

EKSPLORASI BAKTERI *IDEONELLA SAKAIENSIS* SEBAGAI AGEN BIODEGRADASI LIMBAH PLASTIK JENIS PET

Andi Nurfaizah Yusuf ¹

Wirna Arsyad ²

Yusminah Hala ³

^{1,2,3} Program Studi Pendidikan Biologi, Universitas Negeri Makassar

E-mail: andinurfaizahyusuf@gmail.com¹, wirnaarsyadxiak13@gmail.com², yushala@unm.ac.id³

History Article

Received: Maret, 2025

Approved: Mei, 2025

Published: Juni, 2025

Keywords:

biodegradation,
ideonella sakaensi,
plastic waste,
microorganisms,
PETase

Abstract

Polyethylene terephthalate (PET) is a type of plastic that is difficult to decompose, causing significant environmental impacts. PET biodegradation using microorganisms is a sustainable solution. One of the potential bacteria in this process is Ideonella sakaiensis, which is able to produce the PETase enzyme to decompose PET faster. This study aims to examine the potential of Ideonella sakaiensis in PET biodegradation through the enzymes it produces. The method used is a literature review from various scientific sources regarding the characteristics, degradation mechanisms, and the potential for genetic engineering to increase the efficiency of PET degradation. The results of the study showed that I. sakaiensis was able to accelerate PET degradation 5–120 times faster than natural methods. The potential use of genetic engineering by transforming the PETase gene into Escherichia coli also increases the efficiency of PET plastic degradation.

How to Cite

Yusuf, A.N., Arsyad, W & Hala, Y. 2025. Eksplorasi Bakteri *Ideonella Sakaiensis* Sebagai Agen Biodegradasi Limbah Plastik Jenis Pet. *Edubiolock*. Vol. 6 No. 2 PP 37-46.

PENDAHULUAN

Lingkungan merupakan bagian yang tidak terpisahkan dari kehidupan seluruh makhluk hidup di bumi (Yusuf *et al.*, 2023). Seiring dengan perkembangan teknologi yang semakin pesat, produksi barang dan bahan industri pun meningkat, baik untuk keperluan domestik maupun industri. Sayangnya, peningkatan ini berdampak pada semakin banyaknya limbah yang mencemari lingkungan (Abduh, 2018; Nainggolan *et al.*, 2023). Limbah sendiri merupakan produk sampingan dari aktivitas makhluk hidup yang memiliki dampak negatif terhadap manusia dan ekosistem. Akumulasi limbah, terutama yang sulit terurai seperti plastik, menjadi masalah lingkungan yang mendesak dan membutuhkan solusi yang efektif (Gusty *et al.*, 2023; Budirman *et al.*, 2025).

Plastik adalah salah satu jenis limbah yang paling banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari. Sifatnya yang kuat, ringan, dan tahan lama menjadikannya bahan pilihan utama dalam berbagai produk industri. Namun, ketahanan plastik terhadap degradasi alami menyebabkan akumulasi limbah plastik yang berkelanjutan, mencemari tanah dan air, serta membahayakan kehidupan satwa liar (Siregar *et al.*, 2024). *Polyethylene terephthalate* (PET) merupakan salah satu jenis plastik yang paling umum digunakan, terutama dalam pembuatan botol air minum, kemasan makanan, dan tekstil sintetis. Struktur semi-kristalnya membuat molekul-molekul PET tersusun padat, sehingga sulit ditembus oleh enzim dan memerlukan waktu yang sangat lama untuk terurai secara alami (Arwini, 2022).

Menanggapi permasalahan ini, para ilmuwan terus mencari solusi inovatif, salah satunya melalui biodegradasi menggunakan mikroorganisme (Gandini *et al.*, 2022). Penelitian terbaru menunjukkan bahwa beberapa mikroorganisme, seperti bakteri, jamur, dan alga, memiliki potensi dalam mendegradasi plastik (Asmi *et al.*, 2022). Di antara berbagai mikroorganisme

tersebut, *Ideonella sakaiensis* menjadi perhatian utama karena merupakan bakteri pertama yang ditemukan mampu menguraikan PET. Bakteri ini menghasilkan enzim PETase dan MHETase yang secara spesifik memecah PET menjadi monomer yang lebih sederhana, seperti asam tereftalat dan etilen glikol, yang kemudian dapat dimetabolisme lebih lanjut (Yoshida *et al.*, 2016; Taniguchi *et al.*, 2019)

Potensi *Ideonella sakaiensis* dalam mendegradasi PET telah mendorong penelitian lebih lanjut untuk memahami mekanismenya serta faktor-faktor yang dapat meningkatkan efisiensinya. Penelitian terbaru juga menyoroti kemungkinan rekayasa genetik dengan mentransformasikan gen PETase ke mikroorganisme lain, seperti *Escherichia coli*, guna meningkatkan kapasitas degradasi PET (Pirillo *et al.*, 2021; Yoshida *et al.*, 2021). Dengan kemampuannya yang unik, *I. sakaiensis* membuka peluang besar sebagai agen bioremediasi dalam upaya mengatasi permasalahan limbah plastik secara lebih ramah lingkungan.

Biodegradasi merupakan proses pemecahan senyawa kompleks oleh mikroorganisme menjadi senyawa yang lebih sederhana melalui mekanisme enzimatik (Abidin *et al.*, 2023). Dalam konteks pengolahan limbah plastik, biodegradasi menawarkan solusi berkelanjutan dengan mengubah polutan organik menjadi produk yang lebih ramah lingkungan. *Ideonella sakaiensis* berperan dalam proses ini dengan menghasilkan enzim PETase yang mampu memecah struktur PET secara efisien (Musdary *et al.*, 2021). Kajian ini bertujuan untuk menganalisis potensi *I. sakaiensis* dalam mengkode gen PETase serta mengevaluasi efektivitasnya dalam mendegradasi limbah plastik PET. Selain itu, penelitian ini juga akan membahas mekanisme kerja bakteri ini dalam proses biodegradasi serta peluang

pengembangannya sebagai solusi bioteknologi untuk mengatasi pencemaran plastic

METODE

Kajian literatur menjadi metode utama dalam penelitian ini. Data dan informasi dikumpulkan dari berbagai sumber ilmiah untuk memberikan tinjauan yang komprehensif mengenai limbah plastik PET, potensi biodegradasi oleh bakteri *Ideonella sakaiensis*, dan aspek genetik yang terlibat dalam proses degradasi.

HASIL

Limbah Sampah Plastik PET (*Polyethylene Terephthalate*)

Masalah limbah plastik merupakan tantangan lingkungan yang sulit diatasi. Salah satu penyebab utama permasalahan ini adalah kurangnya kesadaran masyarakat dalam mengelola dan membuang limbah dengan benar. Menurut World Health Organization (WHO), limbah adalah material yang tidak lagi digunakan dalam aktivitas manusia sehingga dibuang (Arifin *et al*, 2023). Hal ini diperkuat oleh pendapat Hasibuan 2023, yang menyebutkan bahwa limbah merupakan benda yang terbuang dan tidak dapat dimanfaatkan kembali. Anggraeni *et al*, (2022) juga menekankan pentingnya pengelolaan limbah agar tidak membahayakan manusia maupun lingkungan. Dari berbagai pendapat tersebut, dapat disimpulkan bahwa limbah adalah zat sisa yang harus dikelola dengan baik untuk mengurangi dampak negatifnya.

Berdasarkan sifatnya, limbah dapat dikategorikan menjadi limbah organik dan anorganik. Limbah organik, seperti limbah rumah tangga, mudah terurai secara alami, sedangkan limbah anorganik, seperti plastik, logam, dan karet, sulit untuk terurai dan dapat mencemari lingkungan dalam jangka panjang. Plastik menjadi salah satu penyumbang limbah terbesar, dengan tingkat konsumsi dan pembuangan yang tinggi (Adisa, 2024; Ubaidillah *et al*, 2023). Limbah plastik menyumbang sekitar 15%

dari total produksi limbah nasional, dengan tingkat pertumbuhan mencapai 14,7% per tahun, menjadikannya sumber pencemaran terbesar kedua setelah limbah organik.

Plastik dikenal memiliki daya tahan yang sangat tinggi dan sulit terurai secara alami. Plastik memiliki sifat yang resisten terhadap degradasi dan mampu bertahan dalam lingkungan selama bertahun-tahun tanpa mengalami perubahan signifikan. Plastik merupakan polimer sintetik berantai panjang yang sering digunakan untuk meningkatkan efisiensi dan daya tahan suatu produk (Indraswati, 2017). United Nations Environment Programme (UNEP) dalam Purnomo, 2021 mengklasifikasikan plastik menjadi enam jenis berdasarkan bahan pembuatannya, yaitu PET (*Polyethylene Terephthalate*), PP (*Polypropylene*), PVC (*Polyvinyl Chloride*), LDPE (*Low-Density Polyethylene*), HDPE (*High-Density Polyethylene*), dan PS (*Polystyrene*). Dari berbagai jenis plastik tersebut, PET menjadi perhatian utama dalam penelitian biodegradasi karena penggunaannya yang luas dalam kemasan dan limbahnya yang sulit terurai secara alami.

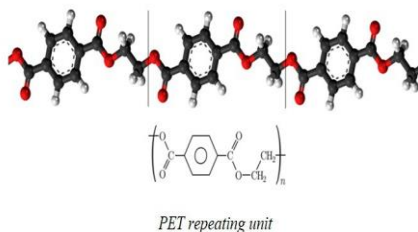


Gambar 1. Jenis-jenis kandungan plastik

PET banyak digunakan dalam industri karena sifatnya yang kuat, kaku, serta tahan terhadap bahan kimia dan panas. PET juga memiliki daya serap uap air yang rendah, sehingga sangat cocok digunakan untuk pembuatan botol minuman, kemasan makanan, dan produk

lainnya (Iman, 2023). Sifat dan karakteristik material plastik dan bahan aditif. Struktur semi-kristal pada PET membuatnya memiliki kepadatan molekuler yang tinggi, sehingga sulit ditembus oleh enzim alami dan membutuhkan waktu yang sangat lama untuk terurai secara alami. Oleh karena itu, diperlukan solusi inovatif untuk mempercepat proses degradasi plastik PET guna mengurangi dampak pencemarannya terhadap lingkungan.

Kesulitan utama dalam degradasi PET disebabkan oleh sifat fisiknya yang kuat terhadap pelarut dan gas serta kemampuannya untuk mempertahankan bentuknya dalam suhu tinggi (Fatma *et al*, 2023). PET termasuk dalam kelompok polimer termoplastik, yang memiliki rantai karbon panjang dan ikatan kimia yang kuat, membuatnya sulit diurai oleh enzim atau pelarut alami (Asmi, 2020). Polimer termoplastik ini memiliki fleksibilitas tinggi terhadap perubahan suhu, sehingga dapat dibentuk ulang ketika dipanaskan. Namun, sifat inilah yang membuatnya bertahan dalam lingkungan selama bertahun-tahun sebelum mengalami degradasi alami (Nurmayanti *et al*, 2024)



Gambar 2. Ikatan kimia *Polyethylene terephthalate*

Polyethylene sebagai bahan dasar PET mengalami serangkaian proses kimia yang memperkuat struktur ikatan karbonnya, sehingga menjadi lebih sulit diuraikan oleh mikroorganisme alami (Mohanan *et al*, 2020). Karena tidak terbentuk secara alami, proses degradasi PET di lingkungan memerlukan waktu yang sangat panjang. Menurut Taniguchi *et al* (2019), pengikatan karbon dalam PET memerlukan energi yang besar, sehingga tidak mudah terurai oleh mikroorganisme

secara alami. Dengan demikian, penelitian mengenai metode biodegradasi menggunakan mikroorganisme menjadi sangat penting untuk mengatasi permasalahan limbah plastik ini.

Potensi Bakteri *Ideonella sakaiensis*

Salah satu bakteri yang berperan dalam proses degradasi plastik adalah *Ideonella sakaiensis*. Bakteri ini termasuk dalam genus *Ideonella*, famili Comamonadaceae, serta kelas *Betaproteobacteria* (Kaur *et al*, 2023). *I. sakaiensis* memiliki kemampuan khusus untuk mensekresikan enzim PETase yang memungkinkan degradasi plastik jenis Polyethylene terephthalate (PET) menjadi senyawa yang lebih sederhana (Maity *et al*, 2021). Sebagai bakteri Gram-negatif, *I. sakaiensis* mampu memecah struktur plastik yang mengandung komponen kimia kompleks seperti PET. Menurut, bakteri ini memiliki karakteristik berbentuk koloni bulat dengan diameter sekitar 0,5–1 mm, memiliki alat gerak berupa flagela, serta dapat berwarna kuning atau tidak berwarna. Selain itu, berdasarkan penelitian, *I. sakaiensis* bersifat aerobik mesofilik, berbentuk batang lurus atau sedikit melengkung, tidak membentuk spora, dan memiliki aktivitas positif terhadap katalase dan oksidase (Azizah, 2022).



Gambar 3. Bakteri *Ideonella sakaensis* berada pada objek plastik.

Kemampuan *I. sakaiensis* dalam mendegradasi PET didasarkan pada interaksinya dengan permukaan plastik untuk mengkatalisis proses degradasi (Feng *et al*, 2021). Efektivitas bakteri ini dalam menghidrolisis PET telah dibuktikan melalui berbagai pengujian. Struktur enzim yang dimiliki oleh *I.*

sakaiensis sangat mendukung proses degradasi karena mengandung lipatan α/β -hidrolase yang dapat mengubah PET menjadi senyawa mono-(2-hidroksietil) tereftalat (MHET) (Feng *et al.*, 2021). Selain PETase, *I. sakaiensis* juga mensekresikan enzim cutinase, yang berperan penting dalam pemecahan PET. Enzim ini memiliki tingkat efektivitas yang tinggi dalam menguraikan plastik, sehingga membuat *I. sakaiensis* menjadi salah satu mikroorganisme yang potensial dalam proses biodegradasi limbah plastik (Maity *et al.*, 2021).

Penelitian yang dilakukan oleh Din *et al.* (2023) menunjukkan bahwa beberapa mikroorganisme mampu menghasilkan enzim yang dapat menghidrolisis PET, seperti lipase, esterase, carboxylesterase, dan cutinase. Penelitian lebih lanjut yang dilakukan oleh ilmuwan Jepang Yoshida dan kawan-kawan pada tahun 2016 juga mengungkapkan bahwa strain *I. sakaiensis* 201-F6 mampu menguraikan plastik dengan cara mensekresikan enzim PETase, yang berperan dalam memutus ikatan kimia PET. *I. sakaiensis* menggunakan dua enzim utama dalam proses ini, yaitu PETase dan MHETase, yang bekerja sama untuk mengubah PET menjadi senyawa yang lebih sederhana dan mudah terurai. Enzim MHETase berfungsi untuk menghidrolisis MHET menjadi asam tereftalat dan etilen glikol, yang kemudian dapat dimanfaatkan oleh bakteri sebagai sumber energi.

Proses biodegradasi, *I. sakaiensis* memanfaatkan enzim yang dihasilkannya, seperti terephthalic acid dan ethylene glycol, untuk menguraikan PET (Taniguchi *et al.*, 2019) dalam penelitiannya menunjukkan bahwa efisiensi degradasi PET oleh bakteri ini dapat ditingkatkan melalui rekayasa genetik, yang memungkinkan proses penguraian berlangsung hingga 5–120 kali lebih cepat dibandingkan degradasi alami. Efektivitas bakteri ini dalam mendegradasi PET dapat diuji dengan mengamati perubahan berat plastik setelah perlakuan dengan enzimnya. Berdasarkan penelitian, enzim PETase yang dihasilkan oleh *I. sakaiensis* mampu

memecah permukaan plastik melalui reaksi hidrolisis.

Kecepatan biodegradasi PET oleh *I. sakaiensis* dapat mencapai 5–120 kali lebih cepat dibandingkan metode konvensional. Namun, efektivitasnya tergantung pada kualitas plastik yang akan diuraikan. PET dengan kualitas rendah umumnya dapat terdegradasi dalam waktu enam minggu, sedangkan plastik PET berkualitas tinggi membutuhkan perlakuan tambahan, seperti pemanasan, sebelum dapat terurai. Untuk mencapai kondisi optimum, bakteri ini memerlukan suhu sekitar 30°C agar enzim yang dihasilkannya dapat bekerja secara maksimal dalam mendegradasi PET.

Proses degradasi yang dilakukan oleh *I. sakaiensis* melibatkan pemecahan PET menjadi monomer-monomer terpisah, yaitu etilen glikol dan asam tereftalat, yang kemudian digunakan sebagai sumber nutrisi bagi bakteri ini (Mathew *et al.*, 2021). Aktivitas enzim PETase dan MHETase memainkan peran kunci dalam proses ini. PETase bertanggung jawab dalam pemecahan struktur PET, sedangkan MHETase bekerja untuk menghidrolisis MHET menjadi senyawa yang lebih sederhana. Produk akhir dari proses degradasi ini kemudian dimanfaatkan oleh koloni *I. sakaiensis* sebagai sumber energi untuk pertumbuhan dan perkembangannya.

Hubungan Gen Pengkode PETase dengan Degradasi Limbah Plastik PET

Ideonella sakaiensis memiliki kemampuan untuk mendegradasi plastik melalui transfer gen pengkode PETase ke dalam *Escherichia coli*. Proses transformasi gen ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi degradasi PET, mengingat *E. coli* memiliki keunggulan dalam ekspresi protein yang cepat, waktu fermentasi yang lebih singkat, serta biaya budidaya yang rendah (Hachisuka *et al.*, 2021). Rekayasa genetik ini memungkinkan produksi enzim PETase dalam jumlah besar, yang berperan dalam percepatan degradasi plastik PET.

Penelitian yang dilakukan oleh Yao *et al*, (2024) menunjukkan bahwa enzim PETase yang dihasilkan oleh *I. sakaiensis* strain 201-F6 memiliki aktivitas hidrolitik yang lebih tinggi dan spesifisitas yang lebih baik terhadap PET dibandingkan dengan enzim lainnya, terutama pada suhu kamar. Bakteri ini menghasilkan PETase yang mampu mempercepat proses degradasi PET hingga 5–120 kali lebih cepat dibandingkan dengan degradasi alami. Proses transformasi gen PETase ke dalam *E. coli* menjadi salah satu teknik rekayasa biodegradasi yang efektif, memungkinkan peningkatan kinerja enzim dalam mengurai plastik lebih cepat.

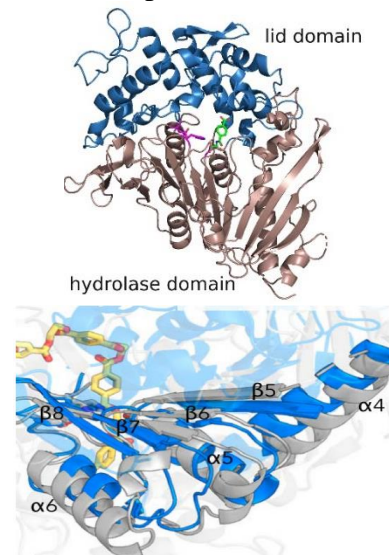
Transformasi gen PETase melalui teknik rekayasa genetika dilakukan dalam beberapa tahap. Menurut Hachisuka *et al* (2021), tahapan pertama adalah isolasi gen pengkode PETase dari *I. sakaiensis* yang kemudian dikloning dan ditransformasikan ke dalam *E. coli*. Selanjutnya, dilakukan ekspresi protein yang diinduksi selama 18 jam pada suhu 25°C menggunakan media *Terrific Broth*. Setelah itu, sel yang telah mengekspresikan PETase dipisahkan melalui sentrifugasi dan dilakukan lisis dalam buffer denaturasi. Tahap berikutnya adalah pemurnian enzim menggunakan metode kromatografi untuk meningkatkan efektivitasnya. Setelah proses pemurnian selesai, enzim PETase dianalisis, diultrafilter, dan dikristalisasi sebelum diuji aktivitasnya menggunakan spektrofotometer.

Hasil analisis ini kemudian diperiksa lebih lanjut melalui teknik *molecular docking*, yaitu metode pemodelan interaksi antara molekul enzim dengan substrat PET dalam bentuk 3D, guna memastikan efektivitas degradasinya. Studi lebih lanjut menunjukkan bahwa PETase dengan struktur α -hidrolase yang aktif memiliki tingkat efisiensi lebih tinggi pada suhu ruang, sehingga lebih menguntungkan dalam aplikasi bioteknologi.

Proses biodegradasi plastik oleh mikroorganisme berlangsung dengan menempelkan enzim PETase pada

permukaan polimer plastik. Hal ini mendorong pertumbuhan molekul sederhana yang berasal dari unsur karbon dan nitrogen, yang pada akhirnya menyebabkan ketidakstabilan struktur polimer dan mengubah permukaan plastik. Biodegradasi dengan enzim PETase dapat dilakukan pada suhu yang lebih rendah dibandingkan metode kimia atau fisik, sehingga lebih ramah lingkungan. Efektivitas enzim ini ditentukan oleh pusat aktifnya yang memungkinkan PET berinteraksi dengan enzim secara lebih efisien.

Escherichia coli yang telah ditransformasikan dengan gen PETase memiliki potensi lebih besar dalam mendegradasi PET dibandingkan *I. sakaiensis* sendiri. Hal ini karena *E. coli* dapat mengekspresikan PETase dengan lebih stabil dan dalam jumlah lebih banyak, sehingga mempercepat proses penguraian limbah plastik. Setelah PET terdegradasi, terjadi proses asimilasi di dalam sitoplasma mikroorganisme, di mana produk degradasi digunakan dalam metabolisme seluler untuk menghasilkan biomassa, energi, cadangan makanan, serta metabolit primer dan sekunder.



Gambar 4. Struktur 3D Enzim PETase (Biru) & Enzim MHETase (Abu-Abu).

Tahapan akhir dari proses biodegradasi ini adalah mineralisasi, yaitu konversi akhir senyawa yang telah dipecah menjadi produk akhir berupa air (H_2O), metana (CH_4), dan karbon dioksida

(CO₂) yang kemudian dilepaskan ke lingkungan. Dengan menggunakan teknik transformasi gen PETase ke dalam *E. coli*, degradasi PET dapat dilakukan dengan lebih cepat dibandingkan degradasi alami hanya dengan menggunakan enzim PETase tanpa rekayasa genetik.

KESIMPULAN

Polyethylene terephthalate (PET) memiliki sifat fisik yang tahan terhadap bahan kimia dan panas, sehingga banyak digunakan dalam berbagai industri. Namun, ketahanannya yang tinggi menyebabkan limbah PET sulit terurai, sehingga berkontribusi terhadap pencemaran lingkungan. Salah satu solusi potensial dalam mengatasi permasalahan ini adalah dengan memanfaatkan *Ideonella sakaiensis*, bakteri yang mampu mendegradasi PET melalui enzim PETase dan MHETase, yang memungkinkan proses penguraian berlangsung 5–120 kali lebih cepat dibandingkan degradasi alami. Selain itu, efektivitas biodegradasi dapat lebih ditingkatkan melalui transformasi gen pengkode PETase ke dalam *Escherichia coli*, yang bertujuan untuk meningkatkan produksi enzim PETase sehingga mempercepat penguraian permukaan polimer plastik. Dengan pendekatan ini, pengelolaan limbah plastik dapat dilakukan secara lebih efisien dan berkelanjutan, sehingga mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

SARAN

1. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengoptimalkan aktivitas enzim PETase dan MHETase melalui rekayasa genetika guna meningkatkan efisiensi degradasi plastik PET secara signifikan.
2. Diperlukan kajian lebih mendalam mengenai potensi penerapan *Ideonella sakaiensis* dalam skala industri, termasuk studi mengenai faktor lingkungan yang dapat mempengaruhi efektivitasnya sebagai agen biodegradasi.

3. Pengembangan teknologi berbasis mikroorganisme seperti bioreaktor yang memanfaatkan bakteri *I. sakaiensis* harus dikaji lebih lanjut agar dapat diterapkan secara luas sebagai solusi pengolahan limbah plastik yang ramah lingkungan.
4. Kolaborasi antara akademisi, industri, dan pemerintah sangat diperlukan dalam mendukung penelitian dan implementasi teknologi biodegradasi plastik berbasis mikroorganisme untuk mengurangi dampak pencemaran lingkungan.

DAFTAR RUJUKAN

- Abduh, I. M. N. 2018. *Ilmu dan rekayasa lingkungan (Vol. 1)*. CV SAH MEDIA. Makassar.
- Abidin, N., Febrianti, N., & Syarifah, S. M. 2023. Pengurai Sampah Plastik Ramah Lingkungan. *Bincang Sains dan Teknologi*. 2(02):63-71. <https://doi.org/10.56741/bst.v2i02.339>
- Adisa, V. 2024. *Panduan Mudah Daur Ulang Sampah Anorganik*. Penerbit Andi. Yogyakarta.
- Anggraeni, G., Sutanto, A., & Sulistiani, W. S. 2022. Variasi Formula Pumakkal Terhadap Kadar N, P, K Pupuk Cair Limbah Air Kolam Lele Sebagai Bahan Ajar Biologi Berupa Lembar Kegiatan Peserta Didik. *Edubiolock*. 3(1): 37-46. <https://doi.org/10.24127/edubiolo ck.v3i1.2066>
- Arifin, Z., Ariantini, M. S., Sudipa, I. G. I., Chaniago, R., Dwipayana, A. D., Adhicandra, I. & Alfiah, T. 2023. *GREEN TECHNOLOGY: Penerapan Teknologi Ramah Lingkungan Berbagai Bidang*. PT. Sonpedia Publishing Indonesia. Jambi.
- Arwini, N. P. D. 2022. Sampah Plastik Dan Upaya Pengurangan Timbulan Sampah Plastik. *Jurnal Ilmiah Vastuwidya*. 5(1): 72-82.

- <https://doi.org/10.47532/jiv.v5i1.412>
- Azizah, R. N. 2022. Identifikasi Bakteri Dari Sedimen Muara Sungai Progo, DI Yogyakarta sebagai agen pendegradasi Mikroplastik. *Skripsi*. Universitas Islam Indonesia, Program Studi Teknik Lingkungan, Yogyakarta.
- <https://dspace.uui.ac.id/handle/123456789/41325>
- Asmi, N. 2020. Isolasi Mikroorganisme Pendegradasi Polimer High Density Polyethylene (HDPE). *Skripsi*. Tidak diterbitkan. Makassar: Fakultas Sains dan Teknologi UIN Alauddin Makassar.
- Asmi, N., Baharuddin, M., & Febryanti, A. 2022. Skrining Mikroba Pendegradasi Plastik dari Tanah dan Uji Biodegradasi Menggunakan Fourier Transform Infrared (FTIR). *Al-Kauniyah: Jurnal Biologi*. 15(1): 151-163.
- <http://dx.doi.org/10.15408/kauniyah.v15i1.19826>
- Budirman, S., Ling, M., Inayah, S. K. M., Sahani, W., Khaer, A., & ST, S. 2025. *Pengolahan Air Limbah Fasilitas Kesehatan: MBBR Dan Karbon Aktif*. Nas Media Pustaka.
- Din, S. U., Kalsoom, Satti, S. M., Uddin, S., Mankar, S. V., Ceylan, E., ... & Shah, A. A. 2023. The purification and characterization of a cutinase-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>
- Feng, S., Yue, Y., Zheng, M., Li, Y., Zhang, Q., & Wang, W. 2021. Is PETase-and Is MHETase-catalyzed cascade degradation mechanism toward polyethylene terephthalate. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 9(29): 9823-9832.
- <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c02420>
- Fatma, Y. S., Lesmana, D., Handayani, L., Sulistyorini, E., Arrasyid, B., Soimin, M., ... & Marda, A. B. 2023. *Mikrobiologi Lingkungan*. TOHAR MEDIA.
- Gandini, T., Sutanto, A., & Asih, T. 2022. Variasi Formula Pumakkal Terhadap Kadar N, P, K Pada Pupuk Cair Limbah Produksi Mie Sebagai Pendukung Belajar Biologi Berupa Lembar Kegiatan Peserta Didik (LKPD). *EDUBIOLOCK*. 3(1): 1-14.
- <https://doi.org/10.24127/edubioclock.v3i1.2063>
- Gusty, S., Rachman, R. M., Dendo, E. A. R., Ampangallo, B. A., & Aryadi, A. 2023. *Revolusi Plastik dan Lingkungan*. Tohar Media.
- Hachisuka, S. I., Nishii, T., & Yoshida, S. 2021. Development of a targeted gene disruption system in the poly (ethylene terephthalate)-degrading bacterium *Ideonella sakaiensis* and its applications to PETase and MHETase genes. *Applied and Environmental Microbiology*. 87(18): e00020-21.
- <https://doi.org/10.1128/AEM.00020-21>
- Hasibuan, M. R. R. 2023. Manfaat Daur Ulang Sampah Organik Dan Anorganik Untuk Kesehatan Lingkungan. *Jurnal Ilmiah Lingkungan*. 2(3): 1–11.
- <https://doi.org/10.31219/osf.io/yb42t>
- Iman, M. 2023. Sifat dan karakteristik material plastik dan bahan aditif. *Jurnal Ilmiah*. 3(2): 65–75.
- <http://repository.unimar-amni.ac.id/id/eprint/5224>
- Indraswati, D. 2017. *Pengemasan makanan*. Forum Ilmiah Kesehatan: Jakarta.
- Kaur, K., Sharma, S., Shree, N., & Mehrotra, R. 2023. Recent advancements and mechanism of

- plastics biodegradation promoted by bacteria: A key for sustainable remediation for plastic wastes. *Biosciences Biotechnology Research Asia*. 20(1): 1-12.
<http://dx.doi.org/10.13005/bbra/3063>
- Maity, W., Maity, S., Bera, S., & Roy, A. 2021. Emerging roles of PETase and MHETase in the biodegradation of plastic wastes. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. Volume 193: 2699-2716.
<https://doi.org/10.1007/s12010-021-03562-4>
- Mathew, J. J., Mathews, A. I., Sajeshkumar, N. K., & Vazhacharickal, P. J. 2021. Microbial degradation of polyethylene terephthalate (PET): an outlook study. *Journal of Medicinal Plants*. 9(5): 31-40.
https://www.researchgate.net/publication/358717121_Microbial_degradation_of_Polyethylene_Terphthalate_PET_an_outlook_study
- Mohanani, N., Montazer, Z., Sharma, P. K., & Levin, D. B. 2020. Microbial and enzymatic degradation of synthetic plastics. *Frontiers in Microbiology*. 11: 580709.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.580709>
- Musdary, F., Amalia, L., Lubis, R. M. A., & Ningsih, W. 2021. Systematic Review: Efektivitas *Ideonella sakaiensis* dan *Chlamydomonas reinhardtii* sebagai Agen Biodegradasi Plastik Berbahan Dasar PET. *Jurnal Biolokus: Jurnal Penelitian Pendid ikan Biologi dan Biologi*. 4(1): 20–26.
<http://dx.doi.org/10.30821/biolokus.v4i1.901>
- Nainggolan, H., Nuraini, R., Sepriano, S., Aryasa, I. W. T., Meilin, A., Adhicandra, I., ... & Prayitno, H. 2023. *Green technology innovation: Transformasi teknologi ramah lingkungan berbagai sektor*. PT. Sonpedia Publishing Indonesia.
- Nurmayanti, Y., Rukmana, M. D., Cengristitama, C., Amir, A. A., Nafillah, K., Sari, M. W., ... & Yusri, A. 2024. *Kimia Material*. Yayasan Tri Edukasi Ilmiah.
- Pirillo, V., Orlando, M., Tessaro, D., Pollegioni, L., & Molla, G. 2021. An efficient protein evolution workflow for the improvement of bacterial PET hydrolyzing enzymes. *International Journal of Molecular Sciences*. 23(1): 264.
<https://doi.org/10.3390/ijms23010264>
- Purnomo, C. W. 2021. *Solusi pengelolaan sampah Kota*. UGM Press. D.I. Yogyakarta.
- Siregar, A. D., Ramadhan, R., Natasya, R., & Sari, L. M. 2024. The Dangers of Chemical Contents in Plastic Used as Food and Beverage Containers. *The Lunarian*. 2(1): 20-31.
<https://thelunarian.com/journal/article/view/13/10>
- Taniguchi, I., Yoshida, S., Hiraga, K., Miyamoto, K., Kimura, Y., & Oda, K. 2019. Biodegradation of PET: current status and application aspects. *ACS Catalysis*. 9(5): 4089-4105.
<https://doi.org/10.1021/acscatal.8b05171>
- Tanasupawat, S., Takehana, T., Yoshida, S., Hiraga, K., & Oda, K. 2016. *Ideonella sakaiensis* sp. nov., isolated from a microbial consortium that degrades poly(ethylene terephthalate). *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. 66(8): 2813-2818.
<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acscatal.8b05171>
- Ubaidillah, M., Puspito, A. N., Suud, H. M., Marvintha, K. N., Zaphora, S. Z., Hapsari, S. S., ... & Zahrosa, D.

- B. 2023. Pengenalan Tanaman Hidroponik dengan Mengkreasi Limbah Plastik pada Siswa Sekolah Dasar. *AJAD: Jurnal Pengabdian kepada Masyarakat*. 3(3): 222-231. <https://doi.org/10.59431/ajad.v3i3.193>
- Yao, J., Liu, Y., Gu, Z., Zhang, L., & Guo, Z. 2024. Deconstructing PET: Advances in enzyme engineering for sustainable plastic degradation. *Chemical Engineering Journal*. 154183. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.154183>
- Yusuf, A. N., Erwing, E., & Muliana, M. 2023. Pengaruh Penerapan Pendekatan Jelajah Alam Sekitar (JAS) Menggunakan Model Investigasi Kelompok Terhadap Motivasi Belajar Biologi Kelas X SMAN 30 Bone. *Oryza (Jurnal Pendidikan Biologi)*. 12(2): 201-210. <https://doi.org/10.33627/oz.v2i2.1425>
- Yoshida, S., Hiraga, K., Taniguchi, I., & Oda, K. 2021. Ideonella sakaiensis, PETase, and MHETase: From identification of microbial PET degradation to enzyme characterization. *Methods in Enzymology*. 648: 187-205. <https://doi.org/10.1016/bs.mie.2020.12.007>
- Yoshida, S., Hiraga, K., Takehana, T., Taniguchi, I., Yamaji, H., Maeda, 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>