

**KEMAMPUAN GAC DAN KONSORSIUM MIKROBA
DALAM MENDEGRADASI LIMBAH CAIR YANG
MENGANDUNG TOLUENA DENGAN MENGGUNAKAN
KOLOM *BIOBARRIER* SKALA PILOT**

SKRIPSI

Oleh

DEDI ALFIAN
04 03 06 7021



**DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
GASAL 2007/2008**

**KEMAMPUAN GAC DAN KONSORSIUM MIKROBA
DALAM MENDEGRADASI LIMBAH CAIR YANG
MENGANDUNG TOLUENA DENGAN MENGGUNAKAN
KOLOM *BIOBARRIER* SKALA PILOT**

SKRIPSI

Oleh

**DEDI ALFIAN
04 03 06 7021**



**SKRIPSI INI DIAJUKAN UNTUK MELENGKAPI SEBAGIAN
PERSYARATAN MENJADI SARJANA TEKNIK**

**DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
GASAL 2007/2008**

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul:

KEMAMPUAN GAC DAN KONSORSIUM MIKROBA DALAM MENDEGRADASI LIMBAH CAIR YANG MENGANDUNG TOLUENA DENGAN MENGGUNAKAN KOLOM *BIOBARRIER* SKALA PILOT

yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari skripsi yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau Instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana semestinya.

Depok, Desember 2007

(Dedi Alfian)

NPM. 04 03 06 7021

PENGESAHAN

Skripsi dengan Judul :

**KEMAMPUAN GAC DAN KONSORSIUM MIKROBA DALAM
MENDEGRADASI LIMBAH CAIR YANG MENGANDUNG
TOLUENA DENGAN MENGGUNAKAN KOLOM *BIOBARRIER*
SKALA PILOT**

dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Depok, Desember 2007

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Ir. Praswasti PDK Wulan, MT

Dr. Ing. Ir. Misri Gozan, MTech.

NIP. 132 008 518

NIP. 132 091 210

UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillah puji syukur kehadiran Allah SWT atas rahmat dan ridho-Nya saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Tak lupa pula saya hendak mengucapkan terima kasih atas bimbingan, dukungan, bantuan dan doa kepada:

1. Ir. Praswasti PDK Wulan, MT dan Dr. Ing. Misri Gozan M.Tech, selaku pembimbing skripsi yang telah memberikan banyak saran, masukan dan bimbingan.
2. Dr. Ir. Widodo Purwanto, DEA, selaku Kepala Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
3. Seluruh dosen di Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia atas seluruh ilmu yang telah diberikan.
4. Mama dan Papa atas doa, semangat, kasih sayang, cinta serta dukungan yang mengalir tanpa henti kepada ananda, kedua adik tercinta yang selalu mendukung kakak, serta Ma Ende dan Baba Ende, yang selalu memberikan doa dan dukungannya dari jauh.
5. Seluruh karyawan DTK atas bantuan serta dukungan yang diberikan.
6. Segenap komponen Mamo Inc., Gede, Onggo, Tri, Nova, Julius atas segala saran, nasihat serta dukungan moril yang diberikan selama ini.
7. Abe, Dino, Andri, Bonggas, Birong, Andy, Ade, Dungky, Japra, Erik, Ryan, Fajar, Elmar, Ugi, Weldy, Jacky, serta seluruh komunitas Dota Pokus, baik di masa lalu, masa kini, ataupun masa mendatang.
8. Batavia Terjaga: Toro, Eris, Adit, serta yang mulai hilang dari peredaran.
9. Seluruh teman ex-aksel SMUN 70, Aji, Ami, Amir, Dian, Difa, Neysa, Okfel, Pulung, Ray, Riana, Sally, dan Sylva yang memberikan banyak semangat kepada penulis.
10. Rekan-rekan sesama satu lab, Yuli, Benget, Arby, Dedi, Ricci, Bustom atas bantuannya.
11. Semua teman GP03 yang menemani keseharian selama perkuliahan.
12. Para junior yang telah memberikan dukungannya.
13. Para jenius, Icefrog, Blizzard, Game Freaks, dan Squaresoft, *nice jobs*.
14. Pihak-pihak lainnya yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Dedi Alfian
NPM 04 03 06 7021
Departemen Teknik Kimia

Dosen Pembimbing
I. Ir. Praswasti PDK Wulan, MT
II. Dr. Ing. Ir. Misri Gozan, MTech.

**KEMAMPUAN GAC DAN KONSORSIUM MIKROBA DALAM
MENDEGRADASI LIMBAH CAIR YANG MENGANDUNG TOLUENA
DENGAN MENGGUNAKAN KOLOM *BIOBARRIER* SKALA PILOT**

ABSTRAK

Toluena merupakan salah satu komponen utama dalam fraksi minyak bumi yang bersifat racun dan karsinogenik serta sulit didegradasi oleh lingkungan. Pada limbah cair, konsentrasi toluena dapat direduksi menggunakan adsorpsi karbon aktif. Setelah adsorben jenuh dengan kontaminan pada proses adsorpsi, karbon aktif harus diregenerasi atau diganti. Mikroorganisme digunakan untuk regenerasi adsorben dengan proses biodegradasi kontaminan. Penelitian ini bertujuan menguji kemampuan GAC dan konsorsium mikroba dalam mendegradasi limbah cair yang mengandung toluena. Penelitian ini menggunakan kolom *biobarrier* skala pilot. Selain itu, dilakukan pengujian pengaruh variasi konsentrasi H₂O₂ sebagai elektron akseptor yang mensuplai oksigen pada proses *biobarrier* toluena dengan memanfaatkan aktivitas konsorsium *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas fluorescens*, *Aeromonas hydrophilla*, *Bacillus coagulans* dan *Bacillus subtilis* dalam *biobarrier* skala pilot.

Enrichment dilakukan terhadap konsorsium bakteri untuk adaptasi dengan toluena. Konsorsium bakteri hasil *enrichment* diinjeksikan 500 ml ke dalam kolom *biobarrier* yang berisi *Granular Activated Carbon* (GAC) yang telah melewati tahap adsorpsi toluena. Dilakukan variasi konsentrasi H₂O₂ 10 mg/l, 30 mg/l, dan 50 mg/l untuk biodegradasi yang optimum. Kontaminan dialirkan secara kontinu dengan laju alir sebesar 0,63 lpm, sementara elektron akseptor dialirkan dengan laju alir 0,2 lpm dan nutrisi 0,1 lpm.

Konsorsium bakteri akan mereaktivasi GAC dengan biodegradasi toluena yang menempel di permukaan dan teradsorp dalam pori GAC. Proses biodegradasi optimum pada konsentrasi H₂O₂ 10 mg/l dengan konsentrasi toluena terdegradasi maksimum sebesar 168,3 ppm.

Kata kunci : Adsorpsi, Biodegradasi, Elektron akseptor, *Biobarrier*

Benget P. S.
NPM 04 03 06 7021
Chemical Department Engineering

Counsellor
Ir. Praswasti PDK Wulan, MT
Dr. Ing. Ir. Misri Gozan, M.Tech

**GAC AND MICROBIAL CONSORTIUM CAPABILITY TO DEGRADATE
WASTEWATER CONTAINING TOLUENA USING PILOT SCALE
BIOBARRIER COLUMN**

ABSTRACT

Toluene is one of the main components found in the crude oil fraction. It is toxic, carcinogenic and barely degradable by natural environment. In waste water, toluene concentration could be reduced by using activated carbon adsorption. By the time the activated carbon is saturated by toluene, it needs to be regenerated or replaced. Microorganism is the agent of adsorbent regeneration through process called biodegradation. This research, is aimed to study GAC and microbial consortium to degradate wastewater containing toluene. This research use pilot scale biobarrier column. In addition, this research observe toward the effect of electron acceptor, H_2O_2 , concentration that act as oxygen supplier on biobarrier process of toluene utilizing the activity of bacterial consortium of *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas fluorescens*, *Aeromonas hydrophilla*, *Bacillus coagulans*, and *Bacillus subtilis* in pilot scale biobarrier instrument.

Enrichment is a process which bacterial consortium is adapted to toluene environment. After some certain times, 500 ml of the enriched consortium is injected to biobarrier column that filled with GAC. This GAC has already pass the toluene adsorption phase. Biodegradation is carried out on 3 variations of H_2O_2 concentration, 10 mg/L, 30 mg/L, and 50 mg/L. Contaminant is flowed continuously at 0.63 lpm flow rate, while electron acceptor at 0.2 lpm flow rate and nutrition at 0.1 lpm flow rate.

The bacterial consortium would reactivate GAC by biodegrading toluene that attach on its surface and that adsorbed inside its pores. The biodegradation process attain the optimum result on H_2O_2 concentration 10 mg/L with maximum value of toluene degradation at 168.3 ppm.

Keywords: Adsorption, biodegradation, electron acceptor, biobarrier

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	ii
PENGESAHAN.....	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
ABSTRAK.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 RUMUSAN MASALAH.....	3
1.3 TUJUAN PENELITIAN.....	3
1.4 BATASAN MASALAH.....	3
1.5 SISTEMATIKA PENULISAN	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 MINYAK BUMI.....	5
2.1.1 <i>Limbah Minyak</i>	6
2.1.2 <i>Toluena</i>	7
2.2 ADSORPSI.....	9
2.2.1 <i>Jenis-jenis Adsorpsi</i>	9
2.2.2 <i>Faktor-faktor yang Mempengaruhi Daya Adsorpsi</i>	10
2.2.3 <i>Breakthrough Curve (Kurva Terobosan)</i>	11
2.2.4 <i>Keseimbangan Adsorpsi</i>	12
2.2.5 <i>Karbon Aktif</i>	12
2.2.5.1 <i>Klasifikasi Karbon Aktif</i>	13
2.2.5.2 <i>Sifat Fisika Karbon Aktif</i>	14
2.2.5.3 <i>Sifat Kimia Karbon Aktif</i>	14
2.2.5.4 <i>Proses Regenerasi Karbon Aktif</i>	15
2.3 BIOREMEDIASI	16

2.3.1	<i>Bakteri</i>	19
2.3.2.1	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	20
2.3.2.2	<i>Pseudomonas fluorescens</i>	21
2.3.2.3	<i>Bacillus subtilis</i>	22
2.3.2.4	<i>Bacillus coagulans</i>	22
2.3.2.5	<i>Aeromonas hydrophyla</i>	23
2.3.2	<i>Pertumbuhan Mikroba</i>	23
2.3.3	<i>Biodegradasi Toluena</i>	26
2.3.4	<i>Elektron Akseptor</i>	27
2.3.5	<i>Nutrisi</i>	29
2.4	BIOBARRIER	30
2.5	GAS CHROMATOGRAPHY	31
BAB III METODE PENELITIAN		33
3.1	DIAGRAM ALIR PENELITIAN	33
3.2	ALAT DAN BAHAN PENELITIAN	35
3.1.1	<i>Peralatan</i>	35
3.1.2	<i>Bahan</i>	37
3.3	PROSEDUR PENELITIAN	38
3.3.1	<i>Tahap Persiapan</i>	38
3.3.1.1	<i>Persiapan Granular Activated Carbon (GAC)</i>	38
3.3.1.2	<i>Persiapan Campuran Kontaminan</i>	38
3.3.1.3	<i>Persiapan Kolom Biobarier</i>	39
3.3.1.4	<i>Kalibrasi Gas Kromatografi FID</i>	43
3.3.2	<i>Enrichment Konsorsium Bakteri</i>	44
3.3.2.1	<i>Sterilisasi Alat</i>	44
3.3.2.2	<i>Proses enrichment konsorsium bakteri</i>	44
3.3.2.3	<i>Penghitungan Jumlah Bakteri</i>	46
3.3.3	<i>Adsorpsi Toluena Menggunakan GAC</i>	47
3.3.4	<i>Biodegradasi Model Kontaminan Toluena</i>	47
3.3.4.1	<i>Pembuatan larutan H₂O₂ (elektron akseptor)</i>	48
3.3.4.2	<i>Pengambilan Data Biodegradasi</i>	49
3.4	VARIABEL PENELITIAN	49

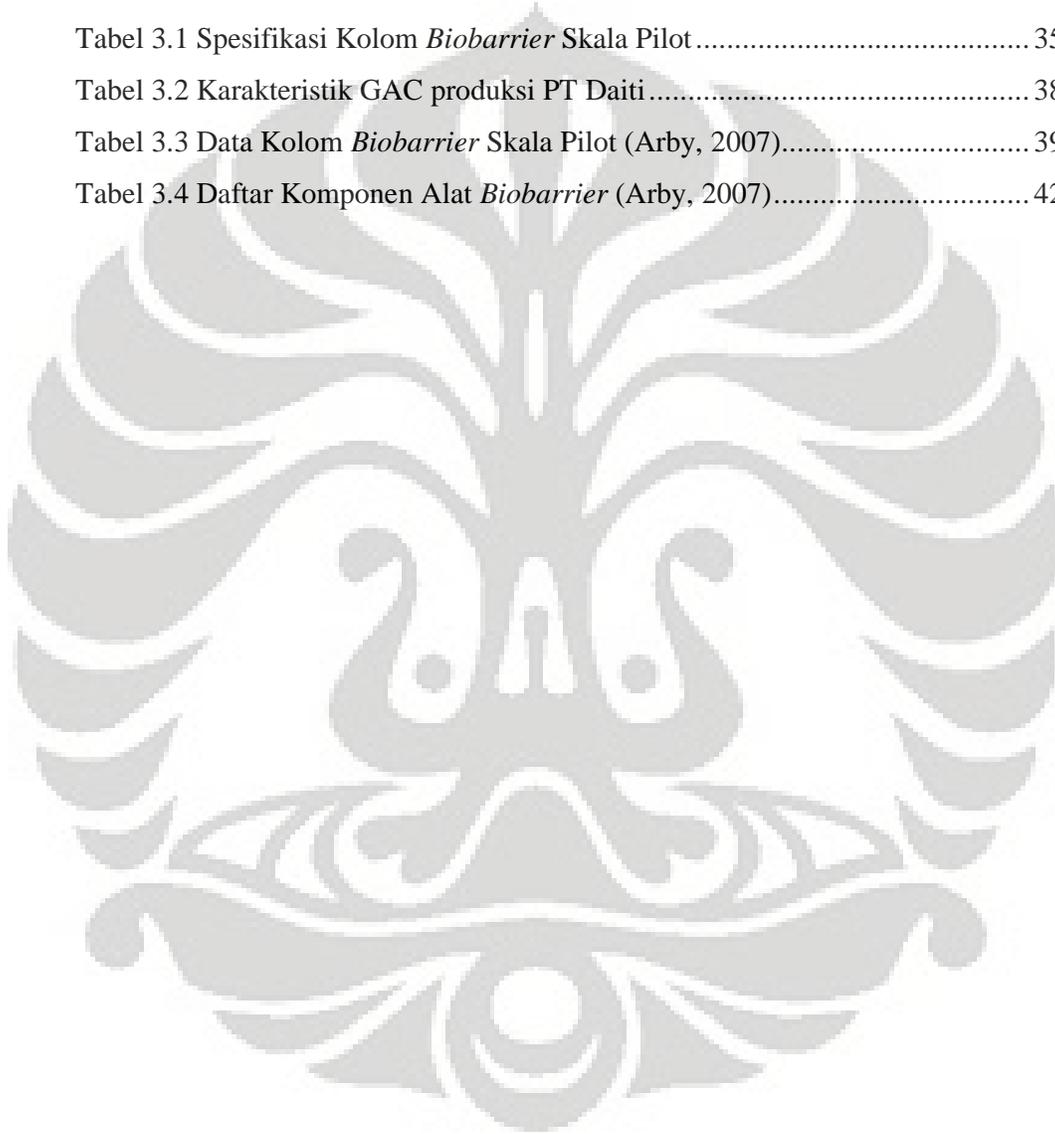
3.5	DATA PENGAMATAN.....	50
3.6	PENGOLAHAN DATA	50
BAB IV PEMBAHASAN		51
4.1	ENRICHMENT KONSORSIUM BAKTERI.....	51
4.2	ADSORPSI TOLUENA MENGGUNAKAN GAC.....	51
4.3	BIODEGRADASI MODEL KONTAMINAN TOLUENA	54
4.3.1	<i>Persiapan Tahap Biodegradasi Toluena</i>	<i>54</i>
4.3.2	<i>Proses Biodegradasi Toluena di Dalam Kolom Biobarrier Skala Pilot.....</i>	<i>55</i>
4.3.3	<i>Pembahasan Biodegradasi Toluena di Dalam Kolom Biobarrier Skala Pilot</i>	<i>57</i>
BAB V PENUTUP		66
5.1	KESIMPULAN.....	66
5.2	SARAN	66
DAFTAR PUSTAKA		67
LAMPIRAN.....		70

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>Breakthrough Curve</i> (Kurva Terobosan).....	12
Gambar 2.2 Sebuah Koloni Bakteri (Mellor et al., 1998).....	20
Gambar 2.3 <i>Pseudomonas aeruginosa</i> (Mellor et al., 1998)	21
Gambar 2.4 <i>Pseudomonas flurescens</i> (http://genome.jgi-psf.org)	21
Gambar 2.5 <i>Bacillus subtilis</i> (http://en.wikipedia.org).....	22
Gambar 2.6 <i>Bacillus coagulans</i> (http://en.wikipedia.org)	23
Gambar 2.7 <i>Aeromonas Hydrophilla</i> (http://en.wikipedia.org)	23
Gambar 2.8 Empat Fase Pertumbuhan Mikroorganisme (Baker et al., 1994)	24
Gambar 2.9 Metabolisme Toluena Menjadi <i>Catechol</i> (Wrenn et al., 1998).....	26
Gambar 2.10 Reaksi Pemutusan Cincin Orto <i>Catechol</i> (Wrenn et al., 1998)....	27
Gambar 2.11 Reaksi Pemutusan Cincin Meta <i>Catechol</i> (Wrenn et al., 1998)....	27
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	34
Gambar 3.2 Kolom <i>Biobarrier</i> Skala Pilot.....	36
Gambar 3.3 Ilustrasi Kolom <i>Biobarrier</i>	40
Gambar 3.4 Skema Aliran Kolom <i>Biobarrier</i> Skala Pilot	41
Gambar 3.5 Set Peralatan <i>Biobarrier</i> Skala Pilot	43
Gambar 3.6 <i>Enrichment</i> Konsorsium Bakteri.....	45
Gambar 3.7 Konsorsium Bakteri, <i>Nutrient Agar</i> , dan Larutan LC	46
Gambar 4.1 Profil Konsentrasi Toluena selama Proses Adsorpsi Berlangsung.....	52
Gambar 4.2 Perbedaan Konsentrasi Toluena antara Outlet dan Inlet selama Proses Adsorpsi ..	53
Gambar 4.3 Akumulasi Toluena pada Proses Adsorpsi Menggunakan GAC	53
Gambar 4.4 Profil Konsentrasi Toluena selama Proses Biodegradasi 66 Jam Pertama	58
Gambar 4.5 Perbedaan Konsentrasi Toluena pada Proses Biodegradasi 66 Jam Pertama. 58	
Gambar 4.6 Profil Konsentrasi Toluena selama Proses Biodegradasi 48 Jam Kedua. 59	
Gambar 4.7 Perbedaan Konsentrasi Toluena pada Proses Biodegradasi 48 Jam Pertama... 60	
Gambar 4.8 Profil pH Toluena Selama Proses Biodegradasi.....	62
Gambar 4.9 pH dan Perbedaan Konsentrasi Toluena antara Outlet dengan Inlet pada Proses Biodegradasi.....	63
Gambar 4.10 Akumulasi Toluena pada Proses Biodegradasi 66 Jam Pertama.....	64
Gambar 4.11 Akumulasi Toluena pada Proses Biodegradasi 48 Jam Kedua	65

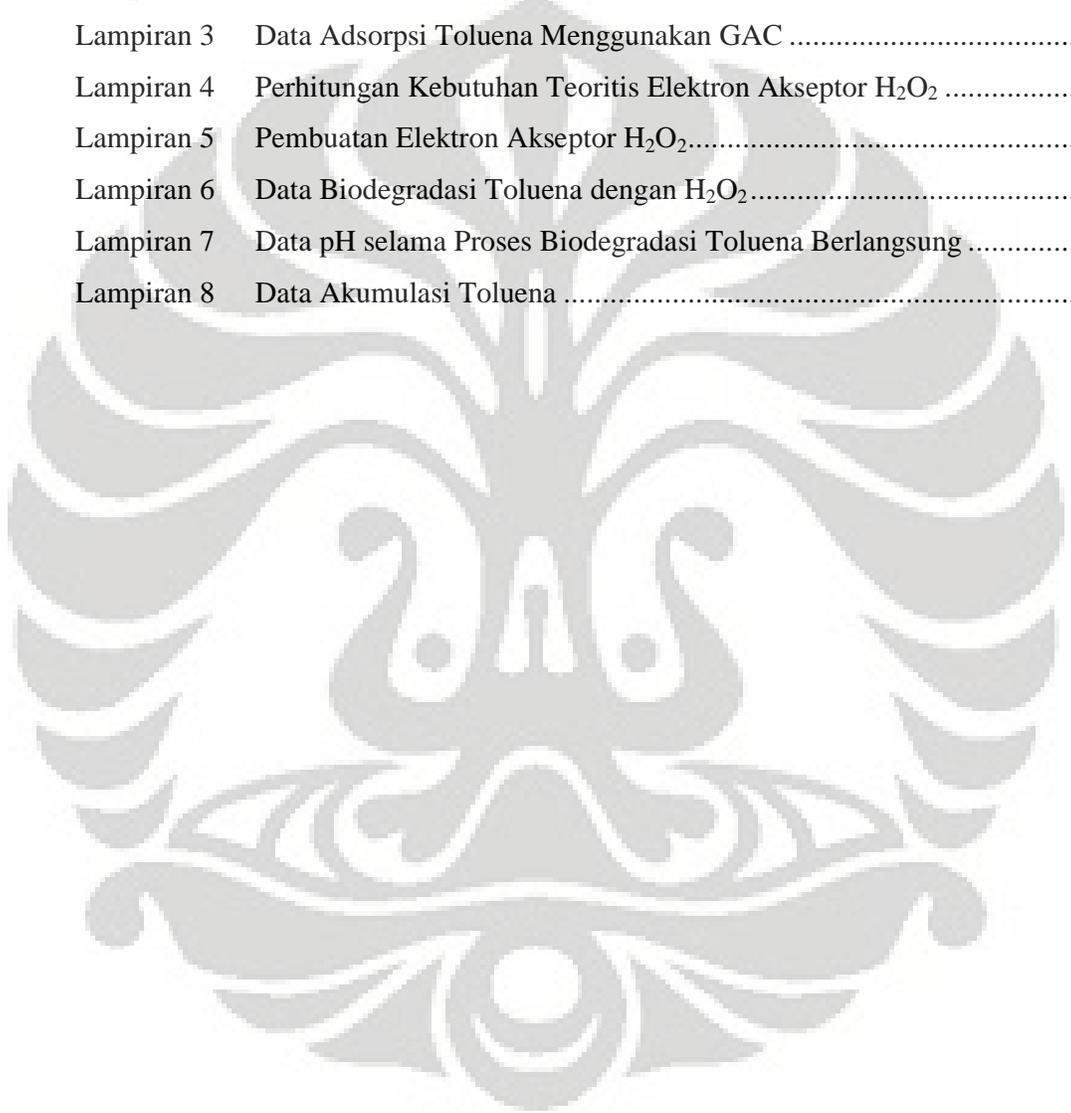
DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Properti Toluena (http://en.wikipedia.org)	8
Tabel 2.2 Nilai Energi Beberapa Elektron Akseptor (Lehman, 2001).....	28
Tabel 2.3 Elemen-elemen Nutrisi	30
Tabel 3.1 Spesifikasi Kolom <i>Biobarrier</i> Skala Pilot	35
Tabel 3.2 Karakteristik GAC produksi PT Daiti	38
Tabel 3.3 Data Kolom <i>Biobarrier</i> Skala Pilot (Arby, 2007).....	39
Tabel 3.4 Daftar Komponen Alat <i>Biobarrier</i> (Arby, 2007).....	42



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Kalibrasi Pompa beserta Flowmeter Limbah, Elektron Akseptor, dan Nutrisi	71
Lampiran 2	Kurva Kalibrasi GC-FID (contoh).....	72
Lampiran 3	Data Adsorpsi Toluena Menggunakan GAC	73
Lampiran 4	Perhitungan Kebutuhan Teoritis Elektron Akseptor H ₂ O ₂	74
Lampiran 5	Pembuatan Elektron Akseptor H ₂ O ₂	75
Lampiran 6	Data Biodegradasi Toluena dengan H ₂ O ₂	76
Lampiran 7	Data pH selama Proses Biodegradasi Toluena Berlangsung	77
Lampiran 8	Data Akumulasi Toluena	78



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Saat ini, industri petrokimia merupakan industri yang memiliki perkembangan cukup pesat di Indonesia. Salah satu cabang industri petrokimia yang cukup berkembang di Indonesia adalah industri petrokimia dari jalur aromatik. Dari jalur ini dihasilkan senyawa benzena, toluena, dan xilena sebagai produk utamanya. Ketiga senyawa aromatik dasar inilah yang menjadi bahan baku produk-produk sintesis jalur aromatik.

Selain menghasilkan produk yang bermanfaat, industri petrokimia juga menghasilkan limbah cair yang masih mengandung senyawa aromatik seperti toluena. Senyawa ini dapat menjadi polutan bagi lingkungan jika keberadaannya memiliki kadar yang lebih besar dari yang disyaratkan. Berdasarkan EPA (*Environmental Protection Agency*) kadar maksimum toluena pada air minum adalah 1 ppm. Kadar yang disyaratkan tersebut sangatlah kecil jika dibandingkan dengan kadar toluena yang terkandung di dalam limbah cair industri petrokimia jalur aromatik di atas.

Untuk mengolah limbah cair yang mengandung toluena, ada beberapa metode yang dapat digunakan. Salah satu diantaranya adalah dengan menggunakan metode *biobarrier*. Metode *biobarrier* adalah penggabungan antara proses adsorpsi dan proses biodegradasi yang dijalankan secara simultan dalam suatu kolom *biobarrier* (Gozan, 2004). Pada metode *biobarrier*, proses adsorpsi yang terjadi akan mengakibatkan adsorben menjadi jenuh. Adsorben ini akan diregenerasi oleh mikroorganisme dengan mendegradasi toluena yang teradsorpsi oleh adsorben sehingga adsorben dapat digunakan kembali dalam proses adsorpsi. Kedua proses ini dilakukan secara simultan sehingga usia pakai adsorben dapat bertambah.

Pada penelitian yang dilakukan sebelumnya, metode *biobarrier* dilakukan pada kolom *biobarrier* skala laboratorium menggunakan model polutan yang



mengandung benzena dan toluena. Penelitian tersebut menunjukkan keberhasilan metode *biobarrier* dalam mereduksi kadar benzena dan toluena di dalam model kontaminan yang digunakan (Bustomy, 2006). Penelitian yang akan dilakukan selanjutnya ditingkatkan dalam skala pilot.

Pada penelitian ini, proses adsorpsi dari *biobarrier* dilakukan menggunakan adsorben berupa karbon aktif dalam bentuk *Granular Activated Carbon* (GAC). Karbon aktif dalam bentuk GAC digunakan sebagai adsorben karena harganya yang murah serta dapat memberikan *yield* kapasitas adsorpsi yang lebih baik dibandingkan dengan penambahan karbon aktif jenis lain dalam jumlah yang sama secara kontinu. Sedangkan proses biodegradasi dari *biobarrier* dilakukan menggunakan konsorsium mikroba yang terdiri dari jenis *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus coagulans*, dan *Aeromonas hydrophila*. Kelima bakteri ini dapat mendegradasi kontaminan yang berupa toluena secara aerobik.

Untuk dapat menunjang metabolisme konsorsium bakteri yang digunakan di dalam penelitian ini, elektron akseptor dan nutrisi perlu ditambahkan ke dalam *biobarrier*. Elektron akseptor adalah senyawa yang menerima elektron selama terjadinya pernapasan sel dan menjadi sumber energi bagi konsorsium bakteri. Elektron akseptor yang biasa digunakan untuk proses aerobik adalah oksigen yang berasal dari reaksi dekomposisi hidrogen peroksida (H_2O_2) karena bentuk fisiknya cairan sehingga lebih mudah dikendalikan pada proses biodegradasi toluena dibandingkan injeksi udara ke dalam kolom bioreaktor (Gozan, 2004). Sementara nutrisi merupakan faktor yang berpengaruh besar dalam sintesis dan pertumbuhan sel serta dalam aktivitas enzim yang dihasilkan oleh bakteri untuk mendegradasi polutan.

Di dalam penelitian ini akan dilakukan studi mengenai kemampuan GAC dan konsorsium mikroba dalam mendegradasi limbah cair yang mengandung toluena menggunakan kolom *biobarrier* skala pilot. Variabel-variabel yang digunakan di dalam penelitian ini mengacu pada perhitungan mengenai *scale-up* alat *biobarrier* skala laboratorium (Arby, 2007). Diharapkan alat ini dapat mengurangi konsentrasi toluena di dalam model kontaminan yang digunakan.



1.2 RUMUSAN MASALAH

Berdasarkan latar belakang masalah tersebut, maka dapat dirumuskan masalah sebagai berikut:

- Bagaimana kemampuan GAC dan konsorsium mikroba dalam proses degradasi toluena di dalam kolom *biobarrier* skala pilot?
- Bagaimana pengaruh konsentrasi H_2O_2 sebagai elektron akseptor terhadap kemampuan konsorsium mikroba dalam mereduksi kadar toluena?

1.3 TUJUAN PENELITIAN

Pada penelitian ini, studi untuk mengetahui kemampuan GAC dan konsorsium mikroba menggunakan kolom *biobarrier* skala pilot dalam mereduksi kadar polutan toluena yang terkandung di dalam model kontaminan yang digunakan serta melihat pengaruh konsentrasi H_2O_2 sebagai elektron akseptor.

1.4 BATASAN MASALAH

Batasan masalah yang terkait dalam penelitian ini adalah :

- Penelitian ini dilaksanakan di laboratorium Bioproses Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia.
- Analisis sampel menggunakan GC-FID Departemen Kimia FMIPA.
- Kontaminan yang digunakan adalah toluena.
- Karbon aktif yang digunakan sebagai adsorben di dalam *biobarrier* berbentuk granular dengan ukuran mesh 8-16.
- Konsorsium bakteri yang digunakan terdiri dari *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus coagulans* dan *Aeromonas hydrophila* yang diperoleh langsung dari Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Minyak dan Gas Bumi (LEMIGAS).
- Temperatur dan tekanan operasi adalah temperatur ambien (± 25 °C) & 1 atm.
- Elektron akseptor yang digunakan adalah H_2O_2 .
- Tidak memperhitungkan laju pertumbuhan mikroba di dalam bioreaktor.



1.5 SISTEMATIKA PENULISAN

Adapun sistematika penulisan makalah ini terdiri dari lima bab, yaitu pendahuluan, tinjauan pustaka, metodologi penelitian, hasil dan pembahasan dan kesimpulan. Berikut ini adalah kerangka sistematika penulisannya :

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini terdiri atas latar belakang penulisan, rumusan masalah, tujuan penulisan skripsi, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menjelaskan teori-teori yang didapatkan dari berbagai pustaka mengenai adsorpsi, karbon aktif, toluena, bioremediasi, biodegradasi hidrokarbon, konsorsium bakteri, dan analisis GC FID.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini berisi prosedur penelitian, diagram alir penelitian, bahan dan alat yang digunakan dalam penelitian..

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi mengenai hasil dan pembahasan data penjenjuran GAC dan optimasi konsentrasi elektron akseptor H_2O_2 .

BAB V KESIMPULAN

Bab ini berisi kesimpulan dari keseluruhan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 MINYAK BUMI

Minyak bumi terbentuk sebagai hasil akhir dari penguraian bahan-bahan organik (sel-sel dan jaringan hewan/tumbuhan laut) yang tertimbun selama berjuta tahun di dalam tanah. Di Indonesia, minyak bumi banyak terdapat di bagian utara Pulau Jawa, bagian timur Kalimantan dan Sumatera, daerah kepala burung Papua, serta bagian timur Seram. Selain itu, minyak bumi juga dapat diperoleh di lepas pantai Jawa dan timur Kalimantan.

Minyak bumi kasar yang baru keluar dari sumur eksplorasi mengandung berbagai macam zat kimia yang berbeda. Bahan utama yang terkandung di dalam minyak bumi adalah hidrokarbon alifatik dan aromatik. Terdapat sedikitnya empat seri hidrokarbon yang terkandung di dalam minyak bumi, yaitu seri n-paraffin (n-alkana) yang terdiri atas metana (CH_4) sampai aspal yang memiliki atom karbon (C) lebih dari 25 pada rantainya, seri iso-paraffin (isoalkana) yang terdapat hanya sedikit dalam minyak bumi, seri neptena (sikloalkana) yang merupakan komponen kedua terbanyak setelah n-alkana, dan seri aromatik (benzenoid).

Komposisi senyawa hidrokarbon pada minyak bumi tidak sama, bergantung pada sumber penghasil minyak bumi tersebut. Misalnya, minyak bumi Amerika komponen utamanya ialah hidrokarbon jenuh, yang digali di Rusia banyak mengandung hidrokarbon siklik, sedangkan yang terdapat di Indonesia banyak mengandung senyawa aromatik dan kadar belerangnya sangat rendah. Minyak bumi berdasarkan titik didihnya dapat dibagi menjadi sembilan fraksi. Pemisahan ini dilakukan melalui proses destilasi.

Selama kegiatan industri perminyakan umumnya terjadi tumpahan atau ceceran yang dapat mencemari lingkungan terutama perairan. Adanya penimbunan limbah minyak dapat menimbulkan masalah pada air tanah. Menurunnya kualitas air tanah, terganggunya ekosistem air dan tanah, turunnya tingkat kesuburan tanah, bahkan organisme air dan tanah bisa musnah karena



kandungan minyak yang melebihi ambang batas. Salah satu bahan pencemar yang sering menimbulkan masalah adalah hidrokarbon aromatis. Hidrokarbon yang sering dijumpai, terutama di perairan adalah toluena (Suryanto, 2003).

2.1.1 Limbah Minyak

Limbah minyak terdiri dari berbagai senyawa kompleks yang diantaranya berupa hidrokarbon ringan, hidrokarbon berat, pelumas dan bahan ikutan dalam hidrokarbon (Shaheen, 1992). Limbah ini dapat berasal dari:

- Tumpahan dan cecceran minyak selama kegiatan pengeboran, produksi, pengilangan dan transportasi.
- Rembesan minyak dari reservoirnya.
- Cecceran dan tumpahan minyak selama pemuatan maupun pembongkaran minyak di pelabuhan.
- Tumpahan minyak dari kebocoran maupun limbah tanker/kapal.
- Minyak bekas dan/atau minyak apkir.
- Limbah dari kegiatan lain.

Kegiatan industri perminyakan dapat menimbulkan adanya kontaminasi bagi lingkungan, baik pada lingkungan perairan maupun daratan. Tumpahan dan cecceran minyak yang terjadi selama pengeboran, produksi, transportasi dan pengilangan minyak bumi dan produknya dapat mengkontaminasi lingkungan. Tumpahan dan cecceran ini dapat berubah menjadi limbah bagi lingkungan jika terbuang dalam jumlah yang besar. Hal ini dapat terjadi akibat adanya kebocoran minyak bumi pada kapal tanker dan adanya semburan liar sumur baik di darat maupun lepas pantai.

Selain itu, proses pengeboran dan pengilangan minyak bumi menjadi produk-produknya dapat pula menghasilkan lumpur minyak (*oil sludge*) dalam jumlah besar. Lumpur minyak pada pengilangan umumnya berasal dari limbah tanki penyimpanan, *separator* minyak-air, unit *wastewater treatment*, dan limbah dari pembersihan alat-alat proses. Komposisi lumpur minyak bervariasi bergantung pada sumber, penyimpanan dan proses yang terjadi pada minyak bumi. Lumpur minyak dapat mencemari lingkungan perairan dan tanah dan



merupakan polutan yang berbahaya bagi lingkungan sehingga penanganannya perlu dilakukan dengan serius.

Selain limbah minyak dari industri perminyakan tersebut, limbah minyak lain yang perlu diperhatikan dan diperhitungkan yaitu limbah yang berasal dari produk minyak bekas yang tidak dapat dimanfaatkan lagi, serta limbah minyak yang berasal dari kegiatan industri dan rumah tangga. Kegiatan-kegiatan ini ternyata dapat menghasilkan limbah minyak dalam jumlah yang cukup besar. Limbah ini kebanyakan terbuang ke sungai dan akan terakumulasi di estuari. Limbah minyak seperti tersebut di atas sebagian besar akan mencemari lingkungan akuatik khususnya laut. Sedangkan sejumlah limbah sisanya akan mencemari lingkungan lain yaitu lahan, akuifer, dan udara (Udiharto, 1996).

2.1.2 Toluena

Toluena merupakan senyawa hidrokarbon aromatik yang tidak memiliki warna, namun memiliki bau khas yang lebih ringan daripada benzena. Kata toluena diturunkan dari nama resin alami *balsam of Tolu*, di mana kata Tolu merupakan nama sebuah kota kecil di Kolombia. Senyawa toluena sendiri ditemukan pertama kali sebagai produk dari pemanasan resin ini.

Pada awal masa perang dunia pertama, toluena banyak diperoleh melalui pemanasan *coke*. Pada saat itu, toluena banyak diperlukan dalam jumlah besar dalam memproduksi senyawa trinitrotoluena (TNT), yang merupakan bahan kimia dengan daya ledak yang tinggi. Bahkan, setelah Perang Dunia I berakhir produksi toluena tetap dilanjutkan. Menggunakan bahan baku minyak bumi, toluena diproduksi pertama kali melalui proses *thermal cracking* dari nafta. Minyak bumi menjadi sumber utama pada produksi toluena melalui proses *catalytic reforming* dan diproduksi secara besar-besaran untuk digunakan dalam dunia penerbangan selama Perang Dunia II. Sejak saat itu, toluena tidak lagi diperoleh dari pemanasan *coke* dan *coal tar* melainkan melainkan dari minyak bumi.

Toluena biasanya diproduksi bersama-sama dengan benzena, xylene, dan senyawa C₉ aromatik melalui proses *catalytic reforming* dengan bahan baku nafta. Hasil yang diperoleh kemudian diekstrak menggunakan *sulfolane* atau *tetraethylene glycol* untuk menghasilkan campuran antara benzena, toluena,



xylena dan C₉ aromatik untuk selanjutnya diseparaasi menggunakan proses fraksionasi (Othmer, 1992).

Tabel 2.1 Properti Toluena (<http://en.wikipedia.org>)

Umum	
Nama sistematis	Toluena
Nama lain	<i>Methylbenzene, phenylmethane, toluol</i>
Rumus molekul	C ₇ H ₈
Massa relatif	92.14 g/mol
Penampilan	Cairan bening, tanpa warna
Properti	
Densitas dan fasa	0.8669 g/cm ³ , cair
Kelarutan dalam air	0.053 g/100 mL (20-25°C)
Kelarutan pada etanol, aseton, hexana dan diklorometana	Tak terhingga
Titik leleh	-93 °C (180 K)/(-135.4°F)
Titik didih	110.6 °C (383.8 K)/ 231.08°F
Temperatur kritis	320 °C (593 K)/ 608°F
Viskositas	0.590 cP at 20°C/ 68°F
Struktur	
Bentuk Molekul	
Bahaya	
Bahaya Utama	Mudah terbakar
NFPA 704	
Titik flash	4 °C/ 39.2 °F

Pencemaran air oleh toluena biasanya disebabkan pembuangan limbah industri ke sungai dan kebocoran pipa. Sifatnya yang *volatile* akan mengakibatkan



sebagian toluena yang terbuang ke lingkungan menguap sementara sisanya meresap ke dalam tanah ataupun larut dalam air tanah. Gas buangan kendaraan bermotor juga mencemari udara dengan hidrokarbon aromatik ini, apalagi di Indonesia dengan kandungan bensin dan solar yang banyak mengandung senyawa aromatik.

United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA) menetapkan bahwa batas maksimum kontaminan toluena yang boleh terdapat dalam air bersih adalah 1 ppm. Jika kadar toluena di atas batas ambang maksimum tadi, dapat membahayakan pada kesehatan. Dampak jangka pendek bagi kesehatan adalah cepat lelah, lesu, badan lemas, dan pusing yang disertai mual. Jika terjadi akumulasi dalam tubuh dalam jangka waktu yang lama, dapat merusak jaringan saraf, menurunnya kemampuan bicara, gangguan penglihatan, gangguan pendengaran, kerusakan ginjal dan hati, bahkan bisa berakhir pada kematian.

2.2 ADSORPSI

Adsorpsi merupakan peristiwa terikatnya suatu molekul fluida pada permukaan zat padat. Peristiwa terikatnya molekul fluida ini dapat disebabkan oleh adanya interaksi hidrofobik, gaya tarik elektrostatis, atau afinitas molekul. Pada peristiwa ini, zat yang mengadsorpsi molekul fluida tersebut disebut sebagai adsorben, sedangkan molekul yang teradsorpsi sendiri disebut adsorbat. Proses adsorpsi ini sangat sering dimanfaatkan dalam pengolahan air minum, terutama pada daerah tercemar dan air tanah. Pada proses adsorpsi, adsorben yang paling banyak digunakan dalam pengolahan air adalah karbon aktif. Hal ini dikarenakan karbon aktif dapat menghilangkan komponen pencemar yang bervariasi (Sontheimer, 1988).

2.2.1 Jenis-jenis Adsorpsi

Berdasarkan sifat interaksi molekuler antara permukaan adsorben dengan adsorbat, adsorpsi dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu, adsorpsi fisika dan adsorpsi kimia. Pada adsorpsi fisika, gaya-gaya intermolekuler yang bekerja mempunyai kekuatan yang relatif kecil. Gaya intermolekuler ini umumnya berupa



gaya Van der Waals yang kadang disertai dengan gaya elektrostatik. Secara proses, adsorpsi fisika umumnya berlangsung cepat, dapat membentuk *multilayer* (lapisan jamak), serta bersifat reversibel. Adsorpsi fisika hanya membutuhkan energi aktivasi yang relatif rendah, yaitu sekitar 1 kkal/gr mol saja, serta memiliki panas adsorpsi sekitar 2 sampai 3 kali kalor laten penguapannya saja. Oleh karena karakteristik adsorpsi fisika di atas, adsorpsi jenis ini umumnya dapat terjadi pada suhu kamar.

Pada adsorpsi kimia, gaya-gaya intermolekuler yang bekerja biasanya adalah transfer elektron. Transfer elektron pada adsorpsi kimia memiliki kekuatan yang sebanding dengan pembentukan ikatan kimia antara adsorbat dan permukaan padatnya. Interaksi ini tidak lebih kuat dibandingkan dengan adsorpsi fisika serta hanya mampu membentuk *monolayer* (lapisan tunggal) saja. Adsorpsi kimia biasanya memiliki panas adsorpsi yang besar, sehingga hanya dapat terjadi pada suhu yang tinggi (Figueredo, 1986).

2.2.2 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Daya Adsorpsi

Jumlah adsorbat yang dapat terserap pada permukaan padatan dipengaruhi oleh beberapa faktor sebagai berikut, antara lain:

1. Sifat Adsorben

Dari sifat adsorbennya, daya adsorpsi dipengaruhi oleh tingkat kemurnian serta luas permukaan adsorbennya. Dari tingkat kemurnian adsorpsinya, adsorben yang lebih murni akan memiliki daya adsorpsi yang lebih baik. Sedangkan dari luas permukaannya, jumlah adsorben yang dapat terserap akan semakin besar seiring dengan jumlah adsorben yang terserap.

2. Jenis Adsorbat

Dari jenis adsorbatnya, daya adsorpsi dapat ditinjau dari ukuran molekul adsorbatnya serta kepolaran dari adsorbatnya. Dari ukuran molekul adsorbatnya, agar molekul adsorbat dapat terperangkap dalam situs aktif adsorben, rongga atau pori-pori adsorben harus berukuran sama atau lebih besar daripada ukuran molekul adsorbatnya. Sedangkan dari kepolaran adsorbatnya, jenis adsorben yang digunakan sebaiknya sesuai dengan adsorbatnya. Untuk adsorbat yang bersifat polar, adsorben yang digunakan sebaiknya juga bersifat polar. Hal yang sama juga



berlaku untuk adsorbat nonpolar, seperti senyawa dari golongan hidrokarbon, adsorben yang digunakan sebaiknya bersifat hidrofobik, seperti karbon aktif dan *silicalite*.

3. Temperatur

Pada proses adsorpsi, pembebasan energi panas terjadi ketika molekul-molekul adsorbat melekat pada adsorbennya. Sesuai dengan azas Le Chatelier pada proses fisika, jumlah adsorbat yang teradsorpsi akan meningkat seiring dengan berkurangnya temperatur.

4. Tekanan

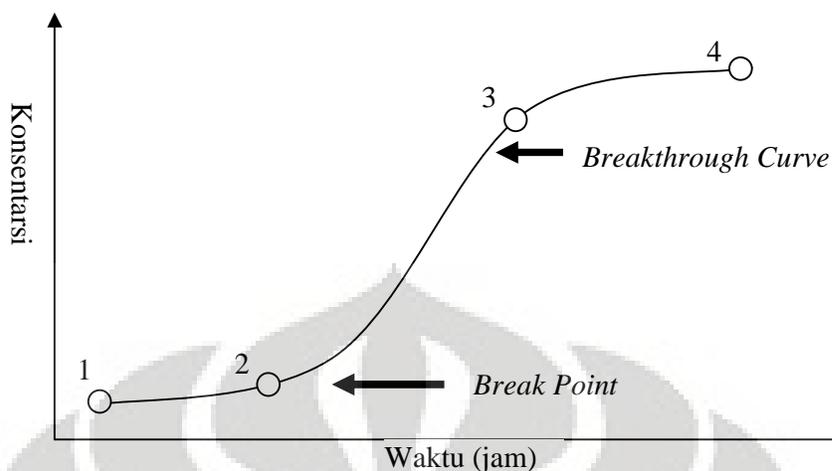
Pada adsorpsi fisika, kenaikan tekanan adsorbat akan menyebabkan bertambahnya jumlah zat yang teradsorpsi. Hal sebaliknya terjadi pada adsorpsi kimia dimana jumlah zat yang teradsorpsi akan berkurang sesuai dengan naiknya tekanan adsorbat.

2.2.3 Breakthrough Curve (Kurva Terobosan)

Kurva terobosan (*breakthrough curve*) merupakan kurva yang menggambarkan suatu rentang kondisi mengenai terjadinya penurunan drastis jumlah adsorbat yang dapat diadsorpsi oleh adsorben. Kondisi penurunan jumlah adsorbat yang dapat teradsorpsi ini terjadi sebelum proses adsorpsi mengalami kesetimbangan adsorpsi (Sontheimer, 1988).

Keberadaan kurva terobosan ini dapat dilihat pada gambar 2.1 berikut. Dari gambar ini dapat dilihat bahwa proses adsorpsi dimulai pada titik 1. Proses adsorpsi tetap dalam laju yang sama sampai pada titik 2, di mana penurunan jumlah adsorbat yang diserap dapat terjadi. Titik ini merupakan titik *breakpoint*. Daerah yang berada pada rentang di antara titik 2 dan 3 merupakan daerah rentang kurva terobosan. Pada rentang ini, jumlah adsorbat yang teradsorpsi mengalami penurunan drastis. Hal ini terus berlanjut sampai pada titik 4, di mana adsorpsi sudah tidak lagi terjadi. Titik 4 merupakan titik kondisi kesetimbangan. Pada titik ini adsorben telah mencapai kondisi jenuh (kondisi di mana seluruh permukaannya telah tertutupi oleh adsorbat) sehingga proses adsorpsi sudah tidak mungkin terjadi lagi.





Gambar 2.1 Breakthrough Curve (Kurva Terobosan)

2.2.4 Kesetimbangan Adsorpsi

Pada proses adsorpsi, terdapat suatu kondisi dimana fluida yang dikontakkan dengan adsorben berhenti melakukan perpindahan molekul dari adsorbat ke adsorben. Kondisi ini disebut dengan kesetimbangan adsorpsi (Sontheimer, 1988). Dalam adsorpsi yang menggunakan kolom, kesetimbangan adsorpsi ditandai dengan jumlah konsentrasi fluida effluen sama dengan jumlah konsentrasi fluida influen.

Kesetimbangan adsorpsi digunakan untuk menghitung koefisien-koefisien yang mempengaruhi adsorpsi. Selain karakteristik adsorbat dan pelarutnya serta adsorben, koefisien-koefisien ini digunakan untuk mempermudah penghitungan laju penggunaan adsorben terendah yang merupakan tujuan desain suatu proses pengolahan (Sontheimer, 1988).

2.2.5 Karbon Aktif

Karbon aktif merupakan padatan amorf dari unsur karbon yang memiliki luas permukaan internal serta volume pori-pori yang sangat besar. Karbon aktif memiliki luas permukaan internal yang berkisar antara 200-2000 m²/gram. Karena memiliki luas permukaan internal yang sangat besar, karbon aktif sering digunakan dalam proses adsorpsi dan berbagai aplikasi pada proses separasi gas-padat dan cair-padat.

Secara struktural, karbon aktif terdiri dari atom-atom karbon yang tersusun dalam struktur serta sifat yang hampir sama dengan struktur dan sifat grafit. Struktur grafit tersusun atas lapisan-lapisan bidang datar yang terbentuk dari atom-atom karbon yang tersusun dalam tatanan heksagonal. Pada struktur ini, jarak antara lapisan-lapisan bidang datar adalah $1,42 \text{ \AA}$, sedangkan lapisan antara tiap bidang datar tersusun secara paralel dengan jarak antar bidang sekitar 0,3 sampai dengan 0,5 nm (Sontheimer,1988).

2.2.5.1 Klasifikasi Karbon Aktif

Berdasarkan jenis fasa fluida yang diadsorp oleh karbon aktif, karbon aktif dapat dibedakan menjadi dua kelas, antara lain:

1. Karbon adsorben gas. Karbon aktif ini digunakan untuk pemurnian pada fasa uap atau gas, seperti pada proses separasi gas dan *recovery* pelarut.
2. Karbon fasa cair. Karbon aktif jenis ini digunakan untuk menghilangkan bau yang tidak sedap atau untuk pemurnian cairan.

Sedangkan secara umum, ukuran pori dari karbon aktif dapat diklasifikasikan ke dalam 3 jenis, antara lain:

1. *Micropore*. Merupakan pori-pori dengan ukuran lebih kecil dari 2 nm. *Micropore* merupakan area di mana sebagian besar proses adsorpsi terjadi. Pori-pori ini memiliki volume dengan besar berkisar antara 0,15 – 0,5 ml/g
2. *Mesopore*. Merupakan pori-pori dengan ukuran berkisar antara 2 – 50 nm. *Mesopore* sering juga disebut sebagai area transisi (*transitional pore*) karena meskipun pada pori ini terjadi adsorpsi, proses adsorpsi yang terjadi kurang dominan dibandingkan dengan *micropore*. Volume dari *mesopore* berkisar antara 0,02 – 10 ml/g.
3. *Macropore*. Ukuran dari pori ini lebih besar dari 50 nm. Pori ini berfungsi sebagai pintu masuk adsorbat menuju ke dalam *micropore*.

Sifat utama yang membedakan antara karbon adsorben gas dan karbon fasa cair adalah ukuran serta area distribusi dari pori-porinya. Pada karbon adsorben gas, pori-pori terbanyak berada pada area *micropore*, sedangkan pada karbon fasa cair jumlah pori-pori terbanyak berada pada area transisi. Walaupun begitu, baik karbon adsorben gas maupun karbon fasa cair memiliki luas



permukaan yang hampir sama, meskipun volume pori-pori yang dimiliki oleh karbon fasa cair cenderung lebih besar.

2.2.5.2 Sifat Fisika Karbon Aktif

Secara umum, karbon aktif diproduksi dalam bentuk serbuk yaitu dalam bentuk *Powdered Activated Carbon* (PAC) dan dalam bentuk grabular, yaitu dalam bentuk *Granular Activated Carbon* (GAC). PAC merupakan karbon aktif yang terdiri dari partikel karbon dengan ukuran kurang dari 0,05 mm, sedangkan GAC terdiri dari partikel karbon dengan ukuran yang bervariasi dari 0,3 sampai 3 mm.

Pemilihan antara PAC dan GAC dalam aplikasinya tergantung pada beberapa faktor teknis dan ekonomis, seperti biaya, laju penggunaan karbon, variasi laju alir serta komposisi pengotor, jenis peralatan yang tersedia, jenis aplikasinya, serta dari faktor lingkungan. Akan tetapi, secara umum karbon aktif dari jenis GAC memiliki lebih banyak kelebihan dibandingkan dengan karbon aktif dari jenis PAC dalam penggunaannya pada proses adsorpsi. Kelebihan tersebut antara lain:

1. GAC memberikan kapasitas adsorpsi yang lebih baik dibandingkan dengan PAC. Hal ini dikarenakan GAC mencapai kondisi jenuh pada konsentrasi influen yang lebih tinggi dibandingkan dengan PAC.
2. Untuk mencapai efisiensi adsorpsi yang sama, GAC memiliki nilai ekonomis yang lebih tinggi dibandingkan dengan PAC.
3. Dalam penanganannya, GAC lebih mudah ditangani daripada PAC karena memiliki ukuran yang lebih besar.

2.2.5.3 Sifat Kimia Karbon Aktif

Ketika proses aktivasi dilakukan terhadap karbon aktif, beberapa gugus fungsi dapat terbentuk pada permukaannya. Terbentuknya gugus fungsi ini disebabkan karena adanya interaksi antara radikal bebas yang berada pada permukaan karbon dengan atom-atom seperti nitrogen dan oksigen yang umumnya berasal dari atmosfer. Terjadinya oksidasi permukaan ini akan menghasilkan gugus hidroksil, karbonil, dan karboksilat yang menyebabkan karbon aktif akan bersifat amfoter.



Keberadaan gugus fungsi tersebut menyebabkan afinitas air dari karbon aktif yang tadinya bernilai rendah menjadi naik. Hal ini dikarenakan potensi gugus fungsi tersebut untuk berinteraksi dengan air sehingga menyebabkan karbon aktif menjadi sedikit lebih hidrofilik.

Akan tetapi, sifat kimia dari karbon aktif yang terpenting dalam menentukan jumlah volume adsorbat yang dapat teradsorpsi per massa karbon aktif adalah kapasitas adsorpsi dari karbon aktif. Kapasitas adsorpsi berpengaruh terhadap desain peralatan yang akan digunakan serta biaya produksi dan operasionalnya. Pada karbon aktif, luas permukaan yang besar tidak menjamin bahwa karbon aktif tersebut memiliki kapasitas adsorpsi yang besar. Hal ini terutama disebabkan oleh hal-hal berikut :

1. Luas permukaan yang terbasahi oleh adsorbat tidak pernah sama dengan luas permukaan aktual dari karbon aktif.
2. Pada aplikasinya, terkadang materi yang akan diadsorpsi memiliki ukuran yang lebih besar dari pori-pori karbon aktif. Hal ini menyebabkan pori-pori karbon aktif yang memiliki luas permukaan yang besar tidak tertutupi oleh adsorbat.
3. Data-data dari luas permukaan, volume pori-pori, maupun sifat permukaan karbon aktif belum banyak dikorelasikan dengan materi yang akan di adsorpsi.

2.2.5.4 Proses Regenerasi Karbon Aktif

Ketika kesetimbangan adsorpsi telah tercapai, proses adsorpsi pada karbon aktif akan terhenti. Untuk mengembalikan kapasitas adsorpsi dari karbon aktif maka dilakukan proses regenerasi atau reaktivasi karbon aktif. Proses regenerasi karbon aktif dilakukan dengan melalui fenomena desorpsi, yaitu usaha untuk menghilangkan molekul adsorbat dari permukaan karbon aktif.

Beberapa metode yang umum digunakan untuk meregenerasi karbon aktif antara lain:

1. Regenerasi termal.

Proses ini dilakukan dengan cara menguapkan adsorbat yang teradsorpsi pada permukaan adsorben. Regenerasi dengan cara ini tidak dapat mengembalikan seluruh kapasitas adsorpsi yang dimiliki karbon aktif, karena adanya zat dengan



berat molekul yang sangat besar yang tidak dapat menguap. Selain itu, karena menggunakan pemanasan, kemungkinan rusaknya karbon aktif tetap ada sehingga umumnya tidak seluruh karbon aktif yang telah jenuh dapat diregenerasi.

2. Regenerasi *physicochemical*.

Proses regenerasi ini dilakukan dengan cara pertukaran ion berdasarkan deret keaktifan ion. Regenerasi ini dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi adsorben karena dengan adanya ion regeneran, selain mampu mengusir ion adsorbat namun dapat juga meningkatkan *driving force* adsorben. Hal ini dapat meningkatkan kinerja adsorben setelah melalui proses regenerasi.

3. Regenerasi biologis (bioregenerasi).

Proses regenerasi ini dilakukan dengan menggunakan bantuan mikroorganisme untuk mendegradasi adsorbat yang terserap pada permukaan adsorben. Metode ini dapat mengurangi *loading* karbon melalui desorpsi komponen sebagai akibat dari pengurangan konsentrasi komponen yang *biodegradable*.

2.3 BIOREMEDIASI

Ketika makhluk hidup, baik tumbuhan ataupun hewan mati, sisa tubuhnya akan dihancurkan oleh bakteri. Pada kondisi yang tepat, material organik yang berasal dari makhluk hidup itu ditransformasi dan kerogen terbentuk. Kerogen merupakan campuran senyawa hidrokarbon yang mengandung rantai parafin, baik lurus maupun bercabang, nafta, dan aromatik. Melalui pengendapan yang lama dari material ini, temperatur sistem meningkat dan melalui perengkahan termal pada suhu 60 – 150 °C minyak bumi terbentuk. Melalui proses lebih lanjut, manusia menggunakan minyak bumi untuk memenuhi kebutuhan hidupnya.

Penggunaan minyak bumi yang amat luas pada segala aspek kehidupan manusia menyebabkan limbah yang dihasilkannya pun tidak sedikit pula. Disinilah mikroba memainkan peranannya yang kedua. Keberadaan mikroorganisme di tanah menyebabkan tanah secara alamiah memiliki kemampuan untuk mendegradasi zat-zat, terutama yang organik pada polutan.



Proses semacam inilah yang untuk selanjutnya disebut sebagai proses biodegradasi (Baker et al., 1994).

Bioremediasi sendiri dapat didefinisikan sebagai proses yang menggunakan mikroorganisme, jamur, tanaman hijau ataupun enzim-enzim yang dihasilkan dari makhluk hidup tersebut untuk mengembalikan keadaan lingkungan yang telah dicemari oleh kontaminan menjadi keadaannya yang semula. Bioremediasi dapat digunakan untuk mendegradasi kontaminan tanah.

Proses biodegradasi yang terdapat di dalam bioremediasi dapat dilakukan melalui dua cara, yaitu secara *ex-situ* dan *in-situ*. Biodegradasi secara *ex-situ* merupakan metode biodegradasi dimana kontaminan dipindahkan dari lokasi asalnya dan diperlakukan pada bioreaktor sistem terbuka maupun tertutup. Sementara biodegradasi secara *in-situ* merupakan biodegradasi yang dilakukan secara langsung pada lahan yang tercemar oleh kontaminan. Metode ini umumnya dilakukan pada kontaminan yang dapat terdegradasi secara biologis.

Proses bioremediasi memiliki beberapa kelebihan sebagai berikut, antara lain (Baker et al., 1994 dan Wiedemeier et al., 1999) :

- Bioremediasi dapat dilakukan pada tempat yang tercemar serta mengurangi daerah yang tercemar.
- Bioremediasi bersifat *nonintrusive*, sehingga dapat digunakan untuk sistem yang kontinu selama proses remediasi berlangsung.
- Bioremediasi memiliki resiko yang lebih kecil dibandingkan metode remediasi lain, karena polutan tidak dipindahkan ke tempat lain.
- Bioremediasi dapat mengolah limbah secara permanen.
- Bioremediasi relatif lebih murah karena dapat meminimalisasi biaya transportasi untuk memindahkan polutan.
- Proses bioremediasi dapat dikombinasikan dengan proses lain yang sejenis menjadi sebuah rangkaian proses pengolahan limbah (*treatment*).

Meskipun begitu, proses bioremediasi bukannya tidak memiliki kekurangan. Berikut adalah beberapa kelemahan yang dimiliki oleh proses bioremediasi:

- Beberapa bahan kimia yang mengandung logam berat serta senyawa yang tersubstitusi halogen berat sangat sulit untuk didegradasi secara biologis.



- Pemantauan yang berkesinambungan terhadap kondisi mikroba diperlukan untuk menjaga agar mikroba tetap hidup.
- Pada beberapa proses biodegradasi, sebagian mikroba justru menghasilkan produk yang sama atau bahkan lebih berbahaya daripada polutan itu sendiri. Contohnya pada proses degradasi *trichloroethylene*, di mana senyawa tersebut justru didegradasi oleh mikroba menjadi senyawa vinil klorida yang bersifat karsinogenik.
- Biodegradasi memiliki waktu pelaksanaan yang lama.
- Pada bioremediasi intrinsik, diperlukan *monitoring* yang bersifat intensif dan memiliki jangka waktu yang panjang.

Adapun beberapa faktor yang dapat mempengaruhi proses bioremediasi antara lain (Baker et al., 1994) :

- Temperatur. Agar mikroba dapat melakukan degradasi, mikroba harus berada pada temperatur lingkungan yang optimum (sekitar 35 °C). Kebanyakan mikroba yang berperan dalam proses bioremediasi akan tidak aktif apabila berada dalam lingkungan dengan suhu kurang dari 5 °C, sedangkan pada suhu yang terlalu tinggi (lebih besar dari 40 °C) sebagian mikroba akan mengisolasi dirinya dengan membentuk kista sehingga tidak dapat melakukan metabolisme.
- Derajat keasaman (pH). Derajat keasaman pada lingkungan mikroba sebaiknya berada pada rentang 5,5 sampai 8,5. Kebanyakan mikroba tidak dapat bertahan pada kondisi lingkungan yang terlalu ekstrim.
- Potensial reduksi-oksidasi.
- Rasio nutrisi pada fasa cair.
- Elektron akseptor yang digunakan.
- Tipe kontaminan, yang dilihat dari segi struktur serta tingkat kompleksitasnya.
- Toksisitas dari kontaminan.
- Aktifitas mikroba pada periode aklimasi. Periode aklimasi merupakan periode di mana mikroba tumbuh dan berusaha untuk mengadaptasikan diri pada lingkungan yang sedikit meracuni mikroba (inokulum), sampai mikroba tersebut tumbuh menjadi populasi yang besar serta mendegradasi



kontaminan secara efektif. Periode aklimasi juga disebut sebagai waktu induksi.

- Aktivasi enzim yang dimiliki mikroba untuk mendegradasi kontaminan.
- Perubahan genetik pada mikroba.
- Penggunaan kontaminan alternatif oleh mikroba.

Pada proses bioremediasi, mekanisme yang terjadi terdiri dari bioaugmentasi, di mana mikroba dan nutrisi dimasukkan ke dalam lingkungan yang terkontaminasi atau biostimulasi, di mana nutrisi dan enzim ditambahkan ke lingkungan untuk melengkapi mikroba. Untuk memasukkan komponen-komponen di atas ke dalam situs bioremediasi, biasanya digunakan metode injeksi. Pada metode ini, campuran mikroba dan nutrisi langsung disuntikkan ke dalam akuifer yang terkontaminasi. Hal yang sama juga dilakukan jika campuran enzim dan nutrisi ingin ditambahkan untuk menstimulasi aktivitas bakteri. Ketika penambahan nutrisi ini dihentikan, biasanya bakteri akan mati karena tidak mampu lagi untuk mendegradasi kontaminan. Metode bioremediasi semacam ini merupakan metode yang paling baik digunakan untuk mengolah kontaminan petroleum.

2.3.1 Bakteri

Bakteri merupakan makhluk hidup bersel tunggal. Tiap sel individu bakteri merupakan organisme yang terpisah dan unik. Beberapa jenis bakteri sering tumbuh membentuk suatu koloni. Meskipun begitu, tiap individu sel tetap memiliki kehidupan yang independen. Bakteri yang telah dewasa, yaitu di mana ukuran tubuhnya telah menjadi maksimum bereproduksi dengan membelah dirinya menjadi dua sel anak. Tiap sel anak merupakan sel yang identik satu sama lain serta dengan bakteri induknya. Pada kondisi yang ideal, bakteri dapat bereproduksi secara acak dan membentuk generasi yang baru setiap 20 sampai 30 menit.

Ribuan spesies bakteri yang berbeda terdapat di seluruh bagian bumi. Meskipun begitu, terdapat sebagian bakteri yang hanya dapat ditemukan pada lingkungan tertentu, membutuhkan makanan yang khusus, serta memiliki *niche* (lingkungan sosial organisme) yang amat khusus (Mellor et al., 1998).





Gambar 2.2 Sebuah Koloni Bakteri (Mellor et al., 1998)

Setelah melalui proses reproduksi, jumlah bakteri yang ada pada suatu lingkungan menjadi dua kali lipat untuk setiap generasinya. Ledakan populasi mikroorganisme ini meningkat secara logaritmik. Pada suatu titik tertentu, jumlah sumber makanan akan semakin berkurang atau terjadi perubahan kondisi pada lingkungan. Hal ini akan menyebabkan populasi mikroba menjadi berkurang. Perubahan kondisi pada lingkungan ini dapat berupa perubahan derajat keasaman (pH), temperatur, ataupun jumlah oksigen pada lingkungan.

Dalam proses degradasi hidrokarbon, berberapa genus bakteri berikut sering digunakan, antara lain dari genus *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Aeromonas*, *Mycobacterium*, (Barnum, 1998).

2.3.2.1 *Pseudomonas aeruginosa*

Pseudomonas aeruginosa merupakan bakteri gram-negatif berbentuk batang lurus atau lengkung yang berukuran sekitar $0,6 \times 0,2 \mu\text{m}$. Bakteri ini dapat ditemukan tunggal, berpasangan, dan kadang-kadang membentuk rantai pendek. *Pseudomonas aeruginosa* tidak mempunyai spora, tidak mempunyai selubung serta mempunyai flagel monotrika sehingga selalu bergerak.

Pseudomonas bersifat aerob obligat yang tumbuh dengan mudah pada banyak jenis media pembiakkan karena memiliki kebutuhan nutrisi yang sederhana. Metabolisme bersifat respiratorik tetapi dapat tumbuh tanpa oksigen bila tersedia NO_3 sebagai akseptor elektron. Bakteri ini tumbuh dengan baik pada suhu $37\text{-}42^\circ\text{C}$. Pertumbuhannya pada suhu 42°C membantu membedakannya dari spesies *pseudomonas* lain dalam kelompok fluoresen. Bakteri ini bersifat oksidase positif,

nonfermenter, tetapi banyak *strain* mengoksidasi glukosa. *Pseudomonas aeruginosa* dalam biakkan dapat menghasilkan berbagai jenis koloni sehingga memberi kesan biakkan dari campuran berbagai spesies bakteri. Tiap jenis koloni mempunyai aktivitas biokimia dan enzimatik berbeda serta pola kepekaan antimikroba yang berbeda pula. Resisten terhadap konsentrasi tinggi garam dan zat pewarna, antiseptik dan antibiotik yang sering digunakan (Mayasari, 2005).



Gambar 2.3 *Pseudomonas aeruginosa* (Mellor et al., 1998)

2.3.2.2 *Pseudomonas fluorescens*

Pseudomonas fluorescens merupakan suatu bakteri yang cukup umum dan dapat ditemukan di tanah maupun air. Bakteri ini memiliki kemampuan adaptasi yang luar biasa pada tempat tinggalnya. Bakteri ini mensekresikan suatu pigmen yang disebut *Fluorescein* dan bergerak menggunakan *flagella* jamak. Ia termasuk golongan gram negatif dan memiliki metabolisme yang sangat baik. *Pseudomonas fluorescens* umumnya merupakan obligat aerob (menggunakan oksigen sebagai sumber elektron) akan tetapi beberapa jenis mampu menggunakan nitrat sebagai sumber elektronnya. Bakteri *Pseudomonas fluorescens* mampu menggunakan hidrokarbon sebagai sumber makanannya karena kemampuan adaptasinya yang tinggi.



Gambar 2.4 *Pseudomonas fluorescens* (<http://genome.jgi-psf.org>)

2.3.2.3 *Bacillus subtilis*

Bacillus subtilis adalah bakteri gram positif berbentuk batang yang umum ditemukan di tanah dan pada tanaman yang membusuk (Madigan, 2005). Bakteri dari genus *Bacillus* keistimewaan yaitu dapat membentuk endospora yang kuat dan protektif. Endospora ini memungkinkan *Bacillus subtilis* untuk hidup pada kondisi lingkungan yang ekstrim. Bakteri ini tergolong bakteri aerob obligat. *Bacillus subtilis* tidak memiliki sifat patogen terhadap manusia tetapi bakteri ini dapat mengkontaminasi makanan yang dapat menyebabkan keracunan makanan walaupun hal ini jarang sekali terjadi. Bentuk spora dari *Bacillus subtilis* memiliki ketahanan terhadap pemanasan yang tinggi yang biasa dilakukan pada saat pemasakan makanan (Nakano, 1998).

Bacillus subtilis dapat memetabolisme berbagai macam sumber karbon dan mensekresikan berbagai macam enzim penting yang digunakan dalam proses industri (Madigan, 2005).

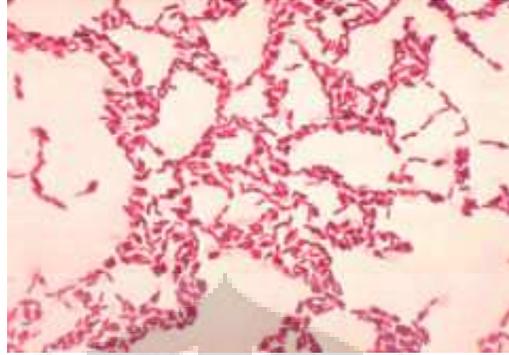


Gambar 2.5 *Bacillus subtilis* (<http://en.wikipedia.org>)

2.3.2.4 *Bacillus coagulans*

Bacillus coagulans merupakan spesies bakteri *Bacillus* yang menghasilkan asam laktat. Bakteri ini dapat tumbuh pada pH rendah hingga 4,2 dan memiliki temperatur optimum untuk pertumbuhan yaitu 37 °C. *Bacillus coagulans* adalah bakteri gram positif yang terkadang dapat menyerupai bakteri bergram negatif jika berada dalam kondisi fasa stasioner. Bakteri ini juga merupakan bakteri fakultatif anaerob. *Bacillus coagulans* kebal terhadap zat-zat kimia dan tahan terhadap temperature tinggi. (De Vecchi, 2005)

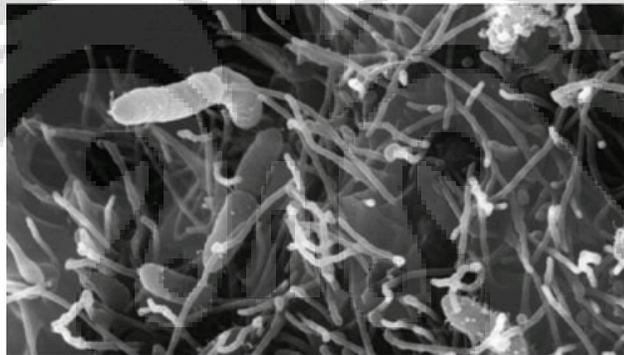




Gambar 2.6 *Bacillus coagulans* (<http://en.wikipedia.org>)

2.3.2.5 *Aeromonas hydrophilla*

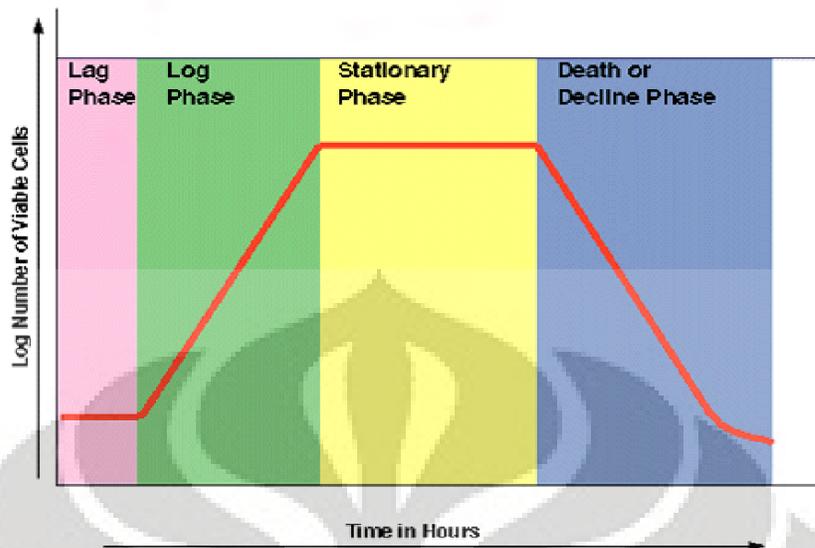
Aeromonas hydrophilla merupakan bakteri gram-negatif yang berbentuk batang dan bersifat heterotropik dan mampu hidup pada keadaan anaerobik maupun aerobik. Bakteri ini patogen terhadap manusia dan biasa ditemukan pada lingkungan berair termasuk pada makanan. Bakteri ini memiliki flagel yang polar.



Gambar 2.7 *Aeromonas Hydrophilla* (<http://en.wikipedia.org>)

2.3.2 Pertumbuhan Mikroba

Proses bioremediasi sangat dipengaruhi oleh aktivitas mikroorganisme yang mendegradasi kontaminan ataupun polutan tersebut. Seperti yang telah disinggung pada bagian sebelumnya, tipe pertumbuhan mikroba yang bersifat eksponensial tidak berlangsung dalam periode waktu yang kontinu. Pertumbuhan mikroba amat dipengaruhi oleh lingkungan dan nutrisi yang terkandung di dalamnya. Kondisi lingkungan yang kurang sesuai bagi pertumbuhan mikroba ataupun kurangnya nutrisi yang terkandung dapat menyebabkan menurunnya atau bahkan menghentikan pertumbuhan bakteri. Pertumbuhan bakteri dapat digambarkan pada kurva berikut :



Gambar 2.8 Empat Fase Pertumbuhan Mikroorganismen (Baker et al., 1994)

Dari kurva pertumbuhan di atas, kita dapat membagi fase pertumbuhan bakteri menjadi empat fase pertumbuhan, antara lain :

1. *Lag Phase*

Fase ini disebut juga sebagai fase pertumbuhan lambat. Pada fase ini, mikroba masih berusaha untuk beradaptasi dengan lingkungan inokulumnya. Selama fase ini, bakteri mengalami penambahan ukuran sel serta melakukan sintesis molekul dan enzim yang dibutuhkan untuk pertumbuhan dan pembelahan sel. Lamanya fase ini dapat bervariasi dan umumnya bergantung pada kondisi lingkungan pertumbuhan mikroba.

2. *Exponential Phase*

Pada fase ini, bakteri mulai melakukan reproduksi melalui pembelahan diri. Populasi bakteri bertambah pesat dengan laju pertumbuhan maksimum dan berlipat ganda sebagai fungsi dari waktu generasinya. Semakin bertambahnya jumlah bakteri akan mengakibatkan jumlah nutrisi yang tersedia makin menipis dan produk hasil metabolisme meningkat. Hal ini nantinya akan menghambat laju pertumbuhan mikroba itu sendiri.

3. *Stationary-Growth Phase*

Pada fase ini populasi mikroorganismen yang ada di dalam lingkungan cenderung konstan. Hal ini disebabkan karena jumlah mikroba yang dihasilkan dari pembelahan diri adalah sama dengan jumlah mikroba yang mati.

4. *Death Phase*

Pada fase ini, jumlah nutrisi yang ada untuk memenuhi kebutuhan hidup mikroba semakin menipis dan jumlah produk hasil metabolisme meningkat. Keadaan ini akan mengakibatkan kompetisi untuk mendapatkan nutrisi antar mikroba semakin besar. Yang mendapatkan nutrisi akan tetap bertahan hidup sementara yang gagal akan mati. Pada fase ini laju kematian bakteri lebih besar daripada laju pertumbuhannya. Setelah jangka waktu tertentu nutrisi yang diperlukan akan benar-benar habis sehingga dapat menyebabkan kematian seluruh populasi bakteri.

Beberapa faktor lingkungan yang mempengaruhi pertumbuhan dan reproduksi bakteri adalah :

- Ketersediaan air. Sebagian besar tubuh bakteri tersusun oleh cairan sehingga metabolisme dan kelangsungan hidupnya sangat tergantung pada ketersediaan air di lingkungannya.
- Temperatur. Aktivitas mikroorganisme umumnya meningkat menjadi dua atau tiga kalinya setiap kenaikan temperatur 10°C hingga mencapai temperatur optimal.
- Derajat keasaman (pH). Pertumbuhan mikroorganisme terbatas hanya pada range pH tertentu. Lingkungan yang terlalu asam akan bersifat toksik bagi bakteri karena metabolisme tidak berjalan dengan baik. Sebagian besar mikroba dapat tumbuh dan berkembang pada pH antara 6.5 – 7.5, hanya sebagian kecil yang masih mampu bertahan pada kondisi lingkungan yang asam dengan pH 4.
- Elektron akseptor sebagai energi pendukung dalam degradasi karbon sebagai sumber nutrisi. Elektron akseptor yang banyak dibutuhkan bakteri aerob adalah oksigen.
- Nutrisi sebagai sumber makanan baik makronutrient dan mikronutrient.

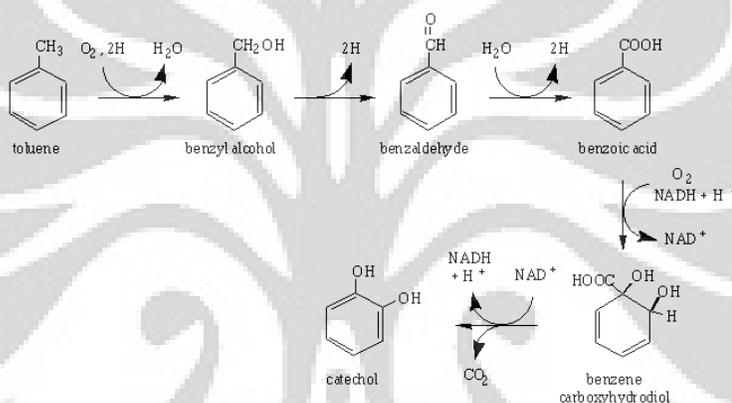
Pada *mix-culture* (konsorsium) populasi mikroorganisme dapat saling mendukung dengan cara menyingkirkan zat/bahan *toxic* bagi mikroba lain, mempercepat proses inisiasi degradasi, mendegradasi produk *intermediate* mikroba lain, kometabolisme (metabolisme bersama), dan transfer genetik. Hal ini



menjadikan penggunaan konsorsium di dalam proses bioremediasi menjadi lebih menguntungkan (Gozan, 2004).

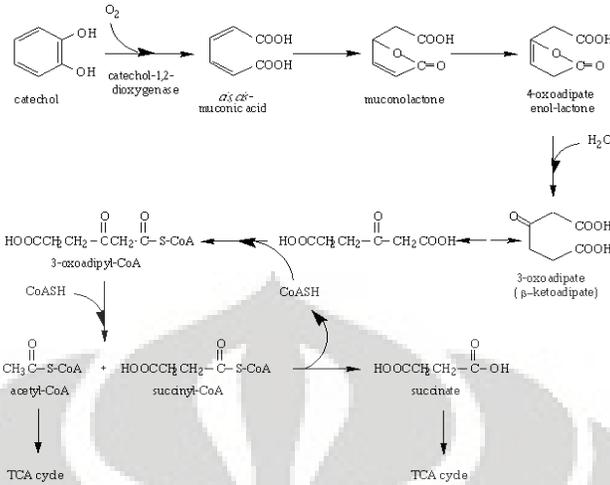
2.3.3 Biodegradasi Toluena

Metabolisme toluena diawali dengan oksidasi rantai samping alkil dan cincin aromatik. Pada reaksi dengan menggunakan monooksigenase sebagai katalis, toluena akan dikonversi menjadi benzil alkohol yang akan dioksidasi lebih lanjut menjadi asam benzoat melalui proses dehidrogenasi. Asam benzoat merupakan senyawa yang akan disisipkan dengan oksigen molekuler untuk membentuk *catechol*.

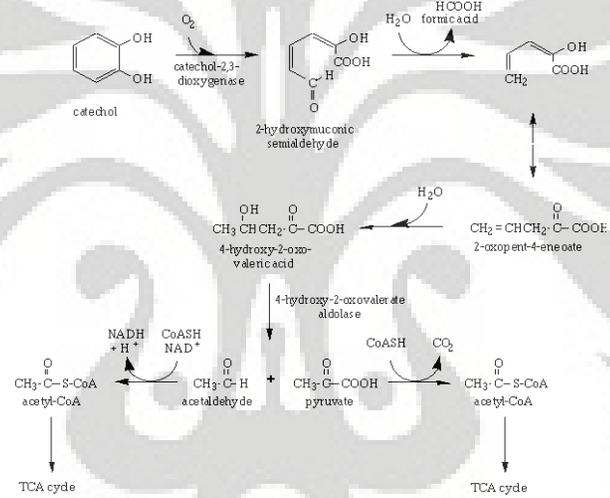


Gambar 2.9 Metabolisme Toluena Menjadi *Catechol* (Wrenn et al., 1998)

Catechol akan dikatabolisme melalui pemutusan cincin dengan bantuan enzim dioksigenase. Pemutusan cincin ini dapat berlangsung melalui dua jenis jalur yang berbeda. Jalur yang pertama adalah pemutusan cincin orto yaitu pemisahan aromatik di antara dua atom karbon yang mengandung gugus hidroksil. Jalur yang kedua adalah pemutusan cincin meta yaitu pemisahan aromatik di antara atom karbon yang mengandung gugus hidroksil dan atom karbon yang tidak tersubstitusi. Kedua jalur ini pada akhirnya akan membentuk *intermediate* siklus TCA (*Acetate* dan *Succinate*) atau senyawa yang dapat dengan mudah dikonversi menjadi *intermediate* siklus TCA (piruvat dan asetaldehida).



Gambar 2.10 Reaksi Pemutusan Cincin Orto *Catechol* (Wrenn et al., 1998)



Gambar 2.11 Reaksi Pemutusan Cincin Meta *Catechol* (Wrenn et al., 1998)

2.3.4 Elektron Akseptor

Elektron akseptor merupakan substansi penerima elektron yang dapat tereduksi dalam proses biodegradasi. Pada proses biodegradasi, elektron akseptor yang biasa digunakan adalah oksigen, nitrat, mangan(IV), besi(III), dan sulfat (Baker, 1994). Proses metabolisme aerobik untuk degradasi substrat biasanya menggunakan oksigen yang berasal dari reaksi dekomposisi hidrogen peroksida (H₂O₂) sebagai elektron akseptor.



Dari persamaan reaksi di atas terlihat bahwa setiap mol H₂O₂ dapat menghasilkan 0.5 mol oksigen. Alasan penggunaan H₂O₂ sebagai pemasok oksigen adalah karena hidrogen peroksida berbentuk cair sehingga lebih mudah dikendalikan pada proses biodegradasi toluena dibandingkan injeksi udara ke dalam kolom bioreaktor (Gozan, 2004).

Penggunaan elektron akseptor oleh mikroorganismenya berdasarkan pada besarnya energi yang dihasilkan. Besarnya energi ini ditentukan dari energi bebas Gibbs yang dilepaskan dalam setiap reaksi reduksi elektron akseptor.

Tabel 2.2 Nilai Energi Beberapa Elektron Akseptor (Lehman, 2001)

Setengah Reaksi	$\Delta G^0 (kJ/mol e^-)$
$\frac{1}{4}O_2 + H^+ + e^- \rightarrow \frac{1}{2}H_2O$	-78,57
$\frac{1}{5}NO_3 + \frac{6}{5}H^+ + e^- \rightarrow \frac{1}{10}N_2 + \frac{3}{5}H_2O$	-72,29
$\frac{1}{2}MnO_2 + 2H^+ + e^- \rightarrow \frac{1}{2}Mn^{2+} + H_2O$	-56
$Fe(OH)_3 + 3H^+ + e^- \rightarrow Fe^{2+} + 3H_2O$	-5,71

Berikut adalah reaksi biodegradasi campuran toluena oleh mikroorganismenya dengan menggunakan elektron akseptor H₂O₂ (Matthews, 1994)



Reaksi biodegradasi toluena secara keseluruhan adalah:



Biodegradasi komponen hidrokarbon memang dapat terjadi secara alami oleh mikroorganismenya tetapi laju biodegradasinya berlangsung lambat disebabkan karena kurangnya elektron akseptor seperti oksigen. Pada air tanah yang



terkontaminasi, oksigen akan cepat habis karena tingginya konsumsi oksigen oleh mikroorganisme sedangkan suplai oksigen pada zona tersebut tidak terganti dengan cepat. Untuk biodegradasi yang optimum perlu dilakukan penambahan elektron akseptor. Sebaliknya jika pemberian oksigen sebagai elektron akseptor terlalu banyak, proses biodegradasi juga tidak efisien karena penambahan H_2O_2 berlebih dapat bersifat toksik bagi mikroorganisme. Penambahan elektron akseptor H_2O_2 berlebihan juga tidak ekonomis karena harganya yang mahal. Karena itu jumlah oksigen yang berasal dari H_2O_2 yang optimum sangatlah diperlukan.

2.3.5 Nutrisi

Dengan basis kering, kurang lebih 95% dari komposisi sel bakteri terdiri dari lima elemen utama, yaitu karbon, oksigen, nitrogen, hidrogen dan fosfor. Fosfor, nitrogen dan sejumlah kecil elemen lainnya diperlukan untuk penyusunan sel atau metabolisme (Makronutrien). Rumus protoplasma: $C_{60}H_{87}O_{23}N_{12}P$, seringkali digunakan sebagai basis perhitungan kebutuhan N dan P pada pengolahan limbah. Selain itu, mikroba juga memerlukan beberapa mikronutrien, seperti: K, S, Ca, Mg, Fe, dan lain-lain, yang biasanya terdapat di lingkungan limbah dan cukup bagi pertumbuhan mikroba.

Sumber nitrogen yang umum digunakan adalah amonium-nitrogen. Hal ini dikarenakan rendahnya energi yang dibutuhkan bakteri untuk mengasimilasi amonium-nitrogen. Selain meningkatkan laju degradasi hidrokarbon, penggunaan amonium-nitrogen juga akan mempercepat fasa lambat pada kurva pertumbuhan bakteri. Akan tetapi, penggunaan amonium-nitrogen dapat memperlambat pertumbuhan bakteri jika ditambahkan dalam jumlah berlebih karena adanya proses pengasaman akibat metabolisme bakteri. Hal ini sebenarnya bisa diatasi dengan penggunaan larutan *buffer* yang tentunya akan menambah biaya.



Tabel 2.3 Elemen-elemen Nutrisi

Unsur	% berat kering	Sumber	Kegunaan
C	50	Senyawa organik atau CO ₂	Penyusun utama materi sel.
O	20	H ₂ O, senyawa organik, CO ₂ , dan O ₂	Penyusun materi dan cairan sel; O ₂ adalah akseptor elektron dalam respirasi
N	14	NH ₃ , NO ₃ , senyawa organik, N ₂	Penyusun asam amino, asam nukleat nukleotida, dan koenzim.
H	8	H ₂ O, senyawa organik, H ₂	Penyusun utama senyawa organik dan cairan sel.
P	3	Fosfat Inorganik (PO ₄)	Penyusun utama asam nukleat, fosfolipid, LPS, asam <i>teichoic</i> .
S	1	SO ₄ , H ₂ S, S ^o , senyawa sulfur organik	Penyusun <i>cysteine</i> , <i>methionine</i> , <i>glutathione</i> , beberapa koenzim.
K	1	Garam K	Kation inorganik utama sel dan kofaktor untuk beberapa enzim.
Mg	0.5	Garam Mg	Kation inorganik sel dan kofaktor untuk beberapa enzim.
Ca	0.5	Garam Ca	Kation inorganik utama sel dan kofaktor untuk beberapa enzim dan komponen pembentuk endospora.
Fe	0.2	Garam Fe	Komponen <i>cytochromes</i> , protein dan kofaktor untuk beberapa reaksi enzim

2.4 BIOBARRIER

Dilihat dari sudut pandang kata-katanya, *biobarrier* dapat diartikan sebagai wadah atau sistem di mana pada sistem tersebut tidak ada makhluk hidup yang dapat keluar ataupun masuk ke dalam sistem tersebut. Dalam aplikasinya, *biobarrier* merupakan penggabungan proses adsorpsi dan proses biodegradasi yang dilakukan secara simultan (Collins, 1995). Dengan menggunakan *biobarrier*, pengotor organik dapat didegradasi dalam jumlah yang lebih besar dibandingkan dengan proses biodegradasi saja. Selain itu, dengan menyatukan proses adsorpsi dan biodegradasi secara simultan, karbon aktif yang digunakan sebagai adsorben diperkirakan akan memiliki usia pakai yang lebih panjang sebelum harus mengalami proses regenerasi dan reaktivasi. Hal ini disebabkan kontaminan yang terdapat pada karbon aktif dapat diregenerasi secara simultan menggunakan bantuan konsorsium mikroba (Gozan, 2004).

Proses *biobarrier* terjadi jika keadaan yang disebut *bioavailable* yaitu keadaan dimana toluena yang teradsorb dapat dibiodegradasi, tercapai. Jika



keadaan ini tercapai, mikroba dapat berkembang dan dapat memenuhi sel antar karbon aktif. Hal ini juga dapat mengurangi kemungkinan oksigen untuk mengalami kontak dengan karbon aktif. Dengan demikian jelas bahwa adsorpsi oksigen oleh karbon aktif dalam proses *biobarrier* tidak terjadi. Untuk degradasi campuran senyawa aromatik dan air adsorpsi oksigen oleh karbon aktif tidak terjadi karena disebabkan karena :

- Pada proses *biobarrier* yang dilakukan, ketika oksigen memasuki *biobarrier* keadaan yang *bioavailable* sudah tercapai.
- Kelarutan oksigen dalam air kecil.
- Dalam air, karbon aktif lebih memilih molekul-molekul organik atau senyawa-senyawa non polar.

Bioavailable dari kontaminan pada karbon aktif dapat ditunjukkan dengan adanya biodegradasi kontaminan pada karbon aktif dibandingkan dengan konsentrasi kontaminan pada karbon aktif sebelum input mikroba. Untuk mencapai tahap *bioavailable* tersebut, proses *biobarrier* yang berjalan haruslah mencapai beberapa tahap berikut (Matthews,et.al,1994).

- Kontaminan terserap ke dalam adsorben.
- Secara enzimatik, mikroba dapat menyebabkan kontaminan terdesorpsi yang kemudian mikroba akan memetabolisme kontaminan tersebut.
- Dengan metabolisme ini, mikroba akan berkembang hingga memenuhi ruang antar adsorben.

2.5 GAS CHROMATOGRAPHY

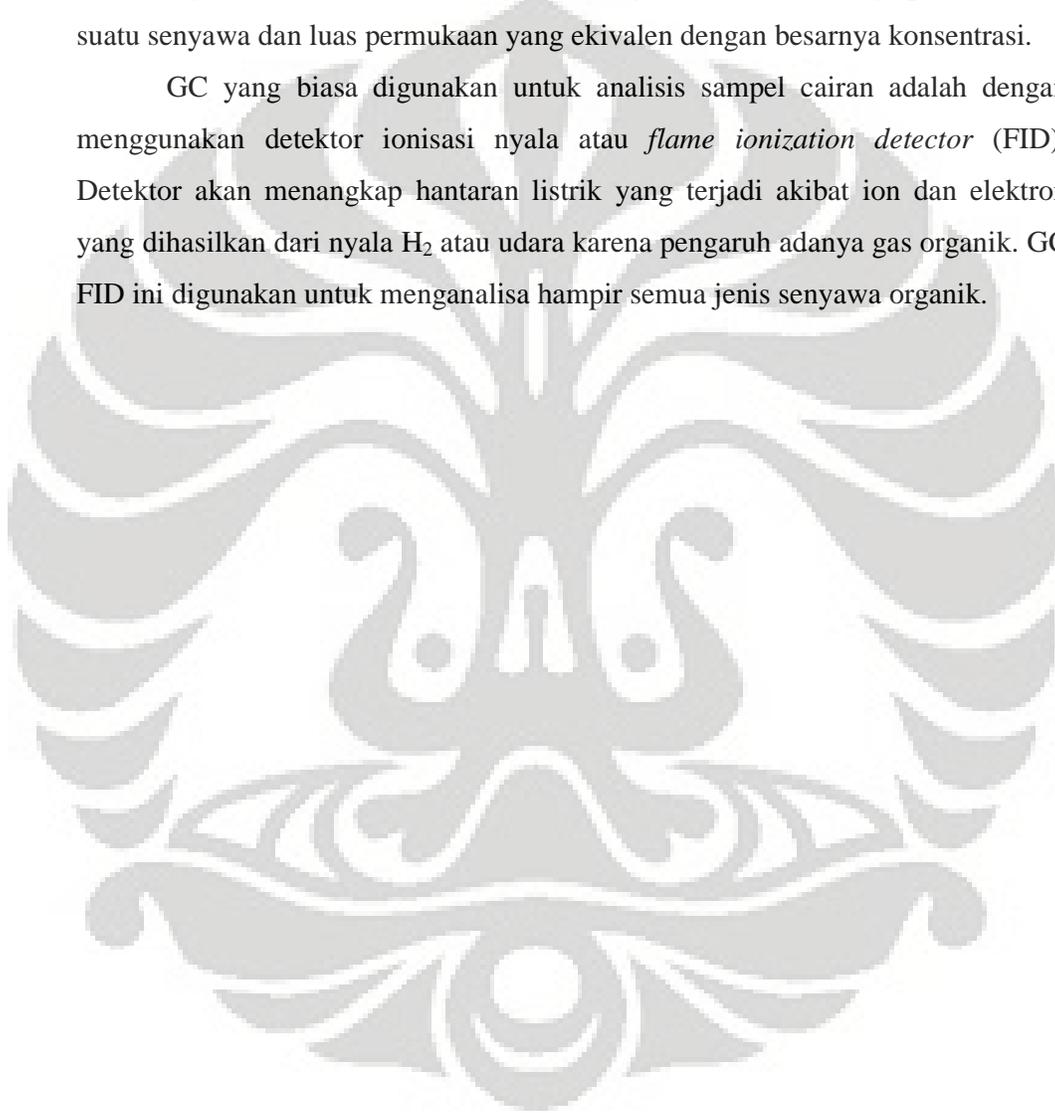
Gas Chromatography (GC) merupakan teknik kromatografi yang sederhana dan mudah digunakan untuk pemisahan, identifikasi dan penentuan komponen kimia dalam suatu campuran. Berdasarkan fasa sampel yang akan dianalisis, GC dibedakan menjadi *Gas-Liquid Chromatography* (GLC) dan *Gas-Solid Chromatography* (GSC). Prinsip kerjanya adalah didasarkan pada perbedaan kecepatan migrasi komponen-komponen yang terkandung dalam senyawa sampel pada fasa gerak dan fasa diam.

Secara singkat, kromatografi bekerja dengan cara: komponen-komponen dalam campuran pada suatu aliran gas pembawa yang inert (fasa gerak)



dilewatkan melalui fasa diam. Pemisahan komponen terjadi karena adanya perbedaan migrasi antara komponen-komponen yang ada dalam campuran tersebut. Gas pembawa dan sampel akan melewati detektor. Alat ini akan mengukur kuantitas dari sampel dan menghasilkan suatu sinyal elektrik yang akan diteruskan ke data system / integrator yang menghasilkan kromatogram atau peak. Peak yang terbentuk memberikan data tentang waktu retensi yang spesifik untuk suatu senyawa dan luas permukaan yang ekuivalen dengan besarnya konsentrasi.

GC yang biasa digunakan untuk analisis sampel cairan adalah dengan menggunakan detektor ionisasi nyala atau *flame ionization detector* (FID). Detektor akan menangkap hantaran listrik yang terjadi akibat ion dan elektron yang dihasilkan dari nyala H₂ atau udara karena pengaruh adanya gas organik. GC FID ini digunakan untuk menganalisa hampir semua jenis senyawa organik.



BAB III

METODE PENELITIAN

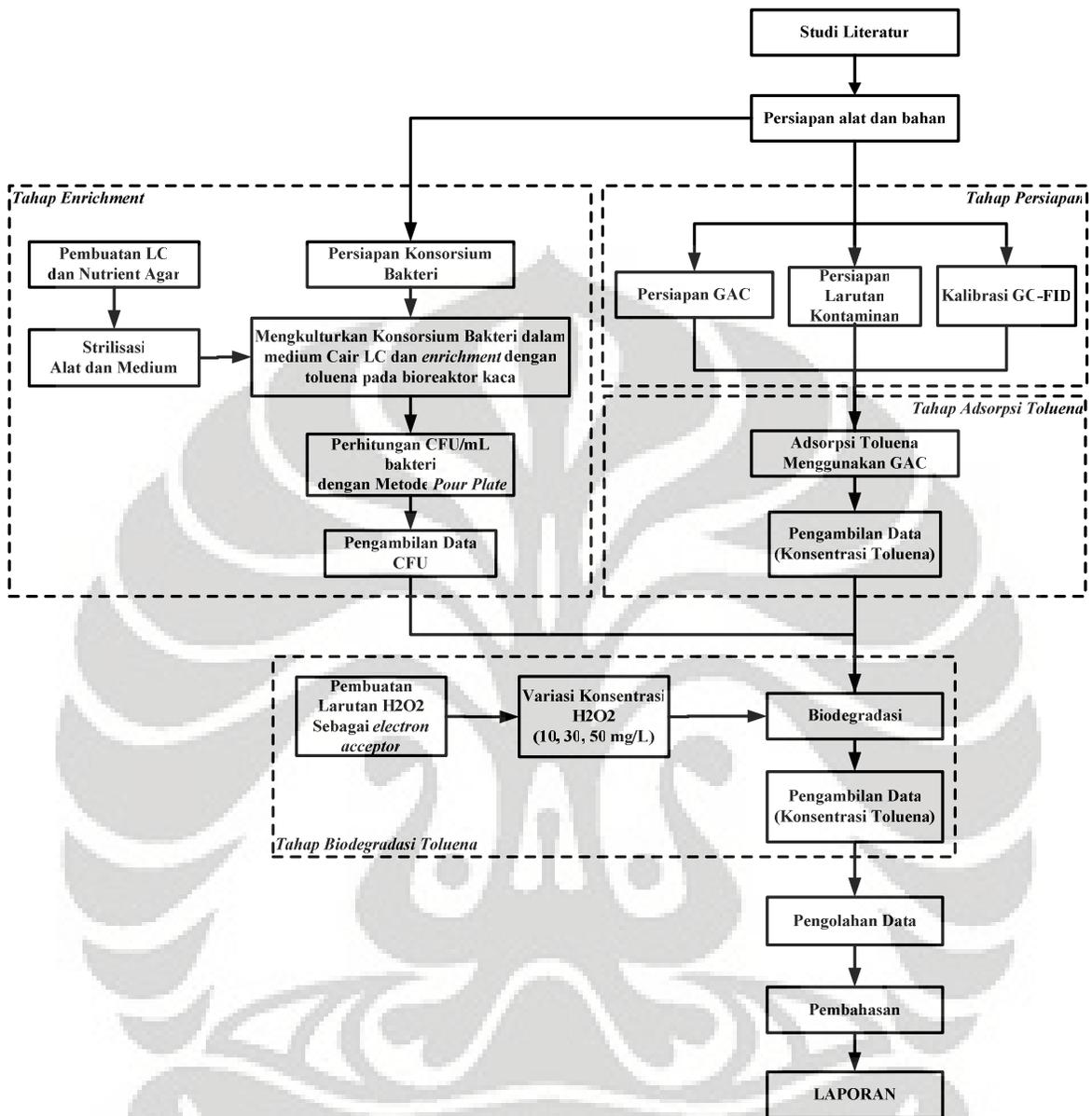
Bab ini akan memuat skema penelitian yang berupa prosedur penelitian, alat dan bahan yang digunakan, serta prosedur pengolahan data. Penelitian dengan judul “Kemampuan GAC dan Konsorsium Mikroba dalam Mendegradasi Limbah Cair yang Mengandung Toluena dengan Menggunakan Kolom *Biobarrier* Skala Pilot” ini merupakan salah satu dari rangkaian penelitian yang dilakukan oleh Tim *Biobarrier* di Laboratorium Bioproses Departemen Teknik Kimia FTUI. Pada tahap penelitian sebelumnya telah dilakukan beberapa percobaan untuk mengetahui konsentrasi optimum H_2O_2 sebagai elektron akseptor pada skala laboratorium serta mengenai rasio nutrisi optimum dalam mendukung pertumbuhan konsorsium bakteri secara optimal.

3.1 DIAGRAM ALIR PENELITIAN

Secara umum penelitian ini terdiri dari percobaan *enrichment* konsorsium bakteri, adsorpsi toluena menggunakan GAC dan biodegradasi. *Enrichment* konsorsium bakteri dilakukan untuk mendapatkan konsorsium bakteri yang dapat beradaptasi dengan lingkungan *biobarrier* dalam jumlah yang cukup. Selanjutnya, untuk mendapatkan lingkungan *biobarrier* yang mengandung toluena, adsorpsi toluena menggunakan GAC dilakukan. Setelah tersebut tercapai, proses biodegradasi secara aerobik pada kolom *biobarrier* skala pilot untuk mereduksi kadar toluena di dalam limbah cair dilakukan.

Berikut ini adalah skema yang menggambarkan alur penelitian ini:





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian



3.2 ALAT DAN BAHAN PENELITIAN

3.1.1 Peralatan

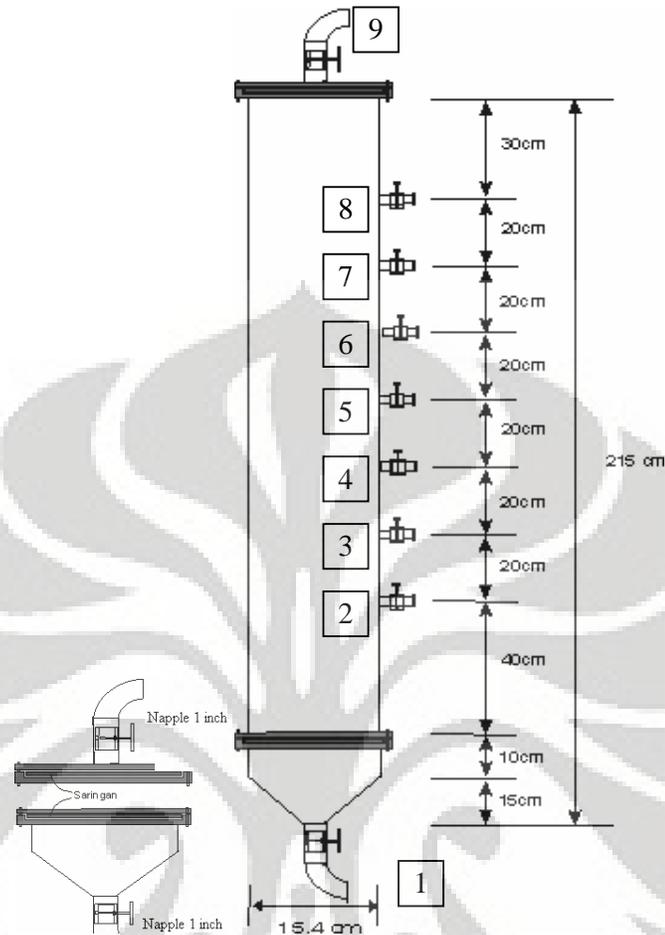
Peralatan yang digunakan dalam penelitian adalah :

1. Tangki air dengan volume 200 liter, 110 liter, dan 60 liter. Tangki digunakan untuk menampung model kontaminan toluena, pengadukan model kontaminan, serta penampungan nutrisi.
2. Selang fiber dan selang plastik, sebagai instalasi penghubung aliran dari dan ke *biobarrier*.
3. Pompa sentrifugal, digunakan untuk mengalirkan kontaminan ke kolom *biobarrier*.
4. Pompa diafragma, digunakan untuk mengalirkan nutrisi dan elektron akseptor ke kolom *biobarrier*.
5. Kanister, sebagai tempat untuk menampung larutan H_2O_2 .
6. Katup *stainless steel*, untuk mengatur laju alir kontaminan, nutrisi dan elektron akseptor.
7. *Flowmeter*, untuk mengukur laju alir.
8. Kolom *Biobarrier* Skala Pilot dengan spesifikasi sebagai berikut.

Tabel 3.1 Spesifikasi Kolom *Biobarrier* Skala Pilot

Parameter	Nilai	Satuan
Material	<i>Stainless steel</i>	
<i>Schedule</i>	40	
<i>Size</i>	6	inch
OD	6,63	inch
ID	15,41	cm
Tebal	0,71	cm
Tinggi	215	cm
Luas Alas	186,29	cm ²
Volume	40.053	cm ³





Gambar 3.2 Kolom *Biobarrier* Skala Pilot

9. Bioreaktor sebagai tempat untuk enrichment konsorsium bakteri.
10. *Transfer Box* sebagai tempat steril untuk melakukan inokulasi dan penghitungan CFU.
11. *Beaker Glass* 100 ml, 500 ml dan 1000 ml untuk wadah pembuatan LC dan tempat sampel sementara.
12. Labu ukur dan gelas ukur untuk mengukur volume cairan.
13. *Erlenmeyer* dan buret untuk keperluan titrasi.
14. Aluminium foil dan *plastic wrap* untuk mengisolasi sampel agar tidak terkontaminasi.
15. Neraca digital untuk mengukur berat zat kimia yang digunakan.
16. Pengaduk kaca dan spatula untuk pengadukan agar sampel merata.
17. *Magnetic Stirrer* untuk mengaduk larutan kalibrasi.
18. Botol tempat sample.

19. *Pressure cooker* untuk memanaskan medium dan sterilisasi alat.
20. Oven untuk mengeringkan GAC dan peralatan kaca untuk kepentingan sterilisasi.
21. GC FID di Departemen Kimia FMIPA UI untuk pengujian sampel.
22. Pipet untuk pengambilan cuplikan sampel.
23. Cawan Petri untuk tempat pengkulturan bakteri.
24. Peralatan *Reverse Osmosis* (RO) untuk menghasilkan air RO yang akan digunakan untuk pembuatan model kontaminan toluena dan sebagai pelarut zat kimia lain yang digunakan dalam penelitian.

3.1.2 Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian adalah :

1. Toluena teknis yang diperoleh dari PT Bratachem, digunakan untuk membuat model kontaminan toluena dengan konsentrasi tertentu serta pembuatan larutan kalibrasi untuk GC FID.
2. *Granular Activated Carbon* (GAC) mesh 8-16 yang diperoleh dari PT. Daiti Carbon Nusantara sebanyak 9779 gram.
3. Air RO yang dihasilkan dari pengolahan air leding dari lingkungan Universitas Indonesia dengan alat *Reverse Osmosis* yang akan digunakan sebagai bahan baku air penelitian.
4. H_3PO_4 untuk menghentikan kinerja konsorsium bakteri.
5. Konsorsium Bakteri *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus coagulans*, dan *Aeromonas hydrophyl*.
6. H_2O_2 sebagai elektron akseptor.
7. Kalium Permanganat, Asam Sulfat, Natrium Oksalat untuk keperluan titrasi elektron akseptor.
8. Nutrien Agar sebagai media tempat bertumbuhnya konsorsium bakteri pada saat kulturisasi.
9. LC yang berisi campuran air RO dan $FeCl_3 \cdot 6H_2O$, $CaCl_2 \cdot 2H_2O$, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, NH_4NO_3 , KH_2PO_4 , $K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$.
10. Alkohol 70% untuk sterilisasi.



3.3 PROSEDUR PENELITIAN

Secara umum tahapan yang akan dilakukan pada penelitian ini terbagi menjadi 4 tahap, yaitu tahap persiapan, tahap *enrichment* konsorsium bakteri, penjuanan GAC (*loading phase*) dan biodegradasi toluena.

3.3.1 Tahap Persiapan

3.3.1.1 Persiapan Granular Activated Carbon (GAC)

Karakterisasi GAC telah dilakukan pada penelitian sebelumnya sehingga yang dilakukan pada tahap ini adalah pembersihan dan pengeringan GAC. Sebelum dimasukkan dalam kolom *biobarrier* GAC dibersihkan dari pengotor untuk menghilangkan komponen hidrokarbon, gas, dan air dari permukaan karbon dengan cara dikukus menggunakan *pressure cooker* selama 120 menit. Setelah dikukus, GAC dikeluarkan dan dipisahkan dari sisa air. GAC bersih yang masih basah dikeringkan dengan oven selama 3 jam pada suhu 130 °C. Setelah melalui prosedur ini dan GAC sudah benar-benar kering, GAC kemudian ditimbang sebanyak 9779 gram (Arby, 2007). Berikut adalah karakteristik GAC yang digunakan.

Tabel 3.2 Karakteristik GAC produksi PT Daiti

Sifat	Nilai
Ukuran partikel (<i>mesh</i>)	8 – 16
Diameter (cm)	0,268
<i>Void</i>	0,608
Densitas GAC (gram/mL)	1,282

3.3.1.2 Persiapan Campuran Kontaminan

Larutan model kontaminan dibuat dengan mengisi tangki utama dengan 200 liter air RO dan ditambahkan 133 ml toluena yang kemudian diaduk hingga tercampur homogen. Untuk menjaga volume tangki kontaminan utama, tambahkan campuran kontaminan dibuat di dalam tangki cadangan. Tangki cadangan diisi dengan 60 liter air RO dan 40 ml toluena. Untuk menghindari penguapan yang



berlebihan, tangki kontaminan ditutup rapat untuk menghindari kontak antara larutan dengan udara di lingkungan luar.

3.3.1.3 Persiapan Kolom Biobarrier

Kolom *biobarrier* skala pilot yang digunakan di dalam penelitian ini merupakan hasil *scale up* kolom *biobarrier* skala pilot yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya. Berikut merupakan spesifikasi dari kolom *biobarrier* skala pilot tersebut.

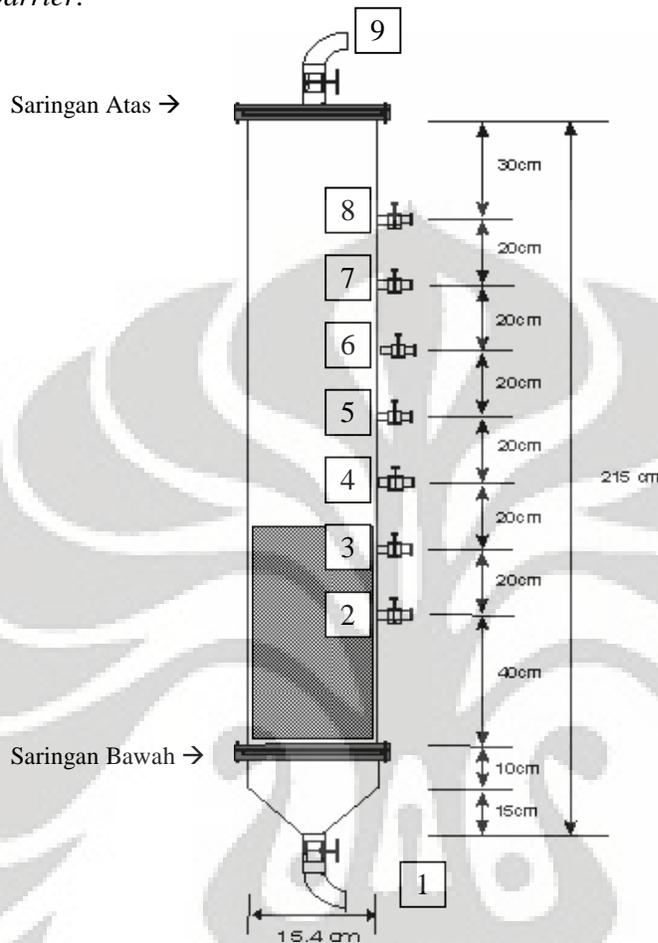
Tabel 3.3 Data Kolom *Biobarrier* Skala Pilot (Arby, 2007)

Parameter	Nilai	Satuan
A. Dimensi Kolom		
Tinggi Kolom	215,0	cm
Diameter Kolom	15,4	cm
Tebal Kolom	0,7	cm
Luas Penampang	186,3	cm ²
Volume Kolom	40053,0	cm ³
	40,1	liter
B. Data GAC		
<i>Mesh</i>	8.0 – 16	
Panjang	0,23	cm
Luas Permukaan	0,30	cm ²
Volume	0,01	cm ³
Diameter Partikel (Dp)	0,28	cm
Spherisitas (Φ)	0,79	
<i>Void</i> (ε)	0,44	
Densitas (ρp)	1,28	gram/cm ³
Densitas Material	1,52	gram/cm ³
C. Data Unggun		
Volume unggun	6449	cm ³
Volume kolom terisi GAC	11467	cm ³
Tinggi kolom terisi GAC	62	cm
Massa GAC	9779	gram
D. Waktu Tinggal		
	188	s
	3,14	menit

Di dalam kolom *biobarrier* skala pilot, sebanyak 9779 gram GAC dimasukkan ke dalam kolom sebagai adsorban untuk proses adsorpsi di dalam



kolom *biobarrier*. Berikut adalah ilustrasi keberadaan GAC di dalam kolom *biobarrier*.



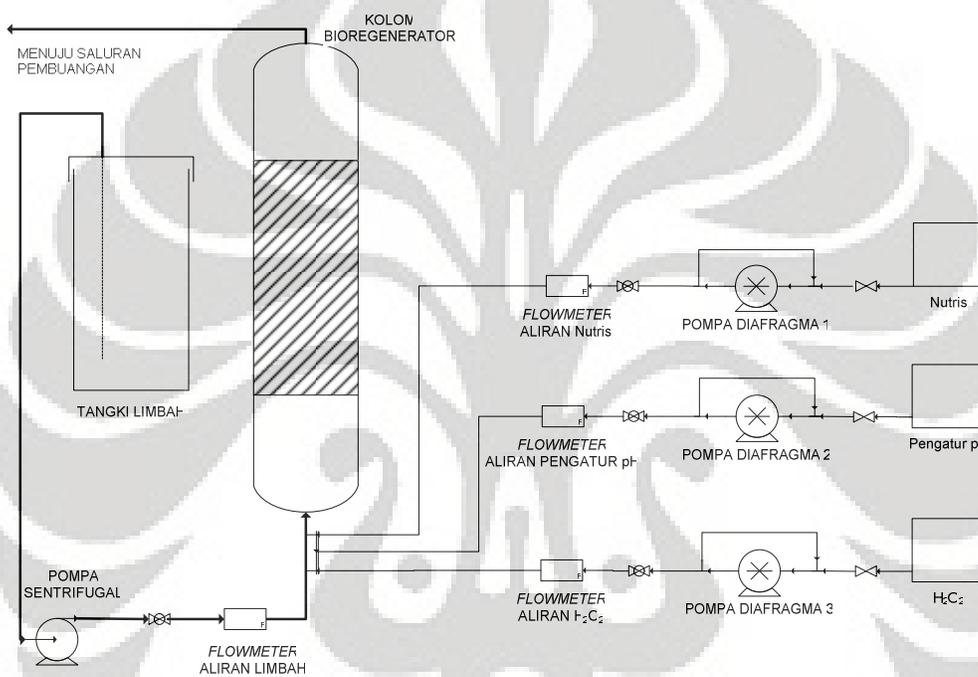
Gambar 3.3 Ilustrasi Kolom *Biobarrier* (Bagian yang Diarsir Merupakan Bagian Kolom yang Diisi GAC)

Pada kolom *biobarrier* ini, baik di bagian atas dan bawah kolom terdapat saringan dengan *mesh* 18-20. Hal ini bertujuan untuk menahan GAC agar tetap berada dalam kolom. Jadi di dalam kolom *biobarrier*, GAC tidak berada dari dasar kolom, melainkan dari ketinggian 25 cm dari dasar kolom. Selain untuk mempermudah *maintenance*, salah satu alasan GAC tidak berada dari dasar kolom adalah untuk memperkecil kemungkinan terjadinya *dead lock* di dalam kolom. Pada kolom *biobarrier* ini, keberadaan *dead lock* tidak diinginkan karena dapat mengurangi efisiensi proses adsorpsi dari kolom *biobarrier* karena dapat mengurangi jumlah GAC yang mengalami kontak dengan aliran kontaminan.

Seperti dapat dilihat pada gambar 3.3, kolom *biobarrier* skala pilot memiliki 7 buah port (port2 s.d. port8) pada bagian kolomnya. Port ini berfungsi

untuk mengambil sampel dari tiap ketinggian kolom tersebut selama proses adsorpsi berlangsung dengan tujuan mengetahui *mass transfer zone* dari kolom *biobarrier* skala pilot. Akan tetapi, pada penelitian sebelumnya *mass transfer zone* untuk kolom *biobarrier* skala lab tidak dapat ditemukan sehingga pada penelitian skala pilot tahap untuk mengetahui *mass transfer zone* tidak dilakukan.

Kolom *biobarrier* skala pilot selanjutnya dioperasikan mengikuti ilustrasi berikut.



Gambar 3.4 Skema Aliran Kolom *Biobarrier* Skala Pilot

Di dalam penelitian ini, larutan kontaminan toluena masuk ke dalam kolom *biobarrier* melalui bagian bawah kolom dengan bantuan pompa sentrifugal. Nutrisi dan elektron akseptor juga masuk ke dalam kolom *biobarrier* melalui percabangan yang terdapat di saluran kontaminan toluena tepat di sebelum sambungan antara aliran toluena dengan kolom *biobarrier*. Akhirnya, baik nutrisi maupun elektron akseptor akan memasuki kolom *biobarrier* melalui bagian bawah kolom bersama-sama dengan larutan kontaminan toluena yang telah dipompa. Hal ini bertujuan agar baik nutrisi maupun elektron akseptor H_2O_2 dapat terdistribusi secara merata di dalam kolom *biobarrier*. Sementara itu, aliran pH regulator belum digunakan. Hal ini dikarenakan belum terdapat data yang memadai mengenai penggunaan pH regulator di dalam proses *biobarrier*.



Mengacu kepada skema aliran kolom *biobarrier* yang telah dijelaskan di atas, berikut adalah daftar komponen peralatan dari kolom *biobarrier* skala pilot.

Tabel 3.4 Daftar Komponen Alat *Biobarrier* (Arby, 2007)

No	Komponen	Fungsi	Jumlah	Spesifikasi
1	Pompa sentrifugal	Mengalirkan limbah ke dalam kolom	1	Merk : Ebara Model : CDXM/A 70/05 Hz : 50; P : 0,37 kW Voltase : 230-240 volt Q : 20-90 Lpm Bahan : <i>Stainless steel</i>
2	Pompa diafragma	Mengalirkan elektron akseptor, nutrisi dan pengatur pH ke dalam kolom	3	Merk : Deng Yuan Tipe : 2600 Flow : 1,6 Lpm Kuat Arus : 0,7 Ampere Voltase : 24 volt Tekanan : 80-125 psi
3	<i>Flowmeter</i>	Mengatur laju alir masing-masing aliran	4	Merk : Dwyer Rentang <i>flow</i> : 0,1-1,2 Lpm Bahan : <i>Stainless steel</i> → Khusus untuk limbah Merk : Zyia Rentang <i>flow</i> : 1 - 11 Lpm Bahan : <i>Stainless steel</i>
4	<i>Ball valve</i>	Membuka dan menutup aliran		Merk : Sankyo Bahan : <i>Stainless steel</i> Ukuran : ¼ inch → 10 buah Ukuran : ½ inch → 2 buah Ukuran : 1 inch → 1 buah
5	<i>Napple</i>	Sambungan untuk selang dengan <i>valve</i>		Bahan : <i>Stainless steel</i> Ukuran : ¼ inch → 20 buah Ukuran : ½ inch → 4 buah Ukuran : 1 inch → 5 buah
6	Klem	Mengencangkan selang pada <i>napple</i> dan <i>valve</i>	6	Ukuran : ½ inch → 4 buah Ukuran : 1 inch → 2 buah
7.	Tangki	Menampung limbah, nutrisi, dan pengatur pH	5	Tangki utama volume: 200 liter → 1 buah Tangki nutrisi volume: 110 liter → 1 buah Tangki cadangan volume: 60 liter → 3 buah
8.	Kanister	Menampung elektron akseptor	2	Volume: 5,5 liter → 4 buah Volume: 12 liter → 2 buah

Setelah seluruh komponen peralatan *biobarrier* disusun berdasarkan diagram skematik, pengecekan terhadap kolom *biobarrier* beserta komponen-



komponennya dilakukan. Dengan menggunakan bantuan pompa sentrifugal, kolom *biobarrier* yang masih kosong dialiri dengan air. Hal ini bertujuan untuk mengecek apakah terjadi kebocoran baik karena kerusakan alat maupun karena pemasangan baut yang kurang kencang. Selanjutnya, pengecekan dan pengencangan sambungan juga dilakukan pada aliran nutrisi dan elektron akseptor. Setiap pompa maupun *flowmeter* yang menyertainya kemudian dikalibrasi untuk menjaga keakuratan pembacaan. Berikut adalah gambar keseluruhan dari set alat *biobarrier* yang digunakan di dalam penelitian ini.



Gambar 3.5 Set Peralatan *Biobarrier* Skala Pilot

3.3.1.4 Kalibrasi Gas Kromatografi FID

Kalibrasi GC-FID dilakukan dengan menentukan luas area toluena pada konsentrasi 100, 200, 300, 400 dan 500 ppm. Hasil yang diperoleh berupa kurva Luas Area Toluena terhadap Konsentrasi Toluena. Kurva ini digunakan untuk menentukan konsentrasi toluena setelah proses degradasi oleh bakteri. Parameter

yang digunakan pada saat melakukan kalibrasi *Gas Chromatograph* adalah sebagai berikut:

- Kolom = PEG (*PolyEthyleneGlicol*)
- Temperatur kolom = 110 °C
- Temperatur Injeksi = 130°C
- Atenuasi = 1
- Tekanan Nitrogen = 1,0 kgf/cm² = 50 ml/min
- Tekanan Hidrogen = 0,5 kgf/cm²
- Tekanan udara kompresor = 0,5 kgf/cm²

3.3.2 *Enrichment* Konsorsium Bakteri

Ada beberapa prosedur yang harus dilakukan pada saat *enrichment* konsorsium bakteri, yaitu :

3.3.2.1 *Sterilisasi Alat*

Sterilisasi dilakukan pada alat dan medium untuk mencegah terkontaminasinya konsorsium bakteri. Alat disterilisasi kering dengan menggunakan oven selama ± 2 jam. Untuk medium seperti air RO, LC dan *nutrient agar* (NA) disterilisasi basah selama 1,5 jam dalam *pressure cooker*. Sedangkan untuk lemari asam dan bioreaktor kaca, sterilisasi dilakukan dengan cara disemprotkan menggunakan alkohol 70 %.

3.3.2.2 *Proses enrichment konsorsium bakteri*

Enrichment konsorsium bakteri dengan toluena dilakukan agar konsorsium bakteri dapat beradaptasi dengan lingkungan yang mengandung toluena. Kultur konsorsium bakteri ini didapatkan dari LEMIGAS. Selanjutnya *enrichment* konsorsium bakteri dilakukan dalam medium *Lockhead and Chase* (LC) yang pada komposisinya tidak mengandung unsur karbon sehingga satu-satunya sumber karbon hanya didapatkan dari toluena. Sebanyak 5 ml konsorsium bakteri dikulturkan dalam 495 ml medium cair LC untuk kemudian dilakukan proses *enrichment* dengan larutan toluena. Proses ini dilakukan dengan cara mengontakkan bakteri pada medium LC toluena dengan konsentrasi 500 ppm pada fase uap dalam bioreaktor kaca tertutup.dengan toluena pada fasa uap dalam



bioreaktor kaca tertutup dan diaduk menggunakan *magnetic stirrer*. Berikut ini adalah komposisi bahan penyusun medium LC:

- $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0,01 gram
- $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0,02 gram
- $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0,2 gram
- NH_4NO_3 0,26 gram
- KH_2PO_4 0,2 gram
- $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 0,8 gram



Gambar 3.6 *Enrichment* Konsorsium Bakteri

Proses *enrichment* dilakukan dalam kondisi aseptik agar tidak terdapat kontaminan seperti debu, jamur dan mikroorganisme lain yang dapat mempengaruhi pertumbuhan konsorsium bakteri. Kondisi aseptik ini diciptakan dengan mensterilkan *transfer box* dengan penyemprotan alkohol 70% ke seluruh bagian dan melakukan penyinaran Ultra Violet selama 5 menit sebelum dilakukan proses *enrichment*. Sinar UV dapat merusak DNA mikroorganisme. Hal ini disebabkan sinar UV dapat membentuk ikatan kovalen dengan senyawa basa yang mencegah sel membelah diri yang dapat menyebabkan kematian jika tidak diperbaiki oleh sel tersebut. Sedangkan alkohol 70% dapat merusak senyawa protein yang ada pada mikroorganisme (Gozan, 2005). Selain itu dilakukan sterilisasi pada alat dan medium yang digunakan dengan sterilisasi kering yaitu pemanasan di oven dengan temperatur 130 °C selama 2 jam (untuk peralatan terbuat dari gelas) dan sterilisasi basah menggunakan *pressure cooker* selama 45 menit (untuk peralatan non gelas) dan 90 menit untuk medium.

3.3.2.3 Penghitungan Jumlah Bakteri

Metode *pour plate* digunakan untuk mengetahui pertumbuhan dan perhitungan jumlah koloni bakteri. Metode ini digunakan karena mudah dilakukan secara manual dan jumlah CFU/ml (*Colony Forming Unit* per mililiter) yang terbentuk ada pada rentang 30-300 koloni. Metode *Pour Plate* menggunakan *Nutrient Agar* sebagai medium. Penghitungan CFU/mL diawali dengan pengenceran cuplikan dari konsorsium bakteri sebanyak 0,2 mL dari *enrichment* di bioreaktor ke dalam 19,8 mL air RO pada labu *erlenmeyer* 1, dilanjutkan 0,2 mL konsorsium bakteri dari labu *erlenmeyer* 1 dimasukkan ke dalam 19,8 mL air RO di labu *erlenmeyer* 2. Hal ini dilakukan hingga labu *erlenmeyer* ke 5. Setelah itu mengambil masing-masing 0,2 mL konsorsium bakteri dari labu *erlenmeyer* 4 dan 5 lalu dimasukkan ke dalam cawan petri tersendiri.

Langkah selanjutnya adalah menuangkan 15 mL *Nutrient Agar* ke dalam masing-masing cawan petri sambil digoyangkan dan ditunggu hingga dingin untuk meletakkan cawan petri yang telah dilapisi *cling wrap* pada posisi terbalik di dalam lemari penyimpanan yang terisolasi. Penghitungan jumlah koloni yang terbentuk dilakukan setelah menginkubasi cawan petri tersebut selama 2 hari agar koloni bakteri dapat jelas terlihat. Hasil yang didapatkan berupa jumlah bakteri dalam *Colony Forming Unit* (CFU)/mL yang akan diplot ke dalam grafik dengan jumlah bakteri sebagai sumbu ordinat dan satuan waktu sebagai absis.



Gambar 3.7 Konsorsium Bakteri, *Nutrient Agar*, dan Larutan LC

Medium *nutrient agar* yang terbuat dari ekstrak alga merah ini digunakan karena memiliki beberapa karakteristik yang bermanfaat pada persiapan media. *Nutrient agar* sulit untuk terdekomposisi oleh bakteri karena *agar* merupakan bahan gel yang stabil dalam hampir semua keadaan. Selain itu, *agar* melebur pada

100 °C dan tidak akan tersolidifikasi sampai suhu 45°C tercapai. Setelah berbentuk gel, agar tidak akan lebur lagi sampai dipanaskan kembali hingga suhu 100°C (Gozan, 2005).

3.3.3 Adsorpsi Toluena Menggunakan GAC

Proses adsorpsi toluena menggunakan GAC dilakukan untuk mendapatkan lingkungan *biobarrier* yang telah terkontaminasi dengan toluena. Toluena yang mengisi pori-pori GAC akan menjadi sumber karbon bagi bakteri pada saat proses biodegradasi berlangsung (Sontheimer, 1988). Selama proses ini berlangsung, toluena akan terus diadsorpsi oleh GAC sampai kapasitas adsorpsinya mencapai maksimum. Dengan kata lain, konsentrasi toluena masuk inlet kolom *biobarrier* sama dengan konsentrasi outletnya..

Larutan kontaminan yang merupakan larutan toluena dalam air yang dialirkan ke dalam kolom *biobarrier* dengan laju alir volumetrik 0,63 lpm. Untuk menjaga agar tangki kontaminan tetap terisi larutan kontaminan toluena, larutan toluena untuk pengisian ulang tangki kontaminan dengan volume 200 liter dibuat pada tangki cadangan dengan ukuran 60 liter.

3.3.4 Biodegradasi Model Kontaminan Toluena

Percobaan ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari penambahan konsorsium bakteri dan juga variasi konsentrasi elektron akseptor (H_2O_2) pada konsentrasi outlet. Laju alir dari kontaminan sama seperti pada percobaan *loading phase* yaitu sebesar 0,63 lpm, laju alir elektron akseptor digunakan sebesar 0,2 lpm dan laju alir nutrisi sebesar 0,1 lpm. Sebelum dilakukan *running*, konsorsium bakteri diinokulasikan ke dalam GAC yang telah jenuh dengan memasukkan 500 ml konsorsium bakteri yang berasal dari bioreaktor ke dalam kolom *biobarrier* dan didiamkan selama ± 30 menit. Setelah itu pompa kontaminan dijalankan hingga laju alir 0,63 lpm. H_2O_2 yang dipompa ke dalam kolom dengan konsentrasi awal sebesar 10 mg/L dan divariasikan berikutnya, sementara nutrisi dijaga laju alirnya agar tetap konstan pada 0,1 lpm.

Berikut adalah komposisi nutrisi yang digunakan perliternya adalah:

- $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ 0,01 gram



- $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0,02 gram
- $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0,2 gram
- NH_4NO_3 1,85 gram
- KH_2PO_4 0,136 gram
- $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 0,228 gram

3.3.4.1 Pembuatan larutan H_2O_2 (elektron akseptor)

1. Pembuatan larutan Kalium Permanganat dengan prosedur sebagai berikut:
 - a. Menimbang 3,2 gram Kalium Permanganat dan dimasukkan ke dalam gelas piala 250 ml.
 - b. Memasukkan 50 ml air ke dalam gelas piala tersebut dan diaduk. Kemudian mengendapkan dan menuangkan ke dalam gelas piala yang besar. Menambahkan 50 ml air untuk melarutkan setiap kristal yang masih tertinggal pada gelas piala. Ulangi prosedur ini sampai semua kristal larut.
 - c. Mengencerkan larutan sampai 1 liter.
2. Pembakuan larutan Kalium Permanganat dengan metode Mc Bride. Prosedur pembakuan adalah sebagai berikut:
 - a. Menimbang 0,3 gram Natrium Oksalat dan dimasukkan ke dalam *erlenmeyer* 250 ml.
 - b. Melarutkan 75 ml Asam Sulfat 1,5 N (20 ml Asam Sulfat pekat ditambahkan pada 400 ml air) ke dalam *erlenmeyer*.
 - c. Memanaskan larutan hingga hampir mendidih (80-90°C).
 - d. Menitrasi dengan Kalium Permanganat. Titik akhir ditandai dengan timbulnya warna merah muda yang mantap sekurang-kurangnya selama 30 detik.
 - e. Selama titrasi suhu tidak boleh kurang dari 60°C.
3. Menentukan konsentrasi H_2O_2 dengan prosedur sebagai berikut:
 - a. Memasukkan 25 ml H_2O_2 ke dalam labu ukur 250 ml (labu 1) dan ditambahkan air sampai tepat 250 ml.
 - b. Memasukkan 25 ml H_2O_2 dari labu ukur 1 ke dalam *erlenmeyer* 250 mL yang telah berisi 5 ml Asam Sulfat pekat dan air 75 ml.



- c. Mentitrasi dengan larutan baku Kalium permanganat sampai terlihat warna merah muda yang mantap.
- d. Melakukan prosedur ini hingga 2 kali.

Percobaan ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi konsentrasi H_2O_2 sebagai elektron akseptor terhadap kemampuan biodegradasi konsorsium bakteri. Hidrogen Peroksida (H_2O_2) yang berfungsi sebagai elektron akseptor dimasukkan ke dalam kolom adsorpsi dengan variasi konsentrasi 10 mg/l, 30 mg/l dan 50 mg/l.

3.3.4.2 Pengambilan Data Biodegradasi

Sampel diambil pada port 1, yang selanjutnya disebut sebagai inlet, dan port 2, yang selanjutnya disebut sebagai outlet, pada kolom *biobarrier* skala pilot. Waktu pengambilan sampel ini dapat berubah-ubah, tergantung besarnya konsentrasi toluena yang keluar dari kolom. Setiap sampel yang diambil, harus ditambahkan satu tetes asam phospat untuk menghentikan kerja bakteri. Botol sampel ditutup rapat dan disegel menggunakan parafilm sehingga memperkecil kemungkinan toluena menguap. Data yang diperoleh dianalisis menggunakan GC FID dan diperoleh data berupa luas area toluena yang kemudian dikonversikan dengan persamaan kalibrasi sehingga didapatkan konsentrasi toluena.

3.4 VARIABEL PENELITIAN

Variabel yang dapat ditentukan dalam penelitian ini adalah variabel bebas dan variabel terikat. Variabel bebas merupakan variabel yang diset pada suatu harga tertentu. Variabel bebas pada penelitian ini adalah variasi konsentrasi elektron akseptor H_2O_2 sebesar 10 mg/liter, 30 mg/liter, dan 50 mg/liter.

Variabel terikat merupakan variabel yang diukur sebagai hasil penelitian. Variabel terikat dalam proses *biobarrier* ini adalah konsentrasi dan pH outlet port 2 kolom *biobarrier*.

Sementara itu, penelitian ini dilakukan dalam kondisi operasi sebagaimana yang telah ditentukan dalam penelitian sebelumnya (Arby,2007):

- Berat karbon aktif sebesar 9779 gram.
- Laju alir model kontaminan toluena sebesar 0,63 lpm (liter per menit).



- Laju alir nutrisi sebesar 0,1 lpm.
- Laju alir elektron akseptor H₂O₂ sebesar 0,2 lpm.

3.5 DATA PENGAMATAN

Data yang diamati pada penelitian ini adalah:

- Konsentrasi toluena pada inlet dan outlet kolom *biobarrier* skala pilot.
- Tingkat keasaman toluena pada inlet dan outlet kolom *biobarrier* skala pilot.

Dimana data-data ini akan diambil pada:

- Waktu pengambilan data proses adsorpsi toluena menggunakan GAC dilakukan setiap pukul 08.00 dan 16.00 setiap harinya hingga konsentrasi outlet kolom *biobarrier* skala pilot mendekati konsentrasi inputnya.
- Pengambilan data proses biodegradasi dari dua titik, yaitu inlet inlet dan outlet kolom *biobarrier* skala pilot.

3.6 PENGOLAHAN DATA

Konsentrasi inlet dan outlet didapat dengan memasukkan luas area toluena yang diperoleh melalui analisis menggunakan GC FID ke dalam persamaan kalibrasi. Setiap penambahan konsentrasi elektron akseptor H₂O₂, diharapkan konsentrasi toluena pada *efluen* akan menurun sebagai akibat dari proses biodegradasi mikroba secara aerobik. Penambahan konsentrasi elektron akseptor terus dilakukan sampai konsentrasi toluena pada aliran keluar mendekati nol. Setelah itu dapat ditentukan konsentrasi H₂O₂ yang optimum untuk mendegradasi toluena oleh mikroba yang maksimum. Jadi dapat disimpulkan konsentrasi elektron akseptor optimum adalah konsentrasi elektron akseptor tertinggi yang masih mempengaruhi perubahan konsentrasi toluena pada *efluen*.



BAB IV PEMBAHASAN

4.1 ENRICHMENT KONSORSIUM BAKTERI

Enrichment konsorium bakteri dengan toluena dilakukan untuk memperbanyak jumlah bakteri serta adaptasi pada lingkungan yang mengandung toluena. Bakteri yang digunakan adalah konsorsium *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus coagulans*, dan *Aeromonas hydrophila*. Konsorsium bakteri ini telah terbukti mampu mendegradasi toluena (Bustomy, 2006; Risma, 2005).

Sebanyak 5 ml konsorsium bakteri dikulturkan dalam medium cair LC untuk kemudian dilakukan proses *enrichment* dengan larutan toluena. Proses ini dilakukan dengan cara mengontakkan bakteri pada medium LC toluena dengan konsentrasi 500 ppm pada fase uap dalam bioreaktor kaca tertutup. Konsentrasi toluena yang digunakan untuk *enrichment* sebesar 500 ppm agar konsorsium bakteri mampu beradaptasi pada konsentrasi tinggi. Oleh sebab itu, diharapkan konsorsium ini akan mampu bertumbuh di dalam kolom *biobarrier* yang dialiri kontaminan toluena.

Enrichment konsorium bakteri dengan toluena dilakukan hingga mencapai tahap pertumbuhan eksponensial sebelum akhirnya diinjeksikan ke dalam kolom *biobarrier* saat kolom *biobarrier* skala pilot akan beroperasi. Hal ini dikarenakan bakteri sedang mengalami pertumbuhan yang pesat sehingga diharapkan proses biodegradasi di dalam kolom *biobarrier* dapat berjalan secara optimum.

4.2 ADSORPSI TOLUENA MENGGUNAKAN GAC

Proses adsorpsi toluena menggunakan GAC dilakukan untuk mendapatkan lingkungan *biobarrier* yang telah terkontaminasi dengan toluena.. Tahap ini akan berakhir ketika konsentrasi kontaminan toluena pada outlet mendekati

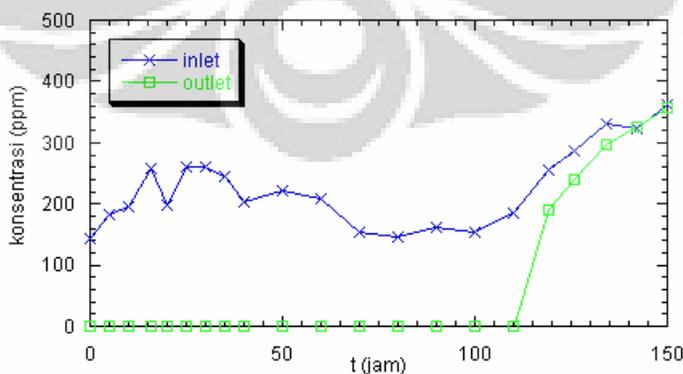


konsentrasinya pada inlet. Toluena yang mengisi pori-pori GAC akan menjadi sumber karbon bagi bakteri pada saat proses biodegradasi berlangsung (Sontheimer, 1988). Diameter pori GAC sebesar 15 Å sampai 23 Å memudahkan adsorpsi toluena yang diameternya hanya sebesar 5,72 Å (Othmer, 1992).

Pada saat campuran kontaminan dialirkan ke dalam kolom, GAC yang terbasahi akan tenggelam dan berada di bagian bawah kolom karena densitasnya yang sebesar 1,2 g/cm³ lebih besar daripada densitas air. Hal ini memungkinkan penggunaan kolom *biobarrier fixed bed* dengan mengatur kecepatan aliran fluida berada di bawah kecepatan minimum sebelum karbon aktif mengalami fluidisasi.

Larutan kontaminan toluena dialirkan secara kontinu ke dalam kolom *biobarrier* dengan laju alir volumetrik 0,63 lpm. Selama proses penjuanan GAC berlangsung, hanya pompa untuk mengalirkan kontaminan toluena saja yang dinyalakan. Aliran elektron akseptor, nutrisi dan pH regulator belum diperlukan karena pada tahap ini proses yang berlangsung hanyalah proses adsorpsi toluena oleh GAC. Adsorpsi oleh GAC dilakukan selama 15 hari, yang berlangsung selama 10 jam perharinya, yang dimulai pada pukul 8.00 dan berakhir pada pukul 18.00. Proses penjuanan GAC yang tidak kontinu ini diakibatkan keterbatasan kapasitas alat *Reverse Osmosis* (RO) sebagai penyedia air RO yang digunakan sebagai pelarut toluena pada pembuatan larutan kontaminan.

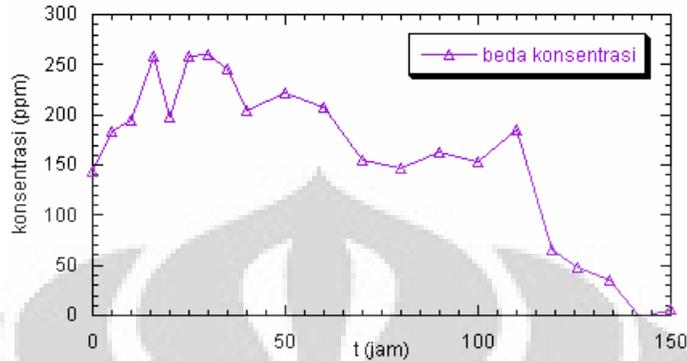
Selama proses adsorpsi berlangsung, konsentrasi toluena pada inlet kolom *biobarrier* berkisar antara 200 – 350 ppm. Waktu yang diperlukan untuk mencapai kondisi di mana konsentrasi outlet mulai mendekati inlet adalah 150 jam waktu proses. Pada jam ke-150, konsentrasi toluena pada inlet sebesar 362,4 ppm, sementara pada outlet kolom *biobarrier* skala pilot sebesar 356,0 ppm.



Gambar 4.1 Profil Konsentrasi Toluena selama Proses Adsorpsi Berlangsung



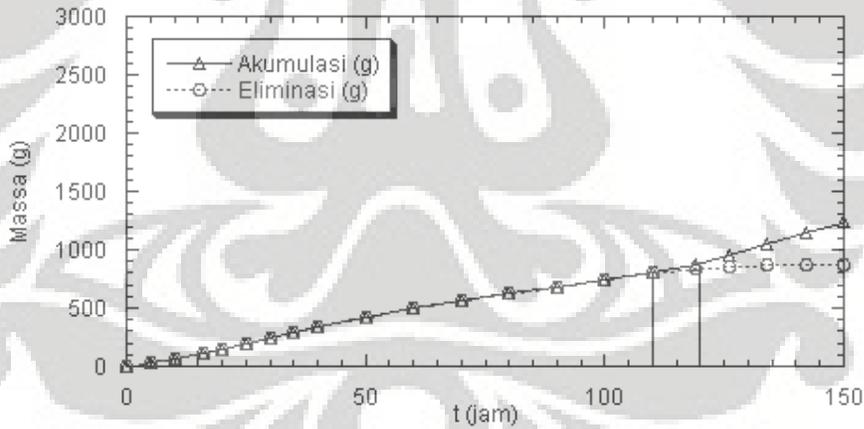
Berikut adalah penurunan konsentrasi toluena pada outlet dibandingkan dengan inlet pada proses adsorpsi toluena menggunakan GAC.



Gambar 4.2 Perbedaan Konsentrasi Toluena antara Outlet dan Inlet selama Proses Adsorpsi

Dari gambar 4.2 di atas dapat terlihat bahwa selama proses adsorpsi toluena berlangsung, seiring dengan bertambahnya waktu, jumlah toluena yang diadsorp cenderung semakin berkurang. Hal ini menandai bahwa kapasitas adsorpsi GAC semakin berkurang seiring dengan bertambahnya waktu adsorpsi.

Untuk tahap adsorpsi toluena menggunakan GAC, berikut adalah jumlah toluena yang terakumulasi.



Gambar 4.3 Akumulasi Toluena pada Proses Adsorpsi Menggunakan GAC

Jika dibandingkan dengan Gambar 4.1, terlihat bahwa peningkatan jumlah toluena yang terakumulasi sebanding dengan konsentrasi toluena yang masuk ke kolom *biobarrier*. Sebagai contoh, pada jam ke-110 sampai dengan jam ke-120, terjadi peningkatan toluena yang masuk ke kolom *biobarrier* di mana akumulasi yang terjadi juga meningkat. Selain itu, terlihat bahwa mulai jam ke-110 proses eliminasi menggunakan GAC mulai terjadi. Hal ini terus berlangsung sampai pada



jam ke-150 konsentrasi outlet mulai mendekati konsentrasi inletnya. Dengan kata lain, eliminasi toluena akibat proses adsorpsi sudah mulai terhenti. Sampai pada jam ke-150 proses adsorpsi, jumlah toluena yang tereliminasi sebesar 880,4 gram.

Tahap selanjutnya adalah proses biodegradasi campuran toluena oleh konsorsium bakteri. Untuk tahap biodegradasi toluena, konsentrasi outlet akan terus dipantau agar dapat dilihat pengaruh biodegradasi terhadap penurunan konsentrasi toluena.

4.3 BIODEGRADASI MODEL KONTAMINAN TOLUENA

4.3.1 Persiapan Tahap Biodegradasi Toluena

Berbeda dengan tahap adsorpsi toluena menggunakan GAC di mana yang dilakukan secara tidak kontinu, untuk tahap biodegradasi kontaminan toluena, proses dilakukan secara kontinu. Sebelum penelitian dapat melangkah mencapai tahap ini, ketiga tahap sebelumnya, antara lain tahap persiapan, tahap *enrichment* konsorsium bakteri serta tahap penjenuhan GAC harus sudah selesai dilakukan. Selain itu, data terakhir dari proses penjenuhan GAC harus sudah diketahui.

Pada penelitian ini, tahap biodegradasi toluena dimulai setelah konsentrasi toluena pada outlet telah mendekati konsentrasi toluena pada inlet kolom *biobarrier* skala pilot. Adapun pada jam ke-150 proses biodegradasi konsentrasi toluena pada inlet bernilai 362,4 ppm sementara konsentrasi toluena pada outlet bernilai 356,0 ppm.

Sementara itu, ketika konsentrasi toluena pada outlet mulai mendekati konsentrasi toluena pada inlet, yaitu 2 hari sebelum proses biodegradasi dimulai, proses *enrichment* konsorsium bakteri dimulai. Selanjutnya, konsorsium yang telah mengalami *enrichment* inilah yang akan digunakan pada tahap biodegradasi toluena. Jangka waktu tiga hari ini dipilih karena berdasarkan hasil penelitian sebelumnya mengenai perkembangan konsorsium bakteri pada proses *enrichment*, pada *enrichment* jam ke-72, konsorsium bakteri berada pada fasa pertumbuhan eksponensial (Sitorus, 2007).

Ketika proses biodegradasi akan dijalankan, langkah selanjutnya adalah pembuatan larutan elektron akseptor. Elektron akseptor yang berperan untuk



suplai oksigen dalam penelitian ini adalah H₂O₂. H₂O₂ digunakan sebagai sumber oksigen karena wujudnya cairan sehingga lebih mudah terdifusi ke dalam larutan kontaminan dan LC yang bersama-sama masuk ke dalam kolom *biobarrier*. Elektron akseptor fasa gas lebih sulit terdifusi ke dalam larutan kontaminan sehingga penggunaannya akan boros karena banyak yang terbuang ke lingkungan. Selain itu, oksigen yang berasal dari H₂O₂ menghasilkan energi yang lebih besar dibandingkan dengan elektron akseptor yang lain (Tabel 2.2).

Hidrogen peroksida akan terurai menjadi molekul oksigen dan air berdasarkan reaksi :



Konsentrasi hidrogen peroksida yang diizinkan untuk proses biodegradasi adalah antara 10 mg/l sampai 100 mg/l. Konsentrasi hidrogen peroksida yang digunakan pada biodegradasi tidak boleh langsung dengan konsentrasi yang tinggi tetapi harus dimulai dari konsentrasi yang rendah dahulu agar bakteri yang digunakan mampu beradaptasi. Konsentrasi yang terlalu tinggi malah akan menjadi racun bagi bakteri (Gozan, 2004). Oleh karena itu, dalam percobaan ini variasi konsentrasi elektron akseptor yang digunakan adalah 10 mg/l, 30 mg/l, dan 50 mg/l. Konsentrasi H₂O₂ yang dipakai pada proses ini lebih kecil dibandingkan kebutuhan H₂O₂ stoikiometrik untuk mengoksidasi seluruh toluena (Lampiran 4).

4.3.2 Proses Biodegradasi Toluena di Dalam Kolom *Biobarrier* Skala Pilot

Sebelum kolom *biobarrier* dioperasikan untuk proses biodegradasi, langkah pertama yang dilakukan adalah menginjeksikan konsorsium bakteri yang telah mengalami proses *enrichment* sebanyak 500 ml ke dalam kolom *biobarrier*. Proses penginjeksian konsorsium bakteri dilakukan dengan menggunakan bantuan pompa sentrifugal. Konsorsium bakteri dimasukkan ke dalam sistem perpipaan dari aliran kontaminan. Selanjutnya aliran tersebut dialiri dengan sedikit kontaminan toluena sampai seluruh larutan konsorsium mikroba masuk ke dalam kolom. Proses ini bertujuan agar bakteri dapat mengambil tempat di dalam GAC yang telah mengalami penjenuhan. Selain itu diharapkan bakteri akan beradaptasi dengan lingkungan kolom *biobarrier* terlebih dahulu sebelum kolom *biobarrier* dijalankan untuk proses biodegradasi. Jumlah inokulum konsorsium bakteri tepat



pada saat konsorsium bakteri belum memasuki kolom *biobarrier* atau dengan kata lain telah menyelesaikan tahap *enrichment* adalah $5,55 \times 10^{12}$ CFU/ml.

Jangka waktu antara proses penginjeksian bakteri sampai dengan mulai dialirkannya aliran kontaminan ke dalam kolom *biobarrier* di set selama 30 menit. Akan tetapi, saat waktu tersebut telah tercapai, pompa sentrifugal untuk mengalirkan kontaminan toluena tidak dapat berjalan. Pompa sentrifugal tersebut baru bisa berfungsi sebagaimana mestinya setelah waktu penginjeksian mencapai sekitar 60 menit. Walaupun jangka waktu tersebut bertambah, namun perhitungan jumlah inokulum konsorsium bakteri pada jam ke-0 bernilai $5,65 \times 10^{12}$ CFU/ml. Dengan kata lain konsorsium bakteri dapat menyesuaikan diri dengan lingkungan barunya. Hal ini dirasa wajar mengingat konsorsium bakteri yang memasuki kolom telah mengalami proses *enrichment* dengan toluena sebelumnya sehingga konsorsium bakteri dapat beradaptasi dengan lingkungan yang mengandung toluena (Sitorus, 2007).

Selanjutnya, kolom *biobarrier* skala pilot dijalankan secara kontinu. Setiap variabel kondisi operasi juga dijaga agar berada pada nilainya masing-masing. Selama proses bioregenerasi berlangsung, pembuatan larutan kontaminan, larutan elektron akseptor serta larutan nutrisi terus dilakukan untuk mencegah berkurangnya salah satu komponen kebutuhan bakteri di dalam kolom *biobarrier*. Pada jam ke-24, pengecekan jumlah konsorsium bakteri di dalam kolom *biobarrier* kembali dilakukan. Jumlah inokulum konsorsium bakteri pada jam ke-24 bernilai $7,95 \times 10^{12}$ CFU/ml.

Pada jam ke-46, merujuk ke pada hasil GC FID konsentrasi elektron akseptor dinaikkan. Hal ini dikarenakan pada jam ke-46, besar konsentrasi toluena pada outlet telah mengalami penurunan yang kurang signifikan dibandingkan dengan pengambilan data sebelumnya, yakni pada jam ke-40. Adapun nilai konsentrasi toluena pada outlet di jam ke-40 adalah 212,66 ppm sementara di jam ke-46 sebesar 202,86 ppm. Setelah jam ke-46 konsentrasi H_2O_2 yang masuk ke dalam kolom *biobarrier* ditingkatkan menjadi 30 mg/liter.

Pada proses biodegradasi ini terdapat beberapa kendala teknis. Pada jam ke-40 peralatan *Reverse Osmosis* yang digunakan untuk mengolah air leding menjadi air RO mengalami kerusakan pada bagian pompa. Hal ini mengakibatkan



suplai air RO berhenti dan untuk membuat larutan kontaminan toluena penggunaan air RO diganti dengan air leding yang berasal dari lingkungan Universitas Indonesia.

Proses biodegradasi terpaksa dihentikan pada jam ke-66. Hal ini dikarenakan kebutuhan istirahat yang diperlukan oleh para praktikan. Proses biodegradasi kembali dilanjutkan setelah 18.5 jam. Penghentian proses biodegradasi ini tentunya akan memberikan dampak terhadap proses biodegradasi yang selanjutnya akan dibahas pada subbab selanjutnya.

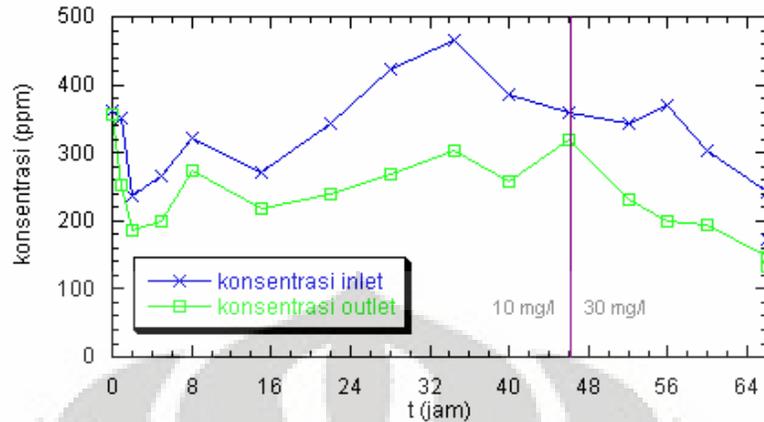
Selanjutnya, pada jam ke-78 konsentrasi elektron akseptor kembali dinaikkan dari 30 mg/liter menjadi 50 mg/liter. Variasi ketiga dilakukan untuk melihat pengaruh penambahan konsentrasi elektron akseptor H₂O₂ di atas kondisi optimum pada skala laboratorium (Sitorus, 2007) terhadap proses biodegradasi yang berlangsung di dalam kolom *biobarrier* skala pilot. Untuk variasi terakhir ini, pengecekan jumlah bakteri pada saat sebelum elektron akseptor dinaikkan serta pada saat proses biodegradasi hampir berakhir dilakukan. Pada jam ke-77, yakni satu jam sebelum kenaikan konsentrasi H₂O₂ menjadi 50 mg/liter, jumlah inokulum konsordium bakteri adalah $8,2 \times 10^{12}$ CFU/ml, sementara pada pada jam ke-113 jumlah inokulum konsorsium bakteri adalah $5,3 \times 10^{12}$ CFU/ml. Proses biodegradasi terus dilanjutkan hingga jam ke-114 ketika proses biodegradasi dihentikan.

4.3.3 Pembahasan Biodegradasi Toluena di Dalam Kolom *Biobarrier* Skala Pilot

Di dalam pembahasan mengenai proses biodegradasi toluena di dalam kolom *biobarrier* skala pilot ini, analisis mengenai proses biodegradasi toluena dilakukan secara terpisah untuk proses biodegradasi sebelum jam ke-66 dan proses biodegradasi setelah jam ke-66 (setelah istirahat). Hal ini dikarenakan penghentian proses biodegradasi tentunya akan memiliki pengaruh yang cukup signifikan terhadap proses biodegradasi.

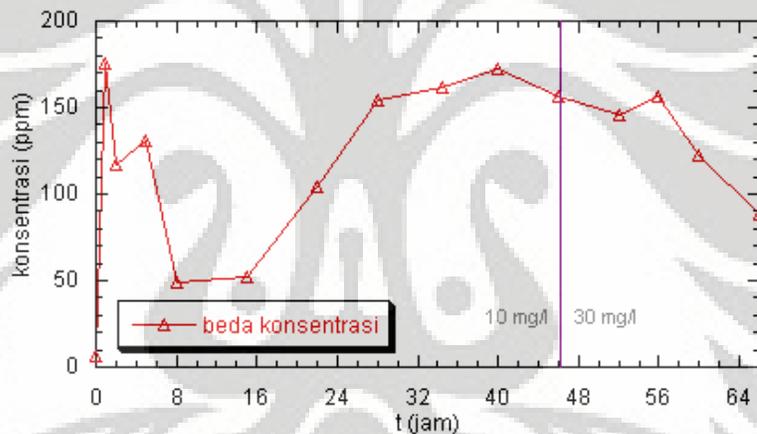
Berikut merupakan profil konsentrasi toluena, baik pada inlet maupun pada outlet selama proses biodegradasi untuk 66 jam pertama berlangsung.





Gambar 4.4 Profil Konsentrasi Toluena selama Proses Biodegradasi 66 Jam Pertama

Sedangkan gambar di bawah merupakan penurunan konsentrasi toluena pada outlet dibandingkan dengan inlet selama proses biodegradasi sebelum jam ke-66 (66 jam pertama).



Gambar 4.5 Perbedaan Konsentrasi Toluena pada Proses Biodegradasi 66 Jam Pertama

Dari gambar di atas dapat terlihat bahwa pada jam pertama terjadi penurunan konsentrasi toluena yang cukup signifikan pada outlet. Penurunan konsentrasi ini diakibatkan oleh konsorsium mikroba yang belum terdistribusi secara merata pada seluruh bagian kolom *biobarrier*.

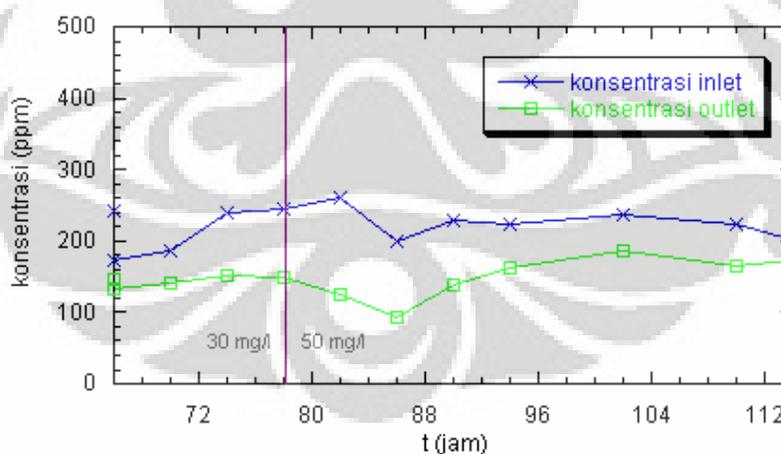
Pada jangka waktu jam ke-1 sampai dengan jam ke-10 terjadi penurunan jumlah toluena yang didegradasi. Penurunan jumlah toluena yang didegradasi ini dipengaruhi oleh faktor pengenceran konsorsium bakteri dari 0,5 liter (volume larutan LC yang digunakan dalam proses *enrichment*) menjadi 28,6 liter atau sekitar 47 kalinya. Volume ini merupakan volume kolom yang tidak terisi GAC. Akan tetapi, konsorsium bakteri dapat terus mengalami pertumbuhan (Sitorus,



2007). Setelah jam ke-10, jumlah toluena yang didegradasi kembali meningkat. Jumlah toluena yang didegradasi ini terus meningkat sampai mencapai jumlah yang konstan mulai jam ke-40. Hal ini menunjukkan selama jangka waktu tersebut konsorsium bakteri kembali mengalami pertumbuhan. Hal ini dikarenakan, jumlah kontaminan yang dapat didegradasi oleh konsorsium bakteri sebanding dengan jumlah konsorsium bakteri yang mendegradasi (Barnum, 1998).

Setelah jam ke-46, konsentrasi H_2O_2 dinaikkan dari 10 mg/liter menjadi 30 mg/liter. Setelah konsentrasi elektron akseptor dinaikkan, terjadi penurunan jumlah kontaminan toluena yang didegradasi. Pada konsentrasi elektron akseptor H_2O_2 sebesar 10 mg/liter, jumlah kontaminan yang tereduksi paling besar terjadi pada jam ke-56 di mana terjadi penurunan kadar toluena pada outlet dibandingkan dengan inlet sebesar 168,3 ppm, sementara pada konsentrasi 30mg/liter penurunan kadar toluena maksimum terjadi pada jam ke-56 dimana penurunannya sebesar 156,2 ppm. Bahkan jumlah ini semakin berkurang seiring dengan berjalannya proses biodegradasi. Hal ini mengindikasikan kenaikan konsentrasi elektron akseptor H_2O_2 menjadi 30mg/liter tidak menaikkan efektifitas proses biodegradasi. Pada variasi ini, proses biodegradasi dihentikan sementara pada jam ke-66.

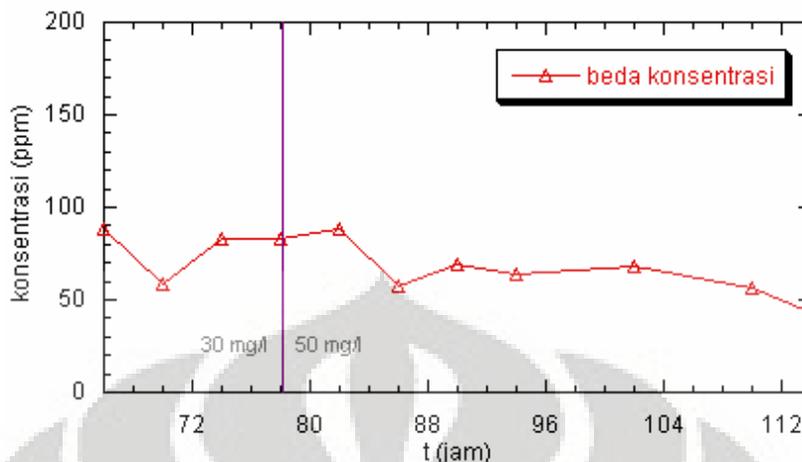
Berikut merupakan profil konsentrasi toluena, baik pada inlet maupun pada outlet selama proses biodegradasi untuk 48 jam kedua berlangsung.



Gambar 4.6 Profil Konsentrasi Toluena selama Proses Biodegradasi 48 Jam Kedua

Sementara gambar di bawah ini merupakan gambar penurunan konsentrasi toluena pada outlet dibandingkan dengan inlet selama proses biodegradasi setelah jam ke-66 (48 jam kedua).





Gambar 4.7 Perbedaan Konsentrasi Toluena pada Proses Biodegradasi 48 Jam Pertama

Setelah proses biodegradasi mengalami pemberhentian sementara selama 18,5 jam, proses biodegradasi dilanjutkan kembali. Selama istirahat berlangsung, baik aliran kontaminan, aliran nutrisi, maupun aliran elektron akseptor dihentikan sama sekali. Hal ini berarti terputusnya sumber nutrisi serta oksigen bagi konsorsium bakteri. Akan tetapi, di dalam konsorsium ini tidak semua bakteri bersifat aerobik obligat, di mana bakteri membutuhkan oksigen agar dapat bermetabolisme. *Bacillus coagulans* dan *Aeromonas hidrophilla* yang terdapat di dalam konsorsium bakteri merupakan bakteri yang dapat bersifat anaerob (De Vecchi, 2005). Selain itu, di dalam kolom *biobarrier* masih terdapat sumber karbon berupa toluena yang telah diadsorpsi oleh GAC sehingga pada fase istirahat ini hanya pertumbuhan bakteri yang bersifat aerobik obligatlah yang terganggu.

Walaupun demikian, ketika proses biodegradasi kembali dilakukan terlihat terjadi penurunan aktivitas konsorsium bakteri dalam proses biodegradasi. Hal ini terlihat dari rendahnya konsentrasi toluena yang didegradasi di dalam *biobarrier* (Gambar 4.7). Penurunan jumlah toluena yang terdegradasi ini tentunya tidak lepas dari penurunan aktivitas bakteri aerob obligat dari konsorsium bakteri, antara lain dari jenis *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas fluorescens*, dan *Bacillus subtilis*. Meskipun demikian, dari jumlah inokulum konsorsium bakteri yang didapatkan pada jam ke-77 terlihat bahwa aktivitas konsorsium mikroba masih relatif stabil. Hal ini terlihat dari jumlah inokulum pada jam tersebut yang bernilai $8,2 \times 10^{12}$ CFU/ml.



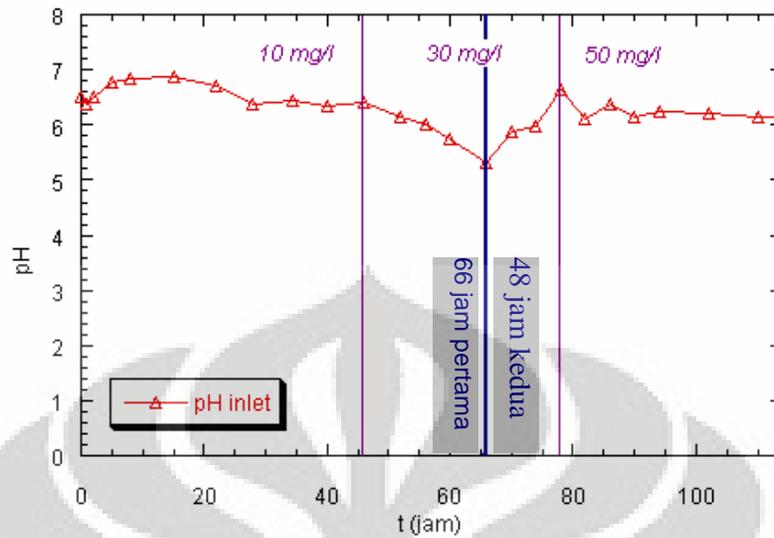
Selanjutnya, setelah jam ke-78 konsentrasi H_2O_2 kembali dinaikkan dari 30 mg/liter menjadi 50 mg/liter. Hal ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan konsentrasi elektron akseptor terhadap proses biodegradasi toluena. Pada awal penambahan konsentrasi, terlihat adanya sedikit peningkatan aktivitas konsorsium bakteri dalam proses biodegradasi dibandingkan variasi konsentrasi H_2O_2 sebelumnya yang sebesar 30 mg/liter. Namun, setelah jam ke-82, terlihat adanya penurunan jumlah toluena yang didegradasi yang juga berarti menurunnya aktivitas konsorsium bakteri.

Jika dilihat dari penurunan konsentrasi toluena pada outlet dibandingkan dengan inlet pada keseluruhan proses, dapat dilihat terjadi penurunan aktivitas konsorsium mikroba di dalam kolom *biobarrier*. Pada konsentrasi H_2O_2 sebesar 50 mg/liter, toluena yang terdegradasi maksimum hanya sebesar 88,9 ppm. Selain itu, perhitungan jumlah inokulum konsorsium bakteri pada jam ke-113 yang sebesar $5,3 \times 10^{12}$ CFU/ml juga menunjukkan fenomena yang serupa. Hasil ini lebih kecil dibandingkan dengan jumlah inokulum pada jam ke-77 yang sebesar $8,2 \times 10^{12}$ CFU/ml.

Secara umum, penurunan konsentrasi terbesar $C_{in} - C_{out}$ (selisih antara inlet dan outlet) toluena terjadi pada konsentrasi H_2O_2 10 mg/liter. Selanjutnya diikuti oleh konsentrasi H_2O_2 30 mg/liter, dan terakhir 50 mg/liter.

Pengukuran terhadap keasaman (pH) juga dilakukan ketika pengambilan sampel. Aktivitas konsorsium bakteri dapat juga kita lihat dari pH larutannya. Berikut adalah grafik yang menunjukkan besarnya toluena pada outlet serta pada inlet sebagai pembandingnya.

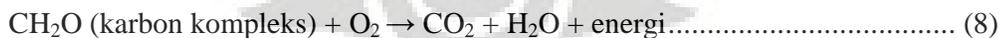




Gambar 4.8 Profil pH Toluena Selama Proses Biodegradasi

Dari Gambar 4.8 terlihat bahwa rentang pH campuran toluena adalah antara 6 sampai 7. Pengecualian terjadi pada proses biodegradasi jam ke-60 sampai dengan jam ke-70. Pada kurun waktu ini, terjadi ketidakstabilan pH pada air leding. Air leding yang digunakan untuk melarutkan toluena sebagai kontaminan memiliki pH yang jatuh mencapai dibawah 6. Hal ini diatasi dengan penambahan larutan natrium hidroksida 0,1 molar ke dalam larutan kontaminan. Penambahan dilakukan sampai pH kontaminan mencapai pH di atas 6.

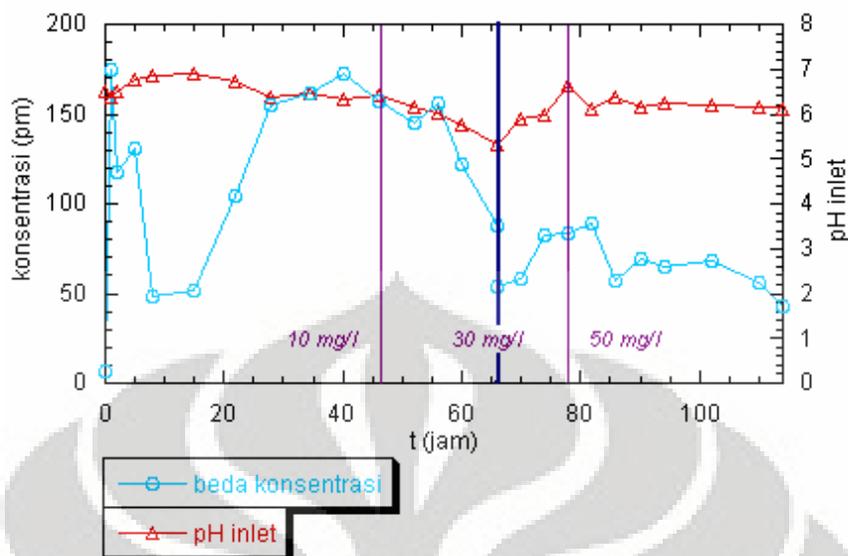
Aktivitas konsorsium bakteri menyebabkan sifat larutan menjadi lebih asam. Hal ini terjadi karena proses respirasi substrat menyebabkan larutan menjadi semakin asam karena proses respirasi substrat tersebut menghasilkan gas CO_2 dan H_2O (dalam bentuk HCO_3^-) dan NADH yang menghasilkan ion H^+ sehingga pada akhirnya proses respirasi substrat menghasilkan suatu larutan asam lemah H_2CO_3 yang menyebabkan turunnya pH larutan. Sebagaimana persamaan reaksi:



Maka secara tidak langsung, adanya penurunan pH outlet dibandingkan dengan inlet menunjukkan adanya penambahan H_2CO_3 sebagai akibat dari adanya proses biodegradasi.

Adapun hubungan antara derajat keasaman dengan penurunan konsentrasi toluena pada proses biodegradasi dapat dilihat pada gambar 4.9 di bawah ini.





Gambar 4.9 pH dan Perbedaan Konsentrasi Toluena antara Outlet dengan Inlet pada Proses Biodegradasi

Berdasarkan gambar di atas, dapat dilihat bahwa proses degradasi toluena oleh konsorsium bakteri sensitif terhadap perubahan pH. Hal ini terlihat pada biodegradasi jam ke-46 sampai dengan jam ke-66. Ketika pH air leding yang digunakan untuk melarutkan kontaminan menurun, konsentrasi toluena yang didgradasi pun ikut menurun. Hal yang sebaliknya juga berlaku, ketika pH larutan kontaminan mulai naik, jumlah kontaminan yang didegradasi juga ikut menaik. Hal ini disebabkan karena aktivitas konsorsium bakteri amat dipengaruhi pH larutannya. Konsorsium bakteri *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus substillis*, *Bacillus coagulans*, dan *Aeromonas hydrophila* yang digunakan memiliki rentang pH untuk pertumbuhan optimum sekitar 6 sampai 7 (Sitorus, 2007). Oleh karena itu, pH larutan yang berada di luar kondisi optimum ini akan menyebabkan penurunan aktivitas konsorsium bakteri yang akhirnya menyebabkan berkurangnya jumlah toluena yang didegradasi.

Proses biodegradasi pada percobaan ini optimum dengan konsentrasi elektron akseptor H_2O_2 10 mg/l. Berhasilnya proses biodegradasi toluena terlihat dari adanya penurunan konsentrasi toluena pada outlet dibandingkan dengan konsentrasi toluena pada inlet seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.9. Kesimpulan ini didukung oleh pengukuran jumlah konsorsium bakteri yang



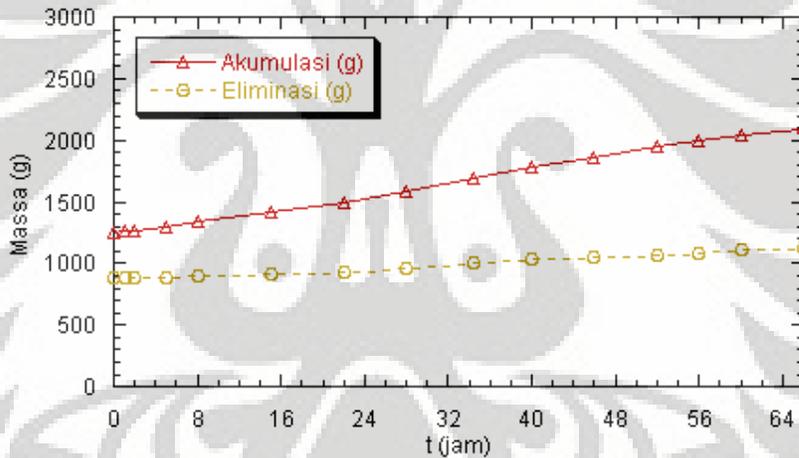
tumbuh pada setiap variasi konsentrasi elektron akseptor dan pH pada inlet dan outlet.

Selama proses reduksi kadar toluena menggunakan proses biobarrier ini berlangsung tentunya akan terdapat jumlah toluena yang terakumulasi di dalam kolom *biobarrier*. Untuk menghitung jumlah toluena yang terakumulasi ini persamaan berikut dapat digunakan.

$$Akumulasi = Q \int y \, dx = Q \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{2} (y_i - y_{i-1}) (x_i - x_{i-1}) \right] \dots\dots\dots (9)$$

Di mana: Q = Laju alir (liter/jam) y = konsentrasi (mg/liter)
 x = waktu (jam) i = urutan data
 n = jumlah data

Untuk proses biodegradasi 66 jam pertama, berikut adalah jumlah toluena yang terakumulasi.



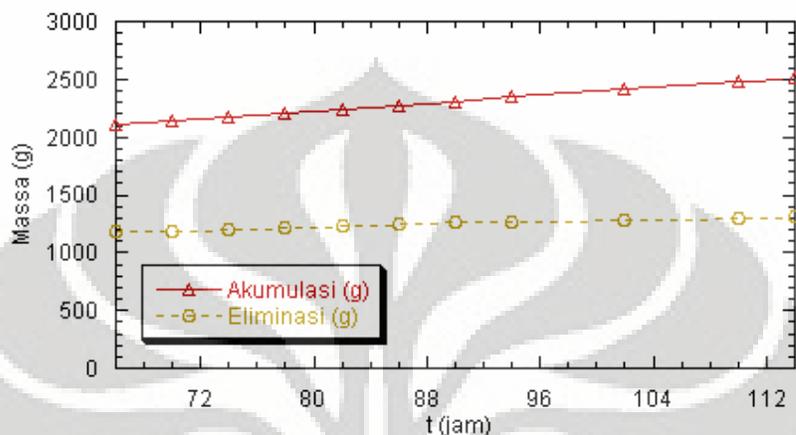
Gambar 4.10 Akumulasi Toluena pada Proses Biodegradasi 66 Jam Pertama

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa terus terjadi eliminasi selama proses biodegradasi berlangsung. Di saat yang sama, akumulasi toluena juga tetap meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa pada saat ini toluena tereliminasi melalui proses adsorpsi dan biodegradasi.

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, setelah jam ke-66 alat *biobarrier* dihentikan sementara selama 18,5 jam. Tentunya, selama jangka waktu ini juga terdapat toluena yang terakumulasi di dalam kolom *biobarrier*. Menggunakan selisih konsentrasi toluena pada akhir biodegradasi 66 jam pertama dan selisih konsentrasi toluena pada awal biodegradasi 48 jam pertama



didapatkan jumlah toluena yang terakumulasi selama jangka waktu tersebut sebesar 47,3 gram. Dengan kata lain, total toluena yang terakumulasi sampai awal biodegradasi 48 jam kedua sebesar 317,6 gram. Berikut adalah jumlah toluena yang terakumulasi selama proses biodegradasi 48 jam kedua.



Gambar 4.11 Akumulasi Toluena pada Proses Biodegradasi 48 Jam Kedua

Dibandingkan dengan biodegradasi pada 66 jam pertama, proses biodegradasi pada 48 jam kedua ini dapat dikatakan tidak seefektif dengan tahap sebelumnya. Hal ini dapat terlihat dari kemiringan rata-rata kurva eliminasi selama proses ini berlangsung. Pada 66 jam pertama, kemiringan rata-rata kurva eliminasi sebesar 3,9 sementara pada 48 jam kedua kemiringan rata-rata kurva eliminasi sebesar 2,9 (Lampiran 8). Kemiringan kurva eliminasi pada 48 jam kedua yang lebih kecil menunjukkan bahwa eliminasi yang terjadi juga lebih lambat. Hal ini mendukung pernyataan bahwa proses biodegradasi optimum terjadi pada konsentrasi elektron akseptor hidrogen peroksida sebesar 10 mg/liter, di mana kondisi tersebut terjadi pada proses biodegradasi 66 jam pertama. Sampai dengan berakhirnya proses biodegradasi, jumlah toluena yang terakumulasi sebesar 1311,6 gram toluena.

BAB V

PENUTUP

5.1 KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian studi kolom *biobarrier* skala pilot untuk pengolahan limbah cair dalam mereduksi kadar toluena ini sebagai berikut :

1. Konsorsium bakteri *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus coagulans* dan *Aeromonas hydrophila* mampu beradaptasi dengan uap toluena konsentrasi 500 ppm. Hal ini ditunjukkan dengan jumlah inokulum pada jam ke-72 proses enrichment sebesar $5,55 \times 10^{12}$ CFU/ml.
2. *Granular Activated Carbon* (GAC) dapat mengadsorp toluena dengan baik selama 150 jam.
3. Proses biodegradasi optimum terjadi pada konsentrasi elektron akseptor H_2O_2 sebesar 10 mg/liter dengan konsentrasi toluena terdegradasi sebesar 168,3 ppm.
4. Jumlah toluena yang terakumulasi di dalam kolom *biobarrier* selama penelitian ini berlangsung sebesar 1311,6 gram.

5.2 SARAN

Untuk mengoptimalkan proses adsorpsi kontaminan, sebaiknya waktu pengamatan pada proses adsorpsi ditambah. Hal ini memungkinkan pengamatan pada proses penjenuhan adsorben dapat dilakukan. Selain itu, untuk menjaga agar konsentrasi toluenadi dalam tangki kontaminan dapat tetap stabil, perlakuan selama pengadukan haruslah tetap konstan. Tangki kontaminan, baik yang digunakan untuk pengadukan maupun penyimpanan tangki harus ditutup serapat mungkin serta hanya terisi udara dalam jumlah yang sedikit untuk meminimalisasi pengurangan konsentrasi toluena akibat penguapan.



DAFTAR PUSTAKA

- Anonymous. EPA, 2000. *Granular Activated Carbon Adsorption and Regeneration*. Office of Water Washington, D.C: United States Enviromental Protection Agency.
- Arby, Berly. 2007. *Penentuan Rasio Optimum C:N:P sebagai Nutrisi pada Proses iodegradasi Benzena-Toluena dan Scale Up Kolom Bioregenerator*. Depok: Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia.
- Baker, Katherine dan Diane S. Herson, 1994. *Bioremediation*. New York : McGraw-Hill Inc.
- Barnum, Susan. 1998. *Biotechnologi an Introduction: Microbial Biotechnology*. Wadsworth Publishing Company : New York.
- Bustomy, Achmad. 2006. Thesis: *Pengurangan Kadar Polutan Hidrokarbon Dalam Air Permukaan Dengan Menggunakan Alat Bioregenerator*. Depok: Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia.
- Collins, C.H., et. al. 1995. *Microbiological Methods*. Butterworth Heinemann.
- De Vecchi E, Drago L, *Lactobacillus sporogenes* or *Bacillus coagulans*: *misidentification or mislabelling?* Milan : Lab. of Clinical Microbiology, Department of Clinical Sciences L. Sacco, L. Sacco Teaching Hospital.
- Figueredo, J.L., Molijin JA. 1986. *Carbon and Coal Gasification Science and Technology*. Boston : Martinus Nijheff Publisher.
- Gozan, Misri. 2004. *Sequential Anaerobic-Aerobic Activated Carbon Biobarrier For Elimination Of Chlorinated Hydrocarbons In Groundwater*. Gottingen: Civillier Verlag.
- Gozan, Misri. 2005. *Diktat Teknologi Bioproses, Buku I*. Depok: Depeartemen Teknik Kimia Universitas Indonesia.
- Lehman, Steward E. And Brian E. Dragich, 2001. *A Novel Approach to Quantify Natural Attenuation via Elektron akseptor Measurement*. Master Thesis. California: California Polytechnic State University San Luis Obispo.
- Madigan, M, Martinko J (editors). 2005. *Brock Biology of Microorganisms*, 11th ed., Prentice Hall.
- Maron, S.H., Jerome B. Lando. 1991. *Fundamentals Of Physical Chemistry*. Case Western Reserve University.

- Matthews, E. et.al., 1994. *Handbook of Bioremediation*. United States:Lewis Publishers.
- Mayasari, Evita. 2005. *Pseudomonas aeruginosa : Karakteristik, Infeksi dan Penanganan*. Medan : USU Repository
- Nakano MM, Zuber P. 1998. *Anaerobic growth of a "strict aerobe" (Bacillus subtilis)*. *Annu Rev Microbiol* 52: 165-90.
- Othmer, Kirk. 1994. *Encyclopedia of Chemical Technology*. Edisi ke-4. Penerbit: A Wiley-Interscience Publication.
- Risma. 2005. *Studi Awal Proses Biodegradasi Toluena Oleh Bakteri Pseudomonas aeruginosa*. Depok : Teknik Kimia Universitas Indonesia.
- Shaheen, E.I. 1992. *Technology of Environmental Pollution Control*. Pen Well Book Tulsa Oklohoma.
- Sitorus, Benget P. 2007. *Pengaruh KonsentrasiElektron Akseptor H₂O₂ pada Proses BiobarrierCampuran Benzena-Toluena dengan Konsorsium Bakteri*. Depok: Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia.
- Sontheimer. Crittenden and Summers, 1988. *Activated Carbon for Water Treatment*, 2nd ed. DVGW-Forschungsstelle.
- Suryanto, Dwi. 2003. "Biodegradasi Aerobik Senyawa Hidrokarbon Aromatik Monosiklis oleh Bakteri". Program Studi Biologi, Fakultas MIPA, Universitas Sumut : USU digital library.
- Udiharto, M. 1996. *Pengujian Biodegradasi Limbah Minyak Bumi Dalam Air*. Prosiding Pelatihan dan Lokakarya Peranan Biodegradasi Dalam Pengelolaan Lingkungan.
- Wiedemeier, Todd H.et.al.,1999. *Natural Attenuation of Fuel and Chlorinated Solvents in the Subsurface*. New York : John Wiley & Sons Inc.
- Mellor et al. 1998. *The Microbiology of In Situ Bioremediation*.
<http://ewr.cee.vt.edu/environmental/teach/gwprimer/biorem/index.html>
(tanggal kunjungan:22 Mei 2006)
- JGI: *Pseudomonas fuorescens PFO-1*
http://genome.jgi-psf.org/finished_microbes/psefl/psefl.home.html
(tanggal kungjungan: 27 Maret 2007)
- Wiki: *Aeromonas_hydrophilla*
http://en.wikipedia.org/wiki/Aeromonas_hydrophila
(tanggal kungjungan: 27 Maret 2007)
- Wiki: *Bacillus_coagulans*
http://en.wikipedia.org/wiki/Bacillus_coagulans
(tanggal kunjungan: 27 Maret 2007)

Wiki: *Bacillus_subtilis*

http://en.wikipedia.org/wiki/Bacillus_subtilis

(tanggal kunjungan: 27 Maret 2007)

Wiki: Toluene

<http://en.wikipedia.org/wiki/Toluene>

(tanggal kunjungan: 22 Mei 2006)

Wrenn, et al. 1998. *Biodegradation of Aromatic Hydrocarbons*.

rsward@ix.netcom.com

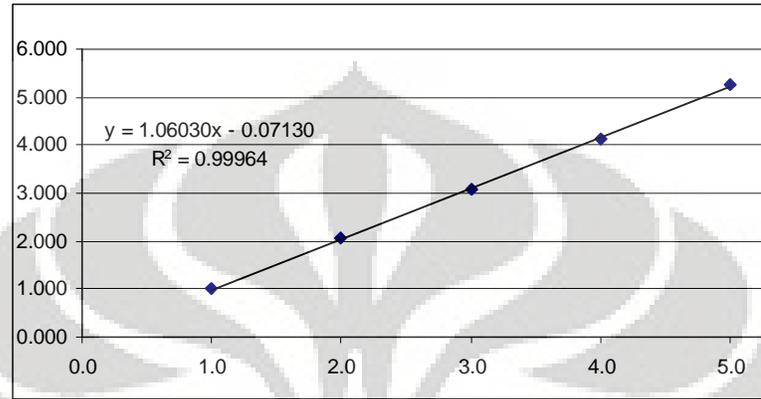
(tanggal kunjungan: 14 Maret 2006)



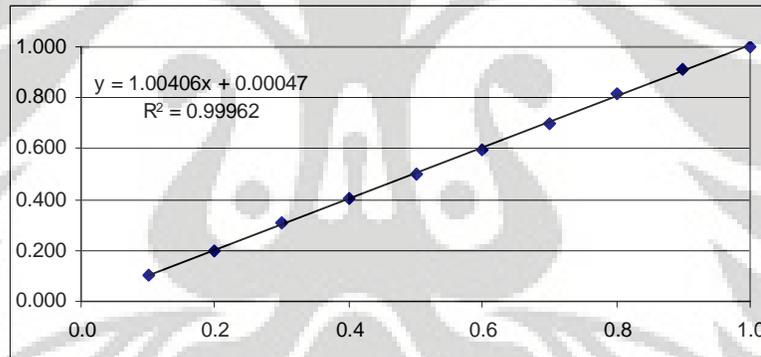


Lampiran 1 Kalibrasi Pompa beserta Flowmeter Limbah, Elektron Akseptor, dan Nutrisi

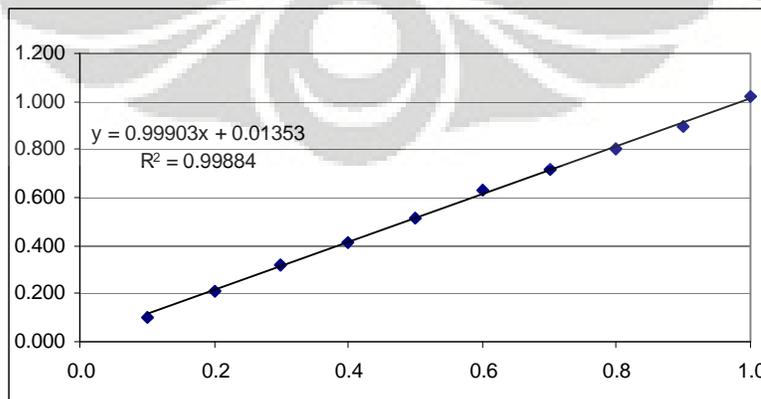
Kurva Kalibrasi Pompa Sentrifugal Untuk Limbah



Kurva Kalibrasi Pompa Diafragma Untuk Elektron Akseptor

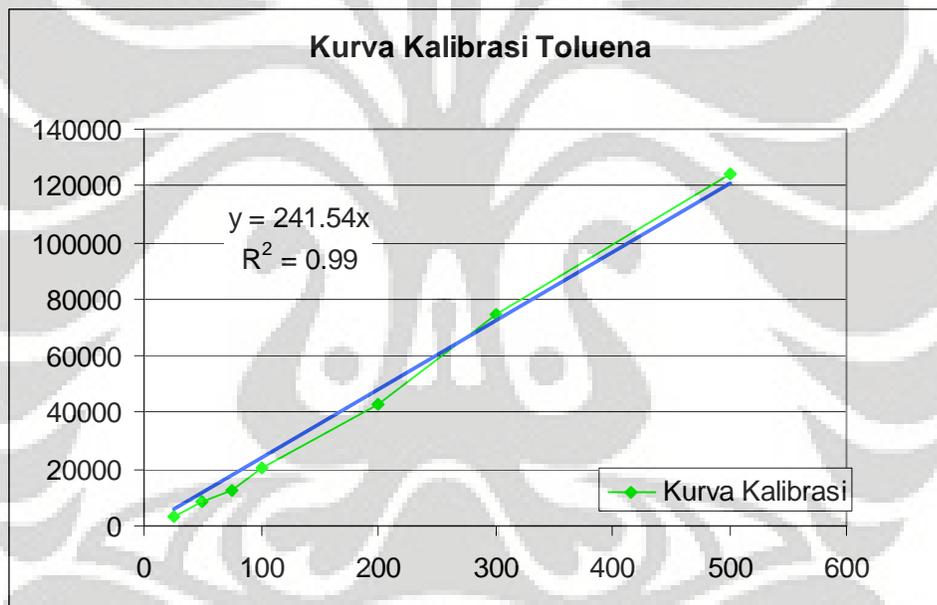


Kurva Kalibrasi Pompa Diafragma Untuk Nutrisi



Lampiran 2 Kurva Kalibrasi GC-FID (contoh)

Konsentrasi (ppm)	Luas Area Toluena
25	3187
50	8338
75	12478
100	20527
200	42713
300	74343
500	123965



Contoh perhitungan :

Dengan luas area (Y) = 50.000, maka konsentrasi (X) yang dimiliki oleh toluena:

$$\frac{y}{241.54} = \frac{50000}{241.54} = 207 \text{ ppm}$$

Lampiran 3 Data Adsorpsi Toluena Menggunakan GAC

Konsentrasi Toluena

waktu (jam)	Inlet (ppm)	Outlet (ppm)	C in - C out
0	143.51	0.00	143.51
5	183.48	0.00	183.48
10	195.31	0.00	195.31
16	258.34	0.00	258.34
20	198.26	0.00	198.26
25	259.24	0.00	259.24
30	260.41	0.00	260.41
35	245.40	0.00	245.40
40	204.25	0.00	204.25
50	222.46	0.00	222.46
60	208.09	0.00	208.09
70	154.75	0.00	154.75
80	146.09	0.00	146.09
90	162.87	0.00	162.87
100	152.98	0.00	152.98
110	184.61	0.00	184.61
119	256.62	190.75	65.87
126	286.00	238.46	47.54
134	332.00	296.89	35.11
142	323.83	325.98	-2.15
150	362.42	355.98	6.44

Lampiran 4 Perhitungan Kebutuhan Teoritis Elektron Akseptor H₂O₂

Laju alir kontaminan = 0,63 lpm = 37,8 liter per jam

Laju alir elektron akseptor = 0,2 lpm = 12 liter per jam

Basis perhitungan = 1 jam

Volume total kontaminan = 37,8 liter

Dengan konsentrasi toluena 500 ppm, maka volume toluena yang terdapat di dalam limbah sebesar 18,9 ml

Densitas toluena = 0,865 g/ml

Massa toluena yang terdapat di dalam kontaminan = 16,35 gram

Massa molekul relatif (Mr) Toluena = 92 g/mol

Jumlah mol toluena dalam kontaminan = 0,177 mol

Biodegradasi toluene : $C_6H_5-CH_3 + 9O_2 \longrightarrow 7CO_2 + 4H_2O + \text{Energi}$

Dekomposisi H₂O₂ : $18H_2O_2 \longrightarrow 18H_2O + 9O_2$

 $C_6H_5-CH_3 + 18H_2O_2 \longrightarrow 7CO_2 + 22H_2O + \text{Energi}$

Reaksi biodegradasi toluene secara keseluruhan adalah :

 $C_6H_5-CH_3 + 14H_2O \longrightarrow 7CO_2 + 36H^+ + 36e^-$ $(H_2O_2 + 2H^+ + 2e^- \longrightarrow 2H_2O) \quad \times 18$

 $C_6H_5-CH_3 + 18H_2O_2 \longrightarrow 7CO_2 + 22H_2O + \text{Energi} \quad +$

Jumlah mol H₂O₂ yang dibutuhkan untuk mendegradasi seluruh toluena secara sempurna = 3,199 mol

Massa molekul relatif (Mr) H₂O₂ = 34 g/mol

Massa H₂O₂ yang diperlukan = 108,75 gram

Maka konsentrasi H₂O₂ yang dibutuhkan untuk mendegradasi toluena secara teoritis bernilai 9,06 gram/liter

Lampiran 5 Pembuatan Elektron Akseptor H₂O₂

▪ Menentukan konsentrasi Kalium Permanganat (KmnO₄)

$$\text{Berat Natrium Oksalat (Na}_2\text{C}_2\text{O}_4) = 0,3 \text{ g}$$

$$\text{Berat ekivalen Natrium Oksalat} = 67$$

$$\text{Volume KmnO}_4 \text{ yang di titrasi} = 45,6 \text{ ml}$$

$$\text{Grek Na}_2\text{C}_2\text{O}_4 = \text{Grek KmnO}_4$$

$$V_1 \times N_1 = V_2 \times N_2$$

$$\text{Grek Na}_2\text{C}_2\text{O}_4 (I) = 0,3 / 67 = 4,482 \times 10^{-3}$$

$$N_2 (I) = \frac{4,482 \times 10^{-3}}{\left(\frac{45,6}{1000}\right)} = 0,0983 N$$

$$\text{Normalitas Kalium Permanganat} = 0,0983 N$$

▪ Mengetahui konsentrasi Hidrogen Peroksida (H₂O₂)

$$\text{Volume H}_2\text{O}_2 = 25 \text{ ml}$$

$$\text{Faktor pengenceran H}_2\text{O}_2 = 10$$

$$N \text{ KmnO}_4 = 0,0983 N$$

$$\text{Volume KmnO}_4 \text{ yang di titrasi} = 20,6 \text{ ml}$$

$$\text{Grek H}_2\text{O}_2 = \text{Grek KmnO}_4$$

$$V_1 \times N_1 = V_2 \times N_2$$

$$25 \times N \text{ H}_2\text{O}_2 = 0,0983 N \times 20,6$$

$$N \text{ H}_2\text{O}_2 = 1,917 N$$

$$N \text{ H}_2\text{O}_2 = 1,917 N \times \text{fp} = 1,917 N \times 10 = 19,17 N$$

▪ Pembuatan Hidrogen Peroksida 10 mg / l

$$\text{Konsentrasi H}_2\text{O}_2 = 10 \text{ mg/l}$$

$$\text{Berat Ekivalen H}_2\text{O}_2 = 17$$

$$\text{Grek H}_2\text{O}_2 = (10 \text{ mg/l}) / (1000 \times \text{BE}) = (10 \text{ mg/l}) / (1000 \times 17) = 5,882 \times 10^{-4}$$

▪ Pengenceran H₂O₂

$$\text{Volume H}_2\text{O}_2 (I) = 1 \text{ liter}$$

$$\text{Grek H}_2\text{O}_2 (I) = 5,882 \cdot 10^{-4}$$

$$N \text{ H}_2\text{O}_2 (II) = 19,17 N$$

$$V_1 \times N_1 = V_2 \times N_2$$

$$V_2 = (5,882 \times 10^{-4} / 19,17 N) = 3,1 \times 10^{-5} \text{ liter} = 0,031 \text{ ml} = 31 \mu\text{l}$$

Volume H₂O₂ yang ditambahkan sebanyak **31 μl** untuk satu liter elektron akseptor.

Lampiran 6 Data Biodegradasi Toluena dengan H₂O₂

Data konsentrasi pada proses biodegradasi toluena 66 jam pertama

t (jam)	Inlet	Outlet	Penurunan Konsentrasi
0	362.42	355.98	6.44
1	351.33	176.16	175.16
2	236.63	119.31	117.31
5	267.15	136.08	131.08
8	322.54	273.85	48.70
15	271.57	219.35	52.22
22	343.47	239.46	104.00
28	423.17	268.66	154.51
34.5	465.97	303.87	162.10
40	385.31	212.66	172.66
46	359.73	202.86	156.86
52	343.29	197.64	145.64
56	368.46	212.23	156.23
60	304.15	182.08	122.08
66	242.83	154.42	88.42

Data konsentrasi pada proses biodegradasi toluena 48 jam kedua

t (jam)	Inlet	Outlet	Penurunan Konsentrasi
66	173.05	119.53	53.53
70	186.24	128.12	58.12
74	239.44	156.72	82.72
78	245.01	161.51	83.51
82	259.74	170.87	88.87
86	200.32	143.16	57.16
90	228.47	159.23	69.23
94	222.81	158.40	64.40
102	237.91	169.96	67.96
110	222.39	166.20	56.20
114	198.78	156.39	42.39

Lampiran 7 Data pH selama Proses Biodegradasi Toluena Berlangsung

Data pH pada proses biodegradasi toluena

66 jam pertama	t (jam)	inlet	outlet
	0	6.52	6.15
	1	6.38	6.30
	2	6.50	6.50
	5	6.79	6.68
	8	6.85	6.75
	15	6.89	6.76
	22	6.71	6.45
	28	6.39	6.22
	35	6.45	6.26
	40	6.35	6.18
	46	6.42	6.18
	52	6.16	6.19
	56	6.02	6.06
	60	5.76	5.84
66		5.77	

48 jam kedua	t (jam)	inlet	outlet
	66	5.33	5.20
	70	5.89	5.96
	74	5.99	6.03
	78	6.64	6.40
	82	6.10	6.12
	86	6.37	6.25
	90	6.15	6.10
	94	6.24	6.18
	102	6.21	6.22
	110	6.16	6.17
	114	6.11	6.19
	66	5.33	5.20
	70	5.89	5.96

Lampiran 8 Data Akumulasi Toluena

Akumulasi selama proses adsorpsi toluena

t (jam)	Akumulasi Input (g)	Akumulasi Total(g)
0	0.0	0
5	30.9	30.9
10	66.7	66.7
16	118.1	118.1
20	152.7	152.7
25	195.9	195.9
30	245.0	245.0
35	292.8	292.8
40	335.3	335.3
50	415.9	415.9
60	497.3	497.3
70	565.9	565.9
80	622.7	622.7
90	681.1	681.1
100	740.8	740.8
110	804.6	804.6
119	879.7	847.2
126	951.5	862.3
134	1044.9	874.7
142	1144.1	879.7
150	1247.8	880.4

Akumulasi selama proses biodegradasi 66 jam pertama

t (jam)	Akumulasi Inlet (g)	Akumulasi Total (g)
0	1247.8	880
1	1261.3	882.4
2	1272.5	885.1
5	1301.0	891.7
8	1334.5	898.3
15	1413.1	911.6
22	1494.4	932.3
28	1581.4	961.6
34.5	1690.6	1000.5
40	1779.1	1030.5
46	1863.6	1049.5
52	1943.3	1066.9
56	1997.1	1088.1
60	2047.9	1109.2
66	2110.0	1132.7

Persamaan kurva eliminasi:

$$y = 3.9x + 868.4$$

Akumulasi selama masa istirahat

t (jam)	Akumulasi Input (g)	Akumulasi Total (g)
66	2110.0	1133
66'	2110.0	1180.0

Akumulasi selama proses biodegradasi 48 jam kedua

t (jam)	Akumulasi Inlet (g)	Akumulasi (g)
66	2110.0	1180
70	2137.1	1186.4
74	2169.3	1196.4
78	2205.9	1210.4
82	2244.1	1227.8
86	2278.9	1246.1
90	2311.3	1260.9
94	2345.4	1272.4
102	2415.1	1289.4
110	2484.7	1305.6
114	2516.5	1311.6

Persamaan kurva eliminasi:

$$y = 2.9x + 985.2$$