Metana: Media Komunikasi Rekayasa Proses dan Teknologi Tepat Guna ISSN: 1858-2907
Desember 2026 Vol. 22(2):49-58 EISSN: 2549-9130

Penurunan *Total Petroleum Hydrocarbon* pada Tanah Terkontaminasi Minyak Melalui Integrasi Biostimulasi dan Bioaugmentasi di PT X

Irvan Salsabila, Najwa Nabila Putri, Panca Setia Utama, Nurfatihayati*, Ida Zahrina, Cory Dian Al'farisi

Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Riau
Kampus Bina Widya Jl. H.R. Soebrantas Km 12,5 Pekanbaru, Riau, 28293 Indonesia
Email: nurfatihayati@lecturer.unri.ac.id

Abstrak

Tumpahan minyak mentah selama eksplorasi, transportasi, atau pemurnian dapat menyebabkan pencemaran tanah dan masalah lingkungan lainnya. Salah satu metode yang efektif dan ramah lingkungan untuk mengatasi kontaminasi tersebut adalah bioremediasi. Penelitian ini bertujuan untuk mengurangi kadar *Total Petroleum Hydrocarbon* (TPH) pada tanah terkontaminasi melalui penerapan metode bioaugmentasi dan biostimulasi, memantau kondisi dinamika parameter lingkungan (pH, suhu, dan kelembaban) selama proses bioremediasi, serta untuk merehabilitasi tanah terkontaminasi agar memenuhi standar kualitas sesuai dengan Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021. Penelitian ini dilakukan melalui tahapan persiapan lahan, aplikasi biostimulasi melalui penambahan nutrisi (urea, triple superphosphate (TSP), dolomit, bahan pengisi), aplikasi bioaugmentasi menggunakan petroleum remediating agent (PETREA), serta pemeliharaan aerasi dan penyiraman secara berkala. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai TPH pada *Grid*-1 mengalami penurunan sebesar 97,2%. Tingkat TPH di *Grid*-2 menunjukkan penurunan sebesar 98,7%. Tingkat TPH di *Grid*-3 menunjukkan penurunan sebesar 89,4%. Tingkat TPH di *Grid*-4 menunjukkan penurunan sebesar 96,0 %. Nilai pH yang diukur pada keempat *grid* berkisar antara 6,3 hingga 6,9, suhu yang diukur pada 4 *grid* berkisar antara 25,5-33°C dan tingkat kelembaban pada 4 *grid* berkisar antara 50% hingga 88%. Hasil akhir TPH memenuhi standar kualitas yang ditetapkan dalam Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021.

Kata Kunci: Bioaugmentasi, Bioremediasi, Biostimulasi, TPH

Abstract

Application of Bioremediation to Reduce Total Petroleum Hydrocarbons in Oil-Contaminated Soil at PT X

Crude oil spills during exploration, transportation, or refining can cause soil contamination and other environmental problems. One effective and environmentally friendly method for addressing such contamination is bioremediation. This study aims to reduce Total Petroleum Hydrocarbon (TPH) *levels in contaminated soil through the application of bioaugmentation and biostimulation methods, to monitor the dynamics of environmental parameters (pH, temperature, and moisture) during the bioremediation process, and to rehabilitate contaminated soil so that it meets quality standards in accordance with Government Regulation No. 22 of 2021. This research was conducted through the stages of site preparation, biostimulation application via the addition of nutrients (urea, triple superphosphate (TSP), dolomite, and filler materials), bioaugmentation application using a petroleum remediating agent (PETREA), as well as periodic aeration and watering. The results showed that the TPH value in Grid-1 decreased by 97.2%. The TPH level in Grid-2 decreased by 98.7%. The TPH level in Grid-3 decreased by 89.4%. The TPH level in Grid-4 decreased by 96.0%. The pH values measured across the four grids ranged from 6.3 to 6.9; the temperatures measured across the four grids ranged from 25.5 to 33°C; and the humidity levels across the four grids ranged from 50% to 88%. The final TPH results met the quality standards set forth in Government Regulation No. 22 of 2021.*

Keywords*: Bioaugmentation, Bioremediation, Biostimulation, TPH.*

*)Correponding author
DOI : 10.14710/metana.v22i2.85806
Diterima: 19-06-2026
Disetujui: 28-10-2026

PENDAHULUAN

Salah satu masalah lingkungan terbesar di Indonesia masih adalah pencemaran tanah. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS) tahun 2025, pencemaran tanah masih merupakan masalah lingkungan utama di Indonesia, dimana terdapat setidaknya 21 desa atau kelurahan di Provinsi Riau yang secara spesifik terdampak oleh isu lingkungan ini. Tumpahan minyak mentah selama eksplorasi, transportasi, dan pemurnian adalah salah satu bentuk pencemaran tanah yang dapat menyebabkan masalah lingkungan yang signifikan. Ketergantungan penggunaan minyak bumi dan gas sebagai bahan bakar telah memiliki dampak yang signifikan terhadap pertumbuhan ekonomi Indonesia dan banyak manfaat bagi masyarakatnya. Namun, tidak dapat dipungkiri bahwa aktivitas ini juga menghasilkan limbah yang dapat mencemari lingkungan (Amelia & Titah, 2021).

Pencemaran tanah merupakan kondisi ketika bahan pencemar masuk ke dalam tanah dan mengubah sifat serta kualitas lingkungannya. Keberadaan bahan pencemar ini menjadi masalah global yang berdampak signifikan terhadap kesehatan manusia, produktivitas tanah, dan keseimbangan ekosistem (Calvina *et al*., 2024). Berdasarkan Peraturan Pemerintah Indonesia (PP) No. 22 Tahun 2021 Lampiran IX, limbah minyak bumi termasuk dalam limbah berbahaya dan beracun (B3) yang wajib dilakukan pengolahan (Limbong & Tangahu, 2025). Karakteristik limbah B3 berdasarkan karakteristiknya seperti mudah meledak (*explosive*), menyala (*ignitable*), reaktif (*reactive*), infeksius (*infectious*), korosif (*corrosive*), dan beracun (*toxic*) (Aviana & Ni'am, 2020).

Pencemaran tanah umumnya disebabkan oleh keberadaan senyawa organik dan anorganik yang sebagian besar berasal dari aktivitas industri minyak dan gas bumi. Minyak bumi adalah campuran kompleks yang mengandung berbagai senyawa, seperti hidrokarbon alifatik, hidrokarbon monoaromatik, dan hidrokarbon aromatik. Pelepasan senyawa tersebut ke lingkungan dapat menimbulkan dampak negatif terhadap kehidupan biota tanah dan berpotensi mengganggu kesehatan fisik manusia. Kontaminan pada air dan tanah oleh produk minyak bumi juga dapat menyebabkan berpindahnya senyawa hidrokarbon ke dalam tanah, sehingga meningkatkan toksisitas lingkungan. Oleh karena itu, pencemaran minyak bumi telah menjadi perhatian penting dalam beberapa penelitian lingkungan selama beberapa dekade terakhir (Madonna, 2022).

Upaya untuk mengurangi dampak pencemaran hidrokarbon minyak bumi dapat dilakukan dengan menurunkan konsentrasi kontaminan di dalam tanah. Bioremediasi merupakan salah satu metode yang efektif dan ramah lingkungan yang menggunakan mikroorganisme untuk mengurangi konsentrasi hidrokarbon. Mikroorganisme diseleksi dan dikembangkan pada polutan tertentu untuk mengurangi kadar hidrokarbon yang terdapat pada tanah (Suryatmana *et al*., 2025). Untuk mengoptimalkan proses degradasi polutan, bioremediasi dapat diterapkan melalui teknik biostimulasi dan bioaugmentasi. Biostimulasi adalah proses penambahan nutrisi ke dalam lingkungan tercemar untuk merangsang pertumbuhan dan aktivitas mikroorganisme asli (indigenous), sedangkan bioaugmentasi merupakan penambahan kultur mikroorganisme pendegradasi hidrokarbon spesifik dari luar ke dalam area yang tercemar. Kebaharuan (novelty) dari penelitian ini terletak pada evaluasi aplikasi terintegrasi berskala lapangan antara biostimulasi menggunakan formulasi nutrisi (urea, *triple superphosphate* (TSP), dolomit, dan bahan pengisi) dengan bioaugmentasi menggunakan *petroleum remediating agent* (PETREA) di PT X. Sinergi dari kedua metode ini dievaluasi secara komprehensif terhadap dinamika parameter lingkungan (pH, suhu, dan kelembaban) untuk memastikan efisiensi pemulihan tanah terkontaminasi minyak agar memenuhi standar baku mutu lingkungan yang ketat sesuai dengan Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengurangi kadar Total Petroleum Hydrocarbon (TPH) pada tanah terkontaminasi melalui penerapan metode terintegrasi bioaugmentasi dan biostimulasi, memantau dinamika parameter lingkungan (pH, suhu, dan kelembaban) selama proses bioremediasi berlangsung, serta untuk merehabilitasi tanah terkontaminasi agar memenuhi standar baku mutu sesuai dengan Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021.

METODOLOGI

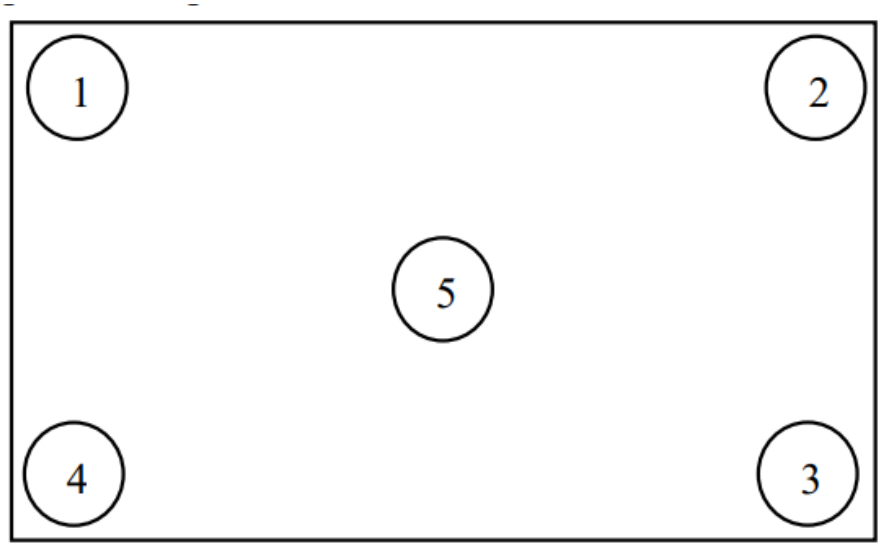
Persiapan lokasi untuk proses pemulihan dipastikan telah memenuhi persyaratan yang merupakan bagian dari area Rencana Pemulihan Fungsi Lingkungan Hidup (RPFLH) *Onsite* Bioremediasi, serta memiliki

kondisi lahan yang relatif datar. Tanah terkontaminasi minyak yang akan dipulihkan berasal dari wilayah kerja Minas. Area pemulihan di lapangan dibagi menjadi empat grid pemantauan. Masing-masing grid berfungsi sebagai unit observasi dan lokasi monitoring berskala lapangan yang mewakili titik-titik penyebaran kontaminan. Detail dimensi dan volume pasti dari setiap grid merupakan data rahasia (confidential) milik perusahaan. Pelaksanaan di tempat hasil olahan, dilakukan pengambilan sampel tanah sebelum proses biostimulasi dan bioaugmentasi menggunakan *hand auger* atau peralatan sejenis yang tersedia, pengambilan sampel dilakukan dari permukaan tanah hingga kedalaman dengan interval setiap 30 cm (0–30 cm, 30–60 cm, 60–90 cm, 90–120 cm, dan seterusnya). Sampel tanah dari lima titik pada kedalaman dan *grid* yang sama kemudian digabungkan (dikompositkan) menjadi satu sampel. Sampel tanah disimpan ke dalam *glass jar* yang ditandai identitas sampel tanah (lokasi, titik sampel, dan kedalaman penggambilan). *Sampling initial* dilakukan untuk menentukan tanah yang membutuhkan pengolahan lanjutan. Skema representasi kelima titik pengambilan sampel tersebut dapat dilihat pada Gambar 1.

Tanah terkontaminasi minyak harus memenuhi kriteria limbah yang akan diolah yaitu nilai *petroleum hydrocarbon* rantai panjang harus pada kisaran ≥ 0,1% dan < 10%. PETREA dan nutrien dipastikan telah tersedia. Pupuk urea, *triple superphosphate* dan dolomit disiapkan.

Proses biostimulasi dilakukan dengan pemupukan sebesar 30% berat (b/b) dari total kebutuhan pupuk urea dan *triple superphosphate* (TSP). Setelah dilakukan proses pemupukan yang merata pada *grid,* maka perlu dilakukan penyiraman dan aerasi. Jika hasil pengukuran kelembaban lebih kecil dari 75% atau *water holding capacity* lebih kecil dari 50%, maka penyiraman dilakukan setelah pemupukan untuk mempertahankan kadar air optimum. Aerasi dilakukan dengan membolak-balikkan tanah menggunakan *excavator* untuk menggemburkan tanah dan memastikan pencampuran yang homogen.

Proses aplikasi bakteri dalam proses bioaugmentasi diawali dengan pengenceran bakteri agen kultur bakteri (Petroleum Remediating Agent/PETREA). Kultur PETREA yang digunakan adalah konsorsium mikroorganisme yang terdiri dari *Pseudomonas oleovorans*, *Pseudomonas parafulva*, *Acinetobacter baumannii*, Comamonas testosteronei, *Bacillus sp*., *Corynebacterium sp*., *Azotobacter sp*., dan *Halomonas sp*. Pengenceran dilakukan menggunakan perbandingan 9 liter air untuk 1 liter bakteri dan diperoleh 10 liter larutan bakteri cair. Campuran bakteri dengan air kemudian diaduk hingga merata. Pompa *sprayer* atau pompa *transfer* disiapkan untuk memindahkan bakteri dari tangki menuju tanah yang terkontaminasi minyak bumi. Cairan bakteri kemudian disemprotkan secara merata ke atas *grid* sebanyak 1 liter untuk 1 m^3 tanah terkontaminasi minyak. *Grid* yang telah disemprot kemudian diaduk hingga merata menggunakan *excavator*. Penyemprotan lanjutan dilakukan berdasarkan data analisis *total plate count* (TPC). Aerasi dilakukan 2 kali seminggu sesuai kebutuhan.



Gambar 1. Pengambilan Sampel pada 5 Titik

Parameter yang harus dikendalikan saat melakukan proses bioremediasi dengan metode biostimulasi dan bioaugmentasi, yaitu pengukuran pH, temperatur dan kelembaban tanah yang dilakukan 3 kali dalam satu minggu untuk memastikan situasi lingkungan tetap berada pada *range* yang bagus bagi aktivitas dan pertumbuhan bakteri pendegradasi hidrokarbon. Pengukuran pH, suhu, dan kelembaban tanah dilakukan menggunakan alat *soil tester* 3 *in* 1. Proses dilakukan dengan menyiapkan alat ukur kelembaban, kemudian alat dimasukkan pada lima titik yang telah ditentukan hingga angka terbaca stabil. Alat ukur dibersihkan sebelum digunakan untuk pengukuran pada titik berikutnya. Data dari kelima titik tersebut selanjutnya dirata-ratakan untuk memperoleh nilai pH, suhu dan kelembaban.

Pengambilan sampel tanah dilakukan 2 minggu sekali untuk mengetahui persentase penurunan *petroleum hydrocarbon* setelah proses bioremediasi. Prosedur mengumpulkan sampel dari tanah dilakukan dengan menggunakan *hand auger* atau peralatan sejenisnya pada lima titik dengan kedalaman per 30 cm dari ketinggian tanah terkontaminasi minyak. Sampel komposit dari kedalaman 0-30 cm dicampurkan dengan sampel komposit dari kedalaman 30-60 cm hingga diperoleh satu sampel yang homogen dan mewakili kondisi tanah pada area tersebut. Sampel dimasukkan kedalam botol kaca diberi label, kemudian disimpan dalam kotak pendingin. Sampel dikirimkan ke laboratorium pihak ketiga perusahaan yang telah terakreditasi. Analisis kandungan *Total Petroleum Hydrocarbon* (TPH) diukur menggunakan metode standar pengujian lingkungan baku yang diakui untuk analisis limbah B3, sesuai dengan protokol laboratorium pihak ketiga tersebut. Parameter lain yang diperhatikan adalah pengukuran *total plate count* dan *nutrien* (N dan P) yang dilakukan sebulan sekali. Jika nilai hasil *total plate count* dianggap kurang, maka perlu dilakukan bioaugmentasi lanjutan dengan menambahkan bakteri sesuai hasil analisis. Jika hasil analisis nutrien (N dan P) dianggap kurang, maka dilakukan penambahan biostimulasi berdasarkan hasil analisis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses bioremediasi dilakukan untuk mengurangi kadar Total Petroleum Hydrocarbon (TPH) di dalam tanah. Parameter TPH digunakan sebagai indikator utama keberhasilan proses degradasi, karena menunjukkan jumlah semua total senyawa hidrokarbon yang ada di dalam media tanah. Monitoring TPH dilakukan secara berkala setiap dua minggu sekali. Proses biodegradasi hidrokarbon minyak bumi dilakukan dengan penambahan bakteri PETREA dalam tanah yang tercemar, dengan unsur C:N:P yang telah diatur dalam kondisi optimal untuk pertumbuhan bakteri. Aktivitas bakteri dalam memanfaatkan hidrokarbon sebagai sumber karbon dan energi berperan dalam mempercepat penurunan konsentrasi TPH Penurunan kadar TPH pada tanah dapat dilihat pada Tabel 1.

Berdasarkan Tabel 1, nilai TPH pada *Grid*-1 mengalami penurunan dari 7.100 mg/kg pada W-0 menjadi 200 mg/kg pada W-10 dengan persentase degradasi TPH sebesar 97,2%. Nilai TPH pada *Grid*-2 mengalami penurunan dari 7.700 mg/kg menjadi 100 mg/kg dengan % degradasi TPH sebesar 98,7%. Nilai TPH pada *Grid*-3 mengalami penurunan dari 4.700 mg/kg menjadi 500 mg/kg dengan % degradasi TPH sebesar 89,4%. Sementara, pada *Grid*-4 penurunan nilai TPH dari 5.000 mg/kg menjadi 200 mg/kg dengan % degradasi TPH sebesar 96,0%. Hasil dari penelitian dapat diketahui bahwa proses bioremediasi dapat menurunkan kandungan hidrokarbon pada tanah. Penurunan tersebut disebabkan karena bakteri *indigenous* dan bakteri yang ditambahkan (bioaugmentasi) mampu mendegradasi hidrokarbon (Rusli, 2019).

Berdasarkan Tabel 1, proses bioremediasi pada Grid-1 dan Grid-2 membutuhkan waktu yang lebih panjang (hingga minggu ke-10) untuk mencapai baku mutu lingkungan yang ditargetkan jika dibandingkan dengan Grid-3 dan Grid-4. Hal ini disebabkan oleh tingginya konsentrasi awal polutan pada Grid-1 (7.100 mg/kg) dan Grid-2 (7.700 mg/kg) yang masuk dalam kategori kontaminasi berat (TK-A). Beban kontaminan yang sangat tinggi ini menuntut waktu kontak dan aktivitas pemecahan rantai karbon oleh bakteri yang lebih lama sebelum akhirnya konsentrasi tersebut dapat turun secara signifikan.

Berdasarkan hasil penelitian pada 4 *grid* diperoleh nilai TPH akhir yang diperoleh telah memenuhi baku mutu yang ditetapkan dalam Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 tentang pengelolaan tanah terkontaminasi limbah berbahaya dan beracun (Limbah B3) Lampiran XIII. Nilai baku mutu yang ditetapkan

yaitu TPH ≤ 1.000 mg/kg yang termasuk dalam kategori TK-C (Hardestyariki dkk., 2020). Namun, pada beberapa titik pengamatan masih ditemukan kenaikan nilai TPH pada minggu tertentu. Kenaikan nilai TPH dapat dilihat pada Gambar 2.

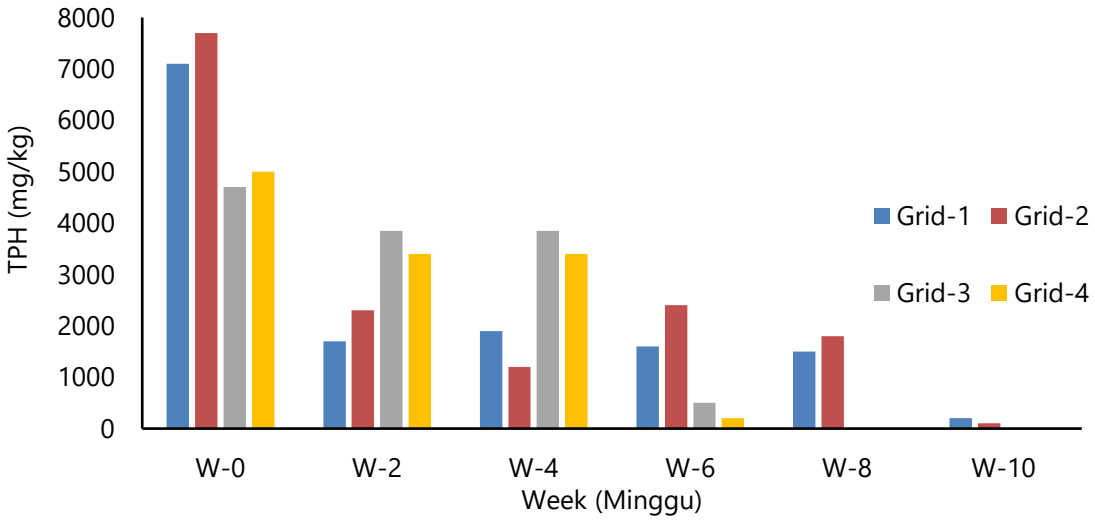
Berdasarkan Gambar 2, pada *Grid*-2 terjadi fluktuasi kadar TPH yang meningkat dari 1.200 mg/kg pada W-4 menjadi 2.400 mg/kg pada W-6. Bakteri yang terdapat pada setiap *grid* terdiri atas bakteri *indigenous* dan bakteri hasil penambahan (bioaugmentasi). Fluktuasi kadar TPH diduga berkaitan dengan keberadaan komunitas bakteri *indigenous* yang tidak seluruhnya berkemampuan mendegradasi hidrokarbon (*non-petrofilik*). Tanah yang tercemar mengandung sumber nutrisi yang tersedia terutama berupa karbon dari hidrokarbon serta unsur nitrogen dan fosfor yang ditambahkan selama proses bioremediasi. Sebagian mikroorganisme dapat menyerap atau mengakumulasi senyawa hidrokarbon ke dalam sel, namun tidak mampu menguraikannya secara sempurna. Ketika sel mikroba mengalami kematian atau lisis, hidrokarbon yang tersimpan di dalam sel akan dilepaskan kembali ke lingkungan tanah sehingga menyebabkan peningkatan konsentrasi TPH. Lisis sel adalah kondisi saat membran sel rusak sehingga isi sel keluar dan sel mengalami kematian (Kawai *et al.*, 2023).

Hasil pengukuran TPH pada *Grid*-3 menunjukkan bahwa konsentrasi hidrokarbon pada W-2 hingga W-4 tetap berada pada nilai 3.850 mg/kg. kondisi tersebut mengindikasikan bahwa proses biodegradasi hidrokarbon tidak berlangsung secara optimal. Bakteri diperkirakan telah mengalami masa jenuh dalam menyerap dan mendegradasi polutan. Masa jenuh terjadi pada saat bakteri tidak mendapatkan suplai nutrisi sehingga terjadi penurunan koloni bakteri. Pengurangan jumlah koloni bakteri menyebabkan bakteri yang tersisa mengalami keadaan jenuh dalam proses degradasi polutan. Dalam situasi ini, kandungan minyak tetap ada karena volume minyak yang tersisa dan tidak dapat dipecah secara efektif oleh mikroorganisme (Anwaruddin, 2019).

Tabel 1 Hasil *Monitoring* TPH

Grid	*Monitoring* TPH						% Degradasi TPH
	0	2	4	6	8	10	
1	7100	1700	1900	1600	1500	200	97,2 %
2	7700	2300	1200	2400	1800	100	98,7 %
3	4700	3850	3850	500			89,4 %
4	5000	3990	3400	200			96,0 %

Keterangan: = TK-A (≥ 5000 mg/kg); = TK-B (1000 <TPH> 5000 mg/kg); = TK-C (≤ 1000 mg/kg)



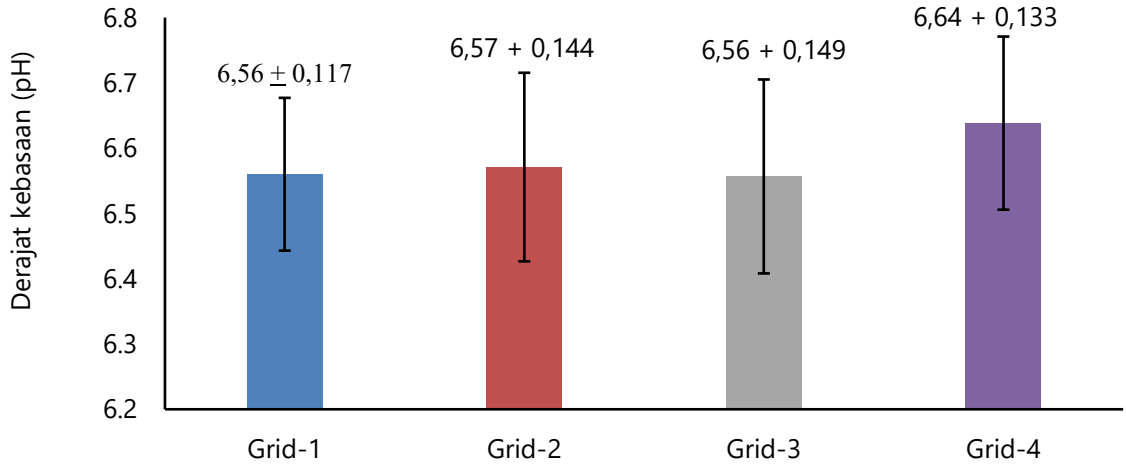
Gambar 2. Penurunan kadar TPH

Penurunan laju biodegradasi TPH berlangsung cepat pada W-2, kemudian secara bertahap melambat dan akhirnya mencapai fase *plateau* (stagnan). Penambahan nutrisi dan penyemprotan bakteri mempercepat penurunan TPH pada W-2. *Grid*-1 dan *Grid*-2 proses bioremediasi terjadi hingga W-10, dibandingkan dengan *Grid*-3 dan *Grid*-4 yang hanya sampai W-6. Hal ini disebabkan karena hidrokarbon minyak bumi terdiri dari ribuan komponen organik. Beberapa komponen sangat terserap ke dalam partikel tanah dan bahan organik tanah, sehingga menyulitkan akses mikroba terhadap senyawa-senyawa ini. Selain itu, metabolit minyak bumi seperti asam lemak, asam naftenat, dan hidrokarbon aromatik polisiklik beroksigen dapat terbentuk dan biodegradasi lebih lanjut dapat terhambat dengan adanya senyawa-senyawa ini karena aktivitas degradasi mikroba yang tertekan (Chen *et al*., 2019).

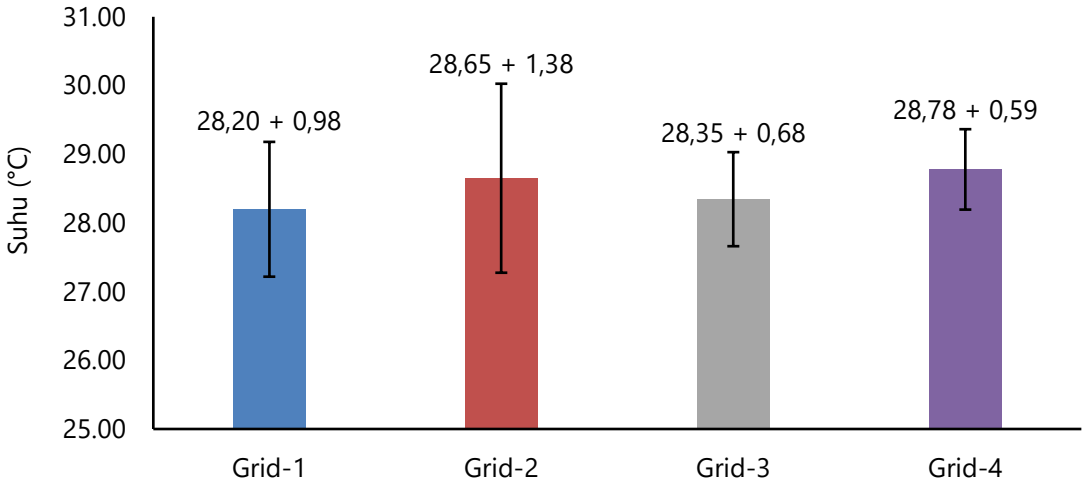
Tingkat efisiensi degradasi TPH pada penelitian ini yang mencapai rentang 89,4% hingga 98,7% menunjukkan hasil yang sangat memuaskan jika dibandingkan dengan penelitian-penelitian terdahulu. Sebagai perbandingan kuantitatif, penelitian bioremediasi yang hanya mengandalkan metode biostimulasi menghasilkan persentase degradasi sebesar 87,48% (Nwadiokwu *et al*., 2023), sementara pendekatan bioaugmentasi tunggal mencatatkan efektivitas penurunan TPH pada kisaran 48,69% hingga 70% (Perwira *et al*., 2021; Sujadi, 2019). Tingginya persentase degradasi pada penelitian ini membuktikan bahwa pendekatan terintegrasi—yaitu penambahan nutrisi yang tepat sasaran (biostimulasi) dipadukan dengan konsorsium agen bioaugmentasi spesifik (PETREA)—mampu mempercepat pemecahan rantai hidrokarbon secara signifikan dan mengoptimalkan waktu pemulihan tanah berskala lapangan hingga mencapai baku mutu TK-C.

Penguraian hidrokarbon oleh mikroba dipengaruhi oleh pH media, karena tanah yang memiliki pH rendah (asam) atau pH tinggi (basa) dapat menghalangi perkembangan bakteri, sehingga proses biodegradasi hidrokarbon menjadi kurang optimal (Arifudin *et al*., 2016). Penelitian ini dilakukan *monitoring* pH secara berkala untuk memastikan kondisi tanah tetap berada pada kisaran optimum Nilai dari *monitoring* pH dapat dilihat pada Gambar 3. Berdasarkan Gambar 3, dapat dilihat nilai pH keempat *grid* penelitian selama proses bioremediasi, menunjukkan nilai rata-rata pH tanah yaitu berkisar antara 6,56–6,64 dengan nilai standar deviasi yaitu 0,117-0,149. Standar deviasi adalah nilai statistik yang digunakan untuk menilai bagaimana distribusi data dalam sampel, serta sejauh mana kedekatan titik individu terhadap rata-rata nilai sampel. Berdasarkan hasil penelitian ini, nilai standar deviasi yang diperoleh sangat kecil dan mendekati nol. Standar deviasi dari kumpulan data yang sama dengan nol menunjukkan bahwa semua nilai dalam himpunan tersebut identik, sementara nilai standar deviasi yang lebih tinggi mengindikasikan bahwa data individu menyimpang dari rata-rata *(Hidayat et al*., 2019).

Selama proses bioremediasi berlangsung, perubahan nilai pH pada penelitian ini cenderung tetap dan tidak terdapat perubahan yang berarti. Kondisi tersebut diduga dipengaruhi oleh penambahan bahan organik berupa serbuk gergaji yang memiliki kemampuan sebagai penyangga tanah (*buffering capacity*) (Suryatmana *et al*., 2019). Penurunan pH selama proses bioremediasi terjadi akibat degradasi hidrokarbon melalui hidrolisis



Gambar 3. Hasil *monitoring* pH tanah



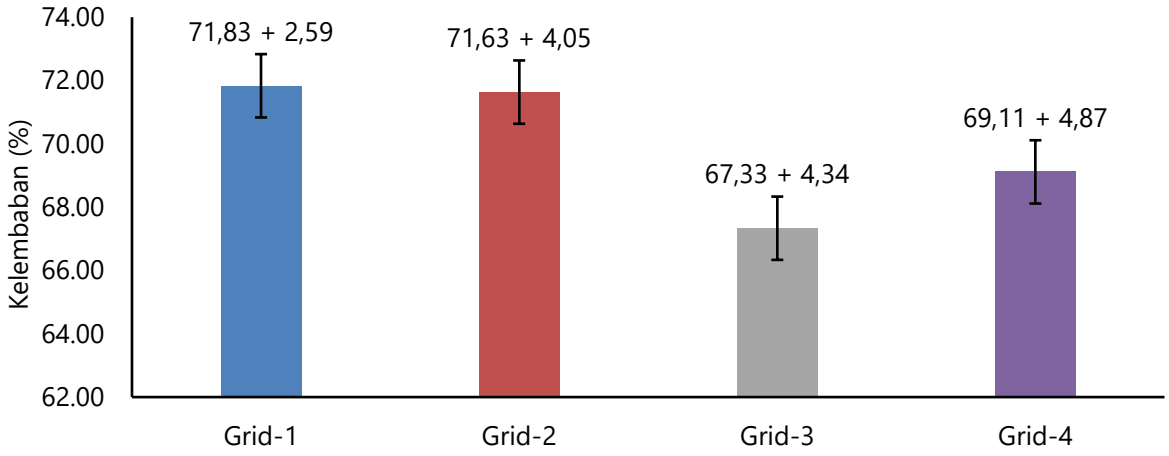
Gambar 4. Hasil *monitoring* suhu tanah

yang menghasilkan banyak *volatile organic acid* (VOA) yang kemudian dikonversi secara biologis menjadi asam. Penurunan pH dalam proses bioremediasi, dari hidrokarbon yang didominasi oleh gugus n-alkana akan dipecah oleh enzim oksigenase yang menghasilkan alkohol dan berakhir pada pembentukan aldehida serta asam lemak bersifat asam (Amin *et al*., 2020). Seiring berlangsungnya proses bioremediasi, nilai pH kembali mengalami peningkatan yang menunjukkan peranan mikroorganisme dalam menguraikan bahan organik. Kondisi ini juga mengindikasi bahwa proses penguraian. Reaksi senyawa karbon menjadi asam organik tidak lagi berlangsung secara dominan dan telah terjadi pembentukan senyawa ammonium yang dapat menaikkan nilai pH (Sulistyorini & Ali, 2020).

Suhu dapat mempengaruh laju pertumbuhan bakteri, aktivitas enzim, kimia polutan, fisiologi, dan keanekaragaman komunitas bakteri yang bertanggung jawab atas proses degradasi. Suhu dianggap sebagai faktor penting dalam remediasi biologis, dan efisiensi penghilang polutan hidrokarbon terkait langsung dengan suhu (Kebede *et al*., 2021). Hasil *monitoring* suhu yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 4.

Berdasarkan Gambar 4, nilai rata-rata suhu selama proses bioremediasi pada ketiga *grid* penelitian berada pada kisaran 25,20–28,78°C dan nilai standar deviasi sebesar 0,59-1,38. Nilai standar deviasi yang didapat menunjukkan suhu seluruh *grid* memiliki tingkat variasi yang rendah. Kondisi ini mengindikasikan bahwa suhu tanah selama proses bioremediasi relatif stabil dan tidak mengalami fluktuasi yang signifikan. Rentang suhu yang diperoleh juga berada dalam kisaran optimum bagi pertumbuhan dan aktivitas bakteri pendegradasi. Menurut Ahmed *et al*. (2024), aktivitas bakteri cenderung meningkat dengan suhu, hingga mencapai titik optimal. Sebagian besar bakteri pengurai hidrokarbon berkembang baik pada suhu mesofilik yaitu sekitar 20–40°C, meskipun beberapa spesies aktif pada temperatur yang lebih tinggi atau lebih rendah. Suhu memengaruhi laju metabolisme mikroba dan sifat fisik hidrokarbon, seperti kelarutan dan ketersediaan hayatinya. Kondisi suhu yang optimal tersebut sangat mendukung viabilitas dan aktivitas enzimatis bakteri pendegradasi hidrokarbon. Hal ini dikonfirmasi melalui pengujian Total Plate Count (TPC) yang dilakukan secara berkala setiap bulan, dimana hasil pemantauan TPC menunjukkan bahwa populasi mikroorganisme pendegradasi tetap terjaga dan aktif berkembang biak selama proses bioremediasi berlangsung (Ahmed *et al*., 2024).

Kandungan kelembaban tanah merupakan faktor yang penting untuk pertumbuhan bakteri. Ketersedian air yang memadai sangat penting untuk metabolisme mikroba dan transportasi nutrien (Ahmed dkk., 2024). Kelembaban tanah pada proses bioremediasi dilakukan monitoring secara berkala, untuk memastikan kondisi lingkungan yang memadai pada pertumbuhan bakteri dan aktivitas bakteri dalam mendegradasi senyawa hidrokarbon. Kelembaban yang berada pada kisaran optimum dapat meningkatkan ketersediaan nutrien serta mendukung metabolisme mikroorganisme selama biodegradasi berlangsung. Hasil dari monitoring kelembaban yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Hasil *Monitoring* Kelembaban Tanah

Berdasarkan Gambar 5, rata-rata kelembaban tanah dalam penelitian ini berada pada kisaran 67,33–71,83% dengan nilai standar deviasi sebesar 2,59–4,87. Nilai standar deviasi tergolong cukup besar, namun rentang kelembaban yang diperoleh masih berada pada kondisi yang optimum bagi pertumbuhan bakteri. Menurut Varjani & Upasani (2019), ketersediaan kelembapan yang tepat berada dalam kisaran 30–90%, memberikan biodegradasi minyak mentah secara aerob optimum. Kondisi kelembaban pada penelitian ini diketahui bahwa lingkungan tanah masih berada dalam kisaran yang sesuai untuk mendukung pertumbuhan bakteri pendegradasi hidrokarbon. Kandungan air sangat berpengaruh untuk aktivitas metabolik mikroba pada limbah minyak bumi karena mikroba akan berfungsi secara aktif di batas antara minyak dan air (Suryatmana *et al*., 2019). Jika kelembaban tanah turun pada penelitian maka dilakukan proses *watering* dan penambahan *bulking agent* yang dapat menaikkan kelembaban pada tanah yang tercemar.

Kondisi kelembaban yang terlalu ekstrem tidak mendukung pertumbuhan dan metabolisme mikroorganisme. Hal tersebut disebabkan karena difusi oksigen di dalam tanah menurun sehingga proses biodegradasi hidrokarbon secara aerob menjadi terbatas dan dapat menyebabkan kondisi tanah anaerob (Kebede *et al*., 2021). Kelembaban yang memadai sangat diperlukan untuk mempertahankan kehidupan mikroba dan proses metabolismenya. Tanah dengan tingkat kelembaban yang sesuai menunjukkan laju degradasi yang lebih cepat karena air membantu proses transport nutrisi, serta meningkatkan kontak antara mikroorganisme dengan senyawa hidrokarbon di dalam tanah. Kondisi tanah yang terlalu kering akan menghambat pertumbuhan dan aktivitas mikroba (Ahmed *et al*., 2024).

KESIMPULAN

Penerapan metode terintegrasi biostimulasi dan bioaugmentasi terbukti sangat efektif dalam menurunkan kadar Total Petroleum Hydrocarbon (TPH) pada tanah terkontaminasi minyak bumi. Hasil penelitian menunjukkan persentase degradasi TPH yang sangat tinggi, yakni mencapai 89,4% hingga 98,7%, dengan hasil akhir (100–500 mg/kg) yang telah memenuhi kriteria baku mutu TK-C sesuai Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021. Keberhasilan ini sangat bergantung pada pemeliharaan dinamika parameter lingkungan yang optimal selama proses remediasi, yaitu suhu (20–40^{o}C), pH (6–8), dan kelembaban (30–90%). Kontribusi ilmiah utama dari penelitian ini adalah pembuktian empiris pada skala lapangan bahwa sinergi antara konsorsium agen biologis spesifik (PETREA) dan formulasi nutrisi mampu mempercepat laju pemulihan lahan secara signifikan dibandingkan penerapan metode tunggal. Implikasi dari hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi rujukan strategis dan panduan praktis bagi industri minyak dan gas dalam mendesain sistem pengelolaan limbah B3 yang ramah lingkungan, efisien secara operasional, dan patuh terhadap regulasi kelestarian lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

Ahmed, R.R., Al-Obaidi, A.A., & Bahaa, M.Z. 2024. Influence of environmental conditions on bacterial remediation of oil-contaminated soil: a case study at Baiji Refinery. *Al-Rafidain Journal of Engineering Sciences*, 2(2): 383–391. https://doi.org/10.61268/gc9va174

Amelia, N., & Titah, H.S. 2021. Kajian pengaruh penggunaan biosurfaktan rhamnolipida dan surfaktin pada proses bioremediasi tanah tercemar crude oil. *Jurnal Teknik ITS*, 10(2): F76–F81. https://doi.org/10.12962/j23373539.v10i2.64012

Amin, R., Madubun, F., & Rahyuni, D. 2020. Bioremediasi tanah terkontaminasi hidrokarbon menggunakan teknik bioaugmentasi. *EnviroScienteae*, 16(2): 318–333. https://doi.org/10.20527/es.v16i2.9663

Anwaruddin, F. 2019. Unjuk kerja reaktor continuous wetland menggunakan tanaman vetiver (*Vetiveria zizanioides*) dan bakteri untuk mendegradasi kandungan oil dan grease, total petroleum hydrocarbon (TPH) dan oil content dari limbah minyak industri X di Yogyakarta. Tugas Akhir. Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

Arifudin, Yani, M., & Murtilaksono, K. 2016. Bioremediasi tanah bertekstur klei terkontaminasi minyak bumi: aplikasi teknik biopile dengan penambahan pasir. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 6(1): 13–19. https://doi.org/10.19081/jpsl.2016.6.1.13

Aviana, A.R.D., & Ni'am, A.C. 2020. Identifikasi limbah bahan berbahaya dan beracun (B3) di laboratorium PT XYZ. *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan*, 8(1): 147–154.

Calvina, A.B., Ardiana, A.D., Azzahra, C.S., Santosa, N.R., Miladya, N.F., Anwar, N.Z., & Isnaeni. 2024. Bioremediasi cemaran tanah menggunakan biostimulan. *Camellia: Clinical, Pharmaceutical, Analytical and Pharmacy Community Journal*, 3(2): 192–204. https://doi.org/10.30651/cam.v3i2.24664

Chen, F., Li, X., Zhu, Q., Ma, J., Hou, H., & Zhang, S. 2019. Bioremediation of petroleum-contaminated soil enhanced by aged refuse. *Chemosphere*, 222: 98–105. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.122

Hardestyariki, D., Yudono, B., & Munawar. 2020. Uji kemampuan konsorsium bakteri hidrokarbonoklastik sebagai agen bioremediasi. *Sriwijaya Bioscientia*, 1(1): 8–15. https://doi.org/10.24233/sribios.1.1.2020.166

Hidayat, R.N., Sabri, L.M., & Awaluddin, M. 2019. Analisis desain jaring GNSS berdasarkan fungsi presisi (studi kasus: titik geoid geometri Kota Semarang). *Jurnal Geodesi Undip*, 8(1): 48–55. https://doi.org/10.14710/jgundip.2019.22451

Kawai, Y., Kawai, M., Mackenzie, E.S., Dashti, Y., Kepplinger, B., Waldron, K.J., & Errington, J. 2023. On the mechanisms of lysis triggered by perturbations of bacterial cell wall biosynthesis. *Nature Communications*, 14: 4123. https://doi.org/10.1038/s41467-023-39723-8

Kebede, G., Tafese, T., Abda, E.M., Kamaraj, M., & Assefa, F. 2021. Factors influencing the bacterial bioremediation of hydrocarbon contaminants in the soil: mechanisms and impacts. *Journal of Chemistry*, 2021: 9823362. https://doi.org/10.1155/2021/9823362

Limbong, B.A., & Tangahu, B.V. 2025. Bioremediation of oil-contaminated soil with variations of bacterial cultures and nutrient ratio: field-scale experimental research. *Riwayat: Educational of History and Humanities*, 8(3): 3500-3508. https://doi.org/10.24815/jr.v8i3.47899

Madonna, S. 2022. Tinjauan singkat bio-elektrokinetik remediasi pada tanah tercemar hidrokarbon minyak bumi. *Jurnal Reka Lingkungan*, 10(3): 175–187. https://doi.org/10.26760/rekalingkungan.v10i3.175-187

Nwadiokwu, E.P., Oladimeji, O.I., Zabi, A.M., Uyi, O.S., Okakwu, A.A., Akinola, A.A., Olubusoye, B.S., & Odogwu, D.A. 2023. Bioremediation of crude oil polluted soil using NPK 15:15:15 and urea as a biostimulant. *Journal of Multidisciplinary Research and Development*, 9(1): 156–162.

Perwira, K.Y., Lukito, H., & Irawan, A.B. 2021. Efektivitas bioaugmentasi dengan *Pseudomonas aeruginosa* pada tanah tercemar minyak bumi. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Lingkungan Kebumian*, 3(1): 31–36. https://doi.org/10.31315/psb.v3i1.6233

Rusli, A.H. 2019. Bioremediasi tanah dengan teknik composting di PT X Yogyakarta. Tugas Akhir. Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

Sujadi, F.M. 2019. Analisis kemampuan bakteri hidrokarbonoklastik dari perairan tercemar sebagai kandidat agen bioremediasi limbah oli bekas. Tesis. Universitas Brawijaya, Malang.

Sulistyorini, & Ali, M. 2020. Bioremediasi dengan *Pseudomonas putida* terhadap pencemaran tanah minyak bumi dengan bioaugmentasi. *Jurnal Envirotek*, 10(1): 59–63. https://doi.org/10.33005/envirotek.v10i1.1171

Suryatmana, P., Gunawan, R.A., Herdiyantoro, D., & Setiawati, M.R. 2019. Potensi inokulan petrofilik dan kompos kotoran ayam dalam bioremediasi limbah minyak bumi sistem land treatment. *Soilrens*, 17(1): 1–8. https://doi.org/10.24198/soilrens.v17i1.23213

Suryatmana, P., Latifah, T., Kamaluddin, N.N., Hindersah, R., & Setiawati, M.R. 2025. Efektivitas *Azotobacter chroococcum* dalam proses bioremediasi tanah terkontaminasi limbah minyak bumi menggunakan bakteri petrofilik. *Soilrens*, 23(1): 74–84. https://doi.org/10.24198/soilrens.v23i1.66113

Varjani, S., & Upasani, V.N. 2019. Influence of abiotic factors, natural attenuation, bioaugmentation and nutrient supplementation on bioremediation of petroleum crude contaminated agricultural soil. *Journal of Environmental Management*, 245: 358–366. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.070