بررسی تأثیر زمان ماند بر تصفیه هوای آلوده به اتانول توسط بیوفیلتر چکنده

امین گلی[۱]، امیر رضا طلایی[۱*]، محمدرضا طلایی[۳]

۱- اصفهان، موسسه آموزش عالی جامی، دانشکده مهندسی مکانیک، گروه مهندسی مکانیک

۲- اصفهان، موسسه آموزش عالی جامی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، گروه عمران محیط زیست

۳- اصفهان، دانشگاه اصفهان، دانشکده مهندسی شیمی، گروه مهندسی شیمی

پیام نگار: **atalaie@jami.ac.ir**

چکیده

مواد آلی فرار ترکیباتی مضر برای سلامتی انسان محسوب می‌شوند. اتانول یکی از اعضاء این گروه بوده که می‌تواند منجر به افزایش آلودگی هوا گردد. در این مطالعه از راکتور بیوفیلتر چکنده که در این مقاله به آن به اختصار راکتور گفته شده است در مقیاس آزمایشگاهی برای تصفیه هوای آلوده به اتانول استفاده شد. در این پژوهش برای اندازه‌گیری اتانول موجود در هوا، اتانول از فاز گازی به فاز مایع (آب مقطر) انتقال داده شد. سپس مقدار اکسیژن خواهی شیمیایی آب (COD) اندازه‌گیری گردید. نتایج این مطالعه نشان داد که راکتور مورد استفاده در این مطالعه قادر به حذف ۱۰۰ درصد اتانول ورودی به خود می‌باشد. نتایج این مطالعه نشان داد که علی‌رغم پیچیدگی‌های راهبری، استفاده از راکتور بیوفیلتر چکنده سازگار با محیط زیست و بسیار موثر در حذف هوای آلوده به اتانول می‌باشد.

کلمات کلیدی: راکتور بیوفیلتر چکنده، حذف متانل، تصفیه هوای آلوده، زمان ماند هیدرولیکی

۱- مقدمه

پیشرفت‌های صنعتی منجر به ایجاد محیطی با امکانات رفاهی بهتر شده لیکن آلودگی‌های تولیدی در صنایع می‌تواند منجر به کاهش کیفیت محیط زیست برای ادامه حیات نسل بشر گردد. لذا اهمیت زیستن در محیطی پاک و عاری از آلاینده ها تبدیل به رویایی شده که متخصصین مربوطه با تلاش و جدیت سعی در به واقعیت تبدیل کردن این رویا دارند. لذا محققان فراوانی در این زمینه تلاش می‌کنند تا بتوانند مشکلات ناشی از آلودگی‌های موجود در طبیعت را که به دست بشر بوجود آمده به طریقی اصلاح کنند. یکی از مهم ترین موضوعات قابل بحث در این زمینه آلودگی آلی ناشی از گازهای خروجی کارخانجات از جمله اتانول می‌باشد که دفعتاً غلظت آن در گازهای خروجی از صنایع بیش از استانداردهای وضع شده می‌باشد. اتانول یکی از گازهای آلوده کننده محیط زیست موجود در صنعت بوده و در دسته مواد آلی فرار (VOCs) قرار می‌گیرد. اتانول در ساخت ترکیبات پتروشیمی استفاده فراوانی دارد [۴-۱]. روشهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی مختلفی برای حذف اتانول از هوا توسط محققین توسعه یافته است که در این میان روشهای بیولوژیکی علی‌رغم پیچیدگی‌های راهبری ارزان و

www.SID.ir

دوستدار محیط زیست است. تجزیه بیولوژیک و هوازی ترکیبات آلی در نهایت منجر به تبدیل این ترکیبات به دی اکسید کربن و آب می‌گردد که آلودگی به مراتب کمتری از ترکیبات آلی دارند. لذا استفاده از بیوفیلترها آلودگی ثانویه به مراتب کمتری نسبت به سایر روشهای تصفیه هوا ایجاد می‌نمایند. گزارشهای مختلف محققان نشان داده که هوای آلوده به ترکیباتی همچون تولوئن، استرین، کتون، فرمالدهید و اتانول می‌توانند با بازدهی مناسب توسط بیوفیلتر تجزیه شوند [۱۴-۵]. گزارشات متعددی نیز توسط محققین ارائه شده که به توانایی گیاهان در حذف آلاینده‌هایی همچون فرمالدهید، بنزن و تولوئن از هوا اشاره می‌نماید [۱۵،۱۶، ۱۰]. توژونگین چو[1] و همکارانش در سال ۲۰۱۰ در مطالعه‌ای بر روی حذف بخار فرمالدهید توسط بیوفیلتر موفق شدند ۹۷٪ فرمالدهید ورودی به سیستم را حذف نمایند [۱۰]. ژانگیونگژی[2] و همکاران نیز در سال ۱۹۹۳ تحقیقاتی را در زمینه حذف بخار فرمالدهید توسط ریشه گیاهان به انجام رساندند. آنها در مطالعه خود موفق به حذف ۶۰٪ فرمالدهید موجود در محیط شدند [۱۱]. پرادو[3] و همکارانش نیز در سال ۲۰۰۵ در مطالعه خود به بررسی حذف مخلوطی از آلاینده‌های فرمالدهید و اتانول در هوا پرداختند و موفق به حذف صد درصدی این آلاینده ها از هوا شدند [۶]. از دیگر مطالعات انجام شده در این زمینه می‌توان به مطالعه الوارز[4] و همکارانش در سال ۲۰۰۸ اشاره نمود. آنها در مطالعه خود موفق شدند درصد بالایی از گاز اتیل بنزن را توسط فرایند بیوفیلتراسیون حذف نمایند [۱۲]. الی[5] و همکارانش نیز در سال ۲۰۰۹ در مطالعه خود موفق به حذف درصد بالایی از مخلوط بنزن و تولوئن در هوا توسط فرایند بیوفیلتراسیون شدند[۱۷]. گلی و همکارانش نیز در سال ۲۰۱۳ با کمک یک صافی چکنده بیولوژیکی موفق به حذف بیش از ۹۹ درصد از فرمالدهید موجود در هوا در زمان ماند ۱۳۲ ثانیه شدند [۱۸]. مطالعه مشابهی نیز توسط فولازاکی[6] و همکارانش در سال ۲۰۱۳ به منظور حذف فرمالدهید از هوا انجام پذیرفت و مشخص گردید که امکان حذف این آلاینده به شدت سمی به روش بیولوژیکی وجود دارد [۱۹]. همچنین طلایی و همکاران در سال ۲۰۱۳ موفق به راهبری یک صافی بیولوژیکی چکنده جهت حذف فرمالدهید از هوا شدند و به کمک روش طراحی آزمایشها (تاگوچی) شرایط بهینه راهبری این راکتور را مشخص نمودند [۲۰]. حذف انواع آلاینده ها از هوای آلوده به کمک روشهای بیولوژیکی در مطالعات فوق نشان دهنده امکان پذیری تصفیه هوای آلوده به ترکیبات آلی با کمک بیوفیلترها بوده و ضرورت تحقیقاتی مناسب برای توسعه هرچه بیشتر این روش و کاربردی نمودن آنها در صنایع را نمایان می‌نماید. طلایی و همکارانش نیز در سال ۲۰۱۳ با انجام مطالعه مروری مزایای بیوفیلترها را به چهار بخش عمده تقسیم نموده اند که عبارتند از: توانایی پالایش آلاینده ها از هوا بدون تولید مواد زائد جنبی پرخطر، هزینه ساخت اولیه اندک، هزینه راهبری پایین و توانایی حذف آلاینده ها در غلظت‌های بسیار اندک. در کنار این مزایا، محققین نامبرده معایب این روش تصفیه هوا را نیز پیچیدگی طراحی و راهبری و در برخی موارد افت فشار بالا در اثر رشد کنترل نشده ریزاندام‌ها ذکر نموده اند [۲۱]. همچنین به دلیل اینکه آلاینده‌های ورودی به بیوفیلتر به عنوان تنها منبع غذایی ریزاندام‌ها محسوب می‌گردند، پس از راه اندازی بیوفیلتر امکان خاموش کردن و رها سازی آن برای مدت زمان طولانی وجود نخواهد داشت که این موضوع نیز می‌تواند به عنوان یکی دیگر از معایب بیوفیلترها تلقی گردد [۲۱]. در مجموع مزایای بیوفیلترها نسبت به معایب آنها از وزن بالاتری برخوردار بوده لذا طراحی، ساخت و بهره برداری صنعتی بیوفیلترها برای کنترل آلاینده‌های خروجی هوا از صنایع در دستور کار بسیاری از کشورهای جهان قرار گرفته است.

اگرچه مطالعات مختلفی در زمینه حذف آلاینده ها از هوا توسط محققین مختلف به انجام رسیده است، لیکن هنوز بسیاری از جزئیات طراحی و راهبری این گونه سیستم ها ناشناخته بوده و نیازمند مطالعات بیشتر است. هدف اصلی در این مطالعه بررسی تاثیر زمان ماند هوای آلوده در بیوفیلتر بر حذف بخار متانول از هوا بود. در این مطالعه بخار اتانول به عنوان تنها منبع کربن به راکتوری حاوی بستر ثابتی از ریزاندام‌ها تزریق گردید. در طی عبور هوای آلوده به اتانول از میان این بستر، ریزاندام‌ها بخشی از اتانول را جذب و به عنوان منبع کربن خود مصرف می‌نمودند. لذا در طی

1. Zhogjun Xu
2. Zhongiun Xl
3. Prado
4. Alvarez
5. Lee
6. Fulazzaky

Archive of SID

www.

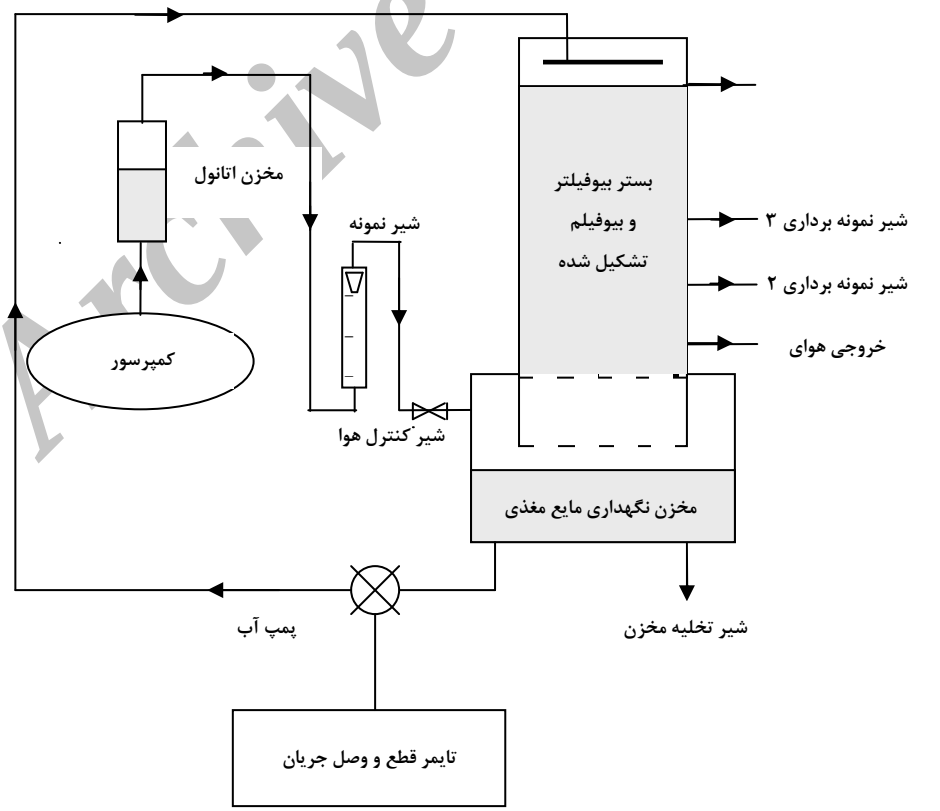
سه بارگذاری مختلف توانایی بیوفیلتر در حذف اتانول مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه پارامترهای موثر بر حذف اتانول همچون غلظت اتانول ورودی و pH نیز مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱ بر پایی بیوفیلتر

در این تحقیق از راکتور نمایش داده شده در شکل (۱) استفاده گردید. این راکتور به ارتفاع ۶۶ سانتیمتر (بخش مفید)، ۸ سانتیمتر قطر و حجم مفید ۳/۳۱۹ لیتر از جنس پلکسی گلاس ساخته شد. به منظور پر نمودن این راکتور از بستر لوله خرطومی ساخته شده از پلی اتیلن استفاده گردید. این بستر بسیار سبک، ارزان و در دسترس بوده لذا در صورت استفاده از نتایج این مطالعه در ساخت این راکتور در مقیاس صنعتی، بستری مناسب محسوب می‌گردد. طبق آزمایشات انجام شده مقدار تخلخل لوله خرطومی ۹۰ درصد محاسبه گردید. بدین معنی که ۹۰ درصد حجم راکتور پر شده با کمک لوله خرطومی را فضای خالی و ۱۰ درصد آن را لوله‌های خرطومی پر نموده بود. دلیل انتخاب این بستر به انجام موفقیت آمیز مطالعات پیشین در زمینه کاربرد بیوفیلتر چکنده توسط نویسندگان این مقاله باز می‌گردد [۱۸]. وزن هر قطعه از بستر ۸۳/. گرم و ابعاد یکسان بودند. برای تولید هوای آلوده به اتانول به کمک یک کمپرسور، هوا از یک مخزن حاوی محلول ۹۹ درصد اتانول عبور داده می‌شد. بخشی از اتانول تبخیر و در هوای عبوری حل می‌گردد. هوای خارج شده این مخزن تا حد اشباع حاوی اتانول بود.

همچنین به منظور نمونه‌گیری از بخشهای مختلف راکتور، مطابق شکل (۱)، سه دریچه نمونه برداری بر روی آن نصب گردید. این دریچه ها به منظور برداشت نمونه‌هایی از گاز و ریزاندام‌های موجود در راکتور مورد استفاده قرار می‌گرفتند. ارتفاع این دریچه ها از کف راکتور به ترتیب ۵، ۱۵ و ۲۵ سانتیمتر بود. لازم به ذکر است که خروجی هوای تصفیه شده در راکتور در ارتفاع ۶۶ سانتیمتری قرار گرفته بود.



شکل ۱- شرح اجمالی پایلوت مورد استفاده در مطالعه

Archive of SID

www.SID.ir

بخار اتانول در این راکتور به عنوان تنها منبع کربن محسوب می‌گردد. لیکن ریزاندام‌ها در این راکتور علاوه بر منبع کربن به منابع مواد معدنی مختلف دیگری نیز نیازمند بودند. لذا برای تامین این مواد، از یک مایع مغذی با فرمولاسیون ویژه استفاده گردید که این فرمولاسیون در مقاله گلی و همکاران درج شده است [۱۸].

این مایع مغذی به کمک یک پمپ با شدت جریان ۵۰ لیتر در ساعت از بالای مخزن بر روی بستر پاشیده می‌شد. این عمل منجر به فراهم آوردن رطوبت کافی و همچنین مواد مغذی مورد نیاز رشد باکتریها در بیوفیلتر می‌گردید. به منظور حداقل انحلال بخار اتانول در مایع مغذی و جذب حداکثری فرمالدهید توسط بیوفیلم به کمک یک تایمر قطع و وصل جریان برق، پمپ مربوطه تنها ۱۵ دقیقه در هر ساعت روشن می‌شد. PH راکتور در این مطالعه بطور روزانه بر روی ۷ تنظیم می‌گردید. راکتور در این مطالعه در دمای اتاق (۲۰ الی ۲۵ درجه سانتیگراد) مورد راهبری قرار گرفت.

۲-۳ راهبری بیوفیلتر

راکتور مورد استفاده در این مطالعه قبلاً برای تصفیه هوای آلوده به فرمالدهید مورد بررسی‌های طولانی مدت قرار گرفته بود. لذا ریزاندام‌های موجود در آن توانایی کافی در جذب و تجزیهٔ ماده سمی فرمالدهید را به خوبی کسب کرده بودند. به همین دلیل دوران سازگارسازی این راکتور برای تصفیه هوای آلوده به اتانول که سمیتی به مراتب پایین‌تر از فرمالدهید داشت، بسیار اندک و تنها برابر با چند روز بود. جهت بررسی توانایی این راکتور در حذف اتانول در شرایط مختلف سه بارگذاری مختلف با شدت جریان هوای ورودی ۹۰، ۲۸۷ و ۱۵۱۲ لیتر در ساعت بر روی آن انجام پذیرفت. با توجه به حجم راکتور و شدت جریان هوای آلوده به اتانول ورودی به آن زمان‌های ماند در سه بارگذاری مختلف به ترتیب عبارت بودند از ۱۳۲، ۴۱ و ۸ ثانیه. نرخ بارگذاری و نرخ حذف نیز به به ترتیب به کمک معادلات شماره (۱) و (۲) مشخص شدند. دلیل انتخاب شدت جریان بسیار بالای ۱۵۱۲ لیتر بر ساعت ایجاد زمان ماند بسیار اندک و اثبات توانایی این راکتور در حذف بخار اتانول با کمک راکتوری با حجم اندک بود.

$$r_e = \frac{C_{in} \times Q}{V} \qquad (۱)$$

$$r = \frac{(C_{in} - C_{out})Q}{V} \qquad (۲)$$

در معادلات فوق پارامتر r_e نرخ بارگذاری بر حسب گرم بر لیتر، پارامتر r نرخ حذف آلاینده بر حسب گرم بر لیتر، پارامتر Q شدت جریان ورودی به بیوفیلتر بر حسب لیتر در ساعت، پارامتر C_{in} غلظت ورودی به راکتور بر حسب گرم بر لیتر، پارامتر C_{out} غلظت الاینده در خروجی راکتور بر حسب گرم بر لیتر و نهایتاً V حجم راکتور بر حسب لیتر می‌باشد.

۲-۴ روشهای انجام آزمایشات

در این مطالعه برای تعیین غلظت متانول در هوا به کمک یک دستگاه پمپ مکنده از هوای ورودی، خروجی و هوای در حال عبور از راکتور نمونه‌گیری می‌شد. هوای مکیده شده از استوانه شیشه‌ای حاوی آب مقطر عبور کرده که به دلیل انحلال‌پذیری بالای متانول در آب، این آلاینده به فاز مایع انتقال یافته و با کمک آزمایش سنجش اکسیژن خواهی شیمیایی (COD) مقدار اتانول حل شده در آب مقطر اندازه‌گیری می‌گردید که شاخصی از مقدار اتانول موجود در هوای آلوده درون راکتور بود. COD آب، عبارت است از میزان اکسیژن مورد نیاز برای اکسایش مواد قابل اکسایش موجود در آن. مقدار COD معمولاً با استفاده از یک عامل اکسیدکننده قوی همچون دی کرومات پتاسیم و یا پرمنگنات پتاسیم در محیط اسیدی قابل اندازه‌گیری است. برای انجام این آزمایش معرفهای زیر آماده شدند: (الف) ۲۲ گرم سولفات نقره در ۴/۰۹ گرم اسید سولفوریک غلیظ حل می‌گردد و جهت اختلاط کامل به مدت ۲۴ ساعت در مکانی تاریک قرار می‌گیرد. (ب) ۱۰/۲۱۶ گرم دی‌کرومات پتاسیم که قبلاً به مدت دو ساعت در دمای ۱۰۲ درجه سلیسوس خشک شده بود به ۱۶۷ میلی لیتر اسید سولفوریک غلیظ اضافه گردید. همچنین ۳۳/۳ گرم سولفات جیوه به ۷۵۰ میلی لیتر آب مقطر اضافه شده و سپس به آهستگی بامحلول دی کرومات پتاسیم و اسید سولفوریک مخلوط گردید. سپس محلول نهایی به کمک اضافه کردن آب مقطر به حجم یک لیتر رسید. برای اندازه‌گیری COD نمونه ها ۱/۵ میلی گرم از محلول دی کرومات پتاسیم و ۳/۵ میلی لیتر محلول سولفات نقره و ۲/۵ میلی لیتر از نمونه مورد نظر در ویال ریخته شد و پس از مخلوط نمودن به مدت

Archive of SID

www.

دو ساعت در دمای ۱۵۰ درجه سلیسوس قرار گرفت. پس از گذشت مدت زمان دو ساعت ویال به آهستگی سرد شده و سپس محتوای آن به کمک دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۶۲۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. با توجه به کالیبراسیون انجام شده COD نمونه ها مشخص گردید [۱۳].

همچنین برای محاسبه افت فشار در بیوفیلتر از مانومتر دیجیتال استفاده شد. به منظور تعیین pH از یک دستگاه pH متر دیجیتال (HANNA-HI-991001) ساخت آمریکا استفاده گردید. در این مطالعه دما نیز بطور روزانه با استفاده از دماسنج‌های جیوه ای مورد بررسی قرار می‌گرفت.

برای بررسی‌های میکروب‌شناسی از سه نمونه‌گیر موجود بر روی راکتور نمونه‌هایی از بیوفیلم خارج گردید. وزن تقریبی هر نمونه بیوفیلم برداشت شده یک گرم بود. نمونه ها به طور جداگانه در سرم فیزیولوژیک (۹ گرم نمک در یک لیتر آب) استریل مخلوط شدند. سپس به کمک لوپ آزمایشگاهی مقداری از نمونه سرم فیزیولوژیک حاوی ریزاندام‌ها به محیط کشت جامد نوترینت اگار انتقال یافت. این نمونه ها به مدت ۴۸ ساعت در انکوباتور با دمای ۳۷ درجه سلیسوس قرار گرفتند. پس از این مدت کلنی‌های میکروبی با مشخصات مختلف از قبیل رنگ و ریخت‌شناسی بر روی محیط کشت جامد نوترینت آگار رشد نمودند. با شمارش تعداد کلنی‌های با ریخت‌شناسی یکسان از هر بخش تعدادی کلنی (یا گونه ریزاندام‌ها) که دارای بالاترین تعداد بود به عنوان کلنی‌های غالب (از لحاظ تعداد) انتخاب شدند. سپس به کمک روش کشت خطی از هر کلنی نمونه برداری شده و بر روی محیط‌های کشت جدید نوترینت آگار برده شدند و در انکوباتور با دمای ۳۷ درجه سلیسوس به مدت زمان ۴۸ ساعت قرار گرفتند. این عمل تا بدست آمدن کلنی‌های خالص (با رنگ و ریخت‌شناسی یکسان) تکرار گردید. پس از خالص‌سازی ریزاندام‌ها با کمک کیت زیست‌شیمیایی شناسایی میکروبی HI25 ساخت کارخانه HIMEDIA در کشور هندوستان که قادر به شناسایی ۷۱ گونه میکروبی از جمله خانواده انتروباکتریاسه بود مورد بررسی تکمیلی قرار گرفت. بدین ترتیب تنوع میکروبی موجود در بخشهای مختلف راکتور مشخص گردید.

به منظور اندازه‌گیری غلظت ریزاندام‌های موجود در راکتور نیز ۱۰ عدد از بسترهای موجود در راکتور خارج شده و پس از خشک کردن به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۴ درجه سلیسوس توزین گردید. این بسترها سپس به دقت شسته شده و در محلول ۱۰ درصد اسید هیدروکلریک نیز شناور شدند تا تمام ریزاندام‌های چسبیده به آن از بستر جدا شوند. سپس مجدداً بسترها خشک شده و وزن شدند. اختلاف وزن ایجاد شده نمایشگر وزن بیوفیلم موجود بر روی بسترها بود [۲۲]. با توجه به معلوم بودن تعداد کل بیوفیلم‌های موجود در صافی وزن کل ریزاندام‌ها قابل محاسبه بود.

۳- بحث و نتایج

۳-۱ بررسی بارگذاری‌های مختلف بخار اتانول در بیوفیلتر

راکتور مورد مطالعه در سه شدت جریان مختلف به کارگرفته شد که زمان‌های ماند مختلفی را ایجاد نمود. در نخستین بارگذاری که با زمان ماند ۱۳۲ ثانیه انجام پذیرفت راکتور تقریباً بلافاصله به شرایط پایدار رسید. در این مطالعه شرایط پایدار به شرایطی اطلاق می‌گردید که راندمان حذف اتانول در راکتور برای چهار روز متوالی تنها پنج درصد با یکدیگر اختلاف داشته باشند. همان طور که در شکل ((۲)- الف) مشخص است، خروجی این راکتور در همان روزهای اولیه به شرایط پایدار رسیده بود. دلیل دست یابی سریع به شرایط پایدار را می‌توان در کاربرد قبلی و طولانی مدت راکتور مورد مطالعه در این تحقیق برای بررسی تصفیه هوای آلوده به فرمالدهید جستجو نمود. فرمالدهید ماده‌ای بسیار سمی برای ریزاندام‌ها بوده، با این حال به دلیل انجام فرایند سازگارسازی طولانی مدت بر روی ریزاندام‌های موجود در این راکتور توانایی مصرف آن را به عنوان تنها منبع کربن کسب نموده بودند [۱۸]. لذا در مطالعه حاضر این ریزاندام‌ها مشکلی در مواجهه با اتانول که به مراتب سمیت کمتری برای ریزاندام‌ها دارد نداشته و به سرعت خود را برای مصرف آن سازگار نمودند. همان طور که در شکل ((۲)- الف) مشخص است در روزهای نهایی این بارگذاری یعنی روزهای یازدهم الی سیزدهم بازدهی حذف اتانول از هوا به ۹۹ درصد رسید.

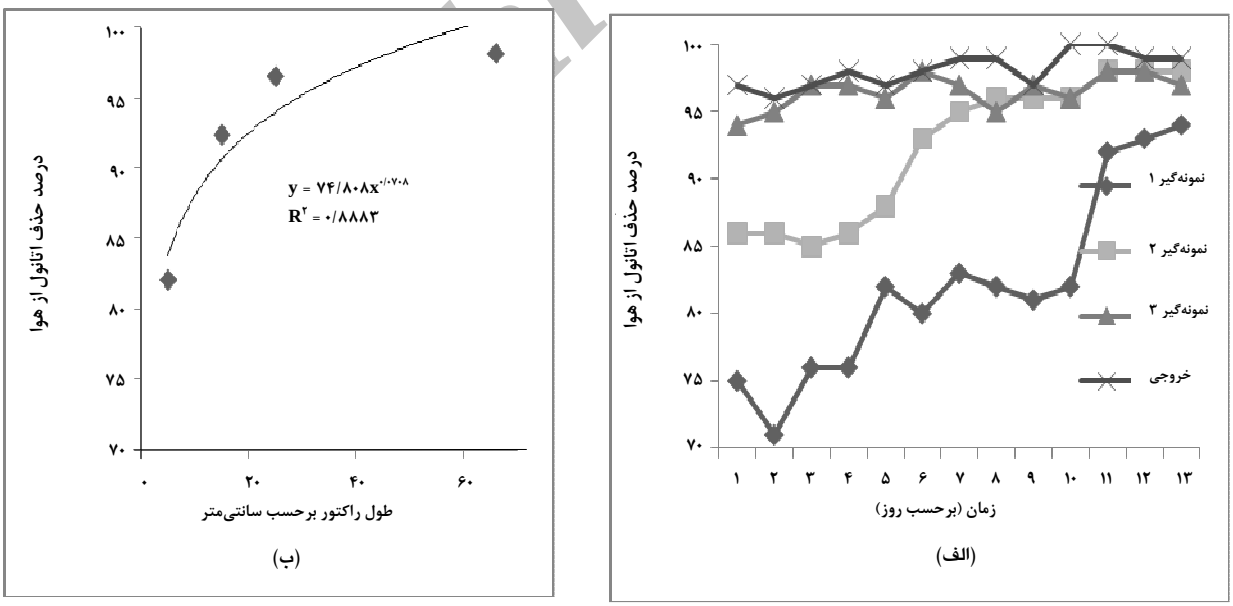
متوسط بازدهی حذف اتانول از هوا در طول راکتور در شکل ((۲)- ب) نمایش داده شده است. نکته جالبی که در این شکل مشخص است این است که بطور متوسط ۸۲ درصد اتانول حذف شده در این راکتور در ابتدایی ترین بخش آن یعنی تا نمونه گیر شماره ۱ حذف شده است. لازم به ذکر است که ارتفاع این بخش از

Archive of SID

www.SID.ir

راکتور تنها پنج سانتیمتر است. این پدیده در مطالعات قبلی این گروه بر روی حذف فرمالدهید در همین راکتور نیز مشاهده و گزارش گردیده بود [۱۸]. دلیل این امر می‌تواند کاهش فشار بخار اتانول در طول راکتور باشد. اتانول موجود در هوا که از همان ابتدای ورود به راکتور در تماس با بستر پوشیده از بیوفیلم حاوی رطوبت بالا قرار گرفته است به سرعت در رطوبت حل شده و باعث کاهش شدید غلظت اتانول موجود در هوا می‌گردد. در بخشهای ابتدای راکتور، به دلیل غلظت بالای اتانول موجود در هوا، فشار بخار این ماده باعث انحلال شدید اتانول در رطوبت موجود در بیوفیلم می‌گردد. لذا با افزایش ارتفاع راکتور، غلظت اتانول نیز کاهش می‌یابد. این کاهش غلظت منجر به کاهش فشار بخار این ماده در بخش‌های بالاتر می‌گردد. لذا به دلیل کاهش فشار بخار در بخشهای بالاتر راکتور، انحلال آن در رطوبت موجود در بیوفیلم به شدت کاهش می‌یابد. بدین سان در بخشهای ابتدایی راکتور (۵ سانتیمتر اول)، بخش اعظم اتانول موجود در هوا (۸۲ درصد) حذف شده لیکن سایر بخش‌های آن (۶۱ سانتیمتر بالایی) فقط قادر به حذف مقدار اندکی از آن (۱۸ درصد) می‌باشند. این کاهش غلظت در طول راکتور را می‌توان در شکل ((۲)- ب) مشاهده نمود. پروفایل طولی حذف اتانول از هوا در این راکتور از معادله $y=۷۴/۸۰x^{۰/۰۷}$ پیروی می‌نماید که در آن y درصد حذف آلاینده از هوا و x طول راکتور است. فولازاکی و همکارانش نیز در سال ۲۰۱۳ کاهش شدید غلظت فرمالدهید در بخشهای ابتدایی یک راکتور صافی چکنده را گزارش نموده اند که تشابه زیادی با نتایج حاصل از این تحقیق دارد. لیکن آنها هیچ گونه توجیهی در این زمینه ارائه نداده‌اند.

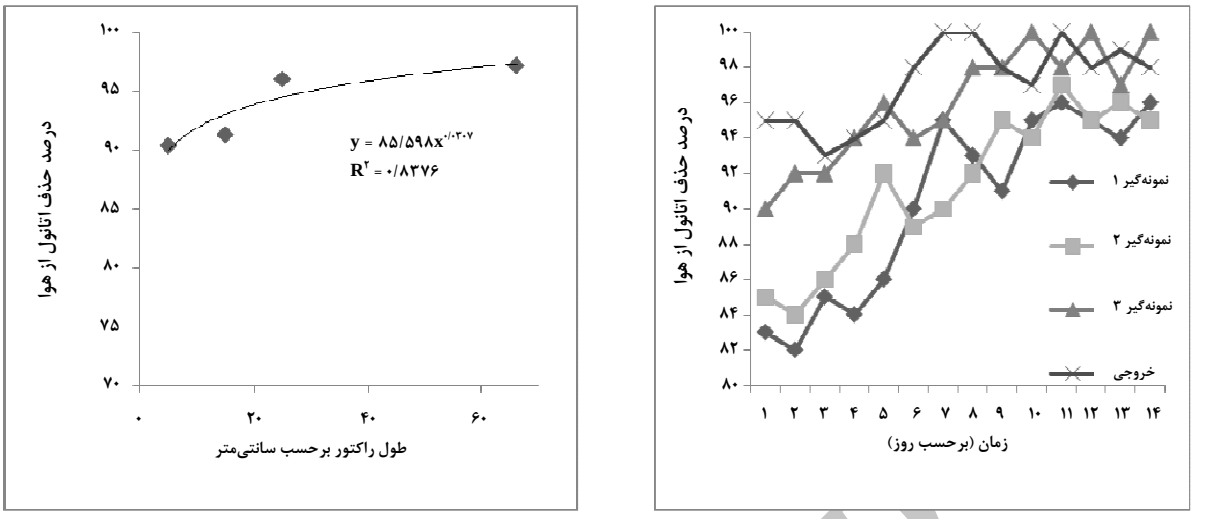
در دومین بارگذاری که با کاهش زمان ماند از ۱۳۲ ثانیه به ۴۱ ثانیه صورت پذیرفت بازدهی راکتور در روزهای اول راهبری اندکی افت نمود. لیکن در مدت حدوداً ۷ روز شرایط پایدار ایجاد و نهایتاً سیستم در روزهای آخر کار خود در این بارگذاری موفق به حذف ۱۰۰ درصد اتانول ورودی به خود گردید. این شرایط در شکل ((۳)- (الف) بطور واضح قابل مشاهده است. همان طور که در شکل ((۳)- ب) نیز مشاهده می‌گردد ۹۱ درصد اتانول ورودی به راکتور در همان پنج سانتیمتر ابتدایی راکتور حذف شده است و کلیه طول باقیمانده از راکتور کمتر از ۱۰ درصد حذف را ارائه نموده است. همچنین پروفایل طولی حذف آلاینده در راکتور می‌توان از طریق معادله $y=۸۵/۵۹x^{۰/۰۳}$ پیش‌بینی گردد که در این معادله نیز y درصد حذف اتانول موجود در هوا و x طول راکتور می‌باشد.



شکل ۲- (الف) درصد حذف اتانول از هوای ورودی به راکتور در نمونه‌گیرهای مختلف موجود در طول راکتور و خروجی نهایی آن در بارگذاری اول، (ب) متوسط حذف اتانول در طول راکتور در بارگذاری اول

Archive of SID

www.

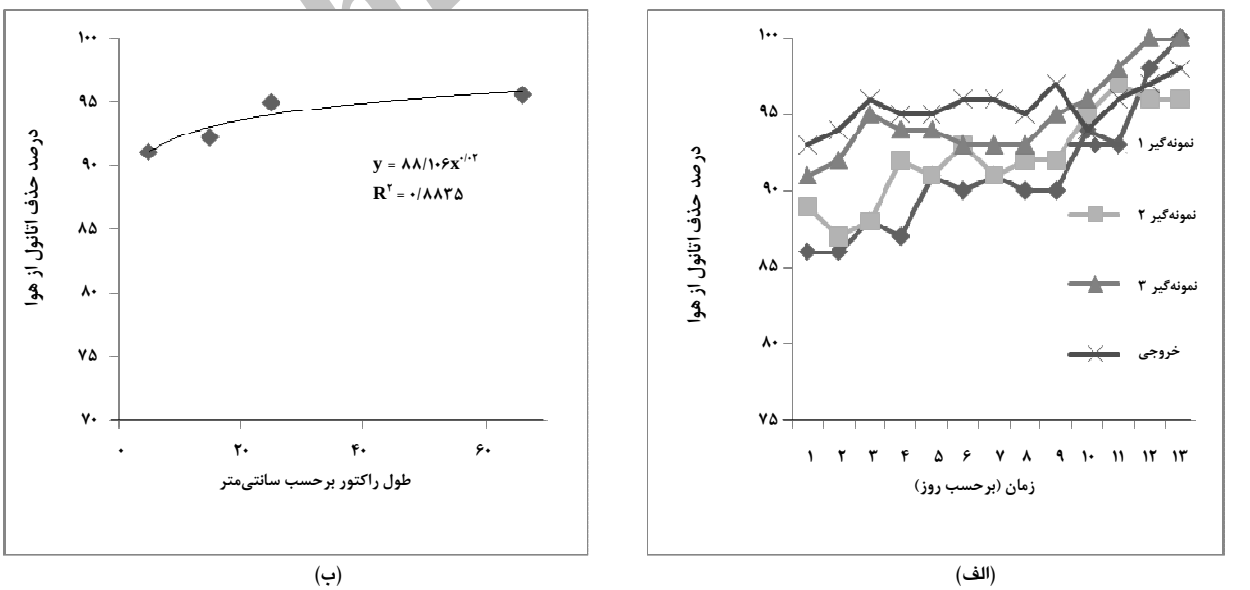


(الف) (ب)

شکل ۳- (الف) درصد حذف اتانول از هوای ورودی به بیوفیلتر در نمونه‌گیرهای مختلف موجود در طول راکتور و خروجی نهایی آن در بارگذاری دوم، (ب) متوسط حذف اتانول در طول راکتور در بارگذاری دوم

در سومین بارگذاری دبی ورودی به راکتور به شدت افزایش داده شد و زمان ماند به ۸ ثانیه کاهش یافت. ایجاد شرایط پایدار در راکتور و در این بارگذاری ۱۰ روز به طول انجامید و نهایتاً پس از ۱۲ روز راکتور موفق به حذف ۱۰۰ درصد آلاینده موجود در هوا شد.

پروفایل طولی حذف آلاینده در راکتور را می‌توان از طریق معادله $y=88/10x^{-0.02}$ پیش‌بینی کرد که در این معادله نیز y درصد حذف اتانول موجود در هوا و x طول راکتور می‌باشد.



(الف) (ب)

شکل ۴- (الف) درصد حذف اتانول از هوای ورودی به راکتور در نمونه گیرهای مختلف موجود در طول راکتور و خروجی نهایی آن در بارگذاری سوم، (ب) متوسط حذف اتانول در طول راکتور در بارگذاری سوم

www.SID.ir

همان‌طور که می‌دانید افزایش طول راکتور به معنای افـزایش زمـان مانـد مـی‌باشـد. نتـایج ایـن مطالعـه کـه در شـکل‌هـای ((۲)- ب)، ((۳)- ب) و ((۴- ب) نمایش داده شده است نشان می‌دهد افـزایش زمان ماند هوای آلوده در راکتور تا حدودی می‌تواند منجر به افزایش بازدهی گردد هر چند که با افزایش بیش از حد زمان مانـد بـازدهی حذف اتانول از هوا به سمت عدد ثابتی پیش می‌رود و افزایش زمـان ماند پس از رسیدن به یک مقدار بهینه دیگـر افـزایش چشـم‌گیـری نمی‌یابد. این چنین نتایجی توسط برخی دیگر از محققـین همچـون استرس[1] و همکارانش در سال ۲۰۰۵ نیز گزارش شـده اسـت [۲۴]. هرچند که این محققـین از بیـوفیلتر بـرای حـذف ترکیبـاتی ماننـد فرمالدهید، دی اکسید کربن و ترکیباتی دیگر استفاده نمودند، لیکن نتایج حاصل از افزایش زمان ماند در تمام آنها یکسان بوده است.

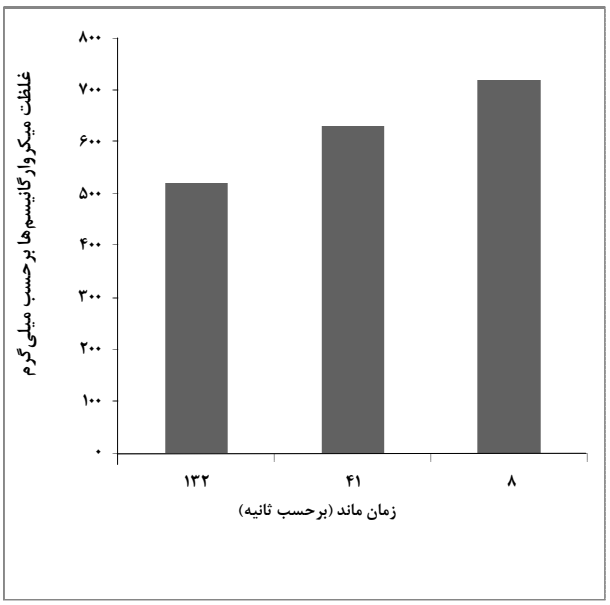
در طول مطالعه دمای هوای ورودی و خروجی راکتور مورد بررسی و سنجش قـرار مـی‌گرفـت. دمـای بخـش میـانی راکتـور نیـز روزانـه اندازه‌گیری می‌شد. نتایج این مطالعات نشان داد که متوسـط دمـای ورودی و خروجی به راکتور به ترتیـب ۲۶/۴ و ۲۴/۶ بـود. همچنـین متوسط دمای بخش میـانی راکتـور بـه دلیـل فعالیتهـای میکروبـی اندکی بالاتر بوده و برابر با ۲۸ درجه سلیسوس بود.

۳-۲ بررسی میکروبی راکتور

در این مطالعه غلظت ریزاندام‌های راکتور بررسـی گردیـد و مطـابق شکل (۵) مشخص شد که با افزایش مقدار اتانول ورودی بـه راکتـور غلظت ریزاندام‌ها نیز افزایش یافته است. در مطالعه گذشته این گروه بر روی حذف فرمالدهید از هـوا مشـخص شـد کـه افـزایش غلظـت فرمالدهید تأثیر معکوسی بر غلظت ریزاندام‌ها دارد [۱۸]. این مسئله می‌تواند به دلیل سمیت بالای فرمالدهید بوده باشـد. لـیکن در ایـن مطالعه اتانول سمیت زیادی نداشته لذا ورود اتانول بیشتر بـه منزلـه ورود ماده غذایی بیشتر به راکتور می‌باشد که این امر خود منجر بـه افزایش غلظت ریزاندام‌ها در راکتور می‌گردد.

با توجه به این موضوع که بر روی پایلوت مورد نظر تعـدادی دریچـه برای نمونه برداری از گاز و همچنین محتویات راکتور در نظر گرفتـه شده بود، نمونه‌هایی از بیوفیلم از هـر بخـش راکتـور برداشـته شـد. ریزاندام‌های موجود بر روی بیوفیلم‌های هر بخش بطور جداگانـه بـر روی محیط کشت نوترینت آگار تلقیح گردید و سـپس بـرای مـدت

1. Streese



شکل ۵- غلظت ریزاندام‌های راکتور در زمان ماندهای مختلف (بارگذاری‌های متفاوت)

۴۸ ساعت در انکوباتور با دمای ۳۷ درجه سلیسوس قرار گرفت. پس از گذشت ۴۸ ساعت کلنی‌هایی با رنگها و اشـکال مختلـف بـر روی محیط کشت نوترینت آگار تشکیل گردید. با شمارش تعداد کلنی‌هـا با ریخت‌شناسی یکسان از هر بخش یـک کلنـی کـه دارای بـالاترین تعداد بودند به عنوان کلنی‌های غالب انتخاب شدند. در مرحلـه بعـد به کمک فرایند کشت خطی، خالص‌سازی هـر کلنـی انتخـاب شـده انجـام پـذیرفت. ریزانـدام‌هـای خـالص بـه کمـک کیـت شناسـایی ریزاندام‌های HI25 مورد بررسی قرار گرفتند. نتـایج ایـن بررسـی‌هـا نشان داد که گونـه‌هـای مختلـف میکروبـی پنومونیـا[2]، سابسپیسـیز ازنی[3]، کلبسیلا[4]، سابسپیسیز پنومونیا[5]، کلبسیلا تریجنـا[6] و کلویـورا کلویورا اسکورباتا[7] جزء گونه‌های غالب در سرتاسر راکتـور محسـوب می‌گردند. لیکن تعداد برخی از این گونه ها در بخـش‌هـای مختلـف راکتور مطابق جدول (۱) متفاوت بود. باتوجـه بـه ایـن موضـوع کـه بیشترین درصـد حـذف اتـانول در بخـش ابتـدایی راکتـور بـود لـذا ریزاندام‌های این بخش می‌توانند بسیار مفید فایده باشند. همچنـین با توجه به اینکه راکتور مورد نظـر قـبلاً بـه منظـور بررسـی حـذف فرمالدهید از هوا بـه کـار رفتـه بـود و در آن مطالعـه بررسـی‌هـای

2. Pneumonia
3. Subspecies Ozaenae
4. Klebsiella
5. Subspecies Pneumonia
6. Klebsiella Terrigena
7. Kluyvera Ascorbata

Archive of SID

www.

تنوع میکروبی راکتور در قبل از شروع آزمایشات کاملاً مشخص بود. لذا در جدول (۱) می‌توانید تغییرات تنوع میکروبی این راکتور را پس از ۴۰ روز راهبری با اتانول مشاهده نمایید. همان طور که مشخص است تمام ریزاندام‌های غالب موجود در راکتور در طی این ۴۰ روز تغییر نموده‌اند و ریزاندام‌های غالب قبلی بطور کلی با ریزاندام‌های غالب جدید جایگزین شده‌اند. لازم به ذکر است که این ادعا به معنای نابودی کامل گونه‌های قبلی و جایگزینی آنها با گونه‌های جدیدی که قبلاً در بیوفیلتر نبوده‌اند نمی‌باشد. لیکن به معنای کاهش تعداد ریزاندام‌های غالب قبلی و افزایش تعداد ریزاندام‌هایی که قبلاً از لحاظ تعداد، غالب نبوده‌اند نیست.

جدول ۱- نتایج بررسی‌های میکروب‌شناسی بر روی بخشهای مختلف راکتور

شماره نمونه‌گیر	نام باکتریهای‌های غالب شناسایی شده قبل از شروع آزمایشات	نام باکتری‌های غالب شناسایی شده پس از اتمام آزمایشات
نمونه‌گیر ۱	سالمونلابنگوری[1]	پنومونیا، سابسپیسیز ازنی، کلبسیلا
نمونه‌گیر ۲	سالمونلا کلریوزیس[2]	پنومونیا ,سابسپیسیز پنومونیا، کلبسیلا
نمونه‌گیر ۳	سالمونلا نیفیموریوم[3]، سراتیا انتوموفیلا[4]، سراتیا فیساریا[5]	کلبسیلا تریجنا، کلویورا اسکورباتا

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه از یک صافی چکنده بیولوژیکی برای تصفیه هوای آلوده به اتانول استفاده گردید. توده میکروبی این صافی قبلاً برای بررسی تصفیه هوای آلوده به فرمالدهید مورد استفاده قرار گرفته بود لذا دوره سازگارسازی آن برای حذف اتانول بسیار کوتاه بود. صافی چکنده مورد استفاده در این مطالعه قادر به حذف ۱۰۰ درصد اتانول موجود در هوا تنها در مدت زمان ماند هشت ثانیه بود و بخش اعظم این حذف (۸۲ درصد) تنها در پنج سانتیمتر نخست این صافی انجام می‌پذیرفت. در این مطالعه کاهش فشار بخار اتانول در طول راکتور به عنوان دلیل اصلی حذف درصد بالایی از اتانول در بخشهای نخستین راکتور معرفی شد. نتایج این مطالعه نشان داد که علی‌رغم پیچیدگی‌های راهبری، استفاده از بیوفیلتر سازگار با محیط زیست و بسیار موثر در حذف هوای آلوده به اتانول می‌باشد. این روش امروزه می‌تواند به عنوان جایگزینی مناسب برای روشهای شیمیایی و یا فیزیکی همچون اسکریبرهای شیمیایی و یا کربن فعال محسوب گردد.

1. Salmonella Bongori
2. Salmonella Choleraesuis
3. Salmonella Typhimurium
4. Serratia Entomophila
5. Serratia Ficaria

مراجع

[1] Everaert, K., Baeyens, J., "Catalytic combustion of volatile organic compounds". Journal of Hazardous Materials, 109(1), 113-139, (2004).

[2] Francke, K. P., Miessner, H., Rudolph, R., "Plasmacatalytic processes for environmental problems". Catalysis Today, 59(3), 411-416, (2000).

[3] O'malley, A., Hodnett, B. K., "The influence of volatile organic compound structure on conditions required for total oxidation". Catalysis today, 54(1), 31-38, (1999).

[4] Naya, M., Nakanishi, J., "Risk assessment of formaldehyde for the general population in Japan". Regulatory Toxicology and Pharmacology, 43(3), 232-248, (2005).

[5] Prado, Ó. J., Veiga, M. C., Kennes, C., "Biofiltration of waste gases containing a mixture of formaldehyde and methanol". Applied microbiology and biotechnology, 65(2), 235-242, (2004).

[6] Smidt, S., Bauer, H., Pogodina, O., Puxbaum, H., "Concentrations of ethene and formaldehyde at a valley and a mountain top site in the Austrian Alps". Atmospheric Environment, 39(22), 4087-4091, (2005).

[7] Squire, R. A., Cameron, L. L., "An analysis of potential carcinogenic risk from formaldehyde". Regulatory Toxicology and Pharmacology, 4(2), 107-129, (1984).

[8] Wippermann, U., Fliegmann, J., Bauw, G., Langebartels, C., Maier, K., Sandermann, H., "Maize glutathione-dependent formaldehyde dehydrogenase: protein sequence and catalytic properties. Planta", 208(1), 12-18, (1999).

[9] Wolverton, B. C., McDonald, R. C., Watkins, E. A., "Foliage plants for removing indoor air pollutants from energy-efficient homes". Economic Botany, 38(2), 224-228, (1984).

[10] Xu, Z., Qin, N., Wang, J., Tong, H., "Formaldehyde biofiltration as affected by spider plant". Bioresource technology, 101(18), 6930-6934, (2010).

[11] Wolverton, B. C., Wolverton, J. D., "Plants and soil microorganisms: removal of formaldehyde, xylene, and ammonia from the indoor environment". Journal of the Mississippi Academy of Sciences, 38(2), 11-15, (1993).

Archive of SID

www.SID.ir

[12] Alvarez-Hornos, F. J., Gabaldón, C., Martínez-Soria, V., Martín, M., Marzal, P., Penya-Roja, J. M., "Biofiltration of ethylbenzene vapours: influence of the packing material". Bioresource technology, 99(2), 269-276, (2008).
[13] Nicolella, C., Converti, A., Zilli, M., "Biotrickling air filtration of 2-chlorophenol at high loading rates". Biochemical Engineering Journal, 43(1), 98-105, (2009).
[14] Ottengraf, S. P. P., Van Den Oever, A. H. C., "Kinetics of organic compound removal from waste gases with a biological filter". Biotechnology and Bioengineering, 25(12), 3089-3102, (1983).
[15] Glick, B. R., "Phytoremediation: synergistic use of plants and bacteria to clean up the environment". Biotechnology advances, 21(5), 383-393, (2003).
[16] Oyabu, T., Sawada, A., Onodera, T., Takenaka, K., Wolverton, B., "Characteristics of potted plants for removing offensive odors". Sensors and Actuators B: Chemical, 89(1), 131-136, (2003).
[17] Lee, E. H., Ryu, H. W., Cho, K. S., "Removal of benzene and toluene in polyurethane biofilter immobilized with< i> Rhodococcus</i> sp". EH831 under transient loading. Bioresource technology, 100(23), 5656-5663, (2009).
[18] Goli A, Talaiekhozani A., "Evaluation of biological treatment of air stream contaminated with formaldehyde using bio-trickling filter", Tolue behdasht journal of Yazd, In press.
[19] Fulazzaky, M. A., Talaiekhozani, A. R., Hadibarata, T., "Calculation of optimal gas retention time using a logarithmic equation applied to a bio-trickling filter reactor for formaldehyde removal from synthetic contaminated air", RSC Advances, 3(15): 5100-5107, (2013).
[20] Fulazzaky, M. A., Talaiekhozani, A., Ponraj, M. M., Abd Majid, M. Z., "Removal of formaldehyde from polluted air in a biotrickling filter reactor". Desalination and Water Treatment; 52 (19-21): 3663-3671, (2014).
[21] Fulazzaky, M. A., Talaiekhozani, A. Mohamad doss, P., Abd Majid, M. Z., Hadibarata, T., Goli, A., "Biofiltration process as an ideal approach to remove pollutants from polluted air", Desalination and Water Treatment; 52 (19-21): 3600-3615, (2014).
[22] APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 14ed. APHA American Public Health Association, 155-158, (1976).
[23] Moussavi, G., Khavanin, A., Sharifi, A., "Ammonia removal from a waste air stream using a biotrickling filter packed with polyurethane foam through the SND process". Bioresource technology, 102(3), 2517-2522, (2011).
[24] Streese, J., Schlegelmilch, M., Heining, K., Stegmann, R., "A macrokinetic model for dimensioning of biofilters for VOC and odour treatment". Waste Management, 25(9), 965-974, (2005).

Archive of SID

www.