

## ***Comparative Effectiveness Of Organic Waste–Based Eco-Enzyme And Commercial Bio-Bacterial Agents In Railway Toilet Wastewater Treatment***

### **Perbandingan Eefektivitas Eco-Enzyme Berbasis Limbah Organik Dan Biobakteri Komersial Dalam Pengolahan Limbah Toilet Kereta Api Ramah Lingkungan**

Johannes Martua Hutagalung<sup>1)</sup>, Karina Marwahati<sup>2)</sup>, Lia Muliati<sup>3\*)</sup>, Usamah Rizqi Alfian<sup>4\*)</sup>, Retno Prasongko<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup> Program Studi Teknik Kimia, Universitas Insan Cendekia Mandiri, Jl. Pasir Kaliki No.199, Sukabungah, Kec. Sukajadi, Kota Bandung, Jawa Barat 40162  
Email: [johannesmartua85@gmail.com](mailto:johannesmartua85@gmail.com)

<sup>2)</sup> Program Studi Teknik Kimia, Universitas Insan Cendekia Mandiri, Jl. Pasir Kaliki No.199, Sukabungah, Kec. Sukajadi, Kota Bandung, Jawa Barat 40162  
Email: [kmarwahati12@gmail.com](mailto:kmarwahati12@gmail.com)

<sup>3\*)</sup> Program Studi Teknik Kimia, Universitas Insan Cendekia Mandiri, Jl. Pasir Kaliki No.199, Sukabungah, Kec. Sukajadi, Kota Bandung, Jawa Barat 40162  
Email: [liautomo@gmail.com](mailto:liautomo@gmail.com)

<sup>4\*)</sup> Program Studi Teknik Kimia, Universitas Insan Cendekia Mandiri, Jl. Pasir Kaliki No.199, Sukabungah, Kec. Sukajadi, Kota Bandung, Jawa Barat 40162  
Email: [usamahalfian35@gmail.com](mailto:usamahalfian35@gmail.com)

<sup>5)</sup> Fasilitas Penumpang Daop 2, PT. Kereta Api Indonesia (Persero), Jl. Stasiun Timur No.25, Kb. Jeruk, Kec. Andir, Kota Bandung, Jawa Barat 40181  
Email: [faspnbdg02@gmail.com](mailto:faspnbdg02@gmail.com)

\*) Corresponding author

**Abstract:** *The growing number of railway passengers in Indonesia demands improved service quality, including the provision of environmentally friendly toilet facilities. The Railway Eco-Toilet (RET) system has adopted a waste storage mechanism to reduce direct discharge into tracks or water bodies. However, the stored wastewater still requires further treatment to meet environmental quality standards. One potential alternative is eco-enzyme, a fermentation product of household organic waste that contains enzymes, organic acids, and beneficial microorganisms capable of degrading pollutants. This study aims to analyze the performance of eco-enzyme in reducing pollutants in RET wastewater and to compare it with a commercial bio-bacteria product currently applied by PT KAI. The observed parameters include Biochemical Oxygen Demand (BOD), Chemical Oxygen Demand (COD), Total Dissolved Solids (TDS), and Total Suspended Solids (TSS). The experiment was conducted by directly applying eco-enzyme to RET storage tanks with incubation periods of 10, 15, and 20 days. Samples were then analyzed in an accredited laboratory using standard water quality testing methods. The results on the 20th day showed that eco-enzyme reduced pollutant levels to BOD<sub>5</sub> of 70 mg/L, COD of 206 mg/L, TDS of 1478 mg/L, and TSS of 14 mg/L. In comparison, the commercial bio-bacteria achieved BOD<sub>5</sub> of 63 mg/L, COD of 204 mg/L, TDS of 1129 mg/L, and TSS of 53 mg/L. The analysis indicated that eco-enzyme performed better in reducing TSS, achieving compliance with environmental standards, whereas both treatments failed to lower BOD<sub>5</sub> and COD to the required limits. These findings highlight the potential of eco-enzyme as an alternative for treating railway toilet wastewater. Its application could strengthen RET systems and be extended to domestic wastewater management such as household septic tanks.*

**Keywords:** *biobacteria, eco-enzyme, railway, wastewater, Railway Eco-Toilet*

**Abstrak:** Pertumbuhan jumlah pengguna transportasi kereta api di Indonesia menuntut peningkatan kualitas layanan, termasuk penyediaan fasilitas Toilet Ramah Lingkungan (TRL) yang mampu mengurangi pencemaran. Sistem TRL saat ini menggunakan tangki penampungan untuk mencegah pembuangan langsung limbah ke rel atau badan air, namun kualitas limbah yang dihasilkan masih perlu diolah lebih lanjut agar memenuhi baku mutu lingkungan. Penelitian ini bertujuan menganalisis efektivitas eco-enzyme, produk fermentasi limbah organik rumah tangga yang mengandung enzim, asam organik, dan mikroorganisme bermanfaat, dalam menurunkan kadar pencemar limbah TRL serta membandingkannya dengan biobakteri komersial yang digunakan PT KAI. Parameter yang diuji meliputi Biochemical Oxygen Demand (BOD), Chemical Oxygen Demand (COD), Total Dissolved Solids (TDS), dan Total Suspended Solids (TSS). Penelitian dilakukan dengan menambahkan eco-enzyme pada tangki penampungan limbah TRL dengan variasi waktu inkubasi 10, 15, dan 20 hari, kemudian sampel dianalisis di laboratorium terakreditasi menggunakan metode standar pengujian kualitas air. Hasil pada inkubasi 20 hari menunjukkan eco-enzyme mampu menurunkan kadar pencemar hingga BOD<sub>5</sub> sebesar 70 mg/L, COD 206 mg/L, TDS 1478 mg/L, dan TSS 14 mg/L, sedangkan biobakteri menghasilkan BOD<sub>5</sub> 63 mg/L, COD 204 mg/L, TDS 1129 mg/L, dan TSS 53 mg/L. Analisis menunjukkan eco-enzyme lebih efektif dalam menurunkan TSS hingga memenuhi baku mutu, namun keduanya belum menurunkan BOD<sub>5</sub> dan COD sesuai standar. Dengan demikian, eco-enzyme berpotensi menjadi alternatif ramah lingkungan untuk pengolahan limbah TRL, khususnya dalam menurunkan TSS, serta memiliki potensi untuk diterapkan pada pengolahan limbah domestik seperti septic tank rumah tangga.

Kata Kunci: biobakteri, eco-enzyme, kereta api, limbah, Toilet Ramah Lingkungan

DOI: <https://doi.org/10.37577/sainteks.v8i01.1035>

Received: 01, 2026. Accepted: 03, 2026.

Published: 03, 2026

## PENDAHULUAN

Peningkatan jumlah pengguna transportasi umum di Indonesia, terutama moda kereta api, berdampak langsung terhadap meningkatnya volume limbah yang dihasilkan dari aktivitas toilet kereta. Berdasarkan data PT Kereta Api Indonesia (Persero) Daerah Operasional 2 Bandung, jumlah penumpang kereta api pada periode Januari hingga Desember 2024 mencapai sekitar 9.424.181 penumpang (PT Kereta Api Indonesia, 2025). Limbah toilet ini sebagian besar terdiri dari tinja, urin, dan air limbah lainnya yang mengandung bahan organik dengan kadar Biochemical Oxygen Demand (BOD) dan Chemical Oxygen Demand (COD) yang tinggi, serta kandungan Total Dissolved Solids (TDS) dan Total Suspended Solids (TSS) yang dapat membahayakan lingkungan jika tidak dikelola dengan baik. Pengolahan yang tidak optimal terhadap limbah ini dapat menimbulkan pencemaran lingkungan, bau tidak sedap, serta menjadi sarana penyebaran mikroorganisme patogen (Ridwan et al., 2020; Saminem, 2021).

Limbah toilet yang berasal dari aktivitas penumpang kereta api pada dasarnya memiliki karakteristik yang hampir serupa dengan limbah domestik jenis blackwater, yaitu limbah yang mengandung campuran urin, feses, air siraman, serta berbagai bahan organik terlarut. Kandungan bahan organik yang tinggi menyebabkan limbah ini memiliki potensi pencemaran yang cukup besar apabila tidak dikelola dengan baik. Selain itu, keberadaan senyawa terlarut dan padatan tersuspensi dalam limbah juga dapat memengaruhi kualitas fisik dan kimia perairan apabila limbah tersebut dibuang tanpa pengolahan yang memadai. Oleh karena itu, diperlukan upaya pengolahan limbah yang efektif untuk menurunkan konsentrasi parameter pencemar sebelum limbah dilepaskan ke lingkungan.

Pada sistem Toilet Ramah Lingkungan (TRL) yang diterapkan pada kereta api, limbah tidak lagi dibuang langsung ke rel seperti sistem lama, melainkan ditampung dalam tangki khusus untuk

kemudian diproses lebih lanjut. Sistem ini dikembangkan untuk meminimalkan dampak pencemaran lingkungan yang dapat ditimbulkan oleh limbah toilet kereta api. Oleh karena itu, pengelolaan limbah pada sistem TRL memerlukan metode pengolahan yang mampu menurunkan konsentrasi parameter pencemar seperti BOD<sub>5</sub>, COD, TDS, dan TSS secara efektif.

Sebagai bentuk tanggung jawab terhadap lingkungan, PT Kereta Api Indonesia (Persero) telah mengimplementasikan sistem toilet ramah lingkungan, di mana limbah tidak lagi dibuang langsung ke rel, melainkan ditampung dalam tangki khusus dan kemudian diolah lebih lanjut pada fasilitas pengolahan limbah yang tersedia. Salah satu metode pengolahan yang digunakan secara operasional oleh PT KAI adalah penggunaan biobakteri komersial, yakni mikroorganisme yang diformulasikan secara khusus untuk mempercepat degradasi senyawa organik secara biologis. Contoh limbah organik meliputi kulit buah, sayuran, sisa makanan, dan rempah-rempah. Limbah organik kaya akan karbon, nitrogen, dan nutrisi lain yang mendukung pertumbuhan mikroorganisme dalam proses fermentasi (Rukmini & Astuti Herawati, 2023). Penggunaan biobakteri ini terbukti mampu mengurangi kadar pencemar secara signifikan dan telah menjadi bagian penting dalam sistem pengolahan limbah toilet kereta api.

Di sisi lain, meningkatnya kesadaran terhadap pengolahan limbah berbasis bahan alami mendorong pemanfaatan eco-enzyme sebagai alternatif ramah lingkungan. Eco-enzyme merupakan cairan hasil fermentasi limbah organik seperti kulit buah dan sayuran, yang mengandung berbagai enzim serta mikroorganisme alami yang mampu membantu proses penguraian bahan organik dalam limbah cair. Proses fermentasi limbah organik tersebut menghasilkan berbagai senyawa bioaktif serta enzim seperti amilase, protease, dan lipase yang berperan dalam menguraikan senyawa organik kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana. Dengan demikian, eco-enzyme ditawarkan sebagai alternatif pengganti biobakteri komersial yang selama ini digunakan PT KAI dalam sistem Toilet Ramah Lingkungan (TRL). Keunggulan eco-enzyme terletak pada ketersediaan bahan baku yang melimpah dan proses pembuatan yang sederhana.

Meskipun biobakteri komersial telah banyak digunakan dalam sistem pengolahan limbah Toilet Ramah Lingkungan (TRL), kajian ilmiah yang membandingkan efektivitasnya dengan eco-enzyme pada sistem limbah toilet kereta api masih terbatas. Sebagian besar penelitian sebelumnya lebih banyak berfokus pada pemanfaatan eco-enzyme pada limbah domestik atau limbah organik skala rumah tangga. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji kinerja eco-enzyme berbasis limbah organik serta membandingkannya dengan biobakteri komersial yang digunakan oleh PT Kereta Api Indonesia (Persero) dalam pengolahan limbah TRL. Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik limbah Toilet Ramah Lingkungan (TRL) setelah perlakuan menggunakan eco-enzyme berbasis limbah organik, membandingkan efektivitas eco-enzyme dengan biobakteri komersial yang digunakan oleh PT Kereta Api Indonesia (Persero) dalam menurunkan parameter pencemar, serta mengkaji potensi eco-enzyme sebagai alternatif pelengkap dalam sistem pengolahan limbah TRL

## **METODOLOGI**

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental untuk menguji efektivitas eco-enzyme berbasis limbah organik dibandingkan biobakteri komersial PT Kereta Api Indonesia (Persero) dalam pengolahan limbah Toilet Ramah Lingkungan (TRL).

### **Lokasi dan Waktu Penelitian**

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Teknik Kimia Universitas Insan Cendekia Mandiri, Laboratorium Kimia B4T, serta Depo Kereta Bandung. Penelitian berlangsung selama enam bulan, yaitu dari Maret hingga Agustus 2025.

### **Bahan dan Alat**

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi limbah organik (kulit buah, sisa sayur, dan rempah-rempah), gula merah, air, sampel limbah Toilet Ramah Lingkungan (TRL), eco-enzyme hasil fermentasi, serta biobakteri komersial PT Kereta Api Indonesia (Persero).

Peralatan yang digunakan antara lain fermentor, pisau, saringan, gelas ukur 500 mL, pH meter, TDS meter, timbangan analitik, serta jerigen untuk penyimpanan sampel.

#### Prosedur Eksperimen

##### a. Persiapan Bahan dan Alat

Limbah organik, gula merah, dan air disiapkan dengan perbandingan 3:1:10. Selain itu, alat fermentasi dan alat ukur seperti pH meter, TDS meter, timbangan analitik, serta gelas ukur dipersiapkan sebelum proses penelitian dilakukan.

##### b. Pembuatan Eco-Enzyme

Limbah organik dipotong menjadi ukuran kecil untuk meningkatkan luas permukaan fermentasi. Limbah tersebut kemudian dicampurkan dengan gula merah dan air dalam fermentor dengan perbandingan 3:1:10. Fermentor ditutup dengan ventilasi kecil dan difermentasi selama 92 hari pada suhu ruang. Pada minggu pertama dilakukan pengadukan ringan untuk membantu proses fermentasi. Setelah proses fermentasi selesai, larutan disaring untuk memperoleh eco-enzyme yang siap digunakan.

##### c. Pengolahan Limbah TRL

Perlakuan pertama menggunakan 30 L limbah TRL yang ditambahkan eco-enzyme sebanyak 1,5 L (5% v/v). Perlakuan kedua menggunakan 30 L limbah TRL yang ditambahkan biobakteri komersial PT KAI sebanyak 1,5 L (5% v/v). Limbah kemudian diinkubasi dalam jerigen yang tertutup rapat tanpa ruang udara untuk menjaga kondisi anaerob selama proses inkubasi.

##### d. Pengambilan Sampel

Sampel limbah diambil pada hari ke-10, kemudian sebagian sampel langsung dianalisis dan sebagian lainnya diinkubasi kembali untuk pengamatan pada hari ke-15 dan ke-20. Sampel disimpan dalam jerigen tertutup rapat tanpa ruang udara untuk mempertahankan kondisi anaerob hingga waktu analisis.

#### Variabel Penelitian

- Variabel Bebas: jenis bahan pengolahan (eco-enzyme, biobakteri komersial PT KAI), waktu perlakuan (10, 15, 20 hari)
- Variabel Terikat: nilai BOD<sub>5</sub>, COD, TDS, TSS
- Variabel Kontrol: konsentrasi bahan 5%, volume limbah 30 liter, suhu inkubasi alami, kondisi anaerob, homogenitas limbah

#### Metode Analisa

Metode analisa hasil penelitian ini dilakukan dengan mengukur parameter kualitas limbah BOD<sub>5</sub>, COD, TDS, dan TSS sesuai standar nasional Indonesia. Pengukuran BOD<sub>5</sub> dilakukan menggunakan prosedur SNI 6989.72:2009, sedangkan COD dianalisis menggunakan metode refluks terbuka secara titrimetri sesuai SNI 6989.15:2019. Parameter TDS dan TSS diukur secara gravimetri menggunakan SNI 6989.27:2019 dan SNI 6989.3:2019. Data yang diperoleh kemudian dianalisis secara deskriptif untuk melihat nilai BOD<sub>5</sub>, COD, TDS, dan TSS pada setiap kombinasi perlakuan dan waktu inkubasi. Selanjutnya, hasil pengolahan dibandingkan dengan baku mutu air limbah domestik sesuai Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 11 Tahun 2025, dengan batas maksimal BOD<sub>5</sub> ≤ 30 mg/L, COD ≤ 100 mg/L, TDS ≤ 2000 mg/L, dan TSS ≤ 30 mg/L. Analisis dilanjutkan dengan interpretasi tren perubahan nilai untuk mengevaluasi efektivitas masing-masing bahan pengolahan, menentukan durasi inkubasi paling optimal, dan menilai potensi eco-enzyme sebagai alternatif pengolahan limbah toilet yang ramah lingkungan.

#### HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Eco-enzyme dalam penelitian ini dibuat dari kombinasi limbah organik berupa sayur-sayuran (sawi dan bayam), kulit buah (pepaya, nanas, jeruk, mangga), serta rempah-rempah (jahe, kunyit, dan lengkuas). Proses pembuatan dilakukan melalui fermentasi selama 92 hari, menggunakan gula merah sebagai sumber karbon dan air bersih dengan rasio bahan organik :

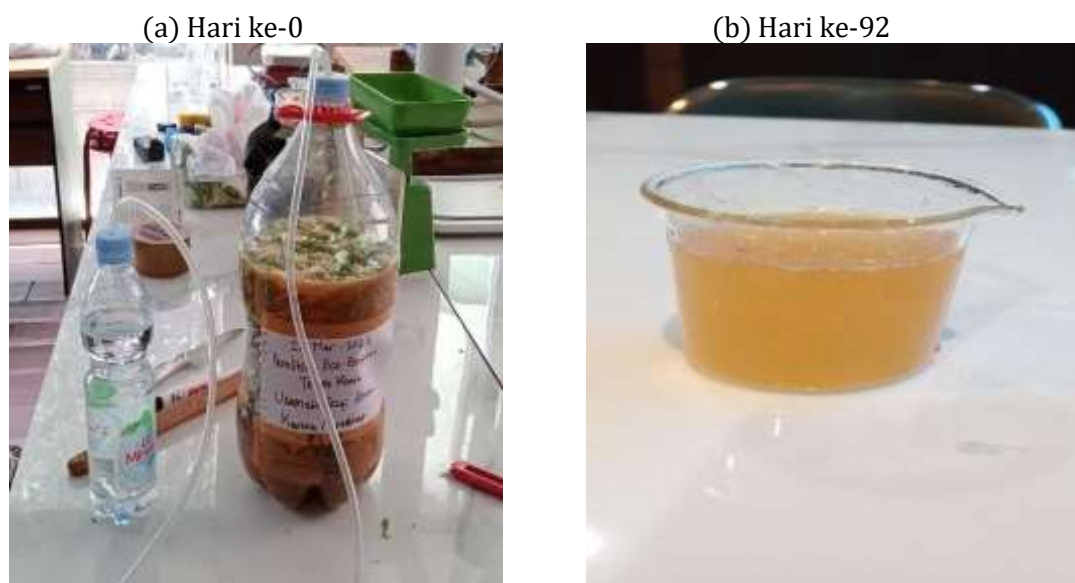
gula merah : air = 3:1:10 (Khasanah et al., 2022).

Fermentasi dilakukan dalam wadah jerigen tertutup pada suhu ruang ( $\pm 27-30^{\circ}\text{C}$ ) dalam kondisi anaerob. Selama 30 hari pertama, campuran diaduk satu kali setiap minggu untuk merangsang aktivitas mikroba dan mencegah endapan yang terlalu cepat. Setelah itu, fermentasi dilanjutkan tanpa pengadukan hingga hari ke-92.

Setelah fermentasi, cairan disaring untuk memisahkan ampas, kemudian dilakukan pengujian pH dan TDS serta pengamatan sifat fisik berupa warna dan bau. Hasil pengujian tersebut ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik Fisik dan Kimia Eco-Enzyme Hasil Fermentasi Limbah Organik pada Hari ke-0 dan Hari ke-92

Parameter	Hari ke-0	Hari ke-92
Warna	Cokelat	Cokelat bening
Bau	Aroma gula merah	Asam khas fermentasi
pH	6,9	4,1
TDS (ppm)	1790	2040



Gambar 1. Perubahan Visual Eco-Enzyme Hasil Fermentasi Limbah Organik Pada Hari ke-0 dan Hari ke-92 yang Menunjukkan Perubahan Warna Larutan serta Karakteristik Fisik selama Proses Fermentasi

Pada hari ke-0, larutan eco-enzyme masih berwarna coklat keruh dengan aroma dominan gula merah. Nilai pH masih mendekati netral (6,9) dan kandungan TDS sebesar 1790 ppm. Kondisi ini menunjukkan bahwa mikroorganisme masih berada pada fase adaptasi sehingga aktivitas dekomposisi belum optimal.

Sedangkan pada hari ke-92, warna cairan berubah menjadi coklat bening, aroma menjadi asam khas fermentasi, pH turun menjadi 4,1, dan TDS meningkat hingga 2040 ppm. Penurunan pH menunjukkan terbentuknya asam organik sebagai produk metabolisme mikroorganisme selama proses fermentasi, yang disertai dengan pemecahan senyawa kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana sehingga meningkatkan nilai TDS.

Dengan demikian, eco-enzyme pada hari ke-92 dinyatakan matang dan siap digunakan sebagai agen pengolahan limbah karena kandungan bioaktif dan enzimnya sudah berada pada

kondisi optimal.

Perubahan karakteristik tersebut menunjukkan bahwa proses fermentasi berlangsung secara bertahap hingga menghasilkan produk eco-enzyme yang stabil. Penurunan pH serta perubahan warna dan aroma merupakan indikator umum keberhasilan fermentasi limbah organik. Kondisi ini menandakan bahwa mikroorganisme fermentatif telah aktif menghasilkan berbagai senyawa metabolit seperti asam organik dan enzim yang berperan dalam proses degradasi bahan organik.

Data pengolahan limbah Toilet Ramah Lingkungan (TRL) menggunakan eco-enzyme dan biobakteri komersial PT KAI disajikan pada Tabel 2. Pengamatan dilakukan pada hari ke-10, 15, dan 20 untuk memantau perubahan parameter limbah secara bertahap. Eco-enzyme dan biobakteri komersial PT KAI menunjukkan perbedaan nilai pada parameter BOD<sub>5</sub>, COD, TDS, dan TSS selama periode inkubasi. Penyajian data dalam satu tabel mempermudah pemantauan tren perubahan setiap perlakuan.

Tabel 2. Nilai BOD<sub>5</sub>, COD, TDS, dan TSS Limbah Toilet Ramah Lingkungan (TRL) setelah Perlakuan Eco-Enzyme dan Biobakteri Komersial PT KAI pada Waktu Inkubasi 10, 15, dan 20 Hari

Parameter	Satuan	Eco-enzyme 10 hari	Eco-enzyme 15 hari	Eco-enzyme 20 hari	Biobakteri Komersial 10 hari	Biobakteri Komersial 15 hari	Biobakteri Komersial 20 hari
BOD <sub>5</sub>	mg/L	175	141	70	149	146	63
COD	mg/L	500.74	440.32	206.85	450.56	430.08	204.80
TDS	mg/L	1504	1495	1478	1143	1142	1129
TSS	mg/L	118	80	14	112	64	53

Berdasarkan hasil pengujian, nilai BOD<sub>5</sub> pada perlakuan eco-enzyme mengalami penurunan dari 175 mg/L pada hari ke-10 menjadi 141 mg/L pada hari ke-15 dan 70 mg/L pada hari ke-20. Sementara itu, pada perlakuan biobakteri komersial nilai BOD<sub>5</sub> menurun dari 149 mg/L pada hari ke-10 menjadi 146 mg/L pada hari ke-15 dan 63 mg/L pada hari ke-20.

Parameter COD juga menunjukkan tren penurunan pada kedua perlakuan. Pada perlakuan eco-enzyme nilai COD menurun dari 500,74 mg/L pada hari ke-10 menjadi 440,32 mg/L pada hari ke-15 dan 206,85 mg/L pada hari ke-20. Sementara itu, pada perlakuan biobakteri komersial nilai COD menurun dari 450,56 mg/L pada hari ke-10 menjadi 430,08 mg/L pada hari ke-15 dan 204,80 mg/L pada hari ke-20.

Nilai TDS menunjukkan perubahan yang relatif kecil dibandingkan parameter lainnya. Pada perlakuan eco-enzyme nilai TDS menurun dari 1504 mg/L pada hari ke-10 menjadi 1495 mg/L pada hari ke-15 dan 1478 mg/L pada hari ke-20. Sedangkan pada perlakuan biobakteri komersial nilai TDS menurun dari 1143 mg/L menjadi 1142 mg/L dan 1129 mg/L.

Penurunan paling signifikan terjadi pada parameter TSS. Pada perlakuan eco-enzyme nilai TSS menurun dari 118 mg/L pada hari ke-10 menjadi 80 mg/L pada hari ke-15 dan mencapai 14 mg/L pada hari ke-20. Sementara itu, pada perlakuan biobakteri komersial nilai TSS menurun dari 112 mg/L pada hari ke-10 menjadi 64 mg/L pada hari ke-15 dan 53 mg/L pada hari ke-20.

Penurunan nilai TSS menunjukkan bahwa sebagian besar partikel padatan tersuspensi dalam limbah telah mengalami proses pengendapan maupun degradasi selama periode inkubasi. Keberadaan asam organik yang dihasilkan selama fermentasi eco-enzyme dapat membantu proses koagulasi alami sehingga partikel padatan lebih mudah menggumpal dan mengendap. Kondisi tersebut menyebabkan konsentrasi padatan tersuspensi dalam limbah menjadi lebih rendah seiring bertambahnya waktu inkubasi.

Tabel 3 menyajikan nilai BOD<sub>5</sub>, COD, TDS, dan TSS limbah Toilet Ramah Lingkungan (TRL) setelah perlakuan eco-enzyme dan biobakteri komersial PT KAI pada hari ke-10, 15, dan 20, dibandingkan dengan standar baku mutu lingkungan yang ditetapkan dalam PermenLH No. 11 Tahun 2025. Penyajian data ini memudahkan identifikasi parameter yang telah memenuhi baku mutu atau yang masih berada di atas ambang batas.

Tabel 3. Perbandingan nilai BOD<sub>5</sub>, COD, TDS, dan TSS Limbah Toilet Ramah Lingkungan (TRL) setelah Perlakuan Eco-Enzyme dan Biobakteri Komersial PT KAI terhadap Baku Mutu Lingkungan PermenLH No. 11 Tahun 2025

Parameter (mg/L)	Hari Inkubasi	Eco-enzyme	Biobakteri Komersial PT KAI	Baku Mutu (PermenLH No. 11 Tahun 2025)	Keterangan
BOD <sub>5</sub>	10	175	149	≤ 30 mg/L	Tidak Memenuhi
	15	141	146	≤ 30 mg/L	Tidak Memenuhi
	20	70	63	≤ 30 mg/L	Tidak Memenuhi
COD	10	500.74	450.56	≤ 100 mg/L	Tidak Memenuhi
	15	440.32	430.08	≤ 100 mg/L	Tidak Memenuhi
	20	206.85	146	≤ 100 mg/L	Tidak Memenuhi
TDS	10	1504	1143	≤ 2000 mg/L	Memenuhi
	15	1495	1142	≤ 2000 mg/L	Memenuhi
	20	1478	1129	≤ 2000 mg/L	Memenuhi
TSS	10	118	112	≤ 30 mg/L	Tidak Memenuhi
	15	80	64	≤ 30 mg/L	Tidak Memenuhi
	20	14	53	≤ 30 mg/L	Eco-enzyme (Memenuhi) Biobakteri Komersial PT KAI (Tidak Memenuhi)

Karakteristik eco-enzyme terlihat dari sifat fisiknya yang menunjukkan stabilitas fermentasi. Warna coklat dan aroma asam khas fermentasi menandakan proses berlangsung optimal. Bau asam muncul akibat terbentuknya senyawa volatil seperti asam asetat dan ester, sedangkan tidak adanya bau busuk atau lendir menunjukkan bahwa tidak terjadi kontaminasi atau proses pembusukan selama fermentasi (Widiani et al., 2023). Hasil fermentasi menunjukkan bahwa eco-enzyme yang dihasilkan memiliki karakteristik yang sesuai dengan literatur. Nilai pH akhir sebesar 4,1 menunjukkan terbentuknya asam organik seperti asam asetat dan asam sitrat akibat aktivitas mikroba fermentatif selama 92 hari. Sihite (2024) menyebutkan bahwa fermentasi limbah organik selama tiga bulan umumnya menghasilkan pH antara 3–5, tergantung bahan baku dan kondisi lingkungan. Penurunan pH ini mencerminkan dominasi mikroorganisme penghasil asam yang menunjukkan keberhasilan fermentasi anaerob. Eco-enzyme dengan pH rendah berpotensi berperan sebagai agen antimikroba alami yang dapat mendukung proses degradasi limbah.

Selain berperan sebagai agen antimikroba, kondisi pH yang bersifat asam juga dapat mempengaruhi aktivitas mikroorganisme selama proses pengolahan limbah. Lingkungan yang asam cenderung menghambat pertumbuhan mikroorganisme pembusuk dan mikroorganisme patogen, sehingga proses fermentasi dapat berlangsung lebih stabil. Kondisi ini memungkinkan mikroorganisme fermentatif bekerja secara optimal dalam menghasilkan senyawa metabolit yang berperan dalam degradasi bahan organik. Nilai Total Dissolved Solids (TDS) meningkat dari 1790 ppm menjadi 2040 ppm setelah 92 hari fermentasi, sejalan dengan dekomposisi bahan organik oleh mikroorganisme. Proses fermentasi menyebabkan kenaikan TDS karena pelepasan senyawa terlarut dari bahan organik, aktivitas enzimatik seperti amilase, protease, dan lipase yang memecah komponen kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana, serta produksi metabolit sekunder yang larut dalam air seperti asam asetat dan asam sitrat. Enzim amilase berperan dalam menghidrolisis karbohidrat kompleks menjadi gula sederhana, sedangkan enzim

protease memecah protein menjadi asam amino dan peptida, serta enzim lipase menguraikan lipid menjadi asam lemak dan gliserol. Proses degradasi ini terjadi akibat aktivitas mikroorganisme selama fermentasi, di mana mikroba memanfaatkan bahan organik sebagai sumber energi dan substrat metabolisme.

Selama fermentasi, mikroorganisme menguraikan senyawa organik melalui reaksi biokimia yang menghasilkan berbagai metabolit seperti alkohol, asam organik, dan gas. Senyawa alkohol yang terbentuk dapat mengalami oksidasi lebih lanjut menjadi asetaldehid dan kemudian menjadi asam asetat oleh aktivitas bakteri seperti *Acetobacter*. Penelitian Rukmini dan Astuti Herawati (2023) menyatakan bahwa fermentasi dengan substrat kaya bioaktif menghasilkan eco-enzyme dengan nilai TDS yang lebih tinggi, terutama jika fermentasi berlangsung aktif tanpa kontaminasi dan dalam kondisi anaerob stabil.

Proses degradasi bahan organik selama fermentasi menunjukkan bahwa eco-enzyme tidak hanya berfungsi sebagai produk akhir fermentasi, tetapi juga sebagai agen biologis yang mengandung berbagai mikroorganisme dan enzim aktif. Keberadaan enzim seperti amilase, protease, dan lipase memungkinkan eco-enzyme membantu proses penguraian senyawa organik kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana ketika diaplikasikan pada limbah cair.

Secara keseluruhan, eco-enzyme hasil fermentasi menunjukkan karakteristik yang sesuai untuk digunakan sebagai agen pengolahan limbah, dengan pH asam, TDS stabil, warna homogen, bau normal, dan endapan minimal. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa proses fermentasi berlangsung secara stabil dan menghasilkan produk eco-enzyme yang layak digunakan dalam pengolahan limbah. Parameter fisik seperti warna, bau, dan endapan dapat digunakan sebagai indikator awal dalam menilai kualitas eco-enzyme sebelum diaplikasikan dalam proses pengolahan limbah.

Tabel 4. Kriteria Eco-enzyme yang Layak Digunakan sebagai Agen Pengolah Limbah

Parameter	Kriteria Umum (Literatur)	Hasil Eco-enzyme Hari ke-92
pH	3 – 5 (asam lemah, hasil fermentasi normal) (Sihite, 2024)	4,1 (sesuai)
TDS	< 5000 ppm (masih aman digunakan, tidak terlalu pekat) (Widiani et al., 2023)	2040 ppm (sesuai)
Warna	Cokelat kekuningan → bening kecokelatan, homogen (Rukmini & Astuti Herawati, 2023)	Cokelat bening
Bau	Asam fermentasi, tidak busuk/menyengat (Muarief et al., 2023)	Bau asam khas fermentasi
Endapan	Sedikit endapan halus → normal hasil fermentasi (Sihite, 2024)	Ada endapan halus
Kandungan Enzim	Mengandung enzim protease, amilase, lipase (indikasi degradasi organik) (Widiani et al., 2023)	Tidak diuji langsung, tetapi terbentuk alami dalam fermentasi organik

Penerapan eco-enzyme dan biobakteri komersial PT KAI pada limbah Toilet Ramah Lingkungan (TRL) menunjukkan efektivitas dalam penurunan BOD<sub>5</sub>, COD, TDS, dan TSS. Eco-enzyme dengan konsentrasi 5% dan biobakteri komersial diaplikasikan ke dalam closet kereta api yang terhubung ke tangki TRL, lalu diinkubasi selama 10, 15, dan 20 hari. Eco-enzyme memecah senyawa organik kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana melalui enzim dan asam organik hasil fermentasi, sedangkan biobakteri bekerja melalui aktivitas mikroorganisme spesifik pengurai bahan organik. Sampel limbah kemudian dianalisis berdasarkan BOD<sub>5</sub>, COD, TDS, dan TSS, kemudian dibandingkan dengan baku mutu air limbah domestik PermenLH No. 11 Tahun 2025.

Nilai BOD<sub>5</sub> menurun dari 175 mg/L menjadi 70 mg/L pada perlakuan eco-enzyme dan dari 146 mg/L menjadi 63 mg/L pada perlakuan biobakteri komersial PT KAI dalam 20 hari. Penurunan terjadi karena enzim protease, amilase, dan lipase memecah protein, karbohidrat, dan lemak, sementara mikroba fermentatif mempercepat degradasi organik (Gaspersz et al., 2022).

COD turun dari 500,74 mg/L menjadi 206,85 mg/L (eco-enzyme) dan dari 450,56 mg/L menjadi 204,80 mg/L (biobakteri), karena asam organik dan senyawa oksidatif membantu memutus ikatan kimia pada senyawa organik kompleks. Penurunan TDS lebih kecil dari 1504 mg/L menjadi 1478 mg/L (eco-enzyme) dan dari 1143 mg/L menjadi 1129 mg/L (biobakteri), karena eco-enzyme menghasilkan metabolit baru, sedangkan biobakteri memanfaatkan sebagian zat terlarut sebagai sumber nutrient (Khasanah et al., 2022). Parameter TSS menunjukkan penurunan paling signifikan dari 118 mg/L menjadi 14 mg/L (eco-enzyme) dan dari 112 mg/L menjadi 53 mg/L (biobakteri), karena asam organik berperan sebagai koagulan alami dan enzim mempercepat dekomposisi partikel tersuspensi.

Penurunan parameter pencemar tersebut menunjukkan bahwa proses biodegradasi dan transformasi senyawa organik berlangsung selama periode inkubasi. Aktivitas mikroorganisme serta enzim yang dihasilkan selama fermentasi berperan dalam memecah senyawa organik kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana sehingga lebih mudah terurai.

Proses biodegradasi tersebut berlangsung secara bertahap seiring dengan aktivitas mikroorganisme yang memanfaatkan bahan organik sebagai sumber energi dan nutrien. Mikroorganisme fermentatif memecah senyawa organik kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana sehingga konsentrasi bahan pencemar dalam limbah dapat berkurang secara perlahan selama periode inkubasi. Proses ini menunjukkan bahwa pengolahan limbah berbasis agen biologis memiliki potensi untuk meningkatkan kualitas limbah melalui mekanisme degradasi alami yang berlangsung secara berkelanjutan.

Penurunan BOD<sub>5</sub> dan COD mengindikasikan berkurangnya kandungan bahan organik yang dapat terdegradasi secara biologis maupun kimiawi dalam limbah. Sementara itu, penurunan TSS menunjukkan bahwa sebagian partikel padatan tersuspensi mengalami proses pengendapan dan dekomposisi selama inkubasi, sedangkan perubahan nilai TDS dipengaruhi oleh proses pelepasan serta pemanfaatan senyawa terlarut oleh mikroorganisme selama proses metabolisme berlangsung.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa eco-enzyme maupun biobakteri komersial efektif menurunkan pencemar limbah TRL. Namun demikian, nilai BOD<sub>5</sub> dan COD pada kedua perlakuan masih belum mencapai baku mutu. Hal tersebut dapat disebabkan oleh tingginya kandungan bahan organik dalam limbah toilet kereta api sehingga proses degradasi biologis memerlukan waktu inkubasi yang lebih lama untuk mencapai baku mutu lingkungan yang ditetapkan.

Perbedaan tingkat penurunan pada setiap parameter menunjukkan bahwa mekanisme kerja eco-enzyme dan biobakteri komersial tidak sepenuhnya sama. Eco-enzyme bekerja melalui kombinasi aktivitas enzim dan senyawa organik hasil fermentasi, sedangkan biobakteri komersial mengandalkan aktivitas mikroorganisme spesifik yang diformulasikan untuk menguraikan bahan organik.

Alternatif perbaikan dapat dilakukan melalui perpanjangan waktu inkubasi atau peningkatan konsentrasi agen pengolah untuk mempercepat proses degradasi biologis dan kimia. Selain faktor waktu inkubasi dan konsentrasi agen pengolah, efektivitas proses pengolahan limbah juga dapat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan selama proses degradasi berlangsung. Faktor seperti suhu, ketersediaan nutrien, serta kestabilan kondisi anaerob dapat mempengaruhi aktivitas mikroorganisme dalam menguraikan senyawa organik yang terdapat dalam limbah. Kondisi lingkungan yang stabil memungkinkan mikroorganisme berkembang dengan baik sehingga proses penguraian bahan organik dapat berlangsung lebih optimal. Oleh karena itu, pengendalian kondisi proses menjadi salah satu aspek penting dalam meningkatkan efektivitas pengolahan limbah menggunakan agen biologis seperti eco-enzyme maupun biobakteri komersial.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pemanfaatan eco-enzyme sebagai agen biologis dalam pengolahan limbah memiliki potensi yang cukup besar untuk dikembangkan lebih lanjut. Penggunaan bahan baku limbah organik sebagai sumber pembuatan eco-enzyme tidak hanya berperan dalam menurunkan konsentrasi parameter pencemar dalam limbah cair, tetapi juga

mendukung konsep pengelolaan limbah berkelanjutan dengan memanfaatkan kembali limbah organik yang tersedia di lingkungan. Pendekatan ini memberikan nilai tambah dalam pengelolaan limbah karena selain mengurangi pencemaran lingkungan, juga dapat memanfaatkan limbah organik rumah tangga sebagai sumber bahan baku yang murah dan mudah diperoleh.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan eco-enzyme sebagai agen biologis dalam pengolahan limbah memiliki potensi untuk dikembangkan lebih lanjut sebagai alternatif ramah lingkungan.

## SIMPULAN

Penerapan eco-enzyme berbasis limbah organik mampu menurunkan parameter pencemar limbah Toilet Ramah Lingkungan (TRL) pada kereta api. Selama 20 hari inkubasi, nilai BOD<sub>5</sub> menurun dari 175 mg/L menjadi 70 mg/L, COD dari 500,74 mg/L menjadi 206,85 mg/L, TDS dari 1504 mg/L menjadi 1478 mg/L, dan TSS dari 118 mg/L menjadi 14 mg/L. Dibandingkan dengan biobakteri komersial PT Kereta Api Indonesia (Persero), eco-enzyme menunjukkan kinerja lebih baik pada penurunan TSS sehingga mampu memenuhi baku mutu lingkungan ( $\leq 30$  mg/L). Namun nilai BOD<sub>5</sub> dan COD pada kedua perlakuan masih belum memenuhi baku mutu sehingga diperlukan optimasi proses, seperti peningkatan waktu inkubasi atau konsentrasi agen pengolah. Eco-enzyme berpotensi digunakan sebagai alternatif ramah lingkungan dalam pengolahan limbah toilet kereta api maupun limbah domestik.

## DAFTAR PUSTAKA

- Agustina, A. (2021). Efektivitas Pemberian Eco Enzyme Terhadap Penurunan Nilai BOD dan COD di Tukad Badung The Effectiveness of Providing Eco Enzyme Against the Decrease in BOD and COD Values in Tukad Badung. 5(1), 1–5.
- Gaspersz, M. M., Fitrihidajati, H., Biologi, J., Matematika, F., Pengetahuan, I., Universitas, A., & Surabaya, N. (2022). Pemanfaatan Ekoenzim Berbahan Limbah Kulit Jeruk dan Kulit Nanas sebagai Agen Remediasi LAS Detergen Utilization of Eco-enzyme from Citrus Peels and Pineapple Peels Waste as Detergent LAS Remediation Agent. *LenteraBio*, 11, 503–513. <https://journal.unesa.ac.id/index.php/lenterabio/index503>
- Khasanah, A. M., Rosariawari, F., & Kunci, K. (2022). Efektivitas Eco-Enzyme dalam Menurunkan TSS, TDS, Surfaktan pada Limbah Domestik dengan Variasi Proses Anaerob dan Koagulasi-Flokulasi. <http://esec.upnvjt.com/>
- Muarief, R., Aziz, M., Frima Thousani, H., Yuliana, I., Syarifah, I., Doedyk Setiawan, A., & Amir, V. (2023). Pengolahan Limbah Rumah Tangga Menjadi Eco Enzyme Di Lingkungan Perumahan Ujung Residence. *Jabdima*, 6(1). <http://ejurnal.ubharajaya.ac.id/index.php/Jabdima>
- Ridwan, M., Saefulhadjar, D., & Hernaman, I. (2020). Kadar asam laktat, amonia dan pH silase limbah singkong dengan pemberian molases berbeda. *Majalah Ilmiah Peternakan*, 23(1), 30–34.
- Rukmini, P., & Astuti Herawati, D. (2023). Eco-enzyme from Organic Waste (Fruit and Rhizome Waste) Fermentation. *Jurnal Kimia Dan Rekayasa*, 4(1). <http://kireka.setiabudi.ac.id>
- Saminem, F. (2021). Increasing Teachers' Ability Using Zoom Meeting Applications in the Distance Learning Process Through Collaborative Assistance in SD Negeri Bendo Kapanewon Samigaluh Kulon Progo Academic Year 2020/2021. *IJCER (International Journal of Chemistry Education Research)*, 78–83. <https://doi.org/10.20885/ijcer.vol5.iss2.art5>
- Sihite, F. (2024). Eco Enzyme dengan Kulit Buah dan Sayuran Beserta Manfaatnya untuk Kehidupan Manusia. *Ikraith Teknologi*, 8(1). <https://doi.org/10.37817/ikraith-teknologi.v8i1>
- Widiani, N., Novitasari, A., Biologi, P., Raden, U., & Lampung, I. (2023). Limbah Organik Dapur.