



Biodegradasi Hidrokarbon Tanah Tercemar Limbah Oli Bekas Dengan Biostimulasi Menggunakan *Eco enzyme*

Meliana Simangunsong¹, Rasyidah², Rizki Amelia Nasution³

^{1,2,3}Jurusan Biologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sumatera Utara

*Corresponding author: meliana070422042@uinsu.ac.id

ABSTRACT

Soil contamination caused by used motor oil waste is a serious environmental problem because it contains hydrocarbon compounds classified as toxic and difficult to degrade naturally. This study aimed to determine the effect of ecoenzyme addition as a biostimulant on the reduction of Total Petroleum Hydrocarbon (TPH) levels and the growth of indigenous bacterial populations in soil contaminated with used motor oil waste. The study was conducted from August to November 2025 at the Microbiology Laboratory of UIN Sumatera Utara. Contaminated soil samples were taken from an automotive workshop area in the Setia Budi District, Medan Selayang. This experimental study used a Completely Randomized Design (CRD) with treatments consisting of control (K), P1 (0.5 kg soil + 0.5 L ecoenzyme), and P2 (0.6 kg soil + 0.4 L ecoenzyme), with three replications each. Observations were conducted over 35 days at intervals of days 0, 7, 14, 21, 28, and 35. Parameters measured included TPH levels, temperature, pH, moisture content, and bacterial colony counts. Results showed that ecoenzyme addition significantly reduced TPH levels: P1 decreased from 18% to 0.7%, P2 to 2.6%, and the control to 13.4%. Bacterial populations in P1 increased to 3.25×10^6 CFU/mL, P2 reached 2.74×10^6 CFU/mL, while the control only reached 9.81×10^5 CFU/mL. Statistical analysis using One-Way ANOVA showed significant differences among treatments. Treatment P1 was the best condition for reducing TPH levels to below the quality standard (<1%). Ecoenzymes proved effective as biostimulation agents in enhancing microbial activity and accelerating hydrocarbon biodegradation.

Keywords: Biostimulation, Ecoenzyme, Hydrocarbon Biodegradation, Total Petroleum Hydrocarbons, Used Oil.

PENDAHULUAN

Pencemaran tanah akibat limbah oli bekas menjadi permasalahan lingkungan yang semakin mengkhawatirkan seiring meningkatnya jumlah kendaraan bermotor dan aktivitas perbengkelan di Indonesia. Oli bekas mengandung senyawa Total Petroleum Hydrocarbon (TPH) yang mencemari tanah dan menyebabkan penurunan kesuburan serta keanekaragaman hayati. Limbah ini dikategorikan sebagai Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 101 Tahun 2014 karena mengandung logam berat dan senyawa hidrokarbon

aromatik polisiklik (PAHs) yang berbahaya bagi lingkungan dan kesehatan manusia.

Berbagai metode remediasi fisika dan kimia seperti soil washing, thermal treatment, dan ekstraksi kimia dinilai tidak efektif secara ekonomi dan berisiko menimbulkan dampak negatif tambahan. Sebagai alternatif yang lebih efisien dan ramah lingkungan, bioremediasi memanfaatkan aktivitas mikroorganisme untuk mendegradasi polutan. Salah satu strateginya adalah biostimulasi, yaitu penambahan nutrisi untuk meningkatkan aktivitas bakteri indigenous seperti

Bacillus sp., *Pseudomonas* sp., dan *Alcaligenes* sp., yang mampu menggunakan hidrokarbon sebagai sumber karbon.

Eco enzyme merupakan agen biostimulasi yang menarik karena berasal dari bahan organik yang mudah diperoleh. Eco enzyme dihasilkan melalui fermentasi limbah organik, gula, dan air dengan perbandingan 3:1:10 selama minimal tiga bulan. Cairan hasil fermentasi ini mengandung berbagai enzim ekstraseluler beserta unsur makro (N, P, K) yang mendukung pertumbuhan dan aktivitas metabolisme bakteri indigenous. Pemanfaatan kulit nanas sebagai bahan baku menjadi pilihan strategis karena limbah ini tersedia melimpah di Indonesia.

Pemanfaatan kulit nanas sebagai bahan baku eco enzyme menjadi pilihan strategis karena limbah ini tersedia dalam jumlah melimpah di Indonesia sebagai negara penghasil nanas yang signifikan, sekaligus memberikan nilai tambah pada pengelolaan sampah organik rumah tangga. Penelitian oleh Rachmadani et al. (2023) menunjukkan bahwa eco enzyme dengan konsentrasi 10% v/v dan 15% v/v efektif dalam meremediasi kontaminasi minyak mentah, terbukti mampu menurunkan viskositas dan total hidrokarbon terlarut secara signifikan. Penelitian sebelumnya juga menunjukkan bahwa metode biostimulasi dengan pupuk cair organik dan kompos mampu menurunkan kadar TPH sebesar 66,56% dalam 28 hari (Fazilla, 2019), sementara penggunaan EM-4 mencapai efektivitas hingga 80,66% (Dona, 2024). Hasil-hasil penelitian tersebut mengindikasikan potensi besar penggunaan agen biostimulasi organik, termasuk eco enzyme, dalam mempercepat bioremediasi tanah tercemar hidrokarbon.

Berdasarkan kajian literatur yang telah dipaparkan, penelitian mengenai penerapan eco enzyme berbahan kulit nanas sebagai agen biostimulasi dalam proses biodegradasi hidrokarbon pada tanah tercemar limbah oli bekas masih sangat terbatas dan belum banyak dilaporkan. Terdapat kesenjangan ilmiah (research gap) terkait variasi rasio antara eco enzyme dan tanah tercemar terhadap efektivitas penurunan kadar TPH dan pertumbuhan populasi bakteri indigenous. Oleh karena

itu, penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan eco enzyme berbahan kulit nanas sebagai agen biostimulasi terhadap penurunan kadar TPH serta pertumbuhan populasi bakteri indigenous pada tanah tercemar limbah oli bekas dengan variasi rasio perlakuan, sehingga diharapkan ditemukan metode bioremediasi yang lebih efisien, berkelanjutan, dan ramah lingkungan dalam menangani pencemaran tanah akibat limbah B3.

METODE PENELITIAN

Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilaksanakan dari bulan Agustus hingga November 2025. Pembuatan *eco enzyme*, pengukuran penurunan kadar TPH, dan perhitungan populasi mikroorganisme dilakukan di Laboratorium Mikrobiologi, Universitas Islam Negeri Sumatera Utara (UIN Sumatera Utara), Medan. Sampel tanah tercemar limbah oli diambil dari lokasi perbengkelan otomotif yang berada di Kawasan Setia Budi, Kecamatan Medan Selayang, Kota Medan.

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi wadah plastik bervolume 1 liter, *soil tester*, saringan 10 *mesh* (2 mm), bak wadah reaktor, timbangan analitik, cawan petri, spatula, tabung reaksi, *band counter*, *magnetic stirrer*, bunsen, *beaker glass*, *hotplate*, erlenmeyer, cawan porselen, oven, rak tabung reaksi, dan *vortex*. Bahan yang digunakan antara lain tanah tercemar limbah oli bekas, limbah kulit buah nanas, molase, media *Nutrient Agar* (NA), NaCl 0,85%, *n*-heksana, alkohol 70%, akuades, kertas saring, dan kertas label.

Pembuatan *Eco enzyme*

Eco enzyme dibuat melalui proses fermentasi bahan organik secara anaerob dalam wadah tertutup rapat. Bahan baku yang digunakan adalah limbah kulit buah nanas (150 gram), molase (50 gram), dan air bersih (500 mL) dengan perbandingan 3:1:10. Campuran diaduk hingga merata tanpa dikocok, kemudian disimpan di tempat yang sejuk dan tidak terkena paparan sinar matahari langsung. Pada bulan pertama fermentasi, gas

yang terbentuk dilepaskan setiap hari dengan membuka tutup wadah. Proses fermentasi berlangsung selama tiga bulan hingga *eco enzyme* beraroma seperti tapai, kemudian disaring dan siap diaplikasikan (Benidiktus, 2021).

Pengambilan Sampel Tanah

Sampel tanah diambil dari lokasi perbengkelan otomotif Kawasan Setia Budi, Kecamatan Medan Selayang dengan kondisi tanah yang sudah berminyak, berwarna hitam, dan berbau oli yang menyengat. Sebanyak 10 kg tanah diambil dari lapisan *top soil* (kedalaman 0–20 cm) yang terdapat tumpahan oli. Sampel dimasukkan ke dalam plastik, ditutup rapat menggunakan lakban, dan dibawa ke Laboratorium Mikrobiologi UIN Sumatera Utara untuk preparasi selanjutnya (Tuti, 2021).

Persiapan Reaktor dan Prosedur Penelitian

Sampel tanah diayak menggunakan saringan 10 *mesh* (2 mm) untuk memperoleh ukuran partikel ≤ 2 mm dan memisahkan pengotor seperti batu dan kerikil, sehingga luas permukaan tanah meningkat dan proses bioremediasi berlangsung lebih efektif (Sayara *et al.*, 2010). Rancangan penelitian menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan tiga perlakuan dan tiga ulangan, serta satu kelompok kontrol dengan tiga ulangan. Perlakuan yang ditetapkan adalah sebagai berikut : Kontrol (K) berupa 1 kg tanah tercemar tanpa penambahan *eco enzyme*; P1 dengan rasio tanah tercemar dan *eco enzyme* sebesar 50% : 50% (0,5 kg tanah + 0,5 L *eco enzyme*); dan P2 dengan rasio 60% : 40% (0,6 kg tanah + 0,4 L *eco enzyme*). Campuran tanah dan *eco enzyme* diaduk hingga homogen, kemudian ditempatkan dalam reaktor berupa bak wadah plastik sebanyak 7 buah. Selama proses berlangsung, sampel diaduk setiap 3 hari sekali untuk menjaga homogenitas, kelembaban, dan suplai oksigen bagi mikroorganisme (Putra, 2018). Proses berlangsung selama 35 hari dengan pengamatan pada hari ke-0, 7, 14, 21, 28, dan 35 (Dewi, 2023).

Analisis Parameter

Perhitungan Koloni Bakteri

Perhitungan jumlah koloni bakteri menggunakan metode *Total Plate Count* (TPC) sesuai SNI 01-23323-2006. Sebanyak 1 gram sampel tanah diencerkan secara serial dalam NaCl steril dari konsentrasi 10^{-1} hingga 10^{-5} . Suspensi pada pengenceran 10^{-4} dan 10^{-5} diinokulasikan pada media NA, diinkubasi selama 24 jam, kemudian koloni yang tumbuh dihitung. Jumlah koloni bakteri dinyatakan dalam satuan CFU/mL menggunakan persamaan: $\text{CFU/mL} = (\text{rata-rata jumlah koloni per petri} \times \text{dilution factor}) / \text{volume suspensi yang disebarkan}$.
Pengukuran Total Petroleum Hydrocarbon (TPH)

Pengujian kadar TPH dilakukan menggunakan metode gravimetri. Sebanyak 5 gram sampel tanah diekstraksi dengan 25 mL *n*-heksana, dikocok selama 30 menit pada corong pemisah, kemudian didiamkan hingga terbentuk tiga lapisan (air, *n*-heksana, dan minyak). Lapisan minyak dan *n*-heksana disaring menggunakan kertas filter, ditampung dalam erlenmeyer yang telah diketahui beratnya, kemudian diuapkan pada suhu 70°C hingga *n*-heksana habis menguap. Kadar TPH dihitung menggunakan rumus: $\% \text{ TPH} = ((A - B) / \text{Berat sampel}) \times 100\%$, di mana A adalah berat vial akhir (dengan minyak hasil ekstraksi) dan B adalah berat vial awal (sebelum ekstraksi). Persentase degradasi TPH dihitung dengan rumus: $\% \text{ Degradasi} = ((\text{TPH}_0 - \text{TPH}_n) / \text{TPH}_0) \times 100\%$.

Pengukuran Suhu, pH, dan Kelembaban

Pengukuran suhu dan pH tanah dilakukan menggunakan *soil tester* langsung pada reaktor di setiap interval pengamatan. Pengukuran kelembaban atau kadar air dilakukan dengan metode gravimetri, yaitu menimbang sampel sebelum dan sesudah pengeringan dalam oven untuk mengetahui persentase kandungan air dalam tanah.

Analisis Statistik

Data hasil penelitian dianalisis menggunakan uji statistik ANOVA (*Analysis of Variance*) satu arah (*One Way*) dengan program SPSS untuk mengetahui perbedaan nyata antar perlakuan. Apabila terdapat

perbedaan yang signifikan, dilanjutkan dengan uji lanjutan untuk menentukan perlakuan terbaik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penurunan Kadar *Total Petroleum Hydrocarbon* (TPH)

Hasil pengujian kadar TPH selama 35 hari menunjukkan penurunan yang konsisten pada seluruh perlakuan, namun dengan laju yang berbeda-beda secara signifikan antar perlakuan. Perlakuan P1 menunjukkan penurunan TPH paling signifikan, yaitu dari kadar awal rata-rata 18% pada hari ke-0 menjadi hanya 0,7% pada hari ke-35. Perlakuan P2 juga menunjukkan penurunan yang bermakna, dari 18% menjadi 2,6% pada hari yang sama. Sementara itu, kontrol (K) hanya mampu menurunkan kadar TPH dari 22% menjadi 13,4%, mencerminkan keterbatasan aktivitas bakteri *indigenous* tanpa bantuan nutrisi tambahan.

Tabel 1. Hasil Pengujian Kadar *Total Petroleum Hydrocarbon* (% TPH)

Hari Ke	Penurunan TPH (<i>Total Petroleum Hydrocarbon</i>)					
	K		P1		P2	
	Kadar TPH (%)	Tingkat Degradasi (%)	Kadar TPH (%)	Tingkat Degradasi (%)	Kadar TPH (%)	Tingkat Degradasi (%)
0	22,1	—	18	—	18,7	—
7	20,7	6,42	11,3	37,31	12,8	31,11
14	19,5	11,93	6,5	63,71	8	56,67
21	18	18,96	3,9	78,35	5,1	72,34
28	16,2	27,1	2	89,07	3,3	82,38
35	13,4	39,61	0,7	95,91	2,6	85,37

Persentase degradasi TPH pada perlakuan P1 mencapai rata-rata 95,9% hingga akhir pengamatan hari ke-35, sementara P2 mencapai 85%, sedangkan kontrol hanya sekitar 38%. Hasil uji ANOVA satu arah menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan ($p < 0,05$) antar perlakuan dalam kemampuan mendegradasi TPH. Perlakuan P1 dengan rasio *eco enzyme* 50% merupakan kondisi optimal karena mampu menurunkan

kadar TPH hingga di bawah baku mutu yang ditetapkan, yaitu kurang dari 1%.

Tabel 2. Hasil Uji Statistik ANOVA Kadar TPH

Perlakuan	Waktu (Hari)					
	Hari ke-0	Hari ke-7	Hari ke-14	Hari ke-21	Hari ke-28	Hari ke-35
K	22,133 ^b	20,733 ^b	19,533 ^b	18,000 ^b	16,200 ^b	13,467 ^b
P1	18,000 ^a	11,333 ^a	6,533 ^a	3,933 ^a	2,000 ^a	0,733 ^a
P2	18,733 ^a	12,867 ^a	8,067 ^a	5,123 ^a	3,333 ^a	2,667 ^a

Tingginya efektivitas perlakuan P1 dibandingkan P2 dan kontrol berkaitan erat dengan jumlah *eco enzyme* yang ditambahkan. Pada perlakuan P1, rasio *eco enzyme* yang lebih tinggi (50%) menyediakan kandungan nutrisi berupa nitrogen, fosfor, dan kalium yang lebih besar sehingga mampu mendukung pertumbuhan dan metabolisme bakteri *indigenous* secara optimal. Enzim-enzim yang terkandung dalam *eco enzyme*, terutama lipase, berperan memecah komponen minyak menjadi asam lemak dan gliserol sehingga molekul tersebut lebih mudah diakses oleh bakteri sebagai sumber karbon dan energi (Edwar, 2023). Hasil ini sejalan dengan penelitian Rachmadani *et al.* (2023) yang menunjukkan bahwa konsentrasi *eco enzyme* yang lebih tinggi menghasilkan penurunan TPH yang lebih efektif dalam proses remediasi minyak mentah.

Penurunan kadar TPH yang lebih rendah pada kontrol disebabkan oleh tidak adanya penambahan nutrisi eksternal, sehingga bakteri *indigenous* yang ada hanya mengandalkan sumber daya yang tersedia secara alami di dalam tanah. Kondisi ini menyebabkan aktivitas biodegradasi berlangsung lambat dan tidak optimal. Hal ini mengkonfirmasi pentingnya strategi biostimulasi dalam mempercepat proses bioremediasi tanah tercemar hidrokarbon (Gkorezis, 2016; Anwar *et al.*, 2025).

Dinamika Suhu Selama Proses Biodegradasi

Suhu selama proses bioremediasi berlangsung dalam rentang yang mendukung aktivitas mikroorganisme mesofilik. Perlakuan P1 menunjukkan peningkatan suhu yang paling konsisten, dimulai dari 28°C pada hari ke-0 hingga mencapai 33°C pada hari ke-35. Perlakuan P2 mengalami peningkatan suhu dari 28°C menjadi 31°C, sementara kontrol meningkat dari 26°C menjadi 30,6°C. Peningkatan suhu yang terjadi pada perlakuan P1 dan P2 mencerminkan aktivitas metabolisme mikroorganisme yang lebih intensif akibat ketersediaan nutrisi yang lebih baik dari *eco enzyme*.

Tabel 3: Hasil Pengukuran Suhu (°C) pada Setiap Perlakuan

Hari ke	Nilai Suhu (°C)		
	K	P1	P2
0	26	28	28
7	27,3	30	30
14	28	30	30
21	29	31,3	30
28	29,3	32	31
35	30,6	33	31

Suhu optimal untuk sebagian besar bakteri pendegradasi hidrokarbon berada pada kisaran 10–40°C, dan hasil pengukuran dalam penelitian ini (26–33°C) masih berada dalam rentang tersebut (Nugroho, 2017). Peningkatan suhu yang terjadi pada perlakuan P1 mengindikasikan bahwa aktivitas biodegradasi berjalan lebih aktif, karena suhu yang lebih tinggi dalam batas tertentu akan meningkatkan laju reaksi enzimatik dan mempercepat dekomposisi senyawa hidrokarbon.

Perubahan pH Selama Proses Biodegradasi

Nilai pH selama pengamatan menunjukkan perubahan yang berarti antara perlakuan yang mendapat *eco enzyme* dan kontrol. Pada perlakuan P1, pH meningkat dari 6,3 pada hari ke-0 menjadi 7,5 pada hari ke-14, kemudian stabil pada kisaran 7,0–7,5 hingga hari ke-35. Perlakuan P2 menunjukkan tren yang serupa, dengan pH meningkat dari 6,5 menjadi kisaran 7,0–7,5. Sementara itu, kontrol menunjukkan nilai pH yang berfluktuasi antara 6,0 dan 6,6 sepanjang masa pengamatan, tanpa kecenderungan menuju pH netral.

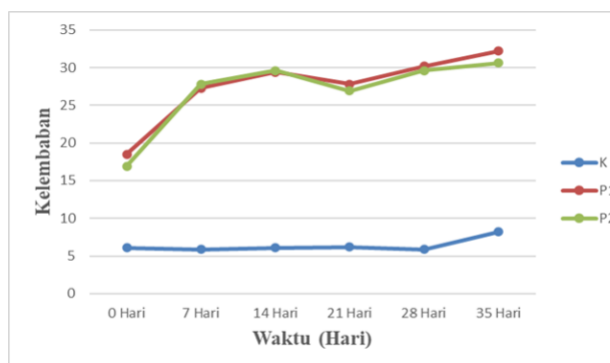
Tabel 4. Hasil Pengukuran pH pada Setiap Perlakuan

Hari ke	Nilai pH		
	K	P1	P2
0	6,3	6,3	6,5
7	6,3	7	7,1
14	6	7,5	7,5
21	6,5	7,1	7,1
28	6,6	7	7,1
35	6,3	7,1	7,1

Pergerakan pH menuju kisaran netral (7,0–7,5) pada perlakuan P1 dan P2 merupakan kondisi yang sangat menguntungkan bagi pertumbuhan dan aktivitas bakteri pendegradasi hidrokarbon. Rentang pH 6,5–7,5 merupakan kondisi optimal bagi sebagian besar bakteri tanah mesofilik (Nugroho, 2017). Peningkatan pH ini diduga berkaitan dengan aktivitas metabolisme bakteri yang menghasilkan produk-produk basa dari pemecahan senyawa hidrokarbon, serta kandungan mineral basa seperti kalium dan kalsium dalam *eco enzyme* kulit nanas yang berkontribusi pada penetralan pH tanah (Dona, 2024).

Kelembaban Tanah Selama Proses Biodegradasi

Kelembaban tanah merupakan faktor fisik yang sangat memengaruhi ketersediaan air bagi metabolisme bakteri dan mobilitas nutrisi dalam tanah. Hasil pengukuran menunjukkan perbedaan kelembaban yang sangat mencolok antara perlakuan yang diberi *eco enzyme* dan kontrol. Perlakuan P1 mengalami peningkatan kelembaban drastis dari 7,5% pada hari ke-0 menjadi kisaran 27–32% sepanjang masa pengamatan, begitu pula dengan P2 yang mencapai kisaran 27–31%. Sebaliknya, kelembaban kontrol tetap rendah pada kisaran 6–8% selama keseluruhan periode penelitian.



Gambar 1. Grafik Hasil Pengukuran Kelembaban pada Setiap Perlakuan

Kelembaban yang tinggi pada perlakuan P1 dan P2 bersumber dari penambahan *eco enzyme* yang berwujud cair. Kondisi kelembaban 27–32% yang dihasilkan pada kedua perlakuan tersebut tampaknya mendekati kisaran optimal bagi aktivitas bakteri pendegradasi hidrokarbon. Kelembaban yang memadai mendukung difusi nutrisi dan oksigen dalam matriks tanah, serta mempertahankan aktivitas enzimatik bakteri agar tetap optimal (Yahya, 2019). Rendahnya kelembaban pada kontrol (6–8%) menjadi salah satu faktor pembatas yang memperlambat aktivitas biodegradasi secara alami.

Pertumbuhan Populasi Bakteri *Indigenus*

Dinamika pertumbuhan bakteri *indigenus* selama proses biodegradasi menunjukkan respons yang sangat berbeda antar perlakuan. Pada hari ke-0, populasi bakteri pada seluruh perlakuan relatif setara dengan kisaran $3\text{--}8 \times 10^5$ CFU/mL. Seiring berjalannya proses bioremediasi, populasi bakteri pada perlakuan P1 mengalami peningkatan yang paling signifikan, mencapai $3,25 \times 10^6$ CFU/mL pada hari ke-35. Perlakuan P2 menunjukkan peningkatan yang juga bermakna dengan jumlah bakteri mencapai $2,74 \times 10^6$ CFU/mL, sedangkan kontrol hanya mencapai $9,81 \times 10^5$ CFU/mL pada hari yang sama.

Gambar 2. Grafik Pertumbuhan Jumlah Koloni Bakteri (CFU/mL) pada Setiap Perlakuan

Tabel 5. Hasil Uji Statistik ANOVA Jumlah Koloni Bakteri

Perlakuan	Waktu (Hari)					
	Hari ke-0	Hari ke-7	Hari ke-14	Hari ke-21	Hari ke-28	Hari ke-35
K	6,18 × 10^{5a}	8,52 × 10^{5a}	6,04 × 10^{5a}	6,71 × 10^{5a}	8,45 × 10^{5a}	9,82 × 10^{5a}
P1	5,31 × 10^{5a}	1,43 × 10^{6b}	1,66 × 10^{6b}	2,04 × 10^{6b}	2,60 × 10^{6b}	3,25 × 10^{6b}
P2	5,27 × 10^{5a}	1,25 × 10^{6b}	1,50 × 10^{6b}	1,76 × 10^{6b}	2,33 × 10^{6b}	2,75 × 10^{6b}

Tingginya populasi bakteri pada perlakuan P1 berkorelasi positif dengan rendahnya kadar TPH yang dicapai pada perlakuan yang sama. Hal ini mengkonfirmasi bahwa peningkatan aktivitas dan populasi bakteri *indigenus* merupakan mekanisme utama di balik percepatan biodegradasi hidrokarbon dalam penelitian ini. Kandungan nitrogen, fosfor, dan kalium dalam *eco enzyme* bertindak sebagai nutrisi esensial yang mendukung sintesis protein, pembentukan membran sel, serta berbagai reaksi enzimatik dalam metabolisme bakteri (Pramushinta, 2018). Populasi bakteri yang lebih rendah pada kontrol ($9,81 \times 10^5$ CFU/mL) mencerminkan keterbatasan pertumbuhan akibat tidak tersedianya sumber nutrisi tambahan selain yang secara alami terdapat dalam tanah tercemar, yang juga telah terdegradasi akibat kontaminasi hidrokarbon. Korelasi antara peningkatan populasi bakteri dan penurunan kadar TPH ini konsisten dengan temuan penelitian Novianty *et al.* (2020) yang menunjukkan bahwa efektivitas bioremediasi sangat ditentukan oleh kelimpahan dan aktivitas metabolik bakteri *indigenus*.

yang mampu memanfaatkan senyawa hidrokarbon sebagai sumber energi.

KESIMPULAN

Penambahan *eco enzyme* berbahan kulit nanas sebagai agen biostimulasi terbukti secara signifikan meningkatkan efektivitas biodegradasi hidrokarbon pada tanah tercemar limbah oli bekas. Perlakuan P1 dengan rasio tanah tercemar dan *eco enzyme* sebesar 50%:50% merupakan kondisi terbaik dalam penelitian ini, berhasil menurunkan kadar *Total Petroleum Hydrocarbon* (TPH) dari rata-rata 18% menjadi hanya 0,7% pada hari ke-35, atau setara dengan efisiensi degradasi sebesar 95,9%, yang merupakan nilai di bawah baku mutu yang ditetapkan (<1%). Peningkatan populasi bakteri *indigenous* pada perlakuan P1 hingga $3,25 \times 10^6$ CFU/mL mengkonfirmasi bahwa *eco enzyme* berperan sebagai penyedia nutrisi esensial yang secara nyata memacu pertumbuhan dan aktivitas metabolisme mikroorganisme pendegradasi. Parameter lingkungan seperti suhu (26–33°C), pH (7,0–7,5), dan kelembaban (27–32%) pada perlakuan P1 berada dalam kondisi yang mendukung aktivitas biologis optimal. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa *eco enzyme* dari fermentasi kulit nanas merupakan agen biostimulasi yang efektif, ekonomis, dan ramah lingkungan untuk diterapkan dalam program bioremediasi tanah yang tercemar limbah hidrokarbon, sekaligus membuka peluang pemanfaatan limbah organik dalam mendukung upaya restorasi lingkungan yang berkelanjutan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Laboratorium Mikrobiologi UIN Sumatera Utara Medan atas fasilitas yang diberikan selama pelaksanaan penelitian, serta kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan, bimbingan, dan kontribusi dalam penyelesaian penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Ahda, M., & Fitri, R. (2019). Isolasi dan karakterisasi

bakteri *indigenous* tanah tercemar oli bekas dari bengkel di Kota Padang. *Jurnal Biologi Universitas Andalas*, 7(1), 12–19.

- Algusri, M. (2019). Dampak pencemaran hidrokarbon minyak bumi terhadap kesuburan tanah. *Jurnal Lingkungan Hidup*, 5(2), 45–52.
- Anwar, R., Hidayat, M., & Syahputra, R. (2025). Biostimulasi sebagai strategi bioremediasi tanah tercemar hidrokarbon: Tinjauan terkini. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 23(1), 1–14.
- Asni, N. (2016). Karakteristik limbah oli bekas dan dampaknya terhadap lingkungan. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 12(3), 201–210.
- Benidiktus, T. (2021). Prosedur pembuatan ekoenzim dari limbah organik. *Jurnal Pertanian Organik*, 4(1), 33–40.
- Dewi, S. R., Winardi, & Sulastri, A. (2023). Bioremediasi tanah tercemar limbah oli bekas dengan metode composting. *Jurnal Bioteknologi Lingkungan*, 8(2), 77–89.
- Dona, A. S. (2024). Potensi EM-4 dan pupuk cair menurunkan tanah tercemar oli bekas dalam bioremediasi. *Skripsi*. Universitas Islam Negeri Sumatera Utara, Medan.
- Edwar, F. (2023). Peran enzim lipase dalam degradasi senyawa minyak pada proses bioremediasi. *Jurnal Enzimologi Terapan*, 5(1), 21–29.
- Fazilla, S. (2019). Efektivitas kombinasi pupuk cair dan tanah kompos dalam proses bioremediasi limbah oli. *Skripsi*. Universitas Islam Negeri Sumatera Utara, Medan.
- Ghazi, A. (2022). Prinsip fermentasi dan produksi ekoenzim dari limbah organik rumah tangga. *Jurnal Biokimia Aplikasi*, 3(2), 55–63.
- Gkorezis, P. (2016). Biostimulation of hydrocarbon-degrading bacteria: A review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 13(4), 1087–1100.
- Indrawati, R., & Surtikanti, H. K. (2024). Dampak PAHs dalam limbah oli terhadap kesehatan manusia dan ekosistem tanah. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 16(1), 44–53.
- Koshlaf, E., & Ball, A. S. (2017). Soil bioremediation approaches for petroleum hydrocarbon polluted environments. *AIMS Microbiology*, 3(1), 25–49.
- Kuppan, P. (2024). Biostimulation strategies for enhanced petroleum hydrocarbon degradation in soil: A comprehensive review. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(2), 1890–1907.
- Kurniawan, A. (2014). Pengelolaan limbah oli bekas di bengkel kendaraan bermotor. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 10(1), 15–23.
- Novianty, R., Yuharmen, Y., & Rosalina, D. (2020).

- Kemampuan biodegradasi bakteri *indigenous* tanah tercemar minyak bumi. *Jurnal Biologi Tropis*, 20(2), 312–320.
- Nugroho, A. (2017). Bioremediasi tanah dan air tercemar minyak bumi: Pendekatan dan teknologi terkini. *Penerbit Universitas Indonesia*, Jakarta.
- Oktafiani, D. (2022). Strategi biostimulasi dalam remediasi tanah tercemar hidrokarbon. *Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan*, 14(2), 88–99.
- Pramushinta, I. A. K. (2018). Peran unsur hara makro dalam mendukung aktivitas mikroorganisme tanah. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 42(1), 71–80.
- Putri, A. R. (2020). Karakteristik fisik dan kimia tanah yang tercemar oli bekas. *Jurnal Ilmu Tanah*, 18(1), 29–37.
- Rachmadani, S., Sulistyowati, L., & Prihatiningsih, N. (2023). Potensi ekoenzim sebagai agen biostimulasi dalam mendukung biodegradasi senyawa hidrokarbon minyak mentah. *Jurnal Bioteknologi dan Biosains Indonesia*, 10(1), 56–65.
- Sayara, T., Borràs, E., Caminal, G., Sarra, M., & Sánchez, A. (2010). Bioremediation of PAHs-contaminated soil through composting: Influence of bioaugmentation and biostimulation on contaminant biodegradation. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 65(6), 859–865.
- Suprayitno, E., & Mondiana, R. (2024). Bioremediasi tanah tercemar minyak bumi menggunakan bakteri *indigenous*: Pendekatan ramah lingkungan. *Jurnal Biologi Lingkungan*, 11(1), 1–12.
- Welan, M., Runtuwene, S., & Paais, M. (2019). Faktor-faktor yang memengaruhi biodegradasi hidrokarbon dalam tanah tercemar minyak bumi. *Jurnal Biopasifik*, 11(2), 45–53.
- Yahya, A. (2019). Mekanisme produksi biosurfaktan oleh bakteri dan peranannya dalam bioremediasi. *Jurnal Mikrobiologi Tropika*, 7(1), 18–26.