

KONTRIBUSI DISPERSAN KIMIAWI DAN BIOSURFAKTAN TERHADAP BIODEGRADASI MINYAK BUMI

Widyanti Yuliandari^{1*}

¹Program Studi Ilmu Lingkungan, Fakultas Ilmu Tarbiyah, Universitas Raden Mas Said Surakarta Indonesia

*Email: widyanti_yuliandari@staff.uinsaid.ac.id

Diterima: 27 Oktober 2024. Disetujui: 05 Desember 2024. Dipublikasikan: 15 Desember 2024

Abstrak: Tumpahan minyak mentah di laut telah menjadi permasalahan lingkungan yang serius. Penggunaan surfaktan sebagai salah satu solusi atas tumpahan minyak tersebut. Surfaktan bertindak sebagai dispersan untuk remediasi kontaminasi berbagai hidrokarbon minyak bumi dan untuk merangsang metabolisme mikroba dan transformasi minyak. Penelitian ini memanfaatkan tinjauan literatur mengenai dispersan kimia dan biosurfaktan sebagai solusi tumpahan minyak laut. Dispersan kimia digunakan untuk mengurangi kerusakan akibat tumpahan minyak dengan memecah lapisan minyak menjadi tetesan-tetesan kecil, sehingga mengurangi potensi terperangkapnya hewan laut di dalam lapisan minyak. Dispersan kimia mempercepat biodegradasi dan merangsang pertumbuhan bakteri. Biosurfaktan dapat mendorong pemecahan molekul hidrokarbon dengan meningkatkan mobilitas, ketersediaan hayati, dan paparan bakteri, sehingga menguntungkan biodegradasi hidrokarbon. Dispersan kimia mempunyai efek positif terhadap proses biodegradasi minyak bumi, namun juga mempunyai efek negatif pada kondisi tertentu. Biosurfaktan memainkan peran positif dalam proses biodegradasi minyak bumi.

Kata Kunci: dispersan kimiawi, biosurfaktan, biodegradasi, minyak bumi

PENDAHULUAN

Minyak bumi telah menjadi sumber energi utama bagi aktivitas industri global, namun eksploitasi dan distribusinya kerap memicu insiden tumpahan minyak yang mencemari ekosistem laut [1]. Tumpahan minyak berdampak serius, baik secara lingkungan maupun ekonomi, yang mendorong pengembangan berbagai metode tanggap darurat, termasuk penggunaan dispersan untuk meminimalkan kerusakan lingkungan [2].

Dispersan, seperti Corexit® EC9500A yang diterapkan pada tumpahan minyak *Deepwater Horizon*, telah diterima secara luas sebagai tindakan penanggulangan tumpahan minyak karena keberhasilannya dalam meningkatkan efisiensi remediasi [2]. Salah satu contoh nyata penggunaan dispersant dalam tanggap darurat untuk tumpahan minyak adalah penggunaan lebih dari 990.000 galon (~ 3700 m³) dispersan (kebanyakan Corexit® EC9500A) pada tumpahan minyak *Deepwater Horizon* [3].

Penerapan surfaktan sebagai dispersan telah menjadi perhatian besar dalam riset global karena hidrokarbon minyak bumi dapat membahayakan ekosistem laut dan kesehatan manusia [4]. Dispersan

berkemampuan memfasilitasi pelarutan minyak permukaan ke dalam air, sebenarnya diterapkan dengan tujuan menstimulasi metabolisme mikroba dan transformasi minyak [5]. Pada kasus dispersan kimia Corexit ternyata memberikan dampak lingkungan yang kompleks, selain mampu meningkatkan pelarutan minyak ke dalam air sehingga mendorong biodegradasi oleh mikroorganisme dan telah diakui sebagai pendekatan paling ramah lingkungan untuk mengatasi polutan minyak beserta turunannya, khususnya di negara-negara berkembang [6]. Kasus ini menjadi bukti bahwa jenis dispersan ini dapat menekan populasi

bakteri pendegradasi hidrokarbon tertentu dan dalam kondisi tertentu, bahkan menghambat aktivitas biodegradasi, terutama pada bakteri pendegradasi alkana [7]. Populasi beberapa bakteri pendegradasi hidrokarbon yang signifikan juga justru ditekan oleh Dispersant jenis Corexit [8].

Dampak lain dari aplikasi dispersant ditemukan dalam penelitian [9] yang membuktikan bahwa aplikasi dispersan dapat berdampak jangka panjang pada kelangsungan hidup larva udang (*Pandalus borealis*). Berbagai potensi untuk menimbulkan dampak lingkungan oleh surfaktan sintesis seperti toksisitas tinggi, biodegradabilitas rendah, kerusakan ekosistem, dan penggunaan global surfaktan yang mencapai lebih dari 15 juta ton per tahun dimana 60% di antaranya berakhir di lingkungan perairan, akan menjadikan biosurfaktan menjadi alternatif menjanjikan dikarenakan toksisitas rendah, biodegradabilitas tinggi, dan efektivitas setara [10]. Biosurfaktan merupakan senyawa amfipatik yang dihasilkan oleh mikroorganisme. Biosurfaktan ini memiliki potensi besar untuk digunakan dalam berbagai aplikasi pada lingkungan dan industriseperti bioremediasi pencemaran minyak [11]; [12].

Salah satu metode umum yang digunakan untuk meningkatkan biodegradasi polutan adalah penambahan biosurfaktan. Penggunaan biosurfaktan,

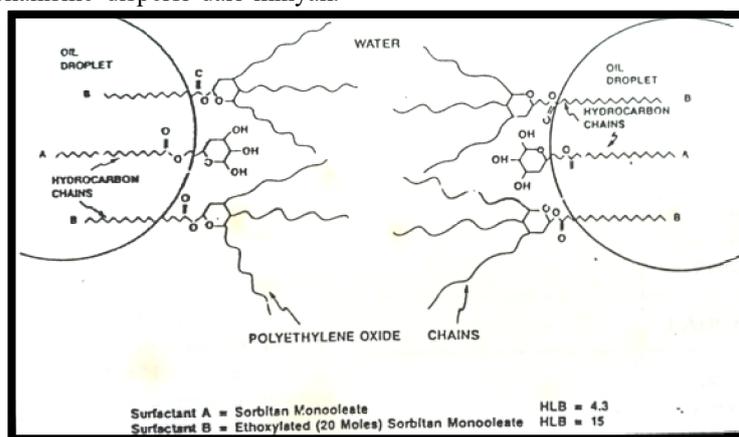
seperti rhamnolipida dan surfaktin, dapat meningkatkan efisiensi bioremediasi dengan cara meningkatkan bioavailabilitas minyak mentah bagi mikroba. Studi menunjukkan bahwa kedua jenis biosurfaktan ini efektif dalam memfasilitasi degradasi minyak mentah pada tanah yang tercemar [13]. Bioremediasi yang ditingkatkan dengan surfaktan (surfactant enhanced remediation) terbukti berhasil di lapangan. Surfaktan mendorong biodegradasi hidrokarbon minyak bumi, terutama

fraksi C21–C40. Juga mendorong pertumbuhan bakteri pendeградasi minyak [14].

Biosurfactant-based dispersants (BBD) menawarkan solusi yang lebih ramah lingkungan, efektif, dan hemat biaya dibandingkan dispersan komersial seperti Corexit 9500A. Surfaktan dan lipid trehalosa menunjukkan kemanjuran dispersi yang setara dengan Corexit, sementara kombinasi rhamnolipid dan emulsin menghasilkan kinerja unggul karena efek sinergis. Surfaktan dan lipid trehalosa menonjol sebagai kandidat terbaik untuk pengembangan komersial berkat rasio efektif yang rendah, tingkat biodegradasi tinggi, dan toksisitas rendah [15] meskipun efektivitas biosurfaktan telah terbukti setara dengan surfaktan sintetik dalam beberapa aplikasi, tantangan seperti biaya produksi dan kurangnya penelitian berkaitan dengan berbagai aplikasi industri perlu diatasi [16]. Beberapa hal di atas menjadikan riset tentang kontribusi dispersan kimiawi dan biosurfaktan menjadi menarik dan penting dalam kaitannya dengan penanganan tumpahan minyak. Penelitian ini bertujuan untuk (a) menganalisis kontribusi dispersan kimiawi terhadap efektivitas dan dampak ekologis dalam proses biodegradasi minyak bumi; (b) mengeksplorasi efektivitas biosurfaktan dalam meningkatkan biodegradasi minyak bumi dibandingkan dispersan kimiawi; (c) mengidentifikasi potensi dan tantangan penggunaan biosurfaktan sebagai alternatif ramah lingkungan dalam penanganan tumpahan minyak.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan literatur review yang menjelaskan mekanisme dispersi dari minyak.



Gambar 1. Sorbitan Monooleat dan Etoksilat Sorbitan Monooleat

Berikut ini beberapa sistem surfaktan yang terdapat

dalam dispersant komersial yang umum digunakan [18].

Tabel 2. Surfaktan Komersial

Sistem Surfaktan	Produsen
Ester asam lemak rantai panjang	ICI
Poly Ethylene Glycol, ester dari asam lemak dan alkil, alkil ether atau alkilaril sulfat/sulfonat	BP
Sorbitan monooleat	EXXON
Etoksilat sorbitan monooleat	
Sodium dioktil sulfosuksinat	

Dengan memahami secara alami proses dispersi minyak, terutama di lautan, dan dampak dari tumpahan minyak, maka bisa dicari solusi untuk mengatasi tumpahan minyak tersebut. Solusi yang ditempuh adalah menggunakan dispersan kimiawi dan biosurfaktan. Berdasarkan dari banyak riset, paper ini menguraikan keuntungan dari kedua metode tersebut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Mekanisme Dispersi

Ketika energi mengenai permukaan antara minyak dan air laut, minyak akan terdispersi secara alami. Dispersi alami ini terjadi ketika gelombang lautan dalam kondisi moderate. Penambahan dispersan kimia akan mempercepat proses pendispersian [17]. Mekanisme dispersi dengan bantuan dispersan adalah sebagai berikut:

- Saat diaplikasikan pada lapisan minyak, dispersan akan berada di permukaan antara minyak dan air laut.
- Gugus oleofil pada dispersan akan berikatan dengan minyak, sedangkan gugus hidrofil akan berikatan dengan air.
- Tegangan permukaan antara minyak dan air laut akan menurun sehingga terbentuklah droplet [18]; [19].

Fungsi dispersan selain membantu proses dispersi adalah mencegah penggabungan kembali droplet yang sudah terbentuk. Ini dapat terjadi karena dispersan berada pada interface antara minyak dan air laut dalam waktu yang cukup lama. Droplet terstabilisasi dengan adanya dispersan.

Sistem Surfaktan	Produsen
Poli etilen glikol monooleat Etoksilat sorbitan oleat Etoksilat oktilfosfat Etoksilat tridesilfosfat	Institute Francaise c/o Petrole
Ester Sorbitan Mono laurat kalsium sulfonat	LABOFINA
Sorbitan monooleat Etoksilat sorbitan trioleat Sodium tridesil sulfosuksinat	EXXON

Efisiensi dispersan juga dipengaruhi banyak hal, diantaranya jenis surfaktan dan salinitas lingkungan, di mana surfaktan nonionik seperti GM-2 menunjukkan kinerja optimal pada salinitas 30–35% dan mendukung stabilitas distribusi ukuran tetesan minyak hingga 60 jam [20].

2. Biosurfaktan

Biosurfaktan, yaitu molekul amphiphilik aktif-permukaan yang diproduksi oleh mikroorganisme [21]. Biosurfaktan dapat mendorong pemecahan molekul hidrokarbon dengan meningkatkan mobilitas, ketersediaan hayati dan paparan bakteri, sehingga menguntungkan proses biodegradasi hidrokarbon. Ada sejumlah besar mikroorganisme yang mampu mengurai polutan seperti minyak dan memproduksi biosurfaktan, tapi belum terlalu banyak diketahui [22].

Umumnya biosurfaktan dihasilkan oleh mikroorganisme yang dikembangkan dalam media larutan mengandung sumber karbon dan nitrogen [23].

Sejumlah bakteri seperti *Bacillus subtilis*, *Bacillus cereus*, *Pseudomonas sp.*, dan *Staphylococcus aureus*, yang ditemukan dalam tanah tercemar minyak bumi menunjukkan kemampuan memproduksi biosurfaktan untuk degradasi minyak [24], [25].

Biosurfaktan dapat memiliki berat molekul rendah, yang bertindak dengan mengurangi tegangan antarmuka air-minyak, atau berat molekul tinggi dan bertindak sebagai biodispersan dengan mencegah koalesensi (proses dimana masing-masing partikel Emulsi bergabung untuk membentuk partikel besar) tetesan minyak dalam air. Bioemulsifer dengan berat molekul tinggi adalah *heteropolysaccharides*, dan komponen aktifnya adalah lipid atau protein. Aktivitas biosurfaktan bakteri dalam bioremediasi berasal dari kemampuannya untuk meningkatkan luas permukaan substrat yang tidak larut air hidrofobik dan untuk meningkatkan kelarutan dan ketersediaan hayati hidrokarbon. Mereka dapat ditambahkan ke proses bioremediasi sebagai bahan yang dimurnikan atau dalam bentuk bakteri penghasil bioemulsifer. Dalam kedua kasus tersebut, mereka dapat merangsang pertumbuhan bakteri yang menurunkan minyak dan meningkatkan kemampuan mereka untuk memanfaatkan hidrokarbon [26]. Penambahan biosurfaktan dapat meningkatkan bioavailabilitas hidrokarbon melalui berbagai mekanisme, seperti solubilisasi, desorpsi, dan modifikasi sifat permukaan sel bakteri. Mekanisme ini berkontribusi secara signifikan dalam peningkatan efisiensi bioremediasi [27].

Berikut ini beberapa tipe biosurfaktan beserta strain penghasilnya.

Tabel 2. Tipe Biosurfaktan

Tipe Surfaktan	Strain Penghasil
Lipopeptide	<i>Bacillus sp.</i>
Lipopeptide	<i>B. Subtilis</i>
Flavolipids	<i>Flavobacterium sp.</i>
Glycolipid	<i>Dietza maris</i>
Lipopeptide	<i>Arthrobacterium Oxydan</i>

Lipopeptida yang dihasilkan oleh *Bacillus subtilis* menunjukkan efektivitas tinggi dalam mendispersikan minyak mentah. Penelitian oleh [28] menunjukkan bahwa biosurfaktan ini mempercepat degradasi hidrokarbon rantai panjang hingga 71,45% dalam dua hari, jauh lebih baik dibandingkan dispersan kimia seperti Corexit 9500A yang hanya mencapai 34,16%. Hal ini menegaskan potensi biosurfaktan dalam meningkatkan bioavailabilitas minyak mentah untuk mikroorganisme.

Penelitian oleh [29] menunjukkan bahwa rhamnolipid yang diproduksi oleh *Pseudomonas aeruginosa* memiliki kemampuan tinggi dalam menurunkan tegangan permukaan larutan menjadi 29 mN/m dan mengemulsifikasi minyak mentah hingga 80%. Hal ini menunjukkan potensinya sebagai pengganti dispersan kimia dalam bioremediasi minyak.

Biosurfaktan dari *Bacillus methylotrophicus* stabil dalam berbagai kondisi pH ekstrem dan suhu tinggi hingga 100°C, sehingga sangat cocok

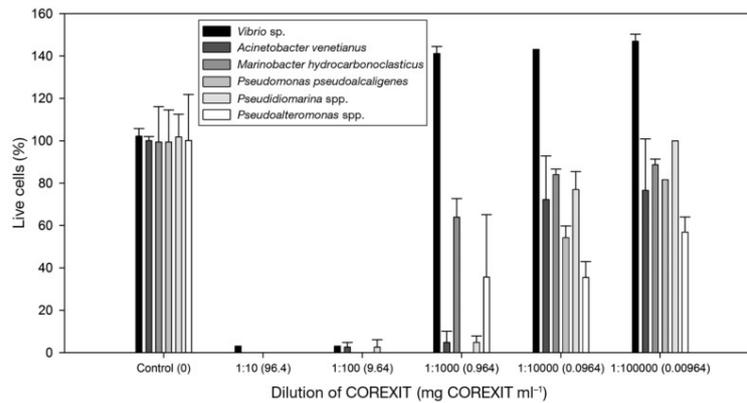
untuk aplikasi di lingkungan laut. Selain itu, biosurfaktan ini dapat mendegradasi hingga 90% hidrokarbon dalam minyak mentah [30].

3. Pengaruh Dispersan Kimiawi Dan Biosurfaktan Terhadap Biodegradasi

Dispersan kimiawi dipandang mampu mempercepat biodegradasi, karena produk *dispersant* saat ini *biodegradable* dan bersifat menstimulasi pertumbuhan bakteri [23]. Aplikasi *dispersant* jenis Slickbar OSD 9000 terhadap

minyak mentah jenis Duri Crude, memberikan degradasi sebesar 19,7% sementara tanpa dispersan hanya 5,2 % [31].

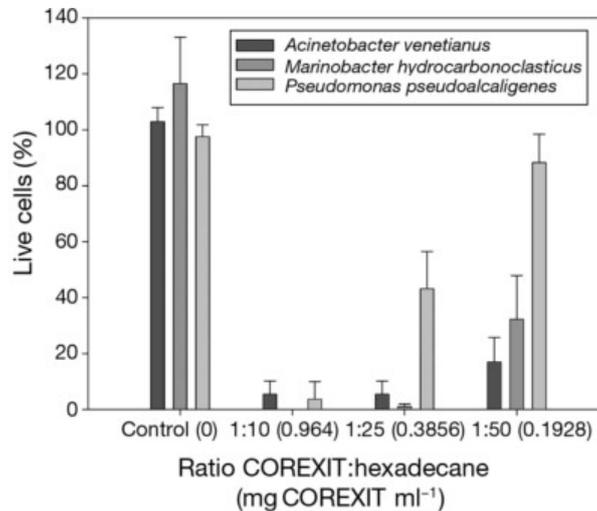
Studi yang dilakukan oleh [3] menunjukkan pengaruh *dispersan kimiawi* jenis COREXIT terhadap bakteri pendegradasi hidrokarbon maupun non *HC degrader* seperti dalam gambar berikut.



Gambar 2. Pengaruh Penambahan Corexit Terhadap Beberapa Bakteri di Lautan

Sedangkan untuk mengetahui pengaruh COREXIT khusus terhadap bakteri pendegradasi minyak, dilakukan pengujian COREXIT terhadap bakteri pendegradasi hidrokarbon. Ditambahkan pula hexadecane sebagai sumber karbon dengan

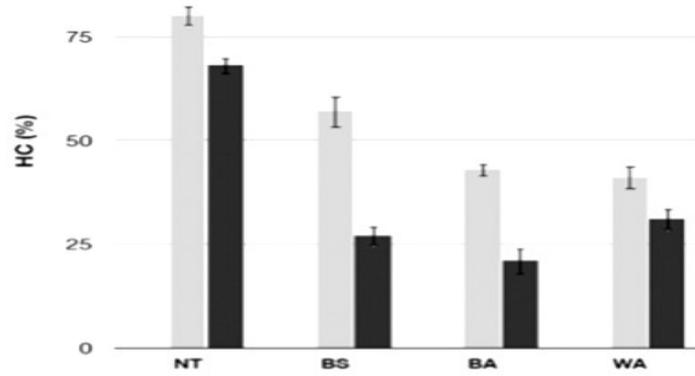
perbandingan 1: 10, 1: 25 dan 1:50 sebagaimana yang disarankan oleh US-EPA (Gambar 3)



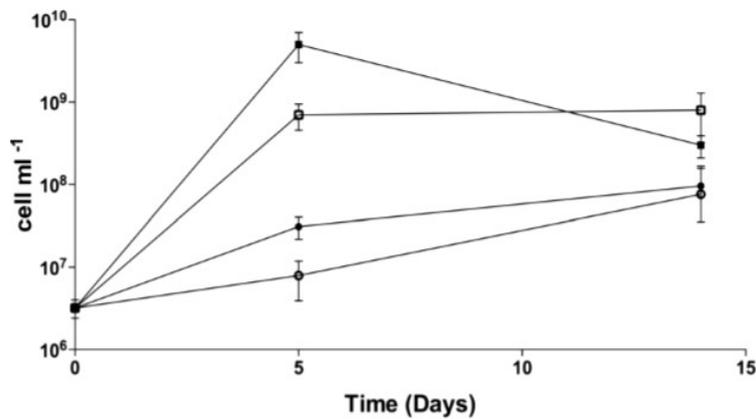
Gambar 3. Pengaruh COREXIT Terhadap Bakteri Pendegradasi Minyak Bumi.

Studi dengan memberikan perlakuan berbeda seperti tanpa treatment (hanya diberikan aerasi sederhana), biostimulasi yakni dengan penambahan nutrient, bioaugmentasi dengan penambahan bakteri yang umum dikenal sebagai pendegradasi hidrokarbon, dan dengan penambahan dispersan disertai nutrient, ternyata menemukan kondisi berkebalikan dengan gambar 3 [32].

Pada gambar 4 di bawah menunjukkan bahwa semua mikrokosmos yang diberikan treatment ternyata lebih terdegradasi daripada yang tanpa perlakuan. Pada hari ke 14 memperlihatkan mikrokosmos BA dan BS mencapai removal THP lebih tinggi daripada yang tambahkan *dispersant* dan kepadatan sel tertinggi pada proses biostimulasi. Sementara mikrokosmos dengan *dispersant* memiliki densitas sel mikroba lebih rendah (gambar 5).



Gambar 4. Konsentrasi TPH pada Setiap Mikrokosmos (Abu muda= hari ke 5, Gelap=Hari ke 14).

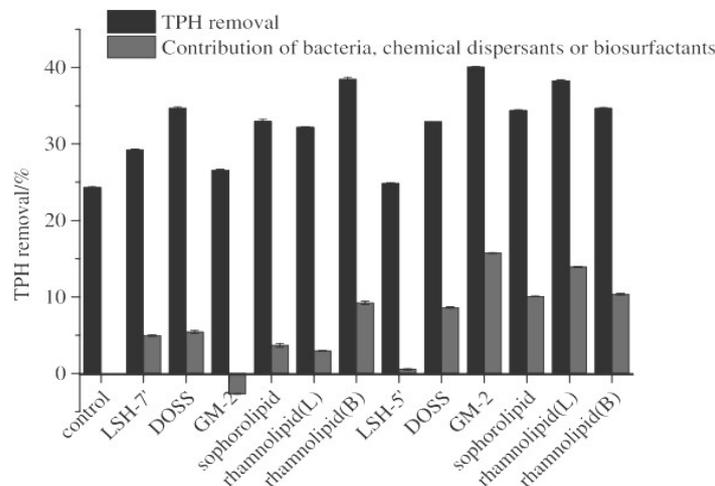


Gambar 5. Konsentrasi Sel yang Diamati Pada Mikrokosmos pada hari 1,5 dan 14 (bulat = WA, bulat gelap = NT, kotak= BS, kotak gelap=BA).

Pengaruh biosurfaktan juga diuji dengan cara mengukur CO₂ yang diemisikan sebagai indikator adanya proses metabolisme jasad renik dalam mikrokosmos yang diuji. Hasilnya adalah sebagaimana Tabel 3. Surfaktan sintesis atau chemical dispersan juga digunakan sebagai pembanding.

Konsentrasi CO₂ yang dihasilkan memperlihatkan aktifitas mikroorganisme dalam mikrokosmos yang menggunakan biosurfaktan

lebih baik daripada yang menggunakan dispersan kimiawi. Ini juga diperkuat dengan hasil pengujian yang menunjukkan bahwa biosurfaktan memberikan persentase reduksi minyak bumi yang lebih besar



Gambar 6. Kontribusi Dispersan kimiawi dan Biosurfaktan dalam Bioremediasi Minyak Mentah

Tabel 3. Pengaruh Biosurfaktan dalam Biodegradasi

Surfaktan	CO ₂ yang diemisikan (μmol g ⁻¹)	Reduksi Konsentrasi Surfaktan (%)
<i>Bacillus sp.</i>	2, 31	68, 3
<i>B. Subtilis</i>	2, 16	69, 1
<i>Flavobacterium sp.</i>	2, 15	42, 5
<i>Dietza maris</i>	1, 97	59, 6
<i>Arthrobacterium Oxydan</i>	1, 49	73, 4
Surfaktan Sintetis	0, 63	24, 8
Kontrol	0, 18	-

4. Pemanfaatan Dispersan Sebagai Substrat

Peran lain dispersan selain memecah lapisan minyak adalah sebagai substrat atau makanan bagi mikroorganisme. Kehadiran dispersan yang dimanfaatkan sebagai substrat, memberikan

pengaruh terhadap pertumbuhan mikroorganisme seperti dalam Tabel 4. Jenis-jenis biosurfaktan seperti rhamnolipid, sophorolipid memberikan pengaruh positif yang signifikan terhadap pertumbuhan bakteri.

Tabel 4. Pemanfaatan beberapa substrat termasuk dispersan dan biosurfaktan oleh strain LSH-70.

Substrate	Growth ^{a,b}
<i>n</i> -hexane	+++
Cyclohexane	+
Biphenyl	-
Trichloromethane	-
Benzene	-
Toluene	-
<i>n</i> -dodecane	+++
<i>n</i> -tetradecane	+++
Phenol	+++
GM-2	-
DOSS	++
Rhamnolipid	+++
Sophorolipid	+++
Naphthalene	+++
Phenanthrene	+++
Pyrene	+++
Anthracene	+++
Ethanol	+++
Ethyl acetate	-
Acetonitrile	++

^a Growth was measured by bacterial number, counted under the optical microscope.

^b +++, positive for growth; ++, medium for growth; +, weak growth; -, no growth.

Tabel 4 di atas memberikan informasi tentang pemanfaatan beberapa substrat termasuk dispersan dan biosurfaktan oleh strain LSH-70. Dispersan kimiawi jenis DOSS (Dioctyl Sulfosuccinate Sodium Salt) mendukung pertumbuhan mikroorganisme pada tingkat sedang. Hal tersebut menunjukkan bahwa DOSS mampu menyediakan lingkungan yang cukup mendukung aktivitas mikroba meskipun tidak optimal. Berbeda dengan media yang diberikan dispersan jenis GM-2 yang menunjukkan tidak ada pertumbuhan mikroorganisme. Sementara pada biosurfaktan Rhamnolipid dan sophorolipid dengan tanda +++ menunjukkan bahwa substrat ini secara signifikan mendukung pertumbuhan mikroorganisme. Hal ini dapat menandakan potensi keduanya dalam aplikasi bioteknologi seperti bioremediasi tumpahan minyak.

Beberapa komponen yang biasa ada dalam minyak bumi juga diuji dan memberikan hasil yang berbeda-beda, contohnya N-Hexane. Komponen ini mendukung pertumbuhan mikroorganisme secara signifikan, berbeda dengan Benzene dan Toluene yang tidak menunjukkan pertumbuhan mikroorganisme sama sekali. Hal ini disebabkan oleh toksisitasnya yang tinggi terhadap mikroorganisme atau oleh struktur kimianya yang lebih kompleks dan sulit dimetabolisme.

Penelitian berbeda yang dilakukan di Cina menunjukkan bahwa baik dispersan kimia (Jiefete dan Slickgone NS) maupun biosurfaktan rhamnolipid dapat meningkatkan biodegradasi minyak di sedimen pantai dengan efektivitas serupa, tetapi menghasilkan komunitas bakteri degradasi minyak yang berbeda. Dispersan kimia

memperkaya bakteri seperti *Syntrophotalea* dan *Marinobacter*, sedangkan rhamnolipid memicu peningkatan keragaman bakteri, termasuk *Pseudomonas* dan *Vibrio* [33].

Penelitian [21] dilakukan untuk mencari solusi biaya penggunaan biosurfaktan yang masih dipandang mahal dan meningkatkan dispersi minyak dengan cara mengkombinasikan antara biosurfaktan dengan dispersan kimiawi. Kombinasi biosurfaktan (rhamnolipid dan surfaktin) dengan surfaktan kimia seperti Tween 80 pada rasio tertentu (6:4, 4:6, dan 2:8 v/v) menunjukkan efektivitas tinggi dalam mendispersikan hexadecane (C16).

Rasio biosurfaktan-surfaktan kimia 6:4 menghasilkan tetesan minyak dengan ukuran rata-rata 168 nm, yang menunjukkan efisiensi tinggi dalam menciptakan emulsi minyak-air yang stabil. Sedangkan dispersan berbasis n-propanol memiliki efisiensi dispersi yang lebih baik dibandingkan dengan Corexit 9500A dalam menangani minyak Alaska North Slope di air laut pada berbagai rasio dispersan terhadap minyak (1:10, 1:25) dan energi pencampuran (200 rpm).

KESIMPULAN

Studi literatur ini menggarisbawahi peran penting dispersan kimiawi dan biosurfaktan dalam meningkatkan proses biodegradasi minyak di lingkungan laut.

Dispersan kimiawi efektif dalam memecah minyak menjadi tetesan kecil, meskipun dalam beberapa kondisi dapat memengaruhi komunitas mikroba secara negatif. Di sisi lain, biosurfaktan seperti rhamnolipid dan surfaktin terbukti mampu meningkatkan bioavailabilitas minyak tanpa menimbulkan toksisitas yang berarti terhadap mikroorganisme pendegradasi minyak.

Kombinasi biosurfaktan dengan dispersan kimia menunjukkan efektivitas yang lebih tinggi dibandingkan penggunaan dispersan kimia saja, menjadikannya alternatif yang lebih ramah lingkungan.

Studi ini menggarisbawahi pentingnya penelitian lebih lanjut untuk mengeksplorasi potensi biosurfaktan dalam menciptakan solusi yang lebih efisien dan berkelanjutan untuk remediasi minyak di ekosistem laut.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Adofo, Y. K., Nyankson, E., & Agyei-Tuffour, B. (2022). Dispersants as an oil spill clean-up technique in the marine environment: A review. *Heliyon*, 8, e10153.
- [2] Farahani, M. D., & Zheng, Y. (2022). The Formulation, Development and Application of Oil Dispersants. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(3), 425. <https://doi.org/10.3390/jmse10030425>
- [3] Hamdan, L. J., & Fulmer, P. A. (2011). Effects of COREXIT?? EC9500A on bacteria from a

- beach oiled by the Deepwater Horizon spill. *Aquatic Microbial Ecology*, 63(2), 101–109. <https://doi.org/10.3354/ame01482>
- [4] Pi, Y., Bao, M., Liu, Y., Lu, T., & He, R. (2017). The contribution of chemical dispersants and biosurfactants on crude oil biodegradation by *Pseudomonas* sp. LSH-7 0. *Journal of Cleaner Production*, 153, 74–82. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.120>
 - [5] Kleindienst, S., Paul, J.H., & Joye, S.B. (2015a). Using dispersants after oil spills: impacts on the composition and activity of microbial communities. *Nat. Rev. Microbiol.* 13 (6), 388e396
 - [6] Abubakar, A., Abioye, O. P., Aransiola, S. A., Maddela, N. R., & Prasad, R. (2024). Crude oil biodegradation potential of lipase produced by *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas aeruginosa* isolated from hydrocarbon- contaminated soil. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 6, 26–32
 - [7] Rahsepar, S., Smit, M. P. J., Murk, A. J., Rijnaarts, H. H. M., & Langenhoff, A. A. M. (2016). Chemical dispersants: Oil biodegradation friend or foe? *Marine Pollution Bulletin*, 108(1–2), 113–119. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.04.044>
 - [8] Kleindienst, S., Seidel, M., Ziervogel, K., Grim, S., Loftis, K., Harrison, S., Malkin, S.Y., Perkins, M.J., Field, J., Sogin, M.L., & Dittmar, T. (2015b). Dispersants can suppress the activity of natural oil-degrading microorganisms. *PNAS* 112 (48), 14900e14905.
 - [9] Keitel-Gröner, F., Arnberg, M., Bechmann, R. K., Lyng, E., & Baussant, T. (2020). Dispersant application increases adverse long-term effects of oil on shrimp larvae (*Pandalus borealis*) after a six-hour exposure. *Marine Pollution Bulletin*, 151, 110892.
 - [10] Johnson, P., Trybala, A., Starov, V., & Pinfield, V. J. (2021). Effect of synthetic surfactants on the environment and the potential for substitution by biosurfactants. *Advances in Colloid and Interface Science*, 288, 102340. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102340>
 - [11] Gautam, K. K., & Tyagi, V. K. (2020). Production and potential of biosurfactants: An overview. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(8), 7327–7340. <https://doi.org/10.1016/j.arabj.2020.03.066>
 - [12] Kosaric, N., & Vardar-Sukan, F. (2022). Biosurfactants: Production, Properties, and Applications. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 32, 140–152. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2022.04.003>
 - [13] Ling, H., Hou, J., Du, M., Zhang, Y., Liu, W., Christie, P., & Luo, Y. (2023). Surfactant-enhanced bioremediation of petroleum-contaminated soil and microbial community

- response: A field study. *Chemosphere*, 322, 138225.
- [14] Amelia, N., & Titah, H. S. (2021). Pengaruh Penggunaan Biosurfaktan Rhamnolipida dan Surfaktin pada Proses Bioremediasi Tanah Tercemar Crude Oil. *Jurnal Teknik ITS*, 10(2).
- [15] Cai, Q., Zhu, Z., Chen, B., Zhang, B., & Ren, H. (2021). Biosurfactant-based dispersants as alternatives for oil spill remediation: Efficacy, mechanism, and future perspectives. *Advances in Colloid and Interface Science*, 295, 102468. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102468>
- [16] [16] Cai, Q., Zhu, Z., Chen, B., Lee, K., Nedwed, T. J., Greer, C., & Zhang, B. (2021). A cross-comparison of biosurfactants as marine oil spill dispersants: Governing factors, synergetic effects, and fates. *Journal of Hazardous Materials*, 416, 126122. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126122>
- [17] ITOF. (1982). *Use of Oil Spill Dispersant*. London.
- [18] Exxon Research and Engineering. (1993). *Exxon Dispersant Guidelines*.
- [19] IPIECA. (1993). *Dispersant and Teir Role in ilspill Response*. London.
- [20] Fu, H., Liu, W., Sun, X., Zhang, F., Wei, J., Li, Y., Lu, J., & Bao, M. (2024). Assessment of spilled oil dispersion affected by dispersant: Characteristic, stability, and related mechanism. *Journal of Environmental Management*, 358, 120888. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120888>
- [21] Lima, T. M. S., Procópio, L. C., Brandão, F. D., Carvalho, A. M. X., Tótola, M. R., & Borges, A. C. (2011). Biodegradability of bacterial surfactants. *Biodegradation*, 22(3), 585–592. <https://doi.org/10.1007/s10532-010-9431-3>
- [22] Souza, E. C., Vessoni-Penna, T. C., & De Souza Oliveira, R. P. (2014). Biosurfaktan-enhanced hydrocarbon bioremediation: An overview. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 89, 88–94. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.01.007>
- [23] Almeida, D. G., De Cássia Soares Da Silva, R. F., Brasileiro, P. P. F., Luna, J. M., Rufino, R. D., & Sarubbo, L. A. (2017). Commercial formulation of biosurfaktan from yeast and its evaluation to use in the petroleum industry. *Chemical Engineering Transactions*, 57. <https://doi.org/10.3303/CET1757111>
- [24] Ayeabogha, M. N., Akujobi, C. O., & Braide, W. (2021). Isolation of Biosurfactant Producing Bacteria from Crude Oil Polluted Soil. *International Journal of Advanced Research in Biological Sciences*, 8(6), 58-62. <https://doi.org/10.22192/ijarbs>.
- [25] Wardhani, R. (2022). Karakterisasi Biosurfaktan dari Isolat Bakteri Laut Pendegradasi Hidrokarbon Petroleum Asal Sedimen Pelabuhan Paotere. Program Magister Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin, Makassar.
- [26] Ron, E. Z., & Rosenberg, E. (2002). Biosurfaktans and oil bioremediation. *Current Opinion in Biotechnology*, 13(3), 249–252. [https://doi.org/10.1016/S0958-1669\(02\)00316-6](https://doi.org/10.1016/S0958-1669(02)00316-6)
- [27] Kaczorek E, Pacholak A, Zdarta A, Smulek W. The impact of biosurfactants on microbial cell properties leading to hydrocarbon bioavailability increase. *Colloids and Interfaces*. 2018;2(3):1–19. Available from: <https://doi.org/10.3390/colloids2030035>
- [28] Feng, J.-Q., Gang, H.-Z., Li, D.-S., Liu, J.-F., Yang, S.-Z., & Mu, B.-Z. (2019). Characterization of biosurfactant lipopeptide and its performance evaluation for oil-spill remediation. *RSC Advances*, 9(17), 9629-9632. DOI: 10.1039/C9RA01456G.
- [29] Das, K., Mukherjee, A. K., & Sen, R. (2014). Biosurfactant of microbial origin and its potential applications in oil spill remediation and oil recovery. *Bioresource Technology*, 101(7), 1924–1935. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.09.088.
- [30] Chandankere, R., Yao, J., Choi, M. M. F., & Masakorala, K. (2014). Enhancing oil spill bioremediation through biosurfactants produced by *Bacillus methylotrophicus*. *Marine Pollution Bulletin*, 79(1–2), 18–26. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2013.12.041
- [31] Lessard, R. R., & Demarco, D. (2000). The Significance of Oilspill Dispersant. *Spill Science and Technology Bulletin*, 6, 59–68.
- [32] Andriany, D. (2001). *Pengaruh Dispersant Pada Biodegradasi Minyak Mentah DURI Crude Sepuluh Nopember*, Surabaya.
- [33] Crisa, F., Genovese, M., Smedile, F., Russo, D., Catalfamo, M., Yakimov, M., Denaro, R. (2016). Bioremediation technologies for polluted seawater sampled after an oil-spill in Taranto Gulf (Italy): A comparison of biostimulation , bioaug-mentation and use of a washing agent in microcosm studies, 106, 119–126. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.03.017>
- [34] Deng, L., Peng, C., Li, S., Yang, R., Yan, C., Li, M., & Lu, L. (2025). Comparative effects of chemical dispersants and rhamnolipid biosurfactants on oil biodegradation and microbial community in coastal sediments. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 196, 105913. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2024.105913>
- [35] Bavadi, M., Song, X., Zhu, Z., & Zhang, B. (2024). Generation of oil spill dispersants composed of biosurfactants and chemical surfactants: Mechanism exploration through molecular dynamics simulation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12, 114249. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114249>