

# Degradasi Total Petroleum Hidrokarbon oleh Bakteri Petrofilik Dengan Proses Bioremediasi Pada Lahan Pasca Pertambangan Minyak Dan Gas

Wilujeng Rastinur Kholiafah, Syadzadhiya Q. Z Nisa'

Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jawa Timur, Surabaya

\*Koresponden email: syadzadhiya.tl@upnjatim.ac.id

Diterima: 28 Oktober 2025

Disetujui: 03 November 2025

## Abstract

Soil contamination by petroleum hydrocarbons is a serious environmental problem due to their toxic nature and potential threat to ecosystem health. This study aimed to evaluate the effectiveness of combining biostimulation and bioaugmentation in enhancing the degradation of Total Petroleum Hydrocarbons (TPH) in contaminated soil. The bioremediation experiment was conducted at the laboratory scale using 1000 g of contaminated soil, treated with 20% (w/w) NPK fertilizer and inoculated with *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas fluorescens*, each at 6% (v/w). The total bacterial population was monitored by determining colony-forming units (CFU/g) following the SNI 2332.3:2015 method, analyzed every 7 days for 35 days. TPH concentration was analyzed using the gravimetric method as regulated in the Decree of the Ministry of Environment No. 128/2003 at the same intervals. The results showed that the bacterial population increased significantly from  $9.6 \times 10^8$  CFU/g at the beginning of the experiment to  $9.30 \times 10^{15}$  CFU/g, with the peak growth observed on day 28. TPH concentration decreased consistently throughout the study, indicating that the combination of biostimulation and bioaugmentation was effective in accelerating hydrocarbon degradation.

**Keywords:** *bioremediation, pseudomonas fluorescens, bacillus subtilis, npk, tph*

## Abstrak

Pencemaran tanah oleh hidrokarbon minyak bumi merupakan permasalahan lingkungan yang serius karena sifatnya yang toksik dan berpotensi mengganggu kesehatan ekosistem. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas kombinasi biostimulasi dan bioaugmentasi dalam meningkatkan degradasi *Total Petroleum Hydrocarbon* (TPH) pada tanah tercemar. Uji bioremediasi dilakukan pada skala laboratorium menggunakan 1000 gram sampel tanah tercemar, dengan perlakuan penambahan pupuk NPK 20% (b/b) serta inokulasi *Bacillus subtilis* dan *Pseudomonas fluorescens* masing-masing 6% (v/w). Total populasi bakteri diamati melalui perhitungan total bakteri (CFU/g) menggunakan metode sesuai SNI 2332.3:2015, yang dianalisis setiap 7 hari sekali selama 35 hari. Konsentrasi TPH dianalisis menggunakan metode gravimetri yang tercantum dalam Kepmen LH No.128 Tahun 2003 setiap 7 hari sekali selama 35 hari penelitian. Hasil penelitian menunjukkan bahwa populasi bakteri meningkat signifikan dari  $9,6 \times 10^8$  CFU/g pada uji awal menjadi  $9,30 \times 10^{15}$  dengan puncak pertumbuhan terjadi pada hari ke-28. Konsentrasi TPH mengalami penurunan yang konsisten selama penelitian, menunjukkan efektivitas perlakuan biostimulasi dan bioaugmentasi dalam mempercepat degradasi hidrokarbon.

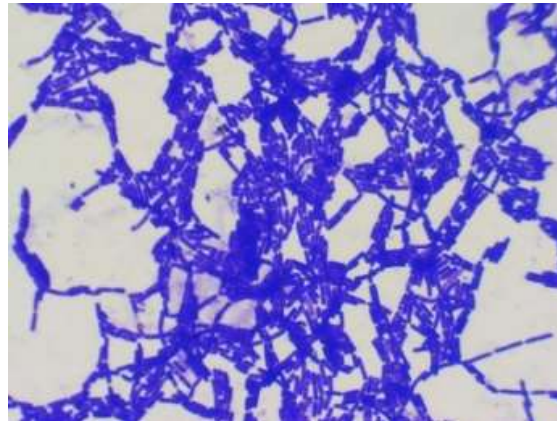
**Kata Kunci:** *bioremediasi, pseudomonas fluorescens, bacillus subtilis, NPK, TPH*

## 1. Pendahuluan

Aktivitas eksplorasi dan produksi minyak bumi berkontribusi signifikan terhadap pencemaran tanah oleh senyawa hidrokarbon. Senyawa ini khususnya Total Petroleum Hydrocarbon (TPH), bersifat toksik, persisten, serta berpotensi mengganggu ekosistem tanah [1]. Tanah merupakan salah satu sumber daya alam yang sangat vital bagi keberlangsungan kehidupan dan ekosistem di bumi. Fungsi tanah tidak hanya sebagai tempat tumbuhnya tanaman, tetapi juga sebagai penyimpan air, pengatur kualitas lingkungan, dan habitat bagi berbagai organisme [2]. Metode remediasi fisika dan kimia yang selama ini digunakan dinilai kurang ramah lingkungan dan membutuhkan biaya tinggi. Bioremediasi dinilai lebih efektif karena memanfaatkan aktivitas bakteri yaitu kelompok bakteri yang mampu menggunakan minyak bumi atau fraksi hidrokarbon sebagai sumber karbon dan energi. Efektivitas bioremediasi dapat ditingkatkan melalui biostimulasi dengan penambahan nutrisi, serta dengan penambahan konsentrasi bakteri [3]. Kondisi lingkungan di sekitar mikroorganisme harus dioptimalkan termasuk parameter fisik dan kimia seperti pH, suhu, kadar air, dan

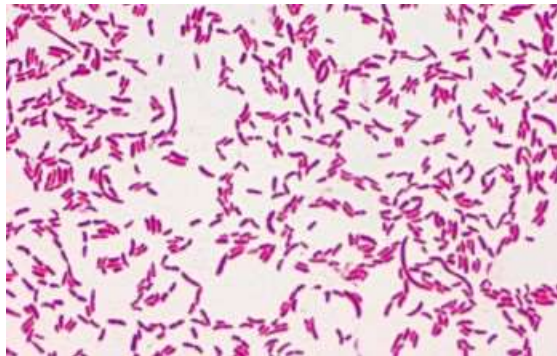
aerasi. Dalam konteks hidrokarbon, optimalisasi kadar oksigen sangat penting untuk mendukung aktivitas aerobik mikroba [4]. Pada proses penurunan kadar hidrokarbon, bioremediasi juga ditandai dengan adanya peningkatan populasi bakteri selama proses berlangsung. Jumlah total total populasi bakteri sering dijadikan indikator keberhasilan bioremediasi karena menunjukkan kemampuan mikroorganisme untuk beradaptasi, tumbuh, dan memanfaatkan hidrokarbon sebagai sumber energi [5].

Dalam praktik bioremediasi dikenal dua pendekatan mikrobiologis utama, yaitu pemanfaatan bakteri indigenous dan bakteri eksogenous. Bakteri indigenous merupakan bakteri asli yang telah beradaptasi dengan kondisi tanah setempat, sehingga memiliki ketahanan ekologi yang baik dan mampu bertahan dalam jangka panjang. Kapasitas degradasi oleh bakteri indigenous terhadap fraksi hidrokarbon kompleks seringkali terbatas sehingga memerlukan dukungan nutrisi tambahan [6]. Morfologi bakteri indigenous dapat dilihat pada **Gambar 1**.



**Gambar 1.** Morfologi mikroskopis bakteri indigenous  
Sumber: Hasil Identifikasi Bakteri Indigenous pada Tanah Tercemar, 2025

Pada bakteri eksogenous yang ditambahkan dari luar lingkungan setempat dan dipilih karena memiliki jalur enzimatik khusus untuk mendegradasi senyawa hidrokarbon tertentu. Kelebihannya adalah kemampuan degradasi yang tinggi, tetapi sering menghadapi tantangan adaptasi dan kompetisi dengan bakteri lokal [7]. Morfologi bakteri eksogenous dapat dilihat pada **Gambar 2**.



**Gambar 2.** Morfologi mikroskopis bakteri eksogenous  
Sumber: Purnomo, 2025

Konsorsium bakteri mampu menurunkan kadar hidrokarbon lebih dari 70% dalam waktu kurang dari 40 hari, sehingga menjadikannya alternatif bioremediasi yang efisien dan ramah lingkungan [9]. Penelitian ini difokuskan pada perlakuan biostimulasi yang dikombinasikan bioaugmentasi untuk mengevaluasi efektivitas degradasi TPH pada tanah tercemar minyak bumi. Pemantauan total populasi bakteri selama proses bioremediasi penting dilakukan untuk mengetahui dinamika pertumbuhan mikroorganisme dan hubungannya dengan penurunan TPH. Peningkatan jumlah sel bakteri umumnya sejalan dengan efisiensi degradasi hidrokarbon, karena semakin banyak sel aktif yang berperan dalam metabolisme substrat. Standarisasi konsentrasi bakteri pada penelitian ini dilakukan menggunakan larutan McFarland 0,5 yang paling umum digunakan dalam penelitian, karena dianggap setara dengan  $1,5 \times 10^8$  CFU/mL untuk memastikan jumlah sel yang diinokulasikan konsisten pada setiap perlakuan [10].

## 2. Metode Penelitian

### *Pengambilan Sampel Tanah Tercemar*

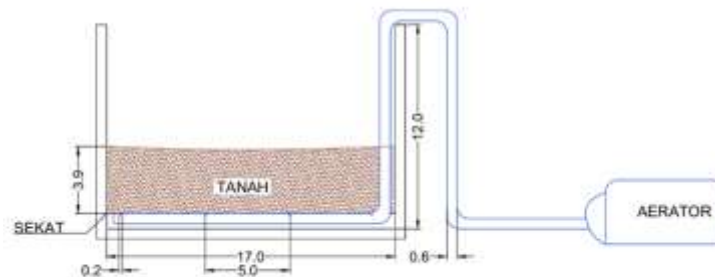
Sampel tanah tercemar minyak bumi diambil dari Kecamatan Porong, Kabupaten Sidoarjo, Jawa Timur – Indonesia. Wilayah ini diketahui pernah menjadi lokasi aktivitas pengeboran dan sumur migas. Saat ini kegiatan produksi migas di kawasan Porong sudah tidak lagi beroperasi, namun jejak pencemaran hidrokarbon akibat aktivitas eksplorasi di masa lalu masih dapat ditemukan pada lahan setempat. Pada penelitian ini, Pengambilan sampel dilakukan dengan metode purposive sampling pada kedalaman 0–30 cm dari permukaan tanah di area yang menunjukkan indikasi kontaminasi minyak bumi. Tanah kemudian dikumpulkan dalam wadah steril, dibawa ke lokasi penelitian, dikeringanginkan pada suhu ruang, dan diayak menggunakan saringan berukuran 2 mm sebelum digunakan untuk perlakuan bioremediasi.

### *Isolasi Bakteri dan Pembuatan Inokulum*

Isolasi dan identifikasi bakteri indigenous yang memiliki kemampuan mendegradasi hidrokarbon pada sampel tanah tercemar melalui uji biokimia. Bakteri yang diisolasi dari sampel tanah merupakan bakteri petrofilik, bakteri yang dapat memanfaatkan hidrokarbon menjadi sumber energi [11]. Pada Penelitian ini mengkombinasikan antara bakteri indigenous dan bakteri eksogenous. Bakteri eksogenous pada penelitian ini menggunakan isolat murni yang merupakan bakteri petrofilik. Bakteri eksogenous dapat ditentukan setelah mengetahui spesies dari bakteri indigenous. Suspensi bakteri dibuat menggunakan larutan NaCl fisiologis 0,85% dan disetarakan kekeruhannya dengan standar McFarland 0,5 yang setara dengan  $1,5 \times 10^8$  CFU/mL, sehingga konsentrasi bakteri yang diinokulasikan ke dalam tanah berada pada tingkat yang seragam.

### *Pembuatan Reaktor*

Pelaksanaan bioremediasi ini dilakukan pada box plastik ukuran 17 cm x 12 cm x 12 cm dengan berat tanah tiap box adalah 1 kg dengan volume 800 cm<sup>3</sup>, dimana apabila diletakkan pada reaktor maka tanah berada pada ketinggian 3,9 cm dari dasar reaktor. Aerator diletakkan pada bagian bawah tanah dan diberi kayu pada bagian sisi kanan dan kiri sebagai penyangga kasa fiber. Kasa fiber berguna untuk media penahan tanah agar tidak langsung menumpuk dan menutup aerator tersebut yang dapat menyebabkan sumbatan pada aerator. Desain Aerator dapat dilihat pada **Gambar 3**.



**Gambar 3.** Desain Reaktor  
Sumber: Hasil Analisis, 2025

Berdasarkan perhitungan stoikiometri, dibutuhkan sekitar 3–3,5 gram oksigen untuk setiap gram hidrokarbon [12]. Pada sampel tanah yang mengandung 40 gram hidrokarbon, kebutuhan oksigen maksimal adalah 140 gram O<sub>2</sub>. Perhitungan kebutuhan oksigen berdasarkan stoikiometri dan kapasitas suplai Oksigen ditunjukkan pada **Tabel 1**.

**Tabel 1.** Kebutuhan Oksigen dan kapasitas suplai oksigen

Parameter	Metode	Hasil
Kadar air tanah (%)	ASTM D2216	17%
Berat air dalam pori tanah	ASTM D2216-10	1,45
Bobot isi tanah	ASTM D7263	1,07 gram/cm <sup>3</sup>
Berat jenis partikel tanah	ASTM D-854-02	2,57 g/cm <sup>3</sup>
Porositas tanah	ASTM D2216	58%
Volume pori tanah	ASTM D7263	464 cm <sup>3</sup>
Volume Oksigen di pori tanah	V <sub>udara</sub> x 21%	32,29 cm <sup>3</sup>
Massa Oksigen yang tersedia	V O <sub>2</sub> x pO <sub>2</sub>	0,046 g
Massa Oksigen yang di suplai aerator	Debit x Berat Oksigen/volume	0,0011 kg/menit

Sumber: Hasil Analisis, 2025

Massa oksigen yang tersedia pada sampel tanah hanya 0,046 g Oksigen, sedangkan agar penelitian ini berjalan maksimal kebutuhan oksigennya yang dibutuhkan adalah 140 gram. Aerator dapat mensuplai oksigen sebesar 1,1 kg/menit, apabila dibutuhkan 140 gram oksigen dalam penelitian ini maka waktu yang dibutuhkan adalah perbandingan dari kebutuhan oksigen dengan maasa oksigen yang disuplai aerator. Total waktu yang diperlukan untuk suplai oksigen agar tercapai kebutuhan degradasi hidrokarbon adalah 127,28 menit. Jika waktu ini dibagi secara merata dalam periode bioremediasi selama 35 hari, maka suplai oksigen yang dibutuhkan per hari hanya sekitar 4 menit.

#### *Perlakuan Bioremediasi*

Pada uji bioremediasi ini dilakukan analisis awal untuk mengetahui karakteristik sampel tanah tercemar sebelum perlakuan, meliputi parameter kelembapan, pH, serta konsentrasi awal TPH. Uji bioremediasi ini dilakukan pada skala laboratorium dengan sampel uji tanah tercemar sebanyak 1000 gram. Penelitian ini memanfaatkan kombinasi antara biostimulasi dengan bioaugmentasi. Biostimulasi dengan penambahan pupuk NPK 20% (b/b), yang berarti 200 gram pupuk NPK ditambahkan pada sampel uji. Bioaugmentasi pada penelitian ini mengkombinasikan bakteri indigenous yang merupakan bakteri petrofilik dan bakteri eksogenous yang merupakan bakteri petrofilik diperoleh dari koleksi laboratorium. Pada penelitian ini total konsentrasi yang diinokulasikan sebesar 12% (v/w) dengan masing masing 6% (v/w) pada tiap suspensi bakteri, yang berarti masing masing bakteri diinokulasikan dalam sampel tanah tercemar sebanyak 60 ml. Pemilihan konsentrasi 12% (v/w) pada penelitian ini didasarkan pada hasil penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa konsentrasi inokulum 10% [13] dan 14% [14] memberikan kinerja degradasi hidrokarbon terbaik. Konsentrasi 12% dipilih sebagai nilai tengah dari dua konsentrasi optimal tersebut, dengan tujuan untuk mengevaluasi potensi efektivitasnya sebagai dosis yang efisien dalam proses bioremediasi.

Faktor lingkungan utama seperti pH, kelembapan, dan aerasi dikontrol untuk mendukung aktivitas degradasi oleh bakteri petrofilik. Bakteri petrofilik secara umum dapat hidup pada pH normal pertumbuhan mikroorganisme yaitu 6-8 [15] dengan tingkat kelembapan sekitar 40% sampai 60% agar mikroorganisme dapat bekerja efektif tanpa gangguan akibat terlalu kering atau terlalu basah [16]. Aerasi juga telah diperhitungkan sesuai standar ASTM untuk menjamin ketersediaan oksigen yang memadai bagi keberlangsungan metabolisme bakteri dalam uji bioremediasi.

#### *Analisis Total populasi Bakteri*

Analisis Total Populasi bakteri dilakukan pada hari ke-7, 14, 21, 28 dan 35 dengan pengenceran bertingkat. Analisis ini dilakukan sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) 2332.3:2015, yang mengatur prosedur pengujian mikrobiologi secara umum. Masing masing sampel tanah 1 gram perlakuan disuspensikan terhadap 10 ml air fisiologis steril, dihomogenkan lalu diambil 1 ml untuk pengenceran bertingkat. Pada pengenceran yang ditentukan, 1 ml sampel ditumbuhkan pada media agar. Media yang digunakan adalah Nutrient Agar (NA) dengan komposisi Peptone (5g/L); Meat extract (3g/L); Agar-agar: (12g/L) sebagai media umum untuk menumbuhkan bakteri, sehingga dapat mencerminkan total populasi bakteri yang ada dalam sampel. Cawan kemudian diinkubasi pada inkubator selama 24 - 48 jam, setelah itu jumlah koloni yang tumbuh dihitung dan dinyatakan dalam satuan Colony Forming Unit (CFU) per gram sampel tanah.

$$\text{CFU/g tanah} = \frac{\text{Jumlah koloni pada cawan}}{\text{sampel yang ditaman}} \times \text{Faktor pengenceran total} \quad (1)$$

#### *Analisis TPH*

Analisis TPH dilakukan pada hari ke-7, 14, 21, 28 dan 35. Konsentrasi TPH pada sampel tanah dianalisis menggunakan metode gravimetri berdasarkan standar EPA SW-846 sebagaimana tercantum dalam Kepmen LH No.128 Tahun 2003. Prosedur analisis dilakukan melalui beberapa tahapan. Pertama, sampel tanah diekstraksi menggunakan pelarut *n*-heksan untuk melarutkan fraksi hidrokarbon. Hasil ekstraksi dipisahkan menggunakan kertas saring. Hasil ekstraksi ditambahkan dengan Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> anhidrat guna mengikat sisa air dan disaring kembali. Filtrat kemudian diuapkan pada suhu sekitar 70°C hingga seluruh pelarut menguap dan tersisa residu. Residu tersebut didinginkan di dalam desikator sebelum ditimbang dengan neraca analitik untuk menentukan kadar TPH yang terkandung dalam tanah. Efisiensi degradasi TPH selama proses bioremediasi dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Efisiensi Degradasi (\%)} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (2)$$

dengan:

$C_0$  = Konsentrasi awal TPH (%)

$C_t$  = Konsentrasi TPH pada waktu ke-t (%)

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### Identifikasi Bakteri sebagai Variabel Uji

Hasil identifikasi bakteri indigenous dengan metode uji biokimia pada sampel tanah tercemar dapat dilihat pada **Tabel 2**.

**Tabel 2.** Hasil Identifikasi bakteri pendegradasi hidrokarbon indigenous pada sampel tanah

Bakteri	<i>Bacillus subtilis</i>
Pewarnaan gram	Batang gram positif
Bentuk Koloni	Permukaan kasar, berlendir, bergelombang pada bagian tepi
Ukuran Koloni (mm)	2-4
	Triple Sugar Iron
	Alkl/Acid Gas (-)
	H <sub>2</sub> S (-)
	SIM
	Indol (-)
	Motilitas (+)
Uji Biokimia	H <sub>2</sub> S (-)
	Sitrat (+)
	Oksidase (-)
	Katalase (+)
	Urease (-)

Sumber: Hasil Analisis, 2025

Bakteri indigenous yang memiliki kemampuan dapat mendegradasi hidrokarbon teridentifikasi sebagai bakteri *Bacillus subtilis*. Bakteri eksogenous yang ditambahkan pada penelitian ini adalah spesies *Pseudomonas fluorescens* yang memiliki efektifitas terbaik dari bakteri petrofilik [17].

#### Analisis Awal pada Tanah

Analisis awal terhadap sampel tanah tercemar disajikan pada **Tabel 3**.

**Tabel 3.** Hasil Analisis awal terhadap tanah tercemar

Parameter	Hasil Analisis
TPH	4%
pH	5
Suhu	29°C
Kelembapan	45
Bakteri indigenous	<i>Bacillus subtilis</i>
Total Populasi Bakteri Awal	$9,6 \times 10^8$

Sumber: Hasil Analisis, 2025

#### Analisis Total Populasi Bakteri

Analisis awal total populasi bakteri indigenous pada sampel tanah Adalah  $4,7 \times 10^6$  CFU/g, setelah ditambahkan inokulum bakteri *Bacillus subtilis* 6% (v/w) dan *Pseudomonas fluorescens* 6% (v/w) total populasi bakteri pada tanah meningkat menjadi  $9,6 \times 10^8$  CFU/g.

Peningkatan populasi bakteri selama proses bioremediasi menunjukkan kemampuan konsorsium dalam memanfaatkan hidrokarbon sebagai sumber energi. Konsorsium *Pseudomonas fluorescens* dan *Bacillus subtilis* memperlihatkan adaptasi yang baik pada lingkungan tercemar, ditandai dengan peningkatan populasi hingga orde  $10^{15}$  CFU/g. Hasil peningkatan populasi bakteri dapat dilihat di **Tabel 4**.

Populasi awal sebesar  $9,60 \times 10^8$  meningkat menjadi  $9,30 \times 10^{15}$  pada hari ke-28. Peningkatan populasi ini dipengaruhi ketersediaan nutrien serta substrat hidrokarbon yang mencukupi sebagai sumber karbon dan energi. Penambahan nutrien, di mana nitrogen dan fosfor menjadi nutrien utama yang dibutuhkan meningkatkan aktivitas metabolik bakteri dalam mendegradasi TPH di tanah tercemar [18].

**Tabel 4.** Total Populasi Bakteri

Waktu kontak (Hari)	Populasi Bakteri (CFU/g)
0	$9,6 \times 10^8$
7	$7,10 \times 10^{10}$
14	$4,60 \times 10^{12}$
21	$2,60 \times 10^{14}$
28	$9,30 \times 10^{15}$
35	$1,20 \times 10^{15}$

Sumber: Hasil Analisis, 2025

Ketersediaan nutrien yang cukup baik dari perlakuan biostimulasi mendorong bakteri untuk tetap berada dalam fase pertumbuhan logaritmik dengan peningkatan populasi yang signifikan. Pada hari ke-35, populasi bakteri mengalami penurunan yang menunjukkan bahwa mikroba telah memasuki fase kematian. Kondisi ini terjadi karena berkurangnya ketersediaan nutrien serta terbentuknya senyawa antara, dari proses degradasi TPH yang menumpuk di lingkungannya yang mengakibatkan pertumbuhan tidak lagi dapat dipertahankan secara optimal [19].

*Analisis Degradasi TPH dengan perlakuan biostimulasi dan bioaugmentasi (Pseudomonas fluorescens 6% (v/w) Bacillus subtilis 6% (v/w))*

Penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi TPH tanah mengalami penurunan signifikan selama 35 hari perlakuan bioremediasi dengan konsorsium *Pseudomonas fluorescens* dan *Bacillus subtilis* (B3). Kadar TPH awal sebesar 4,00% berhasil turun hingga 0,90% pada hari ke-35, dengan efisiensi degradasi mencapai 77,50%. Konsentrasi TPH dan efisiensi degradasi berdasarkan waktu kontak dapat dilihat pada **Tabel 5**.

**Tabel 5.** Konsentrasi TPH dan efisiensi degradasi berdasarkan waktu kontak

Waktu kontak (Hari)	Konsentrasi TPH (%)	Efisiensi degradasi (%)
0	4,00	0
7	3,25	18,75
14	2,50	37,50
21	1,95	51,25
28	1,40	65,00
35	0,90	77,50

Sumber: Hasil Analisis, 2025

Efisiensi degradasi yang tinggi pada perlakuan bioaugmentasi konsorsium bakteri terjadi karena adanya sinergi metabolik antara kedua bakteri. *Bacillus subtilis* memproduksi biosurfaktan yang mampu mengurangi tegangan permukaan sekaligus melepaskan minyak mentah dari tanah tercemar, sehingga mempercepat proses pemecahan senyawa hidrokarbon alifatik maupun aromatik [20]. *Pseudomonas fluorescens* memiliki jalur enzimatis khusus, seperti naphthalene dioxygenase, yang memungkinkan degradasi hidrokarbon kompleks termasuk hidrokarbon aromatik polisiklik [21]. Konsorsium mikroba sering kali lebih efektif dibanding isolat tunggal karena adanya pembagian fungsi metabolik, ko-metabolisme, dan peningkatan stabilitas komunitas [22]. Efisiensi ini lebih tinggi dibandingkan hasil pada bioremediasi dengan isolat tunggal, misalnya penggunaan *Pseudomonas aeruginosa* yang hanya mencapai degradasi sekitar 60% [23] atau *Bacillus subtilis* yang berkisar 65% [11].

#### 4. Kesimpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa perlakuan bioremediasi dengan perlakuan biostimulasi yang dikombinasikan dengan bioaugmentasi (*Pseudomonas fluorescens* dan *Bacillus subtilis*) mampu menurunkan kadar TPH secara signifikan dari 4,00% menjadi 0,90% dalam 35 hari dengan efisiensi degradasi sebesar 77,50%. Peningkatan total populasi bakteri dari  $10^8$  menjadi  $10^{15}$  CFU/g tanah selama proses bioremediasi, yang menunjukkan kemampuan adaptasi dan aktivitas metabolik mikroba dalam memanfaatkan hidrokarbon sebagai sumber energi. Hasil ini menegaskan bahwa penggunaan konsorsium bakteri sangat efektif, serta berpotensi diterapkan sebagai strategi bioremediasi ramah lingkungan untuk mengatasi pencemaran minyak bumi di tanah.

#### 5. Singkatan

TPH	Total Petroleum Hydrokarbon
%	Persentase

CFU	Colony Forming Unit
NPK	Nitrogen, Phosphorus, Kalium
(b/b)	Berat perberat
(v/w)	Volume per weight

## 6. Referensi

- [1] P. Handrianto, "Mikroorganisme Pendegradasi Tph (Total Petroleum Hydrocarbon) Sebagai Agen Bioremediasi Tanah Tercemar Minyak Bumi," *Jurnal SainHealth*, vol. 2, no. 2, p. 35, 2018, doi: 10.51804/jsh.v2i2.287.35-42.
- [2] Widia Gusti, Noni Noviana, Rita Sartika, Lia Anggraini, Andika Pradipta, and Henny Johan, "Studi Pencemaran Tanah Sebagai Bahan Pengayaan Topik Teknologi Ramah Lingkungan untuk Siswa SMP," *Jurnal Pendidikan Mipa*, vol. 12, no. 4, pp. 1252–1258, 2022, doi: 10.37630/jpm.v12i4.783.
- [3] G. Sari, Y. Trihadiningrum, N. Ni'matuzahroh, S. Putra, A. Kasasiah, and M. Alim, "Biosurfactant Produced by Indigenous Bacteria during Composting Process of Crude Oil Polluted Soil: Properties and Role," *Journal of Ecological Engineering*, vol. 23, no. 4, pp. 297–314, Feb. 2022, doi: 10.12911/22998993/146693.
- [4] S. Madonna, "Tinjauan Singkat Bio-Elektrokinetik Remediasi Pada Tanah Tercemar Hidrokarbon Minyak Bumi," *Jurnal Reka Lingkungan*, vol. 10, no. 3, pp. 175–187, 2022, doi: 10.26760/rekalingkungan.v10i3.175-187.
- [5] W. Nirmala *et al.*, "Kinetika Biodegradasi Limbah Minyak Bumi menggunakan Kompos," *Al Kimia*, vol. 2, no. 3, pp. 52–67, 2023.
- [6] A. T. Karyawati, R. S. Mauboy, D. Amalo, M. T. L Ruma, A. Ninda Momo, and B. Anita Pada, "Karakteristik Bakteri Pendegradasi Pada Tanah Yang Tercemar Oli Di Lokasi Perbengkelan Otomotif Kota Mbay Kabupaten Nagekeo," *Jurnal Biotropikal Sains*, vol. 20, no. 2, pp. 84–91, Jun. 2023.
- [7] R. M. , Atlas and R. Bartha, "Microbial Ecology: Fundamentals and Applications (4th ed.). ," in *Benjamin Cummings.*, 4th ed., 1998, pp. 345–347.
- [8] G. Purnomo, "Pseudomonas fluorescens: Klasifikasi, Morfologi, Habitat," Melek Perikanan, 2025.
- [9] Widiyanti Fitri, "Peranan Konsorsium Bakteri Sebagai Remediator Dalam Proses Degradasi Limbah Oli Bekas Kendaraan Bermotor," Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, 2020.
- [10] T. Setya Bhakti, R. Porwanti, D. Rahmawati, and D. P. Pribadi, "Total Plate Number Test at 0.5 McFarland Standard in Escherichia coli Culture," vol. 25, no. 2, pp. 1410–8801.
- [11] A. Garcia and I. Purwanti, "Kajian Bioaugmentasi pada Air Tanah Tercemar Solar di Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 11, no. 3, 2022.
- [12] U.S. Environmental Protection Agency, "How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites - A Guide for Corrective Action Plan Reviewers, Chapter 12, Enhanced Aerobic Bioremediation," Oct. 2017. [Online]. Available: [www.epa.gov/ust](http://www.epa.gov/ust)
- [13] R. Amin, F. Madubun, and D. Rahyuni, "Bioremediasi Tanah Terkontaminasi Hidrokarbon Menggunakan Teknik Bioaugmentasi," *EnviroScientiae*, vol. 16, no. 2, p. 318, Dec. 2020, doi: 10.20527/es.v16i2.9663.
- [14] N. Hendrasarie and Novi Eka, "Bioremediasi Lahan Tercemar Minyak Tanah Dengan Metoda Biopile Bioremediation Of Kerosene Contaminated Land Using Biopile Method," 2011. Accessed: May 18, 2025. [Online]. Available: <chrome://downloads/212-Article%20Text-753-1-10-20180413.pdf>
- [15] E. Kardena, "Bioteknologi untuk Solusi Pencemaran Lingkungan Akibat Tumpahan Minyak," <https://itb.ac.id/berita/bioteknologi-untuk-solusi-pencemaran-lingkungan-akibat-tumpahan-minyak/57565>.
- [16] Yayok Suryo Purnomo and Gusvia Kusuma Dhiningrum, "Bioremediasi Lahan Tercemar Pestisida dengan Cara Pengomposan di Perkebunan Apel Batu," *INSOLOGI: Jurnal Sains dan Teknologi*, vol. 2, no. 3, pp. 419–429, Jun. 2023, doi: 10.55123/insologi.v2i3.1839.
- [17] Y. S. Rahayu, Yuliani, and G. Trimulyono, "Isolation and identification of hydrocarbon degradation bacteria and phosphate solubilizing bacteria in oil contaminated soil in Bojonegoro, East Java, Indonesia," *Indonesian Journal of Science and Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 134–147, 2019, doi: 10.17509/ijost.v4i1.14923.
- [18] M. Wu, J. Wu, X. Zhang, and X. Ye, "Effect of bioaugmentation and biostimulation on hydrocarbon degradation and microbial community composition in petroleum-contaminated loessal soil," *Chemosphere*, vol. 237, p. 124456, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124456.

- [19] R. M. Maier, Ian L. Pepper, and Charles P. Gerba, "Bacterial Growth," in *Environmental Microbiology*, 2nd ed., Elsevier, 2009, ch. 3, pp. 37–54. doi: 10.1016/B978-0-12-370519-8.00003-1.
- [20] N. A. Al-Dhabi, G. A. Esmail, and M. Valan Arasu, "Enhanced Production of Biosurfactant from *Bacillus subtilis* Strain Al-Dhabi-130 under Solid-State Fermentation Using Date Molasses from Saudi Arabia for Bioremediation of Crude-Oil-Contaminated Soils," *Int J Environ Res Public Health*, vol. 17, no. 22, p. 8446, Nov. 2020, doi: 10.3390/ijerph17228446.
- [21] J. M. Foght and D. W. S. Westlake, "Transposon and spontaneous deletion mutants of plasmid-borne genes encoding polycyclic aromatic hydrocarbon degradation by a strain of *Pseudomonas fluorescens*," *Biodegradation*, vol. 7, no. 4, pp. 353–366, Aug. 1996, doi: 10.1007/BF00115749.
- [22] T. Zhang and H. Zhang, "Microbial Consortia Are Needed to Degrade Soil Pollutants," *Microorganisms*, vol. 10, no. 2, p. 261, Jan. 2022, doi: 10.3390/microorganisms10020261.
- [23] K. Y. Perwira, H. Lukito, and A. B. Irawan, "Efektivitas Bioaugmentasi dengan *Pseudomonas aeruginosa* pada Tanah Tercemar Minyak Bumi," *Prosiding Seminar Nasional Teknik Lingkungan Kebumihan SATU BUMI*, vol. 3, no. 1, pp. 31–36, 2021, doi: 10.31315/psb.v3i1.6233.