

TUGAS AKHIR - RE 184804

**KAJIAN TEKNIK BIOAUGMENTASI DAN BIOSTIMULASI
UNTUK MENDEGRADASI TUMPAHAN MINYAK MENTAH DI
LINGKUNGAN LAUT**

RIZAL JAMIL BAHRIANSYAH

NRP 0321184000026

Dosen Pembimbing:

Prof. Dr. Ir. Sarwoko Mangkoedihardjo, MScES

NIP 19540824 198403 1 001

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN

Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



TUGAS AKHIR - RE 184804

Kajian Teknik Bioaugmentasi dan Biostimulasi Untuk Mendegradasi Tumpahan Minyak Mentah Di Lingkungan Laut

RIZAL JAMIL BAHRIANSYAH

NRP 03211840000026

Dosen Pembimbing:

Prof. Dr. Ir. Sarwoko Mangkoedihardjo, MScES

NIP 19540824 198403 1 001

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN

Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



FINAL PROJECT - RE 184804

**STUDY OF BIOAUGMENTATION AND BIOSTIMULATION
TECHNIQUE TO DEGRADE PETROLEUM CRUDE OIL
SPILL ON THE MARINE ENVIRONMENT**

RIZAL JAMIL BAHRIANSYAH

NRP 0321184000026

Advisor:

Prof. Dr. Ir. Sarwoko Mangkoedihardjo, MScES

NIP 19540824 198403 1 001

DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING

Faculty of Civil, Planning, and Geo Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

LEMBAR PENGESAHAN

KAJIAN TEKNIK BIOAUGMENTASI DAN BIOSTIMULASI UNTUK MENDEGRADASI TUMPAHAN MINYAK MENTAH DI LINGKUNGAN LAUT

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
Memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh: **RIZAL JAMIL BAHRIANSYAH**

NRP. 03211840000026

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Prof. Dr. Ir. Sarwoko Mangkoedihardjo, M.Sc.ES

Pembimbing

2. Bieby Voijant Tangahu, S.T., M.T., Ph.D

Penguji

3. Harmin Sulistiyaning Titah, S.T., M.T., Ph.D

Penguji

4. Dr. Ir. R Irwan Bagyo Santoso, M.T

Penguji



PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Rizal Jamil Bahriansyah / 03211840000026
Departemen : Teknik Lingkungan
Dosen Pembimbing / NIP : Prof. Dr. Ir. Sarwoko Mangkoedihardjo, M.Sc.ES. /
19540824 198403 1 001

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Kajian Teknik Bioaugmentasi dan Biostimulasi untuk Mendegradasi Tumpahan Minyak Mentah di Lingkungan Laut” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 26 Juli 2022

Mengetahui
Dosen Pembimbing

Mahasiswa,



(Prof. Dr. Ir. Sarwoko Mangkoedihardjo, M.Sc.ES.)
NIP. 19540824 198403 1 001



(Rizal Jamil Bahriansyah)
NRP. 03211840000026

KAJIAN TEKNIK BIOAUGMENTASI DAN BIOSTIMULASI UNTUK MENDEGRADASI TUMPAHAN MINYAK MENTAH DI LINGKUNGAN LAUT

Nama Mahasiswa / NRP : Rizal Jamil Bahriansyah / 0321184000026
Departemen : Teknik Lingkungan
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Sarwoko Mangkoedihardjo, M.Sc.ES

ABSTRAK

Lingkungan laut menjadi lokasi yang sering terdampak tumpahan minyak, baik pada proses produksi maupun distribusi. Penanganan tumpahan minyak seringkali diawali oleh metode fisik kimia untuk melokalisir pencemaran. Diketahui bahwa metode fisik kimia tidak dapat menyisihkan minyak mentah secara tuntas, dan menghasilkan produk olahan yang memerlukan penanganan lanjutan. Oleh karena itu metode bioaugmentasi dan biostimulasi menjadi alternatif penanganan tumpahan minyak mentah di lingkungan laut. Metode bioremediasi dapat mendegradasi minyak mentah secara efektif dan efisien, serta tidak menghasilkan produk yang berbahaya bagi lingkungan. Tujuan dari studi literatur ini untuk mendapatkan teori-teori yang relevan terkait penambahan kultur mikroba dan variasinya, serta pemenuhan kebutuhan nutrisi pada metode bioaugmentasi dan biostimulasi tumpahan minyak mentah.

Penelitian terdahulu mengungkapkan jika biodegradasi tumpahan minyak mentah menggunakan metode bioaugmentasi dan biostimulasi tersebut dapat mencapai 80% hingga 95%. Kecepatan dan efektifitas biodegradasi bergantung pada konsentrasi pencemar, jenis bakteri, dan faktor lingkungan yang memengaruhinya. Data hasil penelitian terdahulu, didapatkan dari penelusuran *website* penyedia literatur dengan kata kunci yang berkaitan dengan topik pembahasan. Dilakukan tabulasi data dan dianalisis menggunakan aplikasi *Mendeley Desktop*. Hasil analisis data disusun menjadi kajian literatur dan diterapkan pada studi kasus tumpahan minyak mentah Teluk Balikpapan 2018 dan *Southern California* 2021.

Proses bioaugmentasi lebih efektif menggunakan konsorsium bakteri dengan karakteristik metabolisme yang beragam. Metode *Two Stage Bioaugmentation Strategy* (TSBS) sangat potensial untuk menjaga laju biodegradasi agar tetap tinggi. Biostimulasi dilakukan dahulu sebelum bioaugmentasi untuk menstimulasi pertumbuhan bakteri indigen. Proses biostimulasi dilakukan dengan penambahan makronutrien dengan rasio C:N:P adalah 100:10:1 yang bersumber dari pupuk urea, *superphosphate*, *Mono Ammonium Phosphate*, dan juga *Osmocote*. Tidak dilakukan penambahan mikronutrien secara khusus karena minyak mentah, air laut, dan pupuk yang ditambahkan terkandung unsur mikronutrien yang dibutuhkan bakteri. Karakteristik Teluk Balikpapan merupakan perairan semi tertutup, sehingga laju *washout* cenderung kecil dibanding *Southern California* yang langsung berbatasan dengan Samudera Pasifik. Diperkirakan proses bioremediasi di Teluk Balikpapan berlangsung lebih lama dibanding kasus *Southern California* 2021. Beberapa faktor yang perlu diperhatikan pada proses bioaugmentasi dan biostimulasi seperti kesesuaian dan kerapatan sel bakteri, jenis pupuk, dan teknik penerapannya.

Kata Kunci: Bioaugmentasi, Biostimulasi, Lingkungan Laut, Remediasi, Tumpahan Minyak Mentah

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

STUDY OF BIOAUGMENTATION AND BIOSTIMULATION TECHNIQUE TO DEGRADE TROLEUM CRUDE OIL SPILL ON THE MARINE ENVIRONMENT

Student Name / NRP : Rizal Jamil Bahriansyah / 0321184000026
Departement : Teknik Lingkungan
Advisor : Prof. Dr. Ir. Sarwoko Mangkoedihardjo, M.Sc.ES

ABSTRACT

The marine environment is often affected by oil spills, both in the production and distribution processes. Handling of oil spills is often preceded by physical and chemical methods to localize the contamination. It is known that the physicochemical method can't completely remove crude oil, and produces refined products that require further handling. Therefore, bioaugmentation and biostimulation methods are an alternative for handling crude oil spills in the marine environment. The bioremediation method can degrade crude oil effectively and efficiently and doesn't produce by products that are harmful to the environment. This literature study aims to obtain relevant theories regarding the addition of microbial cultures and their variations, as well as the fulfillment of nutrient requirements in the crude oil biodegradation process using bioaugmentation and biostimulation methods.

Previous studies have revealed that the biodegradation of crude oil spills using the bioaugmentation and biostimulation method can reach 80% to 95%. The effectiveness and rate of biodegradation depend on the concentration of the pollutant, type of bacteria, and several environmental factors. Previous research was obtained from searching literature website providers with keywords related to the topic of discussion. Data tabulation was performed and analyzed using the Mendeley Desktop application. The results of the data analysis were compiled into a literature review and applied to case studies of the 2018 Balikpapan Bay and 2021 Southern California crude oil spill.

Bioaugmentation is more effective using bacteria consortium with diverse metabolic characteristics. The Two-Stage Bioaugmentation Strategy (TSBS) was the potential method to maintain a high rate of biodegradation. Biostimulation is carried out before bioaugmentation to stimulate the growth of indigenous bacteria. The biostimulation process was carried out by adding macronutrients with a C:N:P ratio of 100:10:1 sourced from Urea, Superphosphate, Mono Ammonium Phosphate, and Osmocote fertilizers. No specific micronutrients were added because the crude oil, seawater, and added fertilizers contained micronutrients needed by bacteria. The characteristics of Balikpapan Bay are semi-enclosed waters, so the rate of movement tends to be small compared to Southern California which is directly facing the Pacific Ocean. It is estimated that the bioremediation process in Balikpapan Bay will take longer than Southern California. Several factors need to be considered in the bioaugmentation and biostimulation process, such as the adjustment and density of bacterial cells, types of fertilizers, and their application techniques.

Keywords: Bioaugmentation, Biostimulation, Crude Oil Spill, Marine Environment, Remediation

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah segala puji syukur kepada Allah Subhanahu Wa Ta'ala atas segala rahmat dan ridho-Nya serta shalawat semoga selalu tercurahkan kepada Nabi Muhammad Shallallahu'alaihi wa sallam, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul "*Kajian Teknik Bioaugmentasi dan Biostimulasi Untuk Mendegradasi Tumpahan Minyak Mentah Di Lingkungan Laut*". Penyusunan tugas besar ini tidak terlepas dari bimbingan dan dukungan berbagai pihak. Tentunya penulis sangat berterimakasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Sarwoko Mangkoedihardjo, MScES selaku dosen pembimbing tugas akhir atas ilmu dan bimbingannya dalam penyusunan tugas akhir ini.
2. Ibu Bieby Voijant Tangahu, S.T., M.T., Ph.D., dan Ibu Harmin Sulistiyaning Titah, S.T., M.T., Ph.D selaku dosen pengarah atas segala arahan dan masukan yang diberikan.
3. Bapak Dr. Ir. R Irwan Bagyo Santoso, M.T atas masukan dan arahnya pada sidang lisan selaku dosen penguji
4. Salam Takzim kepada kedua orang tua penulis yang telah memberikan segalanya, terutama dukungan dan doanya sehingga penyusunan tugas besar ini diberi kelancaran.
5. Kepada teman – teman seperjuangan yang telah saling dukung dan bertukar pikiran serta ilmu mengenai penyusunan tugas akhir ini.

Penulis berharap semoga segala kebaikan serta dukungan yang diberikan mendapatkan balasan yang lebih baik oleh Allah Subhanahu Wa Ta'ala. Sebagaimana manusia biasa, penyusunan laporan ini tidak terlepas dari kesalahan dan kekurangan. Maka dari itu penulis sangat terbuka terhadap kritik dan saran pada laporan ini. Semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan terlebih kepada penulis sendiri di masa yang akan datang.

Surabaya, 26 Juli 2022

Penulis

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR.....	x
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Ruang Lingkup.....	2
1.5 Manfaat.....	3
BAB II METODE STUDI.....	5
2.1 Kerangka Studi.....	5
2.2 Metode Studi	7
2.2.1 Ide Studi	7
2.2.2 Pengumpulan Data	8
2.2.3 Studi Kasus	9
2.2.4 Hasil dan Pembahasan	9
2.2.5 Kesimpulan dan Saran	9
BAB III HASIL DAN PEMBAHASAN	11
3.1 Perairan Laut	11
3.1.1 Karakteristik Perairan Laut Beriklim Tropis	12
3.1.2 Karakteristik Perairan Laut beriklim subtropis	16
3.2 Pencemaran Minyak Mentah di Lingkungan Laut.....	19
3.2.1 Penyebab Tumpahan Minyak Mentah di Lingkungan Laut	19
3.2.2 Metode Pengambilan Sampel Uji TPH, Nutrien, dan <i>Coliform</i> di Perairan Laut.....	20
3.2.3 Metode Pengukuran TPH.....	22
3.2.4 Komposisi Minyak Mentah.....	23
3.2.5 Karakteristik Tumpahan Minyak Mentah di Lingkungan Laut	26
3.3 Bioremediasi.....	27
3.3.1 Pengenalan Bioremediasi.....	27
3.3.2 Faktor-Faktor yang Berpengaruh Pada Efektifitas Bioremediasi	28
3.4 Bioaugmentasi	29
3.4.1 Bakteri Hidrokarbonoklastik.....	30
3.4.2 Proses Enzimatis dan Metabolisme Hidrokarbon	33
3.4.3 Mikroba <i>Indigenous</i> dan <i>Exogenous</i>	39
3.4.4 Mikroba Kultur Tunggal dan Campuran / Konsorsium.....	44
3.5 Biostimulasi.....	47
3.5.1 Makronutrien Mikroba dan sumbernya	49
3.5.2 Mikronutrien Mikroba dan sumbernya	54
3.6 Tahapan Proses Bioaugmentasi dan Biostimulasi (Simultan / Bertahap)	55
BAB IV STUDI KASUS.....	61
4.1 Deskripsi Wilayah Studi Kasus.....	61
4.1.1 Deskripsi Wilayah Teluk Balikpapan	61
4.1.2 Deskripsi Wilayah <i>Southern California</i>	63
4.2 Kasus Tumpahan Minyak Mentah	64

4.2.1 Kasus Tumpahan Minyak di Teluk Balikpapan 2018.....	64
4.2.2 Kasus Tumpahan Minyak di <i>Southern California</i> 2021	68
4.3 Dampak Tumpahan Minyak	70
4.3.1 Dampak Tumpahan Minyak di Teluk Balikpapan	70
4.3.2 Dampak Tumpahan Minyak Mentah <i>Southern California</i> 2021.....	72
4.4 Penanganan Eksisting Kasus	73
4.4.1 Penanganan Eksisting Kasus Teluk Balikpapan	73
4.4.2 Penanganan Eksisting Kasus <i>Southern California</i>	74
4.5 Alternatif Penanganan Menggunakan Metode Bioaugmentasi dan Biostimulasi	75
4.5.1 Metode Biostimulasi Studi Kasus	78
4.5.2 Metode Bioaugmentasi Studi Kasus.....	90
4.6 <i>Standard Operating Procedure</i> (SOP) Bioaugmentasi Biostimulasi	94
4.6.1 SOP Bioaugmentasi Biostimulasi Kasus Teluk Balikpapan 2018	94
4.6.2 SOP Bioaugmentasi Biostimulasi Kasus <i>Southern California</i> 2021.....	102
4.7 Perbandingan Aplikasi Bioaugmentasi dan Biostimulasi Kedua Studi Kasus	105
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	109
5.1 Kesimpulan.....	109
5.2 Saran	109
DAFTAR PUSTAKA	111
BIOGRAFI PENULIS	123
LEMBAR ASISTENSI TUGAS AKHIR	124

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Baku Mutu Air Laut untuk Biota Laut	12
Tabel 3.2 Karakteristik Fisik Air Laut Beriklim Tropis	14
Tabel 3.3 Kandungan Nutrien dan TSS Air Laut Beriklim Tropis	15
Tabel 3.4 Karakteristik Fisik Air Laut Beriklim Subtropis	17
Tabel 3.5 Kandungan Nutrien dan Air Laut Beriklim Subtropis	18
Tabel 3.6 Komponen Hidrokarbon dan Nonhidrokarbon pada Minyak Bumi.....	23
Tabel 3.7 Jenis Hidrokarbon.....	23
Tabel 3.8 Komponen Non Hidrokarbon Pada Minyak Mentah	25
Tabel 3.9 Bakteri Berdasarkan Senyawa Target Optimum Biodegradasi Minyak Mentah	32
Tabel 3.10 Macam-Macam Biosurfaktan dan Mikroba Penghasilnya	37
Tabel 3.11 Kemampuan <i>Removal</i> Minyak Mentah Bakteri <i>Indigenous</i> dan <i>Exogenous</i>	41
Tabel 3.12 Kemampuan Removal Minyak Mentah Konsorsium Bakteri dan Bakteri Strain Tunggal	45
Tabel 3.13 Unsur Penyusun Sel Bakteri dan Minyak Mentah	49
Tabel 3.14 Hasil Penelitian Terdahulu Terkait Biostimulasi	52
Tabel 3.15 Fungsi Seluler Mikronutrien Terhadap Bakteri.....	54
Tabel 3.16 Efisiensi Degradasi Minyak Mentah Menggunakan Metode Biostimulasi dan Bioaugmentasi	58
Tabel 4.1 Potensi Penyisihan Minyak Mentah Pada Masing-Masing <i>Oil Skimmer</i>	77
Tabel 4.2 Rencana Jadwal Penanganan Bioaugmentasi dan Biostimulasi Kasus Teluk Balikpapan	101
Tabel 4.3 Rencana Jadwal Penanganan Bioaugmentasi dan Biostimulasi Kasus <i>Southern California</i>	105
Tabel 4.4 Tabulasi Pengaplikasian Bioaugmentasi dan Biostimulasi Pada Studi Kasus	106

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Alur Metode Studi.....	7
Gambar 3.1 Zona Ekosistem Laut.....	11
Gambar 3.2 Proses Transformasi, Variasi, dan Perubahan Tumpahan Minyak Mentah di Lingkungan Laut.....	27
Gambar 3.3 Perubahan Kondisi Minyak Mentah Pada Proses Bioaugmentasi	30
Gambar 3.4 Kurva Sigmoid	31
Gambar 3.5 Skema Jalur Degradasi Hidrokarbon Oleh Mikroba.....	34
Gambar 3.6 Tiga Jalur Periferai Degradasi Hidrokarbon Alifatik oleh Mikroba	35
Gambar 3.7 Skema Degradasi Hidrokarbon Aromatik oleh Mikroba	36
Gambar 3.8 Struktur Biosurfaktan (<i>Rhamnolipid</i>).....	37
Gambar 3.9 Ilustrasi Proses Bioremediasi <i>Oil Spill</i> di Lingkungan Laut.....	48
Gambar 3.10 Siklus Unsur Nitrogen pada Perairan Laut	50
Gambar 3.11 Siklus Unsur Fosfor pada Perairan Laut	51
Gambar 4.1 Teluk Balikpapan	61
Gambar 4.2 Visualisasi kondisi Temperatur, Salinitas dan Klorofil	62
Gambar 4.3 Wilayah <i>Southern California</i>	63
Gambar 4.4 Kondisi Kebakaran Kapal dan Permukaan Laut di Teluk Balikpapan	64
Gambar 4.5 Peta Sebaran Tumpahan Minyak Mentah Teluk Balikpapan 2018.....	65
Gambar 4.6 Rute Pipa Distribusi Minyak Mentah dan Posisi Kapal MV Ever Judger	67
Gambar 4.7 Pengangkatan Patahan Pipa Pertamina dari Dasar Laut	68
Gambar 4.8 Peta Platform Elly dan Jalur Pipa <i>San Pedro Bay</i>	69
Gambar 4.9 Pergerakan Lapisan Minyak di Lepas Pantai <i>Southern California</i>	70
Gambar 4.10 Kondisi Pencemaran Minyak Mentah di Sekitar Teluk Balikpapan.....	71
Gambar 4.11 Arah Arus Teluk Balikpapan	72
Gambar 4.12 Dampak Tumpahan Minyak Mentah di <i>Southern California</i>	72
Gambar 4.13 Penanganan Tumpahan Minyak Mentah di Teluk Balikpapan.....	74
Gambar 4.14 Proses Pembersihan Tumpahan Minyak Mentah di <i>Southern California</i>	75
Gambar 4.15 Penggunaan <i>oil boom</i> dan <i>oil skimmer</i>	77
Gambar 4.16 Variasi Kemampuan <i>Removal</i> TPH oleh Beberapa Metode	79
Gambar 4.17 Proyeksi Ketebalan Lapisan Minyak Mentah di Permukaan Laut.....	80
Gambar 4.18 Sketsa Dispersi Minyak Mentah dan Nutrien	97

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Minyak mentah (*crude oil*) merupakan campuran cairan yang terdiri dari jutaan senyawa kimia, yang secara umum merupakan senyawa hidrokarbon yang terbentuk dari dekomposisi organisme tumbuhan, hewan, dan jasad renik sejak jutaan tahun lalu (Syarah, 2019). Minyak mentah merupakan bahan baku bagi beberapa produk terutama untuk bahan bakar. Hasil turunan minyak mentah dibagi menjadi produk kilang minyak (bahan bakar, aspal, oli, dan lain-lain) dan petrokimia (pupuk, insektisida, polimer, monomer, plastik, bahan peledak dan lain-lain) (Wiyantoko, 2016). Beragamnya produk turunan dari minyak mentah dan besarnya manfaat yang dirasakan, menyebabkan permintaannya terus meningkat. Minyak mentah dieksplorasi dari dasar batuan pada lapisan kerak bumi baik di daratan maupun lautan.

Proses eksplorasi, produksi, hingga distribusi minyak mentah tak lepas dari resiko pencemaran lingkungan. Seperti yang diketahui minyak mentah merupakan senyawa yang berbahaya dan beracun karena bersifat karsinogenik dan mutagenik (Astuti and Titah, 2020). Masuknya minyak mentah ke suatu ekosistem akan mengakibatkan rusaknya ekosistem tersebut. Eksplorasi minyak mentah sering kali mengalami kecelakaan yang berujung pada pencemaran lingkungan seperti kasus Lapindo Brantas di Sidoarjo yang menyebabkan semburan lumpur beracun dan terus berlangsung hingga saat ini. Proses produksi juga tak lepas dari kecelakaan seperti yang terjadi pada Kasus *Deepwater Horizon Oil Spill* yang menumpahkan 700 juta liter minyak mentah ke lingkungan laut Teluk Meksiko tahun 2010 (Kumar *et al.*, 2018). Distribusi minyak mentah juga tidak terlepas dari resiko kecelakaan yang mengakibatkan tumpahan minyak mentah. Distribusi minyak mentah dapat menggunakan kapal tanker dan juga perpipaan. Kasus kecelakaan pada tahap distribusi minyak mentah seperti yang terjadi di Teluk Balikpapan yang diakibatkan oleh patahnya pipa distribusi dasar laut oleh jangkar kapal MV Ever Judger. Dari pipa tersebut, keluar 44.000 barel minyak mentah mencemari lingkungan laut Teluk Balikpapan pada tahun 2018 (Satya, 2020). Kejadian dengan penyebab yang hampir mirip, terjadi juga di lepas pantai *Southern California* 2021. Penyebab dari tumpahan minyak di kasus tersebut adalah putusnya pipa distribusi minyak dasar laut dari *Platform Elly* menuju *Beta Pump Station* yang berada di Kota *Long Beach*. Kejadian tersebut mengakibatkan tumpahan minyak mentah sebesar 24.696 *gallons* (93.484,53 liter) ke lingkungan laut *Southern California* terutama di *Orange County*.

Secara umum langkah awal penanganan tumpahan minyak mentah diolah secara fisika berupa pembakaran, penyaringan, dan penyerapan, serta secara kimia berupa penambahan pengemulsi dan surfaktan. Penggunaan cara fisik dan kimia dalam menangani tumpahan minyak mentah memiliki proses yang lebih cepat, namun menghasilkan produk olahan yang perlu penanganan lebih lanjut agar tidak mencemari lingkungan. Metode penanganan fisik dan kimia pada skala tumpahan yang luas dapat menelan biaya yang cukup besar. Selain itu penggunaan bahan kimia sintetis dapat meningkatkan biaya penanganan dan menimbulkan resiko pencemaran baru bagi lingkungan (Yasmin & Ria, 2017). Oleh karena itu diperlukan suatu pengolahan tumpahan minyak mentah pada lingkungan laut yang lebih ramah lingkungan.

Penggunaan metode fisik kimia digunakan pada jangka waktu pendek pada saat awal terjadinya pencemaran (Ortmann *et al.*, 2020). Namun penanganan jangka panjang juga diperlukan untuk menjaga dan memulihkan ekosistem laut yang terdampak. Penerapan bioremediasi cukup potensial mengingat tingginya keanekaragaman mikroorganisme dan

kondisi iklim yang dapat mendukung pertumbuhannya. Bioremediasi merupakan teknologi remediasi yang sifatnya ramah lingkungan, efisien, cukup efektif, dan ekonomis (Sunaryanto, 2017). Metode bioremediasi juga dapat diaplikasikan pada lingkungan tercemar minyak yang pada prosesnya tidak menimbulkan kerusakan, tidak menimbulkan dampak lanjutan, dan dapat mengurangi limbah secara permanen (Nurmalasari, 2018). Faktor lain yang menjadi pendukung diterapkannya proses bioremediasi karena metode tersebut dapat mengurangi bahkan menghilangkan toksisitas dari senyawa polutan berbahaya (Harmesa, 2020).

Pada lingkungan tercemar minyak mentah secara alamiah telah terkandung bakteri pendegradasi minyak mentah. Namun dibutuhkan waktu yang cukup lama apabila tidak sedikitpun diberi perlakuan tambahan. Terdapat dua pendekatan untuk mempercepat proses biodegradasi tumpahan minyak mentah di lingkungan laut, yaitu bioaugmentasi (penambahan kultur mikroba) dan biostimulasi (pemenuhan nutrisi dan pengkondisian lingkungan mikroba) (Dicky & Ratni, 2021). Proses bioaugmentasi secara efektif dapat mendegradasi tumpahan minyak mentah di lingkungan laut hingga 95% (Wardhani & Titah, 2020). Metode biostimulasi tumpahan minyak mentah dengan pemenuhan nutrisi Nitrogen dan Fosfor juga menghasilkan efisiensi biodegradasi hingga 91,15% (Pratama & Handayani, 2021). Kombinasi kedua metode yaitu bioaugmentasi dan biostimulasi dapat mencapai degradasi minyak mentah sebesar 93% dalam kurun waktu 45 hari (Varjani & Upasani, 2019). Efisiensi bioremediasi minyak mentah bersifat spesifik bergantung pada jenis pencemaran, kultur mikroba, ketersediaan nutrisi dan kondisi lingkungan pencemaran. Oleh karena itu, dilakukan kajian mengenai teknik bioaugmentasi dan biostimulasi untuk mengolah tumpahan minyak mentah di lingkungan laut.

1.2 Rumusan Masalah

Penelitian mengenai teknik bioaugmentasi dan biostimulasi untuk mendegradasi tumpahan minyak mentah di perairan laut telah banyak dilakukan. Namun teknik bioremediasi tersebut bersifat spesifik sesuai dengan jenis dan kondisi lingkungan cemaran minyak mentah. Diperlukan kajian lebih lanjut mengenai pengaruh penambahan kultur mikroba dan variasinya terhadap efektivitas degradasi minyak mentah di lingkungan laut. Guna mengoptimalkan proses biodegradasi minyak mentah tersebut, diperlukan kajian mengenai pemenuhan kebutuhan makronutrien dan mikronutrien mikroba pendegradasi minyak mentah di lingkungan laut.

1.3 Tujuan

Studi literatur ini bertujuan untuk mengumpulkan dan mengolah data sekunder dari literatur terdahulu sehingga didapatkan teori-teori yang relevan terkait penambahan kultur mikroba dan variasinya untuk mendegradasi tumpahan minyak mentah di lingkungan laut. Studi literatur ini juga bertujuan untuk mengolah data sekunder dan mengidentifikasi dari literatur terdahulu terkait dengan pemenuhan kebutuhan makronutrien dan mikronutrien pada proses degradasi minyak mentah oleh mikroba.

1.4 Ruang Lingkup

Ruang lingkup yang digunakan pada kajian ini adalah sebagai berikut :

1. Literatur yang digunakan pada kajian ini berupa jurnal, buku, peraturan perundang-undangan, prosiding seminar, buku, disertasi, tesis, dan tugas akhir
2. Literatur yang digunakan merupakan hasil penelitian skala lab, skala pilot, dan skala terapan

3. Literatur yang digunakan merupakan hasil penelitian di daerah beriklim tropis dan subtropis.
4. Pembahasan mengenai bioaugmentasi mencakup jenis mikroba pendegradasi minyak mentah baik kultur tunggal maupun campuran yang berasal dari mikroba *indigenous* maupun *exogenous*
5. Pembahasan mengenai biostimulasi mencakup karakteristik pencemaran minyak mentah di lingkungan laut dan pemenuhan kebutuhan nutrisi mikroba baik berupa makronutrien maupun mikronutrien.
6. Studi kasus akan membahas mengenai tumpahan minyak mentah pada pipa distribusi minyak bawah laut di Teluk Balikpapan 2018 dan di lepas pantai *Southern California* 2021.

1.5 Manfaat

Manfaat dari kajian ini adalah sebagai berikut :

1. Memberikan informasi mengenai teknik bioaugmentasi dan biostimulasi yang dapat mendegradasi tumpahan minyak mentah di lingkungan laut sesuai dengan karakteristik cemaran.
2. Memberikan informasi mengenai variasi penggunaan mikroba yang dapat mendegradasi tumpahan minyak mentah di lingkungan laut
3. Memberi bahan pertimbangan mengenai pemilihan teknik biostimulasi dan nutrisi yang dibutuhkan untuk mengoptimalkan pertumbuhan mikroba pada proses degradasi tumpahan minyak mentah di lingkungan laut.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II METODE STUDI

Metode studi merupakan tata cara atau prosedur sistematis yang digunakan untuk memecahkan masalah yang dihadapi. Metode studi berisi langkah-langkah yang dimulai dari penentuan masalah yang bertujuan untuk dicari solusi penyelesaiannya. Setelah itu, dilakukan identifikasi prosedur-prosedur berikutnya hingga diperoleh kesimpulan penyelesaian masalah tersebut. Metode studi diharapkan mampu untuk membantu memudahkan peneliti atau penulis dalam pengerjaan studi serta penyusunan laporan. Ringkasan dari metode studi selanjutnya diringkas seperti pada Gambar 2.1 yang berisi Kerangka metode studi pada kajian literatur ini,

2.1 Kerangka Studi



A

Rumusan Masalah:

Penelitian mengenai teknik bioaugmentasi dan biostimulasi untuk mendegradasi tumpahan minyak mentah di perairan laut telah banyak dilakukan. Namun teknik bioremediasi tersebut bersifat spesifik sesuai dengan jenis dan kondisi lingkungan cemaran minyak mentah. Diperlukan kajian lebih lanjut mengenai pengaruh penambahan kultur mikroba dan variasinya terhadap efektifitas degradasi minyak mentah di lingkungan laut. Guna mengoptimalkan proses biodegradasi minyak mentah tersebut, diperlukan kajian mengenai pemenuhan kebutuhan makronutrien dan mikronutrien mikroba pendegradasi minyak mentah di lingkungan laut.

Tujuan:

Studi literatur ini bertujuan untuk mengumpulkan dan mengolah data sekunder dari literatur terdahulu sehingga didapatkan teori-teori yang relevan terkait penambahan kultur mikroba dan variasinya untuk mendegradasi tumpahan minyak mentah di lingkungan laut. Studi literatur ini juga bertujuan untuk mengolah data sekunder dan mengidentifikasi dari literatur terdahulu terkait dengan pemenuhan kebutuhan makronutrien dan mikronutrien pada proses degradasi minyak mentah oleh mikroba.

Metode Pengumpulan Data:

- a. Seleksi literatur berjumlah minimal 100 pustaka terbaru.
- b. Literatur yang digunakan berupa jurnal, buku, prosiding seminar, disertasi, laporan thesis, laporan tugas akhir, dan peraturan perundang-undangan
- c. Jurnal yang digunakan, diutamakan merupakan terbitan terbaru selama 5 tahun terakhir, terhitung sejak tahun 2017.
- d. Kata kunci pada pencarian literatur diantaranya: *biodegradation, bioaugmentation, biostimulation, the fate of petroleum crude oil spill on the marine environment, removal petroleum crude oil spill, Biostimulation technique, nutrient ratio of petroleum crude oil degradation, Petroleum crude oil degraded bacteria, tropical marine environment characteristic, subtropical marine environment characteristic, oil spill characteristic*, dan sebagainya yang akan diuraikan pada penjelasan pada poin 2.2.2 di bab ini.

A



Gambar 2.1 Alur Metode Studi

2.2 Metode Studi

Metode kajian berisi rangkaian tahapan kajian yang akan dilakukan hingga didapatkan kesimpulan umum. Metode kajian dibuat agar pelaksanaan kegiatan kajian dapat terarah dan mencapai tujuan yang diharapkan di awal.

2.2.1 Ide Studi

Ide dari kajian ini yaitu teknik bioaugmentasi dan biostimulasi untuk mendegradasi tumpahan minyak mentah di laut. Kajian ini berasal dari *gap analysis* yang dibuat untuk mencari solusi dari permasalahan penanganan tumpahan minyak mentah di laut dengan

kondisi ideal yang diharapkan. Adanya celah tersebut diakibatkan oleh penggunaan metode remediasi fisik dan kimia untuk menangani pencemaran lingkungan laut berupa tumpahan minyak mentah yang tidak disertai oleh remediasi lanjutan dengan metode biologis. Remediasi dengan metode biologis bertujuan untuk mendegradasi sisa minyak mentah yang belum tertangani secara fisik dan kimia. Metode biologis berupa bioaugmentasi memerlukan jenis mikroba yang sesuai dengan kondisi cemaran dan juga memiliki faktor pembatas berupa ketersediaan nutrisi dan kondisi lingkungan yang dapat menstimulasi pertumbuhan mikroba.

2.2.2 Pengumpulan Data

Studi Pustaka ini bertujuan untuk meningkatkan pemahaman terkait tujuan dari ide kajian yang dilakukan. Sumber pustaka direncanakan minimum sebanyak 100 pustaka terbaru dari berbagai sumber pustaka berupa peraturan perundang-undangan, buku, jurnal, prosiding seminar, disertasi, tesis, tugas akhir, literatur lain yang berhubungan dengan topik yang dibahas dan dapat dipertanggungjawabkan kebenarannya. Jurnal yang dijadikan literatur diambil, secara mayoritas dan diutamakan merupakan terbitan 5 tahun terakhir mulai dari tahun 2017. Keterbaruan jurnal yang dipilih bertujuan untuk mendapatkan teori-teori terbaru terkait metode bioaugmentasi dan biostimulasi tumpahan minyak mentah di lingkungan laut. Keanekaragaman data sangat diperlukan untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat.

Pengumpulan pustaka bertujuan untuk mendapatkan data sekunder dari penelitian sebelumnya, sehingga dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam penyelesaian masalah yang diangkat. Proses pengumpulan pustaka dengan melakukan pencarian pada *website* penyedia pustaka seperti *Google Scholar*, *Elsevier*, *Science Direct*, *IEEE Explorer*, *Springer*, *Sinta Indonesia*, *Garuda* (Garba Rujukan Digital), *ISJD* (*Indonesian Scientific Journal Database*), *MDPI* (*Multidisciplinary Digital Publishing Institute*) *Journal*, *Core.ac.uk*, *repository* kampus, *IOP Publishing*, dan lain-lain. Dari *website* tersebut dilakukan seleksi konten pustaka berupa kata kunci:

- *Autochthonous bacteria*,
- *Bioaugmentation*,
- *Biodegradation oil spill*,
- *Biostimulation*,
- *Biostimulation technique*,
- *Biosurfactant*,
- *Composition of crude oil*,
- *Consortium bacteria*,
- *Exogenous bacteria*,
- *Indigenous bacteria*,
- *Macronutrien bacteria*,
- *Micronutrien bacteria*,
- *Nutrient ratio of petroleum crude oil degradation*,
- *Oil spill characteristic*.
- *Petroleum crude oil characteristics*,
- *Petroleum crude oil composition*,
- *Petroleum crude oil degraded bacteria*,
- *Petroleum crude oil spill Southern California 2021*,
- *Petroleum crude oil spill Balikpapan Bay 2018*,
- *Removal of petroleum crude oil spill*,

- *Single strain bacteria,*
- *Subtropical marine environment characteristic*
- *The fate of petroleum crude oil spill on the marine environment,*
- *Tropical marine environment characteristic,*

Kemudian dari pustaka yang didapat, dilakukan tabulasi pustaka berupa karakteristik lingkungan perairan laut, karakteristik tumpahan minyak mentah di lingkungan laut, mikroba pendegradasi minyak mentah, proses bioaugmentasi lingkungan laut tercemar minyak mentah dengan penambahan variasi kultur mikroba, sumber nutrisi mikroba dan jenisnya, rasio nutrisi yang dibutuhkan untuk mendegradasi minyak mentah, serta teknik bioaugmentasi dan biostimulasi lingkungan laut tercemar minyak mentah. Literatur yang didapat, dilakukan analisis data untuk memperoleh teori-teori yang relevan dengan topik pembahasan.

2.2.3 Studi Kasus

Studi kasus yang akan dibahas pada kajian ini adalah penanganan tumpahan minyak mentah yang diakibatkan oleh patahnya pipa distribusi minyak mentah bawah laut di Teluk Balikpapan 2018 dan di *Southern California* 2021. Kasus tersebut diambil karena memiliki cakupan area terdampak yang cukup luas dan dengan kondisi geografi yang beragam mulai dari kawasan pesisir, pelabuhan, dan zona laut tangkapan nelayan. Kedua kasus tersebut memiliki kesamaan yang penyebabnya adalah putusnya pipa distribusi minyak mentah bawah laut dan terjadi tidak jauh dari kawasan pantai. Kasus tumpahan minyak mentah di Teluk Balikpapan mewakili kasus yang terjadi di daerah beriklim tropis. Kasus tumpahan minyak mentah di lepas pantai *Southern California* pada tahun 2021 mewakili kasus yang terjadi di daerah yang beriklim subtropis. Studi kasus ini akan menyajikan perbandingan penanganan bioaugmentasi dan biostimulasi pada lingkungan laut yang beriklim tropis dan sub tropis. Studi kasus ini akan membahas pada studi kasus ini meliputi pemilihan mikroba dan nutrisi yang sesuai dengan kondisi pencemaran pada masing-masing kasus, perhitungan jumlah nutrisi dan mikroba yang dibutuhkan, dan penyusunan SOP (*Standard Operating Procedure*) penerapan bioaugmentasi dan biostimulasi.

2.2.4 Hasil dan Pembahasan

Hasil dan pembahasan pada kajian ini dilakukan dengan melakukan telaah pustaka berdasarkan dari hasil penelitian sebelumnya. Pembahasan pada kajian ini mencakup kajian karakteristik lingkungan laut beriklim tropis dan subtropis, kajian karakteristik tumpahan minyak mentah di lingkungan laut, kajian kultur mikroba beserta variasinya yang dapat mendegradasi tumpahan minyak mentah di laut, kajian rasio nutrisi C:N:P, jenis nutrisi (makronutrien dan mikronutrien) dan sumbernya, kajian tahapan proses bioaugmentasi dan biostimulasi untuk mendegradasi tumpahan minyak mentah di lingkungan laut baik secara simultan dan/atau bertahap, kajian bioaugmentasi dan biostimulasi untuk mengolah tumpahan minyak mentah pada studi kasus tumpahan minyak Teluk Balikpapan 2018 dan *Southern California* 2021. Studi kasus tersebut juga akan disusun *Standard Operating Procedure* (SOP) dan rencana penjadwalan proses bioaugmentasi dan biostimulasi berdasarkan teori-teori yang didapat.

2.2.5 Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan merupakan hasil dari pembahasan pustaka yang didapat. Kesimpulan berisi jawaban inti dari tujuan kajian yang dilakukan. Saran berisi hal-hal yang masih dapat dikembangkan dan diperbaiki lebih lanjut.

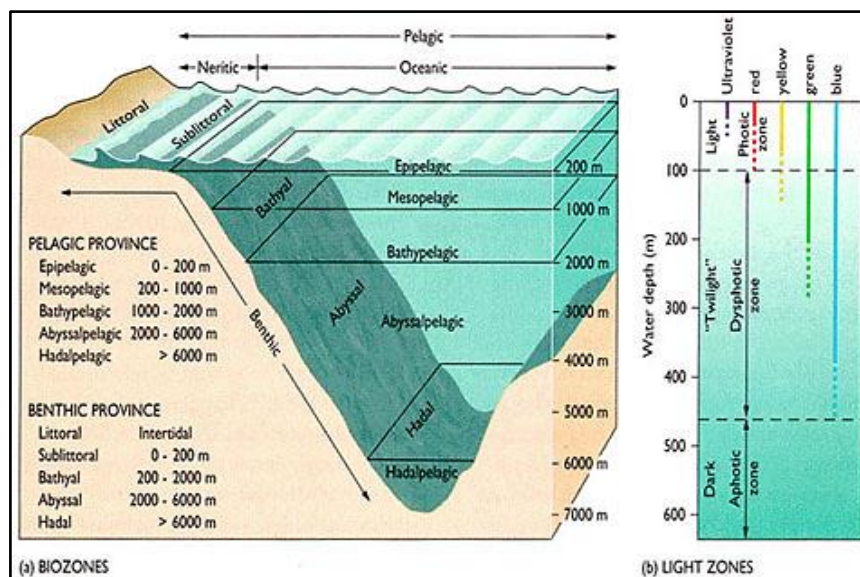
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Perairan Laut

Berdasarkan KBBI (2022), laut merupakan kumpulan air asin (dalam jumlah yang banyak dan meliputi wilayah yang luas) yang menggenangi dan membagi daratan atas benua atau pulau. Menurut Undang-undang Nomor 32 tahun 2014, laut adalah ruang perairan di muka bumi yang menghubungkan daratan dengan daratan dan bentuk-bentuk alamiah lainnya, yang merupakan kesatuan geografis dan ekologis beserta segenap unsur terkait dan yang batas dan sistemnya ditentukan oleh peraturan perundang-undangan dan hukum internasional. Ekosistem laut merupakan ekosistem terbesar di muka bumi yang hampir mencakup 2/3 dari luas permukaan bumi. Laut menyimpan banyak keanekaragaman organisme dan sumber daya alamnya. Sumber daya alam laut terdiri dari hasil perikanan, mineral, minyak dan gas, serta potensi energi listrik. Laut juga dijadikan sebagai salah satu sarana transportasi yang efisien untuk mengangkut barang dan komoditas.

Ekosistem laut merupakan interaksi antara makhluk hidup yang mendiami lautan dan berinteraksi dengan lingkungannya. Zona ekosistem air laut dibedakan berdasarkan intensitas cahayanya (zona fotik, twilight, dan afotik) dan juga berdasarkan kedalamannya (Zona litoral / pasang-surut, epineritik, neritik, batial, dan abisal) (Puryono *et al.*, 2019). Laut berdasarkan intensitas cahayanya terdiri dari zona fotik (cahaya matahari masih bisa menembus sehingga mendukung proses fotosintesis, zona twilight (merupakan zona peralihan yang sudah minim cahaya dan tidak memungkinkan terjadinya fotosintesis), dan zona afotik (ketiadaan cahaya matahari). Pembagian zona ekosistem laut seperti yang tertera pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Zona Ekosistem Laut

Sumber : *divediscover.whoi.edu dalam siswapedia.com* (2011)

Berdasarkan Gambar 3.1 mengenai zona ekosistem laut dibagi menjadi beberapa zona seperti berikut :

- Zona Litoral, bagian wilayah cekungan lautan yang berbatasan langsung dengan daratan dan terjadi peristiwa pasang-surut air laut.

- b. Zona Epineritik, bagian cekungan lautan yang berada diantara garis-garis surut dan area paling dalam yang masih bisa ditembus cahaya matahari.
- c. Zona Neritik, bagian cekungan laut yang masih dapat ditembus sinar matahari hingga ke dasar laut yang kedalamannya ± 300 m. Pada zona ini terdapat banyak organisme laut.
- d. Zona Batial, Sering disebut sebagai wilayah laut dalam. Wilayah cekungan laut ini berkedalaman 200 m hingga 2.000 m. Pada zona ini sudah tidak dapat ditembus sinar matahari, sehingga organisme laut yang mendiami zona tersebut cenderung terbatas.
- e. Zona Abisal, Disebut juga sebagai zona laut sangat dalam, karena zonasi kedalamannya lebih dari 2.000 m dibawah permukaan laut. Memiliki suhu yang sangat dingin, sehingga organisme yang mendiami zona ini sangat terbatas.

Adapun wilayah laut dengan zonasi yang didasarkan dari wilayah permukaan secara horizontal dibagi menjadi lima zona. Menurut Puryono *et al.* (2019), zonasi tersebut diurut dari tepi hingga ke tengah laut berupa Epipelagik, Mesopelagik, Batipelagik, Abiso pelagik, dan Hado pelagik. Wilayah laut memiliki baku mutu untuk biota laut yang tercantum pada Lampiran 3 Kepmen LH No 51 Tahun 2004 seperti pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Baku Mutu Air Laut untuk Biota Laut

Parameter	Satuan	Baku Mutu	Metode Analisis
Temperatur	°C	Terumbu karang: 28-30 Bakau: 28-32 Rumput Laut: 28-30	APHA 2550 B 2012
Turbiditas	NTU	<5	APHA 2130 B 2012
Total Suspended Solid (TSS)	mg/L	Terumbu karang: 20 Bakau: 80 Rumput Laut: 20	APHA 2540 D 2012
pH	-	7-8,5	APHA 4500 H+ B 2012
Salinitas	‰	Terumbu karang: 33-34 Bakau: hingga 34 Rumput Laut: 33-34	IK-S1 (<i>Salt meter</i>)
Oksigen Terlarut	mg/L	>5	IK-S2 (<i>DO meter</i>)
Lapisan Minyak	-	Nihil	-
<i>Biochemical Oxygen Demand</i> (BOD)	mg/L	20	APHA 5210 B 2012
Total Ammonia (NH ₃)	mg/L	0,3	SNI 19-6964.3-2003
Nitrat (NO ₃)	mg/L	0,008	SNI 19-6964.-2003
Fosfat (PO ₄)	mg/L	0,015	SNI 06-6989.31-2005
Merkuri (Hg)	mg/L	0,001	IK-L 42-MP-AES
Cadmium (Cd)	mg/L	0,001	APHA 3111 B 2012
Tembaga (Cu)	mg/L	0,008	APHA 3111 B 2012
Seng (Zn)	mg/L	0,05	APHA 3111 B 2012
Nikel (Ni)	mg/L	0,05	APHA 3111 B 2012
Krom (Cr)	mg/L	0,05	APHA 3111 B 2012

Sumber: KepMen LH RI No. 51 Tahun 2004

3.1.1 Karakteristik Perairan Laut Beriklim Tropis

Laut beriklim tropis berada di kawasan sekitar khatulistiwa atau ekuator, terletak pada garis lintang 23,5° LU (Lintang Utara) hingga 23,5° LS (Lintang Selatan). Pada umumnya laut beriklim tropis cenderung bersuhu hangat dengan sinar matahari sepanjang tahun. Hal tersebut juga mendorong tingginya keanekaragaman biota laut dan mikroorganisme dibanding perairan laut beriklim selain tropis. Negara-negara beriklim tropis diantaranya adalah Indonesia, Malaysia, Papua Nugini, Meksiko, Brazil, Peru, India, Sri Lanka, Kenya,

Nigeria, Kamerun, dan sebagainya. Adapun karakteristik air laut beriklim tropis yang telah dihimpun dari berbagai sumber seperti yang tertera pada Tabel 3.2

Kondisi suhu perairan beriklim tropis yang terendah 23,96 °C di muara Sungai Keluang Kecil, Malaysia, dan suhu tertinggi yang tercatat 33,1 °C di Perairan Laut Kabupaten Nunukan, Kalimantan Utara. Untuk suhu rata-rata perairan tropis berada pada rentang 25,29 °C hingga 31,88 °C. Suhu perairan laut tropis akan lebih dingin saat musim penghujan dan cenderung menghangat pada musim kemarau. Lokasi yang dekat dengan khatulistiwa, memiliki suhu rata-rata cenderung lebih hangat. Pasang surut air laut juga berpengaruh terhadap suhu perairan. Suhu air laut saat pasang lebih tinggi daripada saat surut (Prianto *et al.*, 2019). Perubahan suhu perairan laut dapat berpengaruh terhadap proses fisik, kimia, dan biologis yang terjadi. Perubahan arah aliran arus laut juga dapat menurunkan suhu perairan (Salim *et al.*, 2017).

Pada umumnya perairan laut memiliki kadar salinitas 30-35%. Kadar garam suatu perairan diakibatkan oleh beberapa penyebab seperti pencampuran dengan air tawar, kandungan mineral, letak lintang, dan arus laut. Kondisi salinitas di daerah pesisir tidak terlalu tinggi, hal tersebut diakibatkan daerah pesisir masih dipengaruhi oleh pasang surut air laut serta aktivitas dari daerah darat seperti aliran sungai maupun dari penduduk (Hasanah *et al.*, 2018). Suhu perairan yang lebih hangat memiliki kadar salinitas lebih rendah seperti yang tertera pada Tabel 3.2 dan Tabel 3.4. Dari analisis data seperti pada Tabel 3.1, daerah beriklim tropis memiliki salinitas terendah sebesar 24 ppt (*part per thousand*) dan tertinggi sebesar 36,55 ppt. Sementara salinitas rata-rata berada pada rentang 26,84 ppt hingga 33,91 ppt.

pH merupakan parameter yang menunjukkan keasaman atau kebasaan suatu objek larutan. Nilai pH pada air erat hubungannya dengan keberadaan CO₂ dan alkalinitas. Semakin tinggi konsentrasi CO₂ di atmosfer maka perairan laut akan mengalami asidifikasi atau penurunan nilai pH. Nilai pH dapat berpengaruh terhadap aktivitas biologis organisme, oksigen terlarut, kation anion, dan temperatur dan fotosintesis (Tanjung *et al.*, 2019). Perairan laut tropis memiliki nilai pH yang beragam seperti yang dihimpun pada Tabel 3.2, nilai pH minimum sebesar 6,5 dan maksimum sebesar 8,2. Sementara untuk pH rata-rata perairan tropis berada pada 7,54 hingga 8,17. Hal tersebut masih sesuai dengan baku mutu untuk biota laut dengan rentang baku mutu pH sebesar 7 – 8,5.

Parameter DO (*Dissolved Oxygen*) merupakan parameter yang menyatakan jumlah oksigen terlarut dalam air yang berasal dari proses fotosintesis organisme maupun absorpsi dari udara bebas. Baku mutu DO untuk biota laut seperti yang tertera pada Tabel 3.1 lebih besar dari 5 mg/L. Nilai DO dapat meningkat ketika terjadi absorpsi udara ke perairan akibat adanya ombak dan percikan air, aerasi mekanis, dan fotosintesis organisme. Nilai DO dapat menurun akibat adanya respirasi biologis dan proses dekomposisi bahan organik pada perairan. Nilai DO perairan tropis seperti yang didapatkan dari beberapa sumber tertera pada Tabel 3.2, nilai minimal DO sebesar 4,4 mg/L dan yang tertinggi sebesar 7,81 mg/L. Sementara nilai DO rata-rata sebesar 5,02 mg/L hingga 6,42 mg/L.

Keberadaan nutrien pada perairan laut berpengaruh terhadap kecepatan biodegradasi partikel organik pada ekosistem laut. Mikroba membutuhkan makronutrien dan mikronutrien sebagai unsur yang mendukung metabolisme sel. Makronutrien ini berupa unsur N (Nitrogen) dan unsur P (Fosfor). Namun keberadaan unsur N dan P yang terlalu besar dapat mengakibatkan terjadinya *alga bloom* yang dapat menurunkan nilai DO dan berakibat pada menurunnya kualitas air serta terganggunya ekosistem perairan. Pada perairan beriklim tropis memiliki kandungan nitrat berkisar 0,03 mg/L hingga 2,33 mg/L. Sementara untuk kandungan Amonia perairan laut beriklim tropis berkisar dari 0,03 mg/L hingga 0,7 mg/L.

Tabel 3.2 Karakteristik Fisik Air Laut Beriklim Tropis

No	Peneliti	Lokasi	Suhu (°C)			Salinitas (<i>part per thousand</i>)			pH		DO (<i>Dissolved Oxygen</i>) mg/L	
			Rata-rata	Min	Max	Rata-rata	Min	Max	Rata-rata	Rentang	Rata-rata	Rentang
1	Meirinawati and Iskandar, 2019	Laut Jawa - Ambang Dewakang	28,96	24,57	29,98	34,41 psu	33,07 psu	34,74 psu	-	7,84 - 7,99	-	4,52 - 7,25
2	Kegler <i>et al.</i> , 2017	Spermonde Archipelago, Indonesia	-	29,41	30,08	-	31,6	32,3	-	8,16 - 8,21	-	-
3	Mustikasari <i>et al.</i> , 2019	Kabupaten Nunukan, Kalimantan Utara	31,88	30,7	33,1	26,84	24	30,07	7,66	7,43 - 7,95	6,02	4,87 - 6,68
4	Januar, 2018	Laut Banda, Indonesia	-	28,74	28,99	-	33,12	33,35	-	8,04 - 8,17	-	7,01 - 7,51
5	Adiela <i>et al.</i> , 2021	Keluang kecil river estuary at bukit keluang, Trengganu Malaysia (<i>Low Tide</i>)	31	-	-	20,02	-	-	8,01	-	-	6,91
		Keluang kecil river estuary at bukit keluang, Trengganu Malaysia (<i>High Tide</i>)	23,96	-	-	23,96	-	-	8,16	-	-	7,65
		Keluang kecil river estuary at bukit keluang, Trengganu Malaysia (<i>Rainy Day</i>)	29,96	-	-	23,06	-	-	8,17	-	-	7,81
		Keluang kecil river estuary at bukit keluang, Trengganu Malaysia (<i>Sunny Day</i>)	31,9	-	-	23	-	-	8,2	-	-	7,24
6	Samsudin <i>et al.</i> , 2019	Klang Estuary, Malaysia	31,9	29,28	38,48	28,87	26,41	36,55	7,52	7,28 - 7,95	6,46	5,05-7,41
7	Ramdhan <i>et al.</i> , 2018	Pesisir Kecamatan Sandrobone, Sulawesi Selatan	28,6	-	-	33,91	-	-	7,54	-	5,02	-
		Pesisir Kecamatan Mangarabombang, Sulawesi Selatan	26,8	-	-	32,99	-	-	7,65	-	5,19	-
8	Pianto <i>et al.</i> , 2019	Teluk Balikpapan, Indonesia	28,7 - 29,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	Salim <i>et al.</i> , 2018	Perairan Pulau Kerumputan, Kabupaten Kota Baru, Kalimantan Selatan	28	27	30	28,34	28,2	29	7,64	7,5 - 7,7	7,13	6,8-7,2
10	Aspiany <i>et al.</i> , 2019	Pulau Kedindingan	28,2	-	-	33	-	-	7,8	-	-	-
		Pulau Beras Basah	29	-	-	33	-	-	7,83	-	-	-
11	Suyatna <i>et al.</i> , 2019	Perairan Balikpapan	-	28	32	-	29	35	-	7,43-8,15	-	5,2-5,84
12	Gusmawati <i>et al.</i> , 2020	Teluk Balikpapan	30,7	-	-	33,7	-	-	8,01	-	6	-
13	Tanjung <i>et al.</i> , 2019	Perairan Laut Mimika	-	27,5	29,3	-	30	35,4	-	6,5-7,6	-	4,4-5,2

Tabel 3.3 Kandungan Nutrien dan TSS Air Laut Beriklim Tropis

No	Peneliti	Lokasi	Nitrate	Ammonia	P (Phosphorus)	TSS
			mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	Meirinawati and Iskandar, 2019	Laut Jawa - Ambang Dewakang	0,07 - 0,18 mg/L (TN)	-	0,004 - 0,022 mg/L (PO ₄ -P)	-
2	Kegler <i>et al.</i> , 2017	Spermonde Archipelago, Indonesia	0,16 TN	-	0,48	-
3	Mustikasari <i>et al.</i> , 2019	Kabupaten Nunukan, Kalimantan Utara	-	-	-	-
4	Januar, 2018	Laut Banda, Indonesia	0,03 - 0,04	0,03	0,07 - 0,09	-
5	Adiela <i>et al.</i> , 2021	Keluang kecil river estuary at bukit keluang, Trengganu Malaysia (<i>Low Tide</i>)	2,33	0,38	1,23	29
		Keluang kecil river estuary at bukit keluang, Trengganu Malaysia (<i>High Tide</i>)	1,17	0,7	1,13	20
		Keluang kecil river estuary at bukit keluang, Trengganu Malaysia (<i>Rainy Day</i>)	0,53	0,47	1,1	-
		Keluang kecil river estuary at bukit keluang, Trengganu Malaysia (<i>Sunny Day</i>)	1,2	0,42	1,1	-
6	Samsudin <i>et al.</i> , 2019	Klang Estuary, Malaysia	0,11	0,09	0,03	129
7	Ramdhan <i>et al.</i> , 2018	Pesisir Kecamatan Sandrobone, Sulawesi Selatan	0,25	0,32	0,11	51,67
		Pesisir Kecamatan Mangarabombang, Sulawesi Selatan	0,06	0,1	0,05	40,08
8	Pianto <i>et al.</i> , 2019	Teluk Balikpapan, Indonesia	-	-	-	-
9	Salim <i>et al.</i> , 2018	Perairan Pulau Kerumputan, Kabupaten Kota Baru,	0,66	-	0,11	-
10	Aspiany <i>et al.</i> , 2019	Pulau Kedindingan	-	0,1	-	33 - 47
		Pulau Beras Basah	-	0,6	-	-
11	Suyatna <i>et al.</i> , 2019	Perairan Balikpapan	0,19-0,73	0,13-0,33	0,01-0,05	5-12
12	Gusmawati <i>et al.</i> , 2020	Teluk Balikpapan	0,048	<0,01	<0,01	-
13	Tanjung <i>et al.</i> , 2019	Perairan Laut Mimika	0,07-0,32	0,05-0,18	0,02-0,85	6,67-17,43

Kandungan *Phosphorus* perairan laut beriklim tropis berkisar dari 0,004 mg/L hingga 1,23 mg/L. Keberadaan TSS yang tinggi pada perairan, cenderung meningkatkan laju sedimentasi dan menurunkan aktivitas fotosintesis organisme (Pusparani *et al.*, 2020). Penurunan aktivitas fotosintesis organisme perairan dapat mengakibatkan penurunan DO. Berdasarkan hasil analisis data, nilai TSS perairan laut beriklim tropis berkisar 5 mg/L hingga 129 mg/L. Semakin tinggi pencampuran air sungai dengan air laut, akan meningkatkan nutrient dan TSS pada perairan Laut. Hal ini diakibatkan oleh tingginya kadar nutrien pada air sungai yang disebabkan oleh aktivitas rumah tangga, pertanian, dan perikanan masyarakat. Kadar TSS yang tinggi dari air sungai juga diakibatkan oleh laju erosi sedimen maupun dinding sungai. Data hasil tabulasi jurnal yang mengenai nutrien dan TSS perairan laut beriklim tropis seperti yang tertera pada Tabel 3.3.

3.1.2 Karakteristik Perairan Laut beriklim subtropis

Perairan laut beriklim subtropis terletak di antara 23,5° LU - 35° LU, dan 23,5° LS - 35° LS. Wilayah subtropis terletak di utara dan selatan bumi mengapit daerah beriklim tropis. Wilayah subtropis mengalami empat musim yaitu musim semi (*spring*), musim panas (*summer*), dan musim dingin (*winter*), dan musim gugur (*autumn*). Menurut Djoko (2019), Daerah subtropis memiliki ciri-ciri seperti berikut :

1. Batas yang tegas tidak dapat ditentukan dan merupakan daerah peralihan dari daerah iklim tropis ke iklim sedang.
2. Musim dingin tidak terlalu dingin dan musim panas tidak terlalu panas.
3. Suhu sepanjang tahun dirasa cukup nyaman oleh manusia.
4. Daerah subtropis yang hujannya jatuh pada musim dingin dan musim panasnya kering disebut iklim mediterania, dan jika musim hujannya jatuh pada musim panas dan musim dinginnya kering disebut daerah beriklim Tiongkok.

Menurut Nishijima *et al* (2021) dan Nishijima *et al* (2018) suhu pada perairan subtropis terkhusus perairan *Seto Inland Sea, Japan*, Suhu terhangat pada musim panas dengan rentang 24,3°C - 24,5°C, selanjutnya diikuti suhu pada musim gugur dengan nilai 22,7°C – 23,5°C, suhu pada musim semi dengan suhu 15,5°C -17,5°C, dan suhu terdingin pada musim *winter* dengan rentang suhu 11,3°C -11,6°C. Naik turun suhu pada tiap musim berkisar pada 0,7°C - 2,8°C. Menurut tabulasi data dari beberapa sumber literatur suhu rata-rata tahunan berkisar 23,3°C - 25,1°C. Selengkapnya terkait kondisi suhu perairan subtropis seperti yang tertera pada Tabel 3.4.

Kondisi salinitas pada perairan sub tropis rata-rata berada pada rentang 24,58 ppt hingga 36,06 ppt. Pengaruh musim juga berpengaruh terhadap salinitas perairan laut. Salinitas tertinggi terjadi pada musim dingin dan salinitas terendah terjadi pada musim panas seperti yang tercantum pada Tabel 3.4. Sementara untuk derajat pH perairan laut subtropis rata-rata berada pada rentang pH 7,8 hingga 8,26. pH minimum perairan berada pada derajat 7,58 dan yang tertinggi berderajat pH 8,55. Apabila merujuk pada data tersebut, derajat pH perairan subtropis lebih tinggi daripada derajat pH perairan tropis. Selengkapnya terkait pH perairan laut subtropis seperti yang tercantum pada Tabel 3.4. Untuk oksigen terlarut perairan subtropis seperti yang telah ditabulasi dari sumber literatur pada Tabel 3.4 rata-rata berada pada rentang 6,5 mg/L hingga 8,43 mg/L. Sementara untuk nilai DO minimum sebesar 5,1 mg/L dan maksimum sebesar 9,7 mg/L. Secara umum kondisi tersebut masih berada diatas baku mutu perairan laut yang mensyaratkan nilai DO berada di atas 5 mg/L.

Tabel 3.4 Karakteristik Fisik Air Laut Beriklim Subtropis

No	Author	Lokasi	Suhu ($^{\circ}\text{C}$)			Salinitas (<i>part per thousand</i>)			pH		Dissolved Oxygen (mg/L)	
			Rata-Rata	Min	Maks	Rata-Rata	Min	Maks	Rata-Rata	Rentang	Rata-Rata	Rentang
1	Kong <i>et al.</i> , 2017	<i>Yellow Sea, China</i>										
		<i>Seto Inland Sea, Japan (Spring)</i>	15,5 ± 2,8			32 ± 2,3						
2	Nishijima <i>et al.</i> , 2021	<i>Seto Inland Sea, Japan (Summer)</i>	24,5 ± 2,3			30,7 ± 3,2						
		<i>Seto Inland Sea, Japan (Autumn)</i>	22,7 ± 1,9			31,8 ± 1,5						
		<i>Seto Inland Sea, Japan (Winter)</i>	11,3 ± 2,2			32,6 ± 1,5						
3	Li <i>et al.</i> , 2018	<i>Middle and southern Fujian Coastal Area</i>	24,82	17,97	30,38	31,1 ppt	17,3	34,2	8,08	7,58-8,55	6,9	5-9,5
		<i>Atlantic Sea Bass Darm Site, Portugal (Station 1)</i>		15,61	16,07	35,72				8,25-8,26	7,99	
		<i>Atlantic Sea Bass Darm Site, Portugal (Station 2)</i>		17,68	17,97	35,72				8,37-8,42	7,6	
4	Gomes <i>et al.</i> , 2020	<i>Atlantic Sea Bass Darm Site, Portugal (Station 3)</i>		15,14	15,17	35,72					8,07	
		<i>Atlantic Sea Bass Darm Site, Portugal (Station 4)</i>		15,12	15,14	36,06				8,73-8,86	8,43	
5	Nishijima <i>et al.</i> , 2018	<i>Seto Inland Sea, Japan (Spring)</i>	17,5 ± 1			32,3 ± 1,9						
		<i>Seto Inland Sea, Japan (Summer)</i>	24,3 ± 1,3			30,8 ± 2,8						
		<i>Seto Inland Sea, Japan (Autumn)</i>	23,5 ± 0,7			32,2 ± 1,2						
		<i>Seto Inland Sea, Japan (Winter)</i>	11,6 ± 1,8			32,7 ± 1,4						
6	Lin <i>et al.</i> , 2017	<i>Southwestern East China Sea</i>		11	30		25,4	30,4				
7	Ye <i>et al.</i> , 2017	<i>Hangzhou Bay, China</i>	24,62 - 25,1			7,95-15,95			7,98-8,01		7,62-7,99	
		<i>Xiangshan Bay, China</i>	22,8 - 25,02			24,58-26,22			8,03-8,05		6,89-7,62	
8	Ishida dkk., 2021	<i>Coastal area Japan</i>							8,14-8,26			
9	Esenkulova <i>et al.</i> , 2021	<i>Strait of Georgia, Canada</i>		8	30,5							
10	Environmental Protection Department Hongkong, 2018	<i>Strawling Inlet</i>	24,1	14,5	30,4		29,8	32,9	7,9	7,7-8,1	6,7	5,7-9,7
		<i>Crooked Island</i>	24	14,7	30,3		30,3	33,2	7,9	7,7-8,1	6,6	5,3-9,4
		<i>Port Island</i>	23,4	14,1	29		30,8	33,4	7,8	7,7-8,0	6,5	5,2-9,0
		<i>Mirs Bay</i>	23,3	14,4	29,2		31	33,5	7,8	7-7-8,0	6,5	5,1-8,9

Tabel 3.5 Kandungan Nutrien dan Air Laut Beriklim Subtropis

No	Author	Lokasi	Nitrate	Ammonia	DIN	TN	P	DIP	TP
			mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	Kong <i>et al.</i> , 2017	<i>Yellow Sea, China</i>				0,27751			0,01861
		<i>Seto Inland Sea, Japan (Spring)</i>			0,0364 ± 0,0966			0,0171 ± 0,02375	
2	Nishijima <i>et al.</i> , 2021	<i>Seto Inland Sea, Japan (Summer)</i>			0,0294 ± 0,0658			0,02185 ± 0,0399	
		<i>Seto Inland Sea, Japan (Autumn)</i>			0,056 ± 0,1008			0,04465 ± 0,0361	
		<i>Seto Inland Sea, Japan (Winter)</i>			0,0574 ± 0,119			0,03705 ± 0,02945	
3	Li <i>et al.</i> , 2018	<i>Middle and southern Fujian Coastal Area</i>	0,0728	0,0213			0,011		
		<i>Atlantic Sea Bass Darm Site, Portugal (Station 1)</i>	0,01612	-			0,38		
4	Gomes <i>et al.</i> , 2020	<i>Atlantic Sea Bass Darm Site, Portugal (Station 2)</i>	0,20274	0,01615			0,49		
		<i>Atlantic Sea Bass Darm Site, Portugal (Station 3)</i>	0,77314	0,02261			0,29		
		<i>Atlantic Sea Bass Darm Site, Portugal (Station 4)</i>	0,25668	-			0,18		
		<i>Seto Inland Sea, Japan (Spring)</i>				0,20 ± 0,12			0,018 ± 0,011
5	Nishijima <i>et al.</i> , 2018	<i>Seto Inland Sea, Japan (Summer)</i>				0,23 ± 0,14			0,022 ± 0,16
		<i>Seto Inland Sea, Japan (Autumn)</i>				0,22 ± 0,1			0,027 ± 0,012
		<i>Seto Inland Sea, Japan (Winter)</i>				0,21 ± 0,13			0,024 ± 0,009
6	Lin <i>et al.</i> , 2017	<i>Southwestern East China Sea</i>							
7	Ye <i>et al.</i> , 2017	<i>Hangzhou Bay, China</i>			1,253-1,714	1,682-1,995		0,051-0,088	0,247-0,305
		<i>Xiangshan Bay, China</i>			0,769-0,846	0,902-1,005		0,037-0,059	0,088-0,091
8	Ishida dkk., 2021	<i>coastal area Japan</i>							
9	Esenkulova <i>et al.</i> , 2021	<i>Strait of Georgia, Canada</i>				0,5875 - 2,65			0,003-0,0261
	<i>Environmental</i>	<i>Strarling Inlet</i>		0,031		0,45			0,02
	<i>Protection Department</i>	<i>Crooked Island</i>		0,027		0,42			0,02
10	<i>Hongkong, 2018</i>	<i>Port Island</i>		0,023		0,38			0,02
		<i>Mirs Bay</i>		0,02		0,38			0,02

Perairan subtropis memiliki kadar nutrien yang hampir sama dengan perairan tropis. Pada Tabel 3.5, terdapat tabulasi data nutrien yang dikumpulkan dari berbagai macam literatur. Terdapat parameter Nitrogen yang dibagi menjadi Nitrat, Ammonia, *Dissolved Inorganic Nitrogen* (DIN), dan *Total Nitrogen* (TN). DIN merupakan gabungan antara kandungan nitrat, nitrit, dan ammonia. TN merupakan parameter gabungan dari konsentrasi TDN (*Total Dissolved Nitrogen*) dan PN (*Particulate Nitrogen*). TDN merupakan gabungan dari parameter DIN dan DON (*Dissolved Organic Nitrogen*). Pengukuran DIN berguna untuk mengetahui nitrogen yang tersedia bagi fitoplankton. Kandungan nitrat perairan subtropis sebagaimana hasil tabulasi data, berkisar antara 0,01612 mg/L hingga 0,77314 mg/L. Sedangkan untuk kandungan ammonia berkisar antara 0,01615 mg/L hingga 0,031 mg/L. Untuk parameter DIN, berkisar dari 0,0294 mg/L hingga 1,714 mg/L. Sedangkan untuk parameter TN, berkisar antara 0,2 mg/L hingga 2,65 mg/L.

Kandungan nutrien fosfor perairan laut subtropis terdiri dari tiga parameter yaitu P (fosfor), DIP (*Dissolved Inorganic Phosphorus*), dan TP (*Total Phosphorus*). TP merupakan gabungan dari TDP (*Total Dissolved Phosphorus*) dan *Particulate Phosphate* (PP). TDP terdiri dari *Dissolved Organic Phosphorus* (DOP) dan juga *ortho phosphate*. *Ortho Phosphate* merupakan salah satu bentuk fosfor yang merupakan bagian dari *Dissolved Inorganic Phosphorus* (DIP). Kandungan *Phosphorus* perairan subtropis berkisar antara 0,011 mg/L hingga 0,49 mg/L. Sedangkan kandungan parameter DIP berkisar dari 0,0171 mg/L hingga 0,088 mg/L. Untuk parameter TP perairan laut subtropis berdasarkan Tabel 3.5, berkisar antara 0,003 mg/L hingga 0,027 mg/L.

3.2 Pencemaran Minyak Mentah di Lingkungan Laut

3.2.1 Penyebab Tumpahan Minyak Mentah di Lingkungan Laut

Menurut undang-undang nomor 32 tahun 2014, pencemaran laut adalah masuk atau dimasukkannya makhluk hidup, zat, energi, dan/atau komponen lain ke dalam lingkungan laut oleh kegiatan manusia sehingga melampaui baku mutu lingkungan laut yang telah ditetapkan. Adapun yang dimaksud pencemaran minyak mentah di laut adalah masuknya senyawa atau cairan minyak mentah ke dalam lingkungan laut dan berinteraksi dengan komponen biotik dan abiotiknya serta mengakibatkan penurunan kualitas air laut. Diketahui bahwa minyak mentah merupakan salah satu bahan berbahaya dan beracun karena bersifat karsinogenik dan mutagenik (Astuti & Titah, 2020). Pencemaran minyak mentah dengan luas wilayah terdampak yang besar dapat diakibatkan oleh patahnya pipa distribusi, kebocoran pada *oil rig* lepas pantai, dan kecelakaan kapal tanker pengangkut minyak mentah (Hasanah *et al.*, 2018). Tidak kurang dari 6,44 juta ton per tahun kandungan senyawa hidrokarbon masuk ke perairan laut dunia.

Tumpahan minyak mentah di lingkungan laut dapat diakibatkan oleh beberapa kondisi seperti tabrakan kapal tanker yang mengakibatkan kebocoran lambung kapal tanker, kebocoran saat pengeboran minyak mentah lepas pantai, dan kebocoran pipa distribusi minyak mentah pada lingkungan laut. Menurut Widodo dan Wahyuni (2020) pencemaran laut akibat tumpahan minyak dapat dikelompokkan menjadi 3 bagian yaitu :

1. Kategori Kecil, dengan jumlah tumpahan kurang dari 7 ton minyak dan dapat berpotensi terjadinya pencemaran;
2. Kategori Medium, dengan jumlah tumpahan 7 hingga 700 ton minyak dan menyebabkan pencemaran;
3. Kategori Luas, dengan jumlah tumpahan minyak lebih dari 700 ton yang dapat menyebabkan pencemaran.

Tumpahan minyak dapat secara langsung maupun tak langsung berakibat pada penurunan kualitas lingkungan. Menurut Kuzhaeva and Berlinskii (2018), dapat mencemari lingkungan dengan beberapa mekanisme seperti berikut :

1. *Physical smothering* yang berdampak pada gangguan fungsi fisiologis organisme;
2. Toksisitas kimia memberi dampak langsung berupa efek lethal dan/atau sublethal dan juga menyebabkan gangguan fungsi sel;
3. Berkurangnya keanekaragaman ekosistem;
4. Efek tidak langsung, berupa hilangnya habitat dan tempat tinggal makhluk hidup terdampak yang diakibatkan oleh seleksi alam dari cemaran minyak mentah.

Dikarenakan bahan kimia tersebut sangat beragam pada minyak mentah, dalam pengukuran konsentrasinya tidak dilakukan pemisahan. Pengukuran minyak mentah dilakukan pendekatan dengan mengukur jumlah TPH (Sarasputri, 2011). *Total Petroleum Hydrocarbon* (TPH) merupakan istilah untuk menggambarkan beragam bahan kimia yang secara alami berada pada minyak mentah (Syarah, 2019). Secara umum kandungan TPH berasal dari hidrogen dan karbon, sehingga disebut pula sebagai hidrokarbon. Kandungan pada TPH dapat berupa heksana, mineral oils, benzene, toluena, xylene, florena, dan jet fuels. Besaran TPH pada skala tertentu dapat merusak lingkungan yang terpapar.

3.2.2 Metode Pengambilan Sampel Uji TPH, Nutrien, dan *Coliform* di Perairan Laut

Metode pengambilan sampel perairan laut untuk menguji kandungan TPH, Nutrien (N dan P) dan Jumlah Bakteri, berdasarkan prosedur yang telah ditetapkan pada SNI 6964-8-2015. SNI tersebut berjudul “Kualitas air laut – Bagian 8: Metode Pengambilan Contoh Uji Air Laut”. Standar tersebut bertujuan untuk menyeragamkan metode pengambilan contoh air laut untuk menguji beberapa parameter yang terdapat pada Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 51 Tahun 2004 mengenai Baku Mutu Air Laut. Berikut beberapa tahapan penentuan titik lokasi pengambilan lokasi uji hingga pengawetan sampel berdasarkan SNI 6964-8-2015:

1. Penentuan titik pengambilan contoh

a. Perairan *estuary* (muara sungai)

Pengambilan sampel pada muara sungai berdasarkan perbedaan salinitas dan juga kedalamannya. Salinitas muara sungai dibagi menjadi *Oligohaline* (0,5-5), *Mesohaline* (5-18), dan *Polyhaline* (18-30). Konsentrasi salinitas perairan muara sungai tidak homogen, bagian atas memiliki kadar salinitas lebih rendah dibanding bagian dasar muara sungai. Adapun pengambilan uji sampel apabila kedalaman air kurang dari satu meter adalah 0,5 D. Apabila kedalaman air lebih dari satu meter dapat mengambil sampel pada kedalaman 0 – 1 meter, 0,2D, 0,5D, 0,8D.

b. Perairan pesisir (*coastal area*)

Perairan pesisir merupakan area yang perbatasan daratan dan lautan. Perairan pesisir dipengaruhi oleh kegiatan darat, pelabuhan, dan/atau perairan dangkal lainnya. Titik pengambilan contoh area pesisir berdasarkan kedalamannya adalah 0 – 1 meter, 0,2D, 0,5D, dan 0,8D.

c. Perairan Laut (*open sea*)

Perairan laut atau *open sea* merupakan perairan yang tidak terpengaruh oleh masukan air sungai. Pengambilan air sampel dilakukan di beberapa kedalaman air. Perairan laut dengan kedalaman 1-100 meter, titik pengambilan sampel dilakukan pada 0,2D, 0,5D, dan 0,8D. Untuk kedalaman lebih dari 100 meter, dilakukan pengambilan sampel pada 0,2D, 0,4D, 0,6D dan 0,8D.

2. Alat pengambil contoh uji

Alat pengambil contoh uji air laut dibagi berdasarkan jumlah sampel air laut yang didapat (tunggal dan *multiple sampler*) dan berdasarkan arah pengambilan sampel (horizontal dan vertikal). Alat pengambil contoh tunggal seperti *nansen sampler*, *niskin sampler*, *goflo sampler*, *vandern sampler*, *hydro-bios sampler*, *hayroth sampler*. Alat uji lain seperti *multi water sampler slimline* dan *horizontal water sampler*. Alat uji sampel biasanya berbentuk silinder dan terbuat dari bahan yang tidak mudah bereaksi dengan objek sampel. Alat uji tersebut pada umumnya dilengkapi dengan pemberat, cincin pengaman, *messenger*, dan juga katup yang memungkinkan dapat membuka dan memasukkan objek sampel sesuai kedalamannya. Sebelum digunakann alat pengambil contoh uji disterilkan untuk menghindari kontaminasi pada sampel uji.

3. Wadah contoh uji

Wadah untuk menyimpan contoh uji yang sudah diambil, hendaknya menggunakan bahan dengan persyaratan :

- a. Terbuat dari bahan gelas untuk uji minyak dan fosfat
- b. Terbuat dari bahan P (Polietilen), G (Gelas), dan FP (Flouropolimer) untuk uji *Total Phosphorous*, nitrat, nitrit, dan ammonia
- c. Terbuat dari bahan botol gelas gelap tutup ulir untuk uji *coliform*.

4. Persiapan pengambilan contoh uji

a. Persiapan alat

Alat yang digunakan sebagai pengambil sampel harus dipastikan bebas dari kontaminasi dan tidak terdapat cacat fisik untuk memastikan alat tersebut berfungsi dengan baik.

b. Persiapan bahan

c. Persiapan wadah contoh uji

Parameter zat organik : Wadah dicuci dengan deterjen tanpa fosfat dan dibilas dengan air biasa serta bebas analit, Dimasukkan 10 mL pelarut yang sesuai dengan target uji ke dalam wadah hingga mengenai seluruh bagian dalam wadah. Kemudian dibuang pelarut dan wadahnya dibiarkan hingga mengering.

Parameter nutrien : Wadah dicuci dengan deterjen tanpa fosfat dan dibilas dengan air bersih. Dicuci botol dengan asam klorida (HCl) 1:1 dan dibilas menggunakan air bebas analit sebanyak 3 kali. Botol dibiarkan mengering kemudian ditutup dengan rapat.

Parameter biologi : Wadah dicuci dengan deterjen tanpa fosfat, dan dibilas dengan air bebas analit sebanyak 3 kali hingga kering. Kemudian wadah yang sudah kering ditutup dengan rapat.

5. Cara pengambilan contoh uji

a. Parameter fisika, kimia, dan biologi

- Disiapkan wadah contoh uji yang sudah bebas dari kontaminan
- Diambil contoh uji pada titik pengambilan sampel yang telah ditentukan sebelumnya
- Dimasukkan contoh uji yang sudah didapat ke dalam wadah sesuai parameter

- Dicatat kondisi lapangan berupa beberapa parameter lapangan dan titik koordinat pengambilan sampel
- Diberi identitas sampel pada wadah contoh uji
- Dilanjutkan dengan pengawetan sampel apabila diperlukan

b. Parameter biologi (*coliform*)

Pengambilan contoh uji *coliform* menggunakan botol gelas gelap dengan tutup ulir yang sudah disterilkan. Pengambilan sampel hanya dilakukan pada bagian permukaan air laut dengan kedalaman hingga 1 meter dibawah permukaan air laut.

6. Pengawetan contoh uji

a. Parameter kimia

Penambahan volume pengawet tidak boleh melebihi dari 0,5% volume uji agar tidak terjadi pengenceran. Untuk parameter nutrisi dan organik, rata-rata harus didinginkan hingga bersuhu 6°C.

b. Parameter biologi (*coliform*)

Pengawetan contoh uji bakteri *coliform* dilakukan pada suhu 4°C dan tidak terkena sinar matahari secara langsung. Adapun batas waktu pengujian setelah pengambilan sampel maksimal 6 jam \pm 2 jam.

7. Pengukuran nutrisi dan *coliform*

Metode pengukuran kandungan nutrisi fosfat dan nitrat dapat menggunakan metode spektrofotometri. Hasil pengukuran nutrisi akan memiliki satuan mg/L. Sementara untuk metode pengukuran jumlah kepadatan sel bakteri menggunakan metode *plate count* yang diencerkan secara seri. Hasil pengukuran jumlah sel bakteri akan memiliki satuan CFU/ml.

3.2.3 Metode Pengukuran TPH

Pengukuran TPH dapat menggunakan beberapa metode dan alat seperti Gravimetri, *Gas Chromatography – Mass Spectrometry* (GC-MS), *Gas Chromatography/flame ionization detection* (GC/FID), dan *Thin-layer chromatography flame ionization detection* (TLC/FID). Gravimetri merupakan metode analisis TPH paling sederhana dengan menggunakan prinsip pengukuran berat. Kekurangan dari metode gravimetri adalah tidak dapat mengetahui komposisi rantai karbon pada TPH dan memiliki sensitivitas yang tidak tinggi (Wardhani, 2020). *Gas Chromatography* (GC) merupakan salah satu analisis TPH yang memisahkan komponen dari matriks sampel dan tetap membiarkannya pada fase diam untuk selanjutnya dilakukan analisis. Waktu tambat pada GC melambangkan identitas suatu senyawa secara kualitatif maupun kuantitatif (Wahyuni, 2019). GC sering dipadukan dengan MS (*Mass Spectrometry*) dan FID (*Flame Ionization Detection*) untuk analisis pengukuran komposisi sampel. GC-MS dapat menganalisis segala jenis senyawa hidrokarbon pada TPH. GC-MS digunakan untuk mengukur alkana tertentu seperti Alkana, PAH, dan PAH teralkilasi (Ortmann *et al.*, 2020). Untuk GC-FID digunakan untuk menentukan analisis fraksi *heavy petroleum hydrocarbons* (PHC) (Mehrizi *et al.*, 2019). *Thin-layer chromatography flame ionization detection* (TLC/FID) cukup baik digunakan untuk analisis *saturated, aromatic, resins, and asphaltene* (SARA) pada TPH (Mehrizi *et al.*, 2019).

3.2.4 Komposisi Minyak Mentah

Minyak mentah merupakan campuran cairan yang terdiri dari jutaan senyawa kimia, yang secara umum merupakan senyawa hidrokarbon yang terbentuk dari dekomposisi organisme tumbuhan, hewan, dan jasad renik sejak jutaan tahun lalu (Syarah, 2019). Senyawa hidrokarbon berdasarkan bentuknya terdiri dari tiga jenis yaitu hidrokarbon jenuh, hidrokarbon aromatik, aspalten, dan resin (Syafrizal *et al.*, 2020). Komponen penyusun minyak bumi, sebanyak 50-98% merupakan hidrokarbon dan non hidrokarbon dengan komposisi bergantung pada sumber minyak mentah. Minyak mentah ini akan dilakukan pengolahan destilasi untuk memisahkan minyak bumi ke dalam fraksi masing-masing berdasarkan titik didihnya (Hakim *et al.*, 2021). Minyak mentah dapat diolah hingga menjadi tujuh macam produk olahan yang siap digunakan. Adapun komponen penyusun minyak seperti pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Komponen Hidrokarbon dan Nonhidrokarbon pada Minyak Bumi

Senyawa	Jumlah (%)
Karbon	83,9 – 86,9
Hidrogen	11,4 – 14
Belerang	0,06 – 8
Nitrogen	0,11 – 1,7
Oksigen	0,5
Logam	0,03

Sumber: Wayoi, 2018

Adapun beberapa jenis hidrokarbon yang terdapat pada minyak mentah yang telah diklasifikasikan oleh IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*) seperti pada Tabel 3.7. Rerata minyak mentah mengandung 30% alkana; 50% sikloalkana dialkenes, alkynes, cycloalkanes, alkanes; 15% aromatic hydrocarbon; 5% nitrogen, sulfur, oksigen dan lainnya. Sementara resin dan aspal merupakan struktur kompleks yang susah untuk dilakukan proses biodegradasi (Hoang *et al.*, 2018).

Tabel 3.7 Jenis Hidrokarbon

<i>Primary Class</i>	<i>Compounds</i>
Alkana rantai lurus, n-alkana	Propana [C ₃ H ₈]
	n-Heksana [CH ₃ (CH ₂) ₄ CH ₃]
	n-Dodekana [CH ₃ (CH ₂) ₁₀ CH ₃]
	Cis-but-2-ene [CH ₃ CH=CHCH ₃]
	Pent-1-ene [CH ₂ =CH(CH ₂) ₂ CH ₃]
	Trans-hept-2-ene [CH ₃ CH=CH(CH ₂) ₃ CH ₃]
Sikloalkana, dengan cincin ikatan tunggal	Sikloalkana [C ₆ H ₁₂]
	n-Propil-Siklopentana [CH ₃ CH ₂ CH ₂ C ₅ H ₉]
	Etil-Sikloheksana [CH ₃ CH ₂ C ₆ H ₁₁]
Hidrokarbon aromatik lain	Fenol [C ₆ H ₅ OH]
	Krezol [RC ₆ H ₄ OH],
	Heksakloro-sikloheksana

<i>Primary Class</i>	<i>Compounds</i>
Sikloalkana, dengan cincin ikatan ganda	Siklopentena [C_5H_8]
	3-Metil-siklopentena [$CH_3C_5H_7$]
Alkana bercabang	2-Metil-propana [$CH_3CH(CH_3)CH_3$]
	2,2-Dimetil-butana [$CH_3CH(C- H_3)_2CH_3CH_3$]
	2,2-Dimetil-propana [$CH_3CH(CH_3)_2CH_3$]
	2-Etil-heksana [$CH_3CH(C_2H_5)(CH_2)_3CH_3$]
	2-Metil-but-1-ene [$CH_2=C(CH_3)CH_2CH_3$]
	4,4-Dimetil-cis-pent-2-ene [$CH_3CH=C- HC(CH_3)_2CH_3$]
(Alkil) benzena	Benzena [C_6H_6]
	Metil benzena [$CH_3C_6H_5$]
	Etil benzena [$C_2H_5C_6H_5$]
	(o-Xilena) o-Metil-toluena [$CH_3C_6H_4(o- CH_3)$]
	(m-Xilena) m-Metil-toluena [$CH_3C_6H_4(m- CH_3)$]
	(p-Xilena) p-Metil-toluena [$CH_3C_6H_4(p- CH_3)$]
(Alkil) benzena	1,2-Dimetil-3-etil-benzena [(1- CH_3)(2- CH_3) C_6H_3 (3- C_2H_5)]
	1,2,3-Trimetil-benzena [(1- CH_3)(2- CH_3) C_6H_3 (3- CH_3)]
	n-Propil-benzena [$CH_3CH_2CH_2C_6H_5$]
Polisiklik aromatic hidrocarbon	Acenaphthena dengan 2 cincin benzena dan cincin sikloalkana [$C_{12}H_{10}$]
	Naftalena dengan 2 cincin benzene [$C_{10}H_8$]
	Atrasena dengan 2 cincin benzene dan satu cincin sikloalkana [$C_{14}H_{10}$]
	<i>Chrysene</i> dengan 3 cincin benzene dan satu cincin sikloalkadiena [$C_{18}H_{12}$]
	<i>Coronene</i> dengan 4 cincin benzena, satu cincin sikloalkana dan 2 cincin sikloalkadiena [$C_{24}H_{12}$]
	<i>Pyrene</i> dengan 3 cincin benzene dan satu cincin sikloalkana [$C_{16}H_{10}$]

Sumber : IUPAC dalam Hoang et al (2018)

Pada minyak mentah terdapat kandungan non hidrokarbon, seperti nitrogen, oksigen, dan logam. Komponen logam pada minyak mentah berkisar antara 0,03 hingga 300 mg/L. Komposisi yang logam yang paling dominan adalah vanadium dan nikel. Menurut Nugroho (2006) komponen non hidrokarbon yang ada pada minyak mentah seperti pada Tabel 3.8 berikut ini

Tabel 3.8 Komponen Non Hidrokarbon Pada Minyak Mentah

Nama unsur	Konsentrasi dalam Minyak Mentah ($\mu\text{g/L}$)	Nama unsur	Konsentrasi dalam Minyak Mentah ($\mu\text{g/L}$)
N ₂	2,8x10 ³	Helium	Ada
NO ₃	9,5x10 ⁵	Berillium	Jarang
N Sebagai Organik	1x10 ⁵ -9x10 ⁶	Boron	(7,2-104)x10 ³
Brom	72-2,2x10 ³	Rubidium	10-720
Sodium	≤2x10	Strontium	0,35-250
Magnesium	0,5-2,8x10 ⁴	Yttrium	Unsur Langka
Aluminium	34-1,2x10 ³	Zirconium	2,4-9,8
Silikon	24-2,1x10 ³	Molibdenum	1-7,3x10 ³
Fosfor	3x10 ³ -1x10 ⁴	Perak	Unsur Langka
Sulfur	<9,8x10 ⁴	Cadmium	0,2-29
Klorin	1x10 ⁴ -5,5x10 ⁷	Indium	<0,1
Argon	1,1x10 ³ -1x10 ⁶	Timah	5x10 ³
Kalium	Ada	Rhenium	<200
Kalsium	390-7,7x10 ³	Emas	2,4x10 ⁻² - 3
Scandium	<1,9x10 ⁵	Merkuri	23-3x10 ⁴
Titanium	0,27-300	Timbal	0,5-430
Vanadium	0,4-200	Bismut	Unsur Langka
Chromium	24-1,3x10 ⁶	Uranium	1x10 ⁻² -434
Mangan	1,4-690	Antimoni	6-300
Besi	0,14-3,8x10 ³	Iodine	10 ⁻⁹ x10 ³
Cobalt	20-1,2x10 ⁵	Cesium	Apr-68
Nikel	1,3-1,4x10 ⁴	Barium	0,2-308
Tembaga	27-3,4x10 ³	Lantanum	0,03-39
Seng	3,5-6,3x10 ³	Cerium	Unsur Langka
Gallium	11-810	Ncodimium	Unsur Langka
Germanium	≤100	Samarium	<0,78
Arsen	2-2x10 ³	Europium	0,6-23,2
Selenium	9-1,4x10 ³	Disprosium	Unsur Langka
Oksigen			

Sumber: Nugroho (2006)

Sebaran minyak mentah di perairan laut akan dibedakan dari beberapa efek kepada lingkungan. Kebanyakan minyak akan tersebar dengan arah horizontal. Karakteristik sebaran minyak akan bergantung pada karakteristiknya seperti tegangan permukaan, *specific gravity*, dan viskositasnya (EPA, 1999). Tegangan permukaan merupakan ukuran terhadap interaksi antar permukaan molekul cairan. Semakin tinggi tegangan permukaan maka minyak cenderung tidak menyebar. Namun. Apabila tegangan permukaannya rendah maka minyak akan tersebar atau terdispersi lebih luas meskipun tidak dibantu oleh angin dan arus air. Sementara untuk *specific gravity* merupakan densitas dari suatu substansi yang dibandingkan dengan densitas air. Densitas dari tumpahan minyak akan meningkat seiring terjadinya evaporasi dari substansi ringannya. Minyak yang lebih berat kemungkinan akan tenggelam dan membentuk *tar balls* hingga berinteraksi dengan batuan di dasar lautan. Viskositas merupakan ukuran resistensi cairan untuk mengalir. Semakin

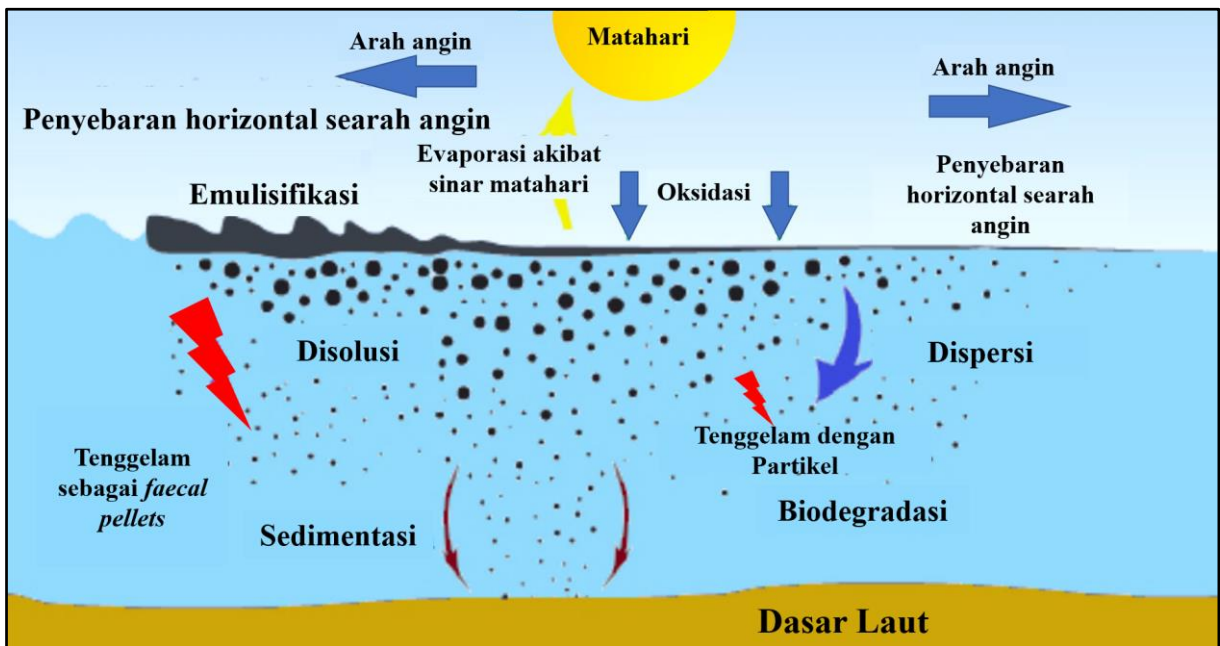
tinggi viskositas suatu minyak, maka kemungkinan untuk menyebar lebih luas cenderung menurun (EPA, 1999). Minyak mentah diklasifikasikan menjadi *heavy oil* dan *light oil*. *Heavy oil* seperti IFO (*Intermediate fuel oil*), HFO (*Heavy fuel oil*), dan *heavy crude oil* memiliki dampak *smothering* bagi perairan laut. Sementara untuk *Light oil* terkhusus *light crude oil* dan produk turunannya lebih bersifat toksik bagi lingkungan perairan laut (Kuzhaeva & Berlinskii, 2018).

3.2.5 Karakteristik Tumpahan Minyak Mentah di Lingkungan Laut

Tumpahan minyak mentah di perairan laut akan mengalami beberapa mekanisme fisik, kimia, dan biologis yang diakibatkan oleh interaksi dengan lingkungannya. Menurut Hoang *et al.* (2018) dan Keramea *et al.* (2021), interaksi tumpahan minyak mentah dapat terjadi seperti berikut:

- Penyebaran minyak mentah diakibatkan oleh hembusan angin pada permukaan laut dan/atau searah oleh arus laut. Semakin kecil tingkat viskositasnya, maka penyebarannya akan semakin cepat. Penyebaran atau *spreading* minyak mentah merupakan pembentukan *thin film* dan perluasan jangkauan area terdampak setelah tumpahan minyak terjadi. Sebaran tumpahan minyak mentah disebabkan oleh adanya arus laut, gelombang, dan angin.
- Evaporasi oleh sinar matahari terjadi ketika substansi ringan atau volatile dari minyak mencapai titik penguapannya dan tersisa substansi yang lebih berat. Evaporasi terjadi beberapa jam setelah tumpahan terjadi dan merupakan awal dari proses reduksi minyak mentah secara alamiah.
- Oksidasi terjadi ketika minyak kontak dengan air dan oksigen berkombinasi dengan hidrokarbon minyak membentuk senyawa yang larut dalam air
- Emulsifikasi merupakan proses pembentukan emulsi yang merupakan campuran *small droplet* dari air dan minyak. Emulsi tersebut dibentuk oleh ombak laut dan turbulensi permukaan laut. Emulsi minyak dan air akan membentuk cairan yang cukup stabil dan kental. Proses emulsifikasi bergantung pada komposisi minyak, temperatur lingkungan dan viskositas minyak. Ketika viskositas minyak meningkat, maka jumlah emulsi minyak meningkat dan mengurangi laju penguapan minyak. Peningkatan jumlah emulsi yang berarti terjadi peningkatan volume *slick*, sehingga fenomena tersebut dapat meningkatkan biaya penanganan.
- Dispersi merupakan pemecahan lapisan minyak menjadi bentuk yang lebih kecil seperti butiran dan menyebabkannya masuk ke kolom air. Dispersi disebabkan oleh proses mekanis oleh pergerakan turbulen air laut. Butiran minyak yang telah masuk pada kolom air akan mengalami proses emulsifikasi.
- Disolusi merupakan proses pelarutan minyak pada kolom air. Minyak memiliki jumlah senyawa terlarut dalam jumlah yang sangat kecil (<1 mg/L). Disolusi didahului oleh proses dispersi. Pada umumnya senyawa minyak mentah yang mengalami proses dispersi memiliki massa jenis yang rendah seperti senyawa aromatik. Komponen hidrokarbon dengan massa jenis yang rendah lebih mudah larut pada air laut dan lebih mudah menguap. Seperti senyawa hidrokarbon benzena dan toluene yang dapat larut beberapa jam setelah kontak dengan air laut. Secara umum disolusi akan berperan signifikan ketika proses evaporasi sangat rendah.
- Sedimentasi merupakan proses pengendapan senyawa minyak yang massa jenisnya lebih besar daripada massa jenis air laut. Senyawa tersebut mengalami interaksi dengan padatan tersuspensi pada air laut.
- *Sinking on particles*
- *Sinking as faecal pellets*

- Biodegradasi terjadi ketika terdapat mikroba hidrokarbonoklastik memanfaatkan hidrokarbon yang sebagai sumber energinya.



Gambar 3.2 Proses Transformasi, Variasi, dan Perubahan Tumpahan Minyak Mentah di Lingkungan Laut

Sumber: Hoang et al (2018)

3.3 Bioremediasi

3.3.1 Pengenalan Bioremediasi

Bioremediasi berasal dari dua kata yaitu Bio dan Remediasi. Bio bermakna makhluk hidup dan remediasi merupakan proses menghilangkan, menurunkan, dan/atau mengubah kontaminan atau polutan menjadi zat yang tidak berbahaya atau kurang berbahaya. Maka bioremediasi bermakna suatu proses pemanfaatan reaksi biodegradatif mikroorganisme seperti bakteri, alga, dan yeast untuk menyisihkan atau mendetoksifikasi polutan yang terbuang ke lingkungan (Fidiastuti *et al.*, 2019). Reaksi tersebut merupakan jenis reaksi oksidasi dan reduksi yang penting untuk menghasilkan energi bagi mikroorganisme pendegradasi (Tangahu *et al.*, 2018). Proses biologis mikroba melalui biodegradasi memiliki potensi untuk mengolah tumpahan minyak mentah (Sunaryanto, 2017). Pada metode remediasi mencakup proses pengurangan mobilitas dan migrasi kontaminan, serta mencegah perluasan sebaran kontaminan pada area yang tidak terkontaminasi (Yuniati, 2018). Penggunaan metode bioremediasi pada umumnya dilakukan secara *insitu* (pengelolaan pencemaran di tempat asalnya). Metode bioremediasi bersifat spesifik bergantung pada karakteristik pencemarnya. Diperlukan penelitian pendahuluan sebelum proses remediasi yang bertujuan mendapatkan karakteristik pencemar, keberadaan mikroba *indigenous*, dan kondisi lingkungan eksisting.

Aplikasi bioremediasi yang sering digunakan untuk mendegradasi tumpahan minyak mentah terdiri dari tiga jenis yaitu bioatenuasi, bioaugmentasi, dan biostimulasi. Bioatenuasi merupakan metode remediasi pemulihan lingkungan tercemar dengan memanfaatkan mikroorganisme yang ada pada lingkungan tersebut dan dibiarkan terdegradasi secara alami tanpa ada intervensi (Wardhani & Titah, 2020). Bioaugmentasi merupakan penambahan mikroba yang telah diisolasi dan dikembangkan berupa kultur

tunggal maupun campuran yang mampu mendegradasi pencemar. Biostimulasi merupakan proses penyesuaian kondisi lingkungan tercemar baik pada kandungan nutrisinya maupun komponen abiotiknya. (Nurmalasari, 2018).

3.3.2 Faktor-Faktor yang Berpengaruh Pada Efektifitas Bioremediasi

Berbagai konsorsium mikroorganisme mampu untuk mendegradasi berbagai macam senyawa polutan. Namun, pada prosesnya membutuhkan waktu yang cukup lama untuk menurunkan konsentrasi polutan, diakibatkan adanya batasan fisik, kimia, dan biologis. Metode bioremediasi membutuhkan organisme yang tepat sesuai dengan kondisi lingkungan yang tepat sehingga mampu mendegradasi polutan secara baik (Harmesa, 2020). Proses penguraian senyawa polutan oleh mikroorganisme dipengaruhi oleh kesesuaian suhu, pH, kecukupan asektor elektron, kadar oksigen, jumlah nutrien, dan faktor lingkungan lain (Dicky & Ratni, 2021).

a. Suhu / Temperatur

Faktor suhu sangat berpengaruh dalam pemilihan mikroorganisme sebagai agen remediasi. Mikroorganisme diklasifikasikan menjadi tiga bagian berdasarkan suhu habitat alamiahnya (Wahyuni, 2017). Klasifikasi yang pertama adalah mikroorganisme psikrofil (kryofil) yang memiliki habitat alami pada suhu 0°C - 30°C, dengan suhu optimal pada 15 °C. Selanjutnya adalah mikroorganisme mesofil yang memiliki habitat alamiah pada suhu 15 °C hingga 55 °C dan suhu optimum pertumbuhan pada suhu 25 °C - 37 °C. Kemudian adalah golongan mikroorganisme termofil yang biasa hidup pada suhu tinggi antara 40 °C hingga 75 °C, dengan suhu optimum pada rentang 45 °C - 65 °C.

b. Derajat Keasaman (pH)

Secara umum, biodegradasi hidrokarbon oleh mikroorganisme mencapai titik optimumnya pada pH netral, sekitar pH 6,0 hingga 8,0 (Puspitasari *et al.*, 2020). pH berpengaruh terhadap, keseimbangan reaksi, *transport* membran, dan fungsi seluler mikroorganisme. Bakteri pada habitat alamiahnya cenderung hidup pada pH netral hingga sedikit alkali / basa (Holifah *et al.*, 2018).

c. Tingkat Salinitas

Tidak semua mikroorganisme dapat hidup pada kondisi dengan salinitas yang tinggi. Seperti halnya bakteri *E. coli* yang tidak dapat hidup pada perairan laut. Secara umum terdapat klasifikasi terhadap mikroorganisme halofilik (dapat hidup di lingkungan berkadar garam tinggi) berdasarkan kemampuan dalam merespon salinitas, yaitu mikroorganisme *halo-tolerant* dan *halo-resistant*. Mikroorganisme *halo-tolerant* terdiri dari organisme bakteri gram positif yang dapat hidup di perairan dengan kadar garam 6-12%. Mikroorganisme *halo-resistant* dapat hidup dengan kadar garam 0,5% hingga 30%.

d. Kecukupan akseptor elektron

Metabolisme mikroorganisme merupakan jenis reaksi oksidasi dan reduksi yang penting untuk menghasilkan energi bagi selnya (Tangahu *et al.*, 2018). Proses oksidasi senyawa organik oleh mikroorganisme dapat menghasilkan elektron. Sementara, elektron tidak bisa berada dalam bentuk bebas. Oleh karena itu dibutuhkan akseptor elektron untuk mengikat elektron yang kemudian akan digunakan pada reaksi reduksi senyawa oleh mikroorganisme. Mikroorganisme aerobik menggunakan oksigen sebagai

akseptor elektronnya. Pada mikroorganisme anaerobik dapat menggunakan NO_3 , SO_4 , fumarat, dan lainnya bergantung pada jenis metabolismenya.

e. Kadar Oksigen Terlarut / *Dissolved Oxygen* (DO)

Mikroorganisme hidrokarbonoklastik sebagian umum bersifat aerobik. Mikroorganisme tersebut menghasilkan enzim oksigenase yang dapat memecah senyawa hidrokarbon (Puspitasari *et al.*, 2020). Keberadaan enzim tersebut berperan pada reaksi masuknya oksigen ke dalam senyawa kimia. Oksigen juga dibutuhkan mikroorganisme sebagai akseptor elektron dan respirasi aerobik sel. Menurut Atlas dan Bertha dalam Nurmalasari (2018), dalam perhitungan secara teori 1 gram oksigen dapat mendegradasi hidrokarbon sebanyak 3,5 gram. Oleh karena itu dibutuhkan oksigen yang optimal untuk mendukung proses degradasi minyak mentah oleh mikroorganisme.

f. Nutrien

Terdapat dua jenis nutrien yang dibutuhkan oleh mikroorganisme yaitu makronutrien dan mikronutrien. Makronutrien merupakan jenis nutrien yang paling dibutuhkan mikroorganisme untuk melakukan serangkaian proses metabolisme sel yang mencakup karbon, nitrogen, dan fosfor. Karbon digunakan mikroorganisme sebagai sumber energi. Sementara untuk nitrogen dan fosfor digunakan sebagai penyusun utama senyawa yang dibutuhkan pada sel mikroorganisme. Mikronutrien merupakan nutrisi yang dibutuhkan dalam jumlah kecil pada metabolisme sel. Pada umumnya mikronutrien digunakan sebagai kofaktor enzim mikroorganisme. Contohnya seperti sulfur, Logam besi, tembaga, *zinc*, nikel, magnesium, kalsium, cobalt, dan lainnya

g. Kondisi Pencemaran

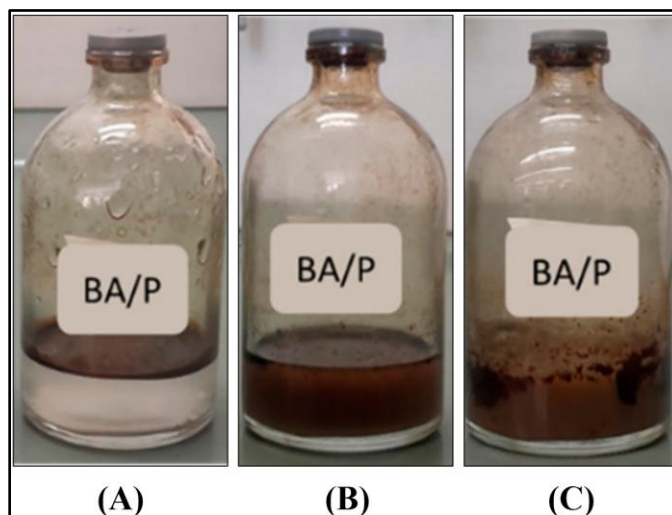
Faktor lain yang dapat berpengaruh terhadap efektivitas bioremediasi adalah karakteristik dan kondisi pencemaran. Dalam kasus tumpahan minyak mentah di perairan laut, perlu diketahui jenis minyak mentahnya termasuk *heavy crude oil* atau *light crude oil*. Selanjutnya perlu diketahui kondisi eksisting pencemaran, sudah terdispersi dan terdisolusi atau masih dalam kondisi membentuk lapisan minyak di permukaan laut. Diperlukan penyesuaian karakteristik pencemaran dengan kemampuan masing-masing agen bioremediasi.

3.4 Bioaugmentasi

Bioaugmentasi merupakan salah satu metode yang dapat digunakan untuk remediasi lingkungan tercemar minyak mentah. Bioaugmentasi merupakan penambahan kultur mikroba pada lingkungan tercemar untuk mempercepat proses degradasi polutan (Nisa'Adzini *et al.*, 2019). Penambahan kultur mikroba pada proses bioremediasi, dikarenakan populasi mikroba eksisting tidak mampu mendegradasi polutan yang ada. Diharapkan dengan penambahan mikroba yang telah dikembangkan dapat mempercepat proses biodegradasi polutan. Penambahan kultur mikroba dapat berasal dari bakteri *indigenous* (berasal dari lokasi pencemaran terjadi) dan bakteri *exogenous* (berasal dari interaksi mikroorganisme terhadap polutan terjadi melalui mekanisme biosorpsi, bioasimilasi, biopresipitasi, bioleaching, biodegradasi, bioakumulasi, biosintesis, dan biotransformasi (Peng *et al.*, 2018).

Mikroorganisme yang dipilih pada proses bioaugmentasi harus mampu beradaptasi dengan lingkungan terkontaminasi dan memiliki kemampuan katabolik yang spesifik untuk menyingkirkan kontaminan target (Harmesa, 2020). Pada lingkungan yang tercemar minyak mentah secara alamiah ditemukan mikroorganisme yang dapat mendegradasi minyak

mentah dengan jumlah lebih dari 10%, sementara pada lingkungan tidak tercemar minyak mentah hanya dapat ditemukan mikroorganisme pendegradasi minyak mentah sebanyak 1% (Nugroho, 2006). Lingkungan yang tercemar minyak mentah, terjadi proses biodegradasi secara alamiah yang melibatkan rangkaian proses konsorsium bakteri. Hal tersebut diakibatkan oleh ketidakmampuan bakteri dalam mendegradasi semua komponen minyak mentah, sehingga dibutuhkan kerja sama antar bakteri untuk mendegradasi minyak mentah secara tuntas (Uyun, 2018). Adapun contoh kondisi minyak mentah skala laboratorium selama proses bioaugmentasi yang dilakukan oleh Perdigão *et al.* (2021), tertera pada Gambar 3.3. Pada gambar A merupakan kondisi awal minyak mentah, gambar B setelah 7 hari, dan gambar C setelah 14 hari kemudian. Pada bioaugmentasi ini, akan fokus pada metode bioaugmentasi menggunakan mikroorganisme bakteri hidrokarbonoklastik. Pembahasan akan mencakup mengenai metabolisme bakteri, pertimbangan penggunaan bakteri kultur tunggal dan/atau konsorsium, serta pertimbangan penggunaan bakteri indigen dan/atau eksogen.



Gambar 3.3 Perubahan Kondisi Minyak Mentah Pada Proses Bioaugmentasi

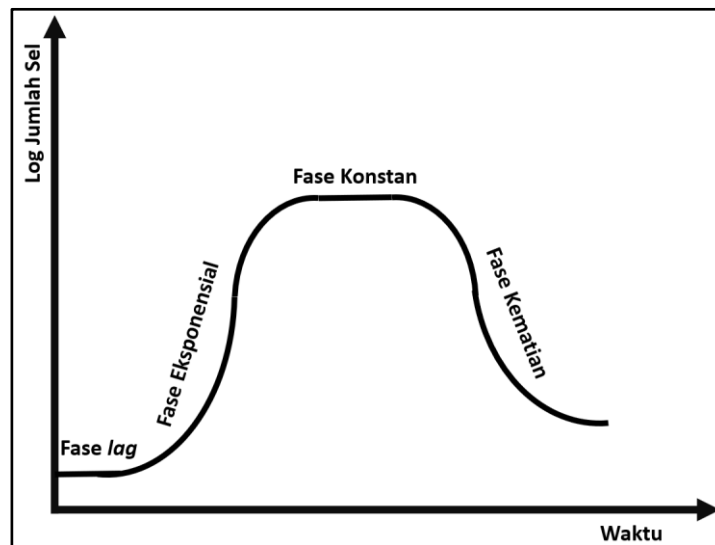
Sumber : Perdigão et al. (2021)

3.4.1 Bakteri Hidrokarbonoklastik

Bakteri Hidrokarbonoklastik merupakan jenis bakteri yang mampu untuk mendegradasikan senyawa hidrokarbon sebagai proses metabolisme dan perkembangbiakannya (Mijaya *et al.*, 2019). Bakteri hidrokarbonoklastik mempunyai potensi secara genetik untuk mengikat, mengemulsi, dan merombak senyawa hidrokarbon menjadi senyawa yang lebih sederhana dan aman bagi lingkungan (Nuryana, 2017). Masing-masing bakteri memiliki kemampuan yang berbeda bergantung pada senyawa hidrokarbonnya. Beberapa bakteri hidrokarbonoklastik hanya dapat mendegradasi secara optimal pada panjang rantai tertentu (Mapelli *et al.*, 2017). Adapun bakteri yang mampu mendegradasi senyawa minyak mentah menurut Xu *et al.* (2018) dan Varjani (2017), seperti yang tercantum pada Tabel 3.9.

Menurut Yulinah (2012), secara garis besar bakteri memerlukan empat tahap pertumbuhan mulai dari fase adaptasi (*lag phase*), fase pertumbuhan (*logaritmik / eksponensial*), fase statis (konstan), dan fase kematian. Pada fase adaptasi, bakteri mengalami penyesuaian dengan media tumbuhnya dan terjadi pembesaran sel. Apabila bakteri dapat beradaptasi dengan lingkungannya akan berlanjut pada fase pertumbuhan (*logaritmik / eksponensial*). Pada fase pertumbuhan, massa sel bakteri tumbuh menjadi dua

kali lipat dan aktivitas metaboliknya berlangsung konstan. Pembelahan sel pada fase logaritmik sesuai dengan persamaan eksponensial, sehingga fase tersebut disebut juga dengan fase eksponensial. Pada fase pertumbuhan ini, sel mikroba akan membutuhkan dan mengkonsumsi nutrisi dengan jumlah yang terus meningkat hingga fase tertentu (Nurjanah, 2018). Fase pertumbuhan dilanjutkan dengan fase stasioner (konstan), dimana mulai terjadi penurunan populasi sel hidup. Pada fase stasioner, kematian bakteri masih sebanding dengan jumlah bakteri yang hidup. Yang terakhir adalah fase kematian, dimana fase kematian bakteri lebih cepat daripada pertumbuhan bakteri baru. Fase kematian juga berlangsung secara eksponensial seperti pada fase pertumbuhan. Fase pertumbuhan bakteri dapat digambarkan menggunakan kurva sigmoid seperti pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Kurva Sigmoid

Sumber : Digambar ulang dari Yulinah (2012)

Kurva sigmoid terdapat dua komponen pembentuk, yaitu jumlah mikroba pada sumbu y dan periode waktu pertumbuhan bakteri pada sumbu x. Perhitungan mikroba dapat menggunakan beberapa metode seperti yang tercantum pada Yulinah (2012) berikut:

- a. *Plate count* : perhitungan jumlah koloni mikroba yang ditumbuhkan pada media di cawan petri. Sebelumnya, media tersebut telah beri sampel pengamatan yang diencerkan secara seri.
- b. *Most Probable Number (MPN)* : merupakan perkiraan jumlah koloni mikroba dengan mengukur perubahan substrat menjadi produk metabolit mikroba. Sampel yang diuji akan diencerkan secara bertingkat dan akan mendapatkan hasil kuantitatif jumlah mikroba dengan satuan MPN/ml.
- c. *Membran filtrasi* : perhitungan jumlah koloni pada membran filter yang digunakan dalam menyaring sampel.
- d. *Perhitungan Langsung*: Koloni mikroba dihitung langsung menggunakan alat *coulter counter*.

Karakteristik utama mikroba hidrokarbonoklastik dibanding dengan mikroba lainnya yaitu kemampuan untuk mengekskresikan enzim hidroksilase. Enzim hidroksilase berfungsi untuk mengoksidasi hidrokarbon dengan cara memotong rantai senyawanya menjadi lebih pendek dan lebih sederhana (Handrianto, 2018). Mikroba dapat dengan cepat dan lengkap mendegradasi polutan organik seperti hidrokarbon pada kondisi aerobik

(Novianty et al., 2020). Mikroba hidrokarbonoklastik juga memiliki enzim oksigenase yang terbagi menjadi enzim monooksigenase dan dioksigenase. Enzim oksigenase mendorong terjadinya reaksi masuknya oksigen pada proses oksidasi senyawa kimia. Proses tersebut berperan untuk membuka ikatan karbon pada senyawa aromatik dan dihasilkan alkohol primer (Puspitasari et al., 2020). Beberapa mikroba hidrokarbonoklastik seperti *Bacillus*, *Arthrobacter*, *Micrococcus*, *Zoopage*, *Pseudomonas*, dan *Articulosporium* juga menghasilkan spora yang mampu melindungi selnya dari sifat racun hidrokarbon (Novianty et al., 2020). Pembentukan senyawa hidrofobik pada dinding sel mikroba hidrokarbonoklastik dapat meningkatkan ikatan sel mikroba pada senyawa hidrokarbon minyak mentah. Kemampuan biodegradasi mikroba terhadap tumpahan minyak mentah bergantung pada konsentrasi dan komposisi hidrokarbon. Konsentrasi minyak mentah yang terlalu tinggi dapat menghambat pertumbuhan mikroba dan menyebabkan kemampuan degradasinya turut berkurang. Tingkat *biodegradability* senyawa hidrokarbon minyak mentah secara berturut-turut dimulai dari *linear alkanes* > *branched alkanes* > *low molecular weight alkyl aromatics* > *monoaromatics* > *cyclic alkanes* > *polyaromatics* > *asphaltenes* (Varjani, 2017). Hal tersebut berhubungan dengan sifat fisik-kimia substrat dan bioavailabilitasnya, yang memengaruhi kontak, transportasi, dan transformasi substrat hidrokarbon oleh mikroba (Xu et al., 2018).

Tabel 3.9 Bakteri Berdasarkan Senyawa Target Optimum Biodegradasi Minyak Mentah

Komponen Hidrokarbon Minyak Mentah	Spesies Bakteri	Senyawa Target Biodegradasi
Hidrokarbon Alifatik (n-alkana)	<i>Dietzia</i> sp.	n-alkana (C6-C40)
	<i>Oleispira antartica</i>	n-alkana (C10-C18)
	<i>Rhodococcus ruber</i>	n-alkana (C13-C17)
	<i>Pseudomonas</i> sp.	n-alkana (C14-C30)
	<i>Geobacillus thermodenitrifican</i>	n-alkana (C15-C36)
	<i>Rhodococcus</i> sp.	Sikloalkana
	<i>Alcanivorax</i> sp.	n-alkana dan alkana bercabang
	<i>Gordonia sihwensis</i>	Normal alkana dan bercabang
	<i>Acinetobacter</i> sp.	-
	<i>Azoarcus</i> sp.	-
	<i>Bacillus</i> sp.	-
	<i>Brevibacterium</i> sp.	-
	<i>Desulfococcus</i> sp.	-
	<i>Stenotrophomonas</i> sp.	-
	<i>Ochrobactrum</i> sp.	-
	<i>Micrococcus</i> sp.	-
	<i>Marinobacter</i> sp.	-
	<i>Desulfosarcina</i> sp.	-
	<i>Thalassolituus</i> sp.	-
	<i>Aspergillus</i> sp.	-
<i>Candida</i> sp.	-	
<i>Penicillium</i> sp.	-	
<i>Pseudozyma</i> sp.	-	

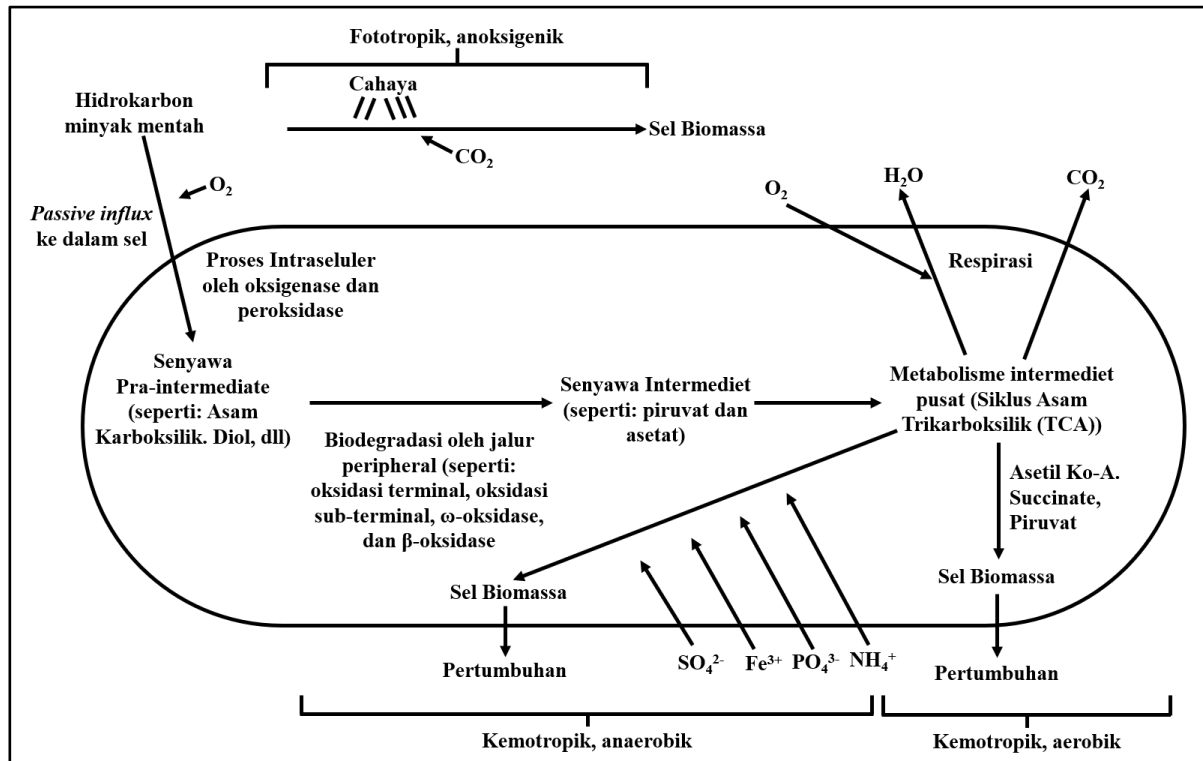
Komponen Hidrokarbon Minyak Mentah	Spesies Bakteri	Senyawa Target Biodegradasi
Hidrokarbon Aromatik	<i>Achromobacter xylosoxidans</i>	Monoaromatik dan Poliaromatik
	<i>Aeribacillus pallidus</i>	Monoaromatik dan Poliaromatik
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Monoaromatik
	<i>Mycobacterium cosmeticum</i>	Monoaromatik
	<i>Acinobacter sp.</i>	Monoaromatik
	<i>Archaeoglobus fulgidus</i>	Monoaromatik
	<i>Bacillus sp.</i>	Monoaromatik
	<i>Aromatoleum aromaticum</i>	Monoaromatik
	<i>Pseudomonas sp.</i>	Monoaromatik
	<i>Rhodococcus sp.</i>	Monoaromatik
	<i>Halomonas sp.</i>	Monoaromatik
	<i>Bacillus licheniformis</i>	Poliaromatik
	<i>Cycloclasticus</i>	Poliaromatik
	<i>Neptunomonas naphthovorana</i>	Poliaromatik
	<i>Sphingomonas</i>	Poliaromatik
	<i>Bacillus mojavensis</i>	Poliaromatik
	<i>Novosphingobium</i>	Poliaromatik
	<i>Sphingobium</i>	Poliaromatik
	<i>Achromobacter insolitus</i>	Poliaromatik
	<i>Pheanaerochaete chrysoorium</i>	Poliaromatik
<i>Vibrio sp</i>	Poliaromatik	
<i>Penicillium janthinellum</i>	Poliaromatik	
<i>Sphingobium</i>	Poliaromatik	
Resins and asphaltenes	<i>Bacillus sp.</i>	Aspal
	<i>Lysinibacillus sp.</i>	Aspal
	<i>Pseudomonas sp.</i>	Aspal
	<i>Citrobacter sp.</i>	Aspal
	<i>Staphylococcus sp.</i>	Aspal
	<i>Pseudomonas sp.</i>	Resin
	Family Vibrionaceae	Resin
	Family Enterobacteriaceae	Resin
<i>Moraxella sp</i>	Resin	

Sumber: Xu et al (2018) dan Varjani (2017)

3.4.2 Proses Enzimatis dan Metabolisme Hidrokarbon

Biodegradasi tumpahan minyak mentah melibatkan berbagai tahapan yang menggunakan enzim tertentu. Kandungan hidrokarbon pada minyak mentah secara selektif dimetabolisme oleh mikroba baik secara individu maupun konsorsium. Senyawa hidrokarbon alifatik dapat lebih mudah didegradasi daripada senyawa hidrokarbon yang lebih kompleks seperti PAH (*Poly Aromatics Hydrocarbon*), resin, dan *asphaltenes* (Varjani, 2017). Proses degradasi hidrokarbon oleh mikroba diawali dari pelekatan sel

mikroba pada substrat dan dilanjutkan dengan produksi biosurfaktan atau biopolimer, bioemulsifier, *solvent*, asam, dan gas. Mikroba mengkatabolisme hidrokarbon minyak bumi dan menggunakan sumber karbon tersebut untuk memperoleh energi dan menjadikannya sebagai biomassa sel. Terdapat tiga jalur yang memungkinkan untuk proses degradasi hidrokarbon minyak mentah oleh mikroba. Ketiga jalur tersebut dapat digambarkan seperti pada skema pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Skema Jalur Degradasi Hidrokarbon Oleh Mikroba

Sumber : Varjani (2017)

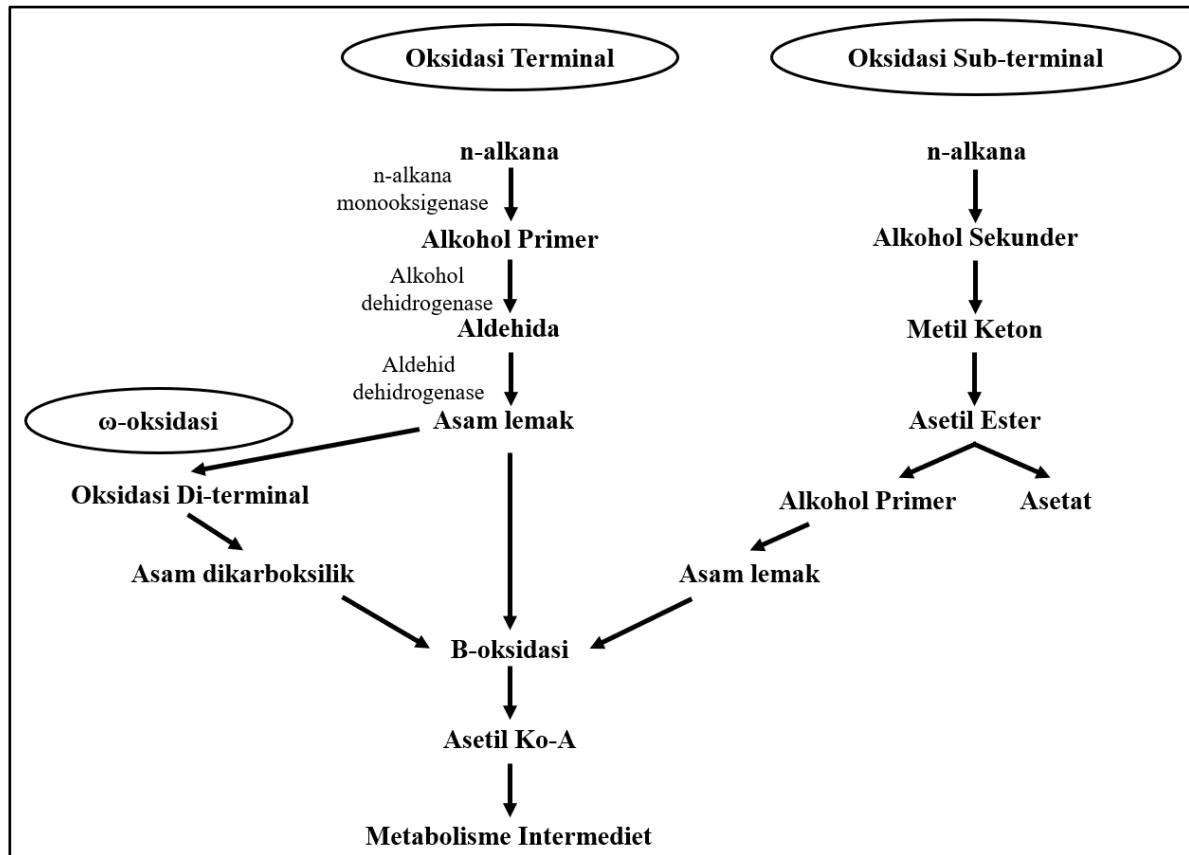
a) *Phototrophic*, anoksigenik

Pada jalur ini mikroba dibantu oleh sinar matahari dan memerlukan CO₂ (karbon dioksida) untuk merombak hidrokarbon menjadi sel biomassa. Mikroba yang bertindak pada jalur fototropik berupa mikroba fotoautotrof yang membuat makanannya sendiri dengan bantuan sinar matahari. Mikroba tersebut memiliki kinerja yang hampir mirip dengan proses fotosintesis pada tumbuhan. Contoh bakteri fotoautotrof adalah *Rhodospseudomonas sp.* dan *Rhodospirillum sp.*

b) Kemotropik, Aerobik

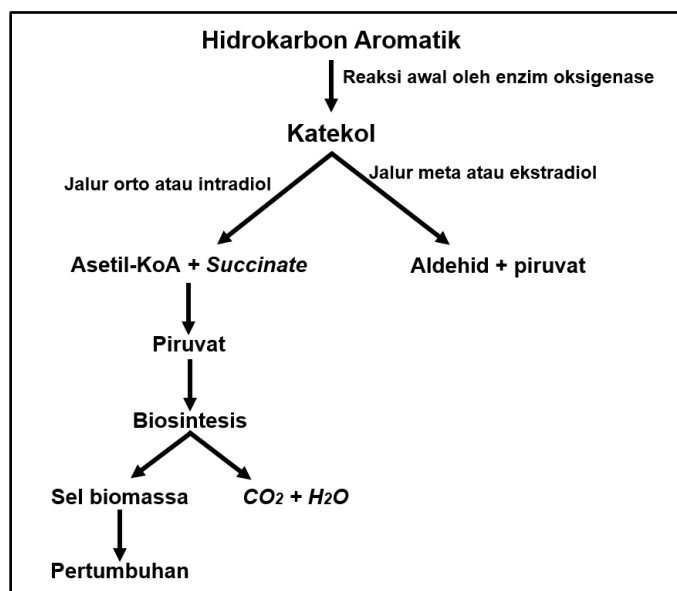
Proses aerobik merupakan metode yang paling cepat dan lengkap untuk mendegradasi senyawa hidrokarbon minyak bumi di lingkungan (Kumar *et al.*, 2018). Proses degradasi hidrokarbon alifatik secara aerobik diawali oleh katalisis enzim oksigenase dan peroksidase untuk mengikat oksigen dan hidrokarbon. Kemudian dilanjutkan pada proses biodegradasi jalur *peripheral pathways* (*Terminal oxidation*, *subterminal oxidation*, dan *omega oxidation*) yang melibatkan enzim monooksigenase, alkohol dehidrogenase, dan aldehid dehidrogenase seperti pada Gambar 3.10. Selanjutnya akan dihasilkan senyawa *intermediate* seperti piruvat dan asetat. Senyawa tersebut akan memasuki metabolisme inti di intraseluler yang merupakan siklus *Tricarboxylic Acid* (TCA). Pada siklus tersebut

akan dihasilkan energi seperti FADH₂, ATP, 3 NADH dan melepas karbon dioksida (Wardhani, 2020). Setelah melewati siklus tersebut, akan dilanjutkan pada proses transfer elektron yang akan menghasilkan tambahan ATP dan H₂O. Energi yang dihasilkan akan dipakai untuk pertumbuhan mikroba dan pembentukan sel biomassa. Pada proses degradasi aerobik ciri utama adalah adanya akseptor elektron terakhir yang berupa oksigen. Skema degradasi hidrokarbon alifatik seperti pada Gambar 3.6 berikut



Gambar 3.6 Tiga Jalur Perifer Degradasi Hidrokarbon Alifatik oleh Mikroba
 Sumber : Varjani (2017)

Adapun skema proses degradasi senyawa hidrokarbon aromatik berbeda dengan hidrokarbon alifatik. Untuk aktivasi awal, terdapat empat enzim yang terlibat yaitu *non-heme iron oxygenases*, *soluble di-iron multi component*, *flavoproteinmonooxygenases*, and *CoA ligases* (Nishino *et al.*, 2000, dalam Fatima *et al.*, 2017). Molekul yang telah teraktivasi tidak akan diubah menjadi alkanol, tetapi akan diubah menjadi intermediet fenol atau katekol. Senyawa katekol akan dapat ditransformasikan melewati dua jalur yaitu ortho (*intradiol pathways*) atau jalur meta (*extradiol pathways*). Pada jalur ortho akan mentransformasikan katekol menjadi cis, cis-asam mukonat menggunakan bantuan enzim *catechol 1,2 dioxygenase*. Untuk jalur meta akan mentransformasikan katekol menggunakan bantuan enzim *catechol 2,3 dyoxygenase* menjadi senyawa 2-hidroksimukonat semialdehida (Kurniawan *et al.*, 2018). Perombakan senyawa hidrokarbon aromatik pada kedua jalur menghasilkan senyawa aromatik dihidroksilasi dan/atau trihidroksilasi dapat masuk pada siklus Krebs. Adapun skema degradasi hidrokarbon aromatik seperti pada Gambar 3.7 berikut



Gambar 3.7 Skema Degradasi Hidrokarbon Aromatik oleh Mikroba

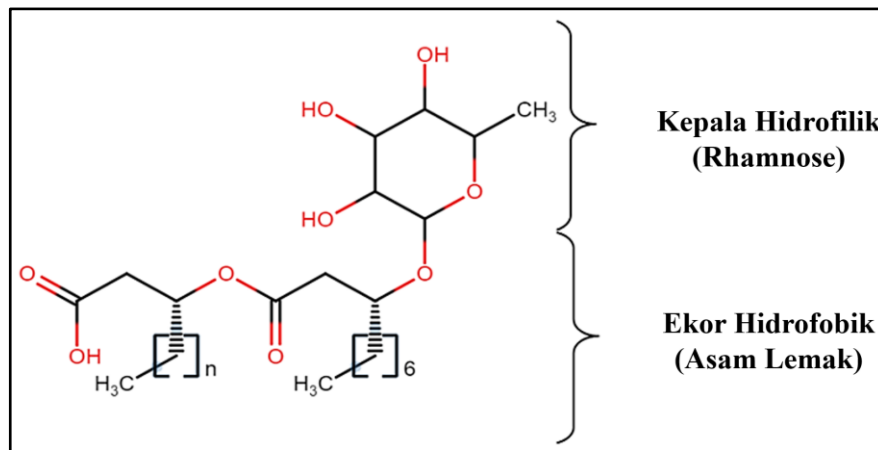
Sumber : Fatima *et al* (2017)

c) Kemotropik, anaerobik

Pengetahuan terkait proses degradasi hidrokarbon secara anaerobik lebih baru dibanding dengan proses aerobik. Pada proses anaerobic senyawa aromatik akan dioksidasi menjadi asam organik atau fenol. Kemudian akan diubah menjadi *volatile* asam lemak rantai panjang. Hasil akhir metabolisme akan terbentuk CH_4 dan CO_2 . Mikroba anaerobik dapat hidup di sedimen laut, atau berada di laut dalam yang berkadar DO rendah. Mikroba anaerobik membutuhkan pengganti oksigen sebagai akseptor elektron. Akseptor elektron pada degradasi anaerobik oleh mikroba menggunakan ion nitrat, besi, mangan, dan/atau sulfat (Kumar *et al.*, 2018). Mikroba anaerobik yang mampu mendegradasi hidrokarbon atau menggunakan sumber karbon pada minyak mentah adalah jenis bakteri *sulphate reducing bacteria*, *methanogenic bacteria*, dan *acetogenic bacteria* (Varjani and Gnansounou, 2017).

Salah satu faktor yang berpengaruh pada keberhasilan proses bioaugmentasi adalah pemberian kultur mikroba yang tepat sesuai dengan kondisi minyak bumi di lingkungan laut. Degradasi senyawa hidrokarbon tidak dapat secara langsung dioksidasi oleh mikroba. Hidrokarbon memerlukan proses pengurangan tegangan permukaan antar dua fase yaitu minyak mentah dan air laut agar dapat diikat oleh mikroba pendegradasi. Mikroba hidrokarbonoklastik pada umumnya memiliki kemampuan untuk menghasilkan biosurfaktan. Biosurfaktan merupakan senyawa biologis yang merupakan campuran kompleks biomolekul seperti *protein*, *exopolysaccharides*, *fatty acids*, *amino acids*, *glycolipids*, dan lainnya (Kumar *et al.*, 2018). Susunan molekul biosurfaktan memiliki dua gugus yang bersifat hidrofobik dan hidrofilik. Biosurfaktan dapat mengurangi tegangan permukaan antara minyak mentah dan air laut. Seperti suatu kasus, biosurfaktan dapat mengurangi tegangan permukaan air dari 72 N/m menjadi 22 N/m (Nurfarahin *et al.*, 2018). Beberapa kultur mikroba hidrokarbonoklastik memproduksi biosurfaktan sebagai mekanisme untuk mengubah senyawa hidrokarbon *insoluble* yang tidak bisa dicerna menjadi senyawa dengan tingkat bioavailabilitas tinggi (Truskewycz *et al.*, 2019). Berikut Gambar 3.7 contoh struktur molekul biosurfaktan dari kelas Glikolipid (struktur

rhamnolipids) dengan kepala hidrofilik (senyawa yang dapat berikatan dengan air) dan ekor hidrofobik (senyawa yang tidak dapat berikatan dengan air).



Gambar 3.8 Struktur Biosurfaktan (*Rhamnolipid*)

(Sumber : Nurfarahin *et al.*, 2018)

Biosurfaktan memiliki keunggulan dibandingkan surfaktan sintesis. Jangkauan biosurfaktan lebih luas berdasarkan pH dan temperatur lingkungan target pengolahan, serta lebih ramah lingkungan (Ng *et al.*, 2022). Biosurfaktan dibagi menjadi dua jenis berbeda yaitu *low molecular weight* dan *high molecular weight*. Biosurfaktan berjenis *low molecular weight* secara umum berupa glikolipid dan lipopeptida, yang memiliki fungsi mengurangi tegangan permukaan. Sementara biosurfaktan berjenis *high molecular weight* diantaranya adalah polisakarida amfipatik, lipopolisakarida, protein, dan lipoprotein. Biosurfaktan dengan berat molekul tinggi pada umumnya berfungsi sebagai stabilisasi emulsi minyak dan air (Nurfarahin *et al.*, 2018). Peningkatan produksi biosurfaktan berbanding lurus dengan penurunan konsentrasi hidrokarbon pada lingkungan. Pada proses bioaugmentasi, kultur mikroba akan memproduksi biosurfaktan dengan cepat dari hari pertama hingga mencapai puncaknya secara umum pada hari kelima (Sarkar *et al.*, 2017). Masing-masing mikroba menghasilkan jenis biosurfaktan yang berbeda. Berikut Tabel 3.10 yang berisi macam-macam biosurfaktan dan mikroba penghasilnya.

Tabel 3.10 Macam-Macam Biosurfaktan dan Mikroba Penghasilnya

<i>Biosurfactant class</i>	<i>Biosurfactant subclass</i>	<i>Mikroba penghasil</i>
<i>Glycolipids</i>	<i>Rhamnolipids</i>	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>
		<i>Pseudomonas cepacia</i>
<i>Trehalolipids</i>	<i>Rhamnolipids</i>	<i>Pseudomonas ssp.</i>
		<i>Lysinibacillus sphaericus</i>
		<i>Serratia rubidaea</i>
		<i>Pseudomonas chlororaphis</i>
		<i>Renibacterium salmoninarum</i>
		<i>Nocardia farcinica</i>
		<i>Rhodococcus sp.</i>
		<i>C. bombicola</i>
		<i>Gordonia</i>
		<i>Arthrobacter</i>
<i>Corynebacterium</i>		

Biosurfactant class	Biosurfactant subclass	Mikroba penghasil
	<i>Sophorolipids</i>	<i>Candida sphaerica</i>
		<i>Starmerella bombicola</i>
		<i>Cutaneotrichosporon mucoides</i>
		<i>Candida bombicola</i>
		<i>Candida apicola</i>
	<i>Mannosylerythritol lipids</i>	<i>Pseudozyma aphidis</i>
	<i>Not informed</i>	<i>Meyerizyma guilliermondii</i>
		<i>Saccharomyces cerevisiae</i>
		<i>Candida utilis</i>
		<i>Marinobacter hydrocarbonoclasticus</i>
Lipopeptides	<i>Surfactin</i>	<i>Bacillus subtilis</i>
		<i>Bacillus nealsonii</i>
	<i>Lichenysin</i>	<i>Bacillus licheniformis</i>
	<i>Not informed</i>	<i>Pseudomonas azotoformans</i>
		<i>Bacillus velezensis</i>
		<i>Bacillus pseudomycooides</i>
		<i>Virgibacillus salarius</i>
		<i>Bacillus cereus</i>
		<i>Bacillus pumilus</i>
		<i>Halomonas sp.</i>
<i>Viscosin</i>	<i>Pseudomonas fluorescens</i>	
<i>Rhodofactin</i>	<i>Rhodococcus erythropolis</i>	
Phospholipids		<i>Thiobacillus thiooxidans</i>
		<i>K. pneumoniae</i>
		<i>Corynebacterium lepus</i>
Polymeric surfactants	<i>Liposan</i>	<i>Candida lipolytica</i>
	<i>Rufisan</i>	<i>Acinetobacter lwoffii</i>
	<i>Emulsan</i>	<i>Acinetobacter lwoffii</i>
		<i>Acinetobacter venetianus RAG-1</i>
		<i>Acinetobacter calcoaceticus</i>
		<i>Alcaligenes faecalis</i>
	<i>Alasan</i>	<i>Acinetobacter radioresistens</i>
		<i>Acinetobacter venetianus RAG-1</i>
		<i>Acinetobacter sp</i>
	<i>Mannoprotein</i>	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>
<i>Polysaccharide-lipid</i>	<i>Burkholderia cepacia</i>	
	<i>Gordonia sp. JE-1058</i>	
<i>Polysaccharide-lipid-protein</i>	<i>Pseudomonas marginalis PD-14B</i>	
	<i>Candida glabrata UCP 1002</i>	
	<i>Candida lipolytica</i>	
	<i>Bacillus licheniformis K125</i>	

Sumber : Sarubbo *et al* (2022), Mahjoubi *et al* (2018), Mnif & Ghribi (2015), Rahman & Gakpe (2008)

Mekanisme biodegradasi senyawa hidrokarbon minyak mentah dapat digambarkan sebagai model kinetika reaksi orde satu dan orde dua (Behera *et al.*, 2022). Kinetika biodegradasi untuk mengevaluasi bagaimana strategi yang tepat untuk mendegradasi minyak mentah. Berikut persamaan model kinetika reaksi orde satu dan dua :

$$C_t = C_i e^{-k_1 t} \dots\dots\dots(1)$$

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k_1} = \frac{0,0693}{k_1} \dots\dots\dots(2)$$

$$\frac{1}{C_t} = k_2 t + \frac{1}{C_i} \dots\dots\dots(3)$$

$$t_{1/2} = \frac{1}{k_2 \cdot C_i} \dots\dots\dots(4)$$

Keterangan :

- C_i = Konsentrasi TPH (g/kg) pada $t = 0$
- C_t = Konsentrasi TPH tersisa (g/kg) pada saat ke- t (hari)
- $t_{1/2}$ = Biodegradasi separuh periode (hari)
- k_1 = Konstanta reaksi orde 1 (hari^{-1})
- k_2 = Konstanta reaksi orde 2 (hari^{-1})

Konstanta orde satu didapatkan dari *slope* grafik analisis regresi linier dari nilai $-\ln \frac{C_t}{C_0}$ dengan unsur waktu. Sementara untuk konstanta orde dua didapat dari *slope* garis yang dibentuk oleh unsur $\frac{1}{C_t}$ dengan waktu.

3.4.3 Mikroba *Indigenous* dan *Exogenous*

Proses bioaugmentasi dapat berlangsung menggunakan kultur mikroba *indigenous* dan/atau *exogenous*. Mikroba *indigenous* merupakan mikroba eksisting yang berada di wilayah objek remediasi. Sementara untuk mikroba *exogenous* merupakan mikroba yang berasal dari luar wilayah objek remediasi. Pada prosesnya sama-sama dilakukan penambahan kultur mikroba ke area pencemaran terjadi. Untuk mengetahui di suatu area perairan laut tercemar telah terdapat mikroba hidrokarbonoklastik, perlu dilakukan eksplorasi dan isolasi sampel. Berikut merupakan proses eksplorasi dan isolasi bakteri seperti yang dilakukan oleh (Chandra *et al.*, 2021):

- a. Pengambilan sampel air laut di area objek sasaran menggunakan metode *purposive sampling*. Pengukuran DO, suhu, pH, dan salinitas juga dilakukan pada lokasi *sampling*.
- b. Sampel air laut ditumbuhkan pada media SMSSe cair. Media SMSSe (*Stone Mineral Salt Solution Extract Yeast*) merupakan media yang spesifik sebagai media uji pertumbuhan dan isolasi bakteri (Mijaya *et al.*, 2019). Komposisi pada media SMSSe terdiri dari senyawa 0,5 gram CaCO_3 , 0,25 gram NH_4NO_3 , 0,1 gram $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0,05 gram KH_2PO_4 , 0,05 gram $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0,02 gram $\text{MnCl}_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, dan ekstrak ragi 0,01% (b/v). atau setara 0,02 gram. Perbandingan senyawa tersebut secara berturut-turut adalah 25 : 12,5 : 5 : 2,5 : 2,5 : 1. Media tersebut dilarutkan pada 200 ml air laut steril. Media SMSSe dapat diskalakan selama perbandingan senyawa-senyawa penyusunnya dalam kondisi yang sesuai.
- c. Pada medium SMSSe yang sudah ditambahkan air laut, ditambahkan pula hidrokarbon minyak mentah sebanyak 2% sebagai sumber karbon.
- d. Sampel yang sudah jadi, dihomogenkan menggunakan *shaker* selama tiga hari berturut-turut dengan kecepatan konstan 120 rpm (*rotation per minute*).

- e. Isolasi dilakukan dengan menggunakan metode pengenceran pada NaCl fisiologis steril sampai 10^{-5}
- f. Pengenceran 1 ml sampel yang sudah dihomogenkan menggunakan NaCl
- g. Hasil pengenceran 10^{-3} , 10^{-4} , dan 10^{-5} diambil masing-masing 1 ml untuk dibiakkan pada media SMSSe padat dengan metode *spread plate*.
- h. Pada media tersebut ditambahkan hidrokarbon minyak mentah sebanyak 2% (b/v) dan *bacto agar* sebanyak 2%.
- i. Media tersebut diinkubasikan selama 2x24 jam pada suhu 35°C.
- j. Setiap pertumbuhan koloni dengan bentuk yang berbeda dibiakkan lagi dengan menggunakan metode *streak plate* (metode gores) dengan media yang sama. Hal ini untuk mendapatkan koloni bakteri tunggal sehingga lebih mudah diamati dan diteliti kemampuan degradasinya.
- k. Identifikasi bakteri dilakukan dengan beragam metode meliputi pengamatan makroskopis (mengamati warna, elevasi, bentuk, dan tepian), pengamatan mikroskopis (pewarnaan gram), uji secara biokimiawi (uji sitrat, motilitas, dan katalase), dan uji molekuler (identifikasi DNA dan penyesuaian dengan pohon filogenetik).

Identifikasi keberadaan mikroba hidrokarbonoklastik penting dilakukan untuk mengetahui apakah mikroba *indigenous* mampu untuk mereduksi hidrokarbon minyak mentah yang mencemari lingkungannya. Selain itu proses isolasi mikroba tersebut untuk mengetahui dan memperkirakan kecepatan degradasi dan waktu yang dibutuhkan untuk mendegradasi hidrokarbon. Bakteri *indigenous* pada area tercemar akan mampu untuk mendegradasi pencemaran dan beradaptasi secara sempurna apabila diberikan stimulasi yang optimal. Tabel 3.11 yang berisi beberapa penelitian terdahulu yang membahas mengenai kemampuan bakteri *indigenous* dan *exogenous* dalam mendegradasi minyak mentah.

Berdasarkan Tabel 3.11 diketahui bahwa bakteri indigen mampu untuk mendegradasi minyak mentah dengan kisaran persentase *removal* dari 40% hingga 81%. Persentase degradasi tertinggi diakibatkan oleh adanya stimulus tambahan berupa penambahan nutrisi, teknik inokulasi bakteri, dan pembentukan *co-culture* atau konsorsium bakteri yang sesuai. Laju degradasi minyak mentah per harinya oleh bakteri indigen mencapai 0,6% hingga 10% dengan median 1,20% per harinya. Kekurangan penggunaan bakteri indigen sebagai agen bioremediasi, yaitu memerlukan waktu yang lebih lama untuk mendegradasi minyak mentah (Gholami-Shiri *et al.*, 2017). Pemilihan bakteri indigen sangat penting dilakukan untuk menentukan kecepatan degradasinya terhadap minyak mentah. Apabila suatu bakteri indigen diisolasi pada daerah yang mengalami pencemaran dalam kurun waktu cukup yang lama, dapat meningkatkan kemampuan degradasi pencemaran yang sejenis (Tao *et al.*, 2017). Hal tersebut diakibatkan oleh adanya penyesuaian genetik, resistivitas, dan adaptasi yang sempurna oleh bakteri terhadap kondisi pencemaran tersebut (Behera *et al.*, 2021). Pengaplikasian bakteri indigen pada awal terjadinya pencemaran hidrokarbon dapat menguntungkan karena dapat meningkatkan aktivitas metabolik bakteri yang secara cepat dapat beradaptasi dengan kondisi lingkungan tersebut (Behera *et al.*, 2021). Bakteri indigen pada umumnya memiliki kemampuan degradasi hidrokarbon pada rantai skala yang terbatas. Hal tersebut disebabkan oleh kemampuan enzimatis bakteri yang terbatas terhadap komponen minyak mentah yang sangat beragam. Komponen yang akan didegradasi terlebih dahulu adalah hidrokarbon yang memiliki rantai senyawa yang sederhana, kemudian dilanjutkan dengan hidrokarbon yang lebih resisten pada tahap selanjutnya (Varjani & Upasani, 2017).

Tabel 3.11 Kemampuan *Removal* Minyak Mentah Bakteri *Indigenous* dan *Exogenous*

No	Penulis / Tahun	<i>Indigenous / Exogenous Bacteria</i>	Bakteri	% Removal crude oil as TPH	% Removal n-alkana	% Removal aromatic	Jangka waktu (Hari)	Laju Degradasi per Hari
1	Laothamteep et al., 2022	<i>Indigenous Bacteria</i>	<i>Alcanivorax</i> genus	45%	-	-	21	2,14%
		<i>Exogenous Bacteria</i>	<i>Mycolicibacterium</i> strains PO1 and PO2, <i>Novospingobium pentaromativorans</i> PY1, and <i>Bacillus subtilis</i> FW1	80,70%	-	-	21	3,84%
2	Tao et al., 2017	<i>Indigenous Consortium Bacteria</i>	T1 (<i>Betaproteobacteria</i> and <i>Gammaproteobacteria</i>)	71,32%	84,00%	30,00%	7	10,19%
		<i>Exogenous Bacteria</i>	T2 (<i>Bacillus subtilis</i> ZF3-1)	2-3%	19,00%	28-29%	7	0,29%
		<i>Indigenous - Exogenous Consortium Bacteria</i>	T3 (<i>Co-culture bacteria</i> : ZF3-1 = 1:1)	73-74%	84%	27-28%	7	10,43%
		<i>Indigenous - Exogenous Consortium Bacteria</i>	T4 (<i>Co-culture bacteria</i> : ZF3-1 = 1:2)	77-79%	92-93%	28-29%	7	11,00%
		<i>Indigenous - Exogenous Consortium Bacteria</i>	T5 (<i>Co-culture bacteria</i> : ZF3-1 = 2:1)	85,01%	94,13%	30%	7	12,14%
3	Abena et al., 2019	<i>Indigenous Consortium Bacteria</i>	<i>Indigenous bacteria (Roultella ornithinolytica</i> strain PL, <i>Serratia marcescens</i> strain PL, <i>Bacillus subtilis</i> strain BJ11, <i>Acinetobacter pittii</i> strain BJ6, and <i>Acinetobacter iwoffii</i> strain BJ10)	25,50%	-	-	40	0,64%
				48,10%	-	-	40	1,20%
				25,40%	-	-	40	0,64%
				37,80%	-	-	40	0,95%
				24,20%	-	-	40	0,61%
4	Wu et al., 2017	<i>Exogenous Consortium Bacteria</i>	<i>Exogenous consortium bacteria (Pseudomonas stutzeri</i> GQ-4 strain KF453954, <i>Pseudomonas</i> SZ-2 strain KF453956, and <i>Bacillus</i> SQe2 strain KF453961)	58%	-	-	56	1,04%

No	Penulis / Tahun	Indigenous / Exogenous Bacteria	Bakteri	% Removal crude oil as TPH	% Removal n-alkana	% Removal aromatic	Jangka waktu (Hari)	Laju Degradasi per Hari
5	Perdigão <i>et al.</i> , 2021	Indigenous Consortium Bacteria	Indigenous bacteria (<i>Rhodococcus erythropolis</i> CPN 2, <i>R. erythropolis</i> CPN 3, <i>Pseudomonas</i> sp 1,7L)	47%	-	-	15	3,13%
6	Gurav <i>et al.</i> , 2017	Indigenous Bacteria	<i>Dietzia</i> sp.HRJ2	49,81%	-	-	12	4,15%
		Indigenous Bacteria	<i>Corynebacterium</i> variabile HRJ4	52,96%	-	-	12	4,41%
		Indigenous Bacteria	<i>Dietzia</i> cinnamea HRJ5	49,13%	-	-	12	4,09%
		Indigenous Bacteria	<i>Bacillus</i> tequilensis HRJ6	54,24%	-	-	12	4,52%
7	Behera <i>et al.</i> , 2021	Indigenous Consortium Bacteria	<i>Dietzia</i> sp. IRB191, <i>Dietzia</i> sp. IRB192, <i>Staphylococcus</i> sp. BSM19 and <i>Stenotrophomonas</i> sp. IRB19	91,5 ± 2,28%	-	-	10+5	6,10%
8	Gholami-Shiri <i>et al.</i> , 2017	Indigenous Consortium Bacteria	SPGR : <i>Staphylococcus</i> sp, <i>Bacillus cereus</i> , <i>Bacillus</i> sp and <i>Lysinibacillus fusiformis</i>	49,5%	-	-	60	0,83%
		Indigenous Consortium Bacteria	SOR : <i>Pseudomonas fluorescens</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> and <i>Citrobacter amalonaticus</i>	48,00%	-	-	60	0,80%
		Indigenous Consortium Bacteria	SOR + SPGR	81%	-	-	60	1,35%
		Indigenous Consortium Bacteria	SOR + SPGR	72,10%	-	-	60	1,20%
9	Perdigão <i>et al.</i> , 2021	Indigenous Consortium Bacteria	Indigenous Bacteria (<i>Pseudomonas</i> , <i>Rhodococcus</i> and <i>Acinetobacter</i>)	66%	-	-	15	4,40%
10	AlKaabi <i>et al.</i> , 2020	Indigenous Bacteria	<i>Bacillus subtilis</i>	38% ± 0,6%	-	-	90	0,42%
		Indigenous Bacteria	<i>Bacillus licheniformis</i>	48,1% ± 0,9%	-	-	90	0,53%
		Indigenous Bacteria	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	42% ± 1%	-	-	90	0,47%
		Indigenous Bacteria	<i>Virgibacillus halodenitrificans</i>	29% ± 1,2%	-	-	90	0,32%

Tumpahan minyak mentah pada lingkungan laut dapat menyebabkan perubahan interaksi antar ekosistem secara drastis. Hal tersebut diakibatkan oleh adanya unsur abiotik (minyak mentah) yang dapat dapat memengaruhi beberapa organisme dan bersifat toksik. Pada proses awal akan terjadi pengurangan keanekaragaman mikroorganisme pada lingkungan tersebut akibat tidak tahan terhadap unsur pencemaran tersebut. Namun di lain sisi, adanya unsur cemaran (minyak mentah) dapat meningkatkan kelimpahan mikroorganisme yang mampu memanfaatkan kandungan hidrokarbon sebagai sumber energinya (Xu *et al.*, 2018). Pada pencemaran yang cukup luas, penggunaan bakteri indigen tidak dapat mendegradasi minyak mentah secara cepat dan tuntas. Penggunaan bakteri indigen secara penuh, tidak lebih baik daripada penggunaan konsorsium bakteri indigen dan eksogen (Laothamteep *et al.*, 2022; Tao *et al.*, 2017).

Bakteri eksogen pada umumnya digunakan untuk mempercepat proses degradasi minyak mentah pada suatu lingkungan. Penambahan kultur bakteri eksogen dilakukan ketika jumlah bakteri indigen yang diperkirakan mampu mendegradasi minyak mentah berada dalam jumlah yang sedikit. Bakteri yang digunakan telah teruji terlebih dahulu dalam skala laboratorium maupun skala terapan, sehingga dapat diketahui bagaimana sifat metabolismenya, kebutuhan nutriennya, dan karakteristik pertumbuhannya. Bakteri eksogenus yang dipilih biasanya memiliki kemampuan degradasi hidrokarbon pada cakupan senyawa hidrokarbon yang cukup luas dan dapat menghasilkan biosurfaktan dalam persentase yang besar dibanding bakteri lainnya. Kemampuan tersebut dapat meningkatkan *bioavailability* hidrokarbon dan mendegradasi hidrokarbon yang persisten di lingkungan (Tao *et al.*, 2017).

Penambahan bakteri eksogen dalam suatu pencemaran terbukti dapat meningkatkan persentase degradasi hidrokarbon dibandingkan dengan menggunakan bakteri *indigenous* saja. Seperti penelitian yang dilakukan Laothamteep *et al* (2018) dan Tao *et al* (2017) penambahan bakteri mampu meningkatkan degradasi hidrokarbon hingga 15% lebih baik daripada bakteri indigen. Perhitungan kecepatan degradasi dan persentase degradasi hanya mencakup referensi yang sudah ditabulasi. Kecepatan degradasi bakteri eksogen, apabila bakteri indigen dianggap tiada maka kecepatan degradasi rata-rata sebesar 1,02%. Hal tersebut lebih rendah daripada kecepatan degradasi oleh bakteri indigen yang kemungkinan dapat disebabkan oleh adanya proses adaptasi bakteri eksogen pada lingkungan tercemar. Sementara penambahan bakteri eksogen dengan mempertimbangkan kehadiran bakteri indigen mendapatkan persentase kecepatan degradasi mencapai 2,88% per harinya. Nilai tersebut dapat menyimpulkan bahwa penambahan bakteri eksogen dapat meningkatkan kecepatan dan persentase degradasi minyak mentah.. Kecepatan degradasi hidrokarbon sebenarnya tidak dapat dibuat suatu standar tertentu, karena sangat banyak faktor yang memengaruhinya. Perbandingan penggunaan bakteri indigen dan eksogen hanya dapat dilakukan apabila faktor-faktor selain jenis bakteri ditetapkan seragam seperti media tumbuh yang digunakan, jenis cemaran minyak mentah, umur bakteri inokulan, dan perlakuan lainnya.

Pencampuran kultur bakteri eksogen dengan indigen memberikan korelasi positif terhadap kecepatan dan persentase degradasi hidrokarbon. Hubungan keduanya dapat diprediksi menimbulkan perilaku komensalisme atau co-metabolisme (AlKaabi *et al.*, 2020). Hubungan bakteri indigen dan eksogen yang bersifat komensalisme atau co-metabolisme dapat dilihat dengan indikator adanya peningkatan keanekaragaman spesies bakteri (Abena *et al.*, 2019). Metode bioaugmentasi dengan menggunakan bakteri eksogen seringkali menyebabkan penurunan kelimpahan dan keanekaragaman spesies bakteri indigen (Laothamteep *et al.*, 2022). Hal ini diakibatkan oleh beberapa faktor seperti keterbatasan nutrisi, akseptor elektron, pH, dan kompetisi antara bakteri eksogen dan

indigen (Abena *et al.*, 2019). Penambahan bakteri eksogen hendaknya mempertimbangkan komposisi hidrokarbon minyak mentah dan kondisi lingkungan pencemaran. Kemudian karakteristik cemaran tersebut dicocokkan dengan spesies bakteri yang sesuai berdasarkan sifat metaboliknya. Sehingga proses bioaugmentasi dapat berlangsung optimal dan mengurangi dampak negatif dari penambahan bakteri eksogen.

3.4.4 Mikroba Kultur Tunggal dan Campuran / Konsorsium

Bakteri hidrokarbonoklastik memiliki kemampuan tertentu untuk mendegradasi senyawa hidrokarbon, tidak semua senyawa hidrokarbon mampu didegradasi secara tuntas (Ibrar & Zhang, 2020). Seperti yang tertera pada Tabel 3.9 yang berisi kemampuan spesifik masing-masing bakteri untuk mendegradasi hidrokarbon. Misalnya pada bakteri *Gordonia sihwensis* yang hanya mampu untuk mendegradasi senyawa hidrokarbon alifatik. Namun terdapat pula *strain* bakteri yang mampu untuk mendegradasi senyawa hidrokarbon yang beragam seperti bakteri *Bacillus sp.* dan *Pseudomonas sp.* Bakteri tersebut mampu untuk mendegradasi senyawa hidrokarbon alifatik, aromatik, *asphaltenes*, dan *resins*. Selain itu, tidak semua bakteri mampu untuk memproduksi biosurfaktan dalam jumlah yang banyak. Seperti pada yang terdapat pada Tabel 3.10 yang berisi kemampuan masing-masing bakteri untuk memproduksi biosurfaktan pada jenis-jenis yang berbeda. Keragaman jenis biosurfaktan berpengaruh terhadap biodegradasi senyawa hidrokarbon minyak mentah oleh bakteri. Secara umum lebih banyak bakteri yang memproduksi biosurfaktan berjenis *glycolipids* dan *lipopetides*.

Keragaman kemampuan bakteri untuk mendegradasi hidrokarbon minyak mentah menyebabkan penggunaan kultur tunggal sebagai agen biodegradasi tidak cukup memuaskan baik dari segi waktu maupun persentase degradasinya. Hal ini dibuktikan oleh Gurav *et al* (2017), Phulpoto *et al* (2021), Rizzo *et al* (2018), dan beberapa peneliti lain yang hasil penelitiannya ditabulasi pada Tabel 3.12. Penelitian tersebut membuktikan bahwa penggunaan kultur tunggal tidak lebih efektif dari kultur campuran / konsorsium untuk mendegradasi hidrokarbon minyak mentah. Dari segi persentase degradasi hidrokarbon maupun kecepatan degradasinya, konsorsium bakteri lebih baik daripada kultur tunggal. Hal ini dikarenakan senyawa hidrokarbon yang terkandung pada minyak mentah sangat beragam dan cukup kompleks. Sehingga kondisi tersebut memerlukan ketahanan yang lebih tinggi dan kemampuan metabolisme yang bersifat komplementer oleh konsorsium bakteri (Varjani & Upasani, 2019). Dapat dibuktikan pada penelitian Rizzo *et al* (2018), bakteri *Alcanivorax strain* A53 mampu mendegradasi TPH sebanyak 52,7%, *Pseudomonas strain* A6 sebesar 38,2%, dan *Joostella strain* A8 sebesar 26,8% dalam kurun waktu 20 hari. Sementara apabila ketiganya dibentuk konsorsium mampu mendegradasi senyawa TPH sebesar 99,4% (konsorsium bakteri *Joostella* dan *Alcanivorax*) dan 99,2% (konsorsium bakteri *Joostella* dan *Pseudomonas*). Terdapat kemungkinan bahwa terjadi interaksi mutualistik antar komponen yang berbeda dari komunitas bakteri karena eksometabolit yang dihasilkan oleh takson tertentu, tidak harus secara langsung terlibat dalam metabolisme polutan. Eksometabolit tersebut dapat digunakan oleh organisme lain untuk meningkatkan kapasitas metabolismenya. (Dell'anno *et al.*, 2020)

Tabel 3.12 Kemampuan Removal Minyak Mentah Konsorsium Bakteri dan Bakteri Strain Tunggal

No	Penulis / Tahun	Konsorsium atau Tunggal	Jenis Bakteri	% Removal crude oil as TPH	% Removal n-alkana	% Removal aromatic	Jangka waktu (Hari)	Laju Degradasi per Hari
1	Gurav <i>et al.</i> , 2017	Konsorsium	<i>Dietzia sp. HRJ2, Corynebacterium variabile HRJ4, Dietzia cinnamea HRJ5 and Bacillus tequilensis HRJ6</i>	66,30%	-	-	12	5,53%
		Konsorsium	<i>Dietzia sp. HRJ2, Corynebacterium variabile HRJ4, and Bacillus tequilensis HRJ6</i>	59,12%	-	-	12	4,93%
		Konsorsium	<i>Corynebacterium variabile HRJ4, Dietzia cinnamea HRJ5 and Bacillus tequilensis HRJ6</i>	54,97%	-	-	12	4,58%
		Tunggal	<i>Bacillus tequilensis HRJ6</i>	54,24%	-	-	12	4,52%
		Tunggal	<i>Corynebacterium variabile HRJ4</i>	52,96%	-	-	12	4,41%
		Tunggal	<i>Dietzia sp. HRJ2</i>	49,81%	-	-	12	4,15%
2	Poddar <i>et al.</i> , 2019	Konsorsium	<i>Klebsiella spp., Enterobacter sp., Pantoea sp</i>	16,20%	-	-	4	4,05%
3	Dell'anno <i>et al.</i> , 2020 (PAH removal)	Konsorsium	<i>Halomonas sp. SZN1 and Alcanivorax sp. SZN2</i>	-	-	63%	27	2,33%
		Konsorsium	<i>Pseudoalteromonas sp. SZN3 and Alcanivorax sp. SZN2</i>	-	-	48%	27	1,78%
		Konsorsium	<i>Halomonas sp. SZN1, Pseudoalteromonas sp. SZN3, and Virgibacillus sp. SZN7</i>	-	-	32%	27	1,19%
		Konsorsium	<i>Epibacterium sp. SZN4 and Halomonas sp. SZN1</i>	-	-	52%	27	1,93%
		Tunggal	<i>Halomonas sp. SZN1</i>	-	-	64%	27	2,37%
		Tunggal	<i>Alcanivorax sp. SZN2</i>	-	-	52%	27	1,93%
		Tunggal	<i>Pseudoalteromonas sp. SZN3</i>	-	-	15%	27	0,56%
		Tunggal	<i>Epibacterium sp. SZN4</i>	-	-	29%	27	1,07%
Tunggal	<i>Virgibacillus sp. SZN7</i>	-	-	43%	27	1,59%		

No	Penulis / Tahun	Konsorsium atau Tunggal	Jenis Bakteri	% Removal crude oil as TPH	% Removal n-alkana	% Removal aromatic	Jangka waktu (Hari)	Laju Degradasi per Hari
4	Phulpoto <i>et al.</i> , 2021	Konsorsium	<i>Pseudomonas sp. S2WE, Pseudomonas sp. S2WG, Pseudomonas sp. S2MS, Ochrobactrum sp. S1MM and Bacillus nealsonii S2MT</i>	68,10%	-	-	12	5,68%
		Konsorsium	<i>Pseudomonas sp. S2WE, Pseudomonas sp. S2WG, Pseudomonas sp. S2MS and Ochrobactrum sp. S1MM</i>	50,60%	-	-	12	4,22%
		Tunggal	<i>Ochrobacterium sp.</i>	40,50%	-	-	12	3,38%
		Tunggal	<i>Pseudomonas sp.</i>	38,28%	-	-	12	3,19%
5	Chen <i>et al.</i> , 2020	Konsorsium	<i>Dietzia sp. CN-3 and Acinetobacter sp. HC8-3S</i>	58,30%	-	-	60	0,97%
6	Varjani and Upasani, 2019	Konsorsium	<i>Pseudomonas aeruginosa, Stenotrophomonas sp. and Ochrobactrum sp.</i>	82,56%	-	-	60	1,38%
		Tunggal	<i>Alcanivorax strain A53</i>	52,70%	-	-	20	2,64%
7	Rizzo <i>et al.</i> , 2018	Tunggal	<i>Pseudomonas strain A6</i>	38,20%	-	-	20	1,91%
		Tunggal	<i>Joostella strain A8</i>	26,80%	-	-	20	1,34%
		Konsorsium	<i>Joostella plus Alcanivorax consortium</i>	99,40%	-	-	20	4,97%
		Konsorsium	<i>Joostella plus Pseudomonas consortium</i>	99,20%	-	-	20	4,96%
8	Bhattacharya <i>et al.</i> , 2019	Konsorsium	<i>Ochrobacterium pseudinetermedium C1 and Bacillus cereus K1</i>	70,54%	-	-	3	23,51%
9	Xia <i>et al.</i> , 2019	Konsorsium	<i>Serratia proteamaculans SIBD1, Alcaligenes sp. OPKDS2, R. erythropolis OSDS1, Rhizobium sp. PNS1, Pseudomonas sp. BSS9BS1</i>	85,26%	-	-	15	5,68%
10	Behera <i>et al.</i> , 2022	Konsorsium	<i>Dietzia lutea (IRB191), Dietzia lutea (IRB192), Staphylococcus warneri (BSM19), and Stenotrophomonas pavanii (IRB19)</i>	80,2 ± 3,0%	-	-	21	3,82%

Tidak selamanya pembentukan konsorsium bakteri yang mampu mendegradasi hidrokarbon lebih baik daripada *strain* tunggal. Penelitian yang dilakukan Dell'Anno *et al* (2020) menunjukkan hal yang tersebut. Terdapat kultur tunggal bakteri yang memiliki persentase degradasi PAH (Polisiklik Aromatik Hidrokarbon) melebihi persentase degradasi kultur campuran. *Strain* tunggal bakteri *Halomonas sp* SZN1, *Alcanivorax sp* SZN2, dan *Virgibacillus sp* SZN7 secara berturut-turut mampu mendegradasi PAH sebesar 64%, 52%, dan 43%. Persentase degradasi tersebut lebih tinggi dibanding konsorsium bakteri *Halomonas sp*. SZN1, *Pseudoalteromonas sp*. SZN3, dan *Virgibacillus sp*. SZN7 yang hanya mampu mendegradasi PAH sebesar 32%. Kemungkinan yang dapat dijelaskan oleh rendahnya degradasi hidrokarbon dari konsorsium bakteri tersebut yaitu antar bakteri memiliki kesamaan pada jalur metabolismenya. Bakteri-bakteri tersebut berkompetisi secara intens dan saling berusaha melepaskan keterikatan tersebut dengan menghasilkan toksin atau antibiotik sehingga menciptakan lingkungan yang tidak sehat (Chen *et al.*, 2020). Terjadinya degradasi yang tidak maksimal oleh konsorsium bakteri juga diakibatkan adanya bakteri yang tidak mampu untuk menghasilkan biosurfaktan. Penelitian yang dilakukan Phulpoto *et al* (2021), campuran bakteri produsen biosurfaktan mencapai persentase tertinggi dibanding kombinasi bakteri non produsen biosurfaktan atau kombinasi keduanya.

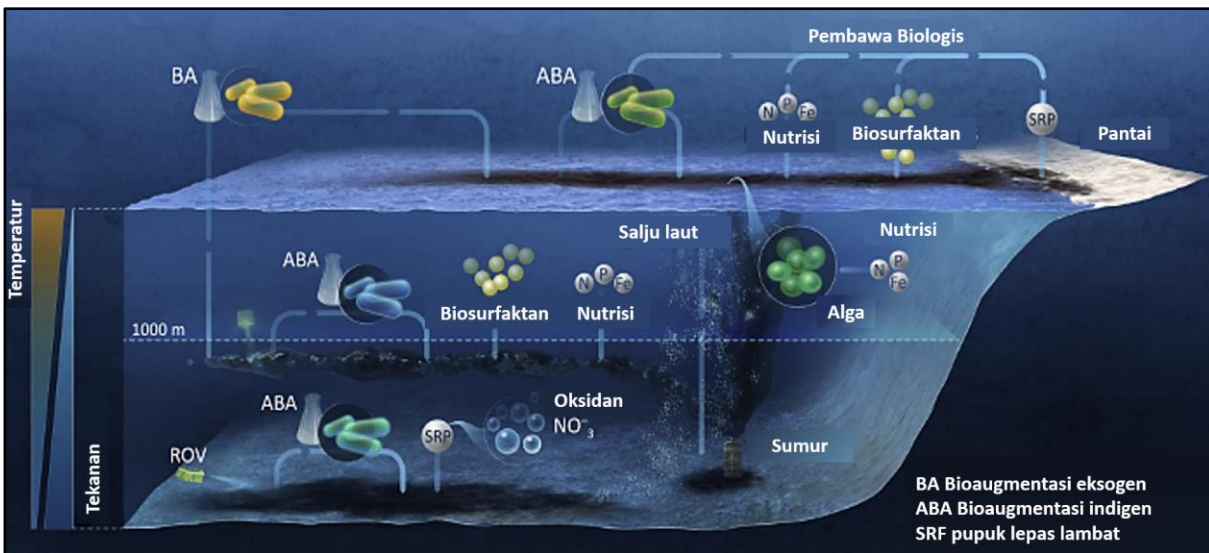
3.5 Biostimulasi

Biostimulasi merupakan salah satu metode remediasi secara biologis yang bertujuan untuk merangsang pertumbuhan mikroorganisme pendegradasi minyak mentah dengan cara melakukan penyesuaian lingkungan abiotik dan pemenuhan kebutuhan nutrisi mikroorganisme (Pratama & Handayani, 2021). Biostimulasi dapat berupa metode fisik seperti penambahan oksigen dengan aerasi dan penyesuaian suhu, juga dapat menggunakan metode kimiawi dengan menambahkan senyawa tertentu untuk menyesuaikan pH lingkungan terdampak dan pemenuhan unsur hara mikroba. Metode biostimulasi juga digunakan ketika kondisi lingkungan yang dikhawatirkan dapat menghambat metabolisme bakteri *exogenous*, misalnya pada kondisi dengan salinitas tinggi (Jimoh *et al.*, 2022). Pada kondisi ekstrim lebih memungkinkan untuk menstimulasi pertumbuhan mikroba indigen, karena telah beradaptasi dan resisten pada kondisi tersebut. Pada kasus terdahulu, penerapan bioremediasi pada tumpahan minyak mentah telah dilakukan pada beberapa kasus seperti pada kasus tumpahan minyak Exxon Valdez yang menghabiskan 50.000 kg nitrogen dan 5.000 kg fosfor pada area tercemar dan menghasilkan peningkatan degradasi hidrokarbon yang signifikan. Pada kasus lainnya yang terjadi pada November 2002 ketika kapal tanker minyak tenggelam di *North-West Spain* dan menumpahkan 60.000 ton minyak mentah. Pada kasus tersebut dilaksanakan proses biostimulasi menggunakan *oleophilic fertilizer* yang mengandung unsur nitrogen dan fosfor. Proses bioremediasi tersebut dilaporkan selesai setelah 12 bulan pasca perlakuan (Thomas, 2020).

Biostimulasi dapat dilakukan langsung pada daerah tercemar (*in situ*) atau diproses secara *ex situ*. Tumpahan minyak mentah pada lingkungan laut lebih diutamakan menggunakan proses *in situ* untuk menghemat biaya dan juga memudahkan prosesnya. Penggunaan metode biostimulasi membutuhkan waktu yang cukup lama apabila tidak disertai dengan penambahan kultur bakteri (metode bioaugmentasi). Oleh karena itu pada beberapa penelitian, metode biostimulasi sering disandingkan dengan metode bioaugmentasi untuk meningkatkan kecepatan degradasi senyawa hidrokarbon. Mikroorganisme yang dirangsang pertumbuhannya dapat berupa mikroorganisme *indigenous* (berasal dari lingkungan terdampak) dan *exogenous* (berasal dari luar lingkungan terdampak). Faktor-faktor abiotik mikroba pendegradasi yang perlu diperhatikan pada proses degradasi pencemar adalah

kebutuhan nutrisi karena menjadi faktor pembatas yang paling berpengaruh. Mengingat faktor lain seperti suhu, salinitas, pH, dan juga oksigen terlarut sangat sulit untuk dilakukan penyesuaian mengingat luasnya pencemaran. Faktor-faktor tersebut tidak terlalu berpengaruh karena mikroba hidrokarbonoklastik secara alamiah dapat hidup pada kondisi tersebut. Namun pada penggunaan mikroba eksogen, harus tetap memperhatikan lingkungan hidup alamiahnya apakah sesuai dengan lokasi yang akan diremediasi. Hal tersebut untuk mencegah terjadinya proses degradasi yang tidak optimal akibat ketidakmampuan bakteri untuk beradaptasi pada lingkungan baru.

Semua mikroorganisme sangat bergantung pada ketersediaan nutrisi untuk bertahan hidup terutama pada lingkungan yang tercemar. Nutrisi yang dibutuhkan oleh mikroba yaitu makronutrien (karbon, nitrogen, fosfor, hidrogen, dan oksigen), mikronutrien (senyawa akseptor elektron, mineral, dan logam), serta senyawa lain yang dapat mempercepat proses degradasi seperti biosurfaktan (Hazaimah & Ahmed, 2021; Mahjoubi *et al.*, 2018). Nutrien tersebut merupakan pendukung kehidupan mikroba untuk berkembang biak, melakukan metabolisme, menghasilkan enzim-enzim tertentu untuk merombak senyawa hidrokarbon (Nurjanah, 2018). Berikut Gambar 3.9 yang berisi ilustrasi bioremediasi *oil spill* di lingkungan laut oleh Mapelli *et al* (2017). Pada gambar tersebut diilustrasikan terjadi kebocoran sumur minyak di dasar laut.



Gambar 3.9 Ilustrasi Proses Bioremediasi *Oil Spill* di Lingkungan Laut

Sumber : Mapelli et al (2017)

Pada lingkungan laut sebenarnya telah tersedia nutrisi alami baik makronutrien maupun mikronutrien. Kandungan nutrisi tersebut berasal dari kandungan alami di lautan maupun hasil samping dari aktivitas manusia yang terbuang ke laut seperti sisa pupuk pertanian, perikanan tambak, dan juga erosi batuan dan sedimen. Perairan laut yang dekat dengan daratan dan muara sungai cenderung memiliki kandungan makronutrien yang lebih tinggi. Bagian atas perairan laut juga memiliki nutrisi yang lebih tinggi dibanding dasar lautan. Hal ini dikarenakan sifat nutrisi yang cenderung berbentuk padatan terlarut sehingga sulit untuk mengendap. Padatan terlarut bersifat *bioavailibility*, sehingga lebih mudah untuk dicerna bakteri dibanding dalam bentuk yang lainnya (Sakaya *et al.*, 2019). Namun kandungan tersebut tidak sebanding dengan kebutuhan mikroba untuk mendegradasi pencemaran dalam jumlah yang banyak. Oleh karena itu diperlukan penambahan nutrisi pada lingkungan tercemar.

3.5.1 Makronutrien Mikroba dan sumbernya

Pada saat terjadinya tumpahan minyak mentah ke lingkungan laut, terjadi lonjakan senyawa dengan unsur hidrokarbon. Makronutrien merupakan unsur yang dibutuhkan mikroba dalam jumlah yang cukup besar dibanding unsur lain. Makronutrien mencakup unsur karbon, nitrogen, dan fosfor. Karbon secara alamiah telah tersedia di alam dalam bentuk senyawa karbon organik yang merupakan hasil sintesis makhluk hidup, dan juga senyawa karbon anorganik yang tidak berasal dari makhluk hidup (berasal dari sumber daya alam mineral). Senyawa karbon organik memiliki struktur yang lebih rumit dibanding karbon anorganik. Senyawa karbon merupakan unsur utama yang dibutuhkan oleh bakteri untuk proses metabolisme dan membentuk komponen-komponen sel. Pada mikroba, karbon akan membentuk senyawa yang berikatan dengan unsur Hidrogen, Nitrogen, dan Oksigen. Unsur-unsur tersebut akan menyusun hingga 95% dari komposisi sel mikroba (Nugroho, 2006). Adapun persentase unsur-unsur penyusun sel bakteri dengan komposisi minyak mentah seperti pada Tabel 3.13. Unsur karbon dapat diambil dengan mekanisme fotosintesis dengan sumber karbon CO₂ dan senyawa organik. Mikroba tersebut disebut sebagai mikroba fototrof. Sementara untuk mikroba dengan sumber energi berasal dari oksidasi senyawa organik dan anorganik tergabung pada jenis mikroba kemotrof (Yulinah, 2012).

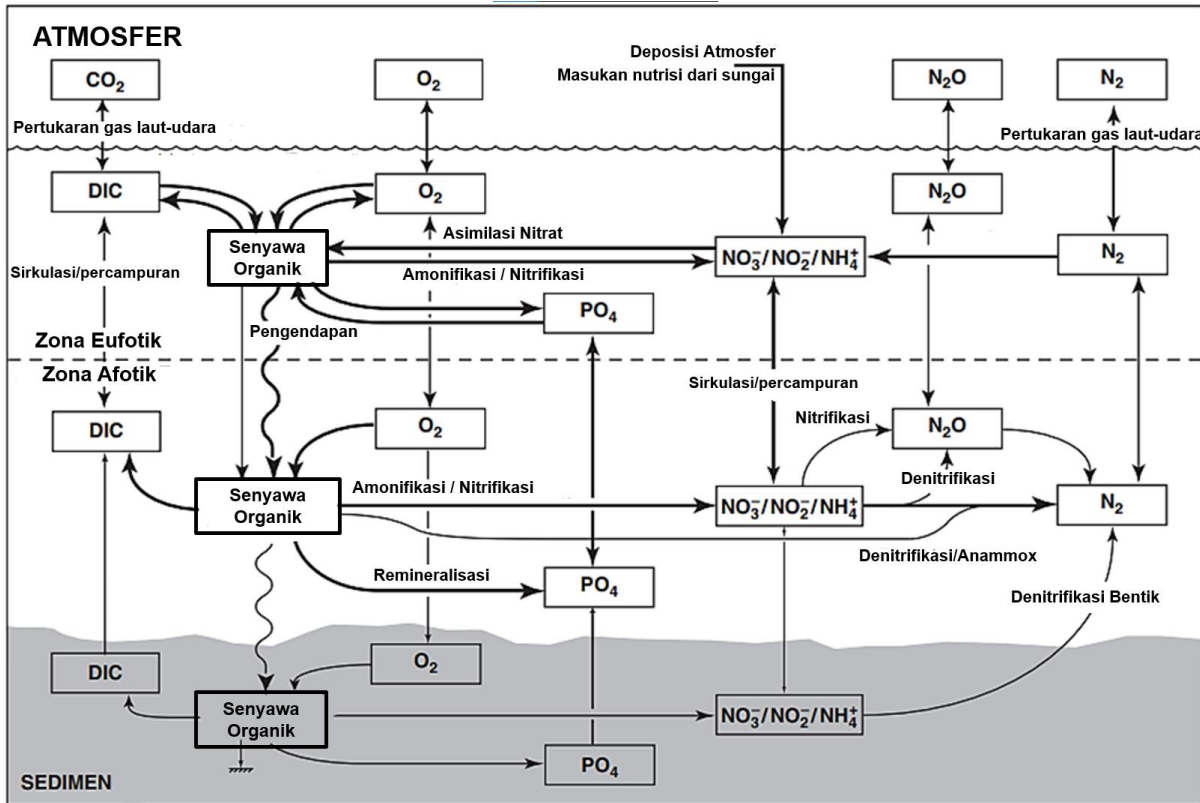
Tabel 3.13 Unsur Penyusun Sel Bakteri dan Minyak Mentah

Unsur	Komposisi sel mikroba (%)	Komposisi minyak mentah (%)
Karbon	50	85-90
Nitrogen	14	<0,1 – 2
Oksigen	20	1 – 1,5
Hidrogen	8	10 -14
Fosfor	3	-
Sulfur	1	0,2 – 3
Kalium	1	-
Na	1	-
Kalsium	0,5	-
Magnesium	0,5	-
Klorida	0,5	-
Besi	0,2	-
Lain-lain	0,3	<1

Sumber : (Sayed et al., 2021)

Pada pencemaran minyak mentah di lingkungan laut, unsur karbon sangat melimpah sekitar 83,9 – 86,9% dari komposisi minyak mentah yang dapat digunakan sebagai sumber karbon bakteri (Wayoi, 2018). Namun bakteri memerlukan unsur lain untuk mendukung proses degradasi dan metabolisme selnya meliputi unsur Nitrogen dan Fosfor. Dimana kebutuhan mikroba atas ketiga unsur tersebut secara umum memiliki rasio optimum C:N:P sebesar 100:10:1 (Kumar et al., 2018; Roy et al., 2018). Hal ini juga dibuktikan oleh penelitian Syafitri et al (2022), yang meneliti variasi rasio C:N:P terhadap kemampuan degradasi biosolar bakteri *Bacillus cereus*. Penelitian tersebut menghasilkan rasio nutrisi C:N:P sebesar 100:10:1, sebagai rasio optimum untuk pertumbuhan *Bacillus cereus*.

Namun tidak sedikit pula penelitian yang mengemukakan bahwa rasio nutrient C:N:P optimum untuk bakteri adalah 100:5:1 seperti pada Tabel 3.13. Unsur Nitrogen digunakan sebagai penyusun protein, enzim, asam amino dan asam nukleat dari mikroba. Berikut Gambar 3.10 yang berisi siklus unsur nitrogen pada perairan laut.

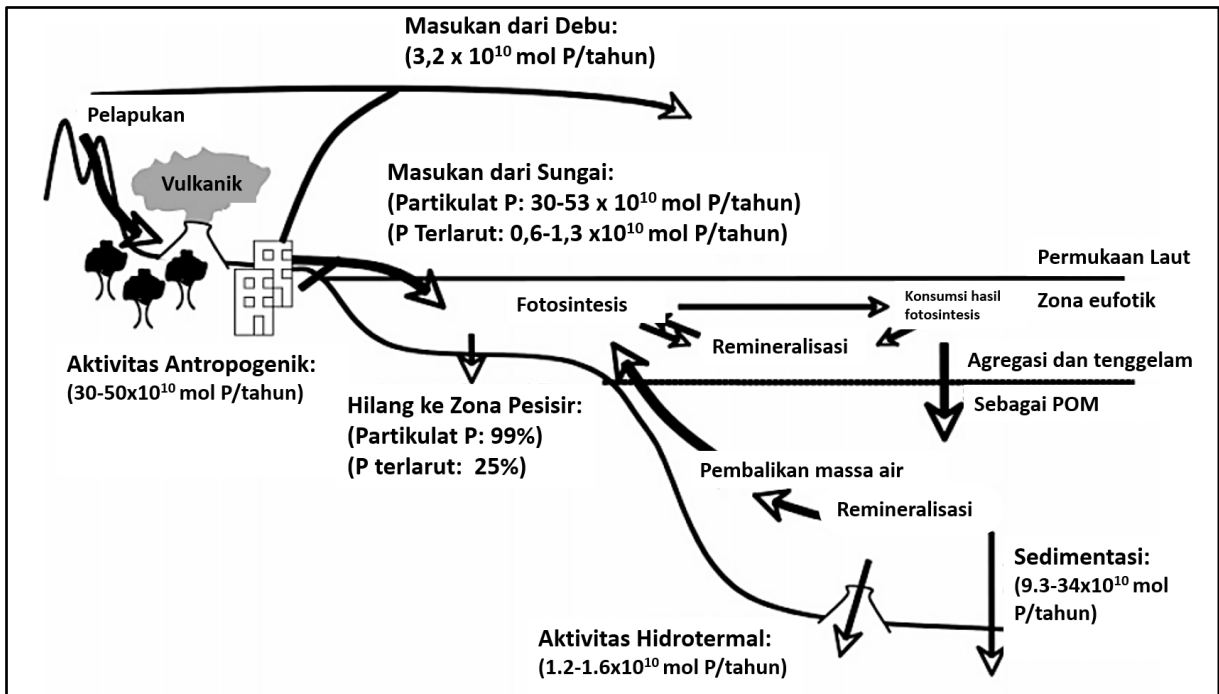


Gambar 3.10 Siklus Unsur Nitrogen pada Perairan Laut
 Sumber: Gruber (2008)

Siklus unsur Nitrogen pada lingkungan laut dipengaruhi oleh metabolisme mikroba kompleks, meliputi proses fiksasi nitrogen, nitrifikasi, asimilasi, dan *anammox* (*anaerobic ammonium oxidation and denitrification*). Nitrogen pada lingkungan laut hampir 95% berada dalam bentuk gas N_2 terlarut yang bersifat tidak reaktif dan tidak dapat digunakan langsung oleh sebagian besar spesies (Meirinawati, 2017). Senyawa Nitrogen sebagian besar dihasilkan pada reaksi redoks yang diinisiasi oleh mikroorganisme laut. Nitrogen pada lingkungan laut dapat diukur sebagai TN (Total Nitrogen), DIN (*Dissolved Inorganic Nitrogen*), DON (*Dissolved Organic Nitrogen*) seperti yang telah dijelaskan di Sub-bab 3.1.2. DIN merupakan gabungan ion nitrogen anorganik terlarut, misalnya NO_3^- , NO_2^- , dan NH_4^+ .

Unsur Fosfor digunakan oleh mikroba untuk membentuk asam nukleat, koenzim, dan fosfolipid (Nurmalasari, 2018). Fosfor secara alamiah berasal dari pelapukan dan erosi batuan fosfor di daratan yang kemudian terbawa hingga ke perairan laut. Namun seiring berkembangnya aktivitas manusia, penambangan batuan fosfat juga dilakukan untuk memenuhi kebutuhan pupuk tanaman. Seperti Gambar 3.11 yang berisi siklus fosfor pada lingkungan laut, menyebabkan fosfor pada waktu yang cukup lama akan terakumulasi di perairan laut terutama pada sedimennya. Hal tersebut diakibatkan oleh laju penambahan fosfor lebih tinggi daripada *uptake* fosfor pada lingkungan laut. Kandungan Fosfor perairan pada umumnya diukur sebagai TP (*Total Phosphorus*). TP merupakan gabungan dari TDP

(Total Dissolved Phosphorus) dan *Particulate Phosphate* (PP). TDP terdiri dari *Dissolved Organic Phosphorus* (DOP) dan juga *ortho phosphate*. *Ortho Phosphate* merupakan salah satu bentuk fosfor yang merupakan bagian dari *Dissolved Inorganic Phosphorus* (DIP). *Ortho phosphate* merupakan bentuk senyawa dari fosfor yang berikatan dengan empat atom oksigen dan dalam bentuk ionik akan terdapat tiga elektron. Senyawa *orthophosphate* (PO_4^-) merupakan bentuk senyawa fosfor yang paling reaktif dan dapat langsung dimanfaatkan bagi mikroorganisme. Senyawa fosfat yang berada di perairan akan mengalami penguraian menjadi senyawa ion H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} , dan PO_4^{3-} (Zainuddin & Nofianti, 2022).



Gambar 3.11 Siklus Unsur Fosfor pada Perairan Laut

Sumber: Paytan and Mclaughlin (2007)

Penambahan nutrisi N dan P pada lokasi target, dapat beraneka macam bentuknya. Nutrisi tersebut bisa berupa padatan maupun cairan. Berdasarkan sumbernya dapat berasal dari pupuk superfosfat, pupuk NPK, *slow release fertilizer*, NaNO_3 (Natrium Nitrat), KNO_3 (Kalium Nitrat), NH_4NO_3 (Ammonium Nitrat), K_2HPO_4 (*Potassium Hydrogen Phosphate*), $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ (*Sodium Tripholyphosphate*), dan *Oleophilic fertilizer* (Saha *et al.*, 2019; Maitra, 2018; Sakaya *et al.*, 2019; Agarry, 2017; Syafitri *et al.*, 2022). Jenis dan bentuk nutrisi memiliki kekurangan dan kelebihan masing-masing. Nutrisi yang bersifat larut dalam air (*water soluble*) memiliki ketersediaan yang cukup banyak dan lebih mudah untuk dilakukan penyesuaian konsentrasi pada target biostimulasi. Nutrisi terlarut lebih banyak digunakan dalam bentuk garam nitrat dan fosfat yang mampu menstimulasi pertumbuhan mikroba dengan cepat (Sayed *et al.*, 2021). Sementara nutrisi yang bersifat *water soluble* memiliki kekurangan seperti lebih mudah terdispersi dan menyebar akibat gelombang dan arus laut, sehingga tidak dapat dimanfaatkan secara optimal oleh bakteri pada jangka waktu yang lebih lama. Untuk jenis nutrisi yang berasal dari *Slow Release Fertilizer* (SRF) memiliki keunggulan yaitu nutrisi yang terkandung di dalamnya dilepaskan secara bertahap, dapat bertahan lebih lama dibanding nutrisi *water soluble*, lebih menghemat biaya dibanding jenis pupuk *inorganic* lainnya, serta yang utama

kemampuan untuk mengatasi *washout* pada lingkungan laut (Mahjoubi et al., 2018). Meskipun demikian, penggunaan pupuk SRF sulit untuk menentukan *rate* pelepasan nutrisi yang optimal. Penggunaan pupuk organik untuk proses biostimulasi memiliki keunggulan yaitu biaya pengadaan lebih murah dan lebih ramah bagi lingkungan. Disamping itu, kandungan nutrisi yang terkandung didalamnya dapat beraneka ragam baik jumlah maupun rasio antar nutriennya, dan juga dikhawatirkan masih mengandung mikroorganisme patogen yang dapat berbahaya bagi lingkungan. Berikut Tabel 3.14 yang berisi tabulasi beberapa hasil penelitian yang membahas terkait biostimulasi minyak mentah.

Tabel 3.14 Hasil Penelitian Terdahulu Terkait Biostimulasi

No	Penulis	Sumber N	Sumber P	Ratio C:N:P Optimal	Perlakuan	Jenis Polutan	%Degradasi	Durasi (hari)
1	Roy <i>et al.</i> , 2018	NaNO ₃	K ₂ HPO ₄	100:10:1	Biostimulasi	TPH	55%	120
				100:10:1	Biostimulasi + Bioaugmentasi	TPH	75%	120
2	Yanyu <i>et al.</i> , 2018	NaNO ₃	KH ₂ PO ₄	100:10:1	Biostimulasi	n-alkana	57,16% - 60,52%	30
3	Sakaya <i>et al.</i> , 2019	KNO ₃	Na ₅ P ₃ O ₁₀	100:5:1	Biostimulasi, T = 28°C	Total Alkana	115% increase degradation rate from bioatenuation	98
				100:5:1	Biostimulation, T = 18°C	Total Alkana	33% increase degradation rate from bioatenuation	98
4	Syafitri <i>et al.</i> , 2022	NH ₄ NO ₃	Pupuk superfosfat	100:10:1	Biostimulasi	Bio Solar	Peningkatan koloni Bacillus cereus dan lapisan biosolar tak tersisa di hari ke-7	7
5	Darmayati <i>et al.</i> , 2017	SRF fertilizer NPK	SRF fertilizer NPK	-	-	Minyak Mentah	44,2±4,3% - 65,9±3,4%	28
6	Hasanah <i>et al.</i> , 2018	Nitrat 0,4 mg/L	-	-	Biostimulasi	Benzena	62,83% – 78,41%	28
7	Hamdan <i>et al.</i> , 2020	KNO ₃	Na ₅ P ₃ O ₁₀	100:5:1	Biostimulasi T=28°C	Light crude oil	32,6% increase degradation rate from bioatenuation	42

No	Penulis	Sumber N	Sumber P	Ratio C:N:P Optimal	Perlakuan	Jenis Polutan	%Degradasi	Durasi (hari)
8	Agarry, 2017	<i>Slow release inorganic NPK fertilizer</i>	<i>Slow release inorganic NPK fertilizer</i>	-	Biostimulasi	<i>Light crude oil</i>	94,87% (Variabel kontrol = 51,6%)	28
		<i>Organic fertilizer (animal dung wastes which consisted of cattle dung, pig dung and poultry droppings)</i>	<i>Organic fertilizer (animal dung wastes which consisted of cattle dung, pig dung and poultry droppings)</i>	-	Biostimulasi	<i>Light crude oil</i>	94,62% (Variabel kontrol = 51,6%)	28

Dari Tabel 3.14 dapat diketahui jika penambahan nutrisi dapat meningkatkan persentase degradasi dan kecepatan degradasi polutan minyak mentah. Peningkatan persentase degradasi minyak mentah dapat mencapai 43,27% (51,6% menjadi 94,87%) menggunakan *slow release inorganic NPK fertilizer* dan 43,02% (51,6% menjadi 94,62%) menggunakan nutrisi pupuk organik campuran kotoran hewan (Agarry, 2017). Persentase degradasi 51,6% merupakan hasil dari proses bioatenuasi (tanpa perlakuan), hasil tersebut dicapai pada hari ke-28. Sementara untuk peningkatan kecepatan degradasi mencapai 32,6% yang merupakan hasil penelitian Hamdan *et al.*(2020) terhadap degradasi *light crude oil* dengan durasi percobaan selama 42 hari. Percobaan lain yang dilakukan oleh Sakaya *et al.* (2019), proses biostimulasi dapat meningkatkan kecepatan degradasi hingga 115% pada suhu 28°C dan 33% pada suhu 18°C. Syafitri *et al.* (2022), mengungkapkan bahwa metode biostimulasi dapat meningkatkan jumlah sel bakteri. Hal ini didukung oleh penelitian Darmayati *et al.* (2017) yang mengatakan jika peningkatan jumlah sel bakteri berkorelasi positif dengan penurunan konsentrasi minyak mentah.

Ditinjau dari lamanya waktu yang dibutuhkan untuk degradasi minyak mentah, metode biostimulasi memakan waktu yang cukup lama dibanding metode bioaugmentasi. Namun penggunaan pupuk SRF dapat meningkatkan kecepatan degradasi hidrokarbon (Darmayati *et al.*, 2017; Agarry, 2017). SRF dapat menjamin keberlanjutan suplai nutrisi yang telah diberikan di awal waktu. Sementara untuk jenis nutrisi lain, Bakteri akan mengalami peningkatan degradasi yang cukup tinggi di awal waktu. Namun dapat menurun dalam jangka waktu yang pendek dan melanjutkan fase stasioner dalam jangka waktu menengah. Penurunan degradasi diakibatkan oleh berkurangnya nutrisi seiring peningkatan jumlah mikroba (Syafitri *et al.*, 2022). Nutrisi paling efektif untuk proses biostimulasi minyak mentah berupa *oleophilic fertilizer*. Pupuk tersebut memungkinkan untuk dapat larut pada fase minyak dan tetap tersedia / terlarut dalam fase air, sehingga memudahkan bakteri hidrokarbonoklastik untuk memanfaatkannya (Mahjoubi *et al.*, 2018). Namun harga yang terlalu mahal, menjadi salah satu faktor penghambat penggunaan *oleophilic fertilizer* pada proses biostimulasi.

3.5.2 Mikronutrien Mikroba dan sumbernya

Menurut Darmayati *et al.* (2017) kebutuhan nutrien mikroba tidak terbatas pada pemberian makronutrien saja (C,N,P), melainkan juga pada *secondary nutrient* yang terdiri dari Magnesium (Mg), Sulfur (S), dan Kalsium (Ca). Nutrisi pada jumlah yang kecil juga dibutuhkan atau disebut *micronutrient* yang terdiri dari Seng (Zn), Besi (Fe), Klor (Cl), Mangan (Mn), B (Boron), Mo (Molibdenum). Mikronutrien berupa mineral-mineral tersebut berguna untuk mempercepat aktivitas katalitik dari enzim yang diproduksi oleh bakteri. Pada lingkungan laut, Adapun fungsi dari beberapa mikronutrien bagian pertumbuhan dan fungsi seluler bakteri seperti pada Tabel 3.15. Mikronutrien tersebut dapat berupa garam-garam anorganik dan dalam bentuk ion terlarut. Mineral tersebut biasanya telah tersedia dalam jumlah yang mencukupi pada lingkungan perairan laut. Seperti penelitian Polapa *et al* (2022) terkait konsentrasi logam berat di perairan laut Kota Makassar, mendapatkan konsentrasi Zn sebesar $0,01 \pm 0$ ppm. Penelitian Wahyuningsih *et al* (2021) yang dilakukan di perairan Kota Bontang, mendapatkan konsentrasi Zn sebesar 0,01 mg/L. Sementara untuk penelitian Sasongko *et al* (2020) di Perairan Pulau Tunda mendapatkan konsentrasi Fe sebesar 0,58 mg/l dan Mn sebesar 0,27 mg/l.

Tabel 3.15 Fungsi Seluler Mikronutrien Terhadap Bakteri

Mikronutrien	Fungsi Seluler
<i>Cobalt (Co)</i>	<i>Vitamin B12; transcarboxylase (propionic acid bacteria)</i>
<i>Copper (Cu)</i>	<i>Respiration (cytochrome c oxidase); Photosynthesis (plastocyanin, some superoxide dismutases)</i>
<i>Manganese (Mn)</i>	<i>Acts as activator of various enzymes; occurs in some superoxide dismutases and in the photolytic (water-splitting) enzyme in oxygenic phototrophs(photosystem-II)</i>
<i>Molybdenum (Mo)</i>	<i>Present in some flavin containing enzymes, nitrogenase, nitrate reductase, sulphide oxidase, some formate dehydrogenases</i>
<i>Nickel (Ni)</i>	<i>Present in most hydrogenase enzymes; coenzyme of methanogenes; carbon monoxide dehydrogenase; urease</i>
<i>Selenium (Se)</i>	<i>Occurs in formate dehydrogenase; certain hydrogenases: amino acid selenocysteine</i>
<i>Tungsten / Wolfram (W)</i>	<i>Some formate dehydrogenases; oxotransferases of hyperthermo-philic</i>
<i>Vanadium (V)</i>	<i>Vanadium nitrogenase; Bromoperoxidase</i>
<i>Zinc (Zn)</i>	<i>Carbonic anhydrase; alcohol dehydrogenase; RNA and DNA polymerase, DNA-binding proteins</i>

Sumber : Sayed *et al* (2021)

Pada kasus tumpahan minyak mentah, jumlah mikronutrien juga mengalami kelimpahan. Seperti yang diketahui kandungan senyawa minyak mentah tidak terbatas pada hidrokarbon saja, melainkan juga pada kandungan mineral dan logam seperti yang tercantum pada Tabel 3.7. Pada proses biostimulasi, penggunaan pupuk tertentu juga dapat memenuhi kebutuhan nutrisi mikroba. Penelitian yang dilakukan Banet *et al.* (2021), yang menggunakan pupuk *Poly-Feed GG 20-20-20 with micronutrients* produksi Haifa group dengan komposisi N- 20%, K- 20%, P- 20%, Fe (1000 ppm), Mn (500 ppm), B (200 ppm), Zn (150 ppm), Cu (110 ppm), Mo (70 ppm). Penggunaan pupuk majemuk NPK Mutiara juga mengandung mikronutrien yang komposisinya terdiri dari 16% Nitrogen (N) terbagi dalam 2 bentuk yaitu 9,5% Ammonium (NH_4) dan 6,5% Nitrat (NO_3), 16% Fosfor Oksida (P_2O_5), 16 % Kalium Oksida (K_2O), 1,5 % Magnesium Oksida (MgO), 5% Kalsium Oksida (CaO) (Ayu *et al.*, 2019). Pupuk NPK majemuk yang dijual secara komersial, rata-rata memiliki tambahan mikronutrien didalamnya seperti produk pupuk NPK Lao Ying, NPK Pak Tani, NPK Nova Tec Blue.

Dari proses telaah literatur, sangat sedikit yang membahas mengenai penambahan mikronutrien untuk mendegradasi senyawa hidrokarbon terutama pada perairan laut. Hal ini dianggap bahwa kebutuhan mikronutrien mikroba sudah dapat terpenuhi oleh adanya kandungan mikronutrien di minyak mentah, kandungan mikronutrien alamiah di lingkungan laut itu sendiri, dan kandungan mikronutrien pada jenis pupuk inorganik tertentu. Penambahan mikronutrien melebihi derajat tertentu akan berakibat sebaliknya, yaitu penurunan produksi enzim. Penurunan produksi enzim disebabkan oleh ketidakmampuan bakteri untuk bertahan dari sifat toksik terutama senyawa logam (Risky *et al.*, 2019).

3.6 Tahapan Proses Bioaugmentasi dan Biostimulasi (Simultan / Bertahap)

Pada suatu area tercemar minyak mentah, secara alamiah akan terjadi peningkatan jumlah bakteri hidrokarbonoklastik. Hal ini diakibatkan respon positif bakteri hidrokarbonoklastik indigen terhadap tumpahan minyak yang menjadikan kandungan karbon minyak mentah sebagai sumber energinya. Proses bioremediasi oleh mikroorganisme tanpa perlakuan tambahan tersebut disebut juga dengan bioatenuasi. Keberadaan bakteri pendegradasi di lingkungan tercemar secara alamiah berkisar $10^3 - 10^4$ CFU/ml dan apabila jumlah bakteri tidak sampai atau berada di bawah 10^3 CFU/ml mengindikasikan lingkungan terjadi kondisi toksik yang cukup berat (Kumar *et al.*, 2018). Mikroorganisme mampu mendegradasi minyak mentah secara optimal dengan jumlah bakteri minimal sebanyak $10^6 - 10^7$ CFU/ml dan dapat mencapai 10^9 CFU/ml pada puncaknya (Varjani & Upasani, 2019; Syafrizal *et al.*, 2020). Sementara untuk jumlah isolat bakteri yang ditambahkan ke area tercemar sebanyak 5-10% (v/v) yang merupakan volume isolat per volume larutan tercemar (Nurmalasari, 2018; Wardhani, 2020). Beberapa bakteri dapat hidup pada volume minyak mentah terhadap perairan hingga 15% (v/v). Hal tersebut sebagaimana tercantum pada Keputusan Menteri Lingkungan Hidup RI nomor 128 tahun 2003, bahwa limbah minyak yang dapat diolah dengan proses bioremediasi berkadar TPH awal maksimum 15%. Diketahui beberapa bakteri seperti *Bacillus subtilis* yang mampu hidup hingga kadar TPH 15% (Wardhani & Titah, 2020). Semakin besar konsentrasi minyak mentah, maka semakin sedikit pula jumlah bakteri yang mampu beradaptasi di kondisi tersebut.

Kondisi sedikitnya jumlah sel bakteri pendegradasi minyak mentah di suatu area tercemar minyak mentah, mengakibatkan lamanya waktu yang diperlukan untuk mendegradasi minyak mentah. Dilain sisi keterbatasan nutrisi terutama N dan P menjadi faktor pembatas bakteri pendegradasi. Beberapa penelitian mengungkapkan untuk melakukan metode biostimulasi dahulu dilanjutkan dengan metode bioaugmentasi pada proses biodegradasi

minyak mentah. Hal ini untuk mendukung percepatan pertumbuhan bakteri indigen yang di memiliki sifat lebih cepat beradaptasi pada kondisi tercemar karena telah terpapar dan terseleksi secara alamiah dibanding bakteri eksogen (Mahjoubi *et al.*, 2018). Penambahan nutrisi pada awal proses juga berguna untuk meningkatkan bioavailabilitas minyak mentah. Bakteri indigen yang resisten pada kondisi tercemar minyak mentah memiliki kemampuan untuk menghasilkan biosurfaktan dan membuat kondisi lingkungan tercemar lebih adaptif bagi mikroba lain (Decesaro *et al.*, 2017). Produksi biosurfaktan ini untuk meningkatkan bioavailabilitas minyak mentah, sehingga dapat juga dimanfaatkan oleh bakteri lain yang tidak memiliki biosurfaktan. Oleh karena itu keberadaan nutrisi yang mencukupi menjadi kunci utama proses biodegradasi minyak mentah (Sayed *et al.*, 2021). Menurut Agbaji *et al* (2020), kekurangan nutrisi yang tersedia dan rendahnya bioavailabilitas minyak mentah, menjadikan penambahan bakteri eksogen menjadi kurang optimal. Penambahan nutrisi pada area tercemar, dapat diibaratkan sebagai proses inokulasi bakteri pada media pertumbuhan yang telah diperkaya nutrisi seperti media SMSSe (*Stone Mineral Salt Solution Extract Yeast*). Sehingga bakteri yang akan ditambahkan pada area tercemar akan beradaptasi sejak awal dengan lingkungan yang memiliki nutrisi yang mencukupi. Berikut beberapa penelitian yang mengungkapkan bahwa proses bioaugmentasi disertai biostimulasi menghasilkan persentase penyisihan lebih baik daripada *single method* diantara keduanya yang tertera pada Tabel 3.16.

Dari Tabel 3.16, dapat ditarik kesimpulan jika metode bioaugmentasi ditambah biostimulasi dengan penambahan nutrisi nitrogen dan fosfor, memperoleh penyisihan minyak mentah lebih tinggi dan lebih cepat dibanding metode lain. Metode bioaugmentasi yang hanya ditambahkan nutrisi fosfor lebih rendah kemampuan degradasinya dibanding metode bioaugmentasi ditambah nutrisi nitrogen. Metode yang paling efisien kedua adalah bioaugmentasi. Metode biostimulasi dengan penambahan nutrisi nitrogen dan fosfor, mendapatkan degradasi minyak mentah yang lebih rendah daripada bioaugmentasi. Dan metode dengan penyisihan minyak mentah terendah adalah metode bioatenuasi yang bergantung pada ketersediaan bakteri dan nutrisi eksisting.

Metode bioaugmentasi pada umumnya dilakukan dengan satu kali proses inokulasi pada media tercemar. Namun proses tersebut akan mengalami fase stasioner yang menyebabkan kecepatan biodegradasi minyak mulai menurun tidak seperti fase logaritmik. Remediasi media tercemar diharapkan mampu dilakukan dalam kurun waktu yang singkat agar dampak pencemaran tidak semakin meluas dan akut. Oleh karena itu, Poorsoleiman *et al* (2020) melakukan penelitian terkait metode inokulasi dua tahap dengan metode komposting. Media yang digunakan adalah LMM (*Liquid Mineral Medium*) ditambah minyak mentah. Kemudian kultur bakteri yang diisolasi dari lumpur minyak diinokulasikan pada media tersebut. Dilakukan pengamatan selama 16 minggu. Pada minggu ke-8 terdapat objek pengamatan yang dilakukan inokulasi (perlakuan inokulasi kedua). Hasil pengukuran didapatkan jika perlakuan dengan inokulasi dua tahap menghasilkan residu TPH yang lebih rendah dibanding inokulasi satu tahap. Kemudian Koolivand *et al* (2020), mencoba hal yang sama dengan penelitian Poorsoleiman *et al* (2020). Hasil penelitian Koolivand *et al* (2020) mengemukakan jika dua tahap inokulasi menghasilkan residu TPH yang lebih sedikit dibanding satu tahap inokulasi. Penelitian tersebut melakukan proses inokulasi kedua pada minggu ke-8 dan pengamatan berakhir di minggu ke-16.

Tahun berikutnya, Behera *et al* (2021) melakukan penelitian terkait dua tahap inokulasi pada metode bioaugmentasi. Pada awal proses bioaugmentasi, degradasi TPH cukup lambat karena berada pada fase lag. Pada fase tersebut, bakteri melakukan proses adaptasi lingkungan dan mencoba memanfaatkan TPH sebagai sumber karbonnya. Memasuki hari ke-10, bakteri mulai mengalami fase stasioner dan kecepatan degradasi TPH mulai menurun.

Hari ke-10 diinokulasikan kultur bakteri sebagai tahap kedua penambahannya. Hari terakhir pengamatan (hari ke-15) didapatkan bahwa perlakuan inokulasi dua tahap lebih optimal daripada satu tahap inokulasi. Didapatkan persentase degradasi TPH mencapai 91,5% pada perlakuan inokulasi dua tahap. Sementara untuk perlakuan inokulasi satu tahap, didapatkan persentase degradasi TPH sebesar 77,3%. Oleh karena itu, metode bioaugmentasi dua tahap menjadi alternatif terbaik untuk mendegradasi tumpahan minyak mentah di lingkungan laut.

Penelitian yang dilakukan Habibi dan Babaei (2017), proses degradasi *oil field produced water* dilakukan dengan proses biostimulasi dahulu dilanjutkan dengan bioaugmentasi. Proses biostimulasi tersebut diawali dengan penambahan nutrisi dan penyesuaian pH. Setelah proses tersebut, bakteri diinokulasikan ke media target. Pada awal proses biostimulasi lebih baik menggunakan nutrisi yang dapat larut dengan cepat atau yang bersifat *water soluble*, agar bakteri indigen dapat dengan cepat menyerap nutrisi tersebut. Seperti yang diketahui jika pupuk *water soluble* dapat menyediakan nutrisi secara instan bagi bakteri. Fase pertumbuhan logaritmik bakteri umumnya terjadi setelah 24 jam hingga 5 hari setelah paparan ke media tercemar. Pada fase tersebut kebutuhan nutrisi sangat tinggi sehingga apabila menggunakan pupuk *slow release* akan menurunkan percepatan pertumbuhan di awal fase. Diketahui jika pupuk *slow release* membutuhkan 10 hari setelah pembubuhan untuk mencapai pelepasan nutrisi yang optimal. Fase pelepasan nutrisi SRF yang optimal diperkirakan berlangsung selama 10 hari. Setelah fase logaritmik, bakteri akan tetap naik pertumbuhannya. Namun dilain sisi, terjadi fase kematian pada sebagian bakteri. Pada fase tersebut hendaknya didukung dengan pemenuhan nutrisi berupa pupuk *slow release* untuk mempertahankan laju degradasi bakteri dan menghemat biaya penanganan.

Penambahan nutrisi melalui proses biostimulasi, tanpa mempertimbangkan jenis bakteri yang kompeten dalam mendegradasi minyak mentah dapat menurunkan efektivitas biostimulasi (Agbaji *et al.*, 2020). Untuk mengatasi hal tersebut beberapa peneliti seperti Susilawati (2019), menerapkan bioaugmentasi terlebih dahulu yang ditumbuhkan pada media yang menyerupai media target. Tahap pertama dilakukan isolasi bakteri indigen pada area tercemar, kemudian dilanjutkan dengan pembuatan media pertumbuhan yang diperkaya dengan nutrisi. Apabila jumlah bakteri yang diinokulasi telah cukup, maka dilakukan dilanjutkan dengan penebaran kultur bakteri pada area tercemar. Setelah itu, dapat dilakukan proses biostimulasi yang bertujuan untuk memperkaya nutrisi N dan P pada media tercemar (Li *et al.*, 2021).

Pertumbuhan bakteri tidak selamanya mengalami fase logaritmik, ada saatnya pertumbuhan mulai statis atau konstan bahkan penurunan pertumbuhan. Apabila suatu proses degradasi belum mencapai persentase degradasi yang diinginkan, maka dapat ditambahkan kultur mikroba baru. Proses tersebut berupa metode *Two-Step Bioaugmentation Strategies* (TSBS) seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Proses biodegradasi minyak mentah bergantung pada kompleksitas senyawa penyusunnya, pada fase pertama menyasar pada komponen yang lebih mudah terdegradasi, sementara hidrokarbon yang lebih resisten didegradasi pada tahap selanjutnya (Varjani & Upasani, 2017). Oleh karena itu, dibutuhkan monitoring lanjutan mendekati pertengahan fase pertama untuk menganalisis komposisi senyawa hidrokarbon yang tersisa. Analisis tersebut berguna untuk memilih bakteri yang mampu untuk mendegradasi komponen minyak mentah yang tersisa.

Tabel 3.16 Efisiensi Degradasi Minyak Mentah Menggunakan Metode Biostimulasi dan Bioaugmentasi

No	Penulis / Tahun	Metode	Jenis Bakteri	Nutrient	% Removal crude oil	Jangka waktu (Hari)	Laju Degradasi per Hari
1	Roy et al. 2018 (Removal TPH)	Natural Attenuation	-	-	35,00%	120	0,29%
		Bioaugmentation	Aerobic Heterotropic Bacterial	-	41,00%	120	0,34%
		Biostimulation (N)	-	NaNO ₃	50,00%	120	0,42%
		Bioaugmentation + N	Aerobic Heterotropic Bacterial	NaNO ₃	63,30%	120	0,53%
		Biostimulation (P)	-	K ₂ HPO ₄	46,00%	120	0,38%
		Bioaugmentation + P	Aerobic Heterotropic Bacterial	K ₂ HPO ₄	57,30%	120	0,48%
		Biostimulation NP	-	NaNO ₃ + K ₂ HPO ₄	55,00%	120	0,46%
		Bioaugmentation + NP	Aerobic Heterotropic Bacterial	NaNO ₃ + K ₂ HPO ₄	75,00%	120	0,63%
2	Varjani and Upasani, 2019 (Removal Crude Oil)	Natural Attenuation	-	-	9,80%	45	0,22%
		Biostimulation	-	NH ₄ NO ₃ + Na ₂ HPO ₄	22,00%	45	0,49%
		Bioaugmentation	Tiga strain <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , Satu strain <i>Stenotrophomonas sp</i> , dan Satu <i>Ochrobactrum sp</i> .	-	49,00%	45	1,09%
		Biostimulation + Bioaugmentation	Tiga strain <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , Satu strain <i>Stenotrophomonas sp</i> , dan Satu <i>Ochrobactrum sp</i> .	NH ₄ NO ₃ + Na ₂ HPO ₄	93,00%	45	2,07%
3	Behera et al. , 2019 (TPH)	Natural Attenuation	-	-	21,00%	21	1,00%
		Biostimulation	-	Poultry Litter	57,50%	21	2,74%
		Bioaugmentation	<i>Dietzia lutea</i> (IRB191), <i>Dietzia lutea</i> (IRB192), <i>Staphylococcus warneri</i> (BSM19), and <i>Stenotrophomonas pavanii</i> (IRB19)	-	80,20%	21	3,82%
		Biostimulation + Bioaugmentation	<i>Dietzia lutea</i> (IRB191), <i>Dietzia lutea</i> (IRB192), <i>Staphylococcus warneri</i> (BSM19), and <i>Stenotrophomonas pavanii</i> (IRB19)	Poultry Litter	90,30%	21	4,30%

No	Penulis / Tahun	Metode	Jenis Bakteri	Nutrient	% Removal crude oil	Jangka waktu (Hari)	Laju Degradasi per Hari
4	Gholami-Shiri et al., 2017 (Oily Sludge)	<i>Negative Control</i>	-	-	12,50%	30	0,42%
		<i>Biostimulation + Bioaugmentation</i>	<i>SPGR Consortium : Staphylococcus sp, Bacillus cereus, Bacillus sp and Lysinibacillus fusiformis</i>	<i>MSM (Mineral Salt Medium)</i>	52,30%	30	1,74%
		<i>Biostimulation + Bioaugmentation</i>	<i>SOR Consortium : Pseudomonas fluorescens, Pseudomonas aeruginosa and Citrobacter amalonaticus.</i>	<i>MSM (Mineral Salt Medium)</i>	35,40%	30	1,18%
		<i>Biostimulation + Bioaugmentation</i>	<i>SPGR + SOR Consortium : Staphylococcus sp, Bacillus cereus, Bacillus sp, Lysinibacillus fusiformis, Pseudomonas fluorescens, Pseudomonas aeruginosa and Citrobacter amalonaticus</i>	<i>MSM (Mineral Salt Medium)</i>	68,50%	30	2,28%
5	Darmayati et al., 2017 (crude oil contaminated sand)	<i>Control</i>	-	-	13,33%	28	0,48%
		<i>Bioaugmentation</i>	<i>Single Culture (Alcanivorax sp)</i>	-	28,37%	28	1,01%
		<i>Bioaugmentation</i>	<i>Mixed Culture (Alcanivorax sp and Pseudomonas balearica)</i>	-	30,53%	28	1,09%
		<i>Bioaugmentation + Biostimulation</i>	<i>Single Culture (Alcanivorax sp)</i>	<i>Biostimulation (N = 7,5 mg/g)</i>	74,60%	28	2,66%
		<i>Mixed Culture</i>	<i>Mixed Culture (Alcanivorax sp and Pseudomonas balearica)</i>	<i>Biostimulation (N = 7,5 mg/g)</i>	64,90%	28	2,32%

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV STUDI KASUS

Studi kasus ini bertujuan untuk menganalisis kasus tumpahan minyak mentah dan potensi penerapan bioaugmentasi dan biostimulasi pada dua kasus tersebut. Untuk memperdalam pemahaman penerapan bioaugmentasi dan biostimulasi tumpahan minyak mentah di lingkungan laut diangkatlah dua kasus tumpahan minyak mentah di dua kondisi geografi dan iklim yang berbeda. Studi kasus tumpahan minyak mentah yang akan dibahas yaitu kasus tumpahan minyak mentah Teluk Balikpapan yang terjadi pada 2018 serta kasus tumpahan minyak mentah di lepas pantai *Southern California* yang terjadi pada 2021. Secara umum, tumpahan minyak mentah di dua lokasi tersebut memiliki penyebab yang sama yaitu bocornya pipa distribusi minyak mentah di dasar laut. Pembahasan metode bioaugmentasi dan biostimulasi pada studi kasus ini dilandaskan dari data sekunder yang telah diolah dan dianalisis pada bab sebelumnya.

4.1 Deskripsi Wilayah Studi Kasus

4.1.1 Deskripsi Wilayah Teluk Balikpapan

Teluk Balikpapan terletak di bagian timur pulau Kalimantan dan diapit oleh Kota Balikpapan dan Kabupaten Penajam Paser Utara, seperti pada Gambar 4.1. Teluk Balikpapan menjadi kawasan strategis dan cukup penting bagi Provinsi Kalimantan Timur. Pada kawasan tersebut, memiliki peranan vital seperti transportasi, industri, bisnis, dan mendukung pergerakan serta pertumbuhan ekonomi kawasan sekitar termasuk Kota Balikpapan. Teluk Balikpapan menjadi salah satu jalur pelayaran utama bagi industri minyak dan gas. Salah satu penyebabnya adalah adanya kilang minyak terbesar kedua di Indonesia setelah kilang minyak Cilacap, yaitu kilang minyak Balikpapan milik Pertamina atau biasa dikenal dengan *Refinery Unit V (RU V) Balikpapan* (Nur *et al.*, 2020).



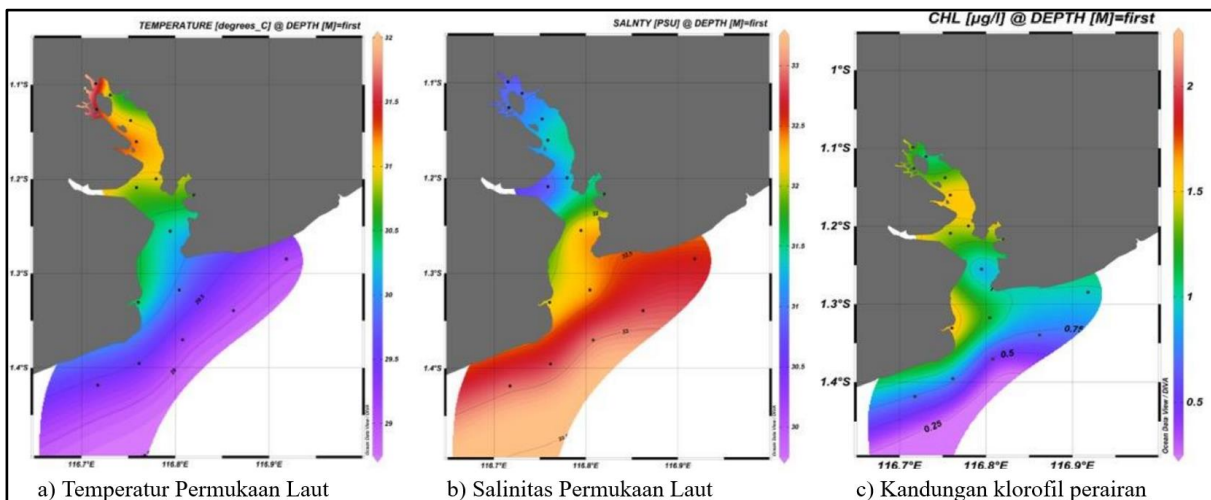
Gambar 4.1 Teluk Balikpapan

Sumber: Google Earth Pro(2022)

(earth.google.com/web/@-1.2303643,116.77834702,-7.41341595a,62409.73809139d,35y,0h,0t,0r)

Kapasitas kilang minyak RU V Balikpapan sebesar 260.000 barel per hari untuk memenuhi produk minyak di kawasan Indonesia Timur dan sebagian pada Indonesia Barat serta kebutuhan ekspor. Hingga saat ini kilang tersebut terus ditingkatkan kapasitas olahannya untuk mencapai produksi 360.000 barel produk minyak per hari pada tahun 2024 (Pertamina, 2020). Kilang Balikpapan mengolah minyak mentah dari pasokan domestik dan impor dengan karakteristik minyak mentah berkadar sulfur $< 2\%$ (*Sweet Crude Oil*) (Komisi VI DPR RI, 2019). Kilang Balikpapan memiliki dua unit CDU (*Crude Destilation Unit*), dengan CDU IV mengolah minyak impor dan domestik, sementara CDU V mengolah minyak mentah domestik saja (Putra, 2010). Kawasan kilang minyak Balikpapan memiliki beberapa sarana pendukung operasional *Incoming* dan *Outgoing* meliputi: *Single Point Mooring* (SPM), *Jetty*, *Filling Station* dan *Piping*. SPM merupakan fasilitas penerima pasokan minyak mentah dari kapal tanker yang terletak di Terminal Lawe-Lawe dengan kapasitas terpasang 1 juta barel minyak mentah dan mampu disinggahi kapal tanker dengan total 320.000 DWT (*deadweight tonnage / tonase bobot mati*) (Ifki, 2021). Terminal Lawe-Lawe dikhususkan untuk menampung minyak mentah yang berasal dari luar negeri (Kementerian ESDM, 2020). Minyak mentah yang ditampung di Terminal Lawe-Lawe, selanjutnya dilakukan proses distribusi menggunakan pipa menuju kilang minyak RU V yang terletak di Balikpapan.

Penelitian Putri *et al* (2021), melakukan pemantauan dan *modeling* kondisi Teluk Balikpapan yang menghasilkan data model salinitas, suhu, dan *chlorophyll*. Klorofil perairan erat kaitannya dengan keberadaan fitoplankton yang merupakan sumber makanan utama bagi organisme laut seperti ikan. Kandungan klorofil di suatu perairan bergantung pada ketersediaan nutrisi dan sinar matahari. Semakin tinggi nutrisi perairan tersedia dan intensitas sinar matahari yang cukup, maka akan meningkat pula konsentrasi klorofil di perairan (Garini *et al.*, 2021). Hasil permodelan dan observasi oleh Putri *et al* (2021) disajikan dalam bentuk Gambar 4.2 berikut



Gambar 4.2 Visualisasi kondisi Temperatur, Salinitas dan Klorofil

Sumber : Putri *et al* (2021)

Pada gambar 4.2 dapat diketahui jika pada Teluk Balikpapan memiliki suhu yang lebih hangat pada hulunya dan cenderung menurun pada bagian hilir. Suhu permukaan perairan disebabkan oleh kedalaman, sirkulasi air, dan juga penyinaran matahari. Semakin dangkal perairan suatu perairan, suhunya cenderung hangat. Berdasarkan gambar tersebut rentang suhu perairan Teluk Balikpapan masih berada pada kondisi mesofilik, yang dapat mendukung pertumbuhan bakteri. Sedangkan untuk kondisi salinitasnya, bagian hulu lebih

rendah daripada bagian hilir yang berbatasan dengan Selat Makassar. Rendahnya salinitas di bagian hulu diakibatkan oleh masuknya atau tercampurnya air laut dengan air tawar yang berasal dari sungai yang berhilir di Teluk Balikpapan. Konsentrasi klorofil pada perairan Teluk Balikpapan cukup beragam dan tidak linear perubahannya. Mendekati bagian tengah teluk, jumlah klorofil semakin meningkat dan mendekati hilir teluk menurun lagi jumlahnya. Hal ini mengindikasikan pada wilayah yang berwarna kuning hingga hijau memiliki nutrisi perairan yang cukup tinggi dan kedalaman yang dangkal daripada area lainnya.

4.1.2 Deskripsi Wilayah *Southern California*

Southern California terletak di selatan bagian barat Amerika Serikat di benua Amerika Utara dan berbatasan langsung dengan Samudera Pasifik. Wilayah tersebut merupakan area megapolitan yang terletak di negara bagian California. Perbatasan darat bagian selatan berbatasan langsung dengan Meksiko. *Southern California* terdapat lima wilayah yaitu *Los Angeles*, *Orange County*, *San Diego County*, sebagian wilayah *Riverside County* dan sebagian wilayah *San Bernadino County*. Berikut Gambar 4.3 yang merupakan gambaran peta wilayah *Southern California*.



Gambar 4.3 Wilayah *Southern California*

Sumber: [wikivoyage.com](https://en.wikivoyage.com) (2022)

(<https://en.wikivoyage.org/wiki/File:SoCal.png>)

Southern California merupakan salah satu daerah penghasil minyak dan gas yang berlokasi di lepas pantainya. Terdapat 27 anjungan sumur minyak dan gas di daerah tersebut (Nishimoto *et al.*, 2019). Anjungan tersebut terletak sejauh 2 hingga 16 km dari lepas pantai. Kedalaman dasar laut di area sumur minyak dan gas berkisar antara 9 hingga 365 meter. Area tersebut membentang 270 km dari garis pantai, diawali oleh *Platform Irene* di sebelah utara hingga *Platform Eureka* di bagian selatan lepas pantai *Huntington Beach*. Anjungan tersebut berusia cukup tua dengan pemasangan mulai dari 1963 hingga 1990 dan hampir semuanya memasuki fase akhir pakai mengingat cadangan minyak dan gas bumi yang hampir habis (Bull & Love, 2019). Sejak 2019, penonaktifan anjungan telah dimulai dan akan dilakukan secara bertahap hingga 2030.

4.2 Kasus Tumpahan Minyak Mentah

4.2.1 Kasus Tumpahan Minyak di Teluk Balikpapan 2018

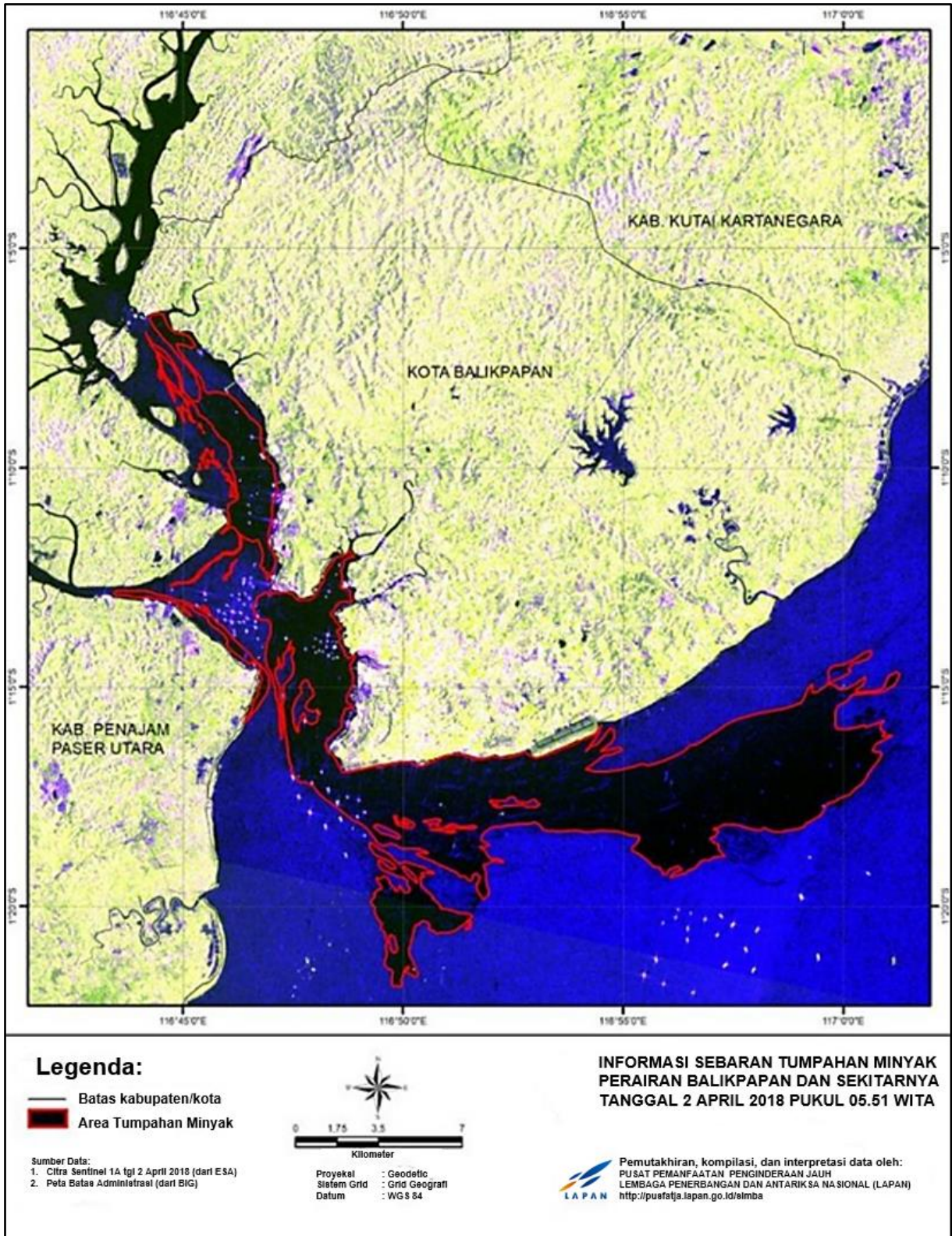
31 Maret 2018 sekitar pukul 11.05 WITA (Waktu Indonesia Tengah), terjadi kebakaran tiga kapal di Teluk Balikpapan. Kapal tersebut terdiri dari satu kapal kargo berjenis *bulk carrier* yaitu MV Ever Judger yang diketahui selesai muat batubara pada 30 Maret 2018 dan dua kapal nelayan. Pada awalnya api muncul dari permukaan laut dan membakar kapal MV Ever Judger, setelah itu merambat ke sebelah utara dan selatan kapal hingga mengenai kapal nelayan. Diketahui peristiwa tersebut menyebabkan lima korban meninggal dunia (Many et al, 2021). Korban meninggal dunia diakibatkan oleh kebakaran yang terjadi di perairan Teluk Balikpapan. Berikut Gambar 4.4 yang berisi visual kebakaran kapal dan permukaan laut di Teluk Balikpapan.



Gambar 4.4 Kondisi Kebakaran Kapal dan Permukaan Laut di Teluk Balikpapan

Sumber: Jawa Pos (2021)

Setelah penyelidikan lebih lanjut ditemukan bahwa penyebab kebakaran tersebut berasal dari tumpahan minyak mentah di Teluk Balikpapan. Tumpahan minyak tersebut diperkirakan terjadi sejak dini hari tanggal 31 Maret 2018. Minyak mentah tersebut tampaknya menyebar sangat cepat berdasarkan penginderaan satelit yang dirilis oleh LAPAN (Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional) beberapa hari setelah kejadian. Hanya dalam 24 jam ke depan, tumpahan sudah bergerak keluar teluk kemudian menuju ke timur dan mencemari Selat Makassar (Nur *et al.*, 2020). LAPAN merilis peta resmi sebaran minyak mentah pada 2 April 2018 seperti pada Gambar 4.5 berikut. Pada gambar tersebut dapat diketahui jika tumpahan minyak mengarah ke hulu Teluk Balikpapan dan sebagian mengarah ke Selat Makassar. Hal tersebut diakibatkan oleh pasang surut air laut dan juga masukan debit sungai.



Gambar 4.5 Peta Sebaran Tumpahan Minyak Mentah Teluk Balikpapan 2018
Sumber: LAPAN (2021)

Setelah beberapa hari dilakukan investigasi, ditemukan fakta bahwa Kapal MV Ever Judger telah selesai muat batubara pada tanggal 30 Maret 2018 dan bersiap untuk meninggalkan pelabuhan. Namun kondisi perairan masih berada pada kondisi surut, dan dirasa cukup menyulitkan untuk keluar dari area Teluk Balikpapan. Sehingga Kapal MV Ever Judger menunggu kondisi pasang terlebih dahulu dengan melego Jangkarnya. Kapal tersebut melego jangkar pada posisi sekitar $1^{\circ}15'08.4''$ S, $116^{\circ}47'18.8''$ E (titik terdekat ke batas larangan lego jangkar). Setelah mendengar penjelasan petugas pelabuhan, jangkar MV Ever Judger segera ditarik. Namun kondisi kapal telah bergeser beberapa ratus meter akibat arus dan angin laut. Kondisi tersebut kemungkinan juga menyeret jangkar dan mengenai pipa bawah laut Pertamina pada pukul 22.00 WITA tanggal 30 Maret 2018 (Many *et al.*, 2021). Adapun rute pipa distribusi dan posisi Kapal MV Ever Judger seperti pada Gambar 4.6. Garis biru putus-putus pada Gambar 4.4 menunjukkan jalur pipa distribusi dari Terminal Lawe-Lawe menuju Kilang RU V Balikpapan. Beberapa jam setelah kejadian tersebut, mulai tercium aroma minyak mentah yang diperkirakan mulai terjadi pada pukul 02.00 WITA tanggal 31 Maret 2018. Oleh karena itu, Pertamina menghentikan suplai minyak mentah dari Terminal Lawe-Lawe ke kilang RU V Balikpapan pada tanggal 31 Maret 2018 siang hari pada saat terjadinya kebakaran.

Menurut Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi, Kementerian ESDM kejadian tumpahan minyak mentah di Teluk Balikpapan terjadi akibat beberapa penyebab dasar yang cukup berpengaruh yaitu :

1. Lack of Risk Assessment

Petugas operasional di Terminal Lawe-Lawe tidak mendeteksi potensi risiko kebocoran pipa distribusi ketika level minyak mulai menurun di tangki *buffer*. Penurunan level pada tangki *buffer* dan *intake*, malah direspon dengan menaikkan *rate* pompa dan menambah pasokan minyak mentah dari tangki lain. Kondisi tersebut mengakibatkan volume minyak mentah yang terbuang ke area Teluk Balikpapan semakin banyak. Hasil HAZOPS (*Hazard and Operability Study*) yang sudah dilakukan khususnya untuk jalur pipa bawah laut kurang komprehensif.

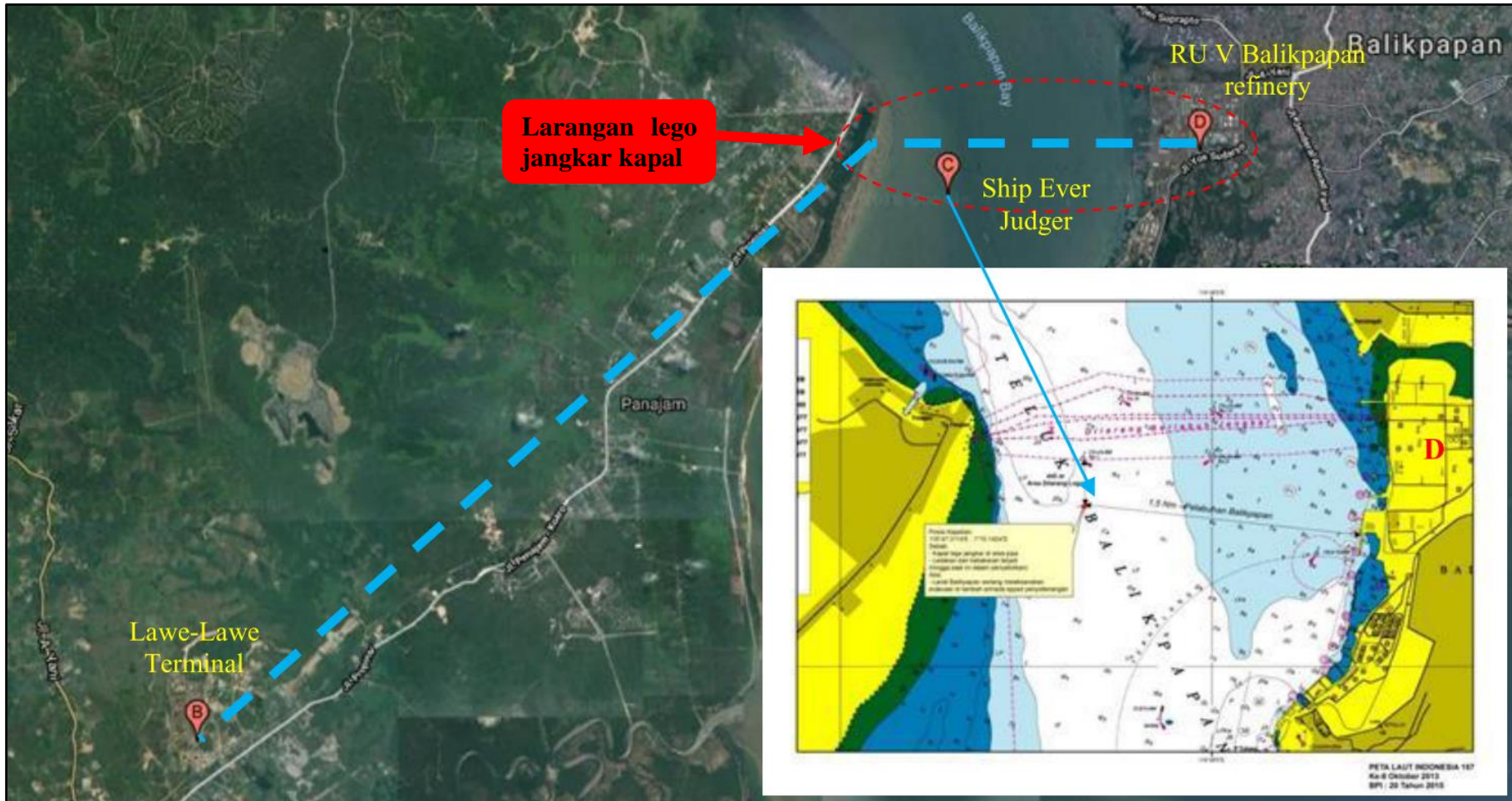
2. Lack of Engineering

Jalur pipa distribusi yang dibangun pada tahun 1997/1998 atau berumur 20 tahun memiliki sistem perpipaan yang masih belum optimal sesuai dengan perkembangan *process safety* yang mencakup :

- Tidak adanya sistem kontrol otomatis (MOV) untuk menutup *control valve*, baik disisi Terminal Lawe-Lawe maupun di sisi Tangki *Buffer* di Kilang
- Tidak adanya *flow* alarm di Terminal Lawe-Lawe, walau digambar P&ID terlihat ada.
- Tangki *Buffer* tidak dilengkapi dengan *check valve* dan *flow recorder* pada bagian *inlet*.
- Tidak adanya sistem instrumen atau sinyal yang mendeteksi pergerakan kapal di daerah berbahaya larangan lego jangkar.

3. Lack of Awareness

Pihak kapal dan/atau pihak lainnya terlambat untuk mengidentifikasi potensi bahaya yang ada di sekitar area larangan lego jangkar, sehingga bisa disebut terlambat memberikan informasi tentang gangguan terhadap pipa. Akibat dari kondisi tersebut, sumber tumpahan minyak baru bisa dipastikan setelah H+4.



Gambar 4.6 Rute Pipa Distribusi Minyak Mentah dan Posisi Kapal MV Ever Judger

Sumber: Koto and Putrawidjaja (2018)

4. *Lack of Competences*

Operator yang terlibat dalam proses operasi distribusi kurang memahami terkait tindakan pada kondisi darurat atau tidak normal.

5. *Lack of Coordination*

Koordinasi selama proses penanganan kurang berjalan dengan baik.

6. *Lack of Communication*

Komunikasi antar pihak sangat penting untuk meminimalkan tindakan yang dapat menimbulkan kerugian pada masing-masing pihak.

Diketahui pipa yang mengalami kebocoran menyalurkan minyak mentah dari SPM Terminal Lawe-Lawe menuju CDU IV yang biasa digunakan untuk mengolah minyak mentah impor. Pusat Hidrografi dan Oseanografi TNI Angkatan Laut (Pushidrosal) melakukan survei bawah laut untuk mengetahui penyebab pastinya. Survei dilakukan menggunakan *multibeam echosounder*, *side scan sonar*, dan magnetometer. Dari hasil pencitraan, diperoleh data berupa temuan satu pipa patah dan bergeser sejauh 117,34 m dan ditemukan pula bekas garukan jangkar dengan panjang garukan sejauh 498,82 meter, lebar 1,6 – 2,5 meter, dan kedalaman 0,3 – 0,7 meter. Adapun pengangkatan patahan pipa penyebab tumpahan minyak dari dasar laut seperti yang tertera pada Gambar 4.7



Gambar 4.7 Pengangkatan Patahan Pipa Pertamina dari Dasar Laut

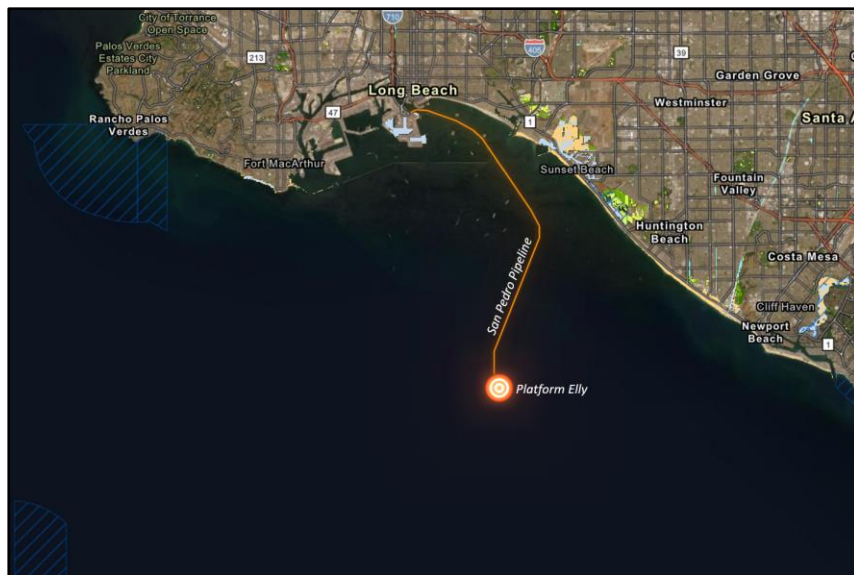
Sumber: Koto and Putrawidjaja (2018)

4.2.2 Kasus Tumpahan Minyak di *Southern California* 2021

Jum'at 1 Oktober 2021 malam hari, *National Response Center* menerima laporan terkait adanya lapisan mengkilap dari lepas pantai yang tidak diketahui asalnya. *Beta Offshore* anak perusahaan *Amplify Energy* sebagai pengelola pipa minyak di lepas pantai Huntington melaporkan bahwa pipa yang dikelolanya mengalami kebocoran dan lapisan yang mengkilap dipastikan adalah minyak mentah yang keluar dari pipa bawah laut yang bocor. Sebelum dipastikan, pihak perusahaan mendeteksi tekanan rendah atau menurun pada pipa tersebut yang menandakan terjadinya masalah pada pipa. Pihak perusahaan kemudian menghentikan penyaluran minyak mentah melalui pipa tersebut pada pukul 6 pagi waktu setempat. Kronologi tersebut sebagaimana tercantum pada dokumen *US Department of*

Transportation Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration (Mayberry, 2021).

Huntington Beach official melaporkan pada hari Minggu, 3 Oktober 2021 perkiraan tumpahan minyak mentah bervolume 3000 barel atau setara dengan 126.000 *gallons* dan perkiraan tertinggi sebesar 144.000 *gallons* atau setara dengan 545.099,3 Liter (Levenson, 2021). Namun setelah dilakukan penelitian lebih lanjut, jumlah tumpahan minyak jauh lebih sedikit dari yang diperkirakan yaitu sekitar 24.696 *gallons* (93.484,53 liter). Volume tersebut didasarkan oleh tujuh pihak yang berwenang dan terlibat meliputi *PHMSA, US Coast Guard, California Department of Fish and Wildlife, California State Lands, NOAA, State Fire Marshall, and BSEE (The USC Sea Grant Program, 2021)*. Seperti yang diketahui bahwa pipa tersebut telah digunakan sejak tahun 1980 dengan diameter 16 inch dan ketebalan 0,5 inch. Lokasi pipa yang bocor diperkirakan berjarak 5 mil (8,047 km) dari bibir pantai dengan kedalaman 98 *feet* (29,87 m). Pipa tersebut bernama *The San Pedro Bay Pipeline* yang menghubungkan *Platform Elly* (Anjungan minyak lepas pantai) menuju *Beta Pump Station* yang berada di Kota *Long Beach, California*. Pipa tersebut membentang sejauh 17 mil (27,36 km) dengan 15 mil berada di dasar laut dan 2 mil berada di daratan (Levenson, 2021). Berikut peta *Platform Elly* dan jalur pipa *San Pedro Bay* seperti pada Gambar 4.8.

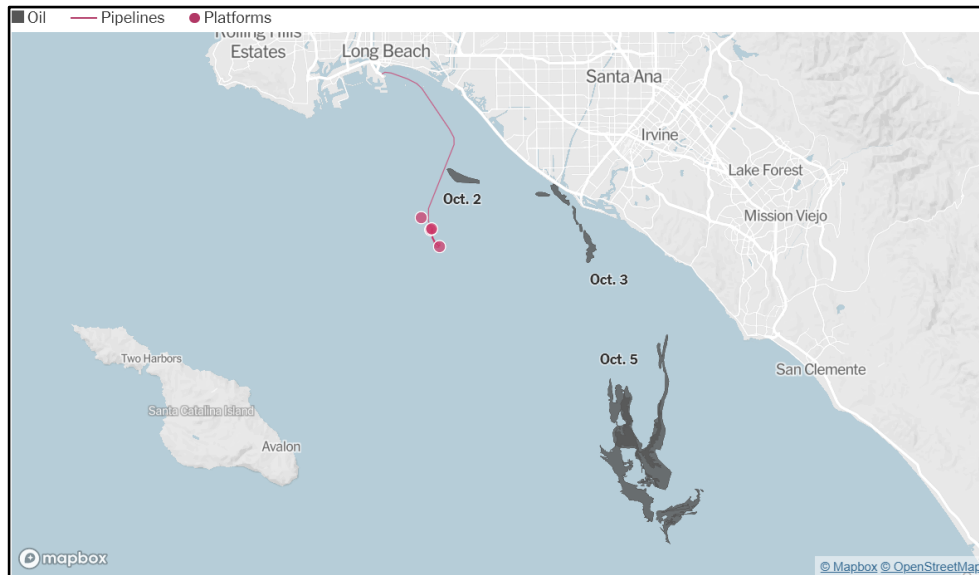


Gambar 4.8 Peta Platform Elly dan Jalur Pipa San Pedro Bay

Sumber: The USC Sea Grant Program (2021)

Tumpahan minyak tersebut berdampak wilayah laut seluas 13 *square miles* atau setara dengan 33,67 km² (NASA, 2021). Penyebab dari bocornya pipa distribusi minyak mentah tersebut masih belum bisa dipastikan hingga saat ini. Terdapat beberapa dugaan sementara diantaranya adalah terkena jangkar kapal kargo asal Jerman (*Rotterdam Ship*) yang pada waktu tersebut dekat dengan lokasi pipa yang bocor yang berjarak 600 meter (Barman, 2021). Didukung oleh data penyelam yang menyebutkan bahwa pipa tersebut telah bergeser dan pecah sejauh 32 meter (Levenson, 2021). Namun belum dapat dipastikan penyebabnya karena berdasarkan pemilik kapal, *Rotterdam Ship* tidak bergeser dari tempat awal melego jangkar didukung oleh bukti *logbook* yang dicatat tiap jamnya. Hipotesa terakhir adalah pipa tersebut memang terkena jangkar kapal namun tidak langsung menyebabkan kebocoran pipa, dan kejadian tersebut dapat berlangsung beberapa tahun sebelumnya. Lapisan minyak pada permukaan laut menyebar di area lepas pantai *Southern*

California dan pada akhirnya bergerak menjauh dari bibir pantai menuju kearah selatan. Hal ini diakibatkan oleh arus laut yang datang dari arah barat dan berbelok arah ke arah selatan secara dominan pada kurun waktu tersebut. Berikut pergerakan lapisan minyak mentah berdasarkan data *Bureau of Ocean Energy Management* dan *NOAA Marine Pollution Reports* seperti pada Gambar 4.9. Lapisan minyak divisualkan berwarna abu-abu kehitaman dan jalur pipa disimbolkan dengan garis merah muda.



Gambar 4.9 Pergerakan Lapisan Minyak di Lepas Pantai Southern California

Sumber: *Bureau of Ocean Energy Management* dan *NOAA Marine Pollution Reports* (2021)

4.3 Dampak Tumpahan Minyak

4.3.1 Dampak Tumpahan Minyak di Teluk Balikpapan

Dampak yang ditimbulkan dari peristiwa tersebut meliputi beberapa sektor seperti ekonomi, aktivitas transportasi pelabuhan, sosial masyarakat, dan yang terbesar adalah dampak terhadap lingkungan. Menurut Satya (2020), sebanyak 40.000 barel minyak mentah atau setara dengan sekitar 6.359.49 liter yang terbuang dan mencemari teluk Balikpapan. Adapun dampak yang dihasilkan seperti yang dihimpun dari Laporan Tim Penanganan KLHK, Koto dan Putrawidjaja (2018), dan Ahyadi *et al* (2021) seperti berikut:

- Luasan area terdampak akibat tumpahan minyak diperkirakan mencapai ± 7000 Ha dengan panjang pantai terdampak mencapai ± 60 km di Kota Balikpapan dan Penajam Paser Utara
- Luasan sebaran minyak mentah berdasarkan penginderaan satelit LAPAN menggunakan data Landsat 8 dan Radar Sentinel 1A tanggal 1 April 2018 mencapai 12.987,2 Hektar
- Tumpahan minyak berdampak pada ekosistem mangrove seluas ± 34 Ha di kelurahan Karingau RT 01 dan RT 02, 6000 tanaman mangrove di Kampung Atas Air Margasari, dan 2.000 bibit mangrove warga Kampung Atas Air Margasari
- Biota laut jenis *crustasea* seperti kepiting, dilaporkan mati di Pantai Banua Patra
- Timbulnya kebakaran pada Teluk Balikpapan yang menewaskan hingga 5 korban jiwa
- Masyarakat mengeluhkan mual dan pusing akibat aroma minyak yang menyengat selama beberapa hari, khususnya di area pemukiman yang terpapar tumpahan minyak mentah.

- Ditemukan lapisan minyak di perairan, tiang, dan kolong pemukiman penduduk kelurahan Margasari, Kampung Baru Hulu, dan Kelurahan Karingau RT 01 dan 02, Kecamatan Balikpapan Barat.
- Dampak lain yaitu matinya pesut mahakam, ikan, dan terumbu karang yang rusak

Berikut beberapa kondisi perairan Teluk Balikpapan akibat tumpahan minyak mentah seperti pada Gambar 4.10 yang diambil dari beberapa sumber. Gambar A menunjukkan terdapat lapisan minyak di area perumahan Pasang Surut Kampung Baru, Balikpapan. Gambar B menunjukkan visual perairan Teluk Balikpapan yang dipotret dari udara. Gambar C juga menunjukkan lapisan minyak di sekitar pantai Banua Patra, Balikpapan. Gambar D menunjukkan *speedboat* yang berlumur minyak mentah di pelabuhan Pertamina. Gambar E menunjukkan pohon mangrove yang diselimuti minyak mentah.

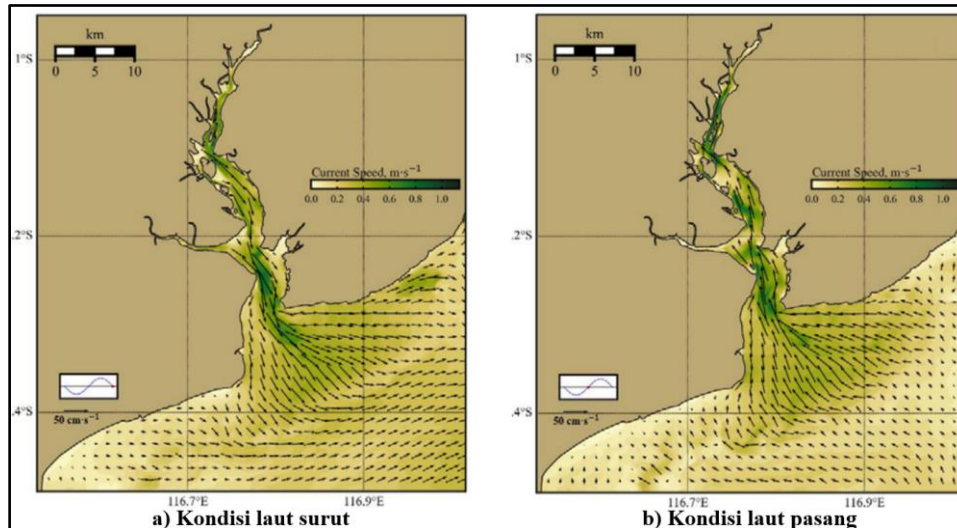


Gambar 4.10 Kondisi Pencemaran Minyak Mentah di Sekitar Teluk Balikpapan

Lapisan minyak di dermaga (a); Penginderaan udara lapisan minyak di pesisir Balikpapan (b), (c); Perahu yang berlumur minyak mentah (d); Minyak mentah pada kawasan hutan bakau (e)

Sumber: Laporan Tim Penanganan KLHK (2018), CNBC Indonesia (2018), BBC Indonesia (2018)

Luasnya area tercemar juga disebabkan oleh kebocoran minyak mentah yang tidak segera ditangani dan juga kondisi oseanografi Teluk Balikpapan yang sangat bergantung pada pasang surut air laut. Analisis tersebut didasarkan pada penelitian Nur *et al* (2020) yang menganalisis pasang surut air di Teluk Balikpapan pada tanggal 31 Maret 2018 pukul 03.00 WITA hingga 1 April pukul 03.00 WITA. Kondisi tersebut digambarkan seperti pada Gambar 4.11 pada keadaan surut dan pasang. Gambar 4.11 sebelah kiri terjadi ketika air laut sedang surut sehingga air dari darat atau hulu teluk Balikpapan mengalir ke arah Selat Makassar. Sementara pada Gambar 4.11 sebelah kanan menunjukkan kondisi air laut sedang pasang, sehingga air dari Selat Makassar masuk menuju hulu Teluk Balikpapan. Karena dua kondisi tersebut dapat terjadi dalam kurun waktu satu hari, maka sebaran minyak mentah tidak hanya mengarah ke Selat Makassar namun ke bagian hulu Teluk Balikpapan juga seperti pada Gambar 4.7. Dapat diperkirakan saat terjadinya tumpahan minyak, daerah tersebut memasuki peralihan musim hujan ke musim kemarau.

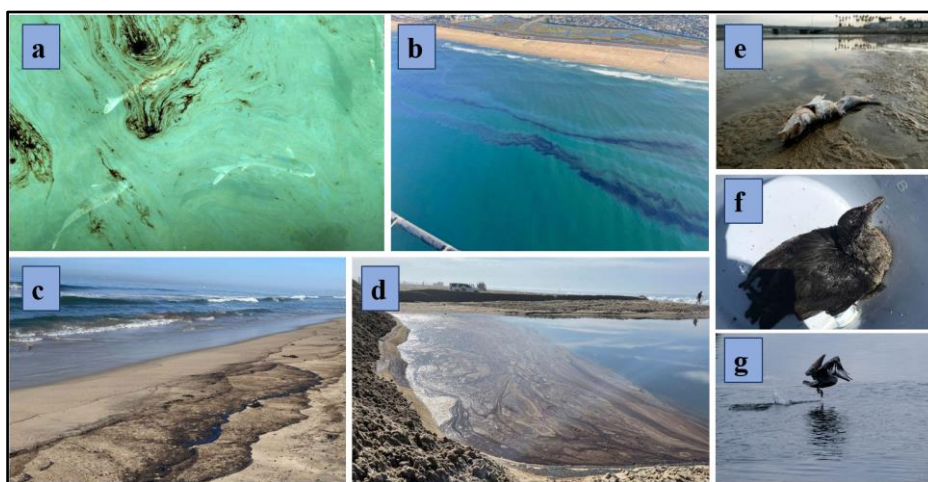


Gambar 4.11 Arah Arus Teluk Balikpapan

Sumber : Nur et al (2020)

4.3.2 Dampak Tumpahan Minyak Mentah *Southern California* 2021

Tumpahan minyak tersebut tidak membutuhkan waktu yang lama untuk berdampak pada area sekitarnya. Masyarakat sekitar yang berada di sekitar *Huntington Beach* mencium aroma menyengat yang berasal dari tumpahan minyak mentah. Sebelumnya diadakan juga *Pacific Air Show* yang dimulai dari 1 Oktober 2021, terpaksa untuk dihentikan di hari ketiga pegelarannya. Terdapat tiga area pantai yang terdampak tumpahan minyak yaitu *Huntington Beach*, *Newport Beach*, dan *Laguna Beach*. Segala aktivitas yang berada di area pantai terutama untuk wisata langsung dilarang. Pada tanggal 3 Oktober 2021, telah terlihat beberapa ikan dan burung yang telah berlumuran dengan minyak mentah (Carey, 2021). Lapisan minyak mentah pada perairan laut juga akan berdampak pada kematian *phytoplankton* yang menjadi dasar piramida makanan dan akan berdampak pada keberlangsungan rantai makanan di atasnya. Berikut beberapa kondisi terkait dampak tumpahan minyak mentah di *Southern California* 2021 seperti pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12 Dampak Tumpahan Minyak Mentah di *Southern California*

Lapisan minyak pada permukaan laut (a), (b); kawasan pesisir pantai terdampak tumpahan minyak (c), (d); Ikan laut yang mati terkena tumpahan minyak (e); Burung yang berlumuran dengan minyak mentah (f), (g).

Sumber: Levenson (2021), Jones (2021), and City of Huntington Beach (2021)

Pada Gambar 4.12 nomor 1 terlihat ikan laut yang berenang di bawah lapisan minyak. Selanjutnya terdapat lapisan minyak yang diamati dari udara seperti pada gambar nomor 2. Terlihat juga lapisan minyak yang telah sampai ke pinggir pantai. Efek dari tumpahan minyak tersebut, terdapat beberapa ikan yang mati dan burung yang berlumuran minyak mentah seperti yang divisualkan pada Gambar 4.12. Diperkirakan saat terjadinya tumpahan minyak, daerah tersebut sedang mengalami musim semi.

4.4 Penanganan Eksisting Kasus

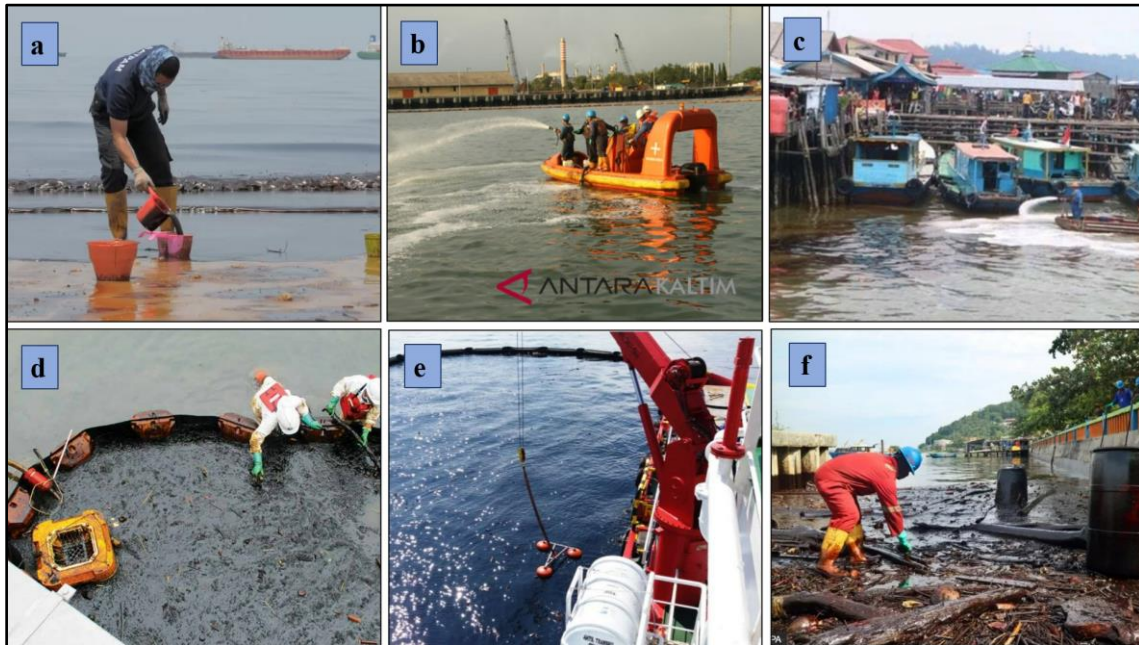
4.4.1 Penanganan Eksisting Kasus Teluk Balikpapan

Seperti yang dikutip pada laman portonews.com 2018, pernyataan Sanggam Marihot selaku Kepala Syahbandar dan Otoritas Pelabuhan (KSOP) Pelabuhan Balikpapan penanganan tumpahan minyak mentah melibatkan berbagai pihak selain PT Pertamina (Persero) seperti *Oil Spill Combat Team (OSCT) Indonesia*, *Chevron Indonesia Oil Company (CICO)*, *Balikpapan Coal Terminal (BCT)*, *Petrosea*, dan beberapa perusahaan lain. Penanganan tumpahan minyak mentah tersebut diawali sejak timbulnya lapisan minyak pada Sabtu pagi tanggal 31 Maret 2018 menggunakan *oil boom* dan dibawa ke pinggir pantai untuk disemprot dengan *dispersant*. Namun segera dihentikan ketika timbul minyak mentah dalam volume yang cukup besar dan menimbulkan kebakaran di Teluk Balikpapan.

Menurut OSCT yang dimuat dalam *International Oil Spill Conference 2020*, penanganan tumpahan minyak mentah di Teluk Balikpapan melibatkan lebih dari 1000 personel dari berbagai perusahaan dan pemerintah dan didukung oleh 60 personel OSCT. Penanganan dibagi menjadi 3-4 wilayah untuk mempermudah koordinasi dan mempercepat penanganan tumpahan minyak. Penangan tumpahan minyak tersebut menggunakan metode fisik dan kimia. Metode fisik berupa pemasangan *oil boom* untuk mengisolasi tumpahan minyak agar tidak meluas dan juga berfungsi untuk mempersempit area sebaran. Minyak yang terisolasi pada *oil boom* dilakukan proses pemisahan dari air laut menggunakan *oil skimmer*. Minyak yang terkumpul dari *oil skimmer* akan ditampung sementara kemudian dikirim ke *vacuum truck*. Dari berbagai sumber literatur tidak ditemukan proses bioremediasi pada tumpahan minyak di Teluk Balikpapan.

Penggunaan *dispersant* cukup umum digunakan pada kasus tumpahan minyak mentah di lingkungan laut terutama pada wilayah yang memiliki kriteria baku mutu lingkungan yang tidak terlalu ketat. *Dispersant* merupakan salah satu metode kimia yang digunakan untuk mengurangi tegangan permukaan antara minyak dengan air laut. Kandungan *dispersant* dapat terdiri dari berbagai senyawa surfaktan yang memiliki dua gugus yang berbeda yaitu gugus hidrofilik dan hidrofobik. Penggunaan *dispersant* dapat disemprot pada permukaan minyak menggunakan kapal laut atau pesawat terbang. *Dispersant* dapat melarutkan minyak mentah dengan waktu 10 menit hingga 1 jam sejak kotak dengan lapisan minyak (Hoang *et al.*, 2018). Keunggulan penggunaan *dispersant* adalah tidak terpengaruh oleh cuaca, kondisi laut, dan faktor lain digunakan pada lingkungan laut yang ekstrim (Yang *et al.*, 2021). Penggunaan *dispersant* dapat menghemat biaya petugas penanganan tumpahan minyak (Sayed *et al.*, 2021). Namun penggunaan *dispersant* memiliki efek toksik ketika berikatan dengan minyak dan disebutkan lebih berbahaya daripada minyak mentah itu sendiri. *Dispersant* sebenarnya tidak bertindak sebagai agen penyisih minyak mentah, melainkan agen pengubah minyak mentah agar dapat larut dalam air membentuk emulsi air dan minyak. Emulsi tersebut akan masuk pada kolom air dan akan meningkatkan paparan pada biota laut dibawah permukaan hingga di dasar laut. Penggunaan *dispersant* dianjurkan jauh dari area terumbu karang dan pesisir karena akan merusak ekosistem yang kaya akan keanekaragaman organisme bawah laut, serta untuk

memperkecil komponen minyak mentah terlarut pada kolom air (Kuzhaeva & Berlinskii, 2018). Ketika emulsi minyak dan air yang dibentuk oleh *dispersant* akan masuk dalam rantai makanan dan dikhawatirkan juga dapat terakumulasi pada ikan atau makhluk hidup lain yang biasa dikonsumsi oleh manusia. Berikut Gambar 4.13 yang berisi beberapa visual penanganan tumpahan minyak mentah di Teluk Balikpapan yang diambil dari beberapa sumber yaitu Antara News, Okezone.com, BBC Indonesia, dan Portonews.



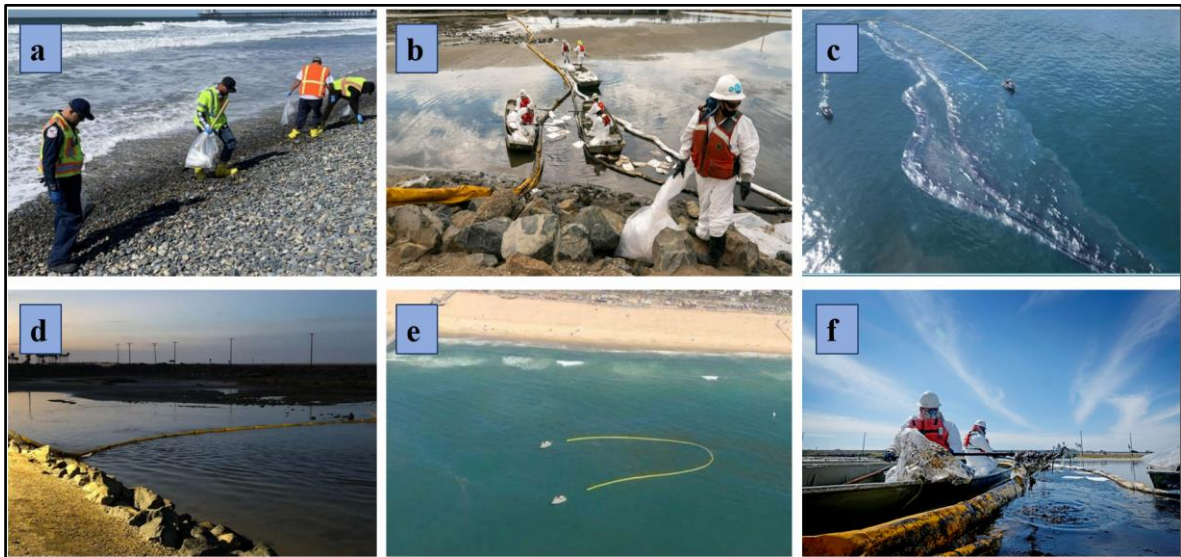
Gambar 4.13 Penanganan Tumpahan Minyak Mentah di Teluk Balikpapan

Petugas membersihkan tumpahan minyak secara manual (a), (f); Penyemprotan *oil dispersant* pada lapisan minyak (b), (c); Penggunaan *oil boom* dan *oil skimmer* (d), (e)
 Sumber: Abdi (2018), Redaksi (2018), Redaksi (2018), Sarifuddin (2018)

4.4.2 Penanganan Eksisting Kasus *Southern California*

Penanganan tumpahan minyak mentah ditandai dengan berhentinya penyaluran minyak mentah dari *Platform Elly* menuju penampung minyak di *Long Beach*. Kemudian menutup akses menuju kawasan pantai di *Southern California* untuk selanjutnya berkoordinasi dengan pihak terkait. Hari pertama kejadian, otoritas terkait memasang 2050 feet (624,84 meter) *oil boom* yang dibagi ke tujuh titik berbeda. Keesokan harinya *The US Coast Guard* mengumumkan bahwa pemasangan *oil boom* tersebut berhasil menyisihkan 3150 gallon atau setara dengan 75 barel dan menambah 5360 feet (1633,73 meter) *oil boom*. Penambahan *oil boom* terus dilakukan terutama untuk melindungi area konservasi. Pembersihan tumpahan minyak juga menggunakan 14 perahu dan 320 personel. Perahu tersebut digunakan untuk melakukan *skimming* lapisan minyak ditengah laut sebelum mencemari area pantai. Lima pesawat juga digunakan untuk membantu pencitraan area mana yang memerlukan pembersihan dari minyak mentah. Pada 5 Oktober 2021, *oil boom* tidak mampu untuk menahan lapisan minyak sehingga memasuki area konservasi *wetland*. Otoritas setempat menambahkan aerator pada area *wetland* terdampak (*The Talbert Marsh*) untuk mengatasi kekurangan oksigen organisme di dalamnya. Terdapat tambahan 4 perahu dan 430 personel yang membantu untuk membersihkan tumpahan minyak mentah. *Dispersant* tidak digunakan pada upaya pembersihan tumpahan minyak mentah di *Southern California* 2021. Pembersihan tersebut mampu untuk menyisihkan sebanyak

5544 *gallon* (20.986,323 liter) minyak mentah dan 13,6 *barrel* (2.162,23 liter) *tar balls*. Data-data tersebut diambil berdasarkan laporan dari *City of Huntington Beach* dan *The USC (University of Southern California) Sea Grant Program*. Berikut Gambar 4.14 yang berisi beberapa proses pembersihan tumpahan minyak mentah yang didapat dari berbagai sumber.



Gambar 4.14 Proses Pembersihan Tumpahan Minyak Mentah di *Southern California*
Pembersihan tumpahan minyak secara manual oleh petugas (a); Pembersihan tumpahan minyak menggunakan *oil boom* dan *oil skimmer* (c), (e), (f); Pemasangan *oil boom* pada muara sungai dan pesisir (b), (d)

Sumber: Levenson (2021), NASA (2021), City of Huntington Beach (2021), Douglas et al (2021)

4.5 Alternatif Penanganan Menggunakan Metode Bioaugmentasi dan Biostimulasi

Penanganan eksisting yang dilakukan di Teluk Balikpapan tidak mampu untuk mereduksi semua minyak mentah yang tumpah ke badan air laut. Hal ini merupakan keterbatasan metode fisik kimia yang umumnya terbatas pada penggunaan alat dan senyawa kimia yang terbatas. Mempertimbangkan luasnya area terdampak dan volume tumpahan yang cukup besar, maka memerlukan biaya dan jumlah alat yang besar pula. Metode kimiawi berupa pemberian/penyemprotan *dispersant* yang digunakan pihak terkait untuk menangani tumpahan minyak dapat berbahaya bagi lingkungan. Seperti yang dijelaskan sebelumnya minyak yang bercampur dengan *dispersant* lebih berbahaya atau lebih toksik daripada minyak itu sendiri.

Penanganan tumpahan minyak mentah *Southern California 2021* melibatkan proses fisik saja yaitu menggunakan *oil boom*, *oil skimmer*, dan pemungutan *tar balls* secara manual. Meskipun tidak menggunakan metode kimiawi, pihak terkait berhasil menyisihkan 5544 *gallon* (20.986,323 liter) minyak mentah dan 13,6 *barrel* (2.162,23 liter) *tar balls*. Namun, proses tersebut tidak mampu untuk menyisihkan minyak mentah secara tuntas. Masih tersisa sekitar 19.152 *gallon* minyak mentah di perairan *Southern California*. Minyak yang berhasil tersisihkan dari metode fisik, masih memerlukan penanganan lebih lanjut untuk diolah menjadi produk yang aman dibuang ke lingkungan. Misalnya pemungutan *tar balls* pada perairan dan tepi pantai akan dilanjutkan dengan pengolahan fisik berupa pembakaran menggunakan insinerator. Oleh karena itu, metode biologis berupa bioaugmentasi dan biostimulasi menjadi alternatif penanganan tumpahan minyak mentah *Southern California*

yang selanjutnya akan dibahas pada studi kasus ini. Sebagaimana telah dibahas sebelumnya, metode bioaugmentasi dan biostimulasi cukup efektif dan efisien dari segi biaya dan kemudahan penanganan tumpahan minyak serta tidak membutuhkan penanganan lanjutan. Metode tersebut juga lebih ramah lingkungan dan tidak bersifat toksik bagi organisme yang ada di perairan laut tersebut. Kasus tumpahan minyak mentah *Southern California 2021* ini, menghasilkan volume tumpahan yang lebih kecil daripada yang terjadi Teluk Balikpapan 2018. Tumpahan tersebut berjumlah 24.696 *gallons* (93.484,53 liter) minyak mentah.

Seperti yang diketahui bahwa metode bioaugmentasi dan biostimulasi dapat digunakan sebagai penanganan tumpahan minyak mentah di lingkungan laut. Namun, penanganan secara fisik di awal tumpahan tetap dibutuhkan seperti penggunaan *oil boom* dan *oil skimmer*. Penggunaan metode fisik tersebut berguna untuk mengurangi volume tumpahan dan mengisolasi area tumpahan agar tidak meluas. Penggunaan *oil boom* dapat membantu mengisolasi tumpahan minyak agar tidak meluas ke area yang tidak tercemar. *Oil skimmer* juga diperlukan untuk menyisahkan minyak mentah dari lingkungan laut. Untuk meningkatkan efektivitas *oil skimmer* dilakukan isolasi lapisan minyak menggunakan *oil boom*.

Dapat diketahui bahwa *oil boom* adalah salah satu alat untuk menangani tumpahan minyak berupa pembatas yang mengapung pada perairan dan terendam sebagian di bawah permukaan air. Jenis *oil boom* terdapat 3 macam yaitu *curtain boom*, *fence boom*, dan *fire resistant boom* (Hoang *et al.*, 2018). *Fence boom* merupakan jenis *oil boom* yang memiliki bagian terendam sekitar 60% dan sisanya berada diatas permukaan air. Satu penampang *fence boom* pada umumnya memiliki panjang 15 meter dan tingginya cukup beragam mulai dari 300 mm, 600 mm, dan 800 mm. Keuntungan pemakaian *fence boom* yaitu berat yang ringan, tidak memerlukan ruang penyimpanan yang besar, tahan korosi, perawatan yang mudah, dan sangat unggul pada perairan yang tenang. Sementara kekurangan penggunaan *fence boom* yaitu memiliki stabilitas yang rendah jika terjadi arus laut disertai angin kencang, serta memiliki fleksibilitas yang rendah. *Curtain boom* merupakan jenis *oil boom* yang memiliki pelampung yang mengapung di permukaan dan tidak memiliki bidang pembatas di bagian atasnya. *Curtain boom* memiliki bidang terendam yang disebut *skirt* pada bagian bawah pelampung. *Curtain boom* cukup efektif karena memiliki fleksibilitas tinggi. Namun *curtain boom* cukup sulit digunakan untuk mengumpulkan minyak, karena bidang dipermukaan *oil boom* cukup sempit. Sementara untuk jenis *oil boom* yang bersifat *fire resistant*, digunakan sebagai pembatas lapisan minyak yang akan dilakukan proses *in situ burning* atau untuk membatasi minyak mentah yang sedang terbakar. Keefektifan *oil boom* tidak hanya berdasarkan bentuknya saja, namun terdapat faktor lingkungan yang dapat berdampak pada efektivitas *oil boom*. Faktor yang dapat berdampak adalah kondisi cemaran, arah dan kecepatan angin, ketinggian ombak. Kecepatan angin yang melebihi 5,5 m/s dan ketinggian ombak lebih dari 1 meter, menyebabkan lapisan minyak dapat keluar dari *oil boom*.

Oil skimmer merupakan salah satu alat yang dapat memisahkan minyak dari air laut. Alat tersebut digunakan setelah minyak diisolasi menggunakan *oil boom* untuk mengoptimalkan kemampuannya. Efektifitas *oil skimmer* juga dipengaruhi oleh kondisi cuaca dan ketebalan lapisan minyak yang dikumpulkan pada *oil boom*. Jenis *oil skimmer* sangat beragam dan memiliki persentase penyisihan yang beragam pula. Menurut Hoang *et al* (2018), macam-macam *oil skimmer* yaitu *oleophilic skimmer*, *elevating skimmer*, *submersion skimmer*, *vortex/centrifugal skimmer*, dan *suction/vacuum skimmer*. Persentase penyisihan tertinggi dapat dicapai oleh *oil skimmer* berjenis *oleophilic* (75-95%) dan *submersion* (70-95%). Sementara untuk penyisihan terendah dicapai oleh *oil skimmer* berjenis *vortex/centrifugal*.

Berikut Tabel 4.1 yang berisi kemampuan *recovery rate* dan persentase *oil recovery* pada masing-masing jenis *oil skimmer*.

Tabel 4.1 Potensi Penyisihan Minyak Mentah Pada Masing-Masing *Oil Skimmer*

Tipe <i>oil skimmer</i>	Rentang <i>recovery rate</i> (m³/jam)	Rentang potensi penyisihan (%)
<i>Oleophilic skimmer</i>	0,2 – 50	75 – 95
<i>Weir Skimmer</i>	0,2 – 100	20 – 90
<i>Elevating Skimmer</i>	1 – 20	10 – 40
<i>Submersion Skimmer</i>	0,5 – 80	70 – 95
<i>Suction / Vacuum Skimmer</i>	0,3 – 40	3 – 90
<i>Vortex / Centrifugal Skimmer</i>	0,2 – 10	2 – 20

Penggunaan *oil skimmer* kerap kali dikombinasikan dengan *oil boom* yang ditarik dengan kapal. Penggunaan metode tersebut dilakukan pada tumpahan minyak yang terlanjur menyebar pada area yang cukup luas. *Oil skimmer* akan diletakkan di ujung belakang *oil boom* yang ujungnya ditarik menuju ke area lapisan minyak. Sehingga minyak yang terkumpul akan berada pada ujung belakang *oil boom* dan kemudian dilakukan pemisahan menggunakan *oil skimmer*. Minyak yang berhasil disisihkan dipompakan menuju bak penampung yang berada di kapal. Metode ini cukup berhasil untuk menangani tumpahan minyak karena dapat menghimpun lapisan minyak yang tersebar pada area yang cukup luas. Jenis *oil skimmer* yang digunakan pada umumnya berupa *static weir skimmer*. Penggunaan *oil boom* dan *oil skimmer* kurang efektif apabila diterapkan pada lingkungan laut yang memiliki ombak cukup besar dan arus yang cukup kuat. Secara umum semakin banyak *oil skimmer* yang digunakan, kemampuan *recovery rate* akan semakin tinggi pula. Sementara untuk persentase penyisihan bergantung pada ketebalan lapisan minyak pada permukaan laut. Adapun kombinasi *oil boom* dengan *oil skimmer* seperti pada Gambar 4.15.



Gambar 4.15 Penggunaan *oil boom* dan *oil skimmer*
 Sumber: elastec.com/one-skimmer-released (2015)

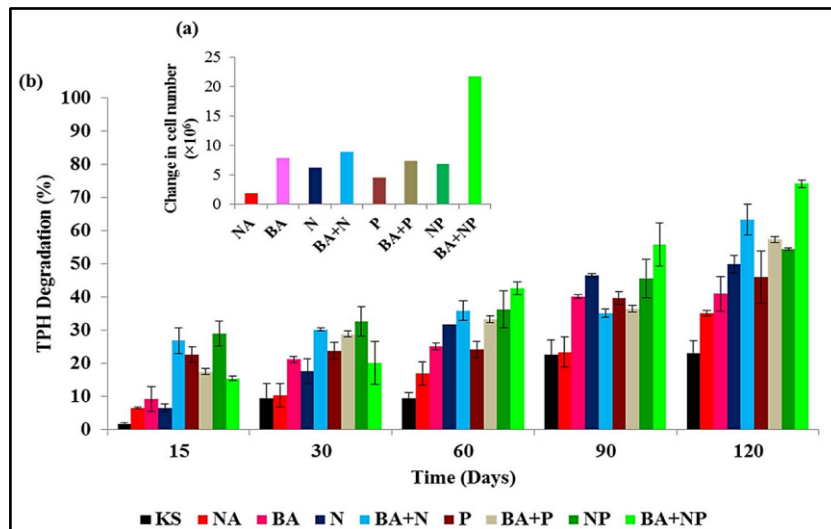
Hampir semua kasus tumpahan minyak mentah di lingkungan laut didahului oleh proses fisik yang berguna untuk menyisihkan minyak mentah agar tidak menyebabkan pencemaran yang lebih luas dan memudahkan pada proses penanganan lanjutan. Apabila tidak dilakukan pengurangan volume tumpahan minyak di awal proses, maka akan menyebabkan

membengkaknya volume nutrisi dan inokulum bakteri yang dibutuhkan yang pada akhirnya dibutuhkan biaya penanganan yang lebih besar pula. Penanganan eksisting tumpahan minyak mentah di Teluk Balikpapan dengan metode fisik berupa *oil skimmer* dan *oil boom* mampu menyisahkan minyak mentah sebesar 2.320 kilo liter atau setara 36,5% dari total volume tumpahan sebesar 6.359 kilo liter (Kemenhub, 2018). Volume penyisihan tersebut dicapai selama empat hari sejak terjadinya tumpahan minyak. Sementara pada kasus tumpahan di *Southern California* 2021 persentase penyisihan menggunakan *oil skimmer* dan *oil boom* mencapai 22,45% yang merupakan akumulasi selama tujuh hari setelah tumpahan. Oleh karena itu pada studi kasus ini, diusulkan menggunakan *oil boom* dan *oil skimmer* untuk mengurangi volume minyak di awal proses. Persentase penyisihan minyak mentah oleh *oil skimmer* diproyeksikan sebesar 30% pada kasus Teluk Balikpapan 2018, dan 20% pada kasus *Southern California* 2021. Hal ini didasarkan dari data laporan penanganan eksisting dan kriteria penyisihan *oil skimmer* seperti yang tercantum Tabel 4.10.

Tumpahan minyak mentah di lingkungan laut juga mengalami reduksi alamiah berupa evaporasi. Proses evaporasi ini disebabkan oleh suhu lingkungan laut yang menghangat akibat sinar matahari. Senyawa hidrokarbon dengan berat jenis ringan dan jenis aromatik, cenderung mengalami proses evaporasi dibanding membentuk emulsi dengan air. Evaporasi fraksi ringan dari minyak mentah, berakibat pada meningkatnya massa jenis tumpahan minyak mentah. Laju evaporasi akan meningkat signifikan sejak pertama kali terjadinya tumpahan hingga hari keempat (Reijnhart & Rose, 1982).. Evaporasi pada minyak mentah dapat menyisahkan 10-40% dari volume tumpahan, bergantung pada jenis minyak mentahnya (Sukhinov *et al.*, 2016). Percobaan terhadap beberapa jenis minyak mentah yang mewakili jenis minyak mentah ringan, *intermediate*, dan berat telah dilakukan oleh Mishra dan Kumar (2015). Hasil percobaan tersebut mendapatkan persentase penguapan *light crude oil* dapat mencapai 50% dari volume tumpahan, sementara minyak berjenis *intermediate* dan *heavy crude oil* persentase evaporasinya mencapai 25%. Percobaan tersebut dilakukan dengan rentang waktu 24 jam. Setelah evaporasi melambat, minyak mentah akan mengalami dispersi vertikal dan mulai masuk ke kolom air. Melambatnya laju evaporasi, akan mempercepat laju emulsifikasi (Sabhan, 2012). Pada fase ini *bioavailability* minyak mentah mulai meningkat dan sudah layak dilakukan penambahan bakteri. Oleh karena itu pada studi kasus ini juga memperhitungkan evaporasi sebagai salah satu aspek yang perlu diperhitungkan pada penanganan tumpahan minyak mentah. Diasumsikan persentase volume minyak yang terevaporasi sebesar 20% pada kasus Teluk Balikpapan 2018. Sementara untuk kasus *Southern California* 2021 diasumsikan sebesar 15% dari total volume tumpahan minyak.

4.5.1 Metode Biostimulasi Studi Kasus

Pada sub-bab 3.6 mengenai tahapan proses bioaugmentasi dan biostimulasi, didapatkan teori bahwa lebih optimal dilakukan proses biostimulasi dahulu sebelum dilakukan proses bioaugmentasi. Tujuannya untuk mengkondisikan area tercemar agar memiliki rasio nutrisi C:N:P yang optimal sehingga bakteri yang ditambahkan dapat langsung beradaptasi dan/atau memerlukan waktu yang relatif singkat untuk beradaptasi. Tujuan lainnya yaitu membantu menstimulasi bakteri indigen yang bersifat hidrokarbonoklastik dan/atau yang mampu untuk menghasilkan biosurfaktan. Sehingga dapat mempercepat pertumbuhannya dan mengkondisikan minyak terlebih dahulu sebelum ditambah bakteri dari luar area tercemar. Teori tersebut juga didukung oleh penelitian Roy *et al* (2018) seperti pada grafik Gambar 4.16 berikut



Gambar 4.16 Variasi Kemampuan *Removal* TPH oleh Beberapa Metode

Sumber : Roy et al (2018)

Pada awal proses hingga hari ke-15 persentase degradasi TPH menggunakan biostimulasi nitrogen dan fosfor lebih tinggi dibanding metode bioaugmentasi murni dan/atau bioaugmentasi disertai penambahan nutrisi nitrogen dan fosfor. Pada fase tersebut juga didapatkan bahwa persentase degradasi TPH metode bioaugmentasi disertai penambahan nitrogen lebih tinggi dibanding dengan metode bioaugmentasi dengan penambahan fosfor. Namun saat perlakuan telah mencapai 60 hari, didapatkan bahwa metode bioaugmentasi disertai biostimulasi (N+P) menjadi metode dengan persentase degradasi tertinggi dibanding metode lainnya. Penelitian tersebut memiliki perbedaan dari penelitian yang lain, yaitu metode bioaugmentasi yang dilakukan selalu lebih rendah dibanding metode biostimulasinya. Hal ini dapat mengindikasikan adanya kompetisi antara bakteri indigen dengan bakteri yang ditambahkan ke media, dan juga dapat mengindikasikan adanya keterbatasan nutrisi sehingga tidak mampu untuk mendegradasi secara optimal. Metode biostimulasi yang lebih efektif dapat mengindikasikan kehadiran bakteri hidrokarbonoklastik yang telah beradaptasi dengan lingkungannya sehingga dapat optimal dalam mendegradasi minyak mentah.

Penambahan nutrisi dilakukan secara bertahap bergantung pada kecepatan degradasi minyak mentah rata-rata per harinya. Faktor utama yang menentukan keberhasilan proses biostimulasi adalah ketersediaan nutrisi secara terus menerus. Hal tersebut merupakan tantangan yang didapat untuk proses biostimulasi perairan laut, karena adanya arus dan gelombang yang menyebabkan media pencemar dalam kondisi yang tidak tetap. Pada Tabel 3.11, 3.12, dan 3.16 dapat diketahui kecepatan maksimum degradasi minyak mentah sebesar 10-12% per harinya dan untuk rata-rata kecepatan degradasi berada di angka 2-5% per hari. Rata-rata waktu yang diperlukan untuk metode bioaugmentasi dan biostimulasi tumpahan minyak mentah sebesar 30-60 hari. Kondisi dilapangan dapat berbeda karena adanya faktor abiotik seperti arus laut, gelombang, angin, yang dapat menyebabkan dispersi minyak mentah dan terjadi aerasi alamiah. Sehingga minyak mentah di perairan dapat terdegradasi lebih cepat dibanding percobaan laboratorium yang memiliki volume dan subjek media yang tetap. Namun kondisi tersebut dapat memperluas daerah terdampak. Hal ini seperti yang tertera pada Gambar 4.5 dan 4.9 yang menyajikan data pencitraan pergerakan dan perluasan lapisan minyak di Teluk Balikpapan 2018 dan *Southern California* 2021. Dilaporkan ketika memasuki hari ke-7 pasca tumpahan, perairan Teluk Balikpapan dan *Southern California* mulai bersih dari lapisan minyak. Hilangnya

lapisan minyak ini bukan berarti komponen minyak mentah telah terdegradasi sepenuhnya, namun terjadi perubahan fisik kimia menjadi bentuk lain dan menyebar lebih luas sehingga konsentrasi tiap volume media menjadi lebih kecil. Oleh karena itu, lebih baik segera menangani tumpahan minyak di awal kejadian. Pada tahap awal jenis nutrisi yang digunakan yang dapat larut dalam air (*water soluble*) dan tahap berikutnya yang bersifat *slow release fertilizer* seperti yang dibahas pada sub-bab 3.5.1. Nutrien *water soluble* digunakan di tahap awal biostimulasi untuk menstimulasi pertumbuhan bakteri indigen secara cepat.

4.5.1.1 Metode Biostimulasi Studi Kasus Teluk Balikpapan 2018

Seperti yang diketahui jika volume minyak yang tumpah ke lingkungan laut Teluk Balikpapan sebesar 6.359,49 m³. Tumpahan minyak tersebut menyebar dan berdampak pada area laut seluas 7.000 Hektar setara dengan 70 juta m². Seperti yang dibahas pada sub-bab 3.6, bakteri pendegradasi mampu mendegradasi minyak dengan perbandingan volume minyak dengan area tercemar maksimal 10-15%. Ketebalan lapisan minyak pada permukaan air dengan faktor-faktor lain yang memengaruhinya dianggap tidak ada, maka dapat diasumsikan seperti pada Gambar 4.17. Oleh karena itu dilakukan pengukuran perkiraan rasio minyak mentah dengan volume perairan tercemar seperti berikut :

Diketahui : Ketebalan lapisan minyak mentah = 0,01 inch = 0,000254 m

Jumlah tumpahan = 6.359,49 m³

Dianggap lapisan minyak berinteraksi dengan air laut sedalam 0,5m

Dihitung : Volume minyak / Volume air laut

Penyelesaian :

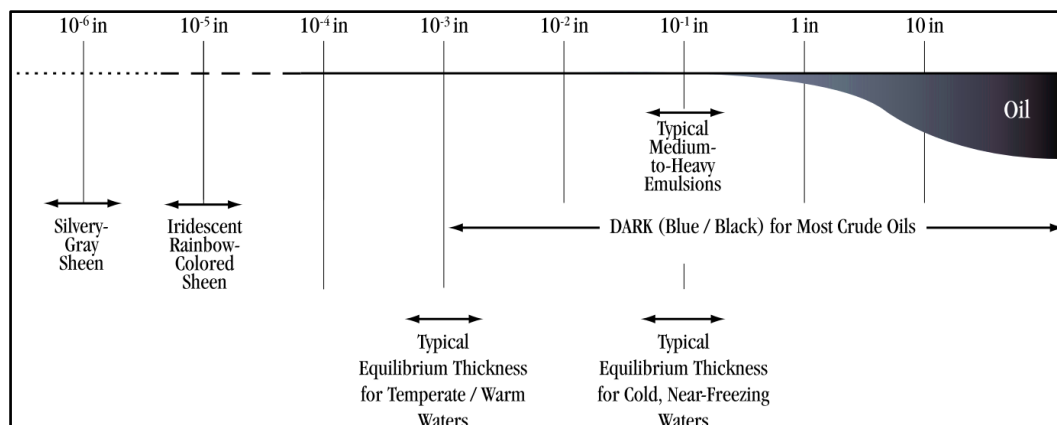
$$\begin{aligned} \text{Luas lapisan minyak} &= \text{Volume minyak} / \text{asumsi ketebalan lapisan minyak} \\ &= 6.359,49 \text{ m}^3 / 0,000254 \text{ m} \\ &= 25.037.369,28 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volume air laut} &= \text{Luas sebaran minyak} \times \text{ketebalan interaksi lapisan minyak} \\ &= 25.037.369,28 \text{ m}^2 \times 0,5 \text{ m} \\ &= 12.518.684,64 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Volume minyak} = 6.359,49 \text{ m}^3$$

$$\begin{aligned} \text{Maka volume minyak dibagi volume air laut} &= 6.359,49 \text{ m}^3 / 12.518.684,64 \text{ m}^3 \\ &= 0,051\% \end{aligned}$$

Nilai tersebut jauh dibawah batas yang diperbolehkan yang sebesar 15%. Oleh karena itu metode bioaugmentasi dan biostimulasi dapat diterapkan pada kasus tumpahan minyak Teluk Balikpapan 2018



Gambar 4.17 Proyeksi Ketebalan Lapisan Minyak Mentah di Permukaan Laut

Sumber : American Petroleum Institute (2010)

Diasumsikan pada kasus Teluk Balikpapan dilakukan penanganan fisik berupa pemasangan *oil boom* dan juga *oil skimmer* dengan kemampuan penyisihan minyak mentah sebesar 30% dari volume tumpahan. Diasumsikan pula terjadi proses evaporasi alamiah minyak mentah sebesar 20% dari volume tumpahan.

$$\begin{aligned} \text{Volume minyak yang tersisihkan oleh proses fisik} &= \% \text{ removal} \times \text{volume tumpahan minyak} \\ &= 30\% \times 6.359,49 \text{ m}^3 \\ &= 1.907,85 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volume minyak yang tersisihkan oleh proses evaporasi} &= \% \text{ removal} \times \text{volume tumpahan minyak} \\ &= 20\% \times 6.359,49 \text{ m}^3 \\ &= 1.271,9 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volume minyak tersisa} &= V \text{ tumpahan} - V \text{ proses fisik} - V \text{ terevaporasi} \\ &= 6.359,49 \text{ m}^3 - 1.907,85 \text{ m}^3 - 1.271,9 \text{ m}^3 \\ &= \mathbf{3.179,75 \text{ m}^3} \end{aligned}$$

Selanjutnya dilakukan perhitungan kebutuhan nutrisi nitrogen dan fosfor berdasarkan dari jumlah tumpahan minyak mentah. Perhitungan unsur karbon pada minyak mentah menggunakan pendekatan persentase komposisi karbon minyak mentah yang berkisar antara 83,9% - 86,9% (Wayoi, 2018). Penggunaan persentase karbon diambil yang tertinggi yaitu 86,9% untuk mengantisipasi kekurangan kebutuhan nitrogen dan fosfor. Digunakan massa jenis minyak mentah untuk menghitung massa karbon yang terkandung dalam minyak mentah sebesar 850 kg/m³ yang merupakan median massa jenis minyak mentah antara 750-950 kg/m³ (Al-Khayat et al., 2018).

Diketahui : Komposisi karbon minyak mentah = 83,9% - 86,9% (Wayoi, 2018)
 Diambil komposisi karbon yang terbesar = 86,9%
 Massa jenis air laut = 1.025 kg/m³ (Fahmi et al., 2017)
 Massa jenis minyak mentah = 750-950 kg/m³ (Al-Khayat et al., 2018)
 Diambil median massa jenis = 850 kg/m³
 Volume tumpahan = 3.179,75 m³

Dihitung : Kebutuhan Nitrogen dan Fosfor untuk proses biostimulasi

Penyelesaian :

$$\begin{aligned} \text{Massa minyak} &= \text{Massa jenis minyak} \times \text{volume minyak} \\ &= 850 \text{ kg/m}^3 \times 3.179,75 \text{ m}^3 \\ &= 2.702.784,01 \text{ kg} \end{aligned}$$

Komponen karbon minyak = 86,9%

$$\begin{aligned} \text{Massa karbon minyak} &= \text{Massa minyak} \times \% \text{komponen karbon minyak} \\ &= 2.702.784,01 \text{ kg} \times 86,9\% \\ &= 2.348.719,31 \text{ kg} \end{aligned}$$

Rasio C:N:P = 100:10:1

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan Nitrogen} &= 10\% \text{ massa karbon minyak} \\ &= 10\% \times 2.348.719,31 \text{ kg} \\ &= 234.871,93 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan Fosfor} &= 1\% \text{ massa karbon minyak} \\ &= 1\% \times 2.348.719,31 \text{ kg} \\ &= 23.487,19 \text{ kg} \end{aligned}$$

%Konsentrasi Nitrogen di minyak = 0,11% - 1,7% (Wayoi, 2018)
 = diambil konsentrasi terkecil (0,11%)

$$\begin{aligned}
\text{Massa Nitrogen di minyak} &= \% \text{ kandungan nitrogen di minyak} \times \text{massa minyak} \\
&= 0,11\% \times 2.348.719,31 \text{ kg} \\
&= 2.973,06 \text{ kg} \\
\text{Konsentrasi Fosfor di minyak} &= 3 \times 10^3 - 1 \times 10^4 \mu\text{g/L} \\
&= \text{diambil konsentrasi terkecil } (3 \times 10^3 \mu\text{g/L}) \\
&= 3 \times 10^{-6} \text{ kg/L} \\
\text{Massa Fosfor di minyak} &= \text{Konsentrasi Fosfor} \times \text{Volume minyak} \\
&= 3 \times 10^{-6} \text{ kg/L} \times 3.179.745,9 \text{ L} \\
&= 9,54 \text{ kg} \\
\text{Kebutuhan akhir Nitrogen} &= \text{Kebutuhan Nitrogen} - \text{Kandungan Nitrogen di minyak} \\
&= 234.871,93 \text{ kg} - 2.973,06 \text{ kg} \\
&= 231.898,87 \text{ kg} \\
\text{Kebutuhan akhir Fosfor} &= \text{Kebutuhan Fosfor} - \text{Kandungan Fosfor di minyak} \\
&= 23.487,19 \text{ kg} - 9,54 \text{ kg} \\
&= 23.477,65 \text{ kg}
\end{aligned}$$

Pada studi kasus ini dipilih sumber nutrisi nitrogen yang berasal dari Pupuk Urea Petro non-subsidi produksi PT Petrokimia Gresik yang memiliki kadar nitrogen minimal sebesar 46%. Urea senyawa kimia dengan rumus molekul $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ dan memiliki berat molekul 60 gram/mol. Sebutan lain untuk urea adalah *carbamide*, *carbamide resin*, *isourea*, *carbonyl diamide*, dan *carbonyldiamine*. Pupuk urea digunakan karena selain kandungan nitrogen yang tinggi, juga sangat mudah larut dalam air dan memiliki harga yang cukup murah. Sementara untuk sumber nutrisi Fosfor bersumber dari pupuk *superphosphate* yang diproduksi oleh PT Petrokimia Gresik dengan merek dagang Pupuk SP-36. Pupuk tersebut, mengandung kadar *phosphate* (P_2O_5) minimal sebesar 36%, namun kandungan *phosphate* yang dapat larut dalam air minimal 30%. Karakteristik pupuk urea dan *superphosphate* didasarkan dari brosur produk yang diterbitkan oleh PT Petrokimia Gresik. Penggunaan jenis pupuk *water soluble* diproyeksikan untuk mendegradasi minyak mentah sebesar 70%.

Persentase 70% ini didasarkan dari jumlah senyawa minyak mentah yang dapat didegradasi dengan cepat di awal tumpahan minyak mentah oleh bakteri. Penggunaan pupuk berjenis *water soluble* berguna untuk menyediakan nutrisi secara instan pada biodegradasi tersebut. Kecepatan rata-rata degradasi minyak mentah pada uji laboratorium sebesar 2-5%. Pupuk tersebut akan di paparkan pada perairan selama beberapa hari untuk memenuhi ketersediaan nutrisi sekitar 2-5% per hari dari total kebutuhan nutrisi. 30% sisanya akan menggunakan pupuk berjenis *slow release fertilizer*. Berikut perhitungan kebutuhan pupuk berjenis *water soluble*.

Kebutuhan Produk Pupuk Urea Petro :

Diketahui :

Rumus senyawa urea	= $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$
Massa atom relatif nitrogen	= 14 g/mol
Massa atom relatif karbon	= 12 g/mol
Massa atom relatif oksigen	= 16 g/mol
Massa atom relatif hidrogen	= 1 g/mol
Massa molekul relatif urea	= 60 g/mol
Kandungan unsur nitrogen	= 46%
Kebutuhan nitrogen	= 231.898,87 kg

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan nitrogen 70\%} &= \text{Kebutuhan nitrogen} \times 70\% \\ &= 162.329,21 \text{ kg} \end{aligned}$$

Penyelesaian :

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan pupuk urea} &= \text{Kebutuhan nitrogen} / \text{Kandungan nitrogen pada pupuk} \\ &= 162.329,21 \text{ kg} / 46\% \\ &= 352.889,58 \text{ kg} \\ \text{Kapasitas 1 karung pupuk} &= 50 \text{ kg} \\ \text{Total karung pupuk urea} &= \text{Kebutuhan pupuk urea} / \text{kapasitas 1 karung pupuk} \\ &= 352.889,58 \text{ kg} / 50 \text{ kg} \\ &= 7.058 \text{ karung urea} \end{aligned}$$

Kebutuhan Produk Pupuk SP-36 :

Diketahui :

$$\begin{aligned} \text{P}_2\text{O}_5 \text{ tersedia} &= 36\% \\ \text{P}_2\text{O}_5 \text{ yang larut dalam air} &= 30\% \\ \text{Massa atom relatif Fosfor} &= 31 \text{ g/mol} \\ \text{Massa atom relatif oksigen} &= 16 \text{ g/mol} \\ \text{Massa molekul relatif P}_2\text{O}_5 &= 142 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

Penyelesaian :

$$\begin{aligned} \text{Unsur P pada P}_2\text{O}_5 &= (2 \times \text{Ar P}) / (\text{Mr P}_2\text{O}_5) \\ &= (62 \text{ g/mol}) / (142 \text{ g/mol}) \\ &= 43,7\% \\ \text{Kebutuhan unsur P} &= 23.488,65 \text{ kg} \\ \text{Kebutuhan 70\% unsur P} &= \text{Kebutuhan P} \times 70\% \\ &= 16.434,36 \text{ kg} \\ \text{1 Karung pupuk SP-36} &= 50 \text{ kg} \\ \text{P}_2\text{O}_5 \text{ pada 1 karung pupuk SP-36} &= \text{Kapasitas 1 karung} \times \text{P}_2\text{O}_5 \text{ yang dapat larut} \\ &= 50 \text{ kg} \times 30\% \\ &= 15 \text{ kg} \\ \text{P pada P}_2\text{O}_5 &= \text{P}_2\text{O}_5 \text{ pada 1 karung pupuk} \times \text{unsur P pada P}_2\text{O}_5 \\ &= 15 \text{ kg} \times 43,7\% \\ &= 6,55 \text{ kg} \\ \text{Kebutuhan pupuk SP-36 (50kg)} &= \text{Kebutuhan 70\% unsur P} / \text{P pada P}_2\text{O}_5 \\ &= 16.434,36 \text{ kg} / 6,55 \text{ kg} \\ &= 3.585 \text{ karung} \end{aligned}$$

Pupuk *slow release fertilizer* (SRF) selanjutnya akan diaplikasikan pada proses biostimulasi. Pupuk SRF merupakan jenis pupuk majemuk yang terdiri dari komponen utama Nitrogen, Fosfor, dan Kalium, serta komponen *micronutrient* berupa kalsium (Ca), Magnesium (Mg), Besi (Fe), Mangan (Mn), Zinc (Zn), Tembaga (Cu), dan Molibdenum (Mo). Pelepasan nutrisi pada SRF terjadi secara bertahap karena pada lapisan luarnya diselubungi oleh senyawa *polymer-coated* berupa *thermoset resins* atau *thermoplastic resins*. Selubung pembungkus juga berfungsi untuk mengontrol jumlah nutrisi yang terlepas agar tetap konstan dan tidak berlebihan. Terdapat dua jenis pupuk SRF berdasarkan jangka waktu pelepasannya yaitu *short term* (3-4 bulan) dan *long term* (9-14 bulan) dengan aplikasi pada tanah. Aplikasi pada air murni mendapatkan pelepasan nutrisi 1,2 hingga 1,5 lebih cepat sekitar dibanding aplikasi pada tanah (Adams *et al.*, 2013). Puncak pelepasan nutrisi SRF pada tanah pada hari ke-20 hingga ke-40. Mekanisme pelepasan nutrisi pada SRF dimulai dari adanya interaksi dengan air yang

memasuki ruang ruang yang terbentuk pada selubung pembungkus yang awalnya berisi udara. Diketahui sifat pupuk SRF sebelum diaplikasikan yaitu dalam kondisi terhidrasi sehingga mudah menyerap air. Lintasan air pada selubung pembungkus tersebut menjadi jalur pelepasan nutrisi ke lingkungan. Laju pelepasan nutrisi akan meningkat seiring dengan peningkatan suhu lingkungan. Pupuk SRF dapat bekerja secara optimal dibawah permukaan air laut dibanding pada permukaan laut (Santas *et al.*, 1999). Oleh karena itu penerapan SRF pada metode biostimulasi digunakan setelah proses biostimulasi menggunakan pupuk *water soluble*. Studi kasus ini akan menggunakan pupuk SRF untuk mendegradasi sisa minyak mentah sebesar 30%. SRF apabila diterapkan di perairan laut akan lebih cepat melepaskan nutrisinya dibanding penerapan di tanah. Hal ini disebabkan oleh adanya pencampuran dengan air sebelum dipaparkan pada objek sasaran. Diproyeksikan pelepasan nutrisi akan mencapai fase tertinggi pada hari ke-10 hingga hari ke-20 pasca paparan. Perkiraan tersebut didasarkan oleh penelitian yang menyebutkan jika pelepasan nutrisi SRF pada perairan mencapai fase pelepasan maksimum lebih cepat 1,2 hingga 1,5 kali dari penerapan di tanah. Selain itu, pencampuran dengan air dan kinetika perairan juga mempercepat pelepasan nutrisi ke lingkungan. Studi kasus ini akan menggunakan pupuk Osmocote dengan kandungan N:P:K adalah 18:11:10 yang terdiri dari 7,5% NO₃-N, 10,5% NH₃-N, 11% P₂O₅, 10% K₂O, dan *resin coating* (Xu and Obbard, 2003).

Diketahui : Pupuk Osmocote 18-11-10 (Majemuk)

N pupuk = 18%

P pupuk = 11%

Dihitung : Kebutuhan pupuk Osmocote untuk menstimulasi 30% sisa minyak

Penyelesaian :

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan 30\% N} &= \text{Kebutuhan N total} - \text{Pemenuhan N pupuk } \textit{water soluble} \\ &= 231.898,87 \text{ kg} - 162.329,21 \text{ kg} \\ &= 69.559,661 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan 30\% P} &= \text{Kebutuhan P total} - \text{Pemenuhan P pupuk } \textit{water soluble} \\ &= 23.477,654 \text{ kg} - 16.434,358 \text{ kg} \\ &= 7.043,296 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\text{Kapasitas 1 karung pupuk Osmocote} = 22,68 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned} \text{Jumlah N pada 1 karung pupuk} &= \text{N pupuk} \times \text{kapasitas 1 karung} \\ &= 18\% \times 22,68 \text{ kg} \\ &= 4,0824 \text{ kg/karung} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Jumlah P pada 1 karung pupuk} &= \text{P pupuk} \times \text{kapasitas 1 karung} \\ &= 11\% \times 22,68 \text{ kg} \\ &= 2,4948 \text{ kg/karung} \end{aligned}$$

Menurut beberapa sumber, proses biostimulasi menggunakan pupuk *Osmocote* tidak diperlukan penambahan nutrisi untuk menyesuaikan rasio nutrisi bakteri. studi kasus ini lebih mengutamakan pemenuhan fosfor dibanding nitrogen. Apabila kebutuhan pupuk *Osmocote* didasarkan dari kebutuhan nitrogen maka akan mendapati kelebihan fosfor yang pada lingkungan yang berpotensi menyebabkan eutrofikasi perairan. Beberapa penelitian telah membuktikan jika pupuk *Osmocote* dapat secara efektif mendukung proses biodegradasi meskipun rasio nutrisi tidak berada dalam rasio yang optimum.

$$\begin{aligned}
\text{Jumlah pupuk Osmocote yang dibutuhkan} &= (\text{Kebutuhan } 30\% \text{ P}) / (\text{Jumlah P} / \text{karung}) \\
&= 7.043,3 \text{ kg} / (2,4948 \text{ kg/karung}) \\
&= 2.824 \text{ karung} \\
\text{Jumlah N tersedia pupuk Osmocote} &= (\text{Jumlah karung yang dibutuhkan} \times \text{kapasitas } 1 \\
&\quad \text{karung}) \times (\% \text{N pupuk}) \\
&= (2.824 \text{ karung} \times 22,68 \text{ kg/karung}) \times 18\% \\
&= 11.528,7 \text{ kg}
\end{aligned}$$

4.5.1.2 Metode Biostimulasi Studi Kasus *Southern California* 2021

Pada saat terjadi tumpahan minyak, kondisi perairan laut mengalami ketidakseimbangan konsentrasi komponen-komponen penyusun ekosistem laut terutama kandungan unsur karbon. Untuk mendegradasi minyak mentah, bakteri memerlukan unsur-unsur yang cukup dan sesuai dengan kebutuhannya, khususnya rasio C:N:P. Oleh karena itu, diperlukan perhitungan kebutuhan jumlah nitrogen dan fosfor perairan agar bakteri indigen mampu mengkondisikan lingkungannya terlebih dahulu sebelum ditambah bakteri eksogen. Pemenuhan unsur nitrogen dan fosfor juga ditujukan agar saat dilakukan proses bioaugmentasi, kondisi perairan tercemar telah memiliki rasio C:N:P yang optimal. Kondisi tersebut sangat menguntungkan untuk mempercepat adaptasi dan pertumbuhan bakteri yang ditambahkan. Seperti yang dibahas pada sub-bab 3.6, bakteri pendegradasi mampu mendegradasi minyak dengan perbandingan volume minyak dengan area tercemar maksimal 10-15%. Ketebalan lapisan minyak pada permukaan air dengan faktor-faktor lain yang memengaruhinya dianggap tidak ada, maka dapat diasumsikan seperti pada Gambar 4.17. Oleh karena itu dilakukan pengukuran perkiraan rasio minyak mentah dengan volume perairan tercemar seperti berikut:

$$\begin{aligned}
\text{Diketahui : Ketebalan lapisan minyak mentah} &= 0,01 \text{ inch} = 0,000254 \text{ m} \\
\text{Jumlah tumpahan} &= 93,48 \text{ m}^3 \\
\text{Dianggap lapisan minyak berinteraksi dengan air laut sedalam } &0,5 \text{ m} \\
\text{Dihitung : Volume minyak / Volume air laut} & \\
\text{Penyelesaian :} & \\
\text{Luas lapisan minyak} &= \text{Volume minyak} / \text{asumsi ketebalan lapisan minyak} \\
&= 93,48 \text{ m}^3 / 0,000254 \text{ m} \\
&= 368.049 \text{ m}^2 \\
\text{Volume air laut} &= \text{Luas sebaran minyak} \times \text{ketebalan interaksi lapisan minyak} \\
&= 368.049 \text{ m}^2 \times 1 \text{ m} \\
&= 368.049 \text{ m}^3 \\
\text{Volume minyak} &= 93,48 \text{ m}^3 \\
\text{Maka volume minyak dibagi volume air laut} &= 93,48 \text{ m}^3 / 368.049 \text{ m}^3 \\
&= \mathbf{0,025\%}
\end{aligned}$$

Ketebalan interaksi lapisan minyak pada permukaan laut diasumsikan sebesar 100 cm karena perairan *Southern California* memiliki arus dan ombak yang cukup besar. Rasio dari volume minyak dibanding dengan volume air laut masih jauh dibawah batas yang diperbolehkan. Oleh karena itu metode bioaugmentasi dan biostimulasi dapat diterapkan pada kasus tumpahan minyak *Southern California* 2021. Sebelum proses bioremediasi, diproyeksikan dilakukan penanganan fisik untuk mengurangi volume tumpahan minyak. Diasumsikan pada kasus *Southern California* dilakukan penanganan fisik berupa pemasangan *oil boom* dan juga *oil skimmer* dengan kemampuan penyisihan minyak mentah sebesar 20% dari volume tumpahan. Diasumsikan pula terjadi proses

evaporasi alamiah minyak mentah sebesar 15% dari volume tumpahan, mengingat kondisi suhu permukaan laut subtropis lebih rendah dibanding laut tropis.

$$\begin{aligned} \text{Volume minyak yang tersisihkan oleh pengolahan fisik (oil skimmer)} \\ &= \% \text{removal} \times \text{volume tumpahan minyak} \\ &= 20\% \times 93,48 \text{ m}^3 \\ &= 18,7 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volume minyak yang tersisihkan oleh proses evaporasi} \\ &= \% \text{removal} \times \text{volume tumpahan minyak} \\ &= 15\% \times 93,48 \text{ m}^3 \\ &= 14,02 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volume minyak tersisa} \\ &= V \text{ tumpahan} - V \text{ penanganan fisik} - V \text{ evaporasi} \\ &= 93,48 \text{ m}^3 - 18,7 \text{ m}^3 - 14,02 \text{ m}^3 \\ &= \mathbf{60,77 \text{ m}^3} \end{aligned}$$

Selanjutnya dilakukan perhitungan kebutuhan nutrisi nitrogen dan fosfor berdasarkan dari jumlah tumpahan minyak mentah. Perhitungan unsur karbon pada minyak mentah menggunakan pendekatan persentase komposisi karbon minyak mentah yang berkisar antara 83,9% - 86,9% (Wayoi, 2018). Penggunaan persentase karbon diambil yang tertinggi yaitu 86,9% untuk mengantisipasi kekurangan kebutuhan nitrogen dan fosfor. Dan digunakan massa jenis minyak mentah untuk menghitung massa karbon yang terkandung dalam minyak mentah sebesar 850 kg/m³ yang merupakan median massa jenis minyak mentah antara 750-950 kg/m³ (Al-Khayat *et al.*, 2018)

Diketahui : Komposisi karbon minyak mentah = 83,9% - 86,9% (Wayoi, 2018)
 Diambil komposisi karbon yang terbesar = 86,9%
 Massa jenis air laut = 1.025 kg/m³ (Fahmi *et al.*, 2017)
 Massa jenis minyak mentah = 750-950 kg/m³ (Al-Khayat *et al.*, 2018)
 Diambil median massa jenis = 850 kg/m³
 Jumlah tumpahan tersisa = 60,77 m³

Dihitung : Kebutuhan Nitrogen dan Fosfor untuk proses biostimulasi
 Penyelesaian :

$$\begin{aligned} \text{Massa minyak} &= \text{Massa jenis minyak} \times \text{volume minyak} \\ &= 850 \text{ kg/m}^3 \times 60,77 \text{ m}^3 \\ &= 51.650,2 \text{ kg} \end{aligned}$$

Komponen karbon minyak = 86,9%

$$\begin{aligned} \text{Massa karbon minyak} &= \text{Massa minyak} \times \% \text{komponen karbon minyak} \\ &= 51.650,2 \text{ kg} \times 86,9\% \\ &= 44.884,03 \text{ kg} \end{aligned}$$

Rasio C:N:P = 100:10:1

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan Nitrogen} &= 10\% \text{ massa karbon minyak} \\ &= 10\% \times 44.884,03 \text{ kg} \\ &= 4.488,4 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan Fosfor} &= 1\% \text{ massa karbon minyak} \\ &= 1\% \times 44.884,03 \text{ kg} \\ &= 448,84 \text{ kg} \end{aligned}$$

% Konsentrasi Nitrogen di minyak = 0,11% - 1,7% (Wayoi, 2018)
 = diambil konsentrasi terkecil (0,11%)

$$\begin{aligned}
\text{Massa Nitrogen di minyak} &= \% \text{ kandungan nitrogen di minyak} \times \text{massa minyak} \\
&= 0,11\% \times 51.650,2 \text{ kg} \\
&= 56,82 \text{ kg} \\
\text{Konsentrasi Fosfor di minyak} &= 3 \times 10^3 - 1 \times 10^4 \mu\text{g/L} \\
&= \text{diambil konsentrasi terkecil } (3 \times 10^3 \mu\text{g/L}) \\
&= 3 \times 10^{-6} \text{ kg/L} \\
\text{Massa Fosfor di minyak} &= \text{Konsentrasi Fosfor} \times \text{Volume minyak} \\
&= 3 \times 10^{-6} \text{ kg/L} \times 60.765 \text{ L} \\
&= 0,18 \text{ kg} \\
\text{Kebutuhan akhir Nitrogen} &= \text{Kebutuhan Nitrogen} - \text{Kandungan Nitrogen di minyak} \\
&= 4.488,4 \text{ kg} - 56,82 \text{ kg} \\
&= 4.431,59 \text{ kg} \\
\text{Kebutuhan akhir Fosfor} &= \text{Kebutuhan Fosfor} - \text{Kandungan Fosfor di minyak} \\
&= 448,84 \text{ kg} - 0,18 \text{ kg} \\
&= 448,66 \text{ kg}
\end{aligned}$$

Pada studi kasus ini dipilih sumber nutrisi nitrogen yang berasal dari Pupuk “Urea 46-0-0” produksi The Andersons Inc. yang memiliki kadar nitrogen sebesar 46%. Urea merupakan senyawa kimia dengan rumus molekul $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ dan memiliki berat molekul 60 gram/mol. Sebutan lain untuk urea adalah *carbamide*, *carbamide resin*, *isourea*, *carbonyl diamide*, dan *carbonyldiamine*. Pupuk urea digunakan karena selain kandungan nitrogen yang tinggi, juga sangat mudah larut dalam air dan memiliki harga yang cukup murah. Sementara untuk sumber nutrisi Fosfor bersumber dari pupuk *Mono Ammonium Phosphate* yang diproduksi oleh Haifa Negev Technologies LTD dengan merek dagang Haifa MAP 12-61-0. Pupuk tersebut, mengandung kadar *phosphate* (P_2O_5) sebesar 61% dan kandungan NH_4 sebesar 12%. Berdasarkan keterangan pada produk, pupuk tersebut dapat larut dalam air secara keseluruhan.

Kebutuhan Produk Pupuk Haifa MAP :

Diketahui :

$$\begin{aligned}
\text{P}_2\text{O}_5 \text{ tersedia} &= 61\% \\
\text{Massa atom relatif Fosfor} &= 31 \text{ g/mol} \\
\text{Massa atom relatif oksigen} &= 16 \text{ g/mol} \\
\text{Massa molekul relatif P}_2\text{O}_5 &= 142 \text{ g/mol}
\end{aligned}$$

Penyelesaian :

$$\begin{aligned}
\text{Unsur P pada P}_2\text{O}_5 &= (2 \times \text{Ar P}) / (\text{Mr P}_2\text{O}_5) \\
&= (62\text{g/mol}) / (142\text{g/mol}) \\
&= 43,7\% \\
\text{Kebutuhan unsur P} &= 448,66 \text{ kg} \\
\text{Kebutuhan 70\% unsur P} &= \text{Kebutuhan P} \times 70\% \\
&= 314,06 \text{ kg} \\
\text{1 Karung pupuk Haifa MAP} &= 50 \text{ Lb} = 22,68 \text{ kg} \\
\text{P}_2\text{O}_5 \text{ pada 1 karung pupuk Haifa MAP} &= \text{Kapasitas 1 karung pupuk} \times \text{P}_2\text{O}_5 \text{ yang dapat} \\
&\quad \text{larut} \\
&= 22,68 \text{ kg} \times 61\% \\
&= 13,84 \text{ kg} \\
\text{P pada P}_2\text{O}_5 &= \text{P}_2\text{O}_5 \text{ pada 1 karung pupuk} \times \text{unsur P pada P}_2\text{O}_5 \\
&= 13,84 \text{ kg} \times 43,7\% \\
&= 6,04 \text{ kg per karung}
\end{aligned}$$

Kebutuhan pupuk Haifa MAP = Kebutuhan 70% unsur P / P pada P_2O_5
= 314,06 kg / (6,04 kg/karung)
= 52 karung
= 1.179,4 kg pupuk

Kandungan NH_4 Haifa MAP = 12%
Massa atom relatif nitrogen = 14 g/mol
Massa atom relatif hidrogen = 1 g/mol
Massa molekul relatif NH_4 = 18 g/mol
Jumlah Produk Haifa MAP = 52 karung
Jumlah pupuk = 52 karung x kapasitas per karung
= 52 x 22,68 kg
= 1.179,36 kg

NH_4 tersedia = Jumlah pupuk x kandungan NH_4 pupuk
= 1.179,36 x 12%
= 141,52 kg

N dalam NH_4 = Ar N / Mr NH_4
= (14 g/mol) / (18 g/mol)
= 78%

N pada pupuk Haifa MAP total = NH_4 tersedia / N dalam NH_4
= 110,07 kg

Kebutuhan Produk Pupuk Urea 46-0-0 (The Anderson Urea Fertilizer) :

Diketahui :

Rumus senyawa urea = $CO(NH_2)_2$
Massa atom relatif nitrogen = 14 g/mol
Massa atom relatif karbon = 12 g/mol
Massa atom relatif oksigen = 16 g/mol
Massa atom relatif hidrogen = 1 g/mol
Massa molekul relatif urea = 60 g/mol
Kandungan unsur nitrogen = 46%

Penyelesaian :

Kebutuhan nitrogen = 4.431,59 kg
Kebutuhan 70% nitrogen = Kebutuhan nitrogen x 70%
= 3.102,11 kg

N pupuk Haifa MAP = 110,07 kg
Kebutuhan N pupuk Urea 46-0-0 = Kebutuhan 70% nitrogen – N pupuk Haifa MAP
= 3.102,11 kg – 110,07 kg
= 2.992,04 kg

Kebutuhan pupuk Urea 46-0-0 = Kebutuhan nitrogen / Kandungan nitrogen pada pupuk
= 2.992,04 kg / 46%
= 6.505 kg

Kapasitas 1 karung pupuk = 22,68 kg
Total karung pupuk urea = Kebutuhan pupuk urea / kapasitas 1 karung pupuk
= 6.505 kg / 22,68 kg
= 287 karung urea

Pupuk *slow release fertilizer* (SRF) selanjutnya akan diaplikasikan pada proses biostimulasi. Pupuk SRF merupakan jenis pupuk majemuk yang terdiri dari komponen

utama Nitrogen, Fosfor, dan Kalium, serta komponen *micronutrient* berupa kalsium (Ca), Magnesium (Mg), Besi (Fe), Mangan (Mn), *Zinc* (Zn), Tembaga (Cu), dan Molibdenum (Mo) Diproyeksikan pelepasan nutrisi akan mencapai fase tertinggi pada hari ke-10 hingga hari ke-24 pasca paparan. Perkiraan tersebut didasarkan oleh penelitian yang menyebutkan jika pelepasan nutrisi SRF pada perairan mencapai fase pelepasan maksimum lebih cepat 1,2 hingga 1,5 kali dari penerapan di tanah. Studi kasus ini akan menggunakan pupuk Osmocote dengan kandungan N:P:K adalah 18:11:10 yang terdiri dari 7,5% NO₃-N, 10,5% NH₃-N, 11% P₂O₅, 10% K₂O, dan *resin coating* (Xu & Obbard, 2003).

Diketahui : Pupuk Osmocote 18-11-10 (Majemuk)

N pupuk = 18%

P pupuk = 11%

Dihitung : Kebutuhan pupuk Osmocote untuk menstimulasi 30% sisa minyak

Penyelesaian :

Kebutuhan 30% N = Kebutuhan N total – Pemenuhan N pupuk *water soluble*
 = 4.431,59 kg – 3.102,11 kg
 = 1.329,48 kg

Kebutuhan 30% P = Kebutuhan P total – Pemenuhan P pupuk *water soluble*
 = 448,66 kg – 314,06 kg
 = 134,6 kg

Kapasitas 1 karung pupuk Osmocote = 22,68 kg

Jumlah N pada 1 karung pupuk = N pupuk x kapasitas 1 karung
 = 18% x 22,68 kg
 = 4,08 kg/karung

Jumlah P pada 1 karung pupuk = P pupuk x kapasitas 1 karung
 = 11% x 22,68 kg
 = 2,4948 kg/karung

Menurut beberapa sumber, proses biostimulasi menggunakan pupuk Gramafix tidak diperlukan penambahan nutrisi untuk menyesuaikan rasio nutrisi bakteri. studi kasus ini lebih mengutamakan pemenuhan fosfor dibanding nitrogen. Apabila kebutuhan pupuk Osmocote didasarkan dari kebutuhan nitrogen maka akan mendapati kelebihan fosfor yang pada lingkungan yang berpotensi menyebabkan eutrofikasi perairan. Beberapa penelitian telah membuktikan jika pupuk Osmocote dapat secara efektif mendukung proses biodegradasi meskipun rasio nutrisi tidak berada dalam rasio yang optimum.

Jumlah pupuk Osmocote yang dibutuhkan = (Kebutuhan 30% P) / (Jumlah P / karung)
 = 134,6 kg / (2,4948 kg/karung)
 = 54 karung

Jumlah N tersedia pupuk Osmocot = (Jumlah karung yang dibutuhkan x kapasitas 1 karung) x (%N pupuk)
 = (54 karung x 22,68kg/karung) x 18%
 = 220,45 kg

4.5.1.3 Solusi dari kelemahan proses biostimulasi

Biostimulasi tumpahan minyak mentah di lingkungan laut, menurut penelitian dan implementasi terdahulu dapat mencapai hasil biodegradasi yang cukup memuaskan. Dibalik keberhasilan tersebut, terdapat beberapa hal penting yang perlu dipertimbangkan.

Metode biostimulasi di perairan laut memiliki beberapa kelemahan seperti rasio C:N:P yang tidak optimum akibat adanya *washout*, dapat menimbulkan *alga bloom* atau eutrofikasi, dan pencemaran nutrisi pada wilayah yang tidak terdampak tumpahan minyak mentah akibat terbawa arus laut.

Untuk mengatasi rasio C:N:P yang tidak optimum, hendaknya dilakukan pemantauan atau *monitoring* secara berkala pada area target bioremediasi. Dari proses pemantauan akan diketahui apakah rasio C:N:P sudah optimum atau tidak. Rasio C:N:P harus mengetahui rentang kemampuan degradasi minyak mentah oleh bakteri. Pada telaah pustaka diketahui bahwa rentang degradasi minyak mentah oleh bakteri sebesar 2% hingga 5% per harinya. Oleh karena itu penambahan nutrisi hendaknya memperhatikan hal tersebut agar tidak terjadi kelebihan nutrisi yang berdampak pada timbulnya eutrofikasi atau *alga bloom*. Pembubuhan nutrisi hendaknya juga memperhatikan geografi perairan termasuk arah arus laut. Dilakukan proses permodelan sebaran tumpahan minyak secara berkala, untuk memprediksi keberadaan minyak mentah terutama ketika memasuki kolom perairan laut. Ketika arah sebaran minyak mentah diketahui, penambahan nutrisi dilakukan hanya pada area yang diindikasikan masih terdapat minyak mentah. Hal tersebut akan memperkecil potensi terjadinya pencemaran nutrisi pada area yang tidak terdampak tumpahan minyak mentah.

4.5.2 Metode Bioaugmentasi Studi Kasus

Menurut pembahasan pada sub-bab 3.4 dan 3.5 dapat diketahui jika proses biostimulasi masih belum optimal jika tidak disertai dengan metode bioaugmentasi. Biostimulasi memerlukan waktu yang cukup lama untuk mendegradasi tumpahan minyak mentah, karena keterbatasan jumlah bakteri indigen yang bersifat hidrokarbonoklastik. Seperti pernyataan Nugroho (2006), secara alamiah bakteri hidrokarbonoklastik berjumlah 1% di lingkungan yang tak tercemar dan 10% di lingkungan yang sedang tercemar minyak mentah. Oleh karena itu, bioaugmentasi diperlukan untuk mengatasi tumpahan minyak mentah pada studi kasus ini. Pada studi kasus ini, akan diterapkan metode bioaugmentasi dua tahap seperti yang telah diteliti dan terbukti efektif oleh Poorsoleiman *et al.* (2020), Koolivand *et al.* (2020), dan Behera *et al.* (2021) dalam mendegradasi minyak mentah.

5.5.2.1 Perhitungan Kebutuhan Inokulum Bakteri Studi Kasus

Tahap pertama yang diperlukan pada metode bioaugmentasi adalah menghitung kebutuhan sel bakteri untuk mendegradasi minyak mentah. Menurut Riyanto *et al.* (2021), Proses bioaugmentasi hendaknya menggunakan inokulum bakteri yang telah memiliki kerapatan sel sebesar 10^8 sel/ml. Kerapatan inokulum tersebut dapat mencapai 10^{12} sel/ml. Volume inokulum sel yang dipaparkan pada area target maksimal sebesar 10% (1 liter inokulum dipaparkan ke 10 liter area tercemar). Jika jumlahnya melebihi 10% maka akan bersifat toksik bagi lingkungan (Panjaitan, 2021). Hal ini sejalan seperti penelitian yang dilakukan oleh Nisa'Adzini *et al.* (2019), yang memperoleh hasil persentase penyisihan TPH dengan penambahan inokulum 16% lebih rendah daripada penambahan inokulum sebesar 12%. Juga diperoleh kesimpulan bahwa pada suatu titik tertentu, akan ada batas penambahan bakteri yang sesuai. Pada studi kasus ini akan digunakan strain bakteri konsorsium atau *mixed culture*. 0,5 ml kultur bakteri diinokulasikan pada 5 gram media atau persentase inokulasi sebesar 10% (Rahayu & Mangkoedihardjo, 2022). Kultur bakteri yang digunakan memiliki kerapatan sebesar 10^8 sel/ml untuk setiap bakteri.

a. Perhitungan Jumlah Inokulum Bakteri Kasus Teluk Balikpapan

Berikut perhitungan kebutuhan bakteri untuk mendegradasi tumpahan minyak mentah di Teluk Balikpapan 2018

$$\begin{aligned}\text{Massa minyak mentah} &= \text{Massa jenis minyak mentah} \times \text{Volume minyak mentah} \\ &= 850 \text{ kg/m}^3 \times 3.179,746 \text{ m}^3 \\ &= 2.702.784,014 \text{ kg} \\ &= 2.702.784.014 \text{ gram}\end{aligned}$$

0,5 ml inokulum bakteri untuk 5 gram pencemar

$$\begin{aligned}\text{Volume inokulum yang dibutuhkan} &= (\text{Massa minyak mentah} \times 0,5 \text{ ml})/5\text{gram} \\ &= (2.702.784.01 \text{ gram} \times 0,5 \text{ ml})/5\text{gram} \\ &= 270.278.401,38 \text{ ml} \\ &= 270,28 \text{ m}^3\end{aligned}$$

Maka jumlah inokulum bakteri yang dimasukkan pada cemaran minyak mentah tersebut sebanyak 270.278.401,38 ml x 10⁸ sel. Apabila membutuhkan 3 strain bakteri untuk membentuk konsorsium atau *mixed culture*, maka tiap bakteri diambil 0,5 ml dan diperoleh volume inokulum konsorsium sebesar 1,5 ml. Volume 1,5 ml kultur bakteri tersebut diinokulasikan pada 15 gram media tercemar. Penerapan di lapangan, kultur bakteri yang siap digunakan untuk proses bioaugmentasi dapat menggunakan wadah drum HDPE dengan volume 200 liter. Maka jumlah drum HDPE yang diperlukan yaitu:

$$\begin{aligned}\text{Volume inokulum yang dibutuhkan} &= (270.278.401,38 \text{ ml}) / (1000 \text{ ml/liter}) \\ &= 270.278,4 \text{ liter} \\ \text{Kapasitas drum HDPE} &= 200 \text{ liter} \\ \text{Jumlah drum yang dibutuhkan} &= \text{Volume inokulum} / \text{kapasitas drum} \\ &= 270.278,4 \text{ liter} / 200 \text{ liter} \\ &= 1.352 \text{ drum kapasitas 200 liter}\end{aligned}$$

b. Perhitungan Jumlah Inokulum Bakteri Kasus *Southern California*

Berikut perhitungan kebutuhan bakteri untuk mendegradasi tumpahan minyak mentah di Teluk Balikpapan 2018

$$\begin{aligned}\text{Massa minyak mentah} &= \text{Massa jenis minyak mentah} \times \text{Volume minyak mentah} \\ &= 850 \text{ kg/m}^3 \times 60,76 \text{ m}^3 \\ &= 51.650,2 \text{ kg} \\ &= 51.650.202,83 \text{ gram}\end{aligned}$$

0,5 ml inokulum bakteri untuk 5 gram pencemar

$$\begin{aligned}\text{Volume inokulum yang dibutuhkan} &= (\text{Massa minyak mentah} \times 0,5 \text{ ml})/5\text{gram} \\ &= (51.650.202,83 \text{ gram} \times 0,5 \text{ ml})/5\text{gram} \\ &= 5.165.020,28 \text{ ml} \\ &= 5,17 \text{ m}^3\end{aligned}$$

Maka jumlah inokulum bakteri yang dimasukkan pada cemaran minyak mentah tersebut sebanyak 5.165.020,28 ml x 10⁸ sel. Apabila membutuhkan 3 strain bakteri untuk membentuk konsorsium atau *mixed culture*, maka tiap bakteri diambil 0,5 ml dan diperoleh volume inokulum konsorsium sebesar 1,5 ml. Volume 1,5 ml kultur bakteri tersebut diinokulasikan pada 15 gram media tercemar. Penerapan di lapangan, kultur bakteri yang siap digunakan untuk proses bioaugmentasi dapat menggunakan wadah drum HDPE dengan volume 200 liter. Maka jumlah drum HDPE yang diperlukan yaitu:

Volume inokulum yang dibutuhkan	= (5.165.020,28 ml) / (1000 ml/liter) = 5.165,02 liter
Kapasitas drum HDPE	= 200 liter
Jumlah drum yang dibutuhkan	= Volume inokulum / kapasitas drum = 5.162,02 liter / 200 liter = 26 drum kapasitas 200 liter

4.5.2.2 Pemilihan Inokulum Bakteri pada Kasus Teluk Balikpapan dan *Southern California*

Seperti yang diketahui, komponen minyak bumi sangat beragam dan cukup kompleks. Diperlukan kemampuan metabolisme bakteri yang beragam pula. Berdasarkan senyawa yang terkandung dalam minyak mentah secara umum terdiri dari hidrokarbon alifatik, aromatik, asphaltenes, resin, dan logam. Diketahui bahwa senyawa hidrokarbon dengan massa jenis ringan akan mengalami penguapan akibat penyinaran matahari pada lapisan minyak dipermukaan laut. Sehingga beberapa hari setelah tumpahan akan tersisa senyawa karbon dengan massa jenis yang lebih berat. Pada sub-bab 3.6 dijelaskan bahwa bioaugmentasi lebih baik dilakukan secara bertahap untuk menjaga kecepatan degradasi minyak mentah. Penambahan bakteri secara bertahap juga bertujuan untuk mencegah populasi bakteri berlebih atau kekurangan populasi bakteri yang berakibat pada penurunan efektifitas proses bioremediasi.

Kedua kasus yang diangkat memiliki kondisi temperatur yang hampir sama dan berada pada kondisi yang dapat mendukung pertumbuhan mikroba secara optimal. Berdasarkan analisis literatur tidak semua bakteri dapat membentuk konsorsium yang bersifat mutualisme. Untuk menentukan apakah suatu konsorsium bakteri dapat menghasilkan persentase degradasi yang optimum memerlukan percobaan laboratorium terlebih dahulu. Sehingga pada studi kasus ini hanya berupa opsi-opsi konsorsium bakteri yang didapat dari analisis data sekunder. Berikut beberapa opsi konsorsium bakteri yang bisa digunakan untuk pada proses bioaugmentasi tumpahan minyak mentah dilaut:

- a. Konsorsium bakteri *Dietzia sp. HRJ2*, *Corynebacterium variabile HRJ4*, *Dietzia Cinnamea HRJ5*, and *Bacillus tequilensis HRJ6* dengan persentase *removal* TPH 66,3% yang dicapai pada hari ke-12. Secara rata-rata konsorsium tersebut mampu mendegradasi minyak mentah sebesar 5,53% per hari/Konsorsium bakteri ini memiliki keunggulan yang tahan terhadap salinitas tinggi. Konsorsium bakteri ini juga memiliki kemampuan untuk mendegradasi TAH (*Total Aromatic Hydroacarbon*) sebesar 82,93% dan TSH (*Total Saturated Hydrocarbon*) sebesar 97,29%. Percobaan tersebut dilakukan oleh Gurav *et al* (2017) dengan skala percobaan laboratorium.
- b. Konsorsium *Serratia proteamaculans SIBD1*, *Alcaligenes sp. OPKDS2*, *R. erythropolis OSDS1*, *Rhizobium sp. PNS1*, *Pseudomonas sp. BSS9BS1* mampu mendegradasi TPH hingga 85,26% yang dicapai pada hari ke-15. Dengan persentase dan durasi waktu tersebut didapatkan kecepatan rata-rata degradasi per hari adalah 5,68%. Konsorsium tersebut terdiri dari bakteri yang bertindak sebagai produsen bioemulsifier yaitu *Rhodococcus erythropolis OSDS1* dan beberapa bakteri hidrokarbonoklastik yang mempunyai kemampuan metabolisme yang berbeda. *Serratia proteamaculans SIBD1* (mampu mendegradasi senyawa hidrokarbon dalam cakupan yang luas; pH: 4.0–9.0; kadar salinitas: 0–65 g/L NaCl), *Alcaligenes sp. OPKDS2* (mendegradasi alkana & BTEX; pH lingkungan: 5.0–9.0; kadar salinitas:

0–45 g/L NaCl), *R. erythropolis OSDS1* (mendegradasi alkana; pH lingkungan : 5.0–9.0; kadar salinitas: 0–35 g/L NaCl), *Rhizobium sp. PNS1* (mendegradasi BTEX; pH lingkungan: 6.0–8.0; kadar salinitas: 0–45 g/L NaCl), and *Pseudomonas sp. BSS9BS1* (mendegradasi BTEX; pH lingkungan : 5.0–9.0; kadar salinitas : 0–55 g/L NaCl) (Phulpoto *et al.*, 2021).

- c. Konsorsium bakteri *Dietzia sp IRB191*, *Dietzia sp IRB 192*, *Staphylococcus sp BSM 19* dan *Stenotrophomonas sp IRB19* dengan kemampuan penyisihan TPH sebesar 91,5 +/- 2,28% yang didapat selama 10+5 hari dengan metode TSBS. Jumlah degradasi minyak mentah tersebut apabila dirata-rata sebesar 6,1% per hari. Data konsorsium tersebut sebagaimana yang tercantum pada Tabel 3.11. Persentase penyisihan tersebut didapat dari percobaan laboratorium menggunakan media MSM (*Mineral Salt Medium*) ditambah dengan *oil sludge* 2% (w/v). Pada penerapan di lapangan, diproyeksikan tidak akan mencapai persentase tersebut dalam waktu 15 hari. Hal tersebut dikarenakan beberapa faktor lingkungan yang memengaruhi bioremediasi tidak dimodelkan pada percobaan laboratorium.

Alternatif lain adalah membentuk konsorsium bakteri baru yang diperkirakan mampu untuk mendegradasi sebagian besar senyawa minyak mentah. Dibutuhkan bakteri yang memiliki rentang degradasi yang cukup luas terhadap hidrokarbon, menghasilkan biosurfaktan secara optimal, dan dibutuhkan pula bakteri dengan kemampuan metabolisme spesifik. Apabila menggunakan metode TSBS, maka konsorsium yang digunakan hendaknya yang memiliki karakteristik metabolisme seperti berikut :

- a. Pada tahap pertama diperlukan bakteri yang memiliki kemampuan metabolisme cukup beragam dan bersifat komplementer, sehingga tidak terjadi kompetisi antar bakterinya. Serta diperlukan bakteri yang dapat menghasilkan biosurfaktan *glycolipid* yang mampu mengurangi tegangan antar permukaan minyak dan air untuk membentuk emulsi minyak-air. Berikut beberapa opsi bakteri yang dapat digunakan pada metode TSBS tahap pertama:
- *Dietzia sp* (n-alkana rantai karbon C6-C40)
 - *Pseudomonas sp* (n-alkana rantai karbon C14-C30; hidrokarbon monoaromatik, *asphaltenes* dan resin; menghasilkan biosurfaktan *rhamnolipid*)
 - *Alcanivorax sp* (n-alkana dan alkana bercabang)
 - *Rhodococcus sp* (alkana siklik, hidrokarbon monoaromatik, dan menghasilkan biosurfaktan *trehalolipids*)
 - *Bacillus sp* (Hidrokarbon alifatik, monoaromatik, poliaromatik, *asphaltenes*, menghasilkan biosurfaktan lipopeptida)
- b. Pada tahap kedua diperlukan bakteri yang memiliki kemampuan metabolisme terhadap senyawa hidrokarbon kompleks. Diperkirakan senyawa hidrokarbon sederhana telah berkurang signifikan baik akibat metabolisme sel maupun proses *weathering* alamiah. Bioaugmentasi pada tahap pertama cenderung menyisakan senyawa hidrokarbon yang lebih kompleks dan memerlukan kestabilan emulsi minyak dan air untuk meningkatkan *bioavailable* hidrokarbon. Berikut beberapa opsi bakteri yang dapat digunakan pada metode TSBS tahap kedua:
- *Halomonas sp* (membentuk konsorsium komplementer dengan *Alcanivorax sp* untuk mendegradasi hidrokarbon aromatik)

- *Alcanivorax sp* (membentuk konsorsium komplementer dengan *Alcanivorax sp* untuk mendegradasi hidrokarbon aromatik)
- *Acinetobacter lwoffii* (mendegradasi TPH dan menghasilkan biosurfaktan rufisan serta emulsan)
- *Virgibacillus sp* SZN7 (mendegradasi PAH dan menghasilkan lipopeptida)
- *Bacillus licheniformis* (mendegradasi hidrokarbon poliaromatik dan menghasilkan lipopeptide berjenis *lichenysin*)

Opsi bakteri yang diusulkan pada penjelasan diatas tetap memerlukan percobaan laboratorium untuk memastikan apakah konsorsium akan berjalan komplementer atau akan timbul kompetisi antar bakteri pada suatu konsorsium tersebut. Bakter-bakteri yang diusulkan pada penjelasan diatas berdasarkan tabulasi dan analisis data sekunder yang terdapat pada Tabel 3.9, 3.10, 3.11, 3.12, dan 3.14. Dipilih bakteri yang mampu menghasilkan biosurfaktan dan dapat mendegradasi minyak mentah dengan persentase penyisihan yang cukup baik.

4.5.2.3 Solusi dari kelemahan metode bioaugmentasi minyak mentah

Setiap metode remediasi memiliki keunggulan dan kelemahannya masing-masing, tak terkecuali metode bioaugmentasi. Kelemahan dari metode bioaugmentasi yaitu bakteri yang ditambahkan dikhawatirkan tidak mampu beradaptasi pada lingkungan target, kerapatan sel bakteri yang tidak tercapai, adanya predasi serta kompetitor dari protozoa maupun bakteri lain. Untuk mengatasi ketidakmampuan bakteri untuk beradaptasi pada lingkungan target, bakteri yang digunakan hendaknya ditumbuhkan pada media yang mengandung zat pencemar dengan kadar dan jenis yang menyerupai dengan target remediasi (Hassanshahian *et al.*, 2014). Bakteri yang digunakan, hendaknya memiliki kemampuan adaptasi yang baik dan sudah diuji coba pada penelitian atau penerapan sebelumnya.

Metode bioaugmentasi seringkali tidak tercapai kerapatan sel bakterinya dibanding dengan kelimpahan bakteri saat proses bioaugmentasi berlangsung (Laothamteep *et al.*, 2022). Jumlah kerapatan sel bakteri yang tidak terpenuhi dapat diatasi dengan melakukan pemantauan secara berkala jumlah kerapatan sel bakteri. Apabila tidak mencukupi dapat dilakukan pembubuhan inokulum bakteri lagi ke media tersebut. Pembubuhan sel bakteri secara berkala dapat mempertahankan jumlah kerapatan sel bakteri pada lingkungan tercemar dan dapat meningkatkan kecepatan biodegradasi sesuai prinsip TSBS (Behera *et al.*, 2021). Predasi atau kompetitor bakteri hidrokarbonoklastik cenderung terjadi diakhir proses bioremediasi. Seperti yang diketahui bahwa akhir proses bioremediasi, kandungan minyak mentah mulai menipis dan berkurang sifat toksiknya. Akibat rendahnya kandungan minyak tersebut bakteri maupun mikroorganisme lain dapat tumbuh pada lingkungan tersebut dan berpotensi menimbulkan kompetisi dengan bakteri hidrokarbonoklastik (Sun *et al.*, 2021). Di sisi lain hal ini bermanfaat sebagai biomonitoring apakah jumlah minyak mentah masih banyak atau sudah berkurang signifikan. Ketika dilakukan monitoring dengan uji laboratorium jumlah TPH atau minyak mentah masih banyak, dapat dilakukan penambahan inokulum bakteri kembali ke area pencemar.

4.6 Standard Operating Procedure (SOP) Bioaugmentasi Biostimulasi

4.6.1 SOP Bioaugmentasi Biostimulasi Kasus Teluk Balikpapan 2018

Prosedur penanganan atau *Standard Operating Procedure* (SOP) tumpahan minyak mentah menggunakan teknik bioaugmentasi dan biostimulasi perlu diperhatikan dan

dirancang sedemikian rupa. Hal tersebut bertujuan untuk mencapai persentase penyisihan yang optimal dan mengurangi potensi timbulnya masalah lanjutan yang disebabkan oleh kesalahan penanganan. Adapun SOP bioaugmentasi dan biostimulasi ini merupakan analisis dari literatur sekunder. Berikut SOP penanganan tumpahan minyak mentah di lingkungan laut menggunakan teknik bioaugmentasi dan biostimulasi:

1. Isolasi wilayah terdampak tumpahan minyak

Suatu wilayah yang terdeteksi terdapat timbulan lapisan minyak mentah terutama dalam skala yang cukup luas untuk segera mungkin dilakukan isolasi guna menghindari potensi kecelakaan.

2. Penutupan akses dan penghentian kegiatan sementara pada area terdampak

Wilayah terdampak harus dibatasi aksesnya dari segala macam kegiatan. Hal ini untuk mengurangi efek dari tumpahan minyak dan agar tidak mengganggu proses remediasi yang sedang berjalan. Beberapa minggu setelah pencemaran, hendaknya tidak mengkonsumsi ikan dan organisme laut lain yang berasal dari area tercemar minyak mentah, untuk menghindari sifat toksik dari kandungan minyak tersebut.

3. Investigasi tumpahan minyak mentah

Ketika lapisan minyak terdeteksi di permukaan air perlu dilakukan investigasi penyebab timbulan lapisan minyak tersebut. Tindakan tersebut bertujuan untuk mendeteksi sumber pencemar dan meminimalisir volume tumpahan yang lebih besar. Investigasi juga bertujuan untuk mengetahui karakteristik tumpahan minyak mentah sebagai dasar perencanaan tindakan remediasi.

4. Penghentian sumber pencemar

Sumber pencemar segera mungkin dihentikan alirannya agar volume tumpahan dapat diminimalisir dan mencegah kerusakan lingkungan yang lebih parah.

5. Pemetaan area terdampak

Memetakan area terdampak tumpahan minyak menggunakan pencitraan satelit, pesawat, atau *drone* untuk mengetahui lokasi yang terdampak. Pemetaan ini dapat digunakan sebagai data acuan pada permodelan dispersi tumpahan minyak. Guna meningkatkan keandalan proses remediasi, pemetaan dilakukan tiap hari selama satu minggu sejak tumpahan minyak.

6. Permodelan Dispersi Tumpahan Minyak

Data investigasi dan observasi lapangan sedapat mungkin juga mencantumkan arah arus laut dan geografi perairan. Data tersebut berguna untuk memodelkan dispersi tumpahan minyak mentah dimasa yang akan datang. Hasil permodelan digunakan sebagai acuan untuk mengambil kebijakan terkait proses remediasi dimasa yang akan datang. Permodelan ini dapat diperbaharui secara berkala untuk meningkatkan keakuratan dan efektifitas remediasi.

7. Perhitungan prakiraan volume tumpahan

Pada hari pertama tumpahan minyak dilakukan analisis volume tumpahan untuk menghitung dan mempersiapkan jumlah nutrien serta konsorsium bakteri yang dibutuhkan pada proses biostimulasi

8. Penggunaan *oil boom*

Oil boom digunakan sebagai langkah pertama penanganan tumpahan minyak yang berguna untuk mengisolasi pencemar agar tidak meluas. *Oil boom* dikombinasikan penggunaannya dengan *weir oil skimmer* untuk mengumpulkan dan menyisihkan minyak mentah yang terlanjur menyebar. *Oil boom* dapat digunakan untuk mengisolasi daerah penting dari paparan minyak mentah serta membantu pemaparan nutrien dan bakteri ke lapisan minyak mentah. *Oil boom* yang digunakan berjenis

fence boom yang memiliki bagian penampang vertikal pada bagian atas pelampung dan bagian dasar pelampung.

9. Penggunaan *weir oil skimmer*

Weir oil skimmer digunakan sebagai alat penyisih minyak mentah yang cukup efektif. Lapisan minyak mentah memiliki waktu detensi hingga 4 hari setelah tumpahan, selanjutnya akan terdispersi ke kolom air membentuk emulsi. Penggunaan *oil skimmer* dioptimalkan pada awal terjadinya tumpahan dengan pertimbangan lapisan minyak masih cukup tebal dan belum meluas, sehingga dapat meningkatkan persentase penyisihan.

10. Penyediaan pupuk *water soluble*

Saat awal terjadinya tumpahan, petugas segera menyiapkan sumber nutrisi berupa pupuk inorganik yang bersifat *water soluble* terlebih dahulu. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, bahwa pupuk inorganik yang digunakan adalah pupuk komersial sehingga mudah didapatkan dipasaran. Penyediaan nutrisi dapat dilakukan secara bertahap dan paralel dengan implementasi biostimulasi.

11. Penyediaan pupuk SRF

Hari ke-7 setelah tumpahan hendaknya petugas telah menyediakan pupuk *Osmocote* yang berjenis *slow release fertilizer* untuk digunakan pada proses biostimulasi lanjutan.

12. Pelaksanaan biostimulasi menggunakan pupuk *water soluble*

Rentang waktu pemaparan pupuk *water soluble* yaitu selama 35 hari (5 minggu). Jumlah pemaparan sebanyak 35 hari mempertimbangkan kecepatan degradasi minyak mentah rata-rata oleh bakteri yang berada pada rentang 2-5% per harinya. Jumlah pemaparan sebanyak 35 kali, akan mendapati persentase volume paparan per harinya sebesar 2,86%. Hal ini untuk mencegah terjadinya eutrofikasi.

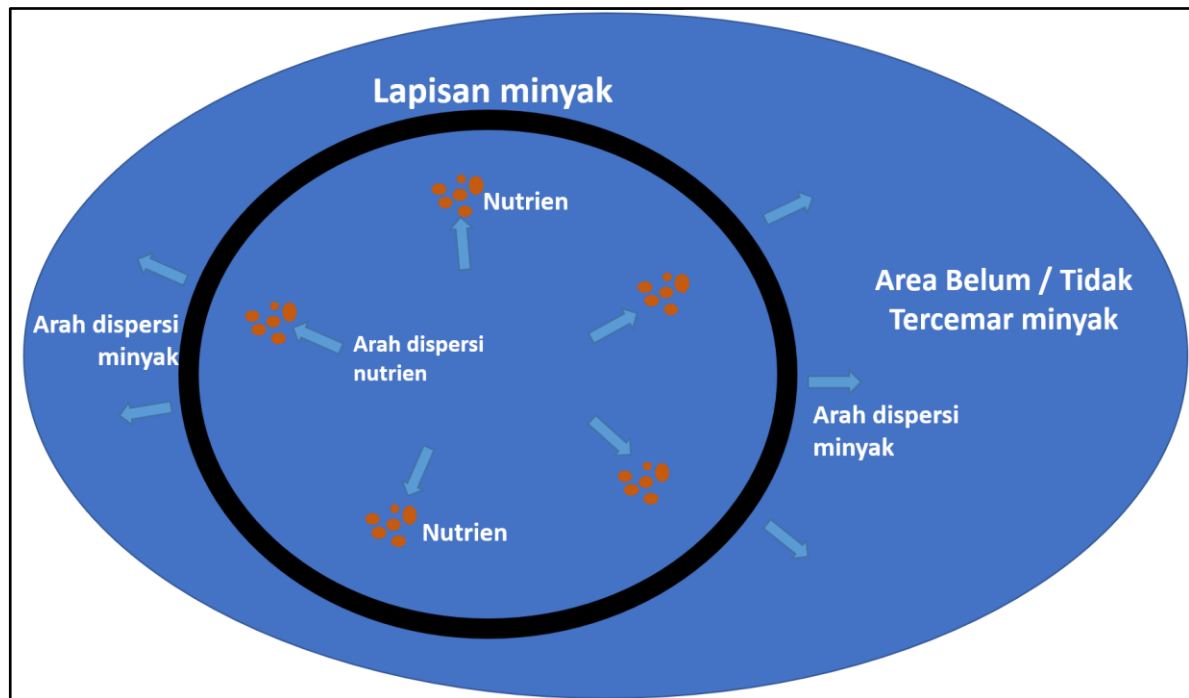
Dihitung kebutuhan pupuk *water soluble* per harinya seperti berikut :

$$\begin{aligned} \text{Jumlah pupuk} &= (352.889,58 \text{ kg Urea} + 179.250 \text{ kg SP36}) \\ &= 532.139,58 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\text{Jumlah pemaparan} = 35 \text{ hari}$$

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan pupuk / hari} &= \text{Jumlah pupuk} / \text{Jumlah pemaparan} \\ &= 532.139,58 \text{ kg} / 35 \text{ hari} \\ &= 15.203,99 \text{ kg} / \text{hari} \end{aligned}$$

Jumlah kebutuhan pupuk / hari masih berdasarkan hitungan matematis, untuk kondisi di lapangan akan sangat dinamis. *Monitoring* kecukupan nutrisi akan diterapkan secara berkala untuk menghindari kelebihan nutrisi yang berpotensi menyebabkan eutrofikasi. Pupuk tersebut dilakukan pelarutan dengan air hingga terbentuk larutan pupuk cair. Hal ini juga untuk memudahkan pemaparan pupuk ke lingkungan. Pemaparan pupuk dapat menggunakan kapal, *drone*, dan pesawat. Larutan pupuk disemprotkan ke lapisan minyak di permukaan laut. Apabila sudah tidak ditemukan lapisan minyak, maka pemaparan larutan pupuk dilakukan pada area bagian dalam batas dispersi minyak. Area tersebut didasarkan oleh hasil pemodelan dispersi minyak mentah baik dispersi vertikal maupun horizontal. Dengan demikian, nutrisi tidak akan menyebar ke area yang tidak terdampak tumpahan minyak. Berikut Gambar 4.18 yang berisi sketsa dispersi minyak mentah dan larutan nutrisi yang ditambahkan.



Gambar 4.18 Sketsa Dispersi Minyak Mentah dan Nutrien

13. Persiapan inokulum bakteri

Inokulum indukan bakteri perlu dipastikan ketersediaannya dalam jumlah yang cukup.

14. Pembuatan inokulum bakteri untuk bioaugmentasi tahap pertama

Bioaugmentasi tahap pertama diasumsikan akan menghabiskan 70% jumlah bakteri yang dibutuhkan. Angka tersebut disesuaikan dengan penggunaan 70% nutrisi yang bersumber dari pupuk berjenis *water soluble*. Persentase 70% didasarkan pula atas jumlah cemaran minyak mentah yang diperkirakan mampu terbiodegradasi pada masa awal pasca tumpahan. Bakteri memerlukan waktu untuk mencapai jumlah koloni 1×10^8 CFU/ml. Beberapa literatur menyebutkan bahwa inokulum bakteri dapat mencapai jumlah tersebut dalam waktu 24 jam. Beberapa literatur tidak hanya menghitung berdasarkan jumlah bakteri, namun juga mempertimbangkan kematangan dan kestabilan kultur yang dapat dicapai setelah 48 jam. Bakteri yang akan dipaparkan pada area tercemar hendaknya masih berada pada awal fase logaritmik. Hal ini untuk memastikan bakteri mampu memanfaatkan hidrokarbon dan nutrisi secara optimal di area tercemar. Hal ini akan bermanfaat untuk menjaga kerapatan sel bakteri di area tercemar hingga meningkatkan kecepatan biodegradasi minyak mentah.

15. Pelaksanaan bioaugmentasi tahap pertama

Bioaugmentasi tahap pertama akan dibagi dengan 7 kali pemaparan pada lingkungan target dengan kurun waktu empat minggu. Satu siklus bioaugmentasi mulai dari persiapan, inkubasi, dan pelaksanaan membutuhkan waktu 4 hari. Apabila dihitung hingga akhir fase stasioner membutuhkan waktu selama 11 hari. Berdasarkan Nurjanah (2018), fase lag bakteri membutuhkan waktu selama 2 hari, fase logaritmik 1 hari, dan fase stasioner selama 4 hari. Dilakukan perhitungan untuk mengetahui jumlah volume bakteri yang akan dipaparkan tiap 1 siklus paparan seperti berikut:

$$\begin{aligned}
\text{Volume inokulum bakteri} &= 270.278,4 \text{ Liter} \\
\text{Persentase inokulum bakteri} &= 70\% \\
\text{Jumlah pemaparan} &= 7 \text{ kali} \\
\text{Vol inokulum tahap pertama} &= \text{Volume inokulum total} \times \text{Persentase inokulum} \\
&= 270.278,4 \text{ Liter} \times 70\% \\
&= 189.194,88 \text{ Liter} \\
\text{Volume inokulum per pemaparan} &= \text{Vol inokulum tahap pertama} / \text{Jumlah pemaparan} \\
&= 189.194,88 \text{ Liter} / 7 \\
&= 27.027,84 \text{ Liter}
\end{aligned}$$

Aplikasi inokulum bakteri di lapangan dapat menggunakan kapal laut. Kapal laut yang digunakan hendaknya yang memiliki penampung benda cair dan memiliki alat pemompa yang dilengkapi semprotan seperti pemadam kebakaran. Hal ini untuk menebarkan inokulum bakteri ke wilayah sasaran (OBIOTech, 2010). Fase awal tumpahan, inokulum bakteri sebisa mungkin untuk disemprotkan langsung ke lapisan minyak. Hal ini bertujuan agar bakteri dapat langsung berikatan dengan lapisan minyak dan sebarannya akan lebih terkontrol (Kalogerakis, 2018). Apabila tidak ditemukan lagi lapisan minyak, maka penebaran bakteri mengikuti kaidah penebaran pupuk *water soluble* sebagaimana disketsakan pada Gambar 4.18. Pada gambar tersebut, pembubuhan bakteri tidak dilakukan diluar area tercemar minyak. Arah pemaparan hendaknya searah dengan arus laut dan arah dispersi minyak mentah. Hal ini untuk menghindari bakteri memasuki area yang tidak tercemar minyak. Sebelum dilakukan pembuatan inokulum perlu dilakukan *monitoring* untuk mengetahui jumlah kultur bakteri apakah sudah memenuhi atau belum memenuhi. Ketika jumlah kultur bakteri sudah memenuhi pada suatu wilayah tercemar, maka pemaparan inokulan baru dapat ditunda bahkan tidak perlu ditambahkan lagi jika jumlah hidrokarbon minyak mentah yang tersedia sangat kecil.

Seperti yang diketahui bahwa lapisan minyak mulai memasuki kolom air setelah 7 hari pasca tumpahan. Perlu dilakukan pemantauan terkait keberadaan minyak mentah pasca tumpahan di perairan laut dan dapat dibantu dengan permodelan dispersi vertikal dan horizontal. Saat sebagian besar minyak mentah memasuki kolom perairan, hendaknya bakteri yang dibubuhkan pada area tercemar diinjeksikan beberapa meter dari permukaan air laut sesuai keberadaan emulsi minyak mentah. Hal ini untuk memastikan bakteri hidrokarbonoklastik dapat mendegradasi polutan minyak mentah secara optimal.

16. Pelaksanaan biostimulasi menggunakan pupuk SRF

Biostimulasi menggunakan pupuk SRF ditujukan untuk menstimulasi bakteri pendegradasi senyawa hidrokarbon kompleks. Hal ini didasarkan oleh kecepatan biodegradasi senyawa hidrokarbon kompleks membutuhkan waktu yang lebih lama dibanding senyawa hidrokarbon sederhana. Guna menghemat biaya operasional, digunakan pupuk yang bersifat *slow release*. Penggunaan pupuk SRF dapat mengurangi kehilangan nutrisi akibat *washout*. Sebelum implementasi di lapangan, pupuk SRF dicampurkan dengan air untuk memudahkan proses biostimulasi terutama untuk penerapan di bawah laut. Sebagaimana dijelaskan pada Sub-Bab 4.5.1, pupuk SRF lebih efektif jika diterapkan di bawah permukaan laut. Oleh karena itu, pupuk yang sudah dicampur dengan air dipompakan dan didispersikan ke bawah permukaan laut. Apabila senyawa target hidrokarbon telah mencapai dasar laut atau sedimen laut, maka pupuk SRF dipompakan menuju ke lokasi tersebut (dasar laut).

Rentang satu siklus pupuk SRF dalam satu siklus pupuk SRF adalah 45 hari. Fase pelepasan nutrien paling aktif terjadi sejak hari ke 10 hingga 20 setelah pengaplikasian. Direncanakan ketika pemaparan pupuk SRF yang pertama mencapai hari ke-10, pada saat yang sama dilakukan pemaparan pupuk SRF juga. Maka, penebaran pupuk SRF dilakukan tiap 10 hari sekali dengan rencana jadwal pemaparan pada hari ke-8, 18, 28, 38, dan 48 setelah tumpahan minyak. Pemaparan pupuk SRF yang pertama dijadwalkan pada hari ke-8, karena emulsi minyak mentah mulai berada di kolom perairan.

Dihitung kebutuhan pupuk SRF per pemaparan seperti berikut :

$$\begin{aligned} \text{Jumlah pupuk} &= 126.176 \text{ kg Osmocote} \\ \text{Jumlah pemaparan} &= 5 \text{ kali} \\ \text{Kebutuhan pupuk / hari} &= \text{Jumlah pupuk} / \text{Jumlah pemaparan} \\ &= 126.176 \text{ kg} / 5 \\ &= 25.235 \text{ kg} / \text{pemaparan} \end{aligned}$$

Jumlah pemaparan pupuk tersebut masih berdasarkan hitungan matematis, untuk kondisi di lapangan akan sangat dinamis. *Monitoring* kecukupan nutrien akan dilakukan secara berkala untuk menghindari kelebihan nutrien yang berpotensi menyebabkan eutrofikasi.

17. Persiapan inokulum bakteri

Inokulum indukan bakteri perlu dipastikan ketersediaannya dalam jumlah yang cukup. Bakteri yang digunakan pada fase kedua ini bertujuan untuk mendegradasi senyawa hidrokarbon kompleks dan hidrokarbon yang terendapkan di sedimen laut. Oleh karena itu, perlu dipilih bakteri yang kompeten untuk mendegradasi senyawa tersebut seperti yang telah dijelaskan pada sub-bab 4.5.2. Persiapan inokulum bakteri dilakukan 3 hari sebelum rencana pemaparan.

18. Pembuatan inokulum bakteri

Jumlah inokulum bakteri untuk tahap kedua ini, diproyeksikan akan menggunakan 30% dari kebutuhan total bakteri. Bakteri diinkubasikan selama 48 jam untuk mencapai jumlah 1×10^8 CFU/ml. 30% inokulum bakteri dibagi menjadi empat kali pemaparan.

19. Pelaksanaan bioaugmentasi tahap kedua

Satu siklus bioaugmentasi mulai dari persiapan, inkubasi, dan pelaksanaan membutuhkan waktu 4 hari. Apabila dihitung hingga akhir fase stasioner membutuhkan waktu selama 11 hari. Dilakukan perhitungan untuk mengetahui jumlah volume bakteri yang akan dipaparkan tiap 1 siklus paparan seperti berikut :

$$\begin{aligned} \text{Volume inokulum bakteri} &= 270.278,4 \text{ Liter} \\ \text{Persentase inokulum bakteri} &= 30\% \\ \text{Jumlah pemaparan} &= 7 \text{ kali} \\ \text{Volume inokulum tahap kedua} &= \text{Volume inokulum total} \times \text{Persentase inokulum} \\ &= 270.278,4 \text{ Liter} \times 30\% \\ &= 81.083,52 \text{ Liter} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volume inokulum per pemaparan} &= \text{Volume inokulum tahap dua} / \text{Jumlah pemaparan} \\ &= 81.083,52 \text{ Liter} / 4 \\ &= 20.270,88 \text{ Liter} \end{aligned}$$

Aplikasi inokulum bakteri di lapangan dapat menggunakan kapal laut dengan melakukan pemompaan ke bawah permukaan laut. Hal ini untuk mendegradasi emulsi minyak mentah yang mulai masuk ke kolom air bahkan terendapkan di dasar laut. Diperlukan data pemodelan dispersi vertikal minyak mentah untuk meningkatkan efektifitas bioaugmentasi. Rencana inokulasi kultur bakteri pada perairan tercemar minyak mentah di jadwal pada hari ke-17, 27, 37, dan 47 pasca tumpahan. Jadwal tersebut masing-masing bertepatan dengan pupuk SRF yang akan memasuki fase pelepasan nutrisi yang optimal. Diharapkan ketersediaan nutrisi tersebut, bakteri mampu beradaptasi dan mendegradasi minyak mentah dengan cepat. Sebelum dilakukan pembuatan inokulum perlu dilakukan *monitoring* untuk mengetahui jumlah kultur bakteri apakah sudah memenuhi atau belum memenuhi. Ketika jumlah kultur bakteri sudah memenuhi pada suatu wilayah tercemar, maka pemaparan inokulum baru dapat ditunda bahkan tidak perlu ditambahkan lagi.

20. Monitoring kandungan nutrisi dan bakteri

Monitoring atau pemantauan kandungan nutrisi dan bakteri pada proses bioaugmentasi dan biostimulasi sangat penting untuk dilakukan. Hal tersebut bertujuan untuk mengetahui apakah kandungan nutrisi dan bakteri telah berada pada kondisi optimum atau tidak. Literatur menyebutkan jika proses bioaugmentasi dan biostimulasi di lautan cenderung kehilangan nutrisi dan bakteri secara cepat dibanding dengan potensi timbulnya eutrofikasi atau ledakan populasi bakteri. Nutrisi akan cepat terdispersi dan cenderung mengikuti arus air laut. Proses bioaugmentasi di lapangan tidak selamanya sesuai dengan kondisi laboratorium. Bakteri yang diinokulasikan di lapangan akan terganggu oleh adanya predator berupa protozoa. Kondisi lingkungan laut yang terdampak tumpahan minyak mentah akan mengalami kondisi toksik selama beberapa minggu. Kondisi toksik ini sebenarnya dapat mengeliminasi predator bakteri dan mikroorganisme lain yang berpotensi menjadi kompetitor bagi bakteri hidrokarbonoklastik yang ditambahkan. Namun monitoring kandungan nutrisi dan jumlah bakteri pada proses bioremediasi tetap perlu dilakukan, guna meminimalisir timbulnya pencemaran baru bagi lingkungan. Jadwal pemantauan kandungan nutrisi dan bakteri dimulai dari hari ke-5 setelah tumpahan. Hari ke-5 bertepatan dengan persiapan inokulum bakteri baru untuk dipaparkan ke lokasi tercemar. Pemantauan tersebut dilakukan berulang setiap 4 hari sekali dengan jadwal pada hari ke-5, 9, 13, 17, 21, 25, 29, 33, 37, 41, 45, 48, 53, dan 57 setelah pencemaran terjadi dengan kurun waktu perencanaan selama 2 bulan.

21. Kontrol bakteri dan nutrisi pasca penanganan

Pasca penanganan perlu memperhatikan kondisi perairan berdasarkan kelimpahan bakteri dan nutrisi. Proses bioaugmentasi dapat menurunkan keanekaragaman bakteri yang hidup di lingkungan terdampak. Penurunan keanekaragaman tersebut berasal dari sifat toksik minyak mentah dan juga kompetisi dengan bakteri yang ditambahkan. Secara alamiah keanekaragaman bakteri akan pulih setelah 12 minggu pasca pencemaran (Sun *et al.*, 2021). Pada awal tumpahan kemungkinan terjadinya eutrofikasi cukup rendah mengingat sifat toksik lingkungan yang dapat menghambat pertumbuhan mikroorganisme penyebab eutrofikasi. Hal yang dapat mendorong terjadinya eutrofikasi adalah penambahan nutrisi dalam jumlah cukup besar pada suatu waktu. Pada studi kasus ini, penambahan nutrisi masih dilakukan secara bertahap dan dalam rentang volume yang dibutuhkan oleh bakteri

hidrokarbonoklastik. Kemungkinan terjadinya eutrofikasi dapat diminimalkan dengan perlakuan tersebut.

Jenis pupuk yang berpotensi mendorong timbulnya eutrofikasi adalah yang bersifat *water soluble*. Pada studi kasus ini pupuk *water soluble* tetap digunakan namun dalam komposisi yang dibutuhkan oleh bakteri pendegradasi minyak dan juga diterapkan di awal tumpahan. Menjelang pertengahan dan akhir masa bioremediasi jumlah mikroorganisme alamiah mulai meningkat kembali. Pada fase tersebut berpotensi timbulnya eutrofikasi. Untuk menanggulangi hal tersebut, dapat digunakan pupuk SRF yang dapat melepaskan nutrisi secara perlahan sehingga kemungkinan terjadinya eutrofikasi cukup kecil.

Potensi pencemaran lain yang dapat terjadi akibat diterapkannya metode biostimulasi dan bioaugmentasi adalah kontaminasi bakteri pada wilayah yang tidak tercemar minyak. Potensi pencemaran tersebut dapat diatasi dengan melakukan penambahan bakteri secara bertahap diiringi dengan *monitoring* jumlah bakteri secara berkala. Jumlah bakteri pada perairan juga dijaga untuk tetap berada pada rentang $1 \times 10^5 - 1 \times 10^6$ CFU/ml untuk menghindari penyebaran dan pertumbuhan bakteri yang terlalu masif. Pembatasan jumlah bakteri dapat menggunakan zat antimikroba alamiah yang dihasilkan oleh beberapa tumbuhan seperti daun Tembelean (*Lantana camara*), Bandotan (*Ageratum conyzoides*), Sirih Hijau (*Piper betle*), Sirih Merah (*Piper crocatum Ruiz and Pav*), dan Daun Sirsak (*Annona muricata*). Pengaplikasian zat antibakteri beberapa ekstrak daun tersebut cukup efektif untuk membatasi pertumbuhan bahkan mematikan bakteri target. Cara kerja zat antibakteri seperti flavonoid yang terdapat pada ekstrak daun sirih merah, membentuk senyawa kompleks dengan protein dan dinding sel bakteri. Zat tersebut akan mengikat protein bakteri dan menyebabkan denaturasi protein sehingga mengganggu fungsi protein. Hal tersebut berdampak pada struktur peptidoglikan bakteri terganggu dan lapisan dinding sel tidak terbentuk secara utuh, sehingga mengakibatkan kematian pada bakteri.

Adapun rencana jadwal penanganan bioaugmentasi dan biostimulasi pada kasus Teluk Balikpapan 2018 dengan rentang waktu selama 60 hari seperti pada Tabel 4.2 berikut

Tabel 4.2 Rencana Jadwal Penanganan Bioaugmentasi dan Biostimulasi Kasus Teluk Balikpapan

No	Perlakuan	Hari Setelah Tumpahan																													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	Isolasi wilayah terdampak	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14																
2	Penutupan akses untuk umum	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21									
3	Investigasi tumpahan minyak	1																													
4	Penghentian sumber pencemar	1																													
5	Pemetaan area terdampak	1			4			7			9			13																	
6	Permodelan dispersi minyak	1																													
7	Perhitungan prakiraan volume tumpahan	1																													
8	Pemasangan oil boom	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14																
9	Penggunaan weir oil skimmer	1	2	3	4																										
10	Penyediaan pupuk water soluble	1											13																		
11	Penyediaan pupuk SRF							7										17											27		
11	Pelaksanaan biostimulasi (pupuk water soluble)		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
13	Persiapan inokulum bakteri	1				5				9				13				17				21				25					
14	Pembuatan inokulum bakteri		2	3			6	7			10	11			14	15			18	19			22	23			26	27			
15	Pelaksanaan bioaugmentasi tahap pertama				4				8				12			16				20				24						28	
12	Pelaksanaan biostimulasi (pupuk SRF)								8										18											28	
13	Persiapan inokulum bakteri														14										24						
14	Pembuatan inokulum bakteri															15	16									25	26				
16	Pelaksanaan bioaugmentasi tahap kedua																	17											27		
17	Monitoring kandungan nutrisi dan bakteri					5				9				13				17				21				25				29	
18	Kontrol nutrisi dan bakteri pasca penanganan														14															28	

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan pupuk / hari} &= \text{Jumlah pupuk / Jumlah pemaparan} \\ &= 7.684,36 \text{ kg} / 21 \text{ hari} \\ &= 365,92 \text{ kg} / \text{hari} \end{aligned}$$

13. Persiapan inokulum bakteri

Inokulum indukan bakteri perlu dipastikan ketersediaannya dalam jumlah yang cukup.

14. Pembuatan inokulum bakteri untuk bioaugmentasi tahap pertama

Bioaugmentasi tahap pertama diasumsikan akan menghabiskan 70% jumlah bakteri yang dibutuhkan. Angka tersebut disesuaikan dengan penggunaan 70% nutrien yang bersumber dari pupuk berjenis *water soluble*. Persentase 70% didasarkan pula atas jumlah cemaran minyak mentah yang diperkirakan mampu terbiodegradasi pada masa awal tumpahan.

15. Pelaksanaan bioaugmentasi tahap pertama

Bioaugmentasi tahap pertama akan dibagi dengan 4 kali pemaparan pada lingkungan target dengan kurun waktu tiga minggu. Satu siklus bioaugmentasi mulai dari persiapan, inkubasi, dan pelaksanaan membutuhkan waktu 4 hari. Siklus pertumbuhan bakteri apabila dihitung hingga akhir fase stasioner, membutuhkan waktu selama 11 hari. Berdasarkan Nurjanah (2018), fase lag bakteri membutuhkan waktu selama 2 hari, fase logaritmik 1 hari, dan fase stasioner selama 4 hari. Dilakukan perhitungan untuk mengetahui jumlah volume bakteri yang akan dipaparkan tiap 1 siklus paparan seperti berikut :

$$\text{Volume inokulum bakteri} = 5.165,02 \text{ Liter}$$

$$\text{Persentase inokulum bakteri} = 70\%$$

$$\text{Jumlah pemaparan} = 5 \text{ kali}$$

$$\begin{aligned} \text{Volume inokulum tahap pertama} &= \text{Volume inokulum total} \times \text{Persentase inokulum} \\ &= 5.165,02 \text{ Liter} \times 70\% \\ &= 3.615,51 \text{ Liter} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volume inokulum per pemaparan} &= \text{Vol. inokulum tahap pertama} / \text{Jumlah pemaparan} \\ &= 3.615,51 \text{ Liter} / 5 \\ &= 723,1 \text{ Liter} \end{aligned}$$

Aplikasi inokulum bakteri di lapangan menggunakan teknik yang sama seperti SOP bioaugmentasi tahap pertama kasus Teluk Balikpapan 2018

16. Pelaksanaan biostimulasi menggunakan pupuk SRF

Rentang satu siklus pupuk SRF dalam satu siklus pupuk SRF adalah 45 hari. Fase pelepasan nutrien paling aktif terjadi sejak hari ke 10 hingga 20 setelah pengaplikasian. Direncanakan ketika pemaparan pupuk SRF yang pertama mencapai hari ke-10, pada saat yang sama dilakukan pemaparan pupuk SRF juga. Maka, penebaran pupuk SRF dilakukan tiap 10 hari sekali dengan rencana jadwal pemaparan pada hari ke-8, 18, 28, dan 38 setelah tumpahan minyak. Pemaparan pupuk SRF yang pertama dijadwalkan pada hari ke-8, karena emulsi minyak mentah mulai berada di kolom perairan.

Dihitung kebutuhan pupuk SRF per pemaparan seperti berikut :

$$\text{Jumlah pupuk} = 1.224,72 \text{ kg Osmocote}$$

$$\text{Jumlah pemaparan} = 4 \text{ kali}$$

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan pupuk / hari} &= \text{Jumlah pupuk} / \text{Jumlah pemaparan} \\ &= 1.224,72 \text{ kg} / 4 \\ &= 306 \text{ kg} / \text{pemaparan} \end{aligned}$$

Jumlah pemaparan pupuk tersebut masih berdasarkan hitungan matematis, untuk kondisi di lapangan akan sangat dinamis. *Monitoring* kecukupan nutrisi akan dilakukan secara berkala untuk menghindari kelebihan nutrisi yang berpotensi menyebabkan eutrofikasi.

17. Persiapan inokulum bakteri tahap kedua

18. Pembuatan inokulum bakteri tahap kedua

Jumlah inokulum bakteri untuk tahap kedua ini, diproyeksikan akan menggunakan 30% dari kebutuhan total bakteri. Bakteri diinkubasikan selama 48 jam untuk mencapai jumlah 1×10^8 CFU/ml. 30% inokulum bakteri dibagi menjadi empat kali pemaparan.

19. Pelaksanaan bioaugmentasi tahap kedua

Satu siklus bioaugmentasi mulai dari persiapan, inkubasi, dan pelaksanaan membutuhkan waktu 4 hari. Apabila dihitung mulai dari tahap persiapan hingga akhir fase stasioner membutuhkan waktu selama 11 hari. Dilakukan perhitungan untuk mengetahui jumlah volume bakteri yang akan dipaparkan tiap 1 siklus paparan seperti berikut :

Volume inokulum bakteri = 5.165,02 Liter

Persentase inokulum bakteri = 30%

Jumlah pemaparan = 3 kali

Volume inokulum tahap kedua = Volume inokulum total x Persentase inokulum
= 5.165,02 Liter x 30%
= 1.549,51 Liter

Volume inokulum per pemaparan = Volume inokulum tahap dua / Jumlah pemaparan
= 1.549,51 Liter / 3
= 516,5 Liter

Aplikasi inokulum bakteri di Rencana inokulasi kultur bakteri pada perairan tercemar minyak mentah dijadwalkan pada hari ke-17, 27, 37, dan 47 pasca tumpahan. Jadwal tersebut masing-masing bertepatan dengan pupuk SRF yang akan memasuki fase pelepasan nutrisi yang optimal. Diharapkan dengan ketersediaan nutrisi tersebut, bakteri mampu beradaptasi dan mendegradasi minyak mentah dengan cepat.

20. *Monitoring* kandungan nutrisi dan bakteri

Monitoring atau pemantauan kandungan nutrisi dan bakteri pada proses bioaugmentasi dan biostimulasi sangat penting untuk dilakukan. Jadwal pemantauan kandungan nutrisi dan bakteri dimulai dari hari ke-5 setelah tumpahan. Hari ke-5 bertepatan dengan persiapan inokulum bakteri baru untuk dipaparkan ke lokasi tercemar. Pemantauan tersebut dilakukan berulang setiap 4 hari sekali dengan jadwal pada hari ke-5, 9, 13, 17, 21, 25, 29, 33, 37, 41, 45, 49, 53, dan 57 setelah pencemaran terjadi dengan kurun waktu perencanaan selama 2 bulan.

21. Kontrol bakteri dan nutrisi pasca penanganan

Pasca penanganan perlu memperhatikan kondisi perairan berdasarkan kelimpahan bakteri dan nutrisi. Proses bioaugmentasi berpotensi menyebabkan kontaminasi bakteri pada wilayah yang tidak tercemar minyak mentah. Disamping itu, proses biostimulasi berpotensi menyebabkan eutrofikasi. Kontrol bakteri dan nutrisi dilakukan dapat menggunakan prosedur yang sama dengan kasus Teluk Balikpapan.

Adapun rencana jadwal penanganan bioaugmentasi dan biostimulasi pada kasus *Southern California* 2021 dengan rentang waktu selama 60 hari seperti pada Tabel 4.3. Rencana jadwal penanganan tumpahan minyak berdasarkan analisis teori yang telah dilakukan sebelumnya

Tabel 4.3 Rencana Jadwal Penanganan Bioaugmentasi dan Biostimulasi Kasus *Southern California*

No	Perlakuan	Hari Setelah Tumpahan																													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	Isolasi wilayah terdampak	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14																
2	Penutupan akses untuk umum	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21									
3	Investigasi tumpahan minyak	1																													
4	Penghentian sumber pencemar	1																													
5	Pemetaan area terdampak	1			4			7			9			13																	
6	Permodelan dispersi minyak	1																													
7	Perhitungan prakiraan volume tumpahan	1																													
8	Pemasangan <i>oil boom</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14																
9	Penggunaan <i>weir oil skimmer</i>	1	2	3	4																										
10	Penyediaan pupuk <i>water soluble</i>	1																													
11	Penyediaan pupuk SRF							7																							
11	Pelaksanaan biostimulasi (pupuk <i>water soluble</i>)		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22								
13	Persiapan inokulum bakteri	1			5				9				13				13														
14	Pembuatan inokulum bakteri		2	3		6	7			10	11			14	15			14	15												
15	Pelaksanaan bioaugmentasi tahap pertama			4				8				12				16				16											
12	Pelaksanaan biostimulasi (pupuk <i>SRF</i>)							8										18													
13	Persiapan inokulum bakteri													14											24						
14	Pembuatan inokulum bakteri														15	16										25	26				
16	Pelaksanaan bioaugmentasi tahap kedua																	17										27			
17	<i>Monitoring</i> kandungan nutrisi dan bakteri				5				9				13				17				21					25				29	
18	Kontrol nutrisi dan bakteri pasca penanganan													14																28	

No	Perlakuan	Hari Setelah Tumpahan																													
		31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
1	Isolasi wilayah terdampak																														
2	Penutupan akses untuk umum																														
3	Investigasi tumpahan minyak																														
4	Penghentian sumber pencemar																														
5	Pemetaan area terdampak																														
6	Permodelan dispersi minyak																														
7	Perhitungan prakiraan volume tumpahan																														
8	Pemasangan <i>oil boom</i>																														
9	Penggunaan <i>weir oil skimmer</i>																														
10	Penyediaan pupuk <i>water soluble</i>																														
11	Penyediaan pupuk SRF																														
11	Pelaksanaan biostimulasi (pupuk <i>water soluble</i>)																														
13	Persiapan inokulum bakteri																														
14	Pembuatan inokulum bakteri																														
15	Pelaksanaan bioaugmentasi tahap pertama																														
12	Pelaksanaan biostimulasi (pupuk <i>SRF</i>)																														
13	Persiapan inokulum bakteri				34																										
14	Pembuatan inokulum bakteri					35	36																								
16	Pelaksanaan bioaugmentasi tahap kedua																														
17	<i>Monitoring</i> kandungan nutrisi dan bakteri				33				37				41				45				48				53				57		
18	Kontrol nutrisi dan bakteri pasca penanganan												42																56		

4.7 Perbandingan Aplikasi Bioaugmentasi dan Biostimulasi Kedua Studi Kasus

Setelah dilakukan serangkaian analisis dan penerapan teori bioaugmentasi dan biostimulasi tumpahan minyak mentah pada studi kasus, dapat ditabulasi poin-poin utama yang membedakan kedua studi kasus. Poin yang dibandingkan mulai dari geografi dan iklim perairan, profil tumpahan, faktor penyisih minyak mentah, biostimulasi, dan bioaugmentasi itu sendiri. Adapun perbandingan tersebut seperti yang tertera pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Tabulasi Pengaplikasian Bioaugmentasi dan Biostimulasi Pada Studi Kasus

Faktor Pemanding	Teluk Balikpapan 2018	<i>Southern California</i> 2021
Kondisi Perairan	Perairan laut semi tertutup	Perairan terbuka / <i>open sea</i>
Geografi Perairan	Berupa Teluk, hilir sungai, pantai, pelabuhan, dan berbatasan dengan Selat Makassar	Berupa pantai, laguna, laut lepas, pelabuhan, dan berbatasan dengan Samudera Pasifik
Kondisi iklim	Tropis	Sub-tropis
Kondisi musim ketika kejadian	Awal musim kemarau	Musim Gugur
Prakiraan temperatur udara	Data Stasiun Meteorologi Sultan Aji Muhammad Sulaiman Sepingan 31 Maret 2018 hingga 2 April 2018 T minimum = 23°C – 24°C T maksimum = 30,5°C – 31,9°C T rata-rata = 25,6°C – 27,7°C	Data temperatur timeanddate.com/weather 1 Oktober 2021 hingga 3 Oktober 2021 T minimum = 12°C – 22°C T maksimum = 28°C – 31°C T rata-rata = 23°C – 25°C
Kandungan nutrisi alami	Lebih banyak kandungan nutrisi karena berada di hilir sungai	Lebih sedikit karena berbatasan langsung dengan Samudera Pasifik
Spesies Bakteri	Menggunakan bakteri hidrokarbonoklastik yang bersifat heterotrof dan autotrof serta yang dapat hidup pada kondisi aerob dan anaerob	Menggunakan bakteri hidrokarbonoklastik yang bersifat heterotrof dan autotrof serta yang dapat hidup pada kondisi aerob dan anaerob
Viskositas Minyak Mentah	Lebih rendah (lebih cair)	Lebih tinggi (lebih kental)
Kandungan Nutrien	Perairan laut tropis secara umum lebih kaya akan nutrisi terutama yang berbatasan dengan muara sungai	Perairan laut subtropis lebih rendah kandungan nutrisi dibanding perairan tropis
Kelarutan Oksigen	Pada suhu yang lebih hangat memiliki kelarutan rendah	Pada suhu yang lebih rendah memiliki kelarutan tinggi
Kelarutan Nutrien	Pada suhu lebih hangat kelarutan nitrogen dan fosfor lebih rendah	Diperkirakan memiliki kelarutan nitrogen dan fosfor yang lebih tinggi
Metabolisme bakteri, ditinjau dari kelarutan nutrisi dan oksigen	Lebih lambat	Lebih cepat
Metabolisme bakteri, ditinjau dari iklim dan kondisi perairan	Dapat berlangsung lebih cepat akibat faktor penyinaran matahari dan kelimpahan nutrisi	Dapat berlangsung lebih lambat akibat faktor penyinaran matahari yang lebih terbatas dan kelimpahan nutrisi yang lebih sedikit
Volume Tumpahan	6.359,49 m ³	93,48 m ³
Penyebab Tumpahan	Putusnya pipa distribusi bawah laut dari <i>reservoir</i> minyak mentah menuju kilang pengolahan minyak mentah	Putusnya pipa distribusi bawah laut dari <i>oil rig</i> minyak mentah menuju <i>reservoir</i> minyak mentah
Respon penanganan awal	Lambat, sehingga berdampak pada besarnya volume tumpahan, terjadinya	Cepat, sehingga volume tumpahan bisa diminimalisir dan kerusakan lingkungan

Faktor Pemanding	Teluk Balikpapan 2018	Southern California 2021
	kebakaran, dan timbulnya korban jiwa	tidak terlalu parah.
<i>Recovery</i> metode fisik (<i>oil boom</i> dan <i>oil skimmer</i>)	Lebih besar, karena arus laut yang cenderung lemah dan berupa perairan semi tertutup	Lebih rendah, karena arus laut cukup kuat dan berupa perairan terbuka
% <i>Recovery</i> metode fisik	36,5%	22,45%
Perkiraan persentase evaporasi akibat pengaruh suhu	20%	15%
Potensi terjadinya <i>wash out</i>	Sedang	Cukup tinggi
Perkiraan durasi bioremediasi minyak mentah	2 - 3 bulan	1,5 – 2 bulan
Potensi terjadinya pencemaran sekunder	Cukup rendah	Sangat rendah,

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil kajian literatur yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan mengenai metode bioaugmentasi dan biostimulasi untuk menangani tumpahan minyak mentah di lingkungan laut seperti berikut ini:

1. Bioaugmentasi menggunakan konsorsium bakteri dengan karakteristik metabolisme komplementer lebih unggul dibanding kultur tunggal.
2. Bakteri indigen dan eksogen sama-sama diperlukan untuk mendegradasi tumpahan minyak di lingkungan laut dan dapat mencapai persentase biodegradasi yang tinggi.
3. Bakteri eksogen yang digunakan hendaknya memiliki kemampuan metabolisme terhadap minyak mentah yang memiliki susunan kompleks.
4. Bioaugmentasi dilakukan secara berkala untuk menghindari penurunan kecepatan degradasi minyak mentah.
5. Proses biostimulasi dilakukan terlebih dahulu untuk menstimulasi bakteri indigen dan secara berkala untuk mencegah eutrofikasi.
6. Rasio C:N:P yang optimum untuk pertumbuhan bakteri adalah 100:10:1.
7. Makronutrien dapat diperoleh dari pupuk inorganik dan organik, dengan sifat *water soluble*, *oleophilic*, dan *slow release fertilizer*.
8. Kebutuhan mikronutrien bakteri dapat berasal dari kandungan minyak mentah, air laut, dan pupuk *slow release*.

5.2 Saran

Saran dari kajian literatur ini adalah seperti berikut:

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terkait kebutuhan mikronutrien bakteri hidrokarbonoklastik.
2. Diperlukan penelitian terkait ketahanan protozoa sebagai predator bakteri pada kondisi lingkungan laut tercemar minyak
3. Diperlukan penelitian lanjutan untuk mengidentifikasi durasi setiap fase pertumbuhan bakteri pada proses bioaugmentasi dan biostimulasi.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Abouee Mehrizi, E., Kermani, M., Farzadkia, M., Esarfili, A., & Ghorbanian, M. (2019). Study of improvement of bioremediation performance for the degradation of petroleum hydrocarbons in oily sludge by a chemical pretreatment strategy. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 21(5), 1052–1062. <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00848-y>
- Abdi, N. 2018. Perairan Teluk Balikpapan Sudah Bersih Dari Minyak. <<https://kaltim.antaranews.com/berita/45521/perairan-teluk-balikpapan-sudah-hampir-bersih-dari-minyak>> diakses pada tanggal 4 Mei 2022
- Adams, C., Frantz, J., & Bugbee, B. (2013). Macro- and micronutrient-release characteristics of three polymer-coated fertilizers: Theory and measurements. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 176(1), 76–88. <https://doi.org/10.1002/jpln.201200156>
- Adiela, N., Nasir, M., & Yaakub, N. (2021). Study on Marine Water Quality Parameters in Keluang Kecil River Estuary at Bukit Keluang , Terengganu. *Journal of Agrobiotechnology*, 12, 140–149. <http://dx.doi.org/10.37231/jab.2021.12.1S.279>
- Agarry, S. E. (2017). Statistical Optimization and Kinetic Studies of Enhanced Bioremediation of Crude Oil - Contaminated Marine Water Using Combined Adsorption-Biostimulation Strategy. *J. Appl. Sci. Environ. Manage.*
- Agbaji, J. E., Nwaichi, E. O., & Abu, G. O. (2020). Optimized production of bioremediation agent for application in theeco-recovery of oil spill site. *Society of Petroleum Engineers - SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition 2020, NAIC 2020*, 1–19. <https://doi.org/10.2118/203654-ms>
- Ahyadi, M. Y., Syarifudin, A. P., Khairunnisa, A. Z., Ximenes, J. D., & Hamdi, M. H. (2021). Analisis Dampak Oil Spill Di Teluk Balikpapan Terhadap Kehidupan Masyarakat Dalam Perspektif Hukum Dan Lingkungan. *Bumi Lestari Journal of Environment*, 21(1), 18. <https://doi.org/10.24843/blje.2021.v21.i01.p03>
- Al-Khayat, R. H., Al-Baghdadi, M. A. R. S., Neama, R. A., & Al-Waily, M. (2018). Optimization CFD study of erosion in 3D elbow during transportation of crude oil contaminated with sand particles. *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*, 7(3), 1420–1428. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.14180>
- AlKaabi, N., Al-Ghouti, M. A., Jaoua, S., & Zouari, N. (2020). Potential for native hydrocarbon-degrading bacteria to remediate highly weathered oil-polluted soils in Qatar through self-purification and bioaugmentation in biopiles. *Biotechnology Reports*, 28, e00543. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00543>
- American Petroleum Institute, National Oceanic and Atmospheric Administration, US Coast Guard, & US Environmental Protection Agency. (2010). *Characteristics of Response Strategies : A Guide for Spill Response Planning in Marine Environments*. March, 80.
- Aspiany, Anggoro, S., Purwanti, F., & Gunawan, B. I. (2019). Evaluating Ecotourism Development in Bontang: Water Quality, Compatibility, and Carrying Capacity. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 370(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/370/1/012049>
- Astuti, A. D., & Titah, H. S. (2020). Studi Fitoremediasi Polutan Minyak Bumi di WilayahPesisir Tercemar Menggunakan Tumbuhan Mangrove(Studi Kasus: Tumpahan Minyak Mentah SumurYYA-1 Pesisir Karawang Jawa Barat). *Jurnal Teknik ITS*, 9(2), F111–F116. <http://ejournal.its.ac.id/index.php/teknik/article/view/53046>
- Ayu, J., Sabli, E., & Sulhaswardi, S. (2019). UJI PEMBERIAN PUPUK NPK MUTIARA DAN PUPUK ORGANIK CAIR NASA TERHADAP PERTUMBUHAN DAN HASIL TANAMAN MELON (Cucumis melo L.). *Dinamika Pertanian*, 33(1), 103–114.

[https://doi.org/10.25299/dp.2017.vol33\(1\).3822](https://doi.org/10.25299/dp.2017.vol33(1).3822)

- Banet, G., Turaani, A. K., Farber, R., Zvuloni, R. A., Rotem, N., Stavi, I., & Cahan, R. (2021). The effects of biostimulation and bioaugmentation on crude oil biodegradation in two adjacent terrestrial oil spills of different age, in a hyper-arid region. *Journal of Environmental Management*, 286(March), 112248. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112248>
- Behera, Ipsita Dipamitra; Nayak, Manoranjan; Mishara, Asmita; Meikap, Bhim Charan; Sen, R. (2022). Strategic implementation of integrated bioaugmentation and biostimulation for efficient mitigation of petroleum hydrocarbon pollutants from terrestrial and aquatic environment. *Marine Pollution Bulletin*, 1–9.
- Behera, I. D., Nayak, M., Biswas, S., Meikap, B. C., & Sen, R. (2021). Enhanced biodegradation of total petroleum hydrocarbons by implementing a novel two-step bioaugmentation strategy using indigenous bacterial consortium. *Journal of Environmental Management*, 292(January), 112746. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112746>
- Bhattacharya, M., Guchhait, S., Biswas, D., & Singh, R. (2019). Evaluation of a microbial consortium for crude oil spill bioremediation and its potential uses in enhanced oil recovery. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 18(January), 101034. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101034>
- Bidja Abena, M. T., Li, T., Shah, M. N., & Zhong, W. (2019). Biodegradation of total petroleum hydrocarbons (TPH) in highly contaminated soils by natural attenuation and bioaugmentation. *Chemosphere*, 234, 864–874. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.06.111>
- Bull, A. S., & Love, M. S. (2019). Worldwide oil and gas platform decommissioning: A review of practices and reefing options. *Ocean and Coastal Management*, 168(September 2018), 274–306. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.10.024>
- Carey, J. (Huntington B. P. D. (2021). *City of Huntington Beach Provides Update on Yesterday's Oil Spill*.
- Chandra, H., Sari, P., Triajie, H., & Junaedi, A. S. (2021). *Potensi Konsorsium Sampel Air Pelabuhan Kamal dan Bittern dalam Mendegradasi Solar Potensi Konsorsium Sampel Air Pelabuhan Kamal dan Bittern dalam Mendegradasi Solar*. August. <https://doi.org/10.14710/jkt.v24i2.10097>
- Chen, W., Kong, Y., Li, J., Sun, Y., Min, J., & Hu, X. (2020). Enhanced biodegradation of crude oil by constructed bacterial consortium comprising salt-tolerant petroleum degraders and biosurfactant producers. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 154(August), 105047. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2020.105047>
- Darmayati, Y., Sanusi, H. S., Prartono, T., Santosa, D. A., & Nuhsin, R. (2017). Optimal bacterial density and fertilizer dosage for bioremediation of oil contaminated sandy beach: A case of Cilacap, Indonesia. *Biotropia*, 24(3), 182–191. <https://doi.org/10.11598/btb.2017.24.3.611>
- Decesaro, A., Machado, T. S., Cappellaro, A. C., Reinehr, C. O., Thomé, A., & Colla, L. M. (2017). Biosurfactants during in situ bioremediation: factors that influence the production and challenges in evaluation. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(26), 20831–20843. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9778-7>
- Dell'anno, F., Brunet, C., van Zyl, L. J., Trindade, M., Golyshin, P. N., Dell'anno, A., Ianora, A., & Sansone, C. (2020). Degradation of hydrocarbons and heavy metal reduction by marine bacteria in highly contaminated sediments. *Microorganisms*, 8(9), 1–18. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8091402>
- Dicky, K., & Ratni, N. (2021). *Bioremediasi Tanah Tercemar Hidrokarbon*. 2, 60–66.

- Djoko, G. dkk. (2019). *Klimatologi Pertanian*.
- Douglas, D. and Stelloh, T. 2021. Oil Spill of California Coast Closes Pipeline, Prompts Warnings of Ecological Disaster. <<https://www.nbcnews.com/news/us-news/major-cleanup-operation-launched-after-oil-slick-detected-southern-california-n1280638>> diakses pada tanggal 6 Mei 2022
- EPA. (1999). Understanding Oil Spills In Freshwater Environments. *Response to Oil Spills*, 7(3), 37–44.
- Esenkulova, S., Suchy, K. D., Pawlowicz, R., Costa, M., & Pearsall, I. A. (2021). Harmful Algae and Oceanographic Conditions in the Strait of Georgia, Canada Based on Citizen Science Monitoring. *Frontiers in Marine Science*, 8(September). <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.725092>
- Fahmi, R., Saleh, M. S., & Isya, M. (2017). Pengaruh Lama Rendaman Kotoran Sapi Terhadap Durabilitas Campuran Aspal Beton Menggunakan Aspal Pen.60/70 Yang Di Substitusi Limbah Ethylene Vinyl Acetate (Eva). *Jurnal Teknik Sipil*, 1(3), 571–580. <https://doi.org/10.24815/jts.v1i3.9996>
- Fatima, K., Imran, A., Engineering, G., Saeed, M. N., Afzal, M., & Engineering, G. (2017). *Plant-bacteria synergism : An innovative approach for the remediation of crude oil-contaminated soils Review contaminated soils. February 2018*. <https://doi.org/10.25252/SE/17/51346>
- Garini, B. N., Suprijanto, J., & Pratikto, I. (2021). Kandungan Klorofil-a dan Kelimpahan di Perairan Kendal, Jawa Tengah. *Journal of Marine Research*, 10(1), 102–108. <https://doi.org/10.14710/jmr.v10i1.28655>
- Gholami-Shiri, J., Mowla, D., Dehghani, S., & Setoodeh, P. (2017). Exploitation of novel synthetic bacterial consortia for biodegradation of oily-sludge TPH of Iran gas and oil refineries. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(3), 2964–2975. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.05.056>
- Gomes, M., Correia, A., Pinto, L., Sá, C., Brotas, V., & Mateus, M. (2020). Coastal Water Quality in an Atlantic Sea Bass Farm Site (Sines, Portugal): A First Assessment. *Frontiers in Marine Science*, 7(April), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00175>
- Government Public Relation. 2021. Proyek Pengembangan Kilang Pertamina Balikpapan Kejar Target. <<https://bumn.go.id/post/proyek-pengembangan-kilang-pertamina-balikpapan-kejar-target>> diakses pada tanggal 15 April 2022
- Gruber, N. (2008). *The Marine Nitrogen Cycle : Overview and Challenges*.
- Gurav, R., Lyu, H., Ma, J., Tang, J., Liu, Q., & Zhang, H. (2017). Degradation of n-alkanes and PAHs from the heavy crude oil using salt-tolerant bacterial consortia and analysis of their catabolic genes. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(12), 11392–11403. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8446-2>
- Gusmawati, N. F., Puspita, C. D., & Ratnawati, I. H. (2020). *Condition of Coral Reef Ecosystem After Oil Spill Event in the. 16(1)*, 59–70.
- Habibi, A., & Babaei, F. (2017). Biological Treatment of Real Oilfield-Produced Water by Bioaugmentation with Sophorolipid-Producing *Candida catenulata*. *Environmental Processes*, 4(4), 891–906. <https://doi.org/10.1007/s40710-017-0268-1>
- Hakim, M. A., Takwanto, A., Kusuma, R. M., Kimia, T., Malang, P. N., Soekarno, J., No, H., Cepu, P. M., Raya, J., & No, S. (2021). EVALUASI NERCA MASSA KINERJA KOLOM FRAKSINASI C-1 MINYAK DAN GAS BUMI CEPU. *Distilat Jurnal Teknologi Separasi*, 7(9), 373–377.
- Hamdan, H. Z., & Salam, D. A. (2020). Microbial community evolution during the aerobic biodegradation of petroleum hydrocarbons in marine sediment microcosms : Effect of biostimulation and seasonal variations *. *Environmental Pollution*, 265, 114858.

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114858>

- Handrianto, P. (2018). MIKROORGANISME PENDEGRADASI TPH (TOTAL PETROLEUM HYDROCARBON) SEBAGAI AGEN BIOREMEDIASI TANAH TERCEMAR MINYAK BUMI (Review Article). *Jurnal SainHealth*, 2(2), 35. <https://doi.org/10.51804/jsh.v2i2.287.35-42>
- Harmesa. (2020). TEKNIK-TEKNIK REMEDIASI SEDIMEN TERKONTAMINASI LOGAM BERAT. *Oseana*, 45, 1–16.
- Hasanah, I., Ihsan, Y. N., Mulyani, Y., & Riantini, I. (2018). Degradasi (Benzena) Dengan Penambahan Nitrat Dan Bakteri Dari Sedimen Pesisir Karangsong Kabupaten Indramayu. *Jurnal Perikanan Dan Kelautan*, 88(1), 88–94.
- Hassanshahian, M., Emtiazi, G., Caruso, G., & Cappello, S. (2014). Bioremediation (bioaugmentation/biostimulation) trials of oil polluted seawater: A mesocosm simulation study. *Marine Environmental Research*, 95, 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2013.12.010>
- Hazaimah, M. D., & Ahmed, E. S. (2021). Bioremediation perspectives and progress in petroleum pollution in the marine environment : a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 54238–54259.
- HKEPD. (2018). Marine water quality in Hong Kong in 2018. *Environmental Protection Department*, 33. <http://wqrc.epd.gov.hk/pdf/water-quality/annual-report/MarineReport2015eng.pdf%0Ahttp://www.epd.gov.hk/epd/eindex.html>
- Holifah, S. S. H. (2018). Analisis Penambahan Kotoran Kambing dan Kuda pada Proses Bioremediasi Oil Sludge di Pertambangan desa Wonocolo. 7(1), 1–8.
- Ibrar, M., & Zhang, H. (2020). Construction of a hydrocarbon-degrading consortium and characterization of two new lipopeptides biosurfactants. *Science of the Total Environment*, 714, 136400. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136400>
- Ishida, H., Isono, R. S., Kita, J., & Watanabe, Y. W. (2021). Long-term ocean acidification trends in coastal waters around Japan. *Scientific Reports*, 11(1), 1–7. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84657-0>
- Januar, H. I. (2018). SAMPLING DESIGN FOR WATER QUALITY MONITORING IN MARINE RESERVE : A STUDY CASE AT BANDA SEA CONSERVATION. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam Dan Lingkungan*, 8(3), 296–300. <https://doi.org/10.29244/jpsl.8.3.296-300>
- Jimoh, A. A., Osebhahiemen, O., & Rasheed, I. (2022). Prospects in the bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminants from hypersaline environments : A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19299-4>
- Jones, B. 2021. Why the Huntington Beach Oil Spill is so Harmful to Wildlife. < <https://www.vox.com/down-to-earth/22708654/oil-spills-wildlife-huntington-beach-california>> diakses pada tanggal 6 Mei 2022
- Kegler, H. F., Lukman, M., Teichberg, M., Plass-Johnson, J., Hassenrück, C., Wild, C., & Gärdes, A. (2017). Bacterial community composition and potential driving factors in different reef habitats of the spermonde archipelago, Indonesia. *Frontiers in Microbiology*, 8(APR). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00662>
- Kehutanan, K. L. H. dan. (2018). Laporan Tim Penanganan Kejadian Tumpahan Minyak (Oil Spill) di Perairan Teluk Balikpapan Kota Balikpapan dan Kabupaten Penajam Pasir Utara, Provinsi Kalimantan Timur. April, 1–13.
- Kementerian ESDM. (2020). ATLAS Keselamatan Migas Zero Unplanned Shutdown Zero Fatality. 3, 1–218.
- Keramea, P., Spanoudaki, K., Zodiatis, G., Gikas, G., & Sylaios, G. (2021). Oil spill

- modeling: A critical review on current trends, perspectives, and challenges. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(2), 1–41. <https://doi.org/10.3390/jmse9020181>
- Komisi VI DPR, R. (2019). *Laporan Kunjungan Kerja Spesifik Komisi VI DPR RI Ke PT Pertamina (Persero) Di Provinsi Kalimantan Timur*. 1–71.
- Kong, X., Liu, Y., Jian, H., Su, R., Yao, Q., & Shi, X. (2017). New approach for rapid assessment of trophic status of Yellow Sea and East China Sea using easy-to-measure parameters. *Journal of Ocean University of China*, 16(5), 781–792. <https://doi.org/10.1007/s11802-017-3203-1>
- Koolivand, A., Abtahi, H., Villaseñor, J., Saeedi, R., Godini, K., & Parhamfar, M. (2020). Effective scale-up of oily sludge bioremediation from a culture-based medium to a two-phase composting system using an isolated hydrocarbon-degrading bacterium: effect of two-step bioaugmentation. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22(5), 1475–1483. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01036-z>
- Koto, J., & Putrawidjaja, M. (2018). Subsea pipeline damaged in Balikpapan Bay caused by anchor load. *Journal of Subsea and Offshore*, 14(1), 6–12.
- Kumar, V., Kumar, M., & Prasad, R. (2018). *Microbial Action on Hydrocarbons*.
- Kurniawan, A., Wirasembada, Y. C., Ningtyas, I. M., Novriansyah, A., Rafi, M., & Effendi, A. J. (2018). *Hidrokarbon Aromatik Polisiklik pada Lahan Tercemar Limbah Minyak Bumi : Tinjauan Pertumbuhan Mikro-*. 16(1), 9–24. <https://doi.org/10.14710/jil.16.1.9-24>
- Kuzhaeva, A., & Berlinskii, I. (2018). Effects of oil pollution on the environment. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 18(5.1), 313–320. <https://doi.org/10.5593/sgem2018/5.1/S20.041>
- Laothamteep, N., Naloka, K., & Pinyakong, O. (2022a). Bioaugmentation with zeolite-immobilized bacterial consortium OPK results in a bacterial community shift and enhances the bioremediation of crude oil-polluted marine sandy soil microcosms. *Environmental Pollution*, 292(PA), 118309. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118309>
- Laothamteep, N., Naloka, K., & Pinyakong, O. (2022b). Bioaugmentation with zeolite-immobilized bacterial consortium OPK results in a bacterial community shift and enhances the bioremediation of crude oil-polluted marine sandy soil microcosms ☆. *Environmental Pollution*, 292(PA), 118309. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118309>
- Levenson, E. 2021. A Timeline of the California Oil Spill, from the First Report to the Clean up. <<https://edition.cnn.com/2021/10/06/us/huntington-beach-california-oil-spill-timeline/index.html>> diakses pada tanggal 6 Mei 2022
- Li, T., Sun, G., Yang, C., Liang, K., Ma, S., & Huang, L. (2018). Using self-organizing map for coastal water quality classification: Towards a better understanding of patterns and processes. *Science of the Total Environment*, 628–629, 1446–1459. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.163>
- Li, X., Chen, Y., Du, X., Zheng, J., Lu, D., & Liu, Z. (2021). Ecological response in the integrated process of biostimulation and bioaugmentation of diesel-contaminated soil. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(14). <https://doi.org/10.3390/app11146305>
- Lin, H., Wang, J., Liu, W., Liu, K., Zhang, S., He, X., Huang, Y., Lin, J., Mou, J., Zheng, C., & Yan, T. (2017). Fouling community characteristics in subtropical coastal waters of the southwestern East China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 36(10), 70–78. <https://doi.org/10.1007/s13131-017-1007-1>
- Mahjoubi, M., Cappello, S., Souissi, Y., Jaouani, A., & Cherif, A. (2018). Microbial Bioremediation of Petroleum Hydrocarbon – Contaminated Marine Environments.

- Recent Insights in Petroleum Science and Engineering*.
<https://doi.org/10.5772/intechopen.72207>
- Maitra, S. (2018). *In Situ Bioremediation - An Overview*. 4(576), 576–598.
<https://doi.org/10.26479/2018.0406.45>
- Many, N., Zaki, M. R. S., & Agatha, C. E. (2021). Marine Casualty Caused by Ever Judger in Balikpapan Bay: Human Error or Technical Factors? *Proceedings of the 1st UMGESHIC International Seminar on Health, Social Science and Humanities (UMGESHIC-ISHSSH 2020)*, 585, 582–587. <https://doi.org/10.2991/assehr.k.211020.083>
- Mapelli, F., Scoma, A., Michoud, G., Aulenta, F., Boon, N., Borin, S., Kalogerakis, N., & Daffonchio, D. (2017). Biotechnologies for Marine Oil Spill Cleanup: Indissoluble Ties with Microorganisms. *Trends in Biotechnology*, 35(9), 860–870.
<https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2017.04.003>
- Mayberry, A. K. (Associate A. for P. S. (2021). Corrective Action Order Oil Spill. U.S. Department of Transportation Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration.
- Meirinawati, H. (2017). Transformasi Nitrogen di Laut. *Oseana*, XLII, 36–46.
- Meirinawati, H., & Iskandar, M. R. (2019). Karakteristik Fisika dan Kimia Perairan di Laut Jawa – Ambang Dewakang. *Oseanologi Dan Limnologi Di Indonesia*, 4(1), 41.
<https://doi.org/10.14203/oldi.2019.v4i1.140>
- Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia. 2004. Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 51 Tahun 2004. Kementerian Lingkungan Hidup. Jakarta
- Mijaya, M. R. S., Yanti, N. A., Ardiansyah, A., & Muhiddin, N. H. (2019). Isolasi dan Seleksi Bakteri Pendegradasi Solar Dari Pelabuhan Penyeberangan Kendari – Wawonii, Sulawesi Tenggara. *BioWallacea: Jurnal Penelitian Biologi (Journal of Biological Research)*, 6(2), 995. <https://doi.org/10.33772/biowallacea.v6i2.8825>
- Mishra, A. K., & Kumar, G. S. (2015). Weathering of Oil Spill: Modeling and Analysis. *Aquatic Procedia*, 4(Icwrcoe), 435–442. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.058>
- Mnif, I., & Ghribi, D. (2015). High molecular weight bioemulsifiers, main properties and potential environmental and biomedical applications. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 31(5), 691–706. <https://doi.org/10.1007/s11274-015-1830-5>
- Mustikasari, E., Ramdhan, M., Amry, S. N., Heriati, A., Kadarwati, U. R., Prihantono, J., & Pryambodo, D. G. (2019). Analisis Karakteristik Dimensi Ekologi Pulau-Pulau Kecil Kabupaten Nunukan, Kalimantan Utara. *Jurnal Kelautan Nasional*, 14(1), 47–57.
<http://ejournal-balitbang.kkp.go.id/index.php/jkn/article/download/7458/pdf>
- NASA Applied Science. 2021. California Oil Spill 2021.
 <<https://appliedsciences.nasa.gov/what-we-do/disasters/disasters-activations/california-oil-spill-2021>> diakses pada tanggal 6 Mei 2022
- Ng, Y. J., Lim, H. R., Khoo, K. S., Chew, K. W., Chieh, D. J., Bilal, M., Siti, H., Munawaroh, H., & Show, P. L. (2022). Recent advances of biosurfactant for waste and pollution bioremediation: Substitutions of petroleum-based surfactants. *Environmental Research*, 113126. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113126>
- Nisa'Adzini, I., Dermawan, D., & Apriani, M. (2019). Pengaruh Penambahan Bakteri Pseudomonas aeruginosa pada Bioremediasi Total Petroleum Hydrocarbon Penambangan Minyak Bumi Tradisional di Jawa Timur. *Conference Proceeding on Waste Treatment Technology*, 2(1), 1–6.
- Nishijima, W., Umehara, A., Sekito, S., Wang, F., Okuda, T., & Nakai, S. (2018). Determination and distribution of region-specific background Secchi depth based on long-term monitoring data in the Seto Inland Sea, Japan. *Ecological Indicators*, 84(September 2017), 583–589. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.09.014>
- Nishijima, W., Umehara, A., Yamamoto, K., Asaoka, S., Fujii, N., Otani, S., Wang, F.,

- Okuda, T., & Nakai, S. (2021). Temporal distribution of primary and secondary production estimated from water quality data in the Seto Inland Sea, Japan. *Ecological Indicators*, 124(August 2020), 107405. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107405>
- Nishimoto, M. M., Simons, R. D., & Love, M. S. (2019). Offshore oil production platforms as potential sources of larvae to coastal shelf regions off southern California. *Bulletin of Marine Science*, 95(4), 535–558. <https://doi.org/10.5343/bms.2019.0033>
- Novianty, R., Saryono, Awaluddin, A., & Pratiwi, Wahyu, N. (2020). Jurnal Teknik Kimia USU Bakteri Indigen Pendegradasi Hidrokarbon Minyak Bumi. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 09(1), 34–40.
- Nur, A. A., Radjawane, I. M., Suprijo, T., & Mandang, I. (2020). Numerical Modeling of Currents Circulation in Balikpapan Bay during Oil Spill Event on March 31, 2018. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 618(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/618/1/012005>
- Nurfarahin, A. H., Mohamed, M. S., & Phang, L. Y. (2018). Culture medium development for microbial-derived surfactants production—an overview. *Molecules*, 23(5), 1–26. <https://doi.org/10.3390/molecules23051049>
- Nurjanah, I. (2018). UJI POTENSI BAKTERI PENDEGRADASI MINYAK SOLAR DI PERAIRAN PELABUHAN TANJUNG PERAK SURABAYA. *Skripsi Universitas Islam Negeri Sunan Ampel*, 1. <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-59379-1%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-420070-8.00002-7%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.ab.2015.03.024%0Ahttps://doi.org/10.1080/07352689.2018.1441103%0Ahttp://www.chile.bmw-motorrad.cl/sync/showroom/lam/es/>
- Nurmalasari, R. (2018). Bioremediasi Tanah Terkontaminasi Solar. *Thesis*.
- Nuryana, D. (2017). Review: Bioremediasi Pencemaran Minyak Bumi. *Journal of Earth Energy Engineering*, 6(2), 9–13. <https://doi.org/10.22549/jee.v6i2.941>
- Ortmann, A. C., Cobanli, S. E., Wohlgeschaffen, G., MacDonald, J., Gladwell, A., Davis, A., Robinson, B., Mason, J., & King, T. L. (2020). Measuring the fate of different diluted bitumen products in coastal surface waters. *Marine Pollution Bulletin*, 153(February). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111003>
- Panjaitan, C. O. (2021). *Kajian Bioremediasi Pada Tanah Tercemar Minyak Mentah (Crude Oil)*. ITS.
- Paytan, A., & Mclaughlin, K. (2007). *The Oceanic Phosphorus Cycle*.
- Pemerintah Indonesia. 2014. Undang-Undang Republik Indonesia No. 32 Tahun 2014 tentang Kelautan. Sekretariat Negara. Jakarta
- Perdigão, R., Almeida, C. M. R., Magalhães, C., Ramos, S., Carolas, A. L., Ferreira, B. S., Carvalho, M. F., & Mucha, A. P. (2021). Bioremediation of petroleum hydrocarbons in seawater: Prospects of using lyophilized native hydrocarbon-degrading bacteria. *Microorganisms*, 9(11). <https://doi.org/10.3390/microorganisms9112285>
- Perdigão, R., Almeida, C. M. R., Santos, F., Carvalho, M. F., & Mucha, A. P. (2021). Optimization of an autochthonous bacterial consortium obtained from beach sediments for bioremediation of petroleum hydrocarbons. *Water (Switzerland)*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/w13010066>
- Pertamina. 2019. Refinery Unit V Balikpapan. <<https://www.pertamina.com/id/refinery-unit-v-balikpapan>> diakses pada tanggal 29 April 20
- Phulpoto, I. A., Hu, B., Wang, Y., Ndayisenga, F., Li, J., & Yu, Z. (2021). Effect of natural microbiome and culturable biosurfactants-producing bacterial consortia of freshwater lake on petroleum-hydrocarbon degradation. *Science of the Total Environment*, 751, 141720. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141720>
- Poddar, K., Sarkar, D., & Sarkar, A. (2019). Construction of potential bacterial consortia for

- efficient hydrocarbon degradation. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 144(August), 104770. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.104770>
- Polapa, F. S., Annisa, R. N., Annisa, R. N., Yanuarita, D., Yanuarita, D., Ali, S. M., & Ali, S. M. (2022). Quality Indeks dan Konsentrasi Logam Berat dalam Perairan dan Sedimen di Perairan Kota Makassar. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 20(2), 271–278. <https://doi.org/10.14710/jil.20.2.271-278>
- Poorsoleiman, M. S., Hosseini, S. A., Etminan, A., Abtahi, H., & Koolivand, A. (2020). Effect of two-step bioaugmentation of an indigenous bacterial strain isolated from oily waste sludge on petroleum hydrocarbons biodegradation: Scaling-up from a liquid mineral medium to a two-stage composting process. *Environmental Technology and Innovation*, 17, 100558. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100558>
- Pratama, S. F., & Handayani, D. (2021). Pengaruh Isolat *Pseudomonas* sp . dan *Bacillus* sp . dengan Biostimulasi Kompos Jerami Padi (*Oryza sativa* L .) Terhadap Penurunan Total Petroleum Hidrokarbon Tanah Tercemar Oli Bekas. *Journal Biosains*, 1(2), 322–328.
- Prianto, Teguh Arif; Manik, Henry M; Jaya, I. (2019). Pemetaan suhu laut di perairan teluk balikpapan menggunakan teknologi akustik tomografi pantai. *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis*, 11(1), 25–36.
- Puryono, S., Anggoro, S., Suryanti, & Anwar, I. S. (2019). Pengelolaan Pesisir Dan Laut Berbasis Ekosistem. In *Academia.Edu*. https://www.academia.edu/download/57461813/karya_mul.pdf
- Pusparani, R., Widyorini, N., & Jati, E. O. (2020). Jurnal Pasir Laut Jurnal Pasir Laut. *Pasir Laut*, 4(1), 16–21.
- Puspitasari, I., Trianto, A., & Suprijanto, J. (2020). *Eksplorasi Bakteri Pendegradasi Minyak dari Perairan Pelabuhan Tanjung Mas , Semarang*. 9(3), 281–288.
- Putra, M. A. E. (2010). *Optimasi Alokasi Minyak Mentah untuk Memenuhi Kebutuhan Kilang Pengolahan pada Perusahaan Perminyakan dengan Menggunakan Metode Program Linear*.
- Putri, M. R., Anwar, I. P., Sihotang, Z., Bernawis, L. I., Setiawan, A., Riza, M., Mandang, I., & Tatipatta, W. M. (2021). Observation and numerical modeling of physical oceanography in the Balikpapan Bay, East Kalimantan: Preliminary results. *Depik*, 10(2), 130–135. <https://doi.org/10.13170/depik.10.2.19259>
- Rahayu, D. R., & Mangkoedihardjo, S. (2022). Kajian Bioaugmentasi untuk Menurunkan Konsentrasi Logam Berat di Wilayah Perairan Menggunakan Bakteri (Studi Kasus: Pencemaran Merkuri di Sungai Krueng Sabee, Aceh Jaya). *Jurnal Teknik Its*, 11(1), F15–F21.
- Rahman, P. K. S. ., & Gakpe, E. (2008). Production, Characterisation and Applications of Biosurfactants-Review. *Biotechnology*, 7(2), 360–370. <http://tees.openrepository.com/tees/handle/10149/93896>
- Ramdhan, M., Arifin, T., & Arlyza, I. S. (2018). Pengaruh Lokasi Dan Kondisi Parameter Fisika-Kimia Oseanografi Untuk Produksi Rumput Laut di Wilayah Pesisir Kabupaten Takalar , Sulawesi Selatan. *Jurnal Kelautan Nasional*, 13(3), 163–172. <http://dx.doi.org/10.15578/jkn.v13i3.6288>
- Redaksi. 2018. Penanganan Tumpahan Minyak di Teluk Balikpapan Cukup Efektif. <<https://www.portonews.com/2018/oil-and-chemical-spill/penanganan-tumpahan-minyak-di-teluk-balikpapan-cukup-efektif/>> diakses pada tanggal 4 Mei 2022
- Redaksi. 2018. Polisi: Tumpahan Minyak di Teluk Balikpapan Berasal dari Pipa Pertamina. <<https://www.bbc.com/indonesia/indonesia-43640595>> diakses pada tanggal 4 Mei 2022
- Reijnhart, R., & Rose, R. (1982). Evaporation of crude oil at sea. *Water Research*, 16(8), 1319–1325. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(82\)90210-X](https://doi.org/10.1016/0043-1354(82)90210-X)

- Riskhany Yuliarti, Arteria widya U.L., I. T. S. N. (2017). *Proses Katalitik Pirolisis Untuk Cracking Bitumen Dari Asbuton Dengan Katalis Zeolit Alam*. 8.5.2017.
- Risky, F. U., Wijanarka, & Pujiyanto, S. (2019). Isolasi khamir penghasil enzim inulinase dari buah kersen (*Muntingia calabura*) serta pengaruh mikronutrien mangan (Mn) pada produksi enzimnya. *NICHE Journal of Tropical Biology*, 2(2), 27–37. <https://doi.org/10.14710/niche.2.2.27-37>
- Riyanto, C. L. R., Sumardi, S., Farisi, S., & Ekowati, C. N. (2021). Aktivitas Biosurfaktan *Serratia Marcescens* strain MBC1 dalam Mengemulsikan Solar dengan Variasi pH dan Media. *Jurnal Sumberdaya Alam Dan Lingkungan*, 8(3), 114–122. <https://doi.org/10.21776/ub.jsal.2021.008.03.3>
- Rizzo, C., Rappazzo, A. C., Michaud, L., De Domenico, E., Rochera, C., Camacho, A., & Lo Giudice, A. (2018). Efficiency in hydrocarbon degradation and biosurfactant production by *Joostella* sp. A8 when grown in pure culture and consortia. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 67, 115–126. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.08.007>
- Roy, A., Dutta, A., Pal, S., Gupta, A., & Sarkar, J. (2018). *Bioresource Technology Biostimulation and bioaugmentation of native microbial community accelerated bioremediation of oil refinery sludge*. 253(November 2017), 22–32. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.004>
- Sabhan. (2012). *Model Sebaran Tumpahan Minyak Di Perairan*. Institut Pertanian Bogor.
- Saha, R. C., Reza, A., Hasan, M. S., & Saha, P. (2019). *A review- bioremediation of oil CHE*
- Safutra, I. 2018. Dampak Kebakaran Teluk Balikpapan, 2 Nelayan Tewas, 2 Kapal Hangus. <<https://www.jawapos.com/jpg-today/01/04/2018/dampak-kebakaran-teluk-balipapan-2-nelayan-tewas-2-kapal-hangus/>> diakses pada tanggal 4 Mei 2022
- Sakaya, K., Salam, D. A., Campo, P., Salam, D. A., & Campo, P. (2019). Assessment of Crude Oil Bioremediation Potential of Seawater and Sediments from the Shore of Lebanon in Laboratory Microcosms. *Science of the Total Environment*, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.025>
- Salim, D., Yuliyanto, Y., & Baharuddin, B. (2017). Karakteristik Parameter Oseanografi Fisika-Kimia Perairan Pulau Kerumpunan Kabupaten Kotabaru Kalimantan Selatan. *Jurnal Enggano*, 2(2), 218–228. <https://doi.org/10.31186/jenggano.2.2.218-228>
- Samsudin, M. S., Azid, A., & Yunus, K. (2019). Marine water quality index trend from eight-year study of Klang Estuary. *Bioscience Research*, 16(S1), 59–68.
- Santas, R., Korda, A., Tenente, A., Buchholz, K., & Santas, P. (1999). Mesocosm assays of oil spill bioremediation with oleophilic fertilizers: Inipol, F1 or both? *Marine Pollution Bulletin*, 38(1), 44–48. [https://doi.org/10.1016/s0025-326x\(99\)80011-3](https://doi.org/10.1016/s0025-326x(99)80011-3)
- Sarifudin, A. 2018. Darurat Tumpahan Minyak di Teluk Balikpapan, 1000 Personel Dikerahkan Bersihkan Laut. <<https://news.okezone.com/read/2018/04/04/340/1882094/darurat-tumpahan-minyak-di-teluk-balikpapan-1-000-personel-dikerahkan-bersihkan-laut>> diakses pada tanggal 4 Mei 2022
- Sarkar, P., Roy, A., Pal, S., Mohapatra, B., Kazy, S. K., Maiti, M. K., & Sar, P. (2017). Enrichment and characterization of hydrocarbon-degrading bacteria from petroleum refinery waste as potent bioaugmentation agent for in situ bioremediation. *Bioresource Technology*, 242, 15–27. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.010>
- Sarubbo, L. A., Silva, G. C., Jos, I., Ribeiro, B. G., Silva, I. A., Twigg, M. S., & Banat, I. M. (2022). *Biosurfactants : Production , properties , applications , trends , and general perspectives*. 181(January). <https://doi.org/10.1016/j.bej.2022.108377>
- Sasongko, A. S., Cahyadi, F. D., Yonanto, L., Islam, R. S., & Destiyanti, N. F. (2020). Kandungan logam berat di perairan pulau tunda kabupaten serang provinsi banten.

- Manfish Journal*, 1(September), 90–95.
- Satya, Y. (2020). Oil Spill Combat Strategy and Lesson Learnt of Balikpapan Spill. 2020 *International Oil Spill Conference*, 1–8.
- Sayed, K., Baloo, L., & Sharma, N. K. (2021). Bioremediation of total petroleum hydrocarbons (Tph) by bioaugmentation and biostimulation in water with floating oil spill containment booms as bioreactor basin. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(5), 1–27. <https://doi.org/10.3390/ijerph18052226>
- Sukhinov, A., Chistyakov, A., Nikitina, A., Semenyakina, A., Korovin, I., & Schaefer, G. (2016). Modelling of oil spill spread. 2016 5th *International Conference on Informatics, Electronics and Vision, ICIEV 2016*, 1134–1139. <https://doi.org/10.1109/ICIEV.2016.7760176>
- Sun, Y., Chen, W., Wang, Y., Guo, J., Zhang, H., & Hu, X. (2021). Nutrient depletion is the main limiting factor in the crude oil bioaugmentation process. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 100, 317–327. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.07.025>
- Sunaryanto, R. (2017). Bioremediasi hidrokarbon minyak bumi menggunakan isolat indigenous. *Prosiding Seminar Nasional Inovasi Teknologi – SNITek 2017*, 147–153.
- Susilawati, D. R. (2019). Bioremediation Experiment Using Hydrocarbon Degrading Bacteria. *Jurnal Geologi Dan Sumberdaya Mineral*, 20(1), 1. <https://doi.org/10.33332/jgsm.v20i1.335>
- Suyatna, I., Riadi, R. I., Feriyanto, I. J., Ghitarina, Gunawan, B. I., Sasono, R. R., & Rafii, A. (2019). Determination of water quality condition from water samples around location of ship to ship transfer of coal in Balikpapan, East Kalimantan, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 348(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/348/1/012067>
- Syafitri, D., Sayuti, I., & Mahadi, I. (2022). Efektifitas Rasio Nutrien Bakteri Bacillus Cereus Strain IMB-11 Dalam Mendegradasi Pencemaran Biosolar. *Jurnal Biogenesis*, 18(1), 54–67.
- Syafrizal, Restiya Rahmani, Tri Partono, Zulkiflianim Onie Kristiawan, Novie Ardhyarini, Yanny Handayani, R. (2020). Biodegradasi Senyawa Hidrokarbon Minyak Bumi Menggunakan Aktifitas Konsorsium Sedimen Laut Dalam. *Lembaran Publikasi Minyak Dan Gas Bumi*, 54 No. 2(Agustus), 81–91.
- Syarah. (2019). *Reduksi Total Petroleum Hydrocarbon(Tph) Pada Tanah Terkontaminasi Minyak Bumi Melalui Soil Washing menggunakan Alkyl Benzene Sulfonate (ABS)*. 680. <http://repository.unbari.ac.id/374/>
- Tangahu, B. V., Titah, H. S., & Mangkoediharjo, S. 2018. *Teknologi Remediasi Lingkungan*. Surabaya: Mobius
- Tanjung, R. H. R., Hamuna, B., & Alianto. (2019). Assessment of water quality and pollution index in coastal waters of Mimika, Indonesia. *Journal of Ecological Engineering*, 20(2), 87–94. <https://doi.org/10.12911/22998993/95266>
- Tao, K., Liu, X., Chen, X., Hu, X., Cao, L., & Yuan, X. (2017). Biodegradation of crude oil by a defined co-culture of indigenous bacterial consortium and exogenous Bacillus subtilis. *Bioresource Technology*, 224, 327–332. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.073>
- Thomas, G. E. (2020). *An Evaluation of the Effects of Marine Oil-spills , Remediation Strategies , and Shipwrecks on Microbial Community Structure and Succession*. October.
- Truskewycz, A., Gundry, T. D., Khudur, L. S., Kolobaric, A., Taha, M., Aburto-medina, A., Ball, A. S., & Shahsavari, E. (2019). *Petroleum Hydrocarbon Contamination in Terrestrial Ecosystems — Fate and Microbial Responses*. 1–20.

- Tuan Hoang, A., Viet Pham, V., & Nam Nguyen, D. (2018). A Report of Oil Spill Recovery Technologies. *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(7), 4915–4928. <http://www.ripublication.com>
- Uyun, K. (2018). Dampak Variasi Pengemban Untuk Imobilisasi Bakteri Mixed Cultures Dalam Mendegradasi Minyak Bumi Pada Mikrokosmos Sedimen Laut. In *Skripsi*.
- Varjani, S. J. (2017). Microbial degradation of petroleum hydrocarbons. *Bioresource Technology*, 223, 277–286. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.037>
- Varjani, S. J., & Gnansounou, E. (2017). Microbial dynamics in petroleum oilfields and their relationship with physiological properties of petroleum oil reservoirs. *Bioresource Technology*, 245(August), 1258–1265. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.028>
- Varjani, S. J., & Upasani, V. N. (2017). International Biodeterioration & Biodegradation A new look on factors affecting microbial degradation of petroleum hydrocarbon pollutants. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 120, 71–83. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.02.006>
- Varjani, S., & Upasani, V. N. (2019). Influence of abiotic factors, natural attenuation, bioaugmentation and nutrient supplementation on bioremediation of petroleum crude contaminated agricultural soil. *Journal of Environmental Management*, 245(May), 358–366. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.070>
- Wahyuni, A. R. T. (2019). *Analisis Kemampuan Bakteri Dari Perairan Tercemar Yang Berpotensi Sebagai Agen Bioremediasi Limbah Hidrokarbon Minyak Solar* (pp. 1–126).
- Wahyuni, D. (2017). Karakteristik Morfologi dan Uji Aktivitas Bakteri Termofilik yang Terdapat di Kawasan Wisata IE Seuum kecamatan Masjid Raya Sebagai Penunjang Praktikum Mikrobiologi. *Skripsi*. <https://core.ac.uk/download/pdf/293465321.pdf>
- Wahyuningsih, N., Suharsono, & Fitriani, Z. (2021). *Kajian Kualitas Air Laut Di Perairan Kota Bontang Provinsi Kalimantan Timur (Study Of The Quality Of The Water Environment In Bontang City , East Borneo Province) Kota Bontang secara administratif merupakan bagian dari Provinsi Kalimantan Timur yang Kal. 4*, 56–66.
- Wardhani, W. K., & Titah, H. S. (2020). Studi Literatur Alternatif Penanganan Tumpahan Minyak Mentah Menggunakan *Bacillus subtilis* dan *Pseudomonas putida* (Studi Kasus: Tumpahan Minyak Mentah Sumur YYA-1). *Jurnal Teknik Its*, 9(2), 97–102.
- Wayoi, G.P.F. 2018. Bioremediasi Air Laut Terkontaminasi Limbah Minyak Menggunakan Bakteri *Pseudomonas aeruginosa*. Skripsi. Makassar : Universitas Hasanuddin
- Widodo, B L Hentri ; Wahyuni, E. T. (2020). Manajemen penanggulangan tumpahan minyak di laut akibat dari pegoperasian kapal. *Majalah Ilmiah Gema Maritim*, 22(1).
- Wiyantoko, B. (2016). *Modul Kuliah Kimia Petroleum*.
- Wu, M., Li, W., Dick, W. A., Ye, X., Chen, K., Kost, D., & Chen, L. (2017). Bioremediation of hydrocarbon degradation in a petroleum-contaminated soil and microbial population and activity determination. *Chemosphere*, 169, 124–130. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.059>
- Xia, M., Fu, D., Chakraborty, R., Singh, R. P., & Terry, N. (2019). Enhanced crude oil depletion by constructed bacterial consortium comprising bioemulsifier producer and petroleum hydrocarbon degraders. *Bioresource Technology*, 282(January), 456–463. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.131>
- Xu, R., & Obbard, J. P. (2003). Effect of Nutrient Amendments on Indigenous Hydrocarbon Biodegradation in Oil-Contaminated Beach Sediments. *Journal of Environment Quality*, 32(4), 1234. <https://doi.org/10.2134/jeq2003.1234>
- Xu, X., Liu, W., Tian, S., Wang, W., Qi, Q., Jiang, P., Gao, X., Li, F., Li, H., & Yu, H. (2018). Petroleum Hydrocarbon-Degrading Bacteria for the Remediation of Oil Pollution Under Aerobic Conditions: A Perspective Analysis. *Frontiers in Microbiology*,

9(December), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02885>

Yang, S., Xing, K., & Yang, Y. (2021). Offshore Oil Pollution and Prevention Measures. *E3S Web of Conferences*, 271, 02010. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127102010>

Yanyu, S. U. N., Hui, W., Junde, L. I., & Bin, W. (2018). Nutrient-enhanced n -alkanes biodegradation and succession of bacterial communities *. *Journal of Oceanology and Limnology*, 36(4), 1294–1303.

Ye, R., Liu, L., Wang, Q., Ye, X., Cao, W., He, Q., & Cai, Y. (2017). Identification of coastal water quality by multivariate statistical techniques in two typical bays of northern Zhejiang Province, East China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 36(2), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s13131-017-0981-7>

Yuniati, M. D. (2018). Bioremediation of petroleum-contaminated soil: A Review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 118(1), 1–7

Zainuddin, F., & Nofianti, T. (2022). PENGARUH NUTRIENT N DAN P TERHADAP PERTUMBUHAN RUMPUT LAUT PADA BUDIDAYA SISTEM TERTUTUP. *Effect of Nutrient N And P on Seaweed Growth in Closed System Cultivation*. 12(1), 116–124.

BIOGRAFI PENULIS



Penulis bernama lengkap Rizal Jamil Bahriansyah dengan kelahiran di Sumenep, 3 Desember 1999. Merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SDN Kebunagung II, SMP Negeri 1 Sumenep, dan SMA Negeri 1 Sumenep. Penulis melanjutkan pendidikan formal ke jenjang perguruan tinggi setelah lulus SMA pada tahun 2018. Penulis diterima sebagai mahasiswa S1 di Departemen Teknik Lingkungan, FTSPK ITS melalui jalur SNMPTN dan terdaftar dengan NRP 03211840000026.

Semasa kuliah, penulis aktif berkontribusi di Divisi Riset dan Teknologi HMTL ITS selama tiga tahun dan Lembaga Dakwah Departemen Teknik Lingkungan ITS Al-Kaun selama dua tahun. Selama kuliah, penulis aktif mengikuti kegiatan kepanitiaan, pelatihan dan seminar baik tingkat departemen hingga nasional. Penulis juga aktif pada bidang pengabdian masyarakat melalui Kampung Mitra HMTL ITS selama dua tahun dan pengabdian masyarakat terkait sertifikasi produk halal. Penulis juga memiliki pengalaman menjadi asisten laboratorium praktikum mikrobiologi lingkungan 2019 dan kimia lingkungan 2020. Penulis juga berkesempatan untuk mengikuti PKM 2020 hingga tahap finalis PIMNAS pada bidang Penelitian Eksakta dengan topik *recovery* material dan PKM 2021 sebagai peraih insentif PKM GT (Gagasan Tertulis) dengan topik penyediaan air bersih.



KEGIATAN ASISTENSI TUGAS AKHIR

Nama : Rizal Jamil Bahriansyah
NRP : 0321184000026
Judul : Kajian Teknik Bioaugmentasi dan Biostimulasi Untuk Mendegradasi Tumpahan Minyak Mentah di Lingkungan Laut

No	Tanggal	Keterangan Kegiatan / Pembahasan	Paraf
1	14-02-2022	Pembahasan terkait penggunaan dua studi kasus dan kerangka rancangan kajian literatur	
2	17-02-2022	Pembahasan terkait revisi proposal tugas akhir pasca seminar proposal	
3	22-04-2022	Pembahasan terkait pemenuhan makronutrien dan mikronutrien pada proses biostimulasi dan susunan bab kajian literatur	
4	16-05-2022	Asistensi sebelum seminar kemajuan	
5	8-06-2022	Pembahasan terkait kontrol bakteri setelah proses bioaugmentasi	
6	13-06-2022	Pembahasan terkait remediasi dengan metode fisik sebelum proses biostimulasi dan bioaugmentasi	
7	17-06-2022	Pembahasan terkait pemilihan bakteri yang akan digunakan pada studi kasus	
8	21-06-2022	Pembahasan terkait penambahan faktor evaporasi yang berdampak pada pengurangan volume tumpahan minyak mentah di lingkungan laut	
9	25-06-2022	Asistensi sebelum masa pengumpulan laporan tugas akhir	

Surabaya, 26 Juni 2022
Dosen Pembimbing,

Prof. Dr. Ir. Sarwoko Mangkoedihardjo, MScES



UTA-S1-TL-02 TUGAS AKHIR
Periode: Genap 2021/2022

Kode/SKS : RE184804 (0/6/0)
No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR UTA-02
Formulir Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing
Ujian Tugas Akhir

Nilai TOEFL 480

Hari, tanggal : Selasa, 12 Juli 2022

Pukul : 08.00 - 09.15 WIB

Lokasi : TL-105

Judul : Kajian Teknik Bioaugmentasi dan Biostimulasi untuk Mendegradasi Tumpahan Minyak Mentah di Lingkungan Laut

Nama : Rizal Jamil Bahriansyah

NRP. : 03211840000026

Topik : Studi Literatur

Tanda Tangan

No./Hal.	Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing Ujian Tugas Akhir
	<i>Serba ke semua arah pengujian</i>

Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-02 ke Sekretariat Program Sarjana
Formulir ini harus dibawa mahasiswa saat asistensi kepada Dosen Pembimbing
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Pembimbing

Berdasarkan hasil evaluasi Dosen Penguji dan Dosen Pembimbing, dinyatakan mahasiswa tersebut:

1. Lulus Ujian Tugas Akhir
2. harus mengulang Ujian Tugas Akhir semester berikutnya
3. Tugas Akhir dinyatakan gagal atau harus mengganti Tugas Akhir (lebih dari 2 semester)

Dosen Pembimbing

Prof. Dr. Ir. Sarwoko Mangkoedihardjo, M.Sc.Es.



UTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR
Periode: Genap 2021/2022

Kode/SKS : RE184804 (0/6/0)
No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR UTA-03
Formulir Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji
Ujian Tugas Akhir

Hari, tanggal : Selasa, 12 Juli 2022
Pukul : 08.00 - 09.15 WIB
Lokasi : TL-105
Judul : Kajian Teknik Bioaugmentasi dan Biostimulasi untuk Mendegradasi Tumpahan Minyak Mentah di Lingkungan Laut
Nama : Rizal Jamil Bahriansyah
NRP. : 03211840000026
Topik : Studi Literatur

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
	<ul style="list-style-type: none">- Nama penguji salah → Bieby- Gelar pembimbing salah → Prof. Prof.- mawaku / tambahkan analisis implementasi bioaugmentasi di laut- mekanisme proses bioaugmentasi harus ditambahkan dlm. penjelasan- Solusi dan kelemahan / kekurangan pe proses bioaugmentasi dlm pe bioaugmentasi laut tercemar minyak.

Formulir UTA-03 diserahkan kepada Dosen Pembimbing setelah sesi Seminar Kemajuan selesai.
Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-03 ke Sekretariat Program Sarjana
Formulir ini harus mahasiswa dibawa saat asistensi kepada Dosen Penguji
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Penguji dan Dosen Pembimbing

Dosen Penguji Bieby Voijant Tangahu, S.T., M.T., Ph.D.

Dosen Pembimbing Prof. Dr. Ir. Sarwoko Mangkoedihardjo, M.Sc.Es.

()
()



UTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR
Periode: Genap 2021/2022

Kode/SKS : RE184804 (0/6/0)
No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR UTA-03
Formulir Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji
Ujian Tugas Akhir



Hari, tanggal : Selasa, 12 Juli 2022
Pukul : 08.00 - 09.15 WIB
Lokasi : TL-105
Judul : Kajian Teknik Bioaugmentasi dan Biostimulasi untuk Mendegradasi Tumpahan Minyak Mentah di Lingkungan Laut
Nama : Rizal Jamil Bahriansyah
NRP. : 03211840000026
Topik : Studi Literatur

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
1.	Perbaiki penuliran → lihat di buku laporan TA.

Formulir UTA-03 diserahkan kepada Dosen Pembimbing setelah sesi Seminar Kemajuan selesai.
Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-03 ke Sekretariat Program Sarjana
Formulir ini harus mahasiswa dibawa saat asistensi kepada Dosen Penguji
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Penguji dan Dosen Pembimbing

Dosen Penguji Harmin Sulistiyoning Titah, S.T., M.T., Ph.D.

Dosen Pembimbing Prof. Dr. Ir. Sarwoko Mangkoedihardjo, M.Sc.Es.

()
()




UTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR
Periode: Genap 2021/2022

Kode/SKS : RE184804 (0/6/0)
No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR UTA-03
Formulir Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji
Ujian Tugas Akhir

Hari, tanggal : Selasa, 12 Juli 2022
Pukul : 08.00 - 09.15 WIB
Lokasi : TL-105
Judul : Kajian Teknik Bioaugmentasi dan Biostimulasi untuk Mendegradasi Tumpahan Minyak Mentah di Lingkungan Laut
Nama : Rizal Jamil Bahriansyah
NRP. : 03211840000026
Topik : Studi Literatur

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
	

Formulir UTA-03 diserahkan kepada Dosen Pembimbing setelah sesi Seminar Kemajuan selesai.
Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-03 ke Sekretariat Program Sarjana
Formulir ini harus mahasiswa dibawa saat asistensi kepada Dosen Penguji
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Penguji dan Dosen Pembimbing

Dosen Penguji Dr. Ir. Irwan Bagyo Santoso, M.T

Dosen Pembimbing Prof. Dr. Ir. Sarwoko Mangkoedihardjo, M.Sc.Es.