ORIGINAL ARTICLE

Photocatalytic Removal of Toluene from Air Using Glass Foam Coated with Titanium Dioxide Nanoparticles

Ramazan Ali Dianati Tilaki[1],
Seyedeh Maryam Adhami[2],
Esmaeil Babanejad Arimi[3]

[1] Associate Professor, Department of Environmental Health, Faculty of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran
[2] MSc in Environmental Health, Faculty of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran
[3] Assistant Professor, Department of Environmental Health, Faculty of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran

(Received January 8, 2023 ; Accepted June 24, 2023)

Abstract

Background and purpose: Toluene, is usually present in gasoline, thinner, and other petroleum products and is one of the volatile organic compounds that causes air pollution and adverse health effects. The aim of this study was to determine the kinetics of toluene removal from the air by photocatalytic method using foam glass coated with titanium dioxide nanoparticles.

Materials and methods: In this experimental study, a glass chamber was used as a closed space. A quartz tube filled by glass foam coated with titanium dioxide nanoparticles was used as air filter. The air filter was placed inside the chamber and an air suction pump was connected to it and a UV lamp was installed next to the air filter. Toluene was injected into the chamber. The contaminated air was passed through the filter and circulated in the chamber. Air samples were taken from the chamber and concentration of toluene was analyzed by Gas Chromatograph.

Results: Brunauer-Emmett-Teller (BET) analysis showed that the average diameter of pores in glass foam was 6 nm and the specific surface area of foam glass was 36 m^2/g. The SEM images confirmed coating of titanium dioxide on the surface of glass foam. Toluene removal without UV irradiation was 46%, 40%, and 37%, for 18.5, 37, and 55.5 mg/m^3, respectively in 2 hour contact time, but in the presence of UV radiation the toluene removal was 100%, 95%, and 90%, respectively in contact time of 80 min. The kinetics of toluene decomposition was pseudo first order.

Conclusion: Glass foam can be used as a photocatalyst stabilization base to remove BTEX from the air. This is a suitable method in removing volatile organic compounds from the air in closed spaces.

Keywords: glass foam, photocatalyst, toluene, air, titanium dioxide

J Mazandaran Univ Med Sci 2023; 33 (223): 105-118 (Persian).

Corresponding Author: Ramazan Ali Dianati Tilaki - Faculty of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran. (E-mail: dianati.tilaki@gmail.com)

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-07]

پژوهشی

مجله دانشگاه علوم پزشکی مازندران
دوره سی و سوم شماره 223 مرداد سال 1402 (118-105)

حذف فتوکاتالیستی تولوئن از هوا با استفاده از فوم شیشه پوشش داده شده با نانوذرات دی اکسید تیتانیوم

رمضانعلی دیانتی تیلکی[1]
سیده مریم ادهمی[2]
اسماعیل بابانژاد آریمی[3]

چکیده

سابقه و هدف: تولوئن که به‌طور معمول در بنزین، تینر و سایر ترکیبات نفتی وجود دارد، یکی از ترکیبات آلی فرار است که موجب آلودگی هوا و اثرات سوء بهداشتی می‌شود. هدف از این مطالعه تعیین سینتیک حذف تولوئن از هوا به روش فتوکاتالیستی با استفاده از فوم شیشه پوشش داده شده با نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بود.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه تجربی یک محفظه شیشه‌ای به‌عنوان فضای بسته مورد استفاده قرار گرفت. یک لوله کوارتز پر شده با فوم شیشه حاوی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم به‌عنوان فیلتر هوا در داخل محفظه قرار گرفت و یک پمپ مکش هوا به آن متصل و یک لامپ UV در کنار آن نصب گردید. تولوئن به داخل محفظه تزریق شد. هوای آلوده از فیلتر عبور و در محفظه به گردش در آمد. نمونه‌های هوا از محفظه گرفته و غلظت تولوئن به‌وسیله گاز کروماتوگراف آنالیز شد.

یافته‌ها: آنالیز BET نشان داد میانگین قطر منافذ فوم شیشه، 6 نانومتر و سطح ویژه 36 مترمربع برگرم است. تصاویر SEM نشان داد پوشش دی‌اکسید تیتانیوم روی سطح فوم شیشه صورت گرفت. در زمان تماس 2 ساعت و بدون تابش UV، میزان حذف تولوئن برای غلظت‌های 18/5، 37 و 55/5 میلی‌گرم بر متر مکعب، به‌ترتیب 46، 40 و 37 درصد بود. در زمان تماس 80 دقیقه و با تابش UV، میزان حذف تولوئن به‌ترتیب 100، 95 و90 درصد بود. سینتیک تجزیه تولوئن از نوع شبه درجه یک (pseudo first order) بود.

استنتاج: از فوم شیشه به‌عنوان پایه تثبیت فتوکاتالیست برای حذف BTEX از هوا می‌توان استفاده نمود. این روش می‌تواند یک راهکار برای حذف مواد آلی فرار از هوا در فضاهای بسته باشد.

واژه‌های کلیدی: فوم شیشه، فتوکاتالیست، تولوئن، هوا، دی اکسید تیتانیوم

مقدمه

ترکیبات آلی فرار (VOCs) عمدتا شامل هیدروکربن‌های آروماتیک، آلیفاتیک، آلدئیدها، کتون‌ها، اترها، الکل‌ها و اسیدهای آلی می‌باشند، که نقطه جوش کم‌تر از 100 درجه سلسیوس دارند. منابع مصنوعی انتشار VOCs شامل صنایع شیمیایی و پتروشیمی در تولید حلال‌ها، رنگ‌ها، روان کننده‌ها، چسب‌ها، تبخیر مشتقات نفتی و احتراق سوخت‌های فسیلی می‌باشند(1). ترکیبات BTEX شامل بنزن، تولوئن، اتیل بنزن و زایلن از جمله ترکیبات سمی VOCs هستند.

مولف مسئول: رمضانعلی دیانتی تیلکی - ساری: کیلومتر 17 جاده فرح آباد، مجتمع دانشگاهی پیامبر اعظم، دانشکده بهداشت E-mail: dianati.tilaki@gmail.com
1. دانشیار، گروه بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران
2. کارشناس ارشد بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران
3. استادیار، گروه بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران
تاریخ دریافت : 1401/10/18 تاریخ ارجاع جهت اصلاحات : 1401/10/26 تاریخ تصویب : 1402/4/3

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-07]

آلودگی هوای محیط و داخل ساختمان‌ها به‌وسیله ترکیبات BTEX ازمسائل مهم بهداشتی محسوب می‌شود. تولوئن یکی از متداول‌ترین VOCs در فضاهای بسته می‌باشد(2). در معرض قرار گرفتن با تولوئن در درجه اول بر سیستم عصبی مرکزی (CNS) تأثیر می‌گذارد و منجر به خستگی، سرگیجه، سردرد و حالت تهوع می‌شود. تولوئن هم‌چنین بر چشم‌ها، پوست و سیستم تنفسی تأثیر گذاشته و در نتیجه باعث تحریک و ناراحتی تنفسی می‌شود. تماس طولانی مدت با تولوئن منجر به لوسمی غیرلنفوسیتی، ناهنجاری‌های کروموزومی و تحریک اعصاب محیطی می‌شود. استنشاق بخارات تولوئن سبب بروز عوارض عصبی مزمن ازجمله کاهش در تفکر و حافظه، ضعف عضلات و هم‌چنین کاهش شنوایی و بینایی می‌گردد(3). برای تولوئن سطح مواجهه مرجع (REL) برای اثر مزمن420 میکروگرم بر متر مکعب (0/11ppm)، برای تماس 8 ساعته 830 میکروگرم بر مترمکعب (0/22ppm) و برای اثر حاد 5000 میکروگرم بر متر مکعب (1/3ppm) می‌باشد(4). برای تماس دائم با تولوئن بدون اثر سوء قابل مشاهده (NOAEL) غلظت 0/26 میلی‌گرم بر مترمکعب در هوا و در مطالعات مربوط به تماس شغلی کم‌ترین غلظت تولوئن در هوا برای ایجاد اثر سوء قابل مشاهده (LOAEL) 332 میلی‌گرم بر مترمکعب (88ppm) گزارش شده است(5).

در مطالعه‌ای غلظت تولوئن در هوای تنفسی کارگران شاغل در یک مجتمع پتروشیمی با میانگین 15 و حداکثر 140 میلی‌گرم بر مترمکعب گزارش شده است(6). در مطالعه دیگری میانگین غلظت تولوئن در هوای تنفسی یک کارخانه تولید کفش، 72 میلی‌گرم بر متر مکعب اندازه‌گیری شده است(7). غلظت تولوئن در هوای یک منطقه صنعتی در اندونزی 105 میلی‌گرم بر متر مکعب بیان شد(8). هم‌چنین در یک تحقیق، میانگین غلظت تولوئن در هوای خروجی از یک زباله سوز بیمارستانی 108 میلی‌گرم بر مترمکعب گزارش شده است(9). روش‌های مختلفی برای حذف تولوئن از هوا مورد مطالعه قرار گرفته است که می‌توان به روش‌های حذف با استفاده از بیوفیلتر و مواد جاذب سطحی و تجزیه فتوکاتالیستی به‌وسیله نور فرابنفش اشاره نمود(10،11). هر کدام از این روش‌ها مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند. عمده‌ترین محدودیت‌های بیوفیلتر ،کم بودن میزان تجزیه بیولوژیکی، افت فشار زیاد و تولید لجن می‌باشند(12). از جمله محدودیت‌های سایر روش‌های حذف BTEX از هوا می‌توان به قیمت بالای ماده جاذب، کارآئی کم در غلظت‌های پائین و تولید پسماند ماده جاذب حاوی ماده خطرناک اشاره نمود(13). یکی از روش‌های حذف ترکیبات آلی از هوا، اکسیداسیون فتوکاتالیستی می‌باشد. در این روش با تابش نور UV به نانوذرات نیمه رسانا مانند دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2)، الکترون از نوارظرفیت به نوار هدایت برانگیخته می‌شود که نتیجه آن تشکیل حفره (h^+) به‌عنوان عامل اکسیدکننده در نوار ظرفیت و الکترون (e^-) به‌عنوان عامل احیاکننده در نوار هدایت می‌باشد و موجب اکسیداسیون و تجزیه ماده آلی می‌شود(14). مراحل اکسیداسیون فتوکاتالیستی را می‌توان با روابط زیر نشان داد:

$$TiO_2 + h\upsilon \longrightarrow TiO_2(e^- + h^+)$$
$$OH^- + h^+ \longrightarrow OH^\circ$$
$$H_2O + h^+ \longrightarrow OH^\circ + H^+$$
$$OH^\circ + \text{ترکیبات آلی} \longrightarrow CO_2 + H_2O$$

تحقیقات متعددی در باره حذف ترکیبات BTEX از هوا به روش اکسیداسیون فتوکاتالیستی انجام شده است که از آن جمله می‌توان به حذف تولوئن با استفاده از صفحات فوم شیشه پوشیده شده با نانوذرات دی اکسید تیتانیوم(15)، حذف تولوئن از هوا با استفاده از سرامیک ساختمانی پوشش داده شده با نانوذرات دی اکسید تیتانیوم(16)، حذف تولوئن از هوا به روش ازن زنی با استفاده از فوم شیشه پوشش داده شده با نانو ذرات اکسید روتنیوم(17)، حذف فتوکاتالیستی تولوئن از هوا با تابش نور فرابنفش(18)، حذف فتوکاتالیستی تولوئن با استفاده از کاتالیست‌هایی بر پایه بیسموت و حذف

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-07]

فتوکاتالیستی تولوئن از هوا به روش فتوکاتالیستی پلاسما اشاره نمود(20،19). یکی از محصولاتی که از شیشه‌های بازیافتی تولید می‌شود فوم شیشه (Glass Foam) می‌باشد. با توجه به ماهیت فرایند تولید فوم شیشه که موجب شکل‌گیری حفره‌های زیادی در آن می‌شود، این ماده دارای وزنی سبک بوده و عایق رطوبت، صدا و گرما می‌باشد. فوم شیشه کاربردهای متعددی مانند ساخت بلوک‌های ساختمانی سبک عایق صدا وگرما و هم‌چنین عایق نمودن لوله‌های آب گرم و سرد و عایق‌بندی سردخانه‌ها و غیره دارد(22،21). در کارخانجات تولید فوم شیشه مقدار زیادی کلوخه‌های فوم شیشه به‌صورت پسماند ایجاد می‌شود. با توجه به وجود منافذ در این کلوخه‌ها، انتظار می‌رود بتوان از این ماده به‌عنوان پایه نگه‌دارنده و تثبیت نانوذرات دی اکسید تیتانیوم استفاده نمود. در این مطالعه امکان استفاده از کلوخه‌های فوم شیشه پوشش داده شده با نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در فرایند فتوکاتالیستی برای حذف تولوئن از هوا در غلظت‌های موجود در محیط‌های کار(9-6) مورد مطالعه قرار گرفته است که تکراری نبوده و نوآوری محسوب می‌شود. هدف از این مطالعه تعیین میزان حذف فتوکاتالیستی تولوئن از هوا با استفاده از فیلتر حاوی کلوخه‌های فوم شیشه پوشش شده با نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید(FG/TiO_2) با تابش نور فرابنفش و تعیین سینتیک جذب می‌باشد.

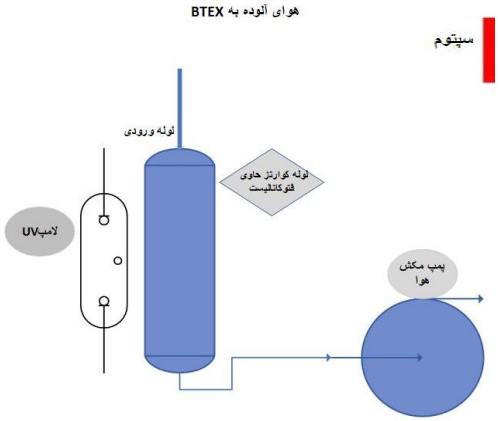
مواد و روش‌ها

این مطالعه تجربی، در مقیاس پایلوت انجام شد. ابتدا یک اتاقک شیشه‌ای مکعب مستطیلی درپوش دار به حجم 70 لیتر جهت شبیه سازی فضای بسته ساخته شد. تست‌های نشت یابی به منظور اطمینان از درزگیری کامل و عدم نشت گاز در اتاقک انجام شد. یک استوانه از جنس کوارتز به قطر 3 و ارتفاع 10 سانتی‌متر دارای لوله ورودی وخروجی به‌عنوان فیلتر مورد استفاده قرار گرفت. در این مطالعه، از کلوخه‌های فوم شیشه که به‌صورت پسماند در کارخانه فوم شیشه آذر جام آمل تولید می‌شود به‌عنوان پایه نگه دارنده و تثبیت نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم استفاده شد. با استفاده از الک‌های مش 4 و 10، کلوخه‌های فوم شیشه در محدوده قطرهای 2 تا 5 میلی‌متر انتخاب شد. به‌منظور تهیه فوم شیشه پوشش داده شده با کاتالیست(FG/TiO_2)، 3گرم از نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم (به فرم آناتاز) به مخلوط 75 میلی‌لیتر آب مقطر و 75 میلی‌لیتر اتانول اضافه شد و پس از هم زدن، سوسپانسیون شیری رنگ به‌دست آمد. پس از آن 15 گرم فوم شیشه به داخل سوسپانسیون اضافه و به‌مدت 4 ساعت روی شیکر با سرعت 130rpm قرار گرفت و در مرحله آخر کل محتویات ظرف پس از خشک شدن در دمای 70 درجه سانتی‌گراد به داخل فیلتر (لوله کوارتزی) اضافه شد(15). سپس فیلتر کوارتزی مورد اشاره در داخل اتاقک شیشه‌ای نصب گردید. لامپUV-C (مدل فیلیپس با توان 16 وات به طول 20 و قطر 1/9 سانتی‌متر) در فاصله2سانتی‌متری فیلتر درون اتاقک قرار داده شد. پیک طول موج منتشره برای لامپ UV-C 253/7 نانومتر و شدت UV در سطح فیلتر برابر با 2/34 میلی‌وات بر سانتی‌متر مربع بود(18). جهت حفاظت در برابر اشعه UV، اطراف اتاقک شیشه‌ای با ورق آلومینیومی پوشانده شد. پمپ مکش هوا در درون اتاقک قرارگرفت و با یک لوله رابط به قسمت پائین فیلتر متصل شد. با روشن شدن پمپ، هوای درون اتاقک با دبی 5 لیتر بر دقیقه با عبور از فیلتر سیرکوله می‌شد. با تزریق حجم‌های معین از تولوئن از طریق سپتوم، غلظت‌های اولیه 18/5، 37/5 و 55/5 میلی گرم بر مترمکعب (معادل با 5، 10 و 15ppm) از تولوئن در داخل اتاقک ایجاد می شد. علت انتخاب این محدوده از غلظت تولوئن این است که براساس مطالعات مروری انجام شده غلظت تولوئن در هوای تنفسی برخی از صنایع در این محدوده می‌باشد(9-6). در هر مرحله از آزمایش در زمان تماس‌های مختلف (15 الی120دقیقه)، یک میلی لیتر از هوای داخل اتاقک به‌وسیله سرنگ

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-07]

مخصوص برداشته شده و به دستگاه GC تزریق می‌شد. در پایان هر مرحله از آزمایش با استفاده از یک پمپ مکش هوای قوی، محتویات اتاقک تخلیه و پس از اطمینان از عدم وجود آلودگی آزمایشات قبلی (با نمونه‌گیری و تزریق به دستگاه GC) آزمایشات جدید انجام می‌شد. به منظور تعیین میزان حذف تولوئن طی فرایند جذب سطحی، آزمایشات تعیین میزان جذب تولوئن به‌وسیله FG/TiO_2 بدون تابش UV نیز انجام شد. تعداد نمونه‌های مورد آزمایش برای سه سطح غلظت و شش زمان تماس به روش فول فاکتوریل با 3 تکرار در دو حالت با تابش و بدون تابش UV جمعا 108 نمونه و به منظور تعیین ایزوترم جذب نیز 15 نمونه مورد بررسی قرار گرفت. دستگاه کروماتوگرافی گازی مورد استفاده مدل Chrompack-CP 9001 مجهز به آشکار ساز یونش شعله‌ای (FID) دارای ستون موئینه به طول 30 متر و قطر داخلی 0/25 میلی‌متر بود. از نیتروژن خالص به عنوان گاز حامل با دبی 2 میلی‌لیتر در دقیقه استفاده گردید. دمای اولیه آون دستگاه GC 32 درجه سانتی‌گراد بود که با نرخ 5 درجه سانتی‌گراد در دقیقه تا 100 درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. دمای انژکتور 250 و دمای آشکارساز 270 درجه سانتی‌گراد تنظیم شد(15). برای رسم منحنی کالیبراسیون از محلول استاندارد BTEX استفاده شد. در تصویر شماره 1 پایلوت آزمایشگاهی ساخته شده مورد استفاده در این تحقیق نشان داده شده است.





تصویر شماره 1: تصویر و شماتیک پایلوت آزمایشگاهی ساخته شده سیستم مورد آزمایش

مدل سینتیک جذب سطحی و تجزیه تولوئن

مدل سینتیکی Langmuir-Hinshelwood (L-H) که معمولا برای فرایندهای فتوکاتالیستی تجزیه مواد آلی قابل کاربرد می باشد در معادله شماره 1 نشان داده شده است:

معادله شماره 1:
$$-\frac{dC}{dt}=\frac{K_r K_e C}{1+K_e C}$$

در این رابطه C غلظت ماده آلی تجزیه شونده (mg/m^3)، K_r ثابت سرعت واکنش $(mg/m^3.min.)$ و k_e ثابت تعادل جذب سطحی ماده آلی در سطح کاتالیست (m^3/mg) می‌باشند. عبارت K_rK_e به‌صورت کلی به‌عنوان ثابت سرعت ظاهری $(K_{app};min^{-1})$ بیان می‌شود. که پس از جایگذاری و باز نویسی به‌صورت معادله شماره 2 نوشته می‌شود.

معادله شماره 2:
$$-\frac{dC}{dt}=\frac{K_{app} C}{1+K_e C}$$

در اغلب مطالعات فتوکاتالیستی به دلیل غلظت های پائین ماده تجزیه شونده حاصل ضرب K_eC عددی بسیار کوچک خواهد شد($k_eC<<1$) لذا رابطه فوق را می‌توان به‌صورت معادله شماره 3 نوشت.

معادله شماره 3:
$$-\frac{dC}{dt}=K_{app}\,C$$

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-07]

اما در صورتی که حاصل ضرب K_eC خیلی بزرگ‌تر از یک شود ($K_eC>>1$) رابطه به‌صورت سینتیک درجه صفر در می‌آید که نشان می‌دهد مکان‌های جذب زیادی از کاتالیست توسط مولکول‌های ماده تجزیه شونده، اشغال شده‌اند (معادله شماره 4).

معادله شماره 4: $-\frac{dC}{dt} = \frac{K_{app}}{K_e}$

به‌صورت کلی می‌توان معادله شماره 5 را برای فرایندهای کاتالیستی هتروژن به‌کار برد(23).

معادله شماره 5: $-\frac{dC}{dt} = K_{app}C_{eq}^{n}$

در معادله شماره6، n درجه واکنش است و C_{eq} غلظت تعادلی جزء واکنش‌دهنده و $r=\frac{dC}{dt}$ می‌باشد. چنان‌چه از طرفین تساوی فوق لگاریتم گرفته شود خواهیم داشت:

معادله شماره 6: $\text{Log } r=\text{Log } K_{app} + n\text{Log } C_{eq}$

با رسم نمودار Log r در مقابل C_{eq} خط راستی حاصل می شود که شیب آن درجه سینتیکی واکنش می‌باشد. چنان چه واکنش فتوکاتالیستی مورد نظر درجه اول سینتیکی باشد می‌توان معادله شماره 7 را نوشت:

معادله شماره 7: $\text{Ln}(\frac{C_0}{C})=K_{app}t$

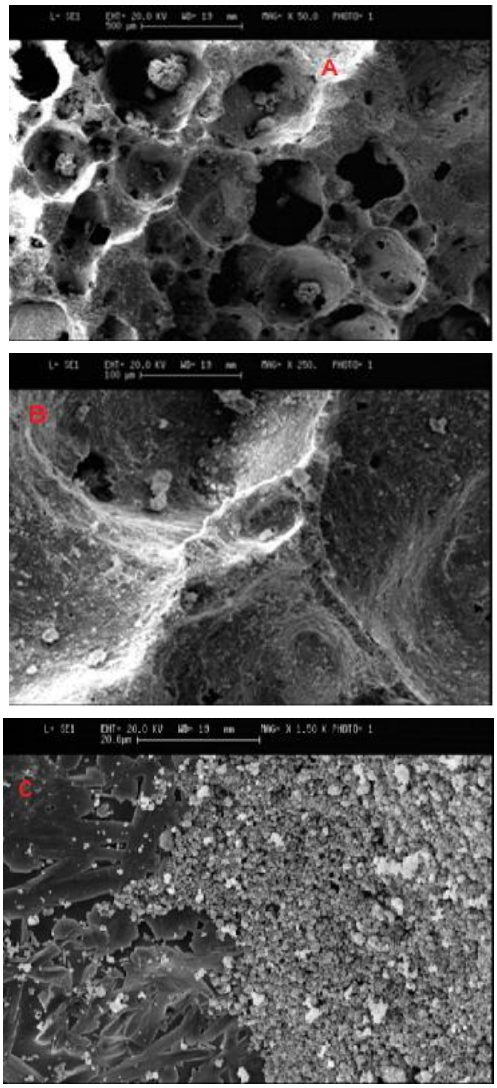
که با رسم نمودار $\text{Ln}(C_0/C)$ در مقابل زمان تابش(t) خطی راست با شیب K_{app} به‌دست می‌آید. چنان‌چه رابطه L-H را به فرم خطی بنویسیم خواهیم داشت (معادله شماره8):

معادله شماره 8: $=\frac{1}{k_r} + \frac{1}{k_r k_e C_r}\frac{11}{}$

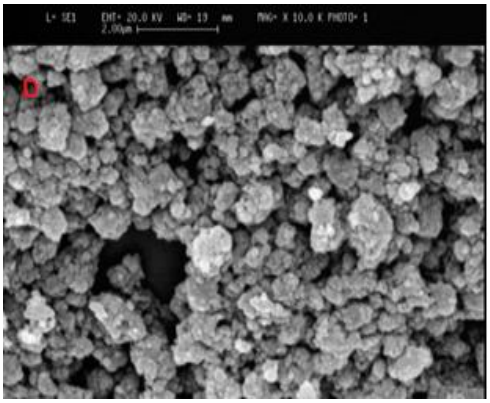
با رسم نمودار 1/r در مقابل 1/C خطی راست بدست می آید که با استفاده از شیب و عرض از مبدا آن، می توان ثابت واکنش تجزیه فتوکاتالیستی (k_r) و ثابت تعادل جذب سطحی (k_e) را محاسبه نمود(24).

یافته‌ها

به منظور تائید تشکیل پوشش لایه دی اکسید تیتانیوم روی سطح فوم شیشه، تصاویر میکروسکوپ الکترونی از فوم شیشه تهیه شد. هم‌چنین به منظور تعیین خصوصیات فوم شیشه از نظر سطح ویژه، اندازه و حجم منافذ آزمایش BET انجام شد. طیف XRD به منظور مشخص نمودن پوشش نانوذرات دی اکسید تیتانیوم آناتاز روی سطح فوم شیشه انجام شد. در تصویر شماره 2 تصاویر میکروسکوپ الکترونی با بزرگنمائی‌های مختلف از فوم شیشه پوشش داده شده با TiO_2 نشان داده شده است.



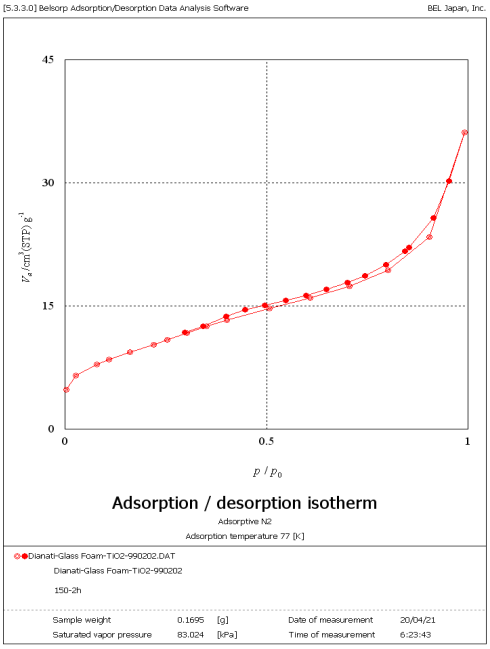
[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-07]



تصویر شماره 2: تصاویر میکروسکوپ الکترونی فوم شیشه پوشیده شده با TiO_2–A: 50 برابر، B: 250 برابر، C: 1500 برابر، D:10000 برابر

در تصاویر A و B تصویر شماره2 که با بزرگنمائی‌های به‌ترتیب 50 و 250 برابر می‌باشد، منافذ باز در فوم شیشه به وضوح دیده می‌شود. تصاویر C و D در تصویر شماره2 نشان می‌دهند که TiO_2در سطح فوم شیشه به صورت لایه سفید رنگ تقریبا یکنواخت پوشش داده شده است.

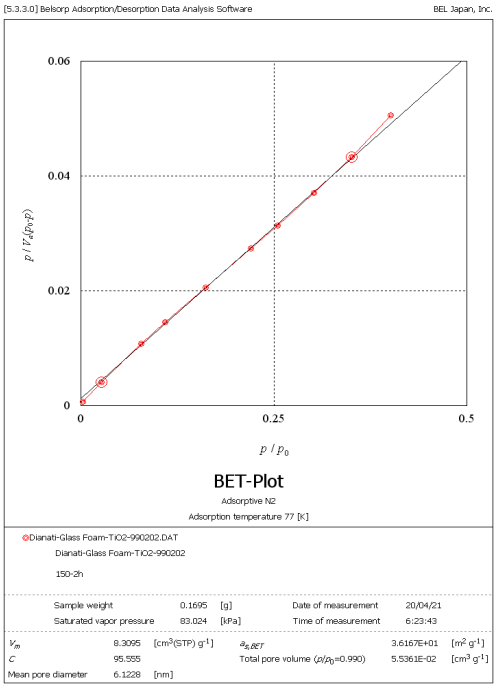
نمودار شماره 1، ایزوترم جذب- واجذب نیتروژن در دمای 77 درجه کلوین مربوط به نمونه‌های فوم شیشه پوشانده شده با TiO_2را نشان می‌دهد.



نمودار شماره 1: ایزوترم جذب- واجذب نیتروژن روی فوم شیشه

ایزوترم جذب به دست آمده به‌صورت ترکیبی از ایزوترم نوع I (جذب سطحی گاز در فشار پائین) و ایزوترم نوع IV (در محدوده فشار متوسط) براساس طبقه‌بندی IUPAC می‌باشد.

نمودارشماره 2 ایزوترم BET مربوط به جذب سطحی گاز نیتروژن دردمای 77 درجه کلوین روی نمونه فوم شیشه پوشانده شده با TiO_2 را نشان می‌دهد. سطح ویژه به‌دست آمده برای فوم شیشه 36 m^2/g و حجم کل منافذ 0/055 Cm^3/g و میانگین قطر منافذ حدود 6 نانومتر به دست آمده که وجود منافذ مزوپور را تائید می‌کند.

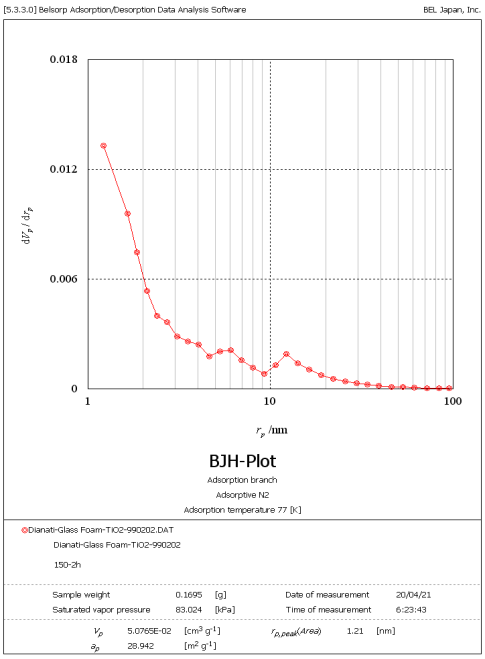


نمودار شماره2: ایزوترم BET به‌دست آمده از جذب نیتروژن روی فوم شیشه

نمودار شماره 3 نمودار مربوط به داده‌های واجذب نیتروژن به منظور تعیین توزیع اندازه منافذ در فوم شیشه مورد آزمایش را به روش Barrett-Joiner-Halenda (BJH) نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود حجم منافذ در محدوده‌ای از اندازه قطر 0/04 cm^3/g و سطح ویژه منافذ در محدوده‌ای از قطر 15 m^2/g به‌دست آمد که

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-07]

کم‌تر از مقادیر به‌دست آمده در ایزوترم BET می‌باشند زیرا در ایزوترم BJH حجم منافذ وسطح ویژه درمحدوده قطر منافذ به‌دست می‌آیند(25).



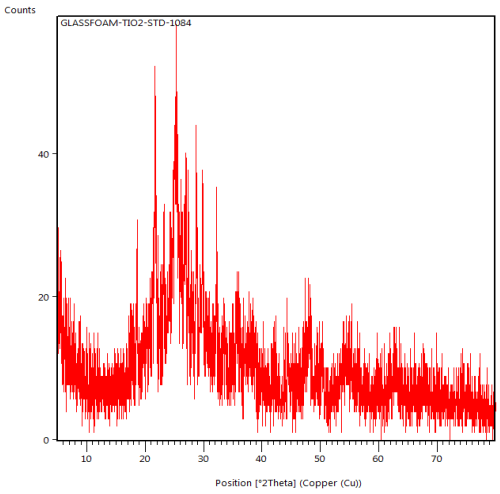
نمودار شماره 3: نمودار جذب BJH-Plot برای گلس فوم بارگذاری شده با TiO_2

در نمودار شماره 4 طیف پراش اشعه ایکس (XRD) مربوط به نمونه فوم شیشه پوشیده شده با TiO_2 نشان داده شده است. با توجه به‌وجود نوار آمورف در محدوده زاویه 2θ برابر 25 تا 28 درجه می‌توان وجود این نوار را به سیلیس موجود در فوم شیشه نسبت داد. هم‌چنین وجود پیک‌ها در محدوده زاویه 2θ برابر 18 تا 25 درجه تائیدکننده وجود TiO_2 در سطح فوم شیشه می‌باشد(26).

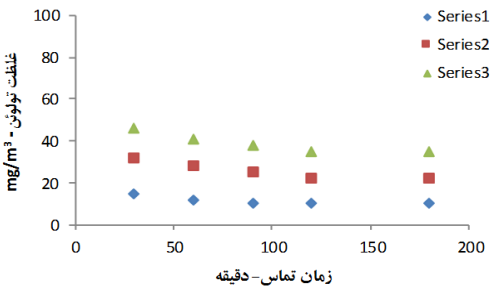
در نمودار شماره 5 میزان کاهش غلظت تولوئن در هوا ناشی از جذب روی سطوح فوم شیشه حاوی کاتالیست بدون تابش UV را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد حداکثر راندمان حذف طی فرایند جذب سطحی پس از 3 ساعت زمان تماس برای غلظت‌های 18/5، 37 و 55/5 میلی‌گرم بر مترمکعب به‌ترتیب 46 ، 40 و 37 درصد به‌دست آمد.

در نمودار شماره 6 راندمان حذف غلظت‌های مختلف تولوئن با استفاده از FG/TiO_2 و تابش UV را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود بیش‌ترین میزان حذف تولوئن در طی 40 دقیقه تابش صورت گرفته است. در تحقیقی مشابه با غلظت‌های اولیه 346، 866، 1618 و 2890 میلی‌گرم بر مترمکعب از تولوئن در محفظه 1/5 لیتری، حداکثر حذف تولوئن طی 10 تا 35 دقیقه گزارش شد(15).

در نمودار شماره 7 تغییرات سرعت تجزیه تولوئن برحسب زمان تابش نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود نمودار تا زمان 60 دقیقه شیب تندی دارد که نشان‌دهنده سرعت بالای تجزیه فتوکاتالیستی تولوئن می‌باشد و سپس با گذشت زمان از سرعت تجزیه کاسته می‌شود.

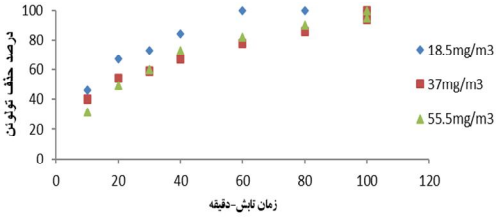


نمودار شماره 4: طیف XRD نمونه فوم شیشه پوشانده شده با TiO_2

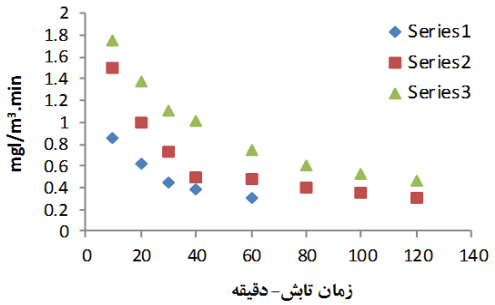


نمودار شماره 5: تغییرات میزان کاهش غلظت‌های مختلف تولوئن با استفاده از فوم شیشه بدون تابش UV

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-07]



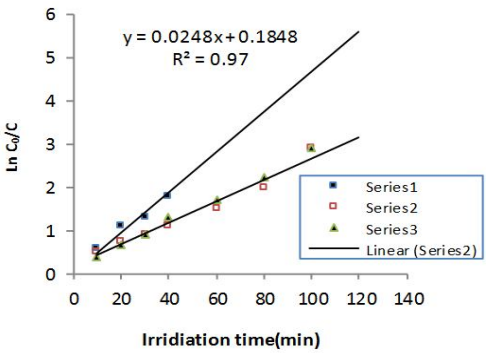
نمودار شماره 6: درصد حذف غلظت‌های مختلف تولوئن بر حسب زمان تابش



نمودار شماره 7: نمودار تغییرات سرعت تجزیه فتوکاتالیستی تولوئن بر حسب زمان تابشUV

با فرض سینتیک درجه یک برای تجزیه تولوئن نمودار Ln C_0/C در مقابل t در نمودار شماره 8 نشان داده شده است. در این نمودار کمی انحراف از خط راست (R^2=0/97) تائیدکننده این موضوع است که سینتیک این واکنش‌ها شبه درجه یک (pseudo first-order) می‌باشد.

ثابت سرعت واکنش (k) برای غلظت‌های مختلف تولوئن محاسبه شد که در جدول شماره 1 نشان داده شده است.

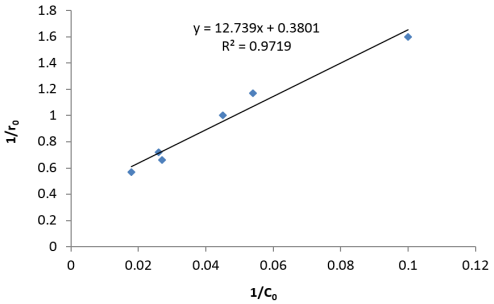


نمودار شماره 8: نمودار سینتیک درجه اول تجزیه فتوکاتالیستی تولوئن

جدول شماره 1: مقادیر ثابت سرعت واکنش تجزیه تولوئن برای غلظت‌های اولیه مختلف

C_0(mg/m³)	k (min⁻¹)
18/5	0/046
37	0/027
55/5	0/029

در نمودار شماره 9 داده‌های مربوط به $1/r_0$ در مقابل $1/C_0$ براساس مدل (L-H) رسم شده است(27). با استفاده از رابطه شماره 8 ثابت سرعت واکنش تجزیه (k_r) برابر با 2/63 mg/m³.min و ثابت فرایند جذب سطحی (K_e) برابر با 0/029 m³/mg به‌دست می‌آید.



نمودار شماره 9: نمودار ایزوترم جذب سطحی - تجزیه فتوکاتالیستی(L-H)

بحث

همان‌گونه که در قسمت یافته‌ها ملاحظه می‌شود در زمان تماس 120 دقیقه میزان حذف تولوئن بوسیله فوم شیشه دارای پوشش تیتانیوم دی‌اکسید بدون تابش نور UV حدود 40 درصد بود که این میزان در حضور تابش UV در زمان تماس80 دقیقه به بیش از 90 درصد افزایش یافت. در مطالعه ای حذف فتوکاتالیستی تولوئن از هوا در یک محفظه به حجم 560 میلی‌لیتر در غلظت‌های کم (17 تا 35 ppb) و غلظت زیاد (23 تا 465 ppm) با استفاده از سفال پوشش داده شده با TiO_2 و تابش UV مورد مطالعه قرار گرفت که در غلظت‌های کم، راندمان حذف تولوئن 63 درصد بود، در حالی که در غلظت‌های زیاد تولوئن، راندمان حذف 78 درصد با سرعت تجزیه 100 mg h^{-1} m^{-2} به‌دست آمد(16). به‌دلیل وجود گروه‌های

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-07]

هیدروکسیل (OH^-) به میزان زیاد در سطح TiO_2، جذب مولکول‌های دارای حلقه بنزنی به سطح کاتالیست با ایجاد کمپلکس با الکترون‌های پیوند π ایجاد می‌شود(28).

در مطالعه‌ای حذف فتوکاتالیستی تولوئن از هوا با استفاده از ساچمه‌های شیشه‌ای پوشش داده شده با TiO_2 (مشابه روش انجام شده در این تحقیق) با تابش نور UV مورد بررسی قرارگرفت که یافته‌های آن نشان داد هنگامی که غلظت تولوئن کم‌تر از 175 میلی‌گرم بر متر مکعب بود، حذف کامل آن از هوا طی 180 دقیقه زمان تابش صورت پذیرفت، اما در غلظت‌های بالاتر (261، ۳۱۴،۴۹۲ و 646 میلی‌گرم بر مترمکعب) با افزایش غلظت تولوئن راندمان حذف کم‌تری مشاهده شد، که البته طی 10 دقیقه ابتدای تابش، غلظت تولوئن کاهش چشم گیری نشان می‌داد، اما با افزایش زمان تابش از راندمان حذف تولوئن کاسته می‌شد. در مطالعه دیگری گزارش شده است که کاهش راندمان حذف تولوئن با گذشت زمان را می‌توان با استفاده از فتوکاتالیست بیسموت اکسی یدید (BiOI) به حداقل رساند(19).

درنمودار شماره7، نمودارهای سرعت حذف غلظت‌های مختلف تولوئن بر حسب زمان نشان داده شده است که ملاحظه می‌شود با گذشت زمان با کم شدن غلظت اولیه تولوئن از سرعت حذف آن کاسته می‌شود که با الگوی سینتیک درجه یک سازگاری دارد. الگوی راندمان حذف در غلظت‌های اولیه مختلف به گونه‌ای است که که براساس آن در غلظت‌های کم ماده تجزیه شونده (تولوئن) سرعت واکنش فتوکاتالیستی تابع غلظت بوده و با این‌که سرعت واکنش به آرامی افزایش می‌یابد، اما کارآئی تجزیه کاهش پیدا می‌کند. اما در غلظت‌های زیاد که سرعت واکنش مستقل از غلظت است (سینتیک درجه صفر) کارائی تجزیه کاهش خواهد یافت(18). در پژوهشی اکسیداسیون فتوکاتالیستی تولوئن با استفاده از نانوذرات TiO_2 و تابش UV مورد بررسی قرار گرفت، که نشان می‌دهد از لحظه شروع تابش UV به مدت 40 دقیقه سرعت تجزیه تولوئن زیاد بوده و پس از آن به تدریج کاهش یافت که با الگوی نمودار شماره 8 مطابقت دارد(28). حذف فتوکاتالیستی BTEX در غلظت‌های 0/1 تا 2 ppm با استفاده از کاتالیست TiO_2 داپ شده با کربن و نیتروژن با تابش نور مرئی مورد بررسی قرارگرفت. یافته‌ها نشان داد که درصد حذف تولوئن با غلظت 2ppm پس از یک ساعت تماس به میزان 5 درصد بوده در حالی که تولوئن با غلظت 0/1 ppm به میزان 80 درصد حذف شده است(27). در مطالعه دیگری حذف فتوکاتالیستی تولوئن از جریان گاز با استفاده از حلقه‌های سرامیکی راشیگ بعنوان پایه تثبیت TiO_2 با تابش UV مورد بررسی قرار گرفت که در آن تابش UV با استفاده از لامپ 15 واتی با طول موج 254 نانومتر صورت گرفت. غلظت‌های اولیه تولوئن در محدوده 100 تا 500 ppb بود. راندمان حذف تولوئن از هوا در محدوده 30 تا 90 درصد به‌دست آمد(29). یافته‌های آزمایشات مربوط به تعیین ایزوترم جذب نشان می‌دهد که فرایند جذب سطحی و تجزیه تولوئن با استفاده از فوم شیشه حاوی نانوذرات TiO_2و تابش UV با مدل لانگ موئیر- هینشل وود مطابقت دارد. پیشرفت‌های اخیر در تجزیه فتوکاتالیستی ترکیبات BTEX از هوا مورد بررسی قرار گرفته و گزارش شده است که این مولکول‌ها ابتدا روی سطح کاتالیست جذب سطحی شده و سپس الکترون- حفره تشکیل شده طی واکنش‌های فتوکاتالیستی موجب اکسیداسیون و تجزیه این ترکیبات می‌شود. هم‌چنین گزارش شده است که تجزیه فتوکاتالیستی این ترکیبات از مدل لاگ موئیر- هینشل وود تبعیت می‌نماید(30). با استفاده از رابطه 8 ثابت سرعت واکنش تجزیه(k_r) برابر با $2/63\ mg/m^3.min$ و ثابت فرایند جذب سطحی(K_e) برابر با $0/029\ m^3/mg$ به‌دست می‌آید. در مطالعه‌ای که با هدف تجزیه فتوکاتالیستی تولوئن با استفاده از TiO_2 و تابش نور فرابنفش انجام شد بر اساس مدل L-H مقدار k_r برابر با $11/47\ mg/m^3.min$ و مقدار K_e برابر با $0/004\ m^3/mg$ به‌دست آمد که با نتایج به‌دست آمده از این مطالعه همخوانی دارد(31).

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-07]

ایزوترم جذب- واجذب نیتروژن در دمای 77 درجه کلوین مربوط به نمونه‌های فوم شیشه پوشانده شده با نانوذرات TiO_2 نشان‌دهنده وجود حلقه هیسترزیس و تائیدکننده این موضوع است که ایزوترم به‌صورت ترکیبی از نوع یک و نوع چهار براساس طبقه‌بندی آیوپاک می‌باشد. در واقع وقتی مولکول‌های یک ماده در فاز بخار وارد منافذ یک جسم متخلخل می‌شوند، متراکم شده و به‌صورت یک لایه نازک مایع در می‌آید که این پدیده را تراکم موئینگی (capillary condensation) می‌گویند، که در ایزوترم جذب– واجذب نیتروژن به‌صورت حلقه هیسترسیس (hysteresis loop) ظاهر می‌شود(32). براساس طبقه‌بندی IUPAC شش نوع حلقه هسترسیس شناسائی شده است که نمودار نشان داده شده در نمودار شماره 1 از نوع H_3 بوده و نشان‌دهنده وجود مزوحفره (2 تا 50 نانومتر) در فوم شیشه می‌باشد(33). در حالی که ایزوترم نوع I مشخصه مواد ریز متخلخل با جذب قابل توجه در ریز منافذ در فشارهای نسبی کم می‌باشد، ایزوترم نوع IV مشخصه مواد با منافذسایز متوسط (مزوپور) است که در آن عمل تراکم فاز بخار در منافذ میکرو اتفاق می‌افتد(34).

به‌طور کلی می‌توان گفت که در دهه اخیر تجزیه فتوکاتالیستی ترکیبات BTEX از هوا مورد توجه محققین قرار گرفته و زمینه‌های کاربرد این روش‌ها فراهم شده و دربعضی صنایع در حال حاضر مورد آزمایش قرار گرفته و در حال توسعه می‌باشد(۳۶،۳۵). در این مطالعه تجزیه فتوکاتالیستی و حذف تولوئن از هوای یک محیط بسته در مقیاس پایلوت آزمایشگاهی (bench scale) با تابش اشعه UV با استفاده از فوم شیشه به‌عنوان پایه تثبیت فتوکاتالیست نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم با موفقیت انجام شد. نتایج مطالعه حاضر نشان داد فوم شیشه به‌عنوان یک ماده زائد بی‌خطر می‌تواند به‌عنوان بستر تثبیت کاتالیست مورد استفاده قرار گیرد. در تصاویر میکروسکوپ الکترونی پوشش TiO_2 در منافذ موجود درساختار تخلخلی فوم شیشه قابل مشاهده می‌باشد، که این پوشش به‌صورت یکنواخت صورت گرفته است. هم‌چنین روند تجزیه فتوکاتالیستی تولوئن نشان داده که فرایند تجزیه فتوکاتالیستی تولوئن با این روش از نوع سینتیک شبه درجه یک و از مدل لانگ موئیر– هینشل وود تبعیت می‌نماید، که از این روابط می‌توان در طراحی فتوراکتورهای کاتالیستی برای حذف ترکیبات آلی فرار از هوا استفاده نمود. پیشنهاد می‌شود این مطالعه در مقیاس پایلوت نیمه صنعتی در محیط واقعی انجام شود تا بتوان علاوه بر رفع محدودیت غیرواقعی بودن شرایط، میزان هزینه- اثربخشی را نیز تعیین نمود.

سپاسگزاری

این مقاله حاصل بخشی از پایان نامه کارشناسی ارشد بهداشت محیط و طرح تحقیقاتی مصوب با کد اخلاق IR.MAZUMS.REC.1398.5075 می‌باشد. بدین‌وسیله از معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی مازندران بخاطر حمایت مالی از این طرح تشکر به‌عمل می‌آید.

References

1. Montero-Montoya R, López-Vargas R, Arellano-Aguilar O. Volatile organic compounds in air: sources, distribution, exposure and associated illnesses in children. Ann Glob Health 2018; 84(2): 225-238.
2. Abtahi M, Fakhri Y, Oliveri Conti G, Ferrante M, Taghavi M, Tavakoli J, et al. The concentration of BTEX in the air of Tehran: a systematic review-meta analysis and risk assessment. Int J Environ Res Public Health 2018; 15(9): 1837.
3. Masekameni MD, Moolla R, Gulumian M, Brouwer D. Risk assessment of benzene, toluene, ethyl benzene, and xylene concentrations

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-07]

from the combustion of coal in a controlled laboratory environment. Int J Environ Res Public Health 2019; 16(1): 95.

4. Zeise L, Wang A, Dangleben NL, Dodge DE, Silva RM. Toluene Reference Exposure Levels Technical Support Document for the Derivation of Noncancer Reference Exposure Levels. In: Assessment OoEHH. USA: California Environmental Protection Agency; 2020.
5. WHO. Air quality guidelines for Europe. Geneve: WHO; 2000.
6. Shahmohammadi D, Karimi Zeverdegani S. Investigation of the Relationship between Inhaled Benzene, Toluene, Ethyl benzene, and Xylene Concentrations and the Urine Metabolites Levels in People Working at a Petrochemical Complex. Journal of Occupational Hygiene Engineering 2018; 5(2): 46-54 (Persian).
7. Maryiantari ES, Keman S. Analysis of health risk and respiratory complaints on footwear craftsman exposed to Toluene vapour. J Public Health Res 2020; 9(2): 1818.
8. Sahri M, Widajati N. Evaluation of toluene exposure in workers at industrial area of Sidoarjo, Indonesia by measurement of urinary hippuric acid. Asia Pacific Journal of Medical Toxicology 2013; 2(4): 145-149.
9. Joneydi Jaffari A, Asari MJ, Saremi M. Determination of some air pollutants emited from hospital incinerators in Hamadan in 2002. J Mazandaran Univ Med Sci 2005; 15(49): 95-102 (Persian).
10. Lara-Ibeas I, Megias-Sayago C, Rodríguez-Cuevas A, Ocampo-Torres R, Louis B, Colin S, et al. Adsorbent screening for airborne BTEX analysis and removal. J Environ Chem Eng 2020; 8(2): 103563.
11. Kim K-H, Szulejko JE, Raza N, Kumar V, Vikrant K, Tsang DC, et al. Identifying the best materials for the removal of airborne toluene based on performance metrics-A critical review. Journal of Cleaner Production 2019; 241: 118408.
12. Ferdowsi M, Khabiri B, Buelna G, Jones JP, Heitz M. Air biofilters for a mixture of organic gaseous pollutants: an approach for industrial applications. Crit Rev Biotechnol 2022: 1-16.
13. Bhave PP, Yeleswarapu D. Removal of indoor air pollutants using activated carbon—A review. Global Challenges in Energy and Environment. Lecture Notes on Multidisciplinary Industrial Engineering. Singapore: Springer; 2020: 65-75.
14. Dianati RA, Mengelizadeh N, Zazouli MA, Yazdani Cherati J, Balarak D, Ashrafi S. Photocatalytic degradation of bisphenol A by GO-TiO2 nanocomposite under ultraviolet light: synthesis, effect of parameters and mineralisation. International Journal of Environmental Analytical Chemistry 2022: 1-18.
15. Lebullenger R, Chenu S, Rocherullé J, Merdrignac-Conanec O, Cheviré F, Tessier F, et al. Glass foams for environmental applications. Journal of Non-Crystalline Solids 2010; 356(44): 2562-2568.
16. Demeestere K, Dewulf J, De Witte BD, Beeldens A, Van Langenhove H. Heterogeneous photocatalytic removal of toluene from air on building materials enriched with TiO2. Building and Environment 2008; 43(4): 406-414.
17. Cabrol A, Lejeune A, Lebullenger R, Denicourt-Nowicki A, Roucoux A, Couvert A, et al. Simulation and optimization of the removal of toluene in air by ozonation with a catalytic open-cell foam. Chemical Engineering Research and Design 2021; 168(4): 453-464.
18. Chen Z, Peng Y, Chen J, Wang C, Yin H, Wang H, et al. Performance and mechanism of photocatalytic toluene degradation and

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-07]

catalyst regeneration by thermal/UV treatment. Environmental Science & Technology 2020; 54(22): 14465-14473.

19. Wang Y, Jiang S, Liu F, Zhao C, Zhao D, Li X. Study on preparation and toluene removal of BiOI/Bi2WO6/ACF photocatalyst. Applied Surface Science 2019; 488: 161-169.
20. Bin Z, Zhang L, Yan Y, Meng L, Yimin Z. Enhancing toluene removal in a plasma photocatalytic system through a black TiO2 photocatalyst. Plasma Science and Technology 2019; 21(11): 115503.
21. da Silva RC, Puglieri FN, de Genaro Chiroli DM, Bartmeyer GA, Kubaski ET, Tebcherani SM. Recycling of glass waste into foam glass boards: A comparison of cradle-to-gate life cycles of boards with different foaming agents. Sci Total Environ 2021; 771: 145276.
22. Bai J, Yang X, Xu S, Jing W, Yang J. Preparation of foam glass from waste glass and fly ash. Materials Letters 2014; 136: 52-54.
23. Asenjo NG, Santamaria R, Blanco C, Granda M, Alvarez P, Menendez R. Correct use of the Langmuir–Hinshelwood equation for proving the absence of a synergy effect in the photocatalytic degradation of phenol on a suspended mixture of titania and activated carbon. Carbon 2013; 55: 62-69.
24. Kumar KV, Porkodi K, Rocha FA. Langmuir–Hinshelwood kinetics–a theoretical study. Catalysis Communications 2008; 9(1): 82-84.
25. Ojeda ML, Esparza JM, Campero A, Cordero S, Kornhauser I, Rojas F. On comparing BJH and NLDFT pore-size distributions determined from N2 sorption on SBA-15 substrata. Physical Chemistry Chemical Physics 2003; 5(9): 1859-1866.
26. Liu Y, Xie J, Hao P, Shi Y, Xu Y, Ding X. Study on factors affecting properties of foam glass made from waste glass. Journal of Renewable Materials 2021; 9(2): 237-253.
27. Obee TN. Photooxidation of Sub-Parts-per-Million Toluene and Formaldehyde Levels on Titania Using a Glass-Plate Reactor. Environ Sci Technol 1996; 30: 3578-3584.
28. Cao L, Gao Z, Suib SL, Obee TN, Hay SO, Freihaut JD. Photocatalytic oxidation of toluene on nanoscale TiO2 catalysts: studies of deactivation and regeneration. Journal of Catalysis 2000; 196(2): 253-261.
29. Quici N, Vera M, Choi H, Li Puma G, Dionysiou DD, Litter M, et al. Effect of key parameters on the photocatalytic oxidation of toluene at low concentrations in air under 254+185 nm UV irradiation. Applied Catalysis B: Environmental 2010; 95(S3-S4): 312-319.
30. Liang C, Li C, Zhu Y, Du X, Yao C, Ma Y, et al. Recent Advances of Photocatalytic Degradation for BTEX: Materials, Operation, and Mechanism. Chemical Engineering Journal 2022; 455(1): 140461.
31. Obee TN. Photooxidation of sub-parts-per-million toluene and formaldehyde levels on titania using a glass-plate reactor. Environ Sci Technol 1996; 30(12): 3578-3584.
32. Neimark AV, Ravikovitch PI, Vishnyakov A. Adsorption hysteresis in nanopores. Phys Rev E Stat Phys Plasmas Fluids Relat Interdiscip Topics 2000; 62(2): R1493-R1496.
33. Donohue M, Aranovich G. Adsorption hysteresis in porous solids. J Colloid Interface Sci 1998; 205(1): 121-130.
34. 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.
35. He F, Jeon W, Choi W. Photocatalytic air purification mimicking the self-cleaning process of the atmosphere. Nat Commun

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-07]

2021; 12(1): 2528.

36. Mamaghani AH, Haghighat F, Lee CS. Photocatalytic oxidation technology for indoor environment air purification: The state-of-the-art. Applied Catalysis B: Environmental 2017; 203: 247-269.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-07]