



Investigating the effect of gas flow rate, inlet ozone concentration and relative humidity on the efficacy of catalytic ozonation process in the removal of xylene from waste airstream

Gh.R. Moussavi¹, A. Khavanin², H.R. Mokarami³

Received: 2010/5/15

Revised: 2010/6/22

Accepted: 2010/8/21

Abstract

Background and aims: The catalytic ozonation is an efficient process for the degradation of volatile organic compounds from contaminated air stream. This study was aimed at investigating the efficacy of catalytic ozonation process in removal of xylene from the polluted air stream and the influence of retention time (gas flow rate), inlet ozone dose and relative humidity on this performance.

Methods: the catalytic ozonation of xylene was conducted using a bench scale set-up consisted of a syringe pump, an air pump, an ozone generator, and a glass reactor packed with activated carbon. Several experimental run was defined to investigate the influence of the selected operational variables.

Results: The results indicated that the efficiency of catalytic ozonation was greater than that of single adsorption in removal of xylene under similar inlet concentration and relative humidity. We found a significant catalytic effect for activated carbon when used in combination with ozonation process, leading to improvement of xylene removal percentage. In addition, the elimination capacity of the system improved with the increase of inlet ozone dose as well as gas flow rate. The relative humidity showed a positive effect of the xylene removal at the range of 5 to 50%, while the higher humidity (more than 50%) resulted in reduction of the performance.

Conclusion: The findings of the present work revealed that the catalytic ozonation process can be an efficient technique for treating the air streams containing industrial concentrations of xylene. Furthermore, there is a practical potential to retrofit the present adsorption systems into the catalytic ozonation simply by coupling them with the ozonation system.

Keywords: Volatile organic compounds, xylene, adsorption, activated carbon, ozone, catalytic ozonation

-
1. **Corresponding author**, Assistant Professor, Department of Occupational and Environmental Health, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tel: 021- 82883827, moussavi@modares.ac.ir
 2. Assistant professor, Department of Occupational and Environmental Health, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University.
 3. MSc in Occupational Health, Department of Occupational and Environmental Health, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University.

بررسی اثر زمان ماند، دوز ازن و رطوبت نسبی بر کارایی فرایند ازنزی کاتالیزوری در حذف زایلن از جریان هوای آلوده

غلامرضا موسوی^۱، علی خوانین^۲، حمید رضامکرمی^۳

تاریخ پذیرش: ۸۹/۵/۳۰

تاریخ ویرایش: ۸۹/۴/۱

تاریخ دریافت: ۸۹/۲/۲۵

چکیده

هدف: فرایند ازنزی کاتالیزوری، یک روش کارآمد برای تصفیه ترکیبات آلی فرار از جریان هوای آلوده می‌باشد. این تحقیق با هدف بررسی کارایی فرایند ازنزی کاتالیزوری در حذف زایلن از جریان هوای آلوده و همچنین تأثیر اثر زمان ماند (میزان جریان گاز)، دوز ازن و رودی و رطوبت نسبی بر کارایی این فرایند انجام شد.

روش بررسی: در این مطالعه، جهت ارزیابی ازنزی کاتالیزوری زایلن از یک سیستم آزمایشگاهی که شامل پمپ تزریق سرنگی، پمپ تزریق هوا، دستگاه مولد ازن و راکتور شیشه‌ای که کربن فعال در آن قرار داده شده بود، استفاده شد. برای بررسی تاثیر هریک از متغیرهای مورد نظر، چندین مرحله آزمایش انجام شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد، ظرفیت حذف زایلن در فرایند ازنزی کاتالیزوری، به طور قابل محسوسی بیشتر از کربن فعال به تنها بود. کربن فعال در حضور ازن به عنوان کاتالیزور عمل کرده و باعث افزایش معنی دار راندمان تجزیه زایلن شده است. علاوه بر آن، با افزایش دوز ازن در رودی راکتور و جریان هوا، ظرفیت سیستم در حذف زایلن نیز افزایش یافت. همچنین با افزایش رطوبت نسبی از ۵٪ به ۵۰٪، کارایی سیستم در حذف زایلن ارتقاء یافت. در حالی که با افزایش بیشتر رطوبت نسبی (بالای ۵٪)، کارایی سیستم تنزل یافت.

نتیجه‌گیری: سیستم ازن-زنی کاتالیزوری می‌تواند به عنوان روش مناسب با کارایی بالا برای حذف زایلن از جریان هوای آلوده در غلطهای بالا استفاده شود. همچنین، این سیستم می‌تواند به راحتی برای تبدیل سیستم‌های جذب کربن فعال حاضر به سیستم ازنزی کاتالیزوری استفاده شود.

کلیدواژه‌ها: ترکیبات آلی فرار، زایلن، جذب سطحی، کربن فعال، ازن، ازنزی کاتالیزوری

دغدغه‌های مهم جامعه بشری تبدیل شده است [۱]. از جمله مهمترین ترکیبات آلوده کننده هوای از صنایع منتشر می‌شوند، ترکیبات آلی فرار (Compounds VOCs: Volatile Organic Compounds) می‌باشند. این ترکیبات می‌توانند باعث ایجاد عوارض بهداشتی مختلفی بر روی سیستم اعصاب مرکزی و دیگر ارگانهای داخلی بدن انسان مانند کبد شوند. همچنین VOC‌هادر صورت انتشار در اتمسفر می‌توانند باعث تشکیل مه دود

مقدمه

یکی از دستاوردهای مهم بشر در سالهای اخیر شد سریع صنایع مختلف و گسترش ساخت مواد شیمیایی گوناگون می‌باشد. در کنار این پیشرفتها که آسایش و راحتی انسانهار ادریبی داشته است، مسائل و مشکلات عدیدهای از جمله آلودگی زیست محیطی و به ویژه آلودگی هوار ادریبی داشته است که به تدریج به یکی از

۱. (نویسنده مسئول)، استادیار، گروه بهداشت حرفه‌ای و محیط، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، تلفن: ۸۲۸۸۳۸۲۷

moussavi@modares.ac.ir

۲. استادیار، گروه بهداشت حرفه‌ای و محیط، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳. کارشناس ارشد بهداشت حرفه‌ای، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران



می‌دهد که اکسیدهای منگنز باعث افزایش سرعت تجزیه و تبدیل ازن به اتمهای اکسیژن و واکنش با بنزن و در نتیجه افزایش کارایی فرایند حذف بنزن می‌شوند [۱۲]. با این وجود، تحقیقات خیلی کمی بر روی دیگر مواد از جمله جاذبهای سطحی بعنوان کاتالیزور در فرایند ازن‌زی کاتالیزوری برای حذف VOC‌ها نجام شده است. مواد متخلخل برخلاف کاتالیزورهای فلزی می‌توانند ترکیبات واسطه وازن باقیمانده را در خود نگه دارند و همچنین باعث افزایش زمان ماند برای واکنش بین ازن و آلاینده شوند. علاوه بر این هزینه مواد متخلخل پایین است [۱۳]. همان طور که قبلاً ذکر شد از معایب اصلی استفاده از جاذبهای سطحی اشباع شدن و در نتیجه کاهش کارایی آنها به مرور زمان است. با به کارگیری ترکیبی از این دوروش، علاوه بر اینکه ازن باعث اکسید کردن ترکیبات آلی فرار جذب سطحی شده بر روی جاذب سطحی می‌گردد، خود جانشین این ترکیبات شده و باعث می‌شود که زمان اشباع شدن جاذب سطحی افزایش یابد که این به نوبه خود کارایی کربن فعال در حذف آلاینده را افزایش خواهد داد و همچنین از آزاد شدن ازن به محیط جلوگیری خواهد شد [۱۰^۹]. بنابراین، هدف از این تحقیق، بررسی کارایی فرایند ازن‌زی کاتالیزوری با استفاده از کربن فعال برای حذف زایلن به عنوان یکی از متداولترین آلاینده‌های منتشره از صنایع [۱۴] است. در این مطالعه، اثر میزان جریان هوای عبوری (زمان تماس)، دوز ازن‌زی و رطوبت نسبی هوای عبوری بر کارایی فرایند ازن‌زی کاتالیزوری در حذف زایلن مورد بررسی قرار گرفت.

روش بررسی

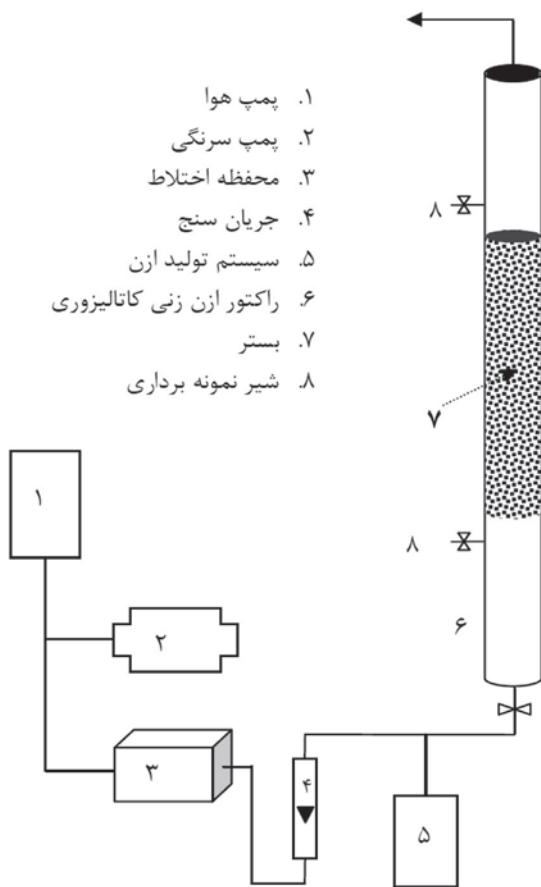
در این تحقیق از یک راکتور ازن‌زی کاتالیزوری در مقیاس آزمایشگاهی استفاده شد. سیستم آزمایشی مورد استفاده در این تحقیق شامل راکتور، پمپ تزریق سرنگی (Syringe pump)، پمپ تزریق هوا، دستگاه مولد ازن، محفظه اختلاط، روتامتر، شبکه لوله‌کشی و سایر متعلقات مربوطه می‌باشد. نمایی کلی از سیستم مورد استفاده در شکل انشان داده شده است.

در این تحقیق، جهت نزدیک کردن شرایط فرایند با شرایط واقعی، از راکتور با جریان مداوم به صورتی که

فتوصیمیابی، گرم شدن کره زمین، تغییرات آب و هوایی و دیگر مشکلات محیط زیستی شوند [۲ و ۳]. بنابراین، برای جلوگیری از مشکلات بهداشتی و زیست محیطی، می‌بایستی VOC‌ها از جریان هوای آلوده قبل از تخلیه به محیط حذف شوند.

یکی از مهمترین و گسترش دهنده ترین روش‌های مورد استفاده برای کنترل VOC‌ها، فرایند جذب سطحی است [۴]. در میان جاذبهای مختلفی که در فناوری جذب سطحی استفاده می‌شوند، کربن فعال به علت سادگی کار با آن، هزینه‌های عملیاتی پایین و بازیافت مؤثر اغلب VOC‌ها، بطور گسترده برای حذف VOC‌ها از هوای آلوده در صنایع استفاده می‌شود [۵ و ۶]. کارایی کربن فعال در حذف آلاینده‌ها از هوای آلوده در دهه‌های اخیر به اثبات رسیده است [۵] و در حال حاضر، روش جذب سطحی با جاذب کربن متخلخل، گسترده ترین روش تصفیه هوای حاوی ترکیبات فرار از هوای است [۷]. از مهمترین معایب این روش کاهش کارایی آن در زمانی است که با مواد جذب شده سطحی به حالت اشباع یا تعادل رسیده، در نتیجه نیاز به احیای مکرر آن و به دنبال آن افزایش هزینه است. همچنین فرآیند جذب سطحی فقط باعث تغییر فاز آلاینده از هوای به روی جسم جامد می‌شود [۵]. از دیگر فرآیندهای مورد استفاده برای تصفیه VOC‌ها روش اکسیداسیون شیمیایی بویژه استفاده از گاز ازن است، اما استفاده از این روش برای حذف VOC‌ها با توجه به کارایی کم، امکان تولید ترکیبات واسطه خط‌رانک و انتشار ازن در محیط، دارای محدودیت‌هایی است [۸]. با این وجود، این گاز پتانسل اکسیداسیون زیادی داشته و بیشتر ترکیبات آلی فرار را اکسید می‌کند و اکسیژن و دیگر محصولات جانبی اکسیداسیون تولید می‌کند [۹].

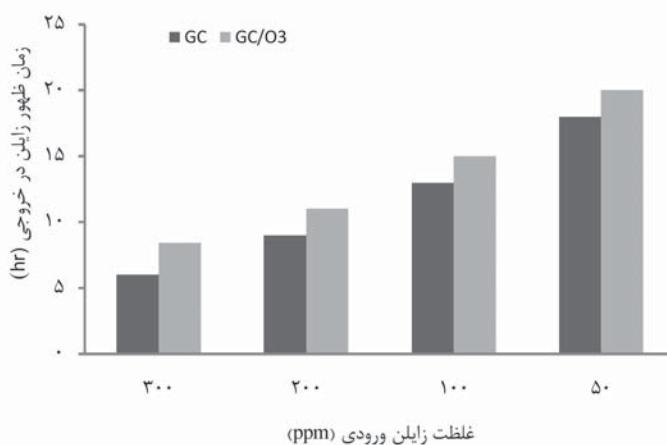
در سالهای اخیر تحقیقات زیادی برای رفع محدودیتهای روش ازن‌زی شده است، که از مهمترین آنها، بویژه برای غلظتهای پایین VOC‌ها، استفاده از فرایند ازن‌زی کاتالیزوری می‌باشد [۱۰]. در این فرایند از مواد مختلفی از جمله اکسیدهای فلزی بعنوان کاتالیزور، استفاده شده است [۱۱]. نتایج مطالعه اینگا (Einaga) و فوچامورا (Futamura) (برروی اکسیداسیون کاتالیزوری بنزن با استفاده از ازن و اکسیدهای منگنز نشانده شده روی آلومینیا بعنوان کاتالیزور، نشان



شکل ۱- شماتیک سیستم آزمایش مورد استفاده در مطالعه

گردید. مایع زایلن با خلوص ۹۹٪ از شرکت Merck تهیه گردید. با توجه به اینکه هر گونه نوسان در میزان دبی پمپ تزریق هوا می‌تواند بر میزان غلظت گاز تأثیر داشته باشد و همچنین جهت یکنواخت‌سازی و ثابت کردن غلظت مورد نظر، یک محفظه اختلاط بعد از دستگاه تزریق سرنگی نصب گردید. همچنین جهت سنجش میزان دقیق دبی هوا از یک روتامتر کالیبره شده استفاده گردید. برای ارزیابی کارایی سیستم در سطوح مختلف رطوبت نسبی (۷۰-۵٪)، با استفاده از یک ایمپینجر حاوی آب مقطر، هیتر و پمپ تزریق، رطوبت‌های موردنظر ساخته شد. بدین منظور با تغییر سطح آب داخل ایمپینجر، دمای هیتر یا دبی پمپ، رطوبت نسبی موردنظر ساخته شده واژ طریق یک شیر به سیستم تزریق می‌شد. برای اندازه‌گیری رطوبت از رطوبت سنج استفاده شد. از کربن فعال با اندازه ۲/۳۸ میلیمتر (مش ۱۰-۸)

جهت جریان از پایین به بالا بود، استفاده شد. راکتور مورد استفاده از جنس شیشه پیرکس و به شکل استوانه، به ارتفاع ۵۰ سانتی متر و قطر داخلی ۳۰ میلیمتر ساخته شد و برای قرار دادن کربن فعال در درون راکتور، در فاصله ۱۰ سانتیمتری از انتهای راکتور، یک صفحه مشبک نصب شد. برای تولید ازن مورد نیاز از ژنراتور تولید ازن بانشان تجاری ARDA مدل ۵۵-AEGCOG استفاده شد. در این ژنراتور، ازن از طریق ایجاد تخلیه‌ی الکتریکی به وسیله جریان متناوب در میان یک شکاف تخلیه و با حضور اکسیژن یا هوای خشک تولید می‌شود. جهت تأمین هوا و تولید میزان دوزهای مختلف ازن از یک پمپ تزریق هوا که دبی آن با کمک درجه تنظیم پمپ امکان پذیر بود، به همراه یک روتامتر استفاده شد. برای تهیه هوازی زایلن در غلظتها مورد نظر (۵۰-۳۰۰ ppm) از دستگاه تزریق سرنگی به همراه پمپ تزریق هوا استفاده



شکل ۲- مقایسه زمان ظهور زایلن در سیستم کربن فعال (GC) با فرایند ازن زنی کاتالیزوری (GC/O3) در غلظتها م مختلف

عبارةت بودند از: دما $23-25^{\circ}\text{C}$; دبی جریان هوای ورودی به راکتور $1/17\text{L/min}$; کربن فعال ۱۰ گرم؛ رطوبت نسبی ۷.۵٪؛ دوز ازن 202mg/h ; غلظت زایلن در هوای ورودی $50-300\text{ppm}$. نتایج حاکی از آن است که با افزایش غلظت زایلن، نقطه ظهور زایلن در خروجی سیستم بطور محسوسی در هردو سیستم کاهش یافته است. همان طور که در شکل ۲ دیده می شود، نقطه ظهور زایلن در خروجی سیستم کربن فعال به تنها یکی با افزایش غلظت از 50 به 300ppm از 18 به 6 ساعت و در فرایند ازن زنی کاتالیزوری از 20 به $8/4$ ساعت کاهش یافت.

اثر میزان رطوبت نسبی هوای ورودی بر کارایی فرایند ازن زنی کاتالیزوری (کربن فعال و ازن) در حذف زایلن: در این مرحله از آزمایش تأثیر رطوبت نسبی در گستره $70-70.5\%$ بر کارایی فرایند ازن زنی کاتالیزوری در غلظت 200ppm زایلن مورد ارزیابی قرار گرفت و سایر متغیرهای تأثیر گذار بر کارایی سیستم مانند مرحله قبل ثابت نگه داشته شد. یافته ها که در شکل ۳ ترسیم شده است نشان می دهد که با افزایش رطوبت نسبی از ۵٪ به ۵۰٪، کارایی سیستم در حذف زایلن ارتقاء یافت، بطوریکه ظرفیت جذب سطحی کربن فعال از 106mg/g افزایش یافت. با افزایش بیشتر رطوبت نسبی (بالای ۵٪)، کارایی سیستم تنزل یافت و ظرفیت جذب تا 99mg/g کاهش یافت.

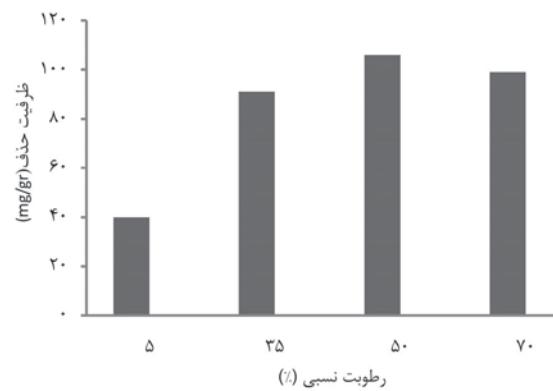
با سطح ویژه $900\text{m}^2/\text{g}$ ، ساخت شرکت Merck، بعنوان کاتالیزور استفاده شد. جهت حذف هر گونه آلودگی احتمالی و رطوبت از سطح کربن، قبیل از استفاده از آن، به مدت ۴ ساعت در دمای 350 درجه سانتیگراد قرار داده شد. برای هر مرحله کلیه آزمایشها سه بار تکرار شد و میانگین سه بار تکرار هر پارامتر به عنوان مقدار آن گزارش شد. همچنین تمامی آزمایشها در دمای آزمایشگاه ($23-25^{\circ}\text{C}$) و فشار اتمسفر وزیر هود انجام شد. اندازه گیری غلظت زایلن با استفاده از دستگاه قرائت مستقیم Phocheck ۵۰۰۰ ساخت کشور انگلستان که با روش آشکارسازی یونها (PID) و به صورت هم زمان نمونه برداری و اندازه گیری را انجام می دهد صورت گرفت. همچنین به منظور اندازه گیری غلظت ازن در فاز گازی از روش جذب یدید پتابسیم و به دنبال آن یedomتری استفاده شد [۱۵].

یافته ها

اثر غلظت زایلن در هوای ورودی بر عملکرد فرایند ازن زنی کاتالیزوری: نتایج کارایی کربن فعال به تنها یکی و فرایند ازن زنی کاتالیزوری در حذف زایلن از جریان هوای آلوده بر مبنای زمان ظهور زایلن در خروجی راکتور در شکل ۲ نشان داده شده است. بر اساس این شکل نقطه شکست حذف زایلن در سیستم ازن زنی کاتالیزوری نسبت به سیستم جذب روی کربن فعال به تنها یکی دیرتر اتفاق می افتد.

شرایط آزمایش انتخابی در این مرحله از آزمایش

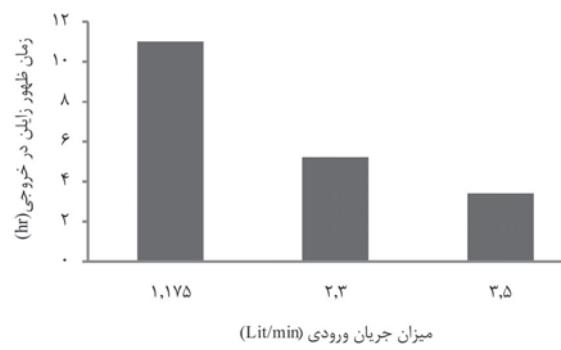
میزان جریان‌هوا (کاهش زمان ماند)، زمان ظهرورزایلن در خروجی راکتور کاهش یافته است، اما یافته‌هانشان داد ظرفیت حذف، یعنی مقدار زایلن حذف شده به ازای واحد جرم کربن فعال افزایش یافت. شکل ۵ نیز اثر دوز ازن در هوای ورودی در گستره $0/20-76\text{g}/\text{h}$ بر کارایی فرایند ازن زنی کاتالیزوری بر حذف زایلن بر حسب ظرفیت حذف را نشان می‌دهد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش دوز ازن در ورودی راکتور، ظرفیت سیستم در حذف زایلن نیز افزایش یافته است. به عبارت دیگر، با افزایش دوز ازن از $0/2$ به $0/76\text{g}/\text{h}$ ظرفیت حذف زایلن حدود ۶۲٪ افزایش داشته است.



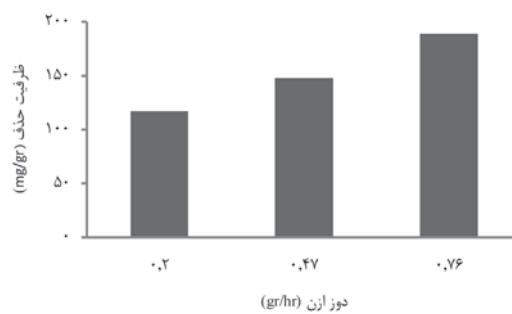
شکل ۳- ظرفیت جذب سطحی زایلن در فرایند ازن زنی کاتالیزوری در رطوبتهای مختلف

بحث

نتایج این تحقیق نشان داد زمان ظهرورزایلن در خروجی ازن زنی کاتالیزوری در شرایط مشابه برای فرایند ازن زنی کاتالیزوری نسبت به کربن فعال به تنها یی بیشتر بوده است (شکل ۲). به عنوان نمونه این زمان برای غلظت 300ppm در فرایند ازن زنی کاتالیزوری $\%40$ نسبت به کربن فعال تنها افزایش یافته است و به طور متوسط، در تمامی غلظتها افزایش کارایی $\%22$ مشاهده گردید. ونگ (kwong) و همکارانش جهت حذف تولوئن، تاثیر ازن عبوری بر روی جاذبهای سطحی زئولیت و $41-\text{MCM}$ - A مورد ارزیابی قرار دادند. یافته‌های آنها نشان داد که میزان حذف تولوئن در فرایند ازن زنی کاتالیزوری نسبت به فرایند جذب سطحی زئولیت و $41-\text{MCM}$ - A به تنها $\%20-40$ افزایش یافت [۱۳]. عوامل متعددی می‌تواند بر این افزایش کارایی تأثیر گذار باشند. دلیل بیشتر بودن حذف زایلن در فرایند ازن زنی کاتالیزوری نسبت به فرایند جذب به تنها یی این است که در فرایند ازن زنی کاتالیزوری جاذب سطحی به عنوان کاتالیزور عمل نموده و باعث تجزیه ازن به اتمهای اکسیژن می‌شود. همچنین کربن فعال با ایجاد یک بستر محصور کننده (با جذب سطحی هردوی ازن و VOC) زمان ماند برای واکنش ازن-VOC را افزایش می‌دهد، بعنوان کاتالیزور عمل نموده و باعث افزایش کارایی فرایند حذف می‌شود [۱۰]. از طرف دیگر جاذب سطحی باعث افزایش سطح تماس ازن و مولکولهای زایلن جذب شده بر روی جاذب سطحی می‌شود. نتایج تحقیقات



شکل ۴- زمان ظهرورزایلن در فرایند ازن زنی کاتالیزوری در میزان جریان‌های ورودی مختلف



شکل ۵- ظرفیت حذف زایلن در فرایند ازن-زنی کاتالیزوری در دوزهای مختلف ازن

اثر زمان ماند و دوز ازن بر کارایی فرایند ازن زنی کاتالیزوری در حذف زایلن: نتایج اثر زمان ماند و دوز ازن بر کارایی فرایند ازن زنی کاتالیزوری در غلظت 200ppm زایلن، به ترتیب در شکل ۴ و نشان داده شده است. شکل ۴ نشان می‌دهد که هر چند با افزایش



* اکسیداسیون مستقیم:



intermediates

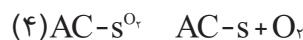
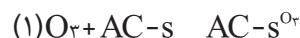


intermediates



intermediates

نشان می‌دهد در فرایند ازنزی کاتالیزوری، در اثر واکنش میان ازن و جایگاه‌های اسید لوویس جاذب سطحی، ازن به اتمهای فعال اکسیژن (رادیکالهای اکسیژن) تجزیه می‌شود. این رادیکالها باعث اکسیداسیون مولکول‌های زایلن جذب شده بر روی جاذب سطحی می‌شوند [۱۰۹]. مطالعات نشان می‌دهد، O_2 در جایگاه‌های اسید لوویس جاذب سطحی، طبق واکنشهای زیر به O_2 و O^o تجزیه می‌شود [۱۰۱۲]:



در این معادلات $\text{AC}-\text{s}^{\text{O}_\text{r}}$ و $\text{AC}-\text{s}^{\text{O}_\text{0}}$ به ترتیب نشانگر جایگاه اسید لوویس در جاذب سطحی و مولکولهای ازن جذب سطحی شده و $\text{AC}-\text{s}^{\text{O}_\text{0}}$ و $\text{AC}-\text{s}^{\text{O}_\text{r}}$ نشانگر گونه‌های اکسید سطحی هستند. $\text{AC}-\text{s}^{\text{O}_\text{0}}$ همچنین می‌تواند با مولکول‌های موجود در بخار آب در هوای ورودی، واکنش داده و طبق واکنش ۵، منجر به تولید رادیکال هیدروکسیل (OH) شده که در تجزیه مولکول‌های آلی شرکت می‌کنند:



با عبور هوای حاوی زایلن و ازن و تماس آن با بستر، واکنشهای کاتالیز شده فوق انجام شده و زایلن طبق واکنشهای کلی زیر تجزیه می‌شود. در فرایند ازنزی-کاتالیزوری در صورت واکنش کامل زایلن (C_8H_{10}) بارادیکالهای حاصل از تجزیه O_3 از جمله $\text{O}^\text{o}\text{OH}$ و O_2 ، معادله کلی می‌تواند به صورت زیر باشد:

* اکسیداسیون غیرمستقیم:



intermediates



intermediates

فعال، رطوبت نسبی جریان هوای بیشتر از ۶۰٪ باشد [۵].

همچنین، یافته‌های این مطالعه نشان داد با افزایش دوز ازن ورودی به راکتور، کارایی فرایند ازن‌زنی کاتالیزوری بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت. جایگاه‌های اسید لوویس در جاذبهای سطحی یک نقش کلیدی در فرایند ازن‌زنی کاتالیزوری ایفای می‌کنند. ازن در این جایگاهها به اتمهای اکسیژن تجزیه می‌شود و بطور متواالی VOC‌ها را اکسید می‌کند [۹]. استفاده از دوز ازن ورودی بیشتر باعث می‌شود تعداد مولکولهای ازن بیشتری به جایگاههای فعلی کربن فعال متصل شود و در نتیجه باعث تجزیه بیشتر زایلن می‌شود. اشباع این جایگاه‌ها، مانع از جذب سطحی و تجزیه ازن و در نتیجه باعث کاهش کارایی فرایند می‌شود. همانطور که قبلًا ذکر شد، یکی از دلایل غیرفعال شدن جاذب سطحی و اشباع آن در فرایند ازن‌زنی کاتالیزوری، جذب سطحی ترکیبات واسطه است که در اثر واکنش ناقص ازن و ترکیبات VOC تشکیل می‌شوند [۱۰]. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد، استفاده از ازن بیشتر می‌تواند سبب کاهش تشکیل این ترکیبات گردد [۱۳]. علاوه بر اینها، با توجه به اینکه ازن یک ماده اکسید کننده است، مطابق با معادله‌های -10 ، بطور مستقیم بازیلن واکنش می‌دهد. میزان کارایی حذف بر اثر این مکانیسم، به دوز ازن بستگی دارد [۹]. لازم به ذکر است، هر چند ممکن است کارایی سیستم ازن‌زنی کاتالیزوری با استفاده از دوزهای بیشتر ازن افزایش یابد، اما میزان ازن باقیمانده در خروجی سیستم نیز باید مدنظر قرار گیرد.

به علاوه، نتایج نشان داد با کاهش زمان ماند، اگرچه ظرفیت حذف، یعنی مقدار زایلن حذف شده به ازای واحد جرم کربن فعل افزایش یافت، اما زمان حذف کاهش داشت. دلیل افزایش ظرفیت حذف با کاهش زمان ماند (متناظر با افزایش میزان جریان هوا)، افزایش میزان بار جرمی زایلن ورودی به راکتور بوده است. افزایش میزان جریان هوا باعث کاهش زمان ماند آلاینده و در نتیجه کافی نبودن زمان برای انجام واکنش اکسیداسیون شده است که این مسئله منجر به کاهش درصد حذف زایلن گردیده است.

اکسیژن نیز نقش مهمی در تجزیه VOC‌ها دارد. اکسیژن ترکیبات واسطه را دیگری که یکی از دلایل غیرفعال شدن کاتالیزور است را اکسید می‌کند [۱۲]:



همچنین در صورت حضور اکسیژن، میزان تجزیه ازن برای اکسیداسیون VOCs ها افزایش می‌یابد [۱۸]. همان طورکه در معادله ۵ نشان داده شده است، یکی از مکانیسم‌های دیگری که در فرایند ازن‌زنی کاتالیزوری رخ می‌دهد، تولید را迪کالهای هیدروکسیل است. هر دوی زایلن و ازن برروی حاذب سطحی جذب می‌شوند. جذب ازن در حضور رطوبت هوا، میتواند فرایندهای تجزیه را دستخوش تغییر دهد و باعث تشکیل را迪کالهای OH می‌شود [۱۹]. این را迪کال‌ها باعث تشدید تجزیه زایلن عبوری از بستر کربن می‌شوند. اثر رطوبت بر کارایی حذف زایلن رخداد این واکنش (تشکیل را迪کال هیدروکسیل) را در راکتور تدایی می‌کند، چون افزایش رطوبت نسبی تا ۵۰٪ باعث افزایش کارایی فرایند ازن‌زنی کاتالیزوری گردید، اما البته با افزایش رطوبت به بیش از ۵۰٪، کارایی سیستم در حذف زایلن کاهش یافت. در واقع میتوان گفت میزان رطوبت نسبی ۵۰٪، شرایط بهینه برای عملکرد سیستم بود. یافته‌های مطالعه یو (Yu) و همکارش بر روی تجزیه تولوئن با استفاده ترکیبی ازن و دیاکسید تیتانیوم نشان داد، افزایش رطوبت نسبی از ۵ به ۲۰٪ باعث افزایش کارایی سیستم شده، اما رطوبتهاي بالاتر تأثیر چندانی بر کارایی سیستم نداشت [۲۰]. ایشان نیز دلیل احتمالی برای مشاهده این یافته خود را تشکیل را迪کالهای OH بر اثر واکنش بین مولکولهای ازن و بخار آب گزارش کردند. علاوه بر این، بخار آب باعث افزایش اکسیداسیون ترکیبات واسطه آلی با ازن برروی کاتالیزور می‌شود [۲۱]. امادر رطوبتهاي بالاتر ۵۰٪، ممکن است به دلیل رقابت مولکولهای آب با مولکولهای زایلن، ازن در جذب شدن روی سطح کربن فعل، و همچنین به دلیل اینکه، جذب سطحی بخار آب مانع از تجزیه ازن برروی جاذب می‌شود [۱۲]، کارایی فرایند کاهش یافته باشد. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد در فرایند جذب سطحی با استفاده از کربن

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از فرایند ازنزی کاتالیزوری با توجه به کارآمدی و کم‌هزینه بودن، می‌تواند یک روش مؤثر برای حذف VOC‌ها برای صنایع باشد.

نکته مهم اینکه کارایی این سیستم برای دیگر VOC‌ها تحت شرایط آزمایشی مشابه، ممکن است متفاوت باشد. بنابراین برای تصدیق کارایی این سیستم به ارزیابی‌های بیشتری نیاز است. به علاوه، این سیستم می‌تواند به راحتی برای تبدیل سیستم‌های جذب کربن فعال حاضر به سیستم ازنزی کاتالیزوری استفاده شود.

منابع

10. Chao CYH, Kwong CW, Hui KS. Potential use of a combined ozone and zeolite system for gaseous toluene elimination. *J. Hazard. Mater.*; 2007, 143: 118-127.
11. Oyama ST. Chemical and catalytic properties of ozone. *Catal. Rev. Sci. Eng.*; 2000, 42: 279- 322.
12. Einaga H, Futamura S. Catalytic oxidation of benzene with ozone over alumina-supported manganese oxides. *J. Cataly.*; 2004, 227: 304-312.
13. Kwong Cw, Chao CYH, Hui KS, Wan MP. Catalytic ozonation of Toluene using Zeolite and MCM-41 materials. *Environ. Sci. Technol.*; 2008, 42: 8504-09.
14. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (1996). Public Health Statement : Xylene [online]. Available: <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp71-c1-b.pdf>
15. APHA, WEF, AWWA. Standard methods for the examination of water and wastewater, 21nd ed. Washington: APHA Publisher; 2005. P.123-125.
16. Li W, Gibbs GV, Oyama ST. Mechanism of ozone decomposition on a manganese oxide catalyst. 1. In situ Raman spectroscopy and ab initio molecular orbital calculations. *J. Am. Chem. Soc.*; 1998, 120:9041-9046.
17. Seto T, Kwon SB, Hirasawa M, Yabe A. Decomposition of toluene with surface-discharge microplasma device. *Jpn. J. Appl. Phys.*; 2005, 44: 5206-5210.
18. Einaga H, Ogata A. Benzene oxidation with ozone over supported manganese oxide catalysts: Effect of catalyst support and reaction conditions. *J. Hazard. Mater.*; 2009, 164: 1236- 1241.
19. Kastner JR, Buquois Q, Ganagavaram R, Das KC. Catalytic ozonation of gaseous reduced sulfur compounds using wood fly ash. *Environ. Sci. Technol.*; 2005, 39: 1835-1842.
20. Yu KP, Lee GWM. Decomposition of gas-phase toluene by combination of ozone and photocatalytic oxidation process (TiO₂/UV, TiO₂/UV/O₃, and UV/O₃). *Appli. Catal. B: Environ.*; 2007, 75: 29-38.
21. Einaga H, Futamura S. Effect of water vapor on catalytic oxidation of benzene with ozone on alumina-supported manganese oxides. *J. Cataly.*; 2006, 243:446-451.