

مقایسه عملکرد بیوفیلتراسیون بر مبنای باکتری و قارچ در تصفیه بخارات تولوئن از جریان هوا

روح اله قاسمی^۱، فریده گلبابایی^{۱*}، محمد جواد جعفری^۲، محمدرضا پورمند^۳، ساسان رضایی^۴
رامین نبی زاده^۵، انسبه ماسوریان^۳

^۱ گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران
^۲ گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، تهران، ایران
^۳ گروه میکروبی شناسی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران
^۴ گروه قارچ شناسی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران
^۵ گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۴/۲۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۶/۱۴

چکیده

مقدمه: امروزه آلودگی هوا به عنوان موضوع مهم محیطی و بهداشتی مطرح است. فرآیندهای کنترلی بیولوژیکی به دلیل دوام، صرفه اقتصادی و دوست دار محیط زیست توانستند جایگزین مناسبی برای روش های فیزیکیوشیمیایی شوند. فناوری بیولوژیکی بر مبنای فعالیت میکروارگانیسم ها قرار دارد. در این مطالعه، قابلیت باکتری سودوموناز پوتیدا و قارچ پلاروتوس استراتوس در تصفیه جریان گازی آلوده حاوی تولوئن و تجزیه بیولوژیکی آن تحت شرایط عملیاتی مشابه مورد مقایسه قرار گرفت.

روش کار: بدین منظور، یک بیوفیلتر شامل دو ستون موازی در مقیاس آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد و آزمایشات در این دو ستون بر مبنای اندازه گیری کارایی حذف، ظرفیت حذف و افت فشار صورت گرفت، به گونه ای که در یکی از ستون ها باکتری و در دیگری قارچ تلقیح شد.

یافته ها: آزمایشات مربوط به باکتری ۲۰ روز و آزمایشات مربوط به قارچ ۱۴ روز به طول انجامید. میزان بار ورودی برای بیوفیلتر باکتریایی و برای بیوفیلتر قارچی به ترتیب عبارت از $11.65 \pm 2.26 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$ و 11.94 ± 2.56 بودند. نتایج نشان داد بیوفیلتر قارچی ظرفیت حذف بالاتری را نسبت به بیوفیلتر باکتریایی دارد (9.65 ± 3.53 در برابر $\text{g/m}^3 \cdot \text{h}$ 9.18 ± 2.6 ، هر چند، افت فشار نیز در بیوفیلتر قارچی بالاتر از بیوفیلتر باکتریایی بود (1.1 ± 0.32 در برابر mm water 1 ± 0.28).

نتیجه گیری: با توجه به نتایج به دست آمده بیوفیلتراسیون قارچی در حذف تولوئن از جریان هوا کاراتر می باشد.

کلمات کلیدی: تجزیه بیولوژیکی، تولوئن، باکتری سودوموناز پوتیدا، قارچ پلاروتوس استراتوس، ظرفیت حذف، افت فشار.

مقدمه

افزایش نگرانی در رابطه با آلودگی هوا باعث شد تا روش های به صرفه و پایدار به منظور تصفیه طیف گسترده ای از این آلاینده ها راه اندازی شود (۱ و ۲). تکنولوژی های مرسوم کنترل آلودگی هوا مانند سوزاندن، جذب سطحی یا شستشوی شیمیایی هزینه برند و هر کدام آلودگی متعاقب خاص خود را دارند (۳). دیگر تکنولوژی های تصفیه هوا، شامل روش های بیولوژیکی افزایش چشم گیری داشته، زیرا کارایی و عمل کردشان در کنترل آلودگی هوا به اثبات رسیده است (۴). علاوه بر این، بیوتکنولوژی می توانند انواع ترکیبات از قبیل ترکیبات آلی فرار (VOCs) را از طریق فعالیت میکروارگانیسم ها به ترکیبات بی ضرر تبدیل کنند، لذا سازگار با محیط زیست بوده و مزایای اقتصادی قابل ملاحظه ای را در مقایسه با تکنولوژی مشابه فیزیکی شیمیایی نشان می دهد (۵ و ۶). با وجود گستره وسیع اشکال مختلف بیوراکتور (مانند بیوفیلترها، بیوفیلترهای چکنده، بیواسکرابرها، سیستم های دوفازی، و ...)، بیوفیلترها هم چنان برای تصفیه ترکیبات کم محلول در آب مناسبند. برعکس، بقیه موارد که در آن ها فاز مایع به صورت پیوسته در گردش است، برای حذف ترکیبات با حلالیت بالا توصیه می شوند (۷ و ۴). تاکنون عمده مطالعات بیوفیلتراسیون با محوریت فعالیت باکتریایی بوده که البته تنوع و سازگاری بالایی در تصفیه VOCs نشان داده اند (۹، ۸ و ۱۰).

با وجود این که بیوفیلترهای باکتریایی به عنوان یک فناوری بادوام برای تصفیه آلاینده های گازی گزارش شده اند، اما عمل کرد آن ها به سرعت در شرایط رطوبت کم، pH پایین و محدودیت مواد مغذی و وجود ترکیبات سرسخت کاهش می یابد (۱۱ و ۱۲). از طرف دیگر، برخی مطالعات که بر مبنای بیوفیلتراسیون قارچی قرار داشته اند اظهار می دارند که این تکنولوژی جدید قابلیت اداره کردن این شرایط سخت را دارد (۱۴، ۱۳ و ۵). در کل، باکتری ها احتمالاً در شرایط معمول ارجح بوده و در حذف ترکیبات آب دوست موفقند، در حالی که قارچ ها می توانند ترکیبات آب گریز را سریع تر از بیوفیلیم های

باکتریایی جذب کنند (۱۵).

در برخی مطالعات از گونه باکتری سودوموناز (*Pseudomonas sp*) در فرآیندهای حذف آلاینده های گازی BTEX نام برده (۱۶ و ۱۷) و نیز از آن به عنوان یکی از گونه های باکتری که پیوسته در بیوفیلیم بیوفیلترهای تصفیه کننده VOC وجود دارد، یاد شده است (۱۸). در تنها مطالعه ای از لیست رفرنس ها، از نوعی قارچ به نام *Postreatus* در حذف برخی VOCs بهره گرفته شده بود (۱۹).

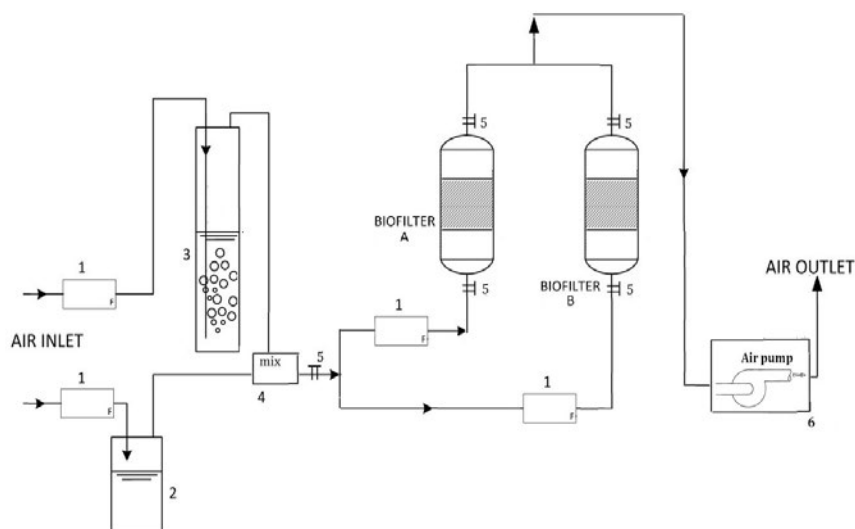
در این مطالعه، آلاینده تولوئن به عنوان VOC مدل مورد استفاده قرار گرفت. تولوئن ترکیب آلی فرار اصلی طبقه بندی شده توسط European Commission's INDEX می باشد و تقریباً همیشه در هوای محیط های درون کارگاهی^۱ از چند $\mu\text{g}/\text{m}^3$ تا $358\mu\text{g}/\text{m}^3$ وجود دارد (۲۱، ۲۰ و ۲۲). تولوئن به طور گسترده در صنایع شیمیایی و بسیاری عملیات مورد استفاده قرار می گیرد. در غلظت های کم، سبب آسیب کبد و کلیه می شود و اثرات نامطلوبی بر سیستم عصبی مرکزی و ژنتیک دارد (۲۳ و ۲۴). تولوئن هم چنین یکی از مشکل ترین VOCs برای تجزیه بیولوژیکی در جریان های گازی مورد توجه می باشد (۲۵ و ۲۶). با وجود پیشرفت های اخیر در شناخت بیوفیلتراسیون قارچی و باکتریایی، هم چنان فقدان مطالعات مقایسه ای سیستماتیک در رابطه با ارزیابی عمل کرد آن ها تحت شرایط یکسان عملیاتی وجود دارد. در این مطالعه، تمرکز بر روی دو فرآیند بیولوژیک بر مبنای فعالیت دو نوع میکروارگانیسم هدف (باکتری سودوموناز پوتیدا و قارچ پلاروتوس استراتوس) در دو بیوفیلتر مجزا برای حذف آلاینده تولوئن از جریان هوای سنتتیک بود.

روش کار

سیستم و شرایط بیوفیلتراسیون

سیستم بیوفیلتر مشتمل بر دو ستون موازی در مقیاس آزمایشگاهی از جنس PVC ساخته شد. قطر

1- Indoor environment



شکل (۱) - شماتیکی از ستاپ آزمایش (بیوفیلتر باکتریایی و بیوفیلتر قارچی)، ۱. روتامتر، ۲ ایمپینجر حاوی تولوئن خالص، ۳ ستون پیش مرطوب ساز، ۴ اتاقک اختلاط، ۵ پورت های نمونه برداری از جریان هوا، ۶ هواکش دور متغیر

به تمامی نقاط آن امکان پذیر بود. شایان ذکر است، تمام سعی بر این بود که در کلیه مراحل آزمایشات، از نشتی جریان به درون سیستم بیوفیلتر جلوگیری شود. لذا کلیه اتصالات حتی المقدور به کمک تمهیداتی نشت گیری شد. در ورودی و خروجی این ستون ها پورت های نمونه برداری از جنس برنج تعبیه شدند.

مواد پرکننده و تعیین ویژگی آن

مخلوط کمپوست و زغال چوب به عنوان مواد پرکننده با نسبت حجمی ۲ به ۱ مورد استفاده قرار گرفت. حجم کار موثر ۰,۷ لیتر بود. کمپوست با قطر دانه متوسط ۲-۴ میلی متر، و کسر تهی اولیه ۵۵% بود. چگالی توده مرطوب^۳ برابر با ۰,۶۲۸ kg/L و چگالی توده خشک^۴ آن برابر با ۰,۳۰۲ kg/L به دست آمد. محتوای رطوبت موجود در کمپوست تهیه شده ۴۸% محاسبه شد. زغال چوب با اشکال تصادفی با قطر تقریبی 15 ± 0.5 mm و تخلخل ۵۰% بود. درصد جذب رطوبت از محاسبه اختلاف وزن زغال مرطوب پس از ۲۴ ساعت غوطه وری در آب و زغال خشک ۴۴% بدست آمد. چگالی خشک و مرطوب آن به ترتیب برابر با ۰,۴۴ kg/L و ۰,۸ بود.

3- Wet bulk density
4- Dry bulk density

درونی هر یک از ستون ها برابر با ۱۰,۵ سانتی متر و ارتفاع آن ها ۷۰ سانتی متر بود (شکل ۱). از فن دور متغیر به منظور تولید جریان در پایین دست ستاپ بهره گرفته شد. جریان هوای تولید شده در ابتدای سیستم به دو جریان کوچک تر و بزرگ تر تقسیم و هر دو به طور پیوسته توسط روتامتر پایش می شدند. جریان بزرگتر با عبور از بابلر، پیش مرطوب می شد. ستون رطوبت ساز قطری معادل با ۶۰ میلی متر و ارتفاع موثر ۶۰ سانتی متر داشت. سپس جریان وارد اتاقک اختلاط^۲ شده و در آن جا با جریان کوچکتر که از ایمپینجر ۲۵ میلی لیتری حاوی تولوئن خالص (۹۹%) عبور می کرد، مخلوط می شد و بدین ترتیب غلظت های مورد نظر از تولوئن توسط تنظیم میکرو ولوهایبی که در مسیر جریان کوچک تر به ایمپینجر قرار داشت به دست می آمد.

به منظور تسهیل آبیاری مواد پرکننده و اسپری محلول مغذی، اختلاط فیزیکی بستر، نمونه برداری از بستر و اندازه گیری درصد رطوبت، pH، دمای آن و درکل سادگی فرایند نگه داشت سیستم، راکتورها به صورت قطعاتی جدا از هم ساخته شدند که نهایتا سرهم شده و سیستم یکپارچه ای را تشکیل می دادند، لذا دسترسی

2- Mixing chamber

که ذکر شد، قبل از تلقیح استریل (30 min, 121°C) و به مقدار یکسان (0.7L) در هر دو بیوفیلتر پر شدند، آن گاه تلقیح باکتریایی (سودوموناز پوتیدا) و قارچی (پلاروتوس استراتوس) به صورت مجزا در هر یک از بستر ستون ها صورت گرفت تا بتوان آزمون های تطبیقی بیوفیلتراسیون این دو نوع میکروارگانیسم را مورد ارزیابی قرار داد. بدین گونه که بیوفیلتر باکتریایی به مدت ۲۰ روز و بیوفیلتر قارچی به مدت ۱۴ روز فعالیت داشتند و در معرض محدوده وسیعی از بار ورودی آلاینده تولوئن قرار گرفتند. میانگین میزان بار ورودی (LR) طی این ۲۰ روز عملیات باکتریایی برابر با $11.65 \pm 2.26 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$ و طی این ۱۴ روز بیوفیلتراسیون قارچی برابر با $11.94 \pm 2.56 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$ بود. شایان ذکر است در طول این آزمایشات، مابقی شرایط از قبیل دما، میزان جریان عبوری، زمان ماند بستر خالی (EBRT)، اندازه و قطر ستون، میزان و نوع مواد پرکننده، نحوه آبیاری و محلول مغذی، درصد رطوبت بستر و ... یکسان بودند. به منظور جلوگیری از خشک شدن بستر، ۳۰ ml محلول مغذی (جدول ۱) به طور منظم هر سه روز یک بار در دو مرحله بر روی مواد پرکننده اسپری می شد. در کلیه عملیات هوادهی در طول شب با دبی L/min ۰.۵ به همراه تراکم پایین تولوئن ۵-۲ ppm انجام می شد تا از گرسنگی و فاز بی هوازی میکروارگانیسم ها جلوگیری شود.

افت فشار نیز توسط مانومترهای U شکل متصل به ورودی و خروجی هر یک از بیوفیلترها اندازه گیری شد. یک راکتور خالی و بدون پرکننده و میکروارگانیسم به عنوان راکتور کنترل برپا شد و کلیه آزمون ها بر روی این سیستم نیز انجام گردید. نمونه گازی $100 \mu\text{L}$ به طور دوره ای از پورت های مربوطه به وسیله سرنگ های Gastight Hamilton نمونه برداری و با GC مورد آنالیز قرار گرفت. تجزیه تولوئن در بیوفیلتر با سنجش تراکم تولوئن در ورودی و خروجی ارزیابی شد.

آنالیز GC و رسم منحنی کالیبراسیون

به منظور آنالیز نمونه های گازی حاوی تولوئن، از

شایان ذکر است در طول عملیات میزان کل جریان هوا 2 L/min تنظیم شد، یعنی در هر ستون جریان برابر با 1 L/min و لذا EBRT در هر ستون برابر با 41.6 s بود. رابطه (۱)

$$EBRT = V_b / Q_v \quad (1)$$

که Q_v میزان گذرحجمی هوا (m^3/sec) و V_b حجم بستر فیلتر (m^3) می باشد. پارامترهای اصلی مورد مطالعه عبارت از میزان بار ورودی^۵ ($\text{IL}; \text{g}/\text{m}^3/\text{hr}$)، ظرفیت حذف^۶ ($\text{EC}; \text{g}/\text{m}^3/\text{hr}$)، و کارایی حذف^۷ ($\text{RE}; \%$) بودند. EC، RE و IL با استفاده از روابط بین غلظت ورودی تولوئن، C_{in} (g/m^3)، و غلظت خروجی تولوئن، C_{out} (g/m^3)، Q_v و V_b تعیین می شوند:

$$EC = \frac{(C_{in} - C_{out})}{V_b} \times Q_v \quad (2)$$

$$RE = \frac{(C_{in} - C_{out})}{C_{in}} \times 100 \quad (3)$$

$$IL = \frac{Q_v \times C_{in}}{V_b} = C_{in}/EBRT \quad (4)$$

میکروارگانیسم ها، کشت و تلقیح (باکتری و قارچ) گونه خالص باکتری *Pseudomonas Putida*, PTCC No: 1694 و گونه خالص قارچ *Pleurotus ostreatus* (IRAN 1781C Oyster mushroom) به منظور عامل تجزیه بیولوژیکی آلاینده تولوئن از جریان هوا مورد استفاده قرار گرفتند. برای کشت و تکثیر این گونه باکتری مطابق با پروتکل تعریف شده عمل شد (۲۷).

آزمایشات

تمامی آزمایشات در دمای $22 \pm 2^\circ \text{C}$ انجام شد. به منظور اطمینان از این که آلاینده کاهش یافته تنها در اثر فعالیت میکروارگانیسم های مورد نظر بوده، مواد پرکننده به نسبتی

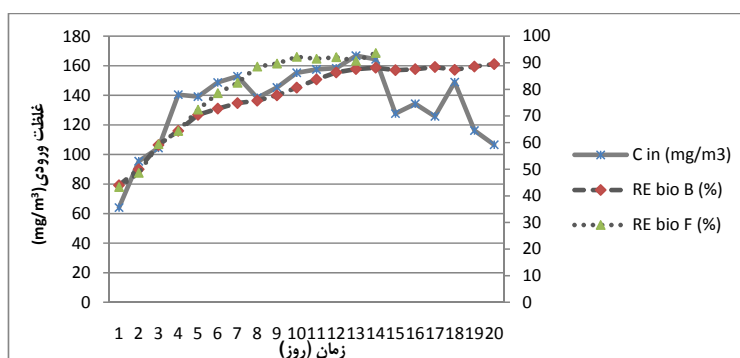
5- inlet load
6- elimination capacity
7- removal efficiency

جدول (۱)- ترکیب عناصر اصلی و ریز مغذی مورد استفاده برای رشد میکروارگانیسم ها

Trace element		Macro element	
compounds	Concentration(mg ^l -1)	compounds	Concentration(gl ⁻¹)
CaCl ₂ .2H ₂ O	26	KH ₂ PO ₄	1
EDTA a ₄ (H ₂ O) ₂	5.5	K ₂ HPO ₄	1
FeCl ₃ .4H ₂ O	1.3	MgSO ₄	0.2
CoCl ₂ .6H ₂ O	0.12	NaCl	1
MnCl ₂ .2H ₂ O	100	KNO ₃	1
ZnCl ₂	0.07		
H ₃ BO ₃	0.06		
NiCl ₂ .6H ₂ O	0.025		
NaMoO ₄ .2H ₂ O	0.025		
CuCl ₂ . 2H ₂ O	0.015		

جدول (۲)- داده های مربوط به هر دو بخش از عملیات - بیوفیلتراسیون باکتریایی و قارچی

RE (%)	EC (g/m ³ .h)	LR (g/m ³ .h)	C _{in} (mg/m ³)	روز	نوع بیوفیلتر
۷۷/۲۱±۱۳/۵۵	۹/۱۸±۲/۶۵	۱۱/۶۵±۲/۲۶	۱۳۴/۵±۲۶/۲	۱-۲۰	باکتریایی
۷۷/۶۷±۱۷/۳	۹/۶۵±۳/۵۳	۲۱/۹۴±۲/۵۶	۱۳۷/۹۱±۲۹/۶۳	۱-۱۴	قارچی



شکل (۲)- تغییرات کارایی حذف (RE) بیوفیلتر باکتریایی و قارچی نسبت به تراکم ورودی آلاینده تولوئن (C_{in}) به ترتیب طی ۲۰ و ۱۴ روز عملیات. C_{in} غلظت ورودی، RE bio B کارایی بیوفیلتر باکتریایی و RE bio F کارایی بیوفیلتر قارچی

دستگاه GC-FID مدل CP-3800 بهره گرفته شد. دستگاه گاز کروماتوگرافی مجهز به ستون ۲۵ m با قطر درونی ۰,۲۵ mm و ضخامت پوشش ۰,۲۵ μm بود. دبی گاز حامل ۱,۸ ml/min، دمای بخش تزریق (اینجکتور) برابر با C ۲۰۰، دمای ستون برابر با C ۱۳۰ و دمای دتکتور برابر با C ۲۴۰ تنظیم شد. منحنی کالیبراسیون برای محدوده غلظتی استاندارد نیز ترسیم گردید (R²=0.999). شایان ذکر است هرچند روز یک بار به طور منظم غلظت های استاندارد ساخته و از درستی روش آنالیز اطمینان حاصل شد.

یافته ها

کارایی حذف تولوئن در هر دو بیوفیلتر تغییرات کارایی حذف (RE) در هر دو بیوفیلتر باکتریایی و قارچی نسبت به تراکم ورودی تولوئن طی کل دوره عملیاتی در شکل (۲) آمده است. طی دوره

عملیات روی هم افتاده و تقریباً مقادیر یکسانی را نشان می دهند، اما بعد از آن منحنی مربوط به بیوفیلتر قارچ شیب بیش تری نسبت به منحنی بیوفیلتر باکتریایی نشان می دهد.

اطلاعات مربوط به میانگین تراکم ورودی آلاینده (C_{in})، میزان ورودی آلاینده (LR)، کارایی حذف (RE)، ظرفیت حذف (EC) طی ۲۰ روز بیوفیلتراسیون باکتریایی و ۱۴ روز بیوفیلتراسیون قارچی در جدول (۲) آمده است.

افت فشار بستر در هر دو بیوفیلتر

افت فشار بستر شاخصی برای انسداد بستر بوده و تغییرات آن برای بیوفیلتر باکتریایی و قارچی در شکل (۴) آمده است. میانگین افت فشار در بیوفیلتر باکتریایی برابر با 1 ± 0.28 و در بیوفیلتر قارچی برابر با 1.1 ± 0.32 mm H₂O بود. میانگین افت فشارها در هر دو عملیات بیوفیلتراسیون روند رو به افزایشی را نشان دادند.

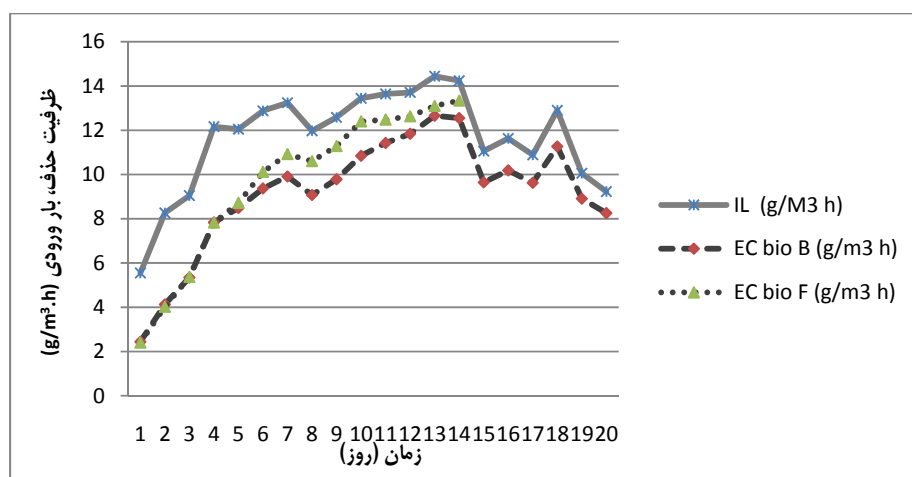
بحث

کارایی حذف تولوئن در بیوفیلترها

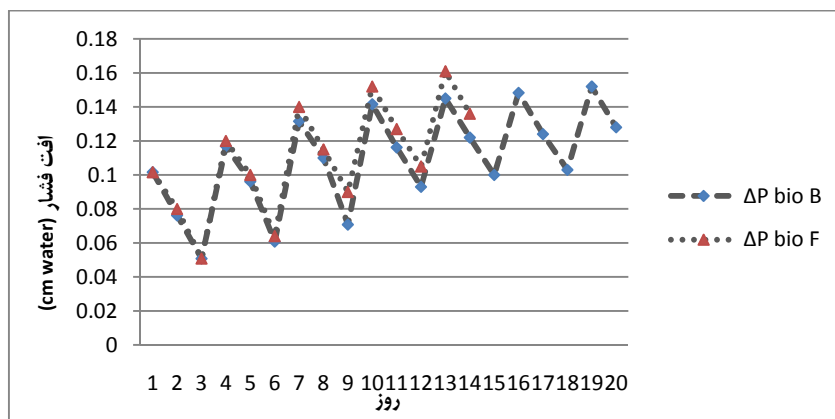
این مطالعه با هدف مقایسه دو بیوفیلتر باکتریایی و قارچی بر حسب کارایی و ظرفیت حذف تولوئن از جریان هوا صورت گرفت که روی هم رفته بیوفیلتر قارچی عمل

های عملیاتی، کارایی حذف در هر دو بیوفیلتر با شیب نسبتاً تندی افزایش یافت که این روند برای بیوفیلتر قارچی مشهودتر به نظر می رسد. طی ۲۰ روز عملیات بیوفیلتراسیون باکتریایی و ۱۴ روز بیوفیلتراسیون قارچی، حداقل میزان بار ورودی آلاینده تولوئن، $5.54 \text{ g/m}^3\text{h}$ که در همان روز اول بود. حداکثر مقدار بار ورودی آلاینده، $14.44 \text{ g/m}^3\text{h}$ بود که در روز سیزدهم اتفاق افتاد. کارایی حذف متناظر با هر یک در بیوفیلتر باکتریایی به ترتیب برابر با 43.99% و 87.64% و در بیوفیلتر قارچی به ترتیب برابر با 43.29% و 90.7% بود. حداکثر کارایی حذف در بیوفیلتر باکتریایی و قارچی هر دو در روز آخر عملیاتی به دست آمد که برای بیوفیلتراسیون باکتریایی برابر با 89.5% درمیزان ورودی آلاینده $9.22 \text{ g/m}^3\text{h}$ و در بیوفیلتر قارچی برابر با 93.66% که در مقدار ورودی آلاینده $14.24 \text{ g/m}^3\text{h}$ اتفاق افتاد.

تغییرات ظرفیت حذف آلاینده (EC) در هر دو بیوفیلتر باکتریایی و قارچی نسبت به میزان ورودی آلاینده (LR) طی کل دوره عملیاتی در شکل (۳) آمده است. همان طور که مشخص است در ابتدای عملیات و زمان تلقیح، فاصله دو منحنی EC و LR نسبتاً زیاد و با گذر زمان این فاصله کم تر و در نهایت در حد یکنواختی باقی می ماند. منحنی های EC برای هر دو بیوفیلتر در ۵ روز نخست



شکل (۳)- تغییرات ظرفیت حذف (EC) بیوفیلتر باکتریایی و قارچی نسبت به میزان ورودی آلاینده تولوئن (LR) به ترتیب طی ۲۰ و ۱۴ روز عملیات. IL میزان بار ورودی، EC bio B ظرفیت حذف بیوفیلتر باکتریایی، EC bio F ظرفیت حذف بیوفیلتر قارچی



شکل (۴) - تغییرات افت فشار بستر به صورت تابعی از زمان در هر دو بیوفیلتر باکتریایی و قارچی. ΔP bio B افت فشار بیوفیلتر باکتریایی، ΔP bio F افت فشار بیوفیلتر قارچی

و همکاران (۲۰۱۳) در مطالعه خود با هدف تصفیه بیولوژیکی BTEX^۸ توسط بیوفیلتر به این نتیجه رسیدند که زمان لازم برای سازگاری میکروارگانیسم ها به این آلاینده ها به ترتیب ۶، ۷، ۹، و ۱۰ روز بود (۳۰).

از آن پس، منحنی تقریباً به صورت یکنواخت و مسطح ادامه یافته به گونه ای که میانگین کارایی حذف در بیوفیلتر باکتریایی و قارچی به ترتیب در حدود ۸۸٪ و ۹۱،۲٪ حفظ شد که بیان گر رسیدن به شرایط حالت پایدار^۹ می باشد. مطالعات فراوانی نیز این مطلب را بیان می کنند که اگر تغییرات کارایی طی سه روز متوالی کم تر از ۵٪ باشد، بدین معنی است که بیوفیلتر به شرایط عملیاتی پایدار رسیده است (۳۰ و ۳۱).

تغییرات ظرفیت حذف هر دو بیوفیلتر باکتریایی و قارچی در شکل (۳) نیز نشان می دهد که در روزهای اول عملیات بیوفیلتراسیون، هر دو منحنی EC روی هم منطبق هستند، به عبارتی نسبت بالایی از ظرفیت حذف در روزهای نخست به جذب سطحی مواد پرکننده مربوط بوده و از آن پس با رشد میکروارگانیسم ها اختلاف ظرفیت حذف در دو بیوفیلتر قابل ملاحظه می باشد، به طوری که منحنی EC مربوط به بیوفیلتر قارچی کمی بالاتر از منحنی EC مربوط به بیوفیلتر باکتری قرار می گیرد. این فاصله، گویای ظرفیت حذف نسبتاً بالاتر در بیوفیلتر

کرد بهتری را نسبت به بیوفیلتر باکتریایی نشان داد. نتایج مربوط به روند تغییرات کارایی حذف در هر دو بیوفیلتر (شکل ۲) نشان می دهد که در روزهای اول عملیات بیوفیلتراسیون، بستر تازه تلقیح شده کارایی بالایی در حذف تولوئن نداشته و تنها قادر به حذف ۴۰-۵۰٪ تولوئن بود. این یافته را می توان چنین توجیه نمود که کارایی حذف (RE) طی روزهای اول بیوفیلتراسیون تنها به دلیل جذب سطحی توسط مواد پرکننده رخ داده است، همان گونه که Klapková و همکاران (۲۰۰۶) نیز در مطالعه خود که با هدف تعیین تاثیر تلقیح میکروبی بیوفیلتر پر شده با مخلوط کمپوست و پرلیت در کارایی حذف تولوئن و زایلن انجام دادند، به چنین نتیجه ای دست یافتند (۲۸).

شیب بالارونده منحنی کارایی حذف آلاینده در هر دو بیوفیلتر مشهود است. این شیب صعودی تا روزهای هشتم و نهم در بیوفیلتر قارچی و تا روزهای دوازدهم و سیزدهم در بیوفیلتر باکتریایی محسوس تر است، به طوری که میانگین کارایی معادل در این روزها برای بیوفیلتر قارچی برابر با ۸۸،۵۴٪ و ۸۹،۷٪ بود. میانگین کارایی متناظر در روزهای ۱۲ و ۱۳ بیوفیلتر باکتریایی ۸۶،۳٪ و ۸۷،۶٪ بود. دوره های ذکر شده را می توان به دوره راه اندازی و سازگاری میکروارگانیسم ها با آلاینده و شرایط موردنظر نسبت داد. در مطالعات، مدت زمان آدپتاسیون را از چند روز تا چند هفته تا ماه ذکر کرده اند (۲۹، ۱۱). Rahul

8- Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene
9- Steady state condition

افت فشار در بیوفیلترها

همان طور که از شکل (۴) مشخص است، شیب منحنی افت فشار بسترها در هر دو بیوفیلتر صعودی بوده که این امر را در روز های اول عملیات بیوفیلتراسیون می توان به نشست و فشردگی بستر نسبت داد، زیرا هنوز میکروارگانیسم ها به اندازه کافی رشد و تکثیر نیافته اند (۳۶، ۳۵ و ۲۸). اما در ادامه، تشکیل و رشد تدریجی بیومس و میسلیوم درون بستر سبب انسداد جزئی منافذ مواد پرکننده و افزایش افت فشار طی روز های عملیات پایدار بیوفیلتراسیون شده است (۳۸، ۳۷ و ۸). میانگین افت فشار در بیوفیلتر قارچی بالاتر از افت فشار در بیوفیلتر باکتریایی بود که این موضوع توسط برخی مطالعات تایید شده است. به طوری که، W. van (۲۰۰۲) در مطالعه خود اظهار داشت که افت فشار بالا در بیوفیلتر قارچی ناشی از اشغال فضای آزاد توسط میسلیوم بوده که به عنوان یکی از نقص های اصلی بیوفیلتراسیون قارچی به شمار می رود، با این حال، حداکثر افت فشار در طی ۶۰ روز آزمایشات، به ۹۱۲ Pa/m bed رسید که این مقدار برای مقیاس های واقعی صنعتی قابل قبول است (۳۹ و ۱۱).

در مطالعه ای حضور مایت ها توسط مشاهدات میکروسکوپی از نمونه های بیوفیلتر در بیوفیلتر باکتریایی، اما نه در بیوفیلتر قارچی تایید شد که این امر علت افت فشار پایین تر در بیوفیلتر باکتریایی شناخته شد (۴۰). Estrada و Hernández نیز در سال ۲۰۱۳، در مطالعه خود اظهار داشتند که بیوفیلتراسیون باکتریایی، افت فشاری معادل با ۶۰٪ کم تر از مقدار آن در بیوفیلتراسیون قارچی را نشان داد که از نظر اقتصادی قابل توجیه است (۱۱). هم چنین مشخص است که شکل منحنی ها در هر دو بخش از آزمایشات به صورت اره ای بوده که به گونه ای بیان گر دوره های آبیاری می باشد که هر سه روز یک بار بر روی بسترپرکننده اسپری می شد. مطالعات نشان می دهند که تجمع آب و رطوبت در منافذ سبب انسداد و گرفتگی بستر شده و لذا در برابر عبور جریان هوا مقاومت ایجاد می کند (۴۱ و ۴۲).

با این تفاسیر، یعنی کارایی بالاتر و نیز افت فشار

قارچی می باشد که داده های جدول (۲) نیز موید این موضوع هستند. حفظ فاصله تقریباً ثابت منحنی های EC و LR در روز های پایانی هر دو عملیات بیوفیلتراسیون نیز نشان دهنده کارایی یکنواخت و رسیدن به حالت شرایط پایدار عملیاتی می باشد که در قبل نیز گفته شد.

از مقایسه عمل کرد بیوفیلتر باکتریایی و قارچی با نظر به شکل های (۲ و ۳) و نیز جدول (۲)، چنین بر می آید که بیوفیلتر قارچی قابلیت بهتری را در حذف آلاینده تولوئن از خود نشان داده و در این راستا موفق تر بوده است. Liu و Zhu در سال ۲۰۰۴ نیز در مطالعه خود که از یک بیوفیلتر قارچی تلقیح شده با پلاروتوس استراتوس برای حذف ترکیباتی مانند استیرن، آلفا پینن، و مخلوط ترکیبات سولفور استفاده کردند، به حداکثر ظرفیت حذف $26 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$ با کارایی حذف بالای ۹۸٪ دست یافتند. (۱۹۵). در مطالعه ای که Krailas و همکاران (۲۰۰۰) با هدف حذف بیولوژیکی متانول توسط بیوفیلتر انجام دادند، به ساختار قارچ و مکانیسم به دام اندازی آلاینده در میسلیوم آن ها پرداخته و دریافتند که قارچ نسبت به باکتری با سهولت بیش تری می تواند ترکیبات آب گریز را جذب و حذف نماید (۳۲). Pedersen و همکاران (۱۹۹۷) در مطالعه خود که فعالیت باکتری سودوموناز پوتیدا را در تجزیه بیولوژیکی تولوئن مورد بررسی قرار دادند دلیل این امر را این گونه بیان می کنند که قارچ می تواند ترکیبات آب گریز را مستقیماً جذب کند و آن به دلیل نبود لایه های آب بین بیوفیلتر قارچی و فازگازی است. لذا ترکیبات آب گریز نسبت به بیوفیلتر باکتریایی سریع تر حذف می شوند (۳۳ و ۳۴). Estrada و همکاران نیز در سال ۲۰۱۳ مطالعه مقایسه ای بین بیوفیلتراسیون قارچی و باکتریایی در تصفیه مخلوط VOC (پروپانول، متیل ایزوبوتیل کتون، تولوئن و هگزانول) انجام دادند. نتیجه مطالعه آن ها نشان داد، بیوفیلتراسیون قارچی ظرفیت های حذف پایین تری را نسبت به همتای باکتریایی خود تامین می کند 27.7 ± 8.9 (vs $40.2 \pm 5.4 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$) (۱۱). هرچند، نتایج تحقیق حاضر نشان می دهد که ظرفیت حذف در بیوفیلتراسیون قارچی بالاتر بوده، با این حال، نتایج متناقضی طی مطالعات اخیر حاصل شده است.

نتیجه گیری

این مطالعه، اولین مقایسه بیوفیلتر قارچی و باکتریایی بر مبنای دو گونه سودوموناز پوتیدا و پلاروتوس استراتوس بود که بر حسب ظرفیت حذف تولوئن به عنوان VOC مدل و افت فشار انجام شد. در کل، بیوفیلتر قارچی ظرفیت حذف و مقادیر معدنی سازی بالاتری را نسبت به بیوفیلتر باکتریایی نشان داد. هر چند افت فشار در بیوفیلتر قارچی بالاتر از مقدار آن در بیوفیلتر باکتریایی بود.

بالاتر در بیوفیلترهای قارچی این نیاز را مبرم می دارد که مطالعاتی در رابطه با مقایسه صرفه اقتصادی و مصرف انرژی این دو فرایند انجام گیرد. محدودیت عمده این مطالعه، تعیین دقیق تعادل جرمی کربن بود که آنالیزهای فراتری از قبیل تجزیه لیکات (لجن) و بستر و نیز سنجش pH آن، نیاز داشت. هر چند اندازه گیری CO₂ در خروجی بیوفیلتر در اغلب موارد نسبت به اتمسفر بالاتر بود.

REFERENCES

- [1] Estrada JM, Lebrero R, Quijano G, Kraakman NJR and Munoz R. Strategies for odour control, in *Odour Impact Assessment Handbook*. John Wiley & Sons, New Jersey. 2013;85-124.
- [2] van Groenestijn JW, Kraakman NJR. Recent developments in biological waste gas purification in Europe. *Chem Eng J*. (2005);113(2-3):85-91.
- [3] Kennes C, Veiga MC. *Bioreactors for waste gas treatment*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 2001;47-98.
- [4] Kennes C, Rene ER, Veiga MC, Bioprocesses for air pollution control. *J Chem Technol Biotechnol*. 2009;84:1419-36.
- [5] Li L, Zhang J, Lin J, Liu J. Biological technologies for the removal of sulfur containing compounds from waste streams: bioreactors and microbial characteristics. *World J Microbiol Biotechnol*. 2015;31:1501-15.
- [6] Estrada JM, Kraakman NJ, Munoz R, Lebrero R. A comparative analysis of odour treatment technologies in wastewater treatment plants. *Environ Sci Technol*. 2011;45(3):1100-06.
- [7] Alfonsín C, Hernández J, Omil F, Prado OJ, Gabriel D, Feijoo J, et al. Environmental assessment of different biofilters for the treatment of gaseous streams. *J Environ Manage*. 2013;15(129):463-70.
- [8] Schiavon M, Ragazzi M, Rada ER, Torretta V. Air pollution control through biotrickling filters: a review considering operational aspects and expected performance. *Crit Rev Biotechnol*. 2016;36(6):1143-55.
- [9] Khammar N, Malhautier L, Degrange V, Lensi R, Godon JJ, Fanlo JL. Link between spatial structure of microbial communities and degradation of a complex mixture of volatile organic compounds in peat biofilters. *J Appl Microbiol*. 2005;98(2):476-90.
- [10] Ralebitso-Senior TK, Senior E, Di Felice R, Jarvis K. Waste gas biofiltration: advances and limitations of current approaches in microbiology. *Environ Sci Technol*. 2012;46(16):8542-73.
- [11] Estrada JM, Hernández S, Munoz R, Revah S. A comparative study of fungal and bacterial biofiltration treating a VOC mixture. *J Hazard Mater*. 2013;15 (250-251):190-7.
- [12] Lebrero R, Rodríguez E, Martín M, García-Encina PA, Munoz R. H₂S and VOCs abatement robustness in biofilters and air diffusion bioreactors: a comparative study. *Water Res*. 2010;44(13):3905-14.
- [13] van Groenestijn JW, van Heininge WN, Kraakman NJ. Biofilters based on the action of fungi. *Water Sci Technol*. 2001;44(9):227-32.
- [14] Arriaga S, Revah S. Improving hexane removal by enhancing fungal development in a microbial consortium biofilter. *Biotechnol Bioeng*. 2005;90(1):107-15.
- [15] Deviny JS, Deshusses MA, Webster TS. *Biofiltration for air pollution control*. Lewis Publ, New York. 1999;43,78.
- [16] Kim DJ, Kim H. Degradation of toluene vapor in a hydrophobic polyethylene hollow fiber membrane bioreactor with *Pseudomonas putida*. *Process Biochem*. 2005;40(6):2015-20.
- [17] Golbabaee F, Pouraghashahin HR, Pourmand MR, Karimi A, Rahimi Foroushani, A. (2013). Study on the efficiency of the two phase partitioning stirred tank bioreactor on the toluene filtration from the airstream by *Pseudomonas putida* via. *Journal of Health and Safety at Work*, 2(4): 31-40.
- [18] Roy S, Gendron J, Delhomnie MC, Bibeau L, Heitz M, Brzezinski R. *Pseudomonas putida* as the dominant toluene-degrading bacterial species during air decontamination by biofiltration. *Appl Microbiol Biotechnol*. 2003;61(4):366-73.
- [19] Braun-L lemman A, Majcherzyk A, Huttermann A. Biodegradation of styrene by white-rot fungi. *Appl Microbiol*

- Biotechnol. 1997;47(2):150-5.
- [20] Hort C, Platel V, Sochard S, Munoz LA, Ondarts M, Reguer A, et al. A hybrid biological process of indoor air treatment for toluene removal. *J Air Waste Manag Assoc.* 2014;64(12):1403-09.
- [21] Sarigiannis DA, Karakitsios SP, Gotti A, Liakos IL, Katsoyiannis A. Exposure to major volatile organic compounds and carbonyls in European indoor environments and associated health risk. *Environ Int.* 2011;37(4):743-65.
- [22] Geiss O, Giannopoulos G, Tirendi S, Barrero-Moreno J, Larsen BR, Kotzias D. The AIRMEX study—VOC measurements in public buildings and schools/kindergartens in eleven European cities: Statistical analysis of the data. *Atmos Environ.* 2011; 45(22):3676-84.
- [23] Moro AM, Brucker N, Charao M, Bulcao R, Freitas F, Baierle M, et al. Evaluation of genotoxicity and oxidative damage in painters exposed to low levels of toluene. *Mutat Res.* 2012;746(1):42-8.
- [24] Mohamed EF, Awad G, Andriantsiferana C, El-Diwany AI. Biofiltration technology for the removal of toluene from polluted air using *Streptomyces griseus*. *Environ Technol.* 2016;37(10):1197-207.
- [25] Wang L, Yang C, Cheng Y, Huang J, He H, Zeng G, et al. Effects of surfactant and Zn (II) at various concentrations on microbial activity and ethylbenzene removal in biotrickling filter. *Chemosphere.* 2013;93(11):2909-13.
- [26] Zhao L, Huang S, Wei Z. A demonstration of biofiltration for VOC removal in petrochemical industries. *Environ Sci Process Impacts.* 2014;16(5):1001-7.
- [27] Pérez MC, Álvarez-Hornos FJ, Portune K, Gabaldón C. Abatement of styrene waste gas emission by biofilter and biotrickling filter: comparison of packing materials and inoculation procedures. *Appl Microbiol Biotechnol.* 2015;99:19–32
- [28] Klapková E, Halecký M, Fitch M, Soccol CR, Paca J. Impact of Biocatalyst and Moisture Content on Toluene/Xylene Mixture Biofiltration. *Braz Arch Biol Technol.* 2006;49(2).
- [29] Novak V, Paca J, Halecky M, Soccol CR. Styrene Biofiltration in a Trickle-Bed Reactor. *Braz Arch Biol Technol.* 2008;51(2).
- [30] Rahul M, Mathur AK, Balomajumder C. Biological treatment and modeling aspect of BTEX abatement process in a biofilter. *Bioresour Tech.* 2013;142:9–17.
- [31] Amin MM, Rahimi A, Bina B, Heidari M, Mohammadi Moghadam F. Performance evaluation of a scoria-compost biofilter treating xylene vapors. *J Environ Health Sci Eng.* 2014;12(1):140.
- [32] Krailas S, Pham QT, Amal R, Jiang JK, Heitz M. Effect of inlet mass loading, water and total bacteria count on methanol elimination using upward flow and downward flow biofilters. *J Chem. Tech Biotechnol.* 2000;75:299-305.
- [33] Pedersen AR, Moller S, Molin S, Arvin E. Activity of toluene-degrading *Pseudomonas putida* in the early growth phase of a biofilm for waste gas treatment. *Biotechnol Bioeng.* 1997;54(2):131-41.
- [34] Fulazzaky MA, Talaiekhozani A, Ponraj M, Abd Majid MZ, Hadibarata T, Golid A. Biofiltration process as an ideal approach to remove pollutants from polluted air. *Desalin. Water Treat.* 2014;52(19-21):3600-15.
- [35] Chen KP, Chang HY, Chou MS. Biofiltration of odorless fume emitted from recycled nylon melting operations. *J Air Waste Manag Assoc.* 2013;63(11):1343-51.
- [36] Estrada JM, Quijano G, Lebrero R, Munoz R. Step-feed biofiltration: A low cost alternative configuration for off-gas treatment. *Water research.* 2013;47(13) 4312-21.
- [37] Padhi SK, Gokhale S. Biological oxidation of gaseous VOCs – rotating biological contactor a promising and eco-friendly technique. *J Environ Chem Eng.* 2014;2(4): 2085-02.
- [38] Dorado AD, Lafuente J, Gabriel D, Gamisans X. Interaction between sorption and biodegradation in a biofilter paciced with activated carbon. *Water Sci Technol.* 2012;66(8):1743-50.
- [39] van Groenestijn JW, Liu JX. Removal of alpha-pinene from gases using biofilters containing fungi. *Atmos Environ.* 2002;36(35):5501-08.
- [40] Woertz JR, van Heiningen WN, van Eekert MH, Kraakman NJ, Kinney KA, van Groenestijn JW. Dynamic bioreactor operation: effects of packing material and mite predation on toluene removal from off-gas, *Appl Microbiol Biotechnol.* 2002;58(5):690-94.
- [41] Dorado AD, Lafuente J, Gabriel D, Gamisans X. The role of water in the performance of biofilters: Parameterization of pressure drop and sorption capacities for common packing materials. *Journal of Hazardous Materials.* 2010;180(1-3):693-702.
- [42] Kawasea Y, Hirata A, Kojima T, Ohmori S, Akutagawa H, Uehara K, et al. Improvement of biodegradation in compact co-current biotricklingfilter by high recycle liquid flow rate: Performance and biodegradation kinetics of ammonia removal. *Process Biochem.* 2014;49(10): 1733-40.

A comparative study of bacterial and fungal bio filtration treating toluene vapors from air stream

Roohollah Ghasemi¹, Farideh Golbabaie^{1,*}, Mohammad Javad Jafari²,
Mohammad Reza Pourmand³, Sasan Rezaei⁴, Ramin Nabizadeh⁵, Ensieh Masoorian³

¹Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

²Department of Occupational Health Engineering, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

³Department of Pathobiology, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

⁴Department of Medical Mycology and Parasitology, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

⁵Department of Environmental Health Engineering, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

*Corresponding Author Email: fgolbabaie@tums.ac.ir

Received: 16.07.2018, accepted: 05.09.2018

ABSTRACT

Introduction: Air pollution is now recognized as an important environmental and health concern. Biological control processes, due to their durable, cost-effective and eco-friendly, have become a good alternative to physico-chemical methods. Biotechnology is based on the activity of microorganisms.

The aim of this study was to compare the capability of *Pseudomonas Putida* PTCC 1694 (bacteria) and *Pleurotus Stratus* IRAN 1781C (mushroom) in the removal of toluene from the air stream and its biodegradation under same operating conditions.

Material and Methods: To this purpose, a bio filter containing two parallel columns was designed and constructed on a laboratory scale and the experiments were carried out based on measuring the removal efficiency (RE), elimination capacity (EC) and pressure drop in these two columns. Thus, the bacteria were inoculated in one of the columns and in the other the fungus was inoculated.

Results: The bacterial testing lasted for 20 days and the fungal testing lasted for 16 days. The contaminant loading rates (LR) for bacterial and fungal bio filters were 11.65 ± 2.26 and 11.94 ± 2.56 g/m³.h, respectively. The results showed that the fungal bio filter was more capable of eliminating of toluene vapor than bacterial bio filter (9.65 ± 3.53 vs 9.18 ± 2.6 g/m³.h). However, the pressure drop in the bacterial bio filter was lower than the fungal bio filter (1 ± 0.28 vs 1.1 ± 0.32 cm water).

Conclusion: According to the results, fungal bio filtration appeared to be more successful than bacterial bio filtration in the removal of toluene.

Keywords: Toluene; Elimination Capacity; Removal Efficiency; Pressure Drop; *Pseudomonas putida*; *Pleurotus ostreatus*

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Ghasemi R, Golbabaie F, Jafari MJ, Pourmand MR, Rezaei S, Nabizadeh R, Masoorian E, (2019). A comparative study of bacterial and fungal bio filtration treating toluene vapors from air stream. *Journal of Health and Safety at Work*, 9(2): 95-104.

COPYRIGHTS

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the Journal of Health and Safety at Work. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution. License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

