

## Biodegradasi jenis polimer PET dan HDPE dengan variasi konsentrasi dan masa inkubasi *eco-enzyme*

Rizqi Lutvianti<sup>1</sup>, Hafsan<sup>1\*</sup>, Rusmadi Rukmana<sup>1</sup>, Ulfa Triyani A. Latif<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Prodi Biologi Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar

\*Corresponding author: Jl. HM. Yasin Limpo 36 Gowa, Sulawesi Selatan, Indonesia. 92113

E-mail addresses: hafsan.bio@uin-alauddin.ac.id

### Kata kunci

Biodegradasi  
*Eco-enzyme*  
HDPE  
PET  
FTIR

### Keywords

Biodegradation  
*Eco-enzyme*  
HDPE  
PET  
FTIR

Diajukan: 25 Mei 2025

Ditinjau: 29 Mei 2025

Diterima: 22 Juli 2025

Diterbitkan: 23 November  
2025

#### Cara Sitasi:

R. Lutvianti, H. Hafsan, R. Rukmana, U. T. A. Latif, "Biodegradasi jenis polimer PET dan HDPE dengan variasi konsentrasi dan masa inkubasi *eco-enzyme*", *Filogeni: Jurnal Mahasiswa Biologi*, vol. 5, no. 3, pp. 241-251, 2025.

### Abstrak

Pencemaran lingkungan akibat limbah plastik merupakan krisis global yang terus memburuk, ditandai dengan rendahnya tingkat daur ulang dan akumulasi plastik yang sulit terdegradasi secara alami. Salah satu pendekatan alternatif yang ramah lingkungan adalah pemanfaatan *eco-enzyme*, larutan hasil fermentasi limbah organik yang mengandung senyawa aktif dan komunitas mikroba potensial. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas *eco-enzyme* terhadap proses biodegradasi dua jenis plastik polimer, yaitu *polyethylene terephthalate* (PET) dan *high-density polyethylene* (HDPE), dengan variasi konsentrasi larutan (0%, 20%, 40%, 60%, dan 100%) serta durasi fermentasi (3, 4, dan 5 bulan). Rancangan eksperimen menggunakan metode faktorial dalam rancangan acak lengkap (RAL), dan pengamatan dilakukan selama 60 hari terhadap penurunan massa plastik dan perubahan gugus fungsi menggunakan spektroskopi *Fourier Transform Infrared* (FTIR). Hasil menunjukkan bahwa degradasi paling signifikan terjadi pada plastik PET yang diberi perlakuan *eco-enzyme* 100% hasil fermentasi lima bulan, dengan penurunan massa sebesar 0,11 gram serta terjadinya pemutusan gugus ester dan karbonil. HDPE menunjukkan resistensi yang lebih tinggi dengan degradasi terbatas melalui proses oksidasi awal. Temuan ini menggarisbawahi potensi *eco-enzyme* sebagai agen biologis dalam bioteknologi lingkungan untuk pengelolaan limbah plastik yang lebih berkelanjutan.

### Abstract

Environmental pollution caused by plastic waste is a worsening global crisis, driven by low recycling rates and the persistent accumulation of plastics that are highly resistant to natural degradation. One eco-friendly alternative is the application of *Eco-enzyme*, a fermented organic waste solution containing active compounds and microbial communities with potential biodegradative activity. This study aims to evaluate the effectiveness of *Eco-enzyme* in the biodegradation of two common polymer plastics—*polyethylene terephthalate* (PET) and *high-density polyethylene* (HDPE)—through varying concentrations (0%, 20%, 40%, 60%, and 100%) and fermentation durations (3, 4, and 5 months). A factorial experimental design within a completely randomized design (CRD) framework was employed, with a 60-day incubation period. Observations focused on mass reduction and functional group changes analyzed using *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR). The results indicated that PET showed the highest degradation, particularly under treatment with 100% *Eco-enzyme* fermented for 5 months, evidenced by a 0.11 g mass loss and cleavage of ester and carbonyl groups. In contrast, HDPE

exhibited limited degradation through initial oxidation. These findings highlight the potential of Eco-enzyme as a biological agent for sustainable plastic waste management in the context of environmental biotechnology.

Copyright © 2025. The authors. This is an open access article under the CC BY-SA license

## 1. Pendahuluan

Permasalahan lingkungan akibat akumulasi limbah plastik telah menjadi isu lingkungan global yang mendesak, termasuk di Indonesia. Data dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) menunjukkan bahwa Indonesia menghasilkan sekitar 67 juta ton sampah setiap tahun, dengan proporsi signifikan berasal dari plastik sekali pakai. Ironisnya, hanya sekitar 5–10% dari total sampah plastik yang didaur ulang, sementara sisanya berkontribusi terhadap degradasi lingkungan yang kronis, seperti penyumbatan aliran air, pencemaran laut, hingga ancaman terhadap rantai makanan dan kesehatan manusia [1]. Plastik diketahui memiliki ketahanan luar biasa terhadap degradasi alami, sehingga menumpuk secara persisten di lingkungan selama ratusan tahun. Kondisi ini memerlukan strategi pengelolaan limbah yang tidak hanya efektif, tetapi juga berkelanjutan dan ramah lingkungan.

Dua jenis plastik yang paling umum digunakan dalam kehidupan sehari-hari adalah *polyethylene terephthalate* (PET) dan *high-density polyethylene* (HDPE). PET merupakan poliester aromatik yang banyak digunakan dalam kemasan minuman dan makanan karena sifatnya yang ringan, transparan, dan tahan terhadap pelarut. Sementara itu, HDPE adalah poliolefin alifatik dengan struktur rantai karbon lurus yang kokoh dan digunakan dalam produk rumah tangga seperti botol deterjen, kantong belanja, serta pipa. Kedua jenis plastik ini memiliki kestabilan kimia yang tinggi, menjadikannya sangat resisten terhadap proses degradasi alami. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan baru yang tidak hanya efektif dalam mendekomposisi struktur polimer tersebut, tetapi juga sejalan dengan prinsip keberlanjutan dan ekoteknologi [2] [3] [4].

Sebagai alternatif pengelolaan limbah plastik yang lebih ekologis, Eco-enzyme mulai mendapatkan perhatian sebagai agen biologis yang potensial. Selama ini, beberapa pendekatan telah dikembangkan untuk mengatasi limbah plastik, seperti metode pirolisis termal, yang mengubah plastik menjadi bahan bakar cair pada suhu tinggi; reaksi kimia aditif, yang memecah ikatan polimer melalui penggunaan katalis kuat; serta biodegradasi mikroba murni, menggunakan isolat bakteri atau jamur tertentu yang dapat mendegradasi senyawa plastik secara spesifik. Namun, pendekatan-pendekatan tersebut umumnya memerlukan biaya tinggi, teknologi canggih, atau waktu proses yang lama, dan tidak selalu ramah lingkungan dalam jangka panjang. Dalam konteks inilah, Eco-enzyme hadir sebagai alternatif yang menarik dan lebih sederhana secara teknis serta lebih ekologis. Diperkenalkan oleh Dr. Rosukon Poompanvong, seorang peneliti dan pemerhati lingkungan dari Thailand, juga pendiri dari Asosiasi Pertanian Organik Thailand “*Organic Agriculture Association of Thailand*”, berkat Eco-enzyme yang beliau perkenalkan, beliau mendapat penghargaan dari FAO Regional Thailand di tahun 2003 [5]. Eco-enzyme adalah larutan kompleks yang dihasilkan dari fermentasi limbah organik seperti sisa buah dan sayur, air, serta gula, dalam kondisi anaerob [6]. Selama proses fermentasi, terbentuk komunitas mikroba, enzim aktif, dan senyawa bioaktif yang diduga mampu menginisiasi degradasi material kompleks termasuk plastik. Beberapa studi awal menunjukkan bahwa Eco-enzyme dapat mempercepat proses oksidasi atau hidrolisis terhadap polimer, terutama pada kondisi pH asam dan suhu ruang, meskipun mekanismenya belum sepenuhnya dipahami secara

molekuler. Di samping manfaat lingkungan, pemanfaatan Eco-enzyme juga membuka peluang pengolahan limbah organik menjadi produk bernilai tambah secara ekonomi [7].

Namun demikian, efektivitas Eco-enzyme terhadap degradasi plastik masih jarang dikaji secara kuantitatif dan sistematis, khususnya terhadap jenis plastik yang berbeda serta pengaruh variasi konsentrasi dan durasi fermentasi. Sebagian besar studi sebelumnya hanya fokus pada efek tunggal atau menggunakan plastik jenis komposit, tanpa menyertakan analisis perubahan kimiawi pada tingkat gugus fungsi polimer. Hal ini menciptakan celah pengetahuan yang perlu dijumpai agar teknologi ini dapat dioptimalkan secara ilmiah dan aplikatif.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh konsentrasi dan waktu inkubasi Eco-enzyme terhadap tingkat degradasi plastik PET dan HDPE secara fisik dan kimiawi. Evaluasi dilakukan melalui pengukuran kehilangan massa serta analisis gugus fungsi menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR). Dengan pendekatan ini, diharapkan penelitian dapat memberikan kontribusi dalam memperkaya literatur mengenai biodegradasi plastik berbasis mikroba alami dan mendukung pengembangan teknologi pengelolaan sampah plastik yang lebih berkelanjutan di Indonesia.

## 2. Metode Penelitian

Penelitian ini merupakan studi eksperimental kuantitatif yang bertujuan mengevaluasi pengaruh konsentrasi dan lama inkubasi Eco-enzyme terhadap tingkat degradasi dua jenis plastik polimer, yaitu PET dan HDPE. Rancangan yang digunakan dalam penelitian ini adalah rancangan acak lengkap (RAL) dua faktor, yang terdiri atas variasi konsentrasi Eco-enzyme (0%, 20%, 40%, 60%, dan 100%) serta variasi durasi fermentasi Eco-enzyme (3 bulan, 4 bulan, dan 5 bulan). Setiap kombinasi perlakuan diulang sebanyak tiga kali untuk menjaga reliabilitas dan validitas data. Dengan demikian, total terdapat 30 kombinasi perlakuan (termasuk kontrol), yang masing-masing diuji terhadap kedua jenis plastik. Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Oktober hingga Desember 2024 dan bertempat di Laboratorium Biologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar.

**Instrumentasi.** Alat dan bahan yang digunakan yaitu wadah plastik tertutup volume 5 L, botol kaca steril berukuran 500 mL, timbangan analitik, oven (suhu 40°C), pisau atau gunting (untuk memotong sampel plastik), rak laboratorium, termometer (untuk pemantauan suhu ruang  $\pm 27^\circ\text{C}$ ), alat ukur volume (gelas ukur, beaker glass), sendok atau spatula (untuk penanganan bahan), limbah organik berupa sisa buah dan sayuran, gula merah, air (rasio fermentasi 3:1:10 b/w/v), sampel plastik, PET (dari botol air mineral bekas), HDPE (dari botol pembersih toilet), larutan eco-enzyme hasil fermentasi (3, 4, dan 5 bulan) dan aquades (untuk kontrol negatif dan pencucian sampel).

**Pembuatan larutan Eco-enzyme.** Eco-enzyme disiapkan melalui fermentasi limbah organik berupa sisa buah dan sayuran, gula merah, dan air dalam rasio 3:1:10 (b/w/v). Fermentasi dilakukan dalam wadah plastik tertutup (volume 5 liter) pada suhu ruang ( $\pm 27^\circ\text{C}$ ), tanpa pengadukan, selama 3, 4, dan 5 bulan sesuai perlakuan. Proses fermentasi berlangsung secara anaerob, di tempat terlindung dari cahaya langsung. Fermentasi menghasilkan larutan coklat gelap dengan bau khas asam dan kandungan senyawa bioaktif yang diasumsikan berperan dalam proses degradasi plastik.

**Persiapan sampel plastik.** Sampel plastik PET diambil dari botol air mineral bekas dan HDPE dari botol pembersih toilet. Masing-masing dibersihkan, dikeringkan, dipotong ukuran  $2 \times 2$  cm, dan ditimbang dengan massa awal sebesar 1 gram. Setiap sampel

ditempatkan dalam botol kaca steril berukuran 500 mL, yang diisi 250 mL larutan Eco-enzyme sesuai konsentrasi dan waktu fermentasi perlakuan. Wadah ditutup rapat dan disimpan secara statis di rak laboratorium pada suhu ruang selama 60 hari inkubasi. Kontrol negatif menggunakan akuades dengan perlakuan identik.

**Pengamatan dan analisis degradasi plastik.** Setelah inkubasi, sampel diambil, dicuci ringan dengan akuades, dan diamati secara visual untuk mengidentifikasi perubahan morfologis (perubahan warna, retakan, kekeruhan, atau degradasi fisik). Sampel kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 40°C selama 24 jam, lalu ditimbang ulang untuk memperoleh massa akhir. Penurunan massa dihitung berdasarkan selisih massa awal dan akhir, serta disajikan dalam persentase sebagaimana persamaan rumus:

$$\text{Penurunan Massa (\%)} = \frac{\text{Massa awal plastik} - \text{Massa akhir plastik}}{\text{Massa awal plastik}} \times 100\%$$

Untuk mengidentifikasi perubahan gugus fungsi akibat degradasi kimiawi, dilakukan analisis spektroskopi FTIR terhadap semua sampel plastik pasca inkubasi. Analisis ini bertujuan mendeteksi perubahan intensitas dan pergeseran bilangan gelombang pada gugus-gugus fungsional utama. Pada plastik PET, fokus pengamatan ditujukan pada gugus ester (C–O), karbonil (C=O), dan hidroksil (O–H), sementara pada HDPE diamati perubahan pada gugus alifatik (C–H) dan munculnya gugus karbonil sebagai indikator proses oksidasi. Interpretasi spektrum FTIR dilakukan dengan membandingkan intensitas puncak antara sampel perlakuan dan kontrol [8].

**Analisis data.** Data penurunan massa dianalisis secara statistik untuk mengetahui signifikansi perbedaan antarperlakuan. Uji normalitas data dilakukan menggunakan metode Shapiro-Wilk untuk memastikan bahwa data memenuhi asumsi distribusi normal. Apabila asumsi terpenuhi, dilakukan uji *Analysis of Variance* (ANOVA) dua arah guna mengevaluasi pengaruh interaktif antara konsentrasi Eco-enzyme dan durasi fermentasi terhadap tingkat degradasi plastik. Perbedaan yang signifikan pada tingkat kepercayaan 95% ( $\alpha = 0,05$ ), dilanjutkan dengan uji lanjutan *post hoc* Duncan untuk mengetahui perlakuan mana yang berbeda secara nyata. Seluruh analisis statistik dilakukan menggunakan perangkat lunak SPSS versi 25.

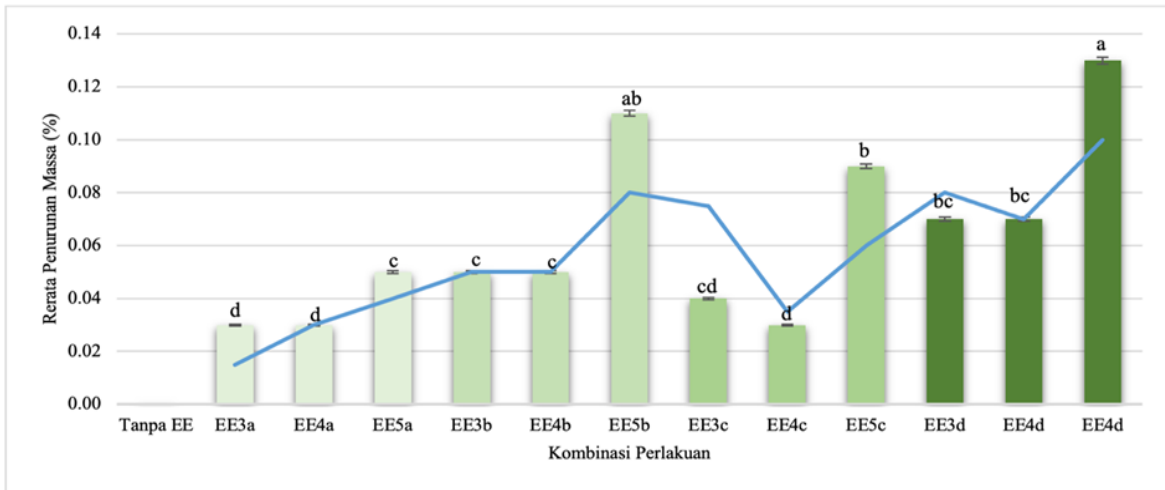
### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Hasil Penelitian

Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan Eco-enzyme dengan variasi konsentrasi dan lama fermentasi memberikan pengaruh terhadap tingkat degradasi fisik dan kimiawi dua jenis plastik, yakni PET dan HDPE. Evaluasi fisik dilakukan dengan membandingkan massa awal dan akhir setelah 60 hari inkubasi, sedangkan evaluasi kimiawi dilakukan dengan analisis gugus fungsi menggunakan spektroskopi FTIR.

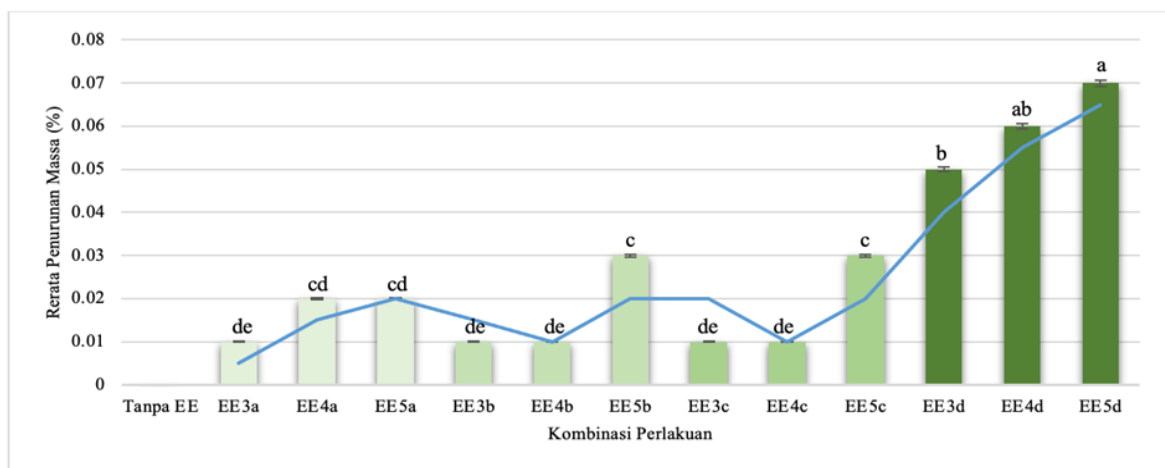
Secara fisik, plastik PET menunjukkan penurunan massa yang lebih besar dibandingkan HDPE dalam seluruh perlakuan. Penurunan paling signifikan terjadi pada perlakuan Eco-enzyme hasil fermentasi lima bulan dengan konsentrasi 100%, yaitu sebesar 0,11 gram dari massa awal 1 gram. Sementara itu, HDPE menunjukkan penurunan massa yang lebih rendah secara keseluruhan, dengan penurunan maksimum sebesar 0,04 gram pada perlakuan serupa. Pola penurunan massa ini menunjukkan bahwa durasi fermentasi dan konsentrasi Eco-enzyme berkorelasi positif dengan tingkat degradasi plastik, khususnya terhadap PET. Data lengkap mengenai rata-rata

penurunan massa plastik PET dan HDPE untuk seluruh kombinasi perlakuan disajikan secara visual pada Gambar 1 dan Gambar 2.



Gambar 1. Rerata Penurunan Massa Plastik PET dengan waktu inkubasi Eco-enzyme 3,4,5 bulan dan konsentrasi 20, 40, 60 dan 100%. Catatan: Notasi “EE” merujuk pada Eco-enzyme. Angka 3, 4, dan 5 menunjukkan lama inkubasi (dalam bulan). Huruf a, b, c, dan d menunjukkan tingkat konsentrasi, masing-masing sebesar 20%, 40%, 60%, dan 100%. Contoh: EE4b = Eco-enzyme dengan inkubasi 4 bulan dan konsentrasi 40%; EE5d = Eco-enzyme dengan inkubasi 5 bulan dan konsentrasi 100%

Gambar 1 menyajikan rata-rata penurunan massa plastik PET pada berbagai konsentrasi Eco-enzyme dan lama fermentasi, yang menunjukkan tren penurunan signifikan seiring dengan peningkatan konsentrasi dan waktu fermentasi. Sedangkan Gambar 2 memperlihatkan tren yang serupa namun dengan intensitas penurunan massa yang lebih rendah pada plastik HDPE, mencerminkan ketahanan relatif HDPE terhadap perlakuan biologis yang sama.

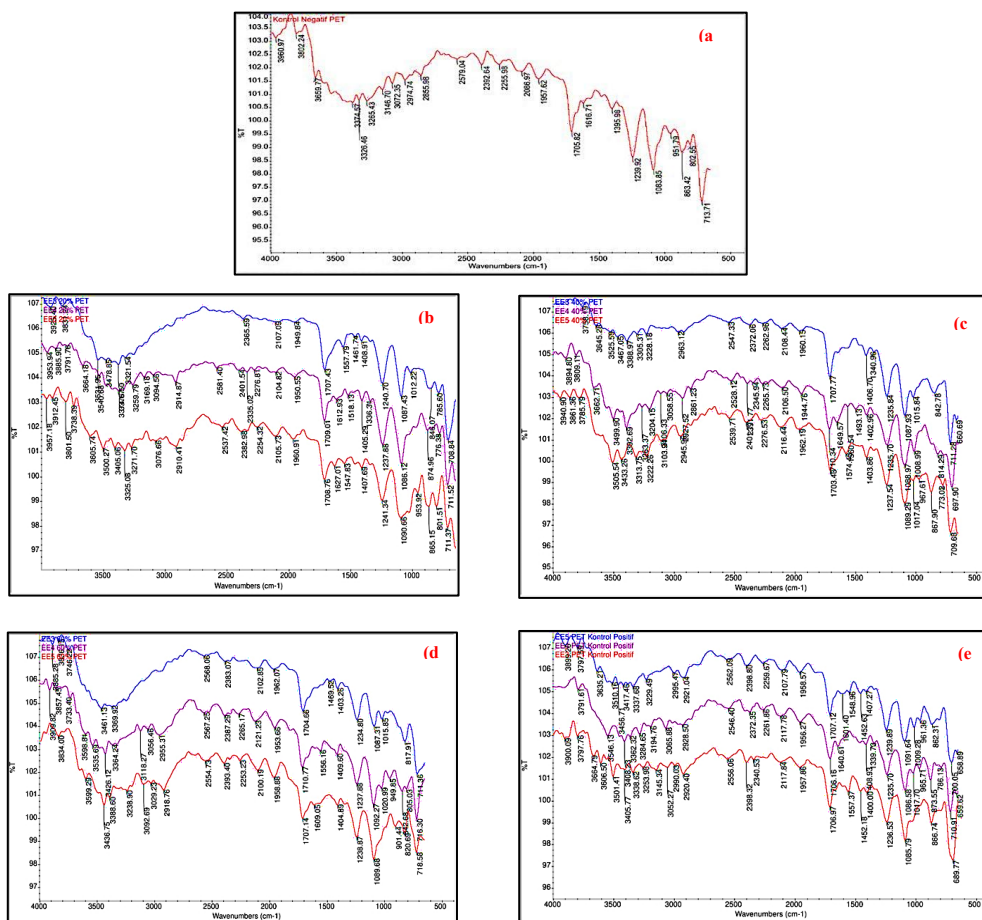


Gambar 2. Rerata Penurunan Massa Plastik HDPE dengan waktu inkubasi Eco-enzyme 3, 4, 5 bulan dan konsentrasi 20, 40, 60 dan 100%. Catatan: Notasi “EE” merujuk pada Eco-enzyme. Angka 3, 4, dan 5 menunjukkan lama inkubasi (dalam bulan). Huruf a, b, c, dan d menunjukkan tingkat konsentrasi, masing-masing sebesar 20%, 40%, 60%, dan 100%. Contoh: EE4b = Eco-enzyme dengan inkubasi 4 bulan dan konsentrasi 40%; EE5d = Eco-enzyme dengan inkubasi 5 bulan dan konsentrasi 100%

Analisis FTIR terhadap plastik PET memperkuat hasil fisik yang telah dilakukan. Pada kontrol negatif (konsentrasi 0%), tidak terlihat perubahan berarti pada

spektrum ester (C–O), karbonil (C=O), maupun hidroksil (O–H). Namun, pada perlakuan Eco-enzyme dengan konsentrasi 20%, 40%, 60%, dan 100%, terutama pada waktu fermentasi lima bulan, terdeteksi penurunan intensitas puncak gugus ester pada  $1715\text{ cm}^{-1}$  dan karbonil sekitar  $1730\text{ cm}^{-1}$ , bersamaan dengan peningkatan intensitas gugus hidroksil pada rentang  $3300\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$ . Perubahan ini menunjukkan terjadinya proses hidrolisis ikatan ester dan oksidasi struktur polimer yang dipicu oleh senyawa aktif dalam Eco-enzyme, seperti asam organik dan enzim hidrolitik. Studi sebelumnya melaporkan bahwa degradasi enzimatik PET menunjukkan korelasi positif antara konsentrasi enzim dan penurunan intensitas puncak FTIR yang berkaitan dengan gugus fungsional utama, termasuk karbonil dan ester [9] [10]. Dengan demikian, semakin tinggi konsentrasi larutan dan semakin lama fermentasi, semakin besar kemungkinan terjadinya serangan kimiawi terhadap struktur polimer. Secara visual, perubahan-perubahan tersebut ditampilkan dalam Gambar 3.

Gambar 3 (a) menunjukkan spektrum plastik PET pada perlakuan 0% (tanpa Eco-enzyme), yang menjadi acuan dasar tanpa perubahan struktur. Gambar 3 (b-e) menggambarkan spektrum plastik PET pada berbagai konsentrasi Eco-enzyme (20%, 40%, 60%, 100%) dan waktu fermentasi 3, 4, dan 5 bulan. Penurunan intensitas puncak C=O dan C–O paling jelas terjadi pada Gambar 3 (e) yaitu konsentrasi 100% dengan masa inkubasi selama 5 bulan), bersamaan dengan peningkatan tajam pada puncak O–H, menandakan terjadinya hidrolisis ester yang masif.

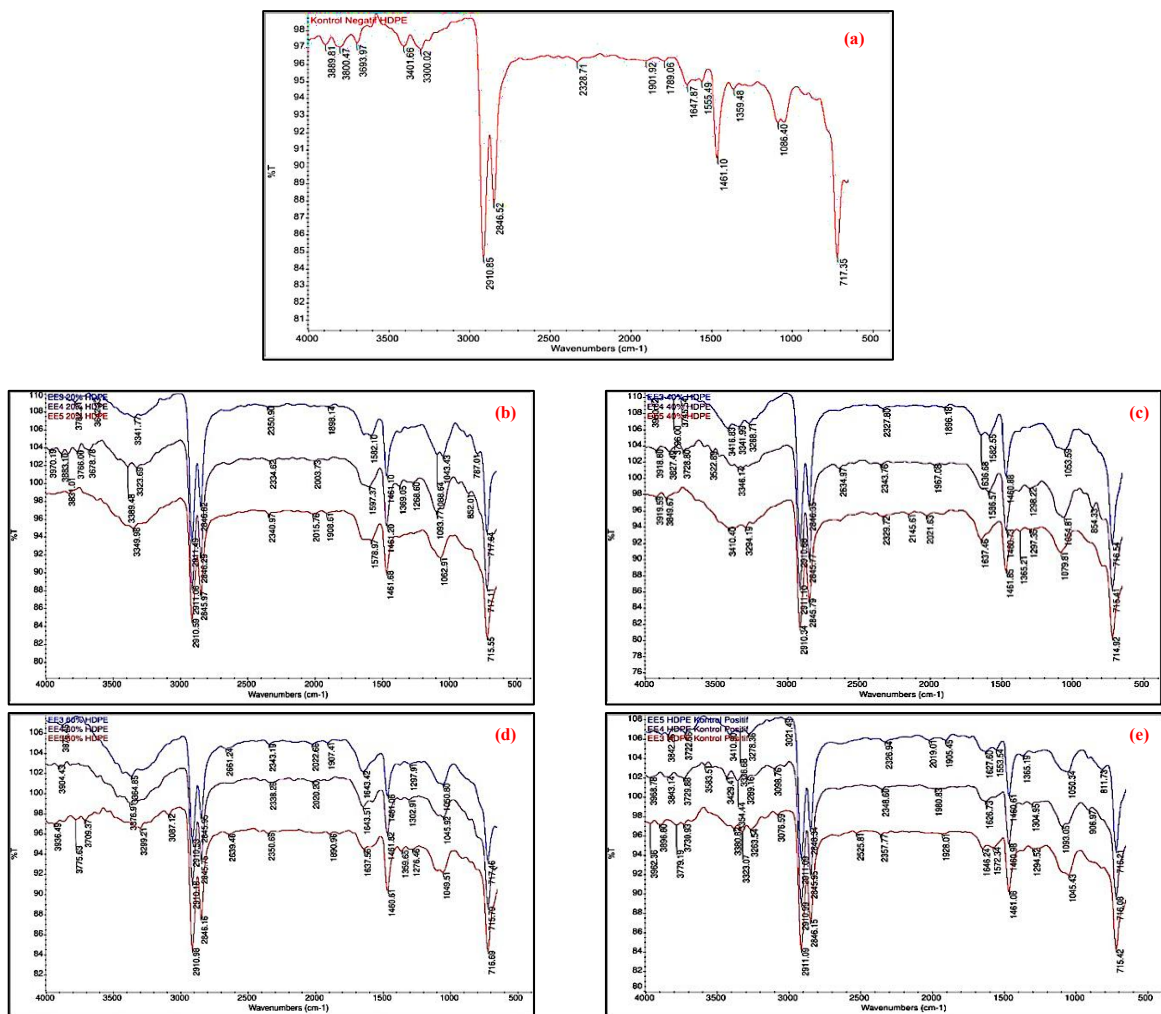


Gambar 3. Hasil analisis FTIR plastik PET dengan waktu inkubasi Eco-enzyme 3,4,5 bulan dan konsentrasi 0% (a), 20% (b), 40% (c), 60% (d) dan 100% (e)



Sementara itu, analisis FTIR pada plastik HDPE menunjukkan bahwa struktur kimia HDPE relatif lebih stabil dibandingkan PET. Pada konsentrasi rendah dan waktu fermentasi singkat, spektrum FTIR tidak menunjukkan perbedaan mencolok dibandingkan kontrol. Namun, pada perlakuan dengan konsentrasi 100% dan waktu fermentasi lima bulan, mulai terdeteksi peningkatan intensitas gugus karbonil ( $C=O$ ) di sekitar bilangan gelombang 1710  $cm^{-1}$ , serta penurunan relatif pada intensitas gugus alifatik ( $C-H$  *stretching*) di sekitar 2915 dan 2849  $cm^{-1}$ . Perubahan ini divisualisasikan dalam Gambar 4.

Gambar 4 (a) memperlihatkan spektrum HDPE pada kontrol negatif (0% Eco-enzyme) tanpa perubahan berarti. Gambar 4 (b-e) menunjukkan spektrum HDPE pada berbagai konsentrasi Eco-enzyme, dari 20% hingga 100%, untuk fermentasi 3, 4, dan 5 bulan. Intensitas karbonil mulai terlihat nyata pada Gambar 4 (e) (100%, 5 bulan), yang menandakan bahwa oksidasi awal terhadap struktur HDPE mulai berlangsung dalam kondisi tersebut.



Gambar 4. Hasil analisis FTIR plastik HDPE dengan waktu inkubasi Eco-enzyme 3,4,5 bulan dan konsentrasi 0% (a), 20% (b), 40% (c), 60% (d) dan 100% (e)

Secara statistik, uji ANOVA dua arah menunjukkan bahwa baik faktor konsentrasi Eco-enzyme maupun durasi fermentasi berpengaruh signifikan ( $p < 0,05$ ) terhadap penurunan massa plastik PET dan HDPE. Interaksi antara kedua faktor tersebut juga signifikan, yang

berarti bahwa efektivitas degradasi sangat dipengaruhi oleh kombinasi keduanya. Secara umum, plastik PET lebih rentan terhadap degradasi dibanding HDPE, baik dari segi perubahan massa maupun transformasi struktur kimia, sebagaimana terlihat dari analisis FTIR.

Secara statistik, uji ANOVA dua arah menunjukkan bahwa baik faktor konsentrasi Eco-enzyme maupun durasi fermentasi berpengaruh signifikan terhadap penurunan massa plastik PET dan HDPE ( $p = 0,032$  untuk konsentrasi;  $p = 0,041$  untuk waktu fermentasi; nilai dari uji ANOVA SPSS). Interaksi antara kedua faktor tersebut juga signifikan, yang berarti bahwa efektivitas degradasi sangat dipengaruhi oleh kombinasi perlakuan. Uji ini dilakukan setelah data terlebih dahulu dianalisis untuk memenuhi asumsi normalitas dan homogenitas varians, menggunakan uji Shapiro–Wilk dan Levene's test, yang menunjukkan hasil memadai ( $p > 0,05$ ). Namun demikian, secara kuantitatif, besarnya penurunan massa yang tercatat masih sangat rendah, dengan rata-rata tertinggi hanya sebesar 0,07%, sehingga signifikansi statistik ini lebih merefleksikan sensitivitas metode pengukuran terhadap variasi perlakuan, dan belum menunjukkan efek biodegradasi yang substansial secara praktis.

### 3.2 Pembahasan

Perbedaan degradasi antara PET dan HDPE dapat dijelaskan melalui struktur kimia keduanya. PET adalah polimer berbasis ester aromatik yang relatif mudah mengalami hidrolisis karena keberadaan gugus ester yang labil. Dalam kondisi asam dan dengan kehadiran enzim atau mikroorganisme yang sesuai, ikatan ester dapat terputus dan menghasilkan senyawa seperti asam tereftalat (TPA) dan etilen glikol (EG), yang lebih mudah didegradasi secara biologis. Oleh karena itu, penurunan massa dan perubahan gugus fungsi pada PET lebih signifikan dibandingkan HDPE.

Spektrum FTIR memperkuat temuan ini, di mana pada PET perlakuan 100% Eco-enzyme dengan fermentasi lima bulan tampak penurunan intensitas puncak pada bilangan gelombang sekitar  $1715\text{ cm}^{-1}$ , yang merepresentasikan gugus karbonil ( $\text{C=O}$ ) dari ikatan ester. Hilangnya atau berkurangnya puncak ini menunjukkan terjadinya pemutusan ikatan ester, yang merupakan titik kunci dalam proses depolimerisasi PET. Selain itu, puncak pada sekitar  $1240\text{ cm}^{-1}$  (gugus  $\text{C-O stretching}$ ) juga melemah, mendukung asumsi bahwa proses hidrolisis ester berlangsung aktif selama inkubasi. Perubahan ini terutama nyata pada perlakuan konsentrasi tinggi dan fermentasi terlalu lama, menunjukkan bahwa intensitas puncak berbanding lurus dengan aktivitas enzimatik dan kandungan asam organik dalam larutan.

Eco-enzyme, sebagai hasil fermentasi limbah organik, mengandung berbagai senyawa aktif seperti enzim hidrolitik (esterase, PETase), asam organik (asetat, sitrat), dan komunitas mikroba. Fermentasi yang lebih lama (lima bulan) memungkinkan pertumbuhan dan stabilisasi komunitas mikroba yang lebih kompleks, termasuk bakteri penghasil enzim hidrolitik [13]. Studi terdahulu menunjukkan bahwa bakteri dari genus *Pseudomonas*, yang terdeteksi dalam Eco-enzyme, diketahui mampu menghasilkan PETase dan enzim lain yang mendukung depolimerisasi PET [15] [16]. PETase memutus ikatan ester dalam rantai PET menjadi BHET dan MHET, yang selanjutnya dikonversi menjadi TPA dan EG. Kedua senyawa ini dapat dimetabolisme oleh mikroba melalui jalur siklus asam sitrat (*TCA cycle*), menghasilkan energi dan biomassa [14] [15].

Sementara itu, HDPE adalah polimer jenuh berbasis karbon-hidrogen yang memiliki ikatan  $\text{C-C}$  tunggal kuat dan tidak mengandung gugus polar yang mudah diserang oleh enzim. Oleh karena itu, HDPE memerlukan proses oksidasi terlebih dahulu untuk menghasilkan gugus karbonil atau hidroksil sebagai titik awal degradasi lebih lanjut. Dalam spektrum FTIR, kemunculan puncak karbonil lemah pada sekitar  $1710\text{--}1730\text{ cm}^{-1}$  terlihat



pada perlakuan konsentrasi tinggi dan fermentasi lima bulan, mengindikasikan bahwa proses oksidatif mulai terjadi pada HDPE. Polimer ini tersusun atas rantai panjang monomer etilena ( $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$ ) yang membentuk struktur polimer jenuh dengan ikatan karbon-karbon tunggal yang sangat stabil. Struktur ini tidak memiliki gugus fungsional polar seperti ester atau amida, sehingga secara alami sangat resisten terhadap serangan kimia dan enzim [4] [15].

Namun, dalam kondisi lingkungan yang mengandung senyawa pro-oksidan seperti asam organik dan enzim oksidatif (yang mungkin terbentuk selama fermentasi Eco-enzyme), atom hidrogen pada gugus metilen ( $-\text{CH}_2-$ ) dapat mengalami abstraksi dan membentuk radikal bebas. Radikal ini dapat bereaksi dengan oksigen terlarut membentuk gugus karbonil ( $\text{C}=\text{O}$ ) atau hidroksil ( $-\text{OH}$ ) di sepanjang rantai utama. Dengan demikian, lokasi pemutusan yang paling mungkin terjadi adalah pada ikatan  $\text{C}-\text{C}$  di dekat gugus metilen yang teroksidasi, yang kemudian menjadi titik awal depolimerisasi lanjutan atau retakan mikrostruktur secara fisik. Proses ini memicu terjadinya degradasi oksidatif terminiti, meskipun dengan laju yang jauh lebih lambat dibandingkan polimer yang memiliki gugus polar seperti PET [14] [15].

Selain faktor struktur kimia, tingkat kristalinitas juga memengaruhi laju degradasi. PET bersifat semi-kristalin dengan daerah amorf yang lebih luas, memungkinkan penetrasi larutan dan enzim ke dalam struktur polimer. Sebaliknya, HDPE memiliki kristalinitas yang tinggi dan struktur rantai lurus yang rapat, sehingga akses degradasi oleh enzim atau senyawa aktif menjadi lebih terbatas. Hal ini menjelaskan mengapa degradasi HDPE berlangsung lebih lambat dan memerlukan perlakuan lebih ekstrem dibandingkan PET [14].

Munculnya puncak karbonil dalam spektrum FTIR pada perlakuan konsentrasi tinggi dan fermentasi lima bulan menunjukkan bahwa proses oksidatif telah dimulai. Bakteri seperti *Pseudomonas* sp. dan *Bacillus* sp. memiliki kemampuan memproduksi enzim oksidatif atau menghasilkan metabolit yang bersifat reaktif terhadap rantai karbon HDPE [15]. Hasil ini konsisten dengan teori bahwa degradasi plastik tidak hanya bergantung pada sifat polimer, tetapi juga pada kondisi lingkungan dan aktivitas biologis yang tersedia [17] [18]. Suhu ruang ( $\pm 27^\circ\text{C}$ ), pH asam dari Eco-enzyme (sekitar 3,5–4), serta waktu kontak yang cukup memungkinkan terjadinya proses biologis yang memadai untuk memecah struktur polimer, setidaknya pada tahap awal. Meskipun degradasi HDPE masih terbatas, perubahan awal ini dapat menjadi dasar untuk inovasi lanjutan dalam formulasi Eco-enzyme atau kombinasi dengan mikroba spesifik yang lebih agresif terhadap polimer jenuh.

Temuan bahwa perlakuan Eco-enzyme dengan fermentasi lima bulan dan konsentrasi 100% menghasilkan degradasi paling tinggi menguatkan pentingnya mengontrol dua parameter utama ini untuk mengoptimalkan efisiensi biodegradasi. Dari sudut pandang lingkungan, pendekatan ini berpotensi menjadi solusi terintegrasi antara pengolahan limbah organik dan pengelolaan limbah plastik. Dari sudut pandang ilmiah, hasil ini menunjukkan bahwa Eco-enzyme dapat dipandang tidak hanya sebagai cairan organik fermentasi, tetapi sebagai sistem ekologi mikroba dan enzim yang hidup, yang mampu dioptimalkan melalui pendekatan bioteknologi untuk degradasi polimer sintetik.

#### 4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa Eco-enzyme memiliki potensi sebagai agen biologis yang dapat memicu degradasi awal plastik jenis PET dan HDPE, dengan respon yang berbeda bergantung pada konsentrasi larutan dan durasi inkubasi. Plastik PET menunjukkan perubahan kimiawi lebih nyata melalui penurunan intensitas gugus ester dan kemunculan gugus karbonil, sedangkan HDPE hanya menunjukkan degradasi terbatas melalui proses oksidasi. Meskipun demikian, dalam penelitian ini besarnya degradasi massa

yang tercatat masih sangat rendah, yaitu tidak melebihi 1%. Hal ini menunjukkan bahwa proses degradasi yang terjadi masih berada pada tahap inisiasi dan belum mencapai pemutusan struktur makromolekul secara signifikan.

Temuan ini menegaskan potensi Eco-enzyme sebagai solusi ramah lingkungan dalam pengelolaan limbah plastik berbasis pendekatan hayati, khususnya untuk plastik PET yang lebih rentan terhadap perubahan kimiawi. Diperlukan penelitian lanjutan untuk mengoptimalkan komposisi, kondisi fermentasi, serta pemanfaatan konsorsium mikroba atau penambahan enzim murni guna meningkatkan efisiensi degradasi secara massal.

## Daftar Pustaka

- [1] M. Nanda, F. Ramadhan, F. Handayani, M. Zidan, and S. Wahyuni, "Analisis pengelolaan Bank Sampah Anyelir di Kecamatan Medan Denai," *Jurnal Kesehatan Tambusai*, vol. 4, no. 9, pp. 1789–1797, 2023.
- [2] S. Juliana, M. Parhusip, A. Simanullang, E. Tita, and W. Irawati, "Potential of *Ideonella sakaiensis* bacteria in degrading plastic waste type polyethylene terephthalate," *Jurnal Biologi Tropis*, vol. 22, no. 2, pp. 381–389, 2022, doi: 10.29303/jbt.v22i2.3321.
- [3] I. Okatama, "Analisa peleburan limbah plastik jenis polyethylene terephthalate (PET) menjadi biji plastik melalui pengujian alat pelebur plastik," *Jurnal Teknik Mesin (JTM)*, vol. 5, no. 3, pp. 109–113, 2016, doi: 10.22441/jtm.v5i3.1213.
- [4] M. A. Al Fajr and A. A. Setiawan, "Penggunaan material limbah high density polyethylene (HDPE) sebagai bahan pengganti agregat kasar pada campuran beton," *Widyakala Journal*, vol. 6, no. 6, pp. 1–18, 2019, doi: 10.36262/widyakala.v6i2.178.
- [5] Z. Zultaqawa, I. N. Firdaus, M. D. Aulia, J. T. Sipil, U. K. Indonesia, S. B. Raya, and K. Bandung, "Manfaat eco-enzyme pada lingkungan," *Jurnal Pengabdian Masyarakat: DIKMAS*, vol. 4, no. 1, pp. 10–14, 2023, doi: 10.37905/dikmas.4.1.7-18.2024.
- [6] I. R. Wulan, J. C. Tanjung, A. Sinatrya, and U. G. Mada, "Review artikel: Efektivitas konsentrasi ekoenzim sebagai agen pertumbuhan dan penambah nutrisi tanaman pada berbagai jenis tanaman budidaya di Indonesia," *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, vol. 12, no. 2, pp. 403–413, 2024, - doi: 10.26418/jtlb.v12i2.74825.
- [7] D. M. Darmawati, N. Busyra, and E. Azhar, "Pengolahan sampah organik menjadi eco-enzyme untuk meningkatkan ekonomi kreatif kelompok PKK Petukangan Jakarta Selatan," *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, vol. 3, no. 2, pp. 105–117, 2023, doi: 10.37850/taawun.v3i02.483.
- [8] F. R. Fadlilah, "Potensi isolat bakteri *Bacillus* dan *Pseudomonas* dalam mendegradasi plastik dengan metode Kolom Winogradsky," *Skripsi*, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2014.
- [9] N. Mohanan, Z. Montazer, P. K. Sharma, and D. B. Levin, "Microbial and enzymatic degradation of synthetic plastics," *Frontiers in Microbiology*, vol. 11, p. 580709, 2020, doi: 10.3389/fmicb.2020.580709.
- [10] F. Kawai, T. Kawabata, and M. Oda, "Current knowledge on enzymatic PET degradation and its possible application to waste stream management and other fields," *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 103, no. 11, pp. 4253–4268, 2019, doi: 10.1007/s00253-019-09717-y.
- [11] M. Mukamto, Y. S. Rahayu, L. Lisdiana, and H. Pranamuda, "Isolation of oxo-degradable polyethylene degrading-bacteria of Benowo landfill soil Surabaya," *Microbiology Indonesia*, vol. 9, no. 1, pp. 9–16, doi: 10.5454/mi.9.1.2.
- [12] M. F. Fachrul, A. Rinanti, T. Tazkiaturrizki, S. Salmiati, and T. Sunaryo, "Degradation of polyethylene plastic waste by indigenous microbial consortium and fungi," *Indonesian Journal of Urban and Environmental Technology*, vol. 5, no. 1, pp. 86–103, 2021, doi: 10.25105/urbanenvirotech.v5i1.8694.
- [13] S. K. Shin, Y. J. Ko, J. E. Hyeon, and S. O. Han, "Studies of advanced lignin valorization based on various types of lignolytic enzymes and microbes," *Bioresource Technology*, vol. 28, no. 9, p. 21728, 2019, doi: 10.1016/j.biortech.2019.121728.
- [14] S. Lv, Y. Li, S. Zhao, and Z. Shao, "Biodegradation of typical plastics: From microbial diversity to metabolic mechanisms," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 25, no. 1, pp. 1–25, 2024, doi: 10.3390/ijms25010593.
- [15] A. S. Shovitri and M. Miftah, "Potensi isolat bakteri *Pseudomonas* sebagai pendegradasi plastik," *Jurnal Sains dan Seni ITS*, vol. 4, no. 2, pp. 67–70, 2015, doi: 10.12962/j23373520.v4i2.13495.
- [16] S. Yoshida, K. Hiraga, T. Takehana, I. Taniguchi, H. Yamaji, Y. Maeda, et al., "A bacterium that degrades and assimilates polyethylene terephthalate," *Science*, vol. 351, no. 6278, pp. 1196–1199, 2016, doi: 10.1126/science.aad6359.

- [17] D. Danso, J. Chow, and W. R. Streit, "Plastics: Environmental and biotechnological perspectives on microbial degradation," *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 85, no. 19, p. e01095-19, 2019, doi: 10.1128/AEM.01095-19.
- [18] H. K. Webb, J. Arnott, R. J. Crawford, and E. P. Ivanova, "Plastic degradation and its environmental implications with special reference to poly(ethylene terephthalate)," *Polymers*, vol. 5, no. 1, pp. 1–18, 2013, doi: 10.3390/polym5010001.