مقاله پژوهشی

بیورآکتور امولسیونی : فن آوری نوین در تصفیه زیستی ترکیبات آلی فرار هوا

دکتر فرشید قربانی شهنا*، دکتر فریده گلبابائی**، دکتر جواد حامدی***

دریافت : ۸۸/۱۲/۷ ، پذیرش : ۸۹/۲/۲۰

چکیده:

مقدمه و هدف: تصفیه زیستی فن آوری نوینی در تصفیه آلاینده های هوا است. این فن آوری امروزه می تواند جایگزین مناسبی برای روشهای تصفیه شیمیائی و فیزیکی باشد. در بین روشهای تصفیه زیستی، بیورآکتور امولسیونی گزینه جدیدی است که مشکلات بیورآکتورهای مرسوم را ندارد. در این رآکتور مشکل انسداد بستر در بیورآکتورهای مرسوم با استفاده از حبابهای فعال زیستی به عنوان جایگزین بستر برطرف شده است. میزان جذب آلاینده در این بیورآکتورها نیز با استفاده از یک فاز آلی زیستی مخلوط با فاز مایع افزایش یافته است و لذا این رآکتور می تواند برای تراکمهای بالای تولوئن ورودی بکار رود. هدف از این مطالعه طراحی بیورآکتور امولسیونی برای تصفیه بخارات تولوئن و تعیین شرایط بهینه پارامترهای عملیاتی برای عملکرد مداوم آن بوده است.

روش کار: در این مطالعه تجربی ـ تحلیلی ابتدا میکروارگانیسمهای غالب تجزیه گر آلاینده شناسائی، استخراج و جهت تزریق به بیورآکتور تغلیظ شدند. در مرحله بعد پس از طراحی بیورآکتور، تأثیر عوامل مختلفی همچون زمان ماند، مقدار اکسیژن و نوع و غلظت فاز آلی بر روی عملکرد بیورآکتور مورد بررسی قرار گرفته و شرایط بهینه برای فعالیت مداوم بیورآکتور انتخاب گردید. در مرحله آخر عملکرد مداوم بیورآکتور در شرایط بهینه مورد پایش قرار گرفت.

نتایج: یافته های تجربی نشان داد که زمان ماند ۱۵ ثانیه، مقدار اکسیژن ٤٠درصد و غلظت ٤ درصد حجمی ان-هگزادکان شرایط بهینه برای بیورآکتور بوده اند. میانگین ظرفیت و بازده حذف بیورآکتور برای تراکم بخار تولوئن ورودی حدود $1\ g/m^3$ به ترتیب $231{,}68\ g/m^3h$ و ٨٨/٤٤٪ بود. مدلهای آماری استخراج شده حداکثر ظرفیت حذف این بیورآکتور را $426{,}21\ g/m^3h$ پیش بینی کرده است.

نتیجه نهایی: با توجه به اینکه ظرفیت حذف این بیورآکتور چندین برابر بیورآکتورهای دیگر می باشد، این بیورآکتور پتانسیل جایگزینی بجای بیوفیلترها و صافیهای چکنده زیستی را دارا می باشد.

کلید واژه ها: آلودگی هوا / بیورآکتور امولسیونی / تصفیه زیستی / تولوئن

مقدمه :

ترکیبات آلی فرار(Volatile Organic Compunds(VOC_s) گروه مهمی از آلاینده های هوا می باشند. این ترکیبات بدلیل فشار بخار بالایی که دارند به سهولت تبخیر شده و قادرند در یک محدوده بزرگ منتشر و باعث آلودگی آب، خاک و هوا گردند. انتشار این آلاینده ها در اتمسفر زمین باعث مشکلاتی از جمله رقیق شدن لایه ازن، ایجاد ازن در جو نزدیک زمین، اثر گلخانه ای، واکنشهای فوتوشیمیایی و اثرات زیانبار برای افراد مواجهه یافته، گیاهان، حیوانات و اکوسیستم ها می گردند(۳-۱).

طبق بررسی های انجام شده وسایل نقلیه موتوری و فرآیندهای صنعتی از جمله صنایع نفت و پتروشیمی و صنایع شیمیایی منابع اصلی تولید و انتشار VOC_s در هوا می باشند(۲).

* استادیار گروه بهداشت حرفه ای دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی همدان (fghorbani@umsha.ac.ir)

** استاد گروه بهداشت حرفه ای دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی تهران

*** استادیار گروه میکروبیولوژی دانشکده زیست شناسی دانشگاه تهران

در بین VOCها، هیدروکربنهای عطری تک حلقه ای مثل بنزن، تولوئن و گزیلن، آلاینده های سمی هستند که به عنوان آلاینده های اولویت دار از لحاظ مخاطره زایی توسط مراجع مختلف مثل آژانس حفاظت از محیط زیست آمریکا (Environmental Protection Agency (EPA طبقه بندی شده اند(۴،۵).

با شتاب گرفتن فعالیتهای صنعتی مخصوصاً در کشورهای در حال توسعه، انتشار چنین آلاینده هایی به محیط زیست افزایش یافته است و مشکلاتی در محدود کردن انتشار این آلاینده های صنعتی در محدوده مرزهای ملی کشورها بوجود آمده است لذا کنترل این آلاینده ها جزء اولویتهای اصلی محسوب می گردد(۶).

روشهای مرسوم کنترل شیمیایی و فیزیکی این آلاینده ها عمدتاً شامل سوزاندن، اکسیداسیون حرارتی و کاتالیستی، جذب سطحی و عمقی و میعان می باشند. این روشها عموماً دارای هزینه های بالا بوده و برخی از آنها در حین فرآیند تصفیه آلاینده اصلی، آلاینده های ثانویه و خطرناک تولید می کنند(۱۰-۷).

تصفیه زیستی آلاینده های هوا یکی از روشهای نوین می باشد که با وجود آنکه بیش از یک قرن است که برای تصفیه فاضلاب استفاده می شود اما قدمت آن برای تصفیه بوها به دهه ۱۹۵۰م و برای کنترل VOCها به دهه ۱۹۹۰م بر می گردد(۱۱،۱۲). این روش بدلیل هزینه کمتر در مقایسه با سایر روشهای تصفیه و عدم تولید آلاینده ثانویه خطرناک، جایگزین مناسبی برای روشهای فیزیکی و شیمیایی می باشد بخصوص در مواردی که دبی جریان هوای آلوده زیاد و تراکم آلاینده نسبتاً کم است(۱۴-۱۲).

تجهیزات تصفیه زیستی آلاینده ها که بیورآکتور نامیده می شوند دارای طرحهای مختلفی هستند که رایجترین آنها بیوفیلترها و صافی های چکنده زیستی می باشند این بیورآکتورها علیرغم مزایای مختلفی که دارند دارای معایبی نیز هستند که مهمترین آنها عبارتند از: الف- عدم کارآیی مناسب برای تراکمهای بالای آلاینده ها که منجر به ظرفیت حذف محدود آلاینده ها می شود ب- انسداد بستر آنها به علت تجمع توده زیستی میکروارگانیسمها و افزایش افت فشار سیستم(۷،۱۲).

پائین بودن ظرفیت حذف بیورآکتورها نقصی است که در بسیاری از صنایع می تواند کاربرد آنها را محدود سازد. به منظور برطرف نمودن این مشکل بیورآکتورهای مرسوم، در طی سالهای اخیر پژوهشهای متعددی انجام شده است که منجربه معرفی بیورآکتورهای دوفازی مجزا (TPPB) Two Phase Partitioning Bioreactor از اوایل دهه ۲۰۰۰ م شده است. در این فناوری، از یک فاز آلی برای جذب آلاینده هایی که قابلیت انحلال پایین در فاز آبی دارند، استفاده می شود. این فاز آلی پس از جذب آلاینده در اختلاط و تماس با فاز آبی، آلاینده را به مرور تحویل فاز آبی می دهد تا توسط میکروارگانیسمها تجزیه گردد. حسن دیگر این بیورآکتور آن است که تراکمهای بالاتری از آلاینده ها را نسبت به بیورآکتورهای مرسوم می تواند جذب و مورد تجزیه زیستی قرار دهد به طوری که ظرفیت حذف آن چندین برابر بیورآکتورهای مرسوم گزارش شده است(۸،۱۲،۱۵،۱۶). برای حل مشکل انسداد بستر بیورآکتورها، استفاده از یک سورفاکتانت زیستی که در اثر عبور جریان گازی از داخل آن تولید حباب می کند، پیشنهاد شده است. در این روش جریان هوای آلوده از داخل فاز آبی حاوی میکروارگانیسمها و سورفاکتانت زیستی عبور کرده و تولید حبابهای بسیار ریز زیادی می کند. در این مکانیسم حبابهای ریز متحرک جایگزین بستر بیورآکتور می شوند و قادرند زمان و سطح تماس کافی بین فازهای آبی و گازی را فراهم نمایند(۱۷،۱۸). بیورآکتورهای امولسیونی Emulsion Bioreactor (EBR) فن آوری مرکب از دو مکانیسم مذکور می باشد که اولین بار توسط کان و همکاران برای تصفیه زیستی آلاینده ها در سال ۲۰۰۳م معرفی گردید(۱۹). در این بیورآکتور از یک فاز آلی همراه با فاز آبی (البته به نسبت کمتر از مقدار مورد استفاده در بیورآکتور دو فازی) جهت کمک به جذب آلاینده استفاده می شود. علاوه بر آن از یک سورفاکتانت زیستی جهت ایجاد حباب یا کف در ستون بیورآکتور استفاده می شود. این بیورآکتور فاقد بستر بوده و سطح تماس اصلی آلاینده با میکروارگانیسمها، حبابهای ایجاد شده است لذا مشکلات مربوط به گرفتگی و انسداد بستر در این نوع بیورآکتور وجود ندارد. در این بیورآکتور، برای حصول به نتایج رضایتبخش نیاز به دانسیته بالائی از میکروارگانیسمها در فاز آبی نسبت به بیورآکتورهای دیگر می باشد. همچنین میکروارگانیسم یا کنسرسیوم میکروبی مورد استفاده باید قدرت تجزیه کنندگی بالایی برای آلاینده هدف دارا باشد(۱۹،۲۰).

هدف از این مطالعه طراحی بیورآکتور امولسیونی برای

تصفیه بخارات تولوئن (به عنـوان نماینـده ای از ترکیبـات آلی فرار) و تعیین تـأثیر تغییـرات پارامترهـای عملیـاتی و ساختاری بر عملکرد بیورآکتور و تعیین شرایط بهینه آنهـا بوده است. پس از تعیین شـرایط بهینـه عملیـاتی، پـایش عملکرد مداوم بیورآکتور و تعیین بـازده و ظرفیـت حـذف این بیورآکتور از اهداف دیگر این مطالعه است.

روش کار:

میکروارگانیسم و مواد مغذی: در ایـن مطالعـه تجربـی ـ تحلیلی بـه منظـور شناسـائی، اسـتخراج و تکثیـر میکـرو ارگانیـسمهای تجزیـه کننـده تولـوئن بـه عنـوان نماینـده VOC_s، از خاک اطراف مخازن بنزین انبار مرکزی شـرکت پخش و پالایش فرآورده های نفتی همدان، چندین نمونـه در شرایط استریل برداشته و در ظروف پلاستیکی درب دار ریخته شدند. نمونه های خاک گرفته شـده در آزمایـشگاه ابتدا توسط سرم نمکی شسته و محلول سیاه حاصله به ظرف دیگری منتقل و به مدت ۶ ساعت در محیط گرم و تاریک نگهداری شد. پس از این مدت، محلول شفاف بـالای ایـن ظرف در داخل ظرف شیشه ای دیگر منتقل و به نسبت ۱ به ۳ با محلول مغذی معدنی مخلوط گردیـد. کلیـه مـواد، ظروف و وسایل مصرفی قبل از استفاده استریل می شدند. محلول معدنی مغذی مورد استفاده دارای عناصـر اصـلی و عناصر ریز مقدار بوده و کلیه اجزاء آن از محصولات شرکت Merck آلمان و از نوع Analytical grade بوده اند. ترکیب عناصر اصلی این محلول مغذی به شرح زیر می باشد:

KH_2PO_4: 1 g/L, K_2HPO_4: 1 g/L, KNO_3: 1 g/L, NaCl: 1 g/L, $MgSO_4$: 0.2 g/L

ترکیب عناصر ریز مقدار مورد استفاده نیـز بـه شـرح زیـر می باشد:

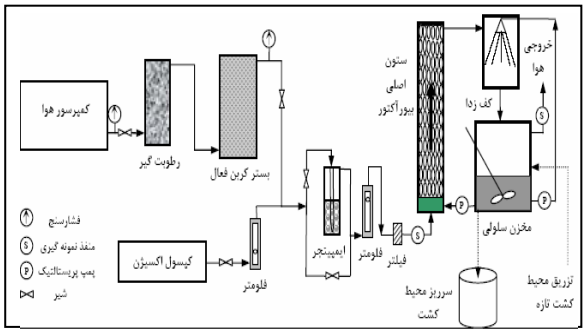
$CaCl_2.2H_2O$: 26 mg/L, EDTA $Na_4(H_2O)_2$: 5.2 mg/L, FeCl2.4H2O: 1.5 mg/ L, $CoCl_2.6H_2O$: 0.12 mg/L, $MnCl_2$.$2H_2O$: 0.1 mg/L, $ZnCl_2$: 0.07 mg/L, H_3BO_3: 0.06 mg/L, $NiCl_2.6H_2O$: 0.025 mg/L, $NaMoO_4.2H_2O$: 0.025 mg/L, $CuCl_2.2H_2O$: 0.015 mg/L.

مرحله بعدی مطالعه فراهم نمودن شـرایط رشـد و تکثیـر میکروارگانیسمهای تجزیه کننده تولوئن و پایش روند رشد آنها و تجزیه تولوئن و در نهایت شناسائی آنهـا مـی باشـد. بدین منظور ۶۰ ml از محلول مخلـوط نمکهـای مغـذی و سرم حاوی میکروارگانیسم در داخل بطریهـای شیـشه ای ۳۰۰ ml ریخته و درب آنها با درپوش از جنس بوتیل رابـر کاملاً مسدود می شد. ۳ بطری به این روش به عنـــوان نمونه اصلی و یک بطری دیگر به عنوان نمونه شاهد آمـاده گردید. در نمونه شاهد به میزان ۱درصـد (وزنـی حجمـی) ترکیب سیانید سدیم اضافه شد. این ترکیب توانائی از بین بردن میکروارگانیسمهای موجود در محلول مذکور را دارد. قبل از بستن درب بطریها ابتدا با استفاده از هوای عبـوری از فیلتر استر سلولزی با پورسایز ۰/۲۲ میکرومتری (هـوای استریل) کلیه نمونه ها به مدت ۳۰ دقیقه هوادهی میشدند. پس از بستن درب بطریها به هر نمونه به میزان ۱۰۰ mg/l تولوئن تزریق گردید. فضای خالی ۲۴۰ میلی لیتری بـالای بطریها، هوای کافی را برای تجزیه هوازی میکروارگانیسمها در طی مدت آزمایش را تضمین می نمـود. پـس از آمـاده سازی نمونه ها، بطریهـا در محـیط تاریـک و دمـای اتـاق حدود ۳۰ ^{o}C بر روی شیکر با سرعت چرخش ۱۵۰ بـار در دقیقه به مدت ۵ روز قرار گرفتند. هدف مرحله اول آزمایشها ایجاد شرایط و فرصـت کـافی بـرای رشـد و تکثیـر اولیـه میکروارگانیسمهای غالب بود. در این مرحله هیچ سنجشی انجام نگرفت. پس از اتمام ایـن مـدت، درب کلیـه بطریهـا برداشته شده و مجدداً در شرایط استریل هـوادهی شـدند. هـوادهی تـا زمانیکـه مقـدار اکـسیژن محلـول (DO) Dissolved Oxygen به میزان ۸۰ درصد برسد ادامـه مـی یافت. انـدازه گیـری DO توسـط دسـتگاه HATCH DO Meter (Model sesion6,USA) انجام میشد. قبل از بسته شدن درب بطریها عـلاوه بـر مقـدار DO، میـزان کـدورت محلولها با تعیین ضریب جذب اسپکتروفتومتری نمونه هـا در طـــول مـــوج ۶۰۰ nm بـــا اســـتفاده از دســـتگاه اســـــــــپکتروفتومتر UV-Visible مـــــــــدل UV-1700 Schimadzu pharmaspec سنجیده شد. میزان کدورت محلولها با استفاده از جدول مک فارلند می توانـد نشان دهنده جمعیت میکروبی باشـد(۲۱). پـس از بـستن درب بطریها مجدداً ۱۰۰ mg/l تولوئن به نمونه تزریق شده و بطریها بر روی شیکر قرار گرفتند. بـرای بررسـی تجزیـه تولوئن توسط میکروارگانیسمها، دو ساعت پس از افـزایش آن (زمان لازم برای به تعادل رسیدن تراکم تولوئن در فـاز آبی و گازی) با استفاده از یک سرنگ گاز بندی هامیلتون، ۱۰۰ µl از هوای فضای بالای بطری نمونه گیـری و بطـور مستقیم بـه دسـتگاه گازکرومـاتوگراف مجهـز بـه دتکتـور یونش شعله ای (FID) مـدل UNICAM 4600 و سـتون شیـشه ای پرشـده از-10% SE 30 on chromosorb W AW-DMCS 100-120 با ابعاد 1.5m×4mm تـزریـــق

می گردید و مساحت پیک حاصله ثبت می شد. دمای ستون درآزمایشها ۵۰°C و دمای تزریق کننده و آشکار ساز ۲۰۰°C بوده است. با مقایسه مساحت پیک حاصله با منحنی استاندارد در فاز گازی، تراکم تولوئن مشخص می گردید. سنجش تراکم تولوئن، DO و ضریب جذب اسپکتروفتومتری هر ۱۲ ساعت انجام شده و روند تغییرات ثبت می شد. با مصرف کامل تولوئن مجدداً درب بطریها باز شده و در مراحل بعدی مقادیر ۲۰۰ mg/l و ۳۰۰ mg/l از تولوئن افزوده و این روند مورد بررسی قرار گرفت. شایان ذکر است که در آخرین فاز آزمایشها قبل از افزایش ۳۰۰ mg/l تولوئن، بخشی از محلول نمکی مغذی با محلول جدید تعویض گردید تا تأثیر محیط کشت غنی تر بر روند مصرف تولوئن و تکثیر میکروارگانیسمها مورد بررسی قرار گیرد. در هر فاز از آزمایش نیز نمونه هائی از این محلول حاوی میکروارگانیسم ها به محیط کشت نوترینت آگار و آگار خونی منتقل و برای کشت و تشخیص به آزمایشگاه میکروبیولوژی فرستاده می شد.

در مرحله بعدی آزمایش که با هدف تغلیظ محیط کشت مایع حاوی میکروارگانیسمها انجام شد، در ابتدا توده میکروبی جامد کلیه بطریهای اصلی پس از سانتریفوژ شدن در داخل بطری ۳ لیتری ریخته شد و حدود ۵۰۰ ml از محلول نمکهای مغذی تازه به آن افزوده گردید. سپس در شرایط استریل بطور مداوم هوای حاوی بخار تولوئن در تراکم حدود ۱ g/l بطور مداوم از داخل آن عبور داده می شد. شرایط مذکور بهترین وضعیت را برای رشد میکروارگانیسمهای تجزیه کننده تولوئن فراهم می نمود. با توجه به نیاز حداقل ۵۰۰ ml محیط کشت غنی از میکروارگانیسم با دانسیته سلولی حداقل ۱۰ g/l برای راه اندازی بیورآکتور اصلی و نیاز به حداقل ۱۰۰ ml از این محیط برای جایگزینی در هر۲۴ ساعت، کشت مداوم توسط بطری ۳ لیتری تا پایان آزمایش ادامه می یافت و هر ۲۴ ساعت به میزان مورد نیاز بیورآکتور از آن برداشته شده و محلول نمکی مغذی تازه جایگزین می شد.

راه اندازی و بهینه سازی بیورآکتور : ساختار اصلی بیورآکتور از چند قسمت تشکیل شده است که شامل یک کمپرسور ۱۵۰ لیتری هوا، کپسول اکسیژن، ستون رطوبت گیر، بستر کربن فعال، سیستم دینامیکی تولید بخار تولوئن، ستون اصلی بیورآکتور، محفظه کف زدا، محفظه نگهداری و اختلاط محیط کشت، پمپ پریستالتیک و سایر اجزاء جانبی مثل فشارسنج، فلومتر، شیرها و رابط ها می باشد. اجزاء و ساختار بیورآکتور امولسیونی مورد استفاده در این مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: اجزاء و ساختار بیورآکتور امولسیونی مورد استفاده در این مطالعه

هوای فشرده خروجی از کمپرسور توسط ستون پرشده سرامیکی ابتدا خشک شده و به منظور حذف هر گونه آلودگی ترکیبات آلی از داخل بستر کربن فعال عبور می کرد. هوای خشک و تمیز خروجی از بستر کربن فعال با نسبت مشخص با اکسیژن مخلوط می گردید. این بیورآکتور بدلیل استفاده از دانسیته سلولی بالای میکروارگانیسمها و نیز انتقال جرمی بالای آلاینده ها از فاز گازی به آبی بدلیل سطح تماس بالای حبابهای تشکیل شده نیازمند اکسیژن مازاد بر مقدار موجود در هوا است تا فرآیند تجزیه زیستی بخوبی انجام شود. با تغییر نسبت مخلوط اکسیژن و هوا، تأثیر درصد اکسیژن بر عملکرد بیورآکتور بررسی و مقدار بهینه آن تعیین گردید. مخلوط اکسیژن و هوا در مرحله بعدی وارد سیستم تولید دینامیکی آلاینده می شد. در این مرحله جریان هوا به دو بخش تقسیم می گردد که یک بخش آن وارد یک ایمپینجر (بطری گاز شوی) حاوی۲۰ ml تولوئن شده و پس از عبور از آن بخار تولیدی از قسمت جانبی ایمپینجر خارج می شود. قسمت دوم هوا بدون عبور از ایمپینجر مجدداً با مخلوط بخار خروجی از آن ترکیب می شود. در این بخش با تغییر دبی هوای دو مسیر می توان تراکمهای مختلف از بخار آلاینده را تولید نمود. در این روش تولید تراکم مشخص آلاینده، با ثابت نگهداشتن دمای اتاق و حجم فاز مایع آلاینده در ایمپینجر می توان به شرایط به نسبت ثابت و قابل کنترلی دست یافت.

این مخلوط بخار آلاینده و هوا قبل از ورود به ستون

بیورآکتور ابتدا از داخل یک فیلتر استر سلولزی با پورسایز ۰/۲۲ میکرونی عبور می کند تا هر گونه آلودگی میکروبی آن مرتفع گردد. کلیه قسمتهای مقاوم در برابر حرارت این بیورآکتور قبل از استفاده با اتوکلاو استریل شده و بقیه قسمتها نیز با عبور بخار اتانول به مدت ۲ ساعت از داخل آنها قبل از آزمایش استریل شدند. استریل کردن این تجهیزات از تداخل سایر میکروارگانیسمهای موجود در هوا یا سطوح بر عملکرد گونه های میکروبی استخراج شده جلوگیری می کند.

جریان هوای حامل غلظت مشخصی از بخار آلاینده در مرحله بعدی از قسمت زیرین ستون بیورآکتور توسط یک توزیع کننده هوا (Air Sparger) وارد آن می شود. ستون بیورآکتور از جنس پلکسی گلاس با ابعاد ۴۸ cm ×۴ cm و حجم تقریبی ۶۰۰ ml مورد استفاده قرار گرفت. جریان گازی ورودی پس از عبور از داخل فاز مایع مخلوط تزریقی به انتهای ستون، تولید حبابهای ریزی می کند که بصورت صعودی به سمت قسمت فوقانی ستون حرکت می کند. فاز مایع توسط یک پمپ پریستالتیک مدل SR25-S300 ساخت شرکت Thomas آمریکا با دبی تنظیمی حدود ۵۰ میلی لیتر در دقیقه بطور مداوم از مخزن سلولی بداخل ستون تزریق می شد. این فاز مایع مرکب از محلول مغذی حاوی میکروارگانیسمها، ان- هگزادکان با غلظت۴ درصد حجمی به عنوان فاز آلی و Triton X-100 با غلظت ۰/۲ درصد حجمی به عنوان سورفاکتانت زیستی بوده است. نوع فاز آلی انتخابی و غلظت آن و همچنین غلظت سورفاکتانت زیستی پس از آزمایشهای اولیه و تعیین مقادیر بهینه، انتخاب گردید.

حبابهای تشکیل شده در داخل ستون پس از طی کل طول ستون از طریق یک دریچه جانبی از آن خارج شده و سپس توسط مایع تزریقی از مخزن سلولی شسته و به مخزن اصلی برگردانده می شد. مایع داخل مخزن سلولی بطور مداوم توسط یک همزن مخلوط شده و مجدداً بداخل ستون تزریق می گردید. به منظور حفظ حیات میکروارگانیسمها و عملکرد مؤثر آنها برای تصفیه مداوم آلاینده، در هر شبا نه روز حدود ۲۰-۱۰ درصد از حجم این محلول تخلیه و محلول مغذی تازه با همان ترکیب جایگزین می گردید. دمای بیورآکتور در طی مدت آزمایش در محدوده °C ۳۲-۲۷ بود.

تأثیر پارامترهای عملیاتی از جمله نوع و درصد بهینه فاز آلی، درصد اکسیژن هوای ورودی، زمان ماند بر روی بازده و ظرفیت حذف بیورآکتور در شرایط مشخص مورد بررسی قرار گرفت و مقادیر بهینه جهت عملکرد مداوم بیورآکتور تعیین گردید. پس از تعیین شرایط بهینه این پارامترها، عملکرد بیورآکتور به مدت ۱۴۴ ساعت مورد پایش قرار گرفت.

روشهای اندازه گیری : برای تعیین بازده حذف (RE) و ظرفیت حذف بیورآکتور (EC)، ابتدا نمونه برداری از آلاینده در فاز گازی قبل و بعد از بیورآکتور بطور مستقیم از جریان هوای ورودی و خروجی از بیورآکتور توسط سرنگهای نمونه گیری گاز بندی شده هامیلتون انجام می شد. برای این منظور از طریق سپتومهای بوتیل رابر تعبیه شده در مسیر ورودی و خروجی هوا سرنگ وارد مسیر شده و با توجه به تراکم آلاینده ، بین ۳۰۰-۱۰۰ µl از فاز گازی نمونه گیری شده و مستقیماً به دستگاه گازکروماتوگراف تزریق می گردید. با مقایسه مساحت پیک حاصله با منحنی استاندارد، تراکم آلاینده تعیین می گردید. در مرحله بعد با توجه به غلظت آلاینده قبل و بعد از بیورآکتور، دبی هوای عبوری و حجم ستون ، بازده و ظرفیت حذف آلاینده توسط بیورآکتور با استفاده از روابط زیر محاسبه می گردید:

$$RE_{(\%)} = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100$$

$$EC_{(gm^{-3}h^{-1})} = \frac{C_{in} - C_{out}}{V} \times Q$$

برای تعیین تراکم آلاینده باقیمانده (تجزیه نشده) در فاز مایع، مایع تخلیه شده بیورآکتور (برای جایگزینی محلولهای نمکی تازه) در داخل سانتریفوژ به مدت ۲۰ دقیقه با ۴۰۰۰ دور در دقیقه قرار گرفته و با جداشدن فاز آلی از آبی آن، از فاز آلی به میزان ۱۰ µl -۵ نمونه گرفته شده و به دستگاه گاز کروماتوگراف تزریق شده و سپس تراکم آلاینده تعیین می شد. برای تعیین ترکیبات واسط تولیدی در حین تجزیه زیستی تولوئن چندین نمونه از فاز مایع بطور مستقل توسط دستگاه گازکروماتوگراف طیف بین جرمی مورد تجزیه قرار گرفت.

غلظت دی اکسید کربن در ورودی و خروجی بیورآکتور با دستگاه Testo model 535 CO_2 meter (Hotek technologies Inc, USA) اندازه گیری می شد. با تعیین اختلاف تراکم دی اکسید کربن ورودی و خروجی بیورآکتور و سپس تعیین مقدار کربن آن و تقسیم آن بر

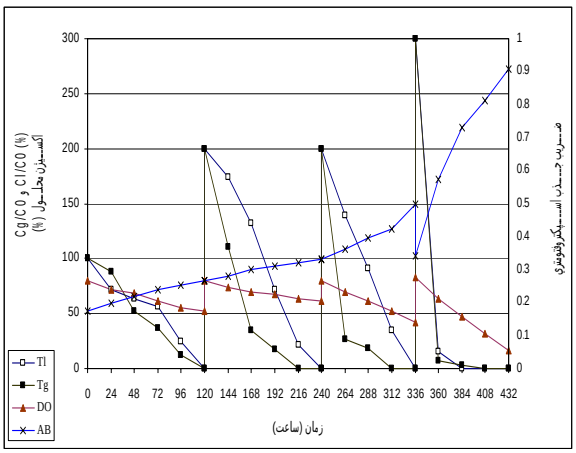
مقدار کربن تولوئن تجزیه شده ($C\text{-}CO_2/C\text{-}Toluene$) درصد کربن معدنی شده محاسبه می گردید.

دانسیته یا تراکم میکروارگانیسمها در فاز مایع نیز با قرار دادن حجم مشخصی از مایع در اجاق با دمای ۷۰°C برای مدت ۱۲ ساعت و توزین جرم توده خشک باقیمانده، برآورد می گردید.

نتایج:

میکروارگانیسمها : نتایج آزمایشهای میکروبیولوژی نمونه های گرفته شده از مایع آبی بطریها در سه نوبت بر روی محیط های کشت آگار مخلوط با آلاینده(ها) و آگار خونی، نشانگر رشد کنسرسیوم میکروبی متشکل از باسیلوس سرئوس، باسیلوس سابتیلیتیس، گونه های سودوموناس، آلکالیژنوس و رودوکوکوس بوده است. با گذشت زمان گونه های آلکالیژنوس و رودوکوکوس غالبتر شدند و پس از تغلیظ، به بیورآکتور تزریق شدند. سویه های خالص این میکروارگانیسم ها پس از جداسازی تحت آزمایشهای تخصصی بیوشیمیایی و مولکولی (16s rDNA) قرار گرفت. نتایج آزمایش نشان داد که سویه های غالب Rhodococcus rhodochrous و Achromobacter Xylosoxidians subsp. Xylosoxidians بوده اند.

روند تغییرات شاخصهای پایشی بطریهای کشت نمونه: تغییرات شاخصهای پایشی برای نمونه های تولوئن نیز در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: روند تغییرات شاخصهای پایشی بطری تولوئن

C_g/C_0: نسبت غلظت در محیط گازی (Head Space) به نمونه شاهد (۱۰۰mg/l)

C_l/C_0: نسبت غلظت در محیط مایع به نمونه شاهد (۱۰۰mg/l)

TL: تولوئن محیط مایع TG: تولوئن محیط گازی DO: اکسیژن محلول

AB : ضریب جذب

نتایج نشانگر آن است که با گذشت زمان سرعت مصرف تولوئن و تعداد میکروارگانیسمهای تجزیه کننده افزایش یافته است بطوریکه در اولین چرخه کار، ۱۰۰ mg/l تولوئن ظرف مدت ۹۶ تا ۱۲۰ ساعت مصرف شده و در سیکل چهارم، بخش اعظم ۳۰۰ mg/l تولوئن در ظرف مدت ۲۴ ساعت مصرف شده است. ضریب جذب اسپکتروفتومتری در این مدت از مقدار ۰/۱۷۵ به میزان ۰/۹۰۹ افزایش یافته است.

بهینه سازی فاز آلی و سورفاکتانت زیستی: دو سورفاکتانت زیستی Silicone DC-100 و Triton X-100 که در مطالعات قبلی(۱۵،۱۹،۲۰،۲۲) به عنوان سورفاکتانت و ماده کف زای زیستی مورد استفاده قرار گرفته بودند تحت آزمایشهای میکروبی و عملیاتی قرار گرفتند. نتایج آزمایشهای میکروبی نشانگر عدم تداخل این سورفاکتانتها در رشد میکروارگانیسمهای تجزیه گر تولوئن بود. از لحاظ عملیاتی نیز هر دو این سورفاکتانتها دارای خاصیت کف زائی مناسبی بودند، اما حبابهای تولیدی توسط Triton X-100 اندکی قوام بهتری نسبت به سورفاکتانت سیلیکونی داشتند بطوریکه حبابهای ایجاد شده توسط Triton X-100 تا زمان ماند ۷/۲ ثانیه و حبابهای ایجاد شده توسط Silicone DC-100 تا زمان ماند حدود ۸ ثانیه قوام خود را حفظ نمودند.

برای این مطالعه سه فاز آلی ان-هگزادکان، الکل اولئیک و ۱- اکتادکان که در پژوهشهای قبلی برای ترکیبات آلی مورد استفاده قرار گرفته بودند (۱۵،۱۹،۲۰،۲۲)، به عنوان فاز آلی انتخاب شدند. در مرحله اول اثرات این ترکیبات بر روند رشد و تکثیر میکروارگانیسمهای تجزیه کننده تولوئن بررسی شد. نتایج کلیه آزمایشهای میکروبی نشانگر عدم تأثیر هر سه فاز آلی مورد آزمایش بر روند رشد و تکثیر این نوع میکروارگانیسمها بوده است. بر اساس نتایج حاصله، هر سه فاز آلی انتخاب شده دارای کارآئی مشابه بوده اما کارآئی ان-هگزادکان اندکی بیشتر از اولئیک الکل و ۱-اکتادکان می باشد. نتایج حاصله در جدول ۱ نشانگر آن است که بازده و ظرفیت حذف بیورآکتور با افزایش درصد فاز آلی تا حدود غلظت ۴ درصدی ان- هگزادکان قابل توجه و در مقادیر بیشتر از آن تقریباً ثابت مانده است. با توجه به این نتایج، غلظت ۴ درصدی ان - هگزادکان به عنوان مقدار بهینه فاز آلی انتخاب گردید.

جدول ۱: تأثیر تراکم ان-هگزادکان در فاز آبی بر ظرفیت و بازده حذف تولوئن توسط بیورآکتور امولسیونی

	غلظت ان هگزادکان(٪)							
	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
بازده حذف (٪)	۷۳/۱	۷۶/۲	۸۳/۶	۸۸/۱۲	۹۲/۹	۹۳/۴	۹۳/۸۱	۹۴
ظرفیت حذف ($g/m^3.h$)	۱۷۵/۴۴	۱۸۲/۸۸	۲۰۰/۶۴	۲۱۱/۴۹	۲۲۲/۹۶	۲۲۴/۱۶	۲۲۵/۱۲	۲۲۵/۶

شرایط آزمایش: زمـان مانـد ۱۵ ثانیـه، غلظـت اکـسیژن ورودی ۴۰٪ تراکم بخار تولوئن ورودی به بیورآکتور $1\ g/m^3$ و دانسیته سلولی $10\ g/l$.

تأثیر زمان ماند گاز بر عملکرد بیورآکتور در حذف بخارات تولوئن: براساس نتایج حاصله در جدول ۲ مشخص گردید که با افزایش زمان ماند بیورآکتور، بازده حذف نیز افزایش می یابـد امـا نهایتاً ظرفیت حذف بیورآکتور کاسته می شود بطوریکه در زمان ماند ۶۰ ثانیه، بازده حـذف ۹۷/۸ درصـد و در زمـان ماند ۱۰ ثانیه، بازده حذف تا ۶۴/۲ درصد کاهش یافته است اما ظرفیت حذف بیورآکتـور در زمـان مانـدهای ۶۰ و ۱۰ ثانیه به ترتیب معادل $58/68\ g/m^3.h$ و ۲۳۱/۱۲ بوده است.

جدول۲ : تأثیر زمان ماند گاز بر ظرفیت و بازده حذف بخار تولوئن

	زمان ماند گاز (S)				
	۱۰	۱۵	۳۰	۴۵	۶۰
بازده حذف (٪)	۶۴/۲	۹۱/۸	۹۳/۷	۹۵/۱	۹۷/۸
ظرفیت حذف ($g/m^3.h$)	۲۳۱/۱۲	۲۲۰/۳۲	۱۱۲/۴۴	۷۶/۰۸	۵۸/۶۸

شرایط آزمایش: غلظـت اکـسیژن ورودی ۴۰٪، غلظـت فـاز آلـی ۴٪، تراکم بخار تولوئن ورودی به بیورآکتور $1\ g/m^3$ و دانسیته سلولی $10\ g/l$

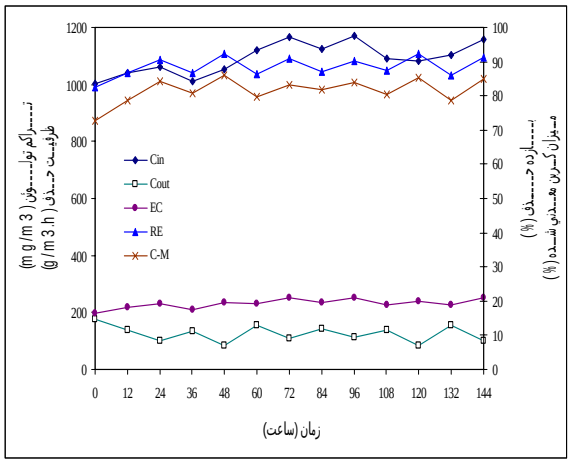
تأثیر تراکم اکسیژن هوای ورودی بیورآکتور بر ظرفیت و بازده حذف بخارات تولوئن : نتایج حاصل از این آزمـایش نـشانگر تأثیر قابل توجه غلظت اکسیژن ورودی بیورآکتور بر بـازده و ظرفیت حذف آن می باشد (جدول ۳). بـازده و ظرفیـت حـــذف بیورآکتـــور بـــه ترتیـــب از مقـــادیر ۵۱/۷٪ و $186/12\ g/m^3.h$ در غلظت ۲۰ درصدی اکسیژن به ۸۷/۹٪ و $316/44\ g/m^3.h$ در غلظـــت ۵۰ درصـــدی اکـــسیژن افزایش یافته است.

جدول ۳ تأثیر تراکم اکسیژن هوای ورودی بیورآکتور بر بازده و ظرفیت حذف بخار تولوئن

	تراکم اکسیژن (٪)						
	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰	۴۵	۵۰
بازده حذف (٪)	۵۱/۷	۶۲/۹	۶۹/۱	۷۶/۴	۸۰/۲	۸۴/۹	۸۷/۹
ظرفیت حذف ($g/m^3.h$)	۱۸۶/۱۲	۲۲۶/۴۴	۲۴۸/۷۶	۲۷۵/۰۴	۲۸۸/۷۲	۳۰۵/۶۴	۳۱۶/۴۴

شرایط آزمایش: زمان ماند ۱۵ ثانیه، تراکم بخـار تولـوئن ورودی $1/5\ g/m^3$ و دانسیته سلولی $10\ g/l$

پایش مداوم عملکرد بیورآکتور در تصفیه زیستی بخارات تولوئن: نتایج سنجش تـراکم ورودی و خروجـی بخـارات تولـوئن، ظرفیـت حـذف، بـازده حـذف و درصـد معـدنی شـدن کربن برای بیورآکتـور امولـسیونی در مـدت زمـان پـایش ۱۴۴ ساعت در شرایط بهینه کاری در شکل ۳ نـشان داده شده است.

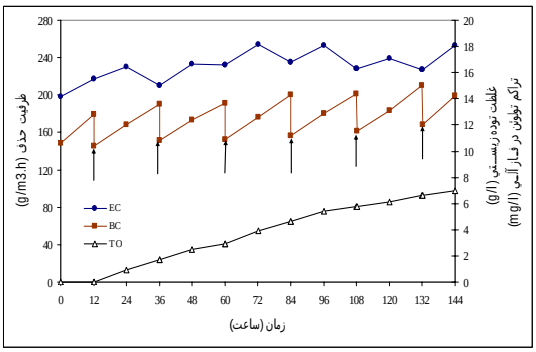


شکل ۳ : پایش عملکرد مداوم بیورآکتور برای حذف تولوئن در فاز گازی

شرایط کاری: زمان ماند ۱۵ ثانیه، تراکم اکـسیژن ورودی ۴۰ درصـد، غلظت توده زیـستی ۱۰-۱۵g/l، غلظـت فـاز آلـی ۴ درصـد، غلظـت سورفاکتانت زیستی در فاز آبی ۰/۲ درصد

بـا توجـه بـه نتـایج حاصـله، در ابتـدای راه انـدازی بیورآکتور، بازده و ظرفیت حذف بیورآکتور نسبتاً کم بـوده اسـت امـا بـا گذشـت ۲۴-۱۲ سـاعت، بـازده و ظرفیـت حذف افزایش قابل توجهی پیدا کرده است. در ظـرف ایـن مـدت، میـانگین بـازده حـذف بخـارات تولـوئن توسـط بیورآکتـور حـدود ۸۸/۴۴ درصـد و میـانگین ظرفیـت حذف، $231/68\ g/m^3.h$ بوده است. میانگین میزان کـربن معـدنی شـده آلاینـده در ایـن مـدت ۸۱/۵۶ درصـد بوده است.

در شـکل ۴ تغییـرات غلظـت تولـوئن در فـاز آبـی همـراه بـا نوسـانات غلظـت میکروارگانیـسمها و ظرفیـت حـذف نـشان داده شـده اسـت. غلظـت تولـوئن تجزیـه نشده در طـول ایـن مـدت نهایتـاً بـه $6/98\ mg/l$ رسـیده است.



شکل ۴ : پایش عملکرد مداوم بیورآکتور برای حذف تولوئن در فاز آبی

(شرایط کار مشابه شرایط شکل ۳). فلش ها نشانگر تعویض حدود ۲۰ درصد از امولسیون میکروبی با محلول نمکی مغذی تازه می باشد (BC: غلظت توده زیستی (g/l) TO: تراکم تولوئن در فاز آلی (mg/l))

بحث:

در این مطالعه دو سویه Rhodococcus rhodochrous و Achromobacter Xylosoxidians subsp. Xylosoxidians میکروارگانیسمهای غالب تجزیه گر تولوئن شناسائی شدند (۱۲،۲۴). در تحقیق دیگری نیز تصفیه زیستی توأم بنزن و تولوئن توسط این میکروارگانیسم گزارش شده است(۲۵). سویه Rhodococcus rhodochrous در مطالعه دب و کوهن برای تجزیه زیستی ترکیبات BTX مورد استفاده قرار گرفته است(۲۶). علاوه بر دو سویه فوق، در مطالعه های مختلف گونه های دیگر میکروبی تجزیه گر تولوئن گزارش شده اند که در این تحقیق به عنوان سویه غالب شناسایی نشدند. از این سویه ها می توان به Pseudomonas Putida که در مطالعه ای توسط اوتینو و همکارانش برای تصفیه زیستی هر سه ترکیب بنزن، تولوئن و گزیلن(۲۷) و در تحقیق دیگری توسط جوریو و همکارانش برای تصفیه تولوئن و گزیلن(۲۸) مورد استفاده قرار گرفته است اشاره کرد. گونه دیگری از این خانواده تحت عنوان Pseudomonas Pseudoalcaligenes نیز برای کنترل تولوئن و گزیلن در تحقیقی توسط اوه و چوئی مورد استفاده قرار گرفته است(۲۹). قابلیت سویه های باسیلی به عنوان بخشی از کنسرسیوم میکروبی تجزیه گر تولوئن در مطالعه داگلیس و همکارش، تشخیص داده شده است(۳۰).

پس از شناسائی، استخراج و غنی سازی سویه های میکروبی تجزیه گر برای استفاده در بیورآکتور امولسیونی لازم بود تأثیر متغیرهای عملیاتی بر عملکرد آن بررسی شود و شرایط بهینه تعیین گردد. مهمترین متغیرهای عملیاتی در این بیورآکتور نوع و غلظت فاز آلی، غلظت اکسیژن ورودی و زمان ماند بوده است. بر اساس سوابق پژوهشی سه فاز آلی انتخاب شده مورد بررسی قرار گرفتند که از بین آنها ان- هگزادکان با اندک کارآئی بهتر نسبت به دو ترکیب دیگر انتخاب شد. کارآئی بیورآکتور برای غلظتهای تا ۷ درصد حجمی این فاز مورد بررسی قرار گرفت. افزایش غلظت فاز آلی در این بیورآکتور تا غلظت ۴درصد، ارتباط مستقیمی و قوی با افزایش بازده و ظرفیت حذف بیورآکتور داشت بطوریکه بازده و ظرفیت حذف آن به ترتیب از ۷۳/۱ درصد و g/m^3h ۱۷۵/۴۴ در غلظت صفر فازآلی به ۹۲/۹ درصد و g/m^3h ۲۲۲/۹۶ در غلظت ۴ درصد فازآلی افزایش یافت. در غلظتهای بالاتر از ۴ درصد فاز آلی افزایش بازده و ظرفیت حذف بیورآکتور ناچیز بوده است بطوریکه در غلظت ۷ درصد بازده آن به ۹۴ درصد و ظرفیت حذف به g/m^3h ۲۲۵/۶ رسید. با توجه به این نتایج غلظت ۴ درصدی فاز آلی به عنوان شرایط بهینه انتخاب گردید. در پژوهشی که توسط کان و همکارانش انجام شده غلظت ۳ تا ۵ درصدی اولئیک الکل به عنوان حد بهینه فاز آلی تعیین شده است همچنین نتایج کار آنها نیز نشانگر آن بوده است که با افزایش غلظت فاز آلی از حد بهینه انتخاب شده، بازده و ظرفیت حذف بیورآکتور افزایش چندانی نمی یابد(۱۹). در بیورآکتورهای دو فازی که با تزریق مستقیم هوای حامل آلاینده بداخل رآکتور حاوی مخلوط فاز آلی و آبی عمل می کند، غلظت فاز آلی مورد استفاده بیشتر از بیورآکتورهای امولسیونی است. در مطالعات مختلف انجام شده بر روی تجزیه زیستی بنزن با بیورآکتور دوفازی، ان- هگزادکان با غلظت ۳۳ درصد (نسبت ۱ به ۲ با فاز آبی) به عنوان فاز آلی مورد استفاده قرار گرفته است (۴،۶،۱۵،۱۶،۲۴). در مطالعات بودریو و همکارانش و داگلیس و همکارش نیز ان - هگزادکان با غلظت ۳۳ درصد برای تصفیه زیستی تولوئن توسط بیورآکتور دوفازی مورد استفاده قرار گرفته است(۱۲،۲۵).

با توجه به آنکه میکروارگانیسمهای هوازی برای انجام متابولیسم و در نتیجه تجزیه و مصرف آلاینده ها نیازمند اکسیژن هستند، بدیهی است که تراکم اکسیژن می تواند نقش مهمی در عملکرد آنها داشته باشد. با توجه به روابط استوکیومتری، هرچه تراکم آلاینده ورودی به بیورآکتور و

دانسیته یا غلظت میکروارگانیسمها در فاز آبـی بیورآکتـور بیشتر باشد، اکسیژن مورد نیاز نیز بیشتر خواهد شد (۱۹). در ایـن مطالعـه تـأثیر تـراکم اکـسیژن هـوای ورودی بـه بیورآکتور بر ظرفیت و بازده حذف آن مـورد بررسـی قـرار گرفت. نتایج بدست آمده مؤیـد افـزایش ظرفیـت و بـازده حـذف بیورآکتـور بـا افـزایش غلظـت اکـسیژن هـوای ورودی بوده است. با افزایش غلظت اکسیژن هـوای ورودی از حـدود ۲۰ درصـد بـه ۵۰ درصـد بـرای غلظـت ورودی ۱٫۵ g/m^3 آلاینده ها، ظرفیت حذف بیورآکتـور از ۱۸۶٫۱۲ بـــه ۳۱۶٫۴۴ $g/m^3.h$ افـــزایش یافـــت. در مطالعـــه کان و همکـارانش بـر روی غلظتهـای ورودی ۲-۲٫۲ g/m^3 بخارات تولوئن به بیورآکتور امولسیونی مشخص شده است که افزایش تـراکم اکـسیژن از ۲۰ درصـد تـا ۴۵ درصـد، باعث افزایش ظرفیت حـذف بیورآکتـور از مقـادیر حـدود ۲۰۰ g/m^3 بـه حـدود ۴۰۰ g/m^3 (دو برابـر) و همچنـین افزایش بازده حذف از حدود ۴۰ درصد به ۷۵ درصد شـده اســـت(۱۹). آزمـــون آمـــاری انجـــام شـــده نـــشانگر رابطـه معنـی دار قـوی بـین تـراکم اکـسیژن هـوای ورودی و ظرفیت حذف بیورآکتور بوده اسـت (R^2= ۰٫۹۸). بـرای بارهـای ورودی کـم آلاینـده هـا بـه بیورآکتـور ، تغییر تراکم اکسیژن تأثیر چندانی بـر ظرفیـت حـذف آن نداشته است اما با افزایش بار ورودی، نقش تراکم اکسیژن برجسته تر شده است. علت این وضعیت همانطور که ذکـر شد نیاز میکروارگانیسمها به اکسیژن بیـشتر بـرای تجزیـه تراکمهای زیاد آلاینده براساس روابط استوکیومتری اسـت. مدلهای آماری استخراج شـده از ایـن مطالعـه نـشانگر آن است که با تزریق اکسیژن خالص بـه بیورآکتـور بـرای بـار ورودی ۴۵۰ $g/m^3.h$ ظرفیـت حـذف تـا ۴۲۶٫۲۱ $g/m^3.h$، خواهد رسید.

زمـان مانـد آلاینـده در بیورآکتـور یکـی دیگـر از پارامترهای عملیاتی است. هر چه زمان ماند آلاینده بیشتر شود، میکروارگانیسمها فرصت کافی بـرای تجزیـه آلاینـده داشته و لـذا بـازده حـذف آلاینـده در بیورآکتـور افـزایش خواهد یافت امـا بـا افـزایش زمـان مانـد، ظرفیـت حـذف آلاینده توسط بیورآکتور کاهش خواهد یافـت. در انتخـاب زمان ماند بهینه برای عملکرد بیورآکتورها باید بـه هـر دو متغیر بازده حذف و بخصوص ظرفیت حذف آلاینده توجـه شود. نتایج ارائه شده در شکل چهار نیز نشانگر همین اصل است. نتایج آزمون رگرسیون نشانگر تأثیر معنی دار و قوی زمان ماند در کلیه آزمایشها بر بازده حذف بیورآکتور بـوده است (R^2=۰٫۹۷). در مطالعـه سـونگ و همکـارانش بـرای دبی ۶ l/min و حجم ستون بیورآکتور ۱٫۸لیتر، زمان مانـد گاز ۱۸ ثانیه گزارش شـده اسـت(۲۲). زمـان مانـد بهینـه تعیین شده در این نوع بیورآکتورها به مراتب کمتر از زمان مانـد بیوفیلترهـا وصـافیهای چکنـده زیـستی اسـت. در مطالعه ای که محمد و همکارانش در مورد حذف بخـارات BTEX با بیوفیلتر انجام داده اند، زمان ماند مناسب مـورد استفاده در تحقیـق ۹۶ ثانیـه بـوده اسـت(۱). در مطالعـه دیگری که جیانپنگ و همکارانش در مورد حـذف بخـارات تولـوئن بـا یـک رآکتـور سـه مرحلـه ای بـا چرخـه جریان هوای بالابر (Airlift Loop) انجـام داده انـد، زمـان ماند بهینه ۳۹٫۶ ثانیه تعیـین شـده اسـت(۳۱) ترکیـان و همکـارانش در مطالعـه ای کـه از بیـوفیلتر بـرای حـذف همزمان تولوئن و گزیلن استفاده نموده اند، زمان مانـد ۶۰ ثانیه ای را انتخاب نموده اند(۱۰). از مطالعات مرتبط دیگر در این زمینه می توان به کار ساکوما در مـورد اسـتفاده از بـسترهای مختلـف بـرای بیوفیلتراسـیون تولـوئن اشـاره نمـود. در ایـن مطالعـه دو زمـان مانـد ۱۳٫۵ و ۲۷ ثانیـه مورد آزمایش قرار گرفت که البته در زمان ماند ۱۳٫۵ ثانیه نتـــایج رضایتبخـــشی حاصـــل نگردیـــده اســـت(۳۲). در مطالعـــه آلـــوارز و همکـــارانش نیـــز زمـــان مانـــد ۹۰ ثانیه ای بـرای حـذف بخـارات تولـوئن و اتیـل اسـتات در یک بیوفیلتر بـا بـستر کـود گیـاهی(Peat) انتخـاب شـده است(۳۳).

یکی دیگر از مزایای این نوع بیورآکتورها بر بیوفیلترها و صافیهای چکنده زیستی، افت فشار کم هوای عبـوری از بیورآکتور می باشد بطوریکه در حین عبور جریـان هـوا از ستون ایـن بیورآکتـور افـت فـشار نـاچیزی در حـدود ۲۵ پاسکال در هر متر از طول سـتون بیورآکتـور (۰٫۱ میلـی متر آب در هر متر از طول ستون بیورآکتـور) ایجـاد شـده است. در حالیکه افت فشار هوای عبـوری در بیوفیلترهـا و صـافیهای چکنـده زیـستی بـه مراتـب بیـشتر از ایـن مقادیر اسـت. در مطالعـه ای کـه محمـد و همکـارانش در مورد حذف بخارات BTEX با بیوفیلترانجام داده اند، افـت فشار سیستم در روز ۲۰۵ از راه اندازی، بـرای بیـوفیلتر در شرایط کاری مزوفیـل ۱۱ میلـی متـر آب و بـرای شـرایط ترموفیل ۶ میلـی متـر آب بـوده اسـت(۱). افـت فـشاری معادل ۷۵۰ پاسکال در هر متر برای صافی چکنده زیستی

مورد استفاده در مطالعه ژائو و همکارانش برای حذف بخارات بنزن گزارش شده است(۳۴). در مطالعه جوریو و همکارانش، افت فشار بیوفیلتر مورد استفاده برای تصفیه زیستی بخارات تولوئن و گزیلن، ۹۸ میلی متر آب به ازاء هر متر از طول بستر بوده است(۲۸). افت فشار ۱۰۰۰ پاسکال بر متر نیز برای بیوفیلتر مورد استفاده برای حذف بخارات تولوئن و گزیلن در مطالعه ترکیان و همکارانش گزارش شده است(۱۰). مقدار افت فشارهای ذکر شده برای بیوفیلترها و صافیهای چکنده مربوط به دوره عملکرد نرمال آنها است در حالیکه با گذشت زمان، با رشد میکروارگانیسمها بر سطح بستر، منافذ آنها مسدود شده و افت فشار سیستم بالا می رود.

در بدو راه اندازی بیورآکتور، بازده حذف بیورآکتور نسبتاً کم و در حدود ۸۲ درصد بوده است. پس از ۲۴ ساعت، افزایش قابل توجهی در بازده حذف بیورآکتور ایجاد شده و به حدود ۹۰ درصد رسیده است. ۲۴ ساعت ابتدای راه اندازی بیورآکتور، مربوط به زمان سازگاری یا خوگیری میکروارگانیسمها با شرایط کاری بیورآکتور بوده است. برای شرایط کاری بهینه شده ، میانگین بازده حذف بخار تولوئن توسط بیورآکتور ۸۸/۴۴ درصد و میانگین ظرفیت حذف آن g/m^3h ۲۳۱/۶۸ بوده است. این میزان ظرفیت حذف بخارتولوئن توسط بیورآکتور امولسیونی در مقایسه با عملکرد بیوفیلترها و صافیهای چکنده زیستی و سایر بیورآکتورها، قابل توجه می باشد. در مطالعه ای که کیارد و همکارانش بر روی بیوفیلترهای با بستر کود گیاهی تجاری در مورد تصفیه زیستی تولوئن انجام داده اند، حداکثر ظرفیت حذف بیوفیلتر g/m^3h ۷۰ بوده است(۳۵). در مطالعه ای دیگر جوریو و همکارانش با استفاده از کود گیاهی سازگار شده در بیوفیلتر به حداکثر ظرفیت حذف g/m^3h ۱۶۵ برای حذف بخارات تولوئن دست یافته اند(۲۸). در مطالعه دیگری توسط تانگ و همکارانش که از کمپوست و کربن فعال به عنوان بستر بیوفیلتر برای حذف بخار تولوئن استفاده کرده بودند، حداکثر ظرفیت حذف بیوفیلتر g/m^3h ۹۷ گزارش شده است(۳۶). کوکس و همکارانش با تغییراتی در مایع گردشی صافی چکنده زیستی توانستند به حداکثر ظرفیت حذف g/m^3h ۱۲۵ برای تولوئن دست یابند(۳۷). در مطالعه مشابه دیگری که توسط سونگ و همکارانش انجام شده است، ظرفیت حذف بخار تولوئن توسط بیورآکتور بدون فاز آلی برابر g/m^3h ۱۰۰/۳ برای غلظتهای ورودی ۱۰۰ ppm بخار تولوئن به بیورآکتور بوده است(۲۲). با مقایسه میانگین ظرفیت حذف بیورآکتور امولسیونی برای بخار تولوئن در این تحقیق با ظرفیت حذف گزارش شده در مطالعات دیگر می توان به کارآئی بهتر این نوع بیورآکتور نسبت به بیورآکتورهای دیگر اذعان نمود. دلایل اصلی این برتری در بخش قبل ذکر گردید.

نتیجه نهایی:

با توجه به نتایج بدست آمده در این مطالعه، کارآیی و اثربخشی بیورآکتورهای امولسیونی در تجزیه زیستی تولوئن اثبات شد. محدودیت اصلی کاربرد این بیورآکتور برای تصفیه تراکمهای زیاد آلاینده ورودی (عمدتاً مقادیر بیشتر از mg/m^3 ۵۰۰) کافی نبودن اکسیژن موجود در هوای ورودی به بیورآکتور است که با افزایش مواد اکسید کننده غیر سمی به محیط آبی میکروارگانیسم یا هوادهی مداوم محلول داخل مخزن اصلی بیورآکتور امکان رفع این محدودیت وجود خواهد داشت. افزایش اکسیژن خالص به جریان هوای ورودی به این بیورآکتور، برای تعیین تأثیر تراکم آن بر عملکرد بیورآکتور بوده است و در مقیاس صنعتی انجام این کار می تواند هزینه بر باشد.

در مقایسه با بیورآکتورهای کلاسیک مثل بیوفیلترها و صافیهای چکنده زیستی، عملکرد بیورآکتور امولسیونی بسیار بهتر بود و نقاط ضعف آنها مثل افت فشار، انسداد بستر و کارآئی پائین در غلظتهای متوسط و بالا در این بیورآکتورها منتفی است. با توجه به نتایج حاصله این نوع بیورآکتورها می توانند جایگزین مناسبی برای بیوفیلترها و صافیهای چکنده زیستی در تصفیه ترکیبات آلی فرار باشند.

سپاسگزاری :

بدینوسیله از دانشگاه علوم پزشکی تهران بخاطر حمایت مالی از این تحقیق و دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی همدان، آزمایشگاه گروه بیوتکنولوژی دانشکده زیست شناسی دانشگاه تهران و خانم حیدر برقی کارشناس آزمایشگاه میکروبیولوژی دانشگاه علوم پزشکی همدان بخاطر همکاری در تجزیه نمونه ها و آزمایشهای میکروبیولوژی تقدیر و تشکر می گردد.

منابع :

1. Mohammad BT, Veiga MC, Kennes C. Mesophilic and thermophilic biotreatment of BTEX-

polluted air in reactors. Biotechnol Bioeng 2007; 97(6): 1423-1438.
2. Chen CL, Fang HY, Shu C. Source location and characterization of volatile organic compound emissions at a petrochemical plant in kaohsiung Taiwan. J Air Waste Manage Assoc 2005; 55: 1487-1497.
3. Paca, J, Klapkova, E, Halecky M, Jones K, Soccol CR. Performance evaluation of a biotrickling filter degrading mixtures of hydrophobic and ydrophilic compounds. Clean Techn Environ Policy 2007: 69-74.
4. Yeom SH, Daugulis AJ. Development of a novel bioreactor system for treatment of gaseous benzene. Biotechnol Bioeng 2001; 72(2): 156-165.
5. Kahraman H, Gecki H. Degrading of benzene, toluene and xylene by pseudomonasaeruginosa engineered with the vitreoscilla hemoglobin gene. Eng Life Sci 2005; 5 (4): 363-368.
6. Daugulis AJ. Two-phase partitioning bioreactors: a new technology platform for destroying xenobiotics. Trend Biotechnol 2001; 19(11): 457-462.
7. Shareefdeen Z, Sing A. Biotechnology for odor and air pollution control. New York: Springer, 2004.
8. Yeom SH, Dalm MC, Daugulis AJ. Treatment of high-concentration gaseous benzene streams using a novel bioreactor system. Biodegrad 2003; 14: 415-421.
9. Choi SC, Oh YS. Simultaneous removal of benzene, toluene and xylenes mixture by a constructed microbial consortium during biofiltration. Biotechnol Lett 2002;24:1269-1275.
10. Torkian A, Dehghanzadeh R, Hakimjavadi. Biodegradation of aromatic hydrocarbons in a compost biofilter. J Chem Technol Biotechnol 2003;78: 795-801.
11. Cox H, Deshusses MA. Biotrickling Filters p. 99-131. Kennes C , Veiga MC (eds), Bioreactors for waste gas treatment. Netherlands: Kluwer Academic, 2001.
12. Boudreau NG, Daugulis AJ. Transient performance of two-phase partitioning bioreactors treating a toluene contaminated gas stream. Biotechnol Bioeng 2006;94(3): 448-457.
13. Li L, Liu JX. Removal of xylene from off-gas using a bioreactor containing bacteria and fungi. Int Biodeter Biodeg 2006;58: 60–64.
14. Wang LK, Pereira NC, Hung YT. Air pollution control engineering. New Jersey: Humana press, 2004.
15. Nielsen DR, Daugulis AJ, Amesmclellan PJ. Transient performance of a two-phase partitioning bioscrubber treating a benzene-contaminated gas stream. Environ Sci Technol 2005; 39(22): 8971-8977.
16. Daugulis AJ. Two-phase partitioning bioreactors: a new technology platform for destroying xenobiotics. Trend Biotechnol 2001 ; 19(11): 457- 462.
17. Lejeune KE, Wild JR, Russell AJ. Nerve agents degraded by enzymaticfoams. Nature 1998;395:27–28.
18. Phipps DW. Biodegradation of volatile organic contaminants fromair using biologically activated foam. US Patent 1998;5: 714,379.
19. Kan E, Deshusses MA. Development of foamed emulsion bioreactor for air pollution control. Biotechnol Bioeng 2003;84(2): 240-244.
20. Ghorbani F, Golbabaei F, Hamedi J, Mahjub H, Darabi HR, Shahtaheri SJ. A bioactive foamed emulsion reactor for the treatment of benzene-contaminated air stream. Bioproc Biosyst Eng 2010; 33:219–226.
21. Forbes BA, Sahm DF, Weissfeld AS. Bailey & Scott's diagnostic microbiology. 12th ed. New YorK: Mosby , 2007.
22. Song J, Kim Y, Son Y, Khim J. A bioactive foam reactor for the removal of volatile organic compounds: system performance and model development. Bioproc Biosys Eng 2007;30: 439-446.
23. Gyu GW. Bioactive foam reactor for enhanced biological degradation specific In: Proceeding of the 41st Meeting of KOSA E, Korean Society for Atmospheric Environment 2006;82-84.
24. Davidson CT, Daugulis AJ. Addressing biofilter limitations: A two-phase partitioning bioreactor process for the treatment of benzene and toluene contaminated gas streams. Biodegrad 2003;14: 415–421.
25. Daugulis AJ, Boudreau NG. Removal and destruction of high concentrations of gaseous toluene in a two-phase partitioning bioreactor by Alcaligenes xylosoxidans. Biotechnol Lett 2003; 25: 1421–1424.
26. Deeb RA, Cohen LA. Temperature effects and substrate interactions during the aerobic biotransformation of BTEX mixtures by toluene-enriched consortia and rhodococcus rhodochrous. Biotechnol Bioeng 1999;62(5):526-536.
27. Otenio MH, Lopes da Silva MT, Oliveira Marques ML, Roseiro JC, Bidoia ED. Benzene, toluene and xylene biodegradation by pseudomonas putida CCMI 852. Braz J Microb 2005; 36:258-261.
28. Jorio H, Kiared K, Brzezinski R, Leroux A, Viel G, Heitz ML. Treatment of air polluted with high concentrations of toluene and xylene in a pilot-scale biofilter. J Chem Technol Biotechnol 1998; 73: 183-196.
29. Oh YS, Choi SC. Selection of suitable packing material for biofiltration of toluene, m- and p-Xylene vapors. J Microb 2000; 38 (1): 31-35.
30. Daugulis AJ, Boudreau NG. Solid-liquid two-phase partitioning bioreactors for the treatment of gas-phase volatile organic carbons (VOCs)

by a microbial consortium. Biotechnol Lett 2008; 30:1583–1587
31. Jianping W, Yu C, Xiaoqiang J, Guozhu M. Removal of toluene from air streams using a gas–liquid–solid three-phase airlift loop bioreactor containing immobilized cells. J Chem Technol Biotechnol 2006;81:17–22.
32. Sakuma T, Hattori T, Deshusses MA. Comparison of different packing materials for the biofiltration of air toxics. J Air Waste Manage 2006; 56:1567–1575.
33. Alvarez-Hornos FJ, Gabaldon C, Martı´nez-Soria V, Marzal P, Penya-roja JM, Izquierdo M. Long-term performance of peat biofilters treating ethyl acetate, toluene, and its mixture in air. Biotechnol Bioeng 2007;96(4): 651- 660.
34. Zhou Q, Huang YL, Tseng DH, Shim H, Yang ST. A trickling fibrous-bed bioreactor for biofiltration of benzene in air. J Chem Technol Biotechnol 1998;73: 359-368.
35. Kiared K, Bibeau L, Brzezinski R, Viel G, Heitz M. Biological elimination of VOCs in biofilter. Environ Prog 1996;15:148-52.
36. Tang HM, Hwang SJ, Hwang SC. Dynamics of toluene degradation in Biofilters. Hazard Waste Hazrd Mater 1995;12: 207-19.
37. Cox HHJ, Nguyen TT, Deshusses MA. Toluene degradation in the recycle liquid of biotrickling filters for air pollution control. Appl Microbiol Biotechnol 2000;54: 133-137.