

Feasibility Study of Using Cutting Oil as an Organic Phase in a Bioscrubber for Enhanced Absorption of Volatile Organic Compounds from Polluted Air

Ali Jalalian Moghadam

Student Research Committee,
Department of Occupational
Health Engineering, School of
Health, Mashhad University of
Medical Sciences, Mashhad, Iran

Mohammad

Nourmohammadi

*Assistant Professor, Department
of Occupational Health
Engineering, School of Public
Health, Mashhad University of
Medical Sciences, Mashhad, Iran.

(Corresponding Author)
Nourmohammadim@mums.ac.ir

Ramazan Mirzaei

Professor, Department of
Occupational Health Engineering,
School of Public Health,
Mashhad University of Medical
Sciences, Mashhad, Iran.

Jamshid Jamali

Associate Professor, Department
of Biostatistics, School of Public
Health, Mashhad University of
Medical Sciences, Mashhad, Iran.

Abstract

Background and purpose: Volatile organic compounds (VOCs), such as toluene, are among the major air pollutants due to their persistence, hydrophobicity, and adverse effects on human health and the environment. This study aimed to evaluate the feasibility of using cutting oil as an organic phase in two-phase bioscrubbers to enhance the biological removal of toluene.

Materials and Methods: First, the biocompatibility of cutting oil at concentrations of 10%, 20%, and 30% was assessed using activated sludge cultures in media containing the oil. Subsequently, the toluene absorption performance in the presence of the organic phase was evaluated under various flow rates by measuring the mass transfer to the liquid phase. Bioaerosol concentrations at the scrubber outlet were also determined using NIOSH method 0800.

Results: Results indicated that at a 10% concentration, cutting oil had no adverse effects on microbial growth and led to a 5.7-fold increase in toluene absorption compared to pure water. At higher concentrations, microbial growth declined significantly, and the overall mass transfer coefficient (KLa) decreased. The lowest bioaerosol emission was also observed at the 10% oil concentration.

Conclusion: In conclusion, adding cutting oil as an organic phase in bioscrubbers, particularly at lower concentrations, can enhance the absorption capacity of toluene, extend its residence time in the liquid phase, and provide more favorable conditions for biodegradation. Given its low cost, availability, and favorable physical properties, cutting oil appears to be a promising and efficient alternative for application in two-phase bioscrubber systems for VOC removal.

Keywords: Volatile Organic Compounds, Bioscrubber, Cutting Oil, Air Pollution Control

Open Access Policy: This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

► **Citation:** Jalalian Moghadam A, Nourmohammadi M, Mirzaei R, Jamali J. Feasibility Study of Using Cutting Oil as an Organic Phase in a Bioscrubber for Enhanced Absorption of Volatile Organic Compounds from Polluted Air. *Iranian Journal of Research in Environmental Health*. Summer 2025; 11(2):11-23.

Received: 2025/03/24

Accepted: 2025/07/19

Doi:10.22038/jreh.2025.26562

امکان سنجی استفاده از روغن برش به عنوان فاز آلی در بیواسکرا بر به منظور افزایش جذب ترکیبات آلی فرار از هوای آلوده

علی جلالیان مقدم

کمیته تحقیقات دانشجویی، گروه مهندسی بهداشت حرفه ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مشهد، مشهد، ایران.

محمد نورمحمدی

*استادیار، گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مشهد، مشهد، ایران. (نویسنده مسئول)
Nourmohammadim@mums.ac.ir

رمضان میرزایی

استاد، گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مشهد، مشهد، ایران.

جمشید جمالی

دانشیار، گروه آمار زیستی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مشهد، مشهد، ایران.

چکیده

زمینه و هدف: ترکیبات آلی فرار (VOCs) مانند تولوئن به دلیل پایداری، آبگریزی و اثرات زیانبار بر سلامت انسان و محیط زیست، از مهم ترین آلاینده های هوا محسوب می شوند. این مطالعه با هدف ارزیابی امکان سنجی استفاده از روغن برش به عنوان فاز آلی در بیواسکرا برهای دو فاز برای افزایش حذف بیولوژیکی تولوئن انجام شد.

مواد و روش ها: در این مطالعه، با هدف بهبود حذف زیستی تولوئن، امکان سنجی استفاده از روغن برش به عنوان فاز آلی در بیواسکرا برهای دو فاز برای بررسی شد. ابتدا زیست سازگاری روغن برش در غلظت های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد با استفاده از کشت لجن فعال در محیط حاوی روغن ارزیابی شد. سپس عملکرد جذب تولوئن در مجاورت فاز آلی و میزان انتقال آن به فاز مایع در شرایط مختلف آزمایشگاهی و دبی های متفاوت سنجیده شد. همچنین، تراکم بیواُتروسل ها در خروجی دستگاه با روش NIOSH 0800 اندازه گیری شد.

یافته ها: نتایج نشان داد در غلظت ۱۰ درصد، روغن برش تأثیر منفی بر رشد میکروارگانیسم ها نداشته و باعث افزایش ۵/۷ برابری جذب تولوئن نسبت به آب خالص شده است. همچنین با افزایش غلظت فاز آلی به دلیلی افزایش ویسکوزیته فاز مایع، رشد میکروبی کاهش یافته و ضریب انتقال جرم نیز کمتر شد. کمترین میزان بیواُتروسل در خروجی نیز در غلظت ۱۰ درصد مشاهده شد.

نتیجه گیری: در نتیجه، افزودن روغن برش به عنوان یک فاز آلی در بیواسکرا برها، به ویژه در غلظت های پایین تر، می تواند ظرفیت جذب تولوئن را افزایش دهد، زمان اقامت آن را در فاز مایع افزایش دهد و شرایط مطلوب تری را برای تجزیه بیولوژیکی فراهم کند. با توجه به هزینه کم، در دسترس بودن و خواص فیزیکی مطلوب، به نظر می رسد روغن برش یک جایگزین امیدوارکننده و کارآمد برای کاربرد در سیستم های بیواسکرا بر دو فاز برای حذف VOC باشد.

کلید واژه ها: ترکیبات آلی فرار، بیواسکرا بر، روغن برش، کنترل آلودگی هوا

◀ **استناد:** جلالیان مقدم ع، نورمحمدی م، میرزایی ر، جمالی ج. امکان سنجی استفاده از روغن برش به عنوان فاز آلی در بیواسکرا بر به منظور افزایش جذب ترکیبات آلی فرار از هوای آلوده. *فصلنامه ی پژوهش در بهداشت محیط*. تابستان ۱۴۰۴؛ ۱۱(۲): ۱۱-۲۳.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۸

نوع مقاله: پژوهشی

ترکیبات آلی فرار (VOCs^۱) از مهم‌ترین آلاینده‌های هوا محسوب می‌شوند که حضور آن‌ها در محیط زیست با پیامدهای گسترده‌ای برای سلامت انسان و پایداری زیست‌محیطی همراه است (۱،۲). این ترکیبات در فرآیندهای فتوشیمیایی لایه تروپوسفر نقش کلیدی ایفا کرده و موجب تولید ازن زمینی و سایر اکسیدکننده‌های ثانویه می‌شوند که از مهم‌ترین عوامل کاهش کیفیت هوا به‌شمار می‌آیند (۳،۴). افزون بر این، برخی VOCها در تخریب لایه‌ی ازن استراتوسفری نیز مؤثر هستند که به‌طور غیرمستقیم سلامت انسان و سایر موجودات زنده را تهدید می‌کند. از میان VOCها، ترکیبات آروماتیک تک‌حلقه‌ای نظیر بنزن، تولوئن و زایلن (BTX) به‌دلیل کاربرد فراوان در صنایع شیمیایی، رنگ‌سازی، تولید پلاستیک و چسب، اهمیت ویژه‌ای دارند. این ترکیبات از پتانسیل بالایی برای آسیب به دستگاه عصبی، کبد، کلیه و سایر اندام‌های حیاتی برخوردار بوده و تماس طولانی‌مدت با آن‌ها ممکن است منجر به بروز سرطان و ناهنجاری‌های ایمنی یا عصبی شود (۵). تولوئن به‌عنوان یکی از اعضای این گروه، ماده‌ای سمی و دارای ویژگی موتاژنیک است که عمدتاً از احتراق سوخت‌های فسیلی ناشی شده و در صنایع مختلف به‌عنوان حلال مورد استفاده قرار می‌گیرد. هرچند سمیت آن از بنزن کمتر است (۶). بر این اساس، آژانس بین‌المللی تحقیقات سرطان (IARC^۲) تولوئن را در گروه ۳ و انجمن آمریکایی متخصصین بهداشت صنعتی (ACGIH^۳) آن را در دسته A4^۴ طبقه‌بندی کرده‌اند (۷).

تلاش‌های گسترده‌ای به‌منظور حذف یا کاهش VOCها از جریان هوا صورت گرفته است. روش‌های موجود به‌طور کلی به دو دسته فیزیکی-شیمیایی و زیستی تقسیم می‌شوند (۱۰). روش‌های فیزیکی-شیمیایی مانند جذب سطحی، احتراق حرارتی و شیمیایی یا استفاده از اسکرابرهای

شیمیایی، علی‌رغم اثربخشی، با چالش‌هایی نظیر هزینه بالا،

نیاز به مواد شیمیایی گران‌قیمت، تولید پسماند و نیاز به سیستم‌های پیچیده دفع همراه هستند. در مقابل، استفاده از سامانه‌های زیستی مانند بیوفیلترها، بیواسکرابرها و بیوترکلرها به‌عنوان گزینه‌هایی پایدار، کم‌هزینه و سازگار با محیط زیست مورد توجه قرار گرفته‌اند (۱۰،۷).

بیواسکرابرها به‌عنوان یکی از متداول‌ترین سیستم‌های زیستی، از یک ستون جذب و یک بیوراکتور تشکیل شده‌اند. در این سامانه، آلاینده‌های گازی ابتدا در فاز مایع جذب و سپس توسط میکروارگانیسم‌ها در فاز زیستی تجزیه می‌شوند. در اغلب موارد، فاز مایع از آب تشکیل شده است؛ اما برای ترکیبات آب‌گریز مانند تولوئن، راندمان جذب در فاز آبی بسیار پایین بوده و یکی از محدودیت‌های اساسی در عملکرد این سیستم‌ها محسوب می‌شود. برای رفع این محدودیت، استفاده از فاز آلی نامحلول در آب به‌عنوان جذب‌کننده واسط در سیستم‌های دو فازیه پیشنهاد شده است که سبب افزایش انحلال‌پذیری ترکیبات آب‌گریز و فراهم‌سازی شرایط مناسب برای تجزیه زیستی می‌شود (۱۱). در این میان، روغن‌های برش به‌دلیل ویژگی‌هایی چون خاصیت روان‌کاری، هدایت حرارتی، قابلیت پخش‌پذیری مناسب، در دسترس بودن، قیمت پایین و پایداری شیمیایی، می‌توانند به‌عنوان فاز آلی جایگزین روغن‌های سیلیکونی در بیواسکرابرها مطرح شود (۱۲، ۱۳) در حالی‌که روغن‌های سیلیکونی در برخی مطالعات پیشین به‌عنوان فاز آلی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، اما هزینه بالا و افزایش ویسکوزیته فاز مایع، کاربرد آن‌ها را در مقیاس‌های نیمه‌صنعتی و صنعتی محدود کرده است. با این حال، یکی از چالش‌های مهم در استفاده از روغن برش، احتمال اثرات بازدارنده آن بر فعالیت میکروارگانیسم‌هاست؛ چرا که برخی از انواع این روغن‌ها حاوی افزودنی‌های باکتری‌کش^۶ هستند که ممکن است عملکرد زیستی سامانه را مختل کنند. تاکنون مطالعه‌ای جامع در زمینه زیست‌سازگاری روغن برش با میکروارگانیسم‌های مورد استفاده در بیواسکرابرها و

^۱ Volatile Organic Compounds

^۲ International Agency for Research on Cancer

^۳ Not Classifiable as to its Carcinogenicity to Humans

^۴ American Conference of Governmental Industrial Hygienists

^۵ Not Classifiable as a Human Carcinogen

^۶ Biocide

حاوی ۵۰ سی سی از مخلوط نوترینت براث^۲ و روغن برش در غلظت‌های ۱۰-۲۰-۳۰ درصد و یک ارلن بدون استفاده از روغن برش به عنوان نمونه شاهد آماده سازی شد. سپس مقدار ۱۰۰ میکرولیتر از محلول لجن رقیق شده را به وسیله میکروسمپلر به داخل ارلن‌ها اضافه شد. به منظور رشد میکروارگانیسم‌ها، نمونه‌ها در داخل انکوباتور شیکردار در ۲۵۰ دور در دقیقه و دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد انکوبه^۳ شدند (شکل ۱). پس از گذشت ۱۶ ساعت مقدار ۱۰۰ میکرولیتر از هر نمونه بر روی پلیت‌های نوترینت آگار کشت داده شد و در دمای ۳۷ درجه انکوبه شدند. سپس رشد میکروارگانیسم‌ها بر روی پلیت و تاثیر غلظت‌های مختلف از روغن برش بر روی رشد میکروارگانیسم‌ها مورد بررسی قرار گرفت (۱۴).



شکل ۱- نمونه‌های حاوی مخلوطی از روغن برش، نوترینت براث و لجن به منظور بررسی امکان رشد میکروارگانیسم‌ها

بررسی میزان انتقال جرم

با توجه به آبریز بودن تولوئن افزودن یک فاز آلی به منظور افزایش جذب آن در سیستم‌های دوفازی ضروری می‌باشد در این مطالعه میزان انتقال جرم برای غلظت‌های مختلفی از روغن برش مورد آزمایش قرار گرفت. تا غلظت بهینه فاز آلی انتخاب شود. شکل ۲ دیاگرام مورد استفاده به منظور اندازه‌گیری میزان انتقال جرم برای غلظت‌های مختلفی از روغن برش را نشان می‌دهد برای این منظور غلظت‌های ۱۰-۲۰-۳۰ درصد از فاز آلی در داخل ارلن یک لیتری ریخته شد و تولوئن در محدوده غلظتی ۱۰۰ PPM را از داخل این محلول عبور داده شد. سپس غلظت تولوئن در ورودی و خروجی را در واحد زمان

عملکرد آن در ارتقاء جذب ترکیبات آب‌گریز انجام نشده است و ترکیبات آلی فرار به‌ویژه تولوئن، به دلیل انتشار گسترده و اثرات زیان‌بار بر سلامت انسان و محیط زیست، به یکی از چالش‌های جدی در مدیریت آلودگی هوا تبدیل شده‌اند. ناکارآمدی نسبی روش‌های فیزیکی و شیمیایی متداول در حذف پایدار این آلاینده‌ها، ضرورت توسعه راهکارهای جایگزین با کارایی بالا و سازگاری زیست‌محیطی را آشکار ساخته است. در این زمینه، روش‌های حذف زیستی این ترکیبات و به ویژه بیواسکرابرهای دوفازی با بهره‌گیری از فاز آلی می‌توانند رویکردی نوین برای بهبود جذب و تجزیه ترکیبات آب‌گریز ارائه دهند. بررسی امکان استفاده از روغن برش به عنوان فاز آلی در این سامانه‌ها، نه تنها می‌تواند محدودیت‌های ناشی از هزینه و کارکرد روغن‌های سیلیکونی را برطرف سازد، بلکه گامی مؤثر در ارتقای کارایی و کاربرد صنعتی فناوری‌های زیستی محسوب می‌شود. بر این اساس، هدف از مطالعه حاضر، ارزیابی امکان استفاده از روغن برش به عنوان فاز آلی در بیواسکرابر، بررسی سازگاری آن با میکروارگانیسم‌ها، و تحلیل تأثیر آن بر بهبود راندمان جذب تولوئن از جریان هوای آلوده است.

روش کار

در این مطالعه به منظور ارزیابی کارایی و ارزیابی خطرات محیط زیستی استفاده از روغن برش به عنوان فاز آلی در بیواسکرابر، سه مرحله کلیدی طراحی و اجرا شد. ابتدا زیست‌سازگاری روغن برش با میکروارگانیسم‌های تجزیه‌کننده آلاینده‌ها بررسی شد. سپس میزان انتقال جرم تولوئن در حضور غلظت‌های مختلف روغن برش ارزیابی گردید. در نهایت، به منظور بررسی اثرات زیست محیطی سیستم، تراکم بیوآئروسول‌ها در خروجی بیواسکرابر مورد سنجش قرار گرفت.

آزمایش زیست سازگار بودن^۱ روغن برش

در این مطالعه کاربردی به منظور زیست سازگار بودن روغن برش انجام پذیرفت ابتدا به منظور رقیق‌سازی، ۱ سی سی از لجن فعال در داخل فالكون ۵۰ بوسیله آب دیونیزه به حجم ۱۰ سی سی رسانده شد. هم‌چنین ۳ ارلن

^۲ Nutrient broth

^۳ Incubation

^۱ Biocompatibility

به‌منظور بررسی تراکم ذرات هوابرد بیولوژیک از نمونه‌برداری

تک‌مرحله‌ای Anderson، دستگاه QuickTake که براساس برخورد مستقیم عمل می‌کند و روش استاندارد NIOSH 0800 انجام گرفت. نمونه‌برداری در دبی ۲۸/۳ لیتر بر دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه صورت گرفت. دبی پمپ نمونه‌برداری قبل از انجام کار با استفاده از کالیبراتور دیجیتال مدل کالیبره گردید.

در این پژوهش از محیط کشت بلاد آگار برای رشد عوامل باکتریایی استفاده شد. قبل از قرار دادن پلیت‌های محیط‌های کشت برای جلوگیری از هرگونه تداخل میکروبی گندزدایی دستگاه با الکل اتانول ۷۰٪ صورت گرفت. پس از هر بار نمونه‌برداری اطراف پلیت توسط پارافیلیم مسدود می‌شد تا از خطای ناشی از آلودگی ثانویه جلوگیری شود و پلیت‌ها به‌صورت وارونه در جعبه‌ی حمل‌ونقل با یخ قرار گرفتند سپس تمام محیط‌های کشت به‌همراه برچسب اطلاعاتی که شامل نام بخش، نامه اتاق و تاریخ بود، که روی آن‌ها درج شده بود به آزمایشگاه منتقل شدند و به مدت ۴۸ تا ۷۲ ساعت در انکوباتور با دمای ۳۵ تا ۳۷ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گرفتند و سپس شمارش کلنی‌ها انجام شد (۱۷).

یافته‌ها

بررسی زیست‌سازگاری^۱ روغن برش

با توجه به این‌که شرکت‌های سازنده روغن برش یکی از ویژگی‌های محصول خود را داشتن مواد باکتری‌کش^۲ معرفی می‌کنند، یکی از اهداف این مطالعه تعیین غلظتی از روغن برش بود که بر روی میکروارگانیسم‌ها تاثیری نداشته باشد. برای این منظور، لجن حاوی میکروارگانیسم‌های تجزیه‌کننده تولوئن در غلظت‌های ۳۰-۲۰-۱۰ درصد از روغن برش همراه نوترینت برات تلقیح^۳ شد و بعد از گذشت ۲۴ ساعت بر روی نوترینت آگار کشت داده شد. نتایج نشان داد که روغن برش در غلظت‌های کمتر از ۱۰ درصد تاثیری بر روی رشد میکروارگانیسم‌ها ندارد (شکل ۳). همان‌طور

اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری تا زمانی که غلظت تولوئن به نقطه اشباع برسد ادامه داشت. برای اندازه‌گیری موازنه جرم و اندازه‌گیری تولوئن در فاز مایع تابعی از زمان از معادله ۱ استفاده شد. میزان انتقال آلاینده به فاز مایع وابسته به غلظت فاز آلی و آب‌گریزی و آب‌دوستی آلاینده دارد.

$$C(t) = \frac{Q}{V} \left(C_s t - \int_0^t C_g dt \right) \quad \text{معادله ۱}$$

$$QC_s = QC_g(t) + V \frac{dc}{dt} \quad \text{معادله ۲}$$

که :

Q = دبی جریان هوا (m^3/s)

V = حجم حلال (m^3)

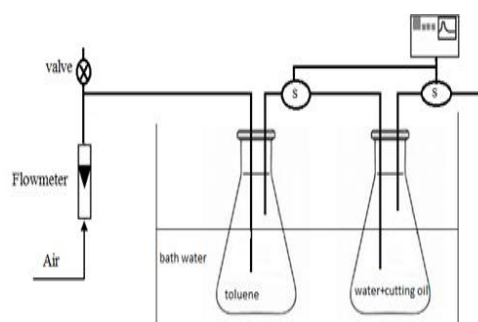
C_0 = غلظت تولوئن در ورودی (g/m^3)

C_g = غلظت در فاز گازی (g/m^3)

$C(t)$ = غلظت تولوئن در فاز مایع در تابعی از زمان (g/m^3)

هم‌چنین برای به‌دست آوردن غلظت در حالت اشباع (هنگامی که غلظت در ورودی و خروجی به تعادل می‌رسد از فرمول زیر استفاده می‌شود (۱۵، ۱۶).

$$\frac{dc}{dt} = k_L a (C_s - C(t)) \quad \text{معادله ۳}$$



شکل ۲- دیاگرام مورد استفاده به منظور اندازه‌گیری میزان انتقال جرم برای غلظت‌های مختلفی از روغن برش

تراکم بیواثر و سل در خروجی بیواسکرابر

¹ Biocompatibility

² Bactericide

³ Incubation



شکل ۵- بسترهای کشت داده شده از نمونه روغن برش با غلظت ۲۰ درصد (سمت راست) و نمونه بدون حضور روغن برش (نمونه شاهد)

میزان انتقال جرم^۱ در روغن برش

به طور کلی انتقال جرم شامل مباحثی است که در آن نیروی محرکه غلظتی عامل انتقال جرم در یک محلول است. انتقال جرم در بسیاری از پدیده های طبیعی و صنعتی نقشی اساسی را ایفا می کند. فرآیند تنفس موجودات زنده مثالی از پدیده های انتقال جرم است. در بسیاری از فرآیندهای شیمیایی صنعتی، عملیات انتقال جرم اهمیت زیادی دارد. به عنوان مثال می توان به بخش های مختلف پالایشگاه های نفت و تصفیه روغن اشاره کرد. در این مطالعه برای سه غلظت مختلف از روغن برش در آب غلظت تولوئن در ورودی و خروجی ایمپینجر اندازه گیری شد و هنگامی که غلظت تولوئن در ورودی و خروجی ایمپینجر به تعادل رسید غلظت در فاز مایع به وسیله معادله^۲ محاسبه شد. نمودار ۱ و نمودار ۲ غلظت تولوئن در نقطه اشباع^۲ در غلظت های مختلف از روغن برش و در دبی های یک و دو لیتر را نشان داد. نتایج نشان داد که غلظت تولوئن برای آب با کمترین زمان به حالت اشباع رسید که این می تواند به دلیل خاصیت آگریزی تولوئن باشد. برای غلظت ۱۰ درصد از روغن برش نتایج نشان داد که ۵۰ درصد از تولوئن بعد از گذشت حدودا ۲۰۰ دقیقه جذب شد و در ادامه غلظت در فاز گازی افزایش می یابد تا هنگامی که غلظت ورودی و خروجی با هم برابر شد. همچنین با دو برابر کردن دبی مدت زمان به نصف کاهش یافت. نتایج نشان داد که استفاده از روغن برش باعث افزایش غلظت تولوئن در فاز مایع و همچنین افزایش زمان اشباع می شود.

که در شکل ۴ و ۵ نشان داده شده است رشد میکروارگانیسم ها در غلظت ۲۰ و ۳۰ درصد بسیار کمتر از نمونه شاهد و غلظت ۱۰ درصد می باشد که نشان دهنده ی تاثیر روغن برش بر روی میکروارگانیسم ها در غلظت های بالاتر از ۱۰ درصد می باشد. مشخصات فیزیکی روغن های مورد استفاده در جدول زیر آورده شده است (جدول ۱). و با توجه به ویسکوزیته کمتر 5000 Viyer برای بیواسکرا بر انتخاب شد.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی روغن برش مورد استفاده در این مطالعه

نوع	درصد ترکیب با آب	دانسیته در درجه	PH	شکل ظاهری
Viyer 4000	۵-۲۰	۰/۹۰۲	۹-۹/۵	سفید
Viyer 5000	۵-۲۰	۰/۸۶۵	۹-۹/۵	سفید



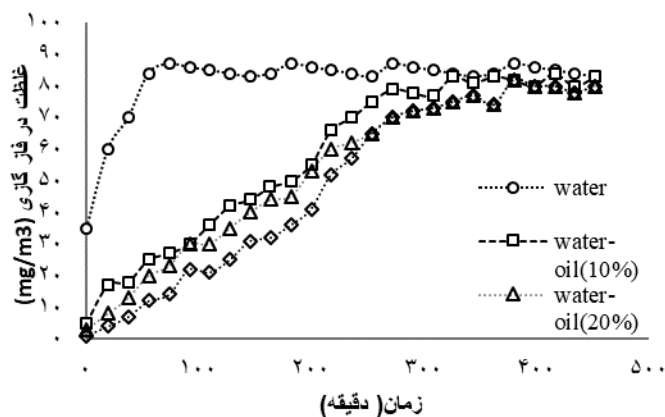
شکل ۳- سترهای کشت داده شده از نمونه روغن برش با غلظت ۱۰ درصد (سمت راست) و نمونه بدون حضور روغن برش (نمونه شاهد)



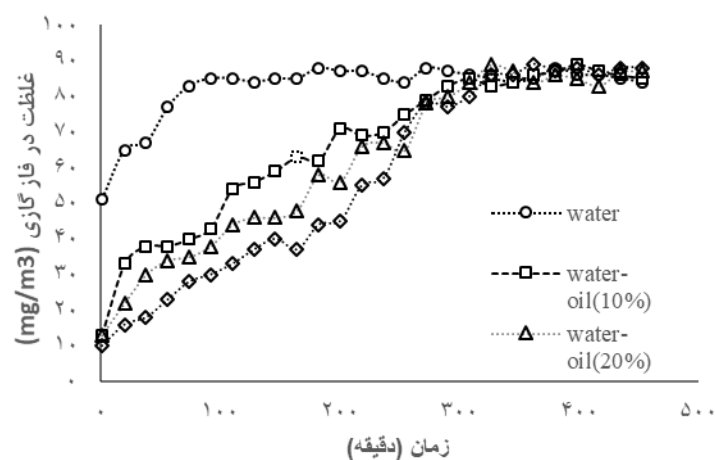
شکل ۴- بسترهای کشت داده شده از نمونه روغن برش با غلظت ۲۰ درصد (سمت راست) و نمونه بدون حضور روغن برش (نمونه شاهد)

¹ Mass Transfer

² Saturation Point



نمودار ۱- غلظت تولوئن در فاز گازی خروجی از راکتور در واحد زمان در محلول مایع حاوی غلظت‌های مختلف از روغن برش (دبی ۱ لیتر بر دقیقه)



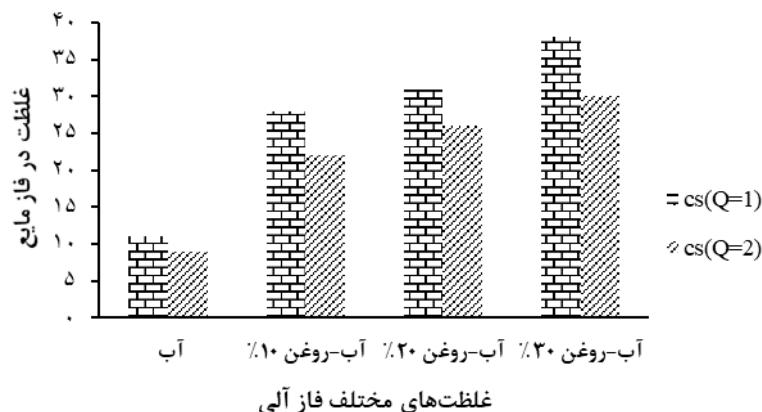
نمودار ۲- غلظت تولوئن در فاز گازی خروجی از راکتور در واحد زمان در محلول مایع حاوی غلظت‌های مختلف از روغن برش (دبی ۲ لیتر بر دقیقه)

همان‌طور که در نمودار ۳ نشان داده شده است با افزایش فاز آلی غلظت در فاز مایع نیز بیشتر می‌شود و ارتباط معکوسی بین ضریب انتقال جرم و غلظت در فاز مایع وجود دارد.

جدول ۲ ضریب انتقال جرم و غلظت در فاز مایع برای سه غلظت از روغن برش و آب به‌عنوان نمونه شاهد نشان داده شده است. با افزایش غلظت روغن برش به‌عنوان فاز آلی، غلظت تولوئن در فاز آبی افزایش یافته و ضریب انتقال جرم کاهش می‌یابد.

جدول ۲- ضریب انتقال جرم و غلظت در فاز مایع در محلول مایع حاوی غلظت‌های مختلف از روغن برش

آب - روغن ۳۰ درصد		آب - روغن ۲۰ درصد		آب - روغن ۱۰ درصد		آب	
غلظت در فاز مایع $C_s(\text{mg l}^{-1})$	ضریب انتقال جرم KLa h^{-1}	غلظت در فاز مایع $C_s(\text{mg l}^{-1})$	ضریب انتقال جرم KLa h^{-1}	غلظت در فاز مایع $C_s(\text{mg l}^{-1})$	ضریب انتقال جرم KLa h^{-1}	غلظت در فاز مایع $C_s(\text{mg l}^{-1})$	ضریب انتقال جرم KLa h^{-1}
37 ± 4	0.38 ± 0.05	$31 \pm 2/5$	0.8 ± 0.04	$28 \pm 1/6$	$3/8 \pm 0.7$	11 ± 1	

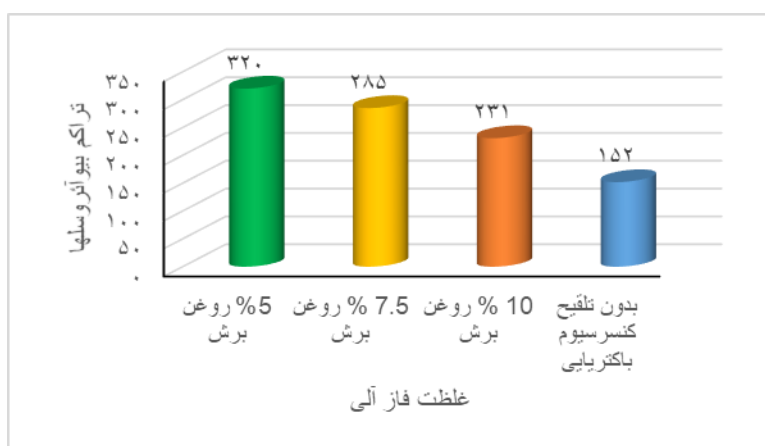


نمودار ۳- غلظت در فاز مایع (1-mg/l) تولوئن در محلول حاوی غلظت‌های مختلف روغن برش به عنوان فاز آلی

اندازه‌گیری تراکم بیوائروسل‌ها

فضای داخل می‌باشد. همان‌طور که نشان داده شده است بیشترین تراکم بیوائروسل‌ها در غلظت ۵ درصد (میانگین ۳۲۰) از روغن برش به‌عنوان فاز آلی و کمترین آن در غلظت ۱۰ درصد از روغن برش (میانگین ۲۳۱) می‌باشد (نمودار ۴).

به‌منظور کیفیت تعیین هوای خروجی از بیواسکرابر در هر دوره از عملکرد بیواسکرابر ۲۰ نمونه از خروجی بیواسکرابر در شرایط مختلف با روش NIOSH 0800 به‌منظور تعیین غلظت بیوائروسل‌ها نمونه‌برداری شد. در این مطالعه هدف از بررسی بیوائروسل‌ها در خروجی بیواسکرابر امکان‌سنجی ورود مجدد هوای خروجی از بیواسکرابر به



نمودار ۴- تراکم بیوائروسل‌ها CFU/M 3 در حالت‌های مختلف از عملکرد بیواسکرابر

بحث

از ترکیباتی که در این مطالعه استفاده شد روغن برش می‌باشد که به‌طور وسیعی در صنایع استفاده می‌شود و ارزان و در دسترس می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است افزودن روغن برش در غلظت‌های کمتر از ۱۰

با توجه به این‌که تولوئن یک ترکیب آب‌گریز می‌باشد به‌منظور افزایش جذب در فاز مایع از ترکیبات گوناگون استفاده می‌شود که باید دارای ویژگی‌هایی باشد، یکی از این ویژگی‌ها عدم تاثیر بر روی میکروارگانیسم‌ها می‌باشد. یکی

اکسیژن به دلیل فاز آلی می‌باشد که دارای حلالیت بالای اکسیژن در مقایسه فاز آبی می‌باشد. آن‌ها همچنین به این نتیجه رسیدند که ضریب انتقال اکسیژن در بیواسکرابر حاوی فاز آلی در مقایسه با بیواسکرابر فاز آبی بسیار کمتر می‌باشد که با نتایج حاصل از این مطالعه مطابقت داشت (۲۱). همان‌طور که در نمودار ۱ و ۲ نشان داده شده است با افزودن روغن برش به فاز مایع غلظت تولوئن در فاز گازی به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد که این نشان‌دهنده‌ی این است که آلایندہ در فاز مایع به دام افتاده است.

هم‌چنین بر اساس نتایج جدول ۲ افزودن روغن برش باعث کاهش ضریب انتقال جرم (KLa) و افزایش غلظت تولوئن در فاز مایع می‌شود. غلظت در فاز مایع هنگام استفاده از آب 11 ± 0.8 میلی‌گرم بر لیتر و با افزودن روغن برش در غلظت ۱۰ درصد، غلظت در فاز مایع 28.6 ± 0.1 میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد. مقدار تولوئن در فاز مایع با افزودن روغن برش در غلظت ۱۰ درصد نسبت به بدون استفاده از روغن برش $7/5$ برابر بیشتر می‌باشد. مطالعه ریواس نشان دادند که حداکثر جذب اکسیژن در روغن سیلیکون با ویسکوزیته کمتر اتفاق می‌افتد (cSt_{10}) و میزان ضریب انتقال جرم ارتباط مستقیمی با کسر حجمی روغن سیلیکون دارد (۲۲).

نمودار ۳ ضریب انتقال جرم (h^{-1}) در محلول حاوی غلظت‌های مختلفی از روغن برش به‌عنوان فاز آلی در دی‌های ۱ و ۲ لیتر بر دقیقه را نشان می‌دهد. بدون استفاده از روغن برش ضریب انتقال جرم $3/8 \pm 0.7 h^{-1}$ بود و در حالت استفاده از روغن برش در غلظت ۱۰ درصد این میزان به $0.4 \pm 0.8 h^{-1}$ کاهش یافته است و به‌همان نسبت غلظت در فاز مایع افزایش یافته است. همان‌طور که نمودار ۲ غلظت تولوئن در فاز گازی خروجی از راکتور در واحد زمان در محلول مایع حاوی غلظت‌های مختلف از روغن برش (دبی ۱ لیتر بر دقیقه) نشان داده شده است هنگام استفاده از آب بدون حضور روغن برش غلظت در فاز گازی بعد از گذشت ۲۰ دقیقه غلظت در فاز گازی ۵۰ درصد می‌شود و در غلظت ۱۰ درصد از روغن برش زمان لازم برای خروج ۵۰ درصد از غلظت ورودی به ۲۰۰ دقیقه افزایش می‌یابد. نمودار ۲ نشان می‌دهد که افزایش دبی با ثابت نگه داشتن غلظت ورودی مدت زمان به تعادل رسیدن

درصد تأثیری بر کاهش رشد میکروارگانیسم‌ها ندارد. نتایج حاصل از آزمون‌های زیست‌سازگاری نشان داد که در غلظت‌های کمتر از ۱۰ درصد، روغن برش اثر قابل توجهی بر رشد میکروارگانیسم‌های تجزیه‌کننده تولوئن نداشته و رشد باکتری‌ها مشابه نمونه شاهد بود. این یافته از نظر عملیاتی بسیار حائز اهمیت است، چرا که امکان استفاده از روغن برش به‌عنوان فاز آلی در بیوراکتورهای زیستی را بدون ایجاد اختلال در فعالیت میکروبی فراهم می‌کند. با این‌حال، کاهش معنی‌دار رشد میکروارگانیسم‌ها در غلظت‌های ۲۰ و ۳۰ درصد نشان‌دهنده خاصیت ضدباکتریایی روغن در این غلظت‌ها است. نکته‌ای که می‌تواند در طراحی سیستم‌های زیستی محدودیت ایجاد کند. بنابراین، پیشنهاد می‌شود در استفاده عملی، غلظت روغن برش در سیستم‌های زیستی از ۱۰ درصد تجاوز نکند. لالانه و همکاران نیز نشان دادند که روغن برش در غلظت کمتر از ۵ درصد تأثیری بر روی جمعیت میکروارگانیسم‌ها ندارد (۱۳) مطالعه‌ای که فابیان و پیونیک به‌منظور بررسی رشد باکتری در امولسیون‌های محلول در روغن انجام دادند، نتایج نشان داد که استفاده از روغن برش هیچ تأثیری بر رشد جمعیت میکروبی در امولسیون ندارد. هم‌چنین نشان دادند که با افزایش غلظت فاز آلی، جمعیت میکروبی در فاز لگاریتمی کاهش می‌یابد (۱۸).

در مطالعه‌ای که بنت و همکاران تحت عنوان زنده‌ماندن باکتری‌ها در روغن برش انجام دادند در این مطالعه زمان زنده‌ماندن ۳۰ گونه مختلف از باکتری در ۹ غلظت روغن برش مورد آزمایش قرار گرفت باکتری‌های گرم منفی قادر بودند مدت زمان قابل توجهی زنده بمانند در حالی‌که باکتری‌های گرم مثبت خیلی زود می‌مردند (۱۹،۲۰).

میزان ضریب انتقال جرم به خصوصیات فیزیکی - شیمیایی آلایندہ و ویژگی‌های محیط جذب (ویسکوزیته و میزان نمک) هم‌چنین خصوصیات داخلی راکتور و شرایط عملیاتی (ویسکوزیته گاز، ویسکوزیته مایع، pH و دما) وابسته است. یکی از جنبه‌های مهم سیستم‌های مایع-مایع به‌وسیله نیلسن و همکاران مورد بررسی قرار گرفت آن‌ها به این نتیجه رسیدند که استفاده از فاز آلی باعث افزایش انتقال اکسیژن می‌شود. آن‌ها دریافتند که این افزایش انتقال

کاهش می‌یابد و تقریباً نصف می‌شود مطالعات زیادی نشان دادند که استفاده از فاز آلی در بیوراکتورهای دوفازی می‌تواند باعث افزایش جذب اکسیژن در نتیجه باعث بهبود انتقال جرم اکسیژن می‌شود که عملکرد میکروارگانیسم‌ها را در تجزیه زیستی آلاینده‌ها بهبود می‌بخشد. در مطالعات از ترکیبات مختلفی از قبیل روغن‌های خوراکی (۲۳) و پلاسمای غیر حرارتی (۲۴)، روغن سیلیکون (۲۵)، روغن برش (۲۶) به منظور افزایش جذب ترکیبات آبریز استفاده شده است. حلالیت محدود اکسیژن در آب یک محدودیت فیزیکی بر روی عملکرد بیوراکتور است. معرفی یک حلال آلی نامحلول در آب به عنوان یک فاز مایع دیگر به انتقال اکسیژن در بیوراکتورها کمک می‌کند با افزودن یک فاز آلی، مقدار بیشتر اکسیژن از جریان گاز جدا می‌شود و در سیستم دوفازی حفظ می‌شود.

بر طبق یافته‌های این مطالعه غلظت تولوئن در فاز مایع با استفاده از روغن برش به عنوان فاز آلی افزایش می‌یابد لالانه و همکاران نیز این نکته را تایید کردند که استفاده از روغن برش باعث افزایش غلظت در فاز مایع می‌شود که با نتایج حاصل از این مطالعه مطابقت دارد (۲۷). همچنین استفاده از فاز آلی باعث افزایش جذب آلاینده هدف به فاز آلی می‌شود. غلظت در نقطه اشباع ترکیبات در فاز مایع به ثابت هنری ترکیب وابسته است.

همان‌طور که در نمودار ۱ نشان داده شده است در هنگام استفاده از آب غلظت در فاز گازی بعد از گذشت مدت زمان کوتاهی با غلظت ورودی برابر می‌شود اما هنگام استفاده از روغن برش بعد از گذشت ۲۰۰ دقیقه ۵۰ درصد از تولوئن هنوز جذب سیستم دوفازی می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از روغن برش باعث جذب و افزایش زمان ماند تولوئن در فاز مایع می‌شود و این زمان لازم برای تجزیه را در اختیار میکروارگانیسم‌ها قرار می‌دهد.

نتایج مربوط به بیوآئروسل‌ها نشان داد که تراکم خروجی میکروارگانیسم‌ها وابسته به غلظت فاز آلی بوده و در غلظت ۵ درصد بیشترین و در غلظت ۱۰ درصد کمترین مقدار ثبت شده است. این نتیجه را می‌توان به پایداری بهتر میکروارگانیسم‌ها در شرایط بهینه زیست‌سازگار نسبت داد. در واقع، کاهش تراکم بیوآئروسل‌ها در غلظت ۱۰ درصد

نشان می‌دهد که شرایط مناسب‌تری برای تثبیت میکروارگانیسم‌ها در محیط وجود دارد و انتشار میکروارگانیسم‌ها به هوا کاهش یافته است، که در کاهش خطرات زیستی هوای خروجی نقش مثبتی ایفا می‌کند. این موضوع به‌ویژه در مواقعی که بازچرخانی هوای خروجی در دستور کار باشد از اهمیت بالایی برخوردار است در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از روغن برش با غلظت بهینه (حدود ۱۰ درصد) می‌تواند علاوه بر حفظ فعالیت زیستی میکروارگانیسم‌ها، باعث بهبود جذب ترکیبات آلی فرار شود، بدون آن‌که باعث افزایش آلاینده‌ی بیولوژیکی هوای خروجی گردد. انتخاب نوع روغن نیز بر عملکرد سیستم تأثیرگذار است، به‌طوری که روغن Viyer 5000 با ویسکوزیته کمتر، در این مطالعه به‌عنوان گزینه‌ی مناسب‌تر انتخاب شد. نتایج این پژوهش می‌تواند مبنایی برای طراحی و بهینه‌سازی بیواسکرابرهای دوفازی در کاربردهای صنعتی واقع شود. این مطالعه در مقیاس آزمایشگاهی و با تمرکز بر تولوئن به‌عنوان آلاینده مدل انجام شد؛ بنابراین تعمیم نتایج به مقیاس صنعتی و سایر VOCها نیازمند بررسی‌های بیشتر است. علاوه بر این، تنها از دو نوع روغن برش تجاری با ترکیب شیمیایی محدود استفاده شد و اثر احتمالی افزودنی‌های مختلف به‌طور کامل ارزیابی نگردید. همچنین، جامعه میکروبی مورد استفاده محدود به لجن بومی بود و بررسی بر روی سویه‌های اختصاصی انجام نشد. نهایتاً، ارزیابی انتشار بیوآئروسل‌ها تنها در شرایط کنترل‌شده صورت گرفت و مطالعات میدانی بیشتری لازم است.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که استفاده از روغن برش در غلظت‌های پایین (حدود ۱۰ درصد) می‌تواند ضمن حفظ فعالیت میکروبی و کاهش تراکم بیوآئروسل‌ها، به بهبود راندمان جذب تولوئن کمک کند. با این حال، غلظت‌های بالاتر علاوه بر ایجاد اثرات بازدارنده بر رشد میکروارگانیسم‌ها، موجب کاهش ضریب انتقال جرم نیز می‌شوند و به همین دلیل برای کاربرد صنعتی مناسب به‌نظر نمی‌رسد.

پزشکی مشهد جهت انجام این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌شود.

ملاحظات اخلاقی: این مقاله بخشی از پایان‌نامه

کارشناسی ارشد به کد

IR.MUMS.FHMPM.REC.1402.088 دانشگاه علوم

پزشکی مشهد می‌باشد.

سهم نویسندگان: علی جلالین مقدم، محمد نورمحمدی،

رمضان میرزایی، در مراحل مختلف انجام شامل طراحی، ایده

و نمونه‌برداری و آنالیز نمونه‌های مطالعه و جمشید جمالی

در آنالیز آماری و داده‌ها همکاری داشته‌اند.

References

1. Zhou X, Zhou X, Wang C, Zhou H. Environmental and human health impacts of volatile organic compounds: A perspective review. *Chemosphere*. 2023 Feb 1;313:137489. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137489> PMID:36513206
2. David E, Niculescu VC. Volatile organic compounds (VOCs) as environmental pollutants: occurrence and mitigation using nanomaterials. *International journal of environmental research and public health*. 2021 Dec 13;18(24):13147. <https://doi.org/10.3390/ijerph182413147> PMID:34948756 PMCID:PMC8700805
3. Dumont E, Andrès Y, Cloirec P Le. Mass transfer coefficients of styrene into water/silicone oil mixtures: New interpretation using the "equivalent absorption capacity" concept. *Chem Eng J*. 2014;237(March 2016):236-41. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.10.021>
4. Mukherjee AK, Bordoloi NK. Biodegradation of benzene, toluene, and xylene (BTX) in liquid culture and in soil by *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas aeruginosa* strains and a formulated bacterial consortium. *Environ Sci Pollut Res*.

تشکر و قدردانی: این مقاله حاصل از طرح پژوهشی با

عنوان طراحی، ساخت و ارزیابی راندمان بیواسکراپر پر شده

به‌منظور تجزیه زیستی تولوئن در مقطع کارشناسی‌ارشد

گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار دانشکده

بهداشت دانشگاه علوم پزشکی مشهد می‌باشد نویسندگان

مقاله، تشکر و قدردانی خود را در راستای انجام این تحقیق

از معاونت پژوهشی و همکاران محترم اعلام می‌دارد.

تعارض منافع: مطالعه‌ی حاضر دارای تعارض منافع

نمی‌باشد.

حمایت مالی: از همکاری معاونت پژوهشی دانشگاه علوم

2012;19(8):3380-8.

<https://doi.org/10.1007/s11356-012-0862-8> PMID:22528987

5. Madronich S, Sulzberger B, Longstreth JD, Schikowski T, Andersen MS, Solomon KR, Wilson SR. Changes in tropospheric air quality related to the protection of stratospheric ozone in a changing climate. *Photochemical & Photobiological Sciences*. 2023 May;22(5):1129-76. 1

<https://doi.org/10.1007/s43630-023-00369-6> PMID:37310641 PMCID:PMC10262938

6. Liang WJ, Ma L, Liu H, Li J. Toluene degradation by non-thermal plasma combined with a ferroelectric catalyst. *Chemosphere*. 2013;92(10):1390-5.

Available from:

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.05.042> PMID:23773445

7. Guieysse B, Hort C, Platel V, Munoz R, Ondarts M, Revah S. Biological treatment of indoor air for VOC removal: Potential and challenges. *Biotechnol Adv*. 2008;26(5):398-410.

<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.03.005> PMID:18547770

8. Berenjian A, Chan N, Malmiri HJ. Volatile Organic Compounds removal methods: A review. *Am J Biochem*

- Biotechnol. 2012;8(4):220-9.
<https://doi.org/10.3844/ajbbsp.2012.220.229>
9. Muñoz R, Daugulis AJ, Hernández M, Quijano G. Recent advances in two-phase partitioning bioreactors for the treatment of volatile organic compounds. *Biotechnol Adv.* 2012;30(6):1707-20. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.08.009> PMid:22960620
10. Kraakman NJR, Rocha-Rios J, Van Loosdrecht MCM. Review of mass transfer aspects for biological gas treatment. *Appl Microbiol Biotechnol.* 2011;91(4):873-86.
<https://doi.org/10.1007/s00253-011-3365-5> PMid:21701986 PMCID:PMC3145080
11. Nourmohammadi M, Karimi A, Golbabaie F, Pourmand MR, Rahimi Foroushanid A, Nourmohammadi E. Biodegradation of toluene in a two-phase low-pressure bioscrubber with using silicon oil as organic phase. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry.* 2023 Dec 18;103(16):4098-110.
<https://doi.org/10.1080/03067319.2021.1921763>
12. Nourmohammadi M, Golbabaie F, Karimi A, Pourmand MR, Noor Poor A, Rahimi Foroushani A, Nourmohammadi E. Absorption and biodegradation of toluene in a two-phase low-pressure bioscrubber using cutting oil as the organic phase. *Health Scope.* 2019 Jan 1;8(1):1-8.
<https://doi.org/10.5812/jhealthscope.65219>
13. Lalanne F, Malhautier L, Roux JC, Fanlo JL. Absorption of a mixture of volatile organic compounds (VOCs) in aqueous solutions of soluble cutting oil. *Bioresour Technol.* 2008;99(6):1699-707.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.04.006> PMid:17513105
14. Karimi A, Golbabaie F, Neghab M, Pourmand MR, Nikpey A, Mohammad K, Mehrnia MR. Biodegradation of high concentrations of benzene vapors in a two phase partition stirred tank bioreactor. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering.* 2013 Jan 15;10(1):10. <https://doi.org/10.1186/1735-2746-10-10> PMid:23369269 PMCID:PMC3570442
15. Jasińska M, Bałdyga J, Cooke M, Kowalski A. Investigations of mass transfer with chemical reactions in two-phase liquid-liquid systems. *Chemical Engineering Research and Design.* 2013 Nov 1;91(11):2169-78.
<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2013.05.010>
16. Zhong Q, Jiao Z, Nie W, Li Y, Gu N. Numerical investigation of mass transfer behavior of a gas-liquid two-phase Taylor flow in a microchannel by a volume-of-fluid multiphase flow system. *International Journal of Mechanical System Dynamics.* 2022 Sep;2(3):253-64.
<https://doi.org/10.1002/msd2.12049>
17. Ashley K. NIOSH manual of analytical methods 5th edition and harmonization of occupational exposure monitoring. *Gefahrstoffe, Reinhaltung der Luft= Air quality control/Herausgeber, BIA und KRdL im VDI und DIN.* 2015;2015(1-2):7.
18. Fabian FW, Pivnick H. Growth of bacteria in soluble oil emulsions. *Appl Microbiol.* 1953;1(4):199
<https://doi.org/10.1128/am.1.4.199-203.1953> PMid:13066033 PMCID:PMC1056903
19. Bennett SJ, Alonso CV, Prasad SN, Römkens MJ. Experiments on headcut growth and migration in concentrated flows typical of upland areas. *Water Resources Research.* 2000 Jul;36(7):1911-22.
<https://doi.org/10.1029/2000WR900067>
20. Bhattacharyya A, Liu L, Lee K, Miao J. Review of biological processes in a membrane bioreactor (MBR): effects of wastewater characteristics and operational

parameters on biodegradation efficiency when treating industrial oily wastewater. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022 Sep 2;10(9):1229
<https://doi.org/10.3390/jmse10091229>

21. Nielsen DR, Sask KN, McLellan PJ, Daugulis AJ. Benzene vapor treatment using a two-phase partitioning bioscrubber: An improved steady-state protocol to enhance long-term operation. *Bioprocess Biosyst Eng*. 2006;29(4):229-40.

<https://doi.org/10.1007/s00449-006-0071-2>
PMid:16941180

22. Rivas-Interián RM, Guillén-Francisco JA, Sacramento-Rivero JC, Zitlalpopoca-Soriano ÁG, Baz-Rodríguez SA. Concentration effects of main components of synthetic culture media on oxygen transfer in bubble column bioreactors. *Biochemical Engineering Journal*. 2019 Mar 15;143:131-40.

<https://doi.org/10.1016/j.bej.2018.12.008>

23. Koutinas M, Baptista IIR, Meniconi A, Peeva LG, Mantalaris A, Castro PML, et al. The use of an oil-absorber-bioscrubber system during biodegradation of sequentially alternating loadings of 1,2-dichloroethane and fluorobenzene in a waste gas. *Chem Eng Sci*. 2007;62(21):5989-6001.

<https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.06.040>

24. He Y, Sang W, Lu W, Zhang W, Zhan C, Jia D. Recent advances of emerging organic pollutants degradation in environment by non-thermal plasma technology: A Review. *Water*. 2022 Apr 21;14(9):1351.

<https://doi.org/10.3390/w14091351>

25. Lhuissier M, Couvert A, Dabert P, Amrane A, Kane A, Audic JL, Dumont E. Removal of a mixture of seven volatile organic compounds (VOCs) using an industrial pilot-scale process combining absorption in silicone oil and biological regeneration in a two-phase partitioning bioreactor (TPPB). *Energies*. 2022 Jun 23;15(13):4576.

<https://doi.org/10.3390/en15134576>

26. Nourmohammadi M, Golbabaei FG, Karimi A, Taban E. Removal of toluene from air-scream using semi industrial two-phase bioscrubber with cutting oil: An intervention study.

27. Lalanne F, Malhautier L, Roux JC, Fanlo JL. Absorption of a mixture of volatile organic compounds (VOCs) in aqueous solutions of soluble cutting oil. *Bioresour Technol*. 2008;99(6):1699-707.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.04.006>
PMid:17513105