روی کربن فعال به دست آمد. به این منظور، ۱/۸ گرم از کربن فعال در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب دیونیزه پراکنده و به مدت ۲۰ دقیقه تحت فراصوت قرار گرفت. سپس محلول ۰/۴ گرم سولفات مس در ۲۰ میلی‌لیتر آب تهیه و به صورت قطره‌ای به سوسپانسیون افزوده شد. مخلوط حاصل ابتدا به مدت ۱ ساعت هم زده شد تا تعادل جذب یون‌های مس برقرار شود، سپس با افزودن سود ۰/۱ مولار، pH به عدد ۱۰ رسانده شده و هم زدن برای ۱ ساعت دیگر ادامه یافت. پس از سانتریفیوژ و شست‌وشوی سه مرحله‌ای، محصول در آون خشک و برای آنالیزهای بعدی نگهداری شد. شکل ۱ شمای کلی سنتز کاتالیست CuO/AC را نشان می‌دهد.

برای انجام آزمایش‌ها شبه‌فنتون حذف سیانید محلولی با غلظت ۱۵۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیانید تهیه شد. تعیین غلظت یون سیانید با استفاده از روش تیتراسیون با نیترات نقره بر اساس استاندارد CN-۴۵۰۰- انجام شد (APHA, 1926). در این روش، کمپلکس $\text{Ag}(\text{CN})_2^+$ تشکیل شده و نقطه پایانی واکنش با تغییر رنگ معرف رودانین از زرد به صورتی مشخص می‌شود.

آزمایش‌های شبه‌فنتون برای بررسی عملکرد کاتالیست در تخریب سیانید انجام شد. محلول حاوی ۱۵۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیانید، به همراه کاتالیست و آب‌اکسیژنه ۳۰ درصد، در pH تنظیم شده با سود یا اسید، تحت هم زدن مداوم قرار گرفت. در زمان‌های مشخص، نمونه‌برداری انجام شد و پس از جداسازی کاتالیست

۳- نتایج و بحث

۳-۱- شناسایی و مشخصه‌یابی فازها و ساختار سطحی

نتایج آنالیز پراش پرتو ایکس برای نمونه کربن فعال و کاتالیست CuO/AC (شکل ۲) نشان‌دهنده حضور پیک‌های آمورف در بازه زاویه ۲θ برابر ۱۰ تا ۲۵ درجه است که تأییدکننده ساختار بی‌شکل کربن است. علاوه بر آن، در طیف کاتالیست، پیک‌های مشخصی در ۲θ برابر با ۳۵/۵، ۳۸/۷، ۴۸/۶، ۵۸/۳ و ۶۱/۵ درجه ظاهر شدند که به ترتیب به صفحات بلوری (-۱۱۱)، (۱۱۱)، (۲۰۲)، (-۲۰۲)، (۲۰۲) و (-۳۱۱) مربوط به ساختار CuO تعلق دارند. مقایسه این پیک‌ها با کارت استاندارد شماره ۹۶-۹۰۱-۶۰۵۸، وجود فاز CuO را تأیید می‌کند. این نتایج بیانگر موفقیت آمیز بودن فرایند تلقیح و بارگذاری CuO بر روی سطح کربن فعال هستند.

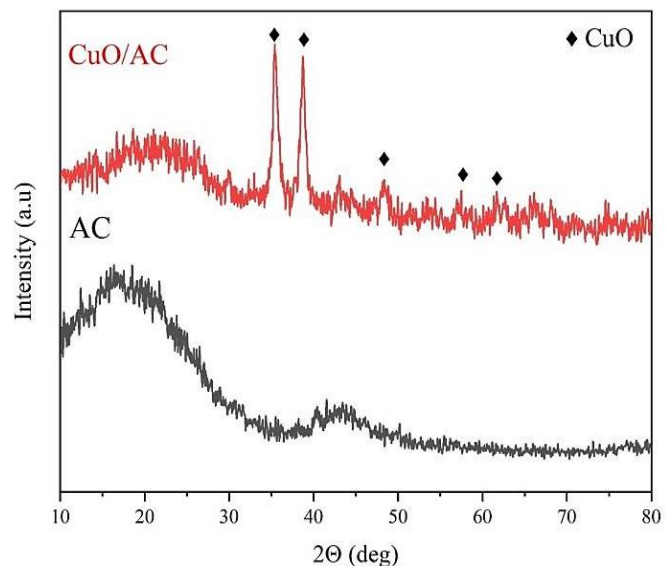


Fig. 2. XRD spectra of AC and CuO/AC catalyst

شکل ۲- تصویر طیف‌های پراش پرتو ایکس کربن فعال و کاتالیست CuO/AC

فعال و تسهیل تماس با واکنش‌دهنده‌ها ایفا کند. وجود حفرات قابل مشاهده در تصاویر، بیانگر ساختار متخلخل و مناسب برای انتقال جرم است.

تحلیل طیف‌سنجی انرژی تفکیکی انجام شده روی نمونه‌ها (شکل ۴)، وجود عناصر اصلی مانند اکسیژن، نیتروژن و مس را در نمونه CuO/AC نشان داد. وجود نیتروژن ناشی از ساختار پلیمر پایه است. نقشه‌های عنصری نیز توزیع یکنواخت Cu و O را بر سطح کاتالیست تأیید می‌کنند.

ایزوترم‌های جذب و واجذب نیتروژن و منحنی توزیع اندازه حفرات برای نمونه‌ها کربن فعال و CuO/AC در شکل ۵ ارائه شده‌اند. نمونه کربن فعال حاصل از ضایعات پلیمری، سطح ویژه بسیار بالایی معادل $2174 \text{ m}^2/\text{g}$ و حجم کل منافذ $1/06 \text{ cm}^3/\text{g}$ دارد که نشان‌دهنده ساختار میکرو حفره‌ای توسعه‌یافته آن است. پس از بارگذاری CuO، سطح ویژه به $1332 \text{ m}^2/\text{g}$ کاهش یافت و حجم کل منافذ به $0/734 \text{ cm}^3/\text{g}$ رسید. در حالی که میانگین قطر حفرات $2/2 \text{ nm}$ بود که نشان‌دهنده وجود ساختار مزو حفره‌ای^۱ غالب است.

کاهش قابل توجه سطح ویژه پس از بارگذاری فلز را می‌توان به انسداد جزئی میکرو حفرات و تجمع نانو ذرات CuO درون شبکه کربن نسبت داد. چنین رفتاری در مطالعات مشابه نیز گزارش شده است. برای مثال در پژوهش فیجو و همکاران نیز مشاهده شد که تشکیل فازهای اکسید نیکل- فریت روی کربن فعال باعث کاهش حدود ۳۵ درصد سطح ویژه اولیه شد. اما حضور مزو حفرات منجر به پایداری بالای انتقال جرم و فعالیت کاتالیزوری مناسب شد (Feijoo et al., 2021).

بر اساس این نتایج و یافته‌های حاضر، می‌توان نتیجه گرفت که کاهش سطح ویژه در نمونه CuO/AC به دلیل انسداد فیزیکی منافذ است. با این حال، باقی ماندن مزو حفرات با قطر میانگین حدود 2 nm امکان نفوذ مؤثر محلول‌های واکنش‌دهنده (سیانید و هیدروژن پراکسید) را فراهم می‌کند. جدول ۱ خواص فیزیکی پایه کربنی و کاتالیست سنتز شده را نشان می‌دهد.

۳-۲- بررسی عملکرد کاتالیست در حذف سیانید

برای ارزیابی اثربخشی کاتالیست سنتز شده، سه سامانه متفاوت

تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی، مورفولوژی سطحی پایه کربنی و کاتالیست را به خوبی نمایش می‌دهد (شکل ۳). در نمونه کربن فعال سطح متخلخل با ساختار نسبتاً یکنواخت دیده می‌شود، در حالی که در نمونه CuO/AC، تجمع ذرات کروی شکل با اندازه متوسط حدود 50 nm قابل مشاهده است. این نانو ذرات در سطح کاتالیست به صورت نسبتاً یکنواخت توزیع شده‌اند که می‌تواند نقش مؤثری در افزایش تعداد سایت‌های

¹ Mesoporous



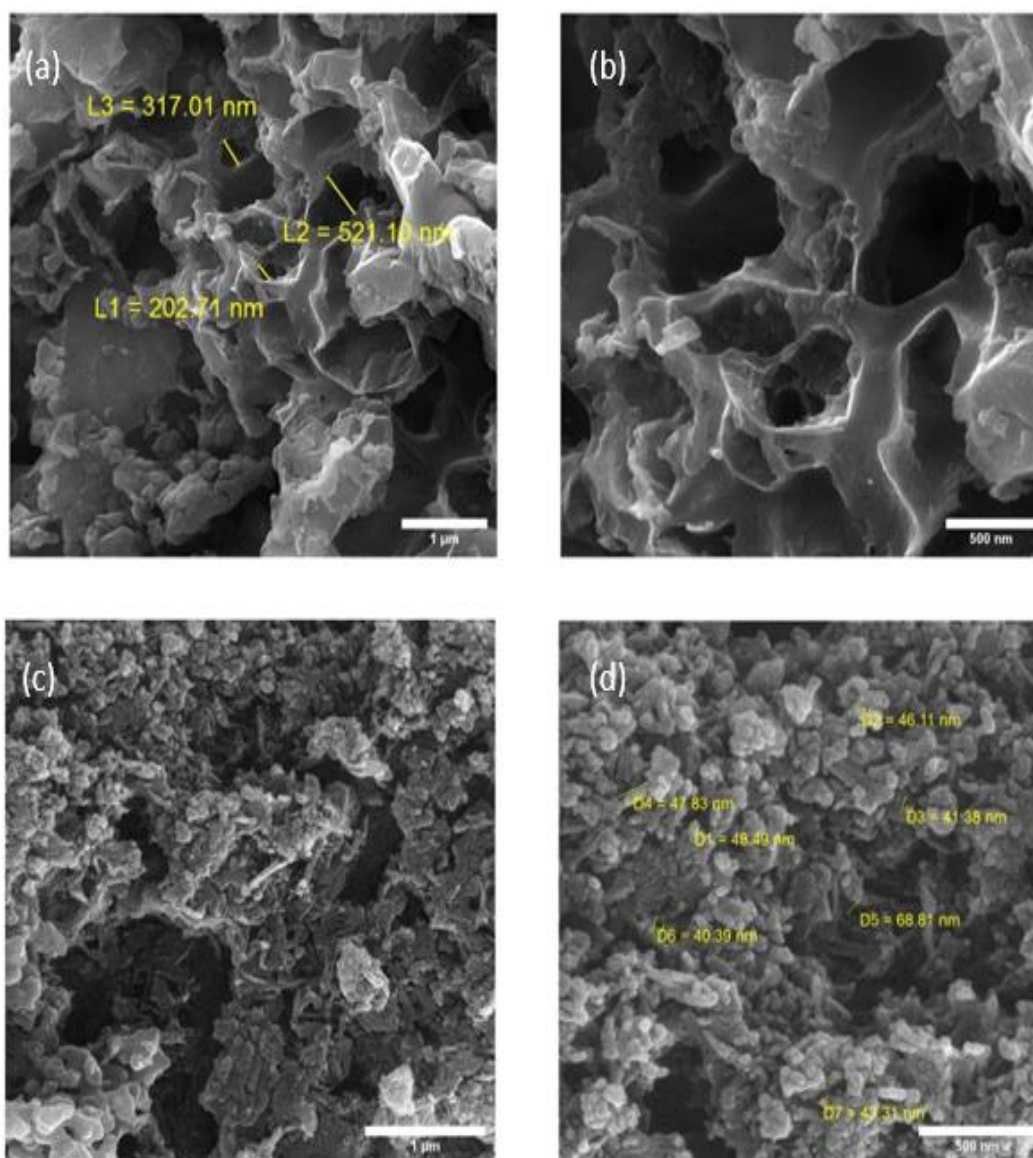


Fig. 3. FESEM images of a) and b) activated carbon synthesized from polymeric waste, c) and d) CuO/AC catalyst

شکل ۳- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (a) و (b) کربن فعال سنتز شده از ضایعات پلیمری، (c) و (d) کاتالیست CuO/AC

جدول ۱- خواص فیزیکی پایه کربنی و کاتالیست سنتز شده

Table 1. Physical properties of carbon-based material and synthesized catalyst

Composition	D_{ap} (nm)	V_{meso} (cm^3/g)	V_t (cm^3/g)	SSA (m^2/g)
AC	1.95	0.879	1.06	2174
CuO/AC	2.20	0.489	0.734	1332



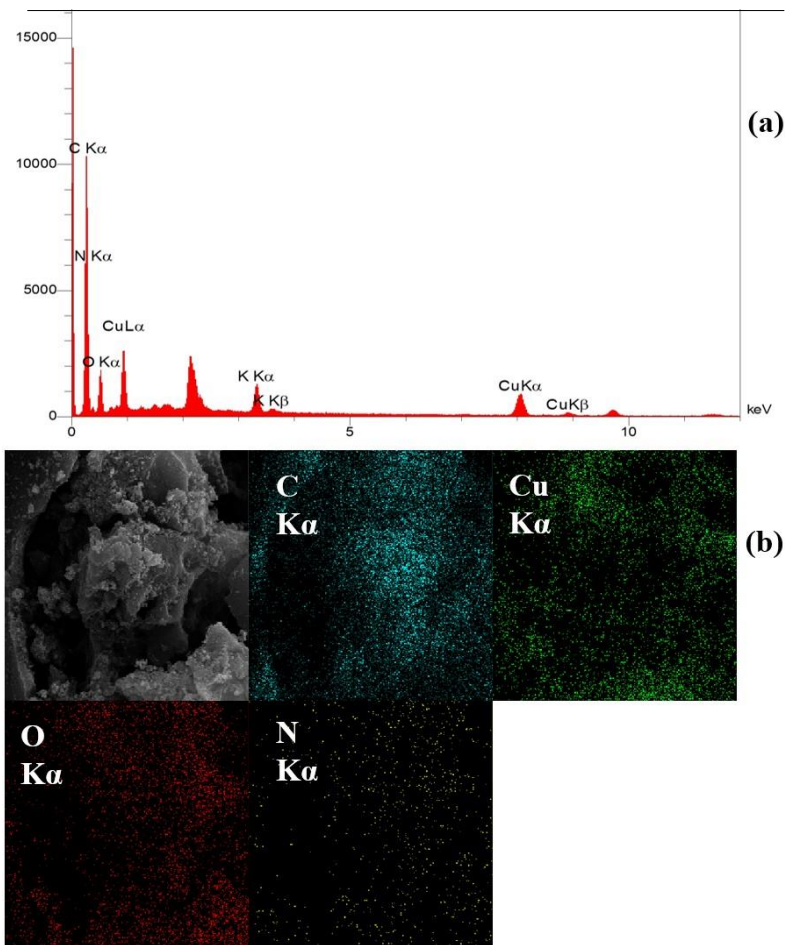


Fig. 4. a) EDS image of the CuO/AC catalyst, b) elemental mapping of the CuO/AC catalyst
 شکل ۴- a) تصویر طیف‌سنجی انرژی تفکیکی مربوط به کاتالیست CuO/AC و (b) نقشه عنصری مربوط به کاتالیست CuO/AC

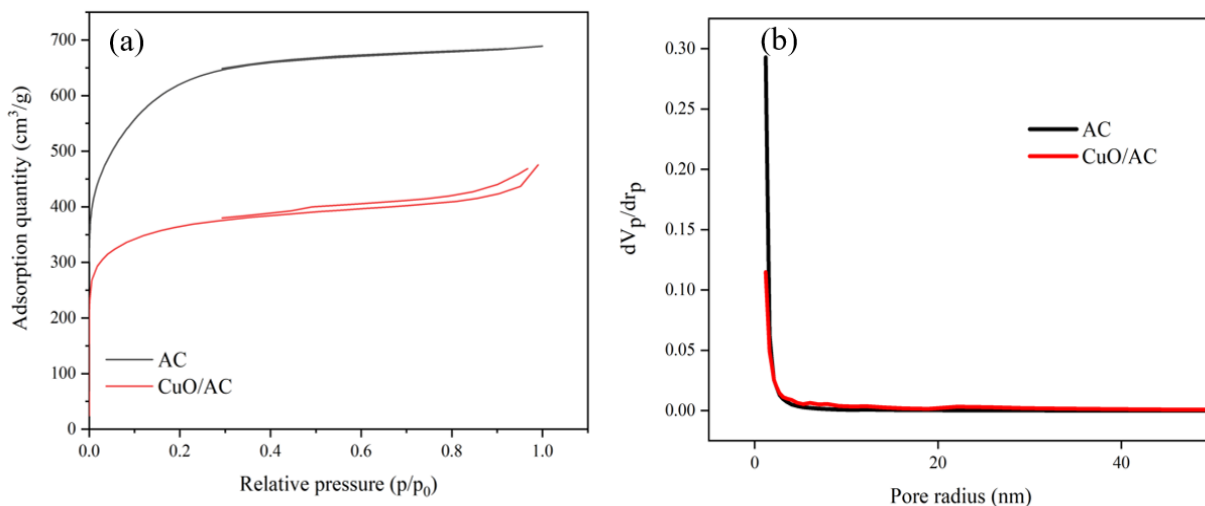


Fig. 5. a) Nitrogen adsorption-desorption isotherm and b) pore size distribution of the AC carbon base and CuO/AC catalyst
 شکل ۵- a) ایزوترم جذب-وا جذب نیتروژن و (b) شعاع اندازه حفرات مربوط به پایه کربنی فعال و کاتالیست CuO/AC



کرده و واکنش شیمیایی را تقویت کند؛ بنابراین، اثربخشی بالا در سامانه ترکیبی حاصل هم‌افزایی بین ویژگی‌های ساختاری پایه کربنی و فعالیت کاتالیزوری CuO است.

۳-۳- بهینه‌سازی شرایط واکنش شبه‌فنتون

- اثر pH

بررسی تأثیر pH اولیه محلول نشان داد که در بازه قلیایی بین ۱۰ تا ۱۲، تفاوت قابل توجهی در کارایی حذف مشاهده نشد و در هر دو حالت، بازدهی در حدود ۹۸ درصد باقی ماند (شکل ۷-ا). این نتیجه بیانگر پایداری ساختار کاتالیست و کارایی آن در محیط‌های قلیایی شدید است. این ویژگی می‌تواند مزیتی نسبت به کاتالیست‌های آهن پایه باشد که معمولاً در pH اسیدی عملکرد بهینه دارند.

- اثر نسبت مولی آب‌اکسیژنه به سیانید

با افزایش نسبت مولی اولیه آب‌اکسیژنه به سیانید از ۱ به ۳،

آزمایش شد: (i) عامل اکسیدکننده H_2O_2 بدون کاتالیست، (ii) کاتالیست سنتز شده CuO/AC بدون اکسیدانت و (iii) ترکیب CuO/AC- H_2O_2 به‌عنوان سامانه شبه‌فنتون ناهمگن. مقایسه بازدهی حذف سیانید در این سه حالت نشان داد که استفاده صرف از H_2O_2 تنها حدود ۲۸ درصد و استفاده صرف از CuO/AC حدود ۳۱ درصد حذف سیانید را طی ۱۲۰ دقیقه فراهم می‌کند. این در حالی است که سامانه ترکیبی CuO/AC- H_2O_2 در مدت‌زمانی بسیار کوتاه‌تر (۶۰ دقیقه) کارایی نزدیک به ۹۸ درصد از خود نشان داد (شکل ۶). این اختلاف چشمگیر به مکانیسم واکنش شبه‌فنتون ناهمگن نسبت داده می‌شود که در آن نانو ذرات CuO با فعال‌سازی H_2O_2 رادیکال‌های هیدروکسیل بسیار واکنش‌پذیری تولید می‌کنند که مسئول اکسیداسیون سریع سیانید هستند.

این یافته‌ها نشان می‌دهند که کاتالیست CuO/AC نه تنها به‌تنهایی دارای توانایی جذب سطحی و حذف محدود است، بلکه در حضور اکسیدکننده نیز قادر است به‌صورت مؤثری H_2O_2 را فعال

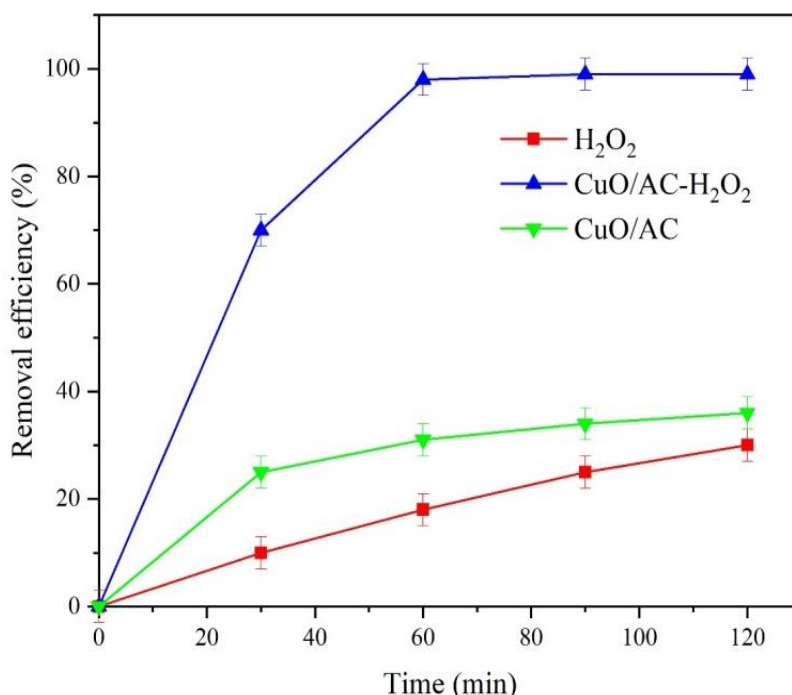


Fig. 6. Cyanide removal efficiency under various catalytic conditions. (Reaction conditions: pH=11, cyanide concentration=15,000 ppm, catalyst dosage=15 g/L, hydrogen peroxide to cyanide ratio=3, temperature=298 K, reaction time=120 min)

شکل ۶- بازدهی حذف سیانید در حضور شرایط کاتالیستی مختلف. (شرایط واکنش: pH=۱۱، غلظت سیانید=۱۵۰۰۰ ppm، مقدار کاتالیست=۱۵ g/L، مقدار آب‌اکسیژنه نسبت به سیانید=۳، دما=۲۹۸K و زمان واکنش=۱۲۰ min)



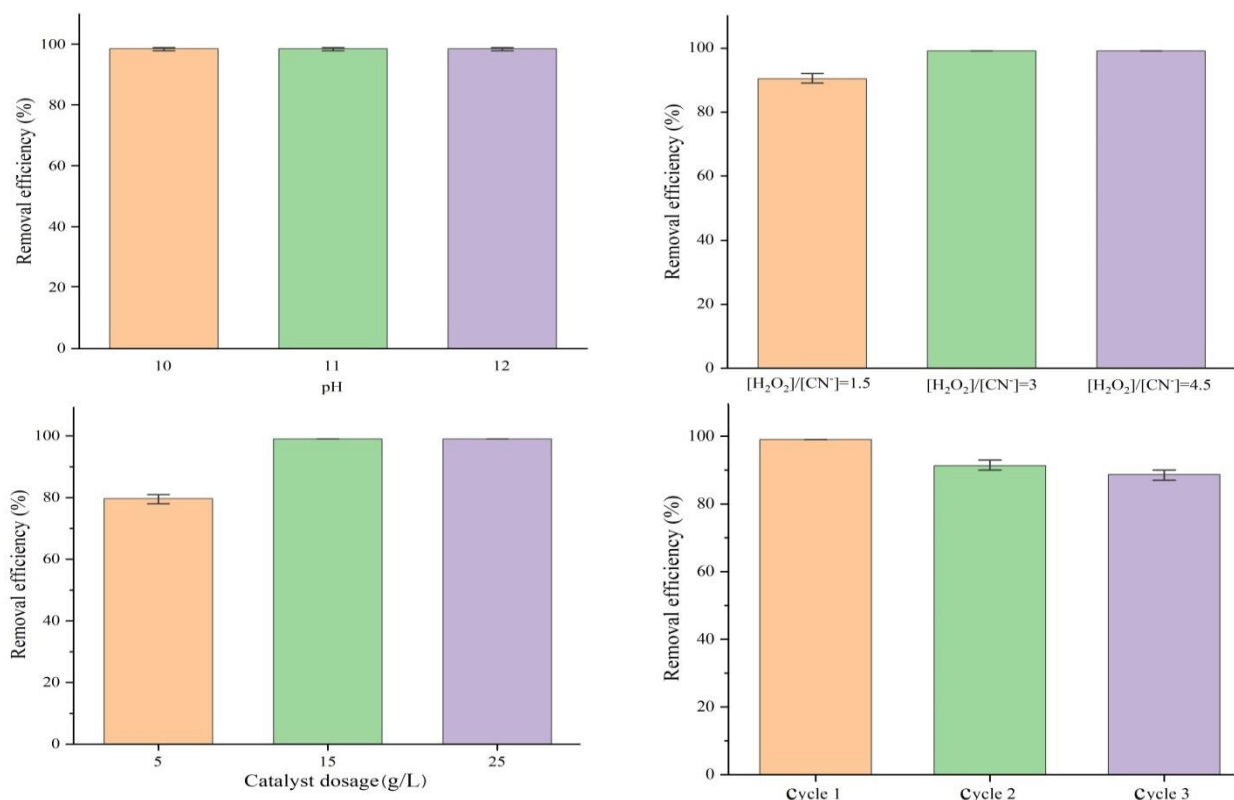


Fig. 7. (a) Effect of pH, (b) molar ratio of hydrogen peroxide to cyanide, (c) catalyst dosage, and (d) consecutive catalyst reuse cycles on cyanide removal efficiency (reaction conditions: cyanide concentration=15,000 ppm, temperature=298 K and reaction time=60 min)

شکل ۷-ا) تأثیر pH، b) نسبت مولی هیدروژن پراکسید به سیانید، c) مقدار کاتالیست و d) چرخه‌های متوالی استفاده از کاتالیست بر بازدهی حذف سیانید (شرایط واکنش: غلظت سیانید=15,000 ppm، دما=298K و زمان واکنش=60 min)

۳-۴- قابلیت بازیافت و پایداری کاتالیست

پایداری و امکان استفاده مجدد از کاتالیست‌ها از منظر اقتصادی و زیست‌محیطی اهمیت فراوانی دارد. در این پژوهش، پس از هر بار استفاده، کاتالیست بازیابی شده، شست‌وشو و خشک شد. در سه چرخه متوالی، کارایی حذف به ترتیب از ۹۸ به ۹۲ درصد و سپس ۸۷ درصد کاهش یافت (شکل ۷-د). نتایج طیف‌سنجی جذب اتمی پس از هر چرخه نشان داد که مقدار شسته شدن مس از روی کاتالیست بسیار ناچیز است (حدود ۱ ppm پس از هر چرخه). این افت جزئی می‌تواند ناشی از انسداد بخشی از سایت‌های فعال سطحی، کاهش سطح تماس مؤثر و شسته شدن بخشی از مس از روی کاتالیست باشد (Chen et al., 2023a, De la Torre et al., 2018). این افت عملکرد اندک در چرخه‌های دوم و سوم، بیانگر دوام ساختار کاتالیست و امکان استفاده چندباره آن در مقیاس صنعتی است.

کارایی حذف به‌طور چشمگیری افزایش یافت (شکل ۷-ب). نسبت بهینه ۳ انتخاب شد چراکه در این حالت، تولید رادیکال‌های هیدروکسیل کافی برای تخریب مؤثر سیانید حاصل شد، بدون آنکه مقدار اضافی H₂O₂ منجر به اتلاف و واکنش‌های جانبی شود (Nie et al., 2022, Chen et al., 2023c).

اثر مقدار کاتالیست

شکل ۷-ج بررسی اثر مقدار کاتالیست در بازه ۵ تا ۲۵ گرم بر لیتر را نشان می‌دهد که افزایش مقدار تا ۱۵ g/L موجب بهبود کارایی تا ۹۸ درصد شد. مقدار بیش از این، بهبود معنی‌داری ایجاد نکردند. این یافته نشان‌دهنده وجود مقدار بهینه‌ای از سطح فعال است که بتواند به‌طور مؤثر H₂O₂ را فعال کند و رادیکال فعال هیدروکسیل تولید کند (Nie et al., 2022).



این مسیر واکنش مطابق مطالعات پیشین در زمینه حذف آلاینده‌های نیتروژنی توسط سیستم‌های فنتون ناهمگن پیشنهاد شده است (Zhao et al., 2015, Ninh Pham et al., 2013, Sun et al., 2019).

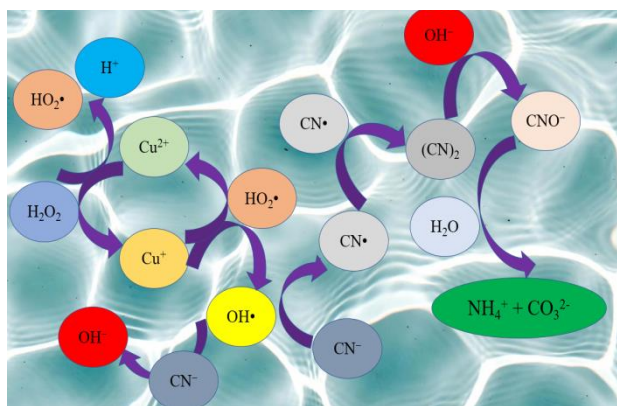


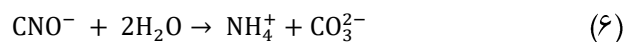
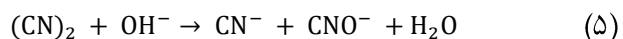
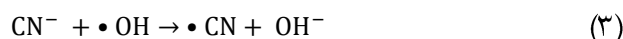
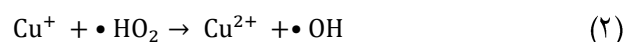
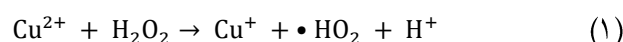
Fig. 8. Proposed mechanism for cyanide removal

شکل ۸- مکانیسم پیشنهادی حذف سیانید

۳-۶- مقایسه عملکرد کاتالیست CuO/AC با مطالعات پیشین به منظور ارزیابی جایگاه کاتالیست پیشنهادی (CuO/AC) در حذف سیانید، عملکرد آن با کاتالیست‌های مشابه مبتنی بر فلزات واسطه (مس، نیکل، آهن) و پایه‌های کربنی مشابه دیگر مقایسه شد. جدول ۲ عملکرد کاتالیست‌های مختلف را در شرایط عملیاتی

۳-۵- مکانیسم پیشنهادی حذف سیانید

مکانیسم واکنش شبه‌فنتون پیشنهادی بر پایه فعال‌سازی پراکسید هیدروژن توسط یون‌های Cu^{2+} سطحی بنا شده است (شکل ۸). در مرحله نخست، Cu^{2+} با H_2O_2 واکنش داده و $\text{HO}_2\cdot$ و Cu^+ تولید می‌شود. سپس Cu^+ در حضور $\text{HO}_2\cdot$ مجدداً به Cu^{2+} می‌گردد و در این فرایند رادیکال‌های هیدروکسیل ($\cdot\text{OH}$) آزاد می‌شوند. این رادیکال‌ها قادرند یون‌های CN^- را به رادیکال $\text{CN}\cdot$ اکسید کرده و در نهایت به ترکیباتی مانند سیانات، آمونیوم و کربنات تجزیه کنند. واکنش‌های پیشنهادی به شرح زیر هستند



جدول ۲- مقایسه کاتالیست‌های مشابه با کاتالیست CuO/AC و عملکرد آن‌ها

Table 2. Comparison of catalysts similar to CuO/AC and their performance

Catalyst	Support	Cyanide removal efficiency (%)	Time (min)	Reaction conditions (pH, temperature, CN^- concentration)	Reference
Biochar	Biochar	97	60	pH=8-10, 25°C, 100mg/L	(Yannick et al., 2023)
NiFe ₂ O ₄ /AC	Activated carbon	96	240	pH=10.5, 25°C, 290mg/L	(Feijoo et al., 2021)
Cu/ACF	Activated carbon fiber	95	90	pH=9-11, 25°C, 39mg/L	(Tian et al., 2015)
Fe/AC	Activated carbon	91	180	pH=8, 25°C, 50mg/L	(Agarwal et al., 2019)
Fe/BC	Biochar	90-95	120-180	pH=6-8, 25°C, 200-500mg/L	(Wei et al., 2023)
Cu/AC	Activated carbon	75-83	60	pH=8-10, 25°C, 3-10mg/L	(Chen et al., 2023a)
CuO/AC	Activated carbon	98	60	pH=11, 25°C, 15000mg/L	This work



جدول ۳- پارامترهای مدل‌های سینتیکی برای حذف سیانید توسط سامانه‌های مختلف سیستم مدل سینتیکی

Table 3. Kinetic model parameters for cyanide removal using various systems

System	K_1 (min^{-1})	R^2 (pseudo-first order)	k_2 ($\text{conc}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)	R^2 (pseudo-second order)
CuO/AC- H_2O_2	1.0107	0.9496	1.3×10^{-3}	0.8981
CuO/AC	0.0985	0.9689	8×10^{-6}	0.9745
H_2O_2	0.0706	0.9733	6×10^{-6}	0.9647

بررسی شده است. این نتایج، پتانسیل کاتالیست پیشنهادی را برای کاربرد در تصفیه پساب‌های صنعتی با غلظت بالای سیانید تأیید می‌کند و گامی به سوی توسعه فناوری‌های سبز و کارآمد محسوب می‌شود.

۳-۷- بررسی سینتیک

به منظور بررسی مکانیسم واکنش و تعیین مدل سینتیکی حاکم بر حذف سیانید، داده‌های تجربی مربوط به بازدهی حذف در زمان‌های مختلف برای سه سیستم بررسی شد. (i) سامانه شبه‌فنتون شامل CuO/AC و H_2O_2 ، (ii) کاتالیست سنتز شده CuO/AC بدون اکسیدانت و (iii) آب اکسیژنه بدون کاتالیست. برای تحلیل سینتیکی، از مدل‌های شبه‌مرتب اول و شبه‌مرتب دوم استفاده شد (Urselin Nouns Foko et al., 2025, Raoul Tchuifon et al., 2025). برای این منظور، داده‌ها به فرم خطی‌سازی شده به صورت $\ln(C_t/C_0)$ به زمان برای شبه‌مرتب اول و $(1/C_t) - (1/C_0)$ به زمان برای شبه‌مرتب دوم ترسیم شدند (که در آن‌ها C_0 غلظت اولیه سیانید و C_t غلظت سیانید در زمان t هستند) و شیب خطوط به ترتیب به عنوان k_1 (min^{-1}) و k_2 ($\text{conc}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) تعیین شد. شاخص R^2 نیز در فضای داده‌های تبدیل شده محاسبه شد. تمامی آزمایش‌ها سه بار تکرار شدند و خطای استاندارد $\pm 3\%$ درصد گزارش شد.

مطابق داده‌های جدول ۳، برای سامانه‌های CuO/AC- H_2O_2 و H_2O_2 به تنهایی، مدل شبه‌مرتب اول دارای بالاترین ضریب همبستگی (R^2 نزدیک به ۱) بوده و بهترین برازش را با داده‌های تجربی نشان داده است. این موضوع بیانگر آن است که نرخ واکنش حذف سیانید عمدتاً تحت تأثیر غلظت اولیه یون سیانید قرار دارد و مکانیسم غالب در حذف، واکنش سطحی ساده است. در سامانه CuO/AC- H_2O_2 که به عنوان سامانه شبه‌فنتون

متنوع نشان می‌دهد. کاتالیست CuO/AC سنتز شده در این پژوهش، با بهره‌گیری از کربن فعال حاصل از ضایعات پلیمری، کارایی حذف سیانید بیش از ۹۸ درصد را در غلظت اولیه بسیار بالای ۱۵۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر طی ۶۰ دقیقه ارائه داد. این عملکرد در مقایسه با کاتالیست‌های مشابه که عمدتاً در غلظت‌های کمتر (۳ تا ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر) آزمایش شدند، برتری قابل توجهی را نشان می‌دهد.

به عنوان مثال، با یوچار گرافن مانند (GpB) با کارایی حدود ۹۷ درصد در ۶۰ دقیقه و غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر، عملکرد خوبی نشان داد، اما در شرایط غلظت‌های زیاد آزمایش نشده است (Yannick et al., 2023). کاتالیست‌های نیکل فریت ($\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{AC}$) و مس روی فیبر کربن فعال (Cu/ACF) به ترتیب کارایی‌های حدود ۹۶ و ۹۵ درصد را ارائه کردند، اما زمان واکنش طولانی‌تر (۴۸۰ و ۹۰ دقیقه) و غلظت‌های اولیه کمتر (۲۹۰ و ۳۹ میلی‌گرم در لیتر) داشتند (Feijoo et al., 2021). Tian et al., 2015 کاتالیست‌های آهن‌دار (Fe-BC و IIAC) نیز با کارایی‌های ۹۱ تا ۹۵ درصد در غلظت‌های کمتر (۵۰ تا ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر) عمل کردند که نشان‌دهنده محدودیت آن‌ها در پساب‌های صنعتی با غلظت بالا است (Wei et al., 2023, Agarwal et al., 2019).

برتری کاتالیست CuO/AC نه تنها در کارایی بالا و زمان واکنش کوتاه، بلکه در پایداری آن در شرایط قلیایی شدید (pH حدود ۱۱) و استفاده از ضایعات پلیمری به عنوان پایه کربنی نهفته است. این ویژگی، رویکردی پایدار و کم‌هزینه برای مدیریت پسماند و تصفیه پساب ارائه می‌دهد که با اصول اقتصاد چرخشی هم‌راستا است. علاوه بر این، پایداری کاتالیست در سه چرخه متوالی (با کاهش اندک از ۹۸ به ۸۷ درصد) نشان‌دهنده قابلیت استفاده مجدد و دوام شیمیایی آن در مقایسه با سایر کاتالیست‌های



متوالی تنها افت اندکی از ۹۸ به ۸۷ درصد نشان داد که بیانگر پایداری شیمیایی و ساختاری مناسب آن است. تحلیل سینتیکی نیز نشان داد که واکنش از مدل شبه مرتبه اول تبعیت می‌کند ($R^2 \approx 0.95$) و مرحله کنترل‌کننده، واکنش سطحی میان رادیکال‌های هیدروکسیل و یون‌های سیانید است.

این پژوهش از نظر علمی و زیست‌محیطی چندین نوآوری و مزیت مهم داشت: نخست، استفاده از ضایعات پلیمری به‌عنوان منبع تولید کربن فعال که رویکردی کم‌هزینه و سازگار با اصول اقتصاد چرخشی است؛ دوم، عملکرد مؤثر و پایدار کاتالیست در محیط قلیایی (pH حدود ۱۱) که نسبت به بسیاری از کاتالیست‌های آهن پایه مزیت دارد؛ سوم، دستیابی به بازده بالا در مدت‌زمان کوتاه و بدون نیاز به حرارت‌دهی یا افزودنی اضافی.

به‌طور کلی، نتایج به‌دست آمده نشان داد که CuO/AC حاصل از پسماند پلیمری می‌تواند به‌عنوان یک کاتالیست سبز، پایدار و کارآمد در حذف سیانید از پساب‌های صنعتی به‌کار رود و توسعه آن می‌تواند به‌صورت هم‌زمان به مدیریت ضایعات پلاستیکی و حفاظت از محیط‌زیست کمک کند.

۵- قدردانی

نویسندگان از حمایت شورای پژوهش پژوهشگاه مواد و انرژی برای انجام این پژوهش با کد پروژه ۷۹۱۴۰۳۰۰۵ قدردانی می‌کنند.

ناهمگن عمل می‌کند، سرعت واکنش ($k=1.0107 \text{ min}^{-1}$) نسبت به سایر سامانه‌ها به‌طور قابل توجهی بیشتر است. این موضوع بیانگر اثربخشی بالای ترکیب کاتالیست و H_2O_2 در تولید رادیکال‌های هیدروکسیل و تخریب سریع سیانید است (Raoul Tchuifon et al., 2025).

شبه مرتبه دوم در سامانه CuO/AC برازش مناسبی ارائه داد که نشان‌دهنده ترکیب جذب و واکنش شیمیایی در نرخ حذف است. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که واکنش شبه‌فنتون ناهمگن در حضور CuO/AC و H_2O_2 از یک مکانیسم شبه‌مرتبه اول تبعیت می‌کند که در آن فعال‌سازی H_2O_2 توسط Cu^{2+} سطحی و تولید رادیکال‌های اکسنده، مرحله کنترل‌کننده اصلی واکنش است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ضایعات پلیمری به‌عنوان منبعی ارزان و آلاینده، به یک پایه کاتالیستی با ارزش افزوده بالا تبدیل شد. کاتالیست CuO/AC سنتز شده از طریق فعال‌سازی شیمیایی و پیرولیز، ساختار متخلخل با سطح ویژه زیاد ($1332 \text{ m}^2/\text{g}$) و توزیع یکنواخت نانو ذرات CuO با اندازه حدود ۵۰ nm را نشان داد که منجر به افزایش قابل توجه کارایی واکنش‌های فنتون ناهمگن شد. در شرایط بهینه (pH حدود ۱۱، دمای محیط، نسبت مولی ۳ برای H_2O_2 به سیانید و دوز کاتالیست ۱۵ گرم بر لیتر)، بازده حذف سیانید بیش از ۹۸ درصد به‌دست آمد و کاتالیست در سه چرخه

References

- Adams, M., Lawrence, R. and Bratty, M., 2008. Biogenic sulphide for cyanide recycle and copper recovery in gold-copper ore processing. *Minerals Engineering*, 21, 509-17. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.02.001>.
- Agarwal, Sh., Pramanick, S., Ajanur Rahaman, Sh., Chandra Ghanta, K. and Dutta, S., 2019. A cost-effective approach for abatement of cyanide using iron-impregnated activated carbon: kinetic and equilibrium study. *Applied Water Science*, 9, 74. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-0953-5>.
- Akcil, A., 2010. A new global approach of cyanide management: international cyanide management code for the manufacture, transport, and use of cyanide in the production of gold. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 31, 135-49. <https://doi.org/10.1080/08827501003727022>.
- Alonso-González, O., Nava-Alonso, F. and Uribe-Salas, A., 2009. Copper removal from cyanide solutions by acidification. *Minerals Engineering*, 22, 324-29. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.09.004>.
- APHA, 1926. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (American Public Health Association). [\[Link\]](#)



- Bolisetty, S. and Mezzenga, R., 2016. Amyloid-carbon hybrid membranes for universal water purification. *Nature Nanotechnology*, 11, 365-71. <https://doi.org/10.1038/nnano.2015.310>.
- Brisbin, J. A., 2020. *Cyanide Clarification of Free and Total Cyanide Analysis for Safe Drinking Water Act (SDWA) Compliance*, Revision 1.0. EPA, United States Environmental Protection Agency. 1-9. [\[Link\]](#)
- Chen, A., Guan, X., Pang, Z., Ke, X., Qin, Z., Chen, Y. et al., 2023a. Catalytic oxidation of biorefractory cyanide-containing coking wastewater by deconjugation effect of bimetal copper-loaded activated carbon. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11, 111283. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111283>.
- Chen, X., Ren, Y., Qu, G., Wang, Z., Yang, Y. and Ning, P., 2023b. A review of environmental functional materials for cyanide removal by adsorption and catalysis. *Inorganic Chemistry Communications*, 157, 111298. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111298>.
- Chen, X., Zhang, T., Qu, G., Ren, Y., Wang, Z., Wang, J. et al., 2023c. Mechanism study on a novel Cu/Fe co-catalyzed heterogeneous particle mediated activation of hydrogen peroxide for efficient degradation of cyanides. *Journal of Water Process Engineering*, 56, 104414. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104414>.
- De la Torre, E., Lozada, A. B., Adatty, M. and Gámez, S., 2018. Activated carbon-spinels composites for waste water treatment. *Metals*, 8(12), 1070. <https://doi.org/10.3390/met8121070>.
- Estay, H., 2018. Designing the SART process—a review. *Hydrometallurgy*, 176, 147-65. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.01.011>.
- Fadaei, Z., Daraei, A. and Pakravan, P., 2024. Adsorptive removal of heavy metals by utilizing activated carbon derived from natural bitumen. *Journal of Water and Wastewater*, 35(4), 1-22. (In Persian). <https://doi.org/10.22093/wwj.2025.487432.3447>.
- Feijoo, C. Y., De la Torre, E. and Narvaez, R., 2021. Cyanide ion oxidation by catalytic effect of nickel ferrites activated carbon composites. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 7, 239-58. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2021.02.07>.
- Joo, S. H., Sungchul, H. and Kim, N. J., 2016. Comparative study on Korean and international chemical control regulations of the physical hazards of sodium cyanide and hydrogen cyanide. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 44, 143-49. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.09.004>.
- Kuyucak, N. and Akcil, A., 2013. Cyanide and removal options from effluents in gold mining and metallurgical processes. *Minerals Engineering*, 50, 13-29. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.05.027>.
- Lan, Y., Lu, Y., Li, B., Li, Y., Guo, J., Yang, W. et al., 2025. Response surface method design of nano-copper modified coffee shell biochar to treat copper cyanide wastewater: characterization and catalytic oxidation adsorption mechanism. *Materials Chemistry and Physics*, 343, 130915. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2025.130915>.
- Nie, X., Li, G., Li, Sh., Luo, Y., Luo, W., Wan, Q. et al., 2022. Highly efficient adsorption and catalytic degradation of ciprofloxacin by a novel heterogeneous fenton catalyst of hexapod-like pyrite nanosheets mineral clusters. *Applied Catalysis B: Environmental*, 300, 120734. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2021.120734>.
- Ninh Pham, A., Xing, G., Miller, Ch. J. and David Waite, T., 2013. Fenton-like copper redox chemistry revisited: hydrogen peroxide and superoxide mediation of copper-catalyzed oxidant production. *Journal of Catalysis*, 301, 54-64. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2013.01.025>.
- Ranjbar, M., Majidian, N. and Samipoorgiri, M., 2023. The study of produced water treatment using integrated electro fenton—granular biological method. *Journal of Water and Wastewater*, 34(1), 152-70. (In Persian). <https://doi.org/10.22093/wwj.2022.364085.3290>.
- Raoul Tchuifon, D., Ghislain Fotsop, C., Grace Mokue Mafo, S., Dorinel Solefack Feudjio, F., Dave Mouafo Dongmo, S. and George Ndifor-Angwafor, N., 2025. Unveiling the photocatalytic activity of Cu/Fe₂O₃@gC₃N₄ nanosheet as



- an efficient fenton-like catalyst for reactive blue 19 removal: optimization and kinetics studies. *Hybrid Advances*, 9, 100424. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2025.100424>.
- Senthil Rathi, B., Trisha, M., Kaviya Selvi, S., Gokul, R. and Renuka, V., 2024. Recent research progress on modified activated carbon from biomass for the treatment of wastewater: a critical review. *Environmental Quality Management*, 33, 907-28. <https://doi.org/10.1002/tqem.22166>.
- Sun, Y., Yang, Z., Tian, P., Sheng, Y., Xu, J. and Han, Y. F., 2019. Oxidative degradation of nitrobenzene by a fenton-like reaction with Fe-Cu bimetallic catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental*, 244, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.11.009>.
- Thomas, N., Dionysiou, D. D. and Pillai, S. C., 2021. Heterogeneous fenton catalysts: a review of recent advances. *Journal of Hazardous Materials*, 404, 124082. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124082>.
- Tian, Sh., Li, Y. and Zhao, X., 2015. Cyanide removal with a copper/active carbon fiber cathode via a combined oxidation of a fenton-like reaction and in situ generated copper oxides at anode. *Electrochimica Acta*, 180, 746-55. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.09.006>.
- Urselin Noumsi Foko, R., Ghislain Fotsop, C., Raoul Tchoufon Tchoufon, D., Banenzoué, C. and Guy Blaise Azebaze, A., 2025. Green synthesis of magnetic type zeolites 4A as catalyst for the elimination of quinoline yellow by the fenton process: optimization and kinetic investigation. *Hybrid Advances*, 9, 100401. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2025.100401>.
- Wang, J., Li, Sh., Deng, Sh., Cheng, Z., Hu, X., Adibah Wan Mahari, W. et al., 2023. Upcycling medical plastic waste into activated carbons toward environmental safety and sustainability. *Current Opinion in Environmental Science and Health*, 33, 100470. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2023.100470>.
- Wei, Y., Chen, L., Jiao, G., Wen, Y., Liao, Q., Zhou, H. et al., 2023. Enhanced removal of metal-cyanide complexes from wastewater by Fe-impregnated biochar: adsorption performance and removal mechanism. *Chemosphere*, 331, 138719. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138719>.
- Yannick, D. D., Zoungranan, Y., Kouadio Dobi-Brice, K., Lynda, E. and Tchirioua, E., 2023. Graphene-like biochar from agricultural waste for cyanide removal: kinetic study and adsorption isotherms. *Science Journal of Chemistry*, 11, 189-196. <https://doi.org/10.11648/j.sjc.20231105.12>.
- Zhao, X., Zhang, J., Qiao, M., Liu, H. and Qu, J., 2015. Enhanced photoelectrocatalytic decomposition of copper cyanide complexes and simultaneous recovery of copper with a Bi₂MoO₆ electrode under visible light by EDTA/K₄P₂O₇. *Environmental Science and Technology*, 49, 4567-74. <https://doi.org/10.1021/es5062374>.

