

Studi Literatur Alternatif Penanganan Tumpahan Minyak Mentah Menggunakan *Bacillus subtilis* dan *Pseudomonas putida* (Studi Kasus: Tumpahan Minyak Mentah Sumur YYA-1)

Widhowati Kesoema Wardhani dan Harmin Sulistiyaning Titah
Departemen Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: harminsulis@gmail.com

Abstrak—Indonesia merupakan negara produsen minyak bumi yang cukup besar, sehingga memiliki banyak kegiatan yang berkaitan dengan penambangan minyak bumi. Kegiatan ini memberikan dampak pada lingkungan sekitar berupa tumpahan minyak. Salah satu kasus tumpahan minyak yang terjadi di Indonesia adalah kasus sumur YYA-1 PT. PHE ONWJ yang terjadi pada tahun 2019. Tumpahan minyak merupakan Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) sehingga membutuhkan penanganan yang menyeluruh. Saat ini penanganan yang banyak dilakukan adalah dengan pendekatan fisik dan kimia, sedangkan pendekatan ini memiliki potensi dampak yang lebih lama bagi ekosistem. Bioremediasi memiliki potensi yang baik untuk diterapkan sebagai alternatif penanganan tumpahan minyak mentah pada perairan laut. Bioremediasi memanfaatkan metabolisme mikroba sebagai pendegradasi hidrokarbon untuk mengubah polutan menjadi senyawa yang tidak berbahaya. Beberapa spesies bakteri yang terbukti dapat digunakan untuk bioremediasi adalah *Bacillus subtilis* dan *Pseudomonas putida*. Berdasarkan beberapa data hasil penelitian pada laboratorium. Diperkirakan penggunaan kedua bakteri ini dapat efektif menyingkirkan tumpahan minyak mentah dengan menerapkan penanganan fisik kimia sebagai penanganan awal, serta beberapa faktor dan prosedur yang harus diperhatikan dengan seksama pada saat penerapan bioremediasi dilakukan.

Kata Kunci—Bioremediasi, *Bacillus subtilis*, Minyak Mentah, *Pseudomonas putida*, TPH.

I. PENDAHULUAN

MINYAK mentah adalah salah satu hal yang banyak digunakan oleh masyarakat di Indonesia guna membantu kegiatan sehari-hari. Minyak mentah merupakan minyak bumi yang telah dipisahkan dari gas alam setelah proses penambangan karena minyak bumi sejatinya ditemukan bersama-sama dengan gas alam [1]. Kegiatan penambangan minyak bumi tidak bisa lepas dengan adanya dampak pada lingkungan di sekitarnya. Salah satu masalah yang sering terjadi adalah adanya tumpahan minyak mentah. Pada kasus-kasus tumpahan minyak mentah pada perairan laut yang telah terjadi, tumpahan minyak dapat menyebar luas dengan cepat karena pengaruh angin, gelombang, dan arus laut [2], [3]. Adanya angin yang berhembus di atas permukaan laut menyebabkan terjadinya arus laut sehingga bisa membawa tumpahan minyak sampai pada area dekat pantai [3], [4]. Minyak mentah merupakan Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) karena bersifat

toksik dan karsinogenik, sehingga minyak mentah dapat berbahaya bagi ekosistem laut maupun kepada masyarakat yang bertempat tinggal di dekat pantai.

Kasus tumpahan minyak mentah sumur YYA-1 milik PT. PHE ONWJ juga terbawa mencapai area dekat pantai dengan cepat. Dalam kurun waktu 6 hari, yang semulanya pada tanggal 12 Juli 2019 mulai muncul gelembung gas di Anjungan YY dan Rig Ensco-67 yang terletak di wilayah *offshore*, pada tanggal 18 Juli 2019 tumpahan minyak sudah mencapai area pantai bagian barat [5], [6]. Faktor utama yang menyebabkan minyak dan gas menyembur adalah terjadinya ledakan prematur di bagian dalam sumur. Ledakan yang seharusnya terjadi pada kedalaman 6.600 ft atau 2011,68 m terjadi pada kedalaman 700 ft atau 213,36 m. Sehingga, akibatnya adalah rusaknya pipa dan formasi lapisan tanah yang membuat anjungan ikut miring [7].

Tumpahan mencapai 3.000 BPD semenjak munculnya gelembung gas [8]. Hal ini menyebabkan tumpahan minyak mencemari wilayah Teluk Balikpapan dan wilayah Pantai Karawang, tertutupnya lokasi usaha pariwisata pantai di Karawang dan Bekasi, mengganggu kesehatan anak-anak dan warga sekitar seperti gatal, pusing, dan mual karena mencium bau limbah minyak yang mengandung B3 [9], merusak area tambak ikan dan udang, merusak dan membunuh ribuan pohon mangrove [10], dan berdampak buruk pada ekosistem laut Pantai Karawang, hilangnya mata pencaharian sebagai nelayan karena tercemarnya lokasi penangkapan ikan oleh tumpahan minyak [11].

Penanganan yang telah dilakukan oleh PT. PHE ONWJ untuk menangani kasus ini adalah dengan pendekatan yang banyak dilakukan pada umumnya untuk menangani tumpahan minyak mentah, yaitu secara fisik dan kimia saja. Penanganan ini memiliki beberapa kelemahan dan potensi dampak yang lebih berbahaya. Pertama adalah terkait kegiatan pembersihan dengan masyarakat berdampak besar terhadap kesehatan karena para warga diminta terjun langsung ke air untuk mengumpulkan limbah minyak, sedangkan minyak mengandung B3. Kedua adalah terkait Penggunaan *oil skimmer* menurut memiliki kelemahan yaitu hanya dapat digunakan secara efektif di perairan yang memiliki hidrodinamika air yang rendah [12]. Terakhir adalah terkait penggunaan dispersan, hal ini dinilai cepat dalam penanganan tumpahan minyak namun, menjelaskan bahwa campuran minyak dan dispersan lebih

toksik dibandingkan dengan minyak mentah itu sendiri sehingga lebih membahayakan ekosistem bawah laut karena dapat dikonsumsi oleh hewan laut dan tersebar melalui rantai makanan [13].

Bioremediasi dinilai dapat menghasilkan pembersihan yang lebih optimal karena mengubah pencemar menjadi senyawa tidak toksik dan mikroba yang digunakan akan mati dengan sendirinya saat pencemar habis terdegradasi. Beberapa spesies bakteri yang terbukti dapat digunakan untuk bioremediasi adalah *Bacillus subtilis* dan *Pseudomonas putida*. Pada studi kasus ini diharapkan dapat menentukan kemampuan *B. subtilis* dan *P. putida* untuk penanganan tumpahan minyak mentah sumur YYA-1.

II. METODOLOGI

A. Studi Literatur

Studi literatur yang digunakan meliputi teori-teori yang mengenai minyak mentah, bioremediasi, *B. subtilis*, *P. putida*, proses biodegradasi, penerapan bioremediasi in-situ, faktor-faktor penting bioremediasi dan data penelitian terdahulu terkait penyisihan *Total Petroleum Hydrocarbon* (TPH) oleh bakteri pada air laut untuk memperkirakan potensi penyisihan. Sumber literatur yang digunakan adalah berupa jurnal nasional maupun internasional, buku, peraturan perundangan, disertasi, tesis, *website* hingga makalah seminar/*proceeding* yang mendukung dan terkait dengan topik studi.

B. Penelitian Pendahuluan

Penelitian pendahuluan yang dilakukan meliputi *range finding test* (RFT) untuk mengetahui apakah *B. subtilis* dan *P. putida* dapat bertahan hidup dengan berbagai konsentrasi minyak mentah pada media *Nutrient Agar* (NA) datar dengan metode *streak plate*. Hal ini bertujuan untuk mengetahui konsentrasi maksimal minyak mentah dimana masing-masing mikroorganisme yang digunakan masih dapat hidup dan dapat melakukan biodegradasi terhadap minyak mentah. Konsentrasi minyak mentah yang digunakan adalah 0, 5, 10, 15% (v/v) dengan waktu inkubasi selama 7 hari dengan suhu 37°C. Konsentrasi 15% (v/v) ditetapkan menjadi konsentrasi terbesar karena disesuaikan dengan peraturan Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 128 Tahun 2003 dimana konsentrasi minyak mentah maksimal yang dapat diolah dengan bioremediasi adalah 15% [14]. RFT dilakukan dengan mengamati perubahan pertumbuhan bakteri pada cawan petri dengan membandingkan pertumbuhan bakteri pada cawan petri kontrol atau pada konsentrasi 0% (v/v) minyak mentah setiap 24 jam selama 7 hari.

C. Metode Bioremediasi

Prinsip utama bioremediasi adalah memanfaatkan metabolisme mikroorganisme untuk mengubah pencemar menjadi senyawa tidak toksik dan mikroba yang digunakan akan mati dengan sendirinya saat pencemar habis terdegradasi [15].

Terdapat 3 pendekatan yang umum dilakukan untuk mengaplikasikan teknologi bioremediasi yaitu bioatenuasi,

bioaugmentasi dan biostimulasi. Bioatenuasi adalah proses pemulihan lingkungan tercemar dengan memanfaatkan mikroorganisme yang ada pada lingkungan dan membiarkan proses biodegradasi terjadi secara alami tanpa intervensi (tanpa penambahan apapun). Potensi penerapan bioatenuasi sangat kecil, menjelaskan bahwa bioremediasi akan efektif jika kondisi lingkungan dapat mendukung mikroorganisme pendegradasi minyak untuk dapat tumbuh dan aktif, sedangkan proses biodegradasi secara alami atau bioatenuasi biasanya berjalan sangat lebih lambat dari penganganan fisika dan kimia (dapat mencapai tahunan) [16].

Bioaugmentasi adalah proses dimana jumlah mikroba ditambahkan jika lingkungan tercemar tidak memiliki jumlah mikroba yang cukup untuk mendegradasi jumlah pencemar yang terkandung. Jenis mikroorganisme yang digunakan untuk ditambahkan pada lingkungan tercemar dapat berupa kultur tunggal maupun kultur campuran (konsorsium) yang mengandung campuran beberapa mikroorganisme yang memiliki potensi mendegradasi pencemar [17]. Pada umumnya metode yang banyak digunakan dalam mendegradasi tumpahan minyak mentah atau hidrokarbon adalah dengan menggunakan konsorsium bakteri, dimana konsorsium adalah campuran populasi mikroba dalam bentuk komunitas yang mempunyai hubungan saling mendukung dan memiliki manfaat satu dan lainnya [18]. Beberapa bakteri yang terbukti memiliki kemampuan mendegradasi hidrokarbon disebutkan oleh yaitu, *Pseudomonas*, *Micrococcus*, *Staphylococcus*, *Bacillus*, *Flavobacterium*, *Achromobacter*, *Klebsiella*, *Actinomycetes*, *Acetobacter*, dan *Rhodococcus* telah ditemukan pada lingkungan tercemar hidrokarbon dan memiliki kemampuan mendegradasi hidrokarbon [19].

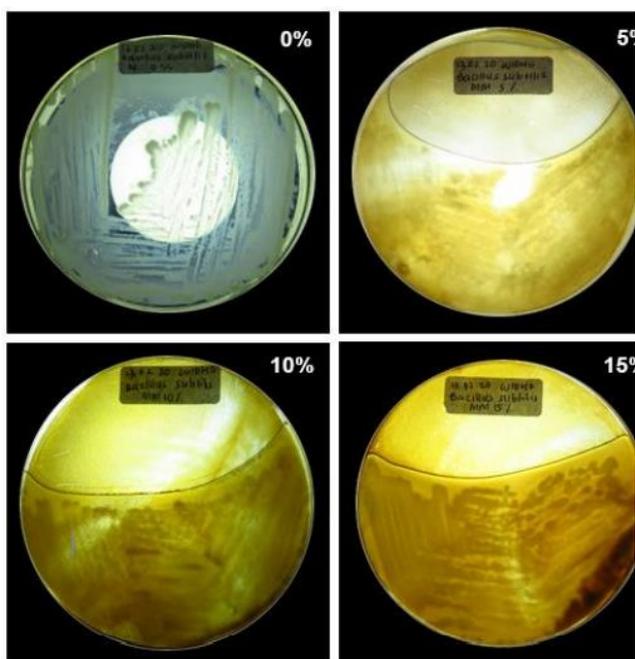
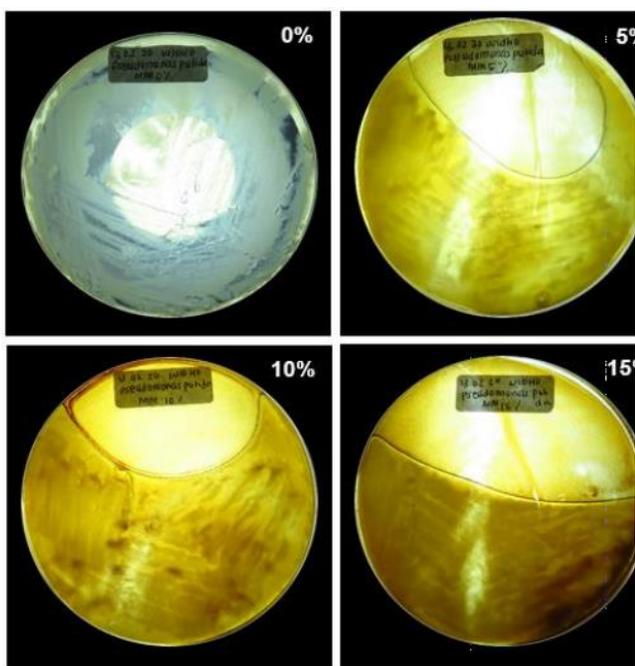
Sedangkan, biostimulasi adalah proses pemulihan lingkungan tercemar dengan menambahkan jumlah nutrisi atau ko-substrat lainnya untuk menstimulasi mikroba pendegradasi. Penambahan nutrisi ditinjau dari rasio C: N: P yang terkandung pada media tercemar [20]. Hasil penelitian menyatakan bahwa rasio terbaik untuk proses degradasi minyak mentah adalah 100:10:1 [21]. Sehingga setelah diketahui rasio C: N: P media tercemar dapat ditambahkan nutrisi organik maupun anorganik untuk mencapai rasio yang ideal.

Besar pencemaran minyak di laut ini dipantau dengan Analisis *Total Petroleum Hydrocarbon* (TPH) yang merupakan pengukuran menyeluruh dari senyawa alifatik, alisiklik dan aromatik. Menurut KepMen LH No 128 Tahun 2003 konsentrasi minyak mentah maksimal yang dapat diolah dengan bioremediasi adalah 15%. Sedangkan besar TPH menurut BPPT Indonesia, minyak tidak berbahaya bagi lingkungan jika bernilai ≤ 1 %. Besar konsentrasi TPH didapatkan dari analisis TPH dengan metode gravimetri dan dengan menggunakan analisis yang lebih akurat yaitu menggunakan analisis *Gas Chromatography – Mass Spectrometry* (GC – MS) [22].

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Minyak Mentah

Menurut Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 128 Tahun 2003, “minyak bumi adalah hasil proses alami berupa

Gambar 1. Hasil RFT Hari Ke-7 *B. subtilis*.Gambar 2. Hasil RFT Hari Ke-7 *P. putida*.

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". Sedangkan minyak mentah sendiri adalah minyak bumi yang telah dipisahkan dari gas alam setelah proses penambangan karena minyak bumi sejatinya ditemukan bersama-sama dengan gas alam [1].

Bahan-bahan utama penyusun minyak mentah merupakan campuran kompleks yang terdiri dari rantai hidrokarbon [23].

Senyawa penyusun minyak bumi tersusun atas senyawa hidrokarbon dan non hidrokarbon. Minyak mentah mengandung senyawa hidrokarbon sekitar 50-98% dan selebihnya senyawa non-hidrokarbon seperti sulfur, nitrogen, oksigen, dan beberapa logam berat [24], [25].

Gabungan dari karbon dan hidrogen akan membentuk senyawa hidrokarbon pada minyak. Senyawa hidrokarbon penyusun minyak bumi terdiri dari beberapa jenis, diantaranya paraffin, naptena, aromatik dan aspaltena [26]. Hidrokarbon aromatik sendiri banyak terdapat di alam sebagai polutan yang kemudian dinyatakan pula bahwa senyawa hidrokarbon aromatik bersifat toksik dan karsinogenik [25]. Sehingga, kasus tumpahan minyak mentah tidak bisa dibiarkan begitu saja dan harus segera ditanggulangi secara tuntas karena termasuk kedalam Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) yaitu bersifat toksik dan karsinogenik.

B. Range Finding Test

Range finding test dilakukan dengan menggunakan minyak mentah PT Pertamina dengan variasi konsentrasi minyak mentah yang digunakan adalah 0, 5, 10, 15% (v/v), waktu inkubasi selama 7 hari dengan suhu 37°C. Sedangkan, bakteri yang digunakan adalah *B. subtilis* dan *P. putida*. Alasan pemilihan kedua bakteri ini adalah merupakan bakteri yang terbukti memiliki kemampuan mendegradasi hidrokarbon minyak mentah, dapat hidup pada kondisi lingkungan dengan tingkat salinitas mencapai 37‰ [27], tidak toksik dan mudah ditemukan. Gambar 1. adalah hasil RFT hari ke-7 *B. subtilis* dan Gambar 2. adalah hasil RFT hari ke-7 *P. putida*. Dapat dilihat pada gambar bahwa semakin besar konsentrasi minyak mentahnya maka semakin sedikit *B. subtilis* dan *P. putida* yang tumbuh. Hal ini juga menyatakan bahwa *B. subtilis* dan *P. putida* dapat hidup pada area dengan konsentrasi minyak mentah sebesar 0% sampai dengan 15% (v/v). Jika dilihat dari hasil RFT ini secara kasat mata *B. subtilis* dan *P. putida* memiliki potensi untuk digunakan dalam biodegradasi minyak mentah karena tidak mengalami kematian yang signifikan selama 7 hari pengamatan, dimana pada umumnya screening hanya dilakukan selama 48 jam [21].

C. Penelitian Terdahulu

Pada studi literatur ini data hasil penelitian terdahulu terkait dengan penyisihan TPH oleh bakteri pada air laut digunakan untuk memperkirakan persen penyisihan minyak mentah oleh *B. subtilis* dan *P. putida*. Tabel 1 [28]–[34]. berisi kumpulan hasil penelitian terdahulu terkait dengan penyisihan TPH oleh bakteri pada air laut. Dari data tersebut diperkirakan isolat tunggal *Bacillus subtilis* dapat menyisihkan kira-kira 60-80% dalam kurun waktu satu bulan (tergantung dari faktor-faktor biodegradasi), sedangkan isolat tunggal *Pseudomonas putida* dapat menyisihkan kira-kira 60-70% dalam kurun waktu satu bulan (tergantung dari faktor-faktor biodegradasi). Perkiraan tersebut bukanlah kesimpulan yang pasti karena merupakan penarikan kesimpulan dari data penelitian dengan kontrol nutrisi yang berbeda dan jumlah konsentrasi pencemar yang berbeda.

Maka diperkirakan persen penyisihan dengan metode

Tabel 1.
Beberapa Hasil Penelitian Terdahulu Terkait dengan Penyisihan TPH oleh Bakteri pada Air Laut

Bakteri	Jenis	Pencemar	Penyisihan
<i>Pseudomonas</i> sp.	Konsorsium	0,5 % Diesel	30,95% (15 hari)
<i>Alcanivorax</i> sp.		10%	
<i>Bordetella</i> sp.	Konsorsium	Arabian Light Crude Oil (ALCO)	55,9% (28 hari)
<i>Pseudomonas balearica</i>		10%	
<i>Bacillus cereus</i>	Konsorsium	Minyak mentah	24,9% (15 hari)
<i>Bacillus licheniformis</i>	Tunggal	Diesel	25,04% (5 hari)
<i>Bacillus subtilis</i>	Tunggal	Diesel	5,42% (5 hari)
<i>Bacillus cereus</i>	Tunggal	Diesel	5,89% (5 hari)
<i>Pseudomonas</i> sp.	Konsorsium	Diesel	30,95% (15 hari)
<i>Bacillus subtilis</i>			
<i>Bacillus jeotagali</i>	Konsorsium	1% Minyak Mentah	95,5% (20 hari)
<i>Bacillus foraminis</i>			
<i>Bacillus subtilis</i>	Tunggal	2% Minyak Mentah	82% (15 hari)
<i>Bacillus cereus</i>			
<i>Bacillus</i> sp	Konsorsium	5% Minyak Mentah	67,2% (5 minggu)
<i>Pseudomonas</i> sp			
<i>Bacillus</i> sp	Konsorsium	5% Minyak Mentah	73,2% (5 minggu)
<i>Bacillus cereus</i>			
<i>Pseudomonas</i> sp	Konsorsium	5% Minyak Mentah	89,1% (5 minggu)
<i>Bacillus sphaericus</i>			
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Konsorsium	5% Minyak Mentah	78,5% (5 minggu)
<i>Pseudomonas</i> sp	Tunggal	1% Minyak Mentah	67% (30 hari)
<i>Bacillus</i> sp	Tunggal	1% Minyak Mentah	61% (30 hari)
<i>Bacillus cereus</i>	Tunggal	1% Minyak Mentah	54% (30 hari)
<i>Pseudomonas putida</i>	Tunggal	2% Minyak Mentah	65% (7 hari)

konsorsium oleh *B. subtilis* dan *P. putida* adalah sebesar 70-90% dalam perkiraan waktu 1-2 bulan (tergantung konsentrasi pencemar) hal ini didasari oleh penelitian yang disebutkan dalam Tabel 1 [34]. dimana hasil konsorsium *Bacillus* sp dan *Pseudomonas* sp memiliki rentang antara 70-90% dalam kurun waktu 5 minggu dan kosentrasi pencemar sebesar 5% minyak mentah. Sedangkan perkiraan persen penyisihan dengan oleh *B. subtilis* dan *P. putida* dapat lebih baik yaitu sebesar 80-95% jika menggunakan metode *sequencing*. Hal ini dikarenakan metode *sequencing* diperkirakan dapat lebih mengoptimalkan proses biodegradasi tumpahan minyak mentah pada perairan laut. Metode *sequencing* adalah metode biodegradasi yang menggunakan beberapa isolat bakteri tunggal secara berurutan, bukan secara langsung dicampur bersamaan. Hal ini diperkirakan dapat menghasilkan nilai penyisihan hidrokarbon minyak mentah yang lebih baik daripada menggunakan metode kultur tunggal ataupun kultur campuran (konsorsium).

Sayangnya, masih belum ada hasil penelitian dengan menggunakan metode ini.

D. Proses Biodegradasi

Proses biodegradasi minyak mentah secara umum dijelaskan oleh [35], yaitu:

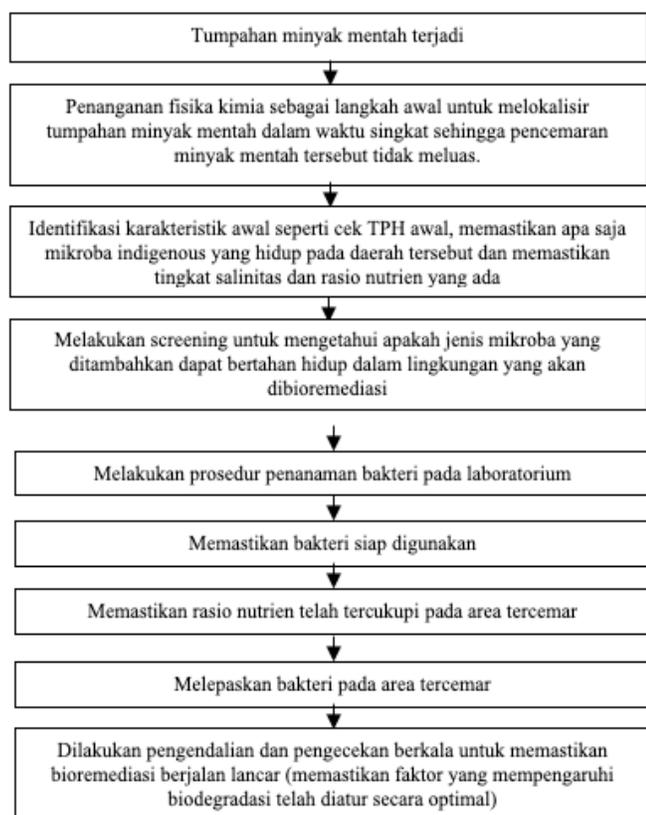
- 1) Pada lingkungan yang tercemar minyak mentah secara alami akan memiliki presentase kandungan mikroba pendegradasi hidrokarbon (hidrokarbonoklastik).
- 2) Bakteri hidrokarbonoklastik memanfaatkan hidrokarbon sebagai sumber energi dan sumber karbon dan hidrogen.
- 3) Mikroba pendegradasi menghasilkan biosurfaktan yang melarutkan hidrokarbon dalam fase cair, mengurangi tegangan permukaan, meningkatkan aksesibilitas mikroorganisme pendegradasi teradap butiran minyak.
- 4) Mikroba mentransfer hidrokarbon ke dalam sel mikroba dengan cara interaksi sel dengan hidrokarbon yang terlarut dalam fase air, melalui proses difusi atau transport aktif atau dengan interaksi sel dengan tetesan hidrokarbon yang teremulsi oleh sel bakteri [36].
- 5) Karakter, jumlah sel dan enzim yang terkandung dalam mikroba akan menentukan hasil degradasi hidrokarbon minyak bumi. Secara garis besar, hidrokarbon akan teroksidasi atau terpecah oleh bantuan enzim hingga menghasilkan aldehida dan asam sederhana yang dapat masuk yang dapat masuk ke dalam proses metabolisme seperti siklus Krebs dan proses transpor elektron.
- 6) Siklus kreb akan menghasilkan ATP, NADH, FADH₂, dan melepaskan CO₂, sedangkan NADH dan FADH₂ masuk kedalam proses transpor elektron menghasilkan H₂O, dan sejumlah ATP.

Dari proses yang telah dijelaskan makan jelas bahwa proses biodegradasi, bakteri memanfaatkan senyawa hidrokarbon minyak bumi sebagai substrat dan mengubahnya menjadi senyawa yang tidak toksik seperti CO₂ dan H₂O.

E. Penerapan Bioremediasi In-Situ

Prediksi kebutuhan jumlah bakteri yang ditambahkan untuk kasus sumur YYA-1 ini adalah dengan membandingkan beberapa literatur penelitian dimana konsentrasi yang banyak digunakan untuk ditambahkan pada area tercemar hidrokarbon adalah antara 5-10% (v/v) yaitu yang merupakan volume isolat per volume media tercemar. Cara penambahan bakteri pada perairan laut yaitu penerapan bioremediasi pada kasus tumpahan 4,6 juta gallon minyak mentah oleh Megaborg di teluk Mexico [37]. Pada kasus ini, bakteri telah diuji coba sebelumnya pada kolam berisi air dengan tambahan minyak mentah dan hasilnya menyatakan bahwa metode ini efektif serta media menjadi tidak toksik dan aman bagi ekosistem bawah laut. Penambahan bakteri dilakukan dengan memindahkan bakteri siap pakai pada drum dan dibawa dengan kapal menuju tengah laut. Selanjutnya bakteri disemprotkan pada area tercemar dengan bantuan alat pemadam kebakaran kapal.

Sehingga untuk kasus sumur YYA-1, hal ini dapat diterapkan dengan memasang pembatas berupa oil boom dan menghitung luas areanya serta mengukur kedalaman air pada area yang



Gambar 3. Skema Langkah Penanganan untuk Studi Kasus Tumpahan Minyak Mentah Sumur YYA-1 Keseluruhan.

terbatasan oil boom. Dengan mengetahui luasan area dan kedalaman dapat diperkirakan berapa banyak volume yang dibutuhkan. Sayangnya saat ini tidak ada data lengkap dari literatur yang dapat digunakan oleh penulis untuk menghitung perkiraan volume penambahan bakteri yang dapat ditambahkan untuk proses bioaugmentasi studi kasus tumpahan minyak mentah sumur YYA-1 ini. Namun, pada umumnya salah satu masalah utama yang menyangkut penggunaan bioaugmentasi secara in situ adalah dengan pengontrolan jumlah bakteri yang cukup untuk biodegradasi [38]. Maka setidaknya harus dianalisis CFU secara berkala untuk memastikan jumlah bakteri paling tidak antara 10^6 – 10^7 sel/mL pada lingkungan selama proses bioremediasi.

Dari hasil dari kajian literatur yang telah dilakukan, bioremediasi pada kasus tumpahan minyak sumur YYA-1 ini memiliki potensi yang baik untuk diterapkan sebagai alternatif penanganan pembersihannya karena bioremediasi dapat membersihkan secara optimal dan lebih aman bagi ekosistem laut. Sudah ada beberapa produk inokulum campuran (konsorsium) yang dijual secara komersial untuk digunakan sebagai penanganan tumpahan minyak mentah di alam (umumnya di Indonesia adalah produk untuk media tanah atau pasir tercemar). Hal ini berarti memang sudah banyak yang mempertimbangkan bahwa bioremediasi adalah jawaban yang lebih tepat untuk penanganan tumpahan minyak mentah. Mungkin beberapa faktor yang mempengaruhi gagalnya bioremediasi di alam bisa terjadi [20], namun jika prosedur penggunaan bioremediasi diperhatikan dengan baik sebelum diterapkan maka hasil yang didapatkan lebih optimal setelah

penanganan pertama dengan fisik kimia.

Maka, Gambar 3. adalah skema atau bagan langkah-langkah penanganan untuk studi kasus tumpahan minyak mentah sumur YYA-1 ini secara keseluruhan.

Faktor penting yang harus diperhatikan disebutkan dalam [17], bahwa suhu yang tepat, nutrisi, dan makanan harus siap untuk mikroba agar bioremediasi dapat berjalan dengan lancar. Selain itu, konsentrasi polutan, jenis polutan, tingkat salinitas, pH lingkungan dan oksigen juga merupakan faktor penting yang harus diperhatikan. Konsentrasi polutan dan jenis polutan mempengaruhi kompleksitas jenis minyak mentah. Tingkat salinitas dan pH lingkungan berkaitan dengan jenis mikroba yang dapat digunakan. Sedangkan oksigen merupakan faktor penting karena biodegradasi melibatkan enzim oksigenase agar molekul hidrokarbon dapat digunakan oleh mikroba sebagai sumber karbon untuk metabolisme sel. Sehingga dalam keadaan aerobik proses biodegradasi dapat berjalan lebih efektif. Kekurangan oksigen akan membuat proses biodegradasi tidak berjalan sempurna. Sehingga perlu adanya kontrol terkait jumlah oksigen yang ada pada media tercemar saat dilakukan proses bioremediasi menggunakan mikroba. [30].

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan uraian yang dijelaskan pada hasil dan pembahasan dapat diperoleh kesimpulan bahwa:

- 1) Hasil studi kasus tumpahan minyak mentah sumur YYA-1 yang terjadi pada tahun 2019 lalu, menyatakan bahwa bioremediasi merupakan metode alternatif yang diterapkan setelah penanganan fisika dan kimia dilakukan sebagai langkah awal untuk melokalisir tumpahan minyak mentah dalam waktu singkat sehingga pencemaran minyak mentah tersebut tidak meluas. Walaupun ada beberapa faktor dan prosedur yang harus diperhatikan dengan seksama pada saat penerapan bioremediasi sebagai penanganan pencemaran tumpahan minyak mentah pada perairan laut agar tidak gagal dan mati (bakterinya) pada saat diterapkan.
- 2) *B. subtilis* dan *P. putida* dapat hidup pada lingkungan tercemar minyak mentah hingga konsentrasi 15% v/v.
- 3) Penyisihan hidrokarbon minyak dengan isolat tunggal dari data penelitian terdahulu diperkirakan adalah 60-80% untuk *B. subtilis* dan 60-70% untuk *P. putida* dalam kurun waktu satu bulan (tergantung dari faktor-faktor biodegradasi).
- 4) Penyisihan hidrokarbon minyak dengan metode konsorsium *B. subtilis* dan *P. putida* dari data penelitian terdahulu diperkirakan adalah 70-90% dan 80-95% dengan metode *sequencing* dalam waktu 1-2 bulan atau lebih (tergantung konsentrasi pencemar).

Berdasarkan uraian yang dijelaskan pada hasil dan pembahasan, maka disarankan untuk perlunya penelitian dengan skala laboratorium terkait saran metode *sequencing* perlu dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. D. AGUSTIN, "Perbandingan Karbon Aktif dari Ampas Tebu dan Tongkol Jagung sebagai Adsorben Logam Cu pada Limbah Tumpahan Minyak Mentah (Crude Oil)," Politeknik Negeri Sriwijaya, 2014.
- [2] M. Fingas, "The basics of oil spill cleanup, third edit," Taylor &, 2013.
- [3] M. Wibowo, "Pemodelan Sebaran Pencemaran Tumpahan Minyak di Perairan Cilacap," *J. Teknol. Lingkung.*, vol. 19, no. 2, pp. 191–202, 2018.
- [4] I. . Hadi, S. dan Radjawane, "Arus Laut," Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2009.
- [5] "Kronologi Kebocoran Migas di Sumur YYA-1 ONWJ Menurut Pertamina - Tirta.ID." <https://tirta.id/kronologi-kebocoran-migas-di-sumur-yya-1-onwj-menurut-pertamina-ee3T> (accessed May 09, 2020).
- [6] "Pertamina Beberkan Kronologi Kebocoran Migas di Sumur YYA-1 - Warta Kota." <https://wartakota.tribunnews.com/2019/07/25/pertamina-beberkan-kronologi-kebocoran-migas-di-sumur-yya-1>.
- [7] "Mulai Terkuak, Misteri Dibalik Insiden Kebocoran Sumur YYA-1 Versi Kementerian ESDM - Dunia Energi." <https://www.dunia-energi.com/mulai-terkuak-misteri-dibalik-insiden-kebocoran-sumur-yya-1-versi-kementerian-esdm/> (accessed May 09, 2020).
- [8] "Sumur Pertamina Bocor, Laut Karawang Tercemar 51 Ribu Barel Minyak - Bisnis Liputan6.com." <https://www.liputan6.com/bisnis/read/4024605/sumur-pertamina-bocor-laut-karawang-tercemar-51-ribu-barel-minyak> (accessed May 09, 2020).
- [9] "Tragedi Tumpahan Minyak Pertamina di Karawang, Horor bagi Manusia dan Lingkungan : Mongabay.co.id." <https://www.mongabay.co.id/2019/07/30/tragedi-tumpahan-minyak-pertamina-di-karawang-horor-bagi-manusia-dan-lingkungan/> (accessed May 09, 2020).
- [10] "Petaka Tumpahan Minyak di Karawang - Kolom Tempo.co." <https://kolom.tempo.co/read/1231257/petaka-tumpahan-minyak-di-karawang> (accessed Sep. 18, 2020).
- [11] "Begini Nasib Buruk Masyarakat Pesisir akibat Tumpahan Minyak di Karawang : Mongabay.co.id." <https://www.mongabay.co.id/2019/07/29/begini-nasib-buruk-masyarakat-pesisir-akibat-tumpahan-minyak-di-karawang/> (accessed Apr. 24, 2020).
- [12] S. Sulistyono, "Dampak Tumpahan Minyak (Oil Spill) di Perairan Laut pada Kegiatan Industri Migas dan Metode Penanggulangannya," *Swara Patra*, vol. 3, no. 1, 2013.
- [13] Josh Clark, "How do you clean up an oil spill? | HowStuffWorks." <http://science.howstuffworks.com/environmental/green-science/cleaning-oil-spill.htm> (accessed Apr. 24, 2020).
- [14] L. H. KEPMEN, "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." Kementerian Lingkungan Hidup, 2003.
- [15] Z. AIDisi, S. Jaoua, D. Al-Thani, S. AlMeer, and N. Zouari, "Isolation, screening and activity of hydrocarbon-degrading bacteria from harsh soils," 2016.
- [16] Y. Darmayati, "Pengenalan Tentang Bioremediasi Untuk Perairan Pantai Tercemar Minyak." Oseana, 2013.
- [17] "A Citizen's Guide to Bioremediation. EPA 542-F-12-003 September 2012," United States Environmental Protection Agency (US EPA), 2012.
- [18] A. C. Asri and E. Zulaika, "Sinergisme antar isolat Azotobacter yang dikonsorsiumkan," *J. Sains dan Seni ITS*, vol. 5, no. 2, 2016.
- [19] C. Bhuvaneshwar, G. Swathi, B. V Bhaskar, T. Munichandrababu, and W. Rajendra, "Effective synergetic biodegradation of diesel oil by bacteria," *Int. J. Environ. Biol.*, vol. 2, no. 4, pp. 195–199, 2012.
- [20] "Guidelines for The Bioremediation of Marine Shorelines and Freshwater Wetlands. Cincinnati. EPA," 2001.
- [21] M. F. Imron, "Optimasi Proses Biodegradasi Solar oleh Isolat Bakteri dengan Menggunakan Response Surface Methodology (RSM) Desain Box Behnken," ITS, 2018.
- [22] "Method 9071B, n-Hexane Extractable Material (HEM) for Sludge, Sediment, and Soil Samples. Washington DC. U.S. EPA," United States Environmental Protection Agency (US EPA), 1999.
- [23] I. Crystiana, T. M. Susantoro, and N. Firdaus, "Pengolahan Data Citra Satelit untuk Mengidentifikasi Potensi Jebakan dalam Kegiatan Eksplorasi Migas," *Lembaran Publ. Miny. dan Gas Bumi*, vol. 49, no. 1, pp. 41–51, 2015.
- [24] G. J. Connel, D.W., dan Miller, "Kimia dan Otoksikologi Pencemaran," Universitas Indonesia Press. Jakarta, 1995.
- [25] D. Rachmawani, F. Yulianda, C. Kusmana, M. Boer, and E. Parwati, "Dampak Hidrokarbon Aromatik Terhadap Ekosistem Mangrove Di Kawasan Binalatung Kota Tarakan Kalimantan Utara (Impact of Aromatic Hydrocarbon on Mangrove Ecosystem in Binalatung Area Tarakan City North Kalimantan)," *J. Mns. dan Lingkung.*, vol. 23, no. 3, pp. 295–303, 2016.
- [26] P. Jurdilla, N. Azizah, A. F. Wati, and others, "Industri Pengolahan Minyak Bumi di Indonesia," 2019.
- [27] R. Rajagukguk, "Pengaruh Bakteri Azotobacter, Bacillus Subtilis, Dan Pseudomonas Putida Terhadap Laju Korosi Aluminium 6063," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017.
- [28] S. K. Panda, R. N. Kar, and C. R. Panda, "Isolation and identification of petroleum hydrocarbon degrading microorganisms from oil contaminated environment," *Int. J. Environ. Sci.*, vol. 3, no. 5, pp. 1314–1321, 2013.
- [29] D. Astuti, "Pengaruh Variasi Jumlah Inokulum Konsorsium Bakteri Terhadap Degradasi Hidrokarbon Minyak Bumi," *Skripsi. Fak. Mat. dan Ilmu Pengetah. Alam. Progr. Stud. Biol. Univ. Indones. Depok*, 2012.
- [30] R. A. Bhaktinagara, A. Suprihadi, and B. Raharjo, "Biodegradasi Senyawa Hidrokarbon Oleh Strain Bacillus cereus (VIC) Pada Kondisi Salinitas Yang Berbeda," *J. Akad. Biol.*, vol. 4, no. 3, pp. 62–71, 2015.
- [31] I. F. Purwanti *et al.*, "Biodegradation of diesel by bacteria isolated from Scirpus mucronatus rhizosphere in diesel-contaminated sand," *Adv. Sci. Lett.*, vol. 21, no. 2, pp. 140–143, 2015.
- [32] P. Prabhakaran, A. Sureshbabu, S. Rajakumar, and P. M. Ayyasamy, "Bioremediation of crude oil in synthetic mineral salts medium enriched with aerobic bacterial consortium," *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol.*, vol. 3, no. 2, pp. 9236–9242, 2014.
- [33] N. Sakthipriya, M. Doble, J. S. Sangwai, and others, "Bioremediation of coastal and marine pollution due to crude oil using a microorganism Bacillus subtilis," *Procedia Eng.*, vol. 116, no. 1, pp. 213–220, 2015.
- [34] D. Sudrajat, N. Mulyana, and D. L. Tri Retno, "Isolasi dan aplikasi mikroba indigen pendeградasi hidrokarbon dari tanah tercemar minyak bumi," *Pros. Pertem. dan Present. Ilmiah-BATAN*, 2015.
- [35] M. J. S. Wenti and others, "Biodegradasi Oil Sludge dengan Variasi Lama Waktu Inkubasi dan Jenis Konsorsium Bakteri 112 yang Diisolasi dari Lumpur Pantai Kenjera," UNIVERSITAS AIRLANGGA, 2012.
- [36] T. Sumarsono, "Efektivitas Jenis dan Konsentrasi Nutrien dalam Bioremediasi Tanah Tercemar Minyak Mentah yang Diaugmentasi dengan Konsorsium Bakteri," Universitas Airlangga, Surabaya, 2009.
- [37] "Megaborg Oil Spill - YouTube." https://www.youtube.com/watch?v=eCzhmGHQ_1c (accessed Jul. 01, 2020).
- [38] A. Nzila, S. A. Razzak, and J. Zhu, "Bioaugmentation: an emerging strategy of industrial wastewater treatment for reuse and discharge," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 13, no. 9, p. 846, 2016.