Archive of SID

مجله سلامت و محیط زیست، فصلنامه‌ی علمی پژوهشی
انجمن علمی بهداشت محیط ایران
دوره دوازدهم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۸، صفحات ۲۷۳ تا ۲۸۸

Available online: http://ijhe.tums.ac.ir
مقاله مرور ساختاریافته

کاربرد سامانه سلول‌های میکروبی تثبیت شده در تصفیه زیستی پساب آلوده به ترکیبات آروماتیک: مقاله مروری

علی پرتوی‌نیا[1,*]، زهرا شمس‌الهی[2]

۱- گروه مهندسی پالایش‌زیستی، دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۲- گروه طراحی و شبیه‌سازی فرآیندها، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

اطلاعات مقاله:

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۲/۲۷
تاریخ ویرایش: ۹۸/۰۳/۲۱
تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۳/۲۶
تاریخ انتشار: ۹۸/۰۶/۱۳

واژگان کلیدی: ترکیبات آروماتیک، زیست سالم‌سازی، تثبیت سلولی، تله‌اندازی، حامل پلیمری

پست الکترونیکی نویسنده مسئول:
a_partovi@sbu.ac.ir

چکیده

زمینه و هدف: زیست سالم‌سازی آلاینده‌ها، روشی مطلوب برای تجزیه آنها به مواد کم‌خطر توسط میکروارگانیسم‌ها است. تاکنون در بیشتر تحقیقات از میکروارگانیسم‌ها به‌صورت سلول آزاد استفاده شده که مشکلات کاربردی مختلفی دارند. استفاده از تکنولوژی تثبیت سبب بهبود راندمان تجزیه زیستی و رفع اکثر معایب سلول‌های آزاد شده است. هدف این مقاله مروری، بررسی امکان کاربرد تکنولوژی تثبیت سلولی براساس حامل‌های پلیمری در حذف آلاینده‌های آروماتیک در مقیاس آزمایشگاهی (فلاسک لرزان و بیوراکتور) است. همچنین، مقایسه عملکرد سلول‌های آزاد و تثبیت شده در شرایط محیطی مختلف از دیگر اهداف این مطالعه است.

روش بررسی: در این تحقیق به ترتیب ۴۰۱، ۷۸، ۴۹، ۱۴۵۰، ۰ و ۰ مقاله در پایگاه‌های اطلاعاتی Scopus، Web of Science، PubMed، Google Scholar، SID و MagIran با استفاده از واژگان کلیدی "Cell immobilization, Biodegradation, Aromatic" جستجو شد. از مجموع ۱۹۷۸ مقاله جستجو شده، پس از حذف ۱۱۶۷ مقاله، تعداد ۸۱۱ مقاله مورد بررسی بیشتر قرار گرفت.

یافته‌ها: مطالعات انجام شده در این زمینه، نشان‌دهنده موفقیت آمیز بودن حذف آلاینده‌ها توسط سلول‌های تثبیت شده با استفاده از ماتریس‌های مناسب در شرایط عملیاتی مختلف است و همچنین در میان سامانه‌های تثبیت سلولی، تله‌اندازی سلول‌ها درون حامل‌های پلیمری، پرکاربردترین روش زیست‌سالم‌سازی آلاینده‌های آروماتیک است.

نتیجه‌گیری: با توجه به عملکرد سلول‌های تثبیت شده در مقایسه با سلول‌های آزاد به‌ویژه در شرایط محیطی نامساعد، قابلیت استفاده مجدد سلول‌های تثبیت شده و کاربرد آنها در بیوراکتورها و بحث افزایش مقیاس، کاربرد این روش‌ها می‌تواند در بحث تصفیه فاضلاب در کشور مورد توجه محققان قرار گیرد.

Please cite this article as: Partovinia A, Shamsollahi Z. Application of immobilized microbial cells in biological treatment of contaminated effluent with aromatic compounds: a review article. Iranian Journal of Health and Environment. 2019;12(2):273-88.

Downloaded from ijhe.tums.ac.ir at 8:38 IRST on Monday September 30th 2019

www.SID.ir

Archive of SID

Downloaded from ijhe.tums.ac.ir at 8:38 IRST on Monday September 30th 2019

مقدمه

مونوآروماتیک‌ها به‌دلیل حلالیت آبی نسبتا بالا از جمله مهمترین آلاینده‌های منابع آب به‌شمار می‌روند. در بین مونوآروماتیک‌ها، حضور فنل و مشتقات آن در پساب خروجی صنایعی مانند داروسازی، پتروشیمی، کاغذسازی، آفت‌کش‌ها و ... نگرانی جدی محیط‌زیستی محسوب می‌شود و آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا آنها را به‌عنوان آلاینده‌های اولیه معرفی کرده است (۳-۱). اگرچه طبق اعلام آژانس حفاظت محیط زیست و سازمان بهداشت جهانی حداکثر غلظت مجاز فنل در پساب و آب قابل شرب به‌ترتیب mg/L ۱ و µg/L ۱ است (۴)، اما غلظت آن در پساب صنایع در محدوده ۱۰ تا mg/L ۳۰۰۰ متغیر است (۵). لذا در سال‌های اخیر تلاش‌های گسترده در زمینه حذف آلاینده‌های آروماتیک انجام شده است.

برای سالم‌سازی مناطق آلوده و حذف انواع آلاینده‌های محیط زیست، روش‌های مختلفی نظیر روش‌های فیزیکی (جذب کربنی، دفن کردن و...)، شیمیایی (تبادل یونی، اکسیداسیون شیمیایی و...) و حرارتی (سوزاندن، دفع حرارتی و ...) وجود دارد. اگرچه این روش‌ها می‌توانند در کاهش سطح آلاینده‌ها مؤثر باشند اما دارای هزینه بالا هستند (۶) و معمولا سبب انتقال آلاینده از یک فاز به فاز دیگر می‌شوند (۷). به همین دلایل، استفاده از روش‌های بیولوژیکی در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. زیست سالم‌سازی (Bioremediation) شامل تبدیل آلاینده‌ها به مواد غیرسمی و بی‌ضرر (یا کم‌ضرر) به‌ویژه آب و کربن دی‌اکسید توسط میکروارگانیسم‌هاست (۸). از جمله مزایای زیست‌سالم‌سازی می‌توان به سادگی فرایند، مقرون به‌صرفه بودن، امکان از بین رفتن کامل آلودگی و قابلیت کاربرد در مقیاس وسیع اشاره کرد. به‌طور کلی این روش سازگار به محیط زیست، مؤثرتر و بی‌ضررتر از روش‌های معمول است (۱۱-۹). وجود میکروارگانیسم‌های بومی در مکان آلوده، مهمترین عامل در امکان انجام فرایند زیستی است (۱۲). از یک منظر کلی، آلاینده‌ها به دو دسته آبگریز و آبدوست تقسیم‌بندی می‌شوند. تجمع هیدروکربن‌های آبگریز در محیط‌های مختلف به‌دلیل غیرقطبی بودن، حلالیت و دسترس‌پذیری پایین، سالم‌سازی و حذف آنها را همواره با چالش‌هایی روبرو کرده است. از این‌رو، در مقاله مروری Partovinia و همکار، به بررسی کاربرد سامانه‌های تثبیت سلولی در حذف ترکیبات نفتی و آلاینده‌های آلی آب‌گریز پرداخته شده است (۱۳) و در مقاله حاضر، هدف مطالعه کاربرد سامانه‌های سلولی تثبیت شده براساس حامل‌های پلیمری به‌ویژه روش تله‌اندازی در تجزیه زیستی هیدروکربن‌های آب‌دوست و ترکیبات آروماتیک به‌عنوان آلاینده‌های سرطان‌زا است. همچنین، عملکرد سلول‌های تثبیت شده و آزاد در شرایط محیطی مختلف بررسی شده است. کاربرد سلول‌های تثبیت شده در بیوراکتورهای آزمایشگاهی نیز نشان‌دهنده امکان‌پذیر بودن فرایند در مقیاس‌های وسیع و تصفیه پساب‌های صنعتی است.

مواد و روش‌ها

جهت بررسی مقاله‌ها و پژوهش‌های منتشر شده در راستای استفاده از سامانه تثبیت سلولی در حذف آلاینده‌های آروماتیک، جستجو در پایگاه‌های اطلاعاتی مختلف انجام شد. در مرحله اول، پس از جستجو با واژه‌های مختلف در پایگاه داده Scopus، کلمات کلیدی "Cell immobilization" و "Biodegradation" انتخاب شدند. در این مرحله به تعدادی از منابع مورد نیاز برای نگارش مقاله دست یافتیم. سپس به منظور دستیابی به هدف اصلی مطالعه، پایگاه‌های اطلاعاتی Scopus، PubMed، Web of Science، Google Scholar، SID و MagIran مورد بررسی قرار گرفتند و واژگان کلیدی "Cell immobilization"، "Biodegradation" و "Aromatic" در قسمت عنوان، چکیده و کلید واژه‌ها و همچنین محتوای کل مقالات جستجو شدند. شکل ۱ فرایند جستجو و انتخاب منابع مطالعاتی را نشان می‌دهد. در این تحقیق به ترتیب ۴۰۱، ۷۸، ۴۹، ۱۴۵۰، ۰ و ۰ مقاله در پایگاه‌های اطلاعاتی Scopus، Web of Science، PubMed، Google Scholar، SID و MagIran با استفاده از واژگان کلیدی "Cell immobilization, Biodegradation, Aromatic" جستجو شد. از مجموع ۱۹۷۸ مقاله جستجو

www.SID.ir

Archive of SID

Downloaded from ijhe.tums.ac.ir at 8:38 IRST on Monday September 30th 2019

شده، پس از حذف ۱۱۶۷ مقاله، تعداد ۸۱۱ مقاله مورد بررسی بیشتر قرار گرفت. مقاله‌های پژوهشی و مطالعات در مقیاس آزمایشگاهی بیشترین سهم منابع را به خود اختصاص دادند. از طرفی، با توجه به ارتباط موضوعی و انتخاب مجلات معتبر، مقالاتی که به‌طور خاص مرتبط با سامانه تثبیت سلولی در حذف آلاینده‌های مونوآروماتیک و ترکیبات پلی‌سیکلیک آروماتیک هستند، مورد مطالعه قرار گرفتند. نکته قابل ذکر این است که به‌دلیل اهمیت موضوع و تمرکز مطالعه حاضر بر عملکرد سلول‌های تثبیت شده به روش تله‌اندازی درون ماتریس‌های پلیمری، از جستجوی واژگان کلیدی دیگر (مانند تله‌اندازی، نوع و نام حامل، نام آلاینده، مقایسه عملکرد سلول‌های آزاد و تثبیت‌شده، اثر فاکتورهای محیطی، بیوراکتور تثبیت شده و غیره) نیز در پایگاه‌های اطلاعاتی استفاده شده است.

یافته‌ها

تکنولوژی تثبیت سلولی و حامل‌های مورد استفاده در تثبیت سلولی

تثبیت به معنای محدود کردن حرکت سلولی یا آنزیمی با حفظ زنده ماندن و عملکرد کاتالیزوری آنها است (۱۴). تثبیت سلولی از دهه‌های ۶۰-۷۰ میلادی مورد توجه قرار گرفته و تاکنون مطالعات بسیاری از کاربرد این تکنولوژی در زمینه‌های مختلف صورت گرفته است (۱۵). سامانه‌های تثبیت سلولی، موجب حفظ حیات و عملکرد سلول‌ها در مدت زمان طولانی و بهبود بازدهی فرایند حذف و تجزیه زیستی آلاینده‌ها می‌شوند که در سال‌های اخیر کاربرد روزافزونی یافته‌اند (۱۶). به‌طور کلی تکنولوژی تثبیت سلولی اکثر معایب استفاده از سلول‌های آزاد را رفع می‌کند و سبب افزایش عملکرد فرایندهای زیست سالم‌سازی می‌شود، اما امکان غیرفعال شدن سلول‌ها در حین تثبیت، امکان نشت سلولی از حامل، محدودیت نفوذ اکسیژن و مواد مغذی از جمله معایب این روش به‌شمار می‌روند.

در فرایند تثبیت سلولی از حامل یا ماتریس‌های مختلفی استفاده می‌شود که به دو دسته کلی آلی و غیرآلی تقسیم‌بندی می‌شوند و حامل‌های آلی خود می‌توانند طبیعی یا سنتزی

شکل ۱- فرایند جستجو و انتخاب منابع مطالعاتی

باشند. پلیمرهایی مانند آلژینات، آگار، آگاروز، سلولز، کاراژینان، کایتوزان و کیتین جزء این گروه از حامل‌ها هستند. حامل‌های پلیمری طبیعی آب‌دوست، زیست‌تخریب‌پذیر، سازگار با محیط‌زیست و ارزان هستند، اما به دلیل مقاومت و پایداری مکانیکی پایین، حساس بودن به دما و pH کاربرد محدودتری جهت تثبیت سلول‌ها دارند (۱۴، ۱۷، ۱۸). از پلیمرهای آلی و سنتزی می‌توان به پلی‌آکریل آمید، پلی‌پروپیلن، پلی‌استایرن، پلی‌وینیل کلراید، پلی‌وینیل الکل، پلی‌آکریلو نیتریل و فوم پلی‌اورتان اشاره کرد. این گروه مقاومت مکانیکی بالاتری نسبت

www.SID.ir

Archive of SID

Downloaded from ijhe.tums.ac.ir at 8:38 IRST on Monday September 30th 2019

به پلیمرهای طبیعی دارند (۱۷). دسترس‌پذیری آسان، قیمت مناسب، امکان تنظیم و اصلاح ساختار از مزایای پلیمرهای سنتزی به‌شمار می‌روند (۱۴). انتخاب مواد غیرآلی نیز مانند زئولیت، سرامیک، شیشه متخلخل، زغال چوب فعال، سنگ‌های آتشفشانی و آنتراسیت به‌عنوان حامل به دلایلی از جمله مقاومت بالا در برابر دما، pH، مواد شیمیایی و تخریب میکربی است (۱۷، ۱۸) و به‌دلیل گروه‌های عاملی کم و عدم اتصال مناسب با سلول‌ها بیشتر در ساخت حامل ترکیبی استفاده می‌شوند (۱۴).

انواع سامانه‌های تثبیت سلولی

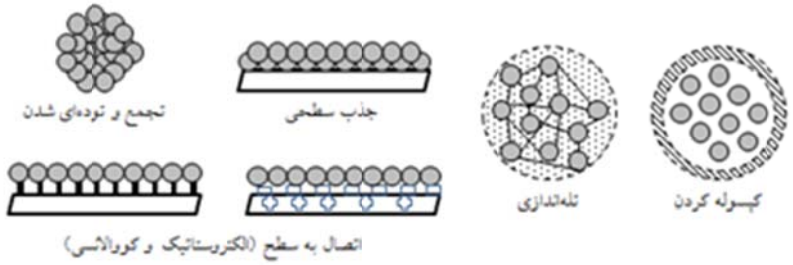
براساس مکانیسم فیزیکی، پنج نوع سامانه تثبیت سلولی وجود دارد که شماتیک آنها در شکل ۲ نشان داده شده است.

روش تجمع و توده‌ای شدن تثبیت بدون نیاز به حامل، در مواردی که سلول‌ها به‌طور طبیعی تمایل به تجمع و توده‌ای شدن دارند، مشاهده می‌شود. به‌دلیل تشکیل توده‌های بزرگ، سلول‌های درونی به‌عنوان سلول‌های تثبیت شده در نظر گرفته شده و استفاده از این روش را در راکتورها و همچنین سیستم‌های تصفیه فاضلاب به صورت بی‌هوازی امکان‌پذیر می‌کند (۱۶، ۱۹).

تثبیت سلولی به روش برگشت‌پذیر جذب سطحی، توسط فعل و انفعالات فیزیکی بین غشای سلول و سطح حامل غیرمحلول در آب انجام می‌شود. در این سامانه تثبیت حامل‌های غیرآلی (سرامیک، شیشه متخلخل)، آلی (چوب، خاک اره) و پلیمری (سلولز) استفاده می‌شود. این روش سریع، ساده و بدون نیاز به افزودنی‌های شیمیایی است و تماس مستقیم بین محیط و سلول‌ها، محدودیت نفوذی را کاهش می‌دهد. جذب سطحی بین سلول‌ها و حامل توسط پیوندهای ضعیف نظیر هیدروژنی، یونی، واندروالس و الکتروستاتیکی تشکیل می‌شود، لذا امکان جدا شدن سلول‌ها از سطح وجود دارد (۱۴، ۱۶-۱۸).

تثبیت سلولی به روش اتصال به سطح توسط اتصال الکتروستاتیکی روی یک سطح شبیه به جذب سطحی است، اما احتمال نشت سلولی کمتر است. این روش نیاز به شستشوی سطح حامل با یک محلول بافری دارد تا سطح حامل آب‌دوست شود و بتواند بارهای منفی سلولی را جذب کند (۱۴). روش دیگر اتصال به سطح، ایجاد پیوند کووالانسی بین حامل غیرآلی و سلول‌ها در حضور عامل اتصال‌دهنده عرضی است که برگشت‌پذیر بوده و به تغییرات شیمیایی سطح حامل بستگی دارد. البته لازم به ذکر است که سمیت عوامل اتصال‌دهنده در این روش سبب کاهش فعالیت سلول‌ها می‌شود (۱۴، ۱۷، ۱۸).

تثبیت سلولی به روش تله‌اندازی درون یک ماتریس متخلخل، در فرایندهای زیست سالم‌سازی بیش از سایر روش‌ها مورد توجه است. پس از تثبیت سلول‌ها درون یک شبکه پلیمری جامد، انتقال مواد مغذی و متابولیت‌های تولید شده از طریق منافذ ماتریس پلیمری انجام می‌شود. تله‌اندازی روشی سریع، غیرسمی، مقاوم و نسبتا ارزان است و علاوه بر اینکه سبب محافظت سلول‌ها در برابر شرایط محیطی می‌شود، از نشت زیاد سلولی به محیط نیز جلوگیری می‌کند. اما دارای محدودیت‌هایی مانند غیرفعال شدن برخی سلول‌ها حین فرایند تثبیت، کاهش نفوذپذیری مواد مغذی و در نتیجه کاهش فعالیت متابولیکی سلول‌های موجود در لایه‌های داخلی ماتریس است. بنابراین



شکل ۲- شماتیک انواع سامانه‌های تثبیت سلولی (۱۴, ۱۶)

www.SID.ir

Archive of SID

Downloaded from ijhe.tums.ac.ir at 8:38 IRST on Monday September 30th 2019

حامل مورد اســتفاده باید ساختار مناسبی داشته باشد و نسبت اندازه منافذ آن به اندازه ســلول‌ها درنظر گرفته شود (۱۴، ۱۷، ۱۸، ۲۰). به‌طور کلی تله‌اندازی ســلول‌ها به دو شیوه تله‌اندازی ژل و اســتفاده از حامل پیش‌ســاخته انجام می‌شــود (۱۳). در تله‌اندازی ژل، ماتریس متخلخل بصورت درجا اطراف ســلول‌ها ســنتز می‌شــود. بدین ترتیب که ابتدا محلول پلیمری و سلولی مخلوط شده و فرایند تشکیل ژل به دو روش کلی افتادن قطره و اســتفاده از قالــب انجــام می‌پذیرد. در روش قطــره، مخلوط پلیمر- ســلول توسط یک سرنگ به داخل محلول اتصال‌دهنده عرضی ریخته می‌شود.

روش کپســوله کردن سلول‌ها یا نگهداری ســلول‌ها درون یک غشای پلیمری متخلخل همانند تله‌اندازی، برگشت‌ناپذیر است، اما برخلاف آن ســلول‌ها توســط یک غشــاء نیمه‌تراوای نازک احاطه می‌شــوند. در این حالت سلول‌ها به‌دلیل قرار گرفتن در یک محیط آبی، بصورت آزادانه حرکت می‌کنند و رشد آنها نیز به آســانی صورت می‌گیرد. مهمترین مزیت این روش، حفاظت قابل توجه ســلول‌ها در شــرایط نامســاعد محیطی است. اما با وجود میزان بالای دانسیته سلولی بارگذاری شده در کپسول‌ها به‌دلیل امکان محدودیت‌های نفوذی غشاء و احتمال آسیب آن در اثر رشد سلولی، به‌ندرت در زیست سالم‌سازی استفاده شده اســت. این روش، تاکنون در شرایط آزمایشگاهی استفاده شده و در مقیاس صنعتی تصفیه اســتفاده نشده است (۱۴، ۱۷، ۱۸، ۲۱).

بحث

عملکــرد ماتریس‌هــای پلیمــری در تجزیه‌زیســتی آلاینده‌های آروماتیک

جــدول ۱ برخــی از تحقیقات انجام شــده در تجزیه زیســتی آلاینده‌های آروماتیک توسط ســلول‌های تثبیت شده به روش تله‌انــدازی در ماتریس‌های پلیمری مختلــف و راندمان تجزیه زیستی را نشان می‌دهد.

همان‌طورکــه مشــاهده می‌شــود در اکثــر تحقیقــات،

جدول ۱- تجزیه‌زیستی برخی ترکیبات آروماتیک توسط سلول‌های تله‌اندازی شده در ماتریس‌های پلیمری

ماتریس پلیمری	آلاینده	میکروارگانیسم	محل جداسازی سویه	فاز مورد بررسی	مدت زمان حذف آلاینده	غلظت اولیه، میزان حذف آلاینده	مرجع
	فنانترن	*سودوموناس*	خاک آلوده به آلاینده	خاک	۴۰ روز	۱۰۰mg/kg، ٪۹۰<	(۲۲)
	پیرین	*مایکوباکتریوم*	خریداری شده	آب	۱۰ روز	۱۰۰ –۱۰۰۰mg/L، ٪۱۰۰	(۲۳)
آلژینات	فنل	*سودوموناس آئروژینوزا*	خریداری شده	آب	۲۹۰- ۸ ساعت	۱۰۰ -۱۲۰۰mg/L، ٪۱۰۰	(۴)
	فنل	*سودوموناس پوتیدا*	خریداری شده	آب	۲۴ ساعت	۵/۳ $mmol/dm^3$، ٪۱۰۰ -۸۵	(۲۴)
	۲و۴و۶- تری کلروفنل	*سودوموناس*	-	آب	۱ روز	۵mg/L، ٪ ۶۲/۵	(۲۵)
فوم پلی‌اورتان	پنتاکلروفنل	*فلاووباکتریوم*	مکان‌های مختلف آلوده به آلاینده	آب	۴ روز	۲۰۰mg/L، ٪۱۰۰	(۲۶)
کایتوزان	بنزو [a] پیرین	*سودوموناس*	رسوبات آلوده به آلاینده	خاک	۴۲ روز	۱۹۰ ng/g، ٪۵۸/۹	(۲۷)
	فنل	*سودوموناس پوتیدا*	خریداری شده	آب	۳۷- ۲۶ ساعت	۱۰۰ mg/L، ٪۱۰۰ -۹۰	(۲۸)
	فلورانتن	*سراتیا*	مکان آلوده به آلاینده	آب	۱۰ روز	۱۰۰mg/L، ٪۸۰ <	(۲۹)

www.SID.ir

Archive of SID

Downloaded from ijhe.tums.ac.ir at 8:38 IRST on Monday September 30th 2019

جدول ۱- تجزیه‌زیستی برخی ترکیبات آروماتیک توسط سلول‌های تله‌اندازی شده در ماتریس‌های پلیمری

ماتریس پلیمری	آلاینده	میکروارگانیسم	محل جداسازی سویه	فاز مورد بررسی	مدت زمان حذف آلاینده	غلظت اولیه، میزان حذف آلاینده	مرجع
آلژینات- پلی‌وینیل الکل فوم پلی‌اورتان	بنزن	*باسیلوس*	خاک آلوده به آلاینده	آب	۹ روز	٪۸۴ ،۴۰۰mg/L ٪۹۰ ،۴۰۰mg/L	(۳۰)
آلژینات	۲- نیتروتولوئن	*مایکروکوکوس*	-	آب	۹۶ ساعت	۱۵، ۳۰ – mM ٪۷۸/۶۷- ۸۹/۳۴	(۳۱)
آگار						۱۵، ۳۰ – mM ٪۷۴- ۸۸	
آلژینات- پلی‌وینیل الکل						۱۵، ۳۰ – mM ٪۱۰۰	
پلی‌آکریل آمید						۱۵، ۳۰ – mM ٪۹۳/۳۴- ۸۸	
فوم پلی‌اورتان						۱۵، ۳۰ – mM ٪۱۰۰	
آلژینات آگار پلی‌آکریل آمید فوم پلی‌اورتان	نفتالین	*سودوموناس*	پساب فاضلاب آزمایشگاه	آب	۷- ۳/۵ روز ۶- ۲/۵ روز ۶/۵- ۳ روز ۶- ۲ روز	۲۵، ۵۰ –mM ٪۱۰۰	(۳۲)
آلژینات پلی‌وینیل الکل- آلژینات پکتین	فنل	*سودوموناس*	مکان آلوده به آلاینده‌های دارویی	آب	۳۰ ساعت ۳۰ ساعت ۴۰ ساعت	۱۰۰ ،mg/L ٪۱۰۰	(۱)
کاپا- کاراژینان	پنتاکلروفنل	*سودوموناس*	خاک آلوده به آلاینده	خاک	۲۶ هفته	۳۵۰، ۳۷۰ – ppm ۶۴/٪۷	(۳۳)
	فنل	*سودوموناس پوتیدا*	خریداری شده	آب	۳ -۱ ماه	٪۱۰۰ ،۲۰۰mg/L	(۳۴)
	فنانترن	کنسرسیوم میکربی	لجن فعال پالایشگاه نفت	آب	۷-۳ روز	۱۰۰، ۵۰۰ – ppm ٪۱۰۰	(۳۵)
پلی‌وینیل الکل	فنانترن	کنسرسیوم میکربی	لجن فعال پالایشگاه نفت	دوغابی	۱۰ روز	۲۵۰، ۲۰۰۰- mg/kg ٪۱۰۰	(۳۶)
	فنل	مخلوط *آسینتوباکتر* و *اسفینگوموناس*	خاک آلوده به فنل و لجن فعال	آب	۵۰ ساعت	٪۱۰۰ ،۸۰۰ mg/L	(۳۷)
فوم پلی‌اورتان	۴- کلروفنل	*فانروکت کریزوسپوریوم*	-	آب	۴ روز	٪۱۰۰ ،۱۰۰ mg/L	(۳۸)
	مخلوط آلیفاتیک‌ها و پلی‌سیکلیک آروماتیک‌ها	*پروتوتکا زاپفی*	چشمه آب گرم	آب	۱۵ روز	٪۱ ،v/v ٪۱۰۰ و ٪ ۱۸/۲±۸/۵۱	(۳۹)
	نیترو بنزن	*رودوتورولا موسیلاژینوزا*	لجن فعال مکان آلوده به آلاینده	آب	۳۰ ساعت	٪۱۰۰ ،۲۰۰ mg/L	(۴۰)

میکروارگانیسم‌های مورد استفاده در فرایند تجزیه‌زیستی از محل آلوده به آلاینده، جداسازی و فرایندهای تجزیه‌زیستی در مقیاس آزمایشگاهی انجام شده‌اند. براساس تحقیقات، تله‌اندازی سلول‌ها در آلژینات بیش از سایر پلیمرهای طبیعی مورد توجه است. این پلیمر دارای مزایایی از جمله ارزان بودن، غیر سمی، نیاز به شرایط ملایم برای تثبیت، تجزیه‌زیستی آسان، نشت سلولی آهسته و پایداری در محدوده وسیعی از pH (۱۰-۳) و دما (بالاتر از ۴۵ ^{o}C) است. البته محدودیت‌های انتقال جرم به‌دلیل تراکم لایه‌های آلژینات، ساییدگی و متورم شدن دانه‌ها در برخی شرایط سبب کاهش کاربرد آن در حذف آلاینده‌ها

www.SID.ir

Archive of SID

Downloaded from ijhe.tums.ac.ir at 8:38 IRST on Monday September 30th 2019

می‌شـود (۴۱، ۴۲). همچنین آلژینات در سیستم‌های متشکل از مخلوط میکروارگانیسم‌ها یا کنسرسیوم‌های میکروبی به‌دلیل مصرف آن توسـط قارچ‌ها نمی‌تواند حامل مناسبی برای تثبیت سـلولی باشـد (۴۳). در میان پلیمرهای سنتزی نیز پلی‌وینیل الکل و فوم پلی‌اورتان بیشترین کاربرد را دارند. پلی‌وینیل الکل علی‌رغم سـنتزی بودن، غیر سمی اسـت و خصوصیاتی مانند استحکام کششی نسبتا خوب، مقاومت در برابر سایش، مقاومت دمایـی، ظرفیت نگهداری آب، زیست‌سـازگاری، فرایندپذیری، تخلخل‌هـای میکرو و ماکرو و تجزیه‌پذیری آهسـته دارد (۳۴، ۴۴). همچنین انتخاب پلی‌وینیل الکل با وزن مولکولی و درجه آبکافت بالا سبب افزایش مقاومت مکانیکی، پایداری و دوام آن می‌شـود (۴۱). فوم پلی‌اورتان نیز به‌دلیل کاربرد آسـان، ارزان بودن، قابلیت بازیابی، عدم سمیت برای میکروارگانیسم‌ها، مقاوم در برابر حلال‌های آلی و حمله میکروبی، مقاومت مکانیکی بالا، طبیعت آب‌گریز و تخلخل بالا در حذف و تجزیه‌زیستی بسیاری از آلاینده‌هـا مـورد توجه اسـت (۴۰، ۴۵). تخلخـل طبیعی پلی‌اورتان سـبب افزایش نفـوذ اکسـیژن و در نتیجه افزایش فعالیت سـلولی می‌شود. در واقع تثبیت سـلولی در این پلیمر سـبب افزایش سـطح تماس مواد مغذی و سـلول‌ها و کاهش نیروهای برشی می‌شود (۴۶). همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شـود، در برخی مطالعات عملکرد سلول‌های تثبیت‌شده در ماتریس‌های مختلف مورد بررسـی قرار گرفته اسـت. به‌عنوان مثال Manohar و همکاران (۲۰۰۱) نشان دادند که سلول‌های تثبیت شده در فوم پلی‌اورتان در غلظت‌های بالای نفتالین (۵۰ و ۷۵ mM) عملکرد بهتری نسـبت به سلول‌های تثبیت شده در ماتریس‌های دیگر داشـته‌اند و فاز تاخیر اولیه تجزیه زیستی نیز حذف شده اسـت. آنها دلیل میزان تجزیه‌زیستی پایین، در آلژینـات، آگار و پلی‌آلکریل آمید را نفوذ آهسـته مواد به درون دانه‌ها دانسـته‌اند (۳۲). Mollaei و همکاران (۲۰۱۰) ترکیب پلیمرهـای آلژینات و پلی‌وینیل الکل را در تجزیه‌زیسـتی فنل توسـط سـلول‌های تثبیت شـده به کار بردند. آنها بیان کردند که حضـور پلی‌وینیل الکل مقاومت فیزیکـی و پایداری دانه‌ها را افزایش می‌دهد و آلژینات نیز سـبب بهبود خواص سـطحی دانه‌ها، کمک به جلوگیری از توده‌ای شدن آنها و تولید دانه‌های کروی شـکل می‌شود. همچنین سـلول‌های تله‌اندازی شده در ایـن ماتریس ترکیبی عملکرد بهتری نسـبت بـه ماتریس‌های دیگر داشته‌اند و سرعت تجزیه زیستی فنل بویژه در غلظت‌های بالا افزایش یافته است (۱).

علاوه بر انتخاب حامل مناسـب، از دیگر عوامل مؤثر بر راندمان تجزیه‌زیسـتی، غلظت سلولی بارگذاری شـده در دانه‌های ژل اسـت. Song و همکاران (۲۰۰۵) اثر بارگـذاری غلظت اولیه سـلولی تثبیت شـده در ماتریس پلی‌وینیل الکل را بر بازدهی فرایند دنیتریفیکاسـیون پساب سنتزی بررسی کردند. براساس نتایج، بازدهی فرایند با افزایش غلظت اولیه سلولی، ابتدا افزایش و سـپس به دلیل کاهش نفوذ مواد مغذی بـه درون دانه‌ها در اثر افزایش میزان سلول، دنیتریفیکاسیون کاهش می‌یابد (۴۷). همچنین در بررسـی‌ها نشان داده شده است که افزودن برخی مواد بـه ماتریس پلیمری در حین فرایند تثبیت سـبب بهبود عملکرد سلول‌ها در فرایند تجزیه‌زیستی آلاینده‌های آروماتیک می‌شـود. Massalha و همکاران (۲۰۱۰) استفاده همزمان از رس و پودر کربن فعال را سـبب معدنی شدن بهتر غلظت‌های بالای فنل توسـط سـلول‌های تثبیت شـده دانسـته‌اند (۴۸). Zhen-Yu و همـکاران (۲۰۱۲) نشـان دادنـد کـه افزودن دیاتومیت سـبب بهبود تخلخل دانه‌هـای آلژینات، انتقال جرم و افزایش رشـد سـلولی و راندمان تجزیه‌زیسـتی می‌شـود و دیاتومیت رها شـده پس از فرایند تجزیه زیسـتی، سبب بهبود کیفیت خاک می‌شـود (۴۲). بنابراین، انتخاب حامل مناسـب، سبب عملکرد موفقیت آمیز سـلول‌های تثبیت شده در تجزیه آلاینده‌های آروماتیک می‌شود.

مقایسه عملکرد سلول‌های آزاد و تثبیت شده در تجزیه زیستی ترکیبات آروماتیک

در زیسـت سالم‌سـازی مناطق آلوده به آلاینده‌های آروماتیک، زمـان و میـزان حذف زیسـتی بسـیار حائز اهمیت هسـتند. به‌طور کلی اسـتفاده از سلول‌های تثبیت شـده سبب افزایش راندمـان و یا کاهش زمان حذف زیسـتی آلاینده‌ها نسـبت به سلول‌های آزاد شده اسـت. البته در برخی تحقیقات نیز، دلیل

www.SID.ir

Archive of SID

Downloaded from ijhe.tums.ac.ir at 8:38 IRST on Monday September 30th 2019

عدم موفقیت سلول‌های تثبیت شده مانند افزایش زمان تجزیه، محدودیت‌هـای نفوذی در حامل بیان شـده اسـت و بنابراین نمی‌توان با قطعیت، مطلوب بودن همیشگی سامانه‌های تثبیت سلولی در حذف آلاینده‌های آروماتیک را مطرح کرد. نکته قابل توجه این اسـت که در کاربرد سلول‌های تثبیت شده در حذف آلاینده‌ها، نه تنها رسـیدن به درصد حذف بالاتر یا رسـیدن به زمان حذف پایین‌تر در مقایسه با سلول‌های آزاد مطلوب است، بلکه عملکرد بهتر و برتری سـلول‌های تثبیت شـده در شرایط نامساعد محیطی نیز مدنظر است. در جدول ۲ کاربردهای موفق سامانه تثبیت در تجزیه آلاینده‌های آروماتیک اشاره شده است. همانطور که اشـاره شـد یکـی از مزایای مهم سـامانه تثبیت، محافظت سـلول‌ها در شـرایط نامسـاعد محیطی مانند غلظت بالای آلاینـده، تغییرات دمایی و pH، شـوری بالا و ترکیبات سمی است. براساس مطالعات ارائه شده در جدول ۲، سلول‌های آزاد به‌دلیل سـمیت و اثر بازدارندگی آلاینده در غلظت‌های بالا عملکرد پایین‌تری نسبت به سلول‌های تثبیت شده و محافظت شـده در حامل‌ها دارند. Mulla و همـکاران (۲۰۱۳) عملکرد سلول‌های آزاد و تثبیت شده در فوم پلی‌اورتان در تجزیه‌زیستی ۲- نیتروتولوئـن را در مقادیر مختلف دما (°C ۴۵- ۲۰) و pH (۱۱- ۴) بررسـی کردند. براساس نتایج آنها، سلول‌های تثبیت شده عملکرد بهتری داشته‌اند و محدوده pH بین ۱۰-۵ و دمای °C ۴۰- ۲۵، اثری بر فعالیت سـلول‌های تثبیت شـده نداشته است، در حالی‌که سلول‌های آزاد تنها قادر به فعالیت در محدوده pH بیـن ۸- ۷ و °C ۳۵- ۳۰ دمـا بوده‌اند (۳۱). Zheng و همکاران (۲۰۰۹) نیز بیان کردند میکروارگانیسـم‌های معمول توانایی سالم‌سـازی پساب حاوی مقادیر بالای ۳ درصد نمک را ندارند. از این‌رو آنها توانایی سـلول مخمر آزاد و تثبیت شده در فوم پلی‌اورتان را در تجزیه زیسـتی mg/L ۲۰۰ نیتروبنزن در مقادیر مختلف سـدیم کلراید (۷- ۳ درصد) بررسـی کردند و براسـاس نتایج، سلول‌های تثبیت شـده، میزان تجزیه زیستی بالاتری در مدت زمان کمتر داشته‌اند (۴۰).

بـه نظر می‌رسـد یکی از مسـائلی کـه باید در فرایند زیسـت سالم‌سازی به‌طور خاص به آن توجه کرد، حضور فلزات سنگین و سـمی در فاز آب و خاک همراه با آلاینده‌ها به ویژه ترکیبات آروماتیک است و براساس نتایج مطالعه حاضر، تحقیقات کمی در این زمینه انجام شده است. از طرفی پلیمرهایی مانند کایتوزان، آلژینات و پلی‌وینیل الکل نیز به‌دلیل ساختارشـان، جاذب‌های مناسبی برای حذف یون‌های فلزات سنگین هستند (۵۲، ۵۳).

جدول ۲- میزان و زمان تجزیه زیستی برخی هیدروکربن‌های آروماتیک توسط سلول‌های تثبیت شده و آزاد

ماتریس پلیمری	آلاینده	غلظت اولیه آلاینده	میزان و زمان تجزیه زیستی توسط سلول‌های آزاد	میزان و زمان تجزیه زیستی توسط سلول‌های تثبیت شده	مرجع
فوم پلی‌اورتان	۳- کلرو بنزوات	۴ mM ۱۰ mM	٪۶۵، ۶۰ ساعت ٪۳۶، ۶۰ ساعت	٪۱۰۰، ۶۰ ساعت ٪۹۸، ۶۰ ساعت	(۴۹)
پلی‌وینیل الکل	فنانترن	۱۰۰ mg/L ۲۵۰ mg/L ۵۰۰ mg/L	٪۱۰۰، ۴ روز ٪۱۰۰، ۷ روز ٪۶۱، ۷ روز	٪۱۰۰، ۳ روز ٪۱۰۰، ۵ روز ٪۸۰، ۷ روز	(۳۵)
آلژینات	پارا- کلروفنل	۲۰ mg/L ۴۰ mg/L ۶۰ mg/L	٪۷۰، ۱۰ روز ٪۱۷، ۱۰ روز کمتر از ٪۵، ۱۰ روز	٪۹۴، ۱۰ روز ٪۳۴، ۱۰ روز ٪۲۶، ۱۰ روز	(۵۰)
پلی‌وینیل الکل- آلژینات	پیرین	mg/kg ۱۰۰soil	٪۳۰، ۹۶ ساعت	٪۵۶، ۹۶ ساعت	(۵۱)

www.SID.ir

Archive of SID

Downloaded from ijhe.tums.ac.ir at 8:38 IRST on Monday September 30th 2019

بنابراین استفاده از سلول‌های تثبیت شده در ماتریس‌های پلیمری در حذف درجا/ درمحل (In situ) آلاینده‌های آروماتیک در مواردی ممکن است موفقیت آمیز نباشد. بدین جهت شناسایی دقیق آلاینده‌های موجود در محل و انتخاب حامل مناسب در بازدهی فرایند و همچنین برآورد اقتصادی بسیار حائز اهمیت است. به‌عنوان مثال Somtrakoon و همکاران (۲۰۰۹) عملکرد سلول‌های آزاد و تثبیت شده در دانه‌های آلژینات در تجزیه زیستی فنانترن موجود در خاک و در حضور آرسنیک، کادمیوم و سرب در مقیاس آزمایشگاهی را بررسی کردند. براساس نتایج، بازدهی حذف توسط سلول‌های تثبیت شده به‌دلیل جذب فلزات توسط گروه‌های کربوکسیلیک آلژینات کمتر از سلول‌های آزاد بوده است (۲۲).

جدول ۳- قابلیت استفاده مجدد ماتریس‌های پلیمری تثبیت شده در تجزیه زیستی برخی ترکیبات آروماتیک

آلاینده	غلظت اولیه آلاینده	ماتریس پلیمری	تعداد دفعات استفاده	مرجع
نفتالین	۲۵ mM	آلژینات	۱۸	(۳۲)
	۵۰ mM		۳	
		آگار	۱۲	
			۳	
		پلی‌آکریل آمید	۲۳	
			۵	
		فوم پلی‌اورتان	۴۵	
			۵	
۴-کلروفنل	۱۰۰ mg/L	فوم پلی‌اورتان	۳	(۳۸)
	۱۰۰۰mg/L	آلژینات	۱۲	
	۱۲۰۰ mg/L		۱۰	
فنل		پلی‌وینیل الکل- آلژینات	۱۵	(۱)
			۱۱	
		پکتین	۸	
			۵	
		فوم پلی‌اورتان	۲۴	
	۱۵ mM		۲۴	(۳۱)
	۳۰ mM	پلی‌وینیل الکل- آلژینات	۲۰	
			۱۲	
۲- نیترو تولوئن		پلی‌آکریل آمید	۱۸	
			۹	
		آلژینات	۱۵	
			۶	
		آگار	۱۲	
			۶	
۳- کلرو بنزوات	۴ mM	فوم پلی‌اورتان	۴	(۴۹)
	۱۰ mM		۴	

www.SID.ir

Archive of SID

Downloaded from ijhe.tums.ac.ir at 8:38 IRST on Monday September 30th 2019

قابلیت استفاده مجدد از سلول‌های تثبیت شده

یکی دیگر از عواملی که سبب برتری سامانه‌های تثبیت سلولی در فرایندهای تجزیه‌زیستی می‌شود، امکان جداسازی آسان حامل‌ها و سلول‌ها از محیط و قابلیت استفاده مجدد آنها بدون کاهش فعالیت است. همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، فوم پلی‌اورتان با داشتن خصوصیات مطلوب عملکرد بهتری داشته است. البته لازم به ذکر است که شرایط محیطی و میزان غلظت و سمیت آلاینده در استفاده مجدد از حامل‌های حاوی سلول تثبیت شده و زمان و بازدهی فرایند نیز اثرگذار هستند.

کاربرد بیوراکتورهای حاوی سلول‌های تثبیت شده در تجزیه زیستی ترکیبات آروماتیک

استفاده از بیوراکتورهای حاوی میکروارگانیسم‌های خالص یا کنسرسیوم میکروبی در تجزیه زیستی آلاینده‌های محیط زیست بسیار مورد توجه است و براساس مطالعات انجام شده انواع مختلف و پرکاربرد شامل بیوراکتورهای بستر سیال، ستون حبابی، بستر فورانی (Spouted bed) و بستر پرشده به‌صورت ناپیوسته و پیوسته استفاده شده‌اند. بیوراکتورهای بستر پرشده دارای مزایایی مانند عملیات آسان، بازدهی بالا، زمان ماند بالای مایع و امکان افزایش مقیاس هستند و برای حذف آلاینده‌های با غلظت پایین در حجم بالای پساب مناسب هستند. بیوراکتورهای بستر سیال نیز دارای مزایایی همچون افزایش سطح تماس، کنترل حجم بارگذاری بالا و نرخ بالای انتقال جرم و حرارت هستند (۲). از طرفی بیوراکتورهای بستر پرشده برای ترکیبات آب‌گریز و با حلالیت‌پذیری پایین در آب مناسب‌تر هستند و بیوراکتورهای بستر فورانی به‌دلیل اختلاط و تماس بهتر بین سلول‌ها و آلاینده، انتقال بهتر اکسیژن و میزان تجزیه‌زیستی بالاتر بر بیوراکتورهای جریانی و ستون حبابی معمول برتری دارند (۵۴). به‌طور کلی بیوراکتورها سبب کاهش تنش‌های هیدرودینامیکی و کنترل بهتر شرایط عملیاتی می‌شوند و بازدهی فرایند را نسبت به سیستم‌های مقیاس کوچک افزایش می‌دهند. اما استفاده از بیوراکتورهای حاوی سلول تثبیت شده دارای مزایایی مانند حفظ توده زیستی فعال در حامل‌ها، کاهش زمان نگهداری و جلوگیری از شستشوی سلولی هستند. همچنین به‌دلیل قابلیت استفاده مجدد از سلول‌های تثبیت شده، از بیوراکتورهای تثبیت شده در مقیاس‌های بزرگ مانند تصفیه پساب به‌طور پیوسته می‌توان استفاده کرد (۲۰). بنابراین بیوراکتورهای تثبیت شده می‌توانند در تصفیه پساب‌های خروجی صنایع مؤثر باشند. جدول ۴ کاربرد بیوراکتورهای حاوی سلول تثبیت شده در تجزیه زیستی ترکیبات آروماتیک در مقیاس آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

زیست سالم‌سازی به دلیل مزایایی همچون سازگاری با محیط زیست، امکان تخریب و تجزیه کامل آلاینده‌ها و ارزان‌تر بودن بسیار مورد توجه است، اما نکته حائز اهمیت این است که سلول‌های میکروبی به‌صورت آزاد تحت شرایط محیطی مختلف ممکن است توانایی خود را از دست بدهند. بنابراین، سامانه‌های تثبیت سلولی با حفظ طولانی مدت سلول‌ها و افزایش عملکرد آنها سبب بهبود فرایند و افزایش بازدهی یا کاهش زمان حذف و تجزیه زیستی آلاینده‌ها می‌شوند که در سال‌های اخیر به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در میان انواع مختلف سامانه‌های تثبیت سلولی، تله‌اندازی سلول‌ها درون ماتریس‌های پلیمری متخلخل روشی کارآمد و مناسب برای زیست سالم‌سازی آلاینده‌های آب‌دوست و آروماتیک محسوب می‌شود. در این تحقیق، مروری بر کاربرد ماتریس‌های پلیمری مورد استفاده در تجزیه‌زیستی آلاینده‌های آروماتیک انجام شد و عوامل مؤثر بر عملکرد سلول‌های تله‌اندازی شده و همچنین عملکرد این سلول‌ها در مقایسه با سلول‌های آزاد در شرایط محیطی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. به‌طورکلی تحقیقات انجام شده نشان می‌دهند که استفاده از سلول‌های تثبیت شده در حذف یا تجزیه زیستی آلاینده‌های آروماتیک علیرغم برخی مشکلات، روشی کارآمد و مؤثر است و با انتخاب حامل پلیمری مناسب براساس شرایط محیطی و نوع آلاینده می‌توان به بازدهی بالا یا کاهش زمان فرایند دست یافت. از طرفی کاربرد سلول‌های تثبیت شده در بیوراکتورها و مقیاس صنعتی به‌دلیل

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۴- کاربرد بیوراکتورهای حاوی سلول‌های تثبیت شده در تجزیه زیستی برخی ترکیبات آروماتیک

نوع بیوراکتور	ماتریس پلیمری	آلاینده	غلظت اولیه	میزان حذف (درصد)	مرجع
بستر سیال	آلژینات	فنل	۱۰۰۰ mg/L	≥ ۹۰	(۵۵)
بستر فورانی	پلی‌وینیل الکل	فنل	۲۰۰ mg/L	۱۰۰	(۳۴)
	پلی‌وینیل الکل	۲و۴- دی‌کلرو فنل	۲۵ -۲۰۰ mg/L	۱۰۰	(۵۶)
ستون حبابی	پلی‌اتیلن گلیکول- کربن فعال- آلژینات	تولوئن	۶۸ -۲۱۳ mg/L	≥ ۹۳	(۵۷)
بستر پرشده	فوم پلی‌اورتان	نفتالین	۸۰ mM و ۶۰، ۴۰	۷۸ -۱۰۰	(۳۲)
	آلژینات	نفتالین	۷۵ mM و ۵۰، ۲۵	۷۰ -۱۰۰	(۵۸)
	فوم پلی‌اورتان	فنل	۱۰۰- ۱۶۰۰ mg/L	۱۰۰	(۵)
	فوم پلی‌اورتان	پنتا کلروفنل	۰/۲- ۸ mg/L	۹۷	(۵۹)
	فوم پلی‌اورتان	بنزن	۴۰۰ mg/L	۹۰	(۳۰)
	پلی‌وینیل الکل- آلژینات			۸۴	

قابلیت اســتفاده مجدد آنها و عملکرد مطلوب آنها در دوره‌های زمانــی متوالی، از نظر اقتصادی مقرون به‌صرفه اســت. البته در برخــی موارد افزایش زمان تجزیــه و محدودیت‌های نفوذی در حامل‌ها، منجر به کاهش راندمان ســامانه‌های تثبیت ســلولی نیز شــده‌اند. اما به‌طور کلی و براساس مطالعات حاضر، می‌توان نتیجه گرفت که با اســتفاده از سامانه ســلول‌های تثبیت شده جهت زیست سالم‌سازی پساب صنایع مختلف، می‌توان از ورود ترکیبات سمی و خطرناک به محیط‌زیست جلوگیری نمود.

ملاحظات اخلاقی

نویســندگان کلیه نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانــه، تحریف داده‌ها و داده‌ســازی را در ایــن مقاله رعایت کرده‌اند.

References

1. Mollaei M, Abdollahpour S, Atashgahi S, Abbasi H, Masoomi F, Rad I, et al. Enhanced phenol degradation by Pseudomonas sp. SA01: Gaining insight into the novel single and hybrid immobilizations. Journal of Hazardous Materials. 2010;175:284-92.
2. Girish CR, Ramachandra MV. Removal of Phenol from Wastewater in Packed Bed and Fluidised Bed Columns: A Review. International Research Journal of Environment Sciences. 2013;2(10):96-100.
3. Mohanty SS, Jena HM. Biodegradation of phenol by free and immobilized cells of a novel Pseudomonas sp. NBM11. Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2017;34(1):75-84.
4. Ali O, Namane A, Hellal A. Use and recycling of

Downloaded from ijhe.tums.ac.ir at 8:38 IRST on Monday September 30th 2019

www.SID.ir

Archive of SID

Downloaded from ijhe.tums.ac.ir at 8:38 IRST on Monday September 30th 2019

Ca-alginate biocatalyst for removal of phenol from wastewater. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2013;19:1384-90.

5. Kotresha D, Vidyasaga GM. Phenol Degradation in a Packed Bed Reactor by Immobilized cells of Pseudomonas aeroginosa MTCC 4997. Biocatalysis and Agriculture Biotechnology. 2017;10:386-89.
6. Vidali M. Bioremediation. An overview. Pure and Applied Chemistry. 2001;73(7):1163-72.
7. Patel BP, Kumar A. Multi-substrate biodegradation of chlorophenols by defined microbial consortium. 3 Biotechnology. 2016;6(2):191.
8. Brar SK, Verma M, Surampalli RY, Misra K, Tyagi RD, Meunier N, et al. Bioremediation of Hazardous Wastes—A Review. Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management. 2006;10(2):59-72.
9. Kafilzadeh F, Khaledi Z. Evaluation of the isolated bacteria from activated sludge of Asalouyeh Special Zone municipal wastewater treatment for bioaugmentation of kerosene contaminated soils. Iranian Journal of Health and Environment. 2016;9(2):211-22 (in Persian).
10. Nadalian B, Mogadam MS, Ebrahimipour G, Nadalian B. Biodegradation of malathion using mixed culture of Serratia marcescens BNA1 and Pseudomonas aeroginosa BNA2. Iranian Journal of Health and Environment. 2016;8(4):525-34 (in Persian).
11. Safari M, Ahmady-Asbchin S, Soltani N. The potential of Cyanobacterium Schizothrix vaginata ISC108 in biodegradation of crude oil. Iranian Journal of Health and Environment. 2014;7(3):363-74 (in Persian).
12. Ashmagh FR, Kalantary RR, Farzadkia M, Jafari AJ, Nabizadeh R. Survey of phenanthrene biodegradation's model in contaminated soils by Acinetobacter SP. Iranian Journal of Health and Environment. 2009;2(3):196-203 (in Persian).
13. Partovinia A, Rasekh B. Review of the immobilized microbial cell systems for bioremediation of petroleum hydrocarbons polluted environments. Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 2018;48(1):1-38.
14. Dzionek A, Wojcieszyńska D, Guzik U. Natural carriers in bioremediation: A review. Electronic Journal of Biotechnology. 2016;23:28-36.
15. Keshavarz T, Nedovic V. In focus: Immobilization editorial, Cell immobilization: Past, present and future prospects. Journal of Chemical Technology and Biotechnology. 2006;81:483-84.
16. Kourkoutas Y, Bekatorou A, Banat IM, Marchant R, Koutinas AA. Immobilization technologies and support materials suitable in alcohol beverages production: a review. Food Microbiology. 2004;21:377-97.
17. Nwankwegu AS, Onwosi CO. Microbial cell immobilization: a renaissance to bioaugmentation inadequacies. Areview. Environmental Technology Reviews. 2017;6(1):186-98.
18. Bayat Z, Hassanshahian M, Cappello S. Immobilization of microbes for bioremediation of crude oil polluted environments: A mini review. The Open Microbiology Journal. 2015;9:48-54.
19. Ha J. Biodegradation of the organophosphate pesticide, coumaphos, using microorganisms immobilized in calcium-alginate gel beads [dissertation]. Texas: Texas A&M University; 2005.
20. Al-Khalid T, El-Naas MH. Aerobic biodegradation of phenols: A comprehensive review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 2012;42:1631-90.
21. Martins SCS, Martins CM, Fiúza LMCG, Santaella ST. Immobilization of microbial cells: A promising tool for treatment of toxic pollutants in industrial wastewater. African Journal of Biotechnology. 2013;12(28):4412-18.
22. Somtrakoon K, Suanjit S, Pokethitiyook P, Kruatrachue M, Cassidy MB, Trevors JT, et al. Comparing phenanthrene degradation by alginate-encapsulated and free Pseudomonas sp. UG14Lr cells in

www.SID.ir

Archive of SID

Downloaded from ijhe.tums.ac.ir at 8:38 IRST on Monday September 30th 2019

heavy metal contaminated soils. Journal of Chemical Technology and Biotechnology. 2009;84:1660-68.

23. Sarma SJ, Pakshirrajan K. Surfactant aided biodegradation of pyrene using immobilized cells of Mycobacterium frederiksbergense. International Biodeterioration & Biodegradation. 2011;65:73-77.
24. Bandhyopadhyay K, Das D, Maiti BR. Solid matrix characterization of immobilized Pseudomonas putida MTCC 1194 used for phenol degradation. Applied Microbiology and Biotechnology. 1999;51:891-95.
25. Wang CC, Lee CM, Lu CJ, Chuang MS, Huang CZ. Biodegradation of 2,4,6-trichlorophenol in the presence of primary substrate by immobilized pure culture bacteria. Chemosphere. 2000;41:1873-79.
26. O'reilly KT, Crawford RL. Degradation of Pentachlorophenol by polyurethane-immobilized Flavobacterium cells. Applied and Environmental Microbiology. 1989;55(9):2113-18.
27. Jin X, Tian W, Liu Q, Qiao K, Zhao J, Gong X. Biodegradation of the benzo[a]pyrene-contaminated sediment of the Jiaozhou Bay wetland using Pseudomonas sp. immobilization. Marine Pollution Bulletin. 2017;117(1-2):283-90.
28. Chen Y-M, Lin T-F, Huang C, Lin J-C, Hsieh F-M. Degradation of phenol and TCE using suspended and chitosan-bead immobilized Pseudomonas putida. Journal of Hazardous Materials. 2007;148:660-70.
29. Garcia A, Araujo BR, Birolli WG, Marques CG, Diniz LEC, Barbosa AM, Jr., et al. Fluoranthene biodegradation by Serratia sp. AC-11 immobilized into chitosan beads. Applied Biochemistry and Biotechnology. 2019;188(4):1168-84.
30. Kureel MK, Geed SR, Giri BS, Rai BN, Singh RS. Biodegradation and kinetic study of benzene in bioreactor packed with PUF and alginate beads and immobilized with Bacillus sp.-M3. Bioresource Technology. 2017;242:92-100.
31. Mulla SI, Talwar MP, Bagewadi ZK, Hoskeri RS, Ninnekar HZ. Enhanced degradation of 2-nitrotoluene by immobilized cells of Micrococcus sp. strain SMN-1. Chemosphere. 2013;90:1920-24.
32. Manohar S, Kim CK, Karegoudar TB. Enhanced degradation of naphthalene by immobilization of Pseudomonas sp. strain NGK1 in polyurethane foam. Applied Microbiology and Biotechnology. 2001;55:311-16.
33. Cassidy M, Mullineers H, Lee H, Trevors J. Mineralization of pentachlorophenol in a contaminated soil by Pseudomonas sp UG30 cells encapsulated in κ-carrageenan. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology. 1997;19:43-48.
34. El-Naas MH, Mourad A-HI, Surkatti R. Evaluation of the characteristics of polyvinyl alcohol (PVA) as matrices for the immobilization of Pseudomonas putida. International Biodeterioration & Biodegradation. 2013;85:413-20.
35. Partovinia A, Naeimpoor F. Comparison of phenanthrene biodegradation by free and immobilized cell systems: formation of hydroxylated compounds. Environmental Science and Pollution Research. 2014;21(9):5889-98.
36. Partovinia A, Naeimpoor F. Application of cell immobilization in slurry-phase bioremediation: Phenantherene biodegradation and detoxification. In: Bidoia ED, editor. Toxicity and biodegradation testing. New York: Springer; 2018. p. 105-21.
37. Liu YJ, Zhang AN, Wang XC. Biodegradation of phenol by using free and immobilized cells of Acinetobacter sp. XA05 and Sphingomonas sp. FG03. Biochemical Engineering Journal. 2009;44:187-92.
38. Zouari H, Labat M, Sayadi S. Degradation of 4-chlorophenol by the white rot fungus Phanerochaete chrysosporium in free and immobilized cultures. Bioresource Technology. 2002;84:145-50.
39. Ueno R, Wada S, Urano N. Synergetic effects of cell immobilization in polyurethane foam and use of thermotolerant stairn on degradation of mixed hydrocarbon substrate by Prototheca zopfii. Fisheries Science. 2006;72:1027-33.
40. Zheng C, Zhou J, Wang J, Qu B, Wang J, Lu H,

www.SID.ir

Archive of SID

Downloaded from ijhe.tums.ac.ir at 8:38 IRST on Monday September 30th 2019

et al. Aerobic degradation of nitrobenzene by immobilization of Rhodotorula mucilaginosa in polyurethane foam. Journal of Hazardous Materials. 2009;168:298-303.

41. Siripattanakul S, Khan E. Fundamentals and applications of entrapped cell bioaugmentation for contaminant removal. In: Shah V, editor. Emerging environmental technologies. New York: Springer; 2010. p. 147-70.
42. Zhen-Yu W, Ying X, Hao-Yun W, Jian Z, Dong-Mei G, Feng-Min L, et al. Biodegradation of crude oil in contaminated soils by free and immobilized microorganisms. Pedosphere. 2012;22(5):717-25.
43. Partovinia A, Naeimpoor F. Phenanthrene biodegradation by immobilized microbial consortium in polyvinyl alcohol cryogel beads. International Biodeterioration & Biodegradation. 2013;85:337-44.
44. Kuyukina MS, Ivshina IB, Kamenskikh TN, Bulicheva MV, Stukova GI. Survival of cryogel-immobilized Rhodococcus strains in crude oil-contaminated soil and their impact on Biodegradation efficiency. International Biodeterioration & Biodegradation. 2013;84:118-25.
45. Patil NK, Veeranagouda Y, Vijaykumar MH, Nayak SA, Karegoudar TB. Enhanced and potential degradation of o-phthalate by Bacillus sp. immobilized cells in alginate and polyurethane. International Biodeterioration & Biodegradation. 2006;57:82-87.
46. Sharari M, Roohani M, Latibari AJ, Guillet A, Aurousseau M, Sharari A. Treatment of bagasse preparation effluent by Phanerochaete chrysosporium immobilized on polyurethane foam: Enzyme production versus pollution removal. Industrial Crops and Products. 2013;46:226-33.
47. Song SH, Choi SS, Park K, Yoo YJ. Novel hybrid immobilization of microorganisms and its applications to biological denitrification. Enzyme and Microbial Technology. 2005;37:567-73.
48. Massalha N, Shaviv A, Sabbah I. Modeling the effect of immobilization of microorganisms on the rate of biodegradation of phenol under inhibitory conditions. Water Research. 2010;44:5252-59.
49. Mulla SI, Bangeppagari M, Mahadevan GD, Eqani SAMAS, Sajjan DB, Tallur PN, et al. Biodegradation of 3-chlorobenzoate and 3-hydroxybenzoate by polyurethane foam immobilized cells of Bacillus sp. OS13. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2016;4:1423-31.
50. Forootanfar H, Shakibaie M, Bagherzadeh Z, Aghaie-Khozani M, Nafissi-Varche N, Monsef-Esfahani HR, et al. The removal of ρ-chlorophenol in aqueous cultures with free and alginate-immobilized cells of the microalga Tetraselmis suecica. Journal of Applied Phycology. 2013;25:51-57.
51. Wang X, Gong Z, Li P, Zhang L. Degradation of Pyrene in Soils by Free and Immobilized Yeasts, Candida tropicals. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 2007;78:522-26.
52. Guibal E. Interactions of metal ions with chitosan-based sorbents: a review. Separation and Purification Technology. 2004;38:43-74.
53. Ngah WSW, Teong LC, Hanafiah MAKM. Adsorpion of dyes and heavy metal ions by chitosan composites: A review. Carbohydrate Polymers. 2011;83:1446-56.
54. El-Naas MH, Acio JA, Telib AEE. Aerobic biodegradation of BTEX: Progresses and prospects. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2014;2:1104-22.
55. González G, Herrera G, García MT, Peña M. Biodegradation of phenolic industrial wastewater in a fluidized bed bioreactor with immobilized cells of Pseudomonas putida. Bioresource Technology. 2001;80:137-42.
56. Al-Khalid T, El-Naas MH. Biodegradation of 2,4 dichlorophenol. American Journal of Engineering and Applied Sceinces. 2017;10(1):175-91.
57. Song J, Namgung H, Ahmed Z. Biodegradation of toluene using Candida tropicalis immobilized on polymer matrices in fluidized bed bioreactors. Jour-

www.SID.ir

Archive of SID

nal of Hazardous Materials. 2012;241-242:316-22.
58. Seoud MA, Maachi R. Biodegradation of Naphthalene by Free and Alginate Entrapped Pseudomonas sp. Zeitschrift für Naturforschung. 2003;58(9-10):726-31.
59. Damianovic MHRZ, Moraes EM, Zaiat M, Foresti E. Pentachlorophenol (PCP) dechlorination in horizontal-flow anaerobic immobilized biomass (HAIB) reactors. Bioresource Technology. 2009;100:4361-67.

Downloaded from ijhe.tums.ac.ir at 8:38 IRST on Monday September 30th 2019

www.SID.ir

Archive of SID

Available online: http://ijhe.tums.ac.ir

Systematic Review Article

Application of immobilized microbial cells in biological treatment of contaminated effluent with aromatic compounds: a review article

A Partovinia[1,*], Z Shamsollahi[2]

1- Biorefinery Engineering Department, Faculty of New Technologies Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2- Department of Simulation and Designing of Processes, School of Chemical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFORMATION:

Received: 18 March 2019

Revised: 11 June 2019

Accepted: 16 June 2019

Published: 4 September 2019

Keywords: Aromatic compounds, Bioremediation, Cell immobilization, Entrapment, Polymeric carrier

***Corresponding Author:**

a_partovi@sbu.ac.ir

ABSTRACT

Background and Objective: Bioremediation of contaminants by living microorganisms is a favorable method for elimination or degradation of pollutants to less harmful substances. In the recent decades, cell immobilization technique has been applied to improve biodegradation efficiency and also overcome to free cells disadvantages. The purpose of this review article is to investigate the application of cell immobilization technology with emphsize on polymeric matrices in the aromatic pollutants removal in laboratory scale (shake flask and bioreactor). Also, the performance of free and immobilized cells has been compared in various environmental conditions.

Materials and Methods: In this survey 401, 78, 49, 1450, 0 and 0 relevant articles were found on Scopus, Web of Science, PubMed, Google scholar, SID and Magiran databases, respectively by using keywords such as "Cell immobilization", "Biodegradation" and "Aromatic. Out of 1978 articles, 1167 articles were excluded from the study. Finally, 811 articles were further reviewed.

Results: According to the previous studies, removal of contaminants by immobilized cells using appropriate matrices is higher than freely suspended cell systems. Also, among the cell immobilization systems, cell entrapment in the polymeric carriers is the most widely used method for the bioremediation of aromatic contaminants.

Conclusion: Regarding the superiority of immobilized cells in comparison with free cells specially in harsh environments, the reuse of immobilized cells and their application in bioreactors as well as their scale up potential, development and application of these methods can be considered by researchers for wastewater treatment in our country.

Please cite this article as: Partovinia A, Shamsollahi Z. Application of immobilized microbial cells in biological treatment of contaminated effluent with aromatic compounds: a review article. Iranian Journal of Health and Environment. 2019;12(2):273-88.

Downloaded from ijhe.tums.ac.ir at 8:38 IRST on Monday September 30th 2019

www.SID.ir