

**BIODEGRADASI PETROLEUM SECARA MIKROKOSMOS
MENGUNAKAN ISOLAT BAKTERI ASAL DERMAGA POPSA
MAKASSAR**

**Zulfiqar Lukman
H041 19 1086**



**DEPARTEMEN BIOLOGI
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2023**

**BIODEGRADASI PETROLEUM SECARA MIKROKOSMOS
MENGUNAKAN ISOLAT BAKTERI ASAL DERMAGA POPSA
MAKASSAR**

SKRIPSI

*diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana biologi
fakultas matematika dan ilmu pengetahuan alam
universitas hasanuddin*

Zulfiqar Lukman

H041 19 1086

**DEPARTEMEN BIOLOGI
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2023**

LEMBAR PENGESAHAN

**BIODEGRADASI PETROLEUM SECARA MIKROKOSMOS
MENGUNAKAN ISOLAT BAKTERI ASAL DERMAGA POPSA
MAKASSAR**

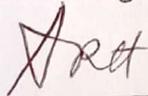
Disusun dan diajukan oleh:

ZULFIQAR LUKMAN

H041191086

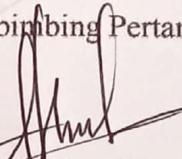
Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Studi Biologi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin pada tanggal 17 Maret 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Pembimbing Utama



Prof. Dr. Dirayah Rauf Husain, DEA
NIP. 196005251986012001

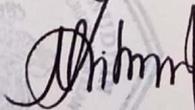
Pembimbing Pertama



Prof. Dr. Fahrudin, M.Si
NIP. 196509151991031002

Menyetujui,

Ketua Program Studi,



Dr. Magdalena Litaay, M.Sc
NIP. 196409291989032002

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini;

Nama : Zulfiqar Lukman
NIM : H041191086
Program Studi : Biologi
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

Biodegradasi Petroleum Secara Mikrokosmos Menggunakan Isolat Bakteri Asal Dermaga Popsa Makassar

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut

Makassar, 17 Maret 2023



Zulfiqar Lukman

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Alhamdulillah, puji syukur saya panjatkan atas kehadiran Allah SWT, karena atas berkah rahmat dan hidayah-Nya-lah sehingga penulisan tugas akhir ini dapat selesai dengan baik. Salawat dan salam tak lupa pula tucurahkan kepada Nabi Muhammad SAW serta seluruh keluarga dan sahabat beliau, Nabi yang senantiasa menjadi suri tauladan dalam menjalani kehidupan.

Penulisan tugas akhir ini merupakan prasyarat untuk menyelesaikan studi di prodi Biologi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin. Penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Ibu **Prof. Dr. Dirayah R. Husain, DEA** sebagai pembimbing utama sekaligus penasehat akademik, dan Bapak **Prof. Dr. Fahrudin, M.Si.** sebagai pembimbing pertama yang telah meluangkan waktunya untuk membimbing penulis, serta senantiasa memberikan ide serta motivasi sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi ini.

Penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang setinggi tingginya untuk Ayahanda **Lukman** dan Ibunda tercinta **Hamida** atas segala kesabaran dan kasih sayangnya, Adik-adikku tercinta **Fikry, Regina Putri** dan **Abi** serta seluruh keluarga yang telah banyak memberikan dukungan, kasih sayang, pengorbanan, serta doa sehingga penulis dapat menyelesaikan studi ini.

Penghargaan dan ucapan terima kasih penulis sampaikan pula kepada Ibu **Dr. Magdalena Litaay, M.Sc.** selaku Ketua Departemen Biologi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin, **Staf Dosen** Pengajar Departemen Biologi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Hasanuddin, Ibu **Dr. Juhriah, M.Si.** dan Bapak **Dr. Ir. Slamet Santosa, M.Si.** selaku tim penguji. Penghargaan dan ucapan terima kasih kepada Bapak **Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M. Sc.** selaku Rektor Universitas Hasanuddin beserta jajarannya.

Tak lupa pula rasa terima kasih yang sebesar-besarnya penulis ucapkan kepada:

- Kak **Fuad Gani S.Si.** Kak **Nenis Sardiani S.Si.** Kak **Heriadi S.Si., MSi.** dan Kak **Syafrian Nur Muhammad S.Si.** yang telah rela meluangkan banyak waktu, tenaga, dan pikirannya dalam membantu kelancaran skripsi penulis.
- Kak **Riuh Wardhani, S.Si., M.Si.** yang telah meluangkan banyak waktu, tenaga dan pikirannya dalam membantu kelancaran skripsi penulis.
- Sahabat-sahabat **BIOTIGRIS** (Biologi 2019) yang tidak bisa kami sebutkan namanya satu persatu, yang telah setia mendampingi dan membantu penulis selama menjalankan pendidikan di Departemen Biologi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan skripsi ini, namun penulis berharap semoga skripsi ini bisa menjadi acuan yang bermanfaat dikemudian hari bagi siapapun yang membutuhkan. Akhir kata, bahwa segala sesuatu yang direncanakan dapat terlaksana hanya dengan kasih sayang Allah, semoga Allah SWT melimpahkan Rahmat-Nya kepada kita semua, Amin.

Makassar, 17 Maret 2023

Penulis

ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian “**biodegradasi petroleum secara mikrokosmos menggunakan isolat bakteri asal dermaga popsa makassar**” untuk mengetahui kemampuan dari isolat bakteri laut dari perairan dermaga popsa makassar dalam biodegradasi hidrokarbon yang terkandung dalam petroleum melalui uji indeks emulsifikasi, uji tegangan permukaan dan analisis kualitatif kemampuan biodegradasi menggunakan gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS). Selama tahap kultur digunakan mikrokosmos yang bertujuan untuk menciptakan kondisi pertumbuhan yang menyerupai lingkungan asli dari bakteri yang berisi sedimen, air laut natural (ALN) dan petroleum. Uji indeks emulsifikasi dan uji tegangan permukaan dilakukan pengukuran setiap interval 5 hari, sedangkan analisis kualitatif kemampuan biodegradasi pada GC-MS dilakukan pada akhir masa inkubasi yaitu hari ke 30. Berdasarkan hasil penelitian bakteri yang diperoleh dari dermaga popsa memiliki kemampuan dalam mendegradasi petroleum, dimana pada uji indeks emulsifikasi diperoleh hasil terbaik yaitu sebesar 53,84%, sedangkan pada uji tegangan permukaan diperoleh terbaik yaitu sebesar 22,16 mN/m. Pada uji kualitatif diperoleh kromatogram yang menunjukkan telah terjadi pemutusan rantai karbon dengan membandingkan kromatogram sampel dan kromatogram kontrol, dimana bakteri yang diperoleh dari dermaga popsa mampu memutus 150 rantai karbon. rantai karbon yang berhasil diputuskan tergolong ke dalam hidrokarbon alkana, hidrokarbon alisiklik dan hidrokarbon aromatik

Kata kunci: *Biodegradasi, Petroleum, bakteri laut asal dermaga popsa*

ABSTRACT

A study has been carried out on “**microcosmic petroleum biodegradation using bacterial isolates from Popsa Makassar pier**” to determine the ability of marine bacterial isolates from Popsa Makassar pier waters in the biodegradation of hydrocarbons contained in petroleum through emulsification index tests, surface tension tests and qualitative analysis of biodegradability using gas. Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS). During the culture stage a microcosm is used which aims to create growth conditions that resemble the original environment of the bacteria which contains sediment, natural seawater (ALN) and petroleum. The emulsification index test and surface tension test were measured every 5 days interval, while the qualitative analysis of the biodegradability of the GC-MS was carried out at the end of the incubation period, namely the 30th day. . In the emulsification index test, the best results were obtained, namely 53.84%, while in the surface tension test, the best results were obtained, namely 22.16 mN/m. In the qualitative test, a chromatogram was obtained which showed that there had been a break in the carbon chain by comparing the chromatogram of the sample and the chromatogram of the control, where the bacteria obtained from the popsa dock were able to break 150 carbon chains.

Keywords: Biodegradation, Petroleum, marine bacteria from popsa dock

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xv
I. PENDAHULUAN	1
I.1 Latar Belakang.....	1
I.2 Tujuan Penelitian.....	4
I.3 Manfaat Penelitian.....	4
I.4 Tempat dan Waktu Penelitian.....	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
II.1 Hidrokarbon Petroleum	5
II.2 Bioremediasi Hidrokarbon Petroleum	12
II.3 Bakteri Laut Pendegradasi Hidrokarbon	18
II.4 Mekanisme Biodegradasi Petroleum	20
II.5 Biosurfaktan	24
II.6 Biodegradasi Minyak Bumi Secara Mikrokosmos	27

III. METODE PENELITIAN	28
III.1 Alat	28
III.2 Bahan.....	28
III.3 Metode Kerja	28
III.3.1 Sterilisasi Alat dan Bahan	28
III.3.2 Pembuatan Media	29
III.3.2.1 Pembuatan Air Laut Sintetik	29
III.3.2.2 Pembuatan Media Marine Agar (MA)	29
III.3.2.3 Pembuatan Nutrisi Tambahan K_2HPO_4	29
III.3.2.4 Pembuatan Nutrisi Tambahan $FeSO_4$	29
III.3.3 Penyiapan Mikrokosmos	29
III.3.4 Tahap Prakultur	30
III.3.5 Tahap Kultur	30
III.3.5.1 Uji Indeks Emulsifikasi.....	30
III.3.5.2 Uji Tegangan Permukaan.....	31
III.3.6 Ekstraksi Biosurfaktan	32
III.3.7 Analisis Kualitatif Kemampuan Biodegradasi Menggunakan Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)	32
III.3.6 Analisis Data	33
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	34
IV.1 Tahap Prakultur	34
IV.2 Tahap Kultur	35
IV.3 Uji Emulsifikasi.....	42
IV.4 Uji Tegangan Permukaan	45
IV.5 Analisis Biodegradasi Petroleum Menggunakan Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS).....	47

V. PENUTUP	51
V.1 Kesimpulan.....	51
V.2 Saran	51
Daftar Pustaka	52
Lampiran 1. Bagan Alur Penelitian	58

DAFTAR TABEL

1. Tabel hasil pengamatan secara visual kondisi mikrokosmos kultur selama masa inkubasi	36
2. Tabel hasil pengamatan secara visual kondisi mikrokosmos kontrol selama masa inkubasi	37

DAFTAR GAMBAR

1. Pencemaran minyak bumi di laut.....	6
2. Limbah minyak akibat kegiatan industri	8
3. Struktur kimia petroleum.....	9
4. Kromatogram petroleum di Korea yang diamati dengan Gas Chromatography.....	10
5. Kromatogram petroleum di Indonesia yang diamati dengan Gas Chromatography.....	11
6. Penanggulangan tumpahan minyak secara fisika dengan <i>in situ burning</i>	13
7. Penanggulangan tumpahan minyak secara kimia dengan penyemprotan dispersan	13
8. Penanggulangan tumpahan minyak dengan teknik bioremediasi	14
9. Mekanisme kontak fisik antara bakteri dan hidrokarbon minyak bumi	21
10. Mekanisme emulsifikasi oleh biosurfaktan	22
11. Jalur degradasi alkana oleh bakteri	23
12. Jalur degradasi hidrokarbon aromatik oleh bakteri.....	23
13. Kinerja degradasi biosurfaktan	26
14. Pertumbuhan isolat bakteri pada media ALN	34
15. Kondisi mikrokosmos pada hari ke 5 inkubasi	39
16. Kondisi mikrokosmos pada hari ke 10 inkubasi	39
17. Kondisi mikrokosmos pada hari ke 15 inkubasi	40
18. Kondisi mikrokosmos pada hari ke 20 inkubasi	40
19. Kondisi mikrokosmos pada hari ke 25 inkubasi	41
20. Kondisi mikrokosmos pada hari ke 30 inkubasi	41
21. Grafik indeks emulsifikasi.....	42

22. Hasil uji emulsifikasi selama 30 hari masa inkubasi	44
28. Grafik penurunan tegangan permukaan.....	45
29. Kromatogram petroleum.....	50
30. Kromatogram sampel dari hasil ekstrak kultur	48

DAFTAR LAMPIRAN

1. Bagan Alur Penelitian.....	56
-------------------------------	----

BAB I

PENDAHULUAN

I.I Latar Belakang

Minyak bumi memiliki peran yang paling penting di dunia yaitu sebagai energi dan sumber karbon. Namun, aktivitas minyak bumi dan industri terkait minyak bumi di dunia menyebabkan peningkatan polusi minyak di lingkungan (Unimke dkk., 2018). Kontaminasi lingkungan dengan minyak bumi memiliki efek signifikan pada lingkungan dan kesehatan manusia. Lingkungan yang terkontaminasi minyak bumi dan turunannya merupakan masalah umum yang ditemukan di area pelabuhan. Minyak bumi terdiri dari hidrokarbon kompleks dengan senyawa organik seperti unsur belerang, oksigen, nitrogen dan logam dan beberapa radionuklida. Bahan utama terkandung dalam minyak bumi adalah senyawa paraffin hidrokarbon, jenuh hidrokarbon alisiklik dan aromatik hidrokarbon yang bersifat karsinogenik (Rahayu dkk., 2019).

Minyak bumi memiliki komposisi kompleks yang dibentuk terutama oleh hidrokarbon alifatik dan aromatik. Banyak senyawa yang ada dalam minyak bumi bersifat toksik, mutagenik atau karsinogenik. Dampak minyak bumi seperti naftalena dalam tubuh manusia dapat menyebabkan iritasi kulit, kerusakan sel darah merah dan nefrotoksisitas. Tumpahan minyak bumi ke lingkungan diakibatkan oleh tingginya volume minyak bumi yang digunakan sebagai bahan baku untuk produksi energi dan bahan kimia serta kecelakaan kapal tangki selama proses operasi (Titah dkk., 2021). Dalam kontak dengan lingkungan, minyak bumi mengalami perubahan menjadi lebih kompleks, karena interaksi antara faktor fisik dan biologis. Kompleks hidrokarbon di lingkungan menyebabkan

penanggulangannya sulit sehingga dapat menyebabkan pencemaran perairan yang berujung menjadi sumber penyakit bagi manusia karena terakumulasi di dalam air ataupun ikan (Viesser dkk., 2020).

Kompleks hidrokarbon di lingkungan dapat ditanggulangi dengan teknik bioremediasi. Teknik biodegradasi saat ini merupakan pendekatan yang berpotensi efektif untuk bioremediasi hidrokarbon. Pendekatan dengan teknik biologis memiliki keunggulan dibandingkan teknik fisik dan kimia yang umum diterapkan dalam pemberantasan tumpahan minyak, karena lebih hemat biaya. Bioremediasi telah dikenal sebagai alternatif ekologi yang menjanjikan untuk mengatasi tumpahan minyak, menghindari implikasi negatif yang terkait dengan teknik fisik dan kimia, seperti pengenalan dispersan kimia atau pembakaran tumpahan minyak (Prakash dkk., 2018). Bioremediasi dapat didefinisikan sebagai perubahan senyawa kimia dengan makhluk hidup, khususnya mikroba, menjadi biomassa sel, energi dan komoditas limbah alam. Bioremediasi dapat dibagi menjadi dua strategi yaitu biostimulasi (BS) dengan menambahkan nutrisi ke area yang tercemar minyak untuk merangsang metabolisme sehingga menurunkan kadar minyak oleh komunitas mikroba yang ada secara alami, dan bioaugmentasi (BA) dengan menambahkan mikroorganisme pendegradasi minyak untuk meningkatkan kelimpahannya (Perdigao dkk., 2021). Bakteri dan jamur pendegradasi hidrokarbon tersebar luas di habitat laut, air tawar dan tanah. Kemampuan untuk mengisolasi sejumlah besar mikroorganisme pendegradasi minyak tertentu dari lingkungan yang tercemar umumnya dianggap sebagai bukti bahwa mikroorganisme ini adalah pengurai aktif dari lingkungan tersebut. Mikroorganisme mendegradasi minyak dengan menghasilkan suatu senyawa yang disebut biosurfaktan sebagai hasil metabolik primer (Ojo, 2006).

Biosurfaktan mempromosikan bioremediasi tumpahan minyak di lingkungan laut dengan meningkatkan kelarutan komponen minyak bumi dan mengurangi tegangan permukaan minyak dan air. Biosurfaktan berguna sebagai agen antimikroba. Surfaktan yang dihasilkan mikroorganisme (biosurfaktan) dapat larut dalam pelarut organik (nonpolar) dan pelarut air (polar) serta dikategorikan berdasarkan pada struktur kimia dan sumber mikrobiologisnya. Mereka termasuk glikolipid, lipopeptida, protein, fosfolipid, kompleks polisakarida-protein, lipopolisakarida, lipid netral dan asam lemak. Pemafaatan mikroba penghasil biosurfaktan memiliki potensi yang besar sebagai agen promotor untuk mendegradasi hidrokarbon (Husain dkk., 1997).

Hal ini menjadi tantangan untuk dilakukannya penelitian di berbagai daerah yang terkontaminasi hidrokarbon petroleum guna mencari dan mengembangkan isolat yang lebih unggul dalam mendegradasi hidrokarbon petroleum. Beberapa perairan di Makassar merupakan daerah yang tercemar hidrokarbon petroleum salah satunya di Dermaga Popsa. Pencemaran ini diakibatkan oleh aktivitas fisik kapal yang berlalu-lalang serta bersandar di Dermaga Popsa. Tumpahan minyak sebagai hasil buangan atau bersih-bersih kapal yang bersandar di Dermaga Popsa dapat menyebabkan kematian pada organisme di laut seperti ikan dan lebih bahaya lagi jika tumpahan itu terakumulasi di dalam tubuh ikan dan di konsumsi oleh manusia. Akibat tumpahan minyak yang telah berlangsung bertahun-tahun di Dermaga Popsa terdapat beragam bakteri pendegradasi hidrokarbon. Berdasarkan penelitian sebelumnya dengan menggunakan isolat bakteri dari pelabuhan Popsa, secara *in vitro* isolat tersebut menunjukkan kemampuan dalam mendegradasi hidrokarbon. Berdasarkan hal tersebut, maka dilakukan penelitian lebih lanjut untuk menguji

kemampuan biodegradasi petroleum oleh bakteri yang berasal dari Dermaga Popsa Makassar secara mikrokosmos.

I.2 Tujuan Penelitian

Untuk mengetahui kapasitas degradasi hidrokarbon petroleum secara mikrokosmos oleh isolat bakteri laut yang berasal dari Dermaga Popsa Makassar, melalui uji indeks emulsifikasi, uji tegangan permukaan dan analisis kualitatif kemampuan biodegradasi menggunakan Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS).

I.3 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah sebagai sumber informasi ilmiah mengenai kemampuan isolat bakteri laut yang berasal dari Dermaga Popsa Makassar dalam mendegradasi hidrokarbon petroleum secara kualitatif, sehingga dapat diterapkan dalam teknologi bioremediasi lingkungan yang tercemar oleh petroleum dan industri yang menghasilkan limbah hidrokarbon.

I.4 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada tanggal 15 November 2022 di Laboratorium Mikrobiologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin, Makassar.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Hidrokarbon Petroleum

Minyak bumi adalah campuran kompleks hidrokarbon dengan senyawa organik dari belerang, oksigen, nitrogen dan senyawa yang mengandung logam. Minyak bumi memiliki komposisi kompleks yang dibentuk terutama oleh hidrokarbon alifatik dan aromatik. Minyak bumi terdiri dari hidrokarbon kompleks dengan senyawa organik seperti unsur belerang, oksigen, nitrogen, logam serta beberapa radionuklida. Bahan utama terkandung dalam minyak bumi adalah senyawa paraffin hidrokarbon, jenuh hidrokarbon alisiklik, dan aromatik hidrokarbon yang bersifat karsinogenik. Komposisi minyak bumi bervariasi sesuai dengan lokasi geografis serta kondisi fisik, kimia dan biologi lingkungan di mana ia terbentuk. Banyak senyawa yang ada dalam minyak bumi bersifat toksik, mutagenik atau karsinogenik (Viesser dkk., 2020).

Minyak bumi adalah bahan bakar fosil yang terbentuk dari sisa-sisa tumbuhan dan hewan laut kecil yang mati jutaan tahun yang lalu dan tenggelam ke dasar lautan. Minyak bumi terdiri dari campuran kompleks dari berbagai hidrokarbon, sebagian besar dari alkana dan senyawa aromatik. Warnanya berkisar dari kuning pucat kemerahan dan coklat hingga hitam atau kehijauan (Chougle dan Walke., 2015).

Pencemaran minyak bumi di perairan seperti Gambar 1 merupakan ancaman yang serius bagi lingkungan. Hal ini disebabkan karena minyak bumi mengandung salah satu kontaminan yang sulit diurai yaitu senyawa hidrokarbon. Minyak bumi adalah cairan alami, berminyak dan mudah terbakar yang terdiri

dari hidrokarbon dan biasa ditemukan di mata air atau kolam, tetapi biasanya diperoleh dari bawah permukaan bumi dengan pengeboran. Sebelumnya disebut sebagai minyak batu, yaitu minyak bumi yang tidak dimurnikan dan sekarang disebut minyak mentah. Sifat fisik dan komposisi kimia minyak mentah sangat bervariasi tergantung pada sumbernya. Karena berasal dari bumi, ia berkisar dari cairan yang kadang-kadang hampir tidak berwarna yang terutama terdiri dari bensin hingga material hitam pekat yang mengandung aspal tinggi. Meskipun sebagian besar minyak mentah berwarna hitam, banyak juga yang berwarna kuning, merah, atau coklat oleh cahaya yang ditransmisikan dan menunjukkan fluoresensi kehijauan oleh cahaya yang dipantulkan. Secara umum, hidrokarbon minyak bumi (PHC) yang berasal dari berbagai minyak adalah kelas senyawa yang sangat kompleks terdiri atas senyawa paraffin hidrokarbon, jenuh hidrokarbon alisiklik dan aromatik hidrokarbon (Lyu dkk., 2014).



Gambar 1. Pencemaran minyak bumi di laut (Lyu dkk., 2014).

Polutan minyak, karena toksisitas, mutagenisitas dan karsinogenisitasnya, dianggap sebagai ancaman serius bagi kesehatan manusia dan lingkungan. Senyawa hidrokarbon minyak bumi, misalnya, benzena, toluena, etil benzena, xilena, termasuk senyawa alami minyak bumi. Minyak bumi terbentuk di bawah permukaan bumi oleh dekomposisi organisme laut. Sisa-sisa organisme kecil yang hidup di laut pada tingkat lebih rendah, beserta organisme darat yang terbawa ke laut oleh sungai dan tanaman yang tumbuh di dasar laut, kemudian terjatuh dengan butiran halus dan lumpur lalu mengendap di dasar laut. Deposit tersebut, yang kaya bahan organik, menjadi batuan sumber penghasil minyak mentah. Bahan-bahan organik akan diurai oleh bakteri anaerobik membentuk gas metana. Ketika mencapai kedalaman dengan suhu tinggi dan tekanan tinggi metana yang terdiri dari campuran dua atau tiga gas alkana, yaitu etana dan propana, akan mengalami reaksi untuk membentuk gas alkana, alkana cair, alkana lilin serta alkana padat dan juga sikloalkana yang dikenal sebagai naftenat. Namun pada beberapa lokasi terdapat senyawa organik yang resisten terhadap proses degradasi sehingga senyawa tersebut akan terakumulasi ke dalam perut bumi. Adanya deposit-deposit senyawa organik yang melimpah seperti bahan bakar fosil dan petroleum terjadi karena bahan-bahan tersebut berada dalam kondisi lingkungan yang tidak menunjang terjadinya proses degradasi (Mawad., 2020).

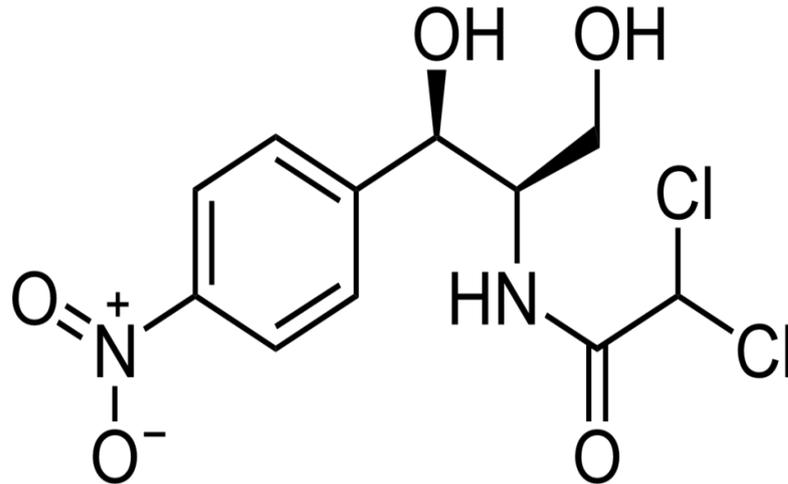
Setiap tahun, jutaan barel minyak dilepaskan ke laut global dari sumber alami dan antropogenik. Kegiatan industri minyak mentah merupakan rangkaian proses yang kompleks dari hulu hingga hilir. Pesatnya kemajuan sektor industri minyak mentah secara bersamaan berdampak positif pada peningkatan kesejahteraan rakyat dan berdampak negatif terhadap pencemaran lingkungan.

Tumpahan minyak seperti Gambar 2, mengancam lingkungan global baik dalam jangka waktu pendek maupun jangka panjang. Dampak minyak bumi seperti naftalena dalam tubuh manusia dapat menyebabkan iritasi kulit, kerusakan sel darah merah dan nefrotoksisitas. (Fauzi dkk., 2016).



Gambar 2. Limbah minyak akibat kegiatan industri (Fauzi dkk., 2016).

Petroleum adalah senyawa organik yang terdiri dari dua elemen utama yaitu karbon dan hidrogen seperti pada Gambar 3. Seluruh hidrokarbon memiliki rantai karbon dan atom-atom hidrogen yang berikatan dengan rantai tersebut. Hidrokarbon juga mengandung sejumlah kecil molekul yang mengandung belerang, nitrogen, logam dan oksigen. Karena kurangnya gugus fungsi, hidrokarbon sebagian besar merupakan non-polar dan menunjukkan reaktivitas kimia yang rendah pada suhu kamar. Hidrokarbon dalam minyak bumi mentah secara umum dapat diklasifikasikan sebagai alkana, sikloalkana, aromatik, aromatik polisiklik, asphaltines dan resin (Oteyza dkk., 2006).

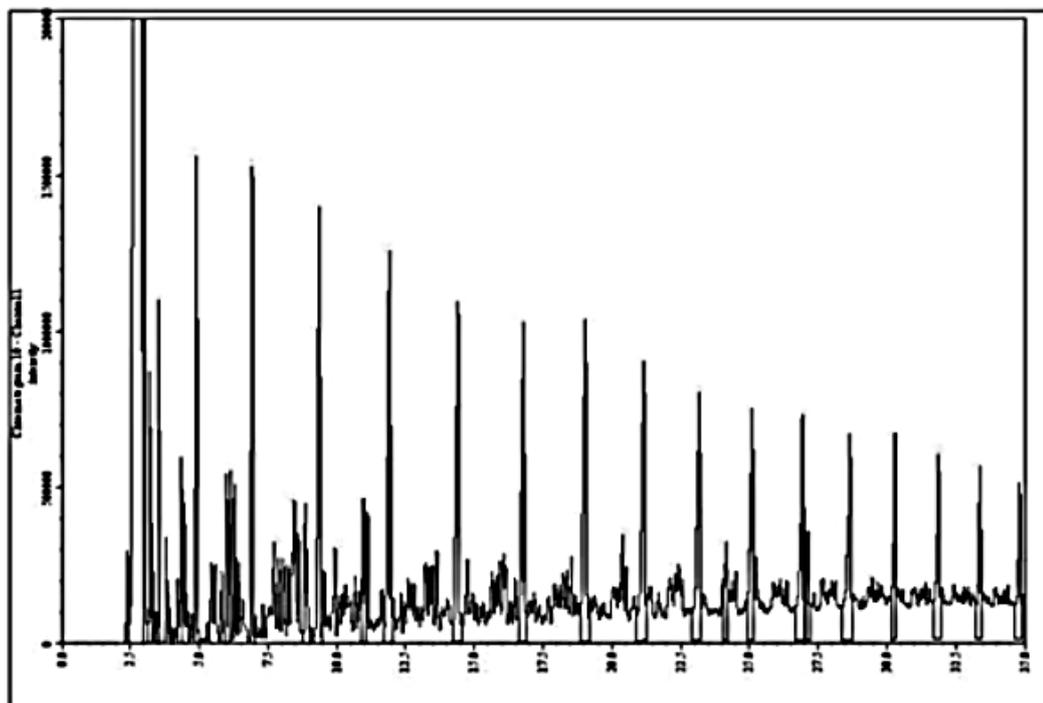


Gambar 3. Struktur kimia petroleum (Oteyza dkk., 2006).

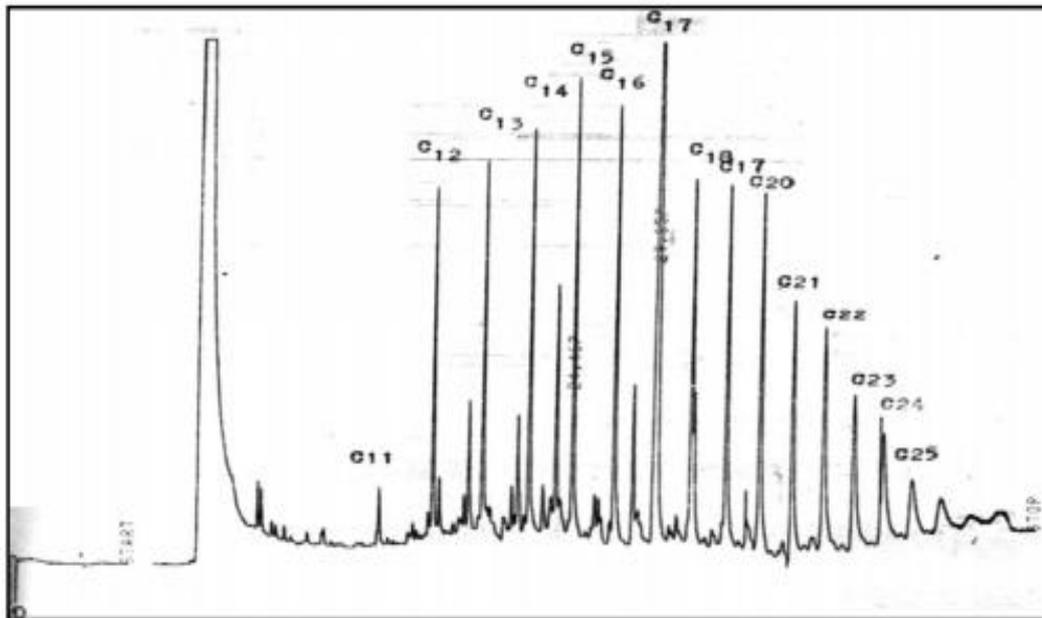
Di antara hidrokarbon minyak bumi, n-alkana adalah yang paling mudah untuk didegradasi. Hidrokarbon [alkana](#) merupakan hidrokarbon yang paling sederhana, hidrokarbon ini seluruhnya terdiri dari ikatan tunggal dan terikat dengan atom hidrogen. Biasanya alkana dalam kisaran C₅ hingga C₁₀ menghambat sebagian besar pengurai hidrokarbon pada konsentrasi yang lebih tinggi karena mengganggu membran lipid ketika hadir sebagai pelarut. Selama degradasi, alkana diubah menjadi alkohol oleh aksi enzim oksigenase yang menyerang gugus metil terminal. Alkohol selanjutnya dioksidasi menjadi aldehida dan kemudian menjadi asam lemak. Pemanfaatan lebih lanjut dari asam lemak terjadi dengan oksidasi rantai alifatik (Victor dkk., 2020).

Sikloalkana atau hidrokarbon alisiklik lebih sulit terdegradasi dibandingkan alkana. Di sini biodegradabilitas menurun dengan bertambahnya jumlah struktur cincin. Sikloalkana tersubstitusi alkil dapat terdegradasi lebih mudah dibandingkan dengan hidrokarbon non-substitusi. Sikloalkana terdegradasi menjadi alkohol siklik oleh aksi oksidase yang selanjutnya didehidrogenasi menjadi keton. Produk utama metabolisme sikloalkana adalah sikloketon dan asam sikloalkana-karboksilat (Victor dkk., 2020).

Molekul hidrokarbon aromatik memiliki struktur yang berbasis benzena. Senyawa aromatik merupakan molekul organik yang mengandung satu atau lebih cincin aromatik, khususnya cincin benzena. Dibandingkan dengan kebanyakan senyawa siklik yang lainnya, senyawa aromatik lebih stabil karena berbagi elektron terdelokalisasi oleh ikatan pi. Senyawa BTEX (benzena, toluena, etilbenzena, xilena) relatif lebih mudah bergerak dan larut dalam air. Hidrokarbon aromatik polisiklik (PAH) atau hidrokarbon aromatik polinuklir (PNA) adalah kelompok senyawa yang terdiri dari dua atau lebih cincin benzena. Beberapa senyawa tersebut diduga bersifat toksik dan karsinogen. Peningkatan berat molekul dan jumlah struktur cincin PAH akan menurunkan kelarutan dan volatilitasnya sekaligus meningkatkan kapasitas adsorpsi. PAH terdegradasi melalui beberapa mekanisme yang mirip dengan proses degradasi senyawa monoaromatik (Victor dkk., 2020).



Gambar 4. Kromatogram petroleum di Korea yang diamati dengan Gas Chromatography (Joo dkk., 2013)



Gambar 5. Kromatogram petroleum di Indonesia yang diamati dengan Gas Chromatography (Umar, 2015)

Kromatogram petroleum menunjukkan kompleks senyawa hidrokarbon yang terkandung dalam petroleum. Di setiap negara yang memiliki minyak bumi, mengandung kompleks senyawa hidrokarbon yang berbeda seperti pada Gambar 4 dan Gambar 5. Senyawa hidrokarbon yang terkandung dalam minyak bumi sebagian besar merupakan hidrokarbon aromatik polisiklik. Hidrokarbon aromatik polisiklik adalah hidrokarbon aromatik dengan dua atau lebih cincin benzena yang menyatu, dan berasal dari sumber alami maupun antropogenik. Tersebar luas dan termasuk kontaminan lingkungan yang memiliki efek biologis yang merugikan, toksisitas, mutagenisitas dan karsinogenisitas. Hidrokarbon aromatik polisiklik stabil secara termodinamika karena sifat aromatiknya, yang meliputi stabilisasi oleh banyak cincin dan kelarutan dalam air yang rendah (Lyu dkk., 2014).

Hidrokarbon aromatik polisiklik dibagi menjadi dua kategori yaitu berat molekul rendah (dua atau tiga cincin) yang relatif mudah menguap, larut dan lebih mudah terdegradasi daripada senyawa berat molekul tinggi (empat cincin atau

lebih) yang menyerap kuat ke tanah dan sedimen dan lebih tahan terhadap degradasi mikroba karena berat molekul tinggi dan hidrofobisitas, sedangkan hidrokarbon aromatik polisiklik ini juga beracun bagi sel bakteri. Namun ada beberapa juga sejumlah spesies bakteri diketahui mampu mendegradasi hidrokarbon aromatik polisiklik. Kebanyakan dari bakteri tersebut, mewakili efisiensi biodegradasi, diisolasi dari tanah atau sedimen yang terkontaminasi (Bisht dkk., 2015).

II.2 Bioremediasi Hidrokarbon Petroleum

Pencemaran minyak bumi di perairan merupakan ancaman yang serius bagi lingkungan. Hal ini disebabkan karena minyak bumi mengandung salah satu kontaminan yang sulit diurai yaitu senyawa hidrokarbon. Bahan utama terkandung dalam minyak bumi adalah senyawa paraffin hidrokarbon, jenuh hidrokarbon alisiklik dan aromatik hidrokarbon yang bersifat karsinogenik. Banyak cara yang dapat dilakukan untuk menanggulangi pencemaran minyak bumi diantaranya yaitu dengan cara fisika, kimia dan biologi. Penanggulangan secara fisika dapat dilakukan dengan *in situ burning* yaitu pembakaran tumpahan minyak di tengah laut. Penanggulangan dengan cara ini biasanya merupakan tindakan dini yang dilakukan ketika terjadi tumpahan minyak seperti pada Gambar 6. Penanggulangan secara kimia dapat dilakukan dengan menggunakan dispersan seperti pada Gambar 7. Kedua cara ini memiliki kelemahan yaitu membutuhkan biaya yang mahal dalam pengoperasiannya, dapat mengganggu kehidupan di lingkungan tersebut dan sifatnya tidak ramah lingkungan. Penanggulangan dengan cara biologi memiliki keunggulan dibandingkan teknik fisik dan kimia yang umum diterapkan dalam pemberantasan tumpahan minyak, karena lebih hemat

biaya. Bioremediasi telah dikenal sebagai alternatif ekologi yang menjanjikan untuk mengatasi tumpahan minyak, menghindari implikasi negatif yang terkait dengan teknik fisik dan kimia, seperti pengenalan dispersan kimia atau pembakaran tumpahan minyak (Prakash dkk., 2018).



Gambar 6. Penanggulangan tumpahan minyak secara fisika dengan *in situ burning* (Prakash dkk., 2018).



Gambar 7. Penanggulangan tumpahan minyak secara kimia dengan penyemprotan dispersan (Xu dkk., 2018).



Gambar 8. Penanggulangan tumpahan minyak secara biologi dengan teknik bioremediasi (Ibrahim dkk., 2018).

Bioremediasi seperti pada Gambar 8, telah dikenal sebagai teknologi yang menjanjikan untuk perawatan daerah yang terkontaminasi minyak bumi karena hemat biaya dan akan menghasilkan mineralisasi lengkap. Fungsi bioremediasi pada dasarnya adalah biodegradasi, yang dapat merujuk pada mineralisasi lengkap kontaminan organik menjadi karbon dioksida, air, senyawa anorganik, dan protein sel atau transformasi kontaminan organik kompleks menjadi senyawa organik sederhana lainnya oleh agen biologis seperti mikroorganisme. Salah satu alternatif penanggulangan lingkungan tercemar hidrokarbon yaitu dengan teknik bioremediasi, yaitu suatu teknologi yang ramah lingkungan, efektif dan ekonomis dengan memanfaatkan aktivitas mikroba. Proses bioremediasi merupakan inovasi teknik yang melibatkan degradasi atau reduksi pencemar organik yang berbahaya menjadi senyawa yang kurang toksik seperti CO_2 , CH_4 , H_2O dan biomassa dengan

mikroorganisme, tanpa menimbulkan efek apapun pada lingkungan. Salah satu dari mekanisme utama bioremediasi adalah biodegradasi, yang melibatkan penggunaan mikroba oleofilik untuk menghilangkan polutan hidrokarbon (Ibrahim dkk., 2018).

Biodegradasi menawarkan alternatif yang sangat efektif untuk dekontaminasi tumpahan minyak. Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi proses bioremediasi meliputi kelembaban tanah, suhu, populasi keanekaragaman hayati, pH, suplai oksigen dan tingkat nutrisi (Margesin dkk., 2001). Konsentrasi karbon, nitrogen dan fosfor adalah faktor utama dalam remediasi hidrokarbon. Mikroorganisme yang mengurai berbagai komponen hidrokarbon minyak bumi dapat dengan mudah diisolasi dari lingkungan yang terkontaminasi minyak bumi (Geetha dkk., 2013).

Biodegradasi hidrokarbon minyak bumi di lingkungan terjadi dengan melewati proses yang kompleks. Aspek kuantitatif dan kualitatif tergantung pada sifat dan jumlah minyak atau hidrokarbon yang ada serta komposisi komunitas mikroba asli. Bakteri pendegradasi hidrokarbon tersebar luas di laut, air tawar dan tanah yang terkontaminasi hidrokarbon dengan memanfaatkan kemampuannya untuk mendegradasi atau mendetoksifikasi kontaminan organik yang digunakan sebagai sumber karbon (Ichor dkk., 2014).

Berbagai faktor fisik dan kimia mempengaruhi laju degradasi hidrokarbon. Beberapa faktor yang mempengaruhi laju degradasi hidrokarbon meliputi (Mahjoubi dkk., 2017):

1. oksigen

Langkah awal dalam katabolisme hidrokarbon alifatik, siklik dan aromatik oleh bakteri dan jamur melibatkan oksidasi substrat oleh oksigenase yang

membutuhkan oksigen molekuler. Meskipun biodegradasi anaerobik telah terbukti terjadi di ekosistem yang berbeda termasuk lingkungan laut, signifikansi ekologisnya umumnya dianggap kecil dan laju biodegradasi agak rendah. Kondisi keterbatasan oksigen biasanya ada di sedimen akuatik dan tanah. Penipisan oksigen dapat terjadi dengan adanya substrat yang mudah digunakan yang meningkatkan konsumsi oksigen mikroba. Dalam beberapa kasus, konsentrasi oksigen terlarut bisa mendekati nol yang mengarah ke tingkat biodegradasi aerobik praktis nol. Dengan demikian, oksigen merupakan faktor yang sangat potensial yang membatasi laju degradasi hidrokarbon (Mahjoubi dkk., 2017).

2. Suhu

Suhu memiliki pengaruh yang cukup besar terhadap kemampuan mikroorganisme untuk mendegradasi hidrokarbon. Pada suhu tinggi, kelarutan, bioavailabilitas, distribusi hidrokarbon dan laju difusi meningkat sehingga dapat meningkatkan kemampuan biodegradasi mikroba dan meningkatkan laju biodegradasi. Di sisi lain, suhu yang sangat tinggi menurunkan kelarutan oksigen dan membatasi biodegradasi (Mahjoubi dkk., 2017).

3. Ketersediaan nutrisi

Sumber anorganik seperti nitrogen, fosfor, kalium, hidrogen atau oksigen sangat penting untuk metabolisme mikroba karena mempengaruhi pertumbuhan dan aktivitas mikroorganisme, sedangkan zat gizi mikro termasuk seng, mangan, besi, nikel, kobalt, molibdenum, tembaga dan klorin diperlukan tetapi dalam jumlah yang sangat sedikit. Aplikasi sumber N dan P dalam bentuk oleofilik dianggap sebagai metode aplikasi nutrisi yang paling efektif, karena aditif oleofilik tetap larut dalam fase minyak sehingga tersedia pada antarmuka minyak-air atau minyak-sedimen di mana mereka meningkatkan pertumbuhan bakteri dan metabolisme (Mahjoubi dkk., 2017).

4. pH

pH merupakan faktor yang sangat mempengaruhi pertumbuhan mikroorganisme. pH kurang bervariasi di lingkungan perairan dan sebagian besar bakteri dan jamur yang mampu mendegradasi hidrokarbon membutuhkan pH netral. Secara umum, aktivitas mikroba dipengaruhi oleh pH yang sangat rendah atau tinggi. Leahy dan Colwell melaporkan bahwa degradasi mikroba naftalena menurun pada pH 5,0 dibandingkan dengan tingkat degradasi tertinggi yang diamati pada pH 7. Efisiensi beberapa mikroorganisme, seperti *Pseudomonas*, untuk mendegradasi hidrokarbon pada suasana basa. Degradasi PAH di lingkungan yang terkontaminasi asam (pH 2) oleh mikroorganisme memiliki laju degradasi yang rendah (Mahjoubi dkk., 2017).

5. Distribusi mikroorganisme pendegradasi hidrokarbon

Tumpahan minyak di lingkungan laut bisa sangat beracun bagi komunitas mikroba laut. Namun, sebagian dari komunitas ini menolak jenis polusi ini dan mampu menggunakan polutan tersebut sebagai sumber karbon. Beberapa penelitian telah mengungkapkan beragam mikroorganisme (bakteri, jamur, archaea dan alga), yang diisolasi dari lingkungan yang terkontaminasi mampu mendegradasi hidrokarbon. Penelitian terbaru melaporkan bahwa 79 bakteri, 103 jamur dan 14 alga mampu menggunakan hidrokarbon sebagai satu-satunya sumber karbon dan energi. Selain itu, di lingkungan laut, setidaknya ditemukan 25 genera bakteri pengurai hidrokarbon. Bakteri adalah kelompok yang paling penting dan melimpah yang dikenal untuk degradasi hidrokarbon. Namun, ada kelas bakteri yang menggunakan hidrokarbon secara eksklusif sebagai substrat dan telah dicirikan sebagai bakteri hidrokarbonoklastik obligat. Kelompok ini hadir pada tingkat rendah atau tidak terdeteksi di lingkungan laut sebelum

kontaminasi dengan hidrokarbon. Mikroorganisme pendegradasi hidrokarbon tersebar luas dan ada di mana-mana di lingkungan laut terutama setelah kontaminasi dengan hidrokarbon. Jumlah dan aktivitasnya meningkat dan dapat mewakili 100% dari total komunitas mikroba. Namun, mereka dapat ditemukan di lingkungan yang tidak terkontaminasi tetapi dalam proporsi yang sangat kecil yang dapat mewakili 0,1% dari total komunitas mikroba (Mahjoubi dkk., 2017).

6. pengomposan

Pupuk organik membantu perkembangan mikroorganisme sehingga proses degradasi dapat terjadi dalam waktu yang singkat. Pengomposan adalah proses mendaur ulang nutrisi dan karbon dari mikroba yang ada di tanah. Penggunaan kompos untuk merangsang pertumbuhan mikroba akan mempercepat dan mengoptimalkan proses degradasi. Dengan meningkatkan kebutuhan mikroba akan nutrisi tingkat biodegradasi minyak bumi dapat dipercepat. Pengomposan sebagian besar dilakukan dalam empat cara yang berbeda tumpukan statis, ruang tertutup, jendela, dan kapal. Metode pengomposan bekerja pada degradasi aerobik dari bahan organik (Mahjoubi dkk., 2017).

II.3 Bakteri Laut Pendegradasi Hidrokarbon

Sebagian besar hidrokarbon minyak bumi yang ditemukan di lingkungan laut pada akhirnya dapat terdegradasi atau dimetabolisme oleh mikroorganisme laut asli. banyak penelitian yang telah mengungkapkan bahwa ada sejumlah besar bakteri pendegradasi hidrokarbon di lingkungan laut yang memiliki akumulasi minyak bumi, seperti area tumpahan minyak dan reservoir minyak, dan juga wilayah yang mendapatkan kelimpahan dan kuantitas tumpahan minyak bumi ditemukan banyak mikroorganisme pendegradasi minyak bumi yang

kemampuannya sangat erat kaitannya dengan jenis hidrokarbon minyak bumi dan faktor lingkungan sekitarnya (Husain dkk., 1997).

Secara umum jumlah bakteri pengurai petroleum biasanya lebih besar ditemukan pada daerah yang terpolusi oleh hidrokarbon, begitu pula kepadatan populasi atau komunitas mikroorganisme tersebut pada suatu habitat sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan. Kehadiran bakteri pendegradasi hidrokarbon yang disebut bakteri hidrokarbonoklast pada suatu tempat berhubungan erat dengan kuantitas dan kualitas hidrokarbon yang ada di dalam lingkungan tersebut. Pada lingkungan perairan (air tawar atau laut) jumlahnya akan lebih banyak ditemukan pada daerah sediment dibandingkan pada kolom air (Sihag 2014).

Biodegradasi minyak diterima secara internasional sebagai solusi yang hemat biaya dan ramah lingkungan. Biodegradasi melibatkan bakteri dalam menanggulangi pencemaran. Studi terbaru telah menetapkan lebih dari 79 genera bakteri yang mampu mendegradasi hidrokarbon minyak bumi. Berbagai spesies mikroba seperti *Achromobacter xylosoxidans*, *Aeribacillus pallidus*, *Geobacillus thermodenitrificans*, *Gordonia sihwensis* dan *Pseudomonas aeruginosa* memainkan peran penting dalam degradasi hidrokarbon (Ejaz dkk., 2021).

Hidrokarbon adalah sumber yang kaya akan karbon dan energi yang dibutuhkan mikroba untuk pertumbuhan. Sebelum karbon tersedia untuk digunakan, molekul hidrokarbon yang lebih besar harus dipecah menjadi molekul yang lebih sederhana yang cocok untuk digunakan oleh mikroba lain. Lebih dari 70 genus mikroba diketahui yang dapat mendegradasi molekul hidrokarbon. Hidrokarbon yang dilepaskan di lingkungan diurai terutama oleh bakteri dan jamur. Mikroba ini ada di mana-mana di lingkungan seperti tanah, air tawar dan

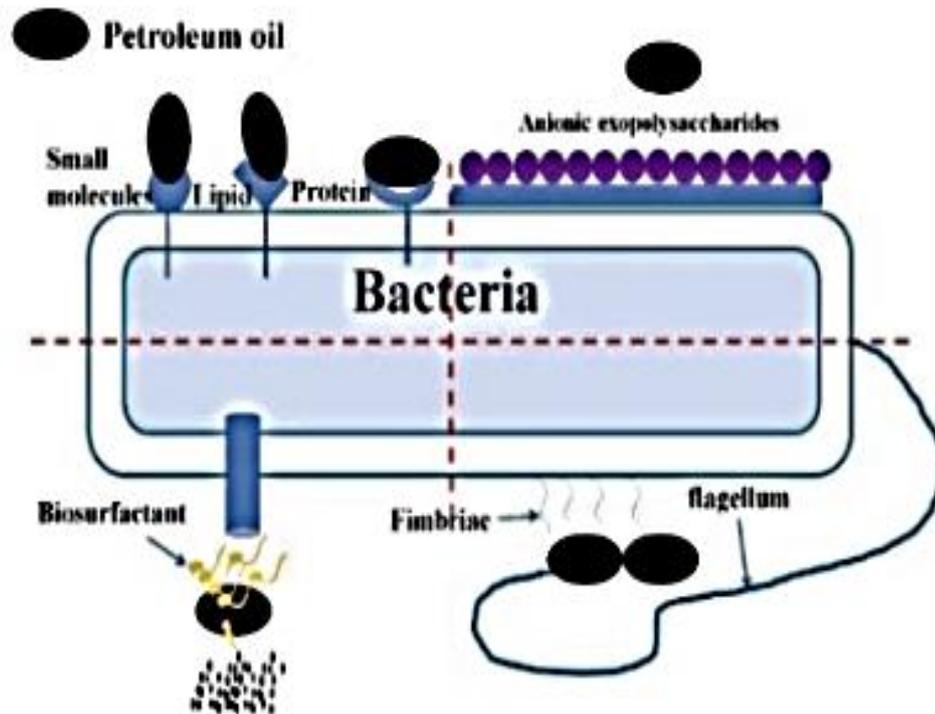
air laut. Dari sekian banyak bakteri yang ditemukan untuk mendegradasi hidrokarbon, yang paling sering ditemukan di lingkungan laut dan tanah adalah *Achromobacter*, *Acinetobacter*, *Alcaligenes*, *Arthrobacter*, *Bacillus*, *Flavobacterium*, *Nocardia* dan *Pseudomonas*. Kelompok jamur yang umum ditemukan di lingkungan laut dan mampu mendegradasi hidrokarbon yaitu *Aureobasidium*, *Candida*, *Rhodotorula* dan *Sporobolomyces* (Sihag 2014).

II.4 Mekanisme Biodegradasi Petroleum

Secara umum biodegradasi atau penguraian bahan (senyawa) organik oleh mikroorganisme dapat terjadi bila terjadi transformasi struktur sehingga terjadi perubahan integritas molekuler. Proses bioremediasi merupakan inovasi teknik yang melibatkan degradasi atau reduksi pencemar organik yang berbahaya menjadi senyawa yang kurang toksik. Proses ini berupa rangkaian reaksi kimia enzimatik atau biokimia yang mutlak memerlukan kondisi lingkungan yang harus sesuai dengan pertumbuhan dan perkembangbiakan mikroorganisme. Senyawa hidrokarbon dalam minyak bumi merupakan sumber karbon bagi pertumbuhan bakteri pendegradasi hidrokarbon (Nugroho, 2006).

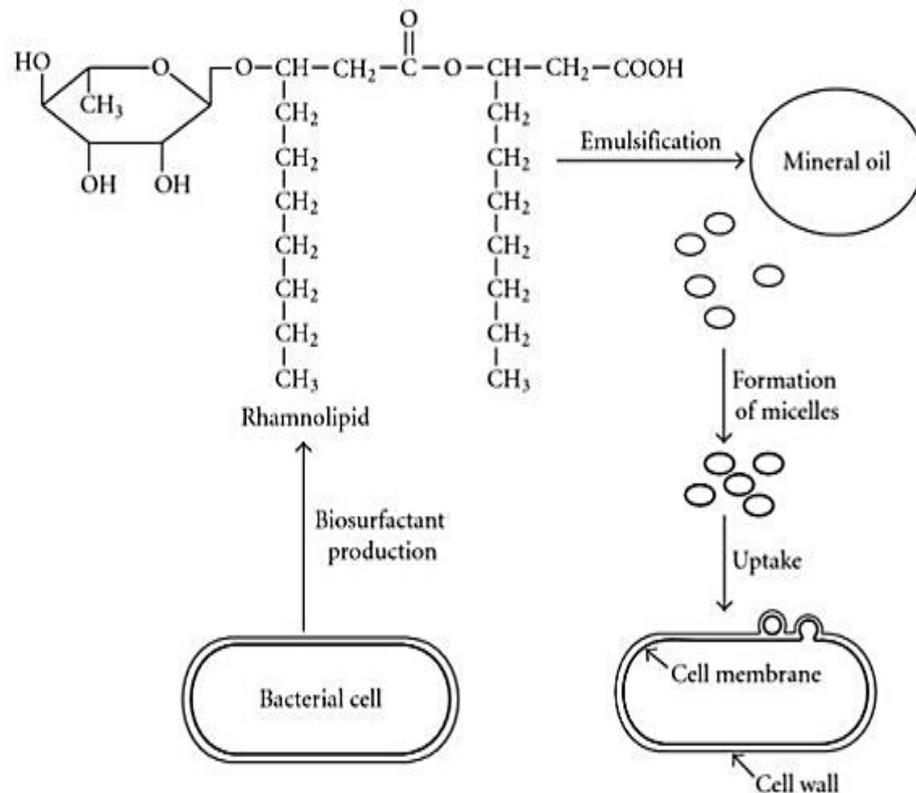
Langkah pertama dalam proses degradasi minyak bumi yaitu kontak langsung dan efektif antara sel bakteri dan substrat hidrokarbon minyak bumi. 1) Fimbriae atau flagel bakteri akan menempel pada minyak bumi. Bakteri akan meningkatkan kemampuan adhesi sel dengan mengubah komponen permukaannya dan mensekresi bioemulsi untuk meningkatkan akses mereka ke substrat hidrokarbon target. 2) Biosurfaktan yang disekresikan oleh bakteri meningkatkan laju disolusi atau desorpsi yang mengarah ke pelarutan atau emulsi polutan hidrokarbon minyak bumi. 3) Protein, lipid dan molekul kecil lainnya

pada permukaan bakteri akan menempel pada permukaan minyak bumi. Setelah masuknya oksigen molekuler ke dalam molekul oleh oksigenase fungsional maka akan terjadi proses biodegradasi dengan bantuan enzim. Komponen utama degradasi bakteri dari hidrokarbon minyak bumi adalah berbagai enzim khusus (Xu et al., 2018).



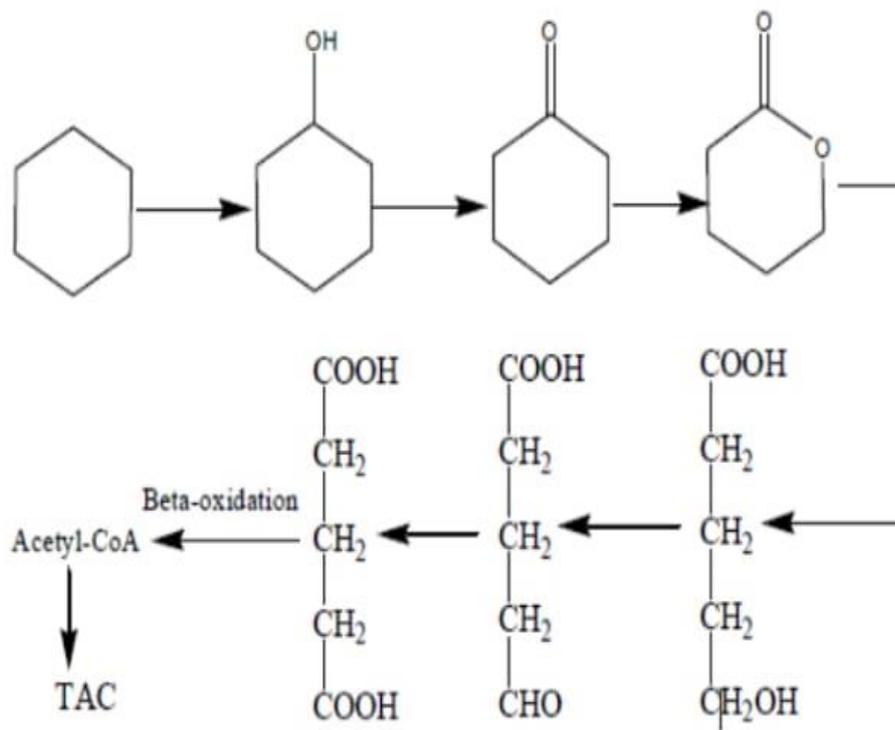
Gambar 9. Mekanisme kontak fisik antara bakteri dan hidrokarbon minyak bumi (Xu dkk., 2018).

Proses degradasi hidrokarbon minyak bumi dimulai dengan polutan minyak bumi diemulsikan oleh surfaktan yang disekresikan oleh mikroorganisme. Hidrokarbon minyak bumi yang teremulsi diadsorpsi oleh permukaan mikroorganisme. Kemudian hidrokarbon minyak bumi yang teradsorpsi pada permukaan membran sel memasuki membran sel melalui transpor aktif atau transpor pasif. Terakhir hidrokarbon minyak bumi masuk ke dalam sel dan mengalami reaksi enzimatik dengan enzim yang sesuai untuk mendegradasi polutan (Xiaokang dkk., 2019).

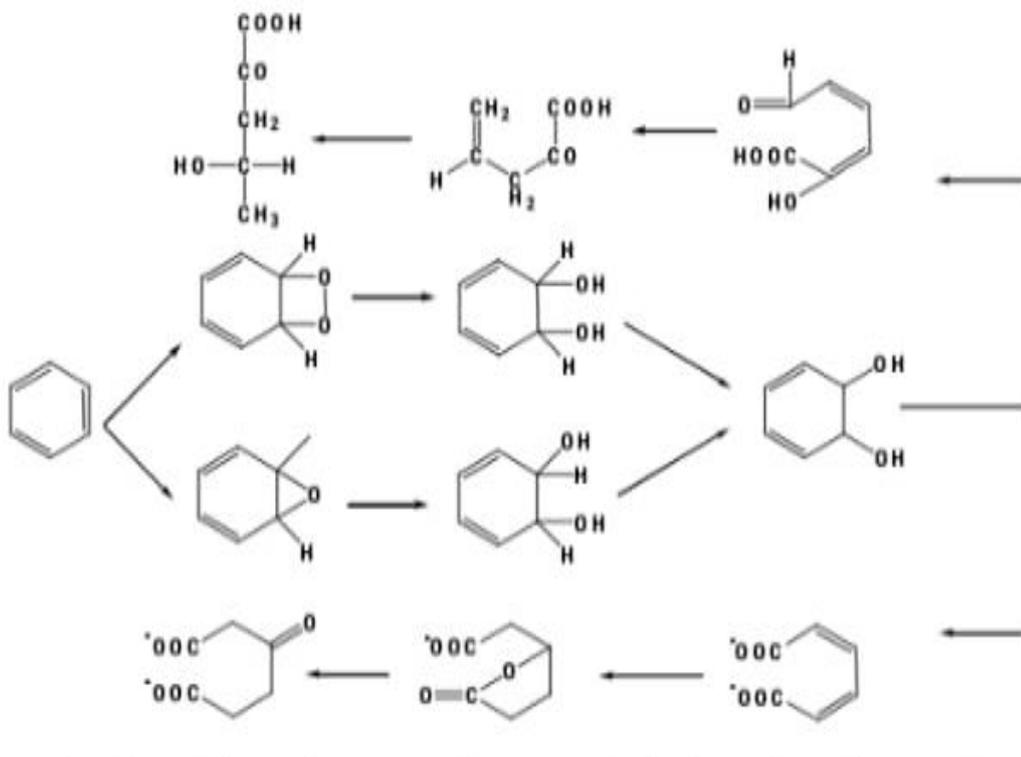


Gambar 10. Mekanisme emulsifikasi oleh biosurfaktan (Xiaokang dkk., 2019).

Kemampuan degradasi hidrokarbon minyak bumi oleh mikroorganisme merupakan faktor penting dalam perbaikan polusi. Jalur degradasi alkana dibagi menjadi oksidasi ujung tunggal, oksidasi ujung ganda dan oksidasi ujung sekunder. Ketiga mode oksidasi ini diimplementasikan dalam posisi yang berbeda pada rantai karbon untuk membentuk alkohol, aldehida, asam dan CoA. Di antara hidrokarbon minyak bumi, n-alkana adalah yang paling mudah untuk didegradasi. Hidrokarbon [alkana](#) merupakan hidrokarbon yang paling sederhana, hidrokarbon ini seluruhnya terdiri dari ikatan tunggal dan terikat dengan atom hidrogen. Selama degradasi, alkana diubah menjadi alkohol oleh aksi enzim oksigenase yang menyerang gugus metil terminal. Alkohol selanjutnya dioksidasi menjadi aldehida dan kemudian menjadi asam lemak (Xiaokang dkk., 2019).



Gambar 11. Jalur degradasi alkana oleh bakteri pendegradasi hidrokarbon (Xiaokang dkk., 2019).



Gambar 12. Jalur degradasi hidrokarbon aromatik oleh bakteri pendegradasi hidrokarbon (Xiaokang dkk., 2019).

Degradasi hidrokarbon aromatik lebih rumit dari pada hidrokarbon lainnya. Hidrokarbon aromatik akan memiliki lokasi degradasi yang berbeda karena proses degradasinya yang berbeda. Misalnya, *Arthrobacter* dan *Mycobacterium* memiliki lebih dari satu jalur degradasi untuk fenantrena. *Arthrobacter* dan *Mycobacterium* merusak pada posisi yang berbeda dari cincin fenantrena dan dapat membentuk produk seperti asam 2-hidroksi-1-naftoat atau asam 2, 2-bifenildioat (Xiaokang dkk., 2019).

Degradasi hidrokarbon aromatik polisiklik yang berbeda pada dasarnya sama. Hidrokarbon aromatik polisiklik terdegradasi diawali dengan cincin hidrokarbon aromatik polisiklik dioksidasi membentuk senyawa trans-dihidro-dihidroksi atau dikatalisis oleh suatu mikroenzim dalam suatu mikroorganisme. Sebuah cincin benzene oksida awal dari senyawa cis-dihidro-dihidroksi, yang didehidrogenasi untuk membentuk diol epoksida. Pembelahan epoksidatif diol membentuk alkohol dengan kurang dari satu cincin dan menghasilkan asam salisilat, katekol dan produk seperti asam gentisik kemudian terus teroksidasi dan rantai hidrokarbon mengalami jalur oksidasi alkana untuk membentuk asam karboksilat, yang bereaksi dengan CoA untuk membentuk asetil-CoA melalui siklus TAC (Xiaokang dkk., 2019).

II.5 Biosurfaktan

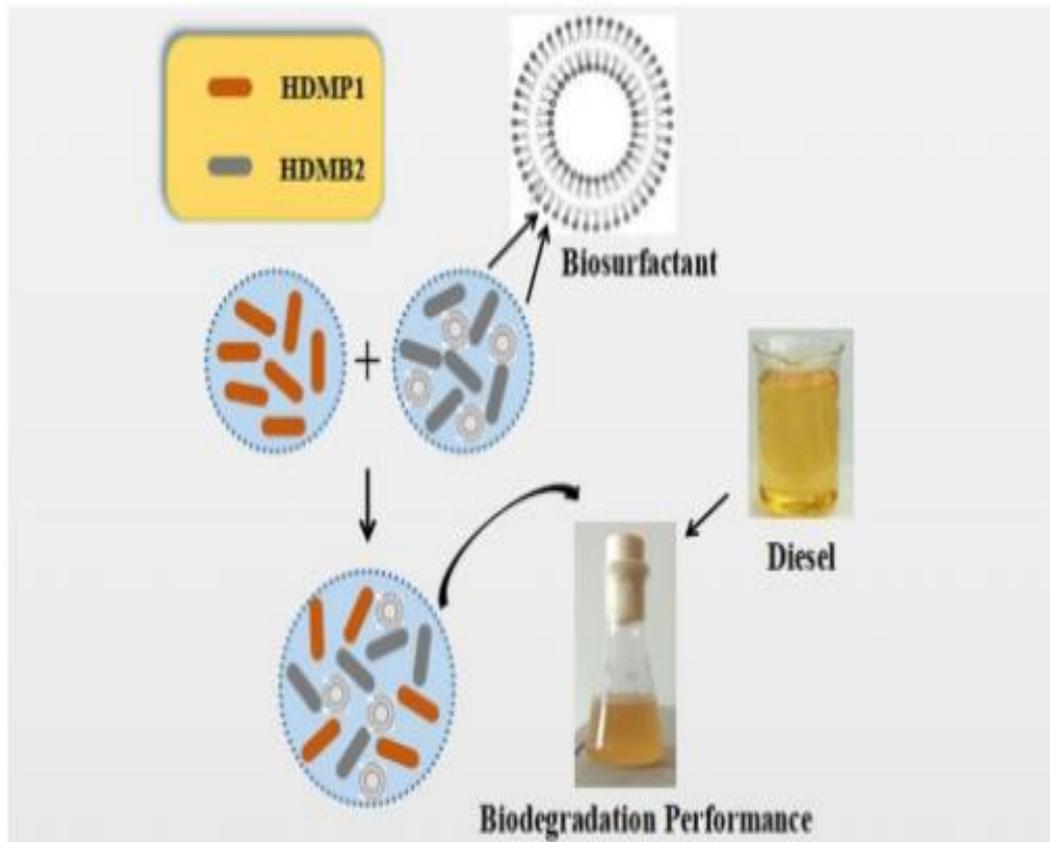
Surfaktan adalah molekul amfifilik yang terdiri dari bagian hidrofilik (polar) dan hidrofobik (nonpolar). Terakumulasi pada antarmuka, bahan kimia ini dapat menurunkan tegangan permukaan dan tegangan antarmuka antara larutan berair dan larutan tak bercampur lainnya. Surfaktan disintesis secara kimia dari sumber petrokimia dan oleokimia. Biosurfaktan adalah senyawa aktif permukaan alami yang disintesis oleh berbagai mikroorganisme (Ghasemi dkk., 2019).

Biosurfaktan merupakan salah satu strategi dari bakteri yang digunakan untuk mempengaruhi penyerapan senyawa hidrofobik. Hidrokarbon adalah molekul yang sangat tahan yang hidrofobik dan memiliki kelarutan air yang rendah. Mikroba sering meningkatkan degradasi senyawa hidrofobik dengan melepaskan biosurfaktan. Dengan mengurangi tegangan antarmuka. Biosurfaktan meningkatkan kelarutan dan area kontak senyawa yang tidak larut dan meningkatkan fluiditas, bioavailabilitas, dan efisiensi biodegradasi senyawa yang tidak larut. Dibandingkan dengan surfaktan kimia, biosurfaktan memiliki keunggulan seperti toksisitas rendah, biodegradabilitas tinggi, kompatibilitas lingkungan yang baik, dan toleransi lingkungan yang tinggi terkhusus pada remediasi area yang terkontaminasi minyak (Wu dkk., 2019).

Biosurfaktan mempromosikan bioremediasi tumpahan minyak di lingkungan laut dengan meningkatkan kelarutan komponen minyak bumi dan mengurangi tegangan permukaan minyak dan air. Biosurfaktan berguna sebagai agen antimikroba. Surfaktan yang dihasilkan mikroorganisme (biosurfaktan) dapat larut dalam pelarut organik (nonpolar) dan pelarut air (polar) serta dikategorikan berdasarkan pada struktur kimia dan sumber mikrobiologisnya. Mereka termasuk glikolipid, lipopeptida, protein, fosfolipid, kompleks polisakarida-protein, lipopolisakarida, lipid netral dan asam lemak. Pemafaatan mikroba penghasil biosurfaktan memiliki potensi yang besar sebagai agen promotor untuk mendegradasi hidrokarbon (Husain dkk., 1997).

Saat ini, peningkatan efek degradasi bakteri pendegradasi diesel dengan menggabungkannya dengan bakteri penghasil surfaktan merupakan cara penting untuk memperbaiki ekologi daerah yang terkontaminasi minyak secara efisien. Di antara 14 isolat bakteri, tiga bakteri pendegradasi solar menunjukkan kinerja

degradasi yang lebih baik seperti pada Gambar 13, dengan tingkat degradasi solar 50,52% (HDMP1), 42,70% (HDMP2), dan 36,46% (HDMP3). Tiga bakteri penghasil biosurfaktan menunjukkan kemampuan pengemulsi yang lebih baik. NS (E24) nilai biosurfaktan terhadap solar ditentukan menjadi 55% (HDMB1), 81% (HDMB2), dan 73% (HDMB3). Bakteri penghasil surfaktan terbaik (HDMB2) menghasilkan biosurfaktan lipopeptida yang dapat diamati dengan adanya peptida dan gugus karboksil menggunakan spektroskopi inframerah transformasi Fourier. Selain itu, interaksi antara bakteri pendegradasi diesel dan bakteri penghasil biosurfaktan dievaluasi dan ditemukan bahwa kombinasi HDMP1 dan HDMB2 memiliki kinerja yang signifikan untuk menghilangkan minyak (laju degradasi solar adalah 67,38%), yang menunjukkan aplikasinya di masa depan dalam proses pemulihan minyak dengan menggunakan mikroba (Wu dkk., 2019).



Gambar 13. Kinerja degradasi biosurfaktan (Xu dkk., 2018).

II.6 Biodegradasi Minyak Bumi Secara Mikrokosmos

Mikrokosmos adalah suatu kondisi pertumbuhan yang semialami, dimana lingkungan pertumbuhan bakteri dibuat menyerupai lingkungan aslinya. Biodegradasi secara mikrokosmos bertujuan untuk melakukan uji kemampuan mikroba hidrokarbonoklastik untuk meningkatkan degradasi minyak bumi. Senyawa-senyawa organik yang terbentuk di alam dapat didegradasi oleh mikroorganisme bila kondisi lingkungan menunjang proses degradasi tersebut. Bakteri dalam aktivitas hidupnya memerlukan molekul karbon seperti petroleum sebagai salah satu sumber nutrisi dan energi untuk melakukan metabolisme dan perkembangbiakannya, sedangkan senyawa nonhidrokarbon merupakan nutrisi pelengkap yang dibutuhkan untuk pertumbuhannya seperti K_2HPO_4 dan $FeSO_4$. Selain itu pada mikrokosmos juga digunakan pompa aerator untuk menjaga ketersediaan suplai oksigen serta memungkinkan terjadinya homogenasi media pertumbuhan (Nugroho, 2006).