POTENSI MIKROORGANISME SEBAGAI AGEN BIOREMEDIASI MIKROPLASTIK DI LAUT

Milani Anggiani^{1*}

¹Balai Bio Industri Laut, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia
Jl. Raya Senggigi, Teluk Kodek, Lombok Utara, Nusa Tenggara Barat, 83352

*Alamat email: milanianggiani@yahoo.com

ABSTRACT

Microplastic is a threat to the survival of organisms on terrestrial and ocean. Microplastic waste accumulation from human activities will accumulate in the environment. The presence of microplastics in the environment is a problem because plastics are persistent. Plastics often contain chemicals that are potentially toxic and carcinogenic. They are consumed by organisms that will affect aquatic life. Plastic waste in the ocean will directly or indirectly poison the marine biota, damaging coral reefs which will further damage the balance of the marine ecosystem. The process of decomposition of plastic waste into microplastics takes hundreds of years through physical, chemical, and biological processes. The problem of microplastic waste can be overcome by biotechnology approaches. One of the strategies to control microplastic pollution is remediation technology by utilizing the potential of indigenous bacteria that grow in their natural environment. Furthermore, the use of bioremediation agents from other microorganisms has been carried out among them, using Fungi and Actinomycetes. The potential of microplastic degrading microorganisms in sea waters has not been done in depth, especially studies in improving the ability of microorganisms to degrade microplastics. The purpose of writing this review is to review the potential of microplastic degrading bacteria originating from marine waters.

Keywords: degradation bacteria, plastic waste, microplastic.

PENDAHULUAN

Produksi plastik mengalami peningkatan yang pesat semenjak tahun 1950-an, mencapai 200 kali lipat dan diprediksi menjadi 381 juta ton pada tahun 2015 (<https://ourworldindata.org/plastic-pollution>). Peningkatan produksi plastik di dunia terjadi karena murah, serbaguna, ringan, dan dapat dipakai dalam waktu yang lama. Berbagai sektor industri seperti pengemasan tekstil, transportasi, konstruksi, kelistrikan, dan industri mesin menggunakan bahan plastik untuk produknya (Geyer et al., 2007). Penggunaan plastik yang tinggi juga

dialami oleh negara berkembang seperti di Indonesia, yang seiring dengan peningkatan jumlah permintaan produk dari industri yang menggunakan bahan plastik.

Indonesia merupakan negara berkembang dengan jumlah penduduk hampir 267 juta pada tahun 2019 (BPS, 2019). Tingkat pertumbuhan penduduk yang tinggi sepadan dengan tingginya limbah yang dihasilkan akibat ketidaktepatan pengelolaan limbah khususnya plastik. Oleh karena itu, pengembangan pengelolaan limbah yang efektif sangat diperlukan terutama untuk negara yang berkembang, berpenghasilan

menengah dan populasi penduduknya tinggi.

Secara global, diperkirakan 80% plastik laut berasal dari darat dan 20% persen dari laut (Li et al., 2016). Tersebar nya limbah plastik ke lingkungan tidak terlepas dari penggunaan plastik untuk produk sekali pakai, kemasan makanan, dan minuman. Plastik yang berada di lingkungan akan mengalami fragmentasi karena adanya proses abiotik seperti radiasi UV dari matahari atau temperatur tinggi (Urbanek et al., 2018). Plastik dapat terdegradasi hingga ukuran <5 mm, yang disebut sebagai mikroplastik (Arthur et al., 2009). Mikroplastik dapat tersebar di permukaan air (Faure et al., 2015), sedimen pesisir (Browne et al., 2011), pasir pantai (Liebezeit & Dubaish, 2012), sedimen air tawar (Castaneda et al., 2014), dan laut dalam (Woodall et al., 2014).

Kehadiran mikroplastik di lingkungan menjadi masalah karena bersifat persisten, mengandung bahan kimia toksik dan bersifat karsinogenik. Oleh karena itu, organisme yang mengkonsumsinya secara tidak langsung akan memengaruhi kehidupan perairan. Mikroplastik dapat secara langsung maupun tidak langsung dikonsumsi oleh organisme melalui jalur *belitan* (*entanglement*), tertelan (*ingestion*), dan interaksi (*interaction*). Sampah plastik dipastikan mengotori lautan, meracuni biota laut, merusak terumbu karang yang selanjutnya akan memberi dampak kerusakan bagi keseimbangan ekosistem laut. Sampah mikroplastik ini dapat masuk ke dalam rantai makanan dan pada akhirnya berdampak pada kesehatan baik manusia maupun lingkungan (Eriksen et al., 2014; Kole et al., 2017; Wright & Kelly, 2017). Selanjutnya Caruso (2015) mengatakan

bahwa kontaminasi mikroplastik di lingkungan perairan di masa depan, diakui sebagai ancaman global yang muncul dengan berbagai implikasinya terhadap kondisi sosial dan lingkungan.

Sungai merupakan tempat pembuangan limbah domestik maupun industri, dan akan bermuara menuju laut. Berdasarkan data dari Lebreton et al. (2017), sungai di Asia menyumbangkan 86% total dari limbah plastik di dunia. Jumlah limbah plastik dari 20 sungai terbesar di dunia pada tahun 2015 sebanyak 947.500 ton, di sungai Yangtze (China) sebanyak 333.000 ton dan menempati posisi pertama, sedangkan limbah plastik di sungai Indonesia menempati posisi ke-7 untuk sungai Brantas dan posisi ke-10 untuk sungai Bengawan Solo. Selain itu, berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Cordova dan Nurhati (2018), sebanyak 59% sampah plastik dan *styrofoam* masuk ke Teluk Jakarta. Solusi untuk pengelolaan limbah plastik sampai saat ini masih terus dikembangkan.

Pengelolaan limbah plastik dapat dilakukan secara kimia, fisika dan biologi. Salah satu strategi yang menarik untuk mengendalikan pencemaran mikroplastik adalah dengan pendekatan teknologi bioremediasi (Caruso, 2015; Alshehrei, 2017; Wei-Min et al., 2017). Teknologi bioremediasi adalah proses teknologi yang menggunakan sistem biologis untuk meremediasi lingkungan yang tercemar (Head, 1998). Bioremediasi dapat dilakukan dengan memanfaatkan potensi mikroba atau bakteri *indigenous* yang ditumbuhkan dalam lingkungan media yang terpapar mikroplastik yang terkontrol. Chee et al. (2010) mengamati beberapa spesies bakteri yang mampu mendegradasi plastik, diantaranya *Bacillus megaterium*, *Pseudomonas* sp., *Azotobacter*, *Ralstonia*

eutropha, dan *Halomonas* sp. Studi laboratorium mengenai bakteri yang dapat mendegradasi plastik telah dilakukan Sharma & Sharma (2004) dengan menggunakan *Pseudomonas stutzeri* dan terbukti dapat mendegradasi plastik *low-density polyethylene* (LDPE) dan *polyethylene* (PE). Biodegradasi dengan menggunakan agen biologis seperti bakteri dapat menjadi salah satu yang terbaik untuk meningkatkan efisiensi degradasi (Starnecker & Menner, 1996).

Limbah Plastik

Lebih dari 300 metrik ton plastik diproduksi di seluruh dunia setiap tahunnya, dan 50% dari plastik yang diproduksi tersebut merupakan produk sekali pakai. Limbah plastik sekali pakai maupun yang telah digunakan beberapa kali tetap akan tersebar ke lingkungan, memenuhi sungai, laut, dan tanah (Singh et al., 2016). Di daerah pesisir dengan jumlah populasi yang tinggi, padatnya kegiatan pelayaran dengan sirkulasi air yang terbatas mengakibatkan terakumulasinya limbah plastik pada sedimen. Plastik yang ukurannya lebih kecil terkumpul di bebatuan, saluran air, ngarai, dan landas benua (Galgani et al., 1996).

Plastik yang berada di permukaan air akan lebih cepat terdegradasi karena terpapar radiasi sinar ultraviolet dari matahari. Pergerakan partikel plastik secara vertikal mungkin terjadi karena tumbuhan atau alga yang menempel di permukaan plastik tersebut, sehingga plastik menjadi lebih berat dan berada di bawah permukaan. Ketika sudah berada di sedimen, plastik akan lebih sulit terdegradasi dan memperbesar kemungkinan dikonsumsi oleh organisme, terutama organisme benthik (Moré-Ferguson et al., 2010). Limbah plastik baik

yang sudah dikonsumsi organisme ataupun terkumpul di sedimen laut dalam akan sangat sulit dimonitor perpindahannya. Selain itu ketika sudah menjadi mikroplastik, akan semakin sulit karena dapat berpindah ke tempat yang sulit terjangkau (Thompson, 2004).

Mikroplastik

Arthur & Barnes (2009) mendefinisikan mikroplastik sebagai partikel mikro dengan rentang ukuran diameter <5 mm. Partikel dengan ukuran tersebut biasanya ditemukan dalam air laut (Ng & Obbard, 2006; Barnes et al., 2009). Sebanyak 90% limbah mikroplastik berada di permukaan air laut (Eriksen et al., 2014) dan sisanya ditemukan dalam sedimen. Terdapat dua jenis mikroplastik, yaitu primer dan sekunder. Keduanya berbahaya bila masuk ke dalam tubuh organisme. Mikroplastik primer dibuat oleh industri untuk produk tertentu seperti kosmetik, pasta gigi, sabun, dan deterjen. Mikroplastik sekunder berasal dari plastik ukuran besar yang telah terdegradasi alam menjadi partikel lebih kecil. Selain penelitian mikroplastik dalam feses, saat ini sudah banyak riset untuk mengetahui nanoplastik dalam tubuh, yang lebih kecil dari mikroplastik. Nanoplastik langsung menembus peredaran darah manusia sambil melepaskan bahan cemarannya.

Mikroplastik yang berasal dari produk kosmetik dan sabun pembersih wajah secara langsung memasuki lingkungan dapat berupa mikroplastik primer atau mikroplastik sekunder (Veiga et al., 2016). Karena ukurannya yang kecil, keberadaan mikroplastik di lingkungan menimbulkan kekhawatiran akan dikonsumsi organisme, terutama biota laut yang berukuran kecil (Barnes et al., 2009). Mikroplastik telah ditemukan dalam

pencernaan amphipoda, cacing pasir, teritip (Thompson et al., 2004), kerang (Browne et al., 2008), krustasea (Murray & Cowie, 2011), burung laut (van Franeker et al., 2011), dan ikan (Davidson & Asch, 2011).

Beberapa penelitian membuktikan bahwa mikroplastik mengalami perpindahan melalui tingkat trofik rantai makanan, contohnya *polystyrene* berukuran 10 μm yang ada pada zooplankton berpindah ke udang *Mysis relicta* yang memangsanya (Setälä et al., 2014). Meskipun terjadi transfer mikroplastik antartingkat trofik, namun tidak dapat dipastikan bahwa mikroplastik terakumulasi atau konsentrasinya meningkat pada tingkat trofik yang lebih tinggi (Zarfl et al., 2011). Plastik yang dikonsumsi tidak dapat dicerna dan memenuhi saluran pencernaan hewan sehingga mengganggu fungsi sistem pencernaan untuk memenuhi kebutuhan nutrisinya (Ryan, 1988; Spear et al., 1995). Potensi interaksi antara mikroorganisme

laut dan mikroplastik di lingkungan laut terdapat pada Gambar 1.

Degradasi Mikroplastik Secara Biologi

Ditinjau dari proses degradasinya, mikroplastik dapat terurai secara fisika, kimia dan biologi. Proses degradasi mikroplastik dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti suhu, pH, kelembaban, tekanan dan peranan dari mikroorganisme pengurai. Metode degradasi secara fisika dan kimia memiliki kekurangan karena memiliki dampak buruk terhadap lingkungan, sehingga diperlukan penanganan lain, salah satunya dengan menggunakan metode secara biologi (Tarr, 2003).

Secara biologi, proses degradasi terjadi karena adanya bantuan dari organisme yang berperan sebagai agen remediasi seperti mikroorganisme yang menghasilkan enzim untuk mendegradasi mikroplastik. Kemampuan enzim yang dihasilkan oleh mikroorganisme dalam men-

Gambar 1. Potensi interaksi antara mikroorganisme laut dan mikroplastik di lingkungan laut (modifikasi gambar: Urbanek, 2018).

degradasi mikroplastik dipengaruhi beberapa faktor lingkungan seperti, pH, suhu, berat dan ukuran dari molekul substrat. Beberapa mikroorganisme seperti fungi dan bakteri mampu mendegradasi mikroplastik (Roohi et al., 2017). Secara umum proses biodegradasi plastik oleh mikroorganisme dapat dilihat pada Gambar 2. Biodegradasi polimer melibatkan langkah-langkah sebagai berikut (Arutchelvi, 2008):

1. Pelekatan mikroorganisme pada permukaan plastik. Pelekatan/kontak mikroorganisme pada permukaan plastik akan membentuk biofilm.
2. Pertumbuhan mikroorganisme memanfaatkan polimer yang terdegradasi sebagai sumber energi dan makanan (asimilasi).
3. Degradasi polimer (fragmentasi melalui hidrolisis).
4. Disintegrasi akhir polimer (mineralisasi).

Mekanisme Kerja Bakteri Pendegradasi Mikroplastik

Degradasi adalah proses yang melibatkan perubahan fisik atau kimia dalam polimer akibat faktor lingkungan seperti cahaya, panas, kondisi kimia atau aktivitas biologis (Tarr, 2003), sedangkan biodegradasi menurut Das & Dash (2014) adalah sebuah proses degradasi yang melibatkan senyawa kimia yang dihasilkan oleh mikroorganisme terutama oleh bakteri. Melalui proses biodegradasi, bahan-bahan organik dapat terdegradasi secara aerobik dan anaerobik. Beberapa mikroorganisme seperti bakteri, jamur, dan actinomycetes memiliki kemampuan untuk mendegradasi plastik sintesis secara alami (biodegradasi). Umumnya, terpotongnya rantai polimer menjadi monomer memerlukan beberapa mikroorganisme yang berbeda, misalnya suatu bakteri mampu memecah polimer menjadi monomer, bakteri lain mampu menggunakan monomer dan mengeluarkan senyawa yang lebih sederhana.

Gambar 2. Mekanisme Umum Biodegradasi Plastik (modifikasi gambar: Roohi et al., 2017).

Pada umumnya hasil degradasi menyebabkan perubahan sifat polimer seperti menghasilkan potongan ikatan polimer, transformasi atau terbentuknya ikatan struktur kimia baru. Menurut Premraj & Doble (2005), degradasi polimer dapat terjadi pada kondisi aerob dan anaerob. Pada kondisi aerob, produk degradasi yang dihasilkan adalah karbondioksida dan air, sedangkan degradasi pada kondisi anaerob dihasilkan karbondioksida, air dan metana atau H_2S . Mekanisme yang terjadi seperti terlihat pada Gambar 3.

Pada proses ini, mikroorganisme tidak dapat mengangkut polimer langsung dari membran sel luarnya ke dalam sel, karena sebagian besar proses biokimia terjadi karena kurangnya air dan molekul polimer yang panjang. Mikroba mengekskresikan enzim ekstraseluler yang mendepolimerisasi polimer di luar sel. Enzim depolimerase ekstraseluler dan intraseluler secara aktif terlibat dalam degradasi polimer secara biologi (Mohan & Srivastava, 2010).

Degradasi oleh mikroba adalah salah satu strategi utama yang digunakan untuk

bioremediasi senyawa organik. Keberlangsungan proses bioremediasi tergantung pada potensi degradasi dan transformasi mikroorganisme. Keunikan metode bioremediasi adalah karena faktanya dapat menghilangkan pencemar dari lingkungan alam atau mengurangi polutan menggunakan komunitas mikroba indigenous yang tersedia di alam. Menurut Shah et al. (2008) dan Ghosh et al. (2013), penelitian mengenai degradasi oleh mikroba terhadap polimer sintesis plastik sudah banyak dilakukan antara lain terdapat pada Tabel 1.

Hasil penelitian yang dilakukan oleh Elpawati (2015) menunjukkan bahwa dari 32 isolat, dihasilkan delapan isolat yang berpotensi sebagai pendegradasi plastik polietilen dengan persentase yang berbeda. Metode kerja yang dilakukan adalah dengan menggunakan guntingan sampah plastik polietilen yang dicuci bersih dan diinokulasikan ke media NA dan TSA. Masa inkubasi selama 10 (sepuluh) hari pada suhu $37^{\circ}C$. Koloni yang tumbuh kemudian diisolasi dan dimurnikan ke media agar miring NA dan TSA untuk pengujian selanjutnya.

Gambar 3. Degradasi polymer dalam kondisi aerob dan anaerob (Premraj & Doble, 2005)

Tabel 1. Penelitian mengenai degradasi polimer sintesis plastik oleh bakteri

Jenis Bakteri pendegradasi	Polimer Sintesis Plastik	Sumber
<i>Brevibacillus borstelensis</i>	Polietilen	Hadad et al., 2005
<i>Pseudomonas stutzeri</i>	Polihidroksialkanoat (PHA)	Shimao, 2001
<i>Alcaligenes faecalis</i>	Polihidroksialkanoat (PHA), Polycaprolactone (PCL)	Ghosh et al., 2013; Oda et al., 1997
<i>Streptomyces sp</i>	Polihidroksialkanoat (PHA)	Mabrouk & Sabry, 2001; Kato, 1997
<i>Bacillus brevis</i>	Polylactic acid (PLA)	Tomita et al., 1999
<i>Pseudomonas putida</i>	Polivinil klorida (PVC)	Anthony et al., 2004
<i>Clostridium botulinum</i>	Polycaprolactone (PCL)	Ghosh et al., 2013

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Riandi et al. (2017) terhadap bakteri yang mempunyai kemampuan mendegradasi polimer plastik *High Density Polyethylene* (HDPE) dan *Low Density Polyethylene* (LDPE) diperoleh 27 jenis isolate yang tergolong genus *Pseudomonas* dan *Ochrobactrum* dengan karakteristik bentuk basil, gram negatif, katalase positif serta tergolong bakteri non-fermentatif. Selain itu, terdapat spesies *Ochrobactrum anthropic* dengan kemampuan mendegradasi HDPE sebesar 20% dan spesies *Pseudomonas aeruginosa* dengan kemampuan mendegradasi LDPE sebesar 18,75%.

Penelitian yang telah dilakukan mengenai peranan bakteri pendegradasi masih mendasar, dan isu mengenai limbah mikroplastik masih menjadi masalah yang belum teratasi. Riset yang mendalam dan komprehensif mengenai penggunaan bakteri sebagai agen pendegradasi mikroplastik yang efektif masih perlu dikaji kedepannya.

PENUTUP

Potensi bakteri pendegradasi mikroplastik di lingkungan perairan laut masih perlu dikaji lebih mendalam dan komprehensif agar dapat diperoleh bakteri

yang memiliki tingkat aktivitas pengurai mikroplastik yang tinggi. Metode yang optimal untuk mengatasi permasalahan limbah mikroplastik di lingkungan perairan khususnya laut sangat penting. Hal ini dapat dilakukan dengan penelitian mengenai kondisi optimum dan peningkatan aktivasi bakteri sebagai agen bioremediasi mikroplastik secara konvensional maupun molekuler dengan teknik rekayasa genetika.

DAFTAR PUSTAKA

- Alshehrei, F. (2017). Biodegradation of Synthetic and Natural Plastics by Microorganisms. *Journal of Applied & Environmental Microbiology*, 5(1): 8–19. <https://doi.org/10.12691/jaem-5-1-2>.
- Anthony, S. D., Meizhong, L., Christopher, E. B., Robin, L.B., & David, L. F. (2004). Involvement of linear plasmids in aerobic biodegradation of vinyl chloride. *Appl. Environ. Microbiol.*, 70: 6092–6097.
- Arutchelvi, J., Sudhakar, M., Arkatkar, A., Doble, M., Bhaduri, S., & Uppara, P. V. (2008). Biodegradation of polyethylene and polypropylene. *Ind. J. Biotechnol.*, 7: 9–22.
- Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C., & Barlaz, M. (2009). Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments.

- Philos. Trans. R. Soc. B*, 364: 1985–1998.
- Browne, M. A., Dissanayake, A., Galloway, T. S., Lowe, D. M., & Thompson, R. C. (2008). Ingested microscopic plastic translocates to the circulatory system of the mussel, *Mytilus edulis* (L.). *Environ. Sci. Technol.*, 42(13): 5026–5031.
- Caruso, G. (2015). Plastic Degrading Microorganisms as a Tool for Bioremediation of Plastic Contamination in Aquatic Environments. *Journal of Pollution Effects & Control*, 3(3): 8–10. <https://doi.org/10.4172/2375-4397.1000e112>.
- Chee, J. Y., Yoga, S. S., & Lau, N. S. (2010). Bacterially produced polyhydroxyalkanoate (PHA): Converting renewable resources into bioplastic. *Formatex Research Center, Spain*, 1395–1404.
- Cordova, M., Hadi, T., & Prayudha, B. (2018). Occurrence and abundance of microplastics in coral reef sediment: a case study in Sekotong, Lombok-Indonesia. *Advances in Environmental Sciences*, 10(1): 23–29. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1297719>.
- Cordova, R. & Nurhati, I. S. (2019). Major source and monthly variations in the release of land derived marine debris from greater Jakarta area, Indonesia. *Scientific Reports: Nature research*, 9: 18730. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55065-2>.
- Das, S. & Dash, H. R. (2014). Microbial Bioremediation: A Potential Tool for Restoration of Contaminated Areas. *Microbial Biodegradation and Bioremediation*. Elsevier, 21 pp. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800021-2.00001-7>.
- Davison, P. & Asch, R. G. (2011). Plastic ingestion by mesopelagic fishes in the North Pacific Subtropical Gyre. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 432: 173–180.
- Eriksen, M., Lebreton, L. C. M., Carson, H. S., Thiel, M., Moore, C. J., Borerro, ..., & Reisser, J. (2014). Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea. *PLoS ONE*, 9(12): e111913. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913>.
- Elpawati. (2015). Uji Coba Produksi Mikroorganisme Pengdegradasi (Penghancur) Sampah Plastik. *Jurnal Agribisnis*, 9(1): 11–22.
- Galgani, F., Souplet, A., & Cadiou, Y. (1996). Accumulation of debris on the deep sea floor off the French Mediterranean coast. *Marine Ecology Progress Series*, 142: 225–234.
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7): e1700782.
- Ghosh, S. K., Pal, S., & Ray, S. (2013). Study of microbes having potentiality for biodegradation of plastics. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, 20: 4339–4355.
- Hadad, D., Geresh, S., & Sivan, A. (2005). Biodegradation of polyethylene by the thermophilic bacterium *Brevibacillus borstelensis*. *J. Appl. Microbiol.*, 98: 1093–1100.
- Head, I. M. (1998). Bioremediation: towards a credible technology. *Microbiology*, 144: 599–608.
- Kato, N. (1997). Cloning of poly (3-hydroxybutyrate) depolymerase from a marine bacterium, *Alcaligenes faecalis* AE122, and characterization of its gene product. *Biochim. Biophys. Acta*, 135: 113–122.
- Kole, P. J., Löhr, A. J., van Belleghem, F. G. A. J., & Ragas, A. M. J. (2017). Wear and Tear of Tyres: A Stealthy Source of Microplastics in the Environment. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 14: 1265. <https://doi.org/10.3390/ijerph14101265>.
- Lebreton, L. C., van der Zwet, J., Damsteeg, J. W., Slat, B., Andrady,

- A., & Reisser, J. (2017). River plastic emissions to the world's oceans. *Nature Communications*, 8: 15611. <https://www.nature.com/articles/ncomms15611>.
- Li, W. C., Tse, H. F., & Fok, L. (2016). Plastic waste in the marine environment: A review of sources, occurrence and effects. *Science of the Total Environment*, 566: 333–349. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969716310154>.
- Mabrouk, M. M. & Sabry, S. A. (2001). Degradation of poly (3hydroxybutyrate) and its copolymer poly (3-hydroxybutyrate-co3-hydroxyvalerate) by a marine *Streptomyces sp.* SNG9. *Microbiol. Res.*, 156: 323–335.
- Mohan, S. K. & Srivastava, T. (2010). Microbial deterioration and degradation of polymeric materials. *J. Biochem. Tech.*, 2(4): 210–215.
- Moret-Ferguson, S., Law, K. L., Proskurowski, G., Murphy, E. K., Peacock, E. E., & Reddy, C. M. (2010). The size, mass, and composition of plastic debris in the western North Atlantic Ocean. *J. Marine Pollution*, 60(10): 1873–1878. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.07.020>.
- Murray, F., & Cowie, P. R. (2011). Plastic contamination in the decapod crustacean *Nephrops norvegicus* (Linnaeus, 1758). *Mar. Pollut. Bull.*, 62(6): 1207–1217.
- Ng, K. L. & Obbard, J. P., (2006). Prevalence of microplastics in Singapore's coastal marine environment. *Mar. Pollut. Bull.*, 52(7): 761–767.
- Oda, Y., Oida, N., Urakami, T., & Tonomura, K. (1997). Polycaprolactone depolymerase produced by the bacterium *Alcaligenes faecalis*. *FEMS Microbiol. Lett.* 152: 339–343.
- Premraj, R. & Doble, M. (2005). Biodegradation of polymers. *Indian J. Biotechnol.*, 4: 186–193.
- Riandi, M. I., Kawuri, R., & Sudirga, S. K. (2017). Potensi Bakteri *Pseudomonas sp.* dan *Ochrobactrum sp.* yang di Isolasi dari Berbagai Sampel Tanah Dalam Mendegradasi Limbah Polimer Plastik Berbahan Dasar High Density Polyethylene (HDPE) dan Low Density Polyethylene. *Jurnal Simbiosis*, V(2): 58–63
- Roohi, Bano, K., Kuddus, M., Zaheer, M. R., Zia, Q., Khan, ... & Aliev, G. (2017). Microbial Enzymatic Degradation of Biodegradable Plastics. *Current Pharmaceutical Biotechnology*, 18(5): 429–440. <https://doi.org/10.2174/1389201018666170523165742>.
- Ryan, P. (1988). Effects of ingested plastic on seabird feeding: evidence from chickens. *Marine Pollution Bulletin*, 19(3): 125–128.
- Setälä, O., Fleming-Lehtinen, V., & Lehtiniemi, M. (2014). Ingestion and transfer of microplastics in the planktonic food web. *Environ. Pollut.*, 185: 77–83.
- Singh, G., Singh, A. K., & Bhatt, K. (2016). Biodegradation of polythenes by bacteria isolated from soil. *International Journal of Research in Pharmaceutical and Biomedical Sciences*, 5(2): 2056–2062.
- Shah, A. A., Hasan, F., Hameed, A., & Ahmed, S. (2008). Biological degradation of plastics: a comprehensive review. *Biotechnol. Adv.*, 26: 246–265.
- Sharma, A. & Sharma, A. (2004). Degradation assessment of low-density polyethylene (LDPE) and polyethylene by an indigenous isolate of *Pseudomonas stutzeri*. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 63: 293–296.
- Shimao, M. (2001). Biodegradation of plastics. *Curr. Opinion Biotechnol.*, 12: 242–247.

- Spear, L. B., Ainley, D. G., & Ribic, C. A. (1995). Incidence of plastic in seabirds from the tropical pacific, 1984–1991: Relation with distribution of species, sex, age, season, year and body weight. *Marine Environmental Research*, 40(2): 123–46.
- Starnecker, A. & Menner, M. (1996). Assessment of biodegradability of plastics under stimulated composting conditions in a laboratory test system. *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, 85–92.
- Tarr, M. A. (2003). *Chemical Degradation Methods for Wastes and Pollutants: Environmental and Industrial Applications (Environmental Science & Pollution)*. CRC Press, Florida: 314 pp.
- Thompson, R. C., Olsen, Y., & Mitchell, R. P. (2004). Lost at Sea: Where is all the plastic?. *Science*, 7: 838.
- Tomita, K., Kuroki, Y., & Nagai, K. (1999). Isolation of thermophiles degrading poly (L-lactic acid). *J. Biosci. Bioeng.*, 87: 752–755.
- Urbanek, A. K., Rymowicz, W., & Mironczuk, A. M. (2018). Degradation of plastics and plastic-degrading bacteria in cold marine habitats. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102(18): 7669–7678. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9195-y>.
- van Franeker, J. A., Balize, C., Danielsen, J., Fairclough, K., Gollan, J., Guse, ... & Turner, D. M. (2011). Monitoring plastic ingestion by the northern fulmar *Fulmarus glacialis* in the North Sea. *Environ. Pollut.*, 10: 2609–15. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.06.008>.
- Veiga, J. M, Fleet, D., Kinsey, S., Nilsson, P., Vlachogianni, T., Werner, S., ... & Cronin R. (2016). Identifying sources of marine litter. *MSFD GES TG Marine Litter Thematic Report, JRC Technical Reports*, 41 pp.
- Wei-Min, W., Yang, J., & Criddle, C. S. (2017). Microplastics pollution and reduction strategies. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 11(1): 6.
- Woodall, L. C., Sanchez-Vidal, A., Canals, M., Paterson, G. L. J., Coppock, R., Sleight, V., Calafat, A., Rogers, A. D., Narayanaswamy, B. E., & Thompson, R. C. (2014). The deep sea is a major sink for microplastic debris. *R. Soc. Open Sci.*, 1: 140317.
- Wright, S. L. & Kelly, F. J. (2017). Plastic and Human Health: A Micro Issue?. *Environ. Sci. Technol.*, 51(12): 6634–6647. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00423>.
- Zarfl, C., Fleet, D., Fries, E., Galgani, F., Gerdt, G., & Hanke, G. (2011). Microplastics in oceans. *Editorial/Mar. Pollut. Bull.*, 62: 1589–1591.