

Peran Mikroba dalam Degradasi Plastik dan Potensi Bioremediasi: Kajian Literatur

Dwi Rahayu Pujiastuti^{*1)}, Jesslyn Ivana Rumengan¹⁾, Mario Nikolaus Dalengkade²⁾

¹⁾Program Studi Biologi, Universitas Sam Ratulangi Manado, Indonesia

²⁾Program Studi Matematika, Universitas Halmahera Tobelo, Indonesia

*Email Penulis Korespondensi: dwipuji@unsrat.ac.id

Abstrak. Sampah plastik hingga kini masih menjadi isu serius di kalangan peneliti hingga pemerhati lingkungan. Dari tahun 2015 hingga 2023 jumlah produksi plastik dunia menunjukkan pola peningkatan mencapai 413.8 juta ton. Sekitar 22-43% sampah plastik di seluruh dunia dibuang di tempat pembuangan akhir, di mana sumber dayanya terbuang sia-sia, menghabiskan ruang berharga, dan mengancam masyarakat. Pemanfaatan mikroba menjadi potensi solusi ramah lingkungan dan dapat diterapkan secara luas. Kajian ini bertujuan melakukan literatur review mengenai peran mikroba dalam proses degradasi plastik, dengan potensi bioremediasi sebagai solusi berkelanjutan terhadap polusi plastik global. Metode kajian literatur yakni studi literatur dari jurnal nasional dan internasional. Penelusuran literatur melalui database Google, Google Scholar, Pubmed, Semantic Scholar, Web of Science dan Science Direct. Literatur yang digunakan yakni jurnal relevan dari tahun 2010 sampai 2025. Mikroba pendegradasi plastik menawarkan solusi melalui kemampuan alami mereka untuk memecah polimer sintetis menjadi monomer yang lebih sederhana, memanfaatkan enzim seperti kutinase, lipase, esterase, PETase, MHEase. Beberapa mikroba menunjukkan potensi mendegradasi plastik seperti kelompok *Bacillus*, *Ideonella*, *Pseudomonas*, *Trichoderma*, *Rhodococcus* dengan efektifitas dan produksi enzim yang bervariasi. Kemajuan penelitian rekayasa genetik yakni peningkatan laju enzim PETase mendegradasi plastik hingga 10 kali lipat dari alami. Konsorsium bakteri rizosfer di mangrove dalam pengujian laboratorium menunjukkan potensi bioremediasi plastik PE selama inkubasi 90 hari. Manajemen plastik memerlukan sistem pengelolaan yang terintegrasi dengan mekanisme yang berjenjang yang mempercepat proses degradasi alami. Rekayasa genetik pada enzim dan mutasi mikroba dapat menjadi loncatan mengatasi pencemaran plastik yang semakin sulit dikendalikan.

Kata Kunci: peran; mikroba; degradasi; plastik; bioremediasi.

PENDAHULUAN

Sampah plastik hingga kini masih menjadi isu serius di kalangan peneliti hingga pemerhati lingkungan. Dari tahun 2015 hingga 2023 jumlah produksi plastik dunia menunjukkan pola peningkatan mencapai 413.8 juta ton (Plasticseurope 2024). Beriringan dengan hal tersebut jumlah produksi sampah plastik dunia juga lebih luas dan meningkat. Penelitian yang dilakukan oleh tim Geyer *et al.* (2017) mengakumulasi dan memprediksi jumlah sampah plastik dunia yang menunjukkan pola peningkatan hingga tahun 2050. Pada tahun 1950 hingga 2015 terdapat jumlah produksi sampah plastik primer dan sekunder (daur ulang) mencapai 6300 juta ton. Jika pola peningkatannya sama maka diprediksi tahun 2050 mencapai 25 miliar ton sampah plastik. Plastik merupakan senyawa sintetis yang sulit didegradasi secara alami. Hingga kini isu sampah plastik semakin mengkhawatirkan karena telah masuk ke dalam ekosistem laut, danau, sungai dan daratan kemudian timbulnya masalah sekunder yakni mikroplastik (Auta *et al.*, 2017). Di alam, plastik yang mengalami paparan abrasi mekanis dan oksidasi fitokimia perlahan akan mengalami pemecahan hingga ukuran yang sangat kecil disebut dengan mikroplastik (Bessa *et al.*, 2018). Menurut penelitian terbaru, mikroplastik telah ditemukan di dalam tubuh manusia yakni darah (Lee *et al.*, 2024), hati (Amato-Lourenço *et al.*, 2021), payudara (Ragusa *et al.*, 2022), plasenta (Oliveira *et al.*, 2025), lambung (Özsoy *et al.*, 2024).

Pengolahan sampah dengan cara konvensional seperti landfill, insinerasi dan daur ulang masih belum efektif dalam mengurangi sampah terutama plastik (Evode *et al.*, 2021). Sekitar 22-43% sampah plastik di seluruh dunia dibuang di tempat pembuangan akhir, di mana sumber dayanya terbuang sia-sia, menghabiskan ruang berharga, dan mengancam masyarakat (Gourmelon, 2015). Sampah plastik sifatnya tidak mudah terurai secara hayati dan untuk menghilangkan secara permanen harus melalui pembakaran atau pirolisis (Geyer *et al.*, 2017). Pengelolaan secara landfill, insinerasi maupun daur ulang tidak cukup dalam mengolah plastik

hingga hilang permanen dan tetap bermuara pada TPA hingga berdampak pada lingkungan yang lebih luas. Selain prosesnya lambat, juga memerlukan dana yang mahal dalam pengolahannya serta polusi baru pada tanah, udara dan perairan (Evode *et al.*, 2021). Saat plastik terpecah menjadi ukuran yang lebih kecil yakni mikroplastik, maka masalah menjadi lebih kompleks. Priolisis bahkan pembakaran tidak dapat mengatasi pengendalian dan dampak dari mikroplastik yang telah tersebar di lingkungan (Thacharodi *et al.*, 2024). Permasalahan plastik perlu manajemen yang lebih komprehensif dan terstruktur hingga tercipta suatu sistem yang ramah lingkungan dan mudah diterapkan di masyarakat.

Pendekatan pendegradasi secara alami merupakan salah satu solusi yang lebih efisien dibandingkan metode lainnya. Pemanfaatan mikroba menjadi potensi solusi ramah lingkungan dan dapat diterapkan secara luas. Mikroba dikenal sebagai organisme paling penting dan melimpah di alam, serta mampu mendegradasi plastik. Dalam beberapa tahun terakhir, mikroba pendegradasi plastik telah diisolasi dari berbagai habitat, seperti habitat laut, TPA, tanah, dan kompos (Lv *et al.*, 2024). Mikroba pendegradasi plastik menawarkan solusi melalui kemampuan alami mereka untuk memecah polimer sintetis menjadi monomer yang lebih sederhana, memanfaatkan enzim seperti lipase, esterase, hydrolase PET (Tournier *et al.*, 2020; Wei & Zimmermann, 2017). Penemuan bakteri *Ideonella sakaiensis* pada tahun 2016 yang mampu mendegradasi polyethylene terephthalate (PET) secara lengkap, menandai era baru dalam bioteknologi lingkungan (Yoshida *et al.*, 2016). Kemajuan penelitian pada rekayasa genetik dan isolasi strain dari habitat ekstrem, yang meningkatkan laju degradasi hingga 10 kali lipat dibandingkan metode alami (Tournier *et al.*, 2020). Tujuan kajian ini yakni melakukan kajian literatur mengenai peran mikroba dalam proses degradasi plastik, dengan potensi bioremediasi sebagai solusi berkelanjutan terhadap polusi plastik global.

METODE

Metode yang dalam kajian litetarur yakni studi literatur dari jurnal nasional dan internasional. Penelusuran literatur melalui database Google, Google Scholar, Pubmed, Semantic Scholar, Web of Science dan Scient Direct. Kata kunci yang digunakan diantaranya Microbiological degradation of plastics, plastics degradation by microbes, microbial degradation of plastics. Literatur yang digunakan yakni jurnal relevan dari tahun 2010 sampai 2025.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Mekanisme Degradasi Plastik oleh Mikroba

Pada suatu material, setiap perubahan fisika dan kimia yang disebabkan oleh aktivitas mikroorganisme dikenal sebagai biodegradasi. Plastik alami dan sintetis terdegradasi oleh aktivitas mikroorganisme, termasuk bakteri, aktinomisetes, dan jamur (Zeenat *et al.*, 2021). Biodegradasi polimer plastik terdiri dari tiga langkah: (a) penempelan mikroba pada permukaan polimer, atau plastik (b) pemanfaatan polimer sebagai sumber karbon, dan (c) degradasi polimer (Danso *et al.*, 2019).

Pada saat mikroba menempel pada permukaan plastik dan mendegradasi plastic dengan mensekresi enzim untuk mendapatkan energi bagi pertumbuhannya. Plastik berukuran besar yang terdiri dalam bentuk polimer terdegradasi menjadi monomer dan oligomer yang merupakan molekul dengan berat molekul rendah. Beberapa oligomer dapat diasimilasi di lingkungan internal mikroorganisme setelah berdifusi ke dalamnya. Plastik yang telah berbentuk monomer selanjutnya mudah digunakan oleh mikroba sebagai sumber karbon atau energi dalam metabolisme pembentukan massa (Zeenat *et al.*, 2021). Faktor lingkungan memainkan peran krusial dalam mengoptimalkan mekanisme ini; misalnya, paparan UV pra-degradasi dapat meningkatkan biofragmentasi oleh bakteri hingga 30% (Tokiwa *et al.*, 2009).

Peran Mikroba dalam Degradasi Plastik

Metode konvensional seperti daur ulang dan insinerasi hanya menangani kurang dari 10% limbah plastik, meninggalkan mayoritas terakumulasi di lingkungan (Geyer *et al.*, 2017). Degradasi biologis oleh mikroba muncul sebagai alternatif ramah lingkungan untuk mengatasi

ketahanan polimer sintetis seperti polyethylene (PE) dan polyethylene terephthalate (PET), yang memerlukan waktu ratusan tahun untuk terurai secara alami. Mikroorganisme, termasuk bakteri dan jamur, dapat memproduksi enzim seperti PETase dan MHETase yang secara spesifik memecah ikatan ester dalam PET (Yoshida *et al.*, 2016). Berbagai galur dari genus seperti *Aspergillus*, *Penicillium*, *Rhizopus*, *Serratia*, *Rhodococcus*, *Bacillus*, *Phanerochaete*, dan *Pseudomonas* telah terbukti mampu menguraikan plastik seperti PS, PE, PET, dan PP sejak tahun 1970-an, ketika bukti pertama pertumbuhan mikroba pada plastik diamati (Riaz *et al.*, 2025).

Studi menunjukkan bahwa proses ini tidak hanya mengurangi volume plastik tetapi juga mengonversinya menjadi biomassa atau senyawa karbon dioksida yang netral karbon (Danso *et al.*, 2019). **Tabel 1** memberikan informasi mengenai jenis-jenis mikroba dan enzim yang berpotensi mampu mendegradasi plastik. Beberapa enzim yang berhasil diidentifikasi spesifik terhadap tipe plastik dalam reaksi degradasi.

Tabel 1. Jenis mikroba dan enzim yang mendegradasi plastik

Jenis	Enzim	Tipe plastik	Periode inkubasi	Referensi
<i>Halomonas sp.</i>	Esterase	LDPE	90 hari	(Khandare <i>et al.</i> , 2021)
<i>Pseudomonas spp.</i> consortium	Lipase	PEG	90 hari	(Skariyachan <i>et al.</i> , 2015)
<i>Rhodococcus</i> strain A34	Multicopper oxidase, lipase, dan esterases	PE	30 hari	(Tao <i>et al.</i> , 2023)
<i>Micromonospora sp</i>	Leaf-branch compost cutinase (LCC)	PET, BHET	24 jam	(Tiong <i>et al.</i> , 2023)
<i>Pseudomonas chloroaphis</i> PA23	Lipase- LIP3, LIP4, PHA depolymerase (PhaZ)	PLA, PCL, PES	96 jam	(Mohanan <i>et al.</i> , 2023)
<i>Trichoderma harzianum</i>	Laccase, manganese peroxidase	PE	15 hari	(Sowmya <i>et al.</i> , 2014)
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> E7	Alkane hydroxylase (AH)	Low molecular weight polyethylene (LMWPE)	80 hari	(Jeon dan Kim, 2015)
<i>Exiguobacterium sp.</i> RIT 594	Oxygenase	PS	35 hari	(Parthasarathy <i>et al.</i> , 2022)
<i>Acinetobacter baumannii</i> Rd-H2	Laccase-like multicopper oxidase	PE	30 hari	(Zhang <i>et al.</i> , 2022)
<i>Ideonella sakaiensis</i> 201-F6	PETase, MHETase	PET	18 jam	(Yoshida <i>et al.</i> , 2016)

Sumber: Dhali *et al.* (2024)

Jenis Plastik dan Efektivitas Degradasi

Plastik yang diproduksi secara masal yakni industri fokus pada pembuatan berbagai material termoplastik karena dibutuhkan oleh banyak komoditas. Terdapat beberapa tipe jenis plastik yang umum digunakan yakni: polietilena densitas rendah (LDPE), polietilena densitas tinggi (HDPE), polistirena (PS), polipropilena (PP), polietilena tereftalat (PET), dan polivinil klorida (PVC) (**Tabel 2**).

Plastik konvensional seperti *polyethylene* (PE) dan *polypropylene* (PP) menunjukkan resistensi tinggi terhadap degradasi mikroba karena struktur rantai karbon alifatik yang stabil. Studi menunjukkan bahwa bakteri *Bacillus subtilis* dapat mendegradasi PE rendah densitas

(LDPE) hingga 9.26% berat dalam 30 hari (Vimala dan Mathew 2016). Peneliti lain menunjukkan bahwa bakteri *Bacillus* sp. strain 27 dan *Rhodococcus* sp. mampu mendegradasi plastic PP hingga 4% dan 6,4% berat dalam 40 hari (Auta et al., 2017). Efektivitas meningkat dengan pretreatment seperti fotooksidasi menggunakan iradiasi UV, yang memecah ikatan C-H dan memfasilitasi akses enzim, termal, atau kimia untuk meningkatkan kerentanan plastik terhadap aktivitas mikroba (Thew et al., 2024).

Tabel 2. Tipe jenis plastik secara umum untuk komersial

Kode Plastik	 PET	 PE-HD	 PVC	 PE-LD	 PP	 PS	 O
Nama polimer	Polyethylene terephthalate	High-density polyethylene	Polyvinyl chloride	Low-density polyethylene	Polypropylene	Polystyrene	Other
Suhu leleh	245-265°C	130-140°C	100-260°C	85-125°C	165-175°C	240°C	-
Kepadatan	1.3-1.4 g/cm ³	0.94-0.97 g/cm ³	1.3-1.7 g/cm ³	0.917-0.940 g/cm ³	0.9-0.91 g/cm ³	1.04-1.05 g/cm ³	PLA 1.23-1.2 g/cm ³
Daur ulang	Umum di daur ulang	Umum di daur ulang	terkadang didaur ulang	kadang didaur ulang	kadang didaur ulang	Umum di daur ulang (tapi sulit)	Sulit di daur ulang

Sumber: Dhali et al. (2024)

Untuk *polystyrene* (PS), jamur *Penicillium simplicissimum* terbukti efektif dalam mendegradasi plastik yang diberi pre-treatment sebesar 38% dari berat dengan enzim yang telah diidentifikasi yakni laccase dan *manganese peroxidase* (Sowmya et al., 2015). Bakteri *Pseudomonas putida* Q1 diketahui enzim yang bertanggung jawab yakni lignin, dan laccase (CopA) serta *DyP peroxidase* yang efektif mendegradasi sebesar 4.4 % dari berat (Qiu et al., 2025). Jenis jamur lain yang memiliki potensi pendegradas yakni *Phanerochaete chrysosporium* Strain NA3 walaupun belum diketahui enzim yang berperan (Shereen et al., 2025).

Plastik seperti *polylactic acid* (PLA) dan *polyhydroxyalkanoates* (PHA) lebih rentan terhadap degradasi mikroba. PLA diproduksi dari sumber daya pertanian seperti jagung. PLA dapat diperoleh dari polimerisasi pembukaan cincin laktida (dimer siklik asam laktat) (Zaaba 2020). *Amycolatopsis* sp. strain K104-1 mendegradasi PLA melalui enzim *Poly(l-Lactic Acid) Depolymerase* (PLD) yang kemudian di rekayasa hingga dimurnikan dan mampu mendegradasi hingga 90% berat PLA film dalam 48 jam. Enzim ini termasuk ke dalam famili kimotripsin dari protease serine, menjadikannya kandidat ideal untuk bioremediasi (Shalem et al., 2024).

Polihidroksialkanoat (PHA) merupakan plastik biodegradable terdiri dari polimer berbasis bio yang menjanjikan yang dapat diproduksi oleh banyak mikroba menggunakan berbagai substrat dari bahan baku limbah (Zhou et al., 2023). Degradasi PHA oleh mikroba tersebar luas di antara bakteri. Bakteri pendegradasi PHA telah diidentifikasi di berbagai relung lingkungan, termasuk tanah (panas bumi dan kriogenik), mata air panas, air tawar, dan ekosistem laut, yang menunjukkan distribusi luas mikroorganisme pendegradasi PHA. Misalnya, *Pseudomonas* sp. DSDY0501, yang diisolasi dari lumpur aktif, mampu mendegradasi sepenuhnya film poli (3-hidroksibutirat) (PHB) dalam waktu 21 jam dalam kultur cair, memanfaatkan PHB sebagai satu-satunya sumber karbon (Di et al., 2019). Selain itu, aktinomiset halofilik seperti *Nocardiopsis aegyptia* secara efisien mendegradasi kopolimer PHB dan PHBV, mencapai penurunan berat hingga 89,94% dalam waktu 30 hari (Paloyan et al., 2025).

Potensi Aplikasi Bioremediasi

Bioremediasi berbasis mikroba merupakan solusi inovatif yang menawarkan manajemen pencemaran plastik secara ramah lingkungan dan berkelanjutan dengan penambahan strain mikroba terseleksi. Penelitian telah melaporkan banyak spesies bakteri dan jamur yang dapat mendegradasi plastik sintetis dengan mengeluarkan enzim pendegradasi plastik. Enzim mikroba yang telah teridentifikasi, seperti PETase dan MHETase dari *Ideonella sakaiensis* 201-F6 dan *Thermobifda fusca cutinase* (Tfc), mampu mendepolimerisasi rantai polimer plastik menghasilkan molekul yang tidak berbahaya secara ekologis seperti karbon dioksida dan air. Sifat bioremediasi enzim mikroba benar-benar mendorong biodegradasi polimer mikroplastik sintetis (De Jesus dan Alkendi 2023).

Kemajuan rekayasa genetik pada *Thermobifda fusca cutinase* (Tfc) menunjukkan peningkatan aktivitas katalitik degradasi poli(etilen tereftalat) secara efisien yang dihasilkan menggunakan pendekatan mutagenesis dan berbasis aditif. Hasil mutasi berpotensi meningkatkan laju degradasi PET sebesar $90\% \pm 4,5\%$ setelah reaksi 24 jam (Furukawa *et al.*, 2019). Rekayasa genetika telah meningkatkan potensi enzim PETase dari *I. sakaiensis* dimodifikasi untuk mencapai laju hidrolase PET hingga 10 kali lebih cepat dari yang alami. Hasil rekayasa ini memungkinkan degradasi dalam 10 jam mencapai minimal 90% depolimerasi PET menjadi monomer. Secara produktivitas 16,7 jam terephthalate liter per jam dengan konsentrasi 3 mg (Tournier *et al.*, 2020). PETase pertama-tama menghidrolisis PET menjadi *bis*-(2-hydroxyethyl) terephthalate (BHET) dan *mono*-(2-hydroxyethyl) terephthalate (MHET), yang kemudian diubah oleh MHETase menjadi TPA dan EG (Palit *et al.*, 2025). Teknologi CRISPR-Cas berpeluang merevolusi strategi bioremediasi dengan mendesain ulang mikroorganisme menjadi agen bioremediasi yang efisien. Ketika diintegrasikan dengan prinsip-prinsip ekonomi sirkular dan bioproses industri, teknologi ini dapat membuka masa depan berkelanjutan di mana limbah plastik persisten didaur ulang menjadi bioproduk berharga sehingga mengurangi beban ekologis dan memajukan bioteknologi lingkungan (Palit *et al.*, 2025).

Bioremediasi pencemaran plastik di daerah mangrove dapat dipercepat dengan penambahan mikroba khusus yang memperkaya diversitas mikroba rizosfer pendegradasi. Konsorsium bakteri dari Rhizosphere tanaman mangrove berhasil mendegradasi PE hingga 15% dalam pengaturan laboratorium dengan menggunakan plastik sebagai sumber karbon selama 90 hari (Jiménez *et al.*, 2025). Aplikasi ini lebih hemat biaya dan efisien dibandingkan metode fisik maupun teknologi secara mekanik.

Penelitian di masa mendatang sebaiknya berfokus pada mekanisme biodegradasi dan penggunaan enzim fungsional tanpa mikroorganisme untuk aplikasi yang lebih sederhana. Enzim pendegradasi plastik yang baru dan lebih canggih telah diperoleh dengan memodifikasi urutan asam amino enzim yang sudah ada, terutama pada sisi aktifnya, menggunakan berbagai pendekatan genetic (Martín-González *et al.*, 2024). Eksplorasi enzim tahan panas dan rekayasa genetika pada enzim dengan kemampuan laju degradasi yang memiliki kecepatan lebih tinggi dibandingkan dari alami dan luasnya kecocokan berbagai substrat jenis plastik. Selain faktor biotik, faktor abiotik seperti radiasi UV perlu dieksplorasi sebagai praperlakuan untuk meningkatkan degradasi (Riaz *et al.*, 2025).

KESIMPULAN

Dalam beberapa tahun terakhir, mikroba pendegradasi plastik telah diisolasi dari berbagai habitat, seperti habitat laut, TPA, tanah, dan kompos. Berbagai galur dari genus seperti *Aspergillus*, *Penicillium*, *Rhizopus*, *Serratia*, *Rhodococcus*, *Bacillus*, *Phanerochaete*, *Ideonella*, dan *Pseudomonas* telah terbukti mampu menguraikan plastik seperti PS, PE, PET, dan PP. Mikroba pendegradasi plastik menawarkan solusi melalui kemampuan alami mereka untuk memecah polimer sintetis menjadi monomer yang lebih sederhana, memanfaatkan enzim seperti *Esterase*, *Lipase*, *Leaf-branch compost cutinase* (LCC), *Laccase*, *PETase*, dan *MHETase*. Bioremediasi pencemaran plastik di daerah mangrove dapat dipercepat dengan penambahan mikroba khusus yang memperkaya diversitas mikroba rizosfer pendegradasi. Penelitian di masa mendatang sebaiknya berfokus pada mekanisme biodegradasi, eksplorasi enzim tahan panas dan

rekayasa genetika pada enzim dengan kemampuan laju degradasi yang memiliki kecepatan lebih tinggi dibandingkan dari alami dan luasnya kecocokan berbagai substrat jenis plastik.

DAFTAR PUSTAKA

- Amato-Lourenço, L. F., Carvalho-Oliveira, R., Júnior, G. R., dos Santos Galvão, L., Ando, R. A., & Mauad, T. (2021). Presence of airborne microplastics in human lung tissue. *Journal of Hazardous Materials*, 416, 126124. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126124>
- Auta, H. S., Emenike, C. U., & Fauziah, S. H. (2017). Distribution and importance of microplastics in the marine environment: A review of the sources, fate, effects, and potential solutions. *Environment International*, 102, 165–176. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.02.013>
- Bessa, F., Barriá, P., Neto, J. M., Frias, J. P. G. L., Otero, V., Sobral, P., & Marques, J. C. (2018). Occurrence of microplastics in commercial fish from a natural estuarine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 128, 575–584. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.01.044>
- Danso, D., Chow, J., & Streit, W. R. (2019). Plastics: Environmental and Biotechnological Perspectives on Microbial Degradation. *Applied and Environmental Microbiology*, 85(19). <https://doi.org/10.1128/AEM.01095-19>
- De Jesus, R., & Alkendi, R. (2023). A minireview on the bioremediative potential of microbial enzymes as solution to emerging microplastic pollution. *Frontiers in Microbiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1066133>
- Dhali, S. L., Parida, D., Kumar, B., & Bala, K. (2024). Recent trends in microbial and enzymatic plastic degradation: a solution for plastic pollution predicaments. *Biotechnology for Sustainable Materials*, 1(1), 11. <https://doi.org/10.1186/s44316-024-00011-0>
- Di, Y., Xia, H., Jiao, Y., Zhang, X., Fang, Q., Li, F., & Chen, S. (2019). Biodegradation of polyhydroxybutyrate by *Pseudomonas* sp. DSDY0501 and purification and characterization of polyhydroxybutyrate depolymerase. *3 Biotech*, 9(10), 359. <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1871-9>
- Evode, N., Qamar, S. A., Bilal, M., Barceló, D., & Iqbal, H. M. N. (2021). Plastic waste and its management strategies for environmental sustainability. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 4, 100142. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100142>
- Furukawa, M., Kawakami, N., Tomizawa, A., & Miyamoto, K. (2019). Efficient Degradation of Poly(ethylene terephthalate) with *Thermobifida fusca* Cutinase Exhibiting Improved Catalytic Activity Generated using Mutagenesis and Additive-based Approaches. *Scientific Reports*, 9(1), 16038. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52379-z>
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Gourmelon, G. (2015). *Global Plastic Production Rises, Recycling Lags*. vitalsigns.worldwatch.org
- Jeon, H. J., & Kim, M. N. (2015). Functional analysis of alkane hydroxylase system derived from *Pseudomonas aeruginosa* E7 for low molecular weight polyethylene biodegradation. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 103, 141–146. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.04.024>
- Jiménez, D. J., Chaparro, D., Sierra, F., Custer, G. F., Feuerriegel, G., Chuvochina, M., Diaz-Garcia, L., Mendes, L. W., Ortega Santiago, Y. P., Rubiano-Labrador, C., Salcedo Galan, F., Streit, W. R., Dini-Andreote, F., Reyes, A., & Rosado, A. S. (2025). Engineering the mangrove soil microbiome for selection of polyethylene terephthalate-transforming bacterial consortia. *Trends in Biotechnology*, 43(1), 162–183. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2024.08.013>
- Khandare, S. D., Chaudhary, D. R., & Jha, B. (2021). Marine bacterial biodegradation of low-density polyethylene (LDPE) plastic. *Biodegradation*, 32(2), 127–143. <https://doi.org/10.1007/s10532-021-09927-0>
- Lee, D.-W., Jung, J., Park, S., Lee, Y., Kim, J., Han, C., Kim, H.-C., Lee, J. H., & Hong, Y.-C. (2024). Microplastic particles in human blood and their association with coagulation markers. *Scientific Reports*, 14(1), 30419. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-81931-9>

- Lv, S., Li, Y., Zhao, S., & Shao, Z. (2024). Biodegradation of Typical Plastics: From Microbial Diversity to Metabolic Mechanisms. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(1), 593. <https://doi.org/10.3390/ijms25010593>
- Martín-González, D., de la Fuente Tagarro, C., De Lucas, A., Bordel, S., & Santos-Beneit, F. (2024). Genetic Modifications in Bacteria for the Degradation of Synthetic Polymers: A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(10), 5536. <https://doi.org/10.3390/ijms25105536>
- Mohanan, N., Wong, M. C.-H., Budisa, N., & Levin, D. B. (2023). Polymer-Degrading Enzymes of *Pseudomonas chloroaphis* PA23 Display Broad Substrate Preferences. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(5), 4501. <https://doi.org/10.3390/ijms24054501>
- Oliveira, C. Wanderley., Oliveira, L. F. A. M., Garcia, J., Weingrill, R. B., Urschitz, J., Souza, S. T., Fonseca, E. J. S., Ospina-Prieto, S., & Borbely, A. U. (2025). First evidence of microplastic accumulation in placentas and umbilical cords from pregnancies in Brazil. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, 97(suppl 3). <https://doi.org/10.1590/0001-3765202520241298>
- Özsoy, S., Gündoğdu, S., Sezigen, S., Tasalp, E., Ikiz, D. A., & Kideys, A. E. (2024). Presence of microplastics in human stomachs. *Forensic Science International*, 364, 112246. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2024.112246>
- Palit, P., Minkara, M., Abida, M., Marwa, S., Sen, C., Roy, A., Pasha, M. R., Mosae, P. S., Saha, A., & Ferdoush, J. (2025). PlastiCRISPR: Genome Editing-Based Plastic Waste Management with Implications in Polyethylene Terephthalate (PET) Degradation. *Biomolecules*, 15(5), 684. <https://doi.org/10.3390/biom15050684>
- Paloyan, A., Tadevosyan, M., Ghevondyan, D., Khoyetsyan, L., Karapetyan, M., Margaryan, A., Antranikian, G., & Panosyan, H. (2025). Biodegradation of polyhydroxyalkanoates: current state and future prospects. *Frontiers in Microbiology*, 16. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1542468>
- Parthasarathy, A., Miranda, R. R., Eddingsaas, N. C., Chu, J., Freezman, I. M., Tyler, A. C., & Hudson, A. O. (2022). Polystyrene Degradation by *Exiguobacterium* sp. RIT 594: Preliminary Evidence for a Pathway Containing an Atypical Oxygenase. *Microorganisms*, 10(8), 1619. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10081619>
- Plasticseurope. (2024). *Plastics-the fast Facts 2024*. <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2024>
- Qiu, Q., Sun, X., Li, H., Zhang, F., Zhou, D., Tian, K., Zhang, X., & Huo, H. (2025). Biodegradation of polystyrene and its mechanisms driven by a customized lignin-degrading microbial consortium and degrading bacteria. *Journal of Environmental Management*, 384, 125560. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125560>
- Ragusa, A., Notarstefano, V., Svelato, A., Belloni, A., Gioacchini, G., Blondeel, C., Zucchelli, E., De Luca, C., D'Avino, S., Gulotta, A., Carnevali, O., & Giorgini, E. (2022). Raman Microspectroscopy Detection and Characterisation of Microplastics in Human Breastmilk. *Polymers*, 14(13), 2700. <https://doi.org/10.3390/polym14132700>
- Riaz, A., Abid, J., Shaheen, R., Nadeem, S., & Ghumman, Z. (2025). Engineered bacteria for PET and polyethylene degradation: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(6), 119368. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.119368>
- Shalem, A., Yehezkeili, O., & Fishman, A. (2024). Enzymatic degradation of polylactic acid (PLA). *Applied Microbiology and Biotechnology*, 108(1), 413. <https://doi.org/10.1007/s00253-024-13212-4>
- Shereen, M. A., Satti, S. M., Abbasi, A., Atiq, N., Yousafi, Q., Ahmed, S., Parveen, K., & Rebouh, N. Y. (2025). Investigating the Polystyrene (PS) Biodegradation Potential of *Phanerochaete chrysosporium* Strain NA3: A Newly Isolated Soil Fungus. *Life*, 15(6), 869. <https://doi.org/10.3390/life15060869>
- Skariyachan, S., Megha, M., Kini, M. N., Mukund, K. M., Rizvi, A., & Vasist, K. (2015). Selection and screening of microbial consortia for efficient and ecofriendly degradation of plastic

- garbage collected from urban and rural areas of Bangalore, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(1), 4174. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-4174-y>
- Sowmya, H. V., Ramalingappa, Krishnappa, M., & Thippeswamy, B. (2014). Degradation of polyethylene by *Trichoderma harzianum*—SEM, FTIR, and NMR analyses. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186(10), 6577–6586. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-3875-6>
- Sowmya, H. V., Ramalingappa, Krishnappa, M., & Thippeswamy, B. (2015). Degradation of polyethylene by *Penicillium simplicissimum* isolated from local dumpsite of Shivamogga district. *Environment, Development and Sustainability*, 17(4), 731–745. <https://doi.org/10.1007/s10668-014-9571-4>
- Tao, X., Ouyang, H., Zhou, A., Wang, D., Matlock, H., Morgan, J. S., Ren, A. T., Mu, D., Pan, C., Zhu, X., Han, A., & Zhou, J. (2023). Polyethylene Degradation by a Rhodococcus Strain Isolated from Naturally Weathered Plastic Waste Enrichment. *Environmental Science & Technology*, 57(37), 13901–13911. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c03778>
- Thacharodi, A., Meenatchi, R., Hassan, S., Hussain, N., Bhat, M. A., Arockiaraj, J., Ngo, H. H., Le, Q. H., & Pugazhendhi, A. (2024). Microplastics in the environment: A critical overview on its fate, toxicity, implications, management, and bioremediation strategies. *Journal of Environmental Management*, 349, 119433. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119433>
- Thew, X. E. C., Lo, S. C., Ramanan, R. N., Tey, B. T., Huy, N. D., & Chien Wei, O. (2024). Enhancing plastic biodegradation process: strategies and opportunities. *Critical Reviews in Biotechnology*, 44(3), 477–494. <https://doi.org/10.1080/07388551.2023.2170861>
- Tiong, E., Koo, Y. S., Bi, J., Koduru, L., Koh, W., Lim, Y. H., & Wong, F. T. (2023). Expression and engineering of PET-degrading enzymes from *Microbispora*, *Nonomuraea*, and *Micromonospora*. *Applied and Environmental Microbiology*, 89(11). <https://doi.org/10.1128/aem.00632-23>
- Tokiwa, Y., Calabia, B. P., Ugwu, C. U., & Aiba, S. (2009). Biodegradability of plastics. In *International Journal of Molecular Sciences* (Vol. 10, Issue 9, pp. 3722–3742). <https://doi.org/10.3390/ijms10093722>
- 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., Guémard, E., Dalibey, M., Nomme, J., Cioci, G., Barbe, S., Chateau, M., André, 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>
- Vimala, P. P., & Mathew, L. (2016). Biodegradation of Polyethylene Using *Bacillus Subtilis*. *Procedia Technology*, 24, 232–239. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.05.031>
- 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>
- Zeenat, Elahi, A., Bukhari, D. A., Shamim, S., & Rehman, A. (2021). Plastics degradation by microbes: A sustainable approach. *Journal of King Saud University - Science*, 33(6), 101538. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101538>
- Zhang, Y., Lin, Y., Gou, H., Feng, X., Zhang, X., & Yang, L. (2022). Screening of Polyethylene-Degrading Bacteria from *Rhyzopertha Dominica* and Evaluation of Its Key Enzymes Degrading Polyethylene. *Polymers*, 14(23), 5127. <https://doi.org/10.3390/polym14235127>
- Zhou, W., Bergsma, S., Colpa, D. I., Euverink, G.-J. W., & Krooneman, J. (2023). Polyhydroxyalkanoates (PHAs) synthesis and degradation by microbes and applications towards a circular economy. *Journal of Environmental Management*, 341, 118033. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118033>