



Pengurai Sampah Plastik Ramah Lingkungan

¹Nurul Abidin, ²Wahdaniar, ³Novi Febrianti*, ⁴Sharfina Mutia Syarifah

Corresponding Author: * novifebrianti@pbio.uad.ac.id

¹ STKIP Muhammadiyah Manokwari, Papua Barat, Indonesia

² Universitas Megarezky, Makassar, Indonesia

³ Universitas Ahmad Dahlan, Yogyakarta, Indonesia

⁴ Universitas Aisyiyah Yogyakarta, Indonesia

Abstrak

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menyelidiki mekanisme penguraian sampah plastik oleh berbagai mikroorganisme, termasuk bakteri, cendawan, dan ulat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mekanisme penguraian plastik melibatkan berbagai strategi biokimia dan enzimatik yang berbeda pada setiap mikroorganisme. Bakteri seperti *Ideonella sakaiensis* 201-F6 memiliki enzim PETase yang mampu mengurai plastik PET menjadi senyawa monomer yang lebih sederhana. Cendawan seperti *Trichoderma viride* dan *Aspergillus nomius* juga memiliki enzim ekstraseluler dan kemampuan untuk mengurai berbagai jenis plastik. Sementara itu, ulat *Galleria mellonella* dan larva *Tenebrio molitor* menggunakan mekanisme pencernaan yang melibatkan enzim dan kerjasama dengan bakteri dalam sistem pencernaan mereka. Ulat *G. mellonella* memakan plastik polyethylene (PE) yang mirip dengan struktur karbon lilin lebah yang menjadi sumber makanan alamnya, sementara larva *T. molitor* memakan plastik polystyrene (PS) dan menghasilkan enzim serta bakteri dalam sistem pencernaannya untuk menguraikan styrofoam menjadi senyawa organik yang lebih sederhana. Mekanisme penguraian sampah plastik oleh mikroorganisme masih dalam tahap penelitian yang terus berkembang, dan masih banyak hal yang perlu dipahami dengan lebih mendalam. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengidentifikasi enzim, jalur metabolic, dan mekanisme detail lainnya yang terlibat dalam penguraian sampah plastik oleh mikroorganisme. Penemuan lebih lanjut tentang mekanisme ini dapat berpotensi menjadi sumber inspirasi untuk pengembangan teknologi bioteknologi yang dapat membantu mengurangi masalah sampah plastik.

Kata kunci: enzim, jamur, lingkungan berkelanjutan, mikroorganisme, pengurai, sampah plastik

Pendahuluan

Penemuan mikroorganisme dan enzim di tempat pembuangan sampah yang tidak terduga merupakan kabar baik dalam mengatasi permasalahan sampah plastik di dunia [1]. Plastik memang menjadi masalah serius karena waktu yang lama untuk terurai dan dapat mencemari lingkungan, termasuk pantai dan air minum. Plastik memiliki dampak jangka panjang terhadap lingkungan karena tidak mudah diurai. Selain itu, mikroplastik yang merupakan potongan kecil plastik juga dapat masuk ke tubuh manusia melalui air minum kemasan, yang dapat menimbulkan masalah kesehatan.

Namun, temuan mikroorganisme dan enzim di tempat pembuangan sampah dapat menjadi solusi potensial dalam menghadapi permasalahan sampah plastik. Mikroorganisme dan enzim ini memiliki potensi untuk mendegradasi plastik menjadi bahan yang lebih ramah lingkungan, sehingga dapat membantu mengurangi akumulasi plastik yang sulit terurai di lingkungan [2]. Dengan penemuan ini, para ilmuwan dapat mengkaji lebih lanjut tentang potensi mikroorganisme dan enzim ini dalam mengatasi sampah plastik, termasuk dalam pengembangan teknologi daur ulang plastik yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Selain itu, penting untuk meningkatkan kesadaran akan pentingnya

pengelolaan sampah yang baik serta pengurangan penggunaan plastik sekali pakai untuk mengurangi jumlah sampah plastik yang berakhir di tempat pembuangan sampah dan lingkungan.

Fakta yang mencemaskan bahwa dunia memproduksi jutaan ton sampah plastik setiap tahunnya, dengan Indonesia menjadi penyumbang sampah plastik di laut terbanyak kedua setelah Cina, yaitu sekitar 0,5 juta sampai 1,29 juta ton per tahun [3], telah mendorong para ilmuwan untuk mencari mikroorganisme dan enzim yang dapat menghancurkan plastik. Penelitian menunjukkan bahwa semua mikroorganisme yang dapat menguraikan plastik ditemukan di tempat pembuangan sampah akhir (TPA) atau pusat pengolahan limbah, di mana mereka telah beradaptasi dengan lingkungan yang penuh dengan sampah plastik. Adaptasi ini termasuk cara mereka memperoleh nutrisi untuk bertahan hidup dan berkembang biak. Mikroorganisme mendapatkan nutrisi dengan memecah rantai panjang kimiawi atau polimer plastik menjadi senyawa monomer yang lebih kecil [4]. Proses inilah yang menjadi dasar gagasan penelitian dan pengembangan mikroorganisme sebagai agen bioremediasi untuk mengatasi limbah plastik.

Namun, tidak semua mikroorganisme mampu menghancurkan ikatan kimia plastik. Beberapa contoh mikroorganisme yang telah ditemukan memiliki kemampuan untuk mengurai plastik antara lain bakteri dari genus *Pseudomonas*, *Bacillus*, dan *Ideonella sakaiensis* [5]. Selain itu, beberapa jenis jamur dan alga juga diketahui dapat menguraikan plastik [6]. Kemudahan atau kesulitan dalam mengurai plastik dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti jenis plastik, ukuran dan struktur molekul plastik, kondisi lingkungan, serta jenis dan kemampuan mikroorganisme yang terlibat dalam proses biodegradasi [6]-[8]. Sebagai contoh, plastik jenis polietilena (PE) yang merupakan plastik paling umum, cenderung sulit terurai karena memiliki struktur molekul yang kuat [9]. Namun, beberapa mikroorganisme telah terbukti mampu mengurai polietilena dalam kondisi tertentu. Selain itu, faktor lingkungan seperti suhu, kelembaban, dan ketersediaan nutrisi juga dapat mempengaruhi kemampuan mikroorganisme dalam menguraikan plastik [10]. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut masih diperlukan untuk memahami lebih lanjut tentang mikroorganisme yang mampu menghancurkan ikatan kimia plastik serta faktor-faktor yang mempengaruhi proses biodegradasi plastik.

Penemuan ini juga menunjukkan betapa pentingnya penelitian dan inovasi dalam mencari solusi untuk permasalahan lingkungan, termasuk pengelolaan sampah plastik. Diharapkan penemuan mikroorganisme dan enzim ini dapat menjadi langkah positif dalam mengurangi dampak negatif sampah plastik terhadap lingkungan dan kesehatan manusia.

Metode

Metode penelitian yang digunakan dalam informasi tersebut adalah studi literatur atau review artikel yang relevan dengan topik yang diteliti. Penelitian ini dilakukan dengan cara mengumpulkan artikel-artikel ilmiah terkait mekanisme penguraian sampah plastik oleh mikroorganisme seperti bakteri, cendawan, dan ulat. Setelah itu, artikel-artikel tersebut dianalisis secara kualitatif dengan cara membandingkan strategi biokimia dan enzimatis yang digunakan oleh masing-masing mikroorganisme. Selain itu, hasil analisis juga dikelompokkan berdasarkan isu-isu tertentu yang muncul dalam penelitian ini. Dengan demikian, penelitian ini dapat memberikan gambaran komprehensif tentang mekanisme penguraian sampah plastik oleh mikroorganisme.

Hasil dan Pembahasan

Beberapa mikroorganisme yang telah ditemukan memiliki potensi dalam menghancurkan ikatan kimia plastik meliputi:

1. Bakteri genus *Pseudomonas*: Bakteri ini telah terbukti mampu menguraikan berbagai jenis plastik, seperti polietilen (PE), polipropilen (PP), polivinil klorida (PVC), dan polistirena (PS). *Pseudomonas aeruginosa*, misalnya, diketahui memiliki enzim yang mampu mengurai plastik PE dan PP [5].
2. Bakteri genus *Bacillus*: Beberapa spesies bakteri *Bacillus*, seperti *Bacillus subtilis* dan *Bacillus licheniformis*, juga telah ditemukan memiliki kemampuan dalam menguraikan plastik, terutama PE dan PS [11].
3. Jamur genus *Aspergillus*: Beberapa spesies jamur *Aspergillus*, seperti *Aspergillus niger* dan *Aspergillus fumigatus*, memiliki enzim yang dapat mengurai plastik, terutama poliuretan (PU) [12].

A. Cendawan

Beberapa jenis mikroorganisme seperti cendawan atau fungi bersel satu telah ditemukan memiliki potensi sebagai agen biologis untuk menguraikan polimer plastik [13]-[15]. Sayangnya, saat ini belum banyak penelitian yang mengeksplorasi mekanisme cendawan *Trichoderma viride* dan *Aspergillus nomius* dalam mengurai sampah plastik [16]. Namun, beberapa penelitian menunjukkan bahwa cendawan tersebut memiliki potensi dalam mendegradasi bahan plastik. Sebuah penelitian menunjukkan bahwa *Trichoderma viride* mampu mendegradasi bahan plastik polystyrene (PS) melalui produksi enzim ligninase [17]. Enzim ini dapat memecah ikatan kimia dalam struktur PS dan menghasilkan senyawa organik yang lebih sederhana, seperti asam oksalat dan asam maleat.

Sementara itu, sebuah penelitian lain menunjukkan bahwa *Aspergillus nomius* dapat memecah bahan plastik polyethylene (PE) melalui produksi enzim lipase [18]. Enzim ini dapat memecah ikatan kimia dalam struktur PE dan menghasilkan senyawa organik yang lebih sederhana, seperti asam oleat dan asam palmitat. Namun, perlu dicatat bahwa meskipun cendawan *Trichoderma viride* dan *Aspergillus nomius* memiliki potensi dalam mendegradasi bahan plastik, penggunaannya masih terbatas pada skala laboratorium dan perlu dieksplorasi lebih lanjut dalam skala industri. Sebagai contoh, jenis cendawan *Aspergillus tubingensis* dapat menghancurkan jenis polimer plastik polyester polyurethane (PU) yang digunakan dalam pembuatan ban dan jaket kulit sintetis dalam waktu dua bulan [19]. Penelitian lain menemukan bahwa cendawan jenis *Aspergillus clavatus* yang diperoleh dari tanah tempat pembuangan sampah (TPA) dapat mendegradasi plastik jenis low density polyethylene (LDPE) yang digunakan dalam pembuatan kantong plastik dan tempat sampah dalam waktu 90 hari [20]. Di Indonesia, juga dilaporkan bahwa *Trichoderma viride* dan *Aspergillus nomius* dapat mengurangi berat plastik LDPE hingga 6% dalam waktu 45 hari [21].

B. Bakteri

Pemanfaatan bakteri sebagai agen pendegradasi sampah plastik juga menjadi bidang penelitian yang menjanjikan [22]. Bakteri jenis baru yang disebut *Ideonella sakaiensis* 201-F6, yang memiliki kemampuan untuk mendegradasi plastik jenis polyethylene terephthalate (PET) yang biasa digunakan

dalam pembuatan botol air minum kemasan [23]. Bakteri *I. sakaiensis* 201-F6 ditemukan dalam tanah dan air limbah di pusat daur ulang limbah berbahan PET. Studi tersebut melaporkan bahwa bakteri ini mampu menghasilkan dua jenis enzim, yaitu PETase dan MHETase, yang dapat memecah rantai PET hingga mencapai tingkat yang aman bagi lingkungan. Penggunaan bakteri sebagai agen pendegradasi plastik memiliki keuntungan, seperti perkembangbiakan yang cepat dan struktur sel yang sederhana, yang membuatnya menarik untuk dikembangkan dalam skala industri. Bakteri memiliki kemampuan dalam mengurai sampah plastik melalui beberapa mekanisme yang melibatkan enzim dan proses metabolisme. Berikut adalah beberapa mekanisme umum yang terlibat dalam degradasi plastik oleh bakteri:

- **Sekresi Enzim:** Bakteri dapat menghasilkan enzim yang memiliki kemampuan untuk memecah ikatan kimia dalam plastik. Contohnya, dalam kasus polietilena (PE), bakteri dapat mengeluarkan enzim yang disebut polietilenase atau esterase, yang dapat memotong ikatan ester dalam struktur PE, sehingga memecah plastik menjadi fragmen yang lebih kecil.
- **Pencernaan Intraseluler:** Setelah enzim memotong ikatan plastik, fragmen plastik yang lebih kecil dapat dimasukkan ke dalam sel bakteri melalui proses pencernaan intraseluler. Di dalam sel bakteri, fragmen plastik dapat dipecah lebih lanjut melalui reaksi kimia dan metabolisme, sehingga menjadi molekul yang lebih sederhana yang dapat digunakan sebagai sumber energi atau bahan baku untuk biosintesis.
- **Fermentasi:** Bakteri juga dapat melakukan fermentasi pada plastik yang telah dipecah menjadi fragmen yang lebih kecil. Dalam proses fermentasi, bakteri mengubah fragmen plastik menjadi senyawa organik yang lebih sederhana, seperti asam organik atau gas metana, yang dapat digunakan sebagai sumber energi.
- **Katabolisme Aerobik atau Anaerobik:** Bakteri dapat menguraikan plastik dalam kondisi aerobik (di hadapan oksigen) atau anaerobik (tanpa oksigen). Dalam kondisi aerobik, bakteri menggunakan oksigen untuk menguraikan plastik menjadi produk yang lebih sederhana. Sedangkan dalam kondisi anaerobik, bakteri dapat menggunakan senyawa lain, seperti nitrat atau sulfat, sebagai penerima elektron dalam proses degradasi plastik.
- **Kerjasama Sinergistik:** Beberapa bakteri dapat bekerja secara sinergistik dalam proses degradasi plastik. Sebagai contoh, beberapa bakteri dapat menghasilkan enzim yang memotong ikatan plastik, sementara bakteri lain dapat menggunakan fragmen plastik yang dihasilkan sebagai sumber nutrisi. Kerjasama sinergistik antara berbagai spesies bakteri dapat meningkatkan efisiensi degradasi plastik.

Mekanisme degradasi plastik oleh bakteri dapat bervariasi tergantung pada jenis plastik, spesies bakteri, dan kondisi lingkungan [24]. Studi lebih lanjut diperlukan untuk memahami secara mendalam mekanisme degradasi plastik oleh bakteri dan mengoptimalkan penggunaan bakteri dalam proses pengurangan sampah plastik.

C. Enzim

Penelitian mengenai struktur kristal X-ray dari enzim PETase yang dihasilkan oleh *I. sakaiensis* 201-F6, memberikan informasi penting tentang sifat enzim ini. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa

enzim PETase yang dihasilkan oleh *I. sakaiensis* 201-F6 memiliki struktur kristal yang dapat dianalisis menggunakan teknik sinar X-ray [25]. Informasi tentang struktur kristal enzim ini dapat membantu dalam memahami mekanisme kerja enzim dan memungkinkan pengoptimalan produksi enzim dalam skala industri.

Selain itu, enzim PETase yang dihasilkan oleh *I. sakaiensis* 201-F6 tidak bersifat beracun dan ramah lingkungan [26]. Hal ini menunjukkan potensi enzim ini sebagai agen pendegradasi plastik yang aman bagi lingkungan. Selain itu, enzim ini dapat diproduksi dalam skala industri, yang membuka peluang untuk penggunaan enzim ini dalam aplikasi pendegradasi plastik dalam skala yang lebih besar. Namun, meskipun enzim PETase dari *I. sakaiensis* 201-F6 menunjukkan potensi yang menjanjikan, penelitian lebih lanjut masih diperlukan untuk mengoptimalkan produksi enzim ini dan meningkatkan aktivitasnya dalam menguraikan plastik PET. Pengembangan lebih lanjut dalam hal ini akan menjadi langkah penting untuk memanfaatkan potensi enzim ini secara maksimal dalam aplikasi industri untuk mengatasi masalah sampah plastik.

Enzim PETase yang dihasilkan oleh bakteri *Ideonella sakaiensis* 201-F6 merupakan enzim yang memiliki kemampuan khusus dalam mengurai sampah plastik jenis polietilena tereftalat (PET), yang digunakan dalam botol plastik dan seringkali menjadi salah satu komponen besar dalam sampah plastik di lautan dan lingkungan. Berikut adalah mekanisme umum enzim PETase dalam mengurai sampah plastik [27]:

- **Pengenalan Substrat:** Enzim PETase terlebih dahulu berinteraksi dengan permukaan plastik PET melalui interaksi kimia antara residu amino asam pada enzim dan struktur kimia PET, sehingga enzim dapat mengenali plastik PET sebagai substrat potensial.
- **Pemotongan Ikatan Ester:** Setelah pengenalan substrat, enzim PETase memotong ikatan ester dalam struktur PET. Ikatan ester adalah ikatan kimia yang menghubungkan antara unit monomer asam tereftalat dalam struktur PET. Enzim PETase mengkatalisis reaksi hidrolisis, yaitu pemecahan ikatan ester menggunakan air sebagai penerima gugus hidroksil, sehingga menghasilkan fragmen PET yang lebih kecil, seperti monomer asam tereftalat dan etilena glikol.
- **Pemecahan Fragment PET:** Setelah pemotongan ikatan ester, fragmen PET yang dihasilkan dapat diperoleh oleh enzim PETase. Fragmen PET yang lebih kecil tersebut dapat dipecah lebih lanjut oleh enzim PETase atau enzim lain yang bekerja bersama-sama dengan PETase menjadi molekul yang lebih sederhana, yang dapat digunakan sebagai sumber energi atau bahan baku dalam proses metabolisme bakteri.
- **Aktivitas Kooperatif dengan Enzim Lain:** Beberapa penelitian menunjukkan bahwa enzim PETase juga dapat bekerja secara sinergistik dengan enzim lain, seperti MHETase (mono(2-hidroksietil) tereftalat hidrolase), dalam mengurai plastik PET. MHETase bertanggung jawab dalam mengurai intermediate antara PET dan monomer asam tereftalat yang dihasilkan oleh PETase menjadi molekul yang lebih sederhana, sehingga mempercepat proses degradasi plastik PET.

Mekanisme degradasi plastik PET oleh enzim PETase yang dihasilkan oleh *I. sakaiensis* 201-F6 adalah fenomena yang relatif baru dan masih dalam penelitian lebih lanjut. Namun, penelitian ini

menunjukkan potensi besar enzim PETase sebagai solusi bioteknologi dalam mengatasi pencemaran plastik PET di lingkungan, dan dapat menjadi dasar untuk pengembangan metode yang lebih efisien dalam mengurai sampah plastik PET.

D. Larva

Beberapa penelitian menemukan bahwa beberapa jenis larva serangga memiliki kemampuan untuk mencerna sampah plastik [28]. Ulat *Galleria mellonella* dan larva *Tenebrio molitor*, juga dikenal sebagai mealworms atau ulat Hong Kong, telah terbukti mampu menguraikan plastik polyethylene (PE) dan styrofoam (jenis plastik polystyrene/PS) secara biologis [29].

Ulat *Galleria mellonella* memakan lilin lebah (beeswax) dalam habitat alaminya, yang merupakan senyawa lemak kompleks [30]. Struktur ikatan karbon dalam lilin lebah memiliki kemiripan dengan struktur PE, sehingga sistem pencernaan ulat ini dapat menghancurkan PE, membentuk sekitar 200 lubang pada kantong plastik PE dan mengurangi berat kantong plastik sebesar 92 miligram dalam waktu 12 jam. Sementara itu, larva *Tenebrio molitor* ditemukan mampu memakan styrofoam sebagai satu-satunya sumber pakan mereka, dan laju kesintasan (survival) kelompok larva yang diberi makan styrofoam tidak berbeda signifikan dengan kelompok larva yang diberi makan dedak [31]. Styrofoam yang dikonsumsi oleh larva ini terdegradasi secara efisien menjadi biomassa larva, CO₂, dan kotoran larva dalam waktu kurang dari 24 jam.

Para peneliti juga menemukan bahwa bakteri *Exiguobacterium* sp. strain YT2, yang terdapat dalam sistem pencernaan larva *T. molitor*, dapat membentuk lapisan biofilm dan membuat lubang-lubang kecil pada permukaan styrofoam [32]. Bakteri ini juga dapat mendegradasi 7,4% styrofoam dalam waktu 60 hari dalam media cair. Penemuan ini menunjukkan potensi penggunaan larva serangga, seperti *Galleria mellonella* dan *Tenebrio molitor*, serta bakteri yang terdapat dalam sistem pencernaan mereka, untuk mengatasi masalah sampah plastik, terutama dalam menguraikan plastik PE dan styrofoam yang sulit diurai secara biologis. Namun, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk memahami mekanisme dan potensi aplikasi dari proses pencernaan plastik oleh larva serangga dan bakteri ini dalam skala yang lebih besar dan berkelanjutan. Mekanisme ulat *Galleria mellonella* dan larva *Tenebrio molitor* dalam mengurai sampah plastik:

- Ulat *Galleria mellonella*: Ulat *Galleria mellonella* memiliki kemampuan untuk mengurai plastik polyethylene (PE), seperti kantong plastik, melalui mekanisme pencernaan. Kemampuan ini terbentuk karena pada habitat alaminya, ulat *G. mellonella* memakan lilin lebah (beeswax), suatu senyawa lemak kompleks. Struktur ikatan kimia karbon dalam lilin lebah mirip dengan yang ada dalam PE, sehingga kemungkinan menjadi target penghancuran oleh mikroorganisme dalam sistem pencernaan ulat. Setelah ulat *G. mellonella* memakan plastik PE, sekitar 200 lubang terbentuk pada kantong plastik PE dalam waktu 12 jam. Berat kantong plastik PE juga berkurang sebanyak 92 miligram setelah 12 jam pemakanan oleh ulat *G. mellonella*. Namun, mekanisme biokimia dan enzimatis yang tepat dalam pencernaan plastik PE oleh ulat *G. mellonella* masih belum sepenuhnya dipahami dan memerlukan penelitian lebih lanjut.
- Larva *Tenebrio molitor*: Larva *Tenebrio molitor*, juga dikenal sebagai mealworms atau ulat Hong Kong, memiliki kemampuan untuk mengurai plastik polystyrene (PS), seperti styrofoam,

melalui mekanisme pencernaan dan kerjasama dengan bakteri dalam sistem pencernaan mereka. Styrofoam yang dikonsumsi oleh larva *T. molitor* akan masuk ke dalam saluran pencernaan mereka. Di dalam saluran pencernaan, larva *T. molitor* menghasilkan enzim dan bakteri yang bekerja bersama-sama untuk mendegradasi styrofoam. Enzim yang diproduksi oleh larva *T. molitor*, seperti enzim lipase, akan memecah ikatan kimia dalam struktur styrofoam menjadi senyawa organik yang lebih sederhana.

Selain itu, bakteri yang hidup dalam saluran pencernaan larva *T. molitor*, seperti *Exiguobacterium* sp. strain YT2, juga berperan penting dalam proses ini. Bakteri ini membentuk lapisan biofilm di permukaan styrofoam dan membuat lubang-lubang kecil pada permukaan styrofoam, yang memungkinkan enzim larva *T. molitor* untuk lebih mudah mengakses dan mencerna styrofoam. Bakteri ini juga dapat mendegradasi sebagian styrofoam menjadi senyawa organik melalui aktivitas enzimatik mereka. Namun, perlu dicatat bahwa mekanisme pencernaan plastik oleh larva *T. molitor* dan bakteri dalam sistem pencernaannya masih dalam tahap penelitian yang terus berkembang, dan memerlukan penelitian lebih lanjut untuk memahami secara menyeluruh bagaimana proses ini berlangsung.

Kesimpulan

Mekanisme penguraian sampah plastik oleh berbagai mikroorganisme seperti bakteri, cendawan, dan ulat melibatkan berbagai strategi biokimia dan enzimatik. Bakteri seperti *Ideonella sakaiensis* 201-F6 memiliki enzim PETase yang mampu mengurai plastik PET menjadi senyawa monomer yang lebih sederhana. Cendawan seperti *Trichoderma viride* dan *Aspergillus nomius* juga memiliki enzim dan kemampuan untuk mengurai berbagai jenis plastik melalui produksi enzim ekstraseluler. Sementara itu, ulat *Galleria mellonella* dan larva *Tenebrio molitor* menggunakan mekanisme pencernaan yang melibatkan enzim dan kerjasama dengan bakteri dalam sistem pencernaan mereka. Ulat *G. mellonella* memakan plastik polyethylene (PE) yang mirip dengan struktur karbon lilin lebah yang menjadi sumber makanan alamnya, sementara larva *T. molitor* memakan plastik polystyrene (PS) dan menghasilkan enzim serta bakteri dalam sistem pencernaannya untuk menguraikan styrofoam menjadi senyawa organik yang lebih sederhana. Namun, mekanisme penguraian sampah plastik oleh mikroorganisme masih dalam tahap penelitian yang terus berkembang, dan masih banyak hal yang perlu dipahami dengan lebih mendalam. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengidentifikasi enzim, jalur metabolic, dan mekanisme detil lainnya yang terlibat dalam penguraian sampah plastik oleh mikroorganisme. Penemuan lebih lanjut tentang mekanisme ini dapat berpotensi menjadi sumber inspirasi untuk pengembangan teknologi bioteknologi yang dapat membantu mengurangi masalah sampah plastik.

Referensi

- [1] Chukwuma, O. B., Rafatullah, M., Tajarudin, H. A., & Ismail, N. (2021). Bacterial diversity and community structure of a municipal solid waste landfill: A source of lignocellulolytic potential. *Life*, 11(6), 493.
- [2] Zhu, B., Wang, D., & Wei, N. (2022). Enzyme discovery and engineering for sustainable plastic recycling. *Trends in biotechnology*, 40(1), 22-37.
- [3] Cordova, M. R., & Nurhati, I. S. (2019). Major sources and monthly variations in the release of land-derived marine debris from the Greater Jakarta area, Indonesia. *Scientific Reports*, 9(1), 18730.

- [4] Alshehrei, F. (2017). Biodegradation of synthetic and natural plastic by microorganisms. *Journal of Applied & Environmental Microbiology*, 5(1), 8-19.
- [5] Roberts, C., Edwards, S., Vague, M., León-Zayas, R., Scheffer, H., Chan, G., ... & Mellies, J. L. (2020). Environmental consortium containing pseudomonas and bacillus species synergistically degrades polyethylene terephthalate plastic. *Mosphere*, 5(6), e01151-20.
- [6] Khan, S., Ali, S. A., & Ali, A. S. (2022). Biodegradation of low density polyethylene (LDPE) by mesophilic fungus 'Penicillium citrinum' isolated from soils of plastic waste dump yard, Bhopal, India. *Environmental Technology*, 1-15.
- [7] Oliveira, J., Belchior, A., da Silva, V. D., Rotter, A., Petrovski, Ž., Almeida, P. L., ... & Gaudêncio, S. P. (2020). Marine environmental plastic pollution: mitigation by microorganism degradation and recycling valorization. *Frontiers in Marine Science*, 7, 567126.
- [8] Qin, Z. H., Mou, J. H., Chao, C. Y. H., Chopra, S. S., Daoud, W., Leu, S. Y., ... & Lin, C. S. K. (2021). Biotechnology of plastic waste degradation, recycling, and valorization: current advances and future perspectives. *ChemSusChem*, 14(19), 4103-4114.
- [9] Yuan, J., Ma, J., Sun, Y., Zhou, T., Zhao, Y., & Yu, F. (2020). Microbial degradation and other environmental aspects of microplastics/plastics. *Science of the Total Environment*, 715, 136968.
- [10] Bano, K., Kuddus, M., R Zaheer, M., Zia, Q., F Khan, M., Gupta, A., & Aliev, G. (2017). Microbial enzymatic degradation of biodegradable plastics. *Current pharmaceutical biotechnology*, 18(5), 429-440.
- [11] Tkachuk, N., & Zelena, L. (2021). The impact of bacteria of the genus Bacillus upon the biodamage/biodegradation of some metals and extensively used petroleum-based plastics. *Corrosion and Materials Degradation*, 2(4), 531-553.
- [12] Osman, M., Satti, S. M., Luqman, A., Hasan, F., Shah, Z., & Shah, A. A. (2018). Degradation of polyester polyurethane by Aspergillus sp. strain S45 isolated from soil. *Journal of Polymers and the Environment*, 26, 301-310.
- [13] da Luz, J. M. R., da Silva, M. D. C. S., dos Santos, L. F., & Kasuya, M. C. M. (2019). Plastics polymers degradation by fungi. In *Microorganisms* (pp. 261-270). Vienna, Austria: IntechOpen.
- [14] Sarkhel, R., Sengupta, S., Das, P., & Bhowal, A. (2020). Comparative biodegradation study of polymer from plastic bottle waste using novel isolated bacteria and fungi from marine source. *Journal of Polymer Research*, 27, 1-8.
- [15] Kunlere, I. O., Fagade, O. E., & Nwadike, B. I. (2019). Biodegradation of low density polyethylene (LDPE) by certain indigenous bacteria and fungi. *International Journal of Environmental Studies*, 76(3), 428-440.
- [16] Varshney, S., Gupta, V., Yadav, A. N., Rahi, R. K., & Neelam, D. K. (2023). An overview on role of fungi in systematic plastic degradation. *Journal of Applied Biology and Biotechnology*, 11(3), 61-69.
- [17] Zeghal, E., Vaksmaa, A., Vielfaure, H., Boekhout, T., & Niemann, H. (2021). The potential role of marine fungi in plastic degradation—A review. *Frontiers in Marine Science*, 8, 738877.
- [18] 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.
- [19] Khan, S., Nadir, S., Dong, Y., Schaefer, D. A., Mortimer, P. E., Gui, H., ... & Xu, J. (2020). Biodegradation of polyester polyurethane by Aspergillus flavus G10. *BioRxiv*, 2020-06.
- [20] Sari, D. P., Amir, H., & Elvia, R. (2020). Isolasi bakteri dari tanah tempat pembuangan akhir (TPA) air sebakul sebagai agen biodegradasi limbah plastik polyethylene. *ALOTROP*, 4(2), 98-106.
- [21] Asmi, N. (2020). *Isolasi Mikroorganisme Pendegradasi Polimer High Density Polyethylene (HDPE)* (Doctoral dissertation, Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar).
- [22] Amobonye, A., Bhagwat, P., Singh, S., & Pillai, S. (2021). Plastic biodegradation: Frontline microbes and their enzymes. *Science of the Total Environment*, 759, 143536.
- [23] Weiland, M. H. (2020). Enzymatic biodegradation by exploring the rational protein engineering of the polyethylene terephthalate hydrolyzing enzyme PETase from Ideonella sakaiensis 201-F6. In *Mechanistic Enzymology: Bridging Structure and Function* (pp. 161-174). American Chemical Society.
- [24] Zaaba, N. F., & Jaafar, M. (2020). A review on degradation mechanisms of polylactic acid: Hydrolytic, photodegradative, microbial, and enzymatic degradation. *Polymer Engineering & Science*, 60(9), 2061-2075.
- [25] Graham, R. (2022). *Development of plastic degrading enzymes for future industrial PET biorecycling* (Doctoral dissertation, University of Portsmouth).

- [26] Kim, J. W., Park, S. B., Tran, Q. G., Cho, D. H., Choi, D. Y., Lee, Y. J., & Kim, H. S. (2020). Functional expression of polyethylene terephthalate-degrading enzyme (PETase) in green microalgae. *Microbial Cell Factories*, 19(1), 1-9.
- [27] Ali, S. S., Elsamahy, T., Al-Tohamy, R., Zhu, D., Mahmoud, Y. A. G., Koutra, E., ... & Sun, J. (2021). Plastic wastes biodegradation: mechanisms, challenges and future prospects. *Science of the Total Environment*, 780, 146590.
- [28] Bulak, P., Proc, K., Pytlak, A., Puszka, A., Gawdzik, B., & Bieganski, A. (2021). Biodegradation of different types of plastics by tenebrio molitor insect. *Polymers*, 13(20), 3508.
- [29] Zhong, Z., Nong, W., Xie, Y., Hui, J. H. L., & Chu, L. M. (2022). Long-term effect of plastic feeding on growth and transcriptomic response of mealworms (*Tenebrio molitor* L.). *Chemosphere*, 287, 132063.
- [30] LeMoine, C. M., Grove, H. C., Smith, C. M., & Cassone, B. J. (2020). A very hungry caterpillar: polyethylene metabolism and lipid homeostasis in larvae of the greater wax moth (*Galleria mellonella*). *Environmental Science & Technology*, 54(22), 14706-14715.
- [31] Yang, S. S., Brandon, A. M., Flanagan, J. C. A., Yang, J., Ning, D., Cai, S. Y., ... & Wu, W. M. (2018). Biodegradation of polystyrene wastes in yellow mealworms (larvae of *Tenebrio molitor* Linnaeus): Factors affecting biodegradation rates and the ability of polystyrene-fed larvae to complete their life cycle. *Chemosphere*, 191, 979-989.
- [32] Kim, H. W., Jo, J. H., Kim, Y. B., Le, T. K., Cho, C. W., Yun, C. H., ... & Yeom, S. J. (2021). Biodegradation of polystyrene by bacteria from the soil in common environments. *Journal of Hazardous Materials*, 416, 126239.

Penulis



Nurul Abidin adalah dosen di STKIP Muhammadiyah Manokwari, Papua Barat. pada program studi Pendidikan Biologi. Pendidikan sarjana diperoleh dari Universitas Papua. Sedangkan pendidikan magister diperoleh dari Universitas Muhammadiyah Bengkulu. Beliau sudah banyak mempublikasikan karyanya di jurnal nasional dan internasional. (email: masroel86@gmail.com).



Wahdaniar adalah dosen di Departemen Ilmu Biomedis. Dia adalah sekretaris Program Studi Ilmu Biomedis di Universitas Megarezky, Indonesia. Dia telah menerbitkan artikel pada beberapa jurnal internasional dan menjadi reviewer jurnal untuk Journal of Health Sciences and Medical Development. (email: narwahdaniar03@unimerz.ac.id).



Dr. Novi Febrianti adalah dosen Program Studi Pendidikan Biologi, Universitas Ahmad Dahlan, Yogyakarta. Saat ini menjabat sebagai Ketua Program Studi di institusi yang sama. Menyelesaikan pendidikan Sarjana, Magister pada bidang Biologi di Universitas Gajah Mada. Doktor diperoleh pada bidang Bioteknologi di universitas yang sama. Beliau memiliki keahlian pada bidang Biokimia, Biologi Sel dan Molekuler, Histologi. (email: novifebrianti@pbio.uad.ac.id).



Sharfina Mutia Syarifah adalah dosen Program Studi Bioteknologi, Universitas 'Aisyiyah Yogyakarta, Indonesia. Dia telah menyelesaikan pendidikan Sarjana, Magister pada bidang Bioteknologi Industri di Fakultas Teknologi Kejuruteraan, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia. Beliau memiliki keahlian pada bidang Biokimia, Biotek Industri dan Enzimologi. Beliau sudah banyak mempublikasikan karyanya di jurnal nasional dan internasional. (email: sharfinamutiasyarifah@unisayogya.ac.id).