



## **Pemanfaatan Mikroorganisme untuk Biodegradasi Mikroplastik**

### ***Utilization of Microorganisms for Microplastic Biodegradation***

**Ade Rusman<sup>1,2\*</sup>, Nuning Vita Hidayati<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Program Studi Akuakultur Universitas Muhammadiyah Purwokerto, Jl. KH. Ahmad Dahlan, Kembaran, Kabupaten Banyumas, Jawa Tengah 53182, Indonesia

<sup>2</sup>Magister Sumber Daya Akuatik, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Jenderal Soedirman, Jl. Dr Soeparno, Komplek GOR Soesilo Soedarman, Karangwangkal, Karang Bawang, Grendeng, Purwokerto Utara, Kabupaten Banyumas, Jawa Tengah 53122, Indonesia

**\*Corresponding author:** [aderusman@yahoo.co.id](mailto:aderusman@yahoo.co.id)

Diterima: 22 Januari 2022; Disetujui: 18 Februari 2022

### **ABSTRAK**

Plastik telah menjadi bagian dari kehidupan manusia. Industri makanan olahan telah didominasi oleh plastik kemasan karena sifatnya yang fleksibel dengan mengambil porsi 80 persen. Penggunaan plastik dalam pengemasan, pengiriman, perindustrian dan pertanian baik di pedesaan maupun perkotaan yang diluar kendali telah menimbulkan masalah yang serius yaitu sampah plastik dan pencemaran lingkungan. Mikroplastik merupakan hasil proses dekomposisi sampah plastik yang berlangsung sangat lama melalui berbagai proses kimiawi, fisik, maupun biologi. Mikroplastik dan nanoplastik yang mencemari ekosistem perairan laut dan pantai dapat masuk ke rantai makanan dan membahayakan kesehatan manusia wajib menjadi keprihatinan masyarakat dunia. Pengendalian pencemaran mikroplastik dengan memanfaatkan kemampuan dan potensi mikroba dan bakteri *indigenous* dan jamur atau fungi yang tumbuh dalam lingkungan yang tercemar mikroplastik yang sering disebut remediasi menjadi salah satu strategi yang efisien dan menjanjikan di masa depan. Menempelnya mikroorganisme pada polimer merupakan tahap awal proses biodegradasi plastik yang selanjutnya diikuti oleh pembentukan koloni pada permukaan polimer. Pembelahan hidrolitik merupakan proses lanjutan yang terjadi pada saat enzim mikroba menempel pada substrat polimer. CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O merupakan produk degradasi polimer seperti oligomer, dimer dan monomer melalui proses mineralisasi. CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O merupakan produk akhir dari proses biodegradasi oleh bakteri secara aerobik, yaitu dengan memanfaatkan oksigen sebagai akseptor elektron yang diikuti dengan sintesis senyawa organik yang lebih kecil. Laju biodegradasi dipengaruhi oleh faktor biotik yaitu kelembaban, suhu dan pH dan faktor abiotik yaitu enzim dan hidrofobitas.

**Kata kunci:** Biodegradasi, Mikroorganisme, Mikroplastik, Pencemaran, Lingkungan

### **ABSTRACT**

*Plastic has become a part of human life. The processed food industry has been dominated by plastic packaging because of its flexible nature by taking up 80 percent of the portion. The uncontrolled use of plastic in packaging, shipping, industry and agriculture in both rural and urban areas has caused serious problems, namely plastic waste and environmental pollution. Microplastic is the result of a very long process of decomposition of plastic waste through various chemical, physical, and biological processes. Microplastics and nanoplastics that pollute marine and coastal aquatic ecosystems can enter the food chain and endanger human health, which must be a concern for the world community. Microplastic pollution control by utilizing the ability and potential of indigenous microbes and bacteria and fungi or fungi that grow in an environment contaminated with microplastics, which is often called remediation, is an efficient and promising strategy in the future. The attachment of microorganisms to the polymer is the initial stage of the plastic biodegradation process which is then followed by the formation of colonies on the polymer surface. Hydrolytic*

*cleavage is an advanced process that occurs when microbial enzymes attach to polymer substrates. CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O are degradation products of polymers such as oligomers, dimers and monomers through the mineralization process. CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O are the end products of the aerobic biodegradation process by bacteria, using oxygen as an electron acceptor followed by the synthesis of smaller organic compounds. The rate of biodegradation is influenced by biotic factors, namely humidity, temperature and pH and abiotic factors, namely enzymes and hydrophobicity.*

**Keywords:** Biodegradation, Microorganisms, Microplastics, Pollution, Environment

## PENDAHULUAN

Plastik telah menjadi bagian dari kehidupan manusia. Kemasan kaleng dan gelas telah digantikan oleh kemasan plastik yang lebih praktis dan efisien. Industri makanan olahan telah didominasi oleh plastik kemasan karena sifatnya yang fleksibel dengan mengambil porsi 80 persen. Untuk kemasan yang luwes mencapai 53 persen yang digunakan untuk mengemas, menyimpan dan membungkus makanan, sedangkan untuk kemasan minuman banyak menggunakan kemasan yang kaku (Nasution, 2015).

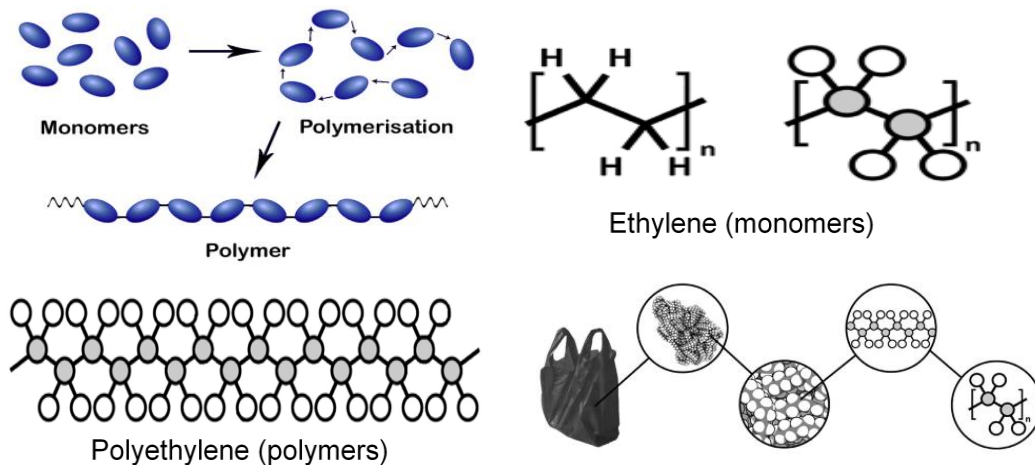
Penggunaan plastik dalam pengemasan, pengiriman, perindustrian, dan pertanian baik di pedesaan maupun perkotaan yang diluar kendali telah menimbulkan masalah yang serius yaitu sampah plastik dan pencemaran lingkungan. Keunggulan utama plastik yaitu ringan, daya tahan tinggi, kuat dan murah sedangkan kelemahannya yaitu secara alami sulit terdegradasi. Penggunaan plastik dunia telah meningkat hingga 12 persen per tahun dan 0,15 miliar ton polimer sintesis dihasilkan secara global per tahunnya (Kumari *et al.*, 2019). Plastik merupakan polimer kompleks yang memiliki umur degradasi yang sangat panjang. Plastik memiliki rantai yang berulang dan panjang serta memiliki *molecular weight* (berat molekul) yang tinggi. Dengan demikian untuk memecah rantai yang panjang menjadi rantai yang pendek dari plastik

memerlukan waktu yang lama (Gyung Yoon *et al.*, 2012).

Plastik kemasan sekali pakai dan praktis akan menjadi sampah dan dibuang ke tempat pembuangan. Limbah plastik tersebut akan mencemari lingkungan, ekosistem baik daratan ataupun perairan andai tanpa pengelolaan yang baik dan benar. Kontaminasi mikroplastik yang bersifat persisten di daratan dan perairan merupakan permasalahan yang belum terpecahkan. Limbah rumah tangga dan industri merupakan penyumbang terbesar limbah plastik. Mikroplastik merupakan hasil proses dekomposisi sampah plastik yang berlangsung sangat lama melalui berbagai proses kimiawi, fisik, maupun biologi (Fachrul & Rinanti, 2018).

Mikroplastik merupakan partikel-partikel kecil hasil dari degradasi plastik yang terapung di lautan oleh cahaya matahari (foto degradasi), abrasi mekanik dan oksidasi (Zhang *et al.*, 2021). Mikroplastik dan nanoplastik yang mencemari ekosistem perairan laut dan pantai dapat masuk ke rantai makanan dan membahayakan kesehatan manusia wajib menjadi keprihatinan masyarakat dunia (Widianarko & Hantoro, 2018).

Ada dua jenis mikroplastik yang berukuran lebih kecil dari 5 mm yaitu mikroplastik primer dan sekunder. Partikel mikro yang digunakan untuk serat sintesis dan kosmetik merupakan mikroplastik primer sedangkan molekul berupa polimer hasil fragmentasi atau



Gambar 1. Monomer, Polymerasion, Polymer, Ethylene (monomers) dan Polyethylene (polymers) (Crawford & Quinn, 2017)

perubahan disebut mikroplastik sekunder (Ekosafitri *et al.*, 2017). Mikroplastik mempunyai beragam jenis, komposisi dan masa jenis bentuk (fragmen, film dan fiber), ukuran, warna (Bergmann, 2015).

Pecahan plastik merupakan ciri dari fragmen mikroplastik. Fragmen plastik dengan densitas rendah merupakan asal dari polimer plastik sekunder yang berbentuk film yang berupa lembaran atau pecahan. Sedangkan mikroplastik yang seperti serabut atau jaring dan berwarna biru jika terkena sinar ultraviolet disebut fiber (Mohamed Nor & Obbard, 2014). Mikroplastik jenis ini banyak dijumpai pinggir pantai. Plastik merupakan polimer sintesis yang mempunyai kerapatan massa molekul tinggi sehingga sangat sulit terdegradasi akhirnya menjadi permasalahan di lingkungan, misalnya polimer polietilen (PE) yang mempunyai kerapatan 0,91-0,97 gram/cm<sup>3</sup>, sehingga sulit dipenetrasi oleh mikroba secara alami (Fachrul *et al.*, 2021).

Banyaknya mikroplastik di lingkungan perairan tawar disebabkan beberapa faktor yang ada yaitu

perbandingan jumlah sumber air dengan populasi manusia, waktu tinggal air, jumlah saluran pembuangan, ukuran sumber air, jenis pengolahan limbah, dan jarak ke pusat perkotaan, (Moore, 2008). Mikroplastik akhirnya akan mengendap di sedimen jika berada dalam badan air (Wright *et al.*, 2013).

Kehadiran mikroplastik di laut terjadi karena: (1) plastik dibuang langsung ke laut, (2) terfragmentasi di laut, (3), hilang dalam proses pengolahan, (4) pembuangan limbah ke lingkungan (GESAMP, 2015). Dengan demikian, pendekatan teknologi bioremediasi merupakan strategi dan pendekatan yang menarik untuk mengendalikan pencemaran mikroplastik di lingkungan (Caruso, 2015; Wu *et al.*, 2017) melalui pemanfaatan potensi bakteri *indigenous* atau mikroba yang ditumbuhkan dalam lingkungan yang

**Tabel 1.** Beberapa Penelitian Terkait Mikroplastik di Lingkungan

<b>Fokus Penelitian</b>	<b>Tipe Sampel</b>	<b>Referensi</b>
<b>Lingkungan Perairan Laut</b>		
Transportasi spesies bakteri patogen ikan <i>Aeromonas salmonicida</i> oleh mikroplastik	Permukaan air	Virsek et al. (2017)
Kehadiran organofosfat ester (OPEs) dan ester asam ftalat (PAEs) dalam mikroplastik terdampar	Sedimen pantai	Zhang et al. (2018)
<b>Estuaria</b>		
Penilaian risiko ekologis mikroplastik, logam berat, dan PAH	Sedimen pantai	Akhbarizadeh et al. (2017)
Penilaian risiko mikroplastik di Muara Changjiang, China	Air Permukaan	Xu et al. (2018)
<b>Sungai</b>		
Sumber mikroplastik dan pemodelan input global dari sungai ke laut	Data pengukuran lapangan	Lebreton et al. (2017), Siegfried et al. (2017)
Sumber mikroplastik dan masukan dari sungai ke laut	Data kolom air sungai	Schmidt et al. (2017)
<b>Danau</b>		
Pengaruh mikroplastik yang mengandung polutan murni atau hidrofobik pada organisme limnik	Contoh ikan ( <i>Clarias gariepinus</i> , <i>Danio rerio</i> ), zooplankton ( <i>Daphnia magna</i> )	Karami et al. (2016), Ma et al. (2016), Chen et al. (2017)
Pemodelan distribusi spasial mikroplastik di Great Lakes	Air permukaan (data literatur)	Hoffman and Hittinger (2017)
<b>Tanah</b>		
transportasi mikroplastik di tanah oleh cacing tanah <i>Lumbricus terrestris</i>	Campuran tanah sintetis dan <i>Lumbricus terrestris</i>	Rillig et al. (2017)
Kelimpahan dan distribusi mikroplastik dalam agregat tanah	Tanah	Zhang and Liu (2018)

terpapar mikroplastik (Fachrul et al., 2021).

### MIKROPLASTIK DILINGKUNGAN

Mikroplastik bersifat persisten sehingga kehadiran di lingkungan menjadi masalah, berpotensi toksik dan karsinogenik karena sering mengandung bahan kimia, dan akan mempengaruhi kehidupan perairan jika dikonsumsi oleh organisme. Sampah plastik berdampak pada kerusakan keseimbangan ekosistem laut, meracuni biota laut, dan merusak terumbu karang. Mikroplastik pada akhirnya dapat berdampak pada lingkungan dan kesehatan manusia

karena dapat masuk ke dalam rantai makanan (Wright & Kelly, 2017).

Mikroplastik menyebabkan banyak permasalahan lingkungan, biota air dan tanah seperti laut, muara, sungai, danau dibuktikan oleh beberapa penelitian (Tabel 1). Ini menjadi bukti bahwa limbah mikroplastik yang menyebar tidak terkontrol menyebabkan kerusakan lingkungan (Fachrul et al., 2021).

Monomer merupakan fragmen-fragmen yang lebih pendek hasil dari degradasi penyinaran sinar UV rantai panjang polyethylene sehingga putus dan membentuk hidro peroksida (Asriza & Pitulima, 2017). Pemanfaatan sinar UV untuk proses degradasi dapat

menyebabkan efek negatif seperti efek rumah kaca. Pencemaran udara oleh gas karbondioksida (CO<sub>2</sub>) dan gas karbonmonoksida (CO) hasil pembakaran limbah plastik akan menimbulkan dampak negative, yaitu. Sehingga, diperlukan adanya solusi untuk mengolah mikroplastik dengan baik dan aman (Fachrul *et al.*, 2021).

**PENGOLAHAN MIKROPLASTIK**

Plastik berubah menjadi fragmen-fragmen melalui proses degradasi secara mekanis melalui gelombang laut, angin, dan aktivitas makhluk hidup (Kershaw, 2015). Mengendapkan mikroplastik pada sedimen densitasnya akan mengalami perubahan karena *biofouling*, pelapukan, dan paparan cahaya matahari (Hidalgo-Ruz *et al.*, 2012). Landfill atau proses alami pendegradasian plastik memerlukan lahan yang luas sehingga tidak efisien (Zhang *et al.*, 2021).

Senyawa hidrofobik yang beracun di lingkungan ma mpu diserap oleh mikroplastik (Cole, 2011). Mikroplastik

bersifat karsinogenik sehingga berpotensi mengganggu sistem saluran kelenjar endokrin (Rochman dkk., 2013), kerusakan sistem saluran pencernaan, fisik maupun kimia organ internal makhluk hidup (Ryan *et al.*, 2009)

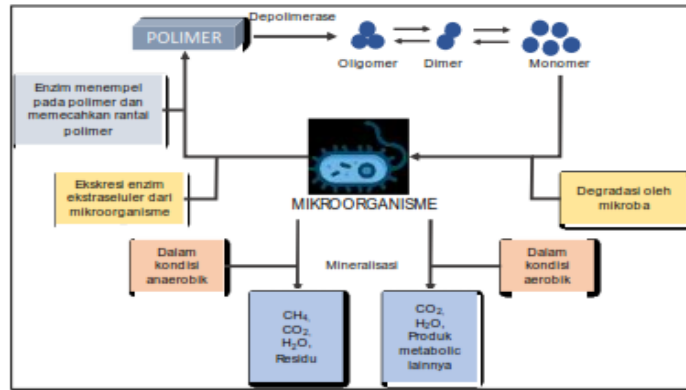
**BIODEGRADASI MIKROPLASTIK**

Pengendalian pencemaran mikroplastik dengan memanfaatkan kemampuan dan potensi mikroba dan bakteri *indigenous* dan jamur atau fungi yang tumbuh dalam lingkungan yang tercemar mikroplastik yang sering disebut remediasi menjadi salah satu strate gi yang efisien dan menjanjikan di masa depan (Fachrul & Rinanti, 2018). Dalam beberapa penelitian dengan sampel plastik di laut ditemukan adanya mikroba eukariota, archaea, fungi dan bakteri (Jacquin *et al.*, 2019). Beberapa penelitian yang terhadap sampel plastik dari laut atau diinkubasi air laut untuk mengevaluasi keberagaman hayati plastisfer dengan teknik molekuler di wilayah geografis yang berbeda Tabel 2.

Tabel 2. Beberapa Riset Penilaian Mikroorganisme dengan Teknik Molekuler

Area Penelitian	Tipe Sampel	Metode	Target Gen	Target	Referensi
Laut subtropical Pasifik Utara	Sampling pada air permukaan	Metagenomic sequencing		Bacteria and Eukaryote	Bryan <i>et al.</i> , 2016
Laut Atlantic Utara	Sampling pada air permukaan	V4-V6 16S rRNA sequencing V9 16S rRNA sequencing	518-1046 1380-1510	Bacteria Microbial Eukaryote	Zettler <i>et al.</i> , 2013
Laut Mediterranean	Inkubasi pada air laut	V3-V5 16S rRNA sequencing	515-926	Bacteria and Archaea	Briand <i>et al.</i> , 2012
Laut Arabian	Inkubasi pada air laut	V4 16S rRNA sequencing	ND	Bacteria	Muthukrishna n <i>et al.</i> , 2018
Estuari, Laut China Timur	Sampling pada air permukaan dan sedimen	V3-V4 16S rRNA sequencing	319-806	Bacteria	Jiang <i>et al.</i> , 2018

Sumber: Jacquin *et al.*, (2019)



**Gambar 2.** Mekanisme Biodegradasi Plastik (Tokiwa *et al.*, 2009; Priyanka & Archana, 2011)

Menempelnya mikroorganisme pada polimer merupakan tahap awal mekanisme biodegradasi plastik yang selanjutnya diikuti oleh pembentukan koloni pada permukaan polimer. Pembelahan hidrolitik merupakan proses lanjutan yang terjadi pada saat enzim mikroorganisme menempel pada substrat polimer. CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O merupakan produk degradasi polimer seperti oligomer, dimer dan monomer melalui proses mineralisasi (Tokiwa *et al.*, 2009). CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O merupakan produk akhir dari proses biodegradasi oleh bakteri secara aerobik, yaitu dengan memanfaatkan oksigen sebagai akseptor elektron yang diikuti dengan sintesis senyawa organik yang lebih kecil.

Bakteri anaerob menggunakan sulfat, nitrat, besi, karbon dioksida sebagai akseptor elektron, dalam kondisi ini penghancuran polimer tanpa menggunakan oksigen (Priyanka & Archana, 2011). Proses biodegradasi plastik PE dapat dilihat pada Gambar 2.

Biodegradasi plastik berbahan dasar minyak bumi konvensional dipengaruhi oleh faktor biotik dan abiotik (Fachrul & Rinanti, 2018). Faktor abiotik (radiasi UV, suhu, tekanan atmosfer) terjadi dalam waktu lama, dan tidak dapat sepenuhnya terurai. Faktor biotik dipengaruhi oleh mikroorganisme

pengurai yang ada di lingkungan yang dapat mempercepat penguraian. Biodegradasi plastik berbahan dasar minyak bumi konvensional dipengaruhi oleh faktor abiotik terjadi dalam waktu lama, dan tidak dapat sepenuhnya terurai dan faktor biotik dipengaruhi oleh mikroorganisme pengurai yang ada di lingkungan yang dapat mempercepat penguraian (Wilkes & Aristilde, 2017). Kelembaban, suhu dan pH merupakan faktor biotik penentu kinerja mikroorganisme dalam degradasi mikroplastik sedang enzim dan hidrofobitas merupakan faktor abiotik dapat dilihat pada Gambar 3.

Strategi yang untuk mengevaluasi biodegradasi polimer antara lain adanya akumulasi biomassa, perubahan permukaan polimer, peningkatan penyerapan oksigen, dan perubahan sifat mekanik dan fisik polimer (Pramila, 2012).

**KESIMPULAN**

Beberapa jenis mikroorganisme dapat melakukan degradasi mikroplastik dengan mekanisme yang unik, bersifat enzimatik dan penciptaan biofilm dalam lingkungan yang terkontrol dan waktu yang panjang. Eksplorasi terhadap potensi mikroba *indigenous* dengan teknologi yang lebih maju untuk menghasilkan kondisi yang



**Gambar 3.** Faktor biotik dan abiotik penentu kinerja mikroorganisme (Fachrul *et al.*, 2021)

ideal, waktu yang lebih singkat dengan pengontrolan perkembangan mikroba pencipta biofilm dan pemberian kosubstrat sebaiknya dilakukan.

**DAFTAR PUSTAKA**

Asriza, R. O., & Pitulima, J. (2017). Fotodegradasi High Density Polyethylene Yang Mengandung Aditif Okso-Biodegradasi. *Indo. J. Chem. Res.*, 4(2), 402–405. <https://doi.org/10.30598/ijcr.2017.4-ris1>

Bergmann, M. (Ed.). (2015). *Marine anthropogenic litter*. Springer.

Caruso, G. (2015). Plastic Degrading Microorganisms as a Tool for Bioremediation of Plastic Contamination in Aquatic Environments. *Journal of Pollution Effects & Control*, 03(03). <https://doi.org/10.4172/2375-4397.1000e112>

Cole, M. (2011). Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 10.

Crawford, C. B., & Quinn, B. (2017). The emergence of plastics. Dalam *Microplastic Pollutants* (hlm. 1–17). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809406-8.00001-3>

Ekosafitri, K. H., Rustiadi, E., & Yulianda, F. (2017). Pengembangan Wilayah Pesisir Pantai Utara Jawa Tengah Berdasarkan Infrastruktur Daerah: Studi Kasus Kabupaten Jepara. *Journal of Regional and Rural Development Planning (Jurnal Perencanaan Pembangunan Wilayah dan Perdesaan)*, 1(2), 145–157. <https://doi.org/10.29244/jp2wd.2017.1.2.145-157>

Fachrul, M. F., & Rinanti, A. (2018). Bioremediasi Pencemar Mikroplastik di Ekosistem Perairan Menggunakan Bakteri Indigenous (Bioremediation of Microplastic Pollutant in Aquatic Ecosystem by Indigenous Bacteria). *Seminar Nasional Kota Berkelanjutan*, 1(1), 302. <https://doi.org/10.25105/psnkb.v1i1.2910>

Fachrul, M. F., Rinanti, A., Tazkiaturrizki, T., Agustria, A., & Naswadi, D. A. (2021). Degradasi mikroplastik pada ekosistem perairan oleh bakteri kultur campuran *Clostridium* sp. Dan *Thiobacillus* sp. *JURNAL PENELITIAN DAN KARYA ILMIAH LEMBAGA PENELITIAN UNIVERSITAS TRISAKTI*, 6(2), 304–316.



- GESAMP. (2015). *Sources, Fate and Effects of Microplastics in The Marine Environment: A Global Assessment* (No. 90; IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection, hlm. 96).
- Gyung Yoon, M., Jeong Jeon, H., & Nam Kim, M. (2012). Biodegradation of Polyethylene by a Soil Bacterium and AlkB Cloned Recombinant Cell. *Journal of Bioremediation & Biodegradation*, 03(04). <https://doi.org/10.4172/2155-6199.1000145>
- Hidalgo-Ruz, V., Gutow, L., Thompson, R. C., & Thiel, M. (2012). Microplastics in the Marine Environment: A Review of the Methods Used for Identification and Quantification. *Environmental Science & Technology*, 46(6), 3060–3075. <https://doi.org/10.1021/es2031505>
- Jacquin, J., Cheng, J., Odobel, C., Pandin, C., Conan, P., Pujo-Pay, M., Barbe, V., Meistertzheim, A.-L., & Ghiglione, J.-F. (2019). Microbial Ecotoxicology of Marine Plastic Debris: A Review on Colonization and Biodegradation by the “Plastisphere.” *Frontiers in Microbiology*, 10, 865. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00865>
- Kershaw, P. (2015). *Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: A global assessment* [Technical Report]. International Maritime Organization. <http://localhost:8080/xmlui/handle/123456789/735>
- Kumari, A., Chaudhary, D. R., & Jha, B. (2019). Destabilization of polyethylene and polyvinylchloride structure by marine bacterial strain. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(2), 1507–1516. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3465-1>
- Mohamed Nor, N. H., & Obbard, J. P. (2014). Microplastics in Singapore’s coastal mangrove ecosystems. *Marine Pollution Bulletin*, 79(1–2), 278–283. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.11.025>
- Moore, C. J. (2008). Synthetic polymers in the marine environment: A rapidly increasing, long-term threat. *Environmental Research*, 108(2), 131–139. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2008.07.025>
- Nasution, R. S. (2015). *Berbagai cara penanggulangan limbah plastik*. 1(No 1), 8.
- Priyanka, N., & Archana, T. (2011). Biodegradability of Polythene and Plastic by The Help of Microorganism: A Way for Brighter Future. *Journal of Environmental & Analytical Toxicology*, 01(02). <https://doi.org/10.4172/2161-0525.1000111>
- R. Pramila. (2012). *Brevibacillus parabrevis*, *Acinetobacter baumannii* and *Pseudomonas citronellolis*—Potential candidates for biodegradation of low-density polyethylene (LDPE). *Journal of Bacteriology Research*, 4(1). <https://doi.org/10.5897/JBR12.003>



- Rochman, C. M., Browne, M. A., Halpern, B. S., Hentschel, B. T., Hoh, E., Karapanagioti, H. K., Rios-Mendoza, L. M., Takada, H., Teh, S., & Thompson, R. C. (2013). Classify plastic waste as hazardous. *Nature*, *494*(7436), 169–171.  
<https://doi.org/10.1038/494169a>
- Ryan, P. G., Moore, C. J., van Franeker, J. A., & Moloney, C. L. (2009). Monitoring the abundance of plastic debris in the marine environment. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *364*(1526), 1999–2012.  
<https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0207>
- Tokiwa, Y., Calabia, B., Ugwu, C., & Aiba, S. (2009). Biodegradability of Plastics. *International Journal of Molecular Sciences*, *10*(9), 3722–3742.  
<https://doi.org/10.3390/ijms10093722>
- Widianarko, Y. B., & Hantoro, I. (2018). *Mikroplastik dalam Seafood dari Pantai Utara Jawa*. Semarang. Penerbit Universitas Katolik Soegijapranata.  
<http://repository.unika.ac.id/17537/>
- Wilkes, R. A., & Aristilde, L. (2017). Degradation and metabolism of synthetic plastics and associated products by *Pseudomonas* sp.: Capabilities and challenges. *Journal of Applied Microbiology*, *12*.
- Wright, S. L., & Kelly, F. J. (2017). Plastic and Human Health: A Micro Issue? *Environmental Science & Technology*, *51*(12), 6634–6647.  
<https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00423>
- Wright, S. L., Thompson, R. C., & Galloway, T. S. (2013). The physical impacts of microplastics on marine organisms: A review. *Environmental Pollution*, *178*, 483–492.  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.02.031>
- Wu, W.-M., Yang, J., & Criddle, C. S. (2017). Microplastics pollution and reduction strategies. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, *11*(1), 6.  
<https://doi.org/10.1007/s11783-017-0897-7>
- Zhang, K., Hamidian, A. H., Tubić, A., Zhang, Y., Fang, J. K. H., Wu, C., & Lam, P. K. S. (2021). Understanding plastic degradation and microplastic formation in the environment: A review. *Environmental Pollution*, *274*, 116554.  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116554>