



Semnan University

Applied Chemistry Today

Journal homepage: <https://chemistry.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2981-2437



Research Article

Synthesis and investigation of photocatalytic activity of CdS/ZSM-5 composite for removal of xylene vapors from air

Parvaneh Nakhostin Panahi*, Fatemeh Norouzi

Department of Chemistry, Faculty of Science, Zanjan University, Zanjan, Iran

PAPER INFO

Article history:

Received: 20/Jul/2024

Revised: 06/Oct/2024

Accepted: 31/May/2025

Keywords:

Photocatalyst,
Xylene,
CdS,
ZSM-5.

ABSTRACT

In this research work, CdS and CdS/ZSM-5 were synthesized by hydrothermal method and their photocatalytic activity was investigated for removing xylene vapors from air in two states: powdered and immobilized on a glass substrate. The CdS in the immobilized state removed a higher percentage of xylene than in the powdered state. Also, by loading CdS onto ZSM-5 zeolite, the photocatalytic activity increased and the CdS/ZSM-5 composite was able to decompose a high percentage of the xylene pollutant. Analysis of x-ray diffraction, scanning electron microscopy, and uv-visible diffuse reflectance spectroscopy were used to investigate the physical and chemical properties of CdS and CdS/ZSM-5. According to the results of x-ray diffraction analysis, the structure of synthesized cadmium sulfide was hexagonal, and according to the scanning electron microscope images, cadmium sulfide was synthesized in a spherical shape. The uv-visible diffused reflectance spectroscopy also showed that band gap of CdS and CdS/ZSM-5 is 1.85 and 2.24 ev, respectively.

DOI: <https://doi.org/10.22075/CHEM.2025.36641.2337>

© 2025 Semnan University.

This is an open access article under the CC-BY-SA 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

*.Corresponding author: Associate Professor of Applied Chemistry. E-mail address: panahi@znu.ac.ir

How to cite this article: Norouzi, F., & Nakhostin Panahi, P. (2025). Synthesis and investigation of CdS/ZSM-5 photocatalytic activity for removal of xylene vapors from air. *Applied Chemistry Today*, 20(75), 139-150. (in Persian)

سنتز و بررسی فعالیت فوتوکاتالیستی کامپوزیت CdS/ZSM-5 برای حذف بخارات زایلین از هوا

پروانه نخستین پناهی^{*}، فاطمه نوروزی

گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۳۰ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۱۵ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۱۰	در این کار پژوهشی CdS و CdS/ZSM-5 با روش هیدروترمال سنتز شده و فعالیت فوتوکاتالیستی آن‌ها برای حذف بخارات زایلین از هوا در دو حالت پودری و تثبیت شده بر روی بستر شیشه ای بررسی شد. کادمیم سولفید در حالت تثبیت شده نسبت به حالت پودری درصد بیشتری از بخارات زایلین را از هوا حذف کرد. همچنین با بارگذاری کادمیم سولفید بر روی زئولیت ZSM-5 فعالیت فوتوکاتالیستی افزایش یافته و کامپوزیت CdS/ZSM-5 توانست درصد بالایی از آلاینده‌ی زایلین را حذف کند. برای بررسی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی CdS و CdS/ZSM-5 از آنالیزهای پراش اشعه ایکس، میکروسکوپ الکترونی روبشی و طیف سنجی بازتاب انتشاری مرئی-فرابنفش استفاده گردید. با توجه به نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس، ساختار کادمیم سولفید سنتز شده به صورت هگزاگونال بوده و مطابق با تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، کادمیم سولفید بصورت کروی شکل سنتز شده است. طیف سنجی بازتاب انتشاری مرئی-فرابنفش نیز شکاف انرژی CdS و CdS/ZSM-5 را به ترتیب ۱/۸۵ و ۲/۲۴ الکترون ولت نشان داد.

DOI: <https://doi.org/10.22075/CHEM.2025.36641.2337>

This is an open access article under the CC-BY-SA 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

۱- مقدمه

زایلین با فرمول شیمیایی C_8H_{10} مایعی بی‌رنگ، فرار، قابل اشتعال و خوش‌بو است که به دی‌متیل بنزن نیز معروف می‌باشد [۱]. زایلین در صنایع تولید لاستیک، روان‌کننده و جوهر، رنگ، چسب، آبکاری، مواد شوینده و پاک‌کننده و انواع سوخت‌ها به کار رفته و به عنوان مکمل همراه بنزن به بنزین اضافه می‌شود [۲]. منابع متحرک، انواع سوخت و جایگاه‌های عرضه سوخت، آتش‌سوزی در جنگل‌ها و نشت نفت به اقیانوس‌ها از عوامل مهم در انتشار زایلین می‌باشند [۳]. عوارض ناشی از تماس با زایلین شامل تأثیر روی سیستم عصبی، خستگی، تهوع، نفخ، سوزش چشم و تورم پوست، بروز مشکل در تنفس، عوارض قلبی، ناراحتی‌های معده، کلیه و کبد می‌باشد [۴]. یکی از مؤثرترین روش‌ها برای حذف بخارات زایلین، فرآیند اکسایش فوتوکاتالیستی است. طی این فرآیند، مواد آلاینده در اثر تابش نور و در حضور فوتوکاتالیست‌های نیمه‌رسانا و تولید شدن رادیکال‌های فعال به H_2O ، CO_2 و یا سایر مواد بی‌ضرر تجزیه می‌شوند [۵ و ۶].

کادمیم سولفید یک جامد زرد رنگ با فرمول CdS می‌باشد که به دلیل خواص و کاربردهای بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این ترکیب در دو کانی متفاوت یکی با نام هگزا گرینوکیت (همان کادمیم سولفید طبیعی) با نام لاتین Hexagonal greenockite و دیگری هالیت مکعبی (کانی از دسته‌ی اسفلریت‌ها مانند ZnS و FeS) با نام لاتین Cubic hawleyite

استخراج می‌شود. کادمیم سولفید یکی از مهمترین نیمه هادی‌ها است که در دمای اتاق شکاف انرژی آن در حدود ۲/۴ الکترون ولت است. این ترکیب در سلول‌های خورشیدی، لیزرها و ابزار نوری نیز استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر کادمیم سولفید به عنوان یک فوتوکاتالیست موثر برای حذف آلاینده‌های آلی بسیار مورد استفاده قرار گرفته است [۷].

ژئولیت‌ها از دسته مواد میکروحرره بوده و آلومیناسیلیکات‌های بلوری و هیدراته فلزات قلیایی یا قلیایی خاکی بویژه سدیم، کلسیم، منیزیم، استرانسیم و باریم هستند که شبکه‌های سه بعدی متشکل از چهار وجهی‌های $[\text{SiO}_4]^{4-}$ و $[\text{AlO}_4]^{4-}$ دارند. در ساختار ژئولیت‌ها چهاروجهی‌ها به گونه‌ای در کنار هم قرار می‌گیرند که یک ساختار شبکه‌ای باز با منافذ و سطوح بسیار زیاد پدید می‌آورد و منجر به کاربردهای وسیعی در صنعت به عنوان رزین‌های مبادله یون، غربال‌های مولکولی، جاذب و کاتالیزور می‌شوند. ژئولیت‌ها به دلیل سطح ویژه بالا، قدرت جذب زیاد، داشتن کانال‌های یکنواخت و پایدار و پایداری حرارتی، مکانیکی و گرمایی، به طور گسترده در فرآیندهای پتروشیمی مانند تبدیل هیدروکربن‌ها، ایزومریزاسیون و استری شدن به عنوان کاتالیزورهای ناهمگن مورد استفاده قرار می‌گیرند [۸-۱۳].

حسینعلی رنگکوی و همکارانش در سال ۲۰۱۸ در کار تحقیقاتی خود نانوذرات TiO_2 را روی ژئولیت تثبیت کرده و فعالیت فوتوکاتالیستی آن را جهت حذف زایلن از فاز گازی تحت تشعشع نور فرابنفش بررسی کردند. نتایج حاصل نشان داد که مقدار حذف زایلن در غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ ppm توسط فوتوکاتالیست TiO_2 تثبیت شده روی ژئولیت به ترتیب برابر با ۳۵/۴۶، ۲۲/۷۰ و ۱۲/۳۷ درصد است [۱۴]. در سال ۲۰۲۲ اتاریخ اسرقی و همکاران فوتوکاتالیست $\text{CdS/g-C}_3\text{N}_4$ را با روش هم رسوبی سنتز کرده و آن را بر روی ژئولیت بارگذاری کردند. کامپوزیت حاصل برای حذف آنتی بیوتیک سفوپرازون مورد استفاده قرار گرفته و خواص فیزیکی و شیمیایی کامپوزیت نیز با استفاده از آنالیزهای مختلف بررسی شد. مطابق با نتایج، پارامترهای pH محلول، زمان تابش، مقدار فوتوکاتالیست و غلظت اولیه سفوپرازون بر روی راندمان تخریب تاثیر می‌گذارد. سفوپرازون با غلظت ۱۷mg/L در حضور ۰/۴g فوتوکاتالیست در pH=۹ در مدت زمان ۸۰ دقیقه به مقدار ۹۳٪ تجزیه شد [۱۵]. خانم شیما و همکارانش در سال ۲۰۲۵ در یک کار پژوهشی فوتوکاتالیست $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{FeVO}_4/\text{modified zeolite}$ را با استفاده از روش هیدروترمال و امواج اولتراسونیک در نسبت‌های مختلف سنتز کرده و فعالیت فوتوکاتالیستی آن‌ها را در حذف متیلن بلو و گوگردزایی بنزوتیوفن بررسی کردند. نتایج حاصل نشان داد که ژئولیت اصلاح شده در حذف آلاینده‌ها نقش مهمی دارد. به طوری که میزان حذف متیلن بلو و گوگرد با فوتوکاتالیست $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{FeVO}_4/\text{modified zeolite}$ در مقایسه با $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{FeVO}_4$ به ترتیب از ۶۷ به ۹۳ درصد و از ۶۸ به ۱۰۰ درصد افزایش یافت [۱۶].

بر اساس مطالعات انجام شده، کادمیم سولفید بارگذاری شده بر روی ژئولیت ZSM-5 برای حذف فوتوکاتالیستی بخارات زایلن از هوای آلوده تاکنون گزارش نشده است. بنابراین در این کار پژوهشی، ابتدا کادمیم سولفید با روش هیدروترمال سنتز شده و فعالیت فوتوکاتالیستی آن برای حذف بخارات زایلن در دو حالت پودری و تثبیت شده بر روی بسترهای شیشه‌ای بررسی خواهد

شد. در مرحله بعد کادمیم سولفید بر روی زئولیت ZSM-5 بارگذاری شده و عملکرد فوتوکاتالیستی کامپوزیت CdS/ZSM-5 حاصل نیز برای حذف بخارات زایلین مورد بررسی قرار می گیرد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی فوتوکاتالیست‌ها با استفاده از آنالیزهای پراش پرتو ایکس (XRD)، میکروسکوب الکترونی روبشی (SEM) و طیف‌سنجی بازتابش انتشاری فرابنفش-مرئی (UV-Vis DRS) بررسی می شود.

۲- بخش تجربی

سنتز کادمیم سولفید

برای سنتز کادمیم سولفید در ابتدا مقدار معینی کادمیم استات را در آب مقطر حل کرده و سپس مقدار معینی تیواستامید به آن اضافه شد. سپس به مدت یک ساعت در دمای اتاق همزده شد. در مرحله بعد سوسپانسیون حاصل را به اتوکلاو منتقل کرده و اتوکلاو در دمای ۱۸۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت در آن قرار داده شد. سپس رسوب حاصل توسط سانتریفوژ جدا شده و کادمیم سولفید حاصل در دمای ۸۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱۰ ساعت در آن خشک شد [۱۷].

بارگذاری کادمیم سولفید بر روی زئولیت ZSM-5

برای بارگذاری کادمیم سولفید بر روی زئولیت، مقدار معینی از زئولیت در حین سنتز کادمیم سولفید به محلول اضافه شد. به این صورت که بعد از اضافه کردن کادمیم استات و تیواستامید به آب مقطر، زئولیت نیز اضافه شده و سوسپانسیون حاصل به مدت یک ساعت در دمای اتاق همزده شد. مابقی مراحل مانند سنتز کادمیم سولفید می باشد.

تثبیت فوتوکاتالیست بر روی بستر شیشه ای

برای انجام این کار لام‌های شیشه‌ای پس از خراشیده شدن در داخل اسیدفلوریدریک ۵ درصد حجمی به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند. در اثر این عمل شیارهای موجود روی این لام‌ها عمیق‌تر شده و تثبیت فوتوکاتالیست بر روی آن‌ها را فراهم می‌کند. پس از خارج کردن لام‌های شیشه‌ای از اسید و شستشو با آب مقطر، سوسپانسیون آماده شده از فوتوکاتالیست روی لام‌ها ریخته شده و جهت خشک شدن در آن دمای ۸۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفتند.

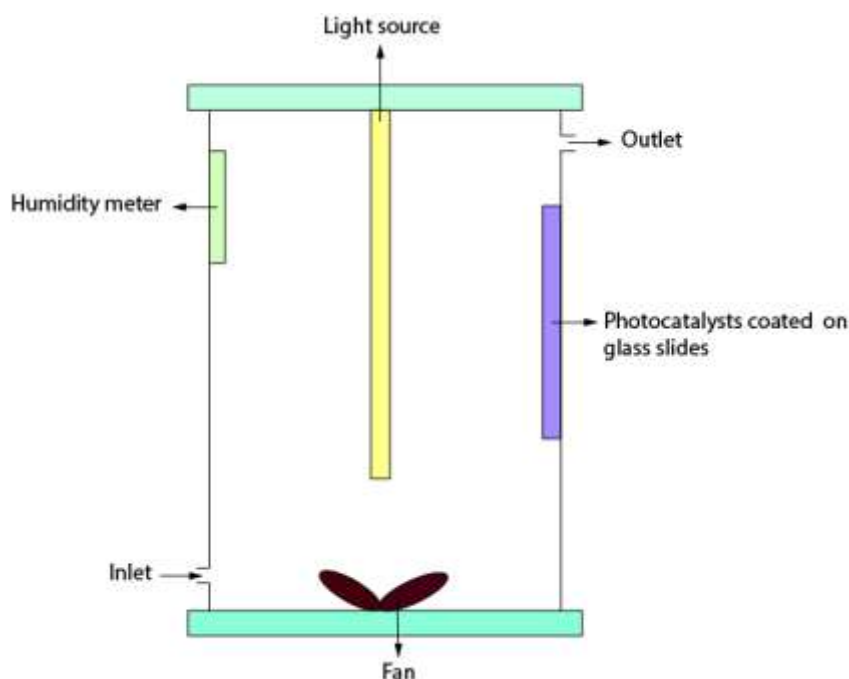
تست فعالیت فوتوکاتالیستی

فوتوکاتالیست‌ها در دو حالت پودری و تثبیت شده روی لام‌های شیشه‌ای تست شدند. برای تست‌های فوتوکاتالیستی، ابتدا مقدار معینی از فوتوکاتالیست را درون فوتوراکتور گازی قرار داده و بعد از بستن در راکتور، زایلین با غلظت مشخص به وسیله سرنگ میکرولیتری داخل آن تزریق شد. سپس فن داخل راکتور روشن شد تا زایلین به بخار تبدیل شده و به طور یکنواخت داخل محفظه راکتور پخش شود. راکتور یک ساعت در تاریکی قرار گرفت تا تعادل جذب-واجذب بین فوتوکاتالیست و زایلین برقرار شود و سپس منبع نور داخل راکتور روشن شد تا واکنش‌های فوتوکاتالیستی آغاز شوند. در ادامه در زمان‌های مختلف نمونه

برداری از هوای داخل راکتور، نمونه برداری توسط سرنگ گازبندی شده انجام گرفته و غلظت زایلین با استفاده از کروماتوگرافی گازی مجهز به دتکتور FID و ستون OV-1 (طول ۱۰ متر، قطر ۰/۲۵ میلی متر، ضخامت فاز ساکن ۰/۲۵ میکرومتر) آنالیز شد. در مرحله آخر برای محاسبه درصد حذف زایلین از رابطه زیر استفاده شد:

$$\text{درصد حذف زایلین} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100$$

در این رابطه C_0 غلظت در لحظه $t=0$ و C_t غلظت در لحظه نمونه برداری می باشد. در هر آنالیز دو بار نمونه برداری انجام شده و میانگین نتایج گزارش شده است. شماتیک سامانه آزمایشگاهی استفاده شده در شکل ۱ نشان داده می شود.

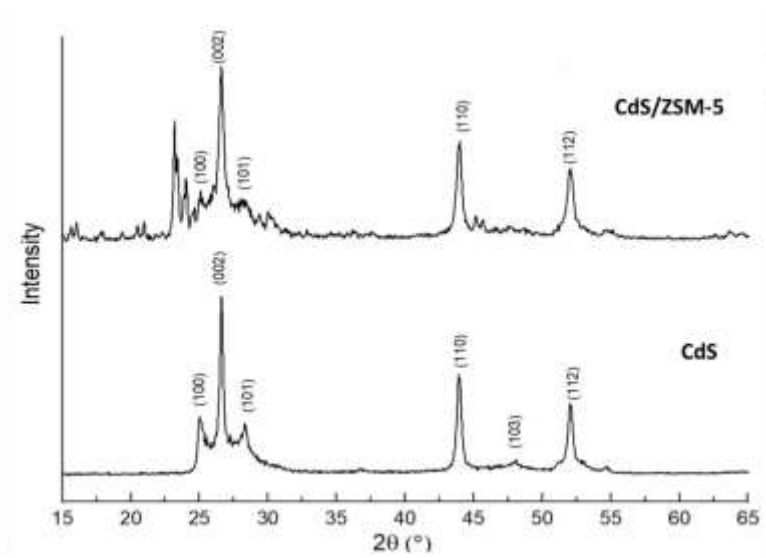


شکل ۱. شماتیک سامانه آزمایشگاهی استفاده شده برای تست فوتوتخریب بخارات زایلین

۳- بحث و نتیجه گیری

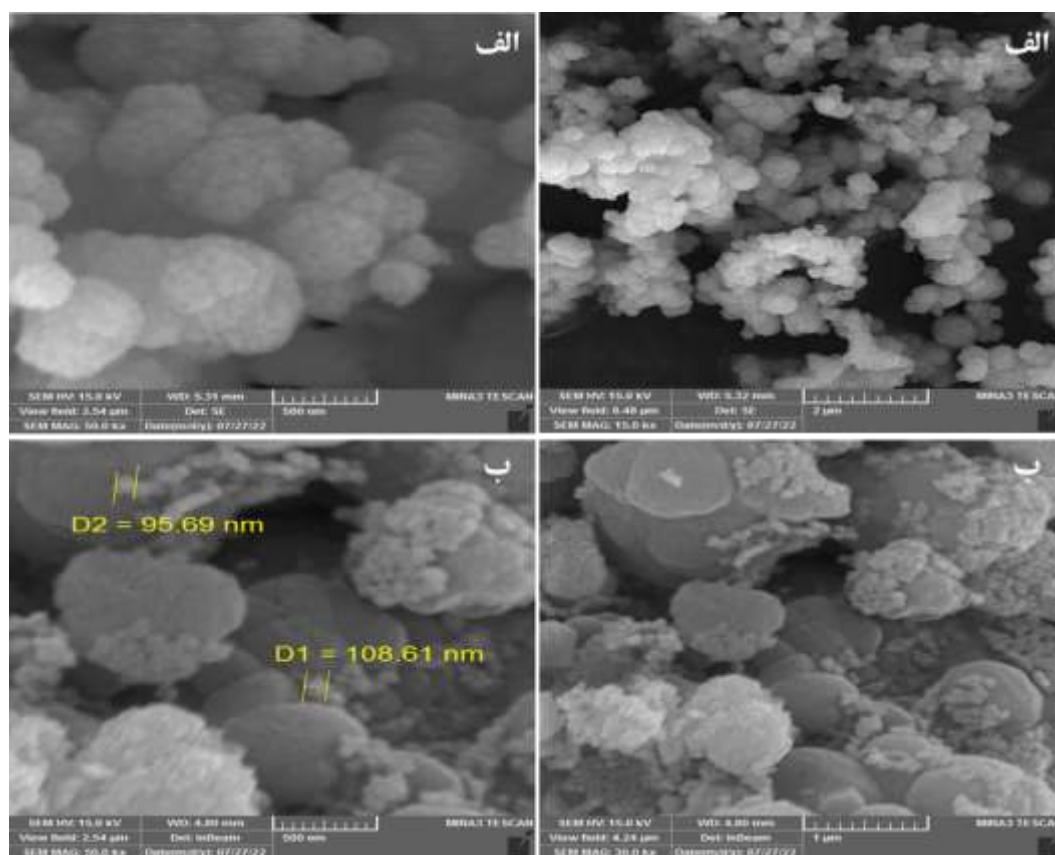
ویژگی های CdS و CdS/ZSM-5

الگوی XRD کادمیم سولفید و کادمیم سولفید بارگذاری شده بر روی ژئولیت در شکل ۲ نشان داده می شود. با مقایسه پیک های پراش کادمیم سولفید سنتز شده با پیک های پراش کادمیم سولفید استاندارد (JCPDS NO ۴۱-۱۰۴۹)، مشخص می شود که کادمیم سولفید درست سنتز شده است. پیک های موجود در نواحی $2\theta = 24/80.7^\circ$ و $47/83.9^\circ$ و $43/68.1^\circ$ و $28/182^\circ$ و $26/50.7^\circ$ و $24/80.7^\circ$ مربوط به کادمیم سولفید هگزاگونالی می باشد که به ترتیب متناظر با بازتاب از صفحات کریستالی (۱۰۰)، (۰۰۲)، (۱۰۱)، (۱۱۰)، (۱۰۳) و (۱۱۲) است [۱۸]. در الگوی XRD مربوط به CdS/ZSM-5، هم پیک های مربوط به کادمیم سولفید و هم پیک های مربوط به ژئولیت ZSM-5 ظاهر شده است که این نشان دهنده ی بارگذاری موفقیت آمیز کادمیم سولفید بر روی ژئولیت می باشد. همچنین ساختار ژئولیت در اثر بارگذاری کادمیم سولفید نیز تغییری نکرده است.



شکل ۲. الگوی پراش اشعه ایکس CdS/ZSM-5 و CdS

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی CdS و CdS/ZSM-5 در شکل ۳ نشان داده شده است. مطابق با تصاویر SEM، کادمیم سولفید سنتز شده کروی شکل می باشد. شکل ۲(ب) نیز نشان می دهد که ذرات کادمیم سولفید به طور یکنواخت بر روی سطح زئولیت توزیع شده اند و ساختار سطحی ناهمواری حاصل شده است که به وضوح ظرفیت جذب آلاینده و سایت های فعال برای انجام واکنش فوتوکاتالیستی را افزایش می دهد و در نتیجه می تواند باعث افزایش فعالیت فوتوکاتالیستی شود [۱۹].

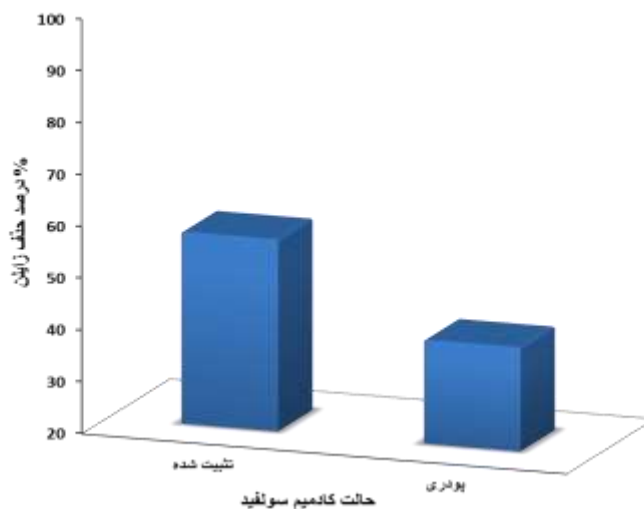


شکل ۳. تصاویر SEM (الف) CdS و (ب) CdS/ZSM-5

مقدار شکاف انرژی CdS و کامپوزیت CdS/ZSM-5 با استفاده از طیف‌سنجی بازتاب انتشاری فرابنفش-مرئی و معادله $(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g)$ تعیین شد که به ترتیب ۱/۸۵ و ۲/۲۴ الکترون ولت به‌دست آمد.

فعالیت فوتوکاتالیستی CdS و CdS/ZSM-5

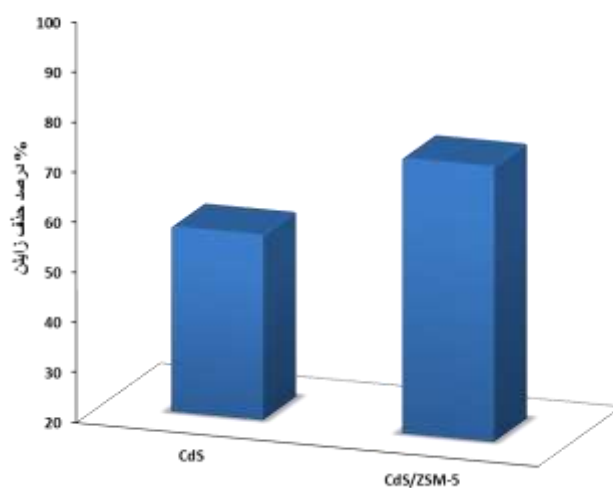
فعالیت فوتوکاتالیستی کادمیم سولفید در دو حالت پودری و تثبیت شده بر روی بسترهای شیشه‌ای برای حذف بخارات زایلن بررسی شده و نتایج در شکل ۴ نشان داده می‌شود.



شکل ۴- درصد حذف بخارات زاین توسط کادمیم سولفید تحت تشعشع نور فرابنفش (غلظت زاین: ۳۰۰ ppm، مقدار فوتوکاتالیست: ۰/۱ g، زمان تست: ۷ ساعت)

با توجه به نتایج حاصل از شکل ۴، استفاده از کادمیم سولفید در حالت تثبیت شده روی لام های شیشه ای به علت بیشتر شدن سطح ویژه فوتوکاتالیست، درصد حذف را افزایش می دهد. در واقع با بیشتر شدن سطح ویژه فوتوکاتالیست، احتمال تماس آلاینده با فوتوکاتالیست بیشتر شده و در نتیجه درصد حذف افزایش می یابد [۲۰].

شکل ۵ درصد حذف بخارات زاین توسط CdS/ZSM-5 را در مقایسه با CdS نشان می دهد.



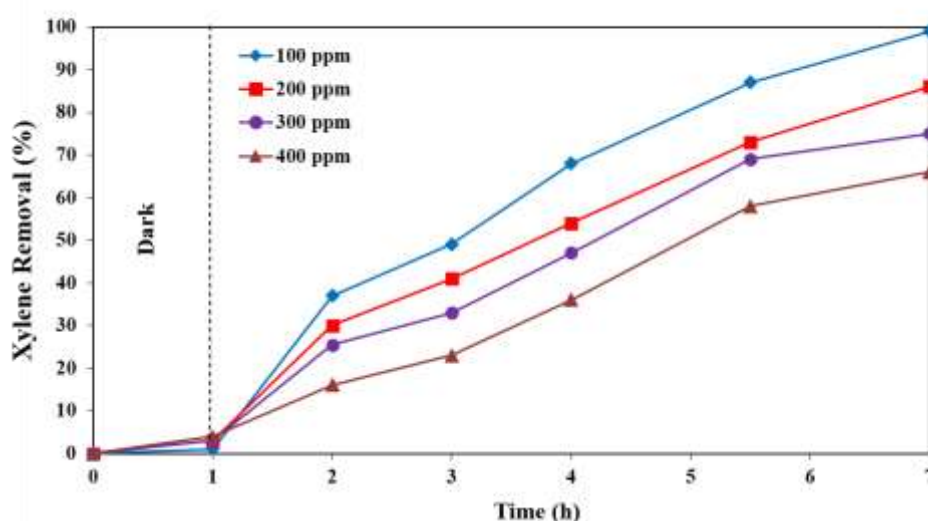
شکل ۵. درصد حذف بخارات زاین توسط CdS و CdS/ZSM-5 تثبیت شده روی لام های شیشه ای تحت تشعشع نور فرابنفش (غلظت زاین: ۳۰۰ ppm، مقدار فوتوکاتالیست: ۰/۱ g، زمان تست: ۷ ساعت)

مشاهده می شود که کامپوزیت CdS/ZSM-5 نسبت به CdS فعالیت فوتوکاتالیستی بیشتری را از خود نشان می دهد. علت افزایش عملکرد فوتوکاتالیستی کامپوزیت CdS/ZSM-5 را می توان به موارد زیر نسبت داد:

۱- زئولیت ZSM-5 دارای سطح ویژه ی بالایی بوده و در نتیجه ذرات کادمیم سولفید به خوبی بر روی سطح زئولیت پخش شده و مکان های فعال سطحی بیشتری برای انجام واکنش های فوتوکاتالیستی تشکیل می شود.

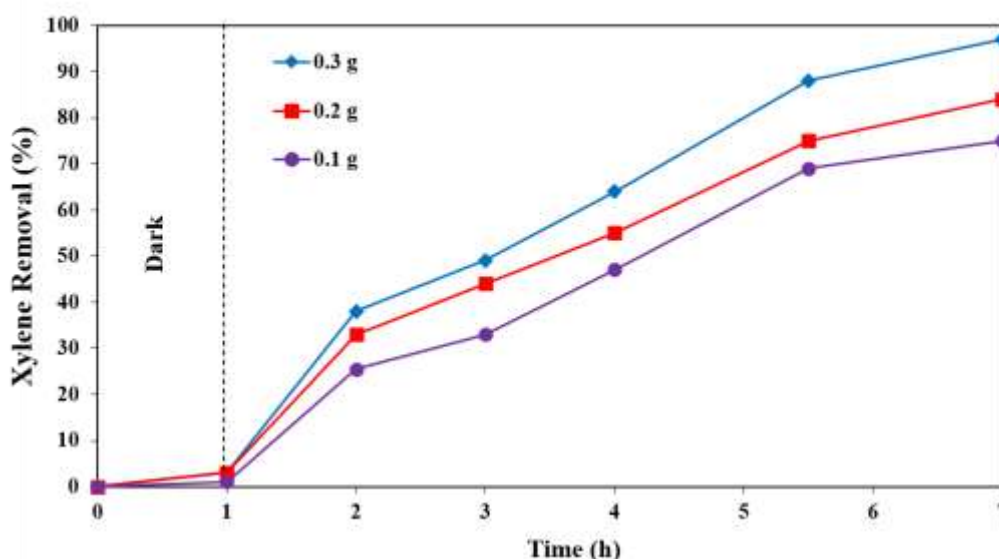
۲- زئولیت ZSM-5 به عنوان کمک کاتالیزور عمل کرده و به خاطر داشتن بار سطحی منفی، فوتوالکتردهای تشکیل شده را به دام انداخته و باعث کاهش ترکیب مجدد فوتوالکتردها-حفره در سطح کاتالیزور می شود.

در مرحله بعدی فعالیت فوتوکاتالیستی کامپوزیت CdS/ZSM-5 برای حذف غلظت های مختلف زایلین مورد بررسی قرار گرفته و نتایج در شکل ۶ نشان داده می شود. مطابق با نتایج، در غلظت ۱۰۰ ppm حذف زایلین ۱۰۰ درصد بوده اما با افزایش غلظت، درصد حذف کاهش می یابد.



شکل ۶ درصد حذف بخارات زایلین با غلظت های مختلف توسط CdS/ZSM-5 تثبیت شده روی لام های شیشه ای تحت تشعشع نور فرابنفش (مقدار فوتوکاتالیست: ۰/۱ g و زمان تست: ۷ ساعت)

تاثیر مقدار فوتوکاتالیست CdS/ZSM-5 نیز بر روی درصد حذف زایلین بررسی شده و نتایج در شکل ۷ نشان داده می شود. مطابق با نتایج، با افزایش مقدار فوتوکاتالیست درصد حذف زایلین نیز افزایش می یابد.



شکل ۷. درصد حذف بخارات زایلین توسط CdS/ZSM-5 با مقادیر مختلف تثبیت شده روی لام های شیشه ای تحت تشعشع نور فرابنفش (غلظت زایلین: ۳۰۰ ppm و زمان تست: ۷ ساعت)

۳- نتیجه گیری

در این مقاله فوتوکاتالیست های CdS و CdS/ZSM-5 بطور موفقیت آمیزی سنتز شده و برای حذف بخارات زایلین از هوای آلوده تحت تشعشع نور فرابنفش مورد ارزیابی قرار گرفت. مطابق با نتایج XRD و SEM، کادمیم سولفید بطور موفقیت آمیزی بر روی زئولیت ZSM-5 بارگذاری شده است. کامپوزیت CdS/ZSM-5 در حالت تثبیت شده بر روی بسترهای شیشه ای توانست درصد بالایی از بخارات زایلین را حذف کند. در واقع زئولیت ZSM-5 با به دام انداختن فوتوالکترن های تشکیل شده، باعث کاهش ترکیب مجدد فوتوالکترن و حفره شده و در نتیجه عملکرد فوتوکاتالیستی افزایش می یابد.

۴- تقدیر و تشکر

نویسندگان از حمایت مالی دانشگاه زنجان در اجرای این پژوهش سپاسگزارند.

۵- فهرست منابع و مآخذ

- [1] Gilch, H. G., & Wheelwright, W. L. (1966). Polymerization of α -halogenated p-xylenes with base. *J. Polym. Sci., Part A: Polym. Chem*, 4(6), 1337-1349.
- [2] Savolainen, K. (1980). Combined effects of xylene and alcohol on the central nervous system. *Acta Pharmacol. Toxicol*, 46(5), 366-372.
- [3] Bakand, S., Winder, C., Khalil, C., & Hayes, A. (2006). A novel in vitro exposure technique for toxicity testing of selected volatile organic compounds. *J. Environ. Monit*, 8(1), 100-105.

- [4] Ma, T., Xu, J., Chen, K., Du, J., Li, W., & Huang, X. (1998). Red–green–blue light emission from hydrogenated amorphous silicon carbide films prepared by using organic compound xylene as carbon source. *Appl. Phys. Lett*, 72(1), 13-15.
- [5] Daneshvar, N., Salari, D., & Khataee, A. R. (2003). Photocatalytic degradation of azo dye acid red 14 in water: investigation of the effect of operational parameters. *J. Photochem. Photobiol. A*, 157(1), 111-116.
- [6] Khataee, A. R., Karimi, A., Soltani, R. D. C., Safarpour, M., Hanifehpour, Y., & Joo, S. W. (2014). Europium-doped ZnO as a visible light responsive nanocatalyst: Sonochemical synthesis, characterization and response surface modeling of photocatalytic process. *Appl. Catal. A- GEN*, 488, 160-170.
- [7] Peng, T., Li, K., Zeng, P., Zhang, Q., & Zhang, X. (2012). Enhanced photocatalytic hydrogen production over graphene oxide–cadmium sulfide nanocomposite under visible light irradiation. *J. Phys. Chem. C*, 116(43), 22720-22726.
- [8] Kuznicki, S. M., Lin, C. C. H., & Dambrowitz, K. A. (2012). Evolving applications of zeolite molecular sieves.
- [9] Csicsery, S. M. (1986). Catalysis by shape selective zeolites-science and technology. *Pure Appl. Chem*, 58(6), 841-856.
- [10] Weitkamp, J. (2000). Zeolites and catalysis. *Solid state ion*, 131(1-2), 175-188.
- [11] VAUGHAN, D. W. (1988). The synthesis and manufacture of zeolites. *Chem Eng Prog*, 84(2), 25-31.
- [12] Armstrong, G. (2015). An introduction to polymer nanocomposites. *Eur J Phys*, 36(6), 063001.
- [13] Baerlocher, C., McCusker, L. B., & Olson, D. H. (2007). *Atlas of zeolite framework types*. Elsevier.
- [14] Rangkooy, H. A., Jahani, F., & Siah Ahangar, A. (2019). Effect of the Type of Ultraviolet on the Photocatalytic Removal of Xylene as a Pollutant in the Air Using TiO₂ Nanoparticles Fixed on the activated carbon. *J. Occup. Hyg. Eng*, 5(4), 26-32.
- [15] AttariKhasraghi, N., Zare, K., Mehrizad, A., Modirshahla, N., & Behnajady, M. A. (2021). Zeolite 4A supported CdS/g-C₃N₄ type-II heterojunction: a novel visible-light-active ternary nanocomposite for potential photocatalytic degradation of cefoperazone. *J. Mol. Liq*, 342, 117479.
- [16] Khabbaz, S. H., Bagheri, A., & Mousavi-Kamazani, M. (2024). Synthesis, characterization, and application of MnFe₂O₄/FeVO₄/modified zeolite nanocomposite as an effective photocatalyst for methylene blue degradation and benzothiophene desulfurization. *Heliyon*.
- [17] Li, Y. D., Liao, H. W., Ding, Y., Qian, Y. T., Yang, L., & Zhou, G. E. (1998). Nonaqueous synthesis of CdS nanorod semiconductor. *Chem. mater*, 10(9), 2301-2303.
- [18] Yang, F., Tian, X., Zhang, K., Zhang, X., & Liu, L. (2018). The morphology–property effect and synergetic catalytic effect of CdS as electrocatalysts for dye-sensitized solar cells. *J Solid State Sci Technol*, 7(6), P311.

- [19] Yin, H., Wang, X., Wang, L., Nie, Q., Zhang, Y., Yuan, Q., & Wu, W. (2016). Ag/AgCl modified self-doped TiO₂ hollow sphere with enhanced visible light photocatalytic activity. *J. Alloys Compd.*, 657, 44-52.
- [20] Yao, S., Li, J., & Shi, Z. (2010). Immobilization of TiO₂ nanoparticles on activated carbon fiber and its photodegradation performance for organic pollutants. *Particuology*, 8(3), 272-278.