ORIGINAL ARTICLE

Comparing ZSM_5, TiO_2/ZSM_5, UV/ ZSM_5, and UV/TiO_2/ZSM_5 Processes in Removal of Styrene from Synthetic Air Current

Seyyed Bagher Mortazavi[1],
Mehdi Salari[2],
Hasan Asilian Mahabadi[3],
Maryam Rostami Aghdam Shendi[4],
Mohammad Miri[5],
Mohsen Yazdani Aval[6]

[1] Professor, Department of Occupational Health Engineering, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
[2] PhD Student in Environmental Health Engineering, Faculty of Public Health, Research Center for Health Sciences, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran
[3] Associate Professor, Department of Occupational Health Engineering, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
[4] MSC Student in Occupational Health Engineering, Faculty of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran
[5] Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Sabzevar University of Medical Sciences, Sabzevar, Iran
[6] Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Sabzevar University of Medical Sciences, Sabzevar, Iran

(Received October 3, 2017 ; Accepted April 29, 2018)

Abstract

Background and purpose: Styrene, one of the most important compounds of VOCs, causes some health concern. In current study, the ability of ZSM_5, TiO_2/ZSM_5, UV/ ZSM_5, and UV/TiO_2/ZSM_5 methods was investigated in removing styrene from air synthetic current.

Materials and methods: In order to synthesize the zeolite and TiO_2-coated zeolite, the sol-gel and saturation methods were employed, respectively. In this study, the effect of the type of removal process, saturation time and initial pollutant concentration were investigated on the removal of styrene in a photoreactor. Phocheck device with direct reading system was applied to determine the output concentration. Also, SEM, XRD, EDX, and BET analyses were used to characterize the chemical and physical properties of ZSM_5, and TiO_2/ZSM_5.

Results: SEM analysis showed that zeolite has a crystal form, and TiO_2 successfully covered the surface of this compound. In addition, the EDX analysis demonstrated that a great part of zeolite structural includes Al and Si constituents. The XRD pattern showed the presence of attached TiO_2 in the zeolite structure. BET analysis revealed that the surface area of zeolite decreased when TiO_2 was coated on its surface. The order of increase in removal efficiency was as follows: UV/TiO_2/ZSM_5 > ZSM_5> TiO_2/ZSM_5. The saturation time of ZSM5 and TiO_2/ZSM_5 in the 300 ppm concentration was 370 and 280 min, respectively, while the outlet concentration in the UV/TiO_2/ZSM_5 method was fixed at 74% removal efficiency after elapsing 310 min. The increment of time exposure and initial styrene concentration also led to decrease in removal efficiency.

Conclusion: In this study application of UV/TiO_2/ZSM_5 process provided a higher efficiency of the styrene removal than that of TiO_2/ZSM or ZSM_5 in the same time.

Keywords: styrene, zeolite, Tio_2, photo-oxidation

J Mazandaran Univ Med Sci 2018; 28 (166): 187-198 (Persian).

* **Corresponding Author: Mohsen yazdani aval** - Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Sabzevar University of Medical Sciences, Sabzevar, Iran (E-mail: yazdani.aval@gmail.com)

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-02]

پژوهشی

مجله دانشگاه علوم پزشکی مازندران
دوره بیست و هشتم شماره ۱۶۶ آبان سال ۱۳۹۷ (۱۹۸-۱۸۷)

مقایسه فرآیندهای ZSM_5، TiO_2/ZSM_5، UV/ ZSM_5 و $UV/TiO_2/ZSM_5$ در حذف استایرن از جریان سنتتیک هوا

سید باقر مرتضوی [۱]
مهدی سالاری [۲]
حسن اصیلیان مهابادی [۳]
مریم رستمی اقدم شندی [۴]
محمد میری [۵]
محسن یزدانی اول [۶]

چکیده

سابقه و هدف: استایرن یکی از مهم‌ترین ترکیبات آلی فرار می‌باشد که می‌تواند باعث اثرات نامطلوب بهداشتی شود. در این مطالعه به بررسی توانایی حذف این ترکیب از محیط های سنتتیک هوا توسط فرآیندهای ZSM_5، TiO_2/ZSM_5، UV/ ZSM_5 و $UV/TiO_2/ZSM_5$ پرداخته شد.

مواد و روش‌ها: جهت تولید زئولیت از روش سل ژل و جهت پوشش زئولیت با TiO_2 از روش غوطه وری استفاده شد. در این مطالعه اثر نوع فرآیند حذف، زمان اشباع و غلظت آلاینده بر میزان حذف در یک فتوراکتور مورد بررسی قرار گرفت. دستگاه قرائت سنج مستقیم فوچک جهت تعیین غلظت خروجی استفاده شد. هم چنین از آنالیز SEM، XRD، EDX و BET برای تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی ZSM_5 و TiO_2/ZSM_5 استفاده شد.

یافته‌ها: آنالیز SEM نشان داد که زئولیت دارای شکل کریستالی است و TiO_2 به خوبی بر روی این ماده پوشش داده شده است. نتایج آنالیز EDX نشان داد که درصد بالایی از ساختار زئولیت شامل دو عنصر Si و Al است. هم چنین الگوی XRD حضور TiO_2 در ساختار زئولیت را به خوبی نشان داد. آنالیز BET نشان داد که با پوشش زئولیت توسط TiO_2، سطح ویژه و تخلخل کاهش می یابد. افزایش راندمان حذف به ترتیب $TiO_2/ZSM_5 < ZSM_5 < UV/TiO_2/ZSM_5$ به دست آمد. زمان اشباع در غلظت ۳۰۰ppm برای ZSM_5 و TiO_2/ZSM_5 به ترتیب ۳۷۰ و ۲۸۰ دقیقه حاصل گشت، در حالی که در حالت کاربرد $UV/TiO_2/ZSM_5$، غلظت خروجی بعد از طی مدت زمان ۳۱۰ دقیقه بر روی راندمان حذف ۷۴ درصد ثابت شد. هم چنین افزایش زمان و غلظت اولیه استایرن منجر به کاهش راندمان حذف شد.

استنتاج: در این مطالعه مشاهده شد که فرآیند $UV/TiO_2/ZSM_5$ راندمان بالاتری از حذف استایرن را برای زمان های مشابه نسبت به روش های TiO_2/ZSM_5 و ZSM_5 دارد.

واژه های کلیدی: استایرن، زئولیت، TiO_2، فتواکسیداسیون

مقدمه

رشد صنایع، مشکلات و نگرانی های بیشماری در رابطه با محیط زیست ازجمله آلودگی هوا به وجود آورده است که امروزه به عنوان یکی از دغدغه‌های مهم جوامع بشری شده است(۱، ۲). ترکیبات VOCs

مولف مسئول: محسن یزدانی اول– سبزوار: دانشگاه علوم پزشکی سبزوار، دانشکده بهداشت E-mail: yazdani.aval@gmail.com
۱. استاد، گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۲. دانشجوی دکترای تخصصی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، مرکز تحقیقاتی علوم بهداشتی، دانشگاه علوم پزشکی همدان ، همدان، ایران
۳. دانشیار، گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۴. کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت حرفه ای ، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران ، ایران
۵. گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی سبزوار، سبزوار، ایران
۶. گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی سبزوار، سبزوار، ایران
تاریخ دریافت : ۱۳۹۶/۷/۱۱ تاریخ ارجاع جهت اصلاحات :۱۳۹۶/۷/۲۶ تاریخ تصویب : ۱۳۹۷/۲/۹

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-02]

(VOCs: Volatile (Organic Compounds به عنوان دسته‌ای از مهم‌ترین و شناخته شده‌ترین آلاینده‌های هوا به‌شمار می‌آیندکه در ساختار خود دارای کربن، هیدروژن، نیتروژن یا گوگرد هستند و دارای سرعت تبخیر بالایی می‌باشند. پس از ذرات معلق، VOCs بیش‌ترین فراوانی و تنوع را دارا می‌باشند و معمولاً در صنایع به عنوان سوخت‌های مایع و حلال کاربرد دارند(۳). کنترل انتشار این آلاینده‌ها از مهم‌ترین قوانین الزامی زیست محیطی برای صنایع می‌باشد چراکه انتشار بخارات حاصل از این ترکیبات به محیط زیست حتی در غلظت‌های پایین نیز باعث آسیب‌های متعددی بر روی سلامتی انسان‌ها و محیط زیست می‌شود(۴). تعدادی از مطالعات انجام پذیرفته، سرطان‌زایی هیدروکربن‌های آرومایتک موجود در قطران و دوده را تایید کرده است. از طرفی VOCs به همراه NOx در حضور نور خورشید، در اثر اکسیداسیون فتوشیمیایی منجر به ایجاد مه‌دود فتوشیمیایی می‌شوند که از نظر زیست محیطی بسیار خطرناک می‌باشند(۳). استایرن یکی از ترکیبات آلی فرار می‌باشد که در صنایع کاربرد گسترده‌ای دارد و معمولاً در اثر واکنش‌های دهیدروژناسیون و هیدرو پراکسیداسیون کاتالیستی اتیل بنزن تولید می شود(۵، ۶). صنایع رنگ، لوله، اتصالات، کفپوش، پوشش لاستیک، لاستیک مصنوعی، پلاستیک، مخازن، وسایل روشنایی و محصولات مقاوم به خوردگی از جمله صنایع یا محصولاتی می باشند که در فرآیندهایشان باعث تولید استایرن می شود(۶). تنفس، بلع و تماس با چشم و پوست مسیرهایی می باشند که این ترکیب به بدن وارد می شود. اثر بر روی سیستم اعصاب مرکزی، از دست دادن تمرکز، درماتیت تماسی تحریکی، ضعف و خستگی، حالت تهوع و اثر بر روی دستگاه تولیدمثل از عوارض مواجهه با این ترکیب می‌باشد(۷).

در مطالعه Vodicka و همکاران (۲۰۰۲) مشاهده شد که مواجهه با استایرن در غلظت‌های ۱۰ppm و بالاتر سبب تحریک چشم، گلو و سیستم تنفسی و در غلظت حدود ۳۷۶ppm منجر به افزایش ترشح در مخاط بینی می‌شود(۸).

در مطالعه‌ای Cherry و Gautrin (۱۹۹۱) گزارش شد که حدود ۲۳ درصد و ۷۱ درصد از افرادی که به ترتیب با غلظت‌های زیر ۵۰ppm و بالای ۱۰۰ppm تماس داشتند، با کاهش فعالیت سیستم اعصاب محیطی و مرکزی روبرو شدند(۹). از این‌رو تحقیق و مطالعه به منظور گسترش و بهبود روش‌های کنترل انتشار VOCs در صنایع از جمله پتروشیمی، صنعت نفت، فرایندهای صنعتی و اگزوز خودروها از اهمیت زیادی برخوردار است. جذب سطحی به عنوان یکی از متداول‌ترین تکنیک‌های کنترلی ترکیبات آلی فرار می‌باشد که در این میان، کربن فعال به دلیل ویژگی‌های مثبتش مانند ظرفیت جذب بالا و هزینه عملیاتی پایین کاربرد بیش تری پیدا کرده است. یکی از مهم‌ترین معایب جذب جداسازی تنهای آلاینده و تغلیظ آن بدون هیچ‌گونه تبدیل می‌باشد(۱۰،۱۱). در دو دهه اخیر استفاده از فرآیند فتوکاتالیستی کاربرد گسترده‌ای یافته است که عامل این گستردش به دلیل تبدیل ترکیبات آلی به CO_2 و H_2O می‌باشد(۱۲،۱۳). TiO_2 به عنوان یکی از پرکاربردترین نیمه رساناها شناخته می شود که در فرآیند های اکسیداسیون استفاده می شود(۱۴). این نیمه رسانا از نظر توانایی فتوکاتالیسی نسب به سایر نیمه رساناها در سطح بالاتری قرار دارد و دارای مزایایی همچون قیمت پایین، پایداری شیمیایی و حفره‌های تولید کننده هیدروژن با قابلیت اکسیداسیون بالا می‌باشد(۱۵). کاربرد نیمه رساناها به تنهایی در فرآیند اکسیداسیون دارای معایبی می‌باشد چراکه این ترکیبات توانایی پایینی در جذب ترکیبات آلی دارند و نمی‌توانند در جریان‌های رقیق VOCs راندمان اکسیداسیون بالایی را به همراه داشته باشند(۱۶،۱۷). در تعدادی از مطالعات به منظور افزایش راندمان فرایندهای فتوکاتالیستی TiO_2 از جاذب‌هایی مانند کربن فعال، آلومینا، سیلیکا و زئولیت استفاده شده است. در میان این جاذب‌ها، زئولیت‌ها به دلیل ویژگی‌هایی همچون سطح

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-02]

ویژه بالا، آب دوستی و آب گریزی، سنتز قابل کنترل و دوستدار زیست محیط بودن، توجه بالای محققان را به خود معطوف نموده است(۱۸).

Thevenet و همکاران (۲۰۰۵) از TiO_2 پوشش داده شده بر روی AC جهت حذف ترکیبات آلی در جریان هوا استفاده نمودند. Thevenet و همکاران در فرآیند فتوکاتالیست از TiO_2/AC و زئولیت/TiO_2 در حذف استیلن استفاده نمودند. در این مطالعه مشخص شد که AC تنها باعث تغلیظ ترکیبات آلی و افزایش مواجهه استیلن با TiO_2 می‌باشد، در حالی که زئولیت علاوه بر جذب باعث بهبود فرآیندهای فتوکاتالیستی TiO_2 می‌شود(۱۹). باتوجه به خطرات زیست محیطی و بهداشتی ناشی از بخارات استایرن، در این مطالعه به بررسی توانایی حذف این ترکیب از محیط های سنتتیک هوا توسط فرآیندهای ZSM_5، TiO_2/ZSM_5، UV/ ZSM_5 و $UV/TiO_2/ZSM_5$ پرداخته شد.

مواد و روش ها

این مطالعه تجربی- کاربردی در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد. موارد مورد استفاده در این مطالعه شامل سولفات آلومینیوم، سیلیکا، تتراپروپیل آمونیوم هیدروکسید، تترا اتیل اورتو تیتانات و ایزوپروپانول می‌باشد که از نمایندگی شرکت مرک خریداری شد.

سنتز ZSM_5

به منظور سنتز ZSM_5، مخلوطی از سولفات آلومینیوم و سیلیکا و تتراپروپیل آمونیوم هیدروکسید ۲۰ درصد وزنی (نسبت ترکیبات $(TPA)2O:60SiO_2:0.5Al_2O_3:936H_2O$ در آب جوشانده شد و بعد از ۱۰ دقیقه همزدن تحت شرایط رفلاکس، محلول همگن شفاف به دست آمد. پس از رسیدن دمای محلول به ۲۵ درجه سانتی گراد، محلول به درون فلاسک‌هایی که درون حمام نفت بوده و حاوی رفلاکس است، ریخته شد. کریستالیزاسیون در فشار محیط و دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان ۷۲ ساعت صورت گرفت. سپس این نانو ذرات زئولیت به دست آمده به روش گریز از مرکز (با ۵۰۰۰ دور بر دقیقه) از محلول جدا شدند و دوباره درون آب مقطر دیسپرس شده و با استفاده از حمام آلتراسونیک جداسازی مجدد انجام شد تا سوسپانسیون کلوییدی غلیظ به دست آید. با افزودن آب، pH محلول در محدوده ۹-۱۰ قرار گرفت که باعث افزایش دافعه الکتروستاتیکی بین کریستال‌ها شد(۲۰).

سنتز TiO_2

ابتدا 5ml تترا اتیل اورتو تیتانات در ۳۵ml ایزوپروپانول حل و به مدت ۳۰ دقیقه با همزن مغناطیسی با سرعت ۳۰۰rpm همزده شد. سپس عامل تعدیل‌کننده به آن اضافه شد و محلول مورد نظر، ۳۰ دقیقه با همان سرعت همزده شد. در ادامه ۱/۵ml اسید به نمونه اضافه گردید و آب مقطر به مقدار 1ml قطره قطره به محلول اضافه و برای مدت زمان ۳۰ دقیقه محلول همزده شد. مقدار آب اضافه شده باید به اندازه‌ای باشد که واکنش هیدرولیز به صورت جزیی انجام شود. در نهایت بعد از ۱۰ ساعت همزدن سل تیتانیا آماده شد(۲۲،۲۱).

پوشش دهی

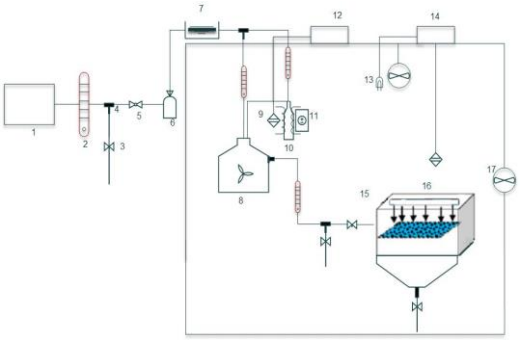
در این مرحله، گرانول‌های زئولیت ZSM_5 با سل تیتانیای آماده شده از مراحل قبل، به روش غوطه‌وری پوشش داده شدند. به همین منظور میزان مناسب سل مورد نظر درون بشر ریخته شده و بر روی همزن مغناطیسی با سرعت ۶۰rpm قرارگرفت و سپس گرانول‌های زئولیت به درون سل اضافه می‌گردد. زمان پوشش‌دهی ۱۵ دقیقه لحاظ شده است و سپس به مدت ۲۴ ساعت زمان پیر شدگی داده می‌شود. در نتیجه فرایند ژلاسیون صورت گرفت و در نهایت پس از خشک نمودن در دمای ۸۰c، در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد کلسینه می‌شود. جهت بررسی خصوصیات ظاهری و مرفولوژی

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-02]

از آنـالیز SEM (VEGA\\TESCAN-LMU) و مشـخص کردن درصـد عناصـر تشـکیل دهنـده زئولیـت از آنـالیز EDX (VEGA\\TESCAN-LMU) و در نهایت جهـت تعیـین سـطح ویـژه و میـزان تخلخـل از آنـالیز BET (NOVA 1200, Quantachrome) براساس ایزوترم‌های جذب و واجذب گاز N_2 استفاده شد(۲۲،۲۱).

مشخصات راکتور و انجام آزمایشات

سیستم راکتور متشکل از یک محفظه مکعبی شکل بـه طـول ۲۶cm، عـرض ۱۰cm و ارتفـاع ۱۵cm (۶cm ارتفـاع داخـل راکتـور) و قسـمت پـایینی آن به‌صـورت کانوپی است. در بالای محفظـه مکعبـی ورودی جریـان هوای حاوی آلاینده و در پایین (قسمت کـانوپی) خروجی می‌باشد. در ارتفاع ۵cm از کف راکتور یـک صـفحه از جنس استیل (مش ۴۰) استفاده شد که روی آن زئولیـت ZSM_5 و TiO_2/ZSM_5 با توزیـع یکنواخـت و ضـخامت ۲mm پوشش داده شده است. هم‌چنین از لامـپ UV-A با طول موج ۳۶۵nm و بـا شـدت ۲/۵ mW/cm^2 کـه بـه شکل افقی در فتوراکتور قرار گرفتـه شـد، اسـتفاده گردیـد. بـه منظـور تـأمین هـوای ورودی از پمـپ ۵۱w بـا فشـار ۱۴۷/۱۱ mmHg (ساخت شرکت Hitachi Ltd) استفاده شـد و جهـت حـذف آلـودگی هـوای ورودی از ظـرف حاوی بستر زغـال فعـال و سـیلیکاژل عبـور داده شـده و سپس وارد سیستم غلظت‌سـازی مـی‌شـد. بـرای غلظـت سازی دینامیک، بخارات اسـتایرن از روش اشـباع بخـار بهره‌گیری شد. همان‌طورکه در تصویر شماره ۱ نمـایش داده شد، هـوای ورودی پـس از عبـور از یـک روتـامتر کالیبره شده توسط یک سـه راهـی بـه دو بخـش تقسـیم گردیـد. یکـی از انشـعابات وارد روتـامتری بـه ظرفیـت ۱۰۰ml شـده و سـپس بـه سـمت بـابلر حـاوی اسـتایرن هـدایت مـی‌شـود و دیگـری پـس از تنظـیم دقیـق فلـو بـه محفظـه یکنواخـت‌سـازی غلظـت بـه ظرفیـت ۳lit و از جنس پیرکس (ساخت شرکت شات دوران آلمان) وارد گردید.



تصویر شماره ۱: شمای ساده‌ای از سیستم طراحی شده برای آزمایشات تجزیـه فتوکاتالیستی بـه روش دینامیـک: ۱) پمـپ هـوا، ۲) روتـامتر، ۳) شیر دوطرفه، ۴) شیر سه طرفـه، ۵) اوریفیس، ۶) پـک سـیلیکاژل- زغال فعال، ۷) مزور پلاسـتیکی بـه همـرا لولـه آلومنیـومی، ۸) محفظـه اخـتلاط، ۹) سنسـور حرارتـی ۱۰) ظـرف حـاوی محلـول اسـتایرن، ۱۱) المنت گرمایی، ۱۲) کنتـرل دمـای بـابلر، ۱۳) لامـپ، ۱۴) کنتـرل کننده دمای داخل، ۱۵) راکتور، ۱۶) لامپ UVA، ۱۷) فن؛

هـوای وارد شـده بـه بطـری گـاز شـوی (حـاوی استایرن) پس از اشباع توسط لولـه‌ای کوتـاه بـه محفظـه اختلاط و یکنواخت‌سازی غلظت وارد شد. بـا توجـه بـه تأثیرپـذیر بـودن تبخیـر سـطحی از فشـار بخـار، در ایـن مطالعه علاوه بر این که کلیـه ظـروف و رابـط در داخـل یک باکس هم دمایی قـرار داده شـد، بـه منظـور کنتـرل دمایی ظرف استایرن از یک دستگاه ترمومتر-ترموستات دیجیتال بـا حساسـیت بـالا (TMC۱۰۱ سـاخت شـرکت پـویش) اسـتفاده شـد. میـزان صـحت نمایشـگر دسـتگاه ترمومتر-ترموستات دیجیتال در حد ۵ درصد یعنی یـک ۱ رقم دیجیتال بود. مقادیر غلظت اسـتایرن در خروجـی محفظه یکنواخت ساز در فواصل زمانی ۱۰ دقیقه توسط دستگاه قرائت سنج مستقیم فوچک (مدل ۵۰۰۰، ساخت کشور انگلستان) که بـا روش آشکارسـازی یون‌هـا PID کار می‌کند، اندازه‌گیری و ثبت شد. به منظور اطمینان از داده‌هـای بـه دسـت آمـده، هـر یـک از انـدازه‌گیری‌ها حـداقل سـه بـار تکـرار شـد و در نهایـت عـدد میـانگین گـزارش شـد. بـه منظـور اطمینـان از صـحت داده‌هـای اندازه‌گیری شده در هرچند نمونه یک‌بار ایـن غلظت‌هـا توسط دستگاه گاز کروماتوگرافی (Philips PU ۴۴۱۰)

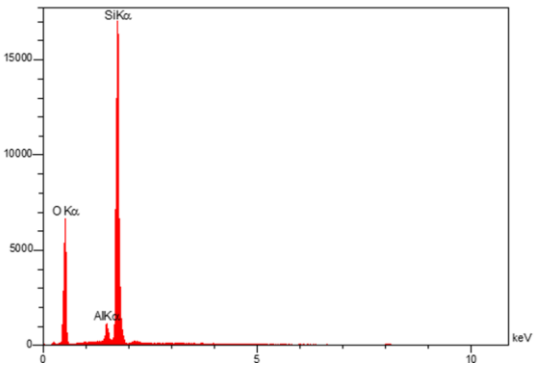
[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-02]

مجهز به دتکتور FID اندازه‌گیری شد. ستون مورد استفاده در دستگاه از نوع پک (طول ۱/۵ متر و قطر ۴mm) بود و برای تجزیه، از متد استاندارد ۸۹ سازمان OSHA با برنامه دمایی ۲۰۰c برای اینجکتور و ۲۵۰c برای دتکتور و ۱۰۰c برای ستون استفاده شد. گاز حامل مورد استفاده گاز نیتروژن $۳۳ml.min^{-1}$ بود. نهایتاً مشخص گردید که نتایج حاصل از دستگاه فوچک و دستگاه گاز کروماتوگرافی بسیار به هم نزدیک بوده و همبستگی R^2 =۰/۹۹۷ دارد. در این مطالعه اثر نوع فرآیند درگیر در حذف، زمان اشباع و غلظت آلاینده برای مقادیر ۲۰۰ و ۳۰۰ppm بر درصد حذف مورد بررسی قرار گرفت.

یافته ها

آنالیز ساختار زئولیت ZSM5 سنتز شده با استفاده از روش EDX

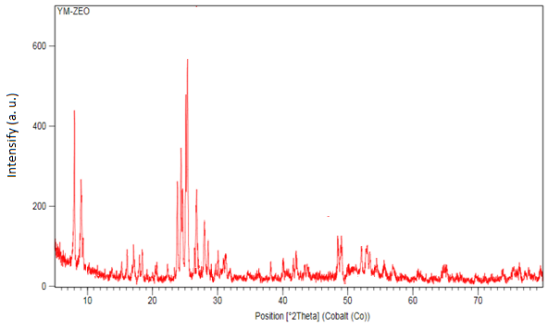
آنالیز EDX مربوط به ZSM_5 سنتز شده مورد بررسی قرار گرفت که نتایج مربوط به این کاتالیست در تصویر شماره ۲ نشان داده شده است. حضور O، Si و Al در آنالیز عنصری EDX قابل مشاهده است. نتایج آنالیز نشان می‌دهد که زئولیت ZSM_5 مورد استفاده در این مطالعه دارای ۶۱/۷۴ درصد سیلیس و ۲۳/۵۶ درصد آلومینیوم می‌باشد.



تصویر شماره ۲: آنالیز ساختار زئولیتZSM_5 سنتز شده با استفاده از روش EDX

آنالیز

در تصویر شماره ۳، آنالیز XRD در باند 2θ به منظور شناخت ساختار کریستالی TiO_2/ZSM_5 آورده شده است.



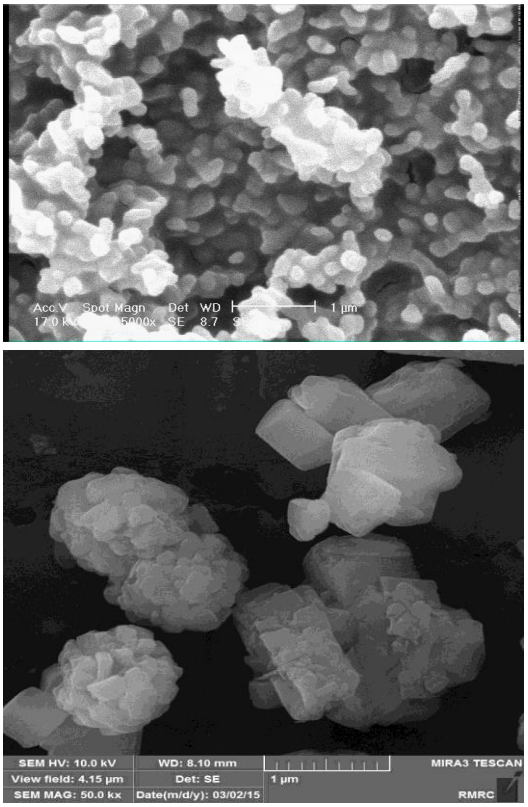
تصویر شماره ۳: آنالیز XRD ساختار کریستالی TiO_2/ZSM_5

باتوجه به شکل، پیک‌های به وجود آمده در زوایای حدود ۷/۹، ۸/۷۶ و ۲۳ مربوط به سیلیکات تیتانیوم می‌باشد. پیک‌های حاصل در زوایه‌های ۲۵/۳، ۳۷/۴ و ۴۸ مربوط به دی اکسید تیتانیوم فاز آناتاز می‌باشد. هم‌چنین پیک 2θ در زاویه ۲۷/۴ مربوط به دی‌اکسید تیتانیوم در فاز روتایل می‌باشد. با توجه به پیک‌های حاصل شده می‌توان نتیجه گرفت که دی‌اکسید تیتانیوم به خوبی طی روش سل- ژل بر روی ZSM_5 پوشش داده شده است(۲۴،۲۳).

آنالیز SEM و BET برای ZSM_5 و TiO_2/ZSM_5

به منظور بررسی خصوصیات سطحی و مرفولوژی دو ترکیب ZSM_5 و TiO_2/ZSM_5 از آنالیز میکروسکوپ الکترونی (SEM) با بزرگنمایی ۱۰X و شدت ولتاژ ۱۰KV استفاده شد (تصویر شماره ۴). عکس الف-۲ مربوط به ZSM_5 و عکس ب-۲ مربوط به TiO_2/ZSM_5 می باشد. نتایج حاصل آنالیز BET جهت تعیین مساحت سطح ویژه و حجم تخلخل برای ZSM_5 و TiO_2/ZSM_5 انجام شد که در جدول شماره ۱ مشاهده می‌شود.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-02]



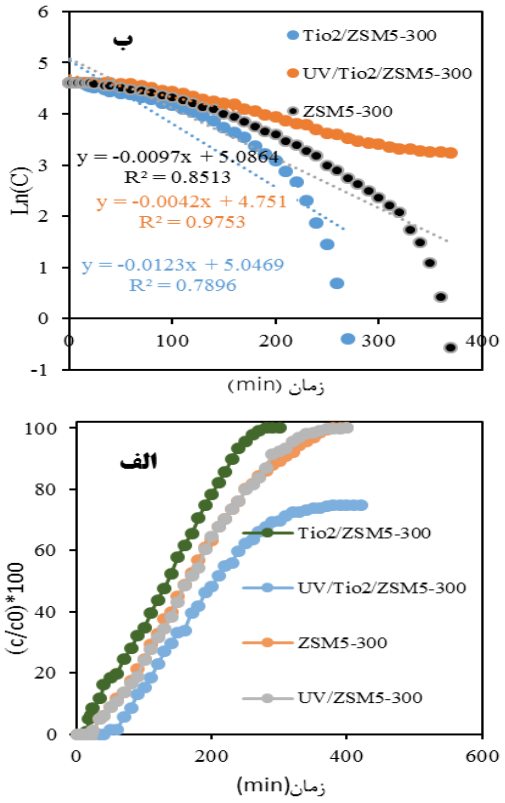
تصویر شماره ۴: عکس SEM از ترکیب ZSM_5 (الف) و TiO_2/ZSM_5 (ب) با بزرگنمای ۱۰۰۰۰

جدول شماره ۱: آنالیز BET جهت تعیین مشخصات ZSM_5 و TiO_2/ZSM_5

پارامتر	مساحت سطح ویژه (m^2g^{-1})	حجم تخلخل کل (cm^3g^{-1})
ZSM_5	۵۲۹/۲۴	۰/۳۰۴۷
TiO_2/ZSM_5	۲۲۶/۱۹	۰/۲۱۱۹

مقایسه راندمان حذف استایرن درحالات ZSM_5، UV/ZSM_5، TiO_2/ZSM_5 و $UV/TiO_2/ZSM_5$

نمودار شماره ۱-الف توانایی ۴ روش ZSM_5، UV/ZSM_5، TiO_2/ZSM_5 و $UV/TiO_2/ZSM_5$ بر میزان حذف استایرن برای غلظت ۳۰۰ppm با دبی ۱ lit/min را نشان می‌دهند. همان طور که در این نمودار مشاهده می‌شود، راندمان ۱۰۰ درصدی حذف برای ZSM_5 تا زمان ۹ دقیقه، برای TiO_2/ZSM_5 تا زمان ۶ دقیقه و برای $UV/TiO_2/ZSM_5$ تا زمان ۱۲ دقیقه به دست آمد. در حالتی که ZSM5 به تنهایی تحت تابش UV قرار گرفت، از نظر راندمان حذف استایرن، تفاوت چندانی در مقایسه با جذب ZSM_5 نداشت. هم‌چنین مشاهده شد که غلظت خروجی استایرن در راکتور در زمان‌های مشابه به ترتیب $UV/TiO_2/ZSM_5$<ZSM5<TiO2/ZSM5 می‌باشد. غلظت خروجی ۱۰۰ درصدی استایرن برای TiO_2/ZSM_5 در زمان ۲۸۰ دقیقه، برای ZSM_5 در زمان ۳۷۰ دقیقه به دست آمد. برای $UV/TiO_2/ZSM_5$ در زمان ۳۱۰ دقیقه غلظت خروجی به حدود ۷۰ درصد رسید و برای زمان‌های بالاتر این خروجی تغییر محسوسی نداشت. هم‌چنین در بررسی سینتیک مشاهده شد (نمودار شماره ۱-ب) که سرعت کاهش راندمان حذف در روش TiO_2/ZSM_5 به طور تقریبی ۲ برابر این سرعت نسبت به روش ZSM_5 و ۳ برابر این سرعت نسبت به روش $UV/TiO_2/ZSM_5$ می باشد. فاکتور زمان بر راندمان حذف دارای اثر معکوس بود به طوری که با افزایش زمان، راندمان حذف کاهش و غلظت خروجی افزایش یافت.

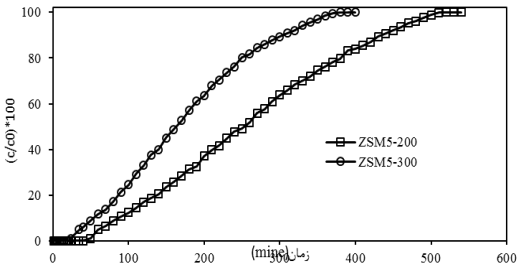


نمودار شماره ۱: مقایسه راندمان و سینتیک حذف استایرن در روش های ZSM_5، UV/ZSM_5، TiO_2/ZSM_5 و $UV/TiO_2/ZSM_5$

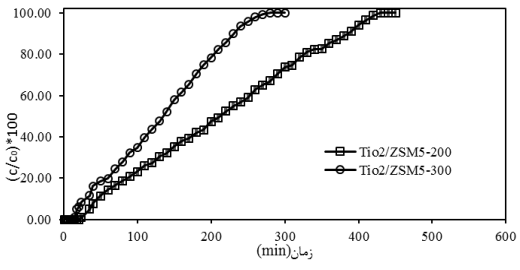
[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-02]

اثر غلظت اولیه استایرن بر میزان حذف ZSM_5، TiO_2/ZSM_5 و $UV/TiO_2/ZSM_5$

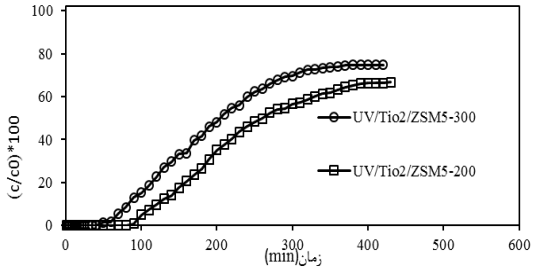
در بررسی اثر غلظت اولیه استایرن بر میزان حذف توسط ZSM_5، TiO_2/ZSM_5 و $UV/TiO_2/ZSM_5$، مشاهده شد که راندمان حذف در زمان‌های مشابه با دبی ۱ lit/min برای غلظت ۳۰۰ppm، کم‌تر از غلظت ۲۰۰ppm می‌باشد (نمودار شماره ۲، ۳ و ۴). در کاربرد ZSM_5 نتایج نشان داد که در غلظت ۲۰۰ppm، زمان اشباع ۵۱۰ دقیقه و در غلظت ۳۰۰ppm، زمان اشباع ۳۷۰ دقیقه است. در حالت کاربرد TiO_2/ZSM_5 مشاهده شد که در غلظت ۳۰۰ppm، اشباع جاذب و خروجی ۱۰۰ درصدی استایرن در زمان ۲۸۰ دقیقه و در غلظت ۲۰۰ppm این زمان حدود ۴۳۰ دقیقه می‌باشد. هم‌چنین در فرآیند فتواکسیداسیون در اثر تابش UV بر ترکیب TiO_2/ZSM مشاهده شد که در غلظت ۳۰۰ppm و زمان‌های بالاتر از ۳۵۰ دقیقه خروجی استایرن از راکتور بر روی حدود ۷۴ درصد ثابت می‌گردد، در حالی که در ۲۰۰ppm و در زمان‌های بالاتر از ۳۹۰ دقیقه خروجی روی حدود ۶۴ درصد ثابت می‌شود.



نمودار شماره ۲: اثر غلظت اولیه استایرن بر راندمان حذف ZSM_5



نمودار شماره ۳: اثر غلظت اولیه استایرن بر راندمان حذف TiO_2/ZSM_5



نمودارشماره۴: اثر غلظت اولیه استایرن بر راندمان حذف $UV/TiO_2/ZSM_5$

بحث

بررسی توانایی فرآیند فتواکسیداسیون در حضور TiO_2 و ZSM_5 در حذف استایرن در جریان هوا به عنوان هدف اصلی این مطالعه در نظر گرفته شد. در بررسی عناصر سازنده ZSM_5 با آنالیز EDX نتایج از سهم بالای عناصر Si و Al در ساختار زئولیت حکایت می‌کند که با نتایج مطالعه Yusof و همکاران مشابهت دارد(۲۵). وجود اکسیدهای این عناصر نشان می دهد که زئولیت به خوبی سنتز شده و می‌تواند در جذب و بهبود توانایی اکسیداسیون TiO_2 عمل خوبی داشته باشد(۲۶). نتایج حاصل از آنالیز SEM نشان داد که تولید ZSM_5 به شکل کریستال و بلور به خوبی شکل گرفته و پوشش حاصل TiO_2 بر روی آن به طور مناسب انجام شده است. هم چنین آنالیز BET کاهش سطح ویژه را در حالت پوشش دهی ZSM_5 با TiO_2 نشان داد که به علت گرفته شدن خلل و فرج بعد از عمل پوشش دهی می باشد. Sobana و همکاران (۲۰۰۷) در ساخت کاتالیست AC–ZnO جهت اکسیداسیون ۴-استیل فنل مشاهده نمودند که با افزایش درصد ZnO سطح ویژه (Activated carbon) AC کاهش می یابد که عامل آن را کاهش حجم تخلخل AC در اثر گرفتگی با ZnO پیشنهاد دادند (۲۷). نتایج نشان داد که در حالت تابش UV بر روی نانو کامپوزیت ZSM_5/TiO_2، بیش‌ترین راندمان حذف حاصل می‌شود و در تابش UV بر ZSM_5 راندمان حذف اختلاف ناچیزی با میزان جذب ZSM_5 داشت. هم‌چنین در حالت‌هایی که تابش UV

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-02]

وجود نداشت، ZSM_5 به تنهایی دارای راندمان بالاتری نسبت به نانو کامپوزیت ZSM_5/TiO_2 دارد. نتایج پر واضح می‌باشد، چرا که در شرایطی که تابش UV وجود ندارد، اصلی‌ترین مکانیسم حذف فرآیند جذب می‌باشد. از طرفی در آنالیز BET مشاهده شد هنگامی که TiO_2 بر روی ZSM_5 پوشش داده می‌شود، سطح ویژه و حجم تخلخل به طور معنی‌دار کاهش می‌یابد. این کاهش می‌تواند تاثیر ویژه‌ای در میزان جذب داشته و نهایتا میزان حذف را کاهش دهد. در مطالعه Jan و همکاران که از فرآیند فتوکاتالیستی $TiO2/ZSM_5$ به منظور حذف استن از جریان هوا استفاده شد، مشاهده گردید که در حالت عدم تابش پرتو UV، بالاترین راندمان جذب توسط ZSM_5 رخ می دهد، در حالی که پایین‌ترین راندمان مربوط به TiO2 بود. لازم به ذکر است که با افزایش نسبت TiO2 به ZSM_5، راندمان جذب کاهش یافت که این وضعیت می‌تواند به کاهش و گرفتگی تخلخل و منافذ سطح ZSM_5 نسبت داده شود(۲۸). با کاربرد تابش UV در فرآیند مشاهده شد که TiO_2/ZSM_5 حذف بیش‌تری را نسبت به ZSM_5 دارد چرا که TiO_2 به عنوان یکی از فعال‌ترین ترکیبات نیمه رسانا شناخته می‌شود که به راحتی با تابش UV فعال گردیده و منجر به حرکت الکترون از باند ظرفیت به باند هدایت رسانش خواهد شد. مطابق با واکنش‌های ۱، ۲ و ۳، این تابش منجر به تولید عوامل اکسید کننده قوی مانند OH^0 و O_2^- می‌گردد که از عوامل مهم تخریب ترکیبات آلی و تبدیل آن ها به ترکیبات CO_2 و H_2O می باشد (مطابق با واکنش ۴) (۱۳).

$$TiO_2 + hv \rightarrow h^+ + e^- \quad (1)$$
$$h^+ + OH^- \rightarrow OH^0 \quad (2)$$
$$e^- + O_{2ads} \rightarrow O_{2ads}^- \quad (3)$$
$$OH^0 + VOC + O_2 \rightarrow nCO_2 + mH_2O \quad (4)$$

از طرفی ZSM_5 با جذب استایرن منجر به افزایش غلظت و در دسترس قرارگیری این ترکیب با TiO_2 می‌شود که خود منجر به بهبود راندمان حذف می‌گردد. هم‌چنین این اتفاق خود به شکل یک فرآیند خودپالایی باعث تاخیر در اشباع ZSM_5 خواهد شد(۲۹). عدم تغییر راندمان حذف ZSM_5 با تابش UV مشخص می‌کند که این ترکیب با تابش فعال نمی گردد و تنها می‌تواند باعث جذب آلاینده شود و به دلیل خصوصیات مناسبش از نظر منافذ یکنواخت و قابلیت تعویض یونی باعث تغلیظ ترکیبات آلی و در نتیجه منجر به تشدید فرآیند فتوکاتالیستی گردد(۳۰).

Ichiura و همکاران (۲۰۰۳) از ترکیب زئولیت /TiO2 به منظور حذف فتوکالیستی ترکیبات تولوئن و فرمالدئید در جریان هوا استفاده نمودند و مشاهده نمودند که در حالت کاربرد TiO2 تحت تابش UV، کم‌ترین راندمان حاصل می‌شود، در حالی که در نسبت ۱:۴ کامپوزیت زئولیت /TiO2، راندمان حذف به بالاترین مقدار می‌رسد. این افزایش راندمان را به علت جذب مداوم آلاینده‌ها توسط زئولیت و در اختیار قرار دادن غلظت‌های بالای آلاینده برای اکسیداسیون گزارش نمودند. آن‌ها هم‌چنین مشاهده نمودند که در نسبت‌های بالاتر زئولیت/TiO_2(۱:۱۲)، به دلیل کاهش فعالیت فتوکاتالیستی TiO2 ناشی شده از کاهش درصد آن به ازای واحد جرم، راندمان کاهش می‌یابد. در مطالعه Jan و همکاران (۲۰۰۹) مشاهده شد که در فرایند جذب استن، در شرایط تابش UV راندمان حذف ZSM_5/TiO_2 نسبت به ZSM_5 افزایش قابل توجه‌ای دارد(۲۸). در نتایج مشخص گردید که اثر زمان بر راندمان حذف دارای رابطه عکس می‌باشد. دلیل کاهش را می‌توان به این گونه تفسیر نمود که در فرآیند جذب، آلاینده با گذر زمان خلل و فرج جاذب را اشباع می‌کند و سطح در دسترس برای جذب را کاهش می‌دهد و در فرآیند فتواکسیداسیون نیز کاهش TiO_2 به دلیل مصرف شدنش جهت اکسیداسیون ترکیبات آلی باعث کاهش راندمان حذف در طول زمان می‌شود. Ao و همکاران (۲۰۰۳) کاهش راندمان حذف ترکیبات BTEX را با افزایش زمان طی فرآیند فتواکسیداسیون TiO_2 مشاهده

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-02]

نمودند. راندمان حذف در ۴ ترکیب BTEX با یکدیگر دارای اختلاف بودند که علت آن به تفاوت در میزان جذب این ترکیبات توسط TiO_2 نسبت داده شد(۳۱).

در مطالعه Tao و همکاران (۲۰۰۶) که ترکیبی از فرآیندهای جذب و اکسیداسیون را برای حذف متانول استفاده نمودند، مشاهده شد که افزایش زمان در تمام حالات TiO_2/AC، TiO_2/AC/UV، AC و AC/UV منجر به افزایش نسبت C/C_0 می‌شود(۳۲). در بررسی افزایش غلظت بر میزان حذف مشاهده شد که در همه حالات از حذف، با افزایش غلظت از ۲۰۰ppm به ۳۰۰ppm یک کاهش راندمان به دست می‌آید. افزایش غلظت استایرن در شرایط بدون تغییر در غلظت ZSM_5 و TiO_2 و یا شدت تابش UV باعث می‌گردد که در فرآیند جذب با اشباع زودتر سطح جاذب، بخشی از آلاینده بدون حذف رها گردد و هم‌چنین در فرآیند اکسیداسیون، رادیکال‌ها فعال به میزانی که غلظت‌های بالاتر آلاینده را اکسید کنند، در دسترس نباشند. بنابراین راندمان حذف با افزایش غلظت آلاینده کاهش خواهد یافت(۳۳).

نتایج نشان داد که نیمه رساناها منجمله TiO_2 در اکسیداسیون ترکیبات آلی توانایی بالقوه ای دارند، اما به دلیل قابلیت جذب کم این ترکیبات، دسترسی به ترکیبات آلی کاهش می یابد. بنابراین با کاربرد جاذب‌هایی از جمله ZSM_5 در فرآیند اکسیداسیون می‌توان میزان غلظت در دسترس ترکیبات آلی برای TiO_2 را افزایش داد و باعث افزایش راندمان جذب شد. نتایج هم‌چنین نشان داد که تاثیر UV بر ZSM_5 هیچ افزایشی در راندمان حذف ندارد چراکه این جاذب تحت تاثیر UV فعال نمی گردد و مکانیسم اصلی حذف توسط این ترکیب فرآیند جذب می‌باشد. از طرفی با پوشش زئولیت با TiO_2 راندمان جذب به دلیل کاهش سطح ویژه کاهش می‌یابد. هم‌چنین این مطالعه ما را به این نتیجه رساند که افزایش زمان و افزایش غلظت آلاینده به دلیل اشباع و کاعش TiO2 فعال، راندمان حذف شیب کاهش به خود می‌گیرد. در مجموع می‌توان روش توام جذب و فتواکسیداسیون را به عنوان تکنیک مناسبی برای حذف استایرن و ترکیبات مشابه پیشنهاد داد.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله نویسندگان مقاله از دانشگاه تربیت مدرس به منظور مساعدت در انجام پژوهش حاضر صمیمانه قدردانی می‌نمایند.

References

1. Cooper CD, Alley FC. Air pollution control: A design approach. 3thed. Long Grove; Waveland Press; 2002.
2. Dehghani MH, Salari M, Naddafi K, Nazmara S, Ahmadi E, Kumar P. Evaluation of formaldehyde concentration in the ambient air of a most populated Iranian city, Tehran Air Quality. Atmosphere & Health 2017; 10(6): 763-772.
3. Khan FI, Ghoshal AK. Removal of volatile organic compounds from polluted air. J Loss Prev Process Ind 2000; 13(6): 527-545.
4. Lillo-Ródenas M, Cazorla-Amorós D, Linares-Solano A .Behaviour of activated carbons with different pore size distributions and surface oxygen groups for benzene and toluene adsorption at low concentrations. Carbon 2005; 43(8): 1758-1767.
5. Maciá-Agulló JA, Cazorla-Amoros D, Linares- Solano A, Wild U, Su DS ,Schlögl R. Oxygen functional groups involved in the styrene production reaction detected by quasi in situ XPS. Catal Today 2005; 102-103: 248-253.
6. Cavani F, Teles JH. Sustainability in catalytic oxidation: an alternative approach or a structural evolution? Chem Sus Chem 2009; 2(6): 508-534.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-02]

7. Winder C, Stacey NH. Occupational toxicology. 2th ed .Florida, CRC press; 2004.
8. Vodicka P, Koskinen M, Arand M, Oesch F, Hemminki K. Spectrum of styrene-induced DNA adducts: the relationship to other biomarkers and prospects in human biomonitoring. Mutat Res 2002; 511(3): 239-254.
9. Cherry N, Gautrin D. Neurotoxic Effects of Styrene: Further Evidence. Br J Ind Med 1990; 47(1): 29-37.
10. Guillemot M, Mijoin J, Mignard S, Magnoux P. Volatile organic compounds (VOCs) removal over dual functional adsorbent/catalyst system. Appl Catal B 2007; 75(3): 249-255.
11. Ao C, Lee S. Combination effect of activated carbon with TiO 2 for the photodegradation of binary pollutants at typical indoor air level. J Photochem Photobiol 2004; 161(2-3): 131-140.
12. Kitano M, Matsuoka M, Ueshima M, Anpo M. Recent developments in titanium oxide-based photocatalysts. Appl Catal A 2007; 325(1): 1-14.
13. Mo J, Zhang Y, Xu Q, Lamson JJ, Zhao R. Photocatalytic purification of volatile organic compounds in indoor air: a literature review. Atmos Environ 2009; 43(14): 2229-2246.
14. Jaafarzadeh Haghighifard N, Mirali S, Jorfi S, Dinarvand F, Alavi N. Efficiency Study on Nanophotocatalytic Degradation and Detoxification of CI direct blue 86 from Aquatic Solution Using UVA/TiO2 and UVA/ZnO. J Mazandaran Uni Med Sci 2016; 26(143): 145-159 (Persian).
15. Fujishima A, Zhang X. Titanium dioxide photocatalysis: present situation and future approaches. Comptes Rendus Chimie 2006; 9(5): 750-760.
16. Ao CH, Lee SC. Indoor air purification by photocatalyst TiO2 immobilized on an activated carbon filter installed in an air cleaner. Chem Eng Sci 2005; 60(1): 103-109.
17. Ichiura H, Kitaoka T, Tanaka H. Removal of indoor pollutants under UV irradiation by a composite TiO2–zeolite sheet prepared using a papermaking technique. Chemosphere 2003; 50(1): 79-83.
18. Lafjah M, Djafri F, Bengueddach A, Keller N, Keller V. Beta zeolite supported sol–gel TiO2 materials for gas phase photocatalytic applications. J Hazardous Mater 2011; 186(2-3): 1218-1225.
19. Thevenet F, Guaitella O, Herrmann J, Rousseau A, Guillard C. Photocatalytic degradation of acetylene over various titanium dioxide-based photocatalysts. Appl Catal B 2005; 61(1): 58-68.
20. Yazdani-Aval M, Mortazavi S, Asilian-Mahabadi H. Evaluation of absorption efficiency of Zeolite ZSM-5 in the removal of styrene vapors. JOHE 2016; 5(1): 10-19.
21. Biglu YFG, Taheri-Nassaj E. Investigation of phase separation of nano-crystalline anatase from TiO2 SiO2 thin film. Ceram Int 2013; 39(3): 2511-2518.
22. Biglu YF-G, Taheri-Nassaj E. Synthesis and characterization of alumina supported sub-nanoporous SiO2–10 wt% TiO2 membrane for nitrogen separation. J Ind Eng Chem 2013; 19(5): 1752-1759.
23. Mahadwad O, Parikh P, Jasra R, Patil C. Photocatalytic degradation of reactive black-5 dye using TiO 2 impregnated ZSM-5. Bull Mater Sci 2011; 34(3): 551-556.
24. Mohamed R, Ismail A, Othman I, Ibrahim I. Preparation of TiO2-ZSM-5 zeolite for photodegradation of EDTA. J Mol Catal A: Chem 2005; 238(1-2): 151-157.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-02]

25. Yusof AM, Keat LK, Ibrahim Z, Majid ZA, Nizam NA. Kinetic and equilibrium studies of the removal of ammonium ions from aqueous solution by rice husk ash-synthesized zeolite Y and powdered and granulated forms of mordenite. J Hazard Mater 2010; 174(1): 380-385.
26. Yoneyama H, Torimoto T. Titanium dioxide/adsorbent hybrid photocatalysts for photodestruction of organic substances of dilute concentrations. Catal Today 2000; 58(2-3): 133-140.
27. Sobana N, Muruganandam M, Swaminathan M. Characterization of AC–ZnO catalyst and its photocatalytic activity on 4-acetylphenol degradation. Catal Commun 2008; 9(2): 262-268.
28. Jan Y-H, Lin L-Y, Karthik M, Bai H. Titanium dioxide/zeolite catalytic adsorbent for the removal of NO and acetone vapors. J Air Waste Manag Assoc 2009; 59(10): 1186-1193.
29. Kuwahara Y,Yamashita H.Efficient photocatalytic degradation of organics diluted in water and air using TiO 2 designed with zeolites and mesoporous silica materials. J Mater Chem 2011; 21(8): 2407-2416.
30. Yamashita H, Ichihashi Y, Anpo M, Hashimoto M, Louis C, Che M. Photocatalytic decomposition of NO at 275 K on titanium oxides included within Y-zeolite cavities: The structure and role of the active sites. J Phys Chem 1996; 100(40): 16041-16044.
31. Ao C, Lee S, Mak C, Chan L. Photodegradation of volatile organic compounds (VOCs) and NO for indoor air purification using TiO 2: promotion versus inhibition effect of NO. Appl Catal B 2003; 42(2): 119-129.
32. Tao Y, Wu C-Y, Mazyck DW. Removal of methanol from pulp and paper mills using combined activated carbon adsorption and photocatalytic regeneration. Chemosphere 2006; 65(1): 35-42.
33. Tao Y, Schwartz S, Wu C-Y, Mazyck DW. Development of a TiO2/AC composite photocatalyst by dry impregnation for the treatment of methanol in humid airstreams. Ind Eng Chem Res 2005; 44(19): 7366-7372.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-02]