Journal of Occupational Hygiene Engineering Volume 5, Issue 2, Summer 2018, Pages: 39-45

Original Article

10.21859/johe.5.2.39

Photocatalytic Removal of Xylene Vapor from Air Flow by Using Titanium Dioxide Nanoparticles Immobilized on Synthesis Type 5 Zeolite

Hossein Ali Rangkooy[1], Atefeh Siahi Ahangar[2], Fereshteh Jahani[2,*]

[1] *Assistant Professor, Environmental Technologies Research Center, Ahvaz Jundishapur University of Medical Sciences, Ahvaz, Iran, & Department of Occupational Health Engineering, School of Health, Ahvaz Jundishapur University of Medical Sciences, Ahvaz, Iran*

[2] *M.Sc Student in Occupational Health Engineering, Jundishapour University of Medical Sciences, Ahvaz, Iran*

**** Corresponding Author:*** *Fereshteh Jahani, Jundishapour University of Medical Sciences, Ahvaz, Iran. Email: jahani.f71@gmail.com*

Received: 07/08/2018
Accepted: 15/09/2018

How to Cite this Article:
Rangkooy HA, Siahi Ahangar A, Jahani F. Photocatalytic Removal of Xylene Vapor from Air Flow by Using Titanium Dioxide Nanoparticles Immobilized on Synthesis Type 5 Zeolite. *J Occup Hyg Eng*. 2018; 5(2): 39-45. DOI: 10.21859/johe.5.2.39

Abstract

Background and Objective: Xylene is a volatile organic compound that is widely used in various industries. Xylene is hazardous not only for the environment but also for human health even in its low-risk concentrations. Today, photocatalytic removal methods has received a great deal of attention in comparison with other methods of removing pollutants. Therefore, the present study aimed to determine the efficiency of removal of xylene vapor from airflow using photocatalytic property of titanium dioxide on ZSM-5 zeolite.

Materials and Methods: In this experimental study, the characteristics of the catalysts were determined using Brunauer–Emmett–Teller, X-ray diffraction (XRD), and scanning electron microscopy scanning (FESEM). Xylene vapors were produced using a dynamical condenser system and the efficiency of xylene vapor depletion was investigated using UV / ZSM-5 / TiO_2.

Results: The obtained results of the images and spectra from XRD, EDS, and FESEM showed good signs of immobilization. The findings revealed that the removal efficiency was decreased by increasing the concentration from 50 ppm to 150 ppm and increasing the flow rate from 0.3 to 0.5. The removal efficiency at concentrations of 50, 100, and 150 was 35.46%, 22.70%, and 17.37%, respectively.

Conclusion: The results showed that the use of composite substrates increases the efficiency of photocatalytic removal, and it is suggested that these adsorption and photocatalytic combination systems can be used to remove other volatile organic compounds in the gas phase.

Keywords: Nanoparticles; Photocatalytic Removal; TiO_2; Xylene; ZSM-5 Zeolite

Copyright © 2018 Journal of Occupational Hygiene Engineering. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits copy and redistribute the material just in noncommercial usages, provided the original work is properly cite

مقاله پژوهشی
doi: 10.21859/johe.5.2.39

بررسی حذف فتوکاتالیستی بخار زایلن از جریان هوا با استفاده از نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم تثبیت‌شده بر روی زئولیت سنتزی نوع ۵

حسینعلی رنگ‌کوی[۱]، عاطفه سیاهی آهنگر[۲]، فرشته جهانی[۲،*]

[۱] مرکز تحقیقات فناوری‌های زیست محیطی، دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور اهواز، اهواز، ایران و استادیار گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور اهواز، اهواز، ایران

[۲] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور اهواز، اهواز، ایران

* **نویسنده مسئول:** فرشته جهانی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور اهواز، اهواز، ایران. ایمیل: jahani.f71@gmail.com

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۱۶
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۲۴

تمامی حقوق نشر برای دانشگاه علوم پزشکی همدان محفوظ است.

چکیده

سابقه و هدف: زایلن یک ترکیب آلی فرار است که دارای کاربرد وسیعی در صنایع مختلف می‌باشد. این ترکیب نه‌تنها برای محیط زیست؛ بلکه برای سلامت انسان حتی در غلظت‌های کم مخاطره‌آمیز است. امروزه در میان روش‌های حذف آلاینده‌ها، روش‌های حذف فتوکاتالیستی مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته‌اند. در این راستا، مطالعه حاضر با هدف تعیین کارایی حذف بخار زایلن از جریان هوا با استفاده از خاصیت فوتوکاتالیستی دی‌اکسید تیتانیوم بر روی زئولیت ZSM-5 انجام شد.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه تجربی ویژگی‌های کاتالیست‌های تولیدشده با استفاده از آنالیزهای (BET: Brunauer–Emmett–Teller)، پراش اشعه ایکس (XRD: X-Ray Diffraction) و دستگاه اسکن میکروسکوپ الکترونی روبشی (FESEM: Field Emission Scanning Electron Microscope) تعیین گردید. همچنین، بخارات زایلن با استفاده از سیستم غلظت‌ساز دینامیک تولید شدند و کارایی حذف بخار زایلن با استفاده از $UV/ZSM-5/TiO_2$ بررسی گردید.

یافته‌ها: تصاویر و طیف‌های به‌دست‌آمده از آزمون‌های XRD، EDS (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy) و FESEM نشان دادند که تثبیت به خوبی انجام شده است. بر مبنای نتایج با افزایش غلظت از ۵۰ به ۱۵۰ بخش در میلیون و با افزایش جریان ورودی از ۰/۳ به ۰/۵، کارایی حذف کاهش یافته است. میزان کارایی حذف در غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ به‌ترتیب برابر با ۳۵/۴۶، ۲۲/۷۰ و ۱۷/۳۷ درصد به‌دست آمد.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان دادند که استفاده از بسترهای ترکیبی، کارایی حذف فتوکاتالیستی را افزایش می‌دهد؛ از این رو پیشنهاد می‌شود که این سیستم‌های ترکیبی جذب و فتوکاتالیستی برای حذف سایر ترکیبات آلی فرار در فاز گازی مورد استفاده قرار گیرند.

واژگان کلیدی: حذف فتوکاتالیستی؛ دی‌اکسید تیتانیوم؛ ذرات نانو؛ زایلن؛ زئولیت سنتزی نوع ۵

مقدمه

یکی از دستاوردهای مهم بشر در سال‌های اخیر، رشد سریع صنایع مختلف و گسترش ساخت مواد شیمیایی گوناگون می‌باشد. در کنار این پیشرفت‌ها که آسایش و راحتی انسان‌ها را در پی داشته است، مسائل و مشکلات متعددی از جمله آلودگی زیست محیطی و به‌ویژه آلودگی هوا ایجاد شده است که به تدریج به یکی از دغدغه‌های مهم بشر تبدیل شده است [۱]. یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین آلاینده‌های هوا، ترکیبات آلی فرار (VOCs: Volatile Organic Compounds) می‌باشد. این ترکیبات در بسیاری از صنایع به‌عنوان حلال و سوخت‌های مایع مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲]. مهم‌ترین منابع انتشار این آلاینده‌ها، صنایع نفت و پتروشیمی، نیروگاه‌های برق و وسایل نقلیه می‌باشند [۳]. یکی از این ترکیبات آلی فرار، زایلن با فرمول شیمیایی C_8H_{10} است [۴]. زایلن یک هیدروکربن آروماتیک بی‌رنگ با طعم شیرین می‌باشد که به راحتی قابل اشتعال است. زایلن موجود در هوای اطراف شهرها و نواحی صنعتی نتیجه فعالیت‌های انسان در ارتباط با ترافیک، کاربرد سوخت‌های فسیلی، فرایندهای صنعتی و ترافیک می‌باشد. مشکلات ناشی از مواجهه با این ترکیبات باعث جلب توجه به این ماده خطرناک

شده است [۵]. با پیشرفت روزافزون صنایع و کاربرد فراوان ترکیبات آلی فرار و خطراتی که این بخارات برای کارگران دارند، پژوهشگران به دنبال روش مناسبی برای حذف آن‌ها می‌گردند. در این ارتباط، امروزه فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs: Advanced Oxidation Processes) توجه بیشتر پژوهشگران را به خود جلب نموده است. این روش یکی از بهترین و پرکاربردترین روش‌ها جهت حذف این ترکیبات می‌باشد [۶،۷]. در این روش با کمک نور UV، ترکیبات گازی مضر به مواد بی‌خطر CO_2 و H_2O تبدیل می‌شوند [۸]. در این میان، استفاده از نانوذرات به همراه اشعه UV از جمله فرایندهای مؤثر و ارزان در تبدیل مواد آلی و سمی به ترکیبات معدنی و بی‌خطر می‌باشد [۹]. سولفیدها و اکسیدهای فلزی از جمله فتوکاتالیست‌های رایج هستند که از جمله آن‌ها می‌توان به TiO_2، SnO_2، ZrO_2، ZnO، Fe_2O_3، CdS، ZnS و WO_3 اشاره کرد [۱۰]. رایج‌ترین این فوتوکاتالیست‌ها TiO_2 و ZnO هستند [۱۰]. ذرات TiO_2 با فوتون‌های پرانرژی باعث بالابردن الکترون از نوار ظرفیت به باند هدایت، در نتیجه ترک حفره‌های الکترونی می‌گردد. دی‌اکسید تیتانیوم به دلیل سمیت کم، انرژی شکاف باند بالا، ارزان‌بودن، سازگاری با محیط زیست، پایداری شیمیایی و فعالیت بالا برای حذف VOCs به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۱]. تثبیت‌سازی فتوکاتالیست بر روی ماده جاذب، کارایی حذف آلاینده را به میزان زیادی ارتقا می‌دهد [۱۲]. در میان جاذب‌های مختلفی که استفاده می‌شوند، زئولیت سنتزی ZSM-5 دارای میزان سیلیکای بالایی (SI/AL>5) می‌باشد. در حال حاضر ساخت تعداد زیادی زئولیت با میزان سیلیکای بالا به روش سنتز گزارش شده‌اند که شامل: فری سیلیکات، بروسیلیکات، FU-1، NU-1، 34، 21، 12، 11 و ZSM-5 می‌باشد که از این بین، سیلیکالیت و ZSM-5 دارای اهمیت تجاری هستند [۱۳]. با توجه به موارد بیان‌شده، مطالعه حاضر با هدف بررسی عملکرد نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم پوشش‌داده‌شده بر روی زئولیت ZSM-5 در حذف بخارات زایلن از جریان هوای آلوده انجام شد.

مواد و روش‌ها

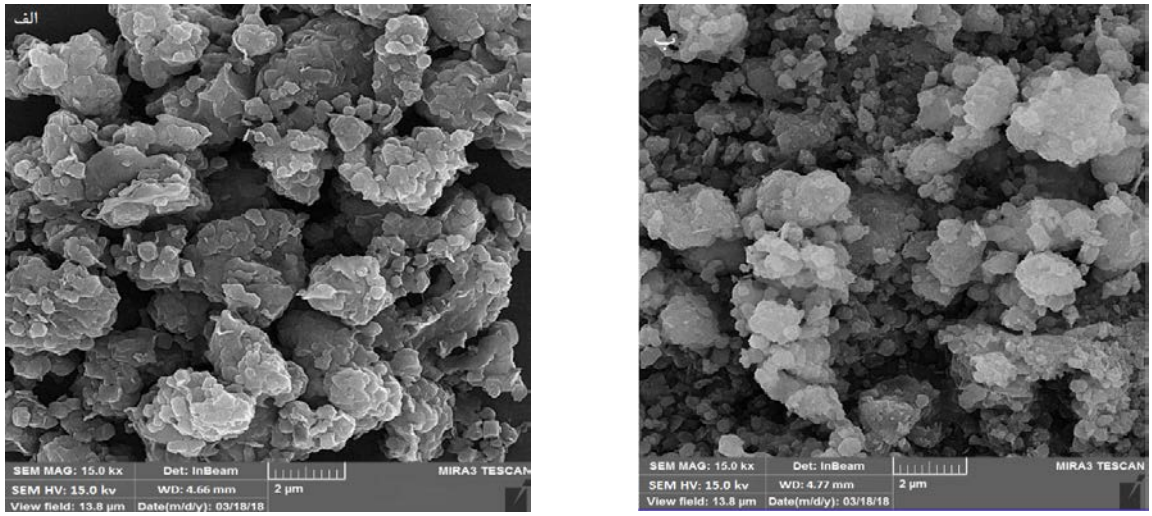
جهت انجام پژوهش حاضر، زئولیت ZSM-5 به‌صورت گرانول با مش ۴۰-۲۰، دی‌اکسید تیتانیوم و زایلن از شرکت سیگما آلدریچ تهیه شد. با توجه به مطالعات انجام‌شده، در این پژوهش ۵ درصد نانوذره بر روی بستر زئولیت ZSM-5 تثبیت گردید [۱۴]. بدین‌صورت که ابتدا مقدار معینی از TiO_2 در آب مقطر دو بار یونیزه‌شده به‌صورت سوسپانسیون آماده شد و به مدت ۳۰ دقیقه درون التراسونیک قرار گرفت تا ذرات در محیط آبی پراکنده گردند. سپس جهت اختلاط کامل، این سوسپانسیون به مدت ۳۰ دقیقه توسط شیکر هم زده شد. در ادامه، مقدار معینی از زئولیت ZSM-5 به سوسپانسیون اضافه گردید و به مدت ۳۰ دقیقه درون التراسونیک قرار گرفت. سپس به مدت دو ساعت توسط شیکر هم زده شد تا نانوذرات TiO_2 بر روی سطح و خلل زئولیت ZSM-5 قرار گیرند. در ادامه، توسط صافی صاف شد و به مدت ۱۲ ساعت در آونی با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد خشک گردید. سپس برای تثبیت TiO_2 بر روی زئولیت ZSM-5 و کلسینه‌کردن، به مدت دو ساعت در کوره‌ای با دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. به‌منظور تعیین مشخصه‌های ساختاری و کریستالی نمونه‌ها، از هریک از آن‌ها آنالیزهای پراش اشعه ایکس (EDS و XRD) و تصاویر دستگاه اسکن میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) گرفته شد. تعیین مساحت سطحی ویژه جاذب و کاتالیست‌ها با استفاده از روش BET از طریق اندازه‌گیری ایزوترم جذب/ واجذب گاز ازت صورت گرفت. در این مطالعه سیستم راکتور شامل محفظه‌ای استوانه‌ای به ارتفاع ۲۸ سانتی‌متر و قطر ۲ سانتی‌متر از جنس دیواره کوارتز بود که از دو طرف در فاصله ۵ سانتی‌متری یک ورودی و یک خروجی داشت. در داخل راکتور استوانه‌ای، ۱ منبع مولد اشعه (لامپ UVA) با قطر ۱/۵ سانتی‌متر و طول ۳۵ سانتی‌متر قرار داشت و سه لامپ UV با توان ۸ وات با رنج طول موج بین ۳۰۰ تا ۴۲۰ نانومتر جای گرفته بود. باید خاطرنشان ساخت که دمای داخلی راکتور تحت تابش دمای طبیعی اتاق (۲۵±۲ درجه سانتی گراد) بوده و دو طرف راکتور با استفاده از PTFE (Polytetraflouroethylen) که در برابر ماده شیمیایی زایلن مقاوم است، درزبندی شده بود و اندازه‌گیری بخارات زایلن با استفاده از دستگاه قرائت مستقیم (مدل Phocheck Tiger) ساخت کمپانی انگلستان براساس آشکارساز یونش نوری (PID: Photo Ionization Detector) انجام می‌شد. به‌منظور تعیین میزان کارایی بستر در فرایند حذف فتوکاتالیستی، ۲ گرم از بستر در راکتور ریخته شد و میزان کارایی در شرایط دمای محیطی ۲۵±۲ درجه سانتی‌گراد، رطوبت ۵±۳۰ و جریان ورودی ۰/۵ لیتر بر دقیقه در سه غلظت ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ با استفاده از فرمول ۱ بررسی گردید. شایان ذکر است که تمامی آزمایش‌ها در آزمایشگاه عوامل شیمیایی دانشگاه جندی شاپور اهواز انجام شد.

یافته‌ها

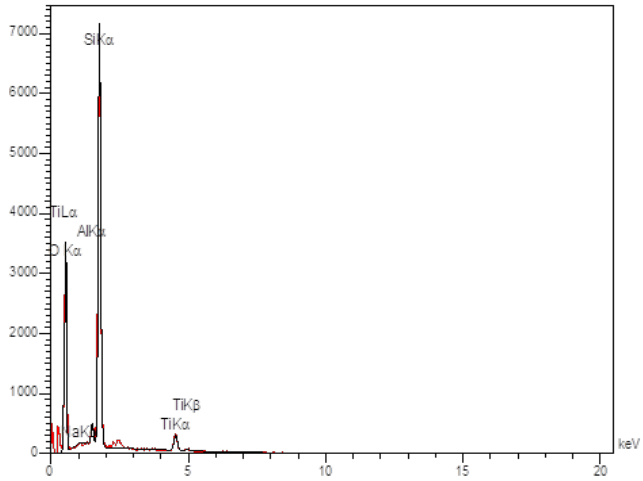
نتایج حاصل از آنالیز BET در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به نتایج، مساحت سطح ویژه ۳۶۴/۴ بوده است که پس از تثبیت نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید به ۳۲۰/۱۷ کاهش یافته است. از سوی دیگر، در شکل ۱ تصاویر مربوط به آنالیز FESEM قابل مشاهده می‌باشد. در تصویر FESEM زئولیت خام (شکل الف) ذرات به‌صورت کروی و شفاف مشاهده می‌گردند و در تصویر زئولیت پوشش‌داده‌شده (شکل ب) ذرات به‌صورت توده‌ای و کلوخه در سطح بستر نشسته‌اند. نتایج طیف‌سنجی پرتو X (EDS) نیز در شکل ۲ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود،

جدول ۱: ویژگی‌های سطح کاتالیست

نمونه	ZSM-5	ZSM-5/TiO_2
سطح ویژه (متر مربع بر گرم)	۳۶۴/۴	۳۲۰/۱۷
میانگین قطر حفرات (نانومتر)	۵/۳۴۴	۴/۳۷۰۸
حجم کل (سانتی‌متر مکعب بر گرم)	۰/۲۹۸۱	۰/۲۶۶



شکل ۱: تصاویر FESEM: الف. زئولیت ZSM-5 ب. ZSM-5/TiO_2

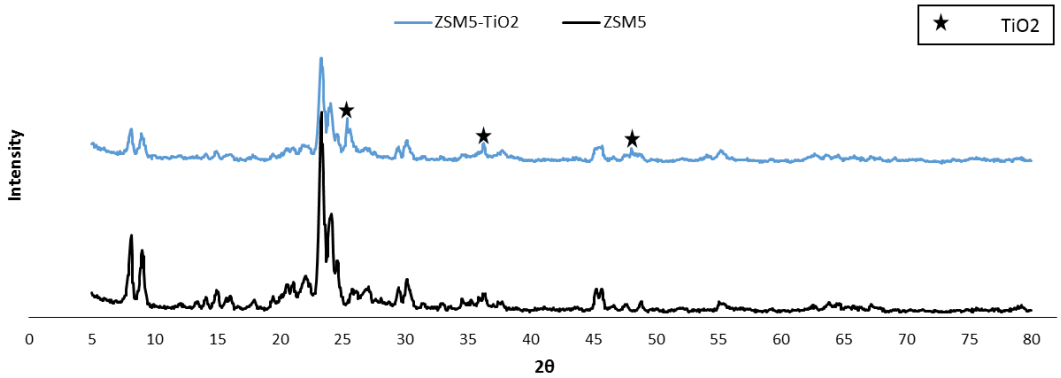


Elt	Line	Int	Error	K	Kr	W%	A%	ZAF	Formula	Ox%	Pk/Bg	Class	LConf	HConf	Cat#
O	Ka	808.2	76.4416	0.4320	0.2490	59.25	72.71	0.4202		0.00	107.35	A	58.49	60.01	0.00
Na	Ka	5.2	0.1091	0.0011	0.0006	0.13	0.11	0.4614		0.00	2.12	B	0.11	0.16	0.00
Al	Ka	108.4	17.2646	0.0203	0.0117	1.61	1.17	0.7262		0.00	3.68	B	1.55	1.67	0.00
Si	Ka	2478.8	17.2646	0.4857	0.2799	34.65	24.22	0.8077		0.00	43.15	A	34.40	34.91	0.00
Ti	Ka	127.3	0.7674	0.0609	0.0351	4.35	1.78	0.8071		0.00	6.56	A	4.21	4.49	0.00
				1.0000	0.5763	100.00	100.00			0.00					0.00

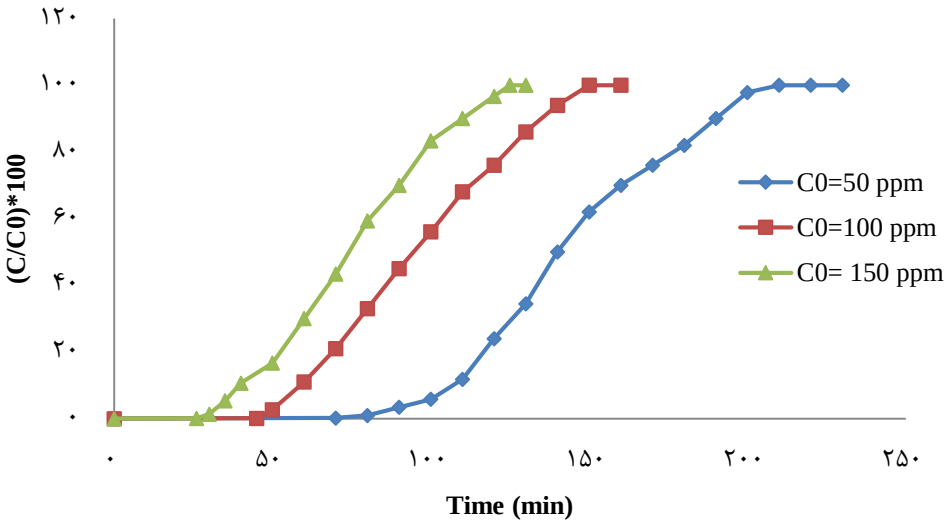
شکل ۲: نتایج حاصل از EDS نمونه ZSM-5/TiO_2

زئولیت پوشش‌داده‌شده حاوی ۴/۳۵ درصد تیتانیوم بوده است. علاوه‌براین، نتایج آزمون XRD از بسترهای زئولیت ZSM-5 و ZSM-5/TiO_2 در شکل ۳ گویای آن است که موقعیت پیک‌های مشخصه فاز TiO_2 در ۲θ=۲۵/۵۵، ۲θ=۳۷/۷۲، ۲θ=۵۲/۱۲ قرار دارند. وجود پیک نشان‌دهنده تولید موفقیت‌آمیز کاتالیست ZSM-5/TiO_2 می‌باشد.

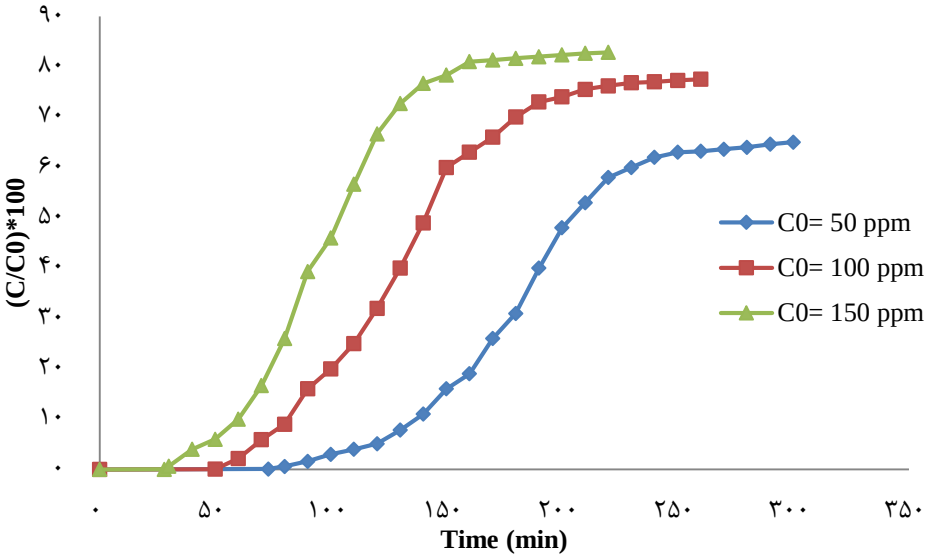
میزان کارایی جذب بخارات زایلن توسط بستر زئولیت ZSM-5 در غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ بخش در میلیون با دبی ۰/۵ لیتر در دقیقه در شکل ۴ مورد مقایسه قرار گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در غلظت ۵۰ بخش در میلیون، زمان ظهور زایلن ۷۰ دقیقه و زمان اشباع ۲۳۰ دقیقه بوده است؛ در غلظت ۱۰۰ بخش در میلیون، زمان ظهور ۴۵ دقیقه و زمان اشباع ۱۶۰ دقیقه ثبت شده است؛ در غلظت ۱۵۰ بخش در میلیون، زمان ظهور ۲۶ دقیقه و زمان اشباع ۱۳۰ دقیقه به‌دست آمده است. از سوی دیگر، شکل ۵ راندمان حذف فتوکاتالیستی زایلن در غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ بخش در میلیون را نشان



شکل ۳: الگوی پراش پرتو X



شکل ۴: بررسی میزان جذب در سه غلظت ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰



شکل ۵: کارایی حذف فتوکاتالیستی بخار زایلن تحت غلظت‌های گوناگون در فرایند UV/ZSM5-TiO_2

می‌دهد. بر مبنای این شکل با افزایش غلظت از ۵۰ به ۱۵۰، راندمان حذف از ۳۵/۴۶ به ۱۷/۳۷ کاهش یافته است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، میزان کاهش بخارات زایلن در غلظت ۵۰ در ۷۳ دقیقه اول ۹۹ درصد و پس از حدود ۲۲۷ دقیقه به مقدار ثابت ۳۵ درصد می‌رسد. در غلظت ۱۰۰ بخش در میلیون، میزان حذف در ۵۰ دقیقه اول ۹۹ درصد بوده و پس از

۲۱۰ دقیقه به مقدار ثابت ۲۲/۵ درصد می‌رسد. در غلظت ۱۵۰ نیز میزان حذف در ۲۸ دقیقه اول ۹۹ درصد بوده و پس از ۱۹۲ دقیقه به مقدار ثابت ۱۷ درصد می‌رسد؛ بنابراین با افزایش غلظت زایلن، زمان ظهور آن در خروجی سیستم کاهش می‌یابد؛ در نتیجه کارایی حذف در بستر فتوکاتالیستی کاهش پیدا می‌کند.

یکی از پارامترهایی که بر فرایند جذب و حذف فتوکاتالیستی تأثیر می‌گذارد، جریان ورودی زایلن است. میزان حذف در بستر $ZSM\text{-}5/TiO_2$ در غلظت ۵۰ و دبی ۰/۵ لیتر در دقیقه ۳۵ درصد می‌باشد؛ اما در دبی ۰/۳ لیتر بر دقیقه و غلظت ۵۰، ۳۹ درصد است که نشان می‌دهد با کاهش نرخ جریان ورودی، کارایی فتوکاتالیست‌ها افزایش یافته است.

بحث

سطح کاتالیزوری مهم‌ترین عامل فعالیت فتوکالیست است. نتایج حاصل از آزمون BET نشان داد که پس از آزمون، نانوذره بر بستر مساحت سطح ویژه کاهش یافت. گزارش شده است که مساحت سطحی زیاد، تنها یکی از عوامل مؤثر بر افزایش کارایی یک جاذب در جذب آلاینده است و وجود خاصیت تخریب آلاینده آلی در دی‌اکسید تیتانیوم، عاملی برای میزان کاهش سطح بستر طی تثبیت نانوذرات می‌باشد [۱۵]. در مطالعه اصیلیان و همکاران با استفاده از نانوکامپوزیت $ZSM\text{-}5/TiO_2$ به حذف فتوکالیستی تولوئن پرداخته شد. در این مطالعه مساحت سطح ویژه از ۳۵۶/۴ به ۳۳۲/۵ متر مربع بر گرم کاهش یافت [۱۶]. در پژوهش حاضر با توجه به نتایج حاصل از آزمون EDS نمونه $ZSM\text{-}5/TiO_2$، درصد وزنی تیتانیوم دی‌اکسید ۴/۳۵ درصد به‌دست آمد. همچنین با مقایسه نمودارهای آزمون XRD در شکل ۳ مربوط به زئولیت ZSM-5 و $ZSM\text{-}5/TiO_2$، پیک مربوط به نانوذره تیتانیوم دی‌اکسید قابل تشخیص است که نشان‌دهنده بارگذاری موفقیت‌آمیز نانوذره تیتانیوم دی‌اکسید بر روی زئولیت ZSM-5 می‌باشد. نتایج حاصل از تصاویر FESEM نیز این بارگذاری را تأیید می‌کنند. در این مطالعه نانوذرات TiO_2 با نسبت ۵ درصد وزنی بررسی شدند و زئولیت ZSM-5 تثبیت گردید که این مقدار بارگذاری با توجه به مطالعات انجام‌شده قابل قبول می‌باشد [۱۴،۱۷]. در این راستا، چن و همکاران مقدار ۵ درصد را میزان بهینه فلز فعال در کاتالیست جهت حذف تری‌کلرواتیلن توسط کاتالیست دانسته‌اند [۱۷] همچنین در پژوهشی که توسط رنگ‌کوی و همکاران انجام شد، میزان بهینه اکسید روی تثبیت‌شده بر روی زئولیت اصلاح‌شده در حذف فتوکاتالیستی استایرن در سه درصد وزنی (۳، ۵ و ۱۰) معادل ۵ درصد به‌دست آمد [۱۸].

دما و رطوبت از دیگر فاکتورهایی هستند که بر کارایی فعالیت فتوکالیستی تأثیر می‌گذارند. در این پژوهش دما و رطوبت به‌ترتیب معادل ۲±۲۵ و ۵±۳۰ تنظیم گردید. مطالعات بسیاری دمای محیط را مناسب‌ترین دما جهت فرایند حذف فتوکاتالیست معرفی کرده‌اند. رنگ‌کوی و همکاران در مطالعه حذف فرمالدهید از جریان هوا، شرایط مختلف آزمایشگاهی را بررسی نمودند و بهترین رطوبت برای فعالیت فتوکالیست را در محدوده بین ۴۰-۳۰ درصد دانستند [۱۹].

از سوی دیگر، نتایج مربوط به حذف در سه غلظت ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ نشان داد که با افزایش غلظت از ۵۰ به ۱۵۰، کارایی حذف کاهش می‌یابد. رضایی و همکاران در پژوهش خود حذف فتوکالیستی تولوئن از جریان هوا را با استفاده از تیتانیوم دی‌اکسید بررسی نمودند و نشان دادند که با افزایش غلظت، راندمان حذف کاهش می‌یابد [۲۰]. همچنین با کاهش جریان ورودی زایلن از ۰/۵ به ۰/۳، کارایی حذف فتوکالیستی زایلن افزایش پیدا می‌کند. Chan و همکاران در مطالعه حذف تولوئن از جریان هوا با استفاده از جاذب زئولیت نشان دادند که کاهش دبی منجر به افزایش ۵۵ درصدی راندمان حذف فتوکالیستی تولوئن می‌شود [۲۱].

نتیجه‌گیری

از نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه چنین استنباط می‌شود که تثبیت ذرات نانوماده نیمه‌رسانای TiO_2 بر روی یک ماده جاذب سطحی همچون ZSM-5 سبب ارتقای کارایی تجزیه آلاینده زایلن در هوا می‌شود؛ به‌طوری که بر مبنای نتایج، فرایند $ZSM\text{-}5/TiO_2/UV$ بیشترین راندمان حذف زایلن را داشت؛ بنابراین استفاده از فرایند $UV/ZSM5\text{-}TiO_2$ به‌منظور حذف بخارات زایلن از جریان هوا می‌تواند مناسب باشد؛ از این رو پیشنهاد می‌گردد این سیستم‌های ترکیبی جذب و فتوکاتالیستی برای حذف سایر ترکیبات آلی فرار در فاز گازی مورد استفاده قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

پژوهش حاضر در قالب پایان‌نامه کارشناسی ارشد با شماره طرح ETRC-9605 از سوی حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه علوم پـزشکی جندی شاپور اهواز حمایت مالی شده است. بدین‌وسیله از این معاونت محترم تشکر و قدردانی می‌گردد.

REFERENCES

1. Cooper CD, Alley FC. Air pollution control: a design approach. New York: Waveland Press; 2010.
2. Khan FI, Ghoshal AK. Removal of volatile organic compounds from polluted air. *J Loss Prev Proc Ind*. 2000;**13**(6):527-45. DOI: 10.1016/S0950-4230(00)00007-3
3. Domeño C, Rodríguez-Lafuente A, Martos JM, Bilbao R, Nerín C. VOC removal and deodorization of effluent gases from an industrial plant by photo-oxidation, chemical oxidation, and ozonization. *Environ Sci Technol*. 2010;**44**(7):2585-91. PMID: 20192167 DOI: 10.1021/es902735g
4. Health Division of Physical Sciences. NIOSH, Manual of Analytical Methods. US Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety

and Health, Division of Physical Sciences and Engineering; 1994.
5. Gariazzo C, Pelliccioni A, Di Filippo P, Sallusti F, Cecinato A. Monitoring and analysis of volatile organic compounds around an oil refinery. *Water Air Soil Pollut*. 2005;**167**(1-4):17-38.
6. Thiruvenkatachari R, Vigneswaran S, Moon IS. A review on UV/TiO 2 photocatalytic oxidation process (Journal Review). *Korean J Chem Eng*. 2008;**25**(1):64-72.
7. Benoit-Marquié F, Wilkenhöner U, Simon V, Braun AM, Oliveros E, Maurette MT. VOC photodegradation at the gas–solid interface of a TiO2 photocatalyst: Part I: 1-butanol and 1-butylamine. *J Photochem Photobiol A Chem*. 2000; **132**(3):225-32. DOI: 10.1016/S1010-6030(00)00196-9
8. Mohamed RM, McKinney DL, Sigmund WM. Enhanced nanocatalysts. *Mater Sci Eng Rep*. 2012;**73**(1):1-13. DOI: 10.1016/j.mser.2011.09.001
9. Cho SP, Hong SC, Hong SI. Photocatalytic degradation of the landfill leachate containing refractory matters and nitrogen compounds. *Appl Catalysis B Environ*. 2002;**39**(2):125-33. DOI: 10.1016/S0926-3373(02)00079-6
10. Hoffmann MR, Martin ST, Choi W, Bahnemann DW. Environmental applications of semiconductor photocatalysis. *Chem Rev*. 1995;**95**(1):69-96. DOI: 10.1021/cr00033a004
11. Wu WQ, Xu YF, Rao HS, Su CY, Kuang DB. Multistack integration of three-dimensional hyperbranched anatase titania architectures for high-efficiency dye-sensitized solar cells. *J Am Chem Soc*. 2014;**136**(17):6437-45. PMID: 24725076 DOI: 10.1021/ja5015635
12. Nezamzadeh-Ejhieh A, Khorsandi S. Photocatalytic degradation of 4-nitrophenol with ZnO supported nano-clinoptilolite zeolite. *J Ind Eng Chem*. 2014;**20**(3):937-46. DOI: 10.1016/j.jiec.2013.06.026
13. Baerlocher C, McCusker LB, Olson DH. Atlas of zeolite framework types. New York: Elsevier; 2007.
14. Nakhaeipour M, Shojaee FA, Najarian F, Safinezhad M, Irvani H. Determining the efficiency of zsm5-zeolite impregnated with nanoparticles of titanium dioxide in the photocatalytic removal of styrene vapors. *J Occupat Hyg Eng*. 2017;**3**(4):61-7. DOI: 10.21859/johe-03048
15. Zhu YP, Li M, Liu YL, Ren TZ, Yuan ZY. Carbon-doped ZnO hybridized homogeneously with graphitic carbon nitride nanocomposites for photocatalysis. *J Phys Chem C*. 2014;**118**(20):10963-71. DOI: 10.1021/jp502677h
16. Asilian Mahabady H, Khavanin A, Aresoomandan S. Efficiency evaluation of the photocatalytic removal of toluene vapour by titanium dioxide nanoparticles immobilized on ZSM-5 zeolite. *Iran Occupat Health*. 2018;**15**(1):17-25. [Persian]
17. Chen JC, Tang CT. Preparation and application of granular ZnO/Al2O3 catalyst for the removal of hazardous trichloroethylene. *J Hazard Mater*. 2007;**142**(1-2):88-96. PMID: 16949739 DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.07.061
18. Rangkooy HA, Pour MN, Dehaghi BF. Efficiency evaluation of the photocatalytic degradation of zinc oxide nanoparticles immobilized on modified zeolites in the removal of styrene vapor from air. *Korean J Chem Eng*. 2017;**34**(12):3142-9. DOI: 10.1007/s11814-017-0174-2
19. Khoopaie AR, Jafari AJ, Khavanin A, Rezaee A, Rangkooy HA. A study on photocatalytic removal of formaldehyde from air using zno nanoparticles immobilized on bone char. *J Qum Univ Med Sci*. 2013;**7**(2):27-34. [Persian]
20. Rezaee A, Khavanin A, Saraf Mamoori R, Hajizadeh E. Elimination of toluene by application of ultraviolet irradiation on TiO2 nano particles photocatalyst. *J Mil Med*. 2007;**9**(3):217-22. [Persian]
21. Chao CY, Kwong CW, Hui KS. Potential use of a combined ozone and zeolite system for gaseous toluene elimination. *J Hazard Mater*. 2007;**143**(1-2):118-27. PMID: 17030416 DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.08.077