

EFEKTIVITAS KONSORSIUM BAKTERI DALAM BIOREMEDIASI LIMBAH PLASTIK SINTETIS DAN PEMETAANNYA BERBASIS DIGITAL: SEBUAH TINJAUAN LITERATUR

Erik Surahmat^{1*}

¹Program Studi Biologi, Universitas Terbuka, Tangerang Selatan, Indonesia

*Erik Surahmat: e121ksoe@gmail.com

ABSTRAK

Pencemaran limbah plastik sintesis merupakan salah satu permasalahan lingkungan global yang semakin meningkat akibat tingginya produksi plastik dan rendahnya laju degradasi alami. Bioremediasi menggunakan konsorsium bakteri menjadi alternatif yang menjanjikan karena mampu meningkatkan efisiensi degradasi melalui sinergisme metabolik, pembagian fungsi enzimatis, dan pembentukan biofilm. Artikel ini bertujuan mengkaji efektivitas konsorsium bakteri dalam biodegradasi limbah plastik sintesis serta potensi integrasinya dengan teknologi pemetaan digital untuk mendukung pengelolaan limbah yang lebih efektif dan berkelanjutan. Kajian dilakukan menggunakan metode *systematic literature review* terhadap artikel yang diperoleh sumber artikel ilmiah menggunakan kombinasi kata kunci terkait konsorsium bakteri, biodegradasi plastik, *plastisphere*, UAV, dan GIS. Hasil penelusuran memperoleh 500 artikel yang kemudian diseleksi berdasarkan relevansi, tahun publikasi, dan kesesuaian topik. Hasil kajian menunjukkan bahwa konsorsium bakteri memiliki kemampuan degradasi yang lebih tinggi dibandingkan kultur tunggal karena adanya sinergisme metabolik dan mekanisme *cross feeding*. Genus bakteri yang paling banyak dilaporkan berperan dalam degradasi plastik meliputi *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhodococcus*, dan *Ideonella*. Selain itu, teknologi *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) dan Sistem Informasi Geografis (GIS) mampu mendukung identifikasi lokasi akumulasi plastik, pemetaan sebaran pencemaran, serta pemantauan efektivitas bioremediasi secara spasial. Integrasi konsorsium bakteri dengan teknologi pemetaan digital berpotensi menghasilkan strategi pengelolaan limbah plastik yang lebih terarah, efisien, dan adaptif dalam mendukung prinsip ekonomi sirkular.

Kata kunci: konsorsium bakteri, biodegradasi plastik, pemetaan digital

1 PENDAHULUAN

Produksi plastik dunia telah melampaui 400 juta ton per tahun dan terus meningkat seiring pertumbuhan industri dan konsumsi masyarakat. Sifat plastik yang ringan, kuat, tahan korosi, dan murah menyebabkan penggunaannya semakin luas pada sektor kemasan, konstruksi, kesehatan, pertanian, dan transportasi (Ermis *et al.*, 2024). Namun demikian, karakteristik tersebut juga menyebabkan plastik sangat sulit terdegradasi secara alami sehingga menjadi salah satu pencemar lingkungan utama (Warlina, 2019).

Jenis plastik yang paling banyak ditemukan sebagai pencemar lingkungan meliputi polyethylene (PE), polypropylene (PP), polyethylene terephthalate (PET), polystyrene (PS), dan polyvinyl chloride (PVC). Akumulasi plastik di lingkungan berpotensi menyebabkan gangguan fisik, kimia, dan biologis pada ekosistem darat maupun perairan, sehingga dapat mengancam kesehatan ekosistem dan manusia (Mandal *et al.*, 2024; Salinas *et al.*, 2024).

Berbagai metode pengelolaan limbah plastik seperti landfill, insinerasi, dan daur ulang kimia telah diterapkan, namun masih menghadapi keterbatasan berupa biaya tinggi, kebutuhan energi besar, serta risiko pencemaran sekunder (Skariyachan *et al.*, 2022). Oleh karena itu, bioremediasi

menggunakan mikroorganisme berkembang sebagai alternatif yang lebih ramah lingkungan (Evania & Perdana, 2025).

Penelitian terkini menunjukkan bahwa konsorsium bakteri memiliki kemampuan degradasi yang lebih baik dibandingkan kultur tunggal karena adanya sinergi metabolik antar anggota komunitas. Konsorsium memungkinkan pembagian fungsi metabolik, pemanfaatan produk antara, serta pembentukan *biofilm* yang meningkatkan kontak antara mikroorganisme dan permukaan plastik (Cao *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2025). Selain pendekatan biologis, perkembangan teknologi digital membuka peluang baru dalam pengelolaan limbah plastik. GIS, UAV, sensor lingkungan berbasis IoT, metagenomik, dan *machine learning* dapat digunakan untuk mengidentifikasi *hotspot* pencemaran, memprediksi distribusi limbah plastik, serta memantau keberhasilan bioremediasi secara *real time* (Olamide & Badmus, 2020; Q. Zhang *et al.*, 2026).

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengulas perkembangan interdisipliner mengenai efektivitas konsorsium bakteri pendegradasi plastik sintetis dan mensinergikannya dengan pemetaan digital berbasis penginderaan jauh. Tinjauan pustaka ini diharapkan dapat mendeskripsikan perkembangan baru dengan memperhatikan beberapa pertanyaan yang belum teresolusi serta arah riset di masa mendatang. Hipotesis yang diajukan adalah bahwa penggabungan konsorsium bakteri sintetis dengan sistem monitoring digital spasial akan menghasilkan efisiensi biodegradasi yang terukur, terkendali, dan proaktif di lingkungan terbuka.

2 METODE

2.1 Prosedur Pengumpulan Data

Studi ini menggunakan metode tinjauan literatur sistematis (*systematic literature review*) untuk mengumpulkan, mengevaluasi, dan menyintesis data primer dari berbagai penelitian bereputasi (Bancong, 2025). Data penelitian yang diambil diterbitkan dalam rentang waktu sepuluh tahun terakhir (2016–2026). Penelusuran data dilakukan menggunakan pangkalan data ilmiah utama seperti *Google Scholar*, *PubMed*, *Scopus*, dan *Web of Science*. Kata kunci pencarian yang digunakan seperti "*microbial consortium*", "*plastic biodegradation*", "*polyethylene terephthalate*", "*synthetic ecology*", "*GIS mapping*", dan "*bioremediation*". Hasil penelusuran pada pangkalan data ilmiah ditemukan total 500 artikel. Selanjutnya dilakukan proses penyaringan berdasarkan judul, abstrak, relevansi topik, tahun publikasi (2016–2026), ketersediaan naskah lengkap, serta status publikasi pada jurnal ilmiah yang telah melalui proses *peer review*. Artikel yang tidak relevan, duplikat, dan tidak memenuhi kriteria inklusi dikeluarkan dari analisis. Sebanyak 500 artikel teridentifikasi pada tahap awal. Setelah penghapusan duplikat dan proses screening berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi, diperoleh 35 artikel yang memenuhi syarat untuk dianalisis. Dari jumlah tersebut, 20 artikel yang paling relevan dan memiliki data empiris yang kuat digunakan sebagai sumber utama. Artikel yang lolos seleksi kemudian dianalisis secara kualitatif untuk mengidentifikasi peran konsorsium bakteri, mekanisme biodegradasi plastik, karakteristik *plastisphere*, serta pemanfaatan teknologi UAV dan GIS dalam pemantauan pencemaran plastik.

2.2 Sintesis dan Kriteria Penilaian Interdisipliner

Kriteria inklusi artikel yang dipilih adalah artikel jurnal ilmiah primer *peer review* yang membahas: (1) mekanisme biodegradasi polimer plastik sintetis (PE, PP, PS, PET, dan PVC) oleh bakteri; (2) pembentukan *biofilm* dan dinamika komunitas *plastisphere*; (3) pemetaan spasial sampah plastik menggunakan UAV atau satelit; dan (4) aplikasi sensor IoT untuk monitoring bioremediasi. Kriteria eksklusi meliputi: (1) artikel yang tidak tersedia dalam teks lengkap; (2)

studi yang hanya berfokus pada degradasi abiotik atau menggunakan fungi tanpa keterlibatan bakteri; (3) publikasi berupa opini; (4) studi yang tidak menyediakan data kuantitatif tentang efisiensi degradasi plastik

Data yang diperoleh kemudian dikategorikan secara tematis ke dalam analisis komparatif kinerja degradasi bakteri dan arsitektur sistem integrasi geospasial. Sintesis ini ditujukan untuk mendeskripsikan perkembangan terbaru serta signifikansi pendekatan interdisipliner dengan mengidentifikasi berbagai kesenjangan penelitian (*research gap*) yang masih terbuka serta arah pengembangannya di masa mendatang (Priyono *et al.*, 2025).

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Keunggulan Konsorsium Bakteri Dibandingkan Isolat Tunggal

Sintesis literatur secara konsisten menunjukkan bahwa konsorsium bakteri lebih unggul dalam mendegradasi plastik sintesis dibandingkan isolat tunggal. Sebagai contoh, konsorsium yang mengandung *Bacillus subtilis*, *Fusarium oxysporum*, dan *Alternaria alternata* (C2) serta *Bacillus subtilis* dan *Pseudomonas allopurida* (C4) menunjukkan penurunan berat yang signifikan pada LDPE daur ulang (17.65%) dan LLDPE murni (16.94%) hanya dalam 30 hari (Salinas *et al.*, 2024).

Studi lain oleh Saeed *et al.* (2022) melaporkan bahwa konsorsium yang diisolasi dari tanah terkontaminasi plastik mampu menurunkan berat film LDPE hingga 32.2% dalam 4 minggu, jauh lebih tinggi dibandingkan degradasi oleh kultur tunggal. Keunggulan ini terutama disebabkan oleh sinergisme metabolik, di mana produk antara dari degradasi oleh satu strain menjadi substrat bagi strain lain (*cross feeding*), sehingga mencegah akumulasi produk inhibisi dan mendorong degradasi yang lebih sempurna (Cao *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2025)

3.2 Mikroorganisme Kunci dan Mekanisme Enzimatik

Analisis pustaka mengidentifikasi genera bakteri kunci yang sering muncul dalam konsorsium pendegradasi plastik, yaitu *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhodococcus* dan *Ideonella* (Tabel 1). *Pseudomonas aeruginosa* dan *Bacillus* spp. sering diisolasi dari lingkungan terkontaminasi plastik dan dikenal memproduksi berbagai enzim pendegradasi (Barwant *et al.*, 2026; Liu *et al.*, 2025).

Tabel 1. Peran genera bakteri kunci dalam konsorsium pendegradasi plastik

Genus Bakteri	Target Polimer Utama	Mekanisme Enzimatik Utama	Efektivitas dalam Konsorsium	Referensi
<i>Pseudomonas</i>	PE, PP, PET	Alkana hidroksilase, lakkase, PETase	Dominan sebagai penginisiasi oksidasi dan pembentukan <i>biofilm</i>	Barwant <i>et al.</i> 2026; Li <i>et al.</i> 2025
<i>Bacillus</i>	PET, LDPE, HDPE	Kutinase, lipase, lakkase	Berperan dalam hidrolisis dan stabilisasi konsorsium melalui pembentukan spora	Saeed <i>et al.</i> , 2022; Salinas <i>et al.</i> , 2024
<i>Rhodococcus</i>	PE, PP	Sistem metabolisme alkana, adhesi kuat	Efektif pada polimer hidrofobik, sering	Zhang <i>et al.</i> , 2023

Genus Bakteri	Target Polimer Utama	Mekanisme Enzimatik Utama	Efektivitas dalam Konsorsium	Referensi
			menjadi pionir kolonisasi	
<i>Ideonella</i>	PET	PETase dan MHETase	Mampu menguraikan ET kristalinitas rendah hingga hampir sempurna	Yoshida <i>et al.</i> , 2016

Mekanisme degradasi sangat bergantung pada jenis polimer. Untuk PET yang memiliki ikatan ester, enzim hidrolase seperti PETase dan MHETase, yang pertama kali diidentifikasi pada *Ideonella sakaiensis*, memainkan peran penting dengan memecah polimer menjadi monomer tereftalat (TPA) dan etilen glikol (EG) (Yoshida *et al.*, 2016; C. Zhang *et al.*, 2023). Untuk polimer dengan rantai karbon jenuh seperti PE dan PP, enzim oksidoreduktase seperti lakkase, mangan peroksidase, dan alkana hidroksilase diperlukan untuk menginisiasi oksidasi rantai karbon yang inert (Pérez-García *et al.*, 2025; Skariyachan *et al.*, 2022).

3.3 Peran *Plastisphere* dan *Biofilm* dalam Degradasi

Keberhasilan konsorsium sangat terkait dengan kemampuannya membentuk *biofilm* pada permukaan plastik, yang dikenal sebagai *plastisphere*. *Biofilm* menyediakan lingkungan mikro yang kondusif untuk pertukaran gen dan metabolit, melindungi sel dari tekanan lingkungan, serta memungkinkan konsentrasi enzim ekstraseluler di dekat substrat (Amaral-Zettler *et al.*, 2020; Bhattacharya *et al.*, 2026).

Studi evolusi laboratorium menunjukkan bahwa seleksi berulang pada plastik sebagai sumber karbon tunggal mendorong evolusi komunitas *biofilm* yang lebih stabil dan produktif, dengan peningkatan ketebalan *biofilm* dan proporsi sel hidup. Dalam struktur *biofilm* ini, terjadi pembagian ruang dan tugas, di mana strain seperti *Stutzerimonas stutzeri* berada di lapisan basal yang bersentuhan langsung dengan plastik, sementara strain lain seperti *Enterobacter* dan *Enterococcus* membentuk lapisan pelindung di atasnya (Howard *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2025).

3.4 Pemetaan Digital untuk Optimalisasi Bioremediasi

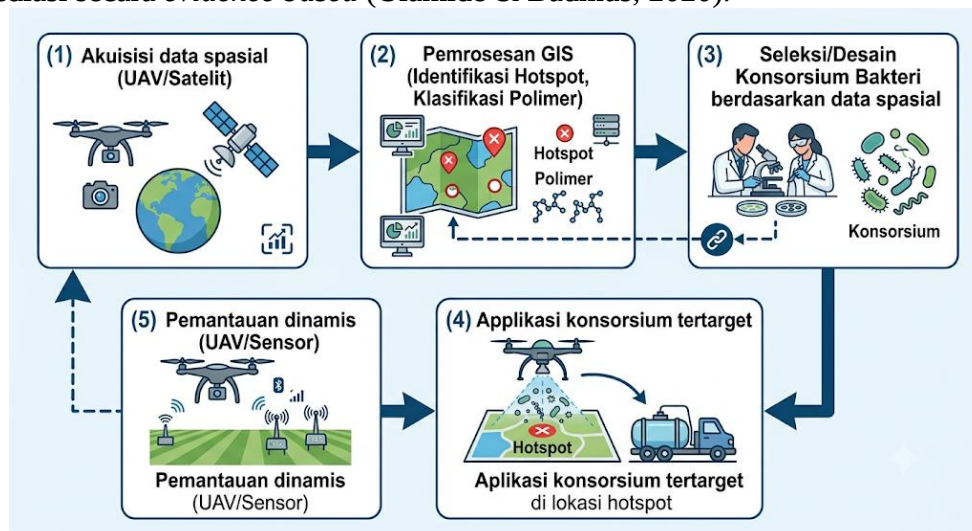
Efektivitas bioremediasi di lapangan sangat bergantung pada identifikasi lokasi akumulasi plastik yang akurat. Teknologi pemetaan digital menawarkan solusi untuk tantangan ini (Viel *et al.*, 2023). Teknologi pemetaan digital, terutama melalui integrasi citra Unmanned Aerial Vehicle (UAV) dan Sistem Informasi Geografis (GIS), menawarkan solusi untuk tantangan ini dengan menyediakan data spasial resolusi tinggi yang dapat diintegrasikan dengan analitik prediktif (Jakovljevic *et al.*, 2020; Olamide & Badmus, 2020).

Penggunaan UAV yang dilengkapi kamera RGB telah terbukti menjadi metode yang efektif dan efisien untuk memantau sampah plastik di badan air. Penelitian oleh Jakovljevic *et al.* (2020) mengembangkan metode segmentasi semantik *end fineto end* menggunakan arsitektur U-Net dengan encoder ResUNet50 yang di *fine tune* pada dataset citra UAV. Metode ini mampu mendeteksi, mengekstraksi, dan mengklasifikasikan plastik terapung (seperti OPS, Nylon, dan PET) dengan akurasi tinggi (F1-score > 0,86) dan mampu mendeteksi partikel plastik sekecil 0,01

m² (1 cm²) pada citra dengan resolusi spasial 4 mm/piksel. Temuan ini sejalan dengan laporan Ironside *et al* (2025) yang mengimplementasikan solusi serupa di Ghana melalui inisiatif 'Plastic Not Seen', di mana survei UAV digunakan untuk menetapkan data dasar tingkat sampah dan memantau kepatuhan program pembersihan.

Sebuah studi kasus terkini oleh Baburaj *et al.* (2023) di Danau Ukkadam, Coimbatore, India, semakin memperkuat pentingnya pendekatan ini. Penelitian tersebut menggabungkan citra UAV untuk menilai kuantitas plastik terapung (makroplastik) dengan teknik klasifikasi spektral, sekaligus melakukan pengambilan sampel air untuk mengidentifikasi mikroplastik melalui studi mikroskopis di laboratorium. Pendekatan integratif ini menghasilkan peta sebaran makroplastik dan identifikasi keberadaan mikroplastik di badan air, yang merupakan informasi krusial untuk merancang strategi remediasi yang tepat sasaran.

Selain deteksi, data spasial yang dihasilkan oleh UAV dan pengambilan sampel lapangan dapat diintegrasikan ke dalam platform GIS untuk analisis risiko lingkungan yang lebih komprehensif. Olamide & Badmus (2020) mengembangkan model GIS-Enhanced Environmental Risk Assessment Model yang menggabungkan berbagai lapisan data spasial, termasuk kimia tanah, hidrogeologi, pola aliran air tanah, kedekatan dengan penerima sensitif (pemukiman, sekolah, badan air), dan data kontaminasi historis. Dengan menggunakan teknik interpolasi spasial (seperti kriging atau Inverse Distance Weighted), pemetaan *hotspot* kontaminasi, dan analisis *weighted overlay*, model ini menghasilkan indeks risiko komposit yang memungkinkan prioritas zona remediasi secara *evidence based* (Olamide & Badmus, 2020).



Gambar 1. Kerangka kerja konseptual integrasi konsorsium bakteri dan pemetaan digital untuk bioremediasi plastik

Hal ini terlihat pada konsep yang digambarkan dalam Gambar 1, yang memvisualisasikan siklus tertutup integrasi antara pemetaan digital dan bioremediasi konsorsium bakteri. Kerangka kerja ini dimulai dari akuisisi data spasial menggunakan UAV atau satelit untuk memetakan sebaran sampah plastik di permukaan air atau daratan. Data mentah tersebut kemudian diproses dalam GIS untuk mengidentifikasi titik-titik akumulasi (*hotspot*) dan mengklasifikasikan jenis polimer berdasarkan karakteristik spektralnya. Tahap ini sangat penting karena informasi tentang jenis polimer dominan dan kondisi hidrologi lokasi menjadi dasar untuk menyeleksi atau merancang konsorsium bakteri yang paling sesuai misalnya, konsorsium yang

mengandung *Ideonella sakaiensis* untuk PET atau *Pseudomonas* dan *Rhodococcus* untuk PE/PP yang lebih hidrofobik (Barwant *et al.*, 2026; Yoshida *et al.*, 2016; Q. Zhang *et al.*, 2026).

Konsorsium yang telah disesuaikan kemudian diaplikasikan secara tertarget pada lokasi *hotspot* yang telah diidentifikasi, memastikan intervensi difokuskan pada area dengan konsentrasi polutan tertinggi dan potensi dampak terbesar. Tahap akhir dari siklus ini adalah pemantauan dinamis menggunakan UAV dan sensor lingkungan (misalnya, sensor kualitas air berbasis IoT) yang dilakukan secara berkala. Pemantauan ini berfungsi untuk mengevaluasi efektivitas degradasi, mendeteksi pergerakan konsorsium, serta mengidentifikasi munculnya *hotspot* baru, sekaligus menyediakan data umpan balik yang kembali ke tahap awal, sehingga strategi remediasi dapat terus disesuaikan secara adaptif dan berkelanjutan (Qattan, 2025).

Dengan menggabungkan data UAV tentang sebaran makroplastik, data laboratorium tentang konsentrasi mikroplastik, dan data GIS tentang kerentanan lingkungan (seperti kedekatan dengan pemukiman atau sumber air minum), kegiatan bioremediasi dapat diarahkan secara tepat sasaran. Sebagai contoh, zona dengan akumulasi mikroplastik tinggi yang berada di dekat daerah aliran sungai (riverine) dan permukiman padat dapat diprioritaskan untuk intervensi bioaugmentasi dengan konsorsium bakteri yang telah terbukti efektif. Integrasi teknologi pemetaan digital (UAV dan GIS) dengan metode survei lapangan konvensional tidak hanya mengatasi keterbatasan metode survei manual yang padat karya dan subjektif, tetapi juga menyediakan kerangka kerja spasial yang penting untuk merancang, mengimplementasikan, dan memantau efektivitas strategi bioremediasi berbasis konsorsium bakteri secara berkelanjutan. Pendekatan terintegrasi ini, seperti yang dicontohkan oleh Baburaj *et al* (2023) menawarkan model yang dapat direplikasi untuk pengelolaan polusi plastik di badan air perkotaan lainnya.

4 KESIMPULAN

Konsorsium bakteri terbukti secara signifikan lebih efektif dalam bioremediasi limbah plastik sintesis dibandingkan isolat tunggal, dengan keunggulan utama pada sinergisme metabolik melalui pembagian tugas dan *cross feeding*. Bakteri dari genus *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhodococcus* dan *Ideonella* adalah bakteri anggota kunci yang memproduksi beragam enzim seperti hidrolase dan oksidoreduktase. Efektivitas ini diperkuat oleh kemampuan konsorsium membentuk *biofilm* dalam *plastisphere*. Untuk transisi dari laboratorium ke aplikasi lapangan, integrasi teknologi pemetaan digital seperti UAV dan GIS sangat penting untuk mengidentifikasi titik-titik akumulasi plastik secara akurat, sehingga memungkinkan penerapan strategi bioremediasi yang terarah, efisien, dan terukur. Pendekatan terintegrasi ini menawarkan jalan yang menjanjikan menuju pengelolaan limbah plastik yang berkelanjutan dan mendukung prinsip ekonomi sirkular.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih kepada keluarga dan pihak-pihak yang telah membantu dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Amaral-Zettler, L., Zettler, E., & Mincer, T. (2020). Ecology of the *plastisphere*. *Nature Reviews Microbiology*, 18. <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0308-0>
- Baburaj, K., Jay, B., & John Wessley, Dr. G. J. (2023). *Quantification of Floating Plastics Using UAV Images and Identification of Microplastics in Ukkadam Tank, Coimbatore, Tamil Nadu* (pp. 333–348). https://doi.org/10.1007/978-3-031-37596-5_25

- Bancong, H. (2025). *Strategi revidi riset dan konstruksi teori: Metode, analisis, dan studi kasus*. Indonesia Emas Group.
- Barwant, M. M., Ali, U. M., & Tolani, T. R. (2026). Microplastic pollution in aquatic environments: a systematic review of bacterial degradation efficacy, mechanisms, and future pathways. In *Frontiers in Earth Science* (Vol. 14). Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/feart.2026.1752600>
- Bhattacharya, S., Kolandhasamy, P., Mandal, A., Rajaram, R., & Darbha, G. K. (2026). Biofilm-mediated surface depolymerization of multiple synthetic polymers by mangrove-derived bacterial consortia. *Journal of Hazardous Materials*, 507. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2026.141847>
- Cao, Z., Yan, W., Ding, M., & Yuan, Y. (2022). Construction of microbial consortia for microbial degradation of complex compounds. In *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* (Vol. 10). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.1051233>
- Ermis, H., Collins, C., Kumar Saha, S., & Murray, P. (2024). Beyond Visibility: Microorganisms for tackling plastic and microplastic problems for cleaner future. In *Chemical Engineering Journal* (Vol. 497). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.154585>
- Evania, A., & Perdana, A. T. (2025). Aplikasi Mikroorganisme untuk Bioremediasi Tanah Tercemar: Suatu Tinjauan Pustaka. *Mikroba: Jurnal Ilmu Tanaman, Sains Dan Teknologi Pertanian*, 2(3), 114–126.
- Howard, S. A., Carr, C. M., Sbahtu, H. I., Onwukwe, U., López, M. J., Dobson, A. D. W., & McCarthy, R. R. (2023). Enrichment of native plastic-associated *biofilm* communities to enhance polyester degrading activity. *Environmental Microbiology*, 25(12), 2698–2718. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/1462-2920.16466>
- Ironside, S., Jakovljevic, G., & Tagoe, N. D. (2025, January 14). Mapping the plastic using UAV imagery. <https://www.Gim-International.Com/Content/Article/Mapping-the-Plastic-Using-Uav-Imagery>.
- Jakovljevic, G., Govedarica, M., & Alvarez-Taboada, F. (2020). A deep learning model for automatic plastic mapping using unmanned aerial vehicle (UAV) data. *Remote Sensing*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/RS12091515>
- Li, S., Liu, J., Su, L., Qiu, J., Lin, L., Kovács, Á. T., & Lin, Y. (2025). Synergistic biodegradation of polyethylene by experimentally evolved bacterial *biofilms*. *ISME Journal*, 19(1). <https://doi.org/10.1093/ismejo/wraf223>
- Liu, W., Wang, J., & Habibi, M. (2025). Towards a circular economy: Harnessing bacteria for sustainable plastic waste degradation. In *Process Biochemistry* (Vol. 159, pp. 82–101). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2025.08.013>

- Mandal, M., Roy, A., Popek, R., & Sarkar, A. (2024). Micro- and nano- plastic degradation by bacterial enzymes: A solution to “White Pollution.” In *Microbe (Netherlands)* (Vol. 3). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100072>
- Olamide, A. L., & Badmus, O. (2020). GIS-Enhanced Environmental Risk Assessment Model for High-Priority Industrial Redevelopment Sites. *International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation*, 1(5), 595–609. <https://doi.org/10.54660/ijmrge.2020.1.5.595-609>
- Pérez-García, P., Sass, K., Wongwattanasat, S., Amann, J., Feuerriegel, G., Neumann, T., Bäse, N., Schmitz, L. S., Dierkes, R. F., Gurschke, M. F., Wypych, A., Bounabi, H., de Divitiis, M., Vollstedt, C., & Streit, W. R. (2025). Microbial plastic degradation: enzymes, pathways, challenges, and perspectives. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 89(4). <https://doi.org/10.1128/membr.00087-24>
- Priyono, A., Setianingrum, A., Rachman, M. A., Sudirman, S., & Pannen, P. (2025). Sintesis metodologi penelitian kuantitatif dalam kajian informasi: tren, inovasi, dan arah pengembangan di era transformasi digital. *Pustaka Karya: Jurnal Ilmiah Ilmu Perpustakaan Dan Informasi*, 13(2), 295–310.
- Qattan, S. Y. A. (2025). Harnessing bacterial consortia for effective bioremediation: targeted removal of heavy metals, hydrocarbons, and persistent pollutants. *Environmental Sciences Europe*, 37(1), 85.
- Saeed, S., Iqbal, A., & Deeba, F. (2022). Biodegradation study of Polyethylene and PVC using naturally occurring plastic degrading microbes. *Archives of Microbiology*, 204. <https://doi.org/10.1007/s00203-022-03081-8>
- Salinas, J., Martínez-Gallardo, M. R., Jurado, M. M., Suárez-Estrella, F., López-González, J. A., Estrella-González, M. J., Toribio, A. J., Carpena-Istán, V., Barbani, N., Cappello, M., Cinelli, P., & López, M. J. (2024). Microbial consortia for multi-plastic waste biodegradation: Selection and validation. *Environmental Technology and Innovation*, 36. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103887>
- Skariyachan, S., Taskeen, N., Kishore, A. P., & Krishna, B. V. (2022). Recent advances in plastic degradation – From microbial consortia-based methods to data sciences and computational biology driven approaches. In *Journal of Hazardous Materials* (Vol. 426). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.128086>
- Viel, T., Manfra, L., Zupo, V., Libralato, G., Cocca, M., & Costantini, M. (2023). Biodegradation of plastics induced by marine organisms: future perspectives for bioremediation approaches. *Polymers*, 15(12), 2673.
- Warlina, L. (2019). Pengelolaan sampah plastik untuk mitigasi bencana lingkungan. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 89–108.
- 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, 1196–1199.
<https://doi.org/10.1126/science.aad6359>

- Zhang, C., Mu, Y., Li, T., Jin, F. J., Jin, C. Z., Oh, H. M., Lee, H. G., & Jin, L. (2023). Assembly strategies for polyethylene-degrading microbial consortia based on the combination of omics tools and the “*Plastisphere*.” In *Frontiers in Microbiology* (Vol. 14). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1181967>
- Zhang, Q., Zhang, Z., Zhang, Z., Qin, G., Jin, M., Chen, B., Yu, Y., Wang, T., Wang, M., Lu, T., Zhu, D., Cui, L., Qian, H., Rillig, M. C., & Zhu, Y. G. (2026). Potential plastic biodegradation in lakes worldwide. *Innovation*. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2026.101338>