

Determine the Dominant Microorganisms in the Aerobic Bioxidation of a Volatile Organic Material in Gas Media

Rezaei M¹, Fazlzadeh Davil M¹, Hajizadeh Y^{2*}

1. Department of Environmental Health Engineering, Ardabil University of Medical Sciences, Daneshgah St., Ardabil, Iran.

2. Department of Environmental Health Engineering, Isfahan University of Medical Sciences, Hezar Jerib St., Isfahan, Iran.

* *Corresponding author.* Tel: +989144166080 Fax: +983136695849 E-mail: yaghoub.hajizadeh@yahoo.com

Received: Jun 29, 2014

Accepted: May 5, 2015

ABSTRACT

Background & objectives: Formaldehyde is one of the volatile organic compounds and classified as probably carcinogenic. The aim of this study was to determine the dominant microorganism in biodegradation of formaldehyde from the air.

Methods: This study was an experimental study that an aerobic biofilter reactor made of steel with mixture of compost and wood chips (50/50 percent in terms of volume volume) in the first step of operation and pumice stone and compost mixture (80% pumice and 20% compost in terms of volume) in the second step were used as beds for microbial growth. First and second step experiments started with concentrations of 20 ± 2 and 24 ± 3 mg/m³, respectively, and completed with concentrations of 276 ± 4 and 224 ± 5 mg/m³, respectively. Sampling and measurement was done using the 3500 method National Institute for Occupational Safety and Health.

Results: The maximum of formaldehyde removal efficiency in both the first and second in empty bed residence time of 180 seconds was achieved at about 91% in the operation first stage and 88% the operation second stage. Also, after some tests done to determine the dominant microbial population it was found that the *Citrobacter freundii* was the dominant microorganism to formaldehyde biodegradation in the study.

Conclusion: The results showed that by increasing the inlet concentration of formaldehyde and reducing the EBRT, the formaldehyde removal capacity of the system decreases. Conclusion: The present study introduced this process as an effective method for removing formaldehyde from the air stream. As well as the results, significant differences in terms of the removal efficiency with different substrate materials in two operation steps do not showed. However that the sustainability of the system capacity to remove formaldehyde in the operation first stage was observed more than the second stage.

Keywords: Biofiltration; Formaldehyde; Bioxidation; Volatile Organic Compound.

تعیین میکروارگانیزم غالب در فرایند بیواکسیداسیون هوای نمونه‌ای از ماده آلی فرار در محیط گازی

محسن رضایی^۱، مهدی فضل زاده^۱، یعقوب حاجی زاده^{۲*}

۱. مربی، عضو هیأت علمی گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی اردبیل
 ۲. استادیار، عضو هیأت علمی گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان
 * نویسنده مسئول. تلفن: ۰۹۱۴۴۱۶۶۰۸۰ فکس: ۰۳۱۳۶۶۹۵۸۴۹ ایمیل: yaghoub.hajizadeh@yahoo.com

چکیده

زمینه و هدف: فرمالدئید جزء ترکیبات آلی فرار و یکی از ترکیبات احتمالاً سرطانزا طبقه بندی می‌شود. هدف از این مطالعه تعیین میکروارگانیزم غالب در تجزیه بیولوژیکی فرمالدئید از هوا بود.

روش کار: این تحقیق یک مطالعه تجربی-آزمایشگاهی بود که از یک رآکتور بیوفیلتر هوای از جنس استیل با بسترهای مخلوط کمپوست و خرده چوب (۵۰/۵۰ حجمی) در مرحله اول آزمایش و مخلوط سنگ پامیس و کمپوست (۸۰٪ حجمی پامیس و ۲۰٪ حجمی کمپوست) در مرحله دوم آزمایش‌ها استفاده گردید. مرحله اول و دوم آزمایش بترتیب با غلظت‌های اولیه فرمالدئید 2 ± 20 و 3 ± 24 mg/m^3 شروع و با غلظت نهایی 4 ± 276 و 5 ± 224 mg/m^3 به انجام رسید. نمونه برداری و سنجش با استفاده از روش ۳۵۰۰ سازمان ملی ایمنی و سلامت کار انجام گردید.

یافته‌ها: حداکثر راندمان حذف در مرحله اول آزمایش ۹۱ درصد با غلظت اولیه ورودی و زمان ماند بستر خالی ۱۸۰ ثانیه و حداکثر راندمان حذف در مرحله دوم ۸۸ درصد با غلظت اولیه ورودی و زمان ماند بستر خالی ۱۸۰ ثانیه حاصل شد. همچنین پس از آزمایشات انجام شده بمنظور تعیین جمعیت میکروبی غالب مشخص گردید که باکتری سیتروباکتر فروندی میکروارگانیزم غالب در تجزیه فرمالدئید می‌باشد.

نتیجه گیری: بررسی نتایج حاصله نشان داد که با افزایش در غلظت ورودی فرمالدئید و کاهش در EBRT راندمان و ظرفیت حذف فرمالدئید کاهش می‌یابد. مطالعه حاضر این فرایند را بعنوان روشی مؤثر در حذف فرمالدئید از جریان هوا معرفی می‌کند. همچنین نتایج، اختلاف معنی‌دار از لحاظ راندمان سیستم با مواد بستر مختلف در دو مرحله را نشان نمی‌دهد، علیرغم اینکه پایداری سیستم از لحاظ ظرفیت حذف فرمالدئید در مرحله اول بیشتر از مرحله دوم مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: بیوفیلتراسیون، فرمالدئید، بیواکسیداسیون، ترکیبات آلی فرار در محیط گازی

دریافت: ۹۳/۴/۸ پذیرش: ۹۴/۲/۱۵

مقدمه

انتشار ترکیبات سمی در چند دهه گذشته به داخل محیط زیست گسترش چشمگیری داشته است که عمدتاً به علت توسعه صنعت و افزایش استفاده از سوخت‌های آلی می‌باشد (۱). ترکیبات آلی فرار (VOC_s) گروهی از این آلاینده‌های سمی هستند که هم از طریق انسانی و هم طبیعی تولید شده، وارد محیط زیست می‌گردند (۳-۱). این مواد به آرامی

در محیط تجزیه شده و تمایل به تجمع دارند، بنابراین آسیب‌های جدی محیطی و انسانی ایجاد می‌کنند (۴). در دهه‌های گذشته صنایع مقدار زیادی از این آلاینده‌ها را وارد محیط کرده‌اند (۵) که در این میان فرمالدئید (HCHO) به علت اثرات منفی زیاد روی سلامتی انسان و سطح انتشار بالا در هوای اتمسفری جزء ترکیبات آلی فرار (VOC_s) مهم خروجی از صنایع محسوب می‌گردد (۱). میزان تولید

بیوفیلتراسیون است. روش‌های متعارف اغلب گران و مستلزم انتقال آلاینده از فاز گازی به فازهای دیگر (جامد یا مایع) می‌باشند. همچنین این روش‌ها خود با تولید آلاینده‌های ثانویه خطرناک و سمی همراه هستند (۱۵، ۱۰، ۳، ۱). در مقابل، روش‌های بیولوژیکی با هزینه مناسب و عدم تولید آلودگی‌های ثانویه در مقایسه با روش‌های سنتی، کاربرد وسیعتری پیدا کرده‌اند (۱۶، ۱۳، ۱۱، ۴، ۱). از مزایای دیگر روش بیوفیلتراسیون، حذف مقادیر کم و بالای VOCs (تا ۱۰۰۰ ppm)، هزینه نصب و راه‌اندازی پایین را می‌توان نام برد (۹). استفاده از فن‌آوری‌های بیولوژیکی به علت طبیعی بودن فرایند قابل اعتمادترین روش بمنظور حذف آلاینده‌های زیست‌محیطی است (۱۶). فن‌آوری‌های زیستی بر اساس توانایی برخی از گونه‌های میکروبی در استفاده از ترکیبات آلی فرار به عنوان منبع انرژی (مرحله تنفس سلولی) و منبع کربن (مرحله رشد سلولی) توسعه پیدا کرده‌اند (۱۸، ۱۷، ۹، ۴، ۱). در این سیستم‌ها عوامل زنده میکروبی که اغلب باکتری‌ها و قارچ‌ها هستند، بر روی بستر متخلخلی رشد داده شده و هوای محتوی آلاینده از بین بستر عبور داده می‌شود، سپس میکروارگانیسم‌هایی (۱۶) که به صورت معلق در بیوفیلتر (مانند لجن فعال) یا به صورت چسبیده به بستر هستند (۱۹) ترکیبات آلاینده‌ها را به ترکیبات ساده‌تر می‌شکنند و در اثر این فرآیند متان (اگر باکتری‌ها و محیط بی‌هوازی باشد)، دی‌اکسید کربن (۱۶) و آب (۴) به عنوان محصولات اصلی نهایی تولید می‌شود (۱۶). میکروارگانیسم‌هایی که توانایی تجزیه فرمالدئید را دارند شامل: سودوموناس پوتیدا، تریکوسپورن پنسیلاتوم، سودوموناس سپاسیا، سودوموناس آلکالیژنز، متیلوباکتریوم اکستروژنوس، هالوموناس (۱۳)، سودوموناس سودوآلکالیژنز (۲۰، ۱۳)، سودوموناس استرینس، متیلوکوکوس، ویبریو و مخمر متیلوتروفیک می‌باشند (۱۸، ۱۷). از پارامترهای

سالیانه آن در جهان ۲۱ میلیون تن است (۶). سازمان‌های بهداشتی حد مجاز مواجهه با فرمالدئید را ۱ ppm /۰ تعیین کرده‌اند (۷). بر اساس استاندارد اداره ایمنی و بهداشت کار (OSHA) مقدار مجاز مواجهه با فرمالدئید در هوای داخل ۰/۷۵ ppm و در هوای بیرون ۰/۵ ppm می‌باشد (۸). قرار گرفتن در معرض غلظت بالایی از آن باعث تهوع، استفراغ، اسهال، درد شکمی (۳، ۱۱-۹)، گاستروآنتریت، بی‌نظمی در خواب، آسیب به عصب بینایی (۱۰)، تحریکات چشمی (۱۲) شده و تماس طولانی مدت با آن احتمال بروز سرطان را در پی خواهد داشت (۹-۱۲). مواجهه با غلظت بالایی از آن باعث مرگ نیز می‌شود (۱۰). این گاز یکی از ترکیبات شیمیایی است که به طور معمول در فرآیندهای شیمیایی کاربرد دارد (۱۰) و اغلب از فعالیت‌هایی نظیر سوزاندن (۱)، تولید کاغذ (۱۳)، ساخت رزین‌های مصنوعی (۱۳، ۱)، تولید نئوپان، گازهای خروج از رآکتورهای تولید فرمالدئید (۱۰)، صنایع شیمیایی و تا حدودی در فرآیندهای تجزیه یا اکسیداسیون فتوشیمیایی هیدروکربن‌ها، ترکیبات متیله و ترکیبات آلی دیگر و واکنش ثانویه هیدروکربن‌ها با ازن (O_3) در هوا تشکیل می‌شود (۱۲-۱۰). همچنین افزایش استفاده از سوخت‌های متانول در رهاسازی آن در هوا سهیم است (۱۱). از منابع انتشار فرمالدئید در داخل ساختمان نیز می‌توان به تخته‌های سه لایه، نئوپان، فرش‌ها، پرده‌ها، محصولات کاغذی، دود توتون، آفت کش‌ها و چسب‌های خاص اشاره کرد (۱۴، ۳). فرمالدئید در هوای داخل ساختمان‌ها جزء آلاینده‌های اصلی قلمداد می‌شود (۱۴).

روش‌های مختلفی برای حذف این آلاینده از هوا وجود دارد که دو دسته هستند. روش‌های فیزیکی شیمیایی (متعارف یا سنتی) که شامل جذب سطحی (مانند کربن فعال)، جذب، سوزاندن کاتالیزوری، میعان گاز حاوی آلاینده و روش‌های بیولوژیکی (مدرن) که رایج‌ترین این روش‌ها

سیستم بیوفیلتر

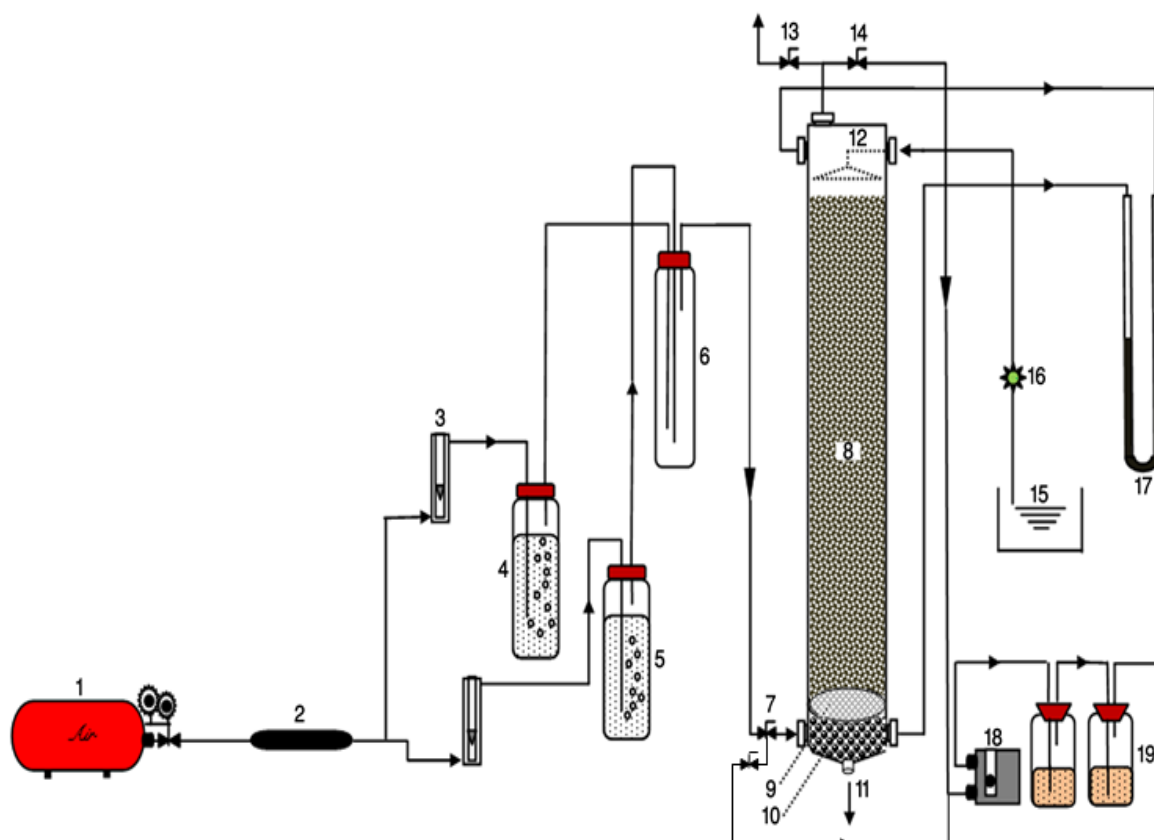
در این مطالعه از بیوفیلتراسیون متعارف به علت تصفیه طیف گسترده‌ای از ترکیبات، افت فشار پایین و عدم نیاز به تولید جریان فاضلاب برخلاف انواع دیگر سیستم‌های بیوفیلتراسیون (۴) استفاده شد. رآکتور از جنس استیل و دارای ارتفاع ۶۰ cm با قطر داخلی ۱۴ cm ساخته شد. مخلوط کمپوست و خرده چوب (۵۰/۵۰ درصد حجمی) با pH حدوداً ۷/۵ و حجم ۶ لیتر در مرحله اول آزمایش و مخلوط سنگ پامیس و کمپوست (۸۰٪ حجمی پامیس و ۲۰٪ حجمی کمپوست) با pH حدوداً ۸ و حجم ۶ لیتر در مرحله دوم بعنوان بستر حمایت‌کننده رشد میکروبی مورد استفاده قرار گرفتند. مرحله اول و دوم آزمایش بترتیب با غلظت‌های 20 ± 2 و 24 ± 3 mg/m³ شروع و به غلظت‌های 276 ± 4 و 224 ± 5 mg/m³ ختم شد. بمنظور توزیع یکنواخت گاز فرمالدئید در داخل بیوفیلتر یک صفحه سوراخ‌دار در ارتفاع ۸ سانتی‌متری بالاتر از کف رآکتور تعبیه شد. تمامی لوله‌های ورودی و خروجی رآکتور از جنس استیل بودند. مطابق نمودار ۱، سه نوع مخزن شامل مخزن رطوبت ساز، مخزن تولید بخارات فرمالدئید و مخزن اختلاط بخارات هوا با بخارات فرمالدئید، قبل از ورودی رآکتور تعبیه شد. مطابق نمودار ۱ جریان هوای عبوری از سیستم بوسله کمپرسور هوا تأمین شده و برای کنترل جریان خروجی از این کمپرسور از دو عدد فلومتر گازی استفاده شد. جهت جلوگیری از ورود آلاینده‌های احتمالی مداخله گر به همراه هوای خروجی از کمپرسور به داخل سیستم، از ستون کربن فعال استفاده گردید. شماتیک سیستم در نمودار ۱ نشان داده شده است.

تأثیرگذار در حذف آلاینده‌ها به روش بیوفیلتر می‌توان به اکسیژن اشباع، دما (بهینه ۲۰ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد)، ضخامت بیوفیلیم، میزان نفوذ آلاینده در بیوفیلیم، pH، نسبت C/N، درجه شوری، رطوبت (بهینه ۳۰ تا ۶۰ درصد) (۲۱) و غیره اشاره کرد (۲۲، ۱۸، ۹). سیستم‌های بیولوژیکی که در حال حاضر بمنظور تصفیه آلاینده‌های هوا کاربرد زیادی دارند شامل: بیواسکرابرها، بیوفیلترها، صافی‌های چکنده (۱۶) و بیورآکتورهای غشایی (۴) می‌باشند. در سال‌های گذشته کاربرد بیوفرآیندها در تصفیه بوهای ناخوشایند (۲۳) در تصفیه خانه‌های فاضلاب، کمپوست و محل‌های تهیه و ذخیره نان بوده است. در حالی‌که اخیراً این روش در تصفیه آلاینده‌های گازی همچون فرمالدئید در مقیاس آزمایشگاهی بررسی شده و در کاربردهای صنعتی توسعه چشمگیری داشته است (۱، ۱۳-۱۰).

توسعه و بهبود کاربرد سیستم بیوفیلتر بمنظور کاهش هرچه بیشتر فرمالدئید از جریان گازی واقعی حاوی مقدار متنوعی از این ترکیب، ارزیابی تأثیر پارامترهای مختلف آزمایشگاهی از قبیل دما، رطوبت و فشار و pH بر روی عملکرد این سیستم و در نهایت تعیین میکروارگانیزم غالب جهت پیشبرد ساده‌تر و شناخت هر چه بیشتر فرایندهای بیواکسیداسیون فرمالدئید از اهداف اصلی این مطالعه بود.

روش کار

این تحقیق یک مطالعه تجربی در مقیاس آزمایشگاهی است که با طراحی، ساخت و راه اندازی یک رآکتور هوایی با جریان پیوسته به انجام رسید.



شکل ۱: شماتیک سیستم بیوفیلتر (۱) کمپرسور هوا، (۲) ستون کربن فعال، (۳) فلومتر، (۴) رطوبت ساز، (۵) مخزن تولید بخارات فرمالدئید، (۶) مخزن اختلاط، (۷) شیر نمونه برداری از هوای آلوده، (۸) بستر بیوفیلتر، (۹) توری توزیع کننده هوا، (۱۰) بستر توزیع کننده یکنواخت هوای ورودی، (۱۱) شیر خروجی مایعات از رآکتور، (۱۲) آب پاش به منظور تخلیه یکنواخت نوترینت، (۱۳) شیر خروجی هوای تصفیه شده، (۱۴) شیر نمونه برداری از هوای تصفیه شده، (۱۵) مخزن نوترینت، (۱۶) پمپ مالشی (Peristaltic Pump)، (۱۷) مانومتر، (۱۸) پمپ فردی و (۱۹) بطری گازشوی نمونه برداری.

۳۹٪ کروموتروپیک اسید ۵/۹۸٪، اسیدسولفوریک ۹۶٪ از شرکت مرک آلمان خریداری شدند. فرآیند راه اندازی و بهره برداری از رآکتور بیوفیلتر روند بهره برداری از سیستم بیوفیلتر مورد مطالعه به این ترتیب بود که جریان هوای خروجی از طریق کمپرسور پس از عبور از ستون کربن فعال ابتدا وارد تقسیم کننده جریان و فلومترهای کنترل کننده جریان شده و از این طریق میزان هوای مورد نیاز برای ورود به مخزن حاوی فرمالدئید ۳۷ درصد و مخزن رطوبت ساز، وارد این مخازن شده سپس مخلوط بخار فرمالدئید و بخار آب آزاد شده در این مخازن به همراه جریان هوا وارد مخزن اختلاط می شد. مخزن رطوبت ساز جهت تغلیظ بخارات فرمالدئید ورودی به رآکتور مورد استفاده قرار گرفت.

مواد و محلول های مورد نیاز

محلول فرمالین ۳۷٪ بمنظور تأمین بخارات فرمالدئید از شرکت مرک آلمان خریداری شد. مواد مغذی به طور تقریبی و با توجه به مطالعات قبل در مقادیر زیر برای تقویت رشد میکروارگانیسم ها به داخل بیوفیلتر تزریق شدند: $(50 \cdot \text{mg/day}) \text{NH}_4\text{Cl}$ ، $(70 \cdot \text{mg/day}) \text{KH}_2\text{PO}_4$ ، $(20 \cdot \text{mg/day}) \text{MgSO}_4$ ، $(3 \cdot \text{mg/day}) \text{MnSO}_4$ ، $(5 \cdot \text{mg/day}) \text{CaCl}_2$ و $(5 \cdot \text{mg/day}) \text{FeSO}_4$ از $(3 \cdot \text{mg/day}) \text{ZnSO}_4$ بمنظور تنظیم pH مواد مغذی و لجن فعال استفاده گردید. جمعیت میکروارگانیسم ها از واحد لجن فعال تصفیه خانه فاضلاب شهری تأمین شد. مواد شیمیایی مورد نیاز جهت آنالیز فرمالدئید شامل بی سولفیت سدیم

زمانی مورد نیاز بمنظور رسیدن به میزان تقریباً ثابت در حذف فرمالدئید (زمانی که تغییرات زیادی در راندمان حذف مشاهده نشد) وارد رآکتور شد. زمان ماند بستر خالی (زمان ماند تئوریکال) هوای حاوی فرمالدئید بر اساس کل دبی هوای ورودی به رآکتور (Q) و حجم بستر رآکتور (V)، با استفاده از فرمول زیر محاسبه گردید:

$$EBRT = V/Q$$

ظرفیت حذف^۲ بیوفیلتر نیز از فرمول زیر محاسبه شد:

$$EC = Q (C_{in} - C_{eff}) / V$$

V حجم بستر رآکتور، C_{in} غلظت ورودی فرمالدئید به رآکتور، C_{eff} غلظت خروجی فرمالدئید از رآکتور و Q دبی هوای حاوی فرمالدئید در ورودی رآکتور می‌باشد.

نمونه‌برداری و سنجش

از روش ۳۵۰۰ (NIOSH)^۳ برای نمونه‌برداری و آنالیز فرمالدئید استفاده شد. طبق این روش بمنظور نمونه‌برداری از هوای ورودی و خروجی از رآکتور یک پمپ نمونه‌بردار فردی مکنده هوا که ورودی آن به رآکتور و خروجی آن به دو عدد بطری گازشوی (ایمپینجر) متصل شده به یکدیگر بصورت سری که حاوی جاذب سولفیت سدیم ۱٪ بودند، استفاده گردید. غلظت فرمالدئید در جاذب مایع به روش رنگ سنجی با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتری (DR5000-HACH LANGE Co.) در طول موج ۵۸۰ نانومتر به صورت روزانه قرائت شد. تعیین رطوبت بستر با استفاده از روش وزن‌سنجی از طریق کوره ۱۰۵ درجه سانتیگراد انجام گرفت. افت فشار بستر به صورت مداوم از طریق مانومتر تعبیه شده به ورودی و خروجی رآکتور سنجش شد. pH مواد مغذی و سوپرناتانت با

مخلوط هوای خروجی از مخزن اختلاط با غلظت مشخص فرمالدئید جهت تجزیه باکتریایی، از قسمت تحتانی وارد بیوفیلتر می‌شود (قبل از ورود به بیوفیلتر از هوای ورودی به بیوفیلتر جهت اطمینان از میزان فرمالدئید محاسبه شده به صورت روزانه نمونه‌برداری انجام گرفت). این مطالعه در مرحله اول در دمای 23 ± 2 و در مرحله دوم در دمای 23 ± 3 درجه سانتیگراد انجام گرفت. در مرحله اول لجن فعال بدون هوادهی قبلی وارد سیستم شد، ولی در مرحله دوم در داخل یک مخزن با نرخ 3 lit/min به طور مداوم و به مدت ۲۰ روز هوادهی شد. همچنین در مرحله دوم بمنظور آماده‌سازی میکروارگانیزم‌ها به شرایط جدید قبل از تلقیح به داخل بیوفیلتر مقدار مشخصی از فرمالدئید به مخزن حاوی لجن فعال به صورت دوره‌ای اضافه گردید. در کل طول مطالعه مواد مغذی و بافر در زمان‌های مختلف (۴ بار در روز) در ابتدای بهره‌برداری از طریق پمپ مالشی^۱ و بقیه روزها به صورت دستی بمنظور توزیع یکنواخت و بهتر جریان در کل بستر، از قسمت فوقانی به داخل رآکتور تزریق شد. مقادیر مختلفی از محلول مغذی و سوپرناتانت به صورت تجربی و به روش سعی و خطا بمنظور حفظ رطوبت بستر به میزان ۳۰ تا ۵۰ درصد (رطوبت مناسب برای رشد میکروارگانیزم‌ها) تزریق شد. در هر دو مرحله پس از سازگاری سیستم و تثبیت راندمان حذف در فاز اول (غلظت اولیه و زمان ماند اولیه (۱۸۰ ثانیه))، راندمان حذف با ثابت نگه داشتن غلظت ورودی اولیه به ترتیب در زمان‌های ماند بستر خالی (EBRT) ۹۰، ۱۱۲، ۱۵۰، ۳۰، ۶۰ ثانیه بمنظور تعیین بهترین زمان ماند، در فاز دوم مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج با یکدیگر مقایسه شدند. در ادامه، در فاز سوم هر مرحله جریان هوای ورودی با غلظت‌هایی متغیری از فرمالدئید به ترتیب بطور مجزا برای دوره‌های

² Elimination Capacity

³ National Institute for Occupational Safety and Health

¹ Peristaltic Pump

مرحله سوم: در این مرحله از محیط‌های کشت افتراقی و IMVIC (اندول- متیل رد- وئس پروسکوئر- سیمون سیترات) استفاده گردید. به این منظور یک ردیف لوله پنج تایی از محیط‌های کشت مورد استفاده قرار گرفت (۲۶).

یافته ها

حداکثر راندمان حذف در هر دو مرحله در طی فاز اول با زمان ماند بستر خالی ۱۸۰ ثانیه حاصل گردید که مقادیر در حدود ۹۱ درصد در مرحله اول و ۸۸ درصد در مرحله دوم بودند. نتایج مربوط به این فاز در هر دو مرحله آزمایش در نمودار ۱ نشان داده شده است. نتایج مربوط به تأثیر زمان ماند بر عملکرد سیستم و تأثیر تغییرات بارگذاری فرمالدئید بر روی راندمان حذف آن برای هر دو مرحله بترتیب در نمودار ۲ و ۳ خلاصه شده است. حداکثر و حداقل مقادیر حذف برای هر دو مرحله اول آزمایش در زمان ماند ۱۸۰ و ۳۰ ثانیه حاصل شد و بترتیب برای مرحله اول در حدود ۹۱ و ۶۲ درصد و برای مرحله دوم بترتیب در حدود ۸۸ و ۶۴ درصد بود. بیشترین و کمترین زمان مورد نیاز برای حصول عملکرد تقریباً ثابت و تثبیت شده در مرحله اول ۱۱ و ۹ روز و در مرحله دوم ۱۱ و ۷ روز اعمال شد.

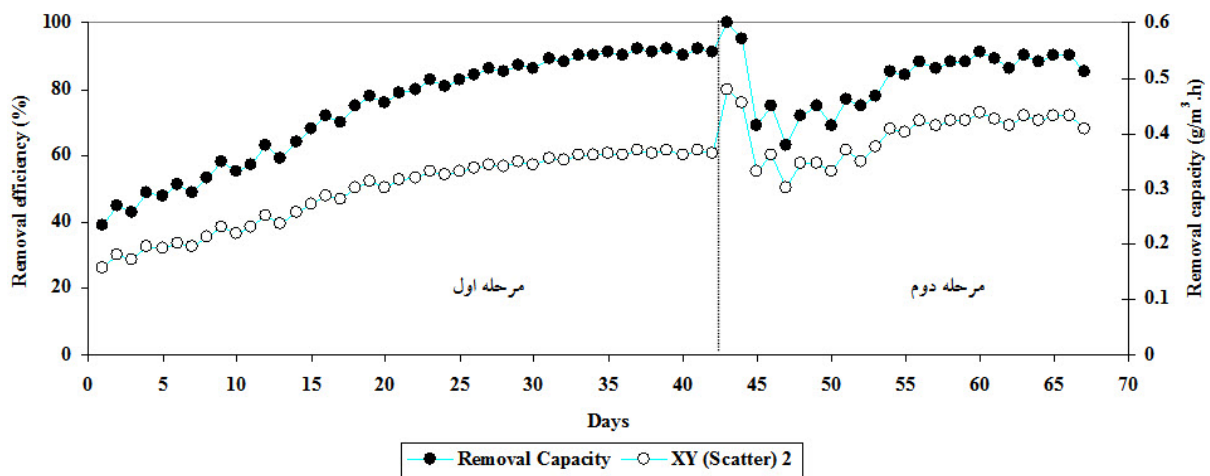
استفاده از pH متر (مدل 1500-Cyberscan Co. اندازه گیری و تنظیم گردید.

شناسایی میکروارگانیزم غالب در تجزیه فرمالدئید
به منظور کشت میکروبی و تشخیص میکروارگانیزم غالب در تجزیه فرمالدئید، با استفاده از پنس استریل از بیوفیلم رشدیافته روی بستر اقدام به نمونه برداری کرده و نمونه‌ها به آزمایشگاه میکروبیولوژی منتقل گردید. از محیط‌های کشت مختلفی به این منظور استفاده گردید. این بخش از آزمایش در سه مرحله کلی زیر انجام گرفت:

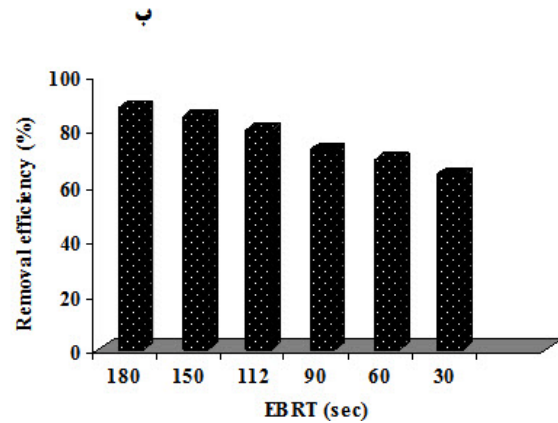
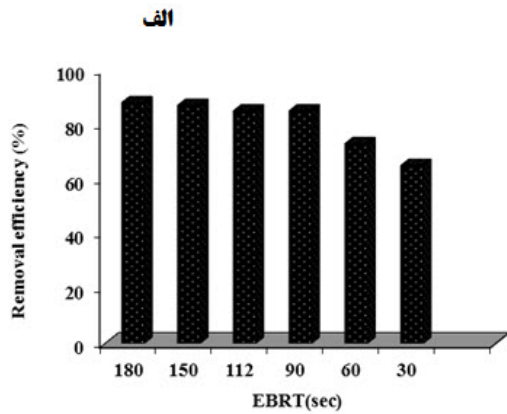
مرحله اول: در این مرحله محیط‌های کشت غنی شامل نوترینت آگار، BHT برات، بلادآگار و شکلات آگار، جهت جداسازی باکتری‌ها از محیط اولیه رشد مورد استفاده قرار گرفت (۲۴).

مرحله دوم: محیط‌های کشت انتخابی جهت تمایز و جداسازی باکتری‌های گرم منفی (باکتری‌های غالب) از گرم مثبت انجام گردید که شامل محیط‌های زیر بودند (۲۵):

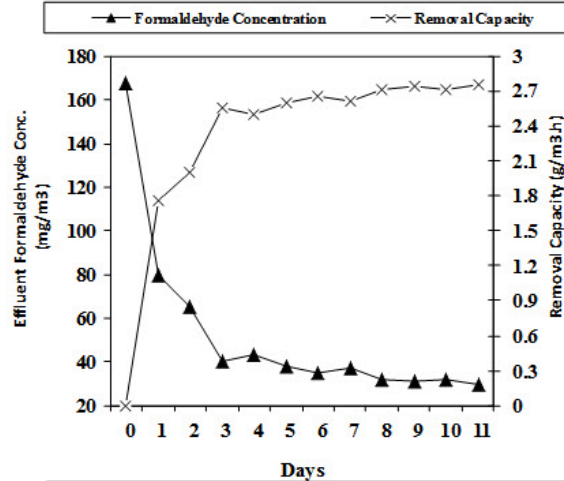
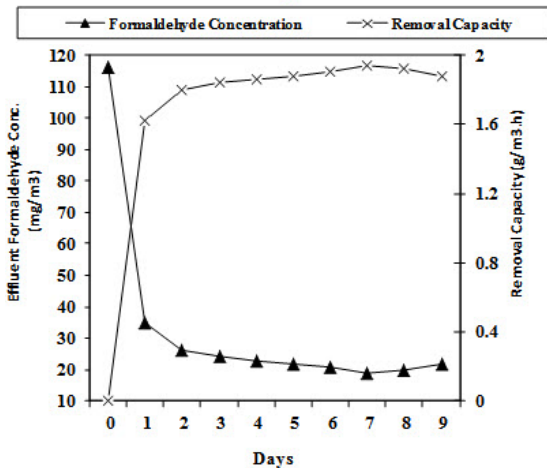
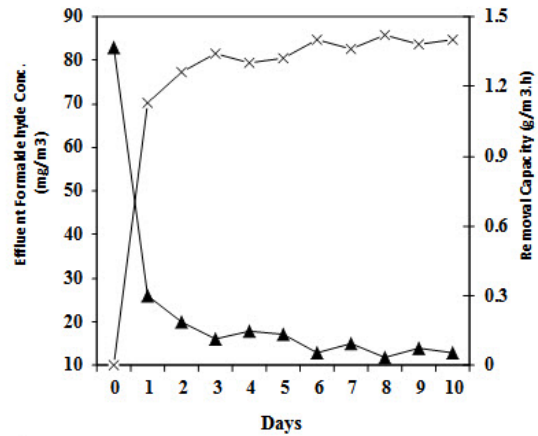
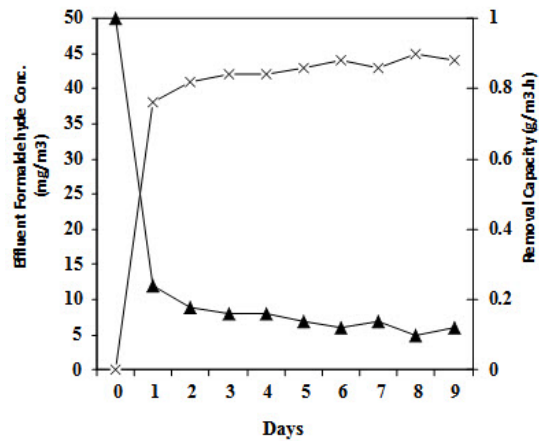
- ۱- مک کانکی آگار (MC Agar): کشت به صورت خطی انجام گرفت تا کلنی تک غالب جداسازی شود.
- ۲- EMB آگار: به صورت کشت خطی انجام گرفته و کلنی تک غالب جداسازی گردید. بر روی محیط EMB کلنی‌های صورتی رنگ مشاهده شد.

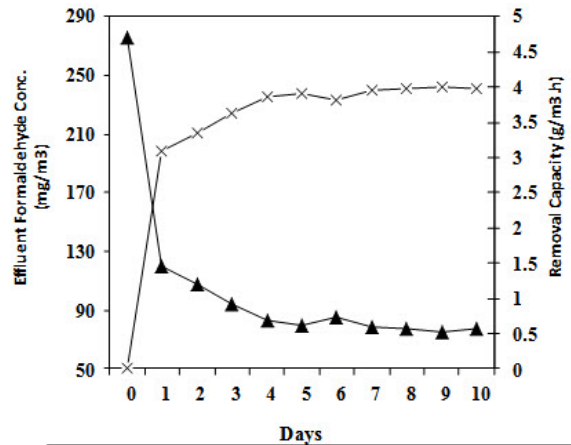
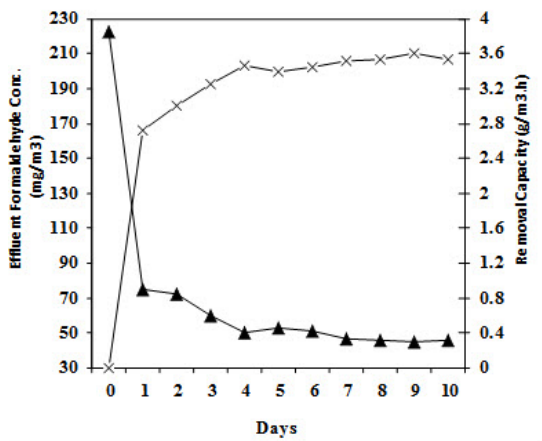


نمودار ۱. تغییرات راندمان حذف فرمالدئید در طول دوره تطابق میکروارگانیزم‌ها در زمان ماند بستر خالی ۱۸۰ ثانیه با غلظت ورودی 2 ± 2 میلی گرم بر مترمکعب (الف) و 24 ± 3 میلی گرم بر مترمکعب (ب).



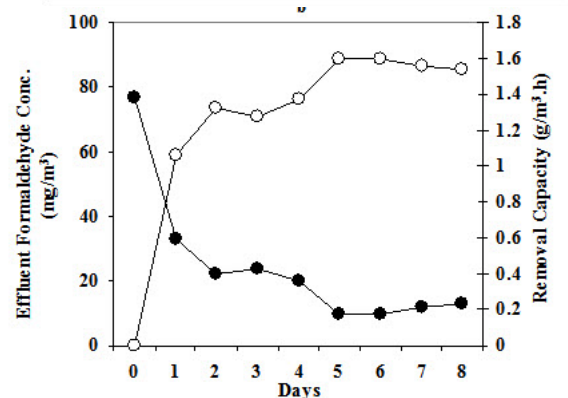
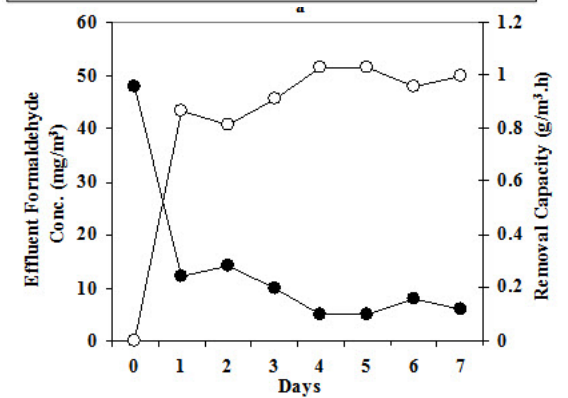
نمودار ۲. تغییرات راندمان حذف فرمالدئید در زمان های ماند بستر خالی با غلظت ورودی 2 ± 2 میلی گرم بر مترمکعب (الف) و 24 ± 3 میلی گرم بر مترمکعب (ب).





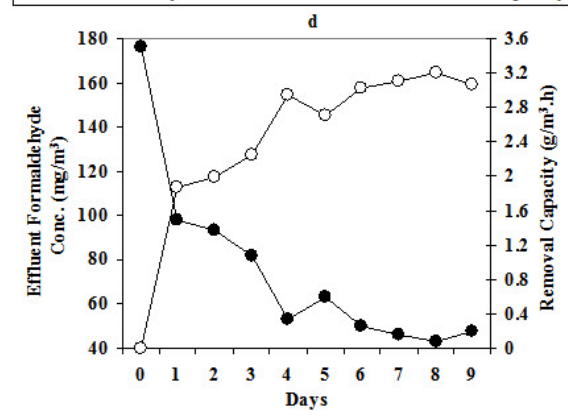
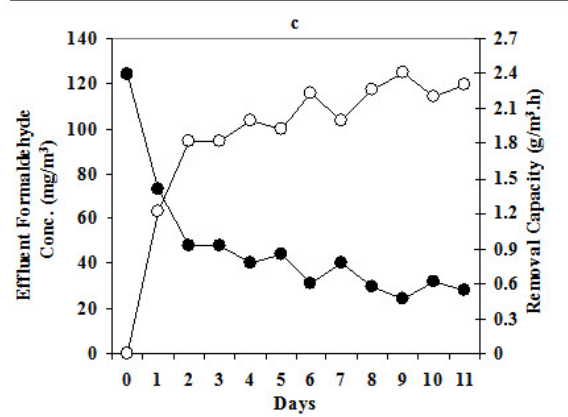
Formaldehyde Concentration Removal Capacity

Formaldehyde Concentration Removal Capacity



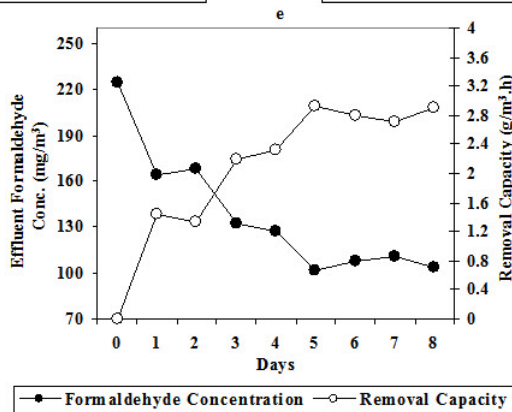
Formaldehyde Concentration Removal Capacity

Formaldehyde Concentration Removal Capacity



Formaldehyde Concentration Removal Capacity

Formaldehyde Concentration Removal Capacity



Formaldehyde Concentration Removal Capacity

نمودار ۳. مرحله اول آزمایش: غلظت خروجی فرمالدئید از رآکتور (مثلث توپر) و ظرفیت حذف فرمالدئید (مثلث توخالی) در دوره های زمانی مورد نیاز بمنظور تثبیت راندمان حذف در غلظت های مختلف فرمالدئید ورودی، $5 \pm 3 \text{ mg/m}^3$ (a)، $83 \pm 3 / 5 \text{ mg/m}^3$ (b)، $116 \pm 2 \text{ mg/m}^3$ (c)، $168 \pm 8 / 5 \text{ mg/m}^3$ (d)، $223 \pm 8 \text{ mg/m}^3$ (e) و $276 \pm 8 \text{ mg/m}^3$ (f). مرحله دوم آزمایش: غلظت خروجی فرمالدئید از رآکتور (دایره توپر) و ظرفیت حذف فرمالدئید (دایره توخالی) در دوره های زمانی مورد نیاز بمنظور تثبیت راندمان حذف در غلظت های مختلف فرمالدئید ورودی، $48 \pm 5 / 5 \text{ mg/m}^3$ (a)، $77 \pm 8 / 5 \text{ mg/m}^3$ (b)، $124 \pm 3 \text{ mg/m}^3$ (c)، $176 \pm 3 / 5 \text{ mg/m}^3$ (d) و $224 \pm 5 \text{ mg/m}^3$ (e).

این مرحله بود، بصورت کوکوباسیل های صورتی رنگ مشاهده شد (شکل ۲ ب). تعداد باکتری ها در این مرحله در حدود 10^6 CFU در هر گرم بستر، شمارش گردید.

نتایج مرحله سوم کشت میکروبی (شناسایی باکتری غالب در تجزیه فرمالدئید)

برای این دو کلنی از محیط های کشت افتراقی و IMVIC (اندول - متیل رد - وئس پروسکوئر - سیمون سیترات) استفاده گردید. نتایج حاصل از این محیط ها به شرح زیر می باشد (شکل ۲ ج):

TSI (تریپل شاگر آبیرون آگار): تولید گاز +، تخمیر گلوکز -، تخمیر لاکتوز +، H_2S (به علت ایجاد رنگ سیاه در اثر مصرف آهن)

SIM: حرکت + (به علت حالت پخش شده کلنی)، اندول - (عدم ایجاد رنگ صورتی در اثر اضافه کردن معرف اندول)، H_2S (به علت ایجاد رنگ سیاه در اثر مصرف آهن)

سیمون سیترات^۱: سیترات + (باکتری ها از سیترات به عنوان منبع کربن استفاده کرده و تغییر رنگ محیط از سبز به آبی رنگ)

اوره^۲: اوره ± (تغییر رنگ از نارنجی به صورتی نشان دهنده مثبت بودن است که در ۲ تست جداگانه نشان داد که می تواند هم اوره مثبت و هم اوره منفی باشد).

MRVP (متیل رد - وئس پروسکوئر): - MR، VP + (تغییر محیط به رنگ قرمز)

لایزین دکربو کسلاز^۳: لایزین - (عدم تغییر رنگ محیط)

نتایج مربوط به شناسایی میکروارگانیسم غالب

در تجزیه فرمالدئید

نتایج مرحله اول کشت میکروبی (جداسازی باکتری های غالب)

در مرحله اول که محیط های کشت غنی شامل نوترینت آگار، BHT برات، بلاد آگار و شکلات آگار، جهت جداسازی باکتری ها از محیط اولیه رشد مورد استفاده قرار گرفت، مشاهده شد که باکتری و قارچ طبق رفرنس های معتبر جامعه میکروبی غالب بودند که در این میان نیز تعداد کلنی های باکتریایی خیلی بیشتر از قارچ ها مشاهده گردید. بنابراین بایستی میکروارگانیسم غالب در این مطالعه از بین کلنی های باکتریایی مشخص می شد. برای این منظور با تهیه لام گسترش از تمامی کلنی های محیط جامد و رنگ آمیزی گرم، کلنی های صورتی و آبی رنگ کاملاً قابل تشخیص بود (شکل ۲ الف). در پایان این مرحله مشاهده شد که فراوانی کلنی های صورتی خیلی بیشتر از کلنی های آبی رنگ بود (که به تعداد محدود از روی کلنی های تک مشاهده شد). بنابراین این نتیجه نشان می داد که باکتری های غالب در تجزیه فرمالدئید، گرم منفی ها هستند.

نتایج مرحله دوم کشت میکروبی (جداسازی کلنی گرم منفی)

در این مرحله رنگ آمیزی گرم از کلنی های تک این دو محیط و مشاهده آن در زیر میکروسکوپ، دو کلنی کاملاً مجزا از باکتری های گرم منفی را که هر کدام جداگانه گسترش و رنگ آمیزی شده بودند را نشان داد. کلنی اول که بصورت باسیل های صورتی رنگ بودند که غالبترین آنها پروتئوس تشخیص داده شد و دومی که کلنی اصلی غالب در

¹ Simon Citrate

² Urea

³ Lysine decarboxylase

روی این محیطها سیتروباکتر فروندی^۲ بود. نتایج این تستها که به منظور تشخیص نوع باکتری پروتئوس نیز انجام گرفت، نشان داد که پروتئوس میرابلیس^۳ (باکتری بیماریزا) و غالبترین نوع باکتری گونه پروتئوس بود.

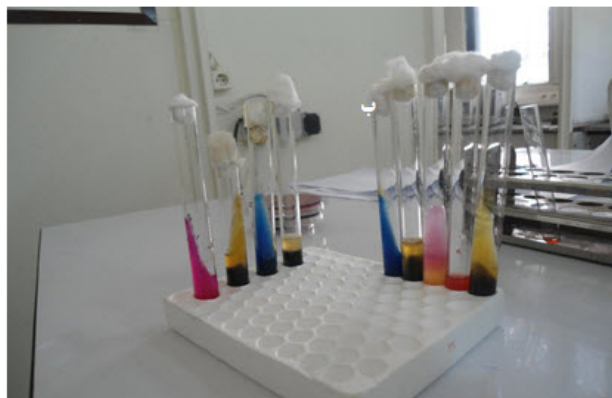
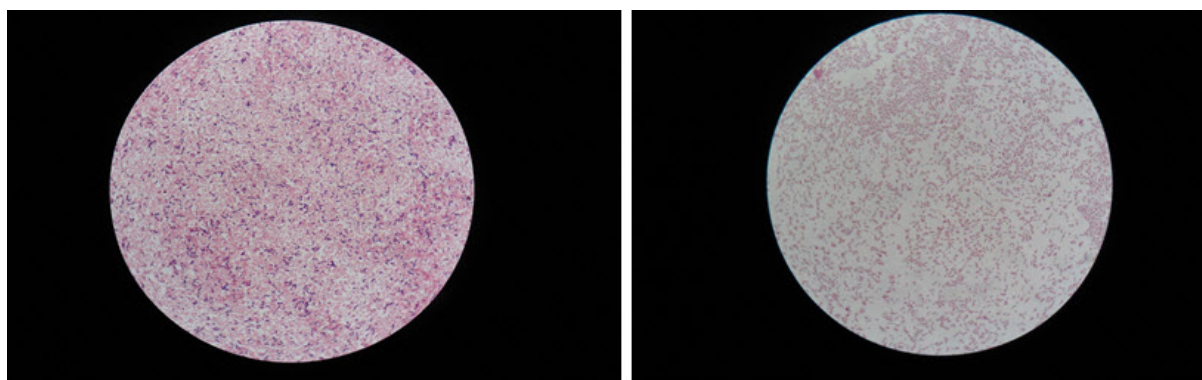
^۲ *Citrobacter freundii*

^۳ *Proteus mirabilis*

اورنیتین دکربوکسیلاز^۱: اورنیتین- (عدم تغییر رنگ محیط)
تست ONGP: این تست که به مدت ۷۲ ساعت انجام گرفت، به علت لاکتوز مثبت تأخیری، مثبت شد. در این تست باکتریهای تخمیر کننده لاکتوز از باکتریهای غیر تخمیر کننده متمایز می‌شوند.

بنابراین نتایج حاصل از این محیطها روی باکتریهای گرم منفی نشان داد که باکتریهای دارای کلنی غالب

^۱ Ornithine Decarboxylase



شکل ۲. نمایی از تصویر میکروسکوپی رشد کلیه باکتری ها در محیط کشت غنی- رنگ آمیزی گرم (الف)، نمایی از تصویر میکروسکوپی رشد باکتری های گرم منفی (صورتی رنگ) در محیط کشت انتخابی (ب) و نمایی از تصویر میکروسکوپی رشد باکتری های گرم منفی در محیط های کشت افتراقی (ج)

باکتریها) تنظیم گردید. با این حال در تمامی نمونههای گرفته شده از پساب خروجی از رآکتور مقدار آن کمتر از ۷ (در محدوده ۴/۵ تا ۶/۶ در مرحله اول و ۴/۶ تا ۶/۴ در مرحله دوم بهره‌برداری) بود. دما در مرحله اول در محدوده $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ و در مرحله دوم در محدوده $23 \pm 3^{\circ}\text{C}$

نتایج مربوط به پارامترهای مؤثر بر عملکرد بیوفیلتر با تنظیم رطوبت بستر از طریق تزریق محلول نوترینت با اعمال سعی و خطا رطوبت بستر در اغلب روزها در حد مطلوب ۶۰-۴۵ درصد وزنی حفظ شد. در تمامی دوره‌های تهیه مواد مغذی، pH آن برای ورود به رآکتور در حدود ۷ (pH بهینه برای

گرفت. به منظور تعیین این اثر هر کدام از زمان‌های ماند به مدت ۵ روز به سیستم تعریف شد. میانگین اعداد بدست آمده از هر زمان ماند به عنوان متوسط میزان حذف فرمالدئید در نمودار ۲ نشان داده شده است. حداکثر راندمان حذف فرمالدئید در زمان ماند ۱۸۰ ثانیه در فاز اول بدست آمد که در حدود ۸۸ درصد ذکر شد. با اعمال زمان‌های ماند کمتر از ۱۸۰ ثانیه میزان تجزیه افت کرده و در نتیجه راندمان حذف قابل قبولی برای فرمالدئید در زمان ماند کمتر از ۹۰ ثانیه حاصل نگردید. راندمان حذف در زمان ماند ۳۰ ثانیه به ۶۲ درصد رسید. با توجه به این نتایج این نکته قابل استنباط است که با کاهش زمان ماند، احتمالاً تبادل فرمالدئید بین فاز گازی و لایه بیوفیلم و همچنین فرصت برای تجزیه میکروبی آن کاهش می‌یابد. مطالعات مختلفی در زمینه حذف فرمالدئید و یا آلاینده‌های دیگر به روش بیوفیلتراسیون این یافته را تأیید می‌کنند.

فاز سوم (تعیین اثر تغییرات غلظت ورودی بر عملکرد سیستم) مرحله اول بهره‌برداری

در فاز سوم بهره‌برداری، غلظت‌های متنوعی از فرمالدئید از 50 ± 3 تا 276 ± 5 mg/m^3 با هدف تعیین تأثیر غلظت‌های مختلف فرمالدئید ورودی بر عملکرد میکروارگانیزم‌ها وارد رآکتور شد. مطابق شکل ۴، هر غلظت طی مدت زمان معینی اعمال شد و پس از تثبیت راندمان در طی روزهای بهره‌برداری شده (معیار تثبیت ۴ روز انتخاب شد)، غلظت به میزان مشخصی افزایش داده شد. با توجه به بالای بودن غلظت ورودی در ۲ غلظت آخر، نسبت به غلظت‌های قبل، سازش میکروبی دیرتر رخ داد. در آخرین غلظت ورودی، راندمان حذف نسبتاً پایین بوده و با حد مجاز استاندارد تعیین شده برای فرمالدئید فاصله بیشتری داشت. بنابراین آزمایشات در فاز سوم برای بیش از 276 ± 5 mg/m^3 ادامه نیافت. همانطور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود، با افزایش در هر یک از غلظت‌های ورودی،

درجه سانتیگراد حفظ شد. افت فشار در حد ۱ میلی‌متر آب بود. نتایج مربوط به پارامترها نشان داده نشده است.

بحث

فاز سازش میکروبی مرحله اول بهره‌برداری

همانطور که در نمودار ۱ مشاهده می‌شود در فاز اول مرحله اول، غلظت خروجی فرمالدئید برای غلظت ورودی 20 ± 2 mg/m^3 در روزهای اول پایین بود. اما با گذشت زمان بدلیل سازش میکروارگانیزم‌ها به فرمالدئید ورودی و افزایش جرم میکروبی تجزیه فرمالدئید روز به روز بیشتر شد تا اینکه پس از ۲۲ روز مقادیر حذف فرمالدئید بیش از ۸۰ درصد و پس از روز ۳۱ ام به بیش از ۹۰ درصد رسید. میانگین راندمان و ظرفیت حذف در این فاز برترتیب در حدود ۹۱ درصد و 0.36 $\text{g/m}^3 \cdot \text{h}$ بود. راندمان حذف در این فاز کمتر از نتیجه زو^۱ و همکاران است (۱۰). علت آن را می‌توان در بالا بودن EBRT در مطالعه زو دانست. همچنین با توجه به وجود متانول در ساختار فرمالین ۳۷ درصد مورد استفاده در مطالعه حاضر، این نکته منطقی بنظر می‌رسد که متانول به علت ساختار ساده تر نسبت به فرمالدئید سریعتر و راحتتر از آن تجزیه می‌شود، بنابراین فرمالدئید کمتر مورد توجه جمعیت میکروبی قرار می‌گیرد و این امر باعث کاهش راندمان حذف فرمالدئید می‌شود. علیرغم متفاوت بودن شرایط مطالعه حاضر نسبت به مطالعه پرادو^۲ و همکاران راندمان بالاتری نسبت به آن حاصل شد.

فاز دوم (تعیین تأثیر زمان ماند بر عملکرد سیستم) مرحله اول بهره‌برداری

در این فاز بر اثر اعمال زمان‌های ماند مختلف، تأثیر مدت زمان ماند هوای حاوی فرمالدئید در داخل رآکتور بر فعالیت میکروبی مورد بررسی قرار

¹ Xu

² Prado

راندمان مواجه شدیم، ولی با گذشت زمان دوباره راندمان حذف بطور تدریجی افزایش یافت. با این وجود مطابق نمودار ۱ تقریباً در ده روز اول راهبری بیوفیلتر راندمان قابل قبولی حاصل نشد. علت کم بودن راندمان در این روزها را می‌توان به سازگاری کم میکروارگانیسم‌ها در مقابل فرمالدئید ورودی و همچنین کم بودن جرم میکروبی در روزهای ابتدایی دانست. رطوبت بالای ۶۰ درصد وزنی طی ۵ روز اول در این مطالعه به دلیل بالا بودن میزان جریان آب (۰/۵ لیتر) حاوی نوترینت و لجن فعال ورودی به رآکتور می‌توانست باعث کاهش رشد باکتری‌ها که مهمترین نوع میکروارگانیسم‌ها برای تجزیه آلاینده‌های آلی همچون فرمالدئید هستند، شود. با توجه به اهمیت زیاد رطوبت بستر در رشد میکروارگانیسم‌ها، میزان جریان نوترینت به روش تجربی و سعی و خطا به میزان ۲۸۰ میلی لیتر کاهش داده شد. این میزان با مطالعات دیگر به دلیل حجم‌های مختلف رآکتور تفاوت دارد (۱۱). با سپری شدن روزهای بهره برداری ظرفیت حذف به میزان تقریباً ثابت و پایدار با میانگین $0.42 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$ (۸۸٪ راندمان حذف) رسید. این مقدار میانگین به عنوان حداکثر ظرفیت حذف سیستم در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از این مطالعه با نتایجی که زو و همکاران بدست آوردند، علیرغم استفاده از غلظت‌های مشابه کمی متفاوت بود. زو و همکاران با بستری به حجم ۲۵ لیتر و با غلظت اولیه فرمالدئید 20 mg/m^3 به حداکثر راندمان ۱۰۰ درصد دست یافتند. این میزان حذف در بارگذاری حداقل در حدود $0.36 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$ و در حداقل دبی ورودی هوا در حدود 112 lit/h حاصل شد (۱۱). بنابراین در مطالعه اخیر، EBRT بیشتری نسبت به مطالعه حاضر اعمال شده است که این امر می‌تواند در تفاوت نتایج این مطالعه با مطالعه حاضر مؤثر باشد.

فاز دوم (تعیین تأثیر زمان ماند بر عملکرد سیستم) مرحله دوم بهره‌برداری

میکروارگانیسم‌ها دچار شوک شده و میزان حذف کمتری را در روز اول برای هر غلظت اعمال شده، شاهد بودیم، ولی بتدریج با سازش میکروبی به غلظت افزایش داده شده، دوباره راندمان و ظرفیت حذف بیشتر شد. میانگین راندمان حذف برای هر یک از غلظت‌ها در ۴ روز آخر به ترتیب از غلظت‌های کم به زیاد در حدود $0.88/3$ ، $0.85/3$ ، $0.83/6$ ، 0.83 ، $0.79/5$ ، $0.73/5$ درصد مشاهده شد. مطالعات دیگر نیز به این نتیجه دست یافتند که با افزایش در بارگذاری فرمالدئید و VOC‌های دیگر راندمان و ظرفیت حذف افت می‌کند. به عنوان مثال در مطالعه زو و همکاران به منظور حذف فرمالدئید از هوا به روش بیوفیلتر با بستر پرشده با گیاه اسپایدر و کمپوست و همچنین بستر سرامیک، نشان داده شد که با افزایش در غلظت ورودی فرمالدئید میزان حذف آن کاهش می‌یابد، بطوری که در ارتفاع ۵ و ۱۰ سانتیمتری نسبت به کف بستر در غلظت ورودی ۵ تا 70 mg/m^3 راندمان بترتیب بیش از ۹۷ و ۹۰ درصد و در غلظت بین ۷۰ تا 207 mg/m^3 راندمان بترتیب به بیش از ۹۰ و ۶۵ درصد کاهش یافت. این روند در مطالعه کای^۱ و همکاران نیز که مطالعه‌ای برای حذف مخلوطی از VOCs شامل تولوئن، استایرن، متیل اتیل کتون و متیل ایزوبوتیل کتون انجام دادند، مشاهده شد.

فاز سازش میکروبی مرحله دوم بهره‌برداری

ابتدا غلظت $24 \pm 3 \text{ mg/m}^3$ (با بارگذاری $0.48 \pm 0.06 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$) بمنظور تطابق میکروارگانیسم‌ها برای مدت ۲۵ روز وارد رآکتور شد. همانطور که در نمودار ۱ ملاحظه می‌گردد راندمان حذف فرمالدئید با این غلظت ورودی در روز اول تلیخ میکروارگانیسم‌ها ۱۰۰ درصد بود. این مقدار بالای حذف در روز نخست احتمالاً به دلیل جذب سطحی فرمالدئید به بستر بیوفیلتر بوده است. در روز دوم با یک افت تقریباً ۳۰ درصدی در

¹ Cai

آزمایش قرار دادند و مشاهده کردند که در سه زمان ماند نخست راندمان مشابه ولی در زمان ماند آخری میزان حذف کمتر بود (۱۰). با توجه به نتایج گرفته شده در این مرحله از آزمایش، به دلیل راندمان مشابه در دو زمان ماند اول، EBRT ۱۵۰ ثانیه با نرخ جریان هوای ۱۴۴lit/h برای ادامه آزمایش‌ها انتخاب و بکار گرفته شد.

فاز سوم (تعیین اثر تغییرات غلظت ورودی بر عملکرد سیستم) مرحله دوم بهره برداری

با انتخاب زمان ماند مناسب، آزمایشات در این فاز با غلظت‌های متفاوت ادامه یافت و پس از سپری شدن تعداد روزهای مورد نیاز برای رسیدن به راندمان حذف ثابت، علاوه بر روزهای اولیه، تعداد ۴ روز به عنوان معیار تثبیت راندمان برای هر غلظت انتخاب شد. با توجه به نمودار (a) با سپری شدن روزهای بهره‌برداری از بیوفیلتر در غلظت فرمالدئید ورودی $48 \pm 5/5 \text{ mg/m}^3$ (بارگذاری جرمی $1/152 \pm 0/132 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$) ظرفیت حذف فرمالدئید در هوای خروجی از رآکتور افزایش و برعکس بطور همزمان مقادیر فرمالدئید خروجی از سیستم کاهش یافت. در روز نخست به دلیل وارد شدن شوک به میکروارگانیزم‌ها در اثر تغییر بارگذاری ورودی از $48 \pm 0/06 \text{ mg/m}^3$ به $1/152 \pm 0/132 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$ ، ظرفیت و راندمان حذف تا حدودی کاهش یافته و به ترتیب به $0/864 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$ و 75% رسید. دوباره با افزایش سازش پذیری میکروارگانیزم‌ها به شرایط بارگذاری جدید، ظرفیت و راندمان حذف افزایش پیدا کرده و در نهایت بطور میانگین در روزهای چهارم تا هفتم بترتیب به میزان $1 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$ و $87/5\%$ رسیده و طی این روزها تغییر واضحی در مقادیر حذف مشاهده نشد. بنابراین در مرحله بعدی آزمایش غلظت فرمالدئید تا $77 \pm 4/5 \text{ mg/m}^3 \cdot \text{h}$ مطابق با نمودار (b) ۳، ظرفیت‌های حذف و مقادیر خروجی فرمالدئید در بارگذاری جدید در روزهای مختلف آزمایش

در ادامه EBRT‌های مختلف جهت تعیین زمان ماند بهینه هوای آلوده به فرمالدئید و مقایسه راندمان حذف در غلظت ثابت فرمالدئید ورودی آزمایش گردید. این مرحله از آزمایش با سه روز تکرار (یک نمونه در روز) انجام گردیده و میانگین نتایج به عنوان راندمان حذف لحاظ شد. همانطور که در نمودار ۲ مشاهده می‌گردد میانگین راندمان حذف در زمان‌های ماند ۱۸۰ و ۱۵۰ ثانیه تقریباً مشابه و به ترتیب در حدود ۸۸ و ۸۷ درصد بود. این امر نشان داد که جامعه میکروبی حتی در ۳۰ ثانیه کمتر نسبت به زمان ماند اولیه نیز به خوبی توانایی تجزیه فرمالدئید بدون کاهش محسوس در راندمان حذف را دارند. ولی با این وجود در EBRT‌های پایین‌تر راندمان حذف به تدریج افت بیشتری کرده و در نهایت در زمان ماند ۳۰ ثانیه به حدود ۶۵ درصد رسید. بنابراین بدلیل پایین بودن میزان حذف در زمان ماند ۳۰ ثانیه، آزمایش‌ها در زمان ماند کمتر از این مقدار قابل قبول نبوده و ادامه نیافت. با توجه به این نتایج، EBRT ۱۸۰ ثانیه دارای بالاترین راندمان در این مطالعه بود. ذکر این نکته ضروریست که در زمان ماند بیشتر از این مقدار احتمالاً راندمان حذف بیشتر از ۸۸ درصد نیز قابل دست‌یابی می‌شد ولی اعمال زمان ماند بالاتر از ۱۸۰ ثانیه بدلیل حجم نسبتاً کم رآکتور در این مطالعه قابل اجرا نبوده و پیشنهاد می‌گردد در مطالعات بعدی زمان‌های بیشتر نیز مورد تحقیق و ارزیابی قرار گیرد. یک دلیل منطقی برای پایین بودن راندمان در EBRT پایین را کاهش میزان نفوذ فرمالدئید بین لایه بیوفیلیم و فاز گازی می‌توان استنباط کرد. نتایج حاصل از برخی مطالعات این روند کاهش راندمان حذف در EBRT‌های پایین را تصدیق می‌کند. Prado و همکاران راندمان حذف مخلوط گازهای متانول و فرمالدئید را در دو نوع بیورآکتور متعارف و صافی چکنده (TF) در EBRT‌های ۷۱/۹، ۴۶/۵، ۳۰ و ۲۰/۷ ثانیه مورد

اختصاص داد. میانگین ظرفیت و راندمان حذف در این مرحله بین روزهای هشتم تا یازدهم به ترتیب $2/3 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$ و ۷۷ درصد بود. بعد از تثبیت راندمان در این غلظت، میزان فرمالدئید ورودی در مرحله بعدی آزمایش به $176 \pm 3/5 \text{ mg/m}^3$ با بارگذاری جرمی $4/22 \pm 0/08 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$ افزایش داده شد. افت راندمان در روز اول آزمایش در این غلظت نیز با مقدار بیشتری نسبت به غلظت‌های ورودی قبلی همراه بود. ظرفیت و راندمان حذف در روز نخست به ترتیب با $1/87 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$ و $44/3$ درصد شروع شد و مطابق با نمودار (d) ۳ با افزایش سازش پذیری میکروارگانیسم‌ها به شرایط جدید بتدریج افزایش یافت. میانگین ظرفیت و راندمان حذف در چهار روز آخر (از روز ششم تا نهم) به ترتیب $3/09$ و $73/4$ درصد شد. آزمایش در این غلظت بطور کلی ۹ روز طول کشید. مرحله آخر آزمایش با غلظت $5/38 \pm 0/12 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$ با بارگذاری جرمی $5/38 \pm 0/12 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$ انجام گردید. تثبیت این غلظت طی ۸ روز رخ داد. ظرفیت و راندمان حذف در روز نخست به ترتیب $1/44 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$ و $26/8$ درصد و میانگین ظرفیت و راندمان حذف از روز چهارم تا هشتم به ترتیب $2/83$ و $52/6$ درصد ثبت گردید. با توجه به داده‌های ثبت شده در کل طول مطالعه و روند تغییرات غلظت در روزهای مختلف نمونه‌برداری، این نکته مشهود است که با افزایش بارگذاری‌های ورودی فرمالدئید علاوه بر افزایش در ظرفیت حذف، راندمان حذف با افت تدریجی همراه بوده (نمودار ۴) و در نهایت در بارگذاری ورودی $5/38 \pm 0/12 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$ حذف نسبتاً قابل قبولی مشاهده نشد. این امر نشان می‌دهد که سیستم بیوفیلتر مورد مطالعه برای بارگذاری بیشتر از این مقدار در شرایط حاکم در این مطالعه جوابگو نیست. اگرچه احتمالاً با افزایش زمان ماند (EBRT) به بیش از ۱۵۰ ثانیه راندمان حذف برای غلظت‌های بالاتر از $224 \pm 5 \text{ mg/m}^3$ امکان تصفیه بیشتری از فرمالدئید را

شد. در روز اول همچون غلظت قبلی، ظرفیت و راندمان حذف عدد پایینی را نشان دادند ولی با این تفاوت که این مقادیر در روز اول در مقایسه با غلظت قبلی افت بیشتری داشتند. همانطور که پیش تر ذکر شد این بار با افزایش بارگذاری ورودی از $1/152 \pm 0/132$ به $1/85 \pm 0/108 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$ بدلیل وارد شدن شوک به میکروارگانیسم‌ها راندمان حذف تا حدود ۵۷٪ کاهش یافت. همچنین ظرفیت حذف در روز نخست در حدود $1/05 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$ مشاهده شد. مطابق نمودار (b) ۳ مقادیر خروجی فرمالدئید در روزهای بعدی کاهش یافته و در چهار روز آخر به یک مقدار تقریباً ثابت و متوسط 13 mg/m^3 کاهش یافت. متوسط ظرفیت و راندمان حذف در این چهار روز به ترتیب $1/57 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$ و $85/4$ ٪ بود. بارگذاری در این مرحله به مدت ۸ روز مورد آزمایش قرار گرفت و پس از چهارمین روز تغییر آشکاری در مقادیر خروجی و حذف فرمالدئید مشاهده نگردید. بنابراین در مرحله بعدی آزمایش غلظت ورودی $124 \pm 3 \text{ mg/m}^3 \cdot \text{h}$ اعمال گردید. نتایج آزمایش‌ها در این غلظت و ورودی در نمودار (c) ۳ آمده است. همانطور که از نمودار (c) ۳ مشاهده می‌شود روند تغییرات غلظت خروجی فرمالدئید همانند غلظت‌های قبلی است و همانطور که برای غلظت‌های قبلی اشاره شد علت کاهش راندمان در اولین روز بهره‌برداری بیوفیلتر در این مرحله نیز، شوک شدن جامعه میکروبی در برابر افزایش غلظت ورودی بوده است. در روز اول ظرفیت و راندمان حذف به ترتیب در حدود $1/22 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$ و 41 ٪ مشاهده شد. ولی با افزایش سازش‌پذیری میکروارگانیسم‌ها به غلظت ورودی فرمالدئید در این مرحله مقادیر حذف افزایش یافته تا اینکه پس از روز هشتم به یک مقدار تقریباً ثابت و پایدار رسید. این مرحله نسبت به غلظت‌های ورودی آزمایش شده در مراحل قبل، زمان زیادی را برای تثبیت میزان حذف به خود

میزان مناسب رطوبت را برای سیستم‌های بیوفیلتر از ۴۰ الی ۶۰ درصد وزنی و یا ۵۰ الی ۷۰ درصد توصیه می‌کنند بنابراین رطوبت بستر سیستم مورد بررسی با توصیه‌های سایر محققین سازگاری دارد. لازم به ذکر است که با افزایش رطوبت، قارچ‌ها در سیستم غالب شده و عمل تجزیه را انجام می‌دهند با این وجود در مطالعات زیادی ذکر شده که جامعه مؤثرتر و غالب تر در تجزیه مواد آلی فرار، باکتری‌ها هستند (۴).

علاوه بر پارامتر رطوبت، pH بدلیل اینکه بر فعالیت میکروبی تأثیر زیادی دارد بنابراین در مایعات ورودی و خروجی از سیستم بصورت روزانه مورد پایش قرار گرفت. عموماً توصیه می‌شود میزان pH در محدوده فعالیت باکتریها و اکتینومیسیتها (در حدود ۷) حفظ شود (۴). از این رو در تمامی دوره‌های تهیه مواد مغذی، pH آن برای ورود به رآکتور در حدود ۷ (pH بهینه برای باکتری‌ها) تنظیم گردید. با این حال علت پایین بودن مقادیر آن در کل نمونه‌های جریان محلول خروجی از بیوراکتور بنظر می‌رسد مربوط به حضور گاز دی اکسید کربن تولیدی از فرآیند تجزیه بیولوژیکی فرمالدئید باشد. هر چند تحقیقات بعمل آمده نشان داده است که عموماً در حد وسیع دمایی از ۰ الی ۶۰ درجه سانتیگراد در منحنی حرارت-راندمان بدون شیب باقی می‌ماند اما محدوده مزوفیلیک دمایی مناسب ترین محدوده دمایی برای فعالیت میکروارگانیزم‌های موثر در عمل تجزیه فرمالدئید شناخته شده است (۴). بنابراین علاوه بر این که از ترموستات بمنظور اعمال دمای ثابت و دلخواه در محدوده مزوفیلیک (۲۳±۳°C) استفاده شد، اما تغییرات دمایی در حدود چند درجه سانتیگراد اجتناب ناپذیر بود. تغییرات دمای محیط و داخل رآکتور بیوفیلتر نشان می‌دهد که سیستم تحت تأثیر متغیر مخدوش کننده دمای محیط قرار داشته است. بدلیل اینکه احتمالاً دما بر روی میزان مصرف اکسیژن

فراهم می‌ساخت. مطالعات انجام گرفته در این زمینه توسط سایر محققین اندک است. یافته‌های بدست آمده در مطالعه زو و همکاران با نتایج حاصل در مطالعه حاضر نسبتاً متفاوت است. آنها با استفاده از بستر پر شده با حلقه‌های سرامیک و با EBRT ۳/۷ دقیقه راندمان حذف را در بخش‌های مختلفی از ارتفاع بستر و در غلظت‌های ورودی بین ۵ تا 2.07 mg/m^3 بررسی نمودند و به راندمان حذف بیش از ۹۷ درصد در غلظت ورودی تا 7.0 mg/m^3 و بیش از ۹۰ درصد در غلظت ورودی تا 2.07 mg/m^3 در قسمت میانی بستر (که بالاترین راندمان حذف را داشت) دست یافتند (۱۱). ظاهراً یکی از مهمترین علت‌های این تفاوت در میزان حذف در نتایج زو و مطالعه حاضر، اختلاف در زمان ماند بوده است. پرادو و همکاران با بررسی حذف مخلوطی از گازهای فرمالدئید و متانول با بستر بیوفیلتر پر شده با سنگ (Lava) با بارگذاری اولیه ۱۵ و $78/2 \pm 2/9 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$ به ترتیب به حداکثر ظرفیت حذف $9/63 \pm 1/48$ و $36/8 \pm 10/3 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h}$ در حذف فرمالدئید در EBRT ۸۰ ثانیه دست یافتند. البته شرایط این مطالعه از قبیل نرخ بارگذاری بالا و EBRT کمتر و همچنین تجزیه رقابتی فرمالدئید با متانول توسط میکروارگانیزم‌ها به عنوان منبع کربن می‌توانند دلایل قانع کننده‌ای برای راندمان حذف نسبتاً محدود نسبت به مطالعه حاضر باشند (۱۰).

بررسی اثر پارامترهای مؤثر بر عملکرد بیوفیلتر

یکی از مهمترین مسائل قابل توجه در بیوفیلترها کنترل مقدار رطوبت بستر است. این فاکتور با فراهم کردن شرایط بهینه برای رشد میکروارگانیزم‌ها در داخل بستر، نقش اساسی در حذف ترکیبات گازی ایفا می‌کند. در واقع احتمالاً جذب سطحی یا ضریب تفکیک اجزای آلاینده در فاز گازی نسبت به میزان رطوبت بستر حساس می‌باشد. رطوبت بستر در اغلب روزها در حد مطلوب ۶۰-۴۵ درصد وزنی قرار داشته است. قابل ذکر است که اکثر محققین

قبولی در تجزیه و کاهش فرمالدئید از جریان هوا دارد و یکی از روش‌های بالقوه در تصفیه هوای آلوده نظیر تصفیه خانه‌های فاضلاب شهری می‌باشد. بنابراین پیشنهاد می‌شود که در مطالعات بعدی، این سیستم در مقیاس پایلوت در محل صنایع با جریان هوای آلوده واقعی مورد بهره برداری قرار گیرد تا تأثیر دیگر جریان‌ات گازی آلوده به همراه فرمالدئید ورودی به رآکتور بمنظور مطالعه برهم کنش آلاینده‌های مختلف و مقاومت باکتریایی در مقابل چندین آلاینده مختلف نیز مورد بررسی قرار گیرد تا در نهایت بهترین شرایط راهبری برای بیوفیلتراسیون هوای آلوده در مقیاس صنعتی قابل دستیابی باشد. همچنین بررسی و مطالعه دماهای راهبری مختلف در عملکرد و فعالیت میکروارگانیسم‌ها در مقیاس پایلوت می‌تواند در راهبری هرچه بهتر و ساده تر بیوفیلترها در مقیاس صنعتی سودمند باشد. این مطالعه نشان می‌دهد که غالب ترین جمعیت میکروبی بمنظور تجزیه فرمالدئید باکتری‌های گرم منفی می‌باشند.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی اصفهان در امر تحقق این طرح تحقیقاتی تشکر و سپاسگذاری می‌گردد.

توسط جمعیت میکروبی تأثیر زیادی دارد، لزوماً بایستی مورد توجه قرار گیرد.

احتمال می‌رود که افزایش میزان افت فشار داخل بستر بیوفیلتر در بهره برداری بیوفیلتر از جنبه افزایش مصرف انرژی حائز اهمیت باشد. لسون^۱ و همکاران گزارش کردند که افزایش افت فشار از ۴ تا ۲۵ سانتیمتر آب به ازای هر متر بستر، در مدت زمان ۶ ماهه مصرف انرژی را در حدود ۷ تا ۲۷ کیلووات افزایش می‌دهد (۲۴). در تحقیق حاضر اندازه ذرات بستر مطابق با توصیه‌های سایر محققین بوده و به گونه‌ای انتخاب شده است که از کلوخه شدن بستر و در نتیجه از افزایش افت فشار جلوگیری نماید بطوری که، میزان افت فشار در حد کمتر از یک میلی‌متر آب در هر متر بستر حفظ شد. بنابراین می‌توان گفت که این میزان از افت، تأثیری در بهره‌برداری بیوفیلتر در این مطالعه نداشته است.

نتیجه گیری

یافته‌های این مطالعه نشان داد که با افزایش در بارگذاری ورودی فرمالدئید و کاهش در EBRT، راندمان کلی حذف فرمالدئید در سیستم بیوفیلتر کاهش می‌یابد. بیورآکتور هوایی با بستر متناسب برای رشد میکروارگانیسم‌ها، در زمان ماند بهینه همراه با مقادیر بارگذاری اعمال شده، عملکرد قابل

¹ Leson

References

- 1- Prado OJ, Veiga MC, Kennes C. Effect of key parameters on the removal of formaldehyde and methanol in gas-phase biotrickling filters. *Journal of Hazardous Materials*. 2006;138(3):543-8.
- 2- Kansal A. Sources and reactivity of NMHCs and VOCs in the atmosphere: A review. *Journal of Hazardous Materials*. 2009;166(1):17-26.
- 3- Talapatra A, Srivastava A. Ambient Air Non-Methane Volatile Organic Compound (NMVOC) Study Initiatives in India—A Review. *Journal of Environmental Protection*. 2011;2(1):21-36.
- 4- Kumar TP, Rahul MAK, Chandrajit B. Biofiltration of Volatile Organic Compounds (VOCs)—An Overview. *Research Journal of Chemical Sciences*. 2011; 1(8):83-92.
- 5- Chen X, Stewart PS. Biofilm removal caused by chemical treatments. *Water research*. 2000;34(17):4229-33.
- 6- Nielsen GD, Wolkoff P. CANCER IAFRO IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Formaldehyde, 2-Butoxyethanol and-¹tert-Butoxypropan-2-ol. 2006;84(6):423-46

- 7- Hygienists ACoGI. TLVs and BEIs: Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents & Biological Exposure Indices: ACGIH Worldwide; 2001.
- 8- Akbar-Khanzadeh F, Park CK. Field precision of formaldehyde sampling and analysis using NIOSH Method 3500. American Industrial Hygiene Association journal. 1997;58(9):657-60.
- 9- Delhoménie MC, Heitz M. Biofiltration of air: a review. Critical reviews in biotechnology. 2005;25(1-2):53-72.
- 10- Prado OJ, Veiga MC, Kennes C. Biofiltration of waste gases containing a mixture of formaldehyde and methanol. Applied microbiology and biotechnology. 2004;65(2):235-42.
- 11- Xu Z, Qin N, Wang J, Tong H. Formaldehyde biofiltration as affected by spider plant. Bioresource technology. 2010;101(18):6930-4.
- 12- Xu Z, Hou H. Formaldehyde Removal from Air by a Biodegradation System. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 2010;85(1):28-31.
- 13- Yoshida K, Ishii H, Ishihara Y, Saito H, Okada Y. Bioremediation Potential of Formaldehyde by the Marine Microalga *Nannochloropsis oculata* ST-3 Strain. Applied biochemistry and biotechnology. 2009;157(2):321-8.
- 14- Kim KJ, Kil MJ, Song JS, Yoo EH, Son KC, Kays SJ. Efficiency of volatile formaldehyde removal by indoor plants: contribution of aerial plant parts versus the root zone. Journal of the American Society for Horticultural Science. 2008;133(4):521-6.
- 15- Sorial GA, Smith FL, Suidan MT, Biswas P, Brenner RC. EVALUATION OF TRICKLE-BED BIOFILTER MEDIA FOR TOLUENE REMOVAL. Journal of the Air & Waste Management Association. 1995;45(10):801-10.
- 16- Ezeonu CS, Tagbo R, Anike EN, Oje OA, Onwurah INE. Biotechnological Tools for Environmental Sustainability: Prospects and Challenges for Environments in Nigeria—A Standard Review. Biotechnology Research International. 2012; 2012:26
- 17- Adroer N, Casas C, Mas C, Solà C. Mechanism of formaldehyde biodegradation by *Pseudomonas putida*. Applied microbiology and biotechnology. 1990;33(2):217-20.
- 18- Pedersen L-F, Pedersen PB, Sortkjaer O. Temperature-dependent and surface specific formaldehyde degradation in submerged biofilters. Aquacultural Engineering. 2007;36(2):127-36.
- 19- Deshusses MA, Hamer G, Dunn IJ. Transient-state behavior of a biofilter removing mixtures of vapors of MEK and MIBK from air. Biotechnology and bioengineering. 1996;49(5):587-98.
- 20- Mirdamadi S, Rajabi A, Khalilzadeh P, Norozian D, Akbarzadeh A, Mohseni FA. Isolation of bacteria able to metabolize high concentrations of formaldehyde. World Journal of Microbiology & Biotechnology. 2005;21(6-7):1299-301.
- 21- Sakuma T, Hattori T, Deshusses MA. The effects of a lower irrigation system on pollutant removal and on the microflora of a biofilter. Environmental Technology. 2009;30(6):621-7.
- 22- Cai Z, Sorial GA. Treatment of dynamic VOC mixture in a trickling-bed air biofilter integrated with cyclic adsorption/desorption beds. Chemical Engineering Journal. 2009;151(1-3):105-12.
- 23- Cox HHJ, Deshusses MA. Innovative experimental setup for the parallel operation of multiple bench scale biotrickling filters for waste air treatment. Environmental Technology. 2005;26(4):421-30.
- 24- Holding A, Collee J. Routine biochemical tests. Methods in microbiology. 1971;6.
- 25- Gregersen T. Rapid method for distinction of gram-negative from gram-positive bacteria. European J Appl Microbiol Biotechnol. 1978;5(2):123-7.
- 26- Powers EM, Latt TG. Simplified 48-hour IMVic test: an agar plate method. Applied and environmental microbiology. 1977;34(3):274-9.
- 27- Leson G, Chavira R, Winer A, editors. Experiences with a full-scale biofilter for control of ethanol emissions. A AND WMA ANNUAL MEETING; 199; Volume 4: 95-MP9A. 04