

## Original Article



# Kinetics of Co-Biodegradation of *n*-Hexane and Methanol Vapors in the Presence of a Non-Aqueous Phase by an Isolated Microbial Culture from Activated Sludge

Received: 2023.09.13

Accepted: 2024.04.09

Sina Keramati, Seyed Morteza Zamir\*

Department of Biochemical Engineering, Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

## EXTENDED ABSTRACT

**Introduction:** Volatile Organic Compounds (VOCs), despite their small share in the atmospheric pollutants, are the main cause of environmental problems and human health risks. In the biological processes, all the pollution is converted into carbon dioxide and biomass. A large number of industries discharge a mixture of pollutants such as *n*-hexane and methanol into the atmosphere. The different chemical and physical properties of these materials affect the rate of biological degradation and their removal efficiency by a specific microbial population. Among these properties, the solubility of each component may affect the interaction between the compounds during the biodegradation of the *n*-hexane/methanol mixture. To overcome the limitation of mass transfer and the low solubility of hydrophobic VOCs such as *n*-hexane in the water phase, it has been reported to be useful to add a non-aqueous phase (NAP) to the culture medium to absorb the hydrophobic compound. According to the previous research, it is clear that the presence of silicone oil as an NAP has a positive effect on the simultaneous removal efficiency of methanol as a hydrophilic and *n*-hexane as a hydrophobic pollutant. However, its effect on the kinetic of biodegradation of VOCs is not well known. Therefore, this study aims to determine the effect of different volume fractions of silicone oil on the kinetics of simultaneous biodegradation of *n*-hexane and methanol.

**Material and Methods:** *n*-hexane ( $5 \text{ g.m}^{-3}$ ) was selected as a hydrophobic pollutant, methanol ( $1 \text{ g.m}^{-3}$ ) as a hydrophilic pollutant, and silicone oil as the NAP. The microbial consortium used in this research was a mixed culture that was isolated from the adapted activated sludge from the return sludge flow of Unit No. 6 of the South Tehran Wastewater Treatment Plant. A gas chromatography (GC) device equipped with a capillary column and flame ionization detector (FID) was used to measure the concentrations of *n*-hexane and methanol. To measure the concentration of carbon dioxide, a thermal conductivity detector (TCD) was used. To measure the biomass concentration a spectrophotometer was used to determine the optical density (OD) of the samples.

**Results and Discussion:** The specific degradation rate (SDR) of methanol decreased from  $1.42 \text{ mg}_{\text{methanol}}.(\text{g}_{\text{biomass}}.\text{day})^{-1}$  to  $1.08 \text{ mg}_{\text{methanol}}.(\text{g}_{\text{biomass}}.\text{day})^{-1}$  by increasing the volume fraction of silicone oil from 1% to 20% v/v. In contrast, when volume fraction of silicone oil reached 10% v/v, the SDR of *n*-hexane increased from  $17.5 (\text{mg}_{\text{hexane}}.(\text{g}_{\text{biomass}}.\text{day})^{-1})$  to  $21 (\text{mg}_{\text{hexane}}.(\text{g}_{\text{biomass}}.\text{day})^{-1})$ . Further increasing in the volume fraction of silicone oil up to 20% v/v did not have much effect on the SDR of *n*-hexane. The kinetics of *n*-hexane biodegradation followed the Michaelis-Menten model. The addition of  $1 \text{ g.m}^{-3}$  of methanol to the culture medium had a negative effect on the SDR of *n*-hexane, and the presence of methanol increased the  $K_s$  value to  $21 \text{ g.m}^{-3}$  and decreased the maximum SDR of *n*-hexane from 141.4 to 123.1  $(\text{mg}_{\text{hexane}}.(\text{g}_{\text{biomass}}.\text{day})^{-1})$ .

**Conclusions:** The presence of silicone oil in the culture medium reduced the negative effect of methanol on the biological degradation of *n*-hexane. The increase in the amount of silicone oil up to 10% v/v was effective on the biodegradation rate of *n*-hexane, and its further increase did not have an effect on the SDR of *n*-hexane.

**Keywords:** Kinetic model, Silicone oil, Solubility, VOCs, Gas-phase pollutants

## How to cite this article:

Keramati, S. and Zamir, S.M., 2024. Kinetics of Co-Biodegradation of *N*-Hexane and Methanol Vapors in the Presence of a Non-Aqueous Phase by an Isolated Microbial Culture from Activated Sludge. *Environ. Sci.* 22(2): 211-224

\* Corresponding Author Email Address: zamir@modares.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2024.1339




Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

## اثر فاز غیر آبی بر سینتیک تخریب زیستی هم‌زمان بخار هگزان و متانول توسط باکتری‌های جداسازی شده از لجن فعال

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۱

سینا کرامتی، سید مرتضی ضمیر\* 

گروه مهندسی شیمی- بیوتکنولوژی  
، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه  
تربیت مدرس، تهران، ایران

### چکیده مبسوط

**سابقه و هدف:** ترکیب‌های آلی فرار (Volatile Organic Compounds (VOCs)) علی‌رغم سهم اندکی که از آلاینده‌های جوی دارند، اما عامل عمده مشکلات زیست‌محیطی و خطر برای سلامتی انسان هستند. در روش تخریب زیستی تمام کربن آلاینده به کربن‌دی‌اکسید و زیست توده تبدیل می‌شود. تعداد زیادی از صنایع مخلوطی از آلاینده‌هایی مانند هگزان و متانول را به جو وارد می‌کنند. خواص شیمیایی و فیزیکی متفاوت این مواد بر نرخ تخریب زیستی و بازده حذف آن‌ها توسط یک جمعیت میکروبی مشخص تاثیر می‌گذارد. در میان این خواص، حلالیت هر جزء ممکن است سبب ایجاد برهم‌کنش میان ترکیبات موجود در مخلوط هگزان / متانول شود. به منظور غلبه بر محدودیت انتقال جرم و حلالیت کم مواد آلی فرار آب‌گریز (مانند هگزان) در فاز آب، افزودن یک فاز غیر آبی به محیط کشت برای جذب ترکیب آب‌گریز، مفید گزارش شده است. با نگاهی به پژوهش‌های پیشین، مشخص می‌شود که هرچند فاز غیر آبی، مانند روغن سیلیکون، بر بازده حذف هم‌زمان متانول بعنوان آلاینده آب‌دوست و هگزان بعنوان آلاینده آب‌گریز اثر مثبتی دارد، اما اثر آن بر سینتیک تخریب زیستی این مواد شناخته شده نیست. بنابراین، هدف این پژوهش، تعیین اثر غلظت‌های مختلف روغن سیلیکون بر سینتیک تخریب زیستی هم‌زمان هگزان و متانول است.

**مواد و روش‌ها:** در این پژوهش هگزان ( $5 \text{ g.m}^{-3}$ ) بعنوان یک ترکیب آلی فرار آب‌گریز، متانول ( $1 \text{ g.m}^{-3}$ ) بعنوان ترکیب آلی فرار آب‌دوست و روغن سیلیکون بعنوان فاز غیر قابل امتزاج با آب انتخاب شدند. گونه‌های میکروبی تخریب‌کننده مورد استفاده در این پژوهش، کشت مخلوطی است که از لجن فعال سازگار شده حاصل از جریان لجن برگشتی واحد شماره شش تصفیه خانه فاضلاب جنوب تهران جداسازی شدند. برای اندازه‌گیری غلظت هگزان و متانول از دستگاه کروماتوگرافی گازی مجهز به یک ستون مویینه و آشکار ساز یون‌سازی شعله استفاده شد. برای اندازه‌گیری غلظت دی‌اکسید کربن از آشکارساز هدایت گرمایی برای سنجش غلظت توده‌ی زیستی از روش کدورت سنجی و تعیین چگالی نوری نمونه‌ها اسپکتروفوتومتر استفاده شد.

**نتایج و بحث:** با افزایش کسر حجمی روغن سیلیکون ۱٪ به ۲۰٪ میزان نرخ تخریب زیستی ویژه متانول از  $1/42 \text{ (mg}_{\text{methanol}} \cdot \text{(g}_{\text{biomass}} \cdot \text{day)}^{-1})$  به  $1/0.8 \text{ (mg}_{\text{methanol}} \cdot \text{(g}_{\text{biomass}} \cdot \text{day)}^{-1})$  کاهش یافت. همچنین با افزایش میزان روغن سیلیکون تا میزان ۱۰٪ حجمی، نرخ تخریب زیستی ویژه هگزان از  $1/5 \text{ (mg}_{\text{hexane}} \cdot \text{(g}_{\text{biomass}} \cdot \text{day)}^{-1})$  به  $21 \text{ (mg}_{\text{hexane}} \cdot \text{(g}_{\text{biomass}} \cdot \text{day)}^{-1})$  افزایش یافت. افزایش کسر حجمی روغن سیلیکون تا ۲۰٪ تاثیر چندانی بر نرخ تخریب زیستی ویژه هگزان نداشت. سینتیک تخریب زیستی هگزان از مدل میکائلیس - منتن تبعیت کرد. افزودن  $1 \text{ g.m}^{-3}$  متانول به محیط کشت اثر منفی بر نرخ تخریب ویژه هگزان داشت و حضور متانول سبب افزایش مقدار  $K_s$  به  $3 \text{ g.m}^{-3}$  و ۲۱ و کاهش بیشینه نرخ تخریب ویژه هگزان از  $14/4$  به  $123/1 \text{ (mg}_{\text{hexane}} \cdot \text{(g}_{\text{biomass}} \cdot \text{day)}^{-1})$  شد.

**نتیجه‌گیری:** حضور روغن سیلیکون در محیط کشت اثر منفی متانول بر تخریب زیستی هگزان را کاهش داد. افزایش میزان روغن سیلیکون تا میزان ۱۰٪ حجمی بر نرخ تخریب زیستی هگزان موثر بود و افزایش بیشتر آن، تاثیر چندانی بر میزان تخریب زیستی ویژه هگزان نداشت.

**واژه‌های کلیدی:** روغن سیلیکون، مواد آلی فرار، حلالیت، مدل سینتیک، آلاینده‌های گازی

استناد به این مقاله: کرامتی، س.

و س. م. ضمیر. ۱۴۰۳. اثر فاز

غیر آبی بر سینتیک تخریب زیستی

هم‌زمان بخار هگزان و متانول توسط

باکتری‌های جداسازی شده از لجن

فعال. فصلنامه علوم محیطی، ۲۲(۲):

۲۲۴-۲۱۱

\* Corresponding Author Email Address: zamir@modares.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2024.1339



## مقدمه

تعداد زیادی از صنایع مانند چاپ و کاغذ، پلیمرها و الیاف مصنوعی، خمیر و مواد شیمیایی آلی، مخلوطی از آلاینده‌هایی مانند هگزان و متانول را به جو وارد می‌کنند. هگزان و متانول بعنوان ترکیباتی سرطان‌زا شناخته نمی‌شوند، اما استنشاق طولانی مدت آن‌ها اثرات مخربی بر سیستم عصبی، ریوی، بینایی و قلب می‌گذارد (Hassan and Sorial, 2010; Rene et al., 2010). سازمان سلامت و امنیت شغلی ایالات متحده آمریکا مقدار  $260 \text{ mg.m}^{-3}$  برای متانول و مقدار  $1800 \text{ mg.m}^{-3}$  برای هگزان را بعنوان میزان مجاز در هوای محیط کاری در هشت ساعت در نظر گرفته است (Zehraoui and Sorial, 2015).

خواص شیمیایی و فیزیکی متفاوت این مواد بر نرخ تخریب زیستی و بازده حذف آن‌ها توسط یک جمعیت میکروبی مشخص تاثیر می‌گذارد. در میان این خواص، حلالیت هر جزء ممکن است سبب ایجاد برهم‌کنش میان ترکیبات موجود در مخلوط هگزان/متانول شود (Cheng et al., 2020; Keramati et al., 2021).

بمنظور غلبه بر محدودیت انتقال جرم و حلالیت کم مواد آلی فرار آب‌گریز در فاز گاز، افزودن یک فاز غیر آبی (Non Aqueous Phase) غیر قابل امتزاج با آب، زیست‌سازگار و با تمایل بالا به جذب ترکیب آب‌گریز مفید گزارش شده است (Muñoz et al., 2007; Angelucci et al., 2019). با افزودن فاز غیر آبی به فاز آبی، یک فاز واسطه بین فاز گاز و فاز آبی شامل جمعیت میکروبی تشکیل می‌شود و ماده آب‌گریز با جذب در فاز غیر آبی به آرامی به فاز آبی نفوذ کرده و به وسیله ریزاندامگان (Microorganism) تخریب و مصرف می‌شود. هم‌چنین فاز آلی نقش منبع ذخیره برای آلاینده در بیوراکتور را داشته که با جذب آن و کاهش غلظت در فاز آبی از اثرات بازدارنده ناشی از افزایش غلظت آلاینده بر فعالیت ریزاندامگان جلوگیری می‌کند (Karimi et al., 2013; Wu et al., 2017). انواع مختلفی از مواد آلی مانند هگزادکان، تترادکان و روغن سیلیکون بعنوان

ترکیب‌های آلی فرار در حدود هفت درصد از آلاینده‌های جوی را شامل می‌شوند. اما علی‌رغم این سهم اندک، عامل عمده مشکلات زیست‌محیطی و خطر برای سلامتی انسان هستند (Galindo et al., 2011). برای حذف این ترکیب‌ها از جریان هوای آلوده صنعتی، روش‌های فیزیکی-شیمیایی و روش‌های زیستی به کار گرفته شده‌اند که روش‌های زیستی به دلایل اقتصادی و زیست‌محیطی مورد توجه پژوهشگران فرار گرفته‌اند. یکی از رایج‌ترین روش‌های زیستی، تخریب زیستی است که طی آن، تمام کربن آلاینده به کربن‌دی‌اکسید و زیست‌توده تبدیل می‌شود (Cheng et al., 2016; Dewidar and Sorial, 2022). انواعی از بیوراکتورها مانند همزن‌دار، فیلتر زیستی (Biofilters)، فیلتر زیستی چکنده (Biotrickling filters) و غیره برای تخریب زیستی ترکیب‌های آلی فرار استفاده شده‌اند.

به‌طور کلی در این بیوراکتورها، ابتدا آلاینده از فاز گاز به فاز مایع که جمعیت میکروبی معلق یا بیوفیلم در آن حضور دارد، انتقال می‌یابد و عمل تخریب زیستی توسط این جمعیت میکروبی انجام می‌شود. مواد آلی فرار را می‌توان براساس میزان حلالیت در آب به دو دسته کلی آب‌دوست مانند متانول و اتانول و آب‌گریز مانند بنزن، هگزان و تولوئن تقسیم کرد (Sakhaei et al., 2023). به همین دلیل، دو نوع محدودیت هم در سینتیک تخریب‌زیستی و هم در نرخ انتقال جرم آلاینده به فاز آبی می‌تواند رخ دهد. برای گروه آلاینده‌های آب‌گریز به سبب حلالیت کم و کاهش میزان انتقال جرم، میزان زیست‌دسترسی‌پذیری (Bioavailability) آلاینده بعنوان منبع کربنی در فاز آبی محدود شده و در نتیجه، میزان حذف آن کاهش می‌یابد. بر خلاف آلاینده‌های آب‌گریز، زیست‌دسترسی‌پذیری آلاینده‌های آب‌دوست به سبب حلالیت زیاد در آب مطلوب است. اما افزایش میزان آلاینده موجود در فاز آبی از یک سطح بحرانی منجر به ایجاد بازدارندگی آلاینده بر فرایند تخریب زیستی آن خواهد شد (Muñoz et al., 2012; Ferdowsi et al., 2017).

سیگما الدریچ (آلمان) تهیه شد. روغن سیلیکون با ویسکوزیته cSt ۱۰ از شرکت روغن صنعت آروشا (ایران) تهیه شد.

### ریزاندامگان و سازگارسازی آن‌ها

ریزاندامگان مورد استفاده در این پژوهش، کشت مخلوطی است که از لجن فعال گرفته شده از جریان لجن برگشتی واحد شماره شش تصفیه خانه فاضلاب جنوب تهران جداسازی شد. بمنظور سازگارسازی ریزاندامگان‌ها با هگزان و متانول، لجن فعال به میزان ۳۰۰ میلی‌لیتر با میزان مخلوط جامدهای معلق مایع (Mixed Liquor Suspended Solids (MLSS)) برابر  $4100 \text{ mg.L}^{-1}$  ابتدا به دو ارلن شیشه‌ای یک لیتری حاوی ۲۰۰ میلی لیتر محلول نمک-های معدنی منتقل شد. هر ارلن تنها با یک جریان گازی هگزان یا متانول با غلظت اولیه فاز گازی  $3 \text{ g.m}^{-3}$  به شکل مداوم خوراک‌دهی شد. محلول نمک‌های معدنی شامل:  $2 \text{ g.L}^{-1} \text{ K}_2\text{HPO}_4$ ،  $0.5 \text{ g.L}^{-1} \text{ KH}_2\text{PO}_4$ ،  $4.5 \text{ g.L}^{-1} \text{ NH}_4\text{Cl}$ ،  $0.1 \text{ g.L}^{-1} \text{ MgSO}_4$ ، یک میلی لیتر محلول ویتامین و یک میلی‌لیتر محلول عناصر کم‌مقدار بود (Kalantar et al., 2021). در طول این مدت، از جریان هوای خروجی از ارلن‌ها در فواصل زمانی مختلف نمونه‌گیری انجام می‌شد. این فرآیند به مدت دو ماه ادامه داشت تا گونه‌هایی که توانایی حذف هگزان و متانول را نداشتند به طور کامل حذف شدند و بازده حذف هگزان به ۷۰٪ و متانول به ۵۰٪ رسید. میزان غلظت متانول و هگزان توسط کروماتوگرافی گازی اندازه‌گیری می‌شد. هم‌چنین در بازه‌های زمانی معین، مقدار مشخصی محلول نمک‌های معدنی در جهت جبران ترکیبات مورد نیاز ریزاندامگان‌ها به هرکدام از ارلن‌ها اضافه می‌شد. میزان pH محیط نیز توسط محلول سود یک نرمال در محدوده ۶/۵-۷ ثابت نگه داشته می‌شد.

### جداسازی گونه‌های تخریب‌کننده هگزان و

#### متانول

پس از پایان دوره‌ی سازگارسازی، یک میلی‌لیتر از محیط داخل ارلن‌ها برداشته شد و سپس رقیق‌سازی‌های سریالی تا رقت  $10^8$  برای هر نمونه انجام شد. سپس یک میلی‌لیتر از

فاز آلی استفاده شده‌اند که از میان آن‌ها روغن سیلیکون به سبب کمی سمیت و عدم زیست تخریب‌پذیری نسبت به دیگر مواد آلی بیش‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرد (Chalupa et al., 2021). یوسفی نژاد و همکاران عملکرد یک فیلتر زیستی چکنده را برای حذف تولوئن بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که در صورت عدم وجود فاز آلی روغن سیلیکون، در غلظت اولیه  $4/5 \text{ g.m}^{-3}$  و زمان اقامت یک دقیقه، بازده حذف برابر ۵۰٪ بود و در صورت اضافه کردن روغن سیلیکون به اندازه ۱۰٪ حجمی / حجمی بازده حذف تا ۹۵٪ افزایش پیدا کرد (Yousefinejad et al., 2019). هم‌چنین آریاگا و همکاران گزارش کردند که بیشینه بازده حذف هگزان در غلظت اولیه  $3 \text{ g.m}^{-3}$  در یک بیوراکتور هم‌ز-دار تک فازی (بدون حضور فاز آلی) و با زمان اقامت یک دقیقه برابر ۲۸٪ بود که با افزودن ۱۰٪ حجمی/حجمی روغن سیلیکون به ۶۷٪ افزایش پیدا کرد (Arriaga et al., 2006). رضانی و همکاران نیز حذف متانول در یک فیلتر زیستی چکنده بررسی کردند. آن‌ها دریافت کردند که افزودن روغن سیلیکون با ۱۰٪ (v/v) بر بازده عملکرد فیلتر زیستی چکنده اثر منفی دارد (Ramezani et al., 2021).

با نگاهی به پژوهش‌های پیشین، مشخص می‌شود که هرچند حضور فاز غیرآبی، مانند روغن سیلیکون، بر بازده حذف هم‌زمان متانول بعنوان آلاینده آب‌دوست و هگزان بعنوان آلاینده آب‌گریز اثر مثبتی دارد اما اثر آن بر سینتیک تخریب زیستی این مواد شناخته شده نیست. بنابراین، هدف این پژوهش، تعیین اثر غلظت‌های مختلف روغن سیلیکون بر سینتیک تخریب زیستی هم‌زمان هگزان و متانول است.

### مواد و روش‌ها

#### روش‌های آزمایشگاهی

#### مواد

هگزان بعنوان یک ترکیب آلی فرار آب‌گریز با درجه خلوص ۹۸/۵٪ از شرکت دکتر مجلی (ایران) تهیه شد. متانول به عنوان ترکیب آلی فرار آب‌دوست با درجه خلوص ۹۹/۹٪ از شرکت

زیستی ویژه هگزان و متانول بعنوان پاسخ، در نظر گرفته شد. به منظور مطالعه اثر حضور روغن سیلیکون و متانول بر سینتیک تخریب زیستی هگزان، مشخصه‌های سینتیکی تخریب هگزان در شش غلظت متفاوت هگزان در محدوده  $1-10 \text{ g.m}^{-3}$  ابتدا در عدم حضور روغن سیلیکون و متانول، سپس در حضور  $1 \text{ g.m}^{-3}$  متانول و در نهایت در حضور  $5\%$  درصد حجمی روغن سیلیکون و  $1 \text{ g.m}^{-3}$  متانول در مدت زمان ۱۰ روز و با غلظت اولیه توده‌ی زیستی برابر  $1 \text{ g.L}^{-1}$   $0/16$  تعیین شدند.

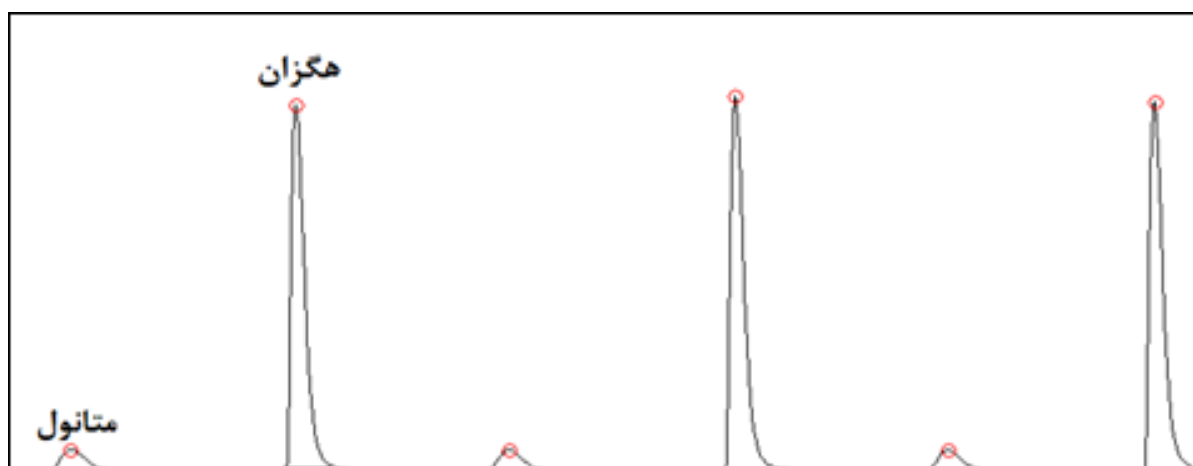
### روش‌های آنالیزی

برای اندازه‌گیری غلظت هگزان و متانول از دستگاه کروماتوگرافی گازی (طیف گستر فراز مدل TG2552-ایران) مجهز به یک ستون مویینه ( $0/32 \mu\text{m}$  و  $25 \text{ m}$  و TRB-5) و آشکار ساز یون‌سازی شعله استفاده شد. در این دستگاه از هیدروژن بعنوان گاز حامل با دبی  $1/5 \text{ mL.min}^{-1}$  و نسبت جداسازی ۱ به ۱۰ استفاده شد. دماهای ستون، تزریق کننده و آشکار ساز به ترتیب  $120^\circ\text{C}$  و  $250^\circ\text{C}$  و  $250^\circ\text{C}$  در نظر گرفته شد. دبی هیدروژن و هوای استفاده شده برای آشکار ساز به ترتیب ۳۵ و ۲۸۰ میلی‌لیتر بر دقیقه بود. برای تهیه نمونه از فضای خالی بالای ویال‌ها از یک سرنگ گازی به حجم کل  $2/5$  میلی‌لیتر (همیلتون، سوئیس) استفاده شد. حجم تزریق  $0/5$  میلی‌لیتر در نظر گرفته شد. برای اندازه‌گیری غلظت دی‌اکسیدکربن از آشکار ساز هدایت گرمایی (Thermal Conductivity Detector (TCD)) و ستون پر شده Porapak Q و هیدروژن بعنوان گاز حامل استفاده شد. دمای قسمت‌های تزریق کننده، ستون، آشکار ساز  $100^\circ\text{C}$  و  $40^\circ\text{C}$  و  $100^\circ\text{C}$  بودند. حجم تزریق برای این اندازه‌گیری برابر  $0/5$  میلی‌لیتر در نظر گرفته شد. برای سنجش غلظت توده‌ی زیستی از روش کدورت سنجی و تعیین چگالی نوری نمونه‌ها در طول موج ۶۰۰ نانومتر بوسیله دستگاه اسپکتروفوتومتر (اپتیزن ۳۲۲۰، کره جنوبی) استفاده شد. کروماتوگرام مربوط به جداسازی گازها در شکل ۱ نشان داده شده است.

هر محلول میکروبی رقیق داخل بشقابک‌های حاوی  $2\%$  حجمی آگار مغذی تلقیح شد و در انکوباتور در دمای  $30^\circ\text{C}$  به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد. از هر کلونی تشکیل شده در هر بشقابک، جداگانه نمونه‌گیری و به بشقابک‌های جدید حاوی آگار مغذی تلقیح شد. سپس در دمای  $30^\circ\text{C}$  به مدت ۴۸ ساعت کشت شد. این روند چندین مرحله تا جداسازی گونه‌های مشخص برای تخریب متانول و هگزان تکرار شد. در پایان سه گونه باکتری مناسب برای حذف هگزان و پنج گونه نیز برای حذف متانول بدست آمدند. این گونه‌ها داخل بشقابک‌های مختلف درون دو دسیکاتور مختلف در کنار ظرف‌های رو باز هگزان یا متانول نگهداری شدند. دو گونه از سه گونه‌ی باکتریایی تخریب کننده هگزان شامل باسیلوس سرئوس<sup>۱</sup> و پاندوریا پنومونوسا<sup>۲</sup> توسط به آنالیز توالی‌یابی به روش 16S rDNA شناسایی شدند (Keramati et al., 2021).

### آزمایش‌ها

آزمایش‌ها به شکل کشت ناپیوسته در ویال‌های  $120$  میلی لیتری حاوی  $14$  میلی لیتر محلول نمک‌های معدنی و درصد‌های حجمی مختلف روغن سیلیکون  $1\%$ ،  $5\%$ ،  $10\%$ ،  $15\%$  و  $20\%$  و مقدار سه میلی‌لیتر از سوپانسیون‌های میکروبی با چگالی نوری برابر یک از هر کدام از مخلوط گونه‌های تخریب کننده هگزان و متانول انجام شد. سپس حجم مایع مشخصی از متانول و هگزان توسط سرنگ گازی (همیلتون، سوئیس) برای رسیدن به غلظت‌های اولیه‌ی ثابت در فاز گاز از هگزان و متانول که به ترتیب برابر  $1 \text{ g.m}^{-3}$  و  $5 \text{ g.m}^{-3}$  بودند به داخل ویال‌ها تزریق شد. pH محیط در مقدار  $6/5$  ثابت شده و ویال‌ها توسط درپوش‌های سیلیکونی با روکش تفلون و سرپوش آلومینیومی کاملاً بسته و آب‌بندی شدند. ویال‌ها در  $30^\circ\text{C}$  و دور  $120 \text{ rpm}$  در داخل شیکرانکوباتور قرار داده شدند. از روش طراحی آزمایش تک عاملی (One Factor Design) برای بررسی آماری داده‌ها با استفاده از نرم افزار طراحی آزمایش (Design Expert version 7.0) به منظور تعیین هر چه بهتر اثر روغن سیلیکون بر نرخ تخریب زیستی ویژه متانول و هگزان استفاده شد. در این روش نرخ تخریب



شکل ۱- کروماتوگرام جداسازی گازهای متانول و هگزان در دستگاه کروماتوگرافی گازی  
Fig. 1- Chromatogram of methanol and hexane gas phase obtained in GC

جدول ۱- نتایج طراحی آزمایش برای روش تک عاملی (غلظت اولیه هگزان و متانول به ترتیب برابر ۵ و ۱ گرم بر متر مکعب است)  
Table 1. The results of the experimental design for the one-factor design (the initial concentrations of *n*-hexane and methanol were 5 and 1 g.m<sup>-3</sup>, respectively)

نرخ تخریب زیستی ویژه هگزان (میلی گرم هگزان بر گرم زیست توده بر روز) Specific degradation rate of hexane (mg <sub>hexane</sub> .(g <sub>biomass</sub> .day) <sup>-1</sup> )	نرخ تخریب زیستی ویژه متانول (میلی گرم متانول بر گرم زیست توده بر روز) Specific degradation rate of methanol (mg <sub>methanol</sub> .(g <sub>biomass</sub> .day) <sup>-1</sup> )	درصد حجمی روغن سیلیکون (کسر حجمی / حجمی %) Silicone oil volume fraction (%/v/v)	شماره آزمایش Test number
17.5	1.42	1	1
18	1.25	1	2
19.2	1.2	5	3
18.8	1	15	4
16.67	1	20	5
15.83	1	20	6
21	1.16	10	7
20	1	10	8

SDR(M) = نرخ تخریب زیستی ویژه متانول و SDR(H) = نرخ تخریب زیستی ویژه هگزان

معادله نرخ تخریب زیستی آلاینده به صورت معادله (۱) بیان می‌شود (Iranmanesh *et al.*, 2015):

$$\frac{dC_j}{dt} = -SDR \times X \quad (1)$$

SDR = نرخ تخریب زیستی ویژه آلاینده (mg.(g<sub>biomass</sub>.day)<sup>-1</sup>) است و از تقسیم کردن نرخ مصرف آلاینده (dC<sub>j</sub>) به غلظت اولیه توده‌ی زیستی (X) نرخ

## نتایج و بحث

### اثر غلظت روغن سیلیکون بر نرخ تخریب زیستی هم‌زمان هگزان و متانول

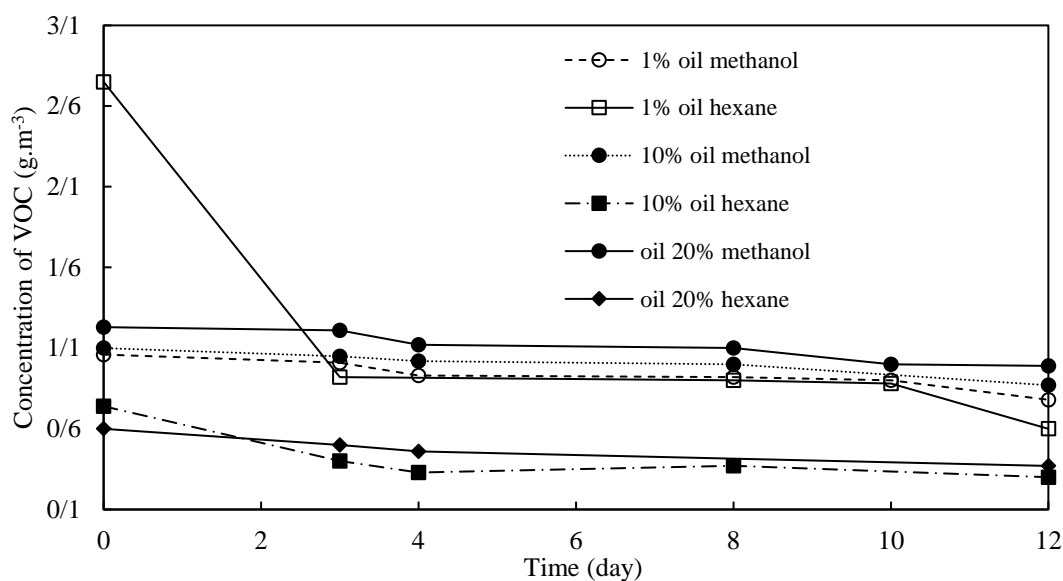
جدول شماره ۱ شامل هشت آزمایش است که در آن نرخ تخریب زیستی ویژه بدست آمده برای هگزان و متانول به ترتیب در غلظت‌های اولیه ۵ و ۱ g.m<sup>-3</sup> در کسر حجمی‌های مختلف روغن سیلیکون نشان داده شده است.

کشت و کاهش زیست‌دسترس پذیری متانول، بازده آن به مقدار ۲۱٪ کاهش یافت. در آزمایش شماره ۶، با افزایش میزان روغن به مقدار ۲۰٪ حجمی، غلظت اولیه هگزان در فاز گاز به  $0/6 \text{ g.m}^{-3}$  کاهش یافت. پس از مدت ۱۲ روز بازده حذف هگزان برابر ۸۹٪ شد که بازده حذف نسبت به زمانی که ۱۰٪ حجمی روغن سیلیکون در محیط وجود داشت حدود ۷٪ کاهش را نشان می‌دهد. بالتزیس و همکاران نیز هنگام حذف آلاینده آب‌گریز ایزوپروپیل بنزن در یک بیوراکتور دو فازی - توزیعی مشاهده کردند با افزایش روغن سیلیکون از مقدار ۱۰٪ به ۳۰٪ شدت انتقال جرم حجمی ایزوپروپیل بنزن از مقدار  $43600 \text{ g.m}^{-3}.\text{h}^{-1}$  به مقدار  $29800 \text{ g.m}^{-3}.\text{h}^{-1}$  کاهش پیدا کرده است (Baltzis *et al.*, 1997). دومونت و همکاران نیز در هنگام بررسی ضریب انتقال جرم استایرن در حضور روغن سیلیکون دریافتند که با افزایش روغن سیلیکون، ضریب انتقال جرم حجمی استایرن با افزایش میزان روغن سیلیکون کاهش یافت که این کاهش را ناشی از افزایش تغییرات ترمودینامیکی در سامانه و افزایش ویسکوزیته و تغییر در ضریب نفوذ انتقال جرم عنوان کرده‌اند که در نتیجه کاهش انتقال جرم را به دنبال داشته است (Dumont *et al.*, 2014). غلظت متانول در فاز گاز نیز با افزایش روغن سیلیکون به  $1/23 \text{ g.m}^{-3}$  افزایش یافت که نسبت به دو آزمایش دیگر غلظت متانول در فاز گاز بطور متوسط به اندازه ۱۰٪ افزایش یافته است. غلظت نهایی متانول  $0/99 \text{ g.m}^{-3}$  بود، که نشان داد بازده حذف متانول از ۲۶٪ به ۱۹٪ کاهش پیدا کرده است. در دو آزمایش دیگر به طور متوسط  $70 \text{ g.m}^{-3}$  کربن دی‌اکسید تولید شده بود، اما میزان کربن‌دی‌اکسید تولیدی در این آزمایش  $63 \text{ g.m}^{-3}$  بود که این کاهش در میزان تولید کربن‌دی‌اکسید احتمالاً در اثر جذب بیشتر کربن-دی‌اکسید در روغن سیلیکون (García-Abuín *et al.*, 2012) و همچنین کاهش میزان تخریب متانول بوده است.

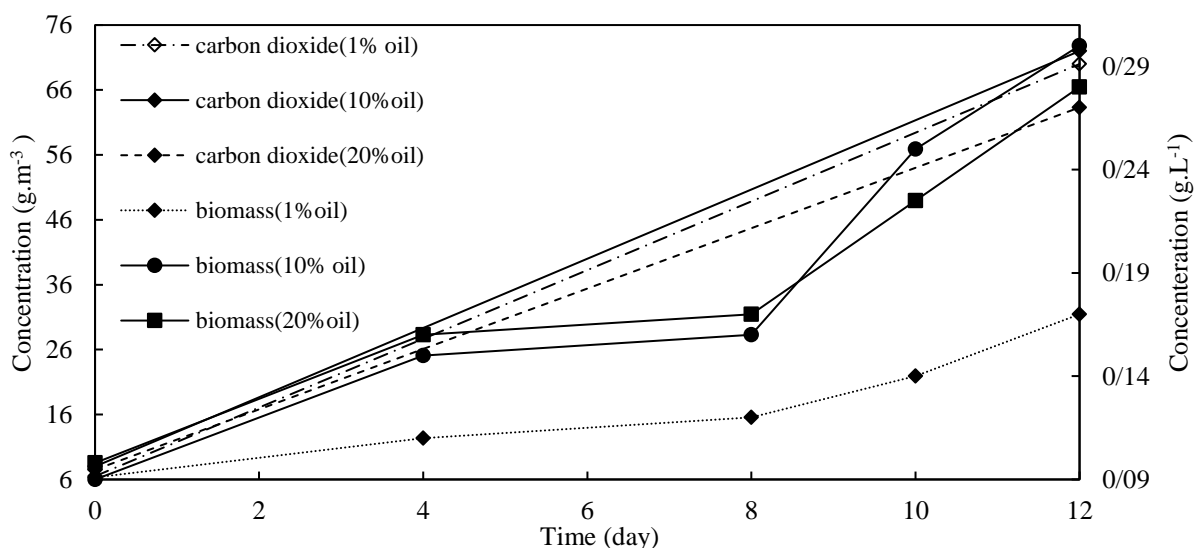
تخریب ویژه بدست می‌آید. همچنین مقادیر ثوابت توزیع پذیری بین فاز محلول و گاز برای دو آلاینده هگزان و متانول توسط معادله (۲) محاسبه شدند.

$$\frac{1}{k_{H_{mix}}} = \frac{1-\phi}{k_{H_{water}}} + \frac{\phi}{k_{H_{oil}}} \quad (2)$$

در معادله (۲)،  $k_{H_{mix}}$  = ضریب توزیع ماده بین هوا و مخلوط آب - روغن سیلیکون،  $\phi$  = کسر حجمی فاز آلی،  $k_{H_{water}}$  = ضریب توزیع ماده بین آب و هوا،  $k_{H_{oil}}$  = ضریب توزیع ماده بین هوا و روغن سیلیکون هستند. در شکل شماره ۲ نتایج حاصل از تغییرات غلظت هگزان و متانول برای آزمایش‌های ۱، ۶ و ۷ نشان داده شده است. در آزمایش شماره ۱ هنگامیکه مقدار روغن سیلیکون برابر ۱٪ حجمی بود، با جذب هگزان در روغن سیلیکون غلظت اولیه آن در فاز گاز از  $4/63 \text{ g.m}^{-3}$  به  $2/75 \text{ g.m}^{-3}$  بدلیل جذب در روغن سیلیکون کاهش یافت. در طی مدت ۱۲ روز غلظت نهایی آن در فاز گاز به  $0/6 \text{ g.m}^{-3}$  رسید و در نهایت بازده حذف برابر ۸۷٪ شد. با توجه به شکل ۳ که تغییرات غلظت زیست‌توده و کربن‌دی‌اکسید بر حسب زمان برای آزمایش‌های ۱، ۶ و ۷ را نشان می‌دهد، می‌توان دریافت که غلظت زیست‌توده در آزمایش شماره ۱ از  $0/1 \text{ g.L}^{-1}$  به  $0/18 \text{ g.L}^{-1}$  افزایش یافت که این افزایش میزان زیست‌توده را می‌توان با توجه به کاهش بازده حذف متانول از ۳۴٪ در حالت بدون روغن (نتایج اینجا نشان داده نشده است) به ۲۸٪ در حضور روغن، در نتیجه بهبود در بازده حذف هگزان دانست. در آزمایش شماره ۷ با افزودن ۱۰٪ حجمی روغن سیلیکون به محیط کشت و جذب بیشتر هگزان، غلظت آن در فاز گاز نسبت به آزمایش شماره ۱ به مقدار  $1/23 \text{ g.m}^{-3}$  کاهش یافت که احتمالاً به دلیل کاهش اثرات بازدارندگی و همچنین افزایش زیست‌دسترس‌پذیری بازده حذف آن به ۹۵٪ افزایش یافت. با توجه به افزایش غلظت متانول در فاز گاز به مقدار  $1/1 \text{ g.m}^{-3}$  در نتیجه افزودن روغن به محیط



شکل ۲- تغییرات غلظت هگزان و متانول برای آزمایش‌های ۱، ۶ و ۷  
 Fig. 2- The variations of *n*-hexane and methanol concentrations for experiments 1, 6 and 7



شکل ۳- غلظت زیست توده و کربن دی اکسید برای آزمایش‌های ۱، ۶ و ۷  
 Fig. 3- Biomass and carbon dioxide concentrations for the experiments 1, 6, and 7

شده است. سطح اطمینان نیز ۹۰٪ انتخاب شده است. با توجه به شکل ۴ (الف) با افزایش مقدار روغن سیلیکون تا ۱۰٪ حجمی میزان نرخ تخریب زیستی ویژه هگزان افزایش یافت که در نتیجه جذب بیشتر هگزان در روغن سیلیکون و افزایش زیست‌دسترسی‌پذیری آن و احتمالاً کاهش غلظت بازدارنده آن در فاز آب بود. همچنین بر طبق پژوهش‌های انجام شده در سیستم‌های دوفازی - توزیعی، حول قطره‌های روغن

### تحلیل آماری

با استفاده از روش تک عاملی اثر مقادیر مختلف روغن سیلیکون بر تخریب زیستی ویژه متانول و هگزان تعیین شد. مقادیر P و F و مقادیر واریانس پارامترهای موثر، که با روش طراحی تک عاملی بدست آمده‌اند، در جدول ۲ نشان داده شده است. مدل‌های حذف متانول و هگزان در حالت اصلاح شده در جدول ۳ به همراه ضریب همبستگی‌شان نشان داده



نتیجه رسیدند که افزایش میزان روغن سیلیکون از ۱۰٪ به ۲۰٪ حجمی تاثیر قابل توجهی بر نرخ انتقال جرم استایرن نخواهد گذاشت (Parnian *et al.*, 2016). در نتیجه افزایش روغن سیلیکون اثر چشم‌گیری بر بازده حذف استایرن نداشت. با توجه به شکل ۴ (ب) با افزایش میزان روغن سیلیکون از ۱٪ به ۲۰٪ حجمی، نرخ تخریب زیستی ویژه متانول از  $1^{-1} \text{mg}_{\text{methanol}} \cdot (\text{g}_{\text{biomass}} \cdot \text{day})^{-1}$  به  $1/42 \text{mg}_{\text{methanol}} \cdot (\text{g}_{\text{biomass}} \cdot \text{day})^{-1}$  کاهش یافت. این کاهش احتمالا با توجه به معادله ۲ که نتایج آن در جدول ۴ نشان داده شده، ناشی از کاهش توزیع پذیری و کاهش زیست‌دسترس پذیری متانول در فاز محلول است.

امکان تشکیل زیست‌توده وجود دارد که با دریافت مستقیم ماده آب‌گریز از داخل روغن سرعت رشد آن تا حد زیادی افزایش می‌یابد (Arriaga and Revah, 2005; Ascon-). هنگامیکه میزان روغن سیلیکون در سامانه به مقدار ۲۰٪ حجمی افزایش یافت، نرخ تخریب ویژه هگزان نسبت به مقدار ۱۰٪ از ۱۹/۱۷ به  $1^{-1} \text{mg}_{\text{hexane}} \cdot (\text{g}_{\text{biomass}} \cdot \text{day})^{-1}$  کاهش یافت. هم‌چنین با توجه به شکل ۴ (الف)، افزایش میزان روغن سیلیکون بیشتر از ۱۰٪ حجمی تاثیر چشم‌گیری بر تخریب زیستی هگزان نداشت. پرنیان و همکاران نیز در هنگام بررسی میزان انتقال جرم استایرن در یک بیوراکتور چکنده به این

جدول ۲- نتایج تحلیل واریانس داده‌های حاصل از آزمایش‌های طراحی شده  
Table 2. The results of the variance analysis of the data obtained from the experiments

شاخص آماری P P-value	شاخص آماری F F-value	میانگین مربعات Mean square	درجه‌ی آزادی Degrees of freedom	مجموع مربعات Sum of squares	شاخص‌ها Factors	پاسخ‌ها Response
0.001	11.8	0.04	2	0.09	مدل Model	نرخ تخریب زیستی ویژه متانول Specific degradation rate of methanol
		0.004	5	0.02	باقی‌مانده Residual	
0.001	33	8.8	2	17.6	مدل Model	نرخ تخریب زیستی ویژه هگزان Specific degradation rate of hexane
		0.3	5	1.34	باقی‌مانده Residual	

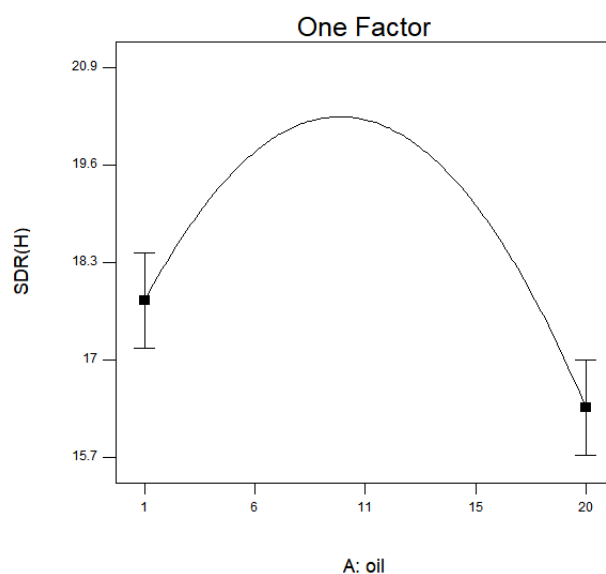
جدول ۳- مدل‌های آماری پیش‌بینی‌کننده تخریب زیستی هگزان و متانول در طراحی آزمایش به روش تک‌عاملی  
Table 3. Statistical predicting models for *n*-hexane and methanol biodegradation based on one-factor design

ضریب همبستگی The coefficient of determination	مدل Model	پاسخ Response
0.8	$1.36-0.036A+1.07 \times 10^{-3}A^2$	SDR(M)
0.9	$17.17+0.651A-0.034A^2$	SDR(H)

Design-Expert® Software

SDR(H)

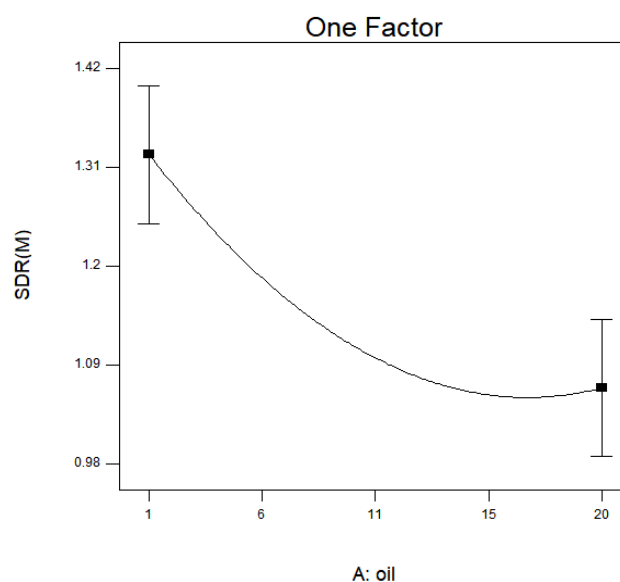
X1 = A: oil



Design-Expert® Software

SDR(M)

X1 = A: oil



شکل ۴- الف) نرخ تخریب زیستی ویژه هگزان، ب) نرخ تخریب زیستی ویژه متانول بر حسب میزان روغن سیلیکون A = درصد حجمی روغن سیلیکون

Fig. 4- a) The specific degradation rate of *n*-hexane, and b) the specific degradation rate of methanol in terms of volume fraction of silicone oil. A=volume fraction of silicone oil

جدول ۴- ضریب توزیع پذیری متانول و هگزان در مخلوط آب و روغن سیلیکون

Table 4. Partition coefficients for methanol and *n*-hexane in mixture of water and silicone oil

20	15	10	5	1	0	درصد حجمی روغن سیلیکون (%) Silicone oil volume fraction (%)
0.00023	0.00022	0.00021	0.0002	0.00019	0.0058	ثابت توزیع پذیری متانول Methanol partition coefficient
0.03	0.04	0.06	0.2	0.6	73.7	ثابت توزیع پذیری هگزان Hexane partition coefficient

سینتیک تخریب زیستی هگزان در حضور و

عدم حضور فاز آلی

جدول ۵ نرخ ویژه تخریب زیستی هگزان به همراه میزان زیست توده‌ی اولیه جهت محاسبه ثابت‌های سینتیکی را نشان می‌دهد. از مدل سینتیکی میکائلیس - منتن (معادله (۳)) برای مدل‌سازی استفاده شد. مقادیر ثابت‌های سینتیکی برای تخریب هگزان در این پژوهش در جدول ۶ ارائه شده است.

$$SDR = \frac{V_m C_{Gi}}{k_s + C_{Gi}} \quad (3)$$

$V_m$  = بیشینه نرخ تخریب ویژه،  $K_s$  = ثابت سینتیکی معادله میکائلیس - منتن ( $\text{g.m}^{-3}$ ) است،  $C_{Gi}$  = غلظت فاز گاز آلاینده ( $\text{g.m}^{-3}$ ) است.

از مقایسه ثابت‌های سینتیکی مشاهده می‌شود که مقدار  $K_s$  هنگامی که متانول به محیط افزوده شد از  $\text{g.m}^{-3}$  ۱۲ به  $\text{g.m}^{-3}$  ۲۱ افزایش یافت که نشان‌دهنده‌ی کاهش تمایل

ریزاندامگان به تخریب هگزان در حضور متانول بود. همچنین بیشینه نرخ تخریب ویژه هگزان از ۱۴۱/۱ به  $(\text{mg}_{\text{hexane}} \cdot (\text{g}_{\text{biomass}} \cdot \text{day})^{-1})$  ۱۲۳/۱ کاهش یافت. افزودن روغن سیلیکون به محیط کشت باعث افزایش بیشینه نرخ تخریب ویژه هگزان به  $(\text{mg}_{\text{hexane}} \cdot (\text{g}_{\text{biomass}} \cdot \text{day})^{-1})$  ۱۳۳/۵ و کاهش مقدار  $K_s$  به  $\text{g.m}^{-3}$  ۱۷ شد. روغن سیلیکون با افزایش توزیع پذیری هگزان در فاز مایع و افزایش نرخ انتقال جرم سبب کاهش مقدار  $K_s$  و افزایش تمایل ریزاندامگان به تخریب زیستی هگزان می‌شود (Ascon-Cabrera and Lebeault, 1995). ایرانمنش و همکاران پارامترهای سینتیک تخریب زیستی هگزان توسط یک جمعیت میکروبی را  $K_s = 9/57 \text{ mg.L}^{-1}$  و  $\text{mg}_{\text{hexane}} \cdot (\text{g}_{\text{biomass}} \cdot \text{day})^{-1}$  ۸۶  $V_m =$  گزارش کرده‌اند. اما در حضور تولوئن بعنوان ماده دوم این مقادیر به ترتیب به  $K_s = 14/43 \text{ mg.L}^{-1}$  و  $\text{mg}_{\text{hexane}} \cdot (\text{g}_{\text{biomass}} \cdot \text{day})^{-1}$  ۴۰  $V_m =$  رسیدند که آن را نشان از اثر بازدارندگی تولوئن بر تخریب زیستی هگزان دانسته‌اند (Iranmanesh et al., 2015).

جدول ۵- نرخ ویژه تخریب زیستی هگزان و غلظت زیست توده‌ی اولیه برای محاسبه ثابت‌های سینتیکی معادله SDR

Table 5. The specific degradation of hexane and the initial biomass concentration for the calculation of kinetic constants of SDR equation

نرخ تخریب زیستی ویژه هگزان (میلی گرم هگزان بر گرم زیست توده بر روز) Specific degradation rate of hexane $\text{mg}_{\text{hexane}} \cdot (\text{g}_{\text{biomass}} \cdot \text{day})^{-1}$	میزان نهایی زیست توده (گرم بر لیتر) Final biomass concentration ( $\text{g.L}^{-1}$ )	مقدار روغن سیلیکون Silicone oil volume fraction (%)	غلظت متانول (گرم بر متر مکعب) Methanol concentration ( $\text{g.m}^{-3}$ )	غلظت هگزان (گرم بر متر مکعب) Hexane concentration ( $\text{g.m}^{-3}$ )
11.12	0.06	0	0	1
25.8	0.07	0	0	3
37	0.07	0	0	4
40.8	0.07	0	0	5
58	0.07	0	0	8
50	0.08	0	0	10
5	0.07	0	1	1
10.8	0.07	0	1	3
21.7	0.07	0	1	4
25.8	0.07	0	1	5
39.2	0.10	0	1	8
37	0.08	0	1	10
6.7	0.07	5	1	1
13	0.07	5	1	3
24.2	0.07	5	1	4
29.2	0.07	5	1	5
45.8	0.07	5	1	8
41.7	0.08	5	1	10

جدول ۶- مقادیر ثابت‌های سینتیکی برای تخریب زیستی هگزان  
6. Kinetic constant values for *n*-hexane biodegradation Table

ضریب همبستگی $R^2$	ثابت نیمه سرعت (گرم بر متر مکعب) $K_s$ ( $g \cdot m^{-3}$ )	بیشینه نرخ تخریب زیستی (میلی گرم هگزان بر گرم زیست توده بر روز) $V_{max}$ $mg_{hexane} \cdot (g_{biomass} \cdot day)^{-1}$	ثابت‌های سینتیکی Kinetic parameters
0.92	12	141.4	هگزان Hexane
0.9	21	123.1	هگزان+متانول Hexane in presence of methanol
0.9	17	133.5	هگزان+متانول+روغن سیلیکون Hexane in presence of methanol and silicone oil

هگزان به  $1 mg_{hexane} \cdot (g_{biomass} \cdot day)^{-1}$   $1/23$  شد.

### نتیجه‌گیری

بطور کلی، با افزایش کسر حجمی روغن سیلیکون میزان نرخ تخریب زیستی ویژه متانول کاهش یافت. همچنین با افزایش میزان روغن سیلیکون تا میزان ۱۰٪ حجمی، نرخ تخریب زیستی ویژه هگزان افزایش یافت. افزایش بیشتر کسر حجمی روغن سیلیکون تا ۲۰٪ حجمی تاثیر چندانی بر نرخ تخریب زیستی ویژه هگزان نداشت. سینتیک تخریب زیستی هگزان از مدل میکائلیس-منتن تبعیت کرد. افزودن  $1 g \cdot m^{-3}$  متانول به محیط کشت اثر منفی بر نرخ تخریب ویژه هگزان داشت و حضور متانول سبب افزایش مقدار  $K_s$  به  $21 g \cdot m^{-3}$  و کاهش بیشینه نرخ تخریب ویژه

### سپاسگزاری

این مقاله از پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی شیمی - بیوتکنولوژی، مصوب و دفاع شده در دانشگاه تربیت مدرس، استخراج شده است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس برای ارائه امکانات آزمایشگاهی ابراز نمایند.

### پی‌نوشت‌ها

<sup>1</sup> *Bacillus cereus*

<sup>2</sup> *Pandoraea pnomenus*

### References

Angelucci, D.M., Piscitelli, D. and Tomei, M.C., 2019. Pentachlorophenol biodegradation in two-phase bioreactors operated with absorptive polymers: Box-Behnken experimental design and optimization by response surface methodology. *Process Safety and Environmental Protection*. 131, 105-115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.09.005>.

Arriaga, S., Muñoz, R., Hernández, S., Guieysse, B. and Revah, S., 2006. Gaseous hexane biodegradation by *Fusarium solani* in two liquid phase packed-bed and stirred-tank bioreactors. *Environmental Science and Technology*. 40(7), 2390-2395. DOI: <https://doi.org/10.1021/es051512m>.

Arriaga, S. and Revah, S., 2005. Removal of *n*-hexane by *Fusarium solani* with a gas-phase biofilter. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*. 32(11-12), 548-553. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10295-005-0247-9>.

### منابع

Ascon-Cabrera, M.A. and Lebeault, J.M., 1995. Interfacial area effects of a biphasic aqueous/organic system on growth kinetic of xenobiotic-degrading microorganisms. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 43, 1136-1141. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00166938>.

Baltzis, B. C., Wojdyla, S. M. and Zarook, S. M., 1997. Modeling biofiltration of VOC mixtures under steady-state conditions. *Journal of Environmental Engineering*. 123(6), 599-605. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1997\)123:6\(599\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1997)123:6(599)).

Chalupa, J., Novák, O., Halecký, M., Bárta, J. and Kozliak, E., 2021. Thermophilic waste air treatment of *n*-alkanes in a two-phase bubble column reactor: the effect of silicone oil addition. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*. 96(6), 1682-1690. DOI: <https://doi.org/10.1002/jctb.6693>.

Cheng, Y., He, H., Yang, C., Zeng, G., Li, X., Chen, H. and Yu, G., 2016. Challenges and solutions for

- biofiltration of hydrophobic volatile organic compounds. *Biotechnology Advances*. 34(6), 1091-1102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2016.06.007>.
- Cheng, Y., Li, X., Liu, H., Yang, C., Wu, S., Du, C. and Zhong, Y., 2020. Effect of presence of hydrophilic volatile organic compounds on removal of hydrophobic n-hexane in biotrickling filters. *Chemosphere*. 252, 126490. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126490>.
- Dewidar, A. A. and Sorial, G. A., 2022. Effect of rhamnolipids on the fungal elimination of toluene vapor in a biotrickling filter under stressed operational conditions. *Environmental Research*. 204, 111973. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111973>.
- Dumont, E., Andrès, Y. and Le Cloirec, P., 2014. Mass transfer coefficients of styrene into water/silicone oil mixtures: New interpretation using the "equivalent absorption capacity" concept. *Chemical Engineering Journal*. 237, 236-241. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.10.021>.
- Ferdowsi, M., Ramirez, A. A., Jones, J. P. and Heitz, M., 2017. Elimination of mass transfer and kinetic limited organic pollutants in biofilters: A review. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 119, 336-348. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.10.015>.
- Galindo, H., Revah, S., Cervantes, F. J. and Arriaga, S., 2011. Effect of surfactant and oil additions in the biodegradation of hexane and toluene vapours in batch tests. *Environmental Technology*. 32(2), 167-173.
- García-Abuín, A., Gómez-Díaz, D. and Navaza, J. M., 2012. Carbon dioxide mass transfer in gas-liquid-liquid system. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 51(15), 5585-5591. DOI: <https://doi.org/10.1080/09593330.2010.491132>.
- Hassan, A. A. and Sorial, G. A., 2010. Biofiltration of n-hexane in the presence of benzene vapors. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*. 85(3), 371-377. DOI: <https://doi.org/10.1002/jctb.2330>.
- Iranmanesh, E., Halladj, R. and Zamir, S. M., 2015. Microkinetic analysis of n-hexane biodegradation by an isolated fungal consortium from a biofilter: Influence of temperature and toluene presence. *CLEAN-Soil, Air, Water*. 43(1), 104-111. DOI: <https://doi.org/10.1002/clen.201200318>.
- Keramati, S., Ferdowsi, M. and Zamir, S. M., 2021. Compounds interactions during simultaneous biodegradation of hydrophobic n-hexane and hydrophilic methanol vapors in one-and two-liquid phase conditions. *Process Safety and Environmental Protection*. 147, 283-291. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.09.040>.
- Kalantar, M., Zamir, S. M., Ferdowsi, M. and Shojaosadati, S. A., 2021. Removal of toluene in a biotrickling filter in the presence of methanol vapors: Experimental study, mathematical modeling, and kinetic parameters optimization. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 9(1), 104617. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104617>.
- Karimi, A., Golbabaei, F., Neghab, M., Pourmand, M. R., Nikpey, A., Mohammad, K. and Mehrnia, M. R., 2013. Biodegradation of high concentrations of benzene vapors in a two phase partition stirred tank bioreactor. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*. 10, 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1186/1735-2746-10-10>.
- Muñoz, R., Daugulis, A. J., Hernández, M. and Quijano, G., 2012. Recent advances in two-phase partitioning bioreactors for the treatment of volatile organic compounds. *Biotechnology Advances*. 30(6), 1707-1720. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.08.009>.
- Parnian, P., Zamir, S. M. and Shojaosadati, S. A., 2016. Styrene vapor mass transfer in a biotrickling filter: effects of silicone oil volume fraction, gas-to-liquid flow ratio, and operating temperature. *Chemical Engineering Journal*. 284, 926-933. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.08.148>.
- Ramezani, M., Khorshidzadeh, M., Zamir, S. M. and Ferdowsi, M., 2021. Performance evaluation of a trickling bioreactor treating methanol vapor under one-and two-liquid phase conditions. *Environmental Technology & Innovation*. 24, 101948. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101948>.
- Rene, E. R., Estefania López, M., Veiga, M. C. and Kennes, C., 2010. Steady-and transient-state operation of a two-stage bioreactor for the treatment of a gaseous mixture of hydrogen sulphide, methanol and  $\alpha$ -pinene. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*. 85(3), 336-348. DOI: <https://doi.org/10.1002/jctb.2343>.
- Sakhaei, A., Zamir, S. M., Rene, E. R., Veiga, M. C. and Kennes, C., 2023. Neural network-based performance assessment of one-and two-liquid phase biotrickling filters for the removal of a waste-gas mixture containing methanol,  $\alpha$ -pinene, and hydrogen sulfide. *Environmental Research*. 116978. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116978>.
- Wu, C., Xu, P., Xia, Y., Li, W., Li, S. and Wang, X., 2017. Microbial compositions and metabolic interactions in one-and two-phase partitioning airlift bioreactors treating a complex VOC mixture. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*. 44(9), 1313-1324. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10295-017-1955-7>.
- Yousefinejad, A., Zamir, S. M. and Nosrati, M., 2019. Fungal elimination of toluene vapor in one-and two-liquid phase biotrickling filters: effects of inlet concentration, operating temperature, and

peroxidase enzyme activity. Journal of Environmental Management. 251, 109554. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109554>.

Research. 8, ASWR-S23688. DOI: <https://doi.org/10.4137/ASWR.S23688>.

Zehraoui, A. and Sorial, G. A., 2015. Treatment of dynamic mixture of n-Hexane, Benzene, and Methanol and fungi community characterization in an integrated scheme of cyclic adsorption/desorption beds and trickle bed air biofilter. Air, Soil and Water

