

BIOTREATMENT OF INDUSTRIAL GASEOUS POLLUTANTS BY BIOFILTRATION

H. Keshavarzi
Shirazi
Tehran University
hsirazi@ut.ac.ir

A. Tarkian
Sharif University
torkian@sharif.edu

A.A. Azimi N. Mehrdadi
Tehran University

Abstract: Performance of a pilot Biofiltration system in removing of Triethylamine (TEA) vapor from air stream was evaluated in this study. Experiments were conducted with a 6-L three section biofilter containing a mixture of compost(60%) and wood chips(40%). The system was operated at $30 \pm 1^\circ\text{C}$. Municipal activated sludge was added initially to promote microbial growth and the systems were started after initial adaptation period of 40 days. Various loading rates ($6-114 \text{ g/m}^3 \cdot \text{hr}$), in detention time of 48 seconds and media moisture of 50-55% were studied to evaluate the removal efficiency of biofilter. Results indicated that all the influent TEA with below concentration of 180 ppm was removed with more than 90% efficiency. In concentration of 180 ppm, more than 90% TEA was hydrolyzed to ammonia in the pH range of 8-9. About 1/3 of biodegraded nitrogen was N-NH_3 (gas), 1/3 was converted to NH_4^+ and 1/3 was converted into nitrate and organic or cell nitrogen. Nitrogen forms were varied over time and with the height of the packing. In certain conditions of this research, the biodegradation of TEA was good but conversion of nitrogen to nitrate was not so well accepted.

تصفیه گازهای آلاینده صنعتی به روش بیوفیلتراسیون

هما کشاورزی شیرازی، ایوب ترکیان، علی اکبر عظیمی و ناصر مهرداد

چکیده: این پژوهش به منظور بررسی سیستم بیوفیلتراسیون در تصفیه گاز آلاینده تری اتیل آمین (TEA) انجام شده است. راکتور بیولوژیکی به مدت یک سال در مجاورت هوای آلوده به TEA در دمای $30 \pm 1^\circ\text{C}$ قرار گرفته است. راکتور مورد استفاده در این تحقیق با حجم مؤثر ۶ لیتر از سه بخش جداگانه تشکیل شده است. بستر بیوفیلتر حاوی ۶۰٪ کمپوست و ۴۰٪ خرده های چوب با ابعاد یکسان (۵-۶ mm) می باشد و در آغاز برای لقاچ میکروبی، لجن فاضلاب شهری به آن اضافه شده است. دامنه بارگذاری بستر $6-114 \text{ g/m}^3 \cdot \text{hr}$ ، رطوبت بستر ۵۵٪، غلظت ورودی $20-400 \text{ ppm}$ و زمان ماند هیدرولیکی ۴۸ ثانیه بوده است. نتایج نشان داد که راندمان حذف در غلظت $20-250 \text{ ppm}$ بیشتر از ۹۰٪ و در $250-400 \text{ ppm}$ بالاتر از ۶۵٪ بوده است. حداکثر ظرفیت حذف قابل دستیابی $72/2 \text{ g/m}^3 \cdot \text{hr}$ بوده که در بارگذاری $114/4 \text{ g/m}^3 \cdot \text{hr}$ به دست آمده است. نتایج آزمایشهای انجام شده بر روی بستر جامد و گازهای خروجی از راکتور بیوفیلتر نشان داد که نیتروژن حاصل از

تاریخ وصول: ۸۷/۱/۲۱

تاریخ تصویب: ۸۸/۱/۲۴

هما کشاورزی شیرازی، استادیار دانشکده محیط زیست- دانشگاه تهران hsirazi@ut.ac.ir
دکتر ایوب ترکیان، دانشیار مرکز آب و انرژی- دانشگاه صنعتی شریف torkian@sharif.edu
دکتر علی اکبر عظیمی، استادیار دانشکده محیط زیست- دانشگاه تهران AAAzimi@ut.ac.ir
دکتر ناصر مهرداد، دانشیار دانشکده محیط زیست- دانشگاه تهران NMehrdadi@ut.ac.ir

تجزیه بیولوژیکی TEA در بستر بیوفیلتر، ابتدا به گاز آمونیاک و سپس به یون آمونیوم، یون نیتراژ و ماده آلی تبدیل می شود. موازنه جرم نیتروژن در راکتور نشان داد که در غلظت ثابت ۱۸۰ ppm با بازدهی حذف بیش از ۹۰٪، از کل نیتروژن تجزیه شده طی ۸۴ روز بیوفیلتراسیون مداوم، یک سوم به صورت نیتروژن در گاز آمونیاک، یک سوم به صورت نیتروژن آمونیاکی و یک سوم مابقی به صورت نیتروژن نیتراژ و نیتروژن آلی در بستر تغییر شکل داده است. همچنین نتایج نشان داد که حذف TEA توسط بیوفیلتر در غلظتهای کمتر از ۱۸۰ ppm کاملاً قابل قبول است و خروج گاز تجزیه نشده نیز کمتر از استاندارد TEA در هوای تنفسی است (استاندارد OSHA برای مجاورت ۸ ساعته با این آلاینده در محیطهای کاری ۲۵ ppm است). ضمناً گاز آمونیاک خروجی در حالتی که سیستم به حالت پایا رسیده باشد، در حد استانداردهای هوای تنفسی می باشد.

کلید واژه ها: تری اتیل آمین، بیوفیلتراسیون، حذف بیولوژیکی گازها، آلودگی هوای صنعتی

۱. مقدمه

راکتورهای بیولوژیکی با فاز گازی به کمک واکنشهای متابولیکی میکروبی تصفیه آلاینده های هوا را به خوبی انجام میدهند. تصفیه بیولوژیکی گازها هنگامی که حجم هوا زیاد و غلظت آلاینده پایین باشد، بازده بسیار بالا داشته و از نظر هزینه های سرمایه گذاری و راهبری کاملاً اقتصادی است [۱]. در کنترل بیولوژیکی، طی واکنشهای اکسیداسیون، ترکیبات گازی به دی اکسید کربن، آب و توده زنده تبدیل میشوند. آلاینده های مورد تصفیه باید قابل تجزیه بیولوژیکی و غیر سمی برای میکروبها باشند [۲].

راکتورهای بیولوژیکی که برای تصفیه آلاینده های گازی بکار میروند: بیوفیلترها، بیوفیلترهای چکنده و بیواسکرابها هستند که از بین آنها بیوفیلترها کارایی بالاتری داشته و متداولتر هستند [۳]. در بیوفیلتراسیون، میکروارگانیسمها یا روی بیوفیلتر تشکیل شده در سطح بستر رشد می کنند یا در فاز مایع اطراف ذرات بستر به حالت تعلیق در می آیند. ضمن حرکت هوا از میان بستر، آلاینده موجود در آن جذب بیوفیلتر شده و مورد تجزیه میکروبی قرار میگیرد. در یک بیوفیلتر می تواند مجموعه ای از فرآیندهای مختلف نظیر جذب، جذب سطحی، تجزیه و واجدبی، انجام شود [۴]. بسترهای بیوفیلتر شامل نسبتهای متفاوتی از پسماندهای بیولوژیکی (کمپوست، خاک و پیت) و مواد بی اثر (خرده های چوب، کربن فعال، پلی استایرن) همراه با تلقیح میکروبی هستند که با افزودن محلول بافر برای تنظیم pH و نمکهای معدنی و عناصر جزئی مورد نیاز رشد میکروبی، محیط برای رشد میکروارگانیسمها مناسب می شود [۵]. از طرفی در سیستمهای کنترل بیولوژیکی اغلب تجزیه تا آخرین مرحله یعنی ایجاد گاز کربنیک و آب ادامه دارد، در حالیکه در اغلب روشهای متداول کنترل گازها، فاضلاب تولیدی یا گاز تغلیظ شده بر روی جاذب، نیاز به تصفیه ثانویه دارد. از آنجائیکه ترکیبات نیتروژندار نظیر آمونیاک و انواع آمینها ترکیباتی بدبو با قابلیت تجزیه بیولوژیکی بالا می باشند، بیوفیلتراسیون می تواند روشی مناسب برای تصفیه آنها باشد [۶، ۷].

TEA گازی بد بوست که در صنایع شیمیایی، کودسازی و ریخته گری مورد استفاده قرار می گیرد و موجب آلودگی هوای داخل واحدهای صنعتی و محیط پیرامون آنها می شود. این تحقیق به منظور بررسی تصفیه پذیری TEA و آگاهی از روند تغییرات نیتروژن در سیستم و نیز شناخت مکانیزم بیوفیلتراسیون برای بررسی عملکرد بیوفیلتر انجام شده است. نتایج این تحقیق میتواند در طراحی و راهبری بهینه سیستمهای بیولوژیکی کنترل آلودگی هوای ناشی از انتشار گازهای صنعتی، مورد استفاده قرار گیرد.

۲. ابزار و روشها

۲-۱. راکتور

استوانه ای دو جداره و سه قسمتی از جنس پلکسی گلاس به ارتفاع یک متر و قطر جداره داخلی و خارجی به ترتیب ۱۰ و ۱۵ سانت می باشد. برای تثبیت دمای بستر، بین دو جداره راکتور آب قرار دارد. در هر بخش راکتور به ارتفاع ۲۵ cm از آکند پر شده و هر بخش با صفحه مشبک از جنس پلکسی گلاس از بخش دیگر جدا شده است. بین هر بخش ۵ cm فضای خالی وجود دارد تا به کمک صفحه مشبک توزیع مجدد هوا برای ورود به بخش بعد فراهم شود. شیر خروج هوا برای نمونه برداری در همین قسمت تعبیه شده است. در هر بخش دو دریچه به قطر ۴ cm برای نمونه برداری از آکند تعبیه شده است. برای کنترل دمای بستر، از جریان آب با دمای کنترل شده بین دو جداره ستون استفاده شد تا بتوان دمای بستر را با دقت $\pm 1^{\circ}\text{C}$ کنترل نمود. سنسور مخصوص دما با میله ۱۰ سانتیمتری در یکی از دو دریچه مخصوص نمونه برداری در بخش میانی بیوفیلتر درون آکند قرار داده شده است. قرائت دمای بستر توسط صفحه نمایشگر دما که بر روی تابلوی برق سیستم نصب شده، میسر می باشد. در کف راکتور دریچه ای برای تخلیه نشتاب پیش بینی شده است. هوای حامل TEA از کف بستر به طرف بالا جریان می یابد و افت فشار با استفاده از مانومتر آبی که توسط لوله پلاستیکی به

۶۰:۴۰ چوب:کمپوست (با C:N:P برابر ۲:۷:۱۰۰، ۰.۴۳٪ مواد آلی و pH برابر ۶/۸) می‌باشد. ۳ لیتر لجن فعال فاضلاب شهری بعد از ۲۰ روز هوادهی و افزودن روزانه ۱۰-۲ ppm تری‌اتیل‌آمین به آن آماده‌سازی، و به بستر افزوده شد. علت افزودن تری‌اتیل‌آمین به لجن فعال، سازگار کردن میکروبها با این ماده سمی بوده است، زیرا در فاضلاب تصفیه‌خانه شهری احتمال وجود این آلاینده بسیار کم است. در جدول ۱ خصوصیات بستر و شرایط راه‌اندازی بیوفیلتر ذکر شده است.

جدول ۱. خصوصیات ماده بستروشرایط راه‌اندازی بیوفیلتر

وزن آکند بدون آب (گرم)	۳۰۵۰	رطوبت (درصد وزنی)	۵۶/۶
فاضلاب اضافه شده (گرم)	۱۹۴۸	pH	۷/۵
وزن کل آکند (گرم)	۴۹۹۸	افت فشار اولیه (سانتی متر آب)	۳/۵
حجم مفید بستر (لیتر)	۵/۸۸	دمای راکتور (°C)	۳۰ ± ۱
دانسیته بستر (گرم بر لیتر)	۸۵۰		

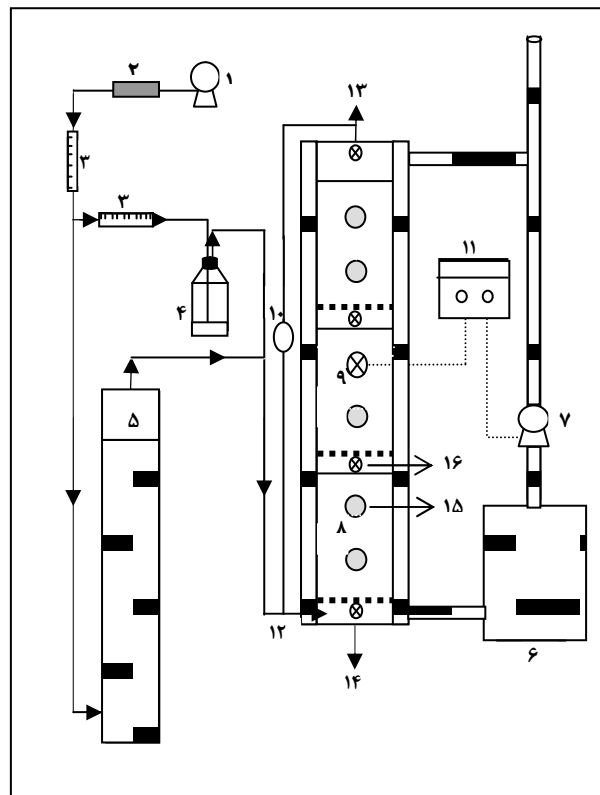
۳-۲. شرایط کارکرد راکتور

راکتور بیولوژیکی با تنظیم رطوبت بستر در ۵۷٪ و pH آکند در ۷/۵ آغاز به کار کرد. دمای بستر توسط آب مخزن با دمای معین بر روی ۱°C ± ۳۰ و دبی هوای عبوری ۷/۵ l/min تنظیم شد. با این میزان عبور هوا، زمان ماند هوا در بستر خالی روی ۴۸ ثانیه تثبیت گردید. رطوبت هوای عبوری از بستر ضمن گذشتن از مرطوب ساز به حد اشباع رسید. با تنظیم فلوکنترلر بخش کوچکی از هوای عبوری، از بطری حاوی TEA عبور کرده و به همان میزان هوای بالای سطح مایع TEA موجود در بطری را که در حالت تعادل با مایع قرار داشت وارد جریان اصلی هوای عبوری از بستر می‌کرد و غلظت دلخواه و ثابت از TEA را فراهم می‌آورد. هر بار به وسیله فلوکنترلر و تغییر دبی هوای عبوری از بطری حاوی آلاینده، غلظت دلخواهی از TEA فراهم می‌شد. جهت حرکت هوا در تمامی عملیات بیوفیلتراسیون از پایین به سمت بالای بستر بود و با زیر رو کردن بستریه صورت متناوب افت فشار بین یک تا سه سانتیمتر حفظ و از کلوخه شدن آکند جلوگیری می‌شد. کنترل pH با افزودن روزانه بافر فسفات در محدوده ۸ تا ۹ حفظ می‌گردید.

۴-۲. نمونه برداری و سنجش

نمونه برداری از شیرهای ورودی و خروجی هوا با گاز شویی در حلال متانول (۲۰ ml متانول، دبی هوای عبوری ۳۴۰ ml/min به مدت ۱۵ دقیقه) صورت گرفت. سنجش نمونه ها توسط دستگاه

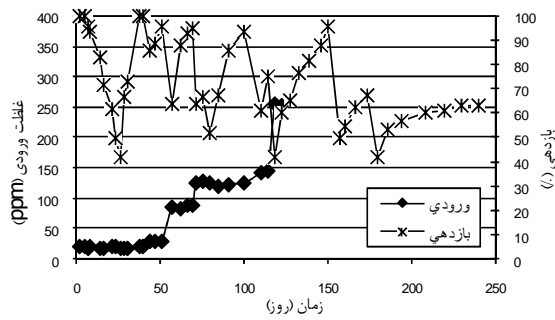
مجرای ورود هوا از یک سمت و به مجرای خروج هوا از سمت دیگر وصل است، پایش می‌شود. منبع تامین هوا یک کمپرسور ۲۲۰ لیتری است و هوا پس از عبور از فیلتر هوا و فلومتر به دو بخش تقسیم می‌شود. بخش کمی از آن با گذر از فلومتر دوم وارد بطری حاوی محلول TEA شده و پس از خروج از سمت دیگر بطری، وارد جریان هوای ورودی به بستر می‌شود. بخش اصلی هوای عبوری از بستر بعد از گذشتن از برج مرطوب ساز همراه با هوای حامل TEA از کف وارد راکتور می‌گردد. برج مرطوب ساز مخزنی مکعب مستطیل به ارتفاع ۱۰۰ cm و سطح مقطع ۹۰۰ cm² است که تا ارتفاع ۷۰ cm درون آن از آب پر شده است. برای تنظیم درجه حرارت مرطوب ساز از المنت حرارتی ۲۰۰۰ وات ترموستات دار استفاده شده است. بدین ترتیب رطوبت هوا بعد از گذر از مرطوب ساز به حد اشباع می‌رسد (بیش از ۹۵٪). شکل ۱ راکتور بیولوژیکی و ملزومات آنرا نشان می‌دهد.



شکل ۱. سیستم بیوفیلتر همراه با ضمائم: ۱- پمپ هوا، ۲- فیلتر هوا، ۳- فلومتر (روتامتر)، ۴- ظرف حاوی TEA مرطوب ساز، ۵- مخزن آب، ۶- مخزن آب، ۷- پمپ آب، ۸- بستر بیوفیلتر، ۹- سنسور دما، ۱۰- مانومتر، ۱۱- کنترل کننده دما، ۱۲- ورود هوا، ۱۳- خروج هوا، ۱۴- خروج نشتاب، ۱۵- دریچه نمونه برداری از بستر، ۱۶- شیر هوای نمونه برداری.

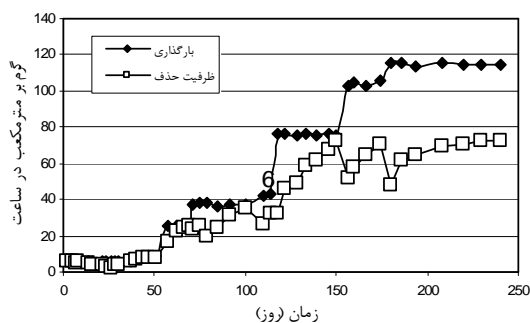
۲-۲. مواد بستر

آکند بستر مخلوطی از مکعب های چوبی با ابعاد ۰/۶-۰/۵ cm و کمپوست کارخانه کهریزک با دانه بندی ۲-۵ mm به نسبت حجمی



شکل ۲. مقایسه بازدهی سیستم با تغییرات غلظت ورودی

برای بررسی تاثیر غلظت ورودی در عملکرد بیوفیلتر، به تدریج میزان آلاینده ورودی افزایش یافت. هر بار پس از افزایش غلظت TEA ورودی و افزایش و تثبیت بازدهی حذف مجدداً غلظت آلاینده ورودی اضافه می‌شد. نتایج نشان داد که با افزایش بارگذاری روی سیستم ابتدا بازدهی کاهش اما پس از مدتی مجدداً افزایش می‌یافت. کاهش بازدهی سیستم با افزایش غلظت آلاینده می‌تواند به دو علت باشد: اول کمبود جمعیت میکروبی برای تجزیه TEA اضافی و دوم ایجاد حالت بازدارندگی برای میکروارگانیسمها. TEA در غلظتهای بالا میتواند برای میکروبها سمی باشد [۶] ولی نتایج نشان دادند که اثر سمیت و بازدارندگی TEA در غلظت های بالاتر از ۴۰۰ ppm آرومی می‌دهد. بنابراین در غلظت‌های کمتر از این حد می‌تواند به دلیل کمبود جمعیت میکروبی در بستر باشد زیرا به مرور زمان با ثابت ماندن غلظت، بازدهی شروع به افزایش می‌نماید. ظرفیت حذف بستر^۲ نیز در طی زمان کاهش بازدهی سیستم اندکی کاسته می‌شد ولی مجدداً سیر صعودی داشت تا اینکه در بارگذاری ۷۲/۲ g/m³.hr به حد نهایی خود یعنی ۱۱۴ g/m³.hr رسید (شکل-۳). میزان بازدهی حذف در این بارگذاری حدود ۶۳٪ بوده است.



شکل ۳. مقایسه ظرفیت حذف سیستم با تغییرات بارگذاری در بیوفیلتر

۳-۲. تغییرات نیتروژن در بیوفیلتر

بعد از تجزیه TEA توسط باکتری‌ها، گاز آمونیاک تولید می‌شود. نیتروژن موجود در ملکول TEA بخشی در رشد سلول‌های جدید

اسپکتروفتومتر (GBC، UV/VIS مدل 911) در ۲۱۵ nm انجام شد. نمونه‌های استاندارد دقیقاً به همان روش نمونه برداری از هوای خروجی از بستر توسط آماده سازی نمونه‌های معلوم در کیسه‌های مخصوص هوا^۱ تهیه می‌شد، یعنی مقادیر مشخصی از TEA به کیسه مخصوص حاوی ۱۰ لیتر هوا تزریق و سپس در حلال متانول به مدت ۱۵ دقیقه بادی ۳۴۰ ml/min گازشویی می‌شد [۸]. روش نمونه برداری از هوا برای سنجش آمونیاک، گاز شویی در ۲۵ میلی‌لیتر آب مقطر (به همان طریق نمونه برداری برای سنجش TEA) بود. نمونه‌ها با استفاده از معرف نسلر و قرائت در طول موج ۴۲۵ نانومتر با اسپکتروفتومتر (Dr/2000 Hach) مورد سنجش قرار گرفته و به کمک منحنی استاندارد برحسب ppm تعیین غلظت می‌شدند. برای سنجش نیتروژن آمونیاکی آکند، بر روی حدود ۲-۱/۵ ماده بستر ۵۰ ml آب مقطر اضافه و به مدت ۱۰ تا ۱۵ دقیقه به هم زده می‌شد.

سپس نمونه‌های صاف شده، طبق روش استاندارد نسلر سنجش می‌شدند. سنجش نیتروژن نیتراته مطابق دستورالعمل شماره NO₃-D ۴۵۰۰- کتاب روش‌های استاندارد آزمایش آب و فاضلاب با استفاده از الکتروود انتخابی نیترا، انجام می‌شد. سنجش نیتروژن کجلدال کل به روش میکرو کجلدال و مطابق دستورالعمل پیشنهادی توسط شرکت Hach و با استفاده از دستگاه هاضم ساخت شرکت مذکور و به دنبال آن اندازه‌گیری نیتروژن آمونیاکی به روش نسلر انجام می‌شد.

نیتروژن آلی از تفاضل مقادیر نیتروژن آمونیاکی از کجلدال کل به دست می‌آمد. برای سنجش pH حدود ۲ گرم از ماده بستر را در ۵۰ ml آب مقطر وارد کرده، بعد از مدت ۱۰ تا ۱۵ دقیقه هم زدن با دستگاه pH متر (مدل ۶۹۱ ساخت کارخانه متروم) قرائت می‌شد. جهت تعیین رطوبت حدود ۳ تا ۵ گرم نمونه از بستر جامد برداشته و بعد از توزین به مدت ۲۴ ساعت در اتوکلاو با دمای ۱۰۶ درجه سانتی گراد قرار می‌گرفت و بعد از سرد شدن نمونه در دسیکاتور، مجدداً توزین و سپس درصد رطوبت بستر تعیین می‌شد.

۳. نتایج و بحث

۳-۱. تاثیر غلظت

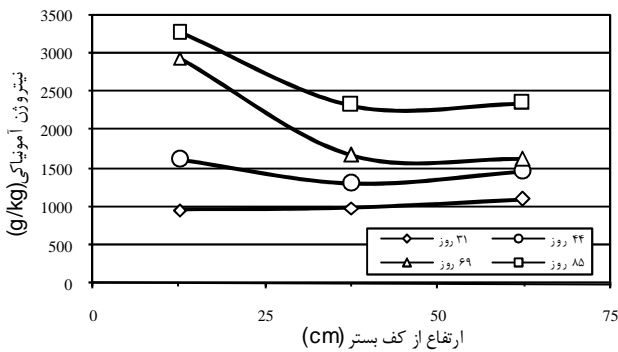
در شروع عملیات بیوفیلتر، TEA با غلظت ۲۰ ppm وارد شد. بعد از سازگاری اولیه میکروبها ۳۷ روز طول کشید تا بازدهی به ۱۰۰٪ رسید. همانگونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، در هنگام راه‌اندازی بستر، بازدهی سیستم از روز پنجم شروع به کاهش کرد و تا روز ۲۶ ام این روند ادامه داشت از آن به بعد افزایش بازدهی آغاز شد و تا روز ۳۷ ام به ۱۰۰٪ رسید. این تغییر بازدهی حذف در زمان راه‌اندازی مربوط به خاصیت جذب بستر و آغاز فعالیت میکروبها بود.

². Elimination Capacity (EC)

¹. Tedlar Bag

۲-۳-۲. یون آمونیوم

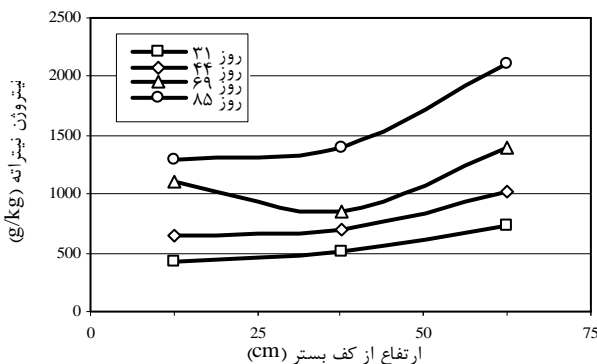
آمونیاک آزاد شده برحسب نیاز می تواند در رشد سلول های جدید شرکت کند و مابقی به صورت NH_4^+ آزاد تجمع یابد. نتایج تحقیق نشان داد که با گذشت زمان یون آمونیوم در بستر افزایش یافته است. اما روند تغییرات آن در طول بستر یکنواخت نبوده به طوری که سنجش نیتروژن آمونیاکی در سه بخش بستر نشان داد که بخش اول بالاترین میزان نیتروژن آمونیاکی را داشته است و بخش دوم و سوم تقریباً یکسان ولی میزان کمتری داشته اند. این امر می تواند به دلیل تبدیل نیتروژن آمونیاکی به فرم های دیگر نیتروژن باشد. شکل ۵ نیتروژن آمونیاکی را در بخش های سه گانه بستر نشان می دهد.



شکل ۵. مقایسه تغییرات نیتروژن آمونیاکی در طول راکتور بیوفیلتر هنگام بیوفیلتراسیون TEA

۳-۲-۳. یون نیترات

یون آمونیوم توسط میکروارگانیسمها به یون نیترات تبدیل می شود اما این تغییر و تبدیل در بستر یکنواخت نیست و روند تغییر آن در بستر برعکس تغییرات نیتروژن آمونیاکی است. به طوری که بخش اول کمترین میزان نیتروژن نیتراته را دارد که می تواند به دلیل رشد کمتر نیتریفایرها یا ازدیاد گاز آمونیاک در این بخش باشد. گاز آمونیاک می تواند به عنوان یک بازدارنده در رشد باکتری های نیترات ساز عمل نماید. شکل ۶ تغییرات نیتروژن آمونیاکی را در سه بخش بستر نشان می دهد.



شکل ۶. مقایسه تغییرات نیتروژن نیتراته در طول راکتور بیوفیلتر هنگام بیوفیلتراسیون TEA

شرکت می کند و اضافه آن به صورت یون آمونیوم و نیترات در بستر تجمع می یابد.

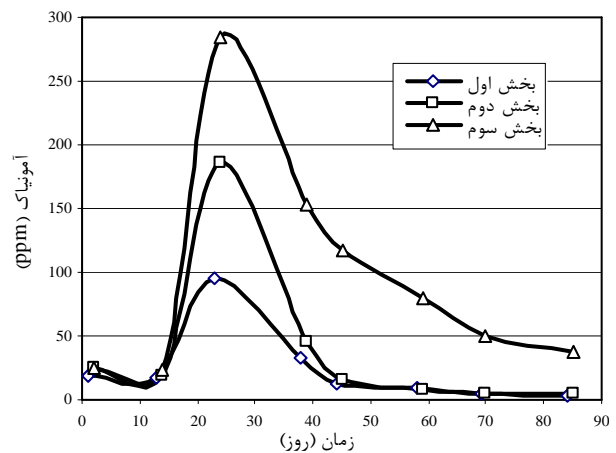
کربن آلی نیز بعد از تجزیه TEA هم به عنوان منبع انرژی وهم در سنتز ماده آلی سلولی شرکت می کند. نتایج تحقیق نشان داد که با تثبیت غلظت TEA ورودی در ۱۸۰ ppm بیش از ۹۰٪ آلاینده ورودی حذف می شود. طی ۸۴ روز تثبیت غلظت آلاینده ورودی، سنجش ترکیبات مختلف نیتروژن در گاز خروجی از سیستم و بستر بیوفیلتر انجام شد که نتایج آن در زیر مشاهده می شود

۳-۲-۱. گاز آمونیاک

غلظت گاز آمونیاک خروجی از سیستم در ابتدا روند صعودی دارد زیرا سرعت تجزیه TEA بالا بوده و فرصت کافی برای یونیزه شدن تمام آن در بستر وجود ندارد. در عین حال تبدیل گاز آمونیاک به یون آمونیوم تابع pH محیط و دماست. چون دما در زمان بیوفیلتراسیون ثابت نگه داشته می شود، تاثیری در این تبدیل ندارد ولی محیط متاثر از TEA تجزیه نشده، خاصیت بازی پیدا می نماید (TEA دارای قدرت بازی ۱۰ برابر بیش از آمونیاک است)، pH در ابتدا افزایش می یابد و این امر باعث می شود که گاز آمونیاک یونیزه نشده در هوای خروجی افزایش یابد.

با کامل شدن تجزیه TEA و کاهش pH یون آمونیوم در بستر افزایش یافته و گاز آمونیاک خروجی رو به کاهش می گذارد. نتایج نشان می دهند که تا روز ۸۴ ام به کمتر از ۲۵ ppm رسیده است (استاندارد آمونیاک در هوای تنفسی). شکل ۴ تغییرات گاز آمونیاک خروجی را هنگام ثابت بودن غلظت TEA ورودی در بخش های مختلف بستر نشان می دهد.

در این شکل مشاهده می شود که انتشار گاز آمونیاک به تدریج در طول بسترتا روز ۲۴ ام افزایش داشته و سپس رو به کاهش گذاشته است. این امر نشان دهنده فعالیت مؤثر باکتریهای تجزیه کننده TEA در طول بستر می باشد.



شکل ۴. مقایسه بخش های مختلف بستر از نظر انتشار گاز آمونیاک در طول فرآیند بیوفیلتراسیون

۳-۲-۴. جرم آلی

روند تغییرات نیتروژن آلی در بستر بیوفیلتر نشان داد که از روز ۱۳ ام به بعد نیتروژن آلی رشد قابل توجه داشته به طوری که بعد از ۷۰ روز تقریباً ۱۰ برابر شده است. این امر نشان دهنده رشد سلولی و افزایش بیومس بوده و می تواند به عنوان یک عامل بازدارنده باعث مسدود شدن خلل و فرج بستر شود. ز طرفی رشد بیومس و یا به عبارتی افزایش میکروارگانیزمها، تجزیه TEA و تغییر و تبدیل نیتروژن را بهبود می بخشد. نتایج نشان داد که در این غلظت آلاینده ورودی، بیومس تولید شده تغییر چندانی در افت فشار ایجاد نکرده و عملکرد بیوفیلتر در تجزیه آلاینده و تشکیل ترکیبات مختلف نیتروژن مطلوب بوده است. شکل ۷ تغییرات نیتروژن آلی را در طول بیوفیلتراسیون در غلظت ورودی ثابت نشان می دهد.

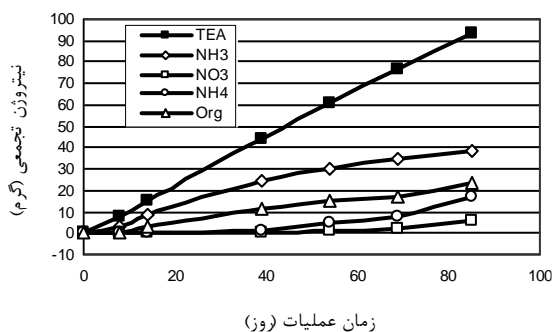
۳-۲-۵. موازنه نیتروژن و مکانیسم تبدیل بیولوژیکی

نتایج بیوفیلتراسیون در غلظت ۱۸۰ ppm در جدول ۲ مشاهده می شود. ارقام ستون دوم جدول مربوط به TEA حذف شده در روز برحسب نیتروژن است. نیتروژن به صورت های مختلف یعنی گاز آمونیاک و یونهای نیترات و آمونیوم و نیتروژن ماده آلی در بستر بیوفیلتر و در نشتاب خروجی از راکتور در ستون های بعدی جدول قرار گرفته است. نمونه برداری ها در غلظت ثابت ۱۸۰ ppm که راکتور به حالت پایا رسیده بود انجام و نتایج آنها ثبت شده است. بعضی از ارقام جدول مذکور به این دلیل که تغییرات روزانه نیتروژن در آکند ثبت می شد و گاه مقادیر حاصل از سنجش، کمتر از مقادیر قبلی به دست می آمد، با علامت منفی مشاهده می شود.

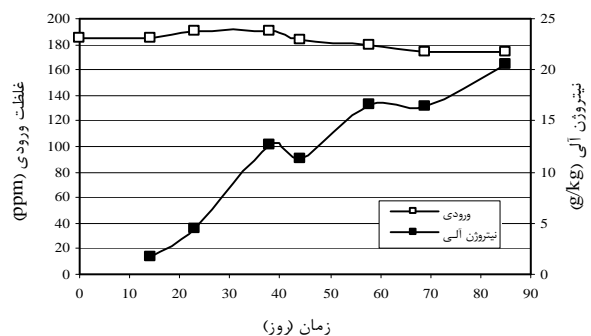
جدول ۲. نتایج سنجش نیتروژن در طول بیوفیلتراسیون در غلظت ورودی ۱۸۰ ppm

روز	نیتروژن	۱۳	۲۳	۳۸	۴۴	۵۸	۶۹	۸۴
TEA-N (mg/day)	۱۱۴۵	۱۱۷۳	۱۱۷۳	۱۱۳۶	۱۱۱۱	۱۰۷۴	۱۰۷۴	۱۰۷۴
(mg/day) N-NH ₃	۷۰۹/۷	۵۷۳	۴۱۹/۶	۳۷۳/۳	۳۴۲/۵	۲۸۴/۲	۲۰۰/۹	۲۰۰/۹
N-NO ₃ (mg/day) (نشتاب)	۰/۰۳	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۴۵	۰/۲۳	۰/۲۹	۰/۲۰	۰/۲۰
N-NO ₃ (mg/day) (آکند)	۱۱۰/۳	۶۲/۲	-۵/۴	۲۲۴/۳	۷۲/۹	۳۰۶	۹۵	۹۵
N-NH ₄ (mg/day) (نشتاب)	۰/۱۵	۰/۲۲	۰/۲	۱۰	۱۴/۷	۱۶/۲	۱۱/۲	۱۱/۲
N-NH ₄ (mg/day) (آکند)	۱۱۴/۶	۱۳۴/۶	۱۸۳/۹	۶۷۸/۳	۲۳۴/۹	۳۰۶	۲۷۵/۱	۲۷۵/۱
N-org. (mg/day)		۲۸۴/۶	۵۴۶/۴	-۲۲۰/۳	۳۷۶/۴	-۱۵/۵	۲۵۳/۱	۲۵۳/۱

تجزیه کننده تری اتیل آمین مطلوب بوده، اما تبدیل نیتروژن آمونیاکی آکند به نیتروژن نیتراته توسط باکتریها کامل نبوده است. یکی از علل این امر می تواند بالا بودن دمای بستر باشد زیرا دما در تعادل بین نیتروژن آمونیاکی و گاز آمونیاک موثر است و تعادل مذکور در دمای بالاتر به سمت تولید نیتروژن یونیزه نشده پیش می رود. شکل ۸ نیتروژن تجمعی را نسبت به کل نیتروژن حاصل از تجزیه TEA در بیوفیلتر نشان می دهد.



شکل ۸. موازنه نیتروژن در بیوفیلتر در غلظت ورودی ۱۸۰ ppm



شکل ۷. تغییرات نیتروژن آلی در بستر بیوفیلتر هنگام بیوفیلتراسیون TEA

نتایج نشان می دهد که طی ۸۴ روز ثابت بودن غلظت ورودی در ۱۸۰ ppm، از کل نیتروژن حذف شده، حدود $\frac{1}{3}$ را گاز آمونیاک، $\frac{1}{3}$ را نیتروژن آمونیاکی و $\frac{1}{3}$ بقیه رانیتروژن نیتراته و نیتروژن آلی تشکیل داده اند. این محاسبات نشان می دهد که فعالیت باکتریهای

and Temperature on the Biofiltration of Toluene Vapors"
Journal of Environmental Management, Vol. 84, No. 2,
2007, pp.115-122.

- [4] Znad, H.T., Katoh, K., Kawase, Y., "High Loading Toluene Treatment in a Compost Based Biofilter Using up-Flow and Down-Flow Swing Operation", Journal of Hazardous Materials, Vol. 141, No. 3, 2007, pp. 745-752.
- [5] Ho, K.L., Chung, Y.C., Lin, Y.H., Tseng, C.P., "Microbial Populations Analysis and Field Application of Biofilter for the Removal of Volatile-Sulfur Compounds From Swine Wastewater Treatment System", Journal of Hazardous Materials, Vol. 152, No. 2, 2008, pp. 580-588.
- [6] Ding, Y., Shi, J.Y., Wu, W.X., Yin, J., Chen, Y.X., "Trimethylamine (TMA) Biofiltration and Transformation in Biofilters", Journal of Hazardous Materials, Vol. 143, No. 1-2, 2007, pp. 341-348.
- [7] Ho, K.L., Chung, Y.C., Lin, Y.H., Tseng, C.P., "Biofiltration of Trimethylamine, Dimethylamine, and Methylamine by Immobilized *Paracoccus* sp. CP2 and *Arthrobacter* sp. CP1" Chemosphere, Vol. 72, No. 2, 2008, pp. 250-256.
- [8] Kim, K.H., Kim, D., "A Combination of Tedlar Bag Sampling and Solid-Phase Microextraction for the Analysis of Trimethylamine in Air: Relationship Between Concentration level and Sample Size", Microchemical Journal, Vol. 91, No. 1, 2009, pp. 16-20.

۴. نتیجه گیری

- نتایج بیوفیلتراسیون تری اتیل آمین را می توان چنین خلاصه نمود:
- تری اتیل آمین قابلیت تجزیه بیولوژیکی در یک بیوفیلتر رادارد و تاغلظت ۱۸۰ ppm در دمای ۳۰°C و رطوبت ۵۵-۵۰٪ در محدوده pH ۸ تا ۹، بیش از ۹۰٪ بازدهی داشته است. حد اکثر میزان حذف در بارگذاری ۱۱۴g/m³,hr برابر ۷۲/۲g/m³,hr بوده است.
 - نیتروژن حاصل از تجزیه TEA ابتدا به شکل گاز آمونیاک در هوای خروجی و سپس به صورت نیتروژن آمونیاکی، نیتراته و آلی در بستر تغییر شکل می دهد. تغییرات نیتروژن در بستر یکنواخت نبوده به طوری که نیتروژن آمونیاکی در اولین بخش نسبت به ورودی ولی نیتروژن نیتراته در بخش سوم بستر بیش از سایر بخشهاست.
 - موازنه جرم نیتروژن در بیوفیلتر نشان داد که از کل نیتروژن تجزیه شده طی ۸۴ روز بیوفیلتراسیون در غلظت ۱۸۰ ppm، حدود یک سوم را گاز آمونیاک، یک سوم را نیتروژن آمونیاکی و یک سوم بقیه رانیتروژن نیتراته و نیتروژن آلی تشکیل داده اند.
 - با تثبیت غلظت ورودی بعد از حدود یک ماه، گاز آمونیاک کاهش یافته و تغییر و تبدیل بیولوژیکی در بستر باعث تبدیل آن به سایر ترکیبات نیتروژن دار شده است. به طوری که بعد از حدود سه ماه، میزان گاز آمونیاک خروجی از راکتور که به عنوان آلاینده ثانویه مطرح است به پایین تر از استاندارد هوای تنفسی رسیده است.
 - روند تغییرات نیتروژن در بستر بیولوژیکی نشان می دهد که تا آخرین مرحله می توان تری اتیل آمین و محصولات حاصل از تجزیه بیولوژیکی این آلاینده را حذف نمود. با وجود آنکه استفاده از روشهای بیولوژیکی در حذف گازهای آلاینده های گازی بسیار متداول است ولی تا آنجائیکه نویسندگان مقاله اطلاع دارند تا کنون در مورد این آمین چنین بررسی کاملی در مورد محصولات جانبی آن انجام نشده است.
 - استفاده از روش بیوفیلتر برای حذف تری اتیل آمین در صنایع خودروسازی بسیار قابل توجه است، زیرا با صرف کمترین هزینه وبا بالاترین راندمان می توان این ماده را که از بخش ریخته گری آزاد می شود، تجزیه و از محیط خارج نمود.

۵. مراجع

- [1] Devinny, J.S., Deshusses, M.A., Webster, T.S., "Biofiltration for Air Pollution Control", Lewis publishers, 1999.
- [2] Rene, E.R., Murthy, D.V.S., Swaminathan, T., "Performance Evaluation of a Compost Biofilter Treating Toluene Vapours", Process Biochemistry, Vol. 40, No. 8, 2005, pp.2771-2779.
- [3] Vergara-Fernández, A., Molina, L.L., Pulido, N.A., Aroca, G., "Effects of Gas Flow Rate, Inlet Concentration