

# Kajian Pengaruh Penggunaan Biosurfaktan Rhamnolipida dan Surfaktin pada Proses Bioremediasi Tanah Tercemar *Crude Oil*

Nelly Amelia dan Harmin Sulistiyaning Titah

Departemen Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

*e-mail:* harminsulis@gmail.com

**Abstrak**—Kegiatan eksplorasi, transportasi dan pemurnian minyak dan gas memiliki potensi menimbulkan limbah yang berbahaya, salah satunya adalah *crude oil*. Lingkungan yang tercemar *crude oil* akan memiliki dampak serius terhadap tanah. Salah satu pencemaran tanah yang terjadi di Indonesia berada di pertambangan minyak bumi rakyat Desa Wonocolo, Kecamatan Kedewan, Kabupaten Bojonegoro. Desa Wonocolo sendiri merupakan desa dengan jumlah sumur dan produksi minyak terbanyak di kawasan tambang minyak bumi rakyat di Kecamatan Kedewan. Kondisi ini berpotensi mengakibatkan terjadinya pencemaran tanah oleh *crude oil* akibat kegiatan eksplorasi dan eksploitasi minyak bumi. Hal ini disebabkan oleh banyaknya tumpahan atau cecceran dari berbagai kegiatan tersebut secara terus menerus yang masih dilakukan dengan cara yang sangat sederhana, tradisional, dan tanpa teknik operasional yang baik. Bioremediasi merupakan salah satu metode alternatif yang potensial dalam mengolah tanah tercemar minyak mentah karena dinilai lebih murah dan ramah lingkungan. Salah satu pendekatan yang dapat dilakukan untuk meningkatkan kinerja mikroba dalam proses bioremediasi adalah dengan menggunakan biosurfaktan. Biosurfaktan yang terbukti efektif dalam mengolah *crude oil* pada proses bioremediasi tanah tercemar adalah rhamnolipida dan surfaktin karena memiliki kemampuan dalam mendegradasi hidrokarbon.

**Kata Kunci**—Bioremediasi Tanah, Biosurfaktan, *Crude Oil*, Rhamnolipida, Surfaktin.

## I. PENDAHULUAN

**M**INYAK bumi adalah salah satu energi dan bahan mentah terpenting dalam kegiatan industri minyak dan gas yang ditemukan bersama-sama dengan gas alam. Menurut Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 128 Tahun 2003, minyak bumi merupakan hasil proses alami berupa hidrokarbon yang dalam kondisi tekanan dan temperatur atmosfer berupa fasa cair atau padat, termasuk aspal, lilin mineral, atau ozokerit, dan bitumin yang diperoleh dari proses penambangan, tetapi tidak termasuk batu bara atau endapan hidrokarbon lain yang berbentuk padat yang diperoleh dari kegiatan yang tidak berkaitan dengan kegiatan usaha dan minyak bumi [1].

Ketergantungan pada minyak bumi dan penggunaan minyak bumi sebagai bahan bakar telah mempengaruhi pembangunan ekonomi di Indonesia dan memiliki banyak manfaat bagi masyarakat. Namun, tidak bisa dipungkiri bahwa kegiatan industri minyak dan gas juga banyak menghasilkan limbah yang berbahaya. Beberapa di antaranya adalah tumpahan minyak mentah (*crude oil*) selama eksplorasi, transportasi dan pemurnian yang dapat menimbulkan masalah lingkungan yang cukup serius.

Bojonegoro merupakan salah satu kabupaten yang terletak di paling ujung barat wilayah provinsi Jawa Timur. Bojonegoro juga merupakan wilayah yang kaya akan minyak dan merupakan penyuplai 20% dari produksi minyak nasional [2]. Pertambangan minyak bumi rakyat yang terdapat di wilayah Kecamatan Kedewan, Kabupaten Bojonegoro memiliki sejumlah 74 unit sumur. Desa Wonocolo sendiri adalah desa dengan jumlah sumur dan produksi minyak terbanyak yaitu 44 sumur dengan kapasitas produksi 25.771 L/hari [3]. Proses penambangan minyak bumi di kawasan Desa Wonocolo, Kecamatan Kedewan, Kabupaten Bojonegoro masih dilakukan dengan cara yang sangat sederhana, tradisional, dan tanpa pengamanan yang baik. Kondisi ini berpotensi mengakibatkan banyaknya tumpahan atau cecceran dari berbagai kegiatan eksplorasi dan eksploitasi minyak bumi yang meliputi pengeboran, penyulingan, dan pengangkutan. Pencemaran tanah terjadi di sekitar sumur tua dan sekitar lokasi penyulingan, sementara pencemaran air terjadi pada 56 badan sungai yang mengalir di kawasan pertambangan rakyat. Hal ini juga terjadi pada lokasi kegiatan pengelolaan sumur tua di Desa Wonocolo. Kegiatan pertambangan Wonocolo diperkirakan mampu menghasilkan minyak bumi, berkisar 50.000 liter atau sekitar 314 barel per hari [2].

Dalam mengatasi pencemaran akibat minyak mentah, diperlukan metode penanggulangan yang efektif, efisien, dan non-destruktif. Berdasarkan Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 128 Tahun 2003, teknologi pengolahan limbah minyak bumi yang dapat dilakukan adalah dengan menggunakan metode biologis [1]. Karbon dengan kandungan minyak bumi tertinggi dalam minyak bumi merupakan sumber energi mikroorganisme, sehingga bioremediasi merupakan metode alternatif yang potensial untuk pemulihan lingkungan [4]. Selain itu, bioremediasi juga dinilai lebih murah dan ramah lingkungan dibandingkan dengan teknologi remediasi lainnya.

Kandungan hidrokarbon pada minyak bumi bersifat sangat hidrofobik, sehingga menyebabkan rendahnya tingkat bioavailabilitas (kemampuan minyak bumi untuk dimetabolisme) bagi mikroba. Hal inilah yang menjadi penyebab utama lambatnya proses biodegradasi [5]. Untuk mengatasi hal tersebut dapat digunakan surfaktan. Surfaktan pada umumnya disintesis dari turunan minyak bumi. Namun, surfaktan dari turunan minyak bumi dan gas alam ini dapat menimbulkan pencemaran terhadap lingkungan, karena surfaktan ini setelah digunakan akan menjadi limbah yang sukar terdegradasi [6]. Disamping itu, minyak bumi yang digunakan merupakan sumber bahan baku yang tidak dapat diperbaharui. Masalah inilah yang menyebabkan banyak

Tabel 1.

Studi terpilih yang melibatkan penggunaan biosurfaktan untuk merangsang biodegradasi <i>Hydrophobic Organic Contaminant</i> (HOC)			
Senyawa Hidrokarbon	Biosurfaktan	Media	Organisme
Oktadekana	Rhamnolipida	Tanah	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> ATCC 9027
Hidrokarbon alifatik dan aromatik	Rhamnolipida	Tanah	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> UG12
Campuran alkana dan naftalena	Rhamnolipida dan pupuk oleofilik	Tanah	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>
n-alkana	Rhamnolipida	Lumpur minyak bumi	<i>Pseudomonas</i> sp. DS10-129
Naftalena	Rhamnolipida	Tanah	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> 19SJ
Naftalena dan fenantrena	Rhamnolipida	Tanah	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> ATCC 9027
Heksadekana dan kerosene (minyak tanah)	Surfaktin mentah	Tanah	<i>Bacillus subtilis</i> ATCC 2423
Fenantrena dan heksadekana	Rhamnolipida	Tanah	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> UG2
Hidrokarbon alifatik dan aromatik	Surfaktin mentah	Air laut	<i>Bacillus subtilis</i> O9
Hidrokarbon alifatik dan hidrokarbon poliaromatik	Rhamnolipida	Tanah	<i>Pseudomonas</i> sp.

pihak mencari alternatif surfaktan yang mudah terdegradasi, yaitu biosurfaktan.

Biosurfaktan dapat berfungsi untuk meningkatkan emulsifikasi hidrokarbon, sehingga kontak antara bakteri dengan hidrokarbon akan lebih efektif [7]. Rhamnolipida dan surfaktin merupakan biosurfaktan yang berpotensi dalam mengolah *crude oil* serta memiliki kemampuan yang efektif dalam mendegradasi kandungan hidrokarbon dan mempercepat proses remediasi. Oleh karena itu, pada studi literatur ini akan dibahas mengenai potensi yang dimiliki oleh rhamnolipida dan surfaktin dalam mendegradasi kandungan hidrokarbon pada minyak mentah untuk penanganan kasus tumpahan minyak di pertambangan minyak bumi rakyat Kabupaten Bojonegoro.

## II. METODOLOGI

### A. Studi Literatur

Studi literatur yang dilakukan meliputi teori-teori mengenai minyak mentah, bioremediasi, biosurfaktan, mekanisme kerja biosurfaktan, dan penerapan bioremediasi pada lokasi studi kasus dengan skenario terpilih. Sumber literatur yang digunakan dapat berupa jurnal nasional maupun internasional, buku, peraturan perundangan, disertasi, tesis, hingga laporan seminar / *proceeding* yang mendukung topik studi.

### B. Metode Bioremediasi

Pada studi literatur ini, skenario metode bioremediasi yang akan digunakan ialah biostimulasi dengan biosurfaktan. Terdapat perbedaan antara proses bioremediasi dengan teknik bioaugmentasi dan biostimulasi.

Bioaugmentasi merupakan proses dimana mikroorganisme pengurai ditambahkan untuk melengkapi populasi mikroba yang telah ada. Walaupun mikroorganisme pendegradasi hidrokarbon tersebar luas di alam, bioaugmentasi dianggap sebagai metode untuk mempercepat proses bioremediasi minyak. Alasan menambahkan mikroorganisme pendegradasi minyak adalah karena populasi mikroba asli mungkin tidak mampu menurunkan berbagai substrat/senyawa dalam campuran kompleks seperti minyak bumi. Pada metode bioaugmentasi ini, mikroba yang dikulturkan diisolasi secara khusus, pada umumnya dari lingkungan yang sama dan ditumbuhkan dalam jumlah yang besar dalam suatu reaktor. Mikroba tersebut mampu mendegradasi komponen-komponen dalam hidrokarbon menjadi CO<sub>2</sub> dan air. Mikroba tersebut akan bertahan hidup

dengan mengkonsumsi hidrokarbon sampai polutan tersebut tersubstansi [8].

Sementara biostimulasi melibatkan penambahan nutrisi yang terbatas untuk mempercepat proses biodegradasi. Salah satu penelitian berpendapat yang sama bahwa biostimulasi mengacu pada penambahan nutrisi ke situs yang sangat tercemar untuk merangsang bakteri yang ada dalam mendegradasi kontaminan berbahaya dan beracun [9]. Biostimulasi juga merupakan teknik remediasi yang sangat efisien, hemat biaya dan ramah lingkungan di alam. Strategi yang banyak digunakan dalam teknik biostimulasi adalah dengan penambahan surfaktan. Surfaktan (*surface active agent*) merupakan molekul-molekul yang mengandung gugus hidrofilik dan gugus lipofilik [10]. Hal ini menyebabkan tegangan permukaan interface berkurang, sehingga dapat meningkatkan aksesibilitas mikroorganisme pendegradasi terdapat butiran minyak. Pada dasarnya mikroorganisme sendiri telah memproduksi surfaktan yang disebut dengan istilah biosurfaktan. Biosurfaktan berfungsi sebagai emulsifier untuk meningkatkan efisiensi bioremediasi minyak. Pada penelitian kumar didapatkan bahwa penambahan biosurfaktan meningkatkan interaksi sel-sel dan mengubah sifat permukaan sehingga meningkatkan degradasi minyak [11]. Terdapat beberapa jenis surfaktan sintesis yang dapat ditambahkan, namun beberapa surfaktan sintesis memiliki efek yang berbahaya saat tercampur dengan minyak mentah sehingga penting sebelumnya untuk mengetahui apakah jenis surfaktan yang ditambahkan tidak akan memberikan dampak toksik bagi komunitas biota laut.

## III. HASIL DAN PEMBAHASAN

### A. Minyak Mentah

Minyak bumi merupakan bahan tambang yang terdapat di dalam perut bumi, komposisinya berupa senyawa kimia terdiri dari komponen hidrokarbon dan non hidrokarbon. Minyak bumi berwarna dari coklat kehitam-hitaman sampai hitam pekat dalam bentuk cair dan terdapat gas-gas yang melarut didalamnya, dengan *specific gravity* berkisar antara 0,8000 – 1,0000 [12]. Minyak bumi ditemukan bersama-sama dengan gas alam. Minyak bumi yang telah dipisahkan dari gas alam itulah yang disebut dengan minyak mentah (*crude oil*).

Minyak mentah mengandung sekitar 50 – 98% senyawa hidrokarbon dan sisanya merupakan senyawa non-hidrokarbon (sulfur, nitrogen, oksigen, dan beberapa logam berat seperti V, Ni dan Cu). Dikarenakan komposisi minyak

mentah yang kompleks, karakterisasi berdasarkan tipe molekul individu tidak dimungkinkan dan analisis unsur tidak menarik karena hanya memberikan informasi terbatas tentang konstitusi minyak bumi yang komposisi unsurnya konstan. Sebaliknya, analisis tipe kelompok hidrokarbon umumnya digunakan dengan pengetahuan tentang distribusi kelas struktural utama hidrokarbon. Pemisahan fraksi SARA adalah contoh dari analisis jenis kelompok tersebut, memisahkan minyak mentah menjadi empat kelas kimia utama berdasarkan perbedaan kelarutan dan polaritas. Empat fraksi SARA adalah jenuh, aromatik, resin dan asphaltene [13].

Konstituen utama minyak mentah adalah organik, tetapi minyak mentah juga mengandung konsentrasi jejak anorganik atau logam dalam kisaran *subparts per billion* (ppb) hingga puluhan dan terkadang ratusan *parts per million* (ppm). Logam dalam minyak mentah memiliki potensi pencemaran terhadap lingkungan. Risiko lingkungan bergantung pada toksisitas dan konsentrasi masing-masing logam dalam minyak mentah. Konsentrasi logam yang tinggi di tanah dan air dapat berbahaya bagi tanah, hewan laut, dan tumbuhan, mengganggu keseimbangan ekologis yang rapuh dan mencemari sumber makanan [14]. Minyak mentah sangat kaya akan logam tertentu, seperti vanadium yang mencapai 2000 ppm pada minyak mentah Venezuela. Kebanyakan alkali dan logam alkali tanah hadir dalam jumlah kecil dalam orde ppm atau kurang [13].

### B. Biosurfaktan

Biosurfaktan adalah zat permukaan aktif yang disintesis oleh sel hidup dan memiliki sifat-sifat mengurangi tegangan permukaan, menstabilkan emulsi, pembentukan busa, pada umumnya tidak beracun dan *biodegradable* [15]. Biosurfaktan merupakan surfaktan yang disintesis oleh mikroorganisme, terutama jika mereka ditumbuhkan pada substrat yang tidak larut dalam air. Kebanyakan biosurfaktan dianggap sebagai metabolit sekunder. Namun, beberapa dapat digunakan untuk kelangsungan hidup mikroorganisme penghasil biosurfaktan dalam memfasilitasi transportasi nutrisi [16].

Biosurfaktan ini dihasilkan pada permukaan sel mikroba atau diekskresikan ke lingkungan yang dapat membantu melepaskan senyawa hidrokarbon dalam senyawa organik dan meningkatkan konsentrasi senyawa hidrokarbon dalam air melalui pelarutan ataupun emulsifikasi. Biosurfaktan mengandung gugus hidrofobik dan hidrofilik yang berfungsi menurunkan tegangan permukaan molekul. Produksi biosurfaktan oleh bakteri sering dikaitkan dengan kemampuan bakteri dalam menggunakan senyawa hidrokarbon sebagai substratnya. Mikroorganisme dengan produksi biosurfaktan yang besar pada umumnya mempunyai kemampuan yang besar juga dalam menguraikan senyawa hidrokarbon; mikroorganisme yang demikian sangat berpotensi untuk digunakan dalam mengurangi cemaran minyak yang terdapat di laut. Bakteri hidrokarbonoklastik merupakan bakteri yang mampu menghasilkan biosurfaktan dan menggunakan hidrokarbon petroleum sebagai satu-satunya sumber karbon dan energi [17].

Mikroorganisme penghasil biosurfaktan ada di mana-mana, menghuni air (laut, air tawar, dan air tanah) dan darat (tanah, sedimen, dan lumpur) serta lingkungan ekstrim (mis.

situs hypersaline, reservoir minyak), dan dapat berkembang di berbagai suhu, pH, dan salinitas. Salah satu sumber mikroba pendegradasi minyak bumi yang telah banyak dieksplorasi adalah lingkungan tercemar limbah minyak bumi. Isolat yang mendominasi di lingkungan tersebut terdiri atas beberapa genera, yaitu *Alcaligenes*, *Arthrobacter*, *Acinetobacter*, *Nocardia*, *Achromobacter*, *Bacillus*, *Flavobacterium*, dan *Pseudomonas* [18]. Beberapa mikroba penghasil biosurfaktan yang juga pernah diteliti diantaranya adalah *Pseudomonas sp*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus licheniformis strain*, *Pseudomonas aeruginosa*, dan *Pseudomonas fluorescens* [7].

Rhamnolipid adalah *glycolipid* yang merupakan suatu senyawa gabungan karbohidrat dan alkil dari asam lemak [19]. Rhamnolipida pada umumnya diproduksi oleh strain *Pseudomonas aeruginosa*. Sementara surfaktin adalah lipopeptida siklik, yang diproduksi oleh strain *Bacillus subtilis* yang berbeda dan dianggap sebagai biosurfaktan yang kuat karena aktivitas permukaannya yang sangat baik sehingga diperlukan untuk memobilisasi minyak yang terperangkap. Surfaktin memiliki campuran isoform dikarenakan panjang rantai karbonnya yang bervariasi dan percabangan komponen asam lemak hidroksilnya. Rantai alkil asam lemak surfaktin bervariasi panjangnya terutama dari 13 sampai 15 atom karbon [20].

### C. Mekanisme Kerja Biosurfaktan

Bagian kepala bersifat hidrofilik masuk ke fase hidrofilik dan bagian ekor bersifat hidrofobik masuk ke fase hidrofobik. Interaksi dua gugus ke dalam dua fase menyebabkan penurunan tegangan permukaan antar fase. Penurunan tegangan permukaan dapat diamati pada perubahan bentuk tetesan minyak di permukaan yang bersifat hidrofilik. Minyak bersifat hidrofobik, apabila minyak ditetaskan dipermukaan benda padat yang bersifat hidrofilik, bentuk tetesan adalah bulat karena tegangan permukaan tetesan minyak tidak sama dengan permukaan benda padat. Hal ini disebabkan karena gaya kohesi molekul minyak lebih besar dibandingkan dengan gaya adhesi antara permukaan minyak dan padatan. Setelah surfaktan ditambahkan ke permukaan antar fase, tetesan minyak akan terdistribusi di permukaan padatan [19].

Terdapat dua mekanisme biosurfaktan dalam meningkatkan degradasi mikroba hidrokarbon, yaitu dengan meningkatkan ketersediaan hayati substrat melalui emulsifikasi dan dengan memfasilitasi asosiasi substrat hidrofobik dengan sel bakteri melalui reduksi hidrofobisitas permukaan sel-sel bakteri [21]. Biosurfaktan meningkatkan luas permukaan senyawa hidrokarbon yang larut dengan mengurangi tegangan permukaan dan antarmuka yang menyebabkan peningkatan ketersediaan hayati dan mobilitas kontaminan. Oleh karena itulah biosurfaktan dapat meningkatkan laju bioremediasi hidrokarbon.

Saat menerapkan surfaktan ke media air-tanah, sebagian darinya pasti mengalami adsorpsi oleh tanah. Semakin besar tingkat adsorpsinya, semakin kecil jumlah yang tersedia untuk melarutkan polutan. Selain itu, karena hidrofobisitas tanah meningkat dengan adsorpsi surfaktan, sebagian kontaminan organik terlarut akan teradsorpsi oleh tanah. Oleh karena itu, sangat penting untuk memilih surfaktan yang tepat dalam aplikasi tertentu dikarenakan penyerapan karakteristik

surfaktan pada partikel tanah sangat bergantung pada struktur kimianya dan sifat tanah.

#### D. Pengaruh Biosurfaktan Terhadap Kandungan Senyawa Hidrokarbon Pada Crude Oil

Salah satu solusi yang menjanjikan dalam meningkatkan bioavailabilitas adalah dengan penggunaan biosurfaktan, dimana fungsi utamanya adalah untuk memfasilitasi kehidupan mikroba di lingkungan yang didominasi oleh antarmuka hidrofilik-hidrofobik. Biosurfaktan memiliki kemampuan untuk melarutkan HOC (*Hydrophobic Organic Contaminant*) dan memiliki beberapa keuntungan tambahan dibandingkan surfaktan sintetis yang membuatnya menjadi kandidat unggul dalam skema bioremediasi. Pertama, biosurfaktan dapat mudah terurai secara hayati dan karenanya tidak menimbulkan ancaman polusi tambahan. Kedua, sebagian besar penelitian menunjukkan bahwa biosurfaktan tidak beracun bagi mikroorganisme dan oleh karena itu, kemungkinan tidak dapat menghambat proses biodegradasi PAH. Selain itu, produksi biosurfaktan berpotensi lebih murah daripada surfaktan sintetis karena bahan bakunya yang murah dan dapat dengan mudah dicapai secara in situ pada lahan yang terkontaminasi [22].

Terdapat banyak penelitian tentang bioremediasi yang ditingkatkan dengan biosurfaktan seperti *Pseudomonas aeruginosa* dengan rhamnolipidanya, lipid candida apicola dengan sophorolipidanya, *Bacillus subtilis* dengan surfaktinnya, dll. Beberapa biosurfaktan yang telah disebutkan merupakan biosurfaktan kuat karena mereka dapat mengurangi tegangan permukaan (dari 72 menjadi 30 dyne/cm) dan memiliki CMC rendah.

Seperti halnya surfaktan sintetis menunjukkan potensi penggunaan biosurfaktan dalam meningkatkan degradasi PAH dengan meningkatkan aksesibilitas mikroba ke substrat yang tidak larut [23]. Prospek penggunaan biosurfaktan di dalam remediasi tanah tergantung pada kapasitas senyawa ini untuk meningkatkan desorpsi dan pembubaran serta merangsang biodegradasi kontaminan. Faktor-faktor ini mungkin terkait karena peningkatan desorpsi, pembubaran, atau transportasi dapat meningkatkan bioavailabilitas kontaminan dan karenanya dapat meningkatkan laju biodegradasi.

Penelitian churchill menunjukkan bahwa rhamnolipida dari bakteri yang dikombinasikan dengan pupuk oleofilik mampu meningkatkan laju degradasi heksadekana, benzena, toluena, o- dan p-kresol, dan naftalena baik dalam fase air maupun bioreaktor tanah [24]. Baru-baru ini, peningkatan dispersi oktadekana dan biodegradasi yang dihasilkan dari penambahan biosurfaktan rhamnolipida telah dilaporkan oleh Zhang dan Miller [25]. Pada penelitiannya disebutkan bahwa rhamnolipida terbukti meningkatkan dispersi berair dari oktadekana. Rhamnolipida dengan konsentrasi di atas CMC dapat melarutkan oktadekana menjadi agregat oligomer. Peningkatan kelarutan oktadekana di bawah CMC rhamnolipida dikaitkan dengan efek dispersi surfaktan. Peningkatan yang signifikan dalam kelarutan hidrokarbon berkorelasi erat dengan peningkatan laju mineralisasi hidrokarbon. Hal ini menunjukkan bahwa bioremediasi fase air dari hidrokarbon yang sedikit larut dapat ditambah dengan surfaktan. Ada kemungkinan bahwa manfaat tambahan dapat diwujudkan dengan desorpsi hidrokarbon yang didorong oleh

surfaktan dari tanah dan sedimen. Dalam studi lebih lanjut, dialporkan juga peningkatan laju biodegradasi alifatik dan aromatik hidrokarbon dengan kultur bakteri murni dengan perlakuan yang sama.

Penelitian rahman menyelidiki biodegradasi n-alkana dalam lumpur minyak bumi yang terkontaminasi dengan 87,4% minyak dan menunjukkan bahwa dengan penambahan rhamnolipida, alkana C8–C11, C12–C21, C22–C31, dan C32–C40 terdegradasi masing-masing sebesar 100%, 83-98%, 80-85%, dan 57-73% setelah 56 hari [26].

Eksperimen yang dilakukan selama 180 hari untuk memantau biodegradasi hidrokarbon alifatik dan hidrokarbon poliaromatik (PAH) dievaluasi penyisihan senyawanya menggunakan tiga strategi yang berbeda, yaitu penambahan nutrisi (III), penambahan biosurfaktan yang dihasilkan dari *Pseudomonas* sp. (IV), dan penambahan biosurfaktan plus nutrisi (V) [27]. Perbaikan strategi tersebut dibandingkan dengan kontrol yang hanya mengandung tanah (I) dan kontrol dengan redaman minyak mentah alami (II). Pada akhir penelitian, diamati bahwa strategi III dan V menunjukkan tingkat penghilangan AH terbaik, yaitu, 96,82% dan 98,35%, dan tingkat penghilangan PAH terbaik masing-masing 83,58% dan 72,3%. Deschenes dalam Kaskatepe dan Yildiz mengemukakan bahwa rhamnolipida lebih efektif daripada natrium dodesil sulfat dalam meningkatkan kelarutan PAH.

Moran melakukan evaluasi kemampuan surfaktin yang diproduksi oleh *Bacillus subtilis* O9 untuk meningkatkan biodegradasi hidrokarbon limbah lambung kapal [28]. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa penambahan konsentrasi biosurfaktan ke dalam kultur mampu menyebabkan penurunan pada hidrokarbon alifatik dan aromatik. Biodegradasi hidrokarbon alifatik meningkat dari 20,9% menjadi 35,5% dan dalam kasus hidrokarbon aromatik dari nihil menjadi 41%. Kenaikan efisiensi biodegradasi tersebut terbilang cukup signifikan dibandingkan dengan kultur tanpa biosurfaktan. Berikut pada Tabel 1 merupakan beberapa penelitian yang menunjukkan peningkatan tingkat biodegradasi hidrokarbon dengan amandemen biosurfaktan.

#### E. Upaya Bioremediasi

Pada studi literatur ini bioremediasi ditawarkan sebagai alternatif penanganan pencemaran tanah di pertambangan minyak bumi rakyat Kabupaten Bojonegoro. Bioremediasi merupakan solusi penanggulangan limbah minyak bumi yang dinilai murah, efektif, ramah lingkungan dan menghasilkan senyawa akhir yang stabil dan tidak beracun. Namun, metode ini memiliki kekurangan yaitu prosesnya membutuhkan waktu yang lama dibandingkan dengan metode fisika atau kimia.

Ada beberapa jenis pendekatan yang dapat dilakukan untuk melakukan penanganan pencemaran tanah oleh minyak mentah, yaitu bioaugmentasi dan biostimulasi. Pada studi kasus ini pendekatan yang akan digunakan adalah biostimulasi dengan cara penambahan biosurfaktan rhamnolipida dan surfaktin. Biosurfaktan jenis rhamnolipida dan surfaktin telah dievaluasi peranannya dalam membersihkan tanah yang terkontaminasi oleh minyak mentah. Pada beberapa kasus, efisiensi penghilangan sangat tinggi mencapai 80%. Efisiensi ini tergantung pada waktu kontak dan konsentrasi biosurfaktan.

Pada studi kasus ini metode biostimulasi dilakukan dengan penambahan biosurfaktan rhamnolipida dan surfaktan, dimana pada skenario ini biosurfaktan diproduksi secara masal di laboratorium dan kemudian biosurfaktan ditambahkan langsung ke lahan tercemar. Menurut hasil kajian berbagai literatur, terdapat beberapa langkah yang dapat dilakukan dalam penerapan metode biostimulasi pada tanah tercemar minyak mentah, yaitu:

Memastikan besar TPH awal. Berdasarkan Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 128 Tahun 2003, bioremediasi di Indonesia dapat dilakukan apabila konsentrasi minyak mentah atau nilai TPH nya maksimal sebesar 15% [1]. Pada studi kasus ini dapat dilakukan dengan menggunakan metode GC-MS seperti yang telah dijelaskan pada subbab 2.3.3.2. Menurut US EPA dalam metode ini dinilai lebih akurat karena sangat sensitif dibandingkan dengan metode gravimetri yang sensitifitasnya rendah. Selain itu, metode GC-MS juga mampu mengidentifikasi dan mengukur segala jenis senyawa hidrokarbon dibandingkan dengan metode gravimetri yang tidak dapat mengidentifikasi komponen minyak. Namun, metode ini memerlukan alat yang mahal dan prosedur yang kompleks, sementara metode gravimetri sendiri lebih murah dan mudah dilakukan.

Melakukan screening bakteri penghasil biosurfaktan pada lahan tercemar. Hal ini perlu dilakukan karena tiap lahan tercemar yang mengandung minyak mentah terdapat berbagai macam bakteri *indigenous* yang hidup di dalamnya dan proses screening berfungsi untuk memastikan kemampuan bakteri yang terdapat pada tanah tercemar dalam memproduksi biosurfaktan. Pada studi literatur ini, biosurfaktan yang ingin diterapkan pada lokasi studi kasus adalah rhamnolipida dan surfaktin yang dimana masing-masing kedua biosurfaktan tersebut umumnya diproduksi oleh bakteri *P. aeruginosa* dan *B. Subtilis*. Setelah identifikasi bakteri pada lahan tercemar dilakukan, maka selanjutnya dapat dilakukan pengujian produksi biosurfaktan pada strain bakteri yang diisolasi, yaitu uji kualitatif dan uji kuantitatif. Uji kualitatif dapat dilakukan melalui uji penyebaran minyak (*oil spreading*), metode agar lapisan hidrokarbon, atau uji *drop collapse*. Sementara uji kuantitatif dapat dilakukan dengan cara menguji parameter aktivitas antarmuka atau permukaan dan parameter indeks emulsifikasi.

Melakukan ekstraksi biosurfaktan yang bertujuan untuk memisahkan sel atau lipid cair dari konstituen lain, protein, polisakarida, dan molekul kecil. Biosurfaktan rhamnolipida dan surfaktin umumnya dapat dilakukan dengan metode ekstraksi pelarut. Pelarut yang biasanya digunakan adalah kloroform-metanol karena pelarut tersebut merupakan pelarut ekstraksi yang universal. Struktur surfaktin sendiri tidak hancur setelah dilakukan proses ekstraksi dengan pelarut kloroform-metanol. Melakukan penambahan larutan biosurfaktan pada lahan tercemar.

Penambahan biosurfaktan rhamnolipida dengan konsentrasi 1,5 g/L menghasilkan presentase degradasi total petroleum hidrokarbon (TPH) sebesar 86,1% dan 80,5% pada dua sampel tanah yang masing-masing mengandung 6.800 ppm dan 8.500 ppm [29]. Sementara itu, diketahui bahwa kandungan TPH pada tanah tercemar di pertambangan minyak bumi rakyat Kabupaten Bojonegoro sebesar 6,05% atau 60.500 ppm [30]. Mengacu pada penelitian tersebut, removal TPH yang didapatkan sebesar 61,12% dengan

konsentrasi 1,5 g/L untuk menurunkan kadar TPH tanah tercemar yang ada di lokasi studi kasus. Hasil tersebut didapatkan menggunakan persamaan interpolasi dengan acuan hasil penelitian yang didapatkan oleh Patowary *et al.* Dikarenakan kadar maksimal TPH menurut Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 128 Tahun 2013 yaitu 1% atau 10.000 mg/kg [1], maka total removal yang dibutuhkan sebesar 83,47%. Oleh karena itu, kebutuhan konsentrasi rhamnolipida untuk meremoval TPH sebesar 83,47% adalah 2,05 g/L.

Di sisi lain, Phulpoto memperoleh removal TPH sebesar 43,6% dan 46,7% pada proses remediasi tanah yang terkontaminasi minyak dengan konsentrasi biosurfaktan mentah Surfaktin masing-masing sebesar 10 mg/L dan 40 mg/L [31]. Namun, di dalam penelitiannya tidak disebutkan konsentrasi awal TPH. Mengacu pada penelitian tersebut, kebutuhan konsentrasi surfaktin untuk meremoval TPH sebesar 83,47% adalah 2,05 g/L. Tidak jauh berbeda dengan rhamnolipida, perkiraan perhitungan kebutuhan konsentrasi surfaktin ini didapatkan dengan rumus persamaan interpolasi.

Dikarenakan perhitungan tersebut masih dalam tahap perkiraan, oleh karena itu dibutuhkan penelitian lanjutan mengenai aplikasi penggunaan biosurfaktan rhamnolipida dan surfaktin pada tanah tercemar crude oil di Indonesia. Hal ini dikarenakan meskipun penerapan biosurfaktan dalam bioremediasi diyakini sangat bermanfaat, terdapat beberapa kekurangan dan keterbatasan saat mengaplikasikan teori ke dalam praktiknya.

#### IV. KESIMPULAN

Berdasarkan uraian yang dijelaskan pada hasil dan pembahasan dapat diperoleh kesimpulan bahwa kegiatan industri minyak dan gas banyak menghasilkan limbah yang berbahaya, salah satunya adalah *crude oil*. Hal tersebut tentunya dapat menimbulkan permasalahan yang cukup serius seperti pencemaran *crude oil* pada tanah. Pada studi kasus pertambangan minyak bumi rakyat Kabupaten Bojonegoro, pencemaran *crude oil* yang terjadi di dalam tanah disebabkan oleh kebocoran minyak selama kegiatan eksplorasi dan eksploitasi minyak bumi yang meliputi pengeboran, penyulingan, dan pengangkutan.

Bioremediasi merupakan salah satu alternatif pengolahan yang mampu menurunkan kandungan hidrokarbon pada tanah yang tercemar oleh *crude oil*. Salah satu pendekatan yang dapat dilakukan untuk meningkatkan kinerja mikroba dalam meremediasi lahan tercemar minyak yaitu dengan melakukan pengembangan strain-strain unggul yang menghasilkan biosurfaktan yang berfungsi untuk meningkatkan emulsifikasi hidrokarbon. Pencemaran minyak mentah di pertambangan minyak bumi rakyat Kabupaten Bojonegoro dapat diatasi dengan penggunaan biosurfaktan rhamnolipida dan surfaktin pada proses bioremediasi. Perkiraan kebutuhan konsentrasi biosurfaktan rhamnolipida dan surfaktin yang dibutuhkan masing-masing sebesar 2,05 g/L dan 1,27 g/L untuk meremoval TPH sebanyak 83,47%.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementerian Lingkungan Hidup, *Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor: 128 Tahun 2003 Tentang Tata Cara dan Persyaratan Teknis Pengolahan Limbah Minyak Bumi dan Tanah Terkontaminasi*

- oleh Minyak Bumi Secara Biologis. Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2003.
- [2] R. N. Naumi, "Pertambangan minyak tradisional di Desa Wonocolo, Kecamatan Kedewan, Kabupaten Bojonegoro tahun 1970-1987," *Avatara*, vol. 3, no. 1, 2015.
- [3] P. Handriano, "Teknologi Bioremediasi dalam Mengatasi Tanah Tercemar Hidrokarbon," in *Prosiding Seminar Nasional Kimia Unesa 2012*, 2012, pp. 22–30.
- [4] N. H. Alami, "Efektivitas Biosurfaktan *Pseudomonas putida* T1 (8) dalam Bioremediasi Tanah Tercemar Minyak Mentah," Departemen Kimia: Universitas Airlangga, 2010.
- [5] Syafrizal, D. Saka Rani, and S. A. Rahayu, "Pemanfaatan Surfaktan dalam Pengolahan Limbah Berminyak Secara Bioproses," in *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia "Kejuangan"*. 2010.
- [6] J. J. Sheng, "Status of surfactant EOR technology," *Petroleum*, vol. 1, no. 2, pp. 97–105, 2015.
- [7] N. Sopiah, Mulyono, and S. Sulistia, "Kajian potensi biosurfaktan isolat bakteri terseleksi untuk dimanfaatkan dalam bioremediasi tanah tercemar minyak bumi," *Ecolab*, vol. 5, no. 1, 2011.
- [8] Z. Yasmin and R. Wulansarie, "Review perbandingan pencemaran minyak di perairan dengan proses bioremediasi menggunakan metode biostimulus dan bioaugmentasi," *Reka Buana J. Ilm. Tek. Sipil dan Tek. Kim.*, vol. 3, no. 1, pp. 67–72, 2018.
- [9] M. Goswami *et al.*, "Bioaugmentation and biostimulation: a potential strategy for environmental remediation," *J Microbiol Exp*, vol. 6, no. 5, pp. 223–231, 2018.
- [10] N. D. Adinda, "Pengaruh Suhu dan Lama Reaksi Pada Sintesis Metil Ester Sulfonat Berbasis CPO dengan Agen Natrium Bisulfat (NaHSO<sub>3</sub>)," Departemen Teknik Kimia: Politeknik Negeri Sriwijaya, 2016.
- [11] M. Kumar, V. Leon, A. D. S. Materano, O. A. Ilzins, and I. Galindo-Castro, "Polycyclic aromatic hydrocarbon degradation by biosurfactant-producing *pseudomonas* sp. IR1," *Zeitschrift für Naturforsch.*, vol. 61, no. 3, pp. 203–212, 2006.
- [12] S. Sulistyono and M. Masykuri, "Kajian dampak tumpahan minyak dari kegiatan operasi kilang minyak terhadap kualitas air dan tanah (studi kasus kilang minyak pusdiklat migas cepu)," *J. Ekosains*, vol. 4, no. 2, pp. 23–34, 2012.
- [13] I. Muhammad, N. Tijjani, I. Dioha, A. Musa, H. Sale, and A. Lawal, "Sara separation and determination of concentration levels of some heavy metals in organic fractions of nigerian crude oil," *Chem. Mater. Res.*, vol. 3, no. 4, pp. 7–14, 2013.
- [14] C. Hardaway, J. Sneddon, and J. N. Beck, "Determination of metals in crude oil by atomic spectroscopy," *Anal. Lett.*, vol. 37, no. 14, pp. 2881–2899, 2004.
- [15] H. Budiharjo, J. Pamungkas, S. R. Gusmawarni, and K. Y. Perwira, "Uji laboratorium efektivitas biosurfaktan 'U-Champ' dalam bioremediasi oil spill," *J. Miner. Energi, dan Lingkung.*, vol. 3, no. 2, pp. 101–106, 2019.
- [16] "Biosurfactants: potential applications in medicine," *J. Antimicrob. Chemother.*, vol. 577, no. 4, pp. 609–618, 2006.
- [17] B. Nababan, "Isolasi dan Uji Potensi Bakteri Pendegradasi Minyak Solar dari Laut Belawan," Departemen Biologi: Universitas Sumatera Utara, 2008.
- [18] D. Sudrajat, N. Mulyana, and D. Tri Retno, "Isolasi dan Aplikasi Mikroba Indigen Pendegradasi Hidrokarbon dari Tanah Tercemar Minyak Bumi," in *Prosiding pertemuan dan Presentasi Ilmiah-BATAN*. 2015.
- [19] R. Renun and Mahreni, "Biosurfaktan," *Eksergi*, vol. 12, no. 2, pp. 12–22, 2015.
- [20] X. Wang, T. Cai, W. Wen, J. Ai, and J. Ai, "Surfactin for enhanced removal of aromatic hydrocarbons during biodegradation of crude oil," *Fuel*, vol. 267, 2020.
- [21] C. N. Mulligan and B. F. Gibbs, "Types, Production and Applications of Biosurfactants," in *Proceedings-Indian National Science Academy Part B*, 2004, pp. 31–56.
- [22] R. S. Makkar and K. J. Rockne, "Comparison of synthetic surfactants and biosurfactants in enhancing biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons," *Environ. Toxicol. Chem. An Int. J.*, vol. 22, no. 10, pp. 2280–2292, 2003.
- [23] A. Tiehm, "Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the presence of synthetic surfactants," *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 60, no. 1, pp. 258–263, 1994.
- [24] R. Griffin and P. Churchill, "Biodegradation rate enhancement of hydrocarbons by an oleophilic fertilizer and a rhamnolipid biosurfactant," *J. Environ. Qual.*, vol. 24, no. 1, pp. 19–28, 1995.
- [25] Y. Zhang and R. M. Miller, "Enhanced octadecane dispersion and biodegradation by a *pseudomonas* rhamnolipid surfactant (biosurfactant)," *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 58, no. 10, pp. 3276–3282, 1992.
- [26] B. Kaskatepe and Y. Sulhiye, "Rhamnolipid biosurfactants produced by *pseudomonas* species," *Brazilian Arch. Biol. Technol.*, vol. 59, 2016.
- [27] M. G. Silva *et al.*, "Comparative evaluation of different bioremediation techniques for crude oil-contaminated soil," *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 1, 2021.
- [28] A. C. Morán, "Enhancement of hydrocarbon waste biodegradation by addition of a biosurfactant from *bacillus subtilis* O9," *Biodegradation*, vol. 11, no. 1, pp. 65–71, 2000.
- [29] R. Patowary, M. C. Kalita, and S. Deka, "Application of biosurfactant for enhancement of bioremediation process of crude oil contaminated soil," *Int. Biodeterior. Biodegradation*, vol. 129, pp. 50–60, 2018.
- [30] R. A. Barakwan, "Penyisihan Hidrokarbon Pada Tanah Tercemar Crude Oil di Pertambangan Minyak Bumi Rakyat Wonocolo, Bojonegoro Dengan Metode Co-Composting Aerobik," Departemen Teknik Lingkungan: Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2018.
- [31] I. A. Phulpoto, "Production and characterization of surfactin-like biosurfactant produced by novel strain *bacillus nealsonii* S2MT and its potential for oil contaminated soil remediation," *Microb. Cell Fact.*, vol. 19, no. 1, pp. 1–12, 2020.