

حذف بخار تولوئن از هوا در یک بیوفیلتر (زیست صافی) تلقیح شده با قارچ فنروکانت کرایسوسپوریوم در شرایط بارگذاری ناپیوسته

سید مرتضی ضمیر، روئین حلاج*، میلاد فردوسی، بهرام ناصرزاد

تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی شیمی

پیام نگار: Halladj@aut.ac.ir

زمان دریافت: ۱۳۸۸/۶/۲۱

زمان پذیرش: ۱۳۸۸/۱۲/۲۲

چکیده

زیست تصفیه یکی از روش‌های زیستی با صرفه اقتصادی بالا برای تصفیه هوا از آلاینده‌ها در غلظت‌های کم به شمار می‌رود. در این پژوهش، حذف بخار تولوئن از هوا در شرایط هوادهی ناپیوسته در یک زیست صافی با بستر کمپوست و سنگ لاوا مورد بررسی قرار گرفت. بستر با قارچ فنروکانت کرایسوسپوریوم^۱ تلقیح شد. کارایی سیستم در یک دوره شصت روزه، با ۱۰ ساعت هوادهی روزانه، در شدت جریان‌های حجمی (m^3h^{-1}) ۰/۰۹۶، ۰/۰۲۴ و ۰/۰۰۶ و هوا و غلظت‌های آلاینده (mgm^{-3}) ۱۷۳/۱ و ۵۲/۴ مورد ارزیابی قرار گرفت. بیشترین بازدهی حذف در روز سی و دوم به دست آمد که به ۹۲٪ رسید. بیشترین میزان تجزیه زیستی تولوئن در بخش ورودی بستر روی داد. سینتیک واکنش زیستی در زیست صافی با استفاده از معادله مونداد بررسی شد که ثابت‌های آن به مقادیر $Km=۳/۴۹۵ (gm^{-3})$ و $rm=۵۰ (gm^{-3}h^{-1})$ به دست آمد. نتایج نشان دادند که یک زیست صافی با بستر حامل قارچ توانایی حذف تولوئن را از هوا در شرایط دشوار زیستی مانند بارگذاری ناپیوسته دارد.

کلمات کلیدی: زیست صافی، تولوئن، کمپوست، بارگذاری ناپیوسته، فنروکانت کرایسوسپوریوم

۱- مقدمه

هوای بسیاری از صنایع در سراسر جهان حاوی انواع ترکیبات آلی فرار است. از این صنایع می‌توان به واحدهای پتروشیمیایی و پالایشگاهی، صنایع چوب و کاغذ، چاپ، چسب‌سازی و پوشش دهی اشاره کرد. در عین حال با توجه به قوانین سخت‌گیرانه زیست محیطی در سطوح ملی و بین‌المللی، لزوم به کارگیری روش‌های مؤثر و اقتصادی کنترل انتشار ترکیبات آلاینده در هوا بیش از پیش ضروری به نظر می‌رسد [۱].

پیش از این روش‌های فیزیکوشیمیایی حذف آلاینده‌ها مانند جذب شیمیایی، سوزاندن، جذب سطحی، شستشو با حلال و فرایندهای غشایی بسیار پرکاربرد بودند. اما در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های زیستی مانند زیست تصفیه به دلیل صرفه جویی در انرژی و هزینه‌های عملیاتی و نیز عدم ایجاد یک جریان آلاینده دیگر، مورد توجه قرار گرفته‌اند [۲]. در یک سیستم زیست تصفیه، جریان هوای آلوده از یک بستر حاوی میکروارگانیسم‌های مناسب برای تجزیه و اکسایش آلاینده‌ها عبور می‌کند. آلاینده از فاز گاز به داخل فاز زیست‌فیلم تثبیت شده روی بستر نفوذ می‌کند. مصرف

1. *Phanerochaete chrysosporium*

[۱۳ و ۶] در حالت بارگذاری پیوسته نتایج مطلوبی به همراه داشته است.

در این تحقیق، یک زیست صافی با بستر کمپوست و سنگ لاوای استریل شده با قارچ فنروکانت کرایسوسپوریوم که پیش از این توانایی خود را در تصفیه پساب‌ها نشان داده بود، تلقیح شد [۱۴]. در نهایت عملکرد این زیست صافی در حذف هگزان از هوا در شرایط هوادهی ناپیوسته به صورت ۱۰ ساعت در روز مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌های آزمایش

۲-۱ میکروارگانیزم

قارچ فنروکانت کرایسوسپوریوم ATCC ۲۴۷۲۵ تهیه شده از مجموعه میکروبی سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران در محیط ۲٪ YMG آگار (عصاره مخمر ۴ گرم، عصاره مالت ۱۰ گرم و گلوکز ۶ گرم در یک لیتر آب مقطر) و pH حدود ۶/۵-۶ و پیش از نگهداری در دمای ۴°C، در دمای ۲۷°C به مدت پنج روز در انکوباتور رشد داده شد و هر ماه یک بار تجدید کشت گردید. برای تهیه مایه تلقیح، تکه کوچکی از میکروب رشد کرده روی آگار به ۱۵۰ ml محیط مایع ۲٪ YMG منتقل شد. سپس در یک هم‌زن ۱۵۰ rpm به مدت ۴ روز کشت داده شد. آن گاه پلتهای تشکیل شده از محیط مایع جدا گردید و در یک هم‌زن به مدت ۳۰ ثانیه قرار گرفت تا یک سوسپانسیون قارچی همگن تشکیل شود.

۲-۲ دستگاه

نمای اجمالی سیستم زیست تصفیه مورد استفاده در این تحقیق در شکل (۱) نشان داده شده است. ستون زیست صافی از جنس پلکسی گلاس به قطر داخلی ۹/۹ cm، ارتفاع کلی ۷۵ cm و حجم مفید ۴ لیتر از سه بخش تشکیل شده است. پرکن استفاده شده به عنوان بستر در این سیستم زیست صافی مخلوطی از کمپوست تهیه شده از کارخانه کمپوست تهران و سنگ لاوا (با نسبت وزنی ۲ به ۱) بود. قطعه سنگهای لاوا شکل شبه کروی داشتند و دارای قطر متوسط ۲۵ mm بودند. ترکیب شیمیایی اولیه کمپوست پودری در

آلاینده‌ها در داخل زیست فیلم یک گرادبان غلظتی ایجاد می‌کند که نیروی محرکه جهت انتقال جرم به حساب می‌آید. ساز و کار مصرف آلاینده توسط میکروارگانیزم‌های مختلف، متفاوت است. اما در هر حال، این عمل به رشد توده زیستی در بستر منجر می‌شود.

در سال‌های اخیر، استفاده از قارچ‌ها برای تلقیح به بستر زیست صافی‌ها افزایش یافته است [۳]. اگر چه مزایای قارچ‌ها در تصفیه پساب‌های صنعتی از سال‌ها قبل شناخته شده بود، اما استفاده از آنها در حذف آلاینده‌های موجود در فاز گاز هنوز یک موضوع جدید محسوب می‌شود. اگر چه قارچ‌ها در مقایسه با باکتری‌ها کندتر رشد می‌کنند، اما نسبت به تغییرات شرایط محیطی بسیار مقاوم‌ترند و می‌توانند در pH‌های پایین و در رطوبت‌های بسیار کمتر نیز به فعالیت زیستی خود ادامه دهند [۴]. همچنین قارچ‌ها توانایی اکسایش طیف متنوعی از آلاینده‌ها را دارند. وجود هابفاها در قارچ‌ها نیز قابلیت جذب مواد آبریز را از هوا توسط توده زیستی افزایش می‌دهد که این خود به تسریع روند انتقال جرم می‌انجامد [۵]. یکی دیگر از ویژگی‌های قارچ‌ها، توانایی آن‌ها به سازگاری با شرایط عملیاتی است. در بسیاری صنایع، هوای آلوده در تمام طول شبانه روز تولید نمی‌شود. یا مقدار آن یا غلظت آلاینده در هوا ممکن است در ساعت‌های کاری مختلف، متفاوت باشد. همچنین بسیاری از واحدهای صنعتی، در ساعت‌های کاری مشخص در روز کار می‌کنند، مثلاً ۸ ساعت یا ۱۲ ساعت در روز، و در زمان باقی مانده تا شروع دوره کاری در روز بعد، اساساً هیچ هوایی در دسترس نیست [۶]. قارچ‌ها به دلیل ویژگی‌های برشمرده شده احتمالاً توانایی تحمل چنین شرایط زیستی دشواری را دارند. اگر چه مطالعاتی در زمینه عملکرد زیست صافی‌های قارچی در یک دوره طولانی در شرایط پایدار انجام شده است، اما اطلاعات اندکی در مورد کارایی آن‌ها در حالت بارگذاری به صورت ناپیوسته در دست است [۷].

تولون یکی از رایج‌ترین مواد آلاینده هوا در بسیاری از صنایع می‌باشد. این ماده به دلیل فشار بخار بالای خود به سرعت وارد فاز هوا می‌شود. تولون یک حلال مهم در صنعت و نیز یک ماده اولیه برای تولید برخی فراورده‌های شیمیایی دیگر به شمار می‌رود. از این رو محققان زیادی حذف بخار تولون را از هوا مورد بررسی قرار داده اند که اغلب در حالت بارگذاری پیوسته بررسی شده است [۸-۱۲]. حذف تولون هم توسط انواع باکتری‌ها [۱۰] و هم توسط قارچ‌ها

1. Yeast Extract
2. Malt Extract

جدول ۱- ترکیب شیمیایی اولیه کمپوست پودری (درصد وزنی)^۱

آب	۲۰٪
منبع نیتروژن	۰/۱۶٪
P ₂ O ₅	۰/۱۷٪
K ₂ O	۰/۳-۰/۹٪
MgO	۰/۳-۰/۹٪
مواد آلی	۲۵٪
اسیدیته (pH)	۶/۸

۱- طبق اطلاعات کارخانه کمپوست تهران

۲-۳ روش آنالیز

نمونه‌های گاز از شیرهای تعبیه شده در هر بخش از ستون و توسط سرنگ مخصوص گازی ۲/۵ میلی لیتری (ساخت هامیلتون) گرفته شدند. جهت تسهیل کار، شیر ورودی به ستون A و شیرهای بخش پایینی، میانی و بالایی ستون به ترتیب B، C و D نام گذاری شدند (شکل ۱). غلظت تولوئن توسط یک دستگاه کروماتوگرافی گازی یانگلین^۱ سری ۶۰۰۰ مجهز به یک تشخیص دهنده FID اندازه‌گیری شد. دماهای تزریق کننده، آون و تشخیص دهنده، به ترتیب ۱۵۰، ۱۲۰ و ۲۵۰ درجه سلسیوس بودند. افت فشار بستر نیز توسط یک مانومتر آبی با دقت ۱ mmH₂O در طول زمان آزمایش اندازه‌گیری شد.

۲-۴ عملکرد زیست صافی در شرایط عملیاتی مختلف

کارایی یک زیست صافی بر اساس دو مفهوم کلیدی بازدهی حذف و ظرفیت حذف تعیین می‌شود. این دو مفهوم به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$RE = \frac{C_{Gi} - C_{Go}}{C_{Gi}} \times 100 \quad (1)$$

$$EC = \frac{(C_{Gi} - C_{Go}) \times Q}{V_f} \quad (2)$$

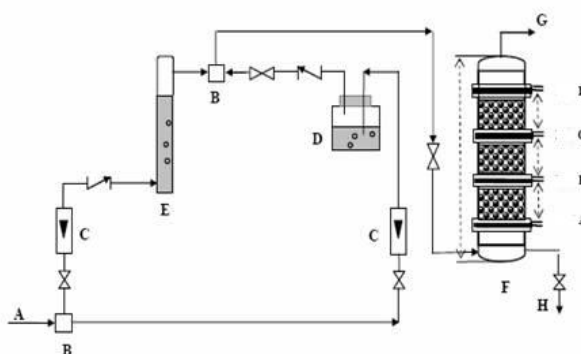
در اینجا، C_{Gi} ، C_{Go} ، Q و V_f به ترتیب غلظت‌های ورودی و خروجی آلاینده (gm^{-3})، شدت جریان حجمی هوای ورودی (m^3h^{-1}) و حجم بستر (m^3) هستند.

1. Younglin

جدول (۱) آورده شده است. این پرکن در یک آون در $150^\circ C$ به مدت ۱ ساعت استریل شد.

تخلخل بستر به روش دلهومنی و همکاران اندازه‌گیری شد [۷]. بدین ترتیب که ۰/۲ لیتر از پرکن برداشته شد و در داخل یک استوانه مدرج ریخته شد و سپس به آرامی تا جایی به این ظرف آب اضافه شد که پرکن با لایه نازکی از آب پوشانده شود و دیگر آب در آن نفوذ نکند. در این صورت میزان حجم آب افزوده شده برابر با حجم فضای خالی بستر بود و تخلخل بستر برابر ۰/۴۵ به دست آمد.

شدت جریان ورودی هوا توسط دو روتامتر تنظیم شد و هوای فشرده تولید شده توسط کمپرسور به عنوان جریان هوای ورودی پس از عبور از این روتامترها به دو جریان تقسیم گشت. قسمتی از جریان از یک ستون رطوبت زن عبور کرد تا میزان رطوبت لازم جهت رشد جمعیت میکروبی تأمین شود و قسمت دیگر جریان از داخل مخزن محتوی تولوئن عبور کرد. این دو جریان پس از پیوستن به یکدیگر، جریان هوای آلوده را به عنوان خوراک ورودی ستون زیست صافی تأمین نموده و از پایین ستون وارد آن شد. هر بخش از ستون مجهز به یک خروجی جداگانه بود که امکان نمونه‌گیری از سه نقطه مختلف در طول بستر را فراهم می‌کرد. آزمایش‌ها در دمای محیط در حدود ۲۲-۲۵ درجه سلسیوس انجام شدند.



شکل ۱- سیستم زیست صافی ساخته شده برای آزمایش‌های زیست تصفیه. A: هوای ورودی از کمپرسور، B: سه راهه، C: روتامترهای هوا، D: مخزن آلاینده، E: ستون رطوبت زن، F: ستون زیست صافی، G: خروجی هوا، H: محل تخلیه مایعات اضافی.

همچنین مدت اقامت واقعی نیز به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\tau = \frac{V_f \varepsilon}{Q} \quad (3)$$

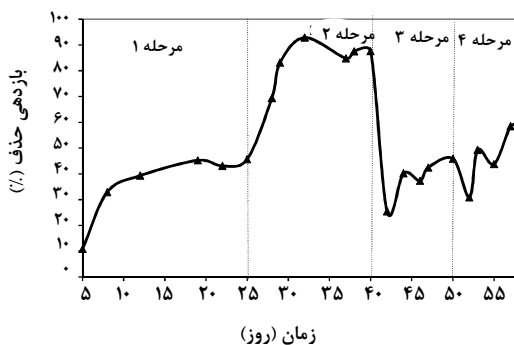
در رابطه (۳)، ε تخلخل بستر است. جدول (۲) شرایط عملیاتی اعمال شده بر سیستم زیست تصفیه را در یک دوره شصت روزه کاری، در چهار فاز مختلف نشان می‌دهد. شدت جریان حجمی هوای ورودی و غلظت تولوئن در هوا مطابق شرایط ذکر شده در جدول تغییر داده شد. در تمام چهار فاز عملیاتی، هوادهی و بارگذاری آلاینده به مدت روزانه ۱۰ ساعت انجام شد.

جدول ۲- شرایط عملیاتی زیست صافی در دوره آزمایش‌ها

مرحله آزمایش	زمان (روز)	شدت جریان هوا ($m^3 h^{-1}$)	غلظت تولوئن ورودی (mgm^{-3})	مدت اقامت واقعی (دقیقه)
۱	۰-۲۵	۰/۰۹۶	۱۷۳/۱	۱/۱
۲	۲۶-۴۰	۰/۰۲۴	۱۷۳/۱	۴/۴
۳	۴۱-۵۰	۰/۰۶	۱۷۳/۱	۱/۷
۴	۵۱-۶۰	۰/۰۶	۵۲/۴	۱/۷

۹۲٪ رسید. رامیرز و همکاران [۱۱] حذف صددرصدی تولوئن را در زیست‌صافی گزارش کرده‌اند که دلیل آن را می‌توان در بهره‌گیری از چند گونه قارچ مختلف به صورت همزمان دانست. همچنین حذف ۸۰-۴۰ درصدی تولوئن در یک زیست‌صافی تلقیح شده با قارچ در حالت بارگذاری ناپیوسته گزارش شده که نشان می‌دهد میزان حذف تولوئن از استون و متیل اتیل کتون کمتر و در حد اتیل بنزن و پارازیلین است [۱۳]. زمانی که در مرحله سوم آزمایش‌ها، شدت جریان هوای ورودی دوباره تا $0.06 (m^3 h^{-1})$ افزایش یافت، بازدهی حذف نسبت به مرحله دوم کاهش یافت و در حالت پایدار به حدود ۶۰٪ رسید.

به منظور بررسی اثر تغییر غلظت آلاینده در هوای ورودی بر بازدهی، در آغاز مرحله چهارم آزمایش‌ها، غلظت ورودی تولوئن در همان شدت جریان $0.06 (m^3 h^{-1})$ تا مقدار متوسط $52 (mgm^{-3})$ کاهش داده شد. از مقایسه مراحل ۳ و ۴ در شکل (۲) به خوبی مشخص است که در غلظت کمتر، رسیدن به حالت پایدار فقط ۴ روز طول می‌کشد و بازدهی نیز اندکی افزایش نشان می‌دهد. در حقیقت میکروارگانیسم‌هایی که با غلظت بالاتر، حدود $173 (mgm^{-3})$ سازگار شده بودند، در این حالت غلظت پایین‌تری از تولوئن را سریع‌تر مصرف می‌کنند.



شکل ۲- تغییرات بازدهی حذف در طول زمان

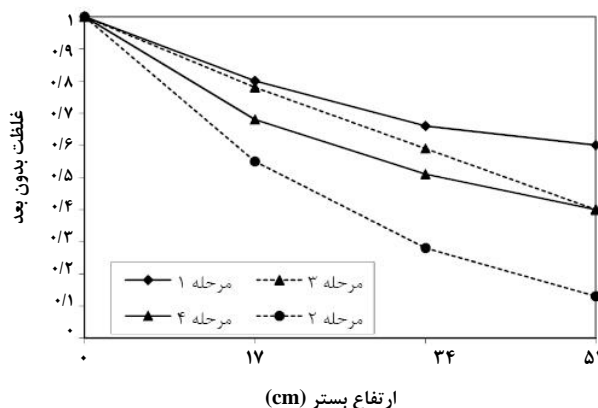
تغییرات ظرفیت حذف زیست صافی در طول زمان آزمایش در شکل (۳) دیده می‌شود. مقایسه شکل‌های (۲) و (۳) به خوبی مستقل بودن این دو مفهوم کلیدی را نشان می‌دهد. به طور مشخص، در محدوده ۲۶ تا ۴۰ روز، بازده در حداکثر مقدار خود قرار دارد، در حالی که در همین مدت، ظرفیت حذف به دلیل پایین بودن شدت

۳- نتایج و بحث

۳-۱ عملکرد زیست صافی

مانند هر راکتور دیگر، یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر کارایی زیست صافی‌ها، مدت اقامت سیال در آنهاست. شکل (۲) تغییرات غلظت خروجی تولوئن در هوا و بازدهی حذف را در طول مدت آزمایش و برای مدت‌های اقامت متفاوت نشان می‌دهد. در سه بخش نخست آزمایش‌ها مطابق جدول (۲)، غلظت متوسط آلاینده در ورودی $173/1 (mgm^{-3})$ نگاه داشته شد. در حالی که شدت جریان حجمی گاز ورودی به ترتیب $0.096 (m^3 h^{-1})$ ، 0.024 و 0.06 بودند. از آن جا که مدت تماس دو فاز گاز-جامد در شروع آزمایش کم بود، ۲۵ روز طول کشید تا سیستم به حالت پایدار برسد و غلظت خروجی تولوئن تغییر چندانی نداشته باشد. همچنین با افزایش مدت اقامت گاز در زیست صافی در مرحله دوم، بازدهی حذف به مقدار قابل ملاحظه‌ای بهبود یافت، به طوری که در روز سی و دوم به

تولوئن نسبت به غلظت ورودی را بر حسب ارتفاع ستون نشان می‌دهد. شیب منحنی‌ها در شکل (۴) نشان می‌دهد که تقریباً ۵۰٪ از کل حذف تولوئن در بخش ورودی راکتور روی می‌دهد و ۵۰٪ باقی مانده نیز در بخش‌های میانی و انتهایی اتفاق می‌افتد. در حقیقت از آن جا که غلظت تولوئن به عنوان یک منبع انرژی در ورودی بیشتر است، میکروارگانیسم‌ها نیز در این بخش بیشتر رشد می‌کنند و مقدار بیشتری از آلاینده را تجزیه می‌کنند. همچنین زمانی که شدت جریان هوای ورودی به ۰/۰۲۴ و ۰/۰۶ (m^3h^{-1}) کاهش یافت، نسبت حذف در یک سوم ابتدایی بستر نیز افزایش یافت که آن را می‌توان به افزایش مدت اقامت گاز مربوط دانست که باعث می‌شود سلول‌های قارچی فرصت بیشتری برای جذب و به درون کشیدن آلاینده داشته باشند. در مرحله چهارم آزمایش نیز که غلظت تا $52 (mgm^{-3})$ کاهش یافت، همین روند مشاهده شد.

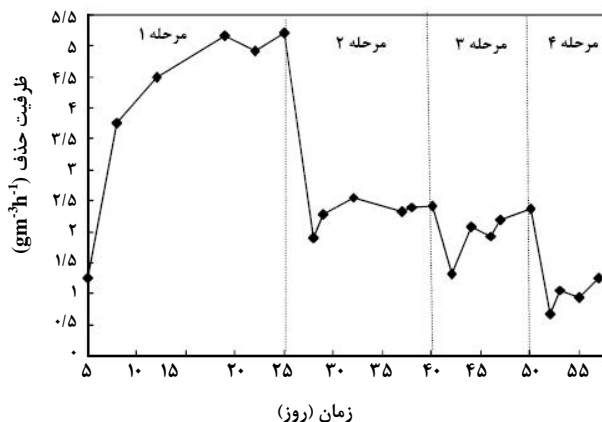


شکل ۴- نیمرخ غلظت آلاینده در طول زیست صافی

۳-۳ بررسی سینتیک حذف تولوئن

سینتیک یک واکنش تجزیه زیست‌شناختی می‌تواند به صورت میکرو یا ماکرو مورد بررسی قرار گیرد. در حالت میکرو باید میکروارگانیسم را پس از جداسازی از بستر به یک محیط کشت مایع لرزان حاوی غلظت مشخصی از آلاینده منتقل کرد. اما نتایج به دست آمده از این حالت به سینتیک واقعی که در آن آلاینده در فاز گاز قرار دارد، قابل تعمیم نیست [۷]. به همین دلیل در این تحقیق از روش ماکرو برای تعیین ثابت‌های سینتیکی معادله موناد استفاده شد. استفاده از این معادله در شرایطی که محدودیتی از نظر انتقال اکسیژن به توده زیستی وجود ندارد و انتقال جرم محدودکننده

جریان هوای ورودی، $0.24 (m^3h^{-1})$ ، بسیار کم است و در حالت بیشینه در این محدوده زمانی به $1000 (mgm^{-3}h^{-1})$ می‌رسد. این در حالی است که حداکثر ظرفیت حذف سیستم در روز ۲۵ حاصل شد که برابر با $1820 (mgm^{-3}h^{-1})$ بود.



شکل ۳- تغییرات ظرفیت حذف در طول زمان

در هر دو شکل (۲) و (۳) و در تمام مراحل آزمایش، پس از رسیدن به یک مقدار بیشینه اندکی کاهش در بازدهی حذف دیده می‌شود. هوادهی ناپیوسته به مدت فقط ۱۰ ساعت در روز یکی از دلایل عمده مشاهده این روند است. همچنین این احتمال وجود دارد که برخی منافذ عبور گاز با چگالی میکروبی بالا بسته شده باشند و گاز مجبور شود تا مسیر خود را از میان منافذ با جمعیت میکروبی کمتر ادامه دهد. این رخداد به کاهش بازدهی می‌انجامد. یک مدل بر مبنای شبکه ای از حفرات نیز این توجیه را تأیید می‌کند (نتایج در اینجا موجود نیست). به عنوان مثال، در مرحله دوم، هر چند بالاترین بازدهی به دست آمده ۹۲٪ می‌باشد، اما حالت پایدار با اندکی کاهش در ۸۷٪ حاصل شده است.

حداکثر افت فشار اندازه گیری شده در زمان آزمایش‌ها $14 mmH_2O$ بوده که عملکرد مناسب بستر را از نظر عدم بروز پدیده گرفتگی^۱ نشان می‌دهد.

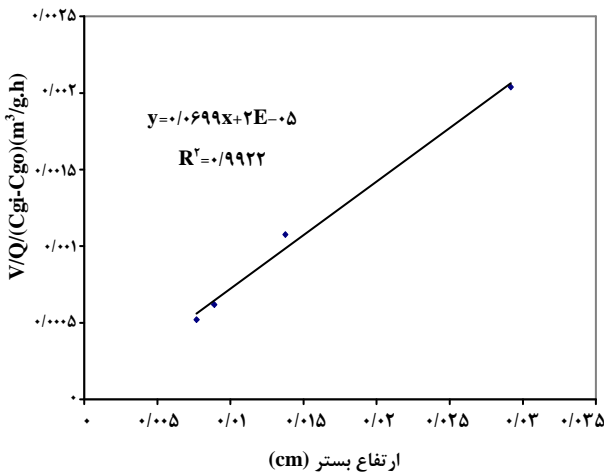
۲-۳ نیمرخ غلظت آلاینده در طول راکتور

نمونه‌گیری از سه محل در طول ستون زیست‌صافی این امکان را به دست می‌دهد که بتوان تغییرات غلظت تولوئن را در طول راکتور مورد بررسی قرار داد. شکل (۴) تغییرات غلظت بدون بعد شده

1. Clogging

$$\frac{V/Q}{C_{g_i} - C_{g_o}} = \frac{K_m}{r_{\max}} \frac{1}{C_{L_n}} + \frac{1}{r_{\max}} \quad (۸)$$

در رابطه (۸) C_{L_n} متوسط لگاریتمی غلظت‌های ورودی و خروجی تولوئن در هوا، V حجم بستر (m^3) و Q شدت جریان هوای عبوری تولوئن در بستر ($m^3 h^{-1}$) از راکتور می‌باشند. K_m و r_{\max} از رسم کردن نمودار $(V/Q)/(C_{g_i} - C_{g_o})$ در مقابل $(1/C_{L_n})$ به دست آمدند که با توجه به شکل (۵)، به ترتیب، برابر ($gm^{-3} h^{-1}$) 50 و (gm^{-3}) $3/495$ بودند.



شکل ۵- رسم منحنی تابع (۸) به منظور به دست آوردن ثابت‌های سینتیکی زیست تجزیه تولوئن

۴- نتیجه‌گیری

حذف تولوئن به عنوان یک ترکیب آروماتیک از هوا در یک زیست صافی مورد بررسی قرار گرفت. بستر طبیعی مورد استفاده مخلوطی از کمپوست و سنگ لاوا بود که با قارچ فنوکائت کرایسوسپوریوم تلقیح شد. برای بررسی عملکرد زیست‌صافی در شرایط کارکرد ناپیوسته هوا دهی به آن به مدت ده ساعت در روز صورت گرفت. بیشترین بازدهی حذف در شدت جریان هوای ورودی ($0.06 m^3 h^{-1}$) و غلظت آلاینده ($173/1 mgm^{-3}$) به دست آمد که حدود ۹۲٪ بود. همچنین در شدت جریان ثابت ($1 min^{-1}$)، زمانی که غلظت کمتر بود ($52/4 mgm^{-3}$)، بازدهی حذف، بیشتر شد و در حد ۶۰٪ ثابت باقی ماند. حداکثر ظرفیت حذف سیستم در روز بیست و پنجم و زمانی که شدت جریان ($0.24 m^3 h^{-1}$) و غلظت تولوئن ($173/1 mgm^{-3}$) بود به دست آمد که برابر با ($5/2 gm^{-3} h^{-1}$) شد.

نیست، کاملاً مناسب می‌باشد [۱۵ و ۱۱]. مطالعه پیشین نشان می‌دهد که در شرایط بارگذاری ناپیوسته و در دماهای متوسط، پس از گذشت مدت مشخصی، جمعیت میکروبی بستر کاملاً فعال می‌شوند که نشان می‌دهد محدودیتی در انتقال اکسیژن و آلاینده به لایه زیستی وجود ندارد [۱۶]. در شرایط پایدار، میزان رشد و مرگ سلولی با هم برابر است. همچنین با فرض برقراری جریان هوا به صورت پلاگ در ستون، می‌توان نوشت:

$$\frac{\partial C_g}{\partial t} = -U_g \frac{\partial C_g}{\partial h} + r \quad (۴)$$

در رابطه (۴)، C_g غلظت تولوئن (gm^{-3})، U_g سرعت ظاهری گاز در طول ستون (mh^{-1})، t فاصله زمانی (h) و h فاصله تا ورودی (m) می‌باشند. r نیز سرعت کلی واکنش است که بر مبنای معادله مونداد به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$r = \frac{r_{\max} C_g}{K_m + C_g} \quad (۵)$$

که در این رابطه r_{\max} بیشینه سرعت واکنش تجزیه زیستی در واحد حجم زیست‌صافی ($gm^{-3} h^{-1}$) و K_m ثابت اشباع در فاز گاز (gm^{-3}) می‌باشند. از آن جایی که پس از فعال شدن سیستم زیستی در زیست‌صافی در صورت عدم تغییر غلظت آلاینده ورودی، غلظت در خروجی نیز تغییر نکرد، می‌توان شرایط را در داخل آن پایدار فرض کرد. در شرایط پایدار، تجمع غلظتی در داخل بستر وجود ندارد و عبارت $(\partial C_g / \partial t)$ برابر صفر می‌باشد. شرایط مرزی لازم برای حل معادله (۴) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$C_g = C_{g_i} \text{ at } h=0 \quad (۶)$$

$$C_g = C_{g_o} \text{ at } h=L \quad (۷)$$

C_{g_o} و C_{g_i} غلظت‌های ورودی و خروجی تولوئن و L ارتفاع زیست‌صافی (m) است. از حل معادله (۴) و (۵) به کمک شرایط مرزی و خطی کردن آن، معادله (۸) حاصل می‌شود.

- [9] Y. Liu, X. Quan, Y. Zhao, Sh. Chen, H. Zhao, "Removal of ternary VOCs in air streams at high loads using a compost-based biofilter", *Biochemical Engineering Journal*, 23, 85–95, (2005).
- [10] H. Shim, S.T. Yang, "Biodegradation of benzene, toluene, ethylbenzene, and o-xylene by a co-culture of *Pseudomonas putida* and *Pseudomonas fluorescens* immobilized in a fibrous-bed bioreactor", *Journal of Biotechnology*, 67, 99–112, (1999).
- [11] A. Ramirez, S. Benard, A. Giroir-Fendler, J. Jones, M. Heitz, "Kinetics of microbial growth and biodegradation of methanol and toluene in biofilters and an analysis of the energetic indicators", *Journal of Biotechnology*, 138, 88–95, (2008).
- [12] D. Oh, J. Song, S.J. Hwang, J.Y. Kim, "Effects of adsorptive properties of biofilter packing materials on toluene removal", *Journal of Hazardous Materials*, 170, 144–150, (2009).
- [13] B. Qi, W. M. Moe, "Performance of low pH biofilters treating a paint solvent mixture: Continuous and intermittent loading", *Journal of Hazardous Materials*, 135, 303–310, (2006).
- [14] M. Ahmadi, F. Vahabzadeh, B. Bonakdarpour, M. Mehranian, "Empirical modeling of olive oil mill wastewater treatment using loofa-immobilized *Phanerochaete chrysosporium*", *Process Biochemistry*, 41, 1148–1154, (2006).
- [15] A.K. Mathur, J. Sundaramurthy, C. Balomajumder, "Kinetics of the removal of mono-chlorobenzene vapour from waste gases using a trickle bed air biofilter", *Journal of Hazardous Materials*, 137, 1560–1568, (2006).
- [16] S.M. Zamir, R. Halladj, M. Ferdowsi, B. Nasernejad, "Influence of transient loading on the removal of high concentrations of VOCs in a biological air filter", The 6th International Chemical Engineering Congress, Kish Island, Iran, (2009).

بیشترین میزان تصفیه در مرحله سوم ستون رخ داد. چرا که در این مرحله، تولوئن پس از حذف در مراحل اول و دوم با غلظت کمتری وارد مرحله نهایی شد و اثر بازدارندگی غلظتی آن کمتر بود. با فرض برقراری جریان پلاگ در زیست راکتور و کاربرد معادله موند، سینتیک واکنش حذف تولوئن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که سینتیک با معادله به کار رفته، تطابق خوبی دارد. در این حالت، $K_m = 3/495 (\text{gm}^{-3})$ و $r_m = 50 (\text{gm}^{-3}\text{h}^{-1})$ شد.

مراجع

- [1] J.S. Devinny, MA Deshusses, T.S. Webster, "Biofiltration for air pollution control" Lewis Publishers, Florida, USA, (1999).
- [2] C. Kennes, F. Thalasso, "Waste Gas Biotreatment Technology", *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 72, 303–319, (1998).
- [3] C. Kennes, M.C. Veiga, "Fungal biocatalysts in the biofiltration of VOC-polluted air", *Journal of Biotechnology*, 113, 305–319, (2004).
- [4] J. Yaomin, M.C. Veiga, C. Kennes, "Performance optimization of the fungal biodegradation of Alpha-pinene in gas-phase biofilter", *Process Biochemistry*, 41, 1722–1728, (2006).
- [5] J. Kim, "Assessment of ethylene removal with *Pseudomonas* strains", *Journal of Hazardous Materials*, 131, 131–136, (2006).
- [6] W.M. Moe, B. Qi, "Performance of a fungal biofilter treating gas-phase solvent mixtures during intermittent loading", *Water Research*, 38, 2259–2268, (2004).
- [7] M.C. Delhoménie, L. Bibeau, J. Gendron, R. Brzezinski, M. Heitz, "A study of clogging in a biofilter treating toluene vapors", *Chemical Engineering Journal*, 94, 211–222, (2003).
- [8] E.R. Rene, D.V.S. Murthy, T. Swaminathan, "Performance evaluation of a compost biofilter treating toluene vapours", *Process Biochemistry*, 40, 2771–2779, (2005).