

TUGAS AKHIR - RE 184804

**KAJIAN BIOAUGMENTASI PADA AIR TANAH
TERCEMAR SOLAR**

ACHMAD DANI GARCIA

NRP. 03211840000091

Dosen Pembimbing

Ipung Fitri Purwanti S.T., M.T., Ph.D

NIP. 19711114 200312 2 001

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN

Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



TUGAS AKHIR - RE 184804

**KAJIAN BIOAUGMENTASI PADA AIR TANAH
TERCEMAR SOLAR**

ACHMAD DANI GARCIA

NRP. 0321184000091

Dosen Pembimbing

Ipung Fitri Purwanti S.T., M.T., Ph.D

NIP. 19711114 200312 2 001

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN

Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



FINAL PROJECT - RE 184804

**STUDY OF BIOAUGMENTATION ON DIESEL OIL
CONTAMINATED GROUNDWATER**

ACHMAD DANI GARCIA

NRP. 03211840000091

Advisor

Ipung Fitri Purwanti S.T., M.T., Ph.D

NIP. 19711114 200312 2 001

DEPARTEMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING

Faculty of Civil, Planning, and Geo Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN

KAJIAN BIOAUGMENTASI PADA AIR TANAH TERCEMAR SOLAR

TUGAS AKHIR

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

Oleh : **ACHMAD DANI GARCIA**

NRP. 0321184000091

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Ipung Fitri Purwanti, ST, MT, Ph.D

Pembimbing

2. Prof. Dr.Ir. Sarwoko Mangkoedihardjo, M.ScEs

Penguji

3. Bieby Voijant Tangahu ST, MT, Ph.D

Penguji

4. Ervin Nurhayati S.T., M.T, Ph.D

Penguji



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa/NRP : Achmad Dani Garcia / 0321184000091

Departemen : Teknik Lingkungan

Dosen Pembimbing/NIP : Ipung Fitri Purwanti, ST, MT, Ph.D / 19711114 200312 2 001

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Kajian Bioaugmentasi pada Air Tanah Tercemar Solar” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

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

Surabaya, 20 Juli 2022

Mengetahui

Dosen Pembimbing,



(Ipung Fitri Purwanti, ST, MT, Ph.D)

NIP. 19711114 200312 2 001

Mahasiswa,



(Achmad Dani Garcia)

NRP. 0321184000091

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KAJIAN BIOAUGMENTASI PADA AIR TANAH TERCEMAR SOLAR

Nama Mahasiswa : Achmad Dani Garcia
NRP : 03211840000091
Departemen : Teknik Lingkungan
Dosen Pembimbing : Ipung Fitri Purwanti, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRAK

Penurunan kualitas air tanah terjadi akibat beberapa aktivitas manusia, salah satunya adalah penggunaan solar. Solar (*diesel oil*) merupakan campuran hidrokarbon yang umum digunakan sebagai bahan bakar. Komponen dalam solar terdiri dari senyawa alifatik, aromatik, dan olefin. Kontaminasi air tanah oleh solar dapat terjadi karena kebocoran pada proses transportasi, serta tangki penyimpanan. Pencemaran solar pada air tanah dapat menimbulkan masalah lingkungan dan kesehatan masyarakat. Contoh kasus pencemaran solar pada air tanah terjadi di Yogyakarta akibat kebocoran tangki penyimpanan pada 1997, di Tasikmalaya pada 2014, dan di Cilacap pada 2019 akibat kebocoran pipa. Bioremediasi adalah metode pendegradasian kontaminan yang memanfaatkan kemampuan mikroorganisme dengan cara mengubah kontaminan menjadi senyawa lain yang tidak berbahaya. Salah satu teknologi bioremediasi yang dapat dilakukan untuk menangani pencemaran solar pada air tanah adalah biostimulasi dan bioaugmentasi. Bioaugmentasi adalah teknik bioremediasi dengan menambahkan mikroorganisme pada situs yang tercemar. Bioaugmentasi dipilih karena efisien dalam meremediasi kontaminan, lebih murah, dan ramah lingkungan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengkaji berbagai literatur dan menjadi referensi yang berkaitan dengan pencemaran air tanah oleh solar, bioaugmentasi pada air tanah tercemar solar, dan pengaplikasian bioaugmentasi dalam kasus pencemaran di Kecamatan Gedongtengen, Yogyakarta.

Metode studi yang digunakan dalam penyusunan penelitian ini adalah kajian pustaka dengan *systematic review* menggunakan *Mendeley Reference Manager* dari berbagai literatur yang terkait dengan bioaugmentasi air tanah tercemar solar. Kajian pustaka digunakan untuk menganalisis studi kasus pencemaran air tanah oleh solar di Kecamatan Gedongtengen, Yogyakarta, secara literatur dengan menerapkan bioaugmentasi menggunakan mikroorganisme bakteri sebagai penanganannya. Literatur yang digunakan sebagai sumber data sekunder berasal dari jurnal ilmiah, *textbook*, tesis, dan *website*.

Studi kasus di wilayah Kecamatan Gedongtengen, Yogyakarta, menunjukkan permasalahan pencemaran solar pada air tanah yang terjadi akibat kebocoran tangki penyimpanan solar di Stasiun Tugu Yogyakarta. Metode yang digunakan dalam mendegradasi polutan solar adalah bioaugmentasi menggunakan isolat konsorsium bakteri yang terdiri dari bakteri *Pseudomonas aeruginosa* dan *Bacillus subtilis*. Bioaugmentasi disertai dengan penambahan nutrisi berupa nitrogen dan fosfor, serta oksigen untuk mendukung pertumbuhan bakteri. Hasil studi menunjukkan, persentase degradasi TPH dan benzena sebesar 87% dan 99% dapat menurunkan konsentrasi TPH dari 3,7 mg/L menjadi 0,48 mg/L dan konsentrasi benzena menjadi 0,007 mg/L sehingga memenuhi baku mutu (0,6 mg/L untuk TPH dan 0,01 mg/L untuk benzena). Jenis mikroorganisme, waktu degradasi, serta penanganan yang tepat pada batasan yang ditemui dapat mempengaruhi proses bioaugmentasi pada air tanah yang tercemar solar.

Kata Kunci: Air Tanah, Bakteri, Bioaugmentasi, Pencemaran Solar, Yogyakarta

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

STUDY OF BIOAUGMENTATION ON DIESEL OIL CONTAMINATED GROUNDWATER

Student's Name : Achmad Dani Garcia
NRP : 03211840000091
Department : Environmental Engineering
Advisor : Ipung Fitri Purwanti, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRACT

The reduction of groundwater quality occurs due to several human activities, one of which is the use of diesel fuel. Diesel oil is a commonly used hydrocarbon as a fuel. The components in diesel fuel consist of aliphatic, aromatic, and olefin compounds. Contamination of groundwater by diesel can occur due to leaks in the transportation process and storage tanks. Diesel pollution in groundwater can cause environmental and public health problems. Examples of cases of diesel pollution in groundwater occurred in Yogyakarta due to a storage tank leak in 1997, in Tasikmalaya in 2014, and in Cilacap in 2019 due to a pipe leak. Bioremediation is a contaminant degradation method that utilizes the ability of microorganisms to convert contaminants into harmless compounds. One of the bioremediation technologies that can be used to treat diesel pollution in groundwater is biostimulation and bioaugmentation. Bioaugmentation is a bioremediation technique by adding microorganisms to the contaminated site. Bioaugmentation was chosen because it is efficient in remediating contaminants, cheaper, and environmentally friendly. The purpose of this study was to examine various literatures and references related to groundwater pollution by diesel fuel, bioaugmentation in diesel polluted groundwater, and the application of bioaugmentation in cases of pollution in Gedongtengen District, Yogyakarta.

The study method used in the preparation of this research is a literature review with systematic review method using the Mendeley Reference Manager from various literatures related to bioaugmentation of diesel polluted groundwater. Literature review is used to analyze case study of groundwater pollution by diesel fuel in Gedongtengen District, Yogyakarta, by applying bioaugmentation using microorganisms as the treatment. The literature used as secondary data source comes from scientific journals, textbooks, theses, and websites.

A case study in the district of Gedongtengen, Yogyakarta, shows the problem of diesel pollution in groundwater that occurs due to a leak in the diesel storage tank at Tugu Station Yogyakarta. The method used in degrading diesel pollutants is bioaugmentation using a consortium of bacteria isolates consisting of *Pseudomonas aeruginosa* and *Bacillus subtilis* bacteria. Bioaugmentation is accompanied by the addition of nutrients in the form of nitrogen and phosphorus, as well as oxygen to support bacterial growth. The results showed that the percentage of degradation of TPH and benzene of 87% and 99% could reduce the concentration of TPH from 3.7 mg/L to 0.48 mg/L and the concentration of benzene to 0.007 mg/L so that it met the quality standard (0.6 mg/L for TPH and 0.01 mg/L for benzene). The type of microorganism, the time of degradation, as well as the proper handling at the limits can affect the bioaugmentation process in diesel contaminated groundwater.

Keywords: Bacteria, Bioaugmentation, Diesel Contamination, Groundwater, Yogyakarta

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “**Kajian Bioaugmentasi pada Air Tanah Tercemar Solar**”. Tujuan penulisan laporan Tugas Akhir ini adalah untuk menyelesaikan Pendidikan S1 Program Sarjana, Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Penulisan laporan Tugas Akhir ini dapat terlaksana dengan baik atas dukungan, bantuan, serta bimbingan dari pihak yang terkait dalam pelaksanaannya. Oleh karena itu, dalam kesempatan yang baik ini perkenankan penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Ibu Ipung Fitri Purwanti, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah sabar membimbing serta memberikan banyak saran dan dukungan kepada penulis.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Sarwoko Mangkoedihardjo M.ScES, Ibu Bieby Voijant Tangahu ST., MT., PhD, dan Ibu Ervin Nurhayati S.T., M.T, Ph.D selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan masukan dalam pembuatan proposal, seminar kemajuan, dan ujian lisan.
3. Ibu Harmin Sulistyoning Titah, S.T., M.T., Ph.D. selaku koordinator tugas akhir yang telah membimbing dan memberi arahan kepada penulis.
4. Bapak Dr. Abdu Fadli Assomadi, S.Si, M.T. selaku dosen wali yang telah memberikan semangat dan motivasi untuk terus belajar selama menjalankan perkuliahan.
5. Bapak Dr.Eng. Arie Dipareza Syafei, S.T., MEPM., selaku Kepala Departemen Teknik Lingkungan, FTSPK-ITS.
6. Orang tua, saudara, dan keluarga yang telah mendoakan, memotivasi dan memberikan dukungan hingga tugas akhir ini selesai.
7. Teman-teman Teknik Lingkungan ITS angkatan 2018, terutama Sulthan, Arnisa, Yusita, dan Priscilia yang selalu memberikan motivasi dan doa.
8. Teman-teman SMA, terutama Rosalia, Givary, Dea, Fafa, dan Rosita yang telah memberikan semangat dan doa.

Dalam penyusunan laporan Tugas Akhir ini telah diusahakan semaksimal mungkin. Namun sebagai manusia biasa, tentunya masih banyak kekurangan dan kesalahan. Untuk itu diharapkan saran dan kritik untuk membangun kesempurnaan penulisan laporan ini, serta dapat bermanfaat bagi penulis maupun para pembaca.

Surabaya, Juli 2022

Penulis

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL.....	x
BAB I.....	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Ruang Lingkup	2
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II.....	5
TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Air Tanah.....	5
2.2 Pencemaran Air Tanah.....	5
2.3 Solar (<i>Diesel Oil</i>).....	6
2.4 Pencemaran Solar pada Air Tanah	8
2.5 Bioremediasi Solar.....	11
2.6 Bioaugmentasi Solar	11
2.6.1 Mekanisme Biodegradasi Solar oleh Bakteri.....	12
2.6.2 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Bioaugmentasi.....	15
2.6.3 Kelebihan dan Kekurangan Bioaugmentasi.....	15
2.7 Bakteri Pendegradasi Solar	16
2.8 Literatur Terdahulu	17
2.9 Bakteri yang Dipilih untuk Studi Kasus	18
2.10 Baku Mutu yang Digunakan.....	19
BAB III.....	21
METODE STUDI.....	21
3.1 Umum.....	21
3.1.1 Kajian Pustaka	21
3.1.2 Studi Kasus.....	21

3.2	Kerangka Studi	21
3.3	Tahapan Pelaksanaan Studi	22
3.3.1	Ide Studi	22
3.3.2	Tujuan Studi	22
3.3.3	Metodologi Kajian Pustaka	23
3.3.4	Outline Laporan Tugas Akhir.....	23
BAB IV		25
PEMBAHASAN STUDI KASUS BERDASARKAN KAJIAN PUSTAKA.....		25
4.1	Profil Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta.....	25
4.2	Pencemaran Solar pada Air Tanah di Kecamatan Gedongtengen	28
4.3	Penanganan Pencemaran Air Tanah di Kecamatan Gedongtengen.....	30
4.4	Kajian Bioaugmentasi Air Tanah di Kecamatan Gedongtengen Menggunakan Isolat Konsorsium Bakteri.....	31
4.4.1	Karakteristik Air Tanah Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta.....	31
4.4.2	Upaya Penyelesaian Kasus Pencemaran Solar pada Solar di Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta.....	36
4.4.3	Skenario Penanganan Pencemaran Solar pada Air Tanah di Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta.....	39
BAB V		51
KESIMPULAN.....		51
5.1	Kesimpulan	51
5.2	Saran	51
DAFTAR PUSTAKA		53
BIODATA PENULIS		59

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Mekanisme Pencemaran Air Tanah.....	6
Gambar 2.2 Struktur Molekul Solar.....	7
Gambar 2.3 (a) Struktur Molekul Senyawa 1,2-Dimetilbenzena, (b) Fluorena, (c) Fenantrena	8
Gambar 2.4 LNAPL dan <i>Plume</i>	9
Gambar 2.5 Pencemaran Solar pada Air Tanah	10
Gambar 2.6 Biodegradasi Senyawa Hidrokarbon Alifatik.....	13
Gambar 2.7 Biodegradasi Senyawa Hidrokarbon Aromatik	14
Gambar 2.8 Struktur Sel Bakteri	16
Gambar 2.9 <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	18
Gambar 2.10 <i>Bacillus subtilis</i>	19
Gambar 3.1 Kerangka Kajian Pustaka dengan Studi Kasus.....	22
Gambar 4.1 Peta Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta.....	26
Gambar 4.2 Stasiun Tugu.....	27
Gambar 4.3 Sistem Akuifer Merapi.....	27
Gambar 4.4 Sumur Tercemar Solar di Jlagran dan Gandekan	28
Gambar 4.5 Pengambilan Sampel Air Tanah Kecamatan Gedongtengen	31
Gambar 4.6 Peta Kedalaman Muka Air Tanah.....	33
Gambar 4.7 Peta Aliran dan Elevasi Muka Air Tanah	34
Gambar 4.8 Titik Pengujian TOC pada Sumur Gali.....	35
Gambar 4.9 Efisiensi Biodegradasi Solar oleh Isolat Tunggal <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	37
Gambar 4.10 Efisiensi Biodegradasi Solar oleh Isolat Tunggal <i>Bacillus subtilis</i>	38
Gambar 4.11 Skema Proses Bioaugmentasi.....	40
Gambar 4.12 Peta Penyebaran <i>Plume</i>	45
Gambar 4.13 Perencanaan Sumur Injeksi Bioaugmentasi	46
Gambar 4.14 Pipa Ekstraksi Gas	49

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Karakteristik Minyak Solar di Indonesia	7
Tabel 2.2 Kandungan Senyawa Hidrokarbon Aromatik pada Solar	8
Tabel 2.3 Efek Akut Paparan Minyak Solar pada Kesehatan Manusia	10
Tabel 2.4 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Bioaugmentasi.....	15
Tabel 2.5 Bakteri Pendegradasi Solar pada Air Tawar	17
Tabel 2.6 Baku Mutu Benzena pada Air untuk Keperluan Higiene Sanitasi	20
Tabel 2.7 Baku Mutu TPH pada Air Laut	20
Tabel 4.1 Kebutuhan Air pada Berbagai Sektor di Kota Yogyakarta.....	29
Tabel 4.2 Kasus Penyakit Diare di Kecamatan Gedongtengen Tahun 2020.....	30
Tabel 4.2 Data Pengujian TOC pada Sumur Gali.....	36
Tabel 4.3 Efisiensi Degradasi Senyawa Benzena	38

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pencemaran lingkungan dapat terjadi akibat limbah yang berasal dari rumah tangga maupun industri yang berada di lingkungan tersebut. Hal ini dapat menimbulkan perubahan pada keadaan kualitas lingkungan baik itu air, tanah, maupun udara termasuk juga flora, fauna, dan mikroorganisme (Sumampouw & Risjani, 2018). Lingkungan yang tercemar dapat menimbulkan dampak yang buruk bagi lingkungan dan makhluk hidup. Adapun dampak buruk dari pencemaran lingkungan yaitu matinya flora dan fauna, keracunan pada manusia, serta rusaknya lingkungan akibat dari polusi air, udara, dan tanah (Lubis *et al.*, 2018).

Pencemaran air terjadi disebabkan oleh hasil buangan industri-industri serta limbah rumah tangga. Tingkat pencemaran air semakin meningkat seiring dengan semakin berkembangnya industri migas, pertanian, maupun non-migas (Rahman *et al.*, 2011). Penurunan kualitas air tanah, terutama di daerah perkotaan, umumnya disebabkan oleh aktifitas manusia, salah satunya adalah penggunaan bahan bakar minyak (BBM). Salah satu produk BBM yang sering digunakan oleh transportasi secara massal adalah minyak solar (Nehrul, 2014). Kontaminasi bahan bakar minyak pada air tanah dapat terjadi akibat dari ceceran minyak di tanah dan kebocoran transportasi maupun pipa penyalur minyak. Selain itu kebocoran pada tangki minyak bawah tanah juga dapat menyebabkan pencemaran pada akuifer (Chen *et al.*, 2017a).

Kasus pencemaran air tanah oleh solar di Indonesia telah terjadi beberapa kali, salah satunya di daerah Jlagran-Gandekan, Gedongtengen, Yogyakarta. Pencemaran diindikasikan berasal dari kebocoran tangki penyimpanan milik PT Kereta Api Indonesia Daerah Operasi VI Yogyakarta yang terjadi pada tahun 1997 (Setyaningsih, 2010). Kebocoran terjadi di Stasiun Tugu Yogyakarta dan berdampak buruk terhadap sistem air tanah di sekitar wilayah tersebut. Beberapa sumur di daerah Jlagran mengalami pencemaran dan terkontaminasi oleh hidrokarbon (Rahman *et al.*, 2018). Kasus lainnya terjadi di Desa Kamulyan, Kecamatan Manonjaya, Kabupaten Tasikmalaya. Kebocoran pipa distribusi solar milik PT Pertamina pada tahun 2014 membuat sumur dan kolam milik warga tercemar solar (Prasetyo, 2014). Selain itu, pencemaran air tanah juga terjadi di Dusun Sidadadi, Kecamatan Wanareja, Kabupaten Cilacap. Pencemaran terjadi pasca kebocoran pipa CB-1 yang menyalurkan solar pada tahun 2019. Akibatnya, warga tidak dapat memanfaatkan air sumur karena bercampur dengan solar (Prasetya *et al.*, 2021). Air yang tercemar solar dikatakan lebih beracun daripada tumpahan minyak yang terjadi sebelumnya. Adapun komponen senyawa toksik utama yang ditemukan pada air yang tercemar solar adalah *benzene*, *toluene*, *ethylbenzene*, dan *xylene* (BTEX) (Khalid *et al.*, 2021).

Ada beberapa metode yang dapat dilakukan untuk meremediasi kontaminan solar pada air tanah seperti bioremediasi, fitoremediasi, dan bioventing. Fitoremediasi merupakan metode remediasi dengan memanfaatkan tanaman sebagai agen pendegradasi kontaminan solar. Bioventing merupakan metode remediasi dengan memberikan aliran udara menggunakan *blower* untuk meningkatkan laju biodegradasi (Brusseau, 2019). Bioremediasi adalah metode pendegradasian suatu kontaminan pada medium tertentu dengan memanfaatkan kemampuan mikroorganisme berupa bakteri dengan cara mengubah kontaminan menjadi bentuk senyawa lain yang tidak beracun dan berbahaya (Kristinanda, 2018). Di antara banyak cara yang tersedia untuk menghilangkan polutan berbahaya, metode bioremediasi adalah pendekatan yang ramah lingkungan, andal, hemat biaya, dan dapat diterapkan secara luas dalam rentang kontaminan tertentu. Teknologi yang dipilih bergantung pada sifat dan tingkat pencemarannya, serta perlakuan *ex situ* atau *in situ* yang diterapkan (Kis *et al.*, 2017). Contoh

teknologi bioremediasi yang dapat digunakan untuk menghilangkan kontaminan solar adalah biostimulasi. Biostimulasi dapat meningkatkan dekomposisi biotik alami dengan melengkapi nutrisi yang dibutuhkan oleh mikroorganisme *indigenous* dan bahan lain yang relevan, misalnya penambahan biosurfaktan ke wilayah yang terkontaminasi. Namun dalam beberapa kasus, mikroorganisme *indigenous* tidak dapat mendegradasi kontaminan dengan cepat. Dalam kasus tersebut, perlu disertakan metode lain yang dapat meningkatkan efikasi biodegradasi (Kis *et al.*, 2017).

Salah satu metode bioremediasi yang dapat dilakukan untuk mendegradasi zat pencemar adalah bioaugmentasi. Bioaugmentasi adalah teknik bioremediasi yang menambahkan mikroorganisme seperti bakteri, fungi, ataupun alga pada situs yang tercemar sebagai pembersih kontaminan pada wilayah tersebut (Melati, 2021). Teknik bioaugmentasi telah dilaporkan berhasil mendegradasi berbagai jenis kontaminan seperti senyawa terklorinasi dan terflorinasi, lignin, quinolin dan piridin, pewarna sintetik, sianida, nikotin, *Diethylene Glycol Monobutyl Ether* (DGBE), dan *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons* (PAHs) (Nzila *et al.*, 2016). Bioaugmentasi merupakan metode bioremediasi yang menjanjikan karena dinilai efektif, murah, dan ramah lingkungan dimana isolat bakteri atau konsorsium mikroba diberikan ke lokasi yang terkontaminasi (Ueno *et al.*, 2007). Dengan demikian, teknik bioaugmentasi menggunakan bakteri dirasa sangat cocok untuk meremediasi pencemaran *diesel oil* pada air tanah.

1.2 Rumusan Masalah

Penurunan kualitas air tanah, umumnya disebabkan oleh aktifitas manusia, salah satunya adalah penggunaan bahan bakar minyak (BBM). Salah satu produk BBM yang sering digunakan oleh transportasi secara massal adalah minyak solar (Nehrul, 2014). Pencemaran air tanah oleh solar sangat merugikan karena kontaminan toksik yang ada dapat merusak ekosistem serta meracuni manusia.

Bioaugmentasi merupakan salah satu teknik bioremediasi yang dapat digunakan untuk mendegradasi kontaminan dengan penambahan bakteri pada wilayah tercemar. Bioaugmentasi dapat menjadi alternatif dalam meremediasi pencemaran solar pada air tanah. Analisis pustaka secara mendalam diperlukan guna mengetahui kemampuan bioaugmentasi bakteri dalam meremediasi pencemaran solar pada air tanah. Setelah dilakukan kajian pustaka, diambil studi kasus atas kajian yang telah dilakukan sebagai pemecahan masalah terhadap permasalahan yang ada.

1.3 Tujuan

Tujuan dari studi pustaka ini yaitu:

1. Mengkaji berbagai literatur dan menjadi referensi yang berkaitan dengan pencemaran air tanah yang diakibatkan oleh solar.
2. Mengkaji berbagai literatur dan menjadi referensi yang berkaitan dengan bioaugmentasi dalam meremediasi air tanah tercemar solar.
3. Membahas dan menjadi referensi pengaplikasian proses bioaugmentasi dalam kasus pencemaran solar pada air tanah di Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta.

1.4 Ruang Lingkup

Tugas akhir ini berjudul “Kajian Bioaugmentasi pada Air Tanah Tercemar Solar”. Ruang lingkup penulisan dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Pencemaran yang disebabkan oleh solar yang terjadi pada air tanah.
2. Bakteri yang dibahas adalah bakteri yang memiliki kemampuan dalam mendegradasi solar.
3. Kasus aplikasi bioaugmentasi dibatasi pada air air tanah tercemar solar.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian dari tugas akhir ini yaitu:

1. Memberikan kontribusi terhadap tabulasi dan pengelompokkan literatur yang secara khusus membahas masalah pencemaran air tanah oleh solar.
2. Memberikan kontribusi terhadap tabulasi dan pengelompokkan literatur yang secara khusus membahas proses bioaugmentasi dalam meremediasi polutan solar pada air tanah.
3. Memberikan informasi mengenai alternatif pemecahan masalah terhadap kasus pencemaran air tanah oleh solar menggunakan metode bioaugmentasi.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Air Tanah

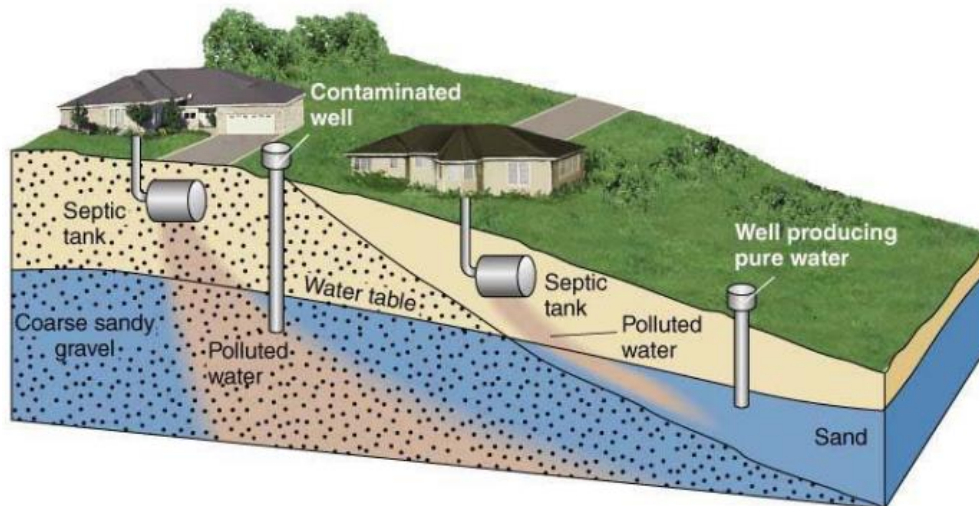
Air merupakan elemen penting bagi kehidupan yang juga merupakan kebutuhan dasar bagi manusia, hewan tumbuhan, dan lingkungan hidup. Salah satu sumber yang sering digunakan oleh manusia adalah air tanah. Air tanah merupakan air yang terakumulasi di bawah permukaan tanah (Rifani, 2021). Air tanah menjadi salah satu sumber daya air yang sangat penting dalam memenuhi kebutuhan manusia. Air tanah digunakan baik untuk kebutuhan domestik maupun untuk kegiatan industri. Air tanah dianggap memiliki nilai ekonomis yang tinggi karena biaya produksi yang rendah dan kualitas lebih baik dibandingkan sumber air bersih lainnya. Pemanfaatan air tanah dilakukan dengan cara pembuatan sumur, baik berupa sumur gali ataupun sumur bor (Naryanto, 2008).

Berdasarkan kedalamannya, air tanah dibagi menjadi 2, yakni air tanah dangkal dan air tanah dalam. Air tanah dangkal merupakan air tanah yang memiliki kedalaman hingga 90 meter di bawah permukaan tanah. Air tanah dangkal berasal dari proses infiltrasi atau resapan air dari permukaan tanah yang mengisi pori-pori tanah dan tertahan di atas lapisan batuan kedap air di dalam tanah. Air tanah ini sering dimanfaatkan oleh penduduk sebagai sumber air minum serta kebutuhan mandi, mencuci, dan lain sebagainya (Fatoni *et al.*, 2018). Air tanah dalam merupakan air tanah yang memiliki kedalaman biasanya antara 100 sampai 300 meter di bawah permukaan tanah. Air tanah dalam berada di antara dua lapisan kedap air, yang juga disebut sebagai lapisan akuifer (Jayanti *et al.*, 2018).

2.2 Pencemaran Air Tanah

Menurut Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021, pencemaran air adalah masuknya atau dimasukkannya makhluk hidup, zat, energi, dan atau komponen lain ke dalam air oleh kegiatan manusia, sehingga melampaui baku mutu air yang telah ditetapkan. Pencemaran air dapat diindikasikan melalui beberapa parameter. Indikator pencemaran air adalah adanya satu atau beberapa parameter yang melebihi baku mutu. Adapun parameter tersebut dibagi menjadi tiga yaitu parameter kimia, fisika, dan biologi. Contoh parameter kimia yang umumnya diukur adalah pH, BOD, COD, dan lain sebagainya. Parameter fisika contohnya bau, warna, dan rasa. Selanjutnya parameter biologi yaitu keberadaan mikroorganisme seperti bakteri (Sumampouw & Risjani, 2018).

Pencemaran air tanah hampir selalu terjadi akibat aktivitas manusia. Air tanah rentan terjadi pencemaran di daerah dengan kepadatan penduduk tinggi dan penggunaan lahan yang intensif. Hampir semua kegiatan yang dapat melepaskan bahan kimia atau limbah, baik sengaja maupun tidak sengaja, berpotensi mencemari air tanah. Tanah yang berpori dan memiliki permeabilitas tinggi cenderung mentransmisikan air dan beberapa jenis kontaminan tertentu dengan relatif mudah ke dalam akuifer di bawahnya. Pergerakan kontaminan cenderung lambat seperti pergerakan air tanah pada umumnya. Karena pergerakan lambat tersebut, kontaminan cenderung tetap terkonsentrasi dalam bentuk *plume* (**Gambar 2.1**). Ukuran dan kecepatan *plume* bergantung pada jumlah dan jenis kontaminan, kelarutan dan densitas, serta kecepatan air tanah di sekitarnya (Talabi & Kayode, 2019).



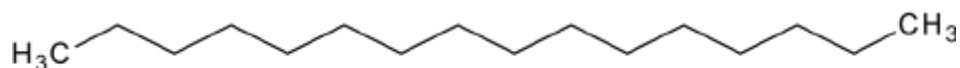
Gambar 2.1 Mekanisme Pencemaran Air Tanah

Sumber: Talabi & Kayode, 2019

2.3 Solar (*Diesel Oil*)

Minyak solar (*diesel oil*) merupakan campuran hidrokarbon yang telah umum digunakan dalam industri dan kehidupan sehari-hari sebagai sumber energi bersama dengan *petrol oil*, *gasoline*, minyak tanah, dan gas alam. Kandungan/komponen dalam solar terdiri dari 64% senyawa alifatik (kebanyakan sikloalkana dan n-alkana), 35% senyawa aromatik seperti benzena, dan 1% olefin (Khalid *et al.*, 2021). Bahan bakar minyak solar merupakan salah satu senyawa karbon organik yang merupakan produk dari minyak mentah pada jendela distilasi antara 200°C hingga 350°C. Minyak solar terdiri dari sekitar 75% hidrokarbon ($C_{10}H_{20}$ - $C_{15}H_{28}$), sekitar 25% hidrokarbon aromatik (misalnya benzena dan stirena), dan sebagian kecil sulfur tergantung pada sumber minyak mentah dan kualitas pembersihan (Hath & Heilos, 2013). Komposisi kimia solar agak rumit karena adanya sejumlah besar senyawa. Oleh karenanya, biasanya menguntungkan untuk menganalisis kelompok utama hidrokarbon yang menyusun solar yaitu parafin, aromatik, naftena, dan olefin, dari pada konsentrasi senyawa individu (Raffa *et al.*, 2021).

Melalui proses fisika dan kimia, solar dan beberapa produk atau senyawa turunan minyak bumi lainnya seperti gas LPG, bensin, kerosin, hingga pelumas, dibuat dari minyak mentah (*crude oil*) (Nugroho, 2006). Di dalam proses pembuatannya, alkana dengan jumlah atom karbon rendah (1 sampai 4) akan diproduksi sebagai elpiji (LPG). Alkana dari pentana (C_5H_{12}) sampai oktana 7 (C_8H_{18}) akan disuling menjadi bensin, alkana jenis nonana (C_9H_{20}) sampai heksadekana ($C_{16}H_{34}$) akan disuling menjadi *diesel*, kerosin dan bahan bakar jet. Sedangkan pelumas merupakan alkana rantai normal dan bercabang, bersuhu tinggi, serta mempunyai jumlah atom karbon tiap molekulnya cukup besar, yaitu berkisar C_{16} ke atas (Vyatrawan, 2015). Solar mengandung molekul hidrokarbon yang ukurannya berkisar antara 8 hingga 21 atom karbon. Solar biasa yang mengandung 16 atom karbon dapat dilihat pada **Gambar 2.2**. Molekul *petro diesel* yang terdiri dari hidrokarbon murni, molekulnya hanya mengandung hidrogen dan karbon tanpa oksigen. Jadi, setelah pembakaran yang tepat hanya CO_2 dan H_2O yang dilepaskan dari molekul ini. Namun biasanya hidrogen sulfida (H_2S) juga dihasilkan karena adanya kandungan sulfur (S) dalam solar (Ruhul *et al.*, 2015).



Gambar 2.2 Struktur Molekul Solar

Sumber: Ruhul *et al.*, 2015

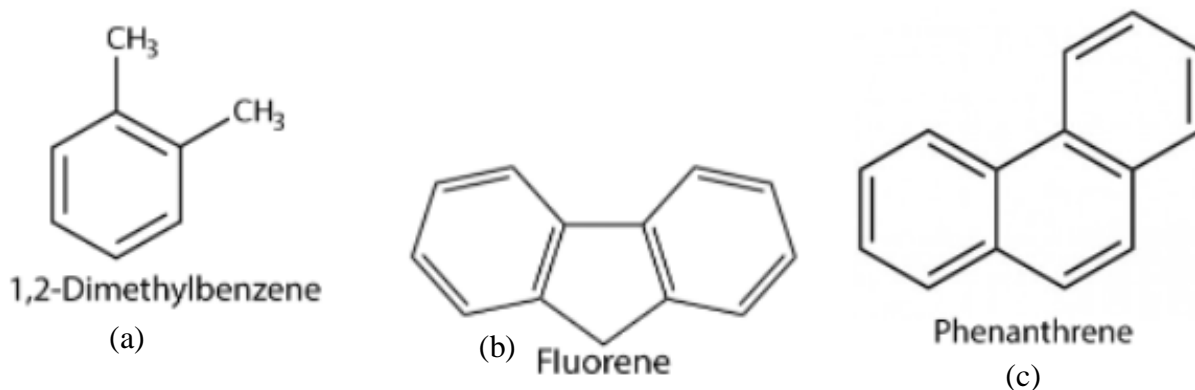
Karakteristik dari minyak solar yang ada di berbagai tempat biasanya berbeda. Hal tersebut dikarenakan kandungan yang ada di dalam minyak solar pun berbeda. Menurut Kadarohman *et al.* (2012), minyak solar yang ada di Indonesia memiliki karakteristik seperti pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Karakteristik Minyak Solar di Indonesia

Karakteristik	Satuan	Nilai
<i>Specific gravity</i>	g/mL, 15°C	0,85
<i>API gravity</i>		35,94
<i>Aniline point</i>	°C	81
Viskositas	cSt	4,34
Densitas	Kg/m ³ , 15°C	0,84
Titik nyala	°C	76
Bilangan setana (CN)		53
Nilai Kalor	kJ/g	45,23

Sumber: Kadarohman *et al.*, 2012

Salah satu kandungan yang ada pada solar adalah hidrokarbon aromatik. Kandungan hidrokarbon aromatik dapat menentukan kinerja dan masa pakai mesin yang menggunakan solar sebagai bahan bakarnya, dimana semakin rendah kandungannya akan semakin baik. Hal tersebut dikarenakan kandungan hidrokarbon aromatik dapat mempengaruhi jumlah bilangan setana (*cetane number*) dan menyebabkan emisi karena pembakaran yang tidak sempurna. Senyawa hidrokarbon aromatik yang paling umum ditemukan dalam bahan bakar solar adalah 1,2-dimetilbenzena, fluorena, dan fenantrena, dimana senyawa-senyawa tersebut biasa digunakan sebagai standar. Struktur molekul dari senyawa 1,2-dimetilbenzena, fluorena, dan fenantrena dapat dilihat pada **Gambar 2.3**. Konsentrasi dari ketiga senyawa hidrokarbon tersebut dapat ditentukan dengan cara dipisahkan menggunakan kondisi fasa normal. Konsentrasi kandungan dari ketiga senyawa hidrokarbon aromatik masing-masing pada bahan bakar solar dapat dilihat pada **Tabel 2.2**. Dari penentuan yang dilakukan, didapatkan kandungan 1,2-dimetilbenzena merupakan konsentrasi tertinggi (Avagyan *et al.*, 2021).



Gambar 2.3 (a) Struktur Molekul Senyawa 1,2-Dimetilbenzena, (b) Fluorena, (c) Fenantrena

Sumber: Avagyan *et al.*, 2021

Tabel 2.2 Kandungan Senyawa Hidrokarbon Aromatik pada Solar

No	Nama Senyawa	Kandungan (%)
1.	1.2-Dimetilbenzena	19,26
2.	Fluorena	1,53
3.	Fenantrena	0,04

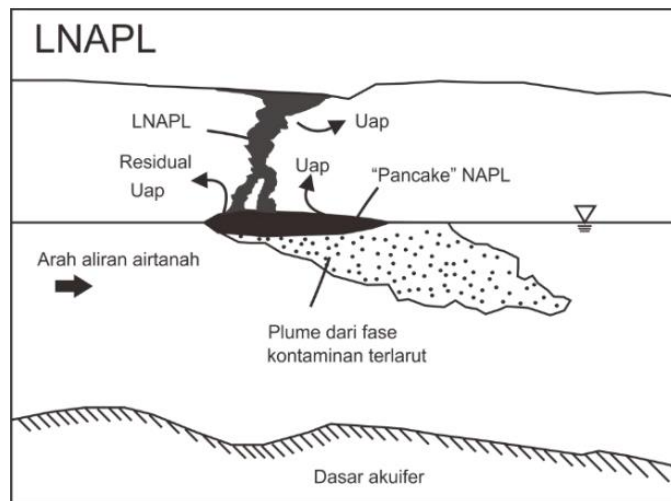
Sumber: Avagyan *et al.*, 2021

2.4 Pencemaran Solar pada Air Tanah

Penggunaan, penyimpanan, dan pendistribusian produk hidrokarbon minyak bumi di seluruh dunia menimbulkan potensi ancaman terhadap pencemaran lingkungan. Pencemaran tanah dan perairan dapat terjadi akibat kebocoran minyak yang dapat menimbulkan masalah serius bagi lingkungan dan kesehatan masyarakat. Kontaminasi solar merupakan masalah serius, karena solar tidak mudah menguap dan kurang *biodegradable* bila dibandingkan dengan *gasoline* (bensin) (Bajagain *et al.*, 2018). Oleh karenanya, penanganan yang tepat harus dilakukan untuk mengatasi pencemaran solar. Kontaminan solar dapat mencapai lingkungan dari berbagai sumber, seperti pembuangan atau pelepasan dari platform produksi minyak secara sengaja maupun tidak disengaja, penyimpanan minyak terapung di laut dan pesisir, serta kegiatan industri lainnya (Polewczyk *et al.*, 2020).

Bahan bakar minyak solar merupakan salah satu jenis pencemar karbon organik yang merupakan produk dari minyak mentah. Kontaminan solar terdiri dari sekitar 75% hidrokarbon, sekitar 25% hidrokarbon aromatik (misalnya benzena dan stirena), dan sebagian kecil sulfur (Hath & Heilos, 2013). Karakteristik kontaminan karbon organik fase cair terbagi menjadi dua, yaitu NAPL dan *plume*. Berdasarkan densitasnya NAPL (*Nonaqueous Phase Liquid*) dibagi menjadi dua yaitu LNAPL (*Light Nonaqueous Phase Liquid*) yang memiliki berat jenis lebih kecil dari air dan DNAPL (*Dense Nonaqueous Phase Liquid*) yang memiliki berat jenis lebih besar dari air. Minyak solar yang beredar di Indonesia memiliki berat jenis rata-rata 0,87 g/cm³ dan lebih kecil dari berat jenis air (± 1 g/cm³), sehingga termasuk dalam LNAPL (Setyaningsih, 2010). Dikarenakan LNAPL seperti minyak solar memiliki densitas lebih rendah dari air, maka pergerakan LNAPL sangat dipengaruhi oleh arah aliran air tanah.

Di sisi lain, *plume* adalah fase kontaminan karbon organik yang terlarut dalam air tanah. Komponen tambahan dalam bahan bakar solar (*additive oxygenate ether*) seperti *methyl tertiary butyl ether* (MTBE) atau etanol memiliki tingkat kelarutan yang tinggi dalam air, sehingga sebagian fase LNAPL dapat larut. Luasnya penyebaran *plume* bervariasi tergantung pada proses atenuasi alami. Atenuasi alami adalah berbagai proses fisik, kimia, atau biologis yang terjadi secara alami dalam mengurangi massa, toksisitas, mobilitas, volume, atau konsentrasi kontaminan dalam air tanah (Manek *et al.*, 2021). Sketsa dari pencemaran kontaminan LNAPL dan *plume* dapat dilihat pada **Gambar 2.4**.



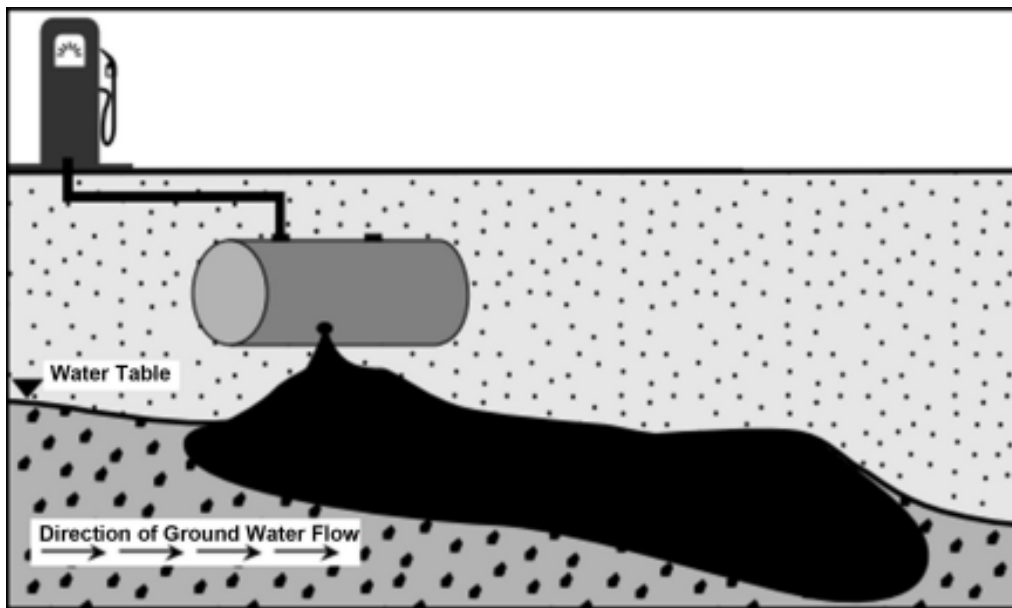
Gambar 2.4 LNAPL dan *Plume*

Sumber: Rahman *et al.*, 2018

Kontaminasi bahan bakar minyak seperti solar pada air tanah dapat terjadi akibat dari tumpahan minyak di tanah dan kebocoran transportasi maupun pipa penyalur minyak. Selain itu kebocoran pada tangki minyak bawah tanah juga dapat menyebabkan pencemaran pada akuifer (Chen *et al.*, 2017a). Air yang tercemar solar dikatakan lebih beracun daripada tumpahan minyak yang terjadi sebelumnya. Adapun komponen senyawa toksik utama yang ditemukan pada air yang tercemar *diesel oil* adalah *benzene*, *toluene*, *ethylbenzene*, dan *xylene* (BTEX) (Khalid *et al.*, 2021). Minyak solar memiliki berat jenis rata-rata lebih kecil dari pada berat jenis air, sehingga termasuk ke dalam *Light Nonaqueous Phase Liquid* (LNAPL). *Nonaqueous Phase Liquid* (NAPL) adalah kontaminan cairan organik seperti hidrokarbon yang tidak larut dapat larut dalam air. LNAPL merupakan cairan pencemar yang tidak dapat larut dalam air dan pencemar tersebut memiliki densitas yang lebih rendah dari pada densitas air ($> 1 \text{ g/cm}^3$). Kontaminan solar akan merembes masuk dari permukaan menuju zona tidak jenuh air dan akan bergerak mengikuti aliran air tanah seperti pada **Gambar 2.5**. Pencemaran solar akan terkonsentrasi pada permukaan air tanah dan perubahan pada air terjadi terbatas pada kedalaman tertentu (Rahman *et al.*, 2018; Setyaningsih, 2010).

Paparan dari minyak solar dapat berbahaya dan berdampak negatif bagi kesehatan manusia. Paparan dapat terjadi akibat meminum dan menggunakan air yang tercemar limbah solar untuk mandi dan mencuci. Menurut Ahmed & Fakhrudin (2018), paparan dari minyak solar (*diesel oil*) dapat mengakibatkan berbagai masalah kesehatan bagi manusia. Efek kronis dari paparan solar dapat menyebabkan penyakit kulit. Selain itu, hiperkeratosis atau penebalan/pengerasan kulit juga dapat terjadi akibat kontak reguler dengan solar. Sampai saat ini belum ada penelitian mengenai indikasi hubungan antara solar dengan kejadian kanker pada manusia, namun ada beberapa penelitian mengenai batas paparan solar yang dapat

menyebabkan karsinogenitas pada hewan setelah kontak dalam waktu lama. Adapun beberapa efek akut berdasarkan jenis paparannya dapat dilihat pada **Tabel 2.3**.



Gambar 2.5 Pencemaran Solar pada Air Tanah

Sumber: Talabi & Kayode, 2019

Tabel 2.3 Efek Akut Paparan Minyak Solar pada Kesehatan Manusia

No	Jenis Paparan	Efek Akut
1.	Terhirup	a. Sakit kepala, pusing, kantuk, inkoordinasi dan euforia. b. Aspirasi ke paru-paru menyebabkan pneumonitis disertai tersedak, batuk, mengi, sesak napas, sianosis dan demam. c. Menghirup uap solar dapat menyebabkan depresi SSP (sistem saraf pusat)/pernapasan dan aritmia jantung.
2.	Tertelan	Mual, muntah, diare, iritasi pada saluran pencernaan.
3.	Paparan Mata	Iritasi mata, sensasi perih dan terbakar, nyeri sementara, dan hiperemia.
4.	Paparan Kulit	a. Iritasi, nyeri sementara dengan eritema, melepuh, dan lukabakar superfisial. b. Solar dapat menghilangkan lemak alami kulit, sehingga paparan berulang dapat menyebabkan kulit kering, pecah-pecah, iritasi, dan dermatitis. c. Individu yang rentan dapat mengalami jerawat minyak dan folikulitis, serta pertumbuhan kutil yang dapat menjadi ganas bila tidak ditangani.
5.	Neurotoksisitas	Menyebabkan gangguan neurologis seperti kantuk, neurasthenia, dan penurunan kecepatan sensorimotor.

6.	Nefrotoksisitas	a. Paparan akut menyebabkan gagal ginjal (sekunder hingga nekrosis tubulus ginjal akut). b. Gejala seperti oliguria (berkembang menjadi anuria), mual, kram perut, dan diare.
----	-----------------	--

Sumber : Ahmed & Fakhruddin, 2018

2.5 Bioremediasi Solar

Di antara banyak cara yang tersedia untuk menghilangkan polutan berbahaya, metode bioremediasi adalah pendekatan yang ramah lingkungan, andal, hemat biaya, dan dapat diterapkan secara luas dalam rentang kontaminan tertentu. Teknologi yang dipilih bergantung pada sifat dan tingkat pencemarannya, serta perlakuan *ex situ* atau *in situ* yang diterapkan (Kis *et al.*, 2017). Bioremediasi adalah metode pendegradasian suatu kontaminan pada medium tertentu dengan memanfaatkan kemampuan mikroorganisme dengan cara mengubah kontaminan menjadi bentuk senyawa lain yang tidak beracun dan berbahaya (Kristinanda, 2018).

Salah satu teknologi bioremediasi yang dapat digunakan untuk menghilangkan kontaminan solar adalah biostimulasi. Biostimulasi dapat meningkatkan dekomposisi biotik alami dengan melengkapi nutrisi yang dibutuhkan oleh mikroorganisme *indigenous* dan bahan lain yang relevan, misalnya penambahan biosurfaktan ke wilayah yang terkontaminasi. Namun dalam beberapa kasus, mikroorganisme *indigenous* tidak dapat mendegradasi kontaminan dengan cepat. Dalam kasus tersebut, perlu disertakan metode lain yang dapat meningkatkan efikasi biodegradasi. Bioaugmentasi menggunakan mikroorganisme yang telah disesuaikan sebelumnya dapat digunakan untuk meningkatkan laju biodegradasi kontaminan (Kis *et al.*, 2017).

2.6 Bioaugmentasi Solar

Salah satu teknik bioremediasi yang dapat digunakan untuk menangani pencemaran *diesel oil* adalah bioaugmentasi. Bioaugmentasi adalah penambahan biokatalis (umumnya bakteri, namun juga dapat melibatkan jamur, gen atau enzim) untuk mendegradasi zat polutan tertentu. Bioaugmentasi dapat dilakukan secara *in situ* maupun *ex situ*. Dalam sebagian besar pengaplikasiannya, bioaugmentasi melibatkan penambahan kultur campuran bakteri yang berasal dari lingkungan alami dan terbukti mampu melakukan biodegradasi kontaminan dengan cepat. Bioaugmentasi terbukti dapat mempercepat bioremediasi pencemaran *diesel*. Dengan adanya kepentingan untuk memulihkan tumpahan dan kebocoran minyak secara cepat, maka telah tersedia berbagai produk kultur bioaugmentasi secara komersial (Lyon & Vogel, 2013).

Dalam bioremediasi pencemaran minyak, terdapat 2 pendekatan utama. Yang pertama adalah bioaugmentasi, dimana mikroorganisme pengurai ditambahkan untuk melengkapi populasi mikroba yang telah ada. Dan yang kedua adalah biostimulasi, dimana pertumbuhan pengurai hidrokarbon dirangsang dengan cara menambahkan *nutrient* (Yasmin & Wulansarie, 2018). Dengan demikian, setelah dilakukan bioaugmentasi dengan menambahkan kultur mikroorganisme, perlu dilakukan biostimulasi. Hal tersebut bertujuan agar mikroorganisme yang ada dapat terus bertahan hidup dan menjaga efisiensi dari proses biodegradasi. Biostimulasi melibatkan penambahan nutrisi (terutama nitrogen dan fosfor) ke lokasi yang tercemar hidrokarbon untuk merangsang mikroorganisme agar memecah lebih banyak minyak. Biostimulasi dilakukan karena metabolisme hidrokarbon dibatasi oleh ketersediaan

nutrisi, sehingga penyediaan nutrisi diperlukan agar degradasi meningkat. Nutrisi yang diberikan dapat berasal dari sumber organik atau anorganik. Dari penelitian yang pernah dilakukan, pengaplikasian nutrisi organik dari kotoran sapi berhasil dilakukan. Keberhasilan aplikasi nutrisi anorganik juga didapatkan dengan menggunakan natrium nitrat dan dihidrogen fosfat (Macaulay & Rees, 2014).

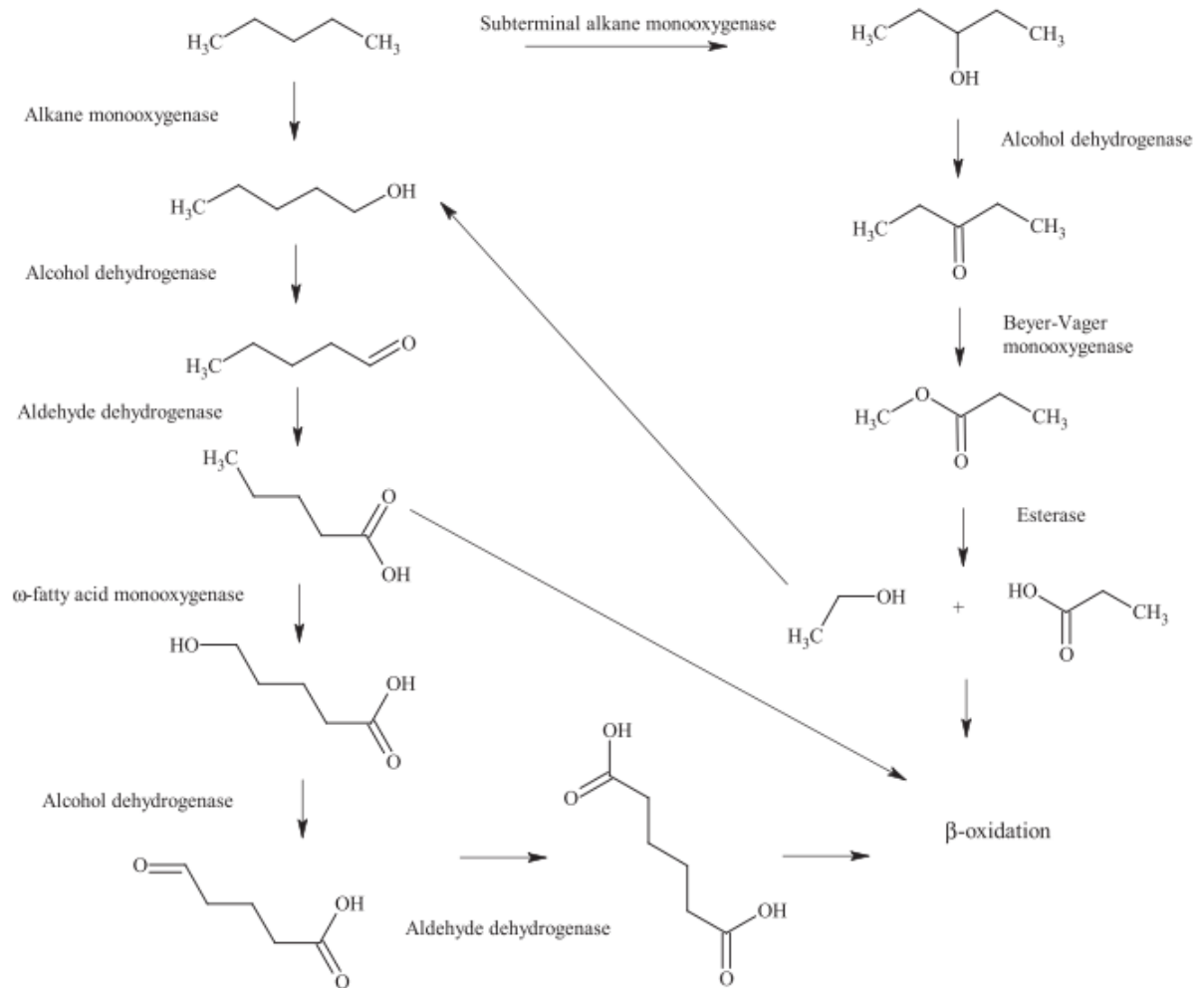
2.6.1 Mekanisme Biodegradasi Solar oleh Bakteri

Beberapa mikroorganisme memiliki kemampuan untuk memecah struktur hidrokarbon pada solar. Bakteri yang diisolasi dari lingkungan yang terkontaminasi memiliki efektivitas degradasi yang lebih baik karena memiliki daya adaptasi, resistensi, dan kelangsungan hidup ketika terkena polutan. Mereka memiliki metabolisme khusus yang telah beradaptasi untuk mencegah kematian dengan mengubah atau melalui reaksi metabolisme dan enzimatis tertentu (Imron *et al.*, 2020). Degradasi hidrokarbon oleh mikroorganisme terjadi akibat dari katalisis oleh enzim intraselular yang melibatkan empat langkah penting. Langkah pertama dimulai dengan proses pengambilan polutan oleh mikroorganisme dan mensekresi surfaktan untuk memfasilitasi emulsifikasi. Selanjutnya polutan yang teremulsi akan teradsorpsi pada permukaan membran sel. Kemudian polutan akan langsung masuk ke membran sel secara endositosis dalam bentuk transpor aktif atau pasif dan menjalani reaksi enzimatis dengan masing-masing enzim sebagai katalis untuk menyelesaikan keseluruhan proses (Khalid *et al.*, 2021). Bakteri akan menggunakan polutan solar sebagai sumber karbon untuk metabolismenya. Secara garis besar, hidrokarbon akan teroksidasi atau terpecah dengan bantuan dari enzim yang dihasilkan oleh mikroorganisme sehingga menghasilkan aldehida dan asam sederhana yang akan masuk ke dalam proses metabolisme seperti siklus Krebs dan transport elektron. Siklus Krebs akan menghasilkan ATP, NADH, FADH₂, dan melepaskan CO₂, dimana kemudian NADH dan FADH₂ akan masuk ke dalam proses transport elektron dan menghasilkan H₂O dan sejumlah ATP. ATP akan digunakan sebagai sumber energi bagi mikroorganisme untuk melakukan metabolisme. Dari proses tersebut diperoleh bahwa degradasi lengkap dari senyawa hidrokarbon akan menghasilkan ATP untuk metabolisme bakteri serta CO₂ dan H₂O sebagai produk sampingan dari reaksi metabolisme aerobik (Wardhani & Titah, 2021).

Solar terdiri atas senyawa alifatik dan aromatik. Kedua senyawa tersebut memiliki proses degradasi yang berbeda dikarenakan bentuk ikatannya juga berbeda. Untuk mekanisme degradasi senyawa alifatik dapat dilihat pada **Gambar 2.6**. Proses degradasi diawali dengan bantuan enzim monooksigenase dan dioksigenase dimana atom oksigen ditambahkan ke karbon terminal atau sub-terminal. Proses ini mengubah senyawa alifatik menjadi beberapa intermediet sentral seperti alkohol primer dan sekunder melalui jalur konvergen. Alkohol kemudian diubah menjadi aldehida dengan bantuan enzim dehidrogenase. Dengan enzim yang sama, aldehida bereaksi dan menghasilkan asam lemak, dimana asam lemak ini akan bereaksi dengan koenzim A (CoA) untuk menghasilkan asetil KoA setelah mengalami oksidasi-β. Asetil KoA yang dihasilkan ini akan masuk ke dalam siklus Krebs yang dilakukan oleh bakteri (Khalid *et al.*, 2021).

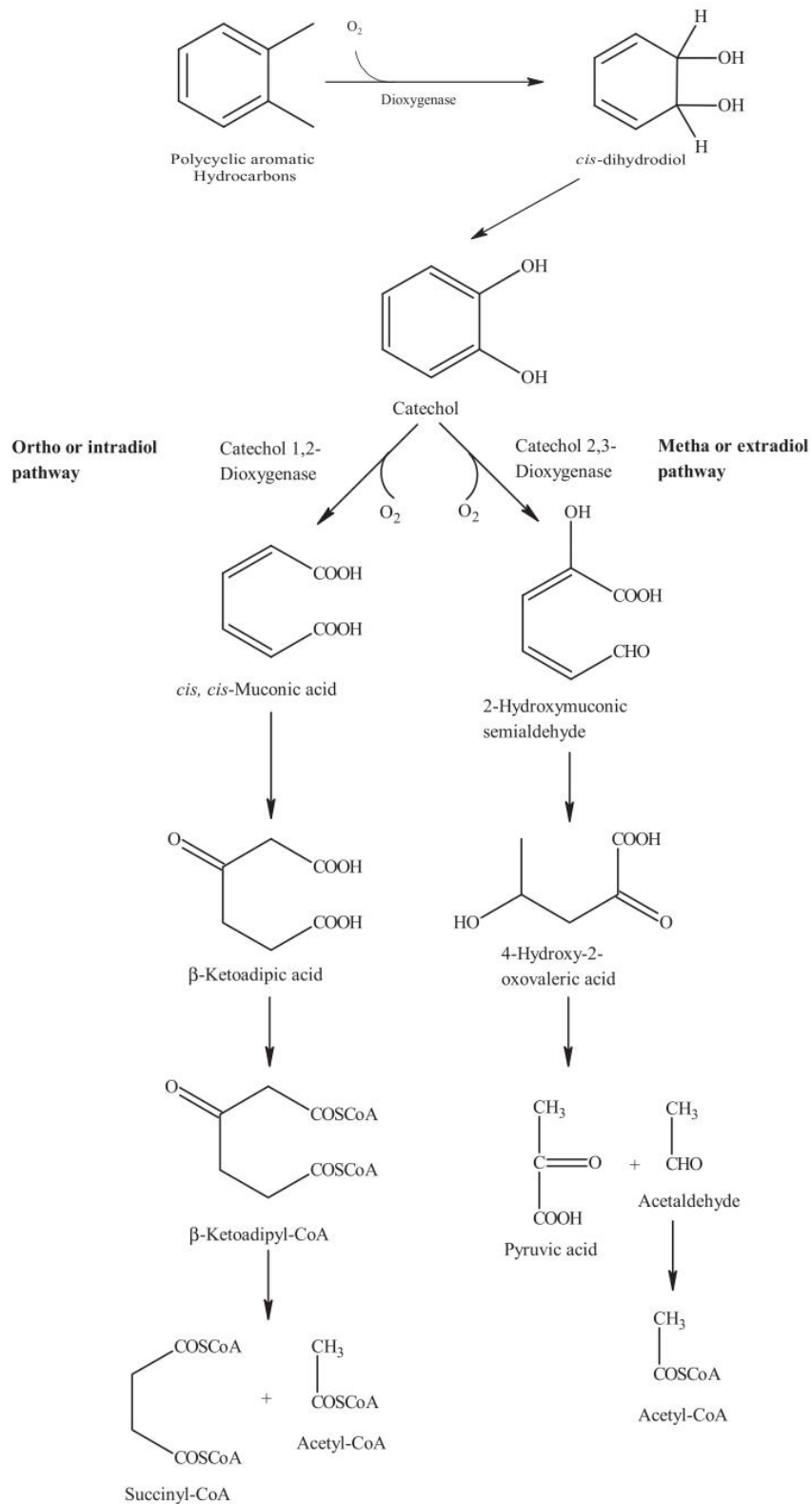
Senyawa hidrokarbon aromatik yang terkandung dalam solar memiliki proses degradasi yang berbeda dari senyawa alifatik. Mekanisme degradasi senyawa hidrokarbon aromatik dapat dilihat pada **Gambar 2.7**. Degradasi PAH dimulai dengan adanya reaksi intraseluler pertama melalui oksidasi, aktivasi, dan penggabungan oksigen. Melalui proses hidrosilasi cincin aromatik dari substrak, cis-dihidrodiol dibentuk dengan bantuan enzim dioksigenase. Selanjutnya cis-dihidrodiol didehidrogenasi menjadi zat intermediet diol berupa katekol oleh enzim dehidrogenase. Metabolit kemudian dapat

dibelah oleh dehidrogenase pembelah cincin melalui jalur pembelahan orto (intra-diol) atau pembelahan meta (ekstra-diol). Reaksi akan mengarah ke produksi intermediet berupa asetil KoA dari oksidasi- β yang akan masuk ke siklus Krebs (Khalid *et al.*, 2021; Imron *et al.*, 2020).



Gambar 2.6 Biodegradasi Senyawa Hidrokarbon Alifatik

Sumber: Imron *et al.*, 2020



Gambar 2.7 Biodegradasi Senyawa Hidrokarbon Aromatik
 Sumber: Imron *et al.*, 2020

2.6.2 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Bioaugmentasi

Proses degradasi pada bioremediasi umumnya dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor-faktor tersebut adalah mikroba (konsentrasi, biomassa, keragaman populasi, aktivitas enzim), substrat (karakteristik fisika-kimia, struktur molekul, dan konsentrasi), serta berbagai faktor lingkungan (pH, suhu, kadar air, Eh, ketersediaan akseptor elektron, sumber karbon dan energi). Parameter tersebut mempengaruhi periode aklimatisasi mikroba terhadap substrat (Luka *et al.*, 2018). Adapun faktor-faktor yang mempengaruhi bioaugmentasi dapat dilihat pada **Tabel 2.4**.

Tabel 2.4 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Bioaugmentasi

Faktor	Deskripsi	Referensi
Kematian sel pada proses inokulasi	Karena perubahan kondisi lingkungan yang ekstrim	vanVeen <i>et al.</i> (1997), Goldstein <i>et al.</i> (1985)
Kematian sel setelah proses inokulasi	Penipisan nutrisi atau toksisitas yang disebabkan oleh kontaminan	Goldstein <i>et al.</i> (1985), Liu <i>et al.</i> (2009)
Ketersediaan Nutrien	Kompetisi antar mikroba untuk mendapatkan nutrisi	Thompson <i>et al.</i> (2005), El Fantroussi & Agathos (2005)
Gangguan organisme lain	Populasi bakteri dapat bersaing dengan pertumbuhan protozoa	Bouchez <i>et al.</i> (2000)
pH	pH yang tinggi dapat menghambat proses degradasi	Dibble & Bartha (1979)
Temperatur	Efek dari pertumbuhan mikroba dan proses degradasi	Atlas (1981)
Kelembapan	Kelembapan yang rendah mempengaruhi pertumbuhan mikroba dan aerasi tanah lebih tinggi	Dibble & Bartha (1979), Leahy & Colwell (1990)

Sumber: Simanjuntak, 2018

2.6.3 Kelebihan dan Kekurangan Bioaugmentasi

Menurut Zaida & Piakong (2019), teknik bioaugmentasi untuk menremediasi hidrokarbon memiliki beberapa kelebihan dan kekurangan. Kelebihan dari bioaugmentasi adalah sebagai berikut:

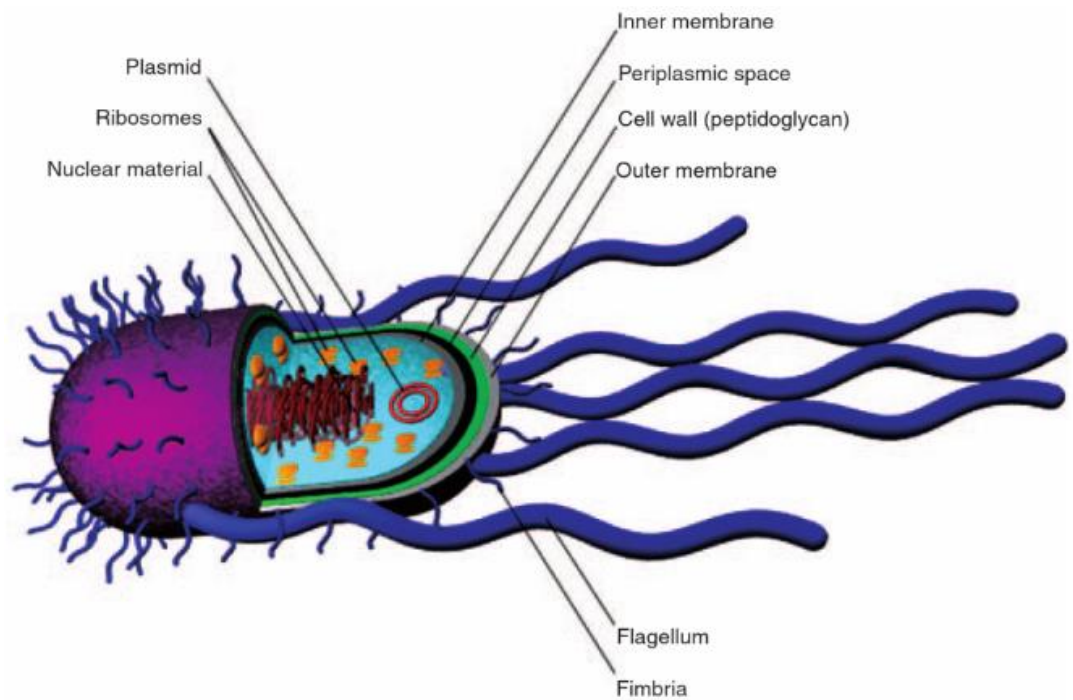
- Biaya lebih murah (dalam hal tenaga kerja).
- Bisa dilakukan secara in situ.
- Ramah lingkungan, karena tidak menambahkan mikroba dan bukannya bahan kimia.
- Dalam proses in situ, mengurangi potensi kekacauan atau kecelakaan selama transportasi.
- Merupakan proses alami dimana mikroba akan secara kontinu membersihkan area.
- Mikroba mendegradasi minyak menjadi senyawa karbon sederhana yang digunakan untuk membuat gula, lemak, dan protein yang dibutuhkan untuk pertumbuhannya.

Selanjutnya untuk kekurangan dari teknik bioaugmentasi adalah sebagai berikut:

- Mikroba membutuhkan kondisi lingkungan yang menguntungkan untuk bertahan hidup.
- Mikroba tidak dapat memetabolisme setiap jenis kontaminan.
- Proses jangka panjang.
- Mikroba menghasilkan produk limbahnya sendiri.
- Persaingan antara mikroorganisme *indigenous* dengan *strain* bakteri augmentasi dapat mengakibatkan kegagalan bioaugmentasi.
- Diperlukan pemantauan intensif pada faktor fisik, kimia, dan biologis.

2.7 Bakteri Pendegradasi Solar

Bakteri merupakan mikroorganisme yang memiliki struktur sederhana namun mempunyai fleksibilitas metabolik dan keragaman terbesar. Di laboratorium, bakteri memiliki rata-rata diameter 0,5-1 μm dan panjang 1-2 μm . Ciri-ciri dari bakteri adalah memiliki tingkat replikasi yang tinggi, rasio luas permukaan terhadap volume yang tinggi, dan kelenturan generik. Bakteri memiliki satu kromosom yang melingkar dan terletak di sitoplasma tanpa ada kompartmen pada setiap bagian sel (**Gambar 2.8**). Sel bakteri yang relatif sederhana memungkinkannya untuk cepat merespon dan beradaptasi dengan kondisi lingkungan. Berdasarkan struktur dinding selnya, bakteri secara garis besar dibagi menjadi dua yaitu bakteri gram-positif dan gram-negatif. Perbedaan struktur dinding sel ini membantu menentukan strategi bagi bakteri untuk bertahan hidup di lingkungan. Misalnya dinding sel tebal bakteri gram-positif, seperti pada *Bacillus* dan *Clostridium*, membantu mereka bertahan dari kondisi fisik yang keras yang ditemukan di lingkungan tanah. Di sisi lain, struktur yang lebih kompleks dari dinding sel pada bakteri gram-negatif seperti *Pseudomonas* dan *Shewanella* membantu mikroba tersebut berinteraksi dengan permukaan mineral dan zat terlarut di lingkungan untuk memperoleh nutrisi yang dibutuhkan dalam metabolisme (Pepper *et al.*, 2011).



Gambar 2.8 Struktur Sel Bakteri

Sumber: Pepper *et al.*, 2011

Dari beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, didapatkan banyak jenis dan spesies bakteri yang dapat berhasil dalam mendegradasi minyak solar. Beberapa spesies seperti *Acinetobacter sp.*, *Bacillus sp.*, *Pseudomonas sp.*, dan *Vibrio sp.* memiliki karakteristik unggul dalam mendegradasi hidrokarbon. Selain itu, spesies seperti *Pseudomonas sp.*, *Flavobacterium sp.*, *Vibrio sp.*, *Acinetobacter sp.*, *Bacillus sp.*, dan *Rhodococcus sp.* diketahui memiliki kemampuan untuk memproduksi biosurfaktan (Imron *et al.*, 2020). Biosurfaktan adalah kandungan yang dapat meningkatkan kelarutan solar dalam air yang terkontaminasi sekaligus meningkatkan biomassa bakteri dan meningkatkan efisiensi penyisihan hidrokarbon (Mnif *et al.*, 2017).

2.8 Literatur Terdahulu

Dari penelitian terdahulu yang telah dilakukan, ditemukan beberapa jenis bakteri yang diketahui dapat mendegradasi solar pada air tanah. Beberapa jenis bakteri tersebut dapat dilihat pada **Tabel 2.5**.

Tabel 2.5 Bakteri Pendegradasi Solar pada Air Tawar

Bakteri	Jenis	Pencemar	Efisiensi Penyisihan	Referensi
<i>Bacillus sp.</i> ¹	tunggal	<i>Diesel</i> 1%	46,5%-70,3% (7 hari)	<i>Lima et al., 2020</i>
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> ²	tunggal	<i>Diesel</i> 2%	87% (20 hari)	<i>Safdari et al., 2017</i>
<i>Bacillus subtilis</i> ²	tunggal	<i>Diesel</i> 2%	75% (20 hari)	
<i>Gordonia alkanivorans</i> ³	tunggal	<i>Diesel</i>	73%-94% (11 hari)	<i>Chen et al., 2017a</i>
<i>Rhodococcus erythropolis</i> ³	tunggal	<i>Diesel</i>	64-85% (11 hari)	
<i>Lysinibacillus bronitolerans</i> <i>Bacillus thuringiensis</i> <i>Bacillus weihenstephanensis</i> ⁴	konsorsium	<i>Diesel</i> 5%	43,54% (21 hari)	<i>Mnif et al., 2017</i>
<i>Lysinibacillus bronitolerans</i> <i>Bacillus thuringiensis</i> <i>Bacillus weihenstephanensis</i> <i>Bacillus subtilis</i> <i>Acinetobacter radioresistens</i> ⁴	konsorsium	<i>Diesel</i> 5%	57,765% (21 hari)	
<i>Acinetobacter venetianus</i> ⁵	tunggal	<i>Diesel</i>	78% (4 hari)	<i>Chen et al., 2017b</i>
<i>Bacillus subtilis</i>	tunggal	<i>Benzene</i>	58,62% - 99,99% (23 hari)	<i>Kurnia et al., 2018</i>
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	tunggal	<i>Benzene</i>	91,61% - 99,99% (23 hari)	

<i>Bacillus Subtilis</i> <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	konsorsium	<i>Benzene</i>	86,94% - 99,99% (23 hari)	
---	------------	----------------	------------------------------	--

2.9 Bakteri yang Dipilih untuk Studi Kasus

Pemilihan bakteri yang akan digunakan dalam studi kasus merupakan isolat bakteri konsorsium yang terdiri dari spesies bakteri *Pseudomonas aeruginosa* dan *Bacillus subtilis*.



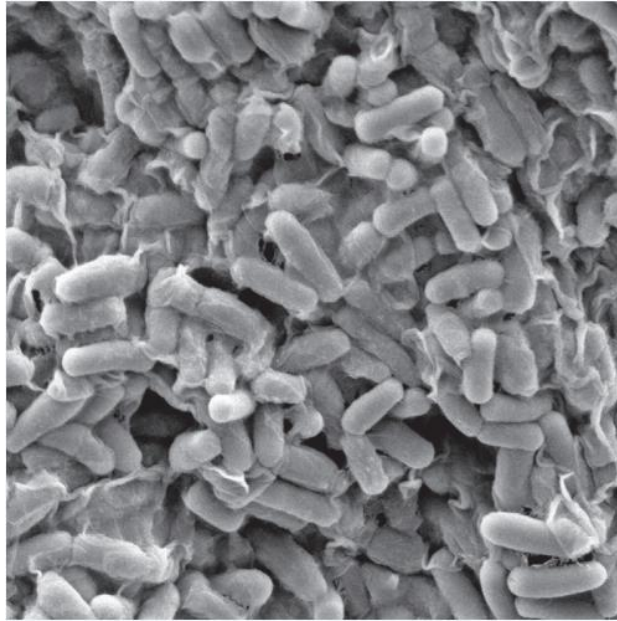
Gambar 2.9 *Pseudomonas aeruginosa*

Sumber: Imron, 2019

<https://fst.unair.ac.id/bakteri-pseudomonas-aeruginosa-untuk-pengolahan-limbah-cair-dengan-kandungan-aluminium/>

Pseudomonas aeruginosa (**Gambar 2.9**) adalah salah satu spesies yang termasuk ke dalam genus *Pseudomonas*. Spesies ini merupakan bakteri gram-negatif yang berbentuk batang, berflagel tunggal, dan berukuran sekitar 0,5-1,0 μm . *Pseudomonas aeruginosa* dapat tumbuh dengan optimum pada suhu 25°C hingga 37°C, dan kemampuan spesies ini untuk tumbuh pada suhu 42°C membantu membedakannya dari spesies *Pseudomonas* yang lain. Bakteri ini merupakan mikroorganisme *ubiquitous* yang memiliki kemampuan bertahan hidup pada berbagai kondisi lingkungan (Wu *et al.*, 2015). Spesies bakteri ini bahkan mampu bertahan hidup pada kondisi lingkungan yang asam hingga pH 5. *Pseudomonas aeruginosa* memiliki potensi yang baik untuk digunakan sebagai agen pengolahan biologis untuk air limbah yang tercemar (Imron, 2019).

Bacillus subtilis (**Gambar 2.10**) merupakan spesies yang paling banyak dipelajari dalam genus *Bacillus*. Sel dari *Bacillus subtilis* berbentuk batang dengan panjang sekitar 4-10 μm dan diameter sekitar 0,25-1,0 μm , dengan volume sekitar 2,5-4,2 fL (Yu *et al.*, 2014). Spesies ini termasuk ke dalam bakteri gram-positif non-patogen. Endospora yang dibentuk oleh *Bacillus subtilis* dapat bertahan dalam kondisi yang keras (suhu tinggi, kering, paparan UV, dan radiasi). *Bacillus subtilis* dapat diisolasi dari berbagai lingkungan, mulai dari tanah hingga habitat laut, dan dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi mulai dari fermentasi, biokontrol tanaman, hingga sebagai agen remediasi (Kovács, 2019; Blake *et al.*, 2021).



Gambar 2.10 *Bacillus subtilis*

Sumber: Kovács, 2019

Kedua spesies bakteri baik *Pseudomonas aeruginosa* maupun *Bacillus subtilis* sama-sama memiliki kemampuan untuk bertahan hidup di lingkungan yang tercemar solar dan bahkan mampu mendegradasinya. Bakteri *Pseudomonas aeruginosa* mampu mendegradasi solar dengan efisiensi hingga 87%, sedangkan *Bacillus subtilis* memiliki efisiensi hingga 75% (Safdari *et al.*, 2017). Selain itu keduanya juga mampu mendegradasi senyawa benzena yang merupakan bagian dari hidrokarbon aromatik yang terkandung dalam solar. *Pseudomonas aeruginosa* memiliki efisiensi degradasi senyawa benzena hingga 99,99%, sedangkan *Bacillus subtilis* memiliki efisiensi hingga 93%. Isolat konsorsium dari *mixed culture* kedua bakteri tersebut juga dapat mendegradasi senyawa benzena hingga 99,99% (Kurnia *et al.*, 2018). Proses biodegradasi oleh bakteri *Pseudomonas aeruginosa* dan *Bacillus subtilis* terjadi dengan cara pengikatan polutan oleh bakteri dan akan menggunakan polutan solar sebagai sumber karbon untuk metabolismenya. Bakteri tersebut akan menghasilkan enzim yang dapat memecah dan mengoksidasi senyawa solar menjadi asam sederhana yang kemudian akan masuk ke siklus Krebs dan transport elektron. Hasil akhir dari proses degradasi adalah ATP yang digunakan untuk metabolisme bakteri, serta CO₂ dan H₂O sebagai produk samping.

2.10 Baku Mutu yang Digunakan

Menurut PP Nomor 22 Tahun 2021 Tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, baku mutu air adalah ukuran batas atau kadar makhluk hidup, zat, energi, atau komponen yang ada atau harus ada dan atau unsur pencemar yang ditenggang keberadaannya di dalam air.

Indonesia memiliki baku mutu untuk media air yang digunakan untuk keperluan higiene sanitasi. Air untuk keperluan higiene sanitasi digunakan untuk pemeliharaan kebersihan perorangan seperti mandi dan sikat gigi, serta untuk keperluan cuci bahan pangan, peralatan makan, dan pakaian. Selain itu, juga dapat digunakan sebagai air baku air minum. Baku mutu tersebut tertulis dalam Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 32 Tahun 2017 Tentang Standar Baku Mutu Kesehatan Lingkungan dan Persyaratan Kesehatan Air untuk Keperluan Higiene Sanitasi, Kolam Renang, *Solus Per Aqua*, dan Pemandian Umum,

dimana batas kadar *benzene* sebagai salah satu kandungan dalam solar dapat dilihat pada **Tabel 2.6**.

Tabel 2.6 Baku Mutu Benzena pada Air untuk Keperluan Higiene Sanitasi

No	Parameter	Unit	Standar Baku Mutu (kadar maksimum)
1.	<i>Benzene</i>	mg/L	0,01

Sumber: PERMENKES Nomor 32 Tahun 2017

Selain itu terdapat juga baku mutu total petroleum hidrokarbon (TPH) untuk air tanah yang tertulis dalam *Environmental Guidelines and Standards for The Petroleum Industry in Nigeria* (EGASPIN) yang dikeluarkan oleh *Department of Petroleum Resources* pada tahun 2002 (Sari *et al.*, 2018). Adapun batas kadar TPH dalam air tanah dapat dilihat pada **Tabel 2.7**.

Tabel 2.7 Baku Mutu TPH pada Air Laut

No	Standar Kualitas Air Tanah	Parameter	Satuan	Baku Mutu
1.	EGASPIN	TPH	µg/L	600

Sumber: *Department of Petroleum Resources*, 2002

BAB III

METODE STUDI

3.1 Umum

Metode studi berisi langkah studi yang akan dilakukan hingga mendapatkan kesimpulan. Metode studi dibutuhkan sebagai acuan agar pelaksanaan studi terarah hingga mencapai kesimpulan. Penyusunan Tugas Akhir akan terbagi dalam 2 bagian, yaitu kajian pustaka dan studi kasus.

3.1.1 Kajian Pustaka

Kajian pustaka dalam penelitian ini dilakukan untuk mendukung ide serta meningkatkan pemahaman terkait pengkajian yang akan dilakukan. Kajian pustaka dilakukan melalui *systematic review* menggunakan *Mendeley Reference Manager*. Sumber dari studi literatur yang digunakan berasal dari jurnal penelitian nasional maupun internasional, *textbooks*, disertasi dan laporan tugas akhir yang berhubungan dengan topik yang akan dikaji yaitu bioaugmentasi air tanah tercemar solar. Sumber diutamakan berasal dari 10 tahun terakhir.

3.1.2 Studi Kasus

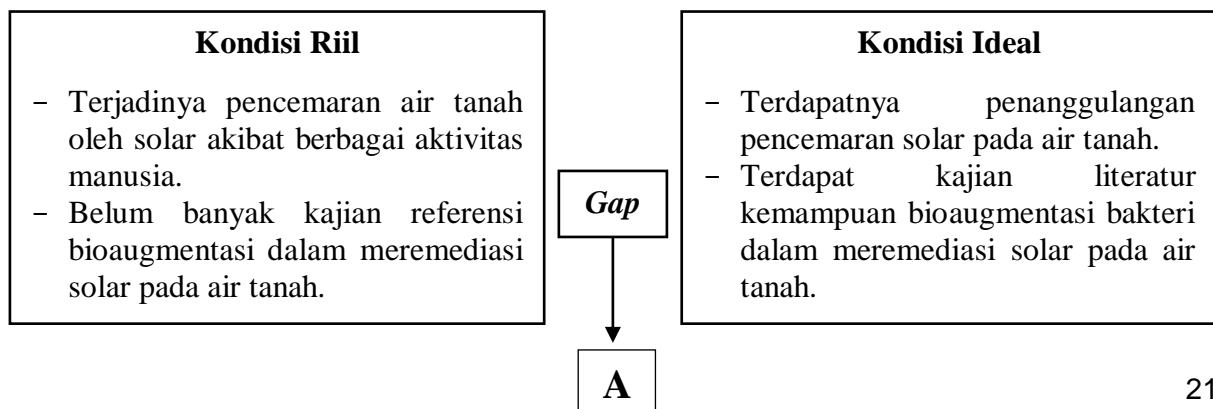
Studi kasus dalam penulisan Tugas Akhir ini adalah tinjauan kasus pencemaran air tanah oleh solar dengan referensi dari berbagai pustaka yang telah dipelajari. Data yang diambil mengenai kasus pencemaran polutan solar, adalah data sekunder. Data sekunder yang diperoleh kemudian dianalisis dengan kajian pustaka yang telah dipelajari. Data yang digunakan berasal dari:

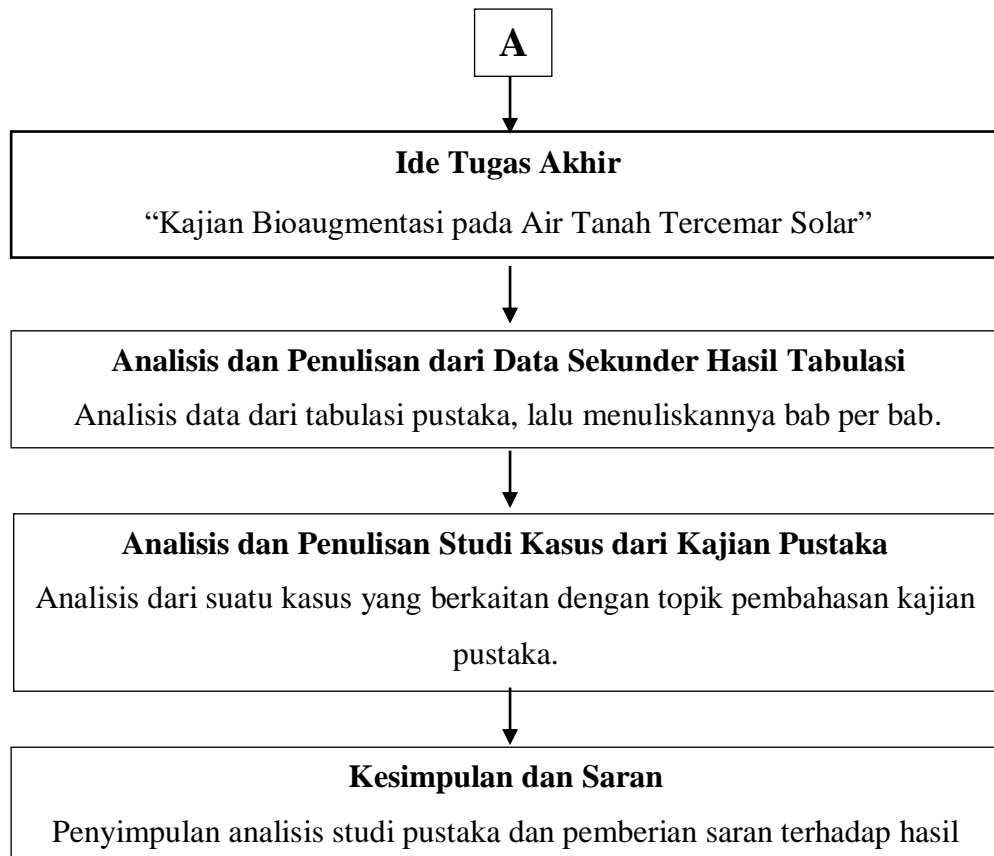
1. Jurnal
2. *Website*
3. Laporan penelitian
4. Prosiding seminar
5. Buletin

Studi kasus akan membahas hingga detail perencanaan penanganan kasus pencemaran air tanah oleh solar menggunakan bioaugmentasi. Bahasan meliputi pemilihan dan penyediaan mikroorganisme bakteri yang digunakan, tahapan pelaksanaan bioaugmentasi, dan perkiraan waktu yang dibutuhkan.

3.2 Kerangka Studi

Kerangka studi dengan studi kasus merupakan rancangan alur proses pelaksanaan studi hingga mencapai tujuan studi. Penyusunan kerangka studi bertujuan agar pengerjaan Tugas Akhir berjalan secara sistematis dan terarah. Kerangka dapat dilihat pada Gambar 3.1 di bawah ini:





Gambar 3.1 Kerangka Kajian Pustaka dengan Studi Kasus

3.3 Tahapan Pelaksanaan Studi

Tahapan pelaksanaan dilakukan untuk menentukan urutan dalam melaksanakan pengerjaan Tugas Akhir dengan menggunakan kajian pustaka dan studi kasus yang sesuai. Berikut kegiatan yang dilakukan dalam setiap tahapan:

3.3.1 Ide Studi

Ide studi didapatkan setelah *gap analysis* dilakukan dengan membandingkan kondisi riil dengan kondisi ideal yang menjadi permasalahan. Perbandingan antara kondisi riil dan kondisi ideal yang menjadi dasar dari studi pustaka ini adalah sebagai berikut:

- Kondisi riil: Terjadinya pencemaran air tanah oleh solar akibat berbagai aktivitas manusia. Belum banyak kajian referensi bioaugmentasi dalam meremediasi solar pada air tanah.
- Kondisi ideal: Terdapatnya penanggulangan pencemaran solar pada air tanah. Terdapat kajian literatur kemampuan bioaugmentasi bakteri dalam meremediasi solar pada air tanah.

3.3.2 Tujuan Studi

Tujuan studi pustaka ini menjawab rumusan masalah dan maksud dari ide studi yang dibuat yaitu mengkaji berbagai literatur yang berkaitan dengan pencemaran air tanah yang diakibatkan oleh solar, mengkaji berbagai literatur yang berkaitan dengan bioaugmentasi dalam meremediasi air tanah tercemar solar, dan membahas kasus

pencemaran solar pada air tanah di wilayah Yogyakarta dan dan pengaplikasian proses bioaugmentasi pada wilayah perairan yang terkontaminasi solar tersebut.

3.3.3 Metodologi Kajian Pustaka

1) Pengumpulan Data Sekunder

Data dikumpulkan dari pustaka yang berkaitan dengan ide pokok bahasan kajian pustaka yaitu tentang pencemaran air tanah, kontaminan solar, bioaugmentasi, bakteri. Diutamakan sumber dari literatur 10 tahun terakhir.

2) Analisis dan Penulisan Data Kajian Pustaka

Analisis data dilakukan dari hasil tabulasi pustaka. Hasil analisa tersebut kemudian akan dituliskan bab per bab.

3) Analisis dan Penulisan Studi Kasus Kajian Pustaka

Analisis dari suatu kasus yang berkaitan dengan topik pembahasan kajian pustaka. Studi kasus yang diambil adalah kasus pencemaran air tanah oleh solar di wilayah Yogyakarta.

4) Kesimpulan dan Saran

Penyimpulan dari hasil analisis studi pustaka dan pemberian saran terhadap hasil. Kesimpulan merupakan jawaban dari tujuan studi pustaka, sedangkan saran merupakan rekomendasi untuk penelitian selanjutnya.

3.3.4 Outline Laporan Tugas Akhir

Untuk memudahkan penyusunan Tugas Akhir ini, diperlukan outline laporan. Outline Laporan Tugas Akhir ini dapat disajikan secara sistematis sebagai berikut.

BAB I: Pendahuluan

Dalam bab ini akan diuraikan latar belakang penulisan, penjabaran rumusan masalah, tujuan penulisan, serta manfaat yang diperoleh dari dilakukannya studi literatur ini.

1.1 Latar Belakang

1.2 Rumusan Masalah

1.3 Tujuan

1.4 Ruang Lingkup

1.5 Manfaat

BAB II: Tinjauan Pustaka

Dalam bab ini akan diuraikan berbagai pustaka hasil tabulasi terkait topik studi literatur yang diangkat.

2.1 Air Tanah

2.2 Pencemaran Air Tanah

2.3 Teori Solar

2.4 Pencemaran Air Tanah oleh Solar

2.5 Bioremediasi Solar

2.6 Bioaugmentasi Solar

2.6.1 Mekanisme Biodegradasi Solar oleh Bakteri

2.6.2 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Bioaugmentasi

2.6.3 Kelebihan dan Kekurangan Bioaugmentasi

2.7 Bakteri Pendegradasi Solar

2.8 Literatur Terdahulu

2.9 Bakteri yang Dipilih untuk Studi Kasus

2.10 Baku Mutu yang Digunakan

BAB III: Metode Studi

Dalam bab ini akan dijabarkan alur proses penulisan studi literatur serta jenis-jenis pustaka yang akan digunakan.

3.1 Umum

3.1.1 Kajian Pustaka

3.1.2 Studi Kasus

3.2 Kerangka Studi

3.3 Sistematika Penulisan

BAB IV: Pembahasan Studi Kasus Berdasarkan Kajian Pustaka

Dalam bab ini akan diuraikan mengenai studi kasus berupa gambaran umum dari wilayah studi kasus dan perencanaan penyelesaian masalah pada studi kasus.

4.1 Profil Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta

4.2 Pencemaran Solar pada Air Tanah di Kecamatan Gedongtengen

4.3 Penanganan Pencemaran Air Tanah di Kecamatan Gedongtengen

4.4 Kajian Bioaugmentasi pada Air Tanah Tercemar Solar di Kecamatan Gedongtengen Menggunakan Isolat Konsorsium Bakteri

4.4.1 Karakteristik Air Tanah di Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta

4.4.2 Upaya Penyelesaian Kasus Pencemaran Solar pada Air Tanah di Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta

4.4.3 Skenario Penanganan Pencemaran Solar pada Air Tanah di Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta

BAB V: Penutup

Dalam bab ini akan dituliskan kesimpulan yang didapatkan dari hasil studi dan menjawab tujuan yang akan dicapai, serta saran yang dapat diberikan sebagai rujukan untuk penelitian selanjutnya.

5.1 Kesimpulan

5.2 Saran

BAB IV

PEMBAHASAN STUDI KASUS BERDASARKAN KAJIAN PUSTAKA

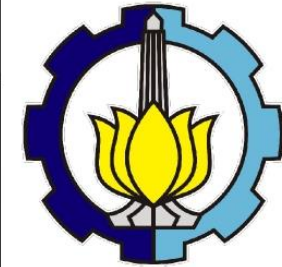
Metode bioaugmentasi dengan penambahan mikroorganisme bakteri untuk mengurangi konsentrasi kontaminan minyak solar pada wilayah air tanah yang tercemar merupakan salah satu metode yang dapat digunakan karena secara berkelanjutan dapat memperbaiki kualitas air tanah sehingga dapat dimanfaatkan kembali oleh masyarakat setempat untuk memenuhi kebutuhan air. Penerapan metode ini dilakukan pada kasus tercemarnya air tanah di Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta. Wilayah tersebut terdampak pencemaran solar akibat kebocoran tangki penyimpanan bahan bakar solar yang ada di Stasiun Tugu Yogyakarta.

4.1 Profil Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta

Kecamatan Gedongtengen merupakan salah satu dari 14 kecamatan yang ada di wilayah Kota Yogyakarta, yang terletak pada koordinat $7^{\circ}47'35,99''$ Lintang Selatan dan $110^{\circ}21'39,99''$ Bujur Timur. Kecamatan Gedongtengen memiliki luas wilayah $0,96 \text{ km}^2$ yang mencakup 2 kelurahan yaitu Kelurahan Pringgokusuman dan Kelurahan Sosromenduran dengan jumlah penduduk sebanyak 19.886 jiwa (Kecamatan Gedongtengen Dalam Angka, 2021).

Kelurahan Pringgokusuman terdiri dari 7 kampung yaitu Jlagran, Pringgokusuman, Gandekan, Kemetiran Lor, Kemetiran Kidul, Sutodirjan, dan Notoyudan. Kelurahan Sosromenduran juga terdiri dari 7 kampung yaitu Sitisewu, Sosrowijayan Wetan, Sosrowijayan Kulon, Sosrodipuran, Sosromenduran, Pajeksan dan Jogonegaran. Kecamatan ini berbatasan dengan Kecamatan Jetis di sebelah utara, Kecamatan Gondomanan dan Kecamatan Ngampilan di sebelah selatan, Sungai Winongo dan Kecamatan Tegalrejo di sebelah barat, dan Kecamatan Danurejan di sebelah timur (Pemerintah Kota Yogyakarta, 2022). Untuk peta wilayah dari Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta dapat dilihat pada **Gambar 4.1**.

Kecamatan Gedongtengen merupakan salah satu pusat Kota Yogyakarta yang banyak dikunjungi karena memiliki beberapa destinasi seperti Malioboro yang menjadi sentra perbelanjaan di Yogyakarta, Kampung Internasional Sosromenduran, dan Stasiun Tugu. Stasiun Tugu (**Gambar 4.2**) merupakan stasiun utama di Kota Yogyakarta yang dimiliki dan dikelola oleh PT Kereta Api Indonesia (Persero). Stasiun ini melayani pemberangkatan dan kedatangan kereta api kelas eksekutif dan hampir semua kelas campuran yang berada di jalur lintas tengah dan selatan Pulau Jawa. Stasiun Tugu dibangun di atas lahan seluas 96.112 m^2 dengan luas bangunan keseluruhan $74,128 \text{ m}^2$ dan memiliki usia cukup tua, dimana stasiun ini mulai beroperasi untuk umum pada 12 Mei 1887 (Kemendikbud, 2017). Dengan adanya transportasi kereta api, maka di Stasiun Tugu Yogyakarta disediakan tangki penyimpanan solar sebagai bahan bakar untuk transportasi tersebut.



DEPARTEMEN
Teknik Lingkungan
FT-SPK
Institut Teknologi Sepuluh
Nopember
Surabaya
2022

JUDUL

PETA WILAYAH KECAMATAN
GEDONGTENGEN, KOTA
YOGYAKARTA

DOSEN PEMBIMBING

Ipfung Fitri Purwanti, S.T., M.T.,
Ph.D

MAHASISWA

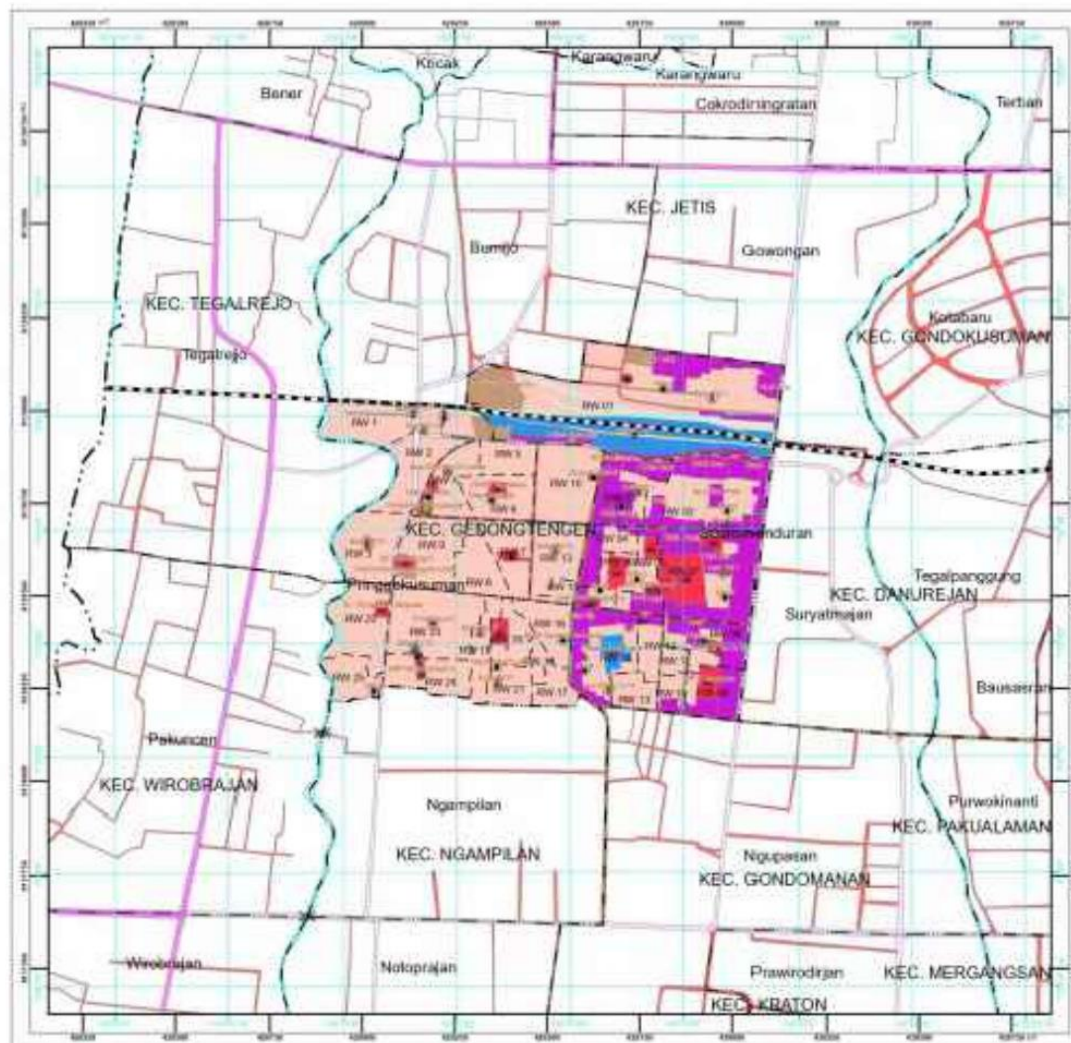
Achmad Dani Garcia

NRP

0321184000091

SKALA

1:10.000



Gambar 4.1 Peta Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta

Sumber: Pemerintah Kota Yogyakarta, 2022 <https://gedongtengenkec.jogjakota.go.id/page/index/peta-wilayah>

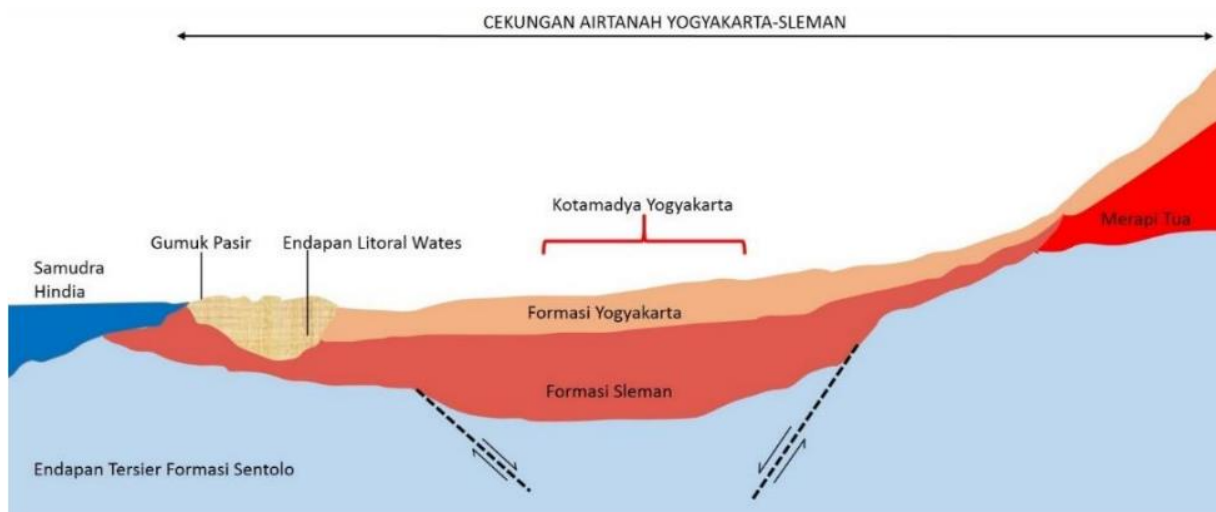


Gambar 4.2 Stasiun Tugu

Sumber: Kemendikbud, 2017

<http://cagarbudaya.kemdikbud.go.id/siteregnas/public/objek/detailcb/PO2015121500017/Stasiun-Kereta-Api-Tugu-Yogyakarta>

Sebagai pemenuhan kebutuhan air minum dan kebutuhan lainnya, masyarakat di Yogyakarta menggunakan air tanah sebagai salah satu sumber daya air. Sistem aliran air tanah di Yogyakarta berada di tengah cekungan air tanah Yogyakarta-Sleman, yang merupakan bagian dari sistem akuifer Merapi-Stratovulkanik. Sistem akuifer Merapi dibedakan menjadi dua akuifer utama, yaitu formasi Yogyakarta yang merupakan akuifer di bagian atas dan formasi Sleman yang merupakan akuifer di bagian bawah. Formasi Yogyakarta terbentang dari lereng tengah Merapi hingga pesisir pantai. Sedangkan formasi Sleman memanjang dari lereng atas Merapi hingga selatan Bantul. Bagian dasar dari sistem akuifer ini tersusun oleh padatan breksi dan lapisan lava endapan vulkanik Gunung Merapi Tua di bagian utara. Sedangkan di bagian tengah dan selatan tersusun oleh batu gamping, napal, dan tufa dari formasi Sentolo (Putra *et al.*, 2013). Di bagian atas formasi pada wilayah barat daya hingga selatan dan timur Yogyakarta merupakan dataran yang tertutup endapan aluvium dari Gunung Merapi Muda. Sedimen kuarter tersebut membentuk suatu sistem akuifer yang dinamakan Sistem Akuifer Merapi (Rahman *et al.*, 2018). Gambar potongan dari Graben Yogyakarta yang menunjukkan sistem akuifer Merapi dapat dilihat pada **Gambar 4.3**.



Gambar 4.3 Sistem Akuifer Merapi

Sumber: Cahyadi *et al.*, 2020

4.2 Pencemaran Solar pada Air Tanah di Kecamatan Gedongtengen

Di Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta, terdapat salah satu stasiun utama yakni Stasiun Tugu Yogyakarta yang beroperasi sejak tahun 1887. Kereta api merupakan salah satu transportasi yang menggunakan minyak solar sebagai bahan bakar, oleh karenanya PT Kereta Api Indonesia selaku pengelola membuat tangki penyimpanan solar yang ditanam di dalam tanah di wilayah Stasiun Tugu. Di tahun 2003, diberitakan bahwa sumur gali warga Jlagran dan Gandekan Lor, Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta yang biasa digunakan untuk kebutuhan rumah tangga tercemar solar (**Gambar 4.4**). Air sumur yang tercemar menjadi berwarna hitam, berminyak, dan berbau solar. PT Kereta Api Indonesia menanggapi bahwa hal tersebut dapat terjadi akibat kebocoran tangki solar di Stasiun Tugu Yogyakarta berkapasitas 35.000 liter yang merembes ke dalam tanah dan mencemari air tanah (Susilo, 2003). Kebocoran dari tangki penyimpanan solar diperkirakan terjadi dari tahun 1997 hingga 1998. Dengan debit kebocoran solar sebesar 300 liter per hari, membuat rembesan solar mencemari sumur warga dan dampaknya masih dirasakan warga hingga saat ini (Hendrayana *et al.*, 2021).



Gambar 4.4 Sumur Tercemar Solar di Jlagran dan Gandekan

Sumber: Susilo, 2003

<https://www.liputan6.com/news/read/51513/limbah-solar-stasiun-tugu-mencemari-sumur-warga>

Air tanah alami yang tidak tercemar umumnya tidak berwarna, tidak berbau, dan tidak berasa, serta secara kimia dan biologi tidak mengandung unsur biotik dan unsur kimia berbahaya. Air tanah yang tercemar akan mengalami perubahan fisik, kimia, dan biologis seperti munculnya bau, perubahan warna dan rasa, serta adanya unsur biotik dan zat kimia. Kadar hidrokarbon yang melebihi 0,3 mg/L dapat bersifat toksik bagi air tawar. Selain itu, pencemaran minyak solar juga dapat mengganggu organisme dalam air serta mengganggu kesehatan manusia. Masalah penyakit yang dapat ditimbulkan oleh pencemaran seperti penyakit kulit, ginjal, liver, dan gangguan organ dalam lainnya (Setyaningsih, 2010).

Air tanah banyak digunakan oleh warga Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta, baik itu untuk kebutuhan domestik maupun non domestik. Menurut Cahyadi *et al.* (2020), kebutuhan air di Kecamatan Gedongtengen adalah sebesar 932.921 m³/tahun dengan persentase sebesar 4,56% dari total kebutuhan air di Kota Yogyakarta. Data kebutuhan air di Kota Yogyakarta pada berbagai sektor disajikan dalam **Tabel 4.1**.

Tabel 4.1 Kebutuhan Air pada Berbagai Sektor di Kota Yogyakarta

No	Jenis Penggunaan (Sektor)	Kebutuhan Air	Persentase
1.	Domestik	18.515.662,00	90,43%
2.	Pertanian	518.499,00	2,53%
3.	Perikanan	0,64	0,01%
4.	Peternakan	6.530,14	0,03%
5.	Industri	40.922,97	0,20%
6.	Restoran	175.930,00	0,86%
7.	Sekolah	301.368,00	1,47%
8.	Kesehatan	246.265,00	1,20%
9.	Perkatoran	19.141,00	0,09%
10.	Tempat ibadah	70.518,00	0,34%
11.	Perhotelan	580.733,00	2,84%
Total Kebutuhan		10.475.470,75	100%

Sumber: Cahyadi *et al.*, 2020

Kebutuhan air di Kota Yogyakarta paling banyak digunakan untuk keperluan domestik, yaitu sebesar 90,43%. Di sisi lain, angka kebutuhan air untuk sektor lain tidak terlalu besar jika dibandingkan dengan kebutuhan domestik. Dari hasil perhitungan indeks pemakaian air tanah, secara umum Kota Yogyakarta memiliki indeks pemakaian air tanah 0,02 yang masuk klasifikasi kelas IV (aman). Indeks pemakaian air tanah dihitung dengan membagi total kebutuhan air dengan pemakaian air tanah. Indeks pemakaian air tanah digunakan untuk menggambarkan kondisi penggunaan air tanah. Kecamatan Gedongtengen sendiri memiliki indeks pemakaian air tanah 0,02 yang juga masuk klasifikasi IV dengan ketersediaan air tanah dinamis sebanyak 48.277.832 m³/tahun (Cahyadi *et al.*, 2020). Dengan tingginya kebutuhan air tanah, maka kualitas air tanah sangatlah penting. Apabila terjadi pencemaran yang membuat kualitas air tanah menjadi buruk, maka akan berdampak pada kondisi kesehatan masyarakat yang menggunakan air tanah tersebut.

Dampak dari pencemaran air tanah di Yogyakarta adalah timbulnya penyakit yang diderita oleh masyarakat. Penyakit yang diderita disebabkan oleh adanya pencemaran air tanah salah satunya yang paling umum adalah penyakit diare. Dalam **Tabel 2.3**, menunjukkan bahwa pencemaran solar dapat menimbulkan penyakit diare apabila tertelan oleh manusia. Tercatat pada tahun 2020, penderita penyakit diare di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta mencapai 10.276 jiwa. Berdasarkan urutan 10 penyakit yang paling banyak diderita di Daerah Istimewa Yogyakarta, diare mendapatkan peringkat ke-2 setelah penyakit hipertensi (DLHK Daerah Istimewa Yogyakarta, 2020). Hasil kajian morbiditas yang dilakukan oleh Subdit Diare dan Infeksi Saluran Pencernaan menunjukkan bahwa angka kesakitan diare semua umur di Yogyakarta adalah 270/1000 penduduk. Di Kota Yogyakarta sendiri target penemuan kasus diare di tahun 2020 di Kota Yogyakarta adalah 11.197 kasus, dengan penemuan kasus yang ditangani sebanyak 5.118 kasus. Dari 5.118 kasus diare yang ditangani oleh puskesmas, jumlah kasus pada perempuan sebanyak 2.846 kasus atau sebesar 54,44% dan jumlah kasus pada laki-laki sebanyak 2.382 kasus atau sebesar 45,46%. Data kasus diare di Kecamatan Gedongtengen dapat dilihat pada **Tabel 4.2**. Data laporan diare dari puskesmas menunjukkan

target penemuan kasus diare di Kecamatan Gedongtengen sebanyak 532 kasus penemuan kasus yang ditangani sebanyak 287 kasus (DINKES Kota Yogyakarta, 2021).

Tabel 4.2 Kasus Penyakit Diare di Kecamatan Gedongtengen Tahun 2020

No	Kasus Diare	Umur	Jumlah
1	Jumlah Target Penemuan	Semua Umur	532
		Balita	253
2	Dilayani	Semua Umur	287
		Balita	41

Sumber: Profil Kesehatan Kota Yogyakarta Tahun 2021 (data 2020)

4.3 Penanganan Pencemaran Air Tanah di Kecamatan Gedongtengen

Menurut Susilo (2003), setelah adanya indikasi kebocoran pada tangki penyimpanan solar berkapasitas 35.000 liter yang ada di Stasiun Tugu Yogyakarta, PT Kereta Api Indonesia telah melakukan perbaikan pada tangki sehingga kebocoran dapat dihentikan. Namun banyak dari solar telah merembes ke dalam tanah sehingga mencemari air tanah di bawahnya. PT Kereta Api Indonesia menemui warga dan melakukan mediasi untuk memberikan sosusi bagi pemenuhan kebutuhan air masyarakat. Bantuan air disalurkan agar warga yang air sumurnya tercemar limbah bahan bakar solar dapat melakukan aktivitas rumah tangga seperti biasanya.

Setelah kasus pencemaran solar terjadi, PT Kereta Api Indonesia melakukan pengambilan sampel air tanah dengan pengeboran (**Gambar 4.5**). Hasil dari sampel air tersebut kemudian akan dilakukan uji kelayakan (Saptono, 2019). PT Kereta Api Indonesia juga melakukan pembersihan sumur gali masyarakat dengan melakukan pemompaan. Pemompaan dilakukan di sumur warga yang berada di sekitar area yang terkena dampak pencemaran air tanah. Namun tidak ada pencatatan atau laporan untuk waktu pemompaan, laju debit pompa, dan durasi pemompaan (Manek *et al.*, 2021).

Di tahun 2020, Dinas Kesehatan DIY melaksanakan pemantauan kualitas air tanah pada sumur gali yang berlokasi di sekitar sumber pencemar dengan tujuan mengetahui kualitas air tanah dari sumur yang berada di dekat dengan sumber pencemar. Hasil dari pemantauan yang berupa Laporan Hasil Uji (LHU) dari laboratorium akan dianalisa dan disusun dalam sebuah laporan. Laporan hasil analisa tersebut selanjutnya dapat digunakan sebagai acuan untuk mengambil kebijakan terkait pengendalian pencemaran air (DLHK Daerah Istimewa Yogyakarta, 2020).

Menurut DLHK Daerah Istimewa Yogyakarta (2020), kondisi air tanah di Daerah Istimewa Yogyakarta masih didominasi oleh pencemaran bakteri koli. Sehingga pemantauan dan penanganan pencemaran air tanah hanya berfokus pada pencemaran bakteri E. coli. Oleh karena itu, penanganan spesifik untuk pencemaran kontaminan solar pada air tanah masih belum dilakukan oleh pemerintah. Perlu adanya penelitian dan analisis mengenai alternatif penanganan untuk menyelesaikan permasalahan perncemaran solar pada air tanah ini.



Gambar 4.5 Pengambilan Sampel Air Tanah Kecamatan Gedongtengen
Sumber: Saptono, 2019 <https://gedongtengenkec.jogjakota.go.id/detail/index/8609>

4.4 Kajian Bioaugmentasi Air Tanah di Kecamatan Gedongtengen Menggunakan Isolat Konsorsium Bakteri

Penanganan pencemaran air tanah dilakukan dengan terlebih dahulu menganalisis karakteristik dari air tanah di Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta.

4.4.1 Karakteristik Air Tanah Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta

Berikut adalah karakteristik air tanah yang ada di Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta.

a. Kedalaman Muka Air Tanah

Kedalaman muka air tanah di area Kecamatan Gedongtengen memiliki variasi dengan pola yang tidak merata akibat pengaruh elevasi muka tanah yang berbeda. Di tahun 2019 telah dilakukan pengukuran muka air tanah pada sumur gali di wilayah sekitar Stasiun Tugu Yogyakarta yang diapit oleh Sungai Winongo dan Sungai Code (Kecamatan Gedongtengen dan Danurejan). Pemetaan dilakukan dengan memplot nilai kedalaman muka air tanah sumur gali menggunakan metode interpolasi IDW (*Inverse Distance Weighting*). Dari pemetaan yang dilakukan, didapatkan kedalaman muka air tanah di wilayah penelitian yang bervariasi antara 4 meter hingga 16 meter di bawah permukaan tanah (Hendrayana *et al.*, 2021). Peta kedalaman muka air tanah dapat dilihat pada **Gambar 4.6**. dari peta tersebut ditemukan air tanah paling dangkal berada di sebelah timur di sekitar Sungai Code. Untuk area Kecamatan Gedongtengen, muka air tanah yang dalam berada di wilayah barat laut dan tengah hingga selatan. Sedangkan untuk muka air tanah yang lebih dangkal berada di wilayah utara dan barat dekat Sungai Winongo. Adapun kedalaman air tanah yang ada di wilayah Kota Yogyakarta juga bervariasi dan berbeda-beda di setiap bagian wilayah. Menurut Cahyadi *et al.* (2020), kedalaman rata-rata dari Formasi Yogyakarta adalah 40 meter. Adapun ketebalan akuifer yang ada di wilayah Kota Yogyakarta dominan berkisar antara 100 meter hingga 120 meter, dimana akuifer tersebut

termasuk cukup tebal. Hanya sedikit wilayah di bagian tenggara yang memiliki ketebalan akuifer 80 meter hingga 100 meter.

b. Arah dan Kecepatan Aliran Air Tanah

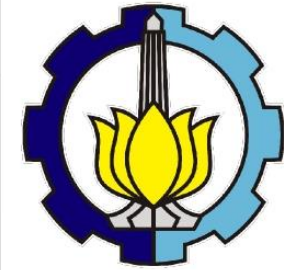
Secara umum, arah aliran air tanah di Kota Yogyakarta berasal dari Gunung Merapi di utara sebagai daerah resapan menuju ke pantai atau laut di arah selatan. Di beberapa wilayah aliran air tanah menjadi tidak seragam, ada yang mengarah ke timur dan juga ke arah barat. Hal tersebut dipengaruhi oleh adanya sungai-sungai yang membelah Kota Yogyakarta seperti Sungai Winongo dan Sungai Cade (Satapona *et al.*, 2018). Berdasarkan peta pola aliran air tanah yang ditunjukkan pada **Gambar 4.7**, aliran air tanah di Kecamatan Gedongtengen mengalir dari utara menuju selatan, barat, dan timur. Peta tersebut direkonstruksi berdasarkan pengukuran muka air tanah di 53 sumur. Pola aliran juga dipengaruhi oleh elevasi air tanah yang juga ditunjukkan dalam peta, dimana muka air tanah tertinggi berada di wilayah utara dan elevasi lebih rendah di wilayah barat, selatan, dan timur. Daerah penelitian pada peta menunjukkan muka air tanah berkisar antara 94 hingga 102 meter di atas permukaan laut (Hendrayana *et al.*, 2021).

Menurut Setyaningsuh (2010), ukuran dari *plume* akan bertambah dan semakin memanjang seiring berjalannya waktu akibat dari dispersi yang berhubungan dengan kecepatan aliran air tanah yang semakin meningkat. Kecepatan aliran air tanah yang rendah dapat membentuk *plume* yang terkonsentrasi, sedangkan kecepatan aliran yang tinggi akan membentuk *plume* yang lebih luas. Di dalam penelitian yang dilakukan, diketahui kecepatan aliran air tanah di Yogyakarta adalah 1,5 km/tahun.

c. Konsentrasi Kontaminan

Menurut Manek *et al.* (2021), konsentrasi awal pada wilayah sumber pencemar yang berupa titik tangki penyimpanan bahan bakar solar dan seluruh lokasi perawatan kereta diperkirakan berada pada kisaran 300 hingga 30000 mg/L. Dalam pemodelan yang telah dilakukan, secara umum konsentrasi bahan pencemar TOC (*Total Organic Carbon*) pada wilayah yang diamati adalah 3,7 mg/L. Konsentrasi bahan pencemar tersebut melebihi nilai baku mutu menurut EGASPIN, dimana baku mutu yang ada adalah 600 µg/L atau 0,6 mg/L. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa air tanah telah tercemar dan dapat menimbulkan berbagai permasalahan lingkungan dan kesehatan. Penelitian yang telah dilakukan menggunakan *tool Vario TOC Elementar* di Laboratorium GetIn-Cicero untuk pengujian level TOC. Pengujian dilakukan pada 53 lokasi sumur gali yang ditunjukkan pada **Gambar 4.8**.

Pengujian kadar TOC dilakukan dengan mengambil sampel air 1 meter di bawah permukaan air tanah karena polutan LNAPL masih dalam bentuk asli atau turunannya. Dari hasil pengujian TOC yang dilakukan, didapatkan 15 sumur gali yang tergolong tercemar oleh TOC pada area studi. Data dari pengujian fisik dan kadar TOC pada sumur gali warga ditunjukkan pada **Tabel 4.2**.



DEPARTEMEN
Teknik Lingkungan
FT-SPK
Institut Teknologi Sepuluh
Nopember
Surabaya
2022

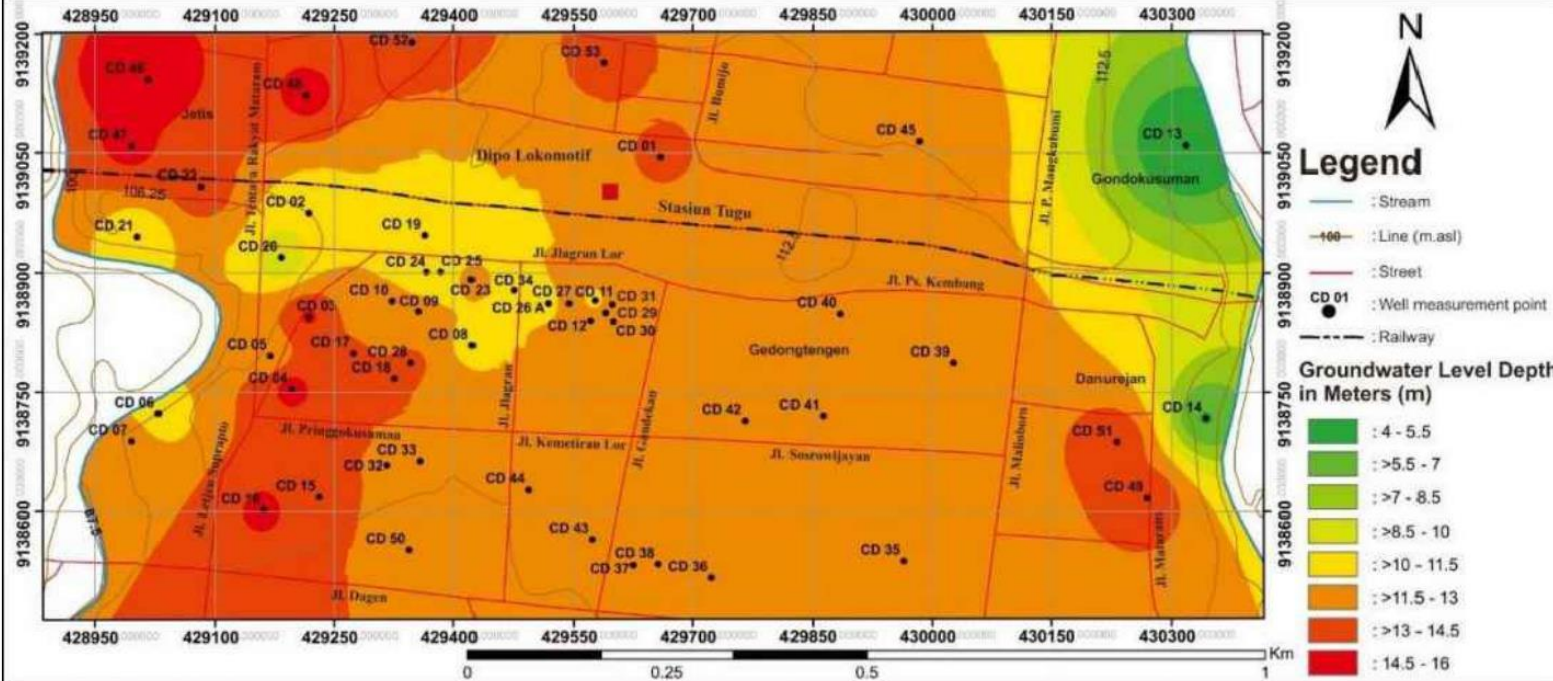
JUDUL
PETA KEDALAMAN MUKA AIR
TANAH

DOSEN PEMBIMBING
Ipung Fitri Purwanti, S.T., M.T.,
Ph.D

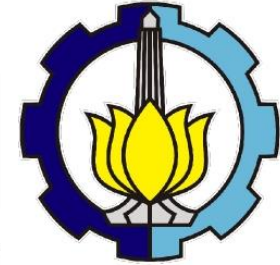
MAHASISWA
Achmad Dani Garcia

NRP
0321184000091

SKALA
1:5.000



Gambar 4.6 Peta Kedalaman Muka Air Tanah
Sumber: Hendrayana *et al.*, 2021



DEPARTEMEN
Teknik Lingkungan
FT-SPK
Institut Teknologi Sepuluh
Nopember
Surabaya
2022

JUDUL

PETA ALIRAN DAN ELEVASI
MUKA AIR TANAH

DOSEN PEMBIMBING

Ipung Fitri Purwanti, S.T., M.T.,
Ph.D

MAHASISWA

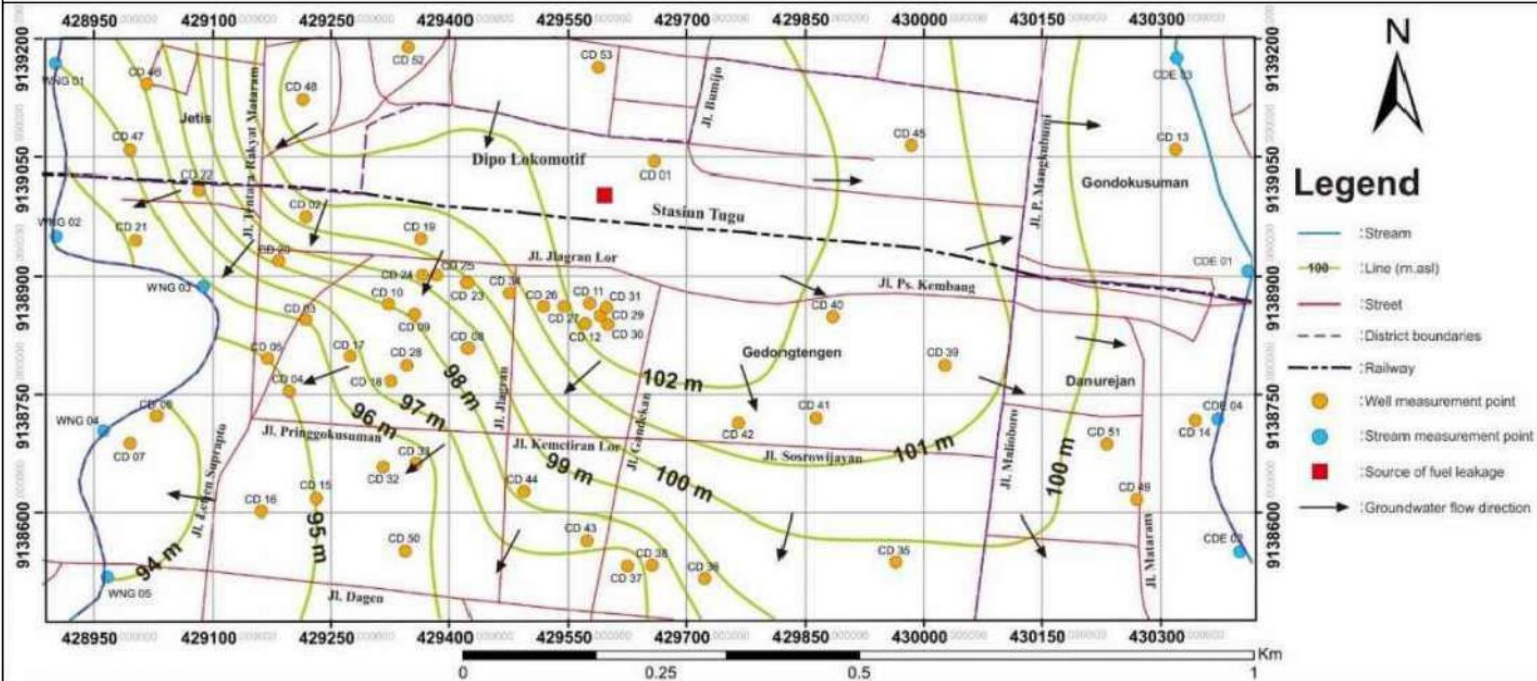
Achmad Dani Garcia

NRP

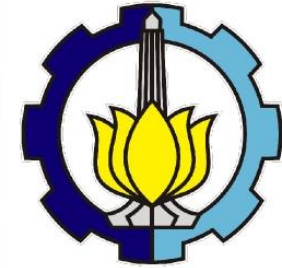
0321184000091

SKALA

1:5.000



Gambar 4.7 Peta Aliran dan Elevasi Muka Air Tanah
Sumber: Hendrayana *et al.*, 2021



DEPARTEMEN
Teknik Lingkungan
FT-SPK
Institut Teknologi Sepuluh
Nopember
Surabaya
2022

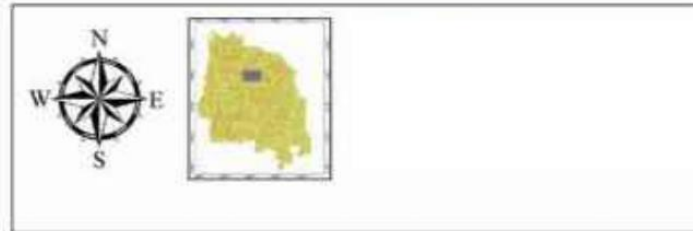
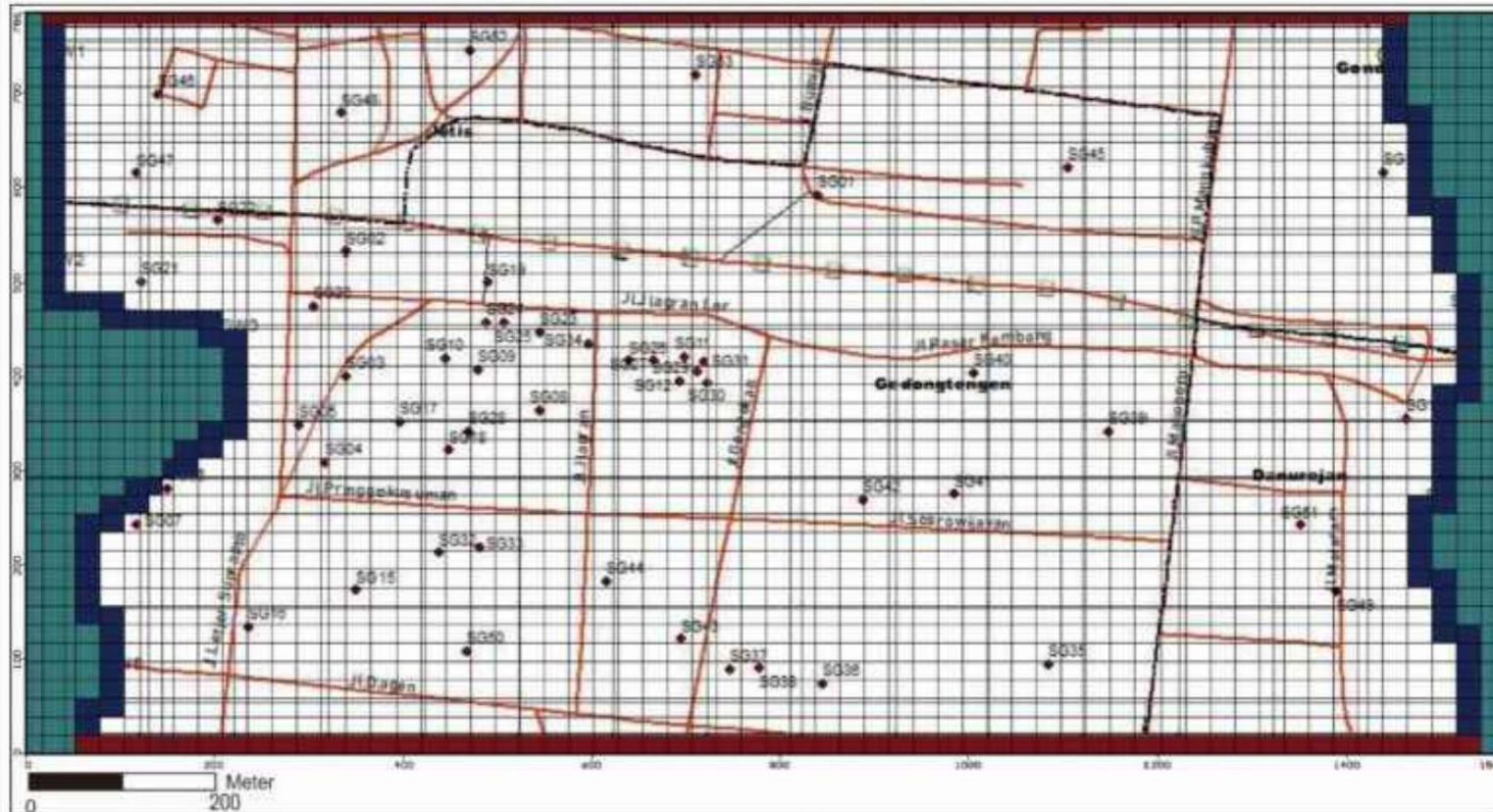
JUDUL
TITIK PENGUJIAN TOC PADA
SUMUR GALI

DOSEN PEMBIMBING
Ipung Fitri Purwanti, S.T., M.T.,
Ph.D

MAHASISWA
Achmad Dani Garcia

NRP
0321184000091

SKALA
1:5.000



Gambar 4.8 Titik Pengujian TOC pada Sumur Gali

Sumber: Manek *et al.*, 2021

Tabel 4.2 Data Pengujian TOC pada Sumur Gali

No	Kode Sumur	TOC (mg/L)	Deskripsi
1.	SG 08	5,02	Permukaan air keruh, berbau seperti solar
2.	SG 09	2,35	Jernih,tidak ada bau solar
3.	SG 10	6,28	Jernih,tidak ada bau solar
4.	SG 11	25,49	Sedikit keruh, sangat berbau solar, terdapat beberapa kotoran
5.	SG 12	10.42	Keruh, sedikit berbau solar
6.	SG 19	5,89	Jernih,tidak ada bau solar
7.	SG 23	9,35	Jernih, sedikit berbau solar
8.	SG 25	13,41	Sedikit keruh, sedikit berbau solar, tidak digunakan
9.	SG 26	18,10	Terdapat LNAPL <i>cake</i> , tebal dan sangat berbau solar
10	SG 27	17,69	Berbau minyak solar, dan keruh berwarna kekuningan
11.	SG 28	5,35	Jernih, sedikit berbau solar
12.	SG 29	9,42	Jernih, berbau solar
13.	SG 30	4,88	Jernih, sedikit berbau solar
14.	SG 31	5,97	Jernih, sedikit berbau solar
15.	SG 34	19,68	Sedikit keruh berwarna kekuningan dan berbau minyak solar

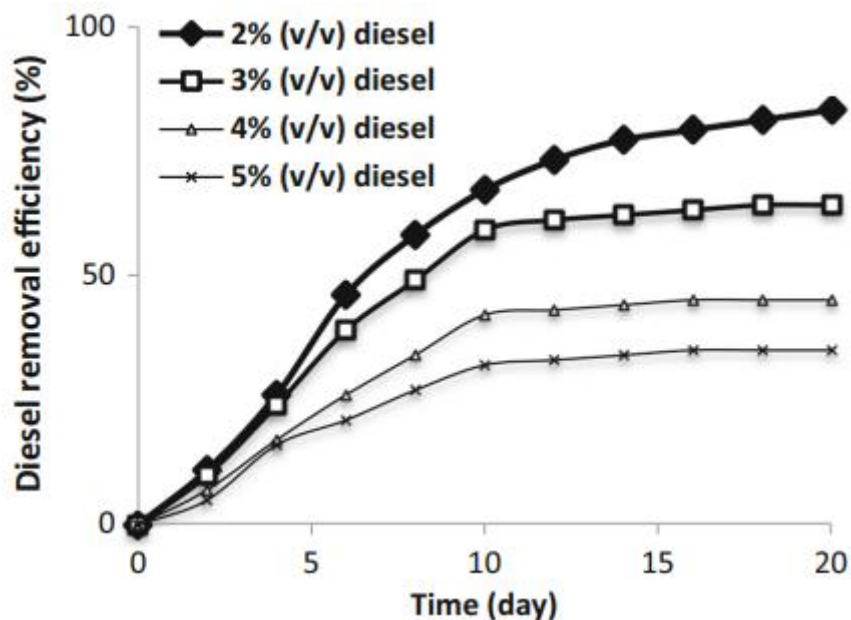
Sumber: Manek et al., 2021

4.4.2 Upaya Penyelesaian Kasus Pencemaran Solar pada Solar di Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta

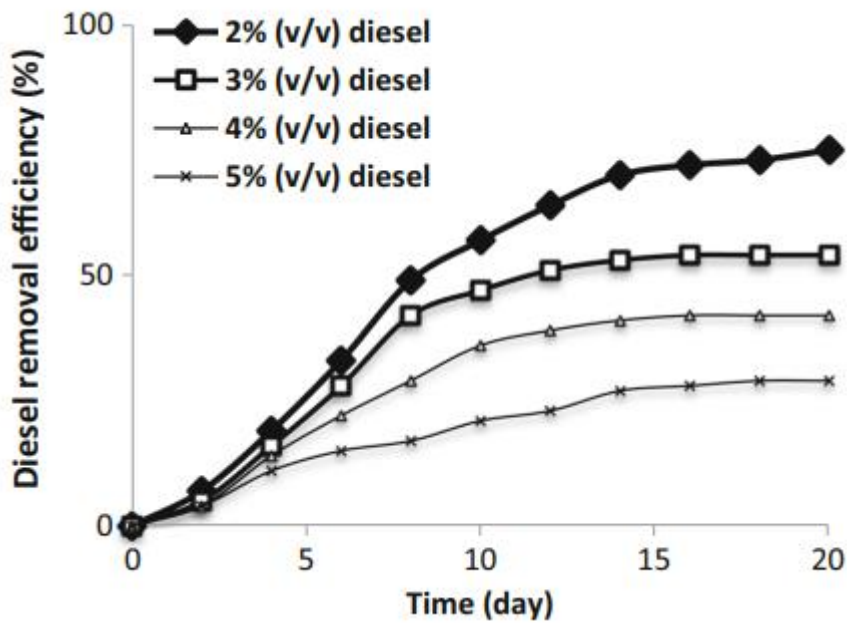
Dalam penelitian Safdari *et al.* (2017), dilakukan pengujian efisiensi bakteri kultur tunggal dalam proses degradasi kandungan polutan solar pada air. Isolat bakteri tersebut didapatkan dari sampel tanah yang tercemar *petroleum hydrocarbon*. Penelitian tersebut menggunakan dua jenis bakteri indigen pada tanah yang tercemar yaitu *Pseudomonas aeruginosa* dan *Bacillus subtilis* sebagai isolat tunggal. Masing-masing isolat diambil 1 mL dan diinokulasikan ke dalam labu erlenmeyer 250 mL berisi 50 mL media dengan tingkat konsentrasi 2%, 3%, 4%, dan 5% (v/v) solar sebagai sumber pencemar. Masing-masing labu erlenmeyer diinkubasi pada suhu 30 °C selama 20 hari. Kandungan hidrokarbon dianalisis menggunakan kromatografi gas (*Agilent Technologies 7890 A GCSystem*) yang dilengkapi dengan kolom kapiler HP-5 (30 m × 250 m × 0,25 m). Gas helium digunakan sebagai gas karier. Hasil dari penelitian menunjukkan isolat bakteri *P. aeruginosa* dan *B. subtilis* memiliki efisiensi biodegradasi yang tinggi khususnya pada konsentrasi solar yang rendah (2% v/v). Hasil dari isolat tunggal *P. aeruginosa* didapatkan degradasi solar mendekati 80% dalam 12 hari pertama dan pada

hari ke-20 berhasil mendegradasi polutan solar sebanyak 87%. Grafik kemampuan degradasi kontaminan solar oleh bakteri *Pseudomonas aeruginosa* ditunjukkan dalam **Gambar 4.9**. Hasil dari isolat tunggal *Bacillus subtilis* didapatkan degradasi solar sebanyak 69% dalam 12 hari pertama dan pada hari ke-20 berhasil mendegradasi polutan solar sebanyak 75%. Grafik kemampuan degradasi kontaminan solar oleh bakteri *Bacillus subtilis* ditunjukkan dalam **Gambar 4.10**. Dari hasil penelitian juga didapatkan bahwa penambahan konsentrasi polutan solar mempengaruhi efisiensi dari biodegradasi. Dengan penambahan konsentrasi solar dari 2% ke 5%, efisiensi biodegradasi oleh isolat *P. aeruginosa* menurun dari 87% menjadi hanya 35%. Sedangkan pada isolat *B. subtilis* menurun dari 75% menjadi hanya 29%.

Penelitian dari Kurnia *et al.* (2018), melakukan pengujian efisiensi dari isolat bakteri tunggal dan konsorsium dalam mendegradasi benzena dari polutan hidrokarbon. Penelitian tersebut menggunakan isolat tunggal *Pseudomonas aeruginosa* dan *Bacillus subtilis*, serta isolat gabungan dari keduanya sebagai konsorsium bakteri. Inokulat dengan konsentrasi 10% digunakan dan diinokulasikan ke dalam media BHB dan minyak dengan konsentrasi 1%, 10%, 17%, dan 20% (v/v) yang kemudian diinkubasi pada suhu ruang. Pengamatan dilakukan selama 23 hari. Data efisiensi dari ketiga jenis isolat dalam mendegradasi benzena dapat dilihat dalam **Tabel 4.3**. Dari data tersebut menunjukkan bahwa isolat tunggal *Pseudomonas aeruginosa* dan konsorsium bakteri memiliki efisiensi yang tinggi dalam mendegradasi kandungan benzena.



Gambar 4.9 Efisiensi Biodegradasi Solar oleh Isolat Tunggal *Pseudomonas aeruginosa*
 Sumber: Safdari *et al.*, 2017



Gambar 4.10 Efisiensi Biodegradasi Solar oleh Isolat Tunggal *Bacillus subtilis*
 Sumber: Safdari *et al.*, 2017

Tabel 4.3 Efisiensi Degradasi Senyawa Benzena

No	Senyawa Benzena	Persentase Degradasi		
		<i>Bacillus subtilis</i>	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Mixed culture
1.	1,2,4-Trimetilbenzena	93,00%	99,99%	98,67%
2.	1,2,4,5-Tetrametilbenzena	82,60%	99,99%	99,99%
3.	1,3-Dimetil-5-Isopropilbenzena	58,62%	99,99%	86,94%

Sumber: Kurnia *et al.*, 2018

Dari hasil tersebut, akan digunakan bakteri kultur campuran untuk bioaugmentasi pada air tanah sebagai upaya dalam penyelesaian kasus pencemaran solar pada air tanah yang dilakukan dalam tugas akhir ini. Polutan solar terdiri dari beberapa jenis senyawa hidrokarbon seperti alifatik, aromatik, dan olefin. Oleh karena itu, dipilih *mixed culture* karena penggunaan spesies bakteri yang berbeda memiliki kemampuan degradasi pada komponen senyawa dalam solar yang berbeda. Maka, efisiensi degradasi solar akan menjadi lebih tinggi. Kultur campuran yang dipakai menggunakan bakteri *Pseudomonas aeruginosa* dan *Bacillus subtilis*. Bakteri tersebut dipilih karena memiliki persentase efisiensi degradasi polutan solar yang cukup tinggi sehingga efektif untuk digunakan dalam proses bioaugmentasi. Diperkirakan efisiensi dari konsorsium bakteri dalam mendegradasi TPH dalam solar adalah 75% - 87%. Dan untuk efisiensi senyawa benzena sebagai bagian dalam minyak solar sebanyak 87% - 99%.

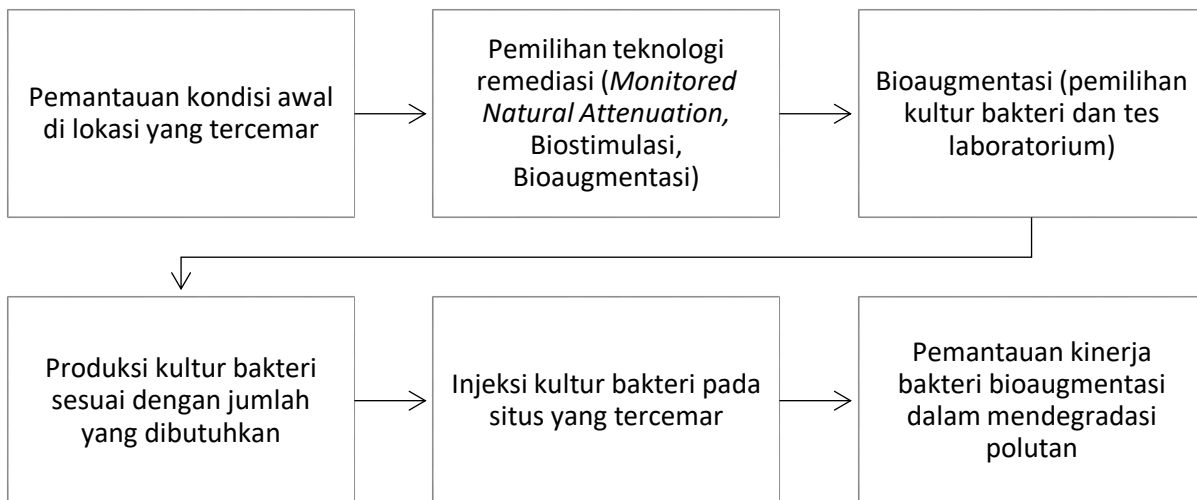
4.4.3 Skenario Penanganan Pencemaran Solar pada Air Tanah di Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta

Penanganan kasus yang diambil adalah pencemaran solar pada air tanah di wilayah Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta. Pencemaran terjadi akibat dari kebocoran tangki penyimpanan minyak solar sebagai bahan bakar untuk kereta api milik PT Kereta Api Indonesia di Stasiun Tugu Yogyakarta. Tangki penyimpanan yang ditanam di dalam tanah mengalami kebocoran sehingga solar merembes ke dalam tanah dan mencemari air tanah dan sumur-sumur milik warga. Kontaminan solar yang mencemari Pencemaran yang terjadi tidak mendapatkan penanganan yang baik sehingga dampaknya masih dapat dirasakan hingga saat ini.

Dalam studi kasus air tanah Kecamatan Gedongtengen ini, akan dilakukan penanganan pada wilayah yang mencakup area *plume* kontaminan solar. Area ini khususnya mencakup wilayah Jlagran dan Glodokan yang memiliki konsentrasi kontaminan yang tinggi. Dari pemodelan yang telah dilakukan, *plume* kontaminan solar memiliki panjang 370 m dan lebar 270 m (Manek *et al.*, 2021). Kedalaman dari kontaminan mencemari wilayah tersebut hingga kedalaman 14 m sehingga menyebabkan air menjadi berbau solar (Hendrayana *et al.*, 2021).

Proses bioaugmentasi dilakukan sesuai dengan langkah-langkah yang tertera pada bagan alir **Gambar 4.11**. Langkah awal yang harus dilakukan adalah melakukan pemantauan awal pada lokasi yang tercemar untuk mengetahui kondisi awal dari area tersebut. Selanjutnya adalah pemilihan teknologi yang terdiri dari *monitored natural attenuation*, biostimulasi, dan bioaugmentasi. Hal tersebut bergantung pada kondisi awal dan kemampuan bakteri *indigenous* dalam melakukan degradasi polutan yang ada. Bioaugmentasi dipilih apabila bakteri *indigenous* tidak efisien dalam mendegradasi polutan. Bioaugmentasi dilakukan dengan melakukan seleksi kultur bakteri dan tes laboratorium terlebih dahulu. Setelah itu dilakukan produksi dan inokulasi kultur bakteri sesuai dengan jumlah yang dibutuhkan. Setelah bakteri siap, maka kultur bakteri akan diinjeksikan pada area yang tercemar. Kemudian setelah dilakukan injeksi, harus dilakukan pengamatan secara berkala untuk memantau kinerja dari kultur bakteri yang telah ditambahkan dalam mendegradasi polutan yang ada pada area tercemar.

Dari berbagai metode bioremediasi, berdasarkan pemberian perlakuan ada dua teknologi bioremediasi utama yaitu bioaugmentasi dan biostimulasi. Bioaugmentasi dilakukan dengan menginokulasi bakteri luar atau *exogenous* untuk mendegradasi polutan. Biostimulasi dilakukan melalui penambahan nutrisi untuk mencegah keterbatasan atau kekurangan metabolik dan menstimulasi mikroorganisme agar dapat meningkatkan kapasitas degradasi (Wu *et al.*, 2016). Untuk mencegah keterbatasan *bioavailability* yang dapat menghambat proses bioaugmentasi, perlu dilakukan biostimulasi. Nutrisi yang ditambahkan mencakup nitrogen (N) dan fosfor (F) yang bisa didapat melalui penambahan pupuk, serta oksigen (O₂) yang dibutuhkan bakteri untuk hidup dan mendegradasi polutan solar. Penelitian yang dilakukan oleh Bento *et al.* (2005) menunjukkan bahwa proses biodegradasi polutan solar yang disertai dengan biostimulasi penambahan nutrisi N dan P yang dilakukan pada tanah di Hong Kong berlangsung selama 12 minggu.



Gambar 4.11 Skema Proses Bioaugmentasi

Sumber: Steffan *et al.*, 2010

Ditentukan volume air tanah yang menjadi media dalam bioaugmentasi menggunakan bakteri. Volume air tanah didapatkan dari debit air tanah yang ada di wilayah kajian yaitu Kecamatan Gedongtengen. Menurut penelitian Cahyadi *et al.* (2020), debit air tanah yang ada di Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta adalah 13.166.681 m³/tahun. Dengan waktu bioaugmentasi 12 minggu, berikut adalah perhitungan volume air tanah.

$$\begin{aligned} \text{Debit air tanah} &= 13.166.681 \text{ m}^3/\text{tahun} \\ &= 252.511,69 \text{ m}^3/\text{minggu} \end{aligned}$$

$$\text{Waktu bioaugmentasi} = 12 \text{ minggu}$$

$$\begin{aligned} \text{Volume air tanah} &= \text{Debit air tanah} \times \text{Waktu bioaugmentasi} \\ &= 252.511,69 \text{ m}^3/\text{minggu} \times 12 \text{ minggu} \\ &= 3.030.140,28 \text{ m}^3 \\ &= 3.030.140,28 \times 10^3 \text{ L} \end{aligned}$$

Selanjutnya, ditentukan luas zona yang tercemar dan akan dilakukan bioaugmentasi untuk menentukan volume area pencemaran *plume*. Panjang yang digunakan adalah 370 m dengan lebar yang digunakan adalah 270 m, sehingga didapatkan luas zona bioaugmentasi adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{Luas zona bioaugmentasi} &= \text{Panjang } \textit{plume} \times \text{Lebar } \textit{plume} \\ &= 370 \text{ m} \times 270 \text{ m} \\ &= 99.900 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Volume area pencemaran} &= \frac{\text{Luas zona bioaugmentasi}}{\text{Luas Kecamatan Gedongtengen}} \times \text{Volume air tanah} \\
&= \frac{99.900 \text{ m}^2}{0,96 \text{ km}^2} \times 3.030.140,28 \times 10^3 \text{ L} \\
&= 315.323.973 \text{ L}
\end{aligned}$$

Berdasarkan volume area pencemaran yang telah dihitung maka dapat ditentukan volume pencemaran *plume* serta beban polutan solar pada air tanah yang ada di wilayah tersebut. Konsentrasi rata-rata pada wilayah studi adalah 3,7 mg/L (Manek *et al.*, 2021). Kontaminan solar ini dapat bergerak ke bawah melalui proses perkolasi dan mencemari hingga kedalaman 14 meter (Hendrayana *et al.*, 2021). Adapun kedalaman air tanah rata-rata yang ada di Formasi Yogyakarta adalah 40 meter (Cahyadi *et al.*, 2020). Selain itu, diketahui bahwa ketebalan *unsaturated zone* pada tanah di Yogyakarta adalah 5 meter (Souvannachith *et al.*, 2017). Maka penentuan volume pencemaran dan beban polutan adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
\text{Kedalaman pencemaran} &= 14 \text{ m} \\
\text{Ketebalan } \textit{unsaturated zone} &= 5 \text{ m} \\
\text{Ketebalan pencemaran} &= \text{Kedalaman pencemaran} - \text{Ketebalan } \textit{unsaturated zone} \\
&= 14 \text{ m} - 5 \text{ m} \\
&= 9 \text{ m} \\
\text{Volume pencemaran} &= \frac{\text{Ketebalan pencemaran}}{\text{Kedalaman air tanah}} \times \text{Volume area pencemaran} \\
&= \frac{9 \text{ m}}{40 \text{ m}} \times 315.323.973 \text{ L} \\
&= 70.947.983,9 \text{ L} \\
\text{Beban polutan} &= \text{Konsentrasi} \times \text{volume pencemaran} \\
&= 3,7 \text{ mg/L} \times 70.947.983,9 \text{ L} \\
&= 262.507.207 \text{ mg} \\
&= 262.507,207 \text{ g}
\end{aligned}$$

Dalam aplikasi bioaugmentasi, perlu juga dilakukan biostimulasi untuk mendukung pertumbuhan bakteri yang menjadi agen biodegradasi. Biostimulasi adalah penambahan nutrisi ke situs yang tercemar. Nutrisi merupakan faktor yang sangat berpengaruh dalam sintesis dan pertumbuhan sel serta aktivitas enzim yang dihasilkan oleh bakteri dalam proses degradasi polutan. Beberapa nutrisi penting yang dibutuhkan oleh bakteri adalah karbon (C), nitrogen (N), dan fosfor (P). Karbon digunakan sebagai sumber energi bagi mikroorganisme untuk aktivitasnya, sedangkan nitrogen dan fosfor sebagai penyusun senyawa-senyawa penting dalam sel yang menentukan aktivitas pertumbuhan mikroorganisme. Ketiga unsur tersebut harus ada dalam rasio yang tepat

agar pertumbuhan bakteri menjadi optimal. Dalam penelitian yang telah dilakukan, didapatkan rasio C:N:P optimum pada proses biodegradasi benzena-toluena adalah 100:10:1 (Wulan *et al.*, 2011). Polutan solar yang merupakan senyawa hidrokarbon dapat menjadi sumber karbon bagi bakteri sehingga jumlah karbon yang ada di area tercemar sama dengan beban polutan. Berikut merupakan perhitungan jumlah nutrisi yang harus dipenuhi untuk mencapai rasio C:N:P optimum untuk menstimulasi pertumbuhan bakteri.

- Karbon

Karena polutan solar akan menjadi sumber karbon utama bagi bakteri, maka jumlah massa karbon sama dengan jumlah beban polutan yang ada di area tercemar.

$$\begin{aligned} \text{Massa C} &= \text{Beban polutan} \\ &= 262.507,207 \text{ g} \\ &= 262,5 \text{ kg} \end{aligned}$$

- Nitrogen

Rasio C:N:P yang digunakan adalah 100:10:1, maka jumlah massa nitrogen yang perlu dipenuhi adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{Massa N} &= \frac{10}{100} \times \text{massa C} \\ &= \frac{10}{100} \times 262,5 \text{ kg} \\ &= 26,25 \text{ kg} \end{aligned}$$

- Fosfor

Rasio C:N:P yang digunakan adalah 100:10:1, maka jumlah massa fosfor yang perlu dipenuhi adalah sebagai berikut.

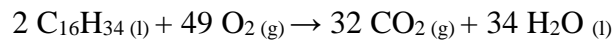
$$\begin{aligned} \text{Massa P} &= \frac{1}{100} \times \text{massa C} \\ &= \frac{1}{100} \times 262,5 \text{ kg} \\ &= 2,625 \text{ kg} \end{aligned}$$

Untuk proses biostimulasi dalam pemenuhan nutrisi bagi bakteri, dapat digunakan pupuk yang mengandung nitrogen dan fosfor sebagai biostimulan. Jenis biostimulan yang digunakan dapat berupa pupuk anorganik maupun pupuk organik. Jenis pupuk anorganik yang dapat digunakan adalah pupuk NPK. Pupuk NPK ini mengandung nitrogen dan fosfor yang berfungsi sebagai nutrisi bagi bakteri. Penggunaan pupuk anorganik ini telah banyak digunakan, baik sebagai sumber hara maupun biostimulan. Namun, pupuk anorganik memiliki beberapa dampak buruk seperti biaya yang relatif lebih besar, dapat menyebabkan toksisitas pada tanah dan tanaman, serta kemungkinan terjadinya eutrofikasi terutama di lingkungan perairan (Nwankwegu *et al.*, 2016). Oleh karena itu, alternatif lain yang dapat dilakukan adalah dengan menggunakan biostimulan yang berasal dari pupuk kompos organik.

Pupuk organik dapat berasal dari limbah yang telah diolah. Beberapa limbah dapat diolah menjadi pupuk melalui proses fermentasi dan dekomposisi sehingga dapat digunakan sebagai sumber N dan P bagi bakteri. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Akbari *et al.* (2015), limbah dari kulit pisang kepok (*Musa paradisiaca formatypica*) dan tanaman *Mucuna bracteata* yang melalui proses dekomposisi dapat digunakan sebagai pupuk kompos. Kadar N yang dihasilkan dari kompos tersebut adalah 3,44% dan kadar P adalah 0,35%. Kadar tersebut sesuai dengan SNI: 19-7030-2004, dimana kadar minimum N adalah 0,4% dan kadar P adalah 0,1%. Nutrien ditambahkan dengan cara dilarutkan dengan air tanah yang ada di wilayah studi. Larutan nutrisi kemudian diinjeksikan ke

dalam tanah agar nantinya bakteri yang ditambahkan dapat hidup karena kebutuhan nutrisinya dapat terpenuhi.

Selain nutrisi berupa nitrogen dan fosfor, penambahan oksigen juga diperlukan. Hal ini dikarenakan bakteri bekerja secara aerobik dan pada proses biodegradasi diperlukan oksigen di dalamnya. Teknik penambahan oksigen ini disebut juga sebagai biosparging. Biosparging ini menggunakan oksigen yang ditingkatkan dalam air tanah, sehingga meningkatkan laju biodegradasi polutan oleh mikroorganisme. Proses biosparging membutuhkan injeksi udara bertekanan rendah di bawah permukaan air (Parween *et al.*, 2018). Kebutuhan penambahan oksigen dapat dihitung melalui stoikiometri dari reaksi oksidasi solar ($C_{16}H_{34}$) yang menghasilkan CO_2 dan H_2O seperti berikut.



Dari reaksi tersebut dihitung jumlah mol (n) dari solar dan oksigen untuk kemudian menentukan volume kebutuhan oksigen. Selanjutnya dapat dihitung kebutuhan udara yang diinjeksikan oleh *blower*. Diketahui massa solar sama dengan beban polutan. Perhitungan kebutuhan oksigen adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 \text{Massa } C_{16}H_{34} &= \text{Beban polutan} \\
 &= 262.507,207 \text{ g} \\
 \text{Mr } C_{16}H_{34} &= 2 ((16 \times \text{Ar C}) + (34 \times \text{Ar H})) \\
 &= 2 ((16 \times 12) + (34 \times 1)) \\
 &= 452 \text{ g/mol} \\
 n \text{ } C_{16}H_{34} &= \frac{\text{Massa } C_{16}H_{34}}{\text{Mr } C_{16}H_{34}} \\
 &= \frac{262.507,207}{452 \text{ g/mol}} \\
 &= 580,768 \text{ mol} \\
 n \text{ } O_2 &= \frac{\text{Koefisien } O_2}{\text{Koefisien } C_{16}H_{34}} \times n \text{ } C_{16}H_{34} \\
 &= \frac{49}{2} \times 580,768 \text{ mol} \\
 &= 14.228,82 \text{ mol} \\
 \text{Volume } O_2 &= n \text{ } O_2 \times \text{Volume molar (V}_m) \\
 &= 14.228,82 \text{ mol} \times 22,4 \text{ L/mol} \\
 &= 318.725,564 \text{ L} \\
 \text{Waktu bioaugmentasi} &= 12 \text{ minggu} \\
 &= 84 \text{ hari} \\
 \text{Kebutuhan } O_2 &= \frac{\text{Volume } O_2}{\text{Waktu bioaugmentasi}}
 \end{aligned}$$

$$= \frac{318.725,564 \text{ L}}{84 \text{ hari}}$$

$$= 3.794,35 \text{ L/hari}$$

Dari kebutuhan oksigen yang sudah didapatkan, maka dapat dihitung jumlah kebutuhan udara yang diperlukan. Bila efisiensi transfer oksigen ditetapkan 10%, maka perhitungan kebutuhan udara yang perlu diinjeksikan adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{Efisiensi transfer O}_2 &= 10\% \\ \text{Kebutuhan udara} &= \frac{\text{Kebutuhan O}_2}{\text{Efisiensi transfer O}_2} \\ &= \frac{3.794,35 \text{ L/hari}}{0,1} \\ &= 37.943,52 \text{ L/hari} \\ &= 37,94 \text{ m}^3/\text{hari} \end{aligned}$$

Selanjutnya kultur bakteri ditambahkan dengan menentukan jumlah bakteri atau inokulum yang akan ditambahkan untuk melakukan bioaugmentasi pada air tanah tercemar sebanyak 70.947.983,9 L. Penentuan dilakukan dengan menghitung penambahan inokulat dari kultur campuran. Kultur campuran yang digunakan adalah konsorsium bakteri yang terdiri dari bakteri *Pseudomonas aeruginosa* dan *Bacillus subtilis*. Menurut penelitian Kurnia *et al.* (2018), inokulum dibuat sebanyak 30 mL dengan konsentrasi 10% (v/v) dengan kerapatan sel 1×10^9 CFU/mL. Maka jumlah bakteri (x) yang dibutuhkan untuk menurunkan konsentrasi polutan sebanyak 262.507,207 gram adalah sebagai berikut.

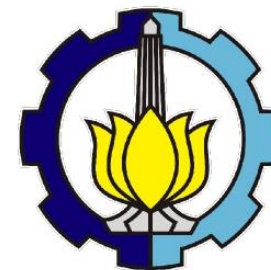
$$\begin{aligned} \frac{262.507,207 \text{ g}}{30 \text{ g}} &= \frac{x \text{ mL}}{3 \text{ mL}} \\ x &= \frac{262.507,207 \text{ g}}{30 \text{ g}} \times 3 \text{ mL} \\ x &= 26.250,72 \text{ mL} \\ x &= 0,026 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Maka jumlah inokulum bakteri yang dimasukkan adalah:

$$\begin{aligned} &= \text{Jumlah bakteri} \times \text{kerapatan bakteri} \\ &= 26.250,72 \text{ mL} \times 10^9 \text{ CFU/mL} \end{aligned}$$

Penambahan penambahan bakteri dilakukan dengan cara menginjeksikannya ke dalam air tanah melalui sumur. Adapun peta model penyebaran *plume* di wilayah kajian dapat dilihat pada **Gambar 4.12**. Injeksi dilakukan melalui pipa yang dimasukkan ke dalam sumur injeksi. Pipa yang digunakan untuk sumur injeksi inokulum bakteri adalah pipa PVC dengan diameter 6 inci atau 15,24 cm (Steffan *et al.*, 2010). Untuk penambahan oksigen atau *air sparging* digunakan pipa PVC dengan diameter 50 mm atau 5 cm dan dipasang hingga kedalaman 9,5 meter. Bagian pipa antara kedalaman 6 meter hingga 9,5 dilubangi (Lee *et al.*, 2014). Detail perencanaan sumur injeksi dapat dilihat pada **Gambar 4.13**.

Model Penyebaran *Plume* Setelah 10 Tahun Kelurahan Jagran dan Sekitarnya



DEPARTEMEN
Teknik Lingkungan
FT-SPK
Institut Teknologi Sepuluh
Nopember
Surabaya
2022

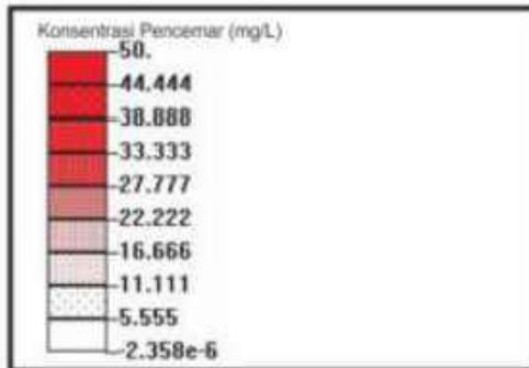
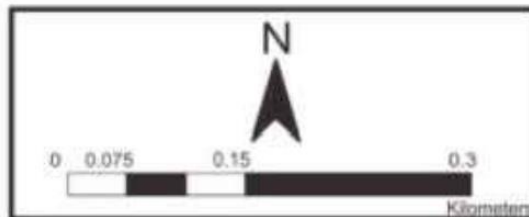
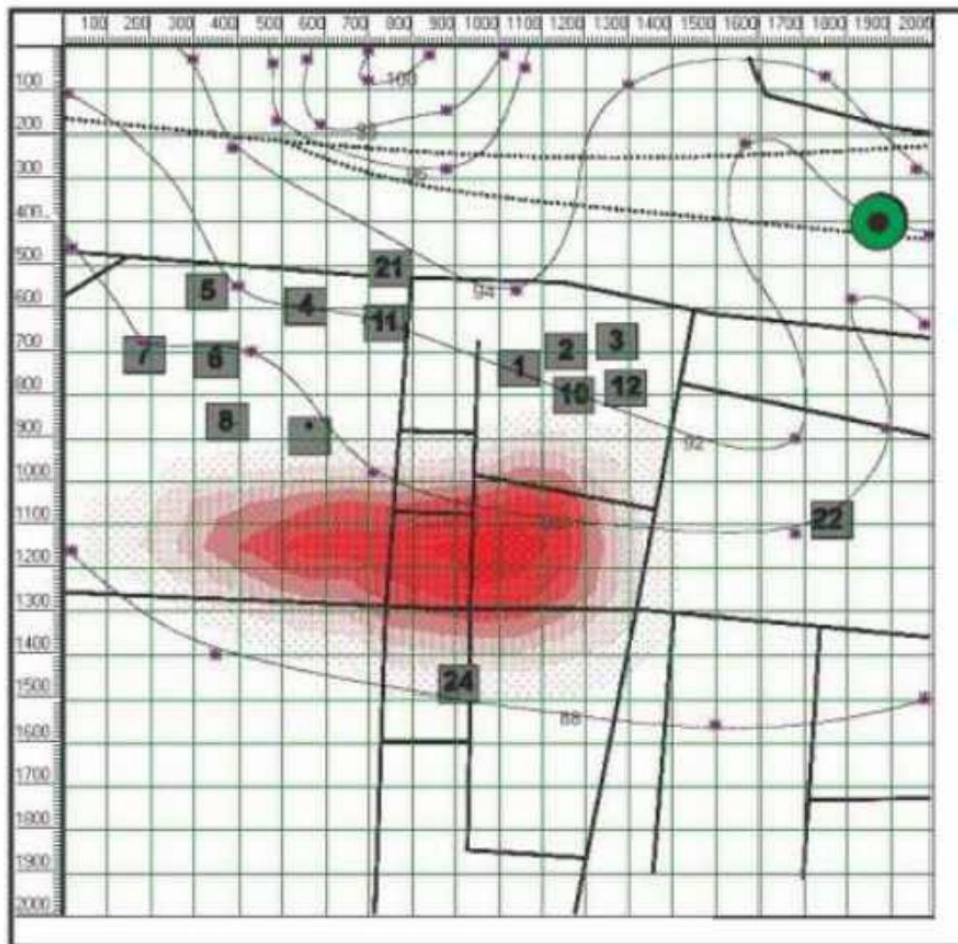
JUDUL
PETA PENYEBARAN *PLUME*

DOSEN PEMBIMBING
Ipung Fitri Purwanti, S.T., M.T.,
Ph.D

MAHASISWA
Achmad Dani Garcia

NRP
0321184000091

SKALA
1:2.000



Gambar 4.12 Peta Penyebaran *Plume*
Sumber: Rahman *et al.*, 2011



DEPARTEMEN
Teknik Lingkungan
FT-SPK
Institut Teknologi Sepuluh
Nopember
Surabaya
2022

JUDUL
PERENCANAAN SUMUR
INJEKSI BIOAUGMENTASI

DOSEN PEMBIMBING
Iping Fitri Purwanti, S.T., M.T.,
Ph.D

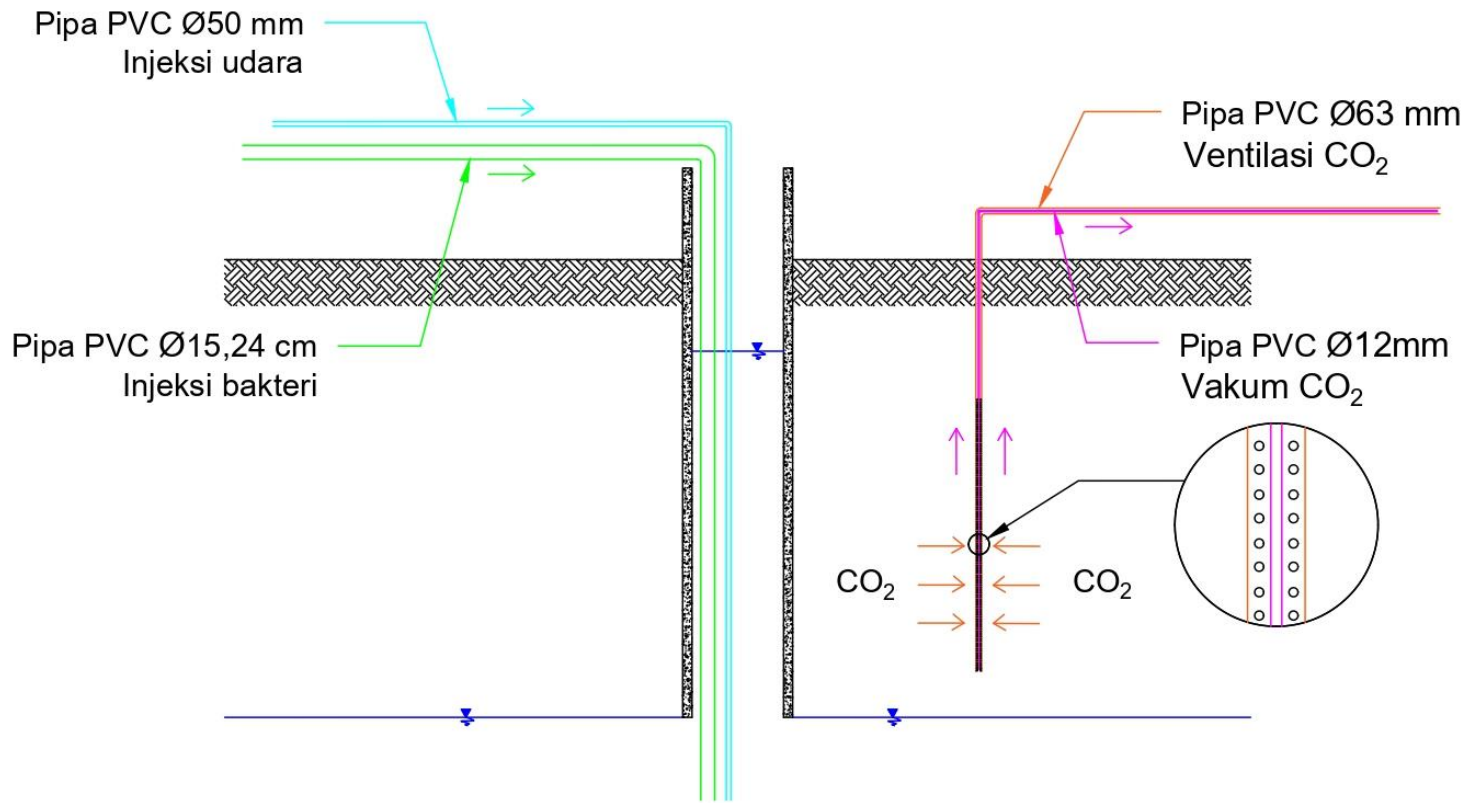
LEGENDA

 Muka tanah
 Muka air tanah
 Sumur beton

MAHASISWA
Achmad Dani Garcia

NRP
0321184000091

SKALA
1:50



Gambar 4.13 Perencanaan Sumur Injeksi Bioaugmentasi

Dalam pelaksanaannya, penambahan nutrisi dilakukan sebelum dilakukan injeksi bakteri ke area yang tercemar. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Roy *et al.*, (2018), dilakukan bioaugmentasi dan biostimulasi untuk menghilangkan TPH dan diamati reduksi maksimum TPH selama 28 hari. Berdasarkan penelitian tersebut, *monitoring* akan dilakukan setiap 4 minggu sekali untuk mengamati aktivitas bakteri seperti jumlah bakteri dan penurunan polutan yang dihasilkan. Untuk mengetahui apakah bioaugmentasi berjalan, dapat diamati dari jumlah penurunan polutan. Apabila penurunan terjadi secara signifikan dalam jangka waktu yang telah ditentukan untuk bioaugmentasi, maka dapat diketahui bahwa bakteri yang ditambahkan telah bekerja dalam mendegradasi polutan solar yang ada. Hal tersebut dikarenakan bakteri *indigenous* sendiri dapat mendegradasi polutan namun dalam jangka waktu yang lama, sehingga tidak cukup efektif. Menurut pemodelan yang dilakukan oleh Rahman *et al.* (2011), konsentrasi polutan solar pada air tanah di Yogyakarta akan hilang dengan sendirinya melalui proses *natural attenuation* dari bakteri *indigenous* setelah 54 tahun. Selain itu *monitoring* juga dilakukan untuk mengamati *bioavailability* yang ada di lokasi, sehingga apabila terjadi penurunan jumlah nutrisi dapat dilakukan penambahan nutrisi kembali sesuai dengan kebutuhan.

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Bento *et al.* (2005), proses biodegradasi polutan solar yang disertai dengan biostimulasi penambahan nutrisi N dan P berlangsung selama 12 minggu. Diestimasi efisiensi dari inokulat konsorsium tersebut sebesar 87% untuk biodegradasi *total petroleum hidrokarbon* (TPH). Maka penentuan polutan TPH setelah proses bioaugmentasi dapat dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 \text{Jumlah polutan (TPH awal)} &= 262.507.207 \text{ mg} \\
 \text{Persentase degradasi} &= 87\% \\
 \text{Waktu degradasi} &= 12 \text{ minggu} \\
 \text{Jumlah TPH akhir} &= \text{jumlah TPH awal} \times (100\% - \% \text{ degradasi}) \\
 &= 262.507.207 \text{ mg} \times (100\% - 87\%) \\
 &= 262.507.207 \text{ mg} \times 13\% \\
 &= 34.125.936,9 \text{ mg} \\
 \text{Konsentrasi akhir TPH} &= \frac{\text{Jumlah TPH akhir}}{\text{Volume plume}} \\
 &= \frac{34.125.936,9 \text{ mg}}{70.947.983,9 \text{ L}} \\
 &= 0,48 \text{ mg/L (baku mutu } 0,6 \text{ mg/L)}
 \end{aligned}$$

Kondisi akhir setelah dilakukan proses bioaugmentasi menggunakan konsorsium campuran bakteri *Pseudomonas aeruginosa* dan *Bacillus subtilis* didapatkan konsentrasi sebesar 0,48 mg/L. Menurut EGASPIN tahun 2002, baku mutu untuk air tanah dengan parameter pencemar TPH adalah 0,6 mg/L. Maka dapat dikatakan bahwa proses bioaugmentasi berhasil menurunkan kontaminan sehingga air tanah memenuhi baku mutu untuk parameter TPH.

Dalam kontaminan solar terkandung senyawa hidrokarbon aromatik yang salah satunya adalah benzena (Hath & Heilos, 2013). Dari pengukuran yang telah dilakukan, diketahui kandungan benzena di dalam solar sebanyak 19,26% (Avagyan *et al.*, 2021).

Dengan menggunakan konsorsium dari *mixed culture* bakteri *Pseudomonas aeruginosa* dan *Bacillus subtilis*, diestimasi bahwa efisiensi dalam mendegradasi senyawa benzena adalah sebesar 99%. Maka penentuan polutan benzena setelah bioaugmentasi dapat dihitung sebagai berikut.

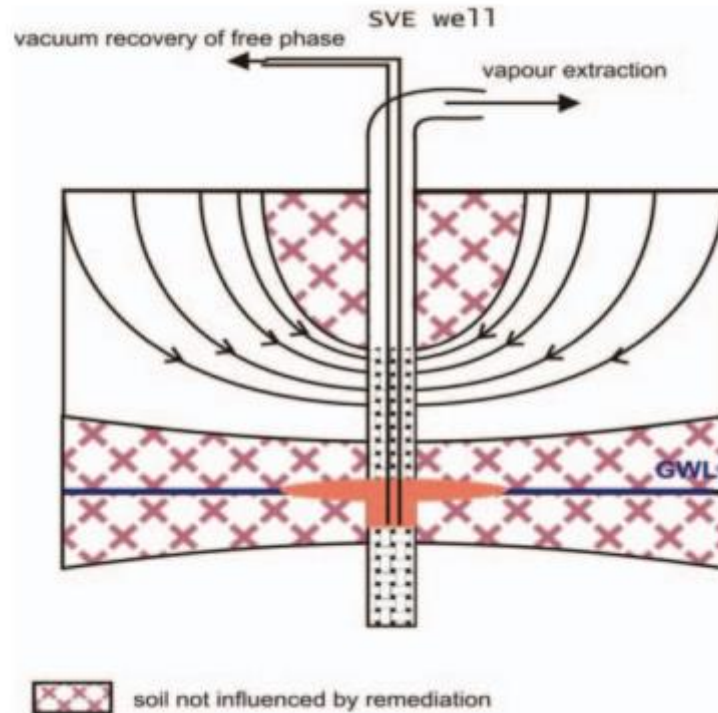
$$\begin{aligned}
 \text{Jumlah benzena awal} &= \text{Jumlah polutan awal} \times \text{Kandungan benzena} \\
 &= 262.507.207 \text{ mg} \times 19,26\% \\
 &= 50.558.888,1 \text{ mg} \\
 \text{Persentase degradasi} &= 99\% \\
 \text{Waktu degradasi} &= 12 \text{ minggu} \\
 \text{Jumlah benzena akhir} &= \text{benzena awal} \times (100\% - \% \text{ degradasi}) \\
 &= 50.558.888,1 \text{ mg} \times (100\% - 99\%) \\
 &= 50.558.888,1 \text{ mg} \times 1\% \\
 &= 505.588,88 \text{ mg} \\
 \text{Konsentrasi akhir benzena} &= \frac{\text{Jumlah benzena akhir}}{\text{Volume plume}} \\
 &= \frac{505.588,88 \text{ mg}}{70.947.983,9 \text{ L}} \\
 &= 0,007 \text{ mg/L (baku mutu } 0,01 \text{ mg.L)}
 \end{aligned}$$

Kondisi akhir setelah dilakukan bioaugmentasi untuk konsentrasi benzena adalah 0,007 mg/L. Menurut PERMENKES Nomor 32 Tahun 2017, baku mutu air yang digunakan untuk keperluan higiene sanitasi untuk parameter pencemar benzena adalah 0,01 mg/L. Dengan demikian hasil akhir dari konsentrasi benzena pada air tanah dapat dikatakan telah memenuhi baku mutu setelah dilakukan proses bioaugmentasi.

Adapun batasan yang dihadapi di lapangan dalam aplikasi bioaugmentasi air salah satunya adalah tidak adanya *exit gate*. Proses degradasi dari polutan solar ini menghasilkan CO₂ dan H₂O, dimana kedua produk tersebut dapat berpotensi membentuk senyawa asam karbonat (H₂CO₃) yang dapat mengganggu proses bioaugmentasi. Untuk mengatasinya, perlu ditambahkan pipa untuk proses *soil vapor extraction* (SVE). Pipa SVE yang digunakan dapat dilihat pada **Gambar 4.14**. Pipa yang lebih besar berdiameter 63 mm digunakan untuk *soil venting*. Pipa yang lebih kecil berdiameter 12 mm digunakan untuk vakum ekstraksi gas yang dihasilkan dari proses biodegradasi (Machackova *et al.*, 2012). Pipa ekstraksi gas ini dapat berfungsi sebagai *exit gate* untuk mengeluarkan CO₂ yang dihasilkan dari proses biodegradasi solar.

Batasan lain yang dihadapi adalah wilayah studi yang merupakan area perkotaan padat sehingga dapat menyulitkan dalam penentuan lokasi injeksi untuk penambahan bakteri dan nutrisi. Dengan kata lain, ketersediaan lahan cukup terbatas untuk melakukan bioaugmentasi dengan skala yang besar. Oleh karena itu, maka injeksi dilakukan melalui sumur-sumur observasi yang sudah ada dengan menambahkan pipa injeksi. Hal tersebut mungkin akan mengakibatkan penyebaran bakteri yang kurang merata. Selain itu, keberadaan bakteri *indigenous* dan kurangnya nutrisi pada lokasi tercemar dapat mengganggu proses bioaugmentasi. Oleh karenanya diperlukan penelitian untuk mengamati apakah bakteri *indigenous* dapat mengancam pertumbuhan bakteri untuk

bioaugmentasi, serta dilakukan *monitoring* secara berkala untuk mengetahui jumlah nutrisi yang perlu ditambahkan. Kondisi lingkungan yang tercemar seperti pH dan suhu juga berpengaruh dalam proses bioaugmentasi. Sebab itu, perlu dilakukan pemantauan dan evaluasi sebelum dan setelah dilakukan bioaugmentasi untuk memastikan kondisi lingkungan dapat mendukung bakteri dalam mendegradasi polutan solar.



Gambar 4.14 Pipa Ekstraksi Gas

Sumber: Machackova *et al.*, 2012

Dari kedua parameter, yaitu TPH dan benzena, kondisi air tanah setelah dilakukan proses bioaugmentasi telah memenuhi baku mutu. Sehingga dapat dikatakan bahwa penanganan pencemaran solar pada air tanah menggunakan konsorsium campuran bakteri *Pseudomonas aeruginosa* dan *Bacillus subtilis* berhasil dan efisien. Keberhasilan dari bioaugmentasi ini ditentukan oleh jenis mikroorganisme dan waktu degradasi, karena keduanya dapat mempengaruhi kemampuan dalam mendegradasi kontaminan solar. Selain itu, isolat campuran atau *mixed culture* dapat menghasilkan enzim yang lebih bervariasi dalam jenis dan tingkat penguraian sehingga mampu mendegradasi polutan solar yang memiliki kandungan dari beberapa senyawa hidrokarbon lebih cepat. Penanganan yang tepat dari batasan-batasan yang ada juga mempengaruhi keberhasilan dari proses bioaugmentasi.

”Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan kajian literatur yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1. Pencemaran minyak solar pada air tanah dapat terjadi akibat cecceran minyak, kebocoran pipa & transportasi, serta kebocoran tangki penyimpanan. Kebocoran menyebabkan solar meresap ke dalam tanah dan mencemari air tanah yang kemudian membentuk *plume*. Pencemaran solar berakibat pada gangguan kesehatan manusia karena penggunaan air tanah yang tercemar. Metode yang digunakan untuk mengurangi konsentrasi kontaminan solar pada air tanah adalah bioaugmentasi.
2. Agen biodegradasi yang dapat digunakan dalam bioaugmentasi air tanah tercemar solar adalah isolat konsorsium bakteri atau *mixed culture* dengan memperhatikan faktor-faktor yang berpengaruh pada proses bioremediasi seperti pH, suhu, dan nutrisi. Penggunaan isolat konsorsium dapat meningkatkan efisiensi degradasi komponen senyawa pada solar. Jenis mikroorganisme dan waktu degradasi berpengaruh dalam kemampuan isolat untuk melakukan degradasi kontaminan solar pada air tanah. Penanganan yang tepat pada batasan yang ditemui juga mempengaruhi proses bioaugmentasi.
3. Hasil studi kasus pencemaran solar pada air tanah di Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta menunjukkan bahwa metode bioaugmentasi merupakan alternatif penanganan yang sesuai untuk menurunkan konsentrasi polutan solar pada air tanah. Skenario penggunaan isolat konsorsium bakteri disesuaikan dengan hasil penelitian sebelumnya yakni dengan menggunakan *mixed culture* yang terdiri dari bakteri *Pseudomonas aeruginosa* dan *Bacillus subtilis* dengan jumlah inokulum yang ditambahkan sebanyak 26.250,72 mL x 10⁹ CFU/mL. Bioaugmentasi disertai dengan penambahan nutrisi berupa nitrogen dan fosfor, serta oksigen untuk mendukung pertumbuhan bakteri. Dengan persentase degradasi TPH dan benzena sebesar 87% dan 99% dapat menurunkan konsentrasi TPH dari 3,7 mg/L menjadi 0,48 mg/L dan konsentrasi benzena menjadi 0,007 mg/L sehingga memenuhi baku mutu (0,6 mg/L untuk TPH dan 0,01 mg/L untuk benzena).

5.2 Saran

Saran dari kajian literatur ini adalah sebagai berikut.

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai jenis bakteri terbaik yang dapat digunakan dalam proses biodegradasi polutan solar pada air tanah yang tercemar.
2. Perlu adanya data yang lebih spesifik dan detail mengenai karakteristik air tanah serta kandungan nutrisi pada air tanah untuk mengetahui jumlah penambahan bakteri serta nutrisinya dalam proses bioaugmentasi air tanah tercemar solar.
3. Diperlukan kajian lebih lanjut mengenai bioremediasi air tanah di wilayah Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta mengingat pencemaran masih terjadi dan dapat berdampak buruk bagi aktivitas masyarakat yang tinggal di sekitar area yang tercemar dan menggunakan air tanah untuk berbagai kebutuhan.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, F., & Fakhruddin, A. N. M. (2018). A Review on Environmental Contamination of Petroleum Hydrocarbons and Its Biodegradation. *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, 11(3), 1-7. <https://doi.org/10.19080/IJESNR.2018.11.555811>.
- Akbari, W. A., Fitriyaningsih, Y., & Jati, D. R. (2015). Pemanfaatan Limbah Kulit Pisang dan Tanaman *Mucuna bracteata* sebagai Pupuk Kompos. *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, 3(1). <http://dx.doi.org/10.26418/jtlb.v3i1.11424>.
- Avagyan, L., Hutfless, S., & Monks, K. (2021, Juli 21). The Determination of Mono- and Polyaromatic Hydrocarbons in Diesel Fuels using Refractive Index Detection. *Rubicon Science*. <https://www.rubiconscience.com.au/2021/07/21/determination-of-mono-and-polyaromatic-hydrocarbons-in-diesel-fuels/>.
- Bajagain, R., Lee, S., & Jeong, S. W. (2018). Application of Persulfate-Oxidation Foam Spraying as A Bioremediation Pretreatment for Diesel Oil-Contaminated Soil. *Chemosphere*, 207, 565-572. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.05.081>.
- Bento, F. M., Camargo, F. A., Okeke, B. C., & Frankenberger, W. T. (2005). Comparative bioremediation of soils contaminated with diesel oil by natural attenuation, biostimulation and bioaugmentation. *Bioresource technology*, 96(9), 1049-1055. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.09.008>.
- Blake, C., Christensen, M. N., & Kovács, Á. T. (2021). Molecular Aspects of Plant Growth Promotion and Protection by *Bacillus subtilis*. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 34(1), 15-25. <https://doi.org/10.1094/MPMI-08-20-0225-CR>.
- BPS Kota Yogyakarta. (2021). Kecamatan Gedongtengen Dalam Angka 2021. BPS Kota Yogyakarta.
- Brusseau, M. L. (2019). Soil and groundwater remediation. In *Environmental and pollution science* (pp. 329-354). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814719-1.00019-7>.
- Cahyadi, A., Riyanto, I. A., Fatchurohman, H., Santosa, S. H. M. B., & Endarto, R. (2020). Indeks Pemakaian Airtanah di Kota Yogyakarta. *Tunas Geografi*, 9(1), 43-54.
- Chen, C. H., Whang, L. M., Pan, C. L., Yang, C. L., & Liu, P. W. G. (2017a). Immobilization of Diesel-Degrading Consortia for Bioremediation of Diesel-Contaminated Groundwater and Seawater. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 124, 62-72. <https://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.07.001>.
- Chen, Y., Lin, J., & Chen, Z. (2017b). Remediation of Water Contaminated with Diesel Oil Using a Coupled Process: Biological Degradation Followed by Heterogeneous Fenton-like Oxidation. *Chemosphere*, 183, 286-293. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.120>.
- Department of Petroleum Resources. (2002). *Environmental Guidelines and Standards for The Petroleum Industry in Nigeria (EGASPIN)*. Lagos
- DINKES Kota Yogyakarta. (2021). *Profil Kesehatan Kota Yogyakarta Tahun 2021*. Pemerintah Kota Yogyakarta.
- DLHK Daerah Istimewa Yogyakarta. (2020). *Dokumen Informasi Kinerja Lingkungan Hidup Daerah Istimewa Yogyakarta Tahun 2020*. Dinas Lingkungan Hidup dan Kehutanan Daerah Istimewa Yogyakarta.
- Fatoni, M., Muryani, C., & Nugraha, S. (2018). Studi Agihan Salinitas Airtanah Dangkal di Kecamatan Puring Kabupaten Kebumen Tahun 2016. *Jurnal GeoEco*, 4(1).

- Hendrayana, H., Putra, D. P. E., & Priambodo, Y. (2021). Assessment of Organic Carbon Contamination in The Unsaturated Zone: a Case of Yogyakarta City, Indonesia. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 9(1), 3115. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2021.091.3115>
- Huth, M., & Heilos, A. (2013). Fuel flexibility in gas turbine systems: impact on burner design and performance. In *Modern Gas Turbine Systems* (pp. 635-684). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857096067.3.635>.
- Imron, M. F. (2019, Agustus 12). Bakteri *Pseudomonas aeruginosa* untuk Pengolahan Limbah Cair dengan Kandungan Aluminium. Universitas Airlangga. <https://fst.unair.ac.id/bakteri-pseudomonas-aeruginosa-untuk-pengolahan-limbah-cair-dengan-kandungan-aluminium/>.
- Imron, M. F., Kurniawan, S. B., Ismail, N. I., & Abdullah, S. R. S. (2020). Future Challenges in Diesel Biodegradation by Bacteria Isolates: A Review. *Journal of Cleaner Production*, 251, 119716.
- Jayanti, N. P., Sali, I. W., & Asmara, I. W. S. (2018). *Efektivitas Penggunaan Kombinasi Pasir Kuarsa Dan Batu Zeolit Dalam Penurunan Kadar Besi (Fe) Pada Air Sumur Gali Studi Dilaksanakan Di Jalan Sidakarya Gang Taman Suci, Desa Sidakarya, Kecamatan Denpasar Selatan*. Tesis Politeknik Kesehatan Denpasar.
- Kadarohman, A., Rohman, I., Kusri, R., & Astuti, R. M. (2012). Combustion Characteristics of Diesel Fuel on One Cylinder Diesel Engine Using Clove Oil, Eugenol, and Eugenyl Acetate as Fuel Bio-Additives. *Fuel*, 98, 73-79.
- Kemendikbud RI. (2017, Agustus 12). Stasiun Tugu Yogyakarta. Sistem Registrasi Nasional Cagar Budaya. <http://cagarbudaya.kemdikbud.go.id/siteregnas/public/objek/detailcb/PO2015121500017/Stasiun-Kereta-Api-Tugu-Yogyakarta>
- Khalid, F. E., Lim, Z. S., Sabri, S., Gomez-Fuentes, C., Zulkharnain, A., & Ahmad, S. A. (2021). Bioremediation of Diesel Contaminated Marine Water by Bacteria: A review and Bibliometric Analysis. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(2), 155.
- Kis, Á. E., Laczi, K., Zsíros, S., Kós, P., Tengölics, R., Bounedjoum, N., Kovacs, T., Rakhely, G., & Perei, K. (2017). Characterization of the *Rhodococcus* sp. MK1 Strain and Its Pilot Application for Bioremediation of Diesel Oil-Contaminated Soil. *Acta microbiologica et immunologica Hungarica*, 64(4), 463-482.
- Kovács, Á. T. (2019). *Bacillus subtilis*. *Trends in Microbiology*, 27(8), 724-725. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2019.03.008>.
- Kristinanda, A. D. (2018). *Isolasi Bakteri Pendegradasi Senyawa Hidrokarbon pada Tanah Tercemar di PT. KAI (Persero) UPT Balai Yasa Yogyakarta*. Tesis Universitas Islam Indonesia.
- Kurnia, D. R., Mangunwardoyo, W., & Ambarsari, H. (2018, Oktober). Biodegradation of used lubricant oil hydrocarbons using *Bacillus subtilis* InaCC B289 and *Pseudomonas aeruginosa* InaCC B290 in single or mixed cultures. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2021, No. 1, p. 070007). AIP Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/1.5062805>.
- Lee, H., Lee, Y., Kim, J., & Kim, C. (2014). Field application of modified in situ soil flushing in combination with air sparging at a military site polluted by diesel and gasoline in Korea. *International journal of environmental research and public health*, 11(9), 8806-8824. <https://doi.org/10.3390/ijerph110908806>.
- Lima, S. D., Oliveira, A. F., Golin, R., Lopes, V. C. P., Caixeta, D. S., Lima, Z. M., & Morais, E. B. (2019). Isolation and Characterization of Hydrocarbon-Degrading

- Bacteria from Gas Station Leaking-Contaminated Groundwater in The Southern Amazon, Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, 80, 354-361.
- Lubis, A. I. F., Nasution, D. P., Sembiring, R. (2018). Analisis Dampak Pencemaran Lingkungan Terhadap Faktor Sosial Ekonomi pada Wilayah Pesisir di Desa Pahlawan Kecamatan Tanjung Tiram Kabupaten Batu Bara. *Jurnal Abdi Ilmu*, 1(2), 94-116.
- Luka, Y., Highina, B. K., & Zubairu, A. (2018). Bioremediation: A Solution to Environmental Pollution-a Review. *Am J Eng Res*, 7(2), 101-109.
- Lyon, D. Y., & Vogel, T. M. (2013). Bioaugmentation for Groundwater Remediation: An Overview. *Bioaugmentation for Groundwater Remediation*, 1-37.
- Machackova, J., Wittlingerova, Z., Vlk, K., & Zima, J. (2012). Major factors affecting in situ biodegradation rates of jet-fuel during large-scale biosparging project in sedimentary bedrock. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 47(8), 1152-1165. <https://doi.org/10.1080/10934529.2012.668379>.
- Macaulay, B. M., & Rees, D. (2014). Bioremediation of Oil Spills: A Review of Challenges for Research Advancement. *Annals of environmental Science*, 8, 9-37.
- Mair, J., Schinner, F., & Margesin, R. (2013). A feasibility study on the bioremediation of hydrocarbon-contaminated soil from an Alpine former military site: effects of temperature and biostimulation. *Cold Regions Science and Technology*, 96, 122-128. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2013.07.006>.
- Manek, E. G., Putra, D. P. E., & Hendrayana, H. (2021, Oktober). Mass Transport Modelling of Total Organic Carbon in Groundwater to Determine the Location of Petroleum Fuel Pollutant Sources in The Area of Jlagran, Yogyakarta City, Indonesia. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 851, No. 1, p. 012024). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/851/1/012024>
- Melati, I. (2021). Teknik Bioremediasi: Keuntungan, Keterbatasan dan Prospek Riset. *Prosiding Biotik*, 8(1), 272-286.
- Mnif, I., Sahnoun, R., Ellouz-Chaabouni, S., & Ghribi, D. (2017). Application of Bacterial Biosurfactants for Enhanced Removal and Biodegradation of Diesel Oil in Soil Using a Newly Isolated Consortium. *Process Safety and Environmental Protection*, 109, 72-81.
- Naryanto, H. S. (2018). Potensi Air Tanah di Daerah Cikarang dan Sekitarnya, Kabupaten Bekasi Berdasarkan Analisis Pengukuran Geolistrik. *Jurnal Air Indonesia*, 4(1), 38-49.
- Nehrul, A. A. (2014). *Sebaran Minyak dan Lemak terhadap Air Tanah Tercemar Minyak Disel di Kelurahan Sosromenduran, Kecamatan Gedongtengen Akibat Tumpahan Minyak Disel Milik PT. KAI DAOP VI Stasiun Tugu Yogyakarta*. Tesis UPN "Veteran" Yogyakarta.
- Nugroho, Astri. (2006). *Bioremediasi Hidrokarbon Minyak Bumi*. Yogyakarta : Penerbit Graha Ilmu.
- Nwankwegu, A. S., Orji, M. U., & Onwosi, C. O. (2016). Studies on organic and in-organic biostimulants in bioremediation of diesel-contaminated arable soil. *Chemosphere*, 162, 148-156. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.07.074> 0045-6535.
- Nzila, A., Razzak, S. A., & Zhu, J. (2016). Bioaugmentation: An Emerging Strategy of Industrial Wastewater Treatment for Reuse and Discharge. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(9), 846.
- Parween, T., Bhandari, P., Sharma, R., Jan, S., Siddiqui, Z. H., & Patanjali, P. K. (2018). Bioremediation: a sustainable tool to prevent pesticide pollution. In *Modern age environmental problems and their remediation* (pp. 215-227). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-64501-8_12.

- Pemerintah Kota Yogyakarta. (2022). Gambaran Umum Kecamatan Gedongtengen. Kemantren Gedongtengen. <https://gedongtengenkec.jogjakota.go.id/page/index/gambaran-umum>.
- Pepper, I. L., Gerba, C. P., Gentry, T. J., & Maier, R. M. (Eds.). (2011). *Environmental microbiology*. Academic press.
- Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 32 Tahun 2017 Tentang Standar Baku Mutu Kesehatan Lingkungan dan Persyaratan Kesehatan Air untuk Keperluan Higiene Sanitasi, Kolam Renang, *Solus Per Aqua*, dan Pemandian Umum.
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 Tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.
- Polewczyk, A., Marchut-Mikołajczyk, O., Drożdżyński, P., Domański, J., & Śmigielski, K. (2020). Effects of Ozonized Rapeseed Oil on Bioremediation of Diesel Oil Contaminated Soil by *Bacillus mycoides* NS1020. *Bioremediation Journal*, 24(2-3), 204-213.
- Prasetya, J. D., Lukito, H., & Masyithoh, A. D. (2021). Arahan Pengelolaan Airtanah Akibat Pencemaran Hidrokarbon di Dusun Sidadadi, Desa Tarisi, Kecamatan Wanareja, Kabupaten Cilacap. *Prosiding SATU BUMI*, 3(1).
- Prasetyo, Budi. (2014, Oktober 23). *Sumur dan Kolam Ikan Tercemar Solar*. Tribunnews. <https://www.tribunnews.com/regional/2014/10/23/sumur-dan-kolam-ikan-tercemar-solar>.
- Putra, D. P. E., Iqbal, M., Hendrayana, H., & Putranto, T. T. (2013). Assessment of optimum yield of groundwater withdrawal in the Yogyakarta City, Indonesia. *Journal of Applied Geology*, 5(1). <https://doi.org/10.22146/jag.7206>
- Raffa, C. M., Chiampo, F., Vergnano, A., & Godio, A. (2021). Selective Removal of Diesel Oil Hydrocarbons in Aerobic Bioremediation. *Applied Sciences*, 11(4), 1471.
- Rahman, A., Alim, M. S., & Utami, U. B. L. (2011). Inventarisasi dan Identifikasi Sumber Pencemar Air di Kota Banjarmasin. *EnviroScienteeae*, 7(2), 56-68.
- Rahman, H. A., Putra, D. P. E., & Hendrayana, H. (2018). Pemodelan Pergerakan Pencemar Airtanah oleh Hidrokarbon di Kelurahan Jlagran Kota Yogyakarta. *Jurnal Geosains dan Teknologi*, 1(3), 81-88.
- Rifani, M. (2021). *Desain Teknologi Remediasi Air Tanah Tercemar di Lahan Bekas TPA Keputih Menggunakan Metode Filtrasi-Adsorpsi*. Tesis Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Roy, A., Dutta, A., Pal, S., Gupta, A., Sarkar, J., Chatterjee, A., Saha, A., Sarkar, P., Sar, P., & Kazy, S. K. (2018). Biostimulation and bioaugmentation of native microbial community accelerated bioremediation of oil refinery sludge. *Bioresource Technology*, 253, 22-32. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.004>.
- Ruhul, A. M., Kalam, M. A., Masjuki, H. H., Fattah, I. R., Reham, S. S., & Rashed, M. M. (2015). State of the Art of Biodiesel Production Processes: A Review of the Heterogeneous Catalyst. *RSC Advances*, 5(122), 101023-101044.
- Safdari, M. S., Kariminia, H. R., Nejad, Z. G., & Fletcher, T. H. (2017). Study Potential of Indigenous *Pseudomonas aeruginosa* and *Bacillus subtilis* in Bioremediation of Diesel-Contaminated Water. *Water, Air, & Soil Pollution*, 228(1), 1-7.
- Sari, G. L., Trihadiningrum, Y., & Ni'matuzahroh, N. (2018). Petroleum hydrocarbon pollution in soil and surface water by public oil fields in Wonocolo sub-district, Indonesia. *Journal of Ecological Engineering*, 19(2). <https://doi.org/10.12911/22998993/82800>.

- Satapona, A., Putra, D. P. E., & Hendrayana, H. (2018). Groundwater flow modeling in the Malioboro, Yogyakarta, Indonesia. *Journal of Applied Geology*, 3(1), 11-22. <https://doi.org/10.22146/jag.39996>
- Saptono, Joko. (2019, November 23). PT KAI DAOP VI Yogyakarta Ambil Sampel Air, Disaksikan FORKOMPIMKA Kecamatan Gedongtengen. Kemantren Gedongtengen. <https://gedongtengenkec.jogjakota.go.id/detail/index/8609>.
- Setyaningsih, W. (2010). Model Pergerakan Bahan Pencemar Minyak Disel pada Akuifer Batupasir Formasi Vulkanik Merapi Muda. *Jurnal Geografi: Media Informasi Pengembangan dan Profesi Kegeografian*, 7(2).
- Simanjuntak, D. Y. (2018). *Studi Bioaugmentasi Bakteri Vibrio alginolyticus pada Remediasi Tanah Tercemar Aluminium= Bioaugmentation Studies of Vibrio alginolyticus on Aluminum Contaminated Soil Remediation*. Tesis Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Souvannachith, T., Putra, D. P. E., & Hendrayana, H. (2017). Assessment of groundwater contamination hazard by nitrate in Samas area, Bantul district, Yogyakarta, Indonesia. *Journal of Applied Geology*, 2(1), 36-47. <http://dx.doi.org/10.22146/jag.30256>.
- Steffan, R., Schaefer, C., & Lippincott, D. (2010). *Bioaugmentation for groundwater remediation*. SHAW ENVIRONMENTAL AND INFRASTRUCTURE INC BATON ROUGE LA.
- Sumampouw, O. J., & Risjani, Y. (2018). *Indikator Pencemaran Lingkungan*. Yogyakarta: Deepublish.
- Susilo, Wiwiek. (2003, Maret 19). Limbah Solar Stasiun Tugu Mencemari Sumur Warga. *Liputan 6*. <https://www.liputan6.com/news/read/51513/limbah-solar-stasiun-tugu-mencemari-sumur-warga>.
- Talabi, A. O., & Kayode, T. J. (2019). Groundwater Pollution and Remediation. *Journal of Water Resource and Protection*, 11(01), 1-19. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2019.111001>.
- Ueno, A., Ito, Y., Yumoto, I., & Okuyama, H. (2007). Isolation and Characterization of Bacteria from Soil Contaminated with Diesel Oil and the Possible Use of These in Autochthonous Bioaugmentation. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 23(12), 1739-1745. <https://doi.org/10.1007/s11274-007-9423-6>.
- Vyatrawan, L. (2015). *Bioremediasi Tanah Tercemar Minyak Dengan Metode Soil Washing Dan Biostimulasi*. Tesis Institute Technology Sepuluh Nopember.
- Wardhani, W. K., & Titah, H. S. (2021). Studi Literatur Alternatif Penanganan Tumpahan Minyak Mentah Menggunakan Bacillus subtilis dan Pseudomonas putida (Studi Kasus: Tumpahan Minyak Mentah Sumur YYA-1). *Jurnal Teknik ITS*, 9(2), F97-F102.
- Wu, M., Dick, W. A., Li, W., Wang, X., Yang, Q., Wang, T., Xu, L., Zhang, M., & Chen, L. (2016). Bioaugmentation and Biostimulation of Hydrocarbon Degradation and The Microbial Community in a Petroleum-contaminated Soil. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 107, 158-164. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.11.019>.
- Wu, W., Jin, Y., Bai, F., & Jin, S. (2015). Pseudomonas aeruginosa. In *Molecular medical microbiology* (pp. 753-767). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397169-2.00041-X>.
- Wulan, P. P. D. K., Gozan, M., Arby, B., & Achmad, B. (2011). Penentuan Rasio Optimum C: N: P sebagai Nutrisi pada Proses Biodegradasi Benzena-Toluena dan Scale Up Kolom Bioregenerator. *Fakultas Teknik. Universitas Indonesia. Depok*.
- Yasmin, Z., & Wulansarie, R. (2018). Review Perbandingan Pencemaran Minyak di Perairan dengan Proses Bioremediasi Menggunakan Metode Biostimulus dan

- Bioaugmentasi. *Reka Buana: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Teknik Kimia*, 3(1), 67-72. <https://doi.org/10.33366/rekabuana.v3i1.943>.
- Yu, A., Loo, J. F., Yu, S., Kong, S. K., & Chan, T. F. (2014). Monitoring bacterial growth using tunable resistive pulse sensing with a pore-based technique. *Applied microbiology and biotechnology*, 98(2), 855-862. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5377-9>.
- Zaida, Z. N., & Piakong, M. T. (2018). Bioaugmentation of Petroleum Hydrocarbon in Contaminated Soil: A Review. *Microbial Action on Hydrocarbons*, 415-439. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1840-5_17.

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Achmad Dani Garcia. Penulis lahir di Sidoarjo pada tanggal 14 Desember 1999. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal di SD Negeri Larangan pada tahun 2006 dan lulus pada tahun 2012, SMP Negeri 1 Candi pada tahun 2012 dan lulus pada tahun 2015, dan SMA Negeri 3 Sidoarjo pada tahun 2015 dan lulus pada tahun 2018. Penulis melanjutkan pendidikan strata sarjananya pada tahun 2018 di Departemen Teknik Lingkungan FTSPK Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan NRP 0321184000091.

Selama perkuliahan, penulis aktif di Himpunan Mahasiswa Teknik Lingkungan (HMTL) ITS sebagai staff Departemen Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa (PSDM) pada periode 2020-2021 dan sebagai Asisten Bidang Pengembangan Tingkat Dasar Departemen Pengembangan Sumber Daya Manusia (PSDM) pada periode 2021-2022. Penulis juga pernah menjadi asisten laboratorium untuk praktikum Mikrobiologi Lingkungan pada tahun 2019 dan 2020, serta praktikum Teknologi Remediasi Lingkungan pada tahun 2021. Penulis juga aktif mengikuti berbagai kegiatan kepanitiaan baik di dalam maupun di luar departemen. Pengalaman kerja praktik dilakukan penulis di Dinas Pekerjaan Umum Bina Marga dan Pematuan (DPUBMP) Kota Surabaya pada tahun 2021. Semasa kuliah, berbagai pelatihan dan seminar telah diikuti oleh penulis dalam rangka pengembangan diri. Penulis mengambil Tugas Akhir mengenai Remediasi Lingkungan dalam menyelesaikan jenjang pendidikan S1, di bawah bimbingan Ibu Ipung Fitri Purwanti, S.T, M.T., Ph.D. Penulis berharap laporan tugas akhir ini dapat menjadi literatur yang baik mengenai remediasi air tanah yang tercemar solar menggunakan metode bioaugmentasi. Segala kritik dan saran dapat dikirimkan melalui email adanigarcia14@gmail.com.



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

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

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

Hari, tanggal : Senin, 11 Juli 2022
Pukul : 08.00-09.15
Lokasi : TL-105
Judul : Kajian Bioaugmentasi pada Air Tanah Tercemar Solar

Nilai TOEFL 500

Nama : Achmad Dani Garcia
NRP. : 03211840000091
Topik : Studi Literatur

Tanda Tangan

No./Hal.	Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing Ujian Tugas Akhir
①	Sesuaikan tujuan & kesimpulan
②	Ikut saran/masukan dosen pengarah
③	peta? lebih dibesarkan. spy lebih tampak jelas

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

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

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

Dosen Pembimbing

Ipung Fitri Purwanti, S.T., M.T., Ph.D



UTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR

Kode/SKS : RE184804 (0/6/0)

Periode: Genap 2021/2022

No. Revisi: 01

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

Hari, tanggal : Senin, 11 Juli 2022
Pukul : 08.00-09.15
Lokasi : TL-105
Judul : Kajian Bioaugmentasi pada Air Tanah Tercemar Solar

Nama : Achmad Dani Garcia
NRP. : 03211840000091
Topik : Studi Literatur

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
	<ul style="list-style-type: none">- Bioaugmentasi perlu biostimulasi?- Jenis biostimulan?- Cara mengetahui bioaugmentasi berhasil

Formulir UTA-03 diserahkan kepada Dosen Pembimbing setelah sesi Seminar Kemajuan selesai.

Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-03 ke Sekretariat Program Sarjana

Formulir ini harus mahasiswa dibawa saat asistensi kepada Dosen Penguji

Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Penguji dan Dosen Pembimbing

Dosen Penguji Prof. Dr. Ir. Sarwoko Mangkoedihardjo, M.ScEs

Dosen Pembimbing Ipung Fitri Purwanti, S.T., M.T., Ph.D



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

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

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


Hari, tanggal : Senin, 11 Juli 2022
Pukul : 08.00-09.15
Lokasi : TL-105
Judul : Kajian Bioaugmentasi pada Air Tanah Tercemar Solar

Nama : Achmad Dani Garcia
NRP. : 03211840000091
Topik : Studi Literatur

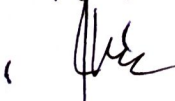
No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
	<ul style="list-style-type: none">- Urutannya dalam draft laporan TA- Sumbu digambarkan sesuai dengan kondisi di lapangan- perhit volume bakteri disemaiha kondisi lapangan lokasi lokasi- Hitung volume bakteri berdasarkan debit.

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

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

()

Dosen Pembimbing Ipung Fitri Purwanti, S.T., M.T., Ph.D

()



UTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR

Kode/SKS : RE184804 (0/6/0)

Periode: Genap 2021/2022

No. Revisi: 01

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

Hari, tanggal : Senin, 11 Juli 2022

Pukul : 08.00-09.15

Lokasi : TL-105

Judul : Kajian Bioaugmentasi pada Air Tanah Tercemar Solar

Nama : Achmad Dani Garcia

NRP. : 03211840000091

Topik : Studi Literatur

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
1.	Penulisan Abstrak, Penulisan Lain
2.	Sajikan perhitungan kebutuhan M.O/N/P dll, hasil air tanah, perkiraan Perakabara selang
3.	BM air laut, tidak Rantai
4.	Munculkan detail Perencanaan aplikasi
5.	Alasan pakai mixed culture

zona kradat
zona akuifer
204
2022
?

Formulir UTA-03 diserahkan kepada Dosen Pembimbing setelah sesi Seminar Kemajuan selesai.

Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-03 ke Sekretariat Program Sarjana

Formulir ini harus mahasiswa dibawa saat asistensi kepada Dosen Penguji



Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Penguji dan Dosen Pembimbing

Dosen Penguji

Ervin Nurhayati, S.T., M.T., Ph.D

Dosen Pembimbing

Ipung Fitri Purwanti, S.T., M.T., Ph.D

()
()

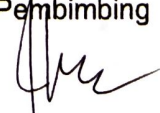


KEGIATAN ASISTENSI TUGAS AKHIR

Nama : Achmad Dani Garcia
NRP : 0321184000091
Judul : Kajian Bioaugmentasi pada Air Tanah Tercemar Solar

No	Tanggal	Keterangan Kegiatan / Pembahasan	Paraf
1	22/12/2021	Mendiskusikan mengenai persiapan dan rencana topik Tugas Akhir yang akan dikerjakan.	
2	04/01/2022	Mendiskusikan dan menentukan topik dan judul sesuai dengan saran dosen pembimbing	
3	17/01/2022	Asistensi terkait pengerjaan proposal serta penulisan bab 1, bab 2, bab 3, dan bab 4.	
4	09/02/2022	Asistensi terkait revisi proposal setelah Seminar Proposal Tugas Akhir. Menambahkan dan mendiskusikan mengenai latar belakang, metode studi, dan RAB.	
5	29/03/2022	Menyampaikan progres laporan Tugas Akhir dan mendiskusikan mengenai sumber literatur yang digunakan.	
6	10/05/2022	Pengiriman draft laporan dan pengecekan mengenai kelengkapan penulisan, serta revisi bab 2, bab 4, dan kesimpulan sementara.	
7	08/06/2022	Asistensi terkait saran dan masukan yang diberikan oleh dosen pengarah pada Seminar Kemajuan Tugas Akhir. Mendiskusikan mengenai abstrak dan studi kasus.	
8	19/06/2022	Mendiskusikan mengenai proses biodegradasi solar, aplikasi bioaugmentasi, kebutuhan nutrisi dan oksigen, penanganan CO2 yang dihasilkan, serta batasan di lapangan.	
9	21/07/2022	Asistensi terkait saran dan masukan dari dosen pembimbing dan dosen penguji pada Ujian Lisan Tugas Akhir.	

Surabaya, 22 Juli 2022
Dosen Pembimbing


Ipung Fitri Purwanti, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 19711114 200312 2 001