



Available online: <https://ijhe.tums.ac.ir>

مقاله پژوهشی



حذف بنزن از هوا با استفاده از فتوکاتالیست $\text{TiO}_2 - \text{Bi}_2\text{O}_3$ پوشش داده شده بر فوم شیشه تحت تابش فرابنفش

رضانعلی دیان‌تی تیلکی^{۱*}، رقیه کاسب^۱، اسماعیل بابانژاد آریمی^۱، محمد دیان‌تی^۲

۱- گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران
۲- گروه ترموسینتیک و کاتالیست، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله:

زمینه و هدف: بنزن یکی از مواد آلی فرار سرطانزا است که در هوای آلوده یافت می‌شود. هدف از این مطالعه حذف بنزن از هوا با استفاده از فتوکاتالیست کامپوزیت $\text{TiO}_2 - \text{Bi}_2\text{O}_3$ تثبیت شده روی فوم شیشه تحت تابش فرابنفش بود.

روش بررسی: در یک راکتور کوارتز فوم شیشه پوشش داده شده با کامپوزیت $\text{TiO}_2 - \text{Bi}_2\text{O}_3$ قرار داده شد و سپس راکتور در داخل یک اتاقک شیشه ای درپوش دار به پمپ هوا متصل و لامپ UV (۲۵۴ nm) در کنار آن نصب گردید. حجم‌های معین (μL) بنزن از طریق سیتوم به داخل اتاقک تزریق شد. با روشن شدن پمپ، هوای آلوده به بنزن از فتوراکتور عبور می‌کرد. با نمونه گیری از هوای داخل اتاقک و استفاده از دستگاه GC-FID، غلظت بنزن اندازه گیری شد.

یافته‌ها: طیف XRD و تصاویر SEM تأیید کننده وجود $\text{TiO}_2 - \text{Bi}_2\text{O}_3$ و آنالیز BET تأیید کننده وجود مزو حفره در فتوکاتالیست کامپوزیت تهیه شده است. میزان جذب سطحی بنزن در کامپوزیت ۱۵ درصد و از مدل لانگمویر تبعیت نمود. سینتیک فرایند از نوع درجه یک بود. با افزایش غلظت بنزن راندمان حذف کاهش یافت. برای غلظت ۳۹ ppm بنزن در مورد TiO_2 و تابش فرابنفش به مدت ۷۵ min، راندمان حذف ۷۵ درصد بود در حالی که در مورد $\text{TiO}_2 - \text{Bi}_2\text{O}_3$ با شرایط مشابه راندمان حذف حدود ۹۰ درصد بدست آمد.

نتیجه گیری: استفاده از فتوکاتالیست کامپوزیت $\text{TiO}_2 - \text{Bi}_2\text{O}_3$ و تابش UV-A موجب افزایش راندمان ۱۵ درصد حذف بنزن نسبت به TiO_2 به تنهایی شده است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۸
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۲۳

واژگان کلیدی: فوم شیشه، بنزن، هوا، فتوکاتالیست، $\text{TiO}_2 - \text{Bi}_2\text{O}_3$

پست الکترونیکی نویسنده مسئول:
dianati.tilaki@gmail.com

Please cite this article as: Dianati Tilaki R, Kaseb R, Babanejad Arimi E, Dianati M. Benzene removal from air using $\text{Bi}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ photocatalyst coated on glass foam under ultraviolet light irradiation. Iranian Journal of Health and Environment. 2025;18(3):489-504.

مقدمه

ترکیبات آلی فرار (VOCs) دسته مهمی از آلاینده ها هستند که آلودگی هوا را در محیط های داخلی ایجاد می کنند. بنزن از جمله مهمترین این مواد است که نیازمند توجه ویژه ای است. آژانس بین المللی تحقیقات سرطان (IARC) بنزن را سرطان زای انسانی گروه A اعلام نموده است. تخمین زده شده است که مواجهه با $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ بنزن در طول زندگی منجر به حدود ۶ مورد سرطان خون در هر ۱ میلیون نفر می شود (۱). مواجهه کوتاه مدت انسان با غلظت های نسبتاً زیاد بنزن، می تواند منجر به اثراتی مانند سردرد، خواب آلودگی، سرگیجه، از دست دادن هوشیاری، سوزش چشم، تحریک پوست، آریتمی قلبی، تحریک تنفسی و آنمی آپلاستیک گردد. مواجهه طولانی مدت با بنزن با لوسمی لنفوسیتی و غیر لنفوسیتی حاد و مزمن، کاهش تعداد سلول های خونی و هیپوپلازای مغز استخوان ارتباط آشکاری دارد (۲، ۳). چون بنزن در نفت خام وجود دارد لذا همه انواع مشتقات نفتی حاوی مقادیری از بنزن هستند. بنزن از طریق تبخیر از بنزین، نفت سفید و گازوئیل، دود حاصله از احتراق انواع سوخت ها، دود سیگار و تنباکو، تبخیر از تینر و رنگ، تبخیر از خوشبو کننده ها، حشره کش ها، پاک کننده ها، تبخیر از دستگاه های فتوکپی، فکس و چاپ، احتراق و سوخت در ساختمان ها (بخاری، آشپزخانه، موتورخانه شوفاژ، پارکینگ و...) وارد هوای محیط های داخلی می شود (۴، ۵). اتحادیه اروپا برای محافظت از سلامتی انسان، حداکثر میانگین سالانه غلظت بنزن در هوا را $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (۰/۰۱۵ ppm) اعلام نمود. با این حال سازمان جهانی بهداشت (WHO) هیچ سطح ایمن در مواجهه با بنزن را توصیه نمی کند (۶). بر اساس استانداردهای سازمان ایمنی و بهداشت شغلی (OSHA)، میانگین وزنی- زمانی ۸ ساعته (TWA) غلظت بنزن در هوای محیط کار $3/25 \text{ mg}/\text{m}^3$ (۱ ppm) است (۷).

برخی روش ها از جمله جذب سطحی با مواد جاذب نظیر کربن فعال، زغال زیستی (بیوجار)، سوزاندن و اکسیداسیون برای حذف بنزن و سایر مواد آلی فرار از هوا مورد مطالعه قرار گرفته

اند (۸). یکی از روش های حذف بنزن از هوا اکسیداسیون فتوکاتالیستی است که بسیار مورد توجه قرار گرفته است (۹، ۱۰). در فرایندهای فتوکاتالیستی از مواد نیمه رسانا بعنوان فتوکاتالیست و نور بعنوان منبع انرژی استفاده می شود. در مواد نیمه رسانا شکاف انرژی (بین نوار ظرفیت و نوار هدایت) نسبت به مواد عایق بسیار کمتر است، لذا نور (به خصوص فرابنفش) انرژی لازم برای تحریک الکترون ها و انتقال آنها به نوار هدایت را تامین می کند. به ازای هر الکترون منتقل شده یک حفره با بار مثبت در نوار ظرفیت باقی می ماند، در صورتی که یک الکترون از یک اتم نزدیک بتواند این فضای خالی را پر کند، یک واکنش زنجیره ای بین الکترون ها و حفرات به وجود می آید که اساس کار واکنش های فتوکاتالیستی است. الکترون های برانگیخته با متصل شدن به مولکول های اکسیژن آنرا به یون سوپر اکسید (O_2^-) تبدیل می کنند و حفره ها (بار مثبت) با متصل شدن به مولکول های آب یون های هیدروکسیل ($\text{OH}^\bullet$) ایجاد می کنند که بدین ترتیب امکان وقوع واکنش های اکسیداسیون- احیا برای تخریب آلاینده های آلی فراهم می شود (۱۱). برای وقوع یک واکنش فتوکاتالیستی، لازم است تا ۴ مرحله اتفاق بیفتد که عبارتند از: جذب انرژی نور برای تولید جفت های الکترون- حفره، جدایش بارهای برانگیخته (بار مثبت حفره و بار منفی الکترون)، انتقال الکترون ها و حفره ها به سطح فتوکاتالیست و استفاده از بارهای موجود در سطح برای واکنش های اکسایش و احیا (۱۲).

تیتانیوم دی اکسید (TiO_2) به دلیل پایداری شیمیایی بالا، هزینه کم و نداشتن خطرات محیط زیستی، مدت طولانی است که به عنوان یک فتوکاتالیست مبنا مورد مطالعه قرار می گیرد. با این حال، دراستفاده از TiO_2 برخی عوامل محدودکننده وجود دارند که مهمترین آنها نیاز به تابش فرابنفش برای برانگیخته شدن به دلیل شکاف انرژی ($\text{band gap} = 3/2 \text{ eV}$) و همچنین ترکیب مجدد الکترون- حفره که منجر به کاهش بازده کوانتومی می شود، است (۱۳، ۱۴). در مطالعات متعددی نشانند (دوپ نمودن) عناصر و ترکیبات مختلف روی TiO_2

امکان تثبیت هم زمان فتوکاتالیست های TiO_2 و Bi_2O_3 روی فوم شیشه به روش آغشته سازی (impregnation) به منظور بهبود کارایی فرایند است. هدف از این مطالعه حذف فتوکاتالیستی بنزن از هوا با استفاده از TiO_2 - Bi_2O_3 پوشش داده شده روی فوم شیشه است.

مواد و روش‌ها

مواد و وسائل: نانوذرات تیتانیوم دی اکسید (TiO_2) آناتاز با اندازه ذرات ۱۸ nm و شکاف انرژی ۳/۲ eV و نانوذرات اکسید بیسموت (Bi_2O_3) با اندازه ذرات ۸۰ nm و شکاف انرژی ۲/۸ eV (هر دو با خلوص درصد ۹۹/۹ ساخت شرکت US Nano)، و بنزن (شرکت مرک) و فوم شیشه در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفتند. لامپ UV-A با طول موج ۳۶۵ nm و توان ۱۶ W به طول ۲۰ cm و قطر ۱۹ mm و لامپ مرئی (فیلمان تنگستن) با توان ۱۶ W و قطر ۱۶ mm (هر دو مدل فیلیپس) بعنوان منبع تابش نور استفاده شدند. از یک اتاقک شیشه ای درپوش دار به ابعاد ۶۰ × ۳۰ × ۴۰ cm به حجم ۷۲ L بعنوان فضای بسته استفاده شد. به منظور حفاظت در برابر تابش فرابنفش و همچنین بازتاب نور، اتاقک با فویل آلومینیومی پوشانده شد. به منظور تبخیر و پخش بخارات بنزن در اتاقک از یک هیتر برقی ۲۰۰ W مجهز به ترموستات و یک مینی فن استفاده شد. دستگاه قرائت مستقیم دما، رطوبت و CO_2 مدل TES1370 در داخل اتاقک قرار داده شد. از یک لوله کوارتزی به قطر ۱ cm و طول ۱۵ cm با قابلیت اتصال به پمپ هوا بعنوان راکتور (نگهدارنده بسترکاتالیست) استفاده شد. به این دلیل لوله کوارتز انتخاب شد که می تواند نور فرابنفش را عبور دهد و به سطح فتوکاتالیست برساند. از یک پمپ هوا با دبی ۴ L/min جهت عبور دادن هوا در بستر کاتالیست استفاده شد. از دستگاه UV سنج لوترون مدل UV340-A جهت اندازه گیری شدت تابش فرابنفش در سطح راکتور استفاده شد. کلیدهای روشن و خاموش نمودن کلیه وسائل در بیرون اتاقک قرار داده شد. دستگاه کروماتوگرافی

با هدف کاهش شکاف انرژی به منظور استفاده از نور مرئی یا انرژی خورشیدی ($h\nu < 2/3 \text{ eV}$) انجام شده است (۱۵). گزارش شده است با اینکه اتم های نشانده شده (دوپانت ها) موجب جابجائی نوار جذبی به ناحیه مرئی می شوند اما کارایی کوانتومی TiO_2 کاهش می یابد که علت آن ترکیب مجدد الکترون - حفره در مکان های استقرار دوپانت ها است (۱۶). روش هائی برای بهبود خواص فتوکاتالیستی TiO_2 از طریق جداسازی الکترون - حفره مورد مطالعه قرار گرفته است. یکی از این روش ها بارگذاری بیسموت (Bi) بصورت اکسید (Bi_2O_3) روی سطح آن است (۱۷). شکاف انرژی در Bi_2O_3 ۲/۹ eV است که با تابش نور مرئی برانگیختگی صورت می گیرد (۱۸). حضور Bi_2O_3 در سطح TiO_2 سرعت اکسیداسیون را افزایش می دهد زیرا واکنش فتوکاتالیستی در حضور نور مرئی را امکان پذیر می سازد. از طرف دیگر، Bi_2O_3 نسبتاً ارزاتر و دارای سمیت کمتری است (۱۹). با توجه به اینکه Bi_2O_3 یک نیمه هادی نوع p با تحرک حفره بالا و TiO_2 یک نیمه هادی نوع n است لذا انتقال الکترونی بین این دو صورت می گیرد که موجب جلوگیری از ترکیب مجدد الکترون - حفره می شود. بنابراین افزودن Bi_2O_3 به TiO_2 می تواند منجر به بهبود راندمان فرایند فتوکاتالیستی و افزایش حذف آلاینده ها شود (۲۰، ۲۱). در فرایندهای فتوکاتالیستی لازم است از یک ماده بی اثر جهت بی تحرک سازی و تثبیت نانوذرات فتوکاتالیست استفاده شود، لذا استفاده از ماده ای که ویژگی های لازم برای این کار را داشته باشد مهم است (۲۲). اخیراً مطالعاتی درباره استفاده از فوم شیشه بعنوان ماده نگهدارنده جهت تثبیت فتوکاتالیست انجام شده است (۲۳). فوم شیشه ماده ای سبک و متخلخل، مقاوم در برابر سایش و خرد شدن، عایق گرما و صدا، مقاوم در برابر اسید، دارای سطح ناصاف و زبری مناسب برای چسبیده شدن محکم لایه فتوکاتالیست روی آن است (۲۴).

ضرورت انجام این مطالعه بهبود حذف فتوکاتالیستی بنزن از هوا است زیرا ترکیب مجدد الکترون - حفره در TiO_2 موجب کاهش کارایی حذف بنزن می شود و سوال پژوهشی این مطالعه

گازی (GC-FID) مدل CHROMPACK به منظور تعیین غلظت بنزن مورد استفاده قرار گرفت.

روش پوشش دهی فتوکاتالیست روی فوم شیشه: در این مطالعه کلوخه‌های فوم شیشه (قطر ۲-۴ mm) با استفاده از TiO_2 و Bi_2O_3 به روش آغشته سازی (impregnation) و سپس کلسینه کردن پوشش دهی شدند. به این منظور ۰/۵ g TiO_2 و ۰/۵ g Bi_2O_3 به ۵۰ mL محلول آب - اتانول (۱ به ۱) اضافه شد و به مدت ۳۰ min روی همزن مغناطیسی ۸۰ rpm قرار گرفت و در مرحله بعد ۵ g از کلوخه فوم شیشه به آن اضافه و به مدت ۳ h به آرامی مخلوط شد. سپس به مدت ۲۴ h در داخل آون با دمای 100°C قرار گرفت تا خشک گردید و بعد از آن به مدت ۳ h در کوره در دمای 450°C جهت کلسینه شدن قرار گرفت. برای پوشش دهی فوم شیشه با هر کاتالیست بصورت جداگانه، ۰/۵ g TiO_2 و ۰/۵ g Bi_2O_3 به ۵۰ mL محلول آب- اتانول (۱ به ۱) اضافه شد و بقیه مراحل مطابق روش فوق به انجام رسید.

روش آزمایش فرایند فتوکاتالیستی: در هر سری آزمایش بصورت جداگانه بستر مورد استفاده در لوله کوارتزی ۳ g فوم شیشه پوشش داده شده با کاتالیست بود شامل: فوم شیشه پوشش داده شده با تیتانیوم دی اکسید (FG/TiO_2)، فوم شیشه پوشش داده شده با بیسموت اکسید ($\text{FG/Bi}_2\text{O}_3$) و فوم شیشه پوشش شده با کامپوزیت دو فتوکاتالیست ($\text{FG/TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$). همچنین لوله کوارتزی حاوی فوم شیشه فاقد کاتالیست (FG) تحت تابش فرابنفش و مرئی نیز بعنوان شاهد مورد آزمایش قرار گرفتند.

راکتور حاوی کاتالیست به پمپ هوا متصل و لامپ های UV و مرئی در فاصله ۱ cm از آن در داخل اتاقک نصب شدند. پس از اطمینان از عدم نشت گاز در اتاقک، در دفعات متفاوت حجم های معین (۲۰۰ و ۵۰ و $10\ \mu\text{L}$) بنزن با استفاده از سرنگ GC از طریق سیتوم به داخل آن تزریق شد. هیتر برقی گرمای لازم برای تبخیر و همچنین فن گردش هوا جهت پخش بنزن در اتاقک را ایجاد نمود. پس از تزریق بنزن و توقف ۱۰ min

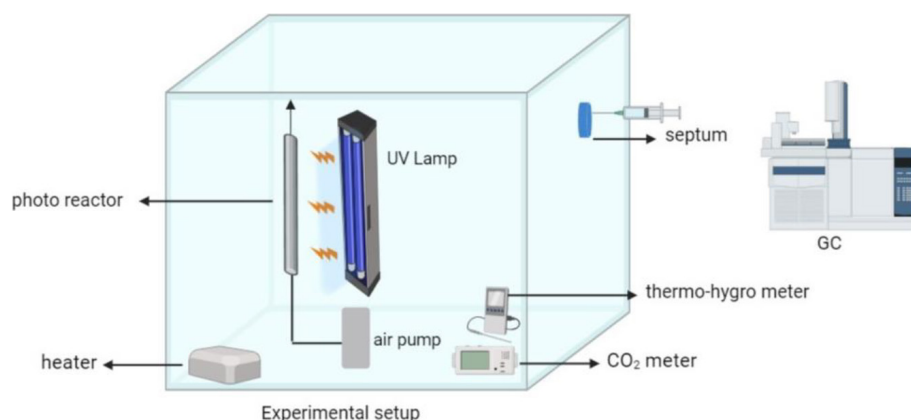
به منظور تبخیر و یکنواخت شدن بنزن، نمونه برداری از هوای اتاقک انجام و غلظت بنزن مورد آنالیز قرارگرفت که به این صورت غلظت اولیه بنزن ۳۹، ۱۹۵ و ۷۸۰ ppm تعیین شد. دمای داخل اتاقک 40°C و رطوبت نسبی ۳۰ درصد اندازه گیری شد. جهت تعیین میزان جذب سطحی بنزن، عبور هوا از راکتور به مدت ۲ h بدون روشن نمودن لامپ (در تاریکی) انجام شد. سپس با روشن نمودن لامپ فرایند فتوکاتالیستی آغاز می‌شد. شدت تابش فرابنفش در سطح لوله کوارتر حاوی بستر کاتالیست $2/3\ \text{mw/cm}^2$ اندازه گیری شد.

در زمان تماس های مختلف (۹۰-۳۰ min)، با استفاده از سرنگ GC ۱ mL هوا از طریق سیتوم از اتاقک نمونه برداری می شد و با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی گازی (GC-FID) مدل Chrompack به منظور تعیین غلظت بنزن مورد آنالیز قرار گرفت. به منظور تعیین میزان جذب یا تجزیه بنزن در شرایط فاقد کاتالیست آزمایشات کنترل با استفاده از لوله کوارتر حاوی فوم شیشه بدون کاتالیست با تابش فرابنفش و مرئی انجام شد. به منظور تعیین میزان جذب سطحی بنزن آزمایشات بدون تابش فرابنفش یا مرئی (در شرایط تاریکی) نیز انجام شد. ستون (column) آنالیز BTEX، به طول ۶۰ m، قطر داخلی ۰/۲۵ mm و ضخامت لایه نازک $0.25\ \mu\text{m}$ مورد استفاده قرار گرفت. شرایط آنالیز شامل دمای تزریق 260°C ، دمای آشکارساز 280°C و جریان گاز هیدروژن $30\ \text{mL/min}$ ایجاد شد. برنامه ریزی دمائی دستگاه از 40°C (ایزوترمال به مدت ۱ min) شروع شد، سپس با سرعت 15°C/min (ایزوترمال به مدت ۴ min) به 90°C افزایش یافت و با سرعت 10°C/min تا 170°C (ایزوترمال به مدت ۴ min) گرم شد. دستگاه با استفاده از چهار غلظت استاندارد کالیبره شد (۲۵).

تعیین خصوصیات فوم شیشه پوشش داده شده با $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$ خصوصیات فوم شیشه پوشش داده شده با کاتالیست های مورد نظر با انجام آزمون های XRD، SEM، BET مشخص شد.

ایزوترم BET در دمای ۷۷ K (۷۷ کلوین) با استفاده از دستگاه آنالیز مساحت سطح ویژه و اندازه منافذ مدل BELSORP MR1 بدست آمد. آنالیز XRD توسط دستگاه پراش سنج اشعه ایکس مدل Shimadzu 7000 انجام شد. مورفولوژی سطح با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

مدل Hitachi SU3500 ارزیابی شد. هر آزمایش ۳ بار تکرار و میانگین اعداد بعنوان میزان غلظت بنزن مورد استناد قرار گرفت. در شکل ۱ شماتیک سیستم راکتور مورد استفاده در این مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۱- شماتیک سیستم راکتور فتوکاتالیستی مورد آزمایش

جذب سطحی و سینتیک واکنش
میزان پوشش سطحی (Θ) مولکول های جذب شونده روی مکان های فعال در سطح فتوکاتالیست با معادله ۱ تعریف می شود:

پس از به تعادل رسیدن جذب سطحی است. با انجام جابجائی معادله ۳ بدست می آید.

$$\frac{1}{N_{ads}} = \frac{1}{N_t} + \frac{1}{N_t \cdot K} \frac{1}{C_e} \quad (3)$$

سینتیک فرایند اکسیداسیون فتوکاتالیستی معمولاً با استفاده از رابطه (L-H) Langmuir-Hinshelwood (معادله ۴) توصیف می شود.

$$r = k \frac{K_B C_B}{(1 + K_B C_B)} \quad (4)$$

در معادله ۴، r نشان دهنده سرعت واکنش ($\text{mg/m}^3 \cdot \text{min}$)، k برابر با ثابت سرعت واکنش ($\text{mg/m}^3 \cdot \text{min}$)، C_B غلظت بنزن

$$\Theta = \frac{N_{ads}}{N_t} \quad (1)$$

تعداد مکانهای اشغال شده
تعداد کل مکانهای جذب سطحی

با فرض کاربرد مدل جذب سطحی Langmuir در مورد جذب سطحی مولکول های گاز روی سطح فتوکاتالیست معادله ۲ را می توان نوشت:

$$\Theta = \frac{N_{ads}}{N_t} = \frac{K C_e}{1 + K C_e} \quad (2)$$

در معادله ۲، K ثابت جذب سطحی و C_e غلظت باقیمانده ماده

(mg/m^3) و KB برابر با ثابت جذب سطحی بنزن (mg/m^3) است.

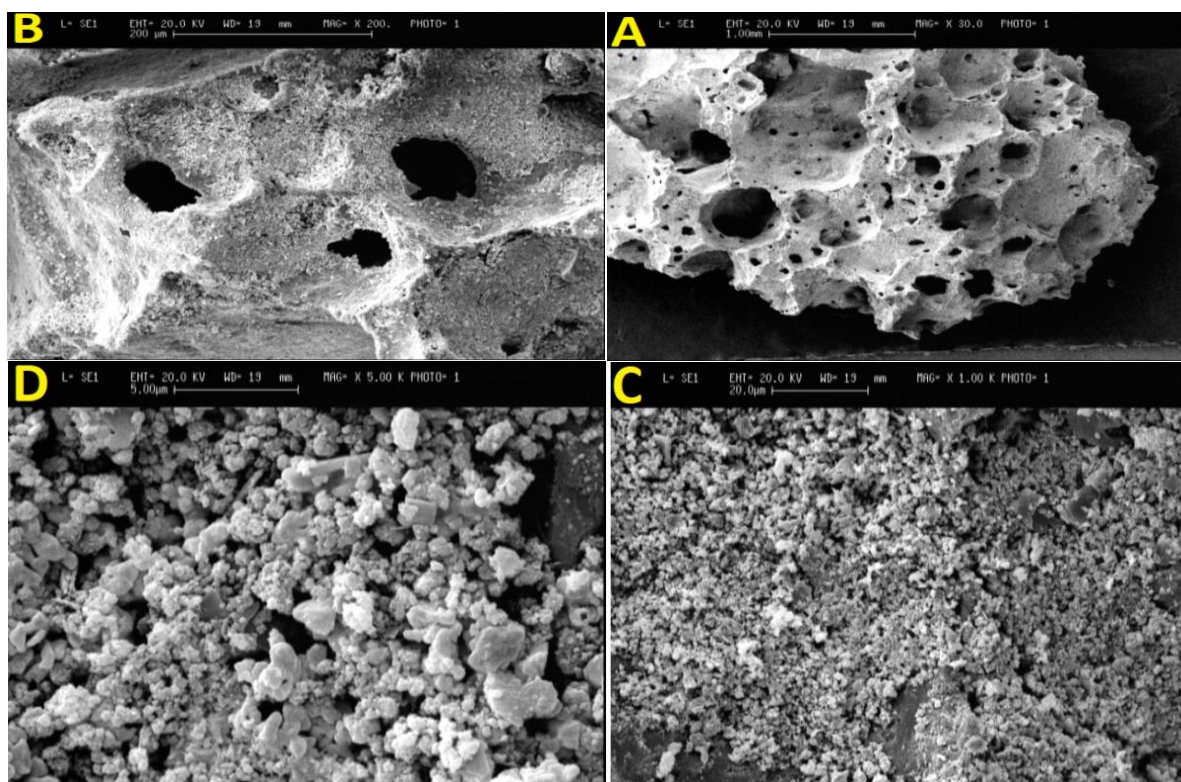
یافته‌ها

در این مطالعه از فوم شیشه برای تثبیت TiO_2 ، Bi_2O_3 و $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$ استفاده شد و اثر پارامترهای غلظت بنزن، زمان تابش، نوع تابش و نوع کاتالیست در حذف بنزن مورد بررسی قرار گرفت. به منظور مشخص نمودن خصوصیات سطح (موفولوژی) فوم شیشه حاوی کاتالیست، تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) تهیه شد. همچنین به منظور تعیین سطح ویژه، اندازه، حجم و توزیع حفره ها، آزمون BET انجام شد. آزمون XRD

به منظور مشخص نمودن حضور فتوکاتالیست روی سطح فوم شیشه انجام شد.

در شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ الکترونی با بزرگنمایی های مختلف از فوم شیشه پوشش داده شده با دو فتوکاتالیست ($\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$) نشان داده شده است.

در تصویر A شکل ۲ که با بزرگنمایی $\times 300$ است، وجود منافذ در فوم شیشه دیده می شود. تصویر B که با بزرگنمایی $\times 2000$ است ایجاد پوشش فتوکاتالیست روی سطح فوم شیشه را نشان می دهد. تصاویر C و D با بزرگنمایی های $\times 10000$ و $\times 50000$ پوشش نسبتاً یکنواخت فتوکاتالیست روی سطح فوم شیشه را نشان می دهند.



شکل ۲- تصاویر SEM از فوم شیشه پوشانده شده با کامپوزیت $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$ با بزرگنمایی های مختلف به ترتیب A: ۳۰ برابر، B: ۲۰۰ برابر، C: ۱۰۰۰ برابر، D: ۵۰۰۰ برابر

حدود ۶۴ nm است که وجود منافذ مزوپور را تأیید می کند. در جدول ۱ خصوصیات فوم شیشه پوشانده شده با کاتالیست های مورد آزمایش آورده شده است.

آنالیز ایزوترم BET مربوط به جذب سطحی گاز نیتروژن در دمای ۷۷ K روی فوم شیشه پوشانده شده با کامپوزیت $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$ نشان می دهد سطح ویژه $36 \text{ m}^2/\text{g}$ ، حجم کل منافذ $0.05 \text{ cm}^3/\text{g}$ و میانگین قطر منافذ

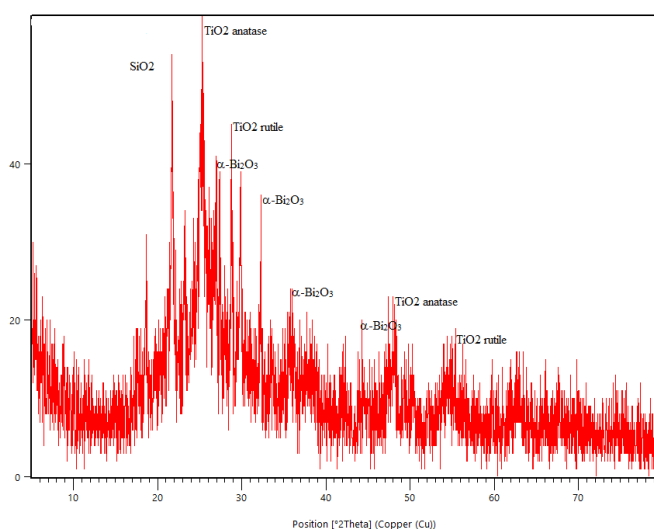
جدول ۱- خصوصیات فوم شیشه پوشانده شده با کاتالیست های مورد آزمایش

نوع بستر	سطح ویژه (m^2/g)	حجم کل منافذ (cm^3/g)	میانگین قطر منافذ (nm)
FG	۸۸/۴	۰/۱۱	۱۰۰
FG/ TiO_2	۴۵	۰/۰۵۵	۵۳
FG/ Bi_2O_3	۴۲	۰/۰۷	۶۰
FG/ $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$	۳۶/۲	۰/۰۵	۶۴

فوم شیشه پوشیده شده با $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$ نشان داده شده است. می توان وجود پیک پهن در محدوده زاویه 18.2° تا 33° را به سیلیس آمورف با گروه سیلانول (Si-OH) در فوم شیشه نسبت داد (۲۷). همچنین فازهای نیمه کریستالی با پیک های ضعیف در فوم شیشه مورد آزمایش مشاهده می شود. پیک های در 2θ از 25° (101) و 48° (101) وجود TiO_2 فاز آاناتاز را نشان می دهند در حالی که پیک های 27° (110) و 54° TiO_2 فاز روتیل را نشان می دهند (۲۸). همچنین وجود پیک ها در زاویه 29° و 32° به $\alpha\text{-Bi}_2\text{O}_3$ و پیک های 33° و 46° به $\beta\text{-Bi}_2\text{O}_3$ نسبت داده می شود (۲۹).

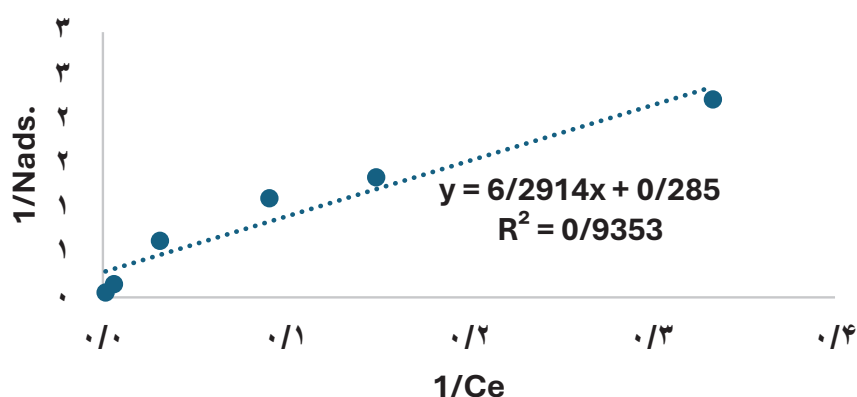
ایزوترم جذب- واجذب نیتروژن مربوط به فوم شیشه پوشانده شده با $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$ تعیین گردید. ایزوترم جذب بدست آمده به صورت ترکیبی از ایزوترم نوع I (جذب سطحی گاز در فشار پائین) و ایزوترم نوع IV (در محدوده فشار متوسط) بر اساس طبقه بندی IUPAC است.

جهت تعیین میزان یکنواختی حفره های فوم شیشه پوشش داده شده با فتوکاتالیست و توزیع اندازه حفره ها از آنالیز BJH استفاده گردید که توزیع اندازه حفره ها را در محدوده ۱ تا ۱۰۰ nm با میانگین قطر حفره ۶۴ nm را نشان می دهد (۲۶). در شکل ۳ طیف پراش اشعه ایکس (XRD) مربوط به نمونه



شکل ۳- طیف XRD نمونه فوم شیشه پوشانده شده با $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$

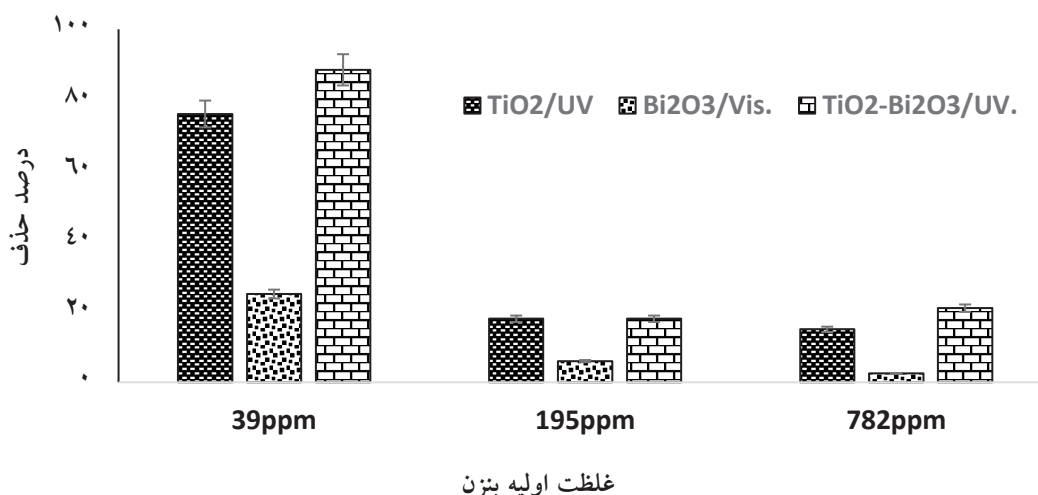
در شکل ۴ ایزوترم لانگمویر برای جذب سطحی بنزن روی فتوکاتالیست $\text{FG/Bi}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ نشان داده شده است.



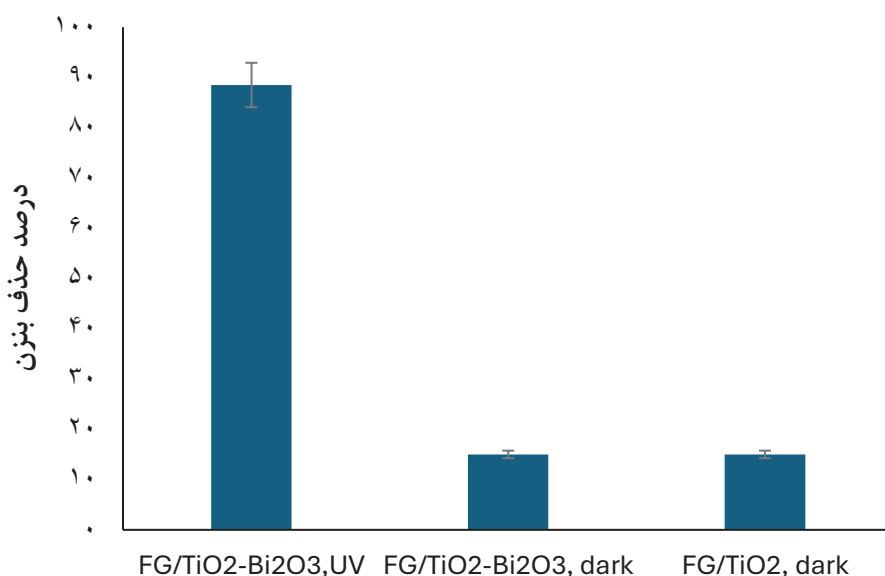
شکل ۴- ایزوترم جذب سطحی بنزن روی $\text{FG/Bi}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$

که راندمان حذف در غلظت ۳۹ ppm برابر با ۲۶ درصد، در ۱۹۵ ppm برابر با ۶ درصد و در غلظت ۷۸۲ ppm برابر با ۲/۵ درصد بدست آمد. با استفاده از کاتالیست $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$ و تابش فرابنفش، نتایج نشان می دهد که راندمان حذف در غلظت ۳۹ ppm برابر با ۸۸ درصد، در غلظت ۱۹۵ ppm برابر با ۱۸ درصد و در غلظت ۷۸۲ ppm برابر با ۲۱ درصد بود.

در شکل ۵ حذف غلظت های مختلف بنزن با استفاده از کاتالیست های مختلف پوشش داده شده روی فوم شیشه در زمان تابش ۷۵ min نشان داده شده است. ملاحظه می شود که با استفاده از کاتالیست TiO_2 با تابش فرابنفش راندمان حذف بنزن در غلظت ۳۹ ppm برابر با ۷۶ درصد، ۱۹۵ ppm برابر با ۱۸ درصد و ۷۸۲ ppm برابر با ۱۵ درصد بود. با استفاده از کاتالیست Bi_2O_3 و تابش نور مرئی نتایج نشان می دهد



شکل ۵- اثر نوع کاتالیست بر حذف فتوکاتالیستی غلظت های مختلف بنزن از هوا (دما 50°C ، زمان تابش ۷۵ min، رطوبت نسبی ۳۰ درصد، دبی پمپ ۴ L/min)

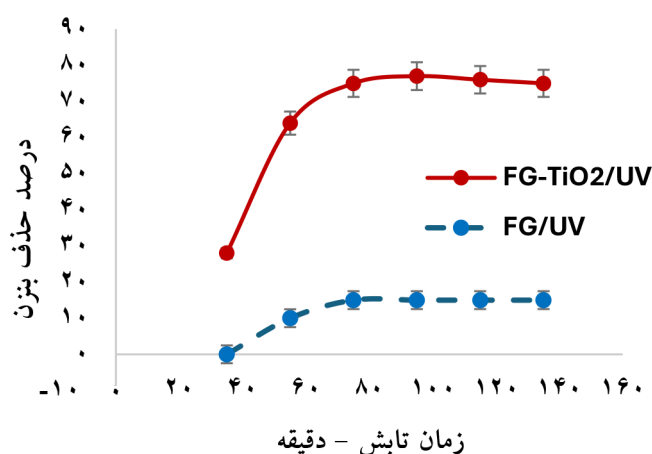


شکل ۶- حذف بنزن با استفاده از فتوکاتالیست کامپوزیت $\text{FG/Bi}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ و مقایسه با شاهد (جذب سطحی)

(غلظت ۳۹ ppm، دما ۴۰ °C، رطوبت نسبی ۳۰ درصد، دبی پمپ ۴ L/min)

۸۸ درصد نشان می دهد در حالی که در راکتورهای شاهد فاقد تابش فرابنفش (تاریکی)، حدود ۱۵ درصد حذف مشاهده شد.

شکل ۶ حذف بنزن با غلظت ۳۹ ppm با استفاده از بستر پوشش داده شده با $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$ با تابش فرابنفش را بیش از

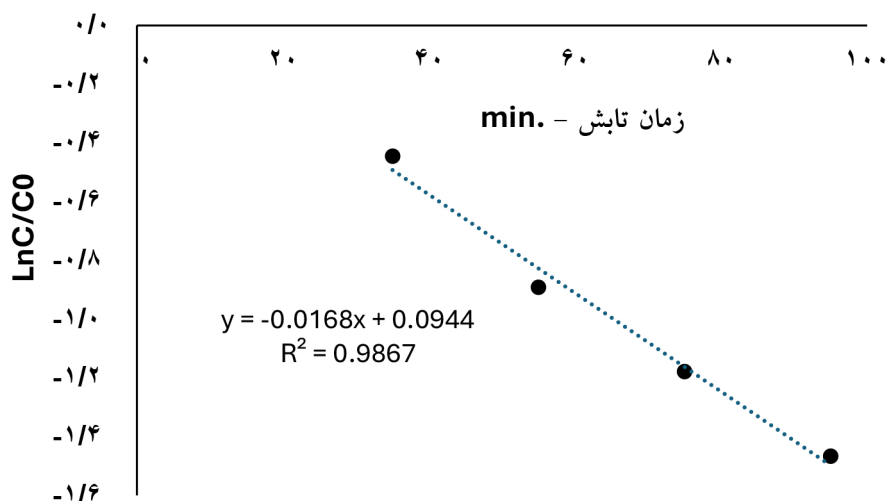


شکل ۷- اثر زمان تابش فرابنفش بر میزان حذف بنزن (۳۹ ppm) با استفاده از فوم شیشه پوشش داده با TiO_2 در

مقایسه با فوم شیشه فاقد کاتالیست (غلظت ۳۹ ppm، دما ۴۰ °C، رطوبت نسبی ۳۰ درصد، دبی ۴ L/min)

در شکل ۷ حذف بنزن با استفاده از فوم شیشه پوشش داده شده با TiO_2 در مقایسه با فوم شیشه فاقد کاتالیست با تابش فرابنفش نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می شود حذف بنزن

به میزان ۷۵ درصد با استفاده از فوم شیشه حاوی TiO_2 با تابش فرابنفش بدست آمده است در حالی که با همین بستر فاقد کاتالیست با تابش فرابنفش راندمان حذف ۱۵ درصد بود.



شکل ۸- سینتیک فرایند فتوکاتالیستی حذف بنزن (۳۹ ppm) توسط $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$ پوشش داده شده روی فوم شیشه

در شکل ۸ نمودار سینتیک درجه یک برای فرایند حذف فتوکاتالیستی بنزن از هوا با کاربرد فتوکاتالیست کامپوزیت $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$ پوشش داده شده روی فوم شیشه نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود ایجاد خط راست با $R^2 = 0.9867$ نشان دهنده تبعیت سینتیک فرایند از مدل سینتیکی درجه یک می باشد.

بحث

ایزوترم جذب - واجذب نیتروژن در دمای ۷۷ K مربوط به نمونه های فوم شیشه پوشش داده شده با $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$ نشان دهنده وجود حلقه هیسترسیس و تأیید کننده این موضوع است که ایزوترم بصورت ترکیبی از نوع یک و نوع چهار بر اساس طبقه بندی IUPAC است (۲۷). بر اساس طبقه بندی IUPAC از شش نوع حلقه هیسترسیس شناسائی شده، نمودار نشان داده شده در شکل ۴ از نوع H_3 بوده و نشان

دهنده وجود مزوحفره (۲ تا ۵۰ nm) در فوم شیشه است، در حالی که ایزوترم نوع I مشخصه مواد ریز متخلخل با جذب قابل توجه در ریز منافذ در فشارهای نسبی کم است؛ ایزوترم نوع IV مشخصه مواد با منافذ ساین متوسط (مزوپور) است که در آن عمل تراکم فاز بخار در منافذ میکرو اتفاق می افتد (۳۰). در مطالعه ای نمونه های آناتاز TiO_2 دوپ شده با Bi^{3+} به روش سنتز هیدروترمال سل-ژل تهیه شد. نتایج آزمون های تعیین خصوصیات نشان می دهد که یون های دوپ شده Bi^{3+} فاز آناتاز TiO_2 را تغییر نمی دهند. یافته های این مطالعه نشان داد که تخریب فتوکاتالیستی فنل توسط نور UV-vis با استفاده از TiO_2 دوپ شده با ۵ درصد وزنی Bi^{3+} ، کلسینه شده در دمای 600°C با درجه معدنی سازی نزدیک به ۱۰۰ درصد دارای راندمان بالاتری نسبت به TiO_2 بوده است که با یافته های مطالعه حاضر همخوانی دارد (۳۱). در یک مطالعه روش هیدروترمال دو مرحله ای برای سنتز

دارای ساختار کریستالی آنتاز بدون ناخالصی است. با توجه به نتایج مطالعات فوتوکاتالیستی، کاتالیزور Bi-TiO_2 فعالیت کاتالیزوری بهبود یافته ای را در تخریب برای MB نشان داد و گسترش دامنه پاسخ طیفی را نشان داد که به ناحیه مرئی منتقل شده است. تخریب MB در حضور Bi-TiO_2 پس از ۱۸۰ min تابش نور مرئی به ۷۰٪ درصد رسید. کاهش قابل توجهی در فعالیت کاتالیزوری MB در طول پنج چرخه در تست قابلیت استفاده مجدد مشاهده نشد، که نشان می‌دهد کاتالیزور Bi-TiO_2 در طول زمان، پایداری و عملکرد خود را بخوبی حفظ می‌کند (۲۱).

حذف فوتوکاتالیستی بنزن (۱۶۰ ppm) از هوا با استفاده از کامپوزیت $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ با تابش نور مرئی (۵۰۰ W) مورد بررسی قرار گرفت. مقدار ۱/۳۵ g فوتوکاتالیست کامپوزیتی (به قطر دانه های ۰/۲۱ تا ۰/۲۵ mm) در یک فتوراکتور کوارتز به ابعاد ۰/۱×۳×۴ cm قرار داده شد. مقادیر Bi_2O_3 در کامپوزیت ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۶۵ درصد جداگانه تهیه و مورد آزمایش قرار گرفت. با استفاده از کامپوزیت حاوی ۱۰ درصد اکسید بیسموت و تابش نور مرئی به مدت ۵ h، راندمان حذف بنزن به حدود ۷۵ درصد رسید و غلظت CO_2 تولید شده به حدود ۲۰۰ ppm افزایش یافت. در حالی که در همین شرایط با تابش فرابنفش، حداکثر راندمان حذف بنزن حدود ۱۵ درصد بود که موجب تولید ۸۰ ppm CO_2 گردید. با افزایش درصد بیسموت راندمان حذف بنزن کاهش یافت و در کامپوزیت حاوی ۶۵ درصد اکسید بیسموت راندمان حذف بنزن به کمتر از ۵ درصد رسید. آزمایشات در شرایط مشابه با استفاده از کاتالیست TiO_2 (P25) و تابش فرابنفش نیز انجام شد که نشان داد راندمان حذف بنزن حدود ۵ درصد با تابش فرابنفش به مدت ۸ h بود که غلظت CO_2 تولید شده به حدود ۲۵ ppm رسید. با استفاده از Bi_2O_3 و تابش نور مرئی حذف بنزن مشاهده نشد. در مطالعه حاضر نیز حذف بنزن توسط Bi_2O_3 با تابش نور مرئی مورد آزمایش قرار گرفت که کارایی قابل توجهی نداشته است که با یافته های مطالعات قبلی در

فوتوکاتالیست ناهمگون $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ مورد استفاده قرار گرفت. با کاربرد دوزهای مختلف LiOH ، TiO_2 بصورت میله های عمودی شاخه دار روی شیشه هادی الکتریسیته (FTO) رشد نمود، بگونه ای که نانوذرات Bi_2O_3 روی شاخه های TiO_2 قرار گرفته بودند. فوتوکاتالیست $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$ فعالیت فوتوکاتالیستی بالاتری را با پایداری بالا در زیر نور مرئی نشان داد که بسیار بالاتر از TiO_2 و Bi_2O_3 خالص بود (۱۷) که در مطالعه حاضر نیز استفاده از Bi_2O_3 به همراه TiO_2 موجب افزایش حدود ۱۵ درصدی کارایی حذف بنزن شده است.

در مطالعه دیگری عملکرد فوتوکاتالیستی نانوذرات ZnO دوپ شده با Bi برای تخریب چهار رنگ آلی تحت نور خورشید مورد بررسی قرار گرفت. عملکرد فوتوکاتالیستی نانوذرات ZnO دوپ شده با Bi برای تخریب آلاینده های برموتیمول بلو و اریوکروم بلک T بهتر از متیل رد و بروموکروزول گرین بود. علیرغم همه اینها، نانوذرات ZnO دوپ شده با Bi می توانند تمام رنگ های آزمایش شده را با کارایی بالا و بدون هیچ عامل کمکی حذف کنند (۲۸).

در یک مطالعه فوتوکاتالیست $\text{Gd-Bi}_2\text{O}_3$ در مقایسه با Bi_2O_3 فاقد Gd، کارایی فوتوکاتالیستی بیشتری در جهت تخریب رنگ‌ها تحت تابش فرابنفش نشان داد. افزایش فعالیت فوتوکاتالیستی $\text{Gd-Bi}_2\text{O}_3$ به کاهش شکاف انرژی در Bi_2O_3 بواسطه دوپ شدن Gd^{3+} نسبت داده شد (۳۲).

در مطالعه دیگری گزارش شده است که فعالیت فوتوکاتالیست $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{Bi}_2\text{O}_3$ بیشتر از $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ ، $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ، TiO_2 و Bi_2O_3 خالص بود. فعالیت فوتوکاتالیستی بیشتر کامپوزیت به دلیل وجود SiO_2 (موجب افزایش سطح تماس و گروه های هیدروکسیل) و همچنین تشکیل اتصالات ناهمگون بین TiO_2 و Bi_2O_3 و افزایش کارایی جداسازی الکترون-حفره نسبت داده شده است (۲۰).

در یک مطالعه فوتوکاتالیست TiO_2 دوپ شده با بیسموت (Bi-TiO_2) با موفقیت با استفاده از روش سل-ژل به کمک سورفاکتانت تهیه شد. مشخص شد که کاتالیزور Bi-TiO_2

این زمینه مطابقت دارد.

در یک مطالعه فتوکاتالیست کامپوزیت ناهمگون در نسبت های مختلف Bi/Ti با اضافه نمودن مقادیر مختلف Bi_2O_3 به کلئید TiO_2 تهیه شد. مشخص شد که بارگذاری بیش از ۵ درصد مولی Bi_2O_3 می تواند منجر به تشکیل Bi_xTiO_y شود. داده های XRD نشان داد که Bi_xTiO_y تادمای 500°C آمورف باقیمانده و در دمای بالاتر 700°C به فاز متمایز $\text{Bi}_2\text{Ti}_4\text{O}_{11}$ متبلور می شود. علاوه بر این، دمای کلسینه نیز تأثیر مهمی بر فعالیت فتوکاتالیستی داشت. مشخص شد که TiO_2 حاوی ۱۰ درصد مولی Bi کلسینه شده در دمای 400°C ، بهترین فعالیت فتوکاتالیستی را نشان داد. ریزساختارهای آمورف Bi_xTiO_y تشکیل شده در کریستال TiO_2 سهم قابل توجهی در ایجاد سطح ویژه بیشتر و افزایش فعالیت فتوکاتالیستی دارند. Zuo و همکاران (۲۷) اشاره کردند که دوپ نمودن بیسموت باعث می شود که TiO_2 با یون های Bi^{3+} واکنش داده و Bi_xTiO_y را تولید کند که منجر به کاهش شکاف انرژی می شود و انرژی آستانه برای فعال سازی نور کاهش می یابد و به طور بالقوه باعث افزایش فعالیت فتوکاتالیستی می شود. Xu و همکاران فعالیت فتوکاتالیستی بیشتر در TiO_2 دوپ شده با Bi بالاتر از ۱ درصد را به تشکیل فاز $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ در TiO_2 نسبت دادند. Mazurkevich و همکار (۲۹) گزارش نمودند که کاهش فعالیت فتوکاتالیستی در غلظت های زیاد Bi_2O_3 ، ممکن است به دلیل تشکیل تیتانات های بیسموت باشد که فعالیت فتوکاتالیستی کمتری دارند.

نتیجه گیری

در این مطالعه حذف بنزن در غلظت اولیه ۳۹ ppm از هوا طی

فرایند فتوکاتالیستی با استفاده از کامپوزیت $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$ پوشش داده شده روی فوم شیشه تحت تابش فرابنفش (UV-A) حدود ۹۰ درصد بدست آمد و در مقایسه با فوم شیشه TiO_2 که ۷۵ درصد بود حدود ۱۵ درصد بیشتر است که علت آن را می توان به جلوگیری از ترکیب مجدد الکترون-حفره توسط Bi_2O_3 نسبت داد. همچنین حذف بنزن طی فرایند جذب سطحی توسط TiO_2 و $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$ پوشش داده شده روی فوم شیشه حدود ۱۵ درصد بدست آمد. با افزایش غلظت بنزن کارایی فرایند کاهش یافت. سینتیک فرایند درجه یک تعیین گردید. از جمله محدودیت های این مطالعه در نظر نگرفتن اثر پارامترهای دما، رطوبت و دوز کاتالیست بر میزان حذف بنزن بود که پیشنهاد می شود در مطالعات بعدی بررسی های بیشتری در این زمینه صورت پذیرد.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان همه نکات اخلاقی از جمله عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده ها و داده سازی را در این مقاله رعایت کرده اند. کد اخلاق این تحقیق IR.MAZUMZ.REC.1398.6828 ثبت شده است.

تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل طرح تحقیقاتی با عنوان "حذف بنزن از هوا با استفاده از فتوکاتالیست TiO_2 بارگذاری شده با Bi_2O_3 با تابش نور مرئی و فرابنفش" با کد ۶۸۲۶ مصوب معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی مازندران است که نویسندگان بدین وسیله از آن معاونت محترم تشکر و قدردانی می نمایند.

References

1. Kumari P, Soni D, Aggarwal SG. Benzene: A critical review on measurement methodology, certified reference material, exposure limits with its impact on human health and mitigation strategies. *Environmental Analysis, Health and Toxicology*. 2024;39(2):e2024012.
2. Masekameni MD, Moolla R, Gulumian M, Brouwer D. Risk assessment of benzene, toluene, ethyl benzene, and xylene concentrations from the combustion of coal in a controlled laboratory environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2019;16(1):95.
3. Zare Jeddi M, Yunesian M, Ahmadkhaniha R, Kashani H, Rastkari N. Semi quantitative and quantitative health risk assessment of gas station workers exposure to benzene. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2015;8(3):391-400 (in Persian).
4. Mai JL, Yang WW, Zeng Y, Guan YF, Chen SJ. Volatile organic compounds (VOCs) in residential indoor air during interior finish period: Sources, variations, and health risks. *Hygiene and Environmental Health Advances*. 2024;9:100087.
5. Sekar A, Varghese GK, Varma MR. Analysis of benzene air quality standards, monitoring methods and concentrations in indoor and outdoor environment. *Heliyon*. 2019;5(11):e02918.
6. Notario A, Gutierrez Alvarez I, Adame JA. Atmospheric benzene measurements in the main metropolitan and industrial areas of Spain from 2014 to 2017. *Atmospheric Research*. 2020;238:104896.
7. Xu F, Wang B, Hu J, Cai N, Han L, Jiang M, et al. Optimization of benzene exposure risk assessment: An integrated approach utilizing internal and external concentrations with a focus on biomarkers S-PMA & t, t-MA. *Science of the Total Environment*. 2024;926:171719.
8. Mobasser S, Wager Y, Ditttrich TM. Indoor air purification of volatile organic compounds (VOCs) using activated carbon, zeolite, and organosilica sorbents. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2022;61(20):6791-801.
9. Almaie S, Vatanpour V, Rasoulifard MH, Koyuncu I. Volatile organic compounds (VOCs) removal by photocatalysts: A review. *Chemosphere*. 2022;306:135655.
10. Thiruvengkatachari R, Vigneswaran S, Moon IS. A review on UV/TiO₂ photocatalytic oxidation process (Journal Review). *Korean Journal of Chemical Engineering*. 2008;25(1):64-72.
11. Haghighat Mamaghani A, Haghighat F, Lee CS. Photocatalytic oxidation technology for indoor environment air purification: The state-of-the-art. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2017;203:247-69.
12. Xiong L, Tang J. Strategies and challenges on selectivity of photocatalytic oxidation of organic substances. *Advanced Energy Materials*. 2021;11(8):2003216.
13. Na Phattalung S, Harding DJ, Pattanasattayavong P, Kim H, Lee J, Hwang DW, et al. Band gap narrowing of TiO₂ nanoparticles: A passivated Co-doping approach for enhanced photocatalytic activity. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2022;162:110503.
14. Rastkari N, Izadpanah F. Photocatalytic removal of formaldehyde from air using titanium oxide-reduced graphene composite. *Iranian Journal*

- of Health and Environment. 2016;9(1):139-46 (in Persian).
15. Imai K, Fukushima T, Kobayashi H, Higashimoto S. Visible light responsive TiO₂ for the complete photocatalytic decomposition of volatile organic compounds (VOCs) and its efficient acceleration by thermal energy. *Applied Catalysis B: Environment and Energy*. 2024;346:123745.
 16. Jiang D, Otitoju TA, Ouyang Y, Shoparwe NF, Wang S, Zhang A, et al. A review on metal ions modified TiO₂ for photocatalytic degradation of organic pollutants. *Catalysts*. 2021;11(9):1039.
 17. Huang Y, Wei Y, Wang J, Luo D, Fan L, Wu J. Controllable fabrication of Bi₂O₃/TiO₂ heterojunction with excellent visible-light responsive photocatalytic performance. *Applied Surface Science*. 2017;423:119-30.
 18. Ho CH, Chan CH, Huang YS, Tien LC, Chao LC. The study of optical band edge property of bismuth oxide nanowires α -Bi₂O₃. *Optics Express*. 2013;21(10):11965-72.
 19. Sharma S, Sharma A, Chauhan NS, Tahir M, Kumari K, Mittal A, et al. TiO₂/Bi₂O₃/PANI nanocomposite materials for enhanced photocatalytic decontamination of organic pollutants. *Inorganic Chemistry Communications*. 2022;146:110093.
 20. Ren C, Qiu W, Zhang H, He Z, Chen Y. Degradation of benzene on TiO₂/SiO₂/Bi₂O₃ photocatalysts under UV and visible light. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. 2015;398:215-22.
 21. Altın I. Bi doped TiO₂ as a Photocatalyst for enhanced photocatalytic activity. *Sakarya University Journal of Science*. 2023;27(3):660-69.
 22. Goutham R, Badri Narayan R, Srikanth B, Gopinath K. Supporting materials for immobilisation of nano-photocatalysts. In: Inamuddin, Sharma G, Kumar A, Lichtfouse E, Asiri A, editors. *Nanophotocatalysis and Environmental Applications: Materials and Technology*. Switzerland: Springer Cham; 2019. p. 49-82.
 23. Cruz GM, Murr CG, Stafin G, Grzebielucka EC, Borges CPF, Arrua MEP, et al. A novel foam glass obtained from solid waste: A sustainable strategy for application in the degradation of an environmental pollutant. *Ceramics International*. 2022;48(18):26351-60.
 24. Murr CG, Kozlinskei LL, Grzebielucka EC, Borges CP, Arrua MEP, de Souza EC, et al. Foamed glass functionalized with iron compounds: A strategic material for heterogeneous photocatalysis. *Materials Chemistry and Physics*. 2023;304:127880.
 25. Kumari P, Garg G, Soni D, Aggarwal SG. Measurement of benzene and other volatile organic compounds: implications for its inhalation health risk associated with the workers at a fuel station in Delhi. *Asian Journal of Atmospheric Environment*. 2023;17(7):1-11.
 26. Fu S, Fang Q, Li A, Li Z, Han J, Dang X, et al. Accurate characterization of full pore size distribution of tight sandstones by low-temperature nitrogen gas adsorption and high-pressure mercury intrusion combination method. *Energy Sciences & Engineering*. 2021;9(1):80-100.
 27. Zuo H, Sun J, Deng R, Su R, Wei F, Wang D. Preparation and characterization of Bi³⁺-TiO₂ and its photocatalytic activity. *Chemical Technology Engineering*. 2007;30(5):577-82.
 28. Honarmand M, Sanandaji F. Intensified photodegradation of organic dyes using Bi-doped ZnO nanoparticles. *Journal of Geomine*.

- 2023;1(4):159-64.
29. Mazurkevich YS, Kobasa IM. TiO₂-Bi₂O₃ materials. *Inorganic Materials*. 2002;38:522-26.
30. Rahman MM, Muttakin M, Pal A, Shafiullah AZ, Saha BB. A statistical approach to determine optimal models for IUPAC-classified adsorption isotherms. *Energies*. 2019;12(23):4565.
31. Murcia Lopez S, Hidalgo M, Navio J. Synthesis, characterization and photocatalytic activity of Bi-doped TiO₂ photocatalysts under simulated solar irradiation. *Applied Catalysis A: General*. 2011;404(1-2):59-67.
32. Dhanasekarana E, Sivakumarb N, Sriharanc N. Enhanced photocatalytic degradation of Gd-doped Bi₂O₃ for selective dyes under UV light irradiation. *Journal of Optoelectronic and Biomedical Materials*. 2022;14(3):77-87.



Available online: <https://ijhe.tums.ac.ir>

Original Article



Benzene removal from air using $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ photocatalyst coated on glass foam under ultraviolet light irradiation

Ramazanali Dianati Tilaki^{1,*}, Roghayeh Kaseb¹, Esmail Babanejad Arimi¹, Mohammad Dianati²

1- Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran

2- Department of Thermokinetics and Catalysis, Faculty of Chemical Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

ARTICLE INFORMATION:

Received: 23 July 2025

Revised: 15 October 2025

Accepted: 20 October 2025

Published: 14 December 2025

Keywords: Foam glass, Benzene, Air, Photocatalyst, $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$

ABSTRACT

Background and Objective: Benzene is a carcinogenic volatile organic compound commonly found in polluted air. This study aimed to remove benzene from air using a $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$ composite photocatalyst immobilized on glass foam under ultraviolet (UV) light irradiation.

Materials and Methods: Glass foam coated with the $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$ composite was placed in a quartz reactor, which was connected to an air pump inside a sealed glass chamber. A UV lamp (254 nm) was installed next to the reactor. Known volumes (μL) of benzene were injected into the chamber through a septum. When the pump was activated, benzene-contaminated air passed through the photoreactor. Benzene concentration was measured by collecting air samples from the chamber and analyzing them using a GC-FID device.

Results: XRD spectra and SEM images confirmed the presence of TiO_2 and Bi_2O_3 , while BET analysis verified the mesoporous structure of the composite photocatalyst. The surface adsorption of benzene by the composite was 15% and followed the Langmuir model. The process kinetics were first-order, and the removal efficiency decreased with increasing benzene concentration. At a benzene concentration of 39 ppm, the removal efficiency after 75 minutes of TiO_2 and UV irradiation was 75%, whereas for $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$ under similar conditions, the efficiency increased to approximately 90%.

Conclusion: Using a $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$ composite photocatalyst under UV-A irradiation improved benzene removal efficiency by about 15% compared with TiO_2 alone.

***Corresponding Author:**

dianati.tilaki@gmail.com

Please cite this article as: Dianati Tilaki R, Kaseb R, Babanejad Arimi E, Dianati M. Benzene removal from air using $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ photocatalyst coated on glass foam under ultraviolet light irradiation. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2025;18(3):489-504.

