

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و پنجم، شماره شش، شهریورماه ۱۴۰۲ (۱۴-۱)

بررسی سینتیک جذب رنگ رودامین B و فلزات سنگین کادمیوم و کبالت از آب توسط زیست فعال سطحی رامنولپیدی تولید شده از باکتری سودوموناس

آئروژینوزا

فاطمه دیبا^۱

بابک مختارانی^{۲*}

mokhtaranib@ccerci.ac.ir

رضا پناهی^۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۲/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۷/۲۶

چکیده

زمینه و هدف: یک روش جایگزین و سازگار با محیط زیست جهت پالایش محیط زیست از آلودگی‌ها، استفاده از مواد زیست فعال سطحی مشتق شده از میکروارگانیسم‌ها است. مزیت زیست فعال سطحی، زیست تخریب‌پذیری، سمیت پایین و اثر بخشی در افزایش تجزیه بیولوژیکی است. برخلاف سورفکتانت‌های شیمیایی، مواد فعال سطحی تولید شده از میکروارگانیسم‌ها به آسانی تجزیه می‌شوند و به همین دلیل برای کاربردهای زیست محیطی به خصوص زیست پالایی بسیار مناسب‌اند. این پژوهش با هدف زیست پالایی و بررسی سینتیک جذب فلزات سنگین (کبالت و کادمیوم) و رنگ رودامین B از آب توسط بیوسورفکتانت تولید شده از باکتری سودوموناس آئروژینوزا صورت گرفت. روش بررسی: در این مطالعه از یک باکتری مولد بیوسورفکتانت که از سایت زباله کهریزک در جنوب تهران به عنوان سویه سودوموناس آئروژینوزا HAK02 جداسازی و شناسایی شده جهت تولید زیست فعال سطحی برای حذف آلاینده‌ها استفاده شد. تست زتا پتانسیل برای تشخیص بار بیوسورفکتانت تولید شده و استفاده در زیست پالایی انجام شد. میزان حذف رنگ توسط دستگاه UV و حذف فلزات سنگین به وسیله آنالیز AES_ICP انجام گرفت.

یافته‌ها: با توجه به بار منفی ماده برای حذف فلزات سنگین و رنگ کاتیونی رودامین B استفاده شد. بیوسورفکتانت تولید شده با سودوموناس آئروژینوزا قادر به حذف ۹۵٪ رودامین B، ۴۳٪ Cd^{2+} و ۳۵٪ Co^{2+} شد. بررسی مدل سینتیکی جذب نشان داد با مدل سینتیکی شبه درجه دوم تطبیق بهتری داشت.

بحث و نتیجه گیری: زیست پالایی با استفاده از زیست فعال سطحی جهت حذف فلزات سنگین و رنگبری روشی سریع و سازگار با محیط زیست می‌باشد. این نمونه جهت حذف رودامین B بسیار مناسب است و برای فلزات سنگین Cd^{2+} و Co^{2+} توانایی متوسط دارد.

واژه‌های کلیدی: رودامین B، زیست پالایی، زیست فعال سطحی، کادمیوم، کبالت و مدل سینتیکی جذب.

۱- کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، پژوهشکده مهندسی نفت، پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران، تهران، ایران

۲- استادیار، پژوهشکده مهندسی نفت، پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران، تهران، ایران. * (مسئول مکاتبات)

۳- استادیار، پژوهشکده مهندسی نفت، پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران، تهران، ایران

Adsorption Kinetics Study of Removal Rhodamine B and Heavy Metals (Cadmium and Cobalt) from Water Using Rhamnolipid Biosurfactant Produced by *Pseudomonas Aeruginosa*

Fatemeh Diba¹

Babak Mokhtarani^{2*}

mokhtarani@ccerci.ac.ir

Reza Panahi³

Admission Date: May 10, 2023

Date Received: October 18, 2022

Abstract

Background and Objective: An alternative and environmentally friendly method for purifying the environment from pollution is the use of biosurfactant derived from microorganisms. The advantage of biosurfactant is biodegradability, low toxicity, and effectiveness in increasing biological decomposition. Unlike chemical surfactants, surface active substances produced by microbes are easily decomposed, and for this reason, they are very suitable for environmental applications, especially bioremediation. The aim of this study was bioremediation and investigation of the absorption kinetics of heavy metals and Rhodamine B from water by biosurfactant produced from *Pseudomonas aeruginosa* bacteria.

Material and Methodology: In this study, a biosurfactant-producing bacterium that was isolated and identified as *Pseudomonas aeruginosa* HAK02 from the Kahrizak waste site in the south of Tehran was used to produce a surface bioactive agent to remove pollutants. Zeta potential test was performed to detect the load of biosurfactant produced and used in bioremediation. The amount of color removal was done by UV device and the removal of heavy metals was done by ICP_AES analysis.

Findings: Due to the negative charge of the substance, it was used to remove heavy metals and Rhodamine B cationic dye. Biosurfactant produced with *Pseudomonas aeruginosa* was able to remove 95% rhodamine B, 43% Cd²⁺, and 35% Co²⁺. Examining the kinetic model of absorption showed that better correlation with pseudo-second order kinetic model.

Discussion and Conclusion: Bioremediation using surfactants to remove heavy metals and dyeing is a fast and environmentally friendly method. This sample is very suitable for the removal of Rhodamine B and has the moderate ability for heavy metals Cd²⁺ and Co²⁺.

Keywords: Bioremediation, Bio-Surfactant, Cadmium, Cobalt, Kinetic model of absorption and Rhodamine B.

1- MSc of Chemical Engineering, Faculty of Petroleum Engineering, Chemistry and Chemical Engineering Research Center of Iran (CCERCI), Tehran, Iran.

2- Prof., Faculty of Petroleum Engineering, Chemistry and Chemical Engineering Research Center of Iran (CCERCI), Tehran, Iran. **(Corresponding Authors)*

3- Assist. Prof., Faculty of Petroleum Engineering, Chemistry and Chemical Engineering Research Center of Iran (CCERCI), Tehran, Iran.

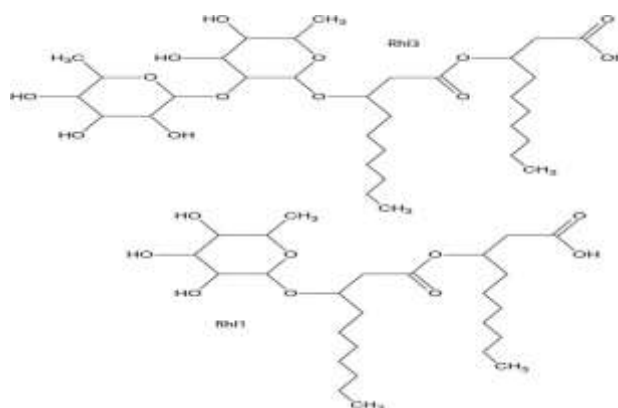
مقدمه

سویه‌هایی با توانایی تولید بالا (مانند سویه‌های جهش‌یافته و یا نوترکیب)، بهینه‌سازی فرآیند و محیط کشت و نیز استفاده از روش‌های خوراکی‌دهی کنترل شده و فرایند مداوم از مهم‌ترین راهکارهای پیشنهادی برای غلبه بر این موانع است (۴).
 رامنولیپید، گلیکولیپیدی است که بیشتر توسط باکتری *Sodomonas* *آئرژینوزا* تولید می‌شود. این ماده متشکل از یک یا دو قند رامنوز که با پیوند گلیکوزیدی به یک یا دو اسید چرب بتا هیدروکسی متصل است. رامنولیپید می‌تواند کشش سطحی آب را از 72 mN/m به زیر 30 mN/m کاهش دهد و غلظت میسل بین ۵۰ تا ۲۰۰ را دارد. این خصوصیات آن‌ها را برای استفاده در موارد مختلف مثل مواد شوینده، امولسیون، روانکاری، ظرفیت فوم، خیساندن، حلالیت و پراکندگی فاز مناسب است. همچنین رامنولیپید را می‌توان از مواد تجدیدپذیر مانند روغن سرخ‌کردنی، پسماند نفتی و روغن سبزیجات گلیسرولی تولید کرد. توسعه تکنیک‌های مختلف باعث شده بیش از ۶۰ نوع رامنولیپید توسط سویه‌های مختلف تولید شود که بیشترین نوع از رامنولیپیدهای تولید شده آلفا ال رامنوپیرانوزیل هیدروکسی دکانوئیل هیدروکسی دکانوات (Rha-C10-C10) است (۵).

نگرانی‌ها در رابطه با محیط زیست در میان مصرف‌کنندگان و نیز قوانین کنترلی اعمال شده توسط دولت‌ها، صنعت را وادار به جستجوی فرآورده‌های جایگزین مانند بیوسورفکتنت‌ها کرده است (۱). تنوع بالای بیوسورفکتنت‌ها باعث شده که برای هر کاربرد خاص از یک نوع بیوسورفکتنت استفاده کرد که کاملاً اختصاصی عمل کند (۲). بیوسورفکتنت‌ها از مولکول‌های پیچیده‌ی آلی با گروه‌های کاربردی خاص تشکیل شده‌اند، اغلب اختصاصی عمل می‌کنند و انتخاب‌گری بالایی دارند. با توجه به این ویژگی برخی در لوازم آرایشی و مواد غذایی و برخی در سم‌زدایی و صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند (۳).

انسان همواره به فکر یافتن محصولات جایگزین برای موادی است که در زمره‌ی مواد پر مصرف هستند ولی مضرات و معایب زیادی را به همراه دارند. زیست فعال سطحی (بیوسورفکتنت) از موادی هستند که در دنیای صنعتی و پیشرفته امروزی کاربردهای فراوانی دارند. فعال سطحی مولکول‌های آمفی پاتیک هستند که یک سر آب‌دوست و یک سر آب‌گریز دارند که با تجمع در فصل مشترک، باعث کاهش کشش سطحی می‌شوند. این ویژگی موجب پتانسیل کاربرد آن‌ها در صنایع گوناگونی مثل صنایع غذایی، کشاورزی، معدن، آرایشی بهداشتی، پتروشیمی، استخراج نفت، زیست پالایی و ... می‌باشد. زیست فعال سطحی زیست تخریب‌پذیر است، سمیت کمتر و کارایی در محدوده دمایی متفاوت نسبت به فعال سطحی شیمیایی دارد. ازین رو کاربرد زیست فعال سطحی که توسط میکروارگانیسم تولید می‌شود به دلیل برتری نسبت به فعال سطحی شیمیایی در حال افزایش است.

هزینه تولید بالا و بازده پایین از گلوگاه‌های مهم در تولید اقتصادی بیوسورفکتنت‌ها به شمار می‌روند. برای غلبه بر این مشکل از روش‌های گوناگونی استفاده شده است. استفاده از سوبستراهای ارزان قیمت (مانند ضایعات حاصل از فرآوری مواد غذایی و فرآورده‌های کشاورزی کم‌بها)، استفاده از روش‌های سریع، مؤثر و ارزان فرآیندهای پایین‌دستی، استفاده از



شکل ۱- ساختار دی رامنولیپید ($Rh_{I3}-RhaRhaC_{10}C_{10}$) و مونو رامنولیپیدها ($Rh_{II}-RhaC_{10}C_{10}$) (۵)

Figure 1. Structure of dirhamnolipid ($Rh_{I3}-RhaRhaC_{10}C_{10}$) and monorhamnolipids ($Rh_{II}-RhaC_{10}C_{10}$) (5)

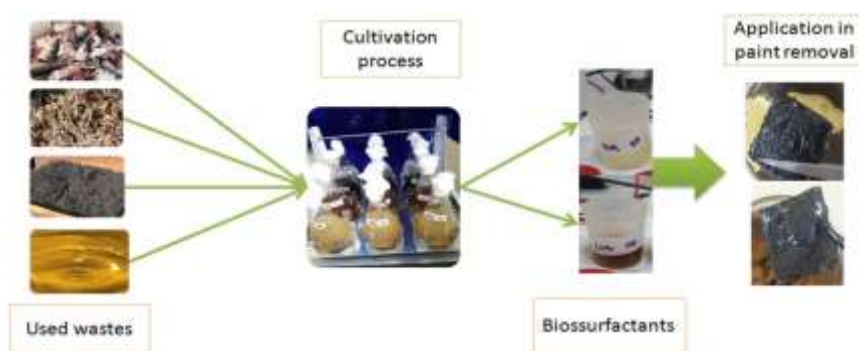
پیشینه تحقیق

در سال ۲۰۱۸، روپشیکھا و همکاران^۲ از رامنولیپید تولید شده توسط باکتری *Sordomonas* آئرژینوزا جهت حذف هیدروکربن‌های نفتی از خاک استفاده کرد. مقدار رامنولیپید $1/5g/L$ برای غلظت 6800 و 8500 ppm بود که به حذف ۸۶ و ۸۰٪ منجر شد. همچنین از سورفکتنت شیمیایی جهت مقایسه با بیوسورفکتنت استفاده شد که در شرایط مشابه به حذف ۷۰ و ۶۸٪ رسید (۹).

در گزارشی دیگر، بیوسورفکتنت‌ها با دیگر افزودنی‌ها مثل سدیم دودسیل سولفات و باکتری‌های تخریب‌کننده هیدروکربن جهت حذف بنزین از محیط خاکی، مقایسه شد. بیوسورفکتنت قادر به حذف ۹۳٪ شد درحالیکه باکتری ۷۰٪ و سدیم دودسیل سولفات ۸۶٪ حذف کرد. تجزیه و تحلیل سینتیک این فرایند یک معادله شبه درجه دوم با $R^2 = 9318/0$ بود که نشان می‌داد بیوسورفکتنت برای این فرایند مناسب است (۱۰).

شکل ۲ نشان داد که جهت تولید بیوسورفکتنت و حذف رنگ، پالولا و همکاران^۳ از دو منبع کربنی متفاوت و کورینه باکتریوم استفاده کردند. در این پژوهش بیوسورفکتنت تولید شده از ضایعات ماهی قابلیت حذف رنگ را نداشت درحالیکه بیوسورفکتنت با منبع کربنی تفاله‌ی نیشکر برای حذف رنگ مناسب بود و هر دو آنیونی بودند (۱۱).

افزایش آگاهی عمومی از اثرات آلودگی محیط زیست، تحقیقات و تکنولوژی را به سمت کمک به پایش محیط زیست از آلاینده‌های آلی و غیر آلی شامل هیدروکربن‌ها و فلزات سوق داده است. فلزات سنگین به دلیل تجمع در زنجیره غذایی، سمیت، تجزیه ناپذیر بودن و پایداری آنها در طبیعت یک تهدید جدی برای محیط زیست محسوب می‌شوند. عمده گروه‌های پسماند ترکیبات آلی شیمیایی، شامل پسماند محلول‌های آلی (آفت‌کش‌ها)، مایعات آلی (شوینده‌ها) و روغن‌ها (روغن‌های روان‌کننده، روغن خودرو، روغن‌های هیدرولیکی) می‌باشند. بیشتر آلودگی‌های موجود در خاک نتیجه نشت و تراوش ناشی از شستشوی تجهیزات و بقایای باقی‌مانده در کانتینرها است. متداول‌ترین فلزات سنگین (HMs) که با فعالیت انسانی مرتبط هستند به دلیل نحوه‌ی نادرست دفع زباله در محل‌های دفن زباله وارد محیط زیست شده‌اند و تولید پسماند شیمیایی شامل سرب (Pb)، کادمیم (Cd)، مس (Cu)، کروم (Cr)، نیکل (Ni)، آهن (Fe)، جیوه (Hg) و روی (Zn) می‌کنند. یک روش جایگزین و سازگار با محیط زیست جهت پالایش محیط زیست از آلودگی‌ها، استفاده از مواد زیست فعال سطحی مشتق شده از میکروارگانیسم‌ها به دلیل تخریب‌پذیری، سمیت پایین و اثر بخشی در افزایش تجزیه بیولوژیکی این ترکیبات است (۶-۸).



شکل ۲- مراحل تولید بیوسورفکتانت و کاربرد آن در حذف رنگ (۱۱)

Figure 2. Production steps of biosurfactant and its application in color removal (11)

در پژوهشی دیگر، روش حذف فلزات سنگین با دو روش الکتروکینتیک و تلفیق الکتروکینتیک با بیوسورفکتانت با هم مقایسه شد که افزودن بیوسورفکتانت منجر به افزایش ۶ تا ۳۰٪ در حذف فلزات مس، روی، کروم، سرب، نیکل و منیزیم شد (۱۲).
 دهرآزما و همکاران در سال ۲۰۰۷ از رامنولیبید برای حذف فلزات سنگین موجود در رسوبات دریاچه لاجین کانادا در فرایند مداوم استفاده کرد. پارامترهای مهم مانند غلظت رامنولیبید و مواد افزودنی، زمان و سرعت جریان مورد بررسی قرار گرفت. گزارش‌های حذف ۳۷٪ از کلسیم، ۱۳٪ روی و ۲۷٪ نیکل را برای این پژوهش نشان داد (۱۳).
 جدول مطالعات دیگر در این زمینه را نشان می‌دهد.

جدول ۱- کارهای انجام شده در حذف آلاینده‌ها از آب و خاک

Table 1. Work done in removing pollutants from water and soil

مرجع	حداکثر حذف (درصد)	آلودگی	محیط آلوده
(۱۴)	۹۹	رنگ (متیل بنفش)	آب
(۱۵)	۷۳	TNT	خاک
(۱۶)	۱۷، ۱۱	کادمیوم، نیکل	خاک
(۱۶)	۳۲، ۲۶، ۳۵	کبالت، مس، روی	خاک
(۱۷)	۹۲	رنگ (متیل بلو)	آب
(۱۸)	۰	رنگ (کنگو رد)	آب
(۱۸)	۲	رنگ (آمارانت)	آب
(۱۹)	۵۳	هیدروکربن نفتی	خاک

تولید بیوسورفکتانت در فلاسک

به ارلن‌های ۲۵۰ mL حاوی ۱۰۰ mL محیط کشت ۳ mL ماده تلقیح و ۴g روغن اضافه شد. ارلن‌ها به مدت ۱۴۴ ساعت (۶ روز) با دور ۲۴۰ rpm و pH ۵/۸ گرم‌گذاری شد.

مواد و روش‌ها

سویه

در این مطالعه از یک باکتری مولد بیوسورفکتانت استفاده شد. این سویه از سایت زباله کهریزک در جنوب تهران به عنوان سویه سودوموناس آئرژینوزا HAK02 جداسازی و شناسایی شده است (۴).

آنالیزها

اندازه‌گیری کشش سطحی و بین سطحی

کشش سطحی و بین سطحی توسط دستگاه Data Physics Contact Angle system (OCA2 Germany) در دمای ۲۵°C و به روش قطره معلق انجام شد.

آنالیز زتا پتانسیل

آنالیز زتا با دستگاه زتامتر (ZEN, ۳۶۰۰ Zeta Malvern English, Sizer) برای تعیین میزان بار سطحی بیوسورفکتنت آنیونی جهت کاربرد در حذف آلاینده به کار گرفته شد. برای اندازه‌گیری پتانسیل زتا، سوسپانسیونی از بیوسورفکتنت (۱g در ۱۰۰mL آب مقطر) با pH ۵/۵ استفاده شد.

آنالیز پلاسمای جفت شده القایی^۲

تعیین غلظت فلزات سنگین Co و Cd موجود در آب به وسیله آنالیز AES_ICP انجام شد.

حذف رودامین B از آب

از بیوسورفکتنت تولید شده جهت حذف رنگ در غلظت ۵۰ppm رودامین B استفاده شد. ۲ درصد وزنی بیوسورفکتنت به عنوان جاذب اضافه شد. نمونه به مدت ۲ دقیقه توسط ورتکس به شدت هم‌زده شد. سپس نمونه‌گیری جهت تعیین مقدار حذف رنگ انجام شد. نمونه‌ها در ویال‌های ۲ میلی‌لیتری جهت میکرو سانتریفیوژ برای جدا کردن بیوسورفکتنت ریخته شد. پس از آن میزان حذف آن توسط دستگاه UV در طول موج ۵۵۴nm اندازه‌گیری شد.

حذف فلزات سنگین از آب

بیوسورفکتنت با ۲ درصد وزنی به ارلن‌های ۵۰۰mL حاوی ۲۵۰ mL محلول که غلظت Cd و Co در آن‌ها ۵۰ppm بود، اضافه شد. ارلن‌ها در دمای ۳۰°C در شیکر با دور ۱۸۰rpm قرار گرفتند. برای بررسی میزان حذف هر ۳۰ دقیقه نمونه‌گیری شد و بعد از سانتریفیوژ و جدا کردن بیوسورفکتنت، جهت اندازه‌گیری غلظت باقی‌مانده فلز در نمونه‌ها و تعیین میزان جذب از آنالیز پلاسمای جفت شده القایی استفاده شد. این

آزمایش برای غلظت Cd، ۵۰۰ppm هم تکرار شد.

رسم نمودارهای سینتیکی جذب

رسم نمودارهای سینتیک جذب، مدل شبه درجه اول و مدل شبه درجه دوم برای فلزات و رنگ به منظور یافتن مدل مناسب جهت تطبیق و شاخص‌های جذب نمونه‌ها انجام شد.

سینتیک جذب

مدل شبه درجه اول

یکی از مدل‌هایی که مقاومت اصلی فرایند جذب را در مرحله‌ی چهارم یعنی مرحله واکنش شیمیایی در نظر می‌گیرد، مدل شبه درجه اول است. در این مدل فرض بر آن است که شدت پُر شدن مراکز جذب به صورت خطی متناسب با تعداد مراکز خالی جذب (نیرو محرکه جذب) است.

$$\ln \left(\frac{q_e - q_t}{q_e} \right) = k_1 t \quad (1)$$

q_e ظرفیت جذب در تعادل، q_t ظرفیت جذب در زمان t و k_1 ثابت سرعت است.

مدل شبه درجه دوم

یکی از مدل‌های پر کاربرد است که بسیاری از مکانیسم‌های جذب سطحی فلزات سنگین بر روی جاذب‌های مختلف را توضیح می‌دهد.

$$\frac{t}{q_t} = \frac{t}{q_e} + \frac{1}{k q_e^2} \quad (2)$$

q_e ظرفیت جذب در تعادل، q_t ظرفیت جذب در زمان t و k ثابت سرعت است (۲۰).

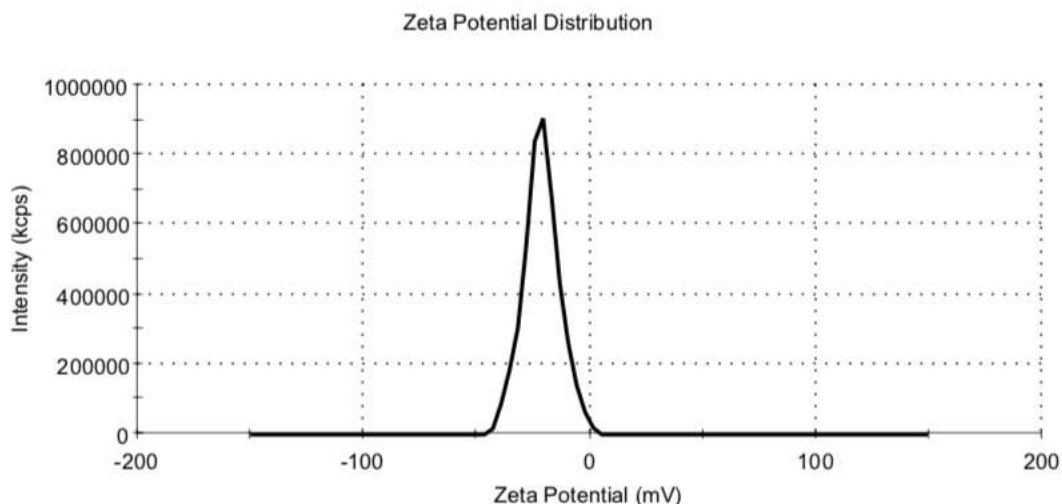
نتایج و بحث:

تعیین بار سطحی ذره

به منظور تعیین آلاینده‌های مناسب برای حذف از آنالیز زتا پتانسیل استفاده شد. نتایج آزمایش زتا پتانسیل در شکل ۳ بار بیوسورفکتنت تولید شده در pH آب مقطر (۵/۵) را ۲۱/۳- نشان داد که بار بسیار زیادی است. در نتیجه این ماده برای حذف فلزات سنگین و رنگ‌ها با بار کاتیونی مناسب است.

1- Wilhelm plate technique

2-Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy



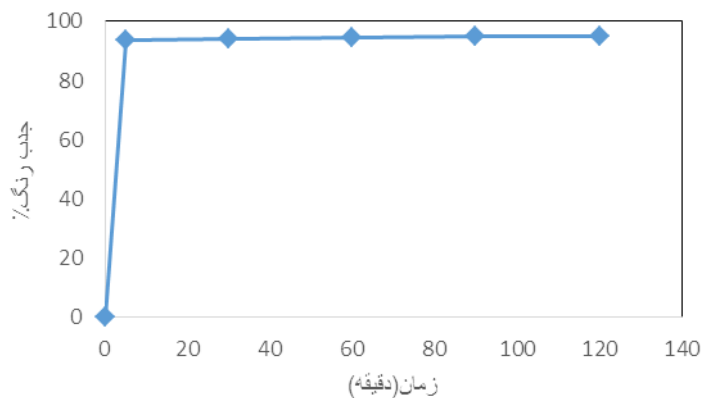
شکل ۳- نمودار زتا پتانسیل بیوسورفکتانت رامنولیپیدی

Figure 3. Rhamnolipid biosurfactant zeta potential diagram

حذف رودامین B

۸۵ دقیقه بعد تنها ۲ درصد حذف شد. بیوسورفکتانت تولید شده توانست در دمای محیط و pH آب مقطر (۵/۵) ۹۵٪ جذب داشته باشد و غلظت رنگ را از ۵۰ ppm به ۲/۵ برساند.

با استفاده از دستگاه UV و منحنی کالیبراسیون میزان حذف رنگ محاسبه و رسم شد. نمودار ۴، سینتیک جذب رودامین B را نشان داد. سرعت جذب در دقایق اول بسیار سریع بوده و ۵ دقیقه نخست بیش از ۹۰ درصد رنگ حذف شد، در حالیکه در



شکل ۴- نمودار سینتیک جذب رودامین B توسط بیوسورفکتانت رامنولیپیدی

Figure 4. Kinetic diagram of rhodamine B absorption by rhamnolipid biosurfactant

بالای بیوسورفکتانت در کمتر از ۵ دقیقه اتفاق افتاد.

در شکل نمونه‌ی سمت چپ غلظت اولیه‌ی رنگ رودامین B که ۵۰ ppm بود را نشان می‌دهد و نمونه‌ی سمت راست مربوط به غلظت بعد از رنگبری که ۲/۵ ppm است. رنگ‌بری سریع و

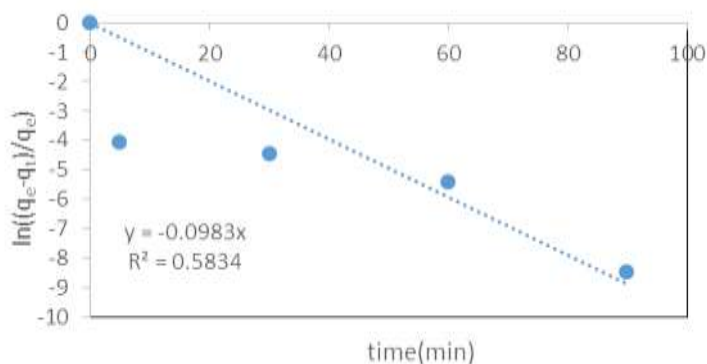


شکل ۵- جذب رودامین B توسط بیوسورفکتانت

Figure 5. Rhodamine B absorption by biosurfactant

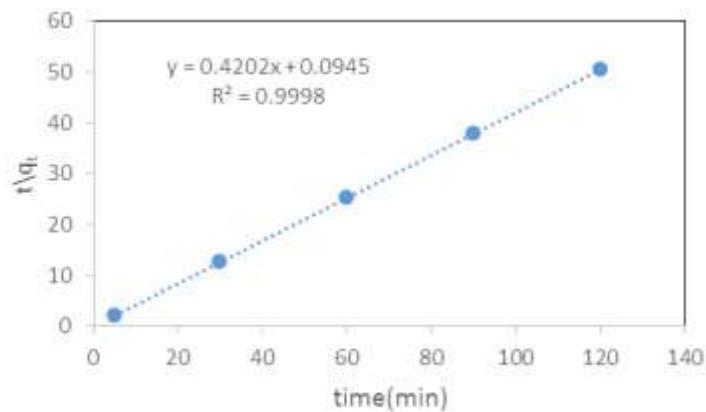
شیمیایی مرحله‌ی تعیین کننده سرعت است. ثابت سرعت ظرفیت جذب در تعادل $1/8697 \text{ g/mg.h}$ و $2/379 \text{ mg/g}$ و $R^2 = 0.9998$ در سینتیک شبه مرتبه دوم، محاسبه شده است.

با توجه به نتایج ارائه شده در نمودار ۶ و ۷ و جدول ۲ مقادیر R^2 بالاتر مربوط به سینتیک شبه مرتبه دوم است. در نتیجه داده‌های تعادلی برای جذب رنگ توسط بیوسورفکتانت از سینتیک شبه مرتبه دوم پیروی می‌کند. در این فرایند جذب



شکل ۶- نمودار مدل شبه درجه اول جذب رنگ

Figure 6. Diagram of pseudo-first order model of dye absorption



شکل ۷- نمودار مدل شبه درجه دوم جذب رنگ

Figure 7. Diagram of the quasi-quadratic model of dye absorption

جدول ۲- پارامترهای شبه درجه اول و دوم جذب رنگ

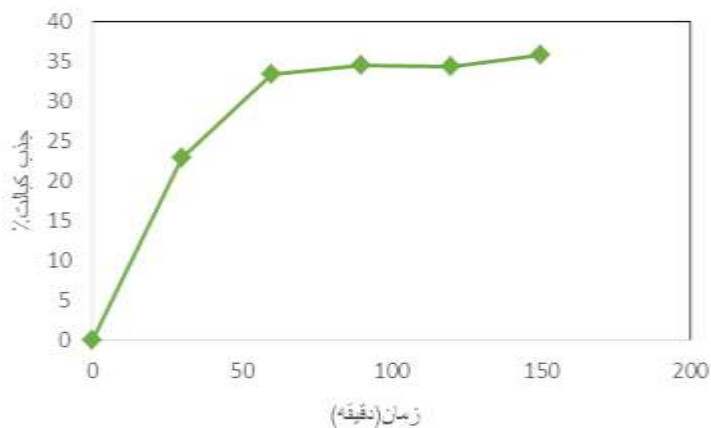
Table 2. Parameters of the first and second order of dye absorption

R ²	q _e (mg/g)	K(g/mg.h)	مدل
۰/۵۸۳۴	۲/۳۷۸	۰/۰۹۸۳	شبه درجه اول
۰/۹۹۹۸	۲/۳۷۹	۱/۸۶۹۷	شبه درجه دوم

حذف کبالت

دسترس بوده ولی با گذشت زمان و کم شدن سایت‌های جذب سطحی، کبالت به صورت نفوذ به حفره‌های درونی جاذب و یا به صورت چند لایه‌ای جذب می‌شود که این امر موجب کاهش سرعت جذب می‌شود.

نمودار زیر جذب کبالت توسط بیوسورفکتانت را نشان می‌دهد. حذف در یک ساعت اول بیشترین سرعت را دارد که ۳۳٪ بود. پس از آن سرعت حذف به صفر میل می‌کند و با گذشت دو ساعت تنها ۲٪ حذف صورت گرفت. زیرا ابتدای فرایند جذب، تعداد بیشتری از سایت‌های سطحی خالی برای انجام جذب در

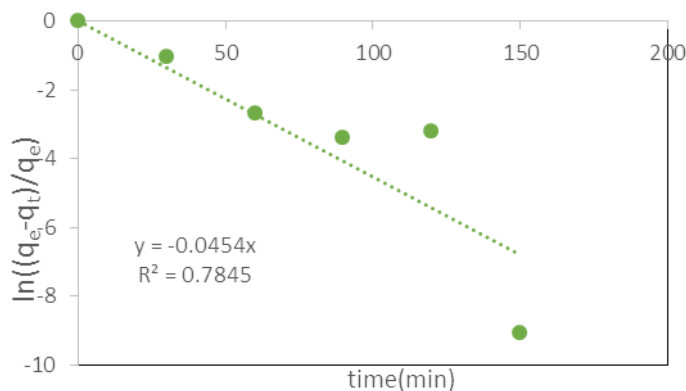


شکل ۸- نمودار سینتیک جذب کبالت توسط بیوسورفکتانت رامنولیپیدی

Figure 8. Kinetic diagram of cobalt absorption by rhamnolipid biosurfactant

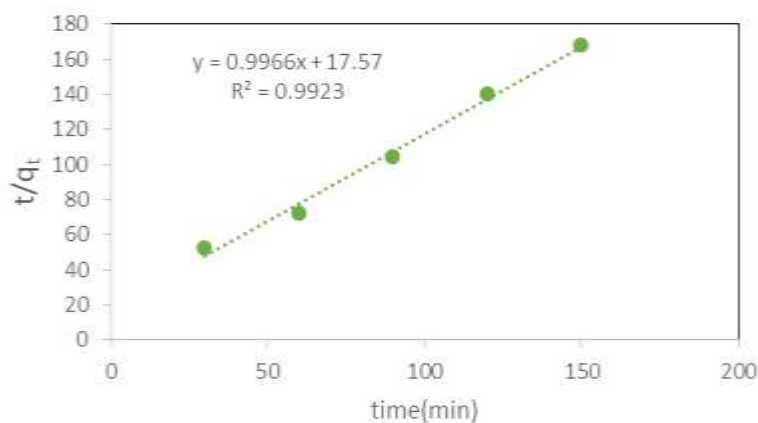
جاذب و جذب شونده کنترل می شود. نتایج نشان می دهد که در سینتیک شبه مرتبه دوم ثابت سرعت $0/0563 \text{ g/mg.h}$ ، ظرفیت جذب در تعادل $1/0034 \text{ mg/g}$ و $R^2 = 0/9923$ است.

بررسی دو مدل سینتیکی نشان می دهد که نتایج با مدل سینتیکی شبه درجه دو تطبیق بهتری دارد. زیرا مقادیر R^2 گزارش شده برای مدل شبه درجه دوم بیشتر است و ظرفیت جذب نیز در این مدل بیشتر می باشد. در نتیجه سرعت کلی فرایند جذب به وسیله فرایند شیمیایی تبادل الکترون بین



شکل ۹- نمودار مدل شبه درجه دوم جذب کبالت توسط بیوسورفکتنت رامنولپیدی

Figure 9. Diagram of quasi-quadratic model of cobalt absorption by rhamnolipid biosurfactant



شکل ۱۰- نمودار مدل شبه درجه دوم جذب کبالت توسط بیوسورفکتنت رامنولپیدی

Figure 10. Diagram of quasi-quadratic model of cobalt absorption by rhamnolipid biosurfactant

جدول ۳- پارامترهای شبه درجه اول و دوم جذب کبالت

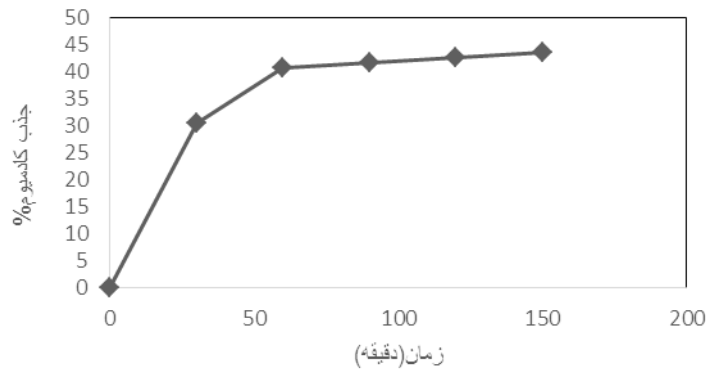
Table 3. First and second order pseudo-parameters of cobalt absorption

R^2	$q_e(\text{mg/g})$	$K(\text{g/mg.h})$	مدل
۰/۷۸۴۵	۰/۸۹۳۶	۰/۰۴۵۴	شبه درجه اول
۰/۹۹۲۳	۱/۰۰۳۴	۰/۰۵۶۳	شبه درجه دوم

حذف کادمیوم

بازدارنده‌ی بین مولکول‌های کادمیوم بر سطح جاذب و توده‌ی مایع باشد.

با توجه به شکل ۱۱، در یک ساعت اول فرایند، حذف فلز کادمیوم تا ۴۰٪ است و پس از آن بعد از گذشت ۹۰ دقیقه تنها ۳٪ حذف اتفاق می‌افتد. این می‌تواند به دلیل نیروهای

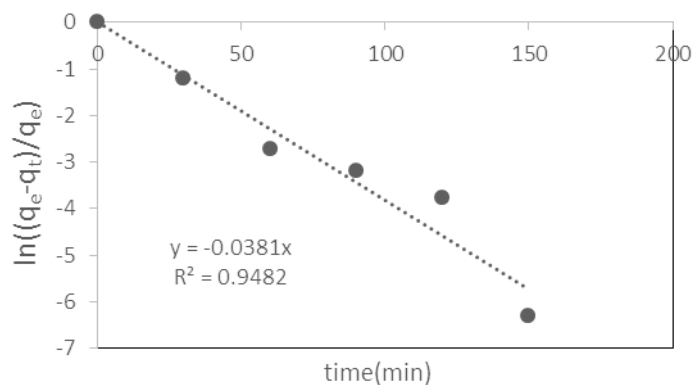


شکل ۱۱- نمودار سینتیک جذب کادمیوم توسط بیوسورفکتانت

Figure 11. Kinetic diagram of cadmium absorption by biosurfactant

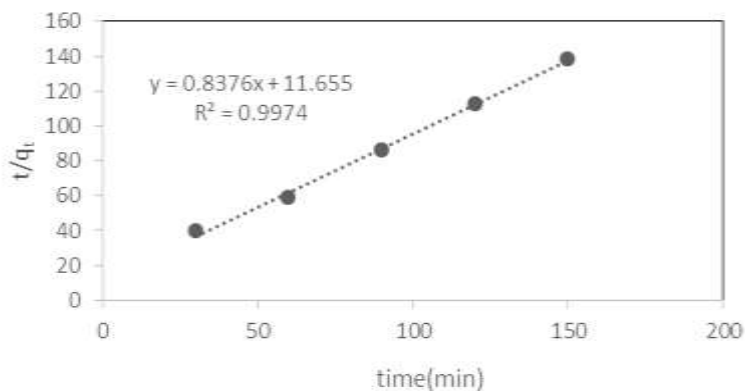
مرتب‌ه اول مشخص است که داده‌های تعادلی از سینتیک شبه مرتبه دوم پیروی می‌کند. این بدان معناست که جذب شیمیایی مرحله‌ی تعیین کننده سرعت است. همچنین به نظر می‌رسد سرعت کلی فرایند جذب به وسیله‌ی فرایند شیمیایی تبادل الکترون بین جاذب و جذب‌شونده کنترل می‌شود.

نتایج جدول ۴ و نمودارهای زیر نشان می‌دهد که در مدل شبه درجه اول ثابت سرعت 0.0381 g/mg.h ، ظرفیت جذب در تعادل $1/0.89 \text{ mg/g}$ و $R^2 = 0.9482$ است، در حالیکه در مدل شبه درجه دوم ثابت سرعت 0.0605 g/mg.h ، ظرفیت جذب در تعادل $1/19 \text{ mg/g}$ و $R^2 = 0.9974$ است. با توجه به داده‌های ارائه شده و مقادیر R^2 بالاتر مشاهده شده برای داده‌های سینتیک شبه مرتبه دوم در مقایسه با سینتیک شبه



شکل ۱۲- نمودار مدل شبه درجه اول جذب کادمیم توسط بیوسورفکتانت رامنولپیدی

Figure 12. Diagram of pseudo-first order model of cadmium absorption by rhamnolipid biosurfactant



شکل ۱۳- نمودار مدل شبه درجه دوم جذب کادمیوم توسط بیوسورفکتانت رامنولیپیدی

Figure 13. Diagram of quasi-quadratic model of cadmium absorption by rhamnolipid biosurfactant

جدول ۴- پارامترهای مدل شبه درجه اول و دوم جذب کادمیوم

Table 4. Parameters of pseudo first and second order model of cadmium absorption

R ²	q _e (mg/g)	K(g/mg.h)	مدل
۰/۹۴۸۲	۱/۰۸۹	۰/۰۳۸۱	شبه درجه اول
۰/۹۹۷۴	۱/۱۹	۰/۰۶۰۵	شبه درجه دوم

نتیجه گیری

وکالت در غلظت ۵۰ ppm به میزان ۴۳ و ۳۵٪ شد. داده-های تعادلی این تحقیق از سینتیک شبه مرتبه دوم پیروی کرد. ثابت سرعت ۱/۸۶۹۷ g/mg.h، ظرفیت جذب در تعادل ۲/۳۷۹ mg/g و ضریب رگرسیون ۰/۹۹۹۸ در سینتیک شبه مرتبه دوم رنگ رودامین B، محاسبه شده است. نتایج جذب کادمیوم نشان می‌دهد که در سینتیک شبه مرتبه دوم ثابت سرعت ۰/۰۵۶۳ g/mg.h، ظرفیت جذب در تعادل ۱/۰۳۴ mg/g و ضریب رگرسیون ۰/۹۹۲۳ است. داده‌های تعادلی حذف کبالت در مدل شبه درجه دوم ثابت سرعت ۰/۰۶۰۵ g/mg.h، ظرفیت جذب در تعادل ۱/۱۹ mg/g و ضریب رگرسیون ۰/۹۹۷۴ است.

این نتایج در مقایسه با پژوهش‌های دیگر نشان داد که بیوسورفکتانت تولید شده از باکتری سودوموناس آئرژینوزا پتانسیل مناسب در حذف آلاینده‌ها دارد. به منظور افزایش حذف می‌توان پارامترهای محیطی مثل دما و pH را بهینه سازی کرد و یا با تلفیق آن با روش الکتروفنتون و الکتروکینتیک درصد جذب را تا ۴۰ درصد بالاتر برد (۱۲، ۱۹).

اثرات آلودگی محیط زیست، تحقیقات و تکنولوژی را به سمت کمک به پایش محیط زیست از آلاینده‌های آلی و غیر آلی شامل هیدروکربن‌ها و فلزات سوق داده است. فلزات سنگین به دلیل تجمع در زنجیره غذایی، سمیت، تجزیه ناپذیر بودن و پایداری آنها در طبیعت یک تهدید جدی برای محیط زیست محسوب می‌شوند. برخلاف سورفکتانت‌های شیمیایی، مواد فعال سطحی تولید شده از میکروکروپ‌ها به آسانی تجزیه می‌شوند و به همین دلیل برای کاربردهای زیست محیطی به خصوص زیست پالایی بسیار مناسب‌اند. توانایی تولید بیوسورفکتانت از مواد ارزان و پسماند یکی از دلایل اهمیت استفاده از بیوسورفکتانت‌ها در تصفیه فاضلاب است که علاوه بر کاهش صدمه به محیط زیست از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است (۲۱).

به منظور شناسایی ویژگی‌های بیوسورفکتانت تولید شده توسط این سویه جهت کاربرد در تصفیه پساب از آنالیز زتا پتانسیل استفاده شد. بار آن ۲۱/۳- گزارش شد که بار نسبتاً زیادی هست. به دلیل بار منفی، از آن در حذف رنگ کاتیونی و فلزات سنگین استفاده شد که قادر به حذف رودامین B، کادمیوم

8. A. Ghavidel, S. Naji Rad and H.A. Alikhani, "The Investigation of Effect of Soil Moisture and Temperature on Crude Oil Bioremediation by *Pseudomonas Putida*," *J. Env. Sci. Tech.*, Vol 23, No.1, pp. 65–76, 2021. (In Persian)
9. R. Patowary, K. Patowary, M. C. Kalita, and S. Deka, "Application of biosurfactant for enhancement of bioremediation process of crude oil contaminated soil," *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 129, no. November 2017, pp. 50–60, 2018.
10. A. Fadhile Almansoori, H. Abu Hasan, M. Idris, S. R. Sheikh Abdullah, and N. Anuar, "Potential application of a biosurfactant in phytoremediation technology for treatment of gasoline-contaminated soil," *Ecol. Eng.*, vol. 84, pp. 113–120, 2015.
11. P. C. Martins and V. G. Martins, "Biosurfactant production from industrial wastes with potential remove of insoluble paint," *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 127, no. November 2017, pp. 10–16, 2018.
12. J. Tang, J. He, T. Liu, X. Xin, and H. Hu, "Removal of heavy metal from sludge by the combined application of a biodegradable biosurfactant and complexing agent in enhanced electrokinetic treatment," *Chemosphere*, vol. 189, pp. 599–608, 2017.
13. B. Dahrazma and C. N. Mulligan, "Investigation of the removal of heavy metals from sediments using rhamnolipid in a continuous flow configuration," *Chemosphere*, vol. 69, no. 5, pp. 705–711, 2007.

References

1. S. Vijayakuma and V. Saravanan, "Biosurfactants-Types, Sources and Applications," *Res. J. Microbiol.*, vol. 10, no. 5, pp. 181–192, 2015.
2. K. Muthusamy, S. Gopalakrishnan, T. K. Ravi, and P. Sivachidambaram, "Biosurfactants: Properties, commercial production and application," *Curr. Sci.*, vol. 94, no. 6, pp. 736–747, 2008.
3. M. Abouseoud, R. Maachi, A. Amrane, S. Boudergua, and A. Nabi, "Evaluation of different carbon and nitrogen sources in production of biosurfactant by *Pseudomonas fluorescens*," *Desalination*, vol. 223, no. 1–3, pp. 143–151, 2008.
4. H. Haj Farajollah, review, "Identification and production of surface bioactive substances by different species of bacteria", Oil Research Institute, Iran Research Institute of Chemistry and Chemical Engineering, 2014.
5. R. B. Lovaglio, V. L. Silva, H. Ferreira, R. Hausmann, and J. Contiero, "Rhamnolipids know-how: Looking for strategies for its industrial dissemination," *Biotechnol. Adv.*, vol. 33, no. 8, pp. 1715–1726, 2015.
6. C. N. Mulligan, "Environmental applications for biosurfactants," *Environ. Pollut.*, vol. 133, no. 2, pp. 183–198, 2005.
7. M. Nezhadnaderi, and H. Gooran Orimi "Thermodynamic Study of Biosorption for Removal of Nickel Using Microbial Biomass Derived from Plants," *Human and Environment*, No. 61, pp.187-204, 2022. (In Persian)

- its application in accelerating the chemical and biological decolorization of azo dyes,” *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 145, no. May, pp. 8–15, 2017.
19. T. G. Ambaye, F. Formicola, S. Scaffoni, Sh. Prasad, Ch. Milanese, F. S. Robustelli D. Cuna, A. Franzetti, M. Vaccari, “Treatment of petroleum hydrocarbon contaminated soil by combination of electro-Fenton and biosurfactant-assisted bioslurry process,” *Chemosphere.* vol. 319, 138013, 2023.
20. H. K. Boparai, M. Joseph, D. M. O. Carroll, “Kinetics and thermodynamics of cadmium ion removal by adsorption onto nano zerovalent iron particles” *J. Hazard. Mater.*, vol. 186, pp. 465–458, 2011.
21. S. Teja Malkapuram, V. Sharma, S. P. Gumfekar, Sh. Sonawane, Gr. Boczkaj, M. M. Seepana, “A review on recent advances in the application of biosurfactants in wastewater treatment,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments.* vol. 48, 101576, 2021.
14. K. Samal, C. Das, and K. Mohanty, “Application of saponin biosurfactant and its recovery in the MEUF process for removal of methyl violet from wastewater,” *J. Environ. Manage.*, vol. 203, pp. 8–16, 2017.
15. B. Bina, M. M. Amin, B. Kamarehie, A. Jafari, M. Ghaderpoori, M. A. Karami, F. Teimouri, and M. Sadani, “Data on biosurfactant assisted removal of TNT from contaminated soil,” *Data Br.*, vol. 19, pp. 1600–1604, 2018.
16. S. Lal, S. Ratna, O. Ben Said, and R. Kumar, “Biosurfactant and exopolysaccharide-assisted rhizobacterial technique for the remediation of heavy metal contaminated soil: An advancement in metal phytoremediation technology,” *Elsevier B.V.*, vol. 10, 2018.
17. M. Mahmoudabadi, "Removal of color from aqueous solutions by flotation method using rhamnolipid biosurfactants", *Mining Engineering, Zarand Higher Education Complex*, 2016.
18. C. Liu, Y. You, R. Zhao, D. Sun, P. Zhang, J. Jiang, A. Zhu, and W. Liu, “Ecotoxicology and Environmental Safety Biosurfactant production from *Pseudomonas taiwanensis* L1011 and