

حذف بخارات تولوئن با استفاده از زئولیت طبیعی اصلاح شده با اکسید مس

اکبر برزگر شنگل^۱؛ سیدباقر مرتضوی^{۱*}؛ حسن اصیلیان^۱؛ حسین کاظمیان^۲

چکیده

زمینه: ترکیبات آلی فرار از جمله فراوانترین آلاینده‌های هوا هستند که در نتیجه فعالیت‌های صنعتی در صنایع تولید مواد شیمیایی، پتروشیمی و صنایع وابسته تولید می‌شوند. ترکیبات مزبور نه تنها برای محیط زیست، بلکه برای سلامت انسان حتی در غلظت‌های کم مخاطره‌آمیز هستند. یکی از روش‌های کنترل این آلاینده‌ها استفاده از بسترهای کاتالیستی است. در مطالعه حاضر، میزان حذف بخارات تولوئن با استفاده از زئولیت طبیعی ایرانی از نوع کلینوپتیلولیت مورد بررسی قرار گرفت.

روش‌ها: برای انجام این مطالعه تجربی، ابتدا گرانول‌های زئولیت طبیعی با کاتیون مس اصلاح و با استفاده از حرارت کلسینه شدند. با استفاده از یک رآکتور تیوبی از جنس استیل، میزان حذف بخارات تولوئن توسط این بستر زئولیتی، در غلظت‌ها و دماهای مختلف و در دو دبی ۱ و ۲ لیتر در دقیقه مورد بررسی قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که اکسید مس به‌عنوان کاتالیزور می‌تواند شرایط اکسیداسیون بخارات تولوئن را در هوا بهتر کند به طوری که باعث کاهش دمای اکسیداسیون کامل بخارات تولوئن گردید. البته در این خصوص افزایش سرعت جریان هوای عبوری (دبی) و نیز افزایش غلظت تولوئن در محدوده‌های مورد آزمایش، تا حدودی باعث کاهش کارایی بستر زئولیت شد.

نتیجه‌گیری: با توجه به این که کلینوپتیلولیت، به‌عنوان یک زئولیت طبیعی در ایران به وفور یافت می‌شود، به نظر می‌رسد که اصلاح آن با اکسید مس بتواند بستر نسبتاً خوبی برای حذف ترکیبات آلی فرار باشد.

کلیدواژه‌ها: تولوئن، ترکیبات آلی فرار، زئولیت طبیعی اصلاح شده، اکسیداسیون کاتالیستی

«دریافت: ۱۳۹۱/۱۲/۹ پذیرش: ۱۳۹۲/۵/۲۲»

۱. گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲. گروه مهندسی شیمی و بیوشیمی، دانشگاه انتاریو غربی، کانادا

* عهده‌دار مکاتبات: تهران، بزرگراه جلال آل احمد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم پزشکی، گروه بهداشت حرفه‌ای، تلفن: ۸۲۸۳۸۲۵-۰۲۱

Email: mortazav@modares.ac.ir

مقدمه

مختلفی مثل التهاب چشم‌ها، اثر بر روی سیستم عصبی، مسمومیت کبدی و سرطان‌ها را ایجاد می‌کند (۵-۱). متداول‌ترین ترکیبات آلی فرار در محیط‌های صنعتی تولوئن، بنزن، زایلن و اتیل بنزن هستند (۶). تولوئن، به‌عنوان نماینده‌ای از VOCها، در بسیاری از صنایع و محیط‌هایی که با رنگ و نقاشی سروکار دارند یافت می‌شود. حد آستانه بوی تولوئن در محدوده ۳-۱/۵ ppm می‌باشد که در این محدوده غلظت، به سختی توسط انسان قابل تشخیص است و احتمال خطر تماس طولانی مدت شغلی با آن و به‌دنبال آن اثرات بهداشتی جدی بر روی سیستم اعصاب مرکزی زیاد است (۷).

ترکیبات آلی فرار (VOCs) گروه بزرگی از مواد هستند که هوای محیط کار، محیط زیست و فضاها را بسته مسکونی را آلوده می‌کنند. این ترکیبات از فراوان‌ترین آلاینده‌های هوا هستند که در نتیجه فعالیت‌های صنعتی در صنایع تولید مواد شیمیایی، پتروشیمی و صنایع وابسته تولید می‌شوند. ترکیبات مزبور نه تنها برای محیط زیست، بلکه برای سلامت انسان حتی در غلظت‌های کم مخاطره‌آمیز هستند. این روزها، اهمیت تماس شغلی با ترکیبات آلی فرار نیز رو به افزایش است. مطالعات نشان داده است که تماس با VOCها عوارض

اکسید مس بر روی کلینوپتیلولیت آن را اصلاح و کارایی آن را برای حذف ترکیبات BTX مورد استفاده قرار داده‌اند (۱۴) ولی تنها در یک دما این بررسی انجام شده است که با این وجود، نحوه اصلاح کلینوپتیلولیت در مطالعه ما متفاوت بوده و در دماهای مختلف تا رسیدن به اکسیداسیون کامل، آزمایشات انجام شده است. همچنین اندازه ذرات در مطالعه حاضر متفاوت در نظر گرفته شده است.

مواد و روش‌ها

این مطالعه از نوع تجربی بوده و در مقیاس آزمایشگاهی انجام گرفت. در مرحله اول، برای آماده‌سازی زئولیت‌ها به این صورت عمل شد که ابتدا زئولیت طبیعی از نوع کلینوپتیلولیت از منطقه سمنان، تهیه و با استفاده از الک‌های آزمایشگاهی ذرات ۱-۰/۵ mm جدا گردید. مواد پس از شستشو با آب مقطر، در هوا خشک شدند. در این مطالعه این حالت از زئولیت با Z-N نمایش داده می‌شود. پس از شستشو با استفاده از محلول ۱ مولار NH_4NO_3 به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد قرار داده شد. سپس چندین بار با آب مقطر گرم شسته شده تا تمام آنیون‌های اضافی از آن خارج شود. در ادامه نمونه‌ها در داخل آون در دمای ۱۱۰ درجه سانتیگراد تقریباً به مدت ۱۶ ساعت خشک و بعد در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۴ ساعت کلسینه شده و به نوع H تبدیل شدند (۱۳). در این مطالعه این حالت از زئولیت با Z-H نشان داده می‌شود. سپس زئولیت‌های نوع H در محلول ۱۰٪ $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ در آب مقطر به مدت ۲۴ ساعت خیسانده تا تبادل یون صورت پذیرد. در ادامه آن‌ها را در دمای ۱۰۵ درجه سانتیگراد به مدت ۱۴ ساعت خشک کردیم و در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۴ ساعت کلسینه شدند. با این روش اکسید مس به ساختمان زئولیت اضافه گردید. در این مطالعه این حالت از زئولیت با Z-Cu نمایش داده می‌شود.

راه‌های مختلفی برای کنترل ترکیبات آلی فرار وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به جذب سطحی، اکسیداسیون حرارتی یا کاتالیتیک، اکسیداسیون فتوکاتالیتیک و پلاسما اشاره نمود. در این بین اکسیداسیون کاتالیتیک یا حرارتی روشی است که برخی از محققین جهت حذف ترکیبات آلی فرار استفاده کرده‌اند (۸-۱۰). زئولیت با توجه به ساختار منحصر به فردی که دارد بستر مناسبی برای این کار است. زئولیت با سطوح وسیع می‌تواند به صورت بالقوه برای مواردی چون جذب سطحی آلاینده‌ها و متعاقب آن، واکنش‌های کاتالیتیک به کار رود. جایگاه‌های فعال می‌تواند فروپاشی و تخریب مولکول‌های بزرگ را تسریع کند (۱۱) و با حضور اکسید مس در ساختمان زئولیت اصلاح شده به عنوان یک بستر جاذب سطحی و کاتالیست بالقوه، به نظر می‌رسد که سرعت واکنش بین اکسیژن و VOCها افزایش یابد.

تحقیقات نشان داده است که اصلاح زیرکونیا با استفاده از اکسید مس و نیز اصلاح زئولیت با استفاده از پالادیوم می‌تواند باعث افزایش میزان فعالیت کاتالیتیک آن‌ها در تجزیه تولوئن گردد. به طوری که افزایش ۵ درصد مس به زیرکونیا و ۰/۵ درصد پالادیوم به زئولیت در اکسیداسیون کلی ترکیبات آلی فرار مناسب تشخیص داده شده است (۱۲).

باتوجه به این که کلینوپتیلولیت یکی از کاربردی‌ترین و پرمصرف‌ترین زئولیت‌های طبیعی بوده و بیشترین ذخایر زئولیت‌های طبیعی ایران این نوع زئولیت است (۱۳) استفاده از این ماده از نظر اقتصادی مقرون به صرفه می‌باشد. بنابراین در مطالعه حاضر از کلینوپتیلولیت به عنوان بستر کاتالیستی و از مس نیز به عنوان کاتالیزور جهت اصلاح آن استفاده گردید تا کارایی آن در حذف بخارات تولوئن به عنوان نماینده ترکیبات آلی فرار مورد ارزیابی قرار گیرد. البته لازم به ذکر است که مطالعه‌ای در این خصوص در ایران انجام گرفته است که با انجام اصلاح اسیدی توسط اسید کلریدریک و نشان دادن نانوذره

بررسی ۵۰ و ۱۰۰ ppm و ۱۰۰ ppm بود. دمای رآکتور نیز بین ۴۰۰-۱۵۰ درجه سانتیگراد (در ۹ دما) تنظیم گردید. نمای شماتیک این رآکتور به همراه متعلقات آن در شکل ۱ آمده است.

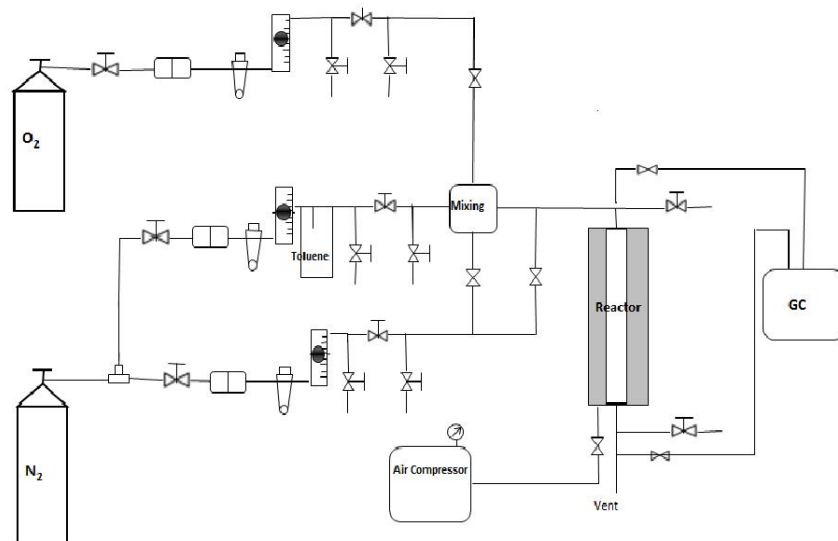
با به دست آوردن غلظت بخارات تولوئن در بالادست و پایین دست جریان رآکتور (بستر زئولیت)، از طریق فرمول زیر میزان درصد حذف تولوئن تعیین گردید. برای اطمینان در هر شرایط، آزمایشات ۳ بار تکرار شد و میانگین آن به عنوان درصد حذف ثبت شد.

$$\text{درصد حذف تولوئن} = \frac{\text{غلظت تولوئن در پایین دست} - \text{غلظت تولوئن در بالادست}}{\text{غلظت تولوئن در پایین دست}} \times 100$$

به این ترتیب ۲ دبی و ۲ غلظت و ۹ دما مورد بررسی قرار گرفت و در هر حالت نیز اندازه گیری ها ۳ بار تکرار شدند همچنین اندازه گیری اول مربوط به قبل از رآکتور و دیگری بعد از رآکتور بود. به این ترتیب در مجموع ۲۱۶ اندازه گیری داشتیم. اطلاعات به دست آمده از اندازه گیری ها ثبت شد و با استفاده از نرم افزار SPSS 19 و آزمون های آماری آنالیز واریانس و پس آزمون دانن (Dunnet) مقایسه بین دو دبی و همچنین غلظت ها در دماهای مختلف انجام گرفت.

برای بررسی مشخصات زئولیت ها در دو مرحله، یکی قبل از اصلاح و دیگری بعد از اصلاح از دستگاه XRD و برای تعیین میزان بارگذاری کاتیون مس بر روی زئولیت ها از روش XRF استفاده گردید.

برای انجام آزمایشات مربوطه از یک رآکتور تیوبی از جنس استیل به طول ۱۰ سانتیمتر و قطر داخلی ۱ سانتیمتر استفاده شد. دمای این رآکتور توسط سیستم های الکترونیکی تحت کنترل بود. برای تولید بخار تولوئن از خرطوم خلأ استفاده شد که جریان گاز نیتروژن با دبی مشخص از آن عبور داده می شد و دو لاین جداگانه برای گاز نیتروژن در نظر گرفته شده بود که بتوان غلظت مورد نظر را به دست آورد. یک لاین دیگر نیز برای اکسیژن در نظر گرفته شد که از نظر ترکیب گاز، ترکیب هوای مصنوعی را ایجاد نماید. این گازها در یک محفظه اختلاط ۱ لیتری با هم مخلوط شده وارد رآکتور می شدند. برای اندازه گیری غلظت بخار تولوئن قبل و بعد از رآکتور از دستگاه گازکروماتوگراف Bruker مدل 450 مجهز به دتکتور FID و ستون موینه از نوع Cp-sil 5CB 30m×0.25mm×0.25µm استفاده شد. اندازه گیری ها به صورت آنلاین انجام می شد. دبی های مورد مطالعه ۱ و ۲ لیتر در دقیقه بود و غلظت های مورد



شکل ۱- شماتیک رآکتور به همراه متعلقات مربوطه و اتصال آن به دستگاه گازکروماتوگراف

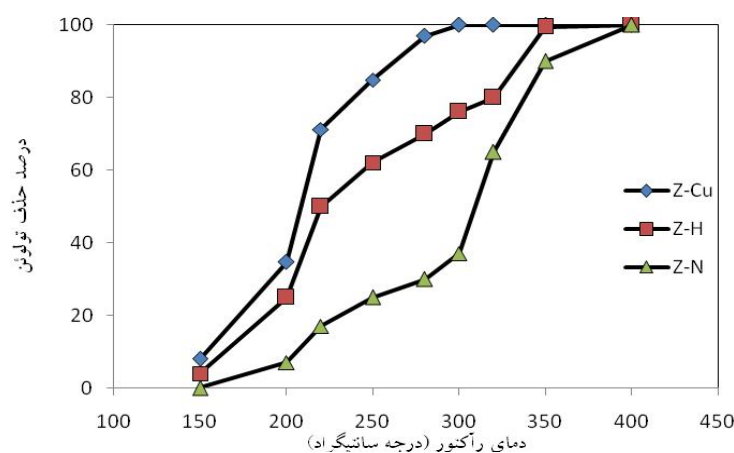
یافته‌ها

جدول ۱- نتایج آنالیز XRF زئولیت طبیعی و زئولیت اصلاح شده با

ماده	Z-N	Z-Cu	مس
L.O.I	۱۳/۴۲	۵/۱	
Na ₂ O	۲/۲۵۱	۰/۲۹۳	
MgO	۰/۹۳۶	۰/۷۲۸	
Al ₂ O ₃	۹/۹۵۴	۱۲/۰۲۹	
SiO ₂	۶۰/۷۰۱	۷۴/۱۲۸	
P ₂ O ₅	۰/۰۴۵	۰/۰۶۹	
SO ₃	۲/۲۹۴	۰/۰۵۶	
Cl	۰/۲۹۱	-	
K ₂ O	۳/۸۹۸	۲/۴۹۱	
CaO	۳/۲۲۹	۰/۵۴	
TiO ₂	۰/۲۲۳	۰/۳۴۳	
Fe ₂ O ₃	۱/۹۴۳	۲/۵۲۳	
Sr	۰/۰۵۳	۰/۰۱۲	
Zr	۰/۰۲	۰/۰۲	
Ba	۰/۱۱۱	-	
Cu	-	۱/۶۷	

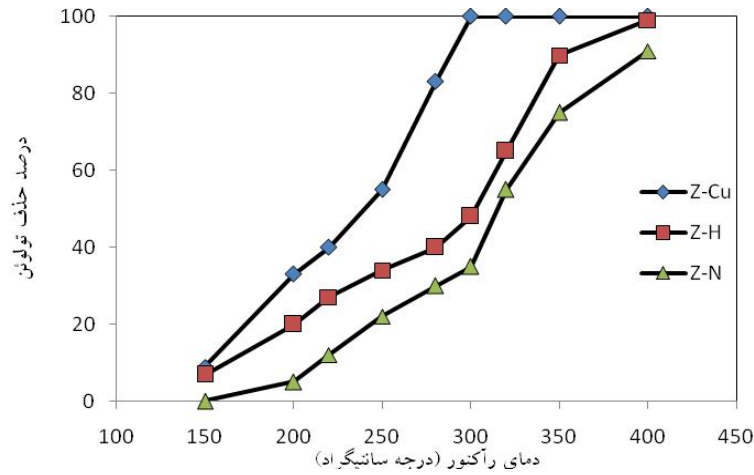
نتایج آنالیز نمونه‌های زئولیت مورد بررسی اعم از اصلاح شده و اصلاح نشده نشان داد که میزان بارگذاری اکسید مس بر روی زئولیت در روش مورد استفاده برابر ۱/۶۷ درصد وزنی بود (جدول ۱).

نتایج نشان داد که با افزایش دما میزان تبدیل کاتالیستی یا به عبارتی، میزان حذف بخارات تولوئن افزایش می‌یابد. به طوری که در دماهای بالاتر این میزان به ۱۰۰ درصد می‌رسد. نمودارهای ۴-۱، مقایسه‌ای را بین زئولیت نوع H (Z-H)، زئولیت طبیعی بدون هیچ اصلاحی (Z-N) و نیز زئولیت اصلاح شده با اکسید مس (Z-Cu) در دبی‌های ۱ و ۲ لیتر در دقیقه و نیز در غلظت‌های ۵۰ و ۱۰۰ ppm بخارات تولوئن نشان می‌دهند. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، وجود کاتالیستی مثل اکسید مس در ساختار کلینوپتیلولیت می‌تواند تا حد قابل قبولی دمای اکسیداسیون کامل را کاهش دهد. به طوری که در زئولیت‌های اصلاح شده با اکسید مس، در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد اکسیداسیون تولوئن در غلظت‌ها و دبی‌های فوق‌الذکر به ۱۰۰ درصد می‌رسد. به عبارتی وجود این کاتالیزور باعث شده است که در دمای

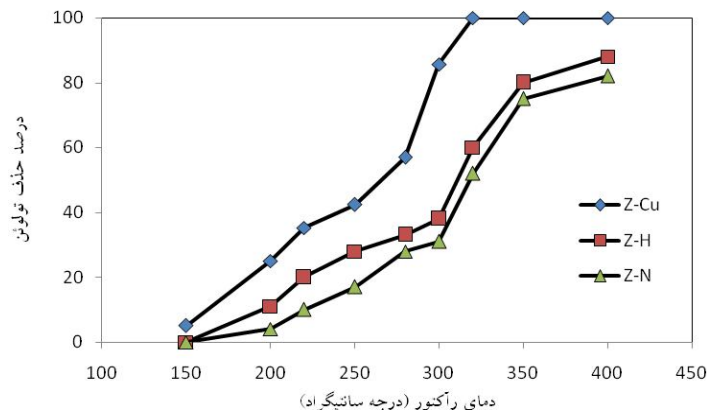


نمودار ۱- مقایسه درصد حذف تولوئن زئولیت اصلاح شده با کاتیون مس و زئولیت طبیعی اصلاح نشده در دماهای مختلف در غلظت تولوئن

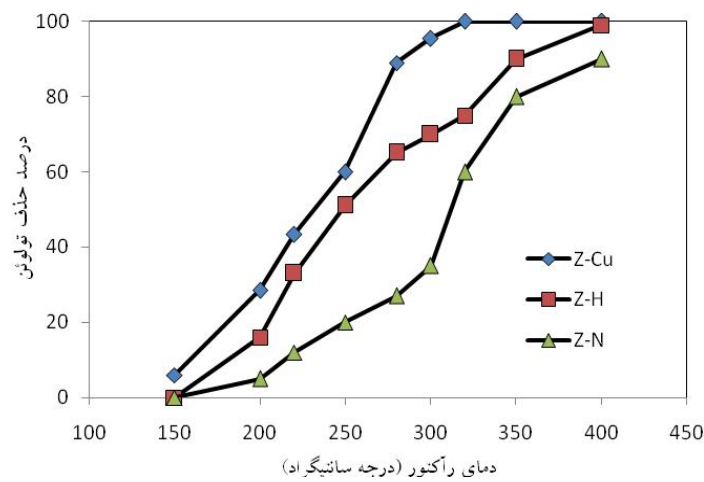
۱۰۰ ppm و دبی ۱ l/min



نمودار ۲- مقایسه درصد حذف تولوئن زئولیت اصلاح شده با کاتیون مس و زئولیت طبیعی اصلاح نشده در دماهای مختلف در غلظت تولوئن ۵۰ ppm و دبی ۱ l/min



نمودار ۳- مقایسه درصد حذف تولوئن زئولیت اصلاح شده با کاتیون مس و زئولیت طبیعی اصلاح نشده در دماهای مختلف در غلظت تولوئن ۱۰۰ ppm و دبی ۲ l/min



نمودار ۴- مقایسه درصد حذف تولوئن زئولیت اصلاح شده با کاتیون مس و زئولیت طبیعی اصلاح نشده در دماهای مختلف در غلظت تولوئن ۵۰ ppm و دبی ۲ l/min

باعث گردید که در دماهای ۳۰۰-۲۰۰ درجه سانتیگراد، کارایی بستر زئولیت اصلاح شده با اکسید مس در حذف بخارات تولوئن کاهش و حذف کامل از ۳۰۰ درجه به ۳۲۰ درجه سانتیگراد افزایش یابد.

درخصوص سرعت جریان هوای عبوری از بستر زئولیت نیز می توان اشاره نمود که در دبی ۱ لیتر بر دقیقه، سرعت فضایی (Space velocity) برابر ۷۶۴۳ h-1 بود. در دبی ۲ لیتر بر دقیقه سرعت فضایی به ۱۵۲۸۶ h-1 افزایش یافته است. همین امر باعث شده که در نمودار مزبور یک افت مشخص در تبدیل کاتالیستی نمایان شود. این موضوع به فرصت کمی که بخارات

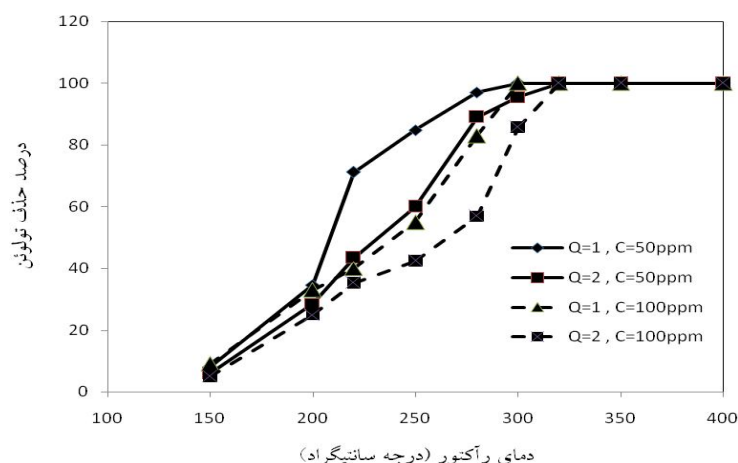
پایین تری بتوان بخارات تولوئن را حذف نمود. نتایج آزمون آنالیز واریانس و پس آزمون دانن (Dunnett) در دبی ها و غلظت های مورد بررسی نشان می دهد که اختلاف معناداری بین زئولیت های اصلاح شده با اکسید مس و زئولیت های اصلاح نشده وجود دارد که این اختلاف به خصوص در دماهای ۳۰۰-۲۰۰ درجه سانتیگراد بیشتر مشاهده می گردد (جدول ۲).

در نمودار ۵ اثر غلظت و دبی (سرعت جریان هوای عبوری) بر روی میزان حذف بخارات تولوئن نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می گردد در دبی ۱ لیتر در دقیقه، افزایش غلظت از ۵۰ به ۱۰۰ ppm تا حدودی

جدول ۲- نتایج آماری (P value) آزمون آنالیز واریانس و پس آزمون دانن بین زئولیت های اصلاح شده با اکسید مس و زئولیت های اصلاح نشده

در دماها و دبی های مختلف

۲۰۰ ≤ دمای رآکتور ≤ ۳۰۰		۱۵۰ ≤ دمای رآکتور ≤ ۴۰۰		غلظت اولیه تولوئن	دبی
Z-N و Z-Cu	Z-H و Z-Cu	Z-N و Z-Cu	Z-H و Z-Cu		
<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	۰/۱۹۶	۵۰ ppm	۱ lit/min
<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	۰/۰۲۸	۱۰۰ ppm	
<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	۰/۲۱۵	۵۰ ppm	۲ lit/min
۰/۰۶۲	۰/۰۰۹	۰/۰۰۳	۰/۰۲۶	۱۰۰ ppm	



نمودار ۵- اثر دبی و غلظت در میزان درصد حذف تولوئن در دماهای مختلف رآکتور بر روی زئولیت اصلاح شده با اکسید مس

ساختمان زئولیت می تواند در حذف کک کمک کند. افزایش میزان مس از ۱ به ۸ درصد وزنی، میزان اکسیداسیون تولوئن را افزایش می دهد و حذف کک تشکیل شده را راحت تر می کند (۱۷)، لذا احتمالاً در صورت افزایش میزان درصد وزنی مس بر روی زئولیت می توان به نتایج بهتری دست یافت. ضمناً در مطالعه ای که در ایران بر روی کلینوپتیلولیت اصلاح شده توسط نانو ذرات مس انجام شده بود نتایج عکس به دست آمده است، به گونه ای که با افزایش نانو ذرات مس به کلینوپتیلولیت، راندمان حذف تولوئن و به عبارتی ترکیبات BTX کاهش نشان داده بود. یافته های مطالعه مذکور با نتایج آن با نتایج مطالعه ما و نیز سایر مطالعاتی که در بالا ذکر شد مغایرت دارد (۱۴).

در رابطه با اثر غلظت بر روی راندمان حذف تولوئن، نتایج نشان داد که افزایش دبی از ۱ lit/min به ۲ lit/min تا حدودی باعث کاهش درصد حذف تولوئن در غلظت های ثابت می شود. در حقیقت افزایش سرعت فضایی از 1 h^{-1} به 15286 h^{-1} باعث این کاهش شده است. البته در مطالعه ای قید شده است که در سرعت های ۱۸۰۰۰ تا ۳۶۰۰۰ بر ساعت، تغییر چندانی در میزان تبدیل تولوئن دیده نشد ولی در سرعت ۷۲۰۰۰ بر ساعت کاهش قابل ملاحظه ای در میزان فعالیت احتراق تولوئن دیده شد (۱۵). در گزارش دیگری نیز در خصوص احتراق تولوئن رقیق و متیل اتیل کتن بر روی کاتالیست زیرکونیای حمایت شده با فلزات اشاره شده است (۱۸). در خصوص علت این اختلاف می توان به نوع بستر مورد استفاده در این مطالعات و خصوصیات آن اشاره نمود. ولی در مجموع معمولاً با افزایش سرعت، فرصت لازم جهت اکسیداسیون در بستر مزبور کاهش می یابد و در نتیجه کارایی سیستم، قدری افت خواهد داشت.

در ارتباط با اثر غلظت نیز نتایج نشان داد که با افزایش غلظت از ۵۰ ppm به ۱۰۰ ppm میزان درصد حذف بخارات تولوئن، کاهش جزئی نشان می دهد اما این کاهش از لحاظ آماری معنادار نبود. در سایر مطالعات

تولوئن در بستر کاتالیستی دارد مربوط می شود چرا که با افزایش سرعت، مدت زمان ماند بخارات در این بستر کاهش می یابد. ولی به هر حال در دمای ۳۲۰ درجه در تمامی شرایط ذکر شده، میزان حذف بخارات تولوئن به ۱۰۰ درصد رسید.

بحث

نتایج نشان داد که اکسید مس به عنوان یک کاتالیست می تواند در ساختار کلینوپتیلولیت باعث کاهش میزان دمای واکنش برای تبدیل کاتالیتیک یا حذف کامل بخارات تولوئن گردد. مطالعات مختلفی بر روی اکسید مس به عنوان کاتالیزور در ترکیبات مختلف انجام گرفته است که کم و بیش نتایج حاکی از تأثیر مثبت اکسید مس در کاهش دمای اکسیداسیون کامل ترکیبات آلی فرار می باشد. Tidahy و همکاران در مطالعه خود به این نتیجه رسیدند که برای زیرکونیا، کاتالیست مس بهترین گزینه است تا اثر بیشتری در اکسیداسیون کل تولوئن ایجاد نماید و ترکیب ۵ درصد وزنی آن را ترکیب مناسبی برای این کار دانستند (۱۲). علاوه بر این Li و همکاران در مطالعه خود در خصوص احتراق کاتالیتیک تولوئن بر روی کاتالیست Cu-Mn/MCM-41 در داخل یک رآکتور لوله ای به نتایج مشابهی دست یافتند. آن ها اذعان داشتند که میزان فعالیت کاتالیتیک تحت تأثیر دمای کلسیناسیون بین ۸۰۰-۳۰۰ درجه سانتیگراد، غلظت اکسیژن، غلظت تولوئن و سرعت جریان هوا قرار دارد. این فاکتورها، فاکتورهای تجربی هستند که میزان فعالیت احتراق تولوئن را بهینه می کنند (۱۵). در ضمن Soylo و همکاران نیز در رابطه با اکسید مس تثبیت شده بر روی زئولیت طبیعی در ترکیه تقریباً به نتایج مشابهی دست یافتند (۱۶) ولی از لحاظ دمای اکسیداسیون کامل نسبت به مطالعه ما به دماهای بالاتری اشاره کرده اند که احتمالاً به دلیل بالاتر بودن غلظت های انتخابی آنهاست. البته لازم به ذکر است که مطالعات نشان داده است که در دماهای پایین، امکان تشکیل کک بر روی زئولیت وجود دارد و وجود مس در

نتیجه گیری

استفاده از اکسید مس جهت اصلاح زئولیت طبیعی از نوع کلینوپتیلولیت که در ایران به وفور یافت می‌شود می‌تواند روش مناسبی جهت حذف ترکیبات مضر مثل ترکیبات آلی فرار (VOCs) باشد. پیشنهاد می‌شود که این مطالعه در غلظت‌های بالاتر نیز انجام شود و نتایج آن با این مطالعه مقایسه شود تا نتیجه‌گیری کامل‌تری صورت پذیرد.

نیز نتایج حاکی از تأثیر غلظت در کاهش میزان کارایی حذف کاتالستی بخارات ترکیبات آلی فرار می‌باشد که البته در غلظت‌های بالاتر، اختلاف بیشتری وجود خواهد داشت (۱۵). چنین برداشتی برای اکسیداسیون کاتالیتیک VOC معمول است یعنی هرچه قدر غلظت کم‌تر شود، دمای اکسیداسیون کامل ترکیبات کم‌تر خواهد شد.

References

- Brightman HS, Moss N. Sick building syndrome studies and the compilation of normative and comparative values. In: Indoor air quality handbook. Spengler J, Samet JM and McCarthy JF, Editors. New York: McGraw-Hill. 2000; 1-3.
- Hunter P, Oyama ST. Control of volatile organic compound emissions: conventional and emerging technologies. New York: John Wiley & Sons; 2000.
- US Environmental Protection Agency (USEPA). Sources of indoor air pollution - organic gases (volatile organic compounds, VOCs). USEPA, 2013.
- Uchiyama S, Hasegawa S. Investigation of a long-term sampling period for monitoring volatile organic compounds in ambient air. Environ Sci Technol. 2000;34(21):4656-61.
- Kjaergaard SK, Molhave L, Pedersen OF. Human reactions to a mixture of indoor air volatile organic compounds. Atmospheric Environment Part A General Topics. 1991;25(8):1417-26.
- Chao CY, Chan GY. Quantification of indoor VOCs in twenty mechanically ventilated buildings in Hong Kong. Atmospheric Environment 2001;35(34):5895-913.
- Occupational Safety and Health Administration (OSHA). Occupational safety and health guideline for toluene. OSHA, 1996.
- Alvarez-Merino MA, Ribeiro MF, Silva JM, Carrasco-Marin F, Maldonado-Hodar FJ. Activated carbon and tungsten oxide supported on activated carbon catalysts for toluene catalytic combustion. Environ Sci Technol 2004; 38:4664-70.
- Everaert K, Baeyens J. Catalytic combustion of volatile organic compounds. Journal of Hazardous Materials. 2004;109(1):113-39.
- O'Reilly A. A series reaction approach to VOC incineration. Process Safety and Environmental Protection. 1998 Nov;76(4):302-12.
- Song W, Li G, Grassian VH, Larsen SC. Development of improved materials for environmental applications: Nanocrystalline NaY zeolites. Environ Sci Technol. 2005;39(5):1214-20.
- Tidahy HL, Siffert S, Wyrwalski F, Lamonier JF, Aboukaïs A. Catalytic activity of copper and palladium based catalysts for toluene total oxidation. Catalysis Today. 2007;119(1-4):317-20.
- Kazemian H. [Introduction to zeolites: magic minerals (Persian)]. 1st ed. Tehran: Behesht. 2004.
- Rostami R, Jonidy Jafari A, Rezaee Kalantari R, Gholami M. [Survey of modified Clinoptilolite Zeolite and Cooper Oxide nanoparticles-containing modified Clinoptilolite efficiency for polluted air BTX removal (Persian)]. Iran J Health & Environ. 2012;5(3):1-8.
- Li WB, Zhuang M, Wang JX. Catalytic combustion of toluene on Cu-Mn/MCM-41 catalysts: Influence of calcination temperature and operating conditions on the catalytic activity. Catalysis Today. 2008;137(2-4): 340-4.
- Soylu GSP, Ozc Elik Z, Boz S. Total oxidation of toluene over metal oxides supported on a natural clinoptilolite-type zeolite. Chemical Engineering Journal. 2010;162(1):380-7.
- Antunes AP, Ribeiro MF, Silva JM, Ribeiro FR, Magnoux P, Guisnet M. Catalytic oxidation of toluene over CuNaHY zeolites: Coke formation and removal. Applied Catalysis B: Environmental. 2001; 33(2):149-64.
- Choudhary VR, Deshmukh GM, Pataskar SG. Low temperature complete combustion of dilute toluene and methyl ethyl ketone over transition metal-doped ZrO₂ (cubic) catalysts. Catalysis Communications. 2004;5(3):115-9