

# Kajian Bioaugmentasi pada Air Tanah Tercemar Solar di Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta

Achmad Dani Garcia dan Ipung Fitri Purwanti  
Departemen Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)  
*e-mail*: purwanti@enviro.its.ac.id

**Abstrak**—Solar (*diesel oil*) merupakan campuran hidrokarbon yang umum digunakan sebagai bahan bakar. 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 pada 1997, di Tasikmalaya pada 2014, dan di Cilacap pada 2019. Bioremediasi adalah metode pendegradasian kontaminan yang memanfaatkan kemampuan mikroorganisme dengan cara mengubah kontaminan menjadi senyawa tidak berbahaya. Tujuan dari kajian ini adalah mengalisis penerapan bioremediasi (bioaugmentasi) pada air tanah tercemar solar di Kecamatan Gedongtengen, Yogyakarta, sebagai akibat dari kebocoran tangki penyimpanan solar di Stasiun Tugu Yogyakarta. Bioaugmentasi yang dikaji adalah menggunakan isolat konsorsium bakteri yang terdiri dari bakteri *Pseudomonas aeruginosa* dan *Bacillus subtilis*. Jumlah bakteri yang ditambahkan sebanyak  $26.250,72 \text{ mL} \times 10^9 \text{ CFU/mL}$  dengan waktu bioaugmentasi selama 12 minggu atau 84 hari. Bioaugmentasi disertai dengan penambahan nutrisi berupa nitrogen dan fosfor, serta oksigen untuk mendukung pertumbuhan bakteri. 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).

**Kata Kunci**—Bioaugmentasi, Kecamatan Gedongtengen Yogyakarta, Pencemaran Air Tanah, *Pseudomonas aeruginosa* dan *Bacillus subtilis*, Solar.

## I. PENDAHULUAN

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 [1]. Lingkungan yang tercemar dapat menimbulkan dampak yang buruk yaitu matinya flora dan fauna, keracunan pada manusia, serta rusaknya lingkungan akibat dari polusi [2]. Pencemaran air terjadi disebabkan oleh hasil buangan industri serta limbah rumah tangga. [3]. Kontaminasi bahan bakar minyak pada air tanah dapat terjadi akibat dari ceceran minyak di tanah dan kebocoran transportasi maupun pipa penyalur minyak. Selain itu kebocoraan pada tangki minyak bawah tanah juga dapat menyebabkan pencemaran pada akuifer [4].

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 (KAI) Daerah Operasi VI Yogyakarta yang terjadi pada tahun 1997 [5]. Kebocoran terjadi di Stasiun Tugu Yogyakarta dan berdampak buruk terhadap sistem air tanah di sekitar wilayah tersebut.

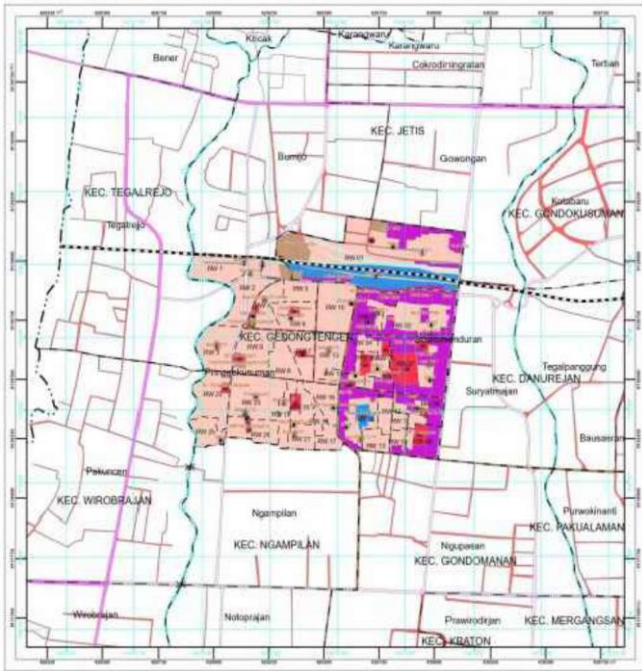
Beberapa sumur di daerah Jlagran mengalami pencemaran dan terkontaminasi oleh hidrokarbon [6]. Kasus lainnya terjadi di Desa Kamulyan, Kecamatan Manonjaya, Kabupaten Tasikmalaya. Kebocoran pipa distribusi solar milik PT Pertamina pada tahun 2014 membuat sumur dan kolam milik warga tercemar solar. Selain 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 solar [7].

Ada beberapa metode yang dapat dilakukan untuk meremediasi kontaminan solar pada air tanah seperti bioremediasi, fitoremediasi, dan bioventing. 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 [8]. 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 efisiensi biodegradasi [9].

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 [10]. Bioaugmentasi merupakan metode bioremediasi yang menjanjikan karena dinilai efektif, murah, dan ramah lingkungan dimana isolat bakteri atau konsorsium mikroba diberikan ke lokasi yang terkontaminasi [11]. Dengan demikian, teknik bioaugmentasi menggunakan bakteri dirasa sangat cocok untuk meremediasi pencemaran *diesel oil* pada air tanah.

## II. METODE KAJIAN

Metode kajian yang digunakan adalah mengkaji dari berbagai literatur melalui *systematic review* menggunakan *Mendeley Reference Manager*. Literatur yang digunakan berasal dari jurnal penelitian nasional maupun internasional, *textbooks*, disertasi dan laporan tugas akhir berhubungan dengan topik yang akan dikaji yaitu bioaugmentasi air tanah



Gambar 1. Peta wilayah kecamatan Gedongtengen, Yogyakarta.

tercemar solar. Data tentang pencemaran air tanah di wilayah Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta merupakan data sekunder, yang diperoleh dari berbagai literatur.

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### A. Gambaran Umum Wilayah Studi

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 [12]. Untuk peta wilayah Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta dapat dilihat pada Gambar 1 [13].

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 [14].

#### B. Pencemaran Solar pada Air Tanah di Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta

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 KAI selaku pengelola membuat tangki penyimpanan solar yang ditanam di dalam tanah di wilayah Stasiun Tugu. Di tahun 2003, diberitakan bahwa sumur gali warga Jagran dan Gandekan Lor, Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta yang biasa digunakan untuk kebutuhan rumah tangga tercemar solar.

Air sumur yang tercemar menjadi berwarna hitam, berminyak, dan berbau solar. PT KAI 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. 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 [15].

Warga Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta menggunakan air tanah untuk kebutuhan domestik maupun non domestik. Kebutuhan air di Kecamatan Gedongtengen adalah sebesar  $932.921 \text{ m}^3/\text{tahun}$  dengan persentase sebesar 4,56% dari total kebutuhan air di Kota Yogyakarta [16].

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. Salah satu penyakit yang diderita oleh masyarakat adalah penyakit diare [17]. 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. Data laporan diare dari puskesmas menunjukkan target penemuan kasus diare di Kecamatan Gedongtengen sebanyak 532 kasus penemuan kasus yang ditangani sebanyak 287 kasus [18].

#### C. Penanganan Pencemaran Air Tanah di Kecamatan Gedongtengen

Adanya indikasi kebocoran pada tangki penyimpanan solar, PT KAI 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 KAI 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.

PT KAI melakukan pengambilan sampel air tanah dengan pengeboran. Hasil dari sampel air tersebut kemudian akan dilakukan uji kelayakan [19]. PT KAI 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 tentang waktu pemompaan, laju debit pompa, dan durasi pemompaan [20].

#### D. Karakteristik Air Tanah Kecamatan Gedongtengen, Yogyakarta

Karakteristik air tanah yang ada di Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta adalah sebagai berikut:

##### 1) 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*). Berdasarkan pemetaan yang dilakukan, didapatkan kedalaman muka air tanah di wilayah penelitian yang bervariasi antara 4 meter hingga 16 meter di bawah permukaan tanah [15]. 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 [16].

##### 2) 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 [21]. Aliran air tanah di Kecamatan Gedongtengen mengalir dari utara menuju selatan, barat, dan timur. Pola aliran juga dipengaruhi oleh elevasi air tanah, dimana muka air tanah tertinggi berada di wilayah utara dan elevasi lebih rendah di wilayah barat, selatan, dan timur. Daerah penelitian pada pemetaan menunjukkan muka air tanah berkisar antara 94 hingga 102 meter di atas permukaan laut [15].

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 [5].

##### 3) Konsentrasi Kontaminan

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 30.000 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 *Environmental Guidelines and Standards for The Petroleum Industry in Nigeria* (EGASPIN) yang dikeluarkan oleh *Department of Petroleum Resources* pada tahun 2002, dimana baku mutu yang ada

Tabel 1.

Kemampuan *P. aeruginosa* dan *B. subtilis* mendegradasi solar dan benzena.

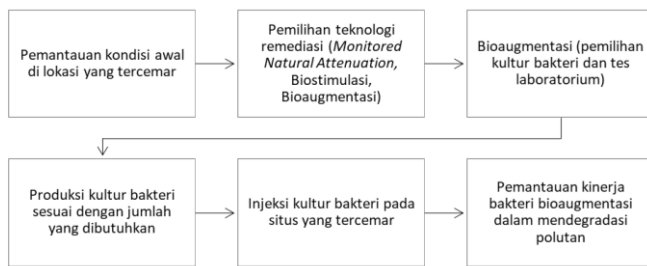
Bakteri	Jenis	Pencemar	Efisiensi
<i>P. aeruginosa</i>	Tunggal	Diesel	87% (20 hari)
<i>B. subtilis</i>	Tunggal	Diesel	75% (20 hari)
<i>P. aeruginosa</i>	Tunggal	Benzena	91,61-99,99% (23 hari)
<i>B. subtilis</i>	Tunggal	Benzena	58,62-99,99% (23 hari)
<i>P. aeruginosa</i> <i>B. subtilis</i>	Konsorsium	Benzena	86,94-99,99% (23 hari)

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 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 [20], [22].

##### E. Pemilihan Bakteri Bioaugmentator

Pemilihan bakteri yang digunakan dalam bioaugmentasi air tanah tercemar ini merupakan isolat bakteri konsorsium yang terdiri dari spesies 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. 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.

*P. aeruginosa* 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. *P. 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 [23]. Spesies bakteri ini bahkan mampu bertahan hidup pada kondisi lingkungan yang asam hingga pH 5. *P. aeruginosa* memiliki potensi yang baik untuk digunakan sebagai agen pengolahan biologis untuk air limbah yang tercemar [24]. *B. subtilis* merupakan spesies yang paling banyak dipelajari dalam genus *Bacillus*. Sel dari *B. 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 [25]. Spesies ini termasuk ke dalam bakteri gram-positif non-patogen. Endospora yang dibentuk oleh *B. subtilis* dapat bertahan dalam kondisi yang keras (suhu tinggi, kering, paparan UV, dan radiasi). *B. 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



Gambar 2. Skema proses bioaugmentasi.

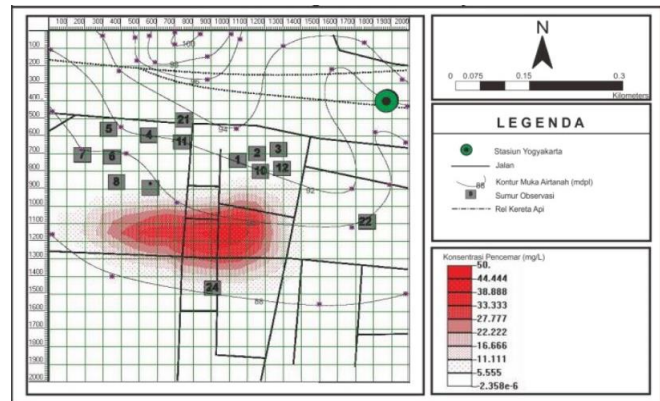
remediasi [26][27].

Kedua spesies bakteri baik *P. aeruginosa* maupun *B. subtilis* sama-sama memiliki kemampuan untuk bertahan hidup di lingkungan yang tercemar solar dan bahkan mampu mendegradasinya. Berdasarkan Tabel 1 [28][29], Bakteri *P. aeruginosa* mampu mendegradasi solar dengan efisiensi hingga 87%, sedangkan *B. subtilis* memiliki efisiensi hingga 75%. Selain itu keduanya juga mampu mendegradasi senyawa benzena yang merupakan bagian dari hidrokarbon aromatik yang terkandung dalam solar. *P. aeruginosa* memiliki efisiensi degradasi senyawa benzena hingga 99,99%, sedangkan *B. subtilis* memiliki efisiensi hingga 93%. Isolat konsorsium dari *mixed culture* kedua bakteri tersebut juga dapat mendegradasi senyawa benzena hingga 99,99%. Dari hasil tersebut, diperkaiakan 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%.

Proses biodegradasi oleh bakteri *P. aeruginosa* dan *B. 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 CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O sebagai produk samping [30].

#### F. Penerapan Bioaugmentasi pada Air Tanah Tercemar Solar di Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta

Proses bioaugmentasi dilakukan sesuai dengan langkah-langkah yang tertera pada bagan alir Gambar 2 [31]. 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* (proses degradasi secara alami), biostimulasi (penambahan nutrisi), dan bioaugmentasi (penambahan bakteri). 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 [31].



Gambar 3. Peta penyebaran plume.

Volume air tanah didapatkan dari debit air tanah yang ada di wilayah kajian yaitu Kecamatan Gedongtengen. Debit air tanah yang ada di Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta adalah 13.166.681 m<sup>3</sup>/tahun atau 252.511,69 m<sup>3</sup>/minggu [16]. Proses biodegradasi polutan solar yang disertai dengan biostimulasi penambahan nutrisi N dan P yang dilakukan pada tanah di Hong Kong berlangsung selama 12 minggu [32]. Berdasarkan data tersebut didapatkan volume air tanah sebesar 3.030.140,28 x 10<sup>3</sup> L.

Dalam studi kasus ini, akan dilakukan penanganan pada wilayah yang mencakup area *plume* kontaminan solar. Berdasarkan pemodelan yang telah dilakukan, *plume* kontaminan solar memiliki panjang 370 m dan lebar 270 m [20]. Pemodelan dilakukan untuk mengetahui penyebaran *plume* pada 10 tahun ke depan, yaitu pada tahun 2021. Adapun peta persebaran *plume* dapat dilihat pada Gambar 3 [3]. Luas zona bioaugmentasi sebesar 99.900 m<sup>2</sup> didapatkan dari panjang dan lebar *plume* [3]. Dengan luas Kecamatan Gedongtengen sebesar 0,96 km<sup>2</sup>, maka didapatkan volume area pencemaran sebesar 315.323.973 L.

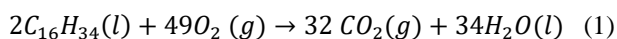
Kontaminan solar dapat bergerak ke bawah melalui proses perkolasi dan mencemari hingga kedalaman 14 meter [15]. Selain itu, diketahui bahwa ketebalan *unsaturated zone* pada tanah di Yogyakarta adalah 5 meter [33]. Dapat diketahui bahwa ketebalan pencemaran air tanah adalah 9 meter. Adapun kedalaman air tanah rata-rata yang ada di Formasi Yogyakarta adalah 40 meter [16]. Maka dari itu, volume pencemaran didapatkan sebesar 70.947.983,9 L. Konsentrasi rata-rata pada wilayah studi adalah 3,7 mg/L [20]. Dapat dihitung beban polutan adalah sebesar 262.507.207 mg atau 262.507,207 g.

Dalam aplikasi bioaugmentasi, perlu juga dilakukan biostimulasi untuk mendukung pertumbuhan bakteri yang menjadi agen biodegradasi. Biostimulasi adalah penambahan nutrisi ke situs yang tercemar. 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 [34]. Polutan solar yang merupakan senyawa hidrokarbon dapat menjadi sumber karbon bagi bakteri sehingga jumlah karbon yang ada di area tercemar sama dengan beban polutan, yaitu

262.507,207 g atau 262,5 kg. Dengan rasio optimum, didapatkan kebutuhan nitrogen dan fosfor masing-masing sebesar 26,25 kg dan 2,625 kg.

Pemenuhan nutrisi pada proses biostimulasi 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 [35]. Pupuk organik dapat berasal dari limbah yang telah diolah. 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% [36]. Nutrien ditambahkan dengan cara dilarutkan dengan air tanah yang ada di wilayah studi. Larutan nutrien kemudian diinjeksikan ke dalam tanah agar nantinya bakteri yang ditambahkan dapat hidup karena kebutuhan nutrisinya dapat terpenuhi.

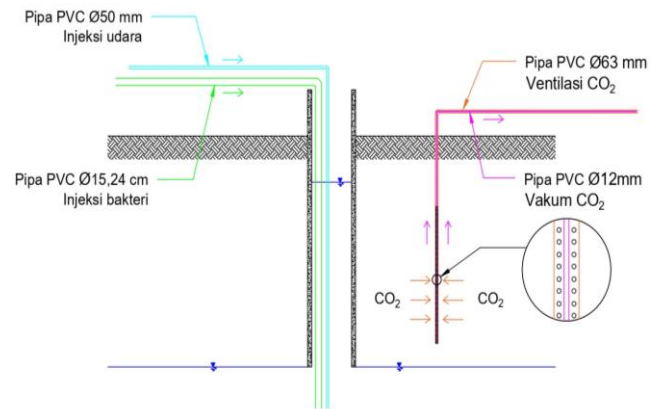
Selain nutrisi berupa N dan P, penambahan oksigen juga diperlukan. Hal ini dikarenakan bakteri bekerja secara aerobik dan pada proses biodegradasi diperlukan oksigen di dalamnya. Teknik penambahan oksigen ini disebut juga sebagai biosparging. Biosparging ini menggunakan oksigen yang ditingkatkan dalam air tanah, sehingga meningkatkan laju biodegradasi polutan oleh mikroorganisme. Proses biosparging membutuhkan injeksi udara bertekanan rendah di bawah permukaan air [34]. Kebutuhan penambahan oksigen dapat dihitung melalui stoikiometri dari reaksi oksidasi solar ( $C_{16}H_{34}$ ) yang menghasilkan  $CO_2$  dan  $H_2O$  seperti pada (1).



Berdasarkan reaksi tersebut dihitung jumlah mol (n) dari solar dan oksigen untuk kemudian menentukan volume kebutuhan oksigen. Diketahui massa solar sama dengan beban polutan dan didapatkan volume oksigen sebesar 318.725,564 L. Selanjutnya dapat dihitung kebutuhan udara yang diinjeksikan oleh *blower*. Dengan waktu bioaugmentasi selama 12 minggu atau 84 hari dan efisiensi transfer oksigen sebesar 10%, maka kebutuhan udara didapatkan sebesar 37.943,52 L/hari.

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 *P. aeruginosa* dan *B. subtilis*. Inokulum dibuat sebanyak 30 mL dengan konsentrasi 10% (v/v) dengan kerapatan sel  $1 \times 10^9$  CFU/mL [29]. Maka jumlah bakteri (x) yang dibutuhkan untuk menurunkan konsentrasi polutan sebanyak 262.507,207 gram adalah sebesar  $26.250,72 \text{ mL} \times 10^9$  CFU/mL.

Penambahan penambahan bakteri dilakukan dengan cara menginjeksikannya ke dalam air tanah melalui sumur. 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



Gambar 4. Perencanaan Sumur Injeksi

cm [31]. 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 [37]. Detail perencanaan sumur injeksi dapat dilihat pada Gambar 4.

Diestimasi efisiensi dari inokulat konsorsium tersebut sebesar 87% untuk biodegradasi *total petroleum hidrokarbon* (TPH), sehingga didapatkan jumlah TPH akhir sebesar 34.125.936,9 mg dan konsentrasi akhir sebesar 0,48 mg/L. Menurut EGASPIN tahun 2002, baku mutu untuk air tanah dengan parameter pencemar TPH adalah 0,6 mg/L [22]. 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 [38]. Dari pengukuran yang telah dilakukan, diketahui kandungan benzena di dalam solar sebanyak 19,26%. Jumlah awal benzena adalah sebesar 50.558.888,1 mg. Diestimasi bahwa efisiensi dalam mendegradasi senyawa benzena adalah sebesar 99%, maka didapatkan jumlah TPH akhir sebesar 505.588,88 mg dan konsentrasi akhir sebesar 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 [39]. 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  $CO_2$  dan  $H_2O$ , dimana kedua produk tersebut dapat berpotensi membentuk senyawa asam karbonat ( $H_2CO_3$ ) 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. 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 [40]. Pipa ekstraksi gas ini dapat berfungsi sebagai *exit gate* untuk mengeluarkan  $CO_2$  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 nutrien. 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.

Berdasarkan 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.

#### IV. KESIMPULAN

Berdasarkan uraian yang dijelaskan pada hasil dan pembahasan dapat diperoleh kesimpulan bahwa yang pertama pencemaran minyak solar pada air tanah terjadi di Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta disebabkan oleh kebocoran tangki penyimpanan BBM. 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 untuk mereduksi polutan solar pada air tanah adalah bioaugmentasi. Kedua, agen biodegradasi dalam bioaugmentasi adalah isolat konsorsium bakteri dengan memperhatikan faktor-faktor yang berpengaruh. Jenis bakteri dan waktu degradasi berpengaruh dalam kemampuan isolat untuk melakukan degradasi kontaminan solar. Penanganan yang tepat pada batasan yang ditemui juga mempengaruhi bioaugmentasi. Ketiga, pencemaran solar pada air tanah di Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta menunjukkan bahwa metode bioaugmentasi merupakan alternatif penanganan yang sesuai. Skenario penggunaan isolat bakteri disesuaikan dengan hasil penelitian sebelumnya yakni dengan menggunakan *mixed culture* yang terdiri dari bakteri *Pseudomonas aeruginosa* dan *Bacillus subtilis* dengan penambahan sebanyak 26.250,72 mL x 10<sup>9</sup> CFU/mL. Penambahan nutrisi N & P, serta O<sub>2</sub> juga dilakukan. Dengan persentase degradasi TPH dan benzena sebesar 87% dan 99% dapat menurunkan TPH menjadi

0,48mg/L dan benzena menjadi 0,007 mg/L sehingga memenuhi baku mutu (TPH 1 mg/L & benzena 0,01 mg/L).

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] O. J. Sumampouw and Y. Risjani, *Indikator Pencemaran Lingkungan*. Yogyakarta: Deepublish, 2018.
- [2] A. I. F. Lubis, D. P. Nasution, and R. Sembiring, "Analisis dampak pencemaran lingkungan terhadap faktor sosial ekonomi pada wilayah pesisir di Desa Pahlawan Kecamatan Tanjung Tiram Kabupaten Batu Bara," *J. Ilm. Abdi Ilmu*, vol. 11, no. 2, pp. 94–116, 2018.
- [3] A. Rahman, M. S. Alim., and U. B. L. Utami, "Inventarisasi dan identifikasi sumber pencemar air di Kota Banjarmasin," *EnviroScientiae*, vol. 7, no. 2, pp. 56–68, 2011, doi: 10.20527/es.v7i2.389.
- [4] C. H. Chen, L. M. Whang, C. L. Pan, C. L. Yang, and P. W. G. Liu, "Immobilization of diesel-degrading consortia for bioremediation of diesel-contaminated groundwater and seawater," *Int. Biodeterior. Biodegradation*, vol. 124, pp. 62–72, 2017, doi: 10.1016/j.ibiod.2017.07.001.
- [5] W. Setyaningsih, "Model pergerakan bahan pencemar minyak disel pada akuifer batupasir formasi volkanik merapi muda," *J. Geogr. Media Inf. Pengemb. dan Profesi Kegeografian*, vol. 7, no. 2, 2010.
- [6] H. A. Rahman, D. P. E. Putra, and H. Hendrayana, "Pemodelan pergerakan pencemar air tanah oleh hidrokarbon di Kelurahan Jlagran Kota Yogyakarta," *J. Geosains dan Teknol.*, vol. 1, no. 3, pp. 81–88, 2018, doi: 10.14710/jgt.1.3.2018.81-88.
- [7] J. D. Prasetya, H. Lukito, and A. D. Masyithoh, "Arahan Pengelolaan Airtanah Akibat Pencemaran Hidrokarbon di Dusun Sidadadi Desa Tarisi Kecamatan Wanareja Kabupaten Cilacap," in *Prosiding Satu Bumi*, 2021, pp. 362–368.
- [8] A. D. Kristinanda, "Isolasi Bakteri Pendegradasi Senyawa Hidrokarbon pada Tanah Tercemar di PT. KAI (Persero) UPT Balai Yasa Yogyakarta," Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, 2018.
- [9] A. E. Kis *et al.*, "Characterization of the Rhodococcus sp. MK1 strain and its pilot application for bioremediation of diesel oil-contaminated soil," *Acta Microbiol. Immunol. Hung.*, vol. 64, no. 4, pp. 463–482, 2017, doi: 10.1556/030.64.2017.037.
- [10] I. Melati, "Teknik Bioremediasi: Keuntungan, Keterbatasan dan Prospek Riset," in *Prosiding Biotik*, 2021, pp. 272–286.
- [11] A. Ueno, Y. Ito, I. Yumoto, and H. Okuyama, "Isolation and characterization of bacteria from soil contaminated with diesel oil and the possible use of These in Autochthonous bioaugmentation," *World J. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 23, no. 12, pp. 1739–1745, 2007, doi: 10.1007/s11274-007-9423-6.
- [12] BPS Kota Yogyakarta, *Kecamatan Gedongtengen Dalam Angka 2021*. Yogyakarta: BPS Kota Yogyakarta, 2021.
- [13] Kemantren Gedongtengen, *Gambaran Umum Kecamatan Gedongtengen*. Yogyakarta: Portal Pemerintah Kota Yogyakarta, 2022. [Online]. Available: <https://gedongtengencek.jogjakota.go.id/page/index/peta-wilayah>
- [14] D. P. E. Putra, H. H. M. Iqbal, and T. T. Putranto, "Assessment of optimum yield of groundwater withdrawal in the Yogyakarta City, Indonesia," *J. Appl. Geol.*, vol. 5, no. 1, pp. 41–49, 2013, doi: 10.22146/jag.7206.
- [15] H. Hendrayana, D. P. E. Putra, and Y. Priambodo, "Assessment of organic carbon contamination in the unsaturated zone: a case of Yogyakarta City Indonesia," *J. Degrad. Min. Lands Manag.*, vol. 9, no. 1, pp. 3115–3127, 2021, doi: 10.15243/jdmlm.2021.091.3115.
- [16] A. Cahyadi, A. I. Riyanto, H. Fatchurohman, S. H. M. B. Santosa, and R. Endarto, "Indeks pemakaian airtanah di Kota Yogyakarta," *J. Tunas Geogr.*, vol. 9, no. 1, pp. 43–54, 2020, doi: 10.24114/tgeo.v9i1.17630.
- [17] F. Ahmed and A. N. M. Fakhruddin, "A review on environmental contamination of petroleum hydrocarbons and its biodegradation," *Int. J. Environ. Sci. Nat. Resour.*, vol. 11, no. 3, pp. 63–69, 2018, doi: 10.19080/IJESNR.2018.11.555811.
- [18] Dinas Kesehatan Kota Yogyakarta, *Profil Kesehatan Kota Yogyakarta Tahun 2021*. Yogyakarta: Pemerintah Kota Yogyakarta, 2021.
- [19] J. Saptono, *PT KAI Daop VI Yogyakarta Ambil Sample Air Disaksikan Forkompimka Kecamatan Gedongtengen*. Yogyakarta: Portal Pemerintah Kota Yogyakarta, 2019. [Online]. Available: <https://gedongtengencek.jogjakota.go.id/detail/index/8609>.
- [20] E. G. Manek, D. P. E. Putra, and H. Hendrayana, "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," 2021.
- [21] A. Satapona, D. P. E. Putra, and H. Hendrayana, "Groundwater flow modeling in the Malioboro, Yogyakarta, Indonesia," *J. Appl. Geol.*, vol. 3, no. 1, pp. 11–22, 2018, doi: 10.22146/jag.39996.

- [22] G. L. Sari, Y. Trihadiningrum, and N. Ni'matuzahroh, "Petroleum hydrocarbon pollution in soil and surface water by public oil fields in Wonocolo sub-district, Indonesia," *J. Ecol. Eng.*, vol. 19, no. 2, pp. 184–193, 2018, doi: 10.12911/22998993/82800.
- [23] W. Wu, Y. Jin, F. Bai, and S. Jin, *Pseudomonas Aeruginosa In Molecular Medical Microbiology*. Amsterdam: Academic Press, 2015. doi: 10.1016/B978-0-12-397169-2.00041-X.
- [24] I. F. Purwanti, S. B. Kurniawan, and M. F. Imron, "Potential of *Pseudomonas aeruginosa* isolated from aluminium-contaminated site in aluminium removal and recovery from wastewater," *Environ. Technol. Innov.*, vol. 15, 2019, doi: 10.1016/j.eti.2019.100422.
- [25] A. C. S. Yu, J. F. C. Loo, S. Yu, S. K. Kong, and T.-F. Chan, "Monitoring bacterial growth using tunable resistive pulse sensing with a pore-based technique," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 98, no. 2, pp. 855–862, 2014, doi: 10.1007/s00253-013-5377-9.
- [26] A. T. Kovács, "Bacillus subtilis," *Trends Microbiol.*, vol. 27, no. 8, pp. 742–725, 2019, doi: 10.1016/j.tim.2019.03.008.
- [27] C. Blake, M. N. Christensen, and Á. T. Kovács, "Molecular aspects of plant growth promotion and protection by *Bacillus subtilis*," *Mol. Plant-Microbe Interact.*, vol. 34, no. 1, pp. 15–25, 2021, doi: 10.1094/MPMI-08-20-0225-CR.
- [28] M.-S. Safdari, H.-R. Kariminia, Z. G. Nejad, and T. H. Fletcher, "Study potential of indigenous *Pseudomonas aeruginosa* and *Bacillus subtilis* in bioremediation of diesel-contaminated water," *Water Air Soil Pollut.*, vol. 228, no. 37, pp. 1–7, 2017, doi: 10.1007/s11270-016-3220-5.
- [29] D. R. Kurnia, W. Mangunwardoyo, and H. Ambarsari, "Biodegradation of Used Lubricant Oil Hydrocarbons Using *Bacillus subtilis* InaCC B289 and *Pseudomonas aeruginosa* InaCC B290 in Single or Mixed Cultures," 2018. doi: 10.1063/1.5062805.
- [30] W. K. Wardhani and H. S. Titah, "Studi literatur alternatif penanganan tumpahan minyak mentah menggunakan *Bacillus subtilis* dan *Pseudomonas putida* (Studi Kasus: tumpahan minyak mentah sumur YYA-1)," *J. Tek. ITS*, vol. 9, no. 2, pp. 97–102, 2021, doi: 10.12962/j23373539.v9i2.52637.
- [31] R. Steffan, C. Schaefer, and D. Lippincott, *Bioaugmentation for Groundwater Remediation*. US: Shaw Environmental and Infrastructure, Inc, 2010.
- [32] F. M. Bento, F. A. Camargo, B. C. Okeke, and W. T. Frankenberger, "Comparative bioremediation of soils contaminated with diesel oil by natural attenuation, biostimulation and bioaugmentation," *Bioresour. Technol.*, vol. 96, no. 9, pp. 1049–1055, 2005, doi: 10.1016/j.biortech.2004.09.008.
- [33] T. Souvannachith, D. P. E. Putra, and H. Hendrayana, "Assessment of groundwater contamination hazard by nitrate in Samas area, Bantul district, Yogyakarta, Indonesia," *J. Appl. Geol.*, vol. 2, no. 1, pp. 36–47, 2017, doi: 10.22146/jag.30256.
- [34] P. P. Wulan, M. Gozan, B. Arby, and B. Achmad, "Penentuan Rasio Optimum C: N: P sebagai Nutrisi pada Proses Biodegradasi Benzena-Toluena dan Scale Up Kolom Bioregenerator," Universitas Indonesia, Depok, 2011.
- [35] A. S. Nwankwegu, M. U. Orji, and C. O. Onwosi, "Studies on organic and in-organic biostimulants in bioremediation of diesel-contaminated arable soil," *Chemosphere*, vol. 162, pp. 148–156, 2016, doi: 10.1016/j.chemosphere.2016.07.074.
- [36] W. A. Akbari, Y. Fitrianiingsih, and D. R. Jati, "Pemanfaatan limbah kulit pisang dan tanaman *Mucuna bracteata* sebagai pupuk kompos," *J. Teknol. Lingkungan. Lahan Basah*, vol. 3, no. 1, pp. 1–10, 2015, doi: 10.26418/jtlb.v3i1.11424.
- [37] H. Lee, Y. Lee, J. Kim, and C. Kim, "Field application of modified in situ soil flushing in combination with air sparging at a military site polluted by diesel and gasoline in Korea," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 11, no. 9, pp. 8806–8824, 2014, doi: 10.3390/ijerph110908806.
- [38] M. Huth and A. Heilos, "Fuel flexibility in gas turbine systems: impact on burner design and performance," *Mod. Gas Turbine Syst.*, pp. 635–684, 2013, doi: 10.1533/9780857096067.3.635.
- [39] Menteri Kesehatan Republik Indonesia, *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*. Jakarta: Menteri Kesehatan Republik Indonesia, 2017.
- [40] J. Machackova, Z. Wittlingerova, K. Vlk, and J. Zima, "Major factors affecting in situ biodegradation rates of jet-fuel during large-scale biosparging project in sedimentary bedrock," *J. Environ. Sci. Heal.*, vol. 47, no. 8, pp. 1152–1165, 2012, doi: 10.1080/10934529.2012.668379.