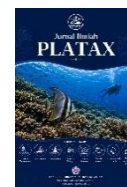




Tersedia daring di Portal Jurnal UNSRAT

Jurnal Ilmiah PLATAX

Beranda jurnal: <https://ejournal.unsrat.ac.id/v3/index.php/platax>

ARTIKEL PENELITIAN / RESEARCH ARTICLE

e-ISSN 2302-3589

Analisis Degradasi Awal Plastik PET oleh Bakteri *Stenotrophomonas* sp. dari Teluk Manado

Early Degradation Analysis of PET Plastic by Stenotrophomonas sp. from Manado Bay

Judul singkat (running title): Degradasi awal PET oleh *Stenotrophomonas* sp.

Elvy L. Ginting^{1*}, Natalie D. C. Rumampuk¹, Royke M. Rampengan¹, Mayse S. Siby¹

¹Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Sam Ratulangi, Manado 95115, Indonesia

Abstract

Indigenous bacteria have the potential to degrade plastic, as demonstrated by the successful isolation of *Stenotrophomonas* sp. from the waters of Manado Bay, North Sulawesi. This study aimed to evaluate the ability of *Stenotrophomonas* sp. to degrade polyethylene terephthalate (PET) and to identify the initial indications of PET degradation. A stock culture of *Stenotrophomonas* sp. maintained in the laboratory was revitalized in Nutrient Broth (NB) medium and recharacterized morphologically on agar medium. The degradation assay used PET specimens (1 × 1 cm), incubated in NB medium as the control and NB inoculated with *Stenotrophomonas* sp. as the treatment. Cultures were incubated in a shaker incubator at 37°C for 120 days. Degradation was evaluated based on the percentage of weight loss. Changes in surface morphology and chemical structure were analyzed using Scanning Electron Microscopy (SEM) and Fourier Transform Infrared (FT-IR) spectroscopy, respectively. Results showed a greater weight reduction in PET incubated with *Stenotrophomonas* sp. than in the control. SEM analysis revealed aggregates, likely bacterial colonies or residual biofilm, as well as surface cracks indicating structural damage. FT-IR analysis showed a slight decrease and broadening of the carbonyl band, and a reduction in the asymmetric and symmetric stretching bands of the ester C–O–C groups. These findings suggest that *Stenotrophomonas* sp. contributes to the early-stage biodegradation of PET plastic.

Keywords: biodegradation, FT-IR, PET plastic, SEM, *Stenotrophomonas* sp.

Abstrak

Bakteri indigenous memiliki potensi dalam mendegradasi plastik, seperti yang telah berhasil diisolasi dari perairan Teluk Manado, Sulawesi Utara, yaitu *Stenotrophomonas* sp. Penelitian ini bertujuan untuk menguji kemampuan *Stenotrophomonas* sp. dalam mendegradasi plastik polyethylene terephthalate (PET) dan mengidentifikasi indikasi degradasi awal pada plastik PET. Stok bakteri *Stenotrophomonas* sp. yang disimpan di laboratorium disebarkan dalam media Nutrient Broth (NB) dan dikarakterisasi kembali secara morfologi pada media agar. Uji degradasi plastik dilakukan menggunakan plastik PET berukuran 1 × 1 cm yang diinkubasi dalam media NB sebagai kontrol, serta NB yang diinokulasikan dengan *Stenotrophomonas* sp. sebagai perlakuan. Inkubasi dilakukan menggunakan shaker incubator pada suhu 37°C selama 120 hari. Kemampuan degradasi dievaluasi berdasarkan persentase penurunan berat plastik. Perubahan morfologi permukaan dan struktur kimia dianalisis menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM) dan spektroskopi Fourier Transform Infrared (FT-IR). Hasil penelitian menunjukkan penurunan berat yang lebih besar pada plastik PET yang diinokulasikan dengan *Stenotrophomonas* sp. dibandingkan kontrol. Analisis SEM memperlihatkan adanya agregat yang diduga koloni bakteri atau sisa biofilm, serta retakan pada permukaan yang mengindikasikan kerusakan struktural. Analisis FT-IR menunjukkan penurunan dan pelebaran pita karbonil serta penurunan intensitas pita regangan asimetris dan simetris gugus ester C–O–C. Temuan ini mengindikasikan peran *Stenotrophomonas* sp. dalam biodegradasi awal plastik PET.

Kata kunci: biodegradasi, FT-IR, plastik PET, SEM, *Stenotrophomonas* sp.

1. Pendahuluan

Plastik merupakan material polimer sintesis yang digunakan secara luas dalam kehidupan sehari-hari, namun memiliki ketahanan tinggi terhadap degradasi di lingkungan. Salah satu jenis plastik yang paling banyak digunakan adalah *polyethylene terephthalate* (PET). PET memiliki struktur aromatik dengan gugus

ester yang kompleks sehingga sulit terdegradasi secara alami (Kawai, 2020).

Degradasi plastik di lingkungan dapat terjadi melalui proses fisik, kimia, dan biologis. Proses biologis memanfaatkan mikroorganisme yang mampu mendegradasi polimer alam maupun polimer sintetik, yang dikenal sebagai proses biodegradasi. Melalui proses ini, limbah plastik menjadi rapuh dan terurai menjadi fragmen berukuran lebih kecil, hingga rantai

Diterima (Received): 14 Agustus 2026 **Direvisi (Revised):** 24 Agustus 2026 **Disetujui (Accepted):** 27 Agustus 2026

***Penulis korespondensi (Corresponding author):** Elvy L. Ginting

Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Sam Ratulangi, Manado 95115, Indonesia

E-mail: like.ginting@unsrat.ac.id

<https://doi.org/10.35800/jip.v14i2.69527>

Artikel ini merupakan artikel Open Access yang didistribusikan di bawah ketentuan Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), yang mengizinkan penggunaan, distribusi, dan reproduksi non-komersial dalam media apa pun, selama karya asli disitasi dengan benar.

Hak Cipta © 2026 Penulis. Diterbitkan oleh Jurnal Ilmiah PLATAX, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Sam Ratulangi.

<https://ejournal.unsrat.ac.id/v3/index.php/platax>

polimer mencapai berat molekul yang cukup rendah untuk dimetabolisme oleh mikroorganisme (Haq et al., 2025).

Berbagai mikroorganisme pendegradasi plastik telah berhasil diisolasi dari tanah, air laut, dan kompos. Beberapa di antaranya adalah *Pseudomonas* sp., *Staphylococcus* sp., dan *Streptomyces* sp. (Devi et al., 2015). Bakteri yang diisolasi dari perairan yang tercemar plastik pun memiliki potensi biodegradasi yang signifikan.

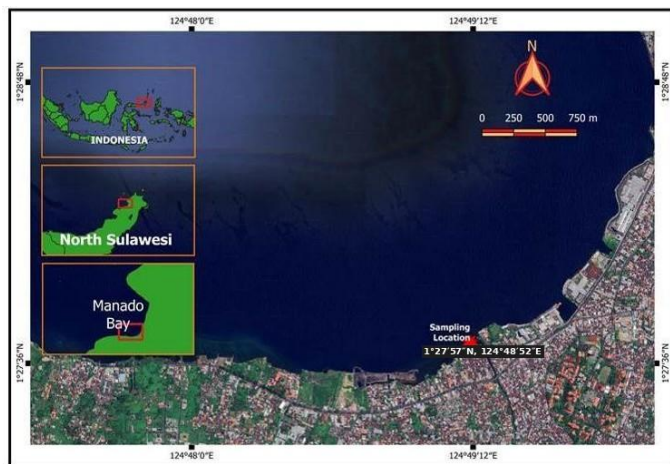
Berdasarkan penelitian sebelumnya, sebanyak 12 isolat bakteri *indigenus* berhasil diisolasi dari perairan Teluk Manado, Sulawesi Utara, salah satunya adalah *Stenotrophomonas* sp. yang menunjukkan aktivitas degradasi plastik (Ginting et al., 2025). Pemanfaatan *Stenotrophomonas* sp. dalam mendegradasi plastik merupakan salah satu pendekatan pengelolaan sampah plastik di perairan. Degradasi oksidatif pada plastik umumnya ditandai dengan terbentuknya gugus karbonil yang dapat dideteksi menggunakan FT-IR serta peningkatan nilai *Carbonyl Index* (CI) (Albertsson & Karlsson, 1990). Selain itu, perubahan morfologi permukaan seperti retakan dan pori dapat diamati menggunakan SEM sebagai indikator degradasi fisik (Rabek, 1995). Kombinasi FT-IR dan SEM memberikan pendekatan komprehensif untuk memahami mekanisme degradasi plastik, karena FT-IR mengidentifikasi perubahan kimia sedangkan SEM mengamati perubahan fisik permukaan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji indikasi degradasi awal plastik PET berdasarkan analisis FT-IR dan SEM oleh bakteri *Stenotrophomonas* sp. yang diisolasi dari perairan Teluk Manado, Sulawesi Utara.

2. Bahan dan Metode

2.1. Waktu dan lokasi penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Juli sampai dengan Desember 2025. Isolat bakteri *Stenotrophomonas* sp. yang digunakan merupakan isolat *indigenus* yang sebelumnya diisolasi dari perairan Teluk Manado, Sulawesi Utara (Gambar 1) (Ginting et al. 2025), dan disimpan dalam koleksi Laboratorium Bioteknologi dan Farmasetika Laut, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Sam Ratulangi, Manado.



Gambar 1. Peta lokasi pengambilan sampel (Ginting et al. 2025)

2.2. Bahan dan pengumpulan data

Sampel plastik yang digunakan adalah plastik jenis PET yang diperoleh dari kemasan air mineral komersial, dipotong menjadi lembaran berukuran 1 cm × 1 cm. Isolat *Stenotrophomonas* sp. yang tersimpan di laboratorium disegarkan kembali dan dikarakterisasi morfologinya sebelum digunakan dalam pengujian biodegradasi.

2.2.1. Penyegaran bakteri dan konfirmasi isolat

Penyegaran bakteri dilakukan dengan cara menginokulasikan isolat ke dalam media *Nutrient Broth* (NB) dan menginkubasikannya pada suhu 37°C selama 24–48 jam. Bakteri yang tumbuh kemudian ditumbuhkan pada media *Nutrient Agar* (NA). Karakteristik morfologi koloni, yang meliputi bentuk, elevasi, tepi, dan warna, diamati sesuai prosedur Cappuccino & Welsh (2017).

2.2.2. Uji potensi biodegradasi plastik

Sampel plastik PET berukuran 1 cm × 1 cm ditimbang berat awalnya, dicuci dengan akuades steril, dan disemprot dengan alkohol 70%. Sampel dimasukkan ke dalam Erlenmeyer 250 mL yang berisi 50 mL media NB. Sebanyak 2 ose isolat *Stenotrophomonas* sp. diinokulasikan ke dalam media tersebut sebagai perlakuan. Sebagai kontrol, digunakan Erlenmeyer berisi media NB dan potongan plastik PET yang sama tanpa inokulasi bakteri. Setiap perlakuan dibuat dalam dua ulangan. Media diinkubasi menggunakan *shaker incubator* pada kecepatan 100 rpm dan suhu 37°C selama 120 hari. Setelah 120 hari, plastik dicuci dengan akuades steril, disemprot alkohol 70%, dikering-udarkan, lalu ditimbang berat akhirnya menggunakan neraca analitik. Persentase degradasi dihitung menggunakan rumus (Rozana et al., 2023):

$$\% \text{ degradasi} = (\text{Berat awal} - \text{Berat akhir}) / \text{Berat awal} \times 100\%$$

2.2.3. Analisis morfologi permukaan plastik menggunakan SEM

SEM digunakan untuk mengamati perubahan morfologi permukaan plastik PET setelah perlakuan dengan *Stenotrophomonas* sp. dibandingkan dengan kontrol. Setelah 120 hari inkubasi, plastik dikeluarkan dari media, direndam dalam larutan SDS 2% (w/v) selama empat jam pada suhu 50°C, kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 60°C selama enam jam. Sebelum analisis SEM, sampel difiksasi menggunakan pita karbon dan dilapisi platinum hingga ketebalan 5 nm. Perubahan morfologi permukaan seperti retakan, erosi, dan ketidakteraturan permukaan digunakan sebagai indikator aktivitas mikroorganisme dalam degradasi polimer (Wei & Zimmermann, 2017; Yoshida et al., 2016).

2.2.4. Spektroskopi FT-IR

Spektrometer FT-IR digunakan untuk mengidentifikasi perubahan gugus fungsi dalam struktur kimia plastik PET. Analisis FT-IR dilakukan menggunakan metode *single-bounce attenuated total reflectance* (ATR) spectroscopy dengan rentang bilangan gelombang 400–4.000 cm⁻¹ dan resolusi 4 cm⁻¹ (Kim et al., 2023). Plastik dikeluarkan dari media setelah 120 hari inkubasi, kemudian direndam dalam larutan SDS 2% (w/v) selama empat jam pada suhu 50°C dan dikeringkan dalam oven pada suhu 60°C selama enam jam sebelum analisis dilakukan (Gajendiran et al., 2016).

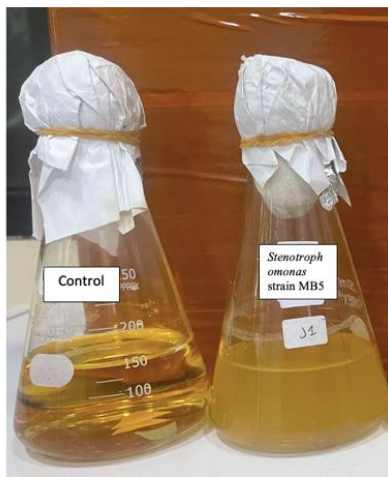
2.3. Analisis data

Persentase degradasi dihitung berdasarkan selisih berat awal dan berat akhir sampel plastik menggunakan rumus Rozana et al. (2023). Perubahan morfologi permukaan dianalisis secara deskriptif berdasarkan citra SEM, sedangkan perubahan gugus fungsi PET dianalisis berdasarkan perbandingan spektrum FT-IR antara sampel perlakuan dan kontrol.

3. Hasil

Hasil karakterisasi morfologi isolat *Stenotrophomonas* sp. yang disegarkan menunjukkan bentuk koloni bulat kecil berwarna kuning, dengan tepi utuh, permukaan halus, dan elevasi datar. Karakteristik ini konsisten dengan deskripsi saat isolat pertama kali diisolasi dan diidentifikasi (Ginting et al., 2025), yang mengindikasikan bahwa isolat yang digunakan tidak terkontaminasi dan merupakan isolat murni *Stenotrophomonas* sp.

Pengamatan media kultur setelah 120 hari inkubasi disajikan pada Gambar 2. Media kontrol tetap bening sepanjang masa inkubasi, mengindikasikan tidak adanya kontaminasi. Sebaliknya, media yang diinokulasi dengan *Stenotrophomonas* sp. berubah menjadi keruh, yang mencerminkan pertumbuhan bakteri selama masa inkubasi.



Gambar 2. Media pertumbuhan *Stenotrophomonas* sp. (perlakuan) dan kontrol setelah 120 hari inkubasi.

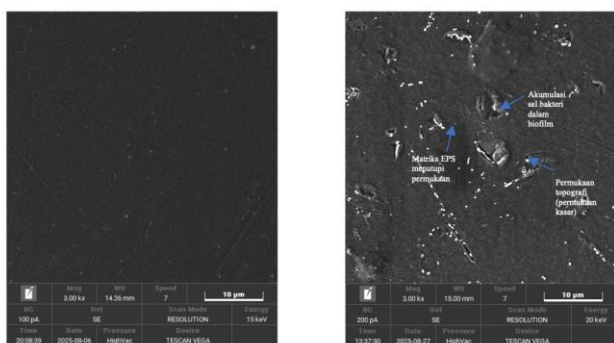
Plastik PET yang diinokulasi dengan *Stenotrophomonas* sp. menunjukkan persentase penurunan berat yang lebih besar dibandingkan kontrol selama 120 hari inkubasi (Tabel 1). Penurunan berat pada kontrol (tanpa bakteri) diduga disebabkan oleh gesekan mekanik selama proses inkubasi menggunakan *shaker* (Geyer et al., 2017), namun besarnya jauh lebih kecil dibandingkan perlakuan bakteri.

Tabel 1. Persentase degradasi plastik PET oleh bakteri *Stenotrophomonas* sp. selama 120 hari inkubasi.

	Berat Awal (gr)	Berat Akhir (gr)	% Degradasi
<i>Stenotrophomonas</i> sp.	0.0444	0.0439	1,13%
	0.0423	0.0419	0,95
	0.0467	0.0460	1,50
Rata rata	0.04447	0.0439	1,19
Kontrol	0.0441	0.0439	0,43
	0.0452	0.0451	0,22
	0.0432	0.0432	0
Rata rata	0.0442	0.0441	0,22

Keterangan: gr = gram; % degradasi dihitung berdasarkan rumus Rozana et al. (2023).

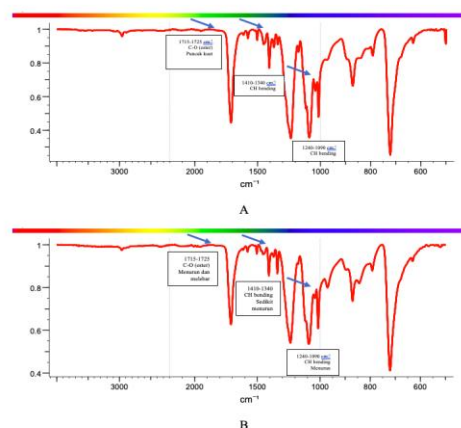
Hasil pengamatan SEM pada sampel plastik PET kontrol dan perlakuan *Stenotrophomonas* sp. disajikan pada Gambar 3. Permukaan plastik PET kontrol tampak halus, rata, dan homogen, mencerminkan integritas fisik polimer yang utuh. Sebaliknya, sampel plastik yang diberi perlakuan bakteri memperlihatkan agregat berbentuk bulat tidak beraturan di permukaan, yang diduga merupakan koloni bakteri atau sisa biofilm yang melekat pada permukaan plastik.



Gambar 3. Hasil pengamatan SEM plastik PET: A, kontrol; B, perlakuan *Stenotrophomonas* sp.

Selain itu, tampak alur dan retakan halus yang memanjang di beberapa bagian permukaan, mengindikasikan kerusakan struktural. Permukaan plastik terlihat tererosi dan tidak homogen, yang menunjukkan terjadinya degradasi fisik dari matriks polimer oleh aktivitas enzim hidrolitik bakteri. Perubahan ini konsisten dengan pemutusan ikatan ester PET yang menyebabkan depolimerisasi parsial (Yoshida et al., 2016; Wei & Zimmermann, 2017; Tournier et al., 2020).

Hasil analisis FT-IR disajikan pada Gambar 4. Pita serapan pada rentang 1.715–1.725 cm^{-1} merupakan getaran regangan gugus karbonil (C=O) dari ikatan ester, yang menjadi ciri utama polimer PET. Perbandingan spektrum kontrol dan perlakuan *Stenotrophomonas* sp. menunjukkan penurunan dan pelebaran intensitas pita karbonil yang tergolong kecil. Perubahan ini mengindikasikan terjadinya oksidasi permukaan dan hidrolisis parsial ikatan ester pada tahap awal biodegradasi PET (Sammon et al., 2000; Kawai, 2020).



Gambar 4. Spektrum FT-IR plastik PET: A, kontrol; B, perlakuan *Stenotrophomonas* sp.

Pita serapan pada rentang 1.410–1.340 cm^{-1} menunjukkan penurunan intensitas yang kecil pada sampel perlakuan, mengindikasikan modifikasi kecil pada lingkungan kimia rantai polimer akibat proses oksidasi permukaan. Perubahan intensitas pita CH bending merupakan indikator terjadinya perubahan struktur kimia polimer akibat proses degradasi (Campanale et al., 2023). Selanjutnya, penurunan intensitas pada daerah 1.240–1.090 cm^{-1} , yang merupakan pita regangan asimetris dan simetris gugus ester C–O–C, mengindikasikan pelemahan atau pemutusan sebagian ikatan ester akibat aktivitas enzim hidrolitik ekstraseluler. Berbagai penelitian melaporkan bahwa enzim esterase, lipase, dan PET hidrolase menyerang ikatan ester PET, menghasilkan senyawa antara seperti MHET, BHET, etilen glikol (EG), dan asam tereftalat (TPA) (Sammon et al., 2000; Yoshida et al., 2016; Tournier et al., 2020).

4. Pembahasan

Kemampuan biodegradasi *Stenotrophomonas* sp. terhadap plastik PET yang ditunjukkan dalam penelitian ini sejalan dengan temuan sebelumnya. *Stenotrophomonas* sp. diketahui mampu menghasilkan enzim depolimerase, termasuk enzim pendegradasi poli-β-hidroksibutirat (PHB) (Wani et al., 2016). Lebih jauh, *S. maltophilia* PRS8 yang diisolasi dari tanah yang terkontaminasi PET menunjukkan kemampuan mendegradasi PET (Din et al., 2023), sementara *S. pavanii* JW-G-1 mampu memanfaatkan PET sebagai satu-satunya sumber karbon (Huang et al., 2022).

Pembentukan biofilm pada permukaan plastik yang terlihat dalam citra SEM merupakan tahap kritis dalam proses biodegradasi polimer. Biofilm meningkatkan kontak antara bakteri dan permukaan polimer, sehingga memfasilitasi pelepasan enzim hidrolitik ekstraseluler secara terlokalisasi (Flemming & Wingender, 2010). Fenomena ini berkaitan dengan terbentuknya ekosistem *plastisphere*, yaitu komunitas mikroorganisme yang berkembang pada permukaan plastik di lingkungan perairan (Zhai et al., 2023). Bakteri *indigenous* mampu dengan cepat mengkolonisasi permukaan plastik dan membangun komunitas *plastisphere* yang mendukung proses biodegradasi (Bhagwat et al., 2021).

Perubahan kimia yang terdeteksi oleh FT-IR menunjukkan bahwa *Stenotrophomonas* sp. menginisiasi modifikasi kimia pada permukaan PET melalui reaksi oksidasi dan hidrolisis parsial ikatan ester. Dominannya pita-pita karakteristik PET yang masih tampak dan tidak adanya pergeseran puncak yang signifikan mengindikasikan bahwa biodegradasi masih berada pada tahap awal, belum mencapai depolimerisasi menyeluruh. Interpretasi

serupa dikemukakan oleh Wei & Zimmermann (2017) serta Lear et al. (2021), yang menyatakan bahwa FT-IR terutama menggambarkan perubahan kimia pada permukaan polimer selama tahap awal biodegradasi.

Reaksi enzimatik yang terjadi dalam proses biodegradasi merupakan mekanisme pemanfaatan polimer plastik sebagai sumber nutrisi dan energi bagi bakteri (Fachrul et al., 2021). Ketika sumber nutrisi dalam media berkurang, mikroorganisme memanfaatkan polimer plastik sebagai substrat alternatif. Temuan dalam penelitian ini mendukung potensi *Stenotrophomonas* sp. sebagai agen biodegradasi PET yang prospektif, meskipun penelitian lanjutan masih diperlukan untuk memahami jalur enzimatik yang terlibat secara lebih komprehensif.

5. Simpulan

Bakteri laut *indigenous Stenotrophomonas* sp. yang diisolasi dari perairan Teluk Manado, Sulawesi Utara, terbukti memiliki kemampuan mendegradasi plastik PET. Analisis SEM memperlihatkan erosi permukaan, retakan, dan pembentukan biofilm yang mengindikasikan terjadinya biodegradasi oleh aktivitas *Stenotrophomonas* sp. Spektrum FT-IR menunjukkan modifikasi kimia berupa penurunan intensitas pita C=O, CH bending, dan C-O-C yang mengindikasikan hidrolisis ikatan ester pada tahap awal biodegradasi PET. Temuan ini mengonfirmasi peran *Stenotrophomonas* sp. dalam biodegradasi plastik PET pada tahap awal. Penelitian lanjutan yang mencakup karakterisasi molekuler dan enzimatik direkomendasikan untuk menjelaskan jalur dan enzim spesifik yang terlibat dalam proses ini.

Konflik kepentingan (Competing interests)

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan yang relevan dengan artikel ini.

Sumber dana (Funding sources)

Penelitian ini didanai oleh Universitas Sam Ratulangi melalui Dana PNPB BLU Unsrat dengan skim RDUU-K1 tahun 2025.

Ucapan terima kasih (Acknowledgements)

Terima kasih buat Universitas Sam Ratulangi yang telah mendanai penelitian ini melalui penelitian Dana PNPB BLU UNSRAT dengan skim RDUU-K1 tahun 2025.

Kontribusi penulis (Authors' contributions)

E.L. Ginting: konseptualisasi, metodologi, analisis data, interpretasi data, validasi penulisan. **N.D.C. Rumampuk:** konseptualisasi, metodologi, analisis data, interpretasi data. **R.M. Rampengan:** metodologi, validasi penulisan. **M.S. Siby:** metodologi, analisis data.

Ketersediaan data (Availability of data and materials)

Dataset yang mendukung hasil penelitian ini tersedia dari penulis korespondensi berdasarkan permintaan yang wajar.

Persetujuan etik (Ethics approval and consent to participate)

Tidak berlaku / Not applicable.

ORCID

Elvy L. Ginting : <https://orcid.org/0000-0003-2424-6243>
 Natalie D.C. Rumampuk : <https://orcid.org/0000-0003-3285-7666>
 Royke M. Rampengan. : <https://orcid.org/0009-0005-4127-4803>
 Mayse S. Siby : <https://orcid.org/0000-0002-7277-5652>

Daftar Pustaka

- Albertsson, A. C., & Karlsson, S. (1990). The influence of biotic and abiotic environments on the degradation of polyethylene. *Progress in Polymer Science*, 15(2), 177–192. [https://doi.org/10.1016/0079-6700\(90\)90027-X](https://doi.org/10.1016/0079-6700(90)90027-X)
- Bhagwat, G., O'Connor, W., Grainge, I., & Palanisami, T. (2021). Understanding the fundamental basis for biofilm formation on plastic surfaces: Role of conditioning films. *Frontiers in Microbiology*, 12, 687118. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.687118>

- Campanale, C., Savino, I., Massarelli, C., & Uricchio, V. F. (2023). Fourier transform infrared spectroscopy to assess the degree of alteration of artificially aged and environmentally weathered microplastics. *Polymers*, 15(4), 911. <https://doi.org/10.3390/polym15040911>
- Cappuccino, J. G., & Welsh, C. T. (2017). *Microbiology: A laboratory manual* (11th ed.). Pearson.
- Devi, R. S., Velu, R. K., Krishnan, N., Duraisamy, N., Kanthaiah, K., Sekar, C., & Arokiaswamy, R. A. (2015). The role of microbes in plastic degradation. In R. Chandra (Ed.), *Environmental waste management* (pp. 341–370). CRC Press.
- Din, S. U., Kalsoom, Satti, S. M., Uddin, S., Mankar, S. V., Ceylan, E., Hasan, F., Khan, S., Badshah, M., Beldüz, A. O., Çanakçı, S., Zhang, B., Linares-Pastén, J. A., & Shah, A. A. (2023). The purification and characterization of a chitinase-like enzyme with activity on polyethylene terephthalate (PET) from a newly isolated bacterium *Stenotrophomonas maltophilia* PRS8 at a mesophilic temperature. *Applied Sciences*, 13(6), 3686. <https://doi.org/10.3390/app13063686>
- Fachrul, M. F., Rinanti, A., Salmiati, Tazkiaturrizki, & Sunaryo, T. (2021). Degradation of polyethylene plastic waste by indigenous microbial consortium and fungi. *Indonesian Journal of Urban and Environmental Technology*, 5(1), 86–103. <https://doi.org/10.25105/urbanenvirotech.v5i1.10749>
- Flemming, H. C., & Wingender, J. (2010). The biofilm matrix. *Nature Reviews Microbiology*, 8(9), 623–633. <https://doi.org/10.1038/nrmicro2415>
- Gajendiran, A., Krishnamoorthy, S., & Abraham, J. (2016). Microbial degradation of low-density polyethylene (LDPE) by *Aspergillus clavatus* strain JASK1 isolated from landfill soil. *3 Biotech*, 6(1), 52. <https://doi.org/10.1007/s13205-016-0394-x>
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Ginting, E. L., Rumampuk, N.D.C., Kemer, K., Pratasik, S.B., Siby, M.S., & Wullur, S. (2025). The potential of indigenous bacteria from Manado Bay, Indonesia, in biodegrading low-density polyethylene. *AACL Bioflux*, 18(6): 2538–2546.
- Haq, F., Kiran, M., Khan, I. A., Mehmood, S., Aziz, T., & Haroon, M. (2025). Exploring the pathways to sustainability: A comprehensive review of biodegradable plastics in the circular economy. *Materials Today Sustainability*, 29, 101067. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.101067>
- Huang, Q. S., Yan, Z. F., Chen, X. Q., Du, Y. Y., Li, J., Liu, Z. Z., Xia, W., Chen, S., & Wu, J. (2022). Accelerated biodegradation of polyethylene terephthalate by *Thermobifida fusca* cutinase mediated by *Stenotrophomonas pavanii*. *Science of The Total Environment*, 808, 152107. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152107>
- Kawai, F. (2020). Current state and perspectives related to the polyethylene terephthalate hydrolases available for biorecycling. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(24), 8894–8908. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c01638>
- Kim, H. R., Lee, C., Shin, H., Kim, J., Jeong, M., & Choi, D. (2023). Isolation of a polyethylene-degrading bacterium, *Acinetobacter guillouiae*, using a novel screening method based on a redox indicator. *Heliyon*, 9, e15731. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15731>
- Lear, G., Kingsbury, J. M., Franchini, S., Gambarini, V., Maday, S. D. M., Wallbank, J. A., Weaver, L., & Pantos, O. (2021). Plastics and the microbiome: Impacts and solutions. *Environmental Microbiome*, 15, 13. <https://doi.org/10.1186/s40793-020-00371-w>
- Rabek, J. F. (1995). *Polymer photodegradation, mechanisms and experimental methods*. Chapman and Hall. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-1274-1>
- Rozana, K., Prabanimngtyas, S., & Widayatama, D. R. (2023). Distribution and biodegradation analysis of polyvinyl <https://doi.org/10.35800/jip.v14i2.69527>

- chloride microplastic by indigenous bacteria isolated from Supit Urang Landfill, Malang, Indonesia. *Biodiversitas*, 24(7), 3853–3859. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d240724>
- Sammon, C., Yarwood, J., & Everall, N. (2000). An FT-IR study of the effect of hydrolytic degradation on the structure of thin PET films. *Polymer Degradation and Stability*, 67(1), 149–158. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(99\)00104-4](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(99)00104-4)
- Tournier, V., Topham, C. M., Gilles, A., David, B., Folgoas, C., Moya-Leclair, E., Kamionka, E., Desrousseaux, M. L., Texier, H., Gavalda, S., Cot, M., Guemard, E., Dalibey, M., Nomme, J., Cioci, G., Barbe, S., Chateau, M., Andre, I., Duquesne, S., & Marty, A. (2020). An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles. *Nature*, 580(7802), 216–219. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2149-4>
- Wani, S. J., Shaikh, S. S., Tabassum, B., Thakur, R., Gulati, A., & Sayyed, R. Z. (2016). *Stenotrophomonas* sp. RZS 7, a novel PHB degrader isolated from plastic contaminated soil in Shahada, Maharashtra, Western India. *3 Biotech*, 6(2), 179. <https://doi.org/10.1007/s13205-016-0477-8>
- Wei, R., & Zimmermann, W. (2017). Microbial enzymes for the recycling of recalcitrant petroleum-based plastics: How far are we? *Microbial Biotechnology*, 10(6), 1308–1322. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12710>
- Yoshida, S., Hiraga, K., Takehana, T., Taniguchi, I., Yamaji, H., Maeda, Y., Toyohara, K., Miyamoto, K., Kimura, Y., & Oda, K. (2016). A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science*, 351(6278), 1196–1199. <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>
- Zhai, X., Zhang, X.-H., & Yu, M. (2023). Microbial colonization and degradation of marine microplastics in the plastisphere: A review. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1127308. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1127308>