

**Peranan Mikroorganisme Pendegradasi Plastik: Tinjauan Biodegradasi Plastik, Mekanismenya, serta Mikroorganisme yang Berperan**

**Putu Cindy Arista\***

Program Studi Teknik Lingkungan, Institut Sains dan Teknologi Nahdlatul Ulama Bali (ISTNUBA), Denpasar, Indonesia.

\*Corresponding author: [aristacindy99@gmail.com](mailto:aristacindy99@gmail.com)

**Article History**

Received : 27 February 2023

Approved : 12 March 2023

Published : 31 March 2023

**Keywords**

Biodegradation, enzymes, microorganisms, plastics.

**ABSTRACT**

Plastic is difficult to decompose in nature because it is a synthetic polymer made by humans and is made from petroleum. The problem that arises from the uncontrolled use of plastic is the accumulation of plastic waste in the environment which is not handled properly and becomes a source of environmental pollution. Plastic waste creates various kinds of environmental problems that disturb the balance of ecosystems and have an impact on the life of organisms in the environment. To overcome this problem, it is necessary to carry out related research as an effective solution for dealing with plastic waste. Biodegradation is one of the right methods for dealing with plastic waste now and in the future. However, there is limited review of the bio-decomposition of plastics, the microbial species present, the effectiveness of degradation, and the mechanisms involved. Based on this, this research focuses on a brief review of plastic biodegradation such as the factors that affect biodegradation, the species of microorganisms that play a role in the degradation of macro and micro-plastics, as well as the mechanism of plastic degradation through enzymes from the viewpoint of microorganisms. Various species of microorganisms such as bacteria, algae and fungi have the ability to decompose plastics but they cannot mineralize plastics completely. Meanwhile, research on the enzymes involved in plastic degradation is still limited, especially in the case of algae. This review can be a reference for researchers to find effective strategies to address the problem of plastic waste worldwide.

© 2023 Universitas Kristen Indonesia  
Under the license CC BY-SA 4.0

**PENDAHULUAN**

Penggunaan bahan plastik tidak bisa dihindari untuk memenuhi kebutuhan hidup kita sehari-hari. Akibatnya, semakin

banyak pula timbunan sampah plastik di lingkungan yang tidak ditangani dengan baik sehingga menimbulkan pencemaran lingkungan. Permasalahan yang ada saat

ini adalah lahan yang dapat dijadikan TPA semakin lama semakin berkurang, sedangkan total konsumsi plastik semakin bertambah (Yunar, 2011). Dampak dari penggunaan plastik yang tidak terkendali dan pengelolaan sampah plastik yang tidak maksimal, akan menjadikannya plastik sebagai limbah yang berakhir di laut dan menimbulkan berbagai permasalahan lingkungan.

Plastik merupakan produk polimer yang terdiri dari berbagai macam senyawa organik dan anorganik sintetik atau semisintetik (Saminathan *et al.*, 2014). Pencemaran lingkungan oleh polimer sintetik, seperti limbah plastik dan polimer sintetik yang larut dalam air limbah, telah diakui sebagai masalah besar. Mikroplastik memiliki ukurannya yang kecil ( $< 5$  mm), luas permukaan yang besar dan kemampuan lebih untuk menyerap ke dalam sel biologis. Polimer ini sangat stabil dan tidak mudah masuk ke dalam siklus degradasi biosfer. Permukaan hidrofobik mikroplastik menarik co-kontaminan seperti logam berat, racun farmasi, penghambat api, dan plasticizer lainnya, yang kemudian dapat masuk ke organisme biologis. Keberadaan mikroplastik di lingkungan, menyebabkan mikroplastik terangkut di sepanjang rantai makanan, dengan manusia sebagai konsumen akhir. Lebih dari 1 juta burung laut dan 100.000 hewan laut mati akibat

pencemaran plastik. Selain itu, partikel plastik telah ditemukan pada tubuh kura-kura (Othman, 2021).

Kontaminasi mikroplastik menjadi perhatian utama di seluruh dunia. Deteksi dan kuantifikasi mikroplastik telah meningkat di lingkungan perairan dan keberadaannya mengganggu kehidupan ekosistem disekitarnya. Penelitian degradasi mikroplastik difokuskan pada pendekatan biologis dan non-biologis. Hingga saat ini, mikroorganisme seperti ganggang, jamur, dan bakteri telah menarik perhatian para ilmuwan sebagai alat untuk pengolahan mikroplastik. Reaksi enzimatik yang dihasilkan oleh mikroorganisme terkait erat dengan proses degradasi mikroplastik (Othman, 2021).

Mengingat hal ini, biodegradasi plastik telah dipelajari secara ekstensif selama tiga dekade terakhir. Para ilmuwan dan lainnya para pemangku kepentingan telah menunjukkan kepedulian yang besar untuk mengatasi akumulasi plastik non-biodegradable di lingkungan (Tokiwa dan Calabia 2008). Beberapa jenis plastik telah terbukti dapat terurai secara hayati, dan mekanisme degradasinya semakin jelas. Studi tentang biodegradasi plastik telah dilakukan untuk mengatasi masalah lingkungan yang terkait dengan limbah plastik. Penelitian terbaru mencakup studi tentang distribusi mikroorganisme

pendegradasi polimer sintetik di lingkungan, isolasi mikroorganisme baru untuk biodegradasi, penemuan enzim degradasi baru, dan kloning gen untuk enzim pendegradasi polimer sintetik (Shimao, 2001)

## METODE PENELITIAN

### Metode

Kajian artikel ini disusun berdasarkan *literature review* pada jurnal yang diterbitkan secara online yang terintegrasi pada *Google scholar* dan beberapa jurnal yang terdaftar pada situs *Science Direct*. Data yang diperoleh berdasarkan studi pustaka diintegrasikan, dikolaborasikan dan dianalisa untuk memperoleh informasi mengenai peranan mikroorganisme dalam mendegradasi plastik, serta mekanismenya, serta spesies dari berbagai mikroorganisme yang berperan dalam proses degradasi plastik.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Biodegradasi Plastik

Plastik dibuat secara substansial dari bahan petrokimia yang diekstrak dari batubara, minyak, dan gas alam. Banyak bahan polimer seperti polietilen (PE), polikaprolakton (PCL), poliuretan (PUR), polihidroksibutirat (PHB), polihidroksialkanoat (PHA), polivinil klorida (PVC), polietilen tereftalat (PET), polibutilena suksinat (PBS), asam

polilaktat atau polilaktida (PLA), polypropylene (PP), dan polystyrene (PS) umumnya digunakan untuk berbagai keperluan (Muhamad *et al.*, 2015; Yoshida *et al.*, 2016).

Plastik yang berbasis fosil dan berbasis bio yang digunakan saat ini sebagian besar tidak dapat terurai secara hayati, misalnya PE, PP, PS, dan PVC. Dengan demikian, plastik *non-biodegradable* ini telah terakumulasi di lingkungan dalam jumlah besar karena tidak tepat pengelolaan sampah dan membuang sampah sembarangan yang tidak terkendali dan, dengan demikian, menimbulkan ancaman serius bagi planet kita (Sharma dan Dhingra, 2016). Akumulasi jangka panjang dari polimer *non-biodegradable* di tanah menyebabkan penurunan kesuburan tanah di samping banyak lainnya masalah ekologi dan kesehatan.

Biodegradasi adalah proses dimana mikroorganisme mampu mendegradasi atau memecah polimer alam (seperti lignin, selulosa) dan polimer sintetik (seperti polietilen, polistiren) (Kaseem, *et al.*, 2012). Biodegradasi plastik merupakan proses perubahan sifat seperti kekuatan tarik, warna, struktur kimia, bentuk, dan berat molekul polimer plastik melalui degradasi mikroba. Biodegradasi dari plastik melibatkan hidrolisis enzimatik dan non-enzimatik mikroorganisme, terutama

bakteri, dan jamur (Wackett dan Hershberger, 2001; Hammer *et al.*, 2012; Gu, 2003).

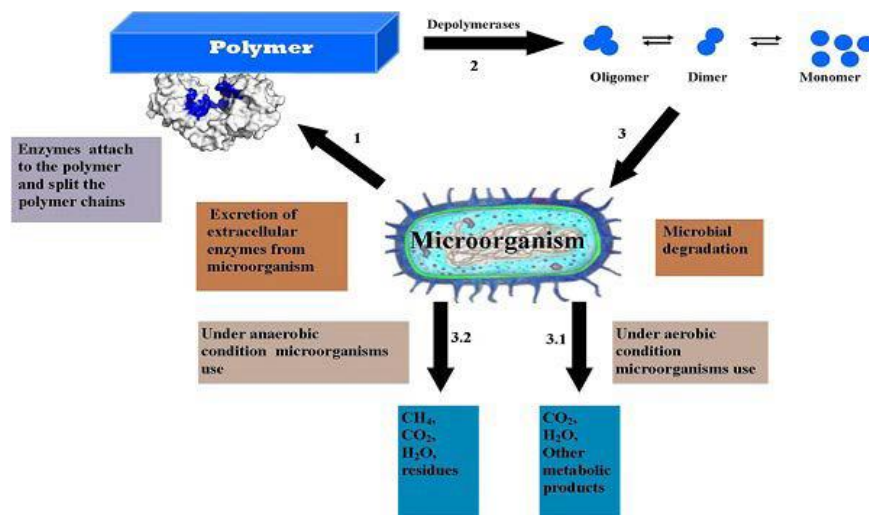
**Biodegradasi Secara Aerob dan Anaerob**

Plastik umumnya terurai secara hayati aerobik di alam, anaerobik di sedimen dan tempat pembuangan sampah dan sebagian aerobik dalam kompos dan tanah (Muthu, 2014). Biodegradasi aerobik dikenal sebagai respirasi aerobik yang merupakan bagian penting dari pengurangan alami kontaminan di tempat-tempat lokasi limbah berbahaya. Mikroba aerobik menggunakan oksigen sebagai elektron akseptor dan memecah bahan kimia organik menjadi senyawa organik yang lebih sederhana dengan CO<sub>2</sub> dan air

sebagai produk sampingan (Ahmet *et al.*, 2018; Priyanka dan Archana, 2011).

Biodegradasi anaerobik adalah penguraian kontaminan organik dengan menggunakan mikroorganisme dengan kondisi tanpa adanya oksigen. Proses ini juga merupakan komponen penting dari pengurangan alami kontaminan di tempat limbah berbahaya. Beberapa bakteri anaerob digunakan nitrat, sulfat, besi, mangan dan karbon dioksida sebagai akseptor elektronnya, untuk memecah bahan kimia organik menjadi senyawa yang lebih sederhana, C plastik → CH<sub>4</sub> + CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub> Residu

O + C + Biomassa (Muthu, 2014). Mekanisme biodegradasi secara aerob dan anaerob digambarkan pada **Gambar 1**



**Gambar 1.** Mekanisme degradasi plastic secara umum oleh mikroorganisme dalam kondisi aerob dan anaerob (Gu, 2003).

## **Mekanisme Biodegradasi Plastik oleh Mikroorganisme**

Mikroorganisme tidak mampu mengangkut polimer secara langsung melalui membran luar sel ke dalam selnya sehingga dibutuhkan proses biokimia yang berperan dalam memecah molekul polimer yang panjang dan sulit larut dalam air sehingga dapat masuk ke dalam sel. Mikroba mengeluarkan enzim ekstraseluler yang mendepolimerisasi polimer di luar sel (Fesseha dan Abebe, 2019). Depolimerisasi adalah proses dimana polimer mengalami depolimerisasi atau pemecahan terlebih dahulu menjadi monomer yang lebih kecil sebelum dapat diserap dan didegradasi dalam sel mikroorganisme (Fadlilah dan Shovitri, 2014).

Biodegradasi polimer memerlukan langkah-langkah sebagai berikut, (1) penempelan mikroorganisme pada permukaan polimer; (2) pertumbuhan mikroorganisme, menggunakan polimer sebagai sumber karbon; (3) degradasi akhir dari polimer (Singh dan Rawat, 2019; Gu, 2003). Proses biodegradasi terjadi melalui beberapa tahapan yaitu biodeteriorasi, biofragmentasi, asimilasi dan mineralisasi (Guzman *et al.*, 2011).

Lucas *et al.*, (2008) yang menyatakan bahwa proses biodegradasi polimer terdiri dari beberapa tahap. Tahap pertama disebut biodeteriorasi yaitu

terjadinya perpaduan aktivitas dari sekumpulan mikroorganisme, dekomposer lain dan faktor abiotik yang memecah komponen polimer menjadi lebih sederhana. Mikroorganisme mensekresikan senyawa katalitik (enzim dan radikal bebas) yang mampu memecah molekul polimer menjadi molekul yang lebih sederhana seperti, oligomer, dimer, dan monomer. Tahap ini disebut depolimerasi. Beberapa molekul dikenali oleh reseptor sel mikroba dan dapat melintasi membran plasma. Molekul lain tetap berada di lingkungan ekstraseluler dan dapat menjadi objek modifikasi yang berbeda. Selanjutnya, terjadi proses asimilasi di dalam sitoplasma. Molekul yang diangkut digunakan dalam proses metabolisme mikroba untuk menghasilkan produk berupa energi, biomassa, cadangan makanan serta metabolit primer maupun sekunder. Secara bersamaan, beberapa metabolit sederhana dan kompleks dapat diekskresikan ke bagian ekstraseluler (misalnya asam organik, aldehida, terpen, dan antibiotik). Tahap akhir yaitu mineralisasi, dimana molekul sederhana seperti CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O dan berbagai garam dari metabolit intraseluler yang sepenuhnya teroksidasi dilepaskan ke lingkungan.

Proses degradasi terjadi karena senyawa tersebut dimanfaatkan oleh mikroorganisme sebagai sumber nutrisi

untuk pertumbuhannya. Menurut Sangale *et al.*, (2012), proses biodegradasi akan lebih efektif dengan menggunakan jenis mikroorganisme yang memiliki karakter degradasi yang berbeda, dimana terdapat mikroorganisme yang berperan dalam pemecahan polimer dan ada yang berperan dalam pemanfaatan monomer. Bahan-bahan polimer yang dilepaskan ke lingkungan akan mengalami penguraian secara fisika, kimia dan biologi atau kombinasinya yang tergantung oleh adanya kelembapan, udara, temperatur, cahaya (*photo-degradation*), radiasi energi tinggi (UV,  $\gamma$ -radiation) atau oleh hadirnya mikroorganisme (bakteri atau jamur) (Sumarsono, 2011).

Terdapat dua enzim aktif yang terlibat dalam biodegradasi polimer yaitu enzim ekstraseluler dan enzim intracellular depolymerases. Penelitian oleh Gu, *et al.* (2000) melaporkan enzim ekstraseluler dan intraseluler yang berperan dalam depolimerasi secara aktif memicu proses degradasi polimer secara biologis. Proses degradasi yang terjadi dikarenakan senyawa tersebut dimanfaatkan oleh mikroorganisme sebagai sumber nutrisi untuk pertumbuhannya. Enzim hidrolitik ekstraseluler seperti CMCase, lipase, xilanase, keratinase, kitinase, dan protease yang disekresikan oleh bakteri ini berperan penting dalam proses degradasi plastik. Polyurethane mendepolimerisasi ikatan

uretan dan ester karena sifat hidrolitik enzim urease, esterase, dan protease. Papain dan urease memiliki kemampuan untuk mendegradasi poliester medis karena sifat proteolitiknya. Hal ini menunjukkan bahwa degradasi mikroplastik oleh mikroorganisme di lingkungan perairan mengurangi risiko ekologis dari polusi mikroplastik (Chandra, *et al.*, 2020).

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa ada sejumlah mikroorganisme (terutama beberapa bakteri dan jamur) yang memiliki kapasitas untuk mendegradasi polimer sintetik ini dengan cara yang jauh lebih cepat dibandingkan dengan metode alami dengan menggunakan beberapa eksoenzim dalam kondisi stress (Muhamad, *et al.*, 2015). Enzim lipase dari *Rhizopus arrhizus*, *Rhizopus delemar*, *Achromobacter* sp., dan *Candida cylindracea* menunjukkan aktivitas pada polietilen adipat (PEA) dan poli( $\epsilon$ -kaprolakton) (PCL). Degradasi enzimatik PCL oleh *Aspergillus flavus* dan *Penicillium funiculosum* menunjukkan bahwa degradasi terjadi lebih cepat diamati pada daerah amorf (Tokiwa dan Suzuki 1977). Selain itu, depolimerase poli(3-hidroksibutirat) (PHB) dari *Streptomyces termofilik* sp. juga mampu mendegradasi poli( $\beta$ -propiolakton) (PPL) (Cook, *et al.*, 1981). Dalam studi banding, biodegradabilitas dari tiga polialkilena suksinat [polietilen suksinat (PES),

polibutilena suksinat (PBS), dan polipropilen suksinat (PPS)] dengan berat molekul yang sama diselidiki menggunakan *Rhizopus delemar* lipase. PPS dengan suhu leleh rendah ( $T_m$ , 43 –52 °C) memiliki laju biodegradasi tertinggi diikuti oleh PES, karena kristalinitas PPS lebih rendah dibandingkan dengan PES dan PBS (Calabia dan Tokiwa, 2006).

### **Faktor yang Mempengaruhi Biodegradasi Plastik**

Struktur kimia dan fisik dari plastik memainkan peran penting dalam biodegradasi plastik. Plastik memiliki polimer yang sulit untuk terdegradasi dibandingkan dengan polimer tanpa rantai samping. Polimer dengan berat molekul berlebihan sulit untuk didegradasi. Faktor lain yang mempengaruhi dalam biodegradasi polimer adalah morfologinya, suhu leleh dan derajat kristalinitas. Jika polimernya amorf, maka akan terdegradasi lebih mudah dibandingkan polimer kristal. Polimer dengan suhu leleh yang tinggi juga sulit untuk terurai (Bhardwaj *et al.*, 2013). Kecepatan proses biodegradasi dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain adalah jenis polimer, karakteristik organisme, dan jenis perlakuan yang diperlukan. Perubahan warna, pemisahan fasa, retak, erosi dan delimitasi adalah beberapa karakteristik yang menunjukkan adanya degradasi polimer (Shah, *et al.*, 2008).

Biodegradabilitas polimer pada dasarnya ditentukan oleh 8 karakteristik sifat fisik dan kimia, antara lain: (1) adanya gugus fungsi yang meningkatkan hidrofobik (degradasi hidrofilik lebih cepat dari hidrofobik); (2) berat molekul dan kerapatan polimer (lebih rendah terdegradasi lebih cepat daripada lebih tinggi); (3) morfologi plastik polimer yang bergantung pada jumlah daerah kristal dan amorf (amorf terdegradasi lebih cepat daripada kristal); (4) kompleksitas struktural, seperti linearitas atau keberadaan rantai cabang di dalam polimer; (5) adanya ikatan yang mudah putus seperti ester atau amida obligasi; (6) Komposisi molekul (campuran); (7) Sifat dan bentuk fisik polimer (misalnya film, pelet, bubuk atau serat); (8) polimer lunak terdegradasi lebih cepat daripada polimer yang keras (Ahmed *et al.*, 2018; Mohan dan Srivastava, 2011; Singh dan Rawat, 2019).

### **Mikroorganisme Pendegradasi Plastik**

Peranan mikroorganisme dalam biodegradasi plastik dan penelitian terkait sudah banyak dilakukan. Menurut Yoon *et al.* (2012), mikroorganisme pendegradasi plastik dapat diisolasi dari tanah, air laut, atau kompos. yang berperan dalam biodegradasi yaitu bakteri, jamur, yeast dan alga. Setiap mikroorganisme memiliki karakteristik yang berbeda, sehingga proses degradasi yang terjadi akan berbeda

atau bervariasi antara satu mikroorganisme dengan mikroorganisme yang lain (Fadlilah dan Shovitri, 2014).

Chandra, *et al.* (2020) melaporkan, beberapa spesies bakteri pendegradasi berbagai jenis mikroplastik, diantaranya: *Bacillus* sp. BCBT21, *Bacillus amyloliquefaciens* BSM-1, *Bacillus amyloliquefaciens* BSM2, *Pseudomonas putida*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus cereus*, *Brevibacillus borstelensis*, *Bacillus vallismortis* bt-dsce 01, *Pseudomonas protegens* bt-dsce 02, *Stenotrophomonas* sp. bt-dsce03, and *Paenibacillus* sp. bt-dsce04. Bakteri lain yang telah diketahui mampu mendegradasi limbah plastik antara lain adalah bakteri *Pseudomonas* sp., *Staphylococcus* sp., *Streptomyces* sp., dan *Bacillus* sp. (Usha dkk., 2011).

Marjayandari dan Shovitri (2015) menyatakan, isolat bakteri *Bacillus* sp. memiliki potensi dalam mendegradasi plastik uji hitam, putih dan transparan. Kemampuan *Bacillus* sp. dalam mendegradasi plastik juga dibuktikan oleh penelitian Fadlilah dan Shovitri (2014). Polyethylene (PET) berhasil didegradasi oleh *Brevibacillus borstelensis* (Calabia dan Tokiwa, 2006), *Rhodococcus rubber* (Bikiaris *et al.*, 2006) dan *Pseudomonas chlororaphis* (Zheng, *et al.*, 2005) Sementara itu, *Pseudomonas putida* (Sivan *et al.*, 2006), *Ochrobactrum* dan

*Pseudomonas fluorescens* memecah polimer rantai Polivinil klorida (PVC) (Gilan *et al.*, 2004).

Penelitian yang dilakukan oleh Sriningsih dan Shovitri (2015) menemukan kemampuan *Pseudomonas* sp. dalam mendegradasi plastik hitam dengan rata-rata degradasi sebesar 2,7%, plastik putih sebesar 3,3% dan plastik transparan sebesar 4,5% selama 3 bulan masa inkubasi. Penelitian terkait oleh Kyaw *et al.* (2012) terjadi perubahan berat plastik LLDPE yang diinkubasi selama 120 hari oleh bakteri *Pseudomonas* sp. *Pseudomonas* secara umum tidak memiliki enzim hidrolitik yang berperan dalam mendegradasi polimer menjadi monomer namun bakteri ini memiliki *system inducible operon* yang mampu menghasilkan enzim tertentu dalam proses metabolisme sumber karbon yang tidak biasa digunakan. Sehingga, bakteri ini memiliki peran penting dalam proses biodegradasi berbagai macam polimer antara lain senyawa xenobiotic dan pestisida. Salah satu jenis enzim yang dihasilkan oleh *Pseudomonas* spp. yang berperan dalam biodegradasi adalah serine hidrolase, esterase dan lipase (Shimao, 2001).

Tokiwa *et al.* (2009) membuktikan bahwa spesies jamur *Aspergillus flavus* dan *Aspergillus niger* mampu mendegradasi jenis plastik PCL. Enzim



yang dihasilkan *Aspergillus flavus* adalah enzim glukosidase, sedangkan enzim yang dihasilkan *Aspergillus niger* yaitu katalase dan protease. Sedangkan, *Penicillium funiculosum* dan *Streptomyces* dilaporkan dapat mendegradasi polihidroksibutirat (PHB). Penelitian tersebut didukung oleh Esmaeili, *et al.* (2013) yang melaporkan *Lysinibacillus xylanilyticus* dan *Aspergillus niger* mampu mendegradasi plastik jenis polyethylene. Setelah 126 hari inkubasi terjadi perubahan pada permukaan polyethylene yang dianalisis dengan menggunakan metode analisis SEM. Spesies fungi lainnya, yaitu *Fusarium solani*, *Curvularia senegalensis* dan *Aureobasidium pullulans* dilaporkan memiliki kemampuan dalam degradasi plastik (Sivan, 2011). Shimao (2001) mengklarifikasi *Fusarium*, *Amycolaptosis* sp. dan *Phanerochaete chrysosporium* sebagai spesies jamur dan *Pseudomonas stutzeri* sebagai spesies bakteri yang berperan dalam mendegradasi berbagai jenis plastik. Russel (2011) menemukan satu spesies jamur *Pestalotiopsis microspora* berhasil mendegradasi polietilen.

Kelompok actinomycetes juga telah ditemukan berperan dalam mengurai beberapa jenis polimer plastik (LDPE, PS, dan PLA) dan menggunakan plastik sebagai sumber karbon.. Oliveira *et al.* (2022) menyatakan terdapat tiga strain

actinomycetes baru yang diidentifikasi memiliki kemampuan dalam menguraikan plastik, yaitu *Streptomyces gougerotti*, *Micromonospora matsumotoense*, dan *Nocardiopsis prasina*. Howard *et al.* (2012) melaporkan *Acinetobacter calcoaceticus* dan *A. gernerii* mampu mendegradasi jenis polimer plastic poliuretan sedangkan *Streptomyces* sp., *Sporichthya* sp. *Actinoplanes* sp., mampu mendegradasi polimer polietilen (Sathya *et al.*, 2012).

## SIMPULAN

Simpulan artikel ini adalah pengendalian secara biologis dengan biodegradasi diharapkan mampu mengatasi pencemaran lingkungan akibat akumulasi sampah plastik yang menjadi permasalahan di seluruh dunia. Biodegradasi merupakan proses penguraian senyawa organik oleh aktivitas mikroorganisme, sehingga terjadi transformasi struktur dari suatu senyawa yang menyebabkan perubahan integritas molekular. Biodegradasi polimer terjadi melalui mekanisme aerob dan anaerob, adapun langkah-langkah dalam biodegradasi sebagai berikut, (1) penempelan mikroorganisme pada permukaan polimer; (2) pertumbuhan mikroorganisme, menggunakan polimer sebagai sumber karbon; (3) degradasi akhir dari polimer. Struktur kimia dan

fisik dari plastik memainkan peran penting dalam biodegradasi plastik. Sinergisme beberapa jenis mikroorganisme seperti bakteri, actinomycetes dan jamur dalam bentuk konsorsium dapat menyempurnakan proses degradasi senyawa hidrokarbon, dibandingkan hanya dilakukan oleh satu jenis mikroba. Penelitian lanjutan sangat diperlukan guna mengeksplorasi dan mengkarakterisasi strain mikroba baru serta menganalisis secara mendalam mekanisme mikroba tersebut dalam mendegradasi plastik.

Selain itu, permintaan dan penggunaan plastik yang terus meningkat perlu berkorelasi positif dengan pengelolaan limbah dan pengendalian sampah plastik. Pemanfaatan bahan *biodegradable* dalam aplikasi industri berbahan dasar plastik perlu ditingkatkan, diikuti dengan pengembangan industri yang dioptimalkan, serta strategi pengendalian pengelolaan sampah plastik agar dapat menjamin keamanan dan kelestarian lingkungan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed T, Shahid M, Azeem F, et al. 2018. Biodegradation of plastics: Current scenario and future prospects for environmental safety. *Environ Sci Pollut Res Int*, 25(8): 7287-7298. doi: 10.1007/s11356-018-1234-9.
- Bikiaris, D.N., G.Z. Papageorgiou and D.S. Achilias. 2006. Synthesis and comparative biodegradability studies of three poly(alkylene succinate)s. *Polym Degrad Stab*, 91: 31–43.
- Bhardwaj H, Gupta R, Tiwari A. 2013. Communities of microbial enzymes associated with biodegradation of plastics. *Journal of Polymers and the Environment*, 21(2): 575-579. doi: 10.1007/s10924-012-0456-z
- Calabia, B.P., Tokiwa, Y. 2006. A Novel PHB Depolymerase from a Thermophilic *Streptomyces* sp.. *Biotechnol Lett* **28**, 383–388.
- <https://doi.org/10.1007/s10529-005-6063-5>.
- Chandra, Prem., Enespa, Devendra P. Sigh. 2020. Microplastic degradation by bacteria in aquatic ecosystem. *Elsevier: Microorganisms for Sustainable Environment and Health*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819001-2.00022-X>.
- Cook, W.J., J.A. Cameron, J.P. Bell and S.J. Huang. 1981. Scanning electron microscopic visualization of biodegradation of polycaprolactones by fungi. *J Polym Sci Polym Lett Ed*, 19: 159–165.
- Esmaeili A, Pourbabaee AA, Alikhani HA, Shabani F, Esmaeili E .2013. Biodegradation of Low-Density Polyethylene (LDPE) by Mixed Culture of *Lysinibacillus xylanilyticus* and *Aspergillus niger* in Soil. *PLoS ONE* 8(9). <https://10.1371/journal.pone.0071720>.

- Fadlilah, Fiki Rahmah dan Maya Shovitri. 2014. Potensi Isolat Bakteri Bacillus dalam Mendegradasi Plastik dengan Metode Kolom Winogradsky. *Jurnal Teknik Pomits*, 3(2).
- Fesseha H, Abebe F. 2019. Degradation of plastic materials using microorganisms: A review. *Public Health Open J*, 4(2): 57-63. doi: 10.17140/PHOJ-4-136
- Gilan, I., Y. Hadar and A. Sivan, 2004. Colonization, biofilm formation and biodegradation of polyethylene by a strain of *Rhodococcus ruber*. *Appl Microbiol Biotechnol*, 65: 97–104.
- Gu, J-D., Ford, T.E., Mitton, D.B. and Mitchell, R. 2000. *Microbial corrosion of metals. (In Review W (Ed), The Uhlig Corrosion Handbook 2nd Edition pp. 915-927. Wiley: New York.*
- Gu J-D. 2003. Microbiological deterioration and degradation of synthetic polymeric materials: Recent research advances. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 52(2): 69-91. doi: 10.1016/S0964-8305(02)00177-4
- Guzman, A., Gnutek, N., and Janik, H. 2011. Biodegradable Polymers For Food Packaging – Factors Influencing Their Degradation And Certification Types – A Comprehensive Review. *Chemical Technology*, 5(1).
- Hammer J, Kraak MH, Parsons JR. 2012. Plastics in the marine environment: The dark side of a modern gift. *Rev Environ Contam Toxicol*, 220: 1-44. doi: 10.1007/978-1-4614-3414-6\_1.
- Howard GT, Norton WN, Burks T. 2012. Growth of *Acinetobacter gernerii* P7 on polyurethane and the purification and characterization of a polyurethane enzyme. *Biodegrad*, 23:561–573.
- Kyaw, B. M., Champakalakshmi. R., Sakharkar, M., Lim, C. S., & Sakharkar, K. R. 2012. Biodegradation of Low Density Polyethylene (LDPE) by *Pseudomonas* Species. *Indian Journal of Microbiology*, 52(3):411-419. <https://doi.org/10.1007/s12088-012-0250-6>.
- Lucas, N., Bienaime, Ch., Belloy, Ch., Queneudec, M., Silvestre, F., dan Nava -Saucedo, J.E. 2008. “Polymer biodegradation: mechanisms and estimation techniques: review”. *Chemosphere* 73 (4): 429 -442. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.06.064>.
- Marjayandari, Lisa dan Shovitri, Maya. 2015. Potensi Bakteri Bacillus sp. dalam Mendegradasi Plastik. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 4(2).
- Mohan KS, Srivastava T. 2011. Microbial deterioration and degradation of polymeric materials. *J Biocheml Tech*, 2(4): 210- 215.
- Muhamad WNAW, Othman R, Shaharuddin RI, Irani MS. 2015. Microorganism as plastic biodegradation agent towards sustainable environment. *Advances in Environmental Biology*, 9(13) Special 2015, Pages: 8-13.
- Muthu SS. 2014. Roadmap to sustainable textiles and clothing: Environmental and social aspects of textiles and clothing supply chain. NY, USA: Springer.
- Oliveira, J. Almeida, P.L. Sobral, R.G. Lourenço, N.D. Gaudêncio, S.P. 2022. Marine-Derived Actinomycetes: Biodegradation of Plastics and Formation of PHA Bioplastics—A Circular Bioeconomy Approach. *Mar. Drugs*, 20, 760. <https://doi.org/10.3390/md20120760>.

- Othman, A.R., Hasan, H.A., Muhamad, M.H. *et al.* 2021. Microbial degradation of microplastics by enzymatic processes: a review. *Environ Chem Lett* **19**, 3057–3073. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01197-9>.
- Priyanka N, Archana T. 2011. Biodegradability of polythene and plastic by the help of microorganism: A way for brighter future. *J Environ Anal Toxicol*, 1(4): 1000111. doi: 10.4172/2161-0525.1000111
- Russell, J. R., et al. 2011. Biodegradation of Polyester Polyurethane by Endophytic Fungi. *Applied And Environmental Microbiology*, 77(17), p. 6076–6084. <https://doi.org/10.1128/AEM.00521-11>.
- Sangale, M. K., Shahnawaz, M., and Ade, A. B. 2012. A Review on Biodegradation of Polythene: The Microbial Approach. *J Bioremed Biodeg* 3:164. doi: 10.4172/2155-6199.1000164.
- Sathya R, Ushadevi T, Panneerselvam A. 2012. Plastic degrading actinomycetes isolated from mangrove sediments. *Int J Curr Res*, 4(10):001–003
- Saminathan P, Sripriya A, Nalini K, Sivakumar T, Thangapandian V. 2014. Biodegradation of plastics by *Pseudomonas putida* isolated from garden soil samples. *J Adv Bot Zool* 1(3):34–38.
- Sivan, A., M. Szanto and V. Pavlov. 2006. Biofilm development of the polyethylene-degrading bacterium *Rhodococcus ruber*. *Appl Microbiol Biotechnol*, 72(2):346–52.
- Sivan, A. 2011. New Perspectives in Plastic Biodegradation. *Current Opinion in Biotechnology*, 22(3):422-426. <https://10.1016/j.copbio.2011.01.013>.
- Shah, AA., Hasan F, Hameed A, Ahmed S. 2008. “Biological degradation of plastics: A comprehensive review”. *Journal of Biotechnology*, Vol 26: 246-265.
- Sharma M, Dhingra HK (2016) Poly- $\beta$ -hydroxybutyrate: a biodegradable polyester, biosynthesis and biodegradation. *British Microbiology Research Journal* 14(3): 1-11. <https://doi.org/10.9734/BMRJ/2016/25430>.
- Shimao, Masayuki. 2001. Biodegradation of plastics. *Current Opinion in Biotechnology*, 12 (3) 242-247. [https://doi.org/10.1016/S0958-1669\(00\)00206-8](https://doi.org/10.1016/S0958-1669(00)00206-8).
- Singh S and Rawat PS. 2019. Biodegradation of Plastic: An Innovative Solution to Safe the Human Health and Environment. In: *Handbook of Research on Environmental and Human Health Impacts of Plastic Pollution: Pennsylvania*. USA: IGI Global, 435-461. doi: 10.4018/978-1-5225-9452-9.ch022
- Sriningsih, Atik dan Shovitri, Maya. 2015. Potensi Isolat Bakteri *Pseudomonas* sebagai Pendegradasi Plastik. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 4(2).
- Sumarsono, T. 2011. Efektivitas Jenis dan Konsentrasi Nutrien dalam Bioremediasi Tanah Tercemar Minyak Mentah yang Diaugmentasi Dengan Konsorsium Bakteri. Skripsi. Departemen Biologi FSAINTEK Universitas Airlangga, Surabaya.
- Tokiwa Y, Calabia B.P. 2008. Biological production of functional chemicals from renewable resources. *Can J Chem*, 86(6):548–555. <https://doi.org/10.1139/v08-046>.

- Tokiwa, Y., B.P. Calabia, C.U. Ugwu and S. Aiba. 2009. Biodegradability of plastics. *Int J Mol Sci.*, 10: 3722-3742. 1.
- Tokiwa, Yutaka and Suzuki, Tomoo. 1977. Purification and Some Properties of Polyethylene Adipate-degrading Enzyme Produced by *Penicillium* sp. Strain 14-3. *Agricultural and Biological Chemistry*, 41:2, 265-274. <https://doi.org/10.1080/00021369.1977.10862486>.
- Usha, R. Sangeetha, T. and Palaniswamy, M. 2011. Screening of Polyethylene degrading Microorganisms from Garbage Soil. *Libyan Agric. Res. Cen. J. Intl.* 2 (4): 200-204.
- Wackett L, Hershberger C. 2001. Biodegradation and biocatalysis—microbial transformation of organic compounds. ASM Press, Washington, DC.
- Yunar, Vica. 2011. Evaluasi Biodegradabilitas Plastik Berbahan Dasar Campuran Pati Dan Polietilen Menggunakan ASTM G21-09,Uji Mikroorganisme dan Uji Lapangan. Skripsi. Universitas Indonesia. Depok.
- Yoon, M. G., Jeon, H. J. and Kim, M. N. 2012. Biodegradation of Polyethylene by a Soil Bacterium and AlkB Cloned Recombinant Cell. *J Bioremed Biodegrad*, 3(4): 1-8. <https://10.4172/2155-6199.1000145>.
- 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>.
- Zheng, Y., Ernest K. Y. and Amarjeet .S. B. 2005. A Review of Plastic Waste Biodegradation. *Critical Reviews in Biotechnology*, 25:4, 243-250. <https://doi.org/10.1080/07388550500346359>.