

Studi Fitoremediasi Polutan Minyak Bumi di Wilayah Pesisir Tercemar Menggunakan Tumbuhan Mangrove (Studi Kasus: Tumpahan Minyak Mentah Sumur YYA-1 Pesisir Karawang Jawa Barat)

Atmira Dinha Astuti dan Harmin Sulistiyaning Titah

Departemen Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

e-mail: harminsulis@gmail.com

Abstrak—Pesisir Indonesia mengalami pencemaran akibat minyak bumi yang berasal dari berbagai aktivitas industri perminyakan dan kegiatan melaut. Polutan minyak bumi merupakan limbah bahan berbahaya dan beracun (B3) karena membahayakan makhluk hidup dan lingkungannya. Pencemaran dari polutan minyak bumi mengakibatkan ekosistem pesisir terganggu. Polutan minyak bumi mengandung petroleum hidrokarbon yang perlu didegradasi agar tidak menimbulkan dampak negatif. Salah satu metode dalam mendegradasi polutan minyak bumi adalah fitoremediasi. Metode ini dipilih karena dapat mendegradasi polutan secara kontinyu, operasional mudah, murah, dan aman. Tumbuhan yang digunakan adalah mangrove karena merupakan tumbuhan yang kuat salinitas payau pada pesisir. Metode dari penulisan ini yaitu menggunakan studi literatur dengan mengumpulkan serta menganalisis berbagai pustaka. Jenis pustaka antara lain jurnal, buku, laporan, *website* dengan pokok pembahasan terkait minyak bumi, fitoremediasi, dan mangrove. Tujuan penulisan sebagai referensi dalam membahas metode fitoremediasi menggunakan mangrove terhadap polutan minyak bumi di wilayah pesisir. Studi kasus yang diambil adalah kebocoran minyak di Pesisir Karawang Jawa Barat. Metode dalam mendegradasi polutan minyak bumi dengan fitoremediasi menggunakan skenario penanaman empat jenis mangrove yaitu *Avicennia*, *Rhizophora*, *Burghiera*, dan *Sonneratia*. Skenario jenis mangrove yang ditanam menyesuaikan dengan zonasi hutan mangrove. Konsentrasi pencemar minyak bumi di pesisir karawang sebesar 10%. Pertumbuhan mangrove membutuhkan waktu selama dua belas minggu untuk menurunkan hingga sisa TPH% menjadi 1,84%.

Kata Kunci—Fitoremediasi, Mangrove, Minyak Bumi, Pesisir, Petroleum Hidrokarbon.

I. PENDAHULUAN

INDONESIA merupakan negara berbentuk kepulauan dengan daerah sangat luas [1]. Hal ini menyebabkan garis pantai di Indonesia memiliki panjang sekitar 99.093 km. Ini menjadikan garis pantai Indonesia merupakan garis pantai terpanjang kedua di dunia [2]. Oleh karena itu, pemanfaatan dan pendayagunaan memerlukan perhatian yang cukup besar di laut dan pesisir pantai Indonesia termasuk Pelabuhan [3]. Kondisi perairan laut dan pesisir Indonesia tercemar oleh polutan minyak bumi disebabkan dari berbagai kegiatan melaut dan industri perminyakan [4]. Hal ini mengakibatkan volume tumpahan solar pada air laut meningkat. Pencemaran laut dan pesisir akan mengakibatkan ekosistem pesisir terganggu. Hal ini berdampak

bagi biodata laut dan hasil melaut akan menurun akibat jumlah ikan berkurang. Hal ini diakibatkan karena minyak bumi merupakan senyawa yang bersifat karsinogenik dan mutagenik yang dapat mengganggu kesehatan makhluk hidup [5]. Sisa penggunaan bahan bakar solar paling berat terkonsentrasi di sepanjang daerah pesisir [6]. Masuknya pencemar organik dan anorganik ke badan air perairan pesisir pantai dapat menyebabkan kualitas perairan mengalami degradasi fungsi secara biologis [7].

Metode remediasi polutan minyak bumi di wilayah pesisir dapat dilakukan baik secara fisik-kimia dan biologi. Remediasi dengan metode fisik-kimia yaitu dengan menggunakan sorben, pendispersian, dan metode pembakaran minyak [8]. Selain itu, metode remediasi dengan metode biologi menggunakan bioremediasi atau fitoremediasi. Teknik bioremediasi membutuhkan biaya yang tidak sedikit dan tidak meremediasi dalam lingkup waktu yang lama dan berkala. Berbeda halnya dengan teknik fitoremediasi, metode ini tidak membutuhkan biaya sebanyak bioremediasi dan proses remediasi sendiri berlangsung secara berkala.

Metode mendegradasi polutan minyak bumi di wilayah pesisir dipilih menggunakan metode fitoremediasi. Fitoremediasi adalah salah satu teknologi yang menggunakan tumbuhan dengan tujuan membersihkan air, tanah, maupun udara yang tercemar [9]. Tumbuhan dapat digunakan untuk memisahkan atau mendetoksifikasi berbagai jenis kontaminan yang terdapat di lingkungan [10]. Fitoremediasi ini menggunakan tumbuhan mangrove karena mangrove merupakan tumbuhan yang kuat akan salinitas tinggi seperti air laut [11]. Selain itu mampu meremediasi pencemar yang dalam kasus ini merupakan polutan minyak bumi. Fitoremediasi menggunakan mangrove dipilih karena termasuk mudah, murah, dan memiliki keuntungan lebih dalam berbagai aspek seperti penanggulangan abrasi dan erosi [12]. Berbagai jenis mangrove dapat digunakan untuk meremediasi tergantung jenis yang tepat untuk di tumbuhbiakkan di wilayah pesisir [13].

Berdasarkan penjelasan tersebut, maka disusunlah studi literatur terhadap terjadinya pencemaran wilayah pesisir oleh polutan minyak bumi. Selain itu dikaji pula pencemaran polutan minyak bumi di pesisir menggunakan metode fitoremediasi dengan tumbuhan mangrove. Studi pustaka ini diharapkan dapat memberikan informasi, uraian, dan analisis tentang

pencemaran perairan pantai oleh minyak bumi yang nantinya dilakukan penanganan dengan metode fitoremediasi menggunakan tumbuhan mangrove yang nantinya akan dihasilkan pula keuntungan dari berbagai aspek lain. Selanjutnya dari kajian pustaka ini, akan diambil studi kasus yang berkaitan langsung dengan bahasan yang telah diulas.

II. METODOLOGI PENULISAN

Metode dari penulisan ini yaitu menggunakan studi literatur dengan mengumpulkan serta menganalisis berbagai pustaka. Kajian pustaka dilakukan dengan menelusuri berbagai referensi yang berkaitan dengan masalah pencemaran wilayah pesisir oleh polutan minyak bumi. Selain itu dilakukan pula kajian pustaka yang berkaitan dengan fitoremediasi oleh tumbuhan mangrove. Jenis pustaka antara lain jurnal, buku, laporan, dan *website* dengan pokok pembahasan terkait minyak bumi, fitoremediasi, dan mangrove. Studi kasus yang diambil dalam penulisan ini adalah kasus kebocoran minyak bumi di Pesisir Karawang Jawa Barat dengan menganalisis salah satu alternatif penanganan yaitu dengan fitoremediasi oleh mangrove dari berbagai pustaka yang telah dianalisis.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pesisir

Pesisir merupakan garis area sempit dari sebuah wilayah daratan yang berbatasan dengan badan air. Zona tersebut merupakan tanah terbuka dan menjadi tempat oleh pasang surut gelombang dan zona tinggi permukaan air suatu wilayah [14]. Pesisir adalah pinggiran wilayah di tepi badan besar air, seperti samudra, laut, atau danau. Pesisir adalah pinggiran yang lebih luas yang secara geologis dimodifikasi oleh aksi dari tubuh air laut dari dulu hingga sekarang [15]. Pesisir adalah suatu lingkup wilayah yang permukaannya secara fisik merupakan pertemuan antara air laut dan daratan [16]. Regulasi di Indonesia menyebutkan pengertian pesisir merupakan daerah peralihan antara ekosistem darat dan laut yang dipengaruhi oleh perubahan di wilayah darat dan laut. Batas daratan yang dimaksud yaitu sampai dengan daratan yang tidak terkena air laut [17]. Pesisir merupakan daerah yang meliputi pantai dan perluasnya ke arah darat sampai batas pengaruh laut. Jadi dalam konteks ini, pantai termasuk dalam pesisir. Pantai adalah bagian dari pesisir yang tergenang pada waktu air laut pasang, lalu kering pada waktu air laut surut.

B. Minyak Bumi

Minyak bumi adalah cairan kental berwarna coklat pekat atau gelap yang mudah terbakar dan berada di lapisan atas dari beberapa area di kerak bumi. Minyak bumi berasal dari pelapukan hewan dan tumbuhan berjuta tahun yang lalu yang menghasilkan produk minyak [18]. Tumbuhan dan hewan tersebut dilapukan oleh mikroorganisme yang selanjutnya terkubur dan terpendam di dalam lapisan kulit bumi. Sebuah tekanan dan suhu yang tinggi, maka setelah jutaan tahun lamanya, akhirnya material tersebut berubah menjadi sebuah minyak yang terkumpul dalam pori-pori batu kapur atau batu

pasir. Oleh karena itu, pori-pori batu kapur tersebut yang sifatnya kapiler, maka dengan prinsip kapilaritas, minyak bumi yang telah terbentuk tersebut dengan secara perlahan-lahan bergerak ke atas. Saat gerakan tersebut terhalang oleh batuan yang tidak berpori, maka terjadilah penumpukan dalam batuan tersebut.

Minyak gas bumi adalah bahan-bahan galian minyak bumi, aspal, lilin bumi, semua jenis bitumen baik yang padat maupun yang cair dan semua gas bumi serta semua hasil-hasil pemurnian dan pengolahan bahan-bahan galian, tidak termasuk bahan-bahan galian anthrasit dan segala macam batu bara, baik yang tua maupun yang muda [19]. Minyak bumi dikenal dengan sebutan bahan bakar fosil. Minyak bumi merupakan bahan bakar yang berasal dari fosil. Jasad renik organisme yang hidup di lautan. Ketika organisme tersebut mati, sisa-sisa tubuhnya akan akan mengendap di dasar lautan dan tertutupi lumpur. Pengaruh tekanan dan temperature tinggi mengubah lumpur menjadi lapisan bebatuan. Setelah jutaan tahun, bakteri anaerob akan menguraikan sisa-sisa organisme tersebut dan mengubahnya menjadi minyak bumi. Minyak bumi tersebut terperangkap diantara lapisan batuan di dasar lautan. Minyak bumi dapat berpindah dari suatu daerah ke daerah lain dan terdeposit di suatu tempat jika terhalang oleh lapisan yang kedap zat cair dan gas (*impervious layer*). Proses terbentuknya minyak bumi dijelaskan berdasarkan dua teori, yaitu:

1) Teori Anorganik

Teori Anorganik menyatakan bahwa minyak bumi berasal dari reaksi kalsium karbida, CaC_2 (dan reaksi antara batuan karbonat dan logam alkali) dan air menghasilkan asetilen yang dapat berubah menjadi minyak bumi pada temperatur dan tekanan tinggi.

$\text{CaCO}_3 + \text{Alkali} \rightarrow \text{CaC}_2 + \text{HO} \rightarrow \text{HC} = \text{CH} \rightarrow \text{Minyak bumi}$

2) Teori Organik

Teori Organik menyatakan bahwa minyak bumi terbentuk dari proses pelapukan dan penguraian secara anaerob jasad renik (mikroorganisme) dari tumbuhan laut dalam batuan berpori.

Pembentukan dari minyak bumi dihasilkan dari pelapukan jasad renik hingga memiliki komponen penyusun yang terendap pada antiklinal atau cekungan dengan komponen senyawa karbon dan hidrogen. Komponen minyak bumi merupakan hidrokarbon yang biasa disebut total petroleum hidrokarbon (TPH). Hidrogen dan karbon adalah penyusun utama dari minyak bumi. Oleh karena penyusun terbesar dari hidrogen dan karbon, maka penyusun dari minyak bumi disebut petroleum hidrokarbon [8].

Pencemaran pada lingkungan pesisir terjadi di perairan manapun diseluruh dunia terutama bila terjadi tumpahan minyak ke laut (*oil spill*) yang mengakibatkan terjadinya pencemaran. Dampak kebocoran minyak ini dapat terjadi di perairan dan daratan. Di laut sering terjadi pencemaran oleh minyak dari tangki yang bocor. Adanya minyak pada permukaan air menghalangi kontak antara air dengan udara sehingga kadar oksigen berkurang. Dampak kebocoran dari minyak bumi baik dari eksplorasi minyak di tengah laut maupun kegiatan melaut menyebabkan tanah atau pasir pada pesisir

tercemar limbah B3 akibat konsentrasi minyak. Hal ini mengakibatkan efek jangka pendek dan jangka panjang [20].

C. Pencemaran Minyak Bumi terhadap Wilayah Pesisir

Limbah minyak bumi di laut memiliki karakteristik. Minyak bumi yang mencemari lingkungan mengalami proses selama menyebar dan terdispersi. Beberapa faktor utama yang mempengaruhi perubahan sifat minyak adalah:

- Karakteristik fisika minyak, khususnya *specific gravity*, viskositas dan trayek didih.
- Komposisi dan karakteristik kimiawi minyak.
- Kondisi meteorologi sinar matahari dan temperatur udara.
- Karakteristik air laut (pH, *specific gravity*, arus, temperatur, keberadaan bakteri, nutrien, dan oksigen terlarut serta padatan tersuspensi) [21].

Proses fisika-kimia yang bertanggung jawab pada transformasi hidrokarbon minyak bumi antara lain adalah penyebaran, penguapan, disperse, emulsifikasi, disolusi, sedimentasi, dan oksidasi. Minyak yang bocor sebagian menguap ke atmosfer. Partikel minyak yang besar jatuh ke dalam laut. Minyak yang memiliki *specific gravity* lebih kecil dari air laut akan menyebar dan terdispersi mengikuti kecepatan angin dan ombak. Jika tidak ada penanganan yang segera dilakukan, minyak dapat menuju dan terakumulasi di pesisir. Perhitungan kecepatan terdispersinya minyak bumi ke pesisir inilah menjadi perhitungan dalam menentukan konsentrasi yang masuk hingga pesisir. Kebocoran minyak terjadi di lingkungan laut akan mengalami serangkaian perubahan atau peluruhan (*weathering*) atas sifat fisik dan kimiawi. Sebagian perubahan tersebut mengarah pada hilangnya beberapa fraksi minyak dari permukaan laut, sementara perubahan lainnya berlangsung dengan masih terdapatnya bagian material minyak di permukaan laut. Meskipun minyak yang tumpah pada akhirnya akan terurai oleh lingkungan laut, namun waktu yang dibutuhkan untuk itu tergantung pada karakteristik awal fisik dan kimiawi minyak dan proses *weathering* minyak secara alamiah. Penjabaran proses minyak bumi di laut yaitu diawali *spreading* hingga terdegradasi.

D. Tumbuhan Mangrove

Pembagian tipe mangrove dibagi menjadi 4 zona yaitu zona mangrove daratan, tengah, terbuka, dan payau. Mangrove daratan merupakan zona terdalam di belakang zona mangrove sejati. Pada zona ini dapat dijumpai jenis-jenis mangrove asosiasi. Selanjutnya mangrove tengah, zona ini terletak di belakang zona terbuka. Umumnya didominasi oleh *Rhizophora* dan *Bruguiera*. Lalu zona mangrove terbuka, bagian ini berhadapan dekat dengan laut yang didominasi oleh *Sonneratia* dan *Avicennia*. *Rhizophora* terkadang juga terdapat pada zona ini. Lalu mangrove payau, zona ini berada hampir zona tawar. Biasanya didominasi oleh komunitas *Nypa* atau *Sonneratia* [22].

Tumbuhan mangrove memiliki ciri-ciri ekologi mangrove sebagai berikut:

- Jenis tanahnya berlumpur, berempung atau berpasir.
- Lahannya tergenang air laut dan pasokan air tawar yang cukup dengan salinitas <38 ppt.

- Suhu udara dengan fluktuasi musiman tidak lebih dari 5°C dan suhu rata-rata >20°C.
- Arus laut tidak terlalu deras, terlindungi dari angin kencang dan gempuran ombak yang kuat.
- Topografi pantai datar atau landai [23].

E. Degradasi Polutan Minyak Bumi dengan Fitoremediasi oleh Tumbuhan Mangrove

Tumbuhan dalam meremediasi pencemar melakukan mekanisme untuk mendegradasinya. Mekanisme fitoremediasi dilakukan oleh tumbuhan dengan diambilnya pencemar dari tanah oleh akar. Proses fitoremediasi secara umum dibedakan berdasarkan mekanisme fungsi dan struktur tumbuhan. Tumbuhan dalam mendegradasi pencemar organik yang dalam kasus ini merupakan polutan petroleum hidrokarbon melakukan mekanisme rizodegradasi pada akar, fitodegradasi dalam tumbuhan, dan fitovolatilisasi pada daun. Secara umum klasifikasi proses fitoremediasi untuk pencemar organik khususnya polutan minyak bumi adalah sebagai berikut:

- Rizodegradasi
Rizodegradasi yaitu polutan diuraikan oleh mikroba dalam tanah, yang diperkuat atau sinergis oleh ragi, fungi, dan zat-zat keluaran akar tumbuhan (eksudat) yaitu gula, alkohol, asam. Eksudat itu merupakan makanan mikroba yang menguraikan polutan maupun biota tanah lainnya. Proses ini adalah tepat untuk dekontaminasi zat organik. Mekanisme rizodegradasi membutuhkan mikroorganisme dalam melakukan degradasi pada pencemar khususnya polutan minyak bumi.
- Fitodegradasi
Fitodegradasi merupakan proses yang dilakukan oleh tumbuhan untuk menguraikan zat kontaminan yang mempunyai rantai molekul yang kompleks menjadi bahan yang tidak berbahaya dengan bantuan enzim. Fitodegradasi yaitu organ tumbuhan menguraikan polutan yang diserap melalui proses metabolisme tumbuhan atau secara enzimatis [24]. Bakteri pembantu proses rizodegradasi yaitu *Marinobacter*, *Oceanobacter*, *Alcanivorax*, *Thalassospira*, *Stappia*, *Bacillus*, *Novospingobium*, *Pseudomonas*, *Spingobium*, dan *Rhodobacter*. Bakteri ini mampu meremediasi polutan minyak bumi menjadi senyawa non-toksik dengan memecah rantai karbonnya. Sedangkan mekanisme fitodegradasi membutuhkan enzim tertentu dalam mendegradasi pencemar organik misalnya polutan minyak bumi atau petroleum hidrokarbon. Enzim dalam proses fitodegradasi yaitu enzim dehalogenase dan oksigenase.
- Fitovolatilisasi
Fitovolatilisasi merupakan suatu proses tumbuhan mengubah pencemar menjadi bahan volatil yang aman bagi lingkungan. Fitovolatilisasi yaitu penyerapan polutan oleh tumbuhan dan dikeluarkan dalam bentuk uap cair ke atmosfer. Kontaminan bisa mengalami transformasi sebelum lepas ke atmosfer.

F. Penerapan Degradasi Mangrove pada Pencemaran Minyak Bumi di Pesisir Karawang, Jawa Barat

Pemetaan karakteristik pantai dilakukan untuk memberikan gambaran umum morfologi untuk dilakukan pengecekan

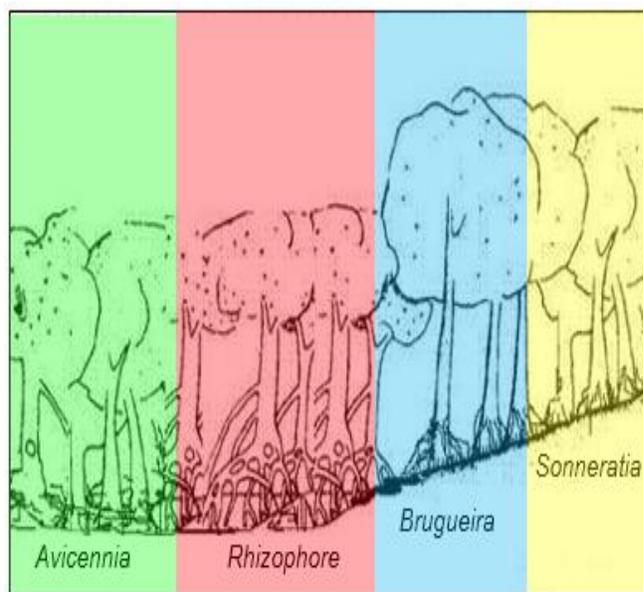
Tabel 1.
Hasil Perhitungan Bibit Tumbuhan per 100 Meter Panjang Pesisir

Zona Mangrove	Jenis Tumbuhan	Jarak Pesisir dari Daratan ke Perairan (m)	Jumlah Bibit Tumbuhan
Daratan	<i>Sonneratia</i>	200	100
Tengah	<i>Brugueira</i>	200	100
Terbuka	<i>Rhizophore</i>	800	400
Payau	<i>Avicennia</i>	800	400

kesesuaian ekologi mangrove. Formasi batuan yang menyusun daerah dan sekitarnya didominasi oleh endapan aluvium yang terdiri dari lanau, pasir dan kerikil [25]. Pasang surut di daerah penelitian termasuk kedalam tipe pasang surut bertipe campuran condong ke harian ganda dengan magnitudo formahzl 1,202. Pesisir Karawang memiliki gelombang pasang surut dengan gelombang rendah [26]. Penampang melintang dasar Perairan Cilamaya, Karawang Nilai rata-rata kemiringan (*slope*) dasar perairan Cilamaya sebesar 0,76⁰. Nilai tersebut masuk dalam kategori kelas 1 dengan morfologi dasar perairan datar atau hampir datar (*flat to almost flat*) karena memiliki nilai kelereng diantara 0–2% [27]. Sebagian besar pantai di Jawa dan Sumatra merupakan pantai dengan karakteristik pasir dan lumpur dengan kemiringan yang landai. Pada pantai dengan kemiringan kecil memiliki karakteristik gelombang laut yang relatif kecil dan tenang. Sedimen dasar *muddy sand* mendominasi jenis sedimen yang ada di perairan. Adanya sungai pada daerah penelitian dimungkinkan mempengaruhi area sebaran sedimen dasar *muddy sand* sehingga pada pada stasiun dekat dengan pantai ditemukan sedimen *muddy sand*. Sedimen jenis *muddy sand* memiliki ukuran butir lebih kecil dari 1 mm dan sangat mudah terbawa oleh arus mengikuti pola arus dominan di perairan. Sedimen jenis *muddy sand* pada daerah lepas pantai cenderung bergerak secara suspended load transport sedimen akan bergerak bersama masa air dan selalu terjaga diatas dasar perairan oleh turbulensi air laut [28]. Karakteristik pesisir Karawang merupakan air laut dengan salinitas 31-34 ppt. Suhu terdingin di Pesisir Karawang adalah 25,74⁰C dan tertinggi 35⁰C. Karakteristik ini menunjukkan bahwa Pesisir Karawang memenuhi kriteria dalam penanaman tumbuhan mangrove.

Setelah dilakukan pengangkutan minyak bumi dari Pesisir Karawang konsentrasi minyak bumi di pesisir karawang mencapai konsentrasi 10%. Konsentrasi TPH maksimum yang diijinkan untuk mengolah tanah tercemar dengan remediasi adalah 15%. Jika terdapat konsentrasi hidrokarbon minyak bumi di atas 15% maka harus dilakukan pengolahan terlebih dahulu yang tujuannya adalah pemanfaatan. Salah satu contohnya adalah *oil recovery*. KLH mempertimbangkan bahwa konsentrasi TPH >15% masih memiliki potensi pemanfaatan [29]. Konsentrasi hidrokarbon minyak bumi pada <10.000 mg/kg atau 1% tidak menyebabkan dampak negatif pada pertumbuhan berbagai tumbuhan ataupun perlindungan pada air tanah. Angka 1% ini kemudian digunakan oleh beberapa negara bagian di US untuk aplikasi pengolahan tanah tercemar di Industri migas [30]. Oleh karena itu, angka 1% digunakan sebagai target konsentrasi akhir remediasi di Indonesia.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa perubahan relatif kecil terhadap keanomalian pertumbuhan dan perkembangan



Gambar 1. Penanaman Skenario Berdasarkan Zonasi Mangrove.

Keterangan:

- : Zona Mangrove Payau
- : Zona Mangrove Terbuka
- : Zona Mangrove Tengah
- : Zona Mangrove Daratan

mangrove akibat terpengaruh polutan minyak. *Rhizophora mucronata* mampu menurunkan TPH tertinggi di antara empat spesies mangrove lainnya. Selain itu, jenis mangrove *Rhizophora* lebih toleran dibandingkan dengan jenis mangrove lainnya. Kemampuan empat jenis mangrove dalam mendegradasi pencemar telah diteliti. *Avicennia*, *Rhizophora*, *Bruguiera*, dan *Sonneratia* masing-masing tumbuhan rata-rata dapat mendegradasi pencemar sebanyak 3% dalam 6 minggu [24].

Skenario penanaman diambil sesuai dengan peletakkan jenis mangrove sesuai zonasi tempat tumbuh. Skenario menggunakan 4 zonasi mangrove asia pasifik yang karakteristiknya sama dengan hutan mangrove yang ada di Indonesia. Penanaman tumbuhan mangrove dilakukan dengan pertimbangan kemampuan *removal* pencemar serta keberadaan di Indonesia. Mangrove jenis *Avicennia* dapat tumbuh pada zona payau atau terdekat dengan perairan laut. *Sonneratia* yang memiliki kapasitas terbesar berada pada mangrove terbuka, di belakang zona mangrove payau. Selanjutnya ditanami tumbuhan dengan *Bruguiera*, dan mangrove daratan ditanami oleh mangrove *Sonneratia*.

Penanaman dilakukan dengan perbandingan luas lahan penanaman empat zonasi mangrove. Penanaman dengan perbandingan dilakukan karena pencemaran berada pada perairan pesisir zona mangrove payau dan terbuka, air pasang surut masuk ke dalam daratan lebih panjang. Penanaman mangrove pada zona tengah dan daratan dilakukan penanaman untuk mendegradasi minyak bumi yang mencemari daratan pesisir. Penanaman dengan variasi ini dilakukan agar hutan mangrove memiliki ragam jenis yang hetero. Pengalokasian keempat jenis empat jenis mangrove ini dapat tumbuh pada zona yang berbeda-beda [13].

Pesisir Karawang memiliki jarak rata-rata 2 km atau 2000 meter dari pesisir daratan ke laut. Panjang dari Pesisir Karawang diambil 100 meter karena karakteristik sepanjang pesisir sama. *Plotting* penanaman tumbuhan dilakukan dengan jumlah perbandingan yaitu 4:4:1:1 dengan zona mangrove payau: mangrove terbuka: mangrove tengah: mangrove daratan dengan meninjau jarak pesisir daratan dan laut. Jarak tanam ideal untuk tumbuhan bertajuk kecil seperti mangrove adalah 1m x 1m [31]. Perhitungan dari skenario penanaman bibit mangrove per 100 meter terdapat pada Tabel 1.

Pengamatan pada enam minggu menunjukkan rata-rata penurunan TPH 38,1% dari konsentrasi minyak 10%. Sementara pengamatan pada minggu kedua belas menunjukkan rata-rata penurunan TPH 81,6% dari konsentrasi minyak 10% menggunakan keempat jenis tumbuhan mangrove. Keempat jenis mangrove dengan skenario tersebut dalam 12 minggu mampu menurunkan TPH sebesar didapatkan 81,6%. Jika dihitung TPH tersisa maka konsentrasi menjadi 1,84%. Mangrove yang telah telah berumur lebih dari 10 tahun, dilaporkan terjadi kematian setelah tercemar oleh tumpahan minyak bumi. Hal itu diduga karena terjadinya dua proses. proses pertama yaitu secara fisik terjadi penutupan pada permukaan jaringan vital tumbuhan oleh minyak, seperti daun dan akar yang mengakibatkan terhambatnya fotosintesis, pertukaran gas dan peningkatan suhu melalui peningkatan absorpsi radiasi. Proses kedua yaitu kematian mangrove karena keracunan minyak bumi. Namun pada proses kedua jarang dijumpai pada mangrove, kemungkinan minyak menghambat proses desalinasi atau osmoregulasi pada mangrove [24].

IV. KESIMPULAN

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

- 1) Pencemaran minyak bumi pada pesisir disebabkan oleh proses *spreading* akibat faktor kecepatan angin dan arah gelombang air laut. Polutan minyak bumi menyebabkan *lethal* biota laut secara mendadak dan akumulasi pencemaran minyak yang menyebabkan kecacatan pada makhluk hidup serta kerusakan bagi ekosistem. Metode penanganan biologi khususnya fitoremediasi lebih dapat kontinyu dalam mendegradasi polutan minyak bumi.
- 2) Mekanisme yang berperan dalam fitoremediasi oleh mangrove pada polutan minyak bumi adalah rizodegradasi pada zona akar, lalu fitodegradasi pada bagian tubuh tumbuhan, dan fitovolatilasi pada daun.
- 3) Hasil studi kasus tumpahan minyak bumi pada kasus kebocoran minyak di sumur YYA-1 Pesisir Karawang menyatakan bahwa metode fitoremediasi merupakan salah satu alternatif dalam mendegradasi polutan minyak bumi dan merehabilitasi pencemaran pada pesisir. Skenario penanaman tumbuhan mangrove yaitu menggunakan empat jenis mangrove berupa *Avicennia*, *Rhizophora*, *Bruguiera*, dan *Sonneratia* sesuai zonasi mangrove. Konsentrasi pencemar minyak bumi di pesisir karawang sebesar 10%. Konsentrasi *removal* adalah 81,6% dengan perhitungan sisa TPH dalam remediasi menggunakan mangrove adalah 1,84%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Gultom, "Pelabuhan Indonesia sebagai Penyumbang Devisa Negara dalam Perspektif Hukum Bisnis," *Kanun J. Ilmu Huk.*, vol. 19, no. 3, pp. 419–444, 2017.
- [2] "Terbaru: Panjang Garis Pantai Indonesia Capai 99.000 Kilometer - National Geographic." <https://nationalgeographic.grid.id/read/13285616/terbaru-panjang-garis-pantai-indonesia-capai-99000-kilometer> (accessed Apr. 05, 2020).
- [3] B. Pramudyanto, "Pengendalian Pencemaran dan Kerusakan di Wilayah Pesisir," *J. Lingk. Widyaiswara*, vol. 1, no. 4, pp. 21–40, 2014.
- [4] S. Sulistyono, "Dampak Tumpahan Minyak (Oil Spill) di Perairan Laut pada Kegiatan Industri Migas dan Metode Penanggulangannya," *Swara Patra*, vol. 3, no. 1, 2013.
- [5] V. Kumar, P. Vikas, S. R. Saruchi, A. Masih, and N. C. Kothiyal, "A preliminary effort to reduce carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons from diesel exhaust by using different blends of diesel and synthesized biodiesel," *Glob. Nest J.*, vol. 20, no. 2, pp. 389–398, 2018.
- [6] B. Comer, N. Olmer, X. Mao, B. Roy, and D. Rutherford, "Black carbon emissions and fuel use in global shipping, 2015," *Int. Counc. Clean Transp.*, vol. 1225, 2017.
- [7] B. Hamuna, R. H. Tanjung, H. MAury, and others, "Kajian kualitas air laut dan indeks pencemaran berdasarkan parameter fisika-kimia di perairan Distrik Depapre, Jayapura," 2018.
- [8] J. W. Doerffer, *Oil spill response in the marine environment*. Elsevier, 2013.
- [9] Y. Oh, K., Cao, T., Li, T., Cheng, "Study on Application of Phytoremediation Technology in Management and Remediation of Contaminated Soils," *J. Clean Energy Technol.* 2, 3216-220, 2014.
- [10] S. Sharma, P., Tomar, P. C., Chpadsaonkar, "Phytoremediation of Indoor Pollution," *World J. Pharm. Res.* 8, 72136-2143., 2019.
- [11] B. R. D. Harnani and H. S. Titah, "Kemampuan *Avicennia alba* untuk menurunkan konsentrasi tembaga (Cu) di muara sungai Wonorejo, Surabaya," *J. Tek. ITS*, vol. 6, no. 2, pp. F219–F223, 2017.
- [12] N. Muddarisna and B. D. Krisnayanti, "Selection of mercury accumulator plants for gold mine tailing contaminated soils," *J. Degrad. Min. Lands Manag.*, vol. 2, no. 3, p. 341, 2015.
- [13] D. Saptarini, F. M. Kamal, N. D. Kuswytasari, and A. Sulisetyono, "Menjelajah Mangrove Surabaya," Surabaya, 2012.
- [14] "United States Environmental Protection Agency," Summary of the Shore Protection Act, 2003.
- [15] G. L. Pickard and W. J. Emery, *Descriptive physical oceanography: an introduction*. Elsevier, 2016.
- [16] A. L. Shalowitz, "Shore and Sea Boundaries with Special Reference to the Interpretation and Use of Coast and Geodetic Survey Data," Washington, DC: US Government Printing Office, US Department of Commerce, Coast and Geodetic Survey, 1964.
- [17] U.-U. R. I. Nomor, "tahun 2007 tentang pengelolaan wilayah pesisir dan pulau-pulau kecil," *Lembaran Negara Republik Indones. Nomor*, vol. 4739, 27AD.
- [18] J. W. Nybakken, "Biologi laut," *Suatu Pendekatan Ekol. PT Gramedia. Jakarta*, pp. 325–363, 1992.
- [19] *Peraturan Perundang-Undangan No 44 Tahun 1960. Pertambangan Minyak dan Gas Bumi.*
- [20] T. S. Agardy, *Marine protected areas and ocean conservation*. Academic Press, 1997.
- [21] N. E. Baker, M. Mlodzik, and G. M. Rubin, "Spacing differentiation in the developing *Drosophila* eye: a fibrinogen-related lateral inhibitor encoded by *scabrous*," *Science (80-)*, vol. 250, no. 4986, pp. 1370–1377, 1990.
- [22] Noor, "Ekosistem Hutan Mangrove dan Peranannya sebagai Habitat Berbagai Biota," *Oseana* 26, 413-23, 1999.
- [23] Wayono, *Biodiversitas*. Jakarta: Erlangga, 2000.
- [24] T. Titiresmi and T. Handayani, "Pengujian Toleransi Mangrove Muda Terhadap Cemar Minyak Bumi," *J. Teknol. Lingkung.*, vol. 13, no. 3, pp. 261–268, 2012.
- [25] Kastowo, *Mengenal Geologi dan Bumi*. Jakarta: ESDM, 1996.
- [26] Y. Yuwono and B. F. Sidad, "Studi tentang pembangunan pelabuhan cilamaya ditinjau dari aspek teknis (Studi Kasus: Pelabuhan Cilamaya Karawang)," *Geoid*, vol. 12, no. 2, pp. 173–180, 2018.
- [27] B. Triatmodjo, *Teknik Pantai*. Yogyakarta: Beta Offset, 2008.
- [28] A. Satriadi, "Studi batimetri dan jenis sedimen dasar laut di Perairan Marina, Semarang, Jawa Tengah," *Bul. Oseanografi Mar.*, vol. 1, no. 5, pp. 53–62, 2012.
- [29] 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.

[30] J. L. Saterbak, *Bioengineering Fundamentals*. US: CRC Pres, 1993.

[31] Wibisono, *Manajemen Kinerja*. Jakarta: Erlangga., 2006.