



Prosiding Seminar Nasional Kota Berkelanjutan 2018

Melati Ferianita Fachrul, Astri Rinanti

p-issn 2621-2048/e-issn 2621-2056

<http://www.trijurnal.lemlit.trisakti.ac.id/index.php/kotaberkelanjutan>

DOI: <http://dx.doi.org/10.25105/psnkb.v1i1.2910>

## Bioremediasi Pencemar Mikroplastik di Ekosistem Perairan Menggunakan Bakteri Indigenous

*Bioremediation of Microplastic Pollutant in Aquatic Ecosystem by Indigenous Bacteria*

Melati Ferianita Fachrul\*, Astri Rinanti

Teknik Lingkungan, Fakultas Arsitektur Lanskap dan Teknologi Lingkungan, Universitas Trisakti,  
Jakarta 11450, Indonesia

Email Koresponden: [melati@trisakti.ac.id](mailto:melati@trisakti.ac.id)

### ABSTRAK

Permasalahan lingkungan hidup yang menjadi isu dan belum banyak terpecahkan adalah kontaminasi pencemar mikroplastik yang bersifat persisten pada ekosistem perairan baik di sungai maupun di lautan. Pada umumnya sumber mikroplastik berasal dari air limbah rumah tangga dan industri. Mikroplastik adalah partikel plastik yang mempunyai diameter kurang dari 5 milimeter (mm) hingga 330 mikron (0,33 mm). Proses dekomposisi sampah plastik menjadi mikroplastik berlangsung sangat lama bahkan memerlukan waktu hingga ratusan tahun melalui berbagai proses fisik, kimiawi, maupun biologi. Di dalam partikel plastik terkandung bahan kimia berbahaya yang bersifat karsinogenik. Pencemar mikroplastik ini dapat masuk ke dalam rantai makanan pada berbagai tingkat trofik yang pada akhirnya berdampak pada lingkungan maupun kesehatan manusia. Demikian luas dampak dari pencemaran mikroplastik ini, maka diperlukan penelitian yang mendalam mengenai dekomposisi mikroplastik di perairan. Untuk mereduksi pencemar mikroplastik tersebut dapat dilakukan dengan pendekatan bioteknologi. Strategi untuk mengendalikan pencemaran mikroplastik dapat dilakukan dengan pengembangan teknologi remediasi dengan memanfaatkan potensi bakteri indigenous yang ditumbuhkan dalam lingkungan yang terkontrol.

**Kata Kunci:** bakteri indigenous, mikroplastik, pencemaran, perairan, remediasi

### 1. PENDAHULUAN

Akhir-akhir ini marak berkembang munculnya masalah di lingkungan perairan baik di perairan sungai maupun di lautan yang berkaitan dengan kontaminasi pencemaran sampah plastik. Sebagian besar sampah plastik yang mencemari sungai akhirnya bermuara di lautan (Lebreton dkk., 2017). Produksi plastik telah meningkat secara dramatis di seluruh dunia selama 60 tahun terakhir dan saat ini diakui sebagai ancaman serius bagi lingkungan laut (Avio dkk., 2017). Sampah plastik di perairan ini menjadi permasalahan serius di seluruh dunia, terlebih di Indonesia (Sahwan dkk., 2005).

Plastik lazim digunakan dalam berbagai penggunaan dalam kegiatan sehari-hari di masyarakat baik di rumah tangga, industri, perdagangan, karena harganya yang murah, ringan dan tahan lama (Wang, Tan, Peng, Qiu, Li, 2016). Menurut Verschoor (2015) limbah plastik yang

pada umumnya hanya digunakan sekali pakai, telah menjadi masalah lingkungan global. Limbah plastik di alam terurai menjadi mikroplastik.

Kehadiran mikroplastik di lingkungan menjadi masalah karena plastik bersifat persisten, sering kali mengandung bahan kimia yang berpotensi toksik dan karsinogenik, karena dikonsumsi oleh organisme maka akan mempengaruhi kehidupan perairan. Selain itu, sampah plastik dipastikan mengotori lautan, meracuni biota laut, merusak terumbu karang 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 dkk., 2014; Kole dkk., 2017; Wright dan Kelly, 2017). Selanjutnya Caruso (2015) mengatakan bahwa kontaminasi mikroplastik lingkungan perairan yang berasal dari air limbah, bahan baku industri dan pabrik pelet ini menjadi prioritas penelitian di masa depan, karena telah diakui sebagai ancaman global yang muncul dengan berbagai implikasinya terhadap kondisi sosial dan lingkungan.

Salah satu strategi dan pendekatan yang menarik untuk mengendalikan pencemaran mikroplastik dapat dilakukan adalah dengan pendekatan teknologi bioremediasi (Caruso, 2015; Alshehrei, 2017; Wei-Min dkk., 2017), dengan memanfaatkan potensi mikroba atau bakteri indigenous yang ditumbuhkan dalam lingkungan media yang terpapar mikroplastik yang terkontrol. Penelitian mengenai bioremediasi mikroplastik ini sudah dilakukan oleh beberapa peneliti. Pada makalah ini akan mengkaji hasil-hasil penelitian yang berkaitan dengan teknologi bioremediasi dengan memanfaatkan potensi mikroba atau bakteri indigenous dengan menggunakan metode kualitatif deskriptif yaitu metode untuk menyelidiki obyek yang tidak dapat diukur dengan angka-angka ataupun ukuran lain yang bersifat eksak dan cenderung menggunakan analisis dengan pendekatan induktif.

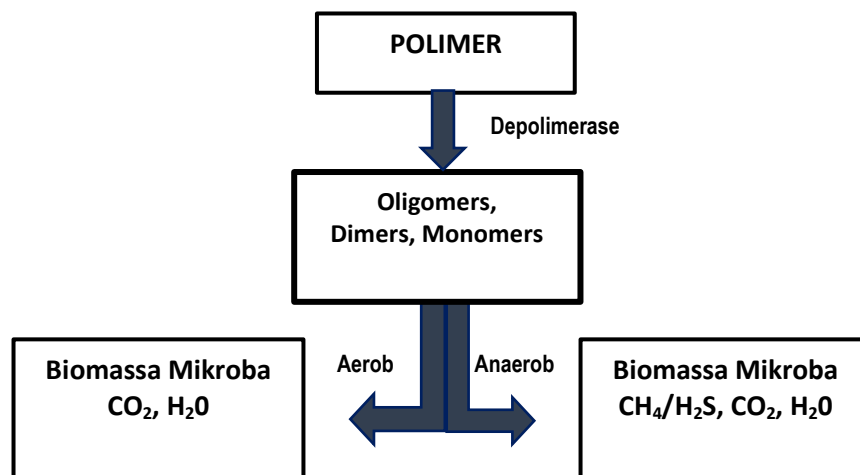
Dengan demikian, makalah ini bertujuan untuk: 1) mengetahui kemampuan mikroba atau bakteri untuk mereduksi mikroplastik dalam media yang terpapar mikroplastik pada skala laboratorium dan 2) mengetahui perubahan bentuk morfologi bakteri setelah terjadinya proses reduksi mikroplastik menggunakan *Scanning Electro Microscop* (SEM).

## 2. BAKTERI PENDEGRADASI LIMBAH 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 dan Dash (2014) adalah 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 actinomycet test 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. Bakteri lain bahkan dapat menggunakan senyawa yang diekskresikan tersebut (Hari dan Neale, 2002).

Pada umumnya hasil proses degradasi menyebabkan perubahan sifat polimer seperti menghasilkan potongan ikatan polimer, transformasi atau terbentuknya ikatan struktur kimia baru. Menurut Premraj dan 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<sub>2</sub>S. Mekanisme yang terjadi seperti terlihat pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Degradasi Polymer dalam kondisi aerob dan anaerob

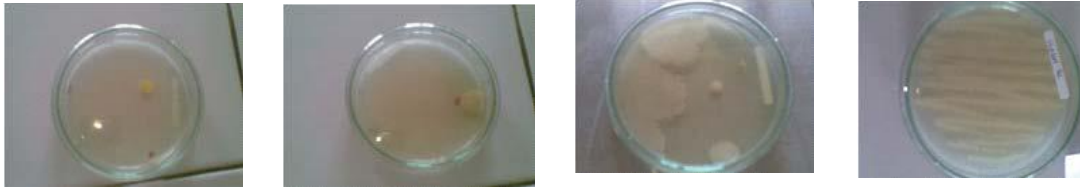
Pada proses ini, mikroorganisme tidak dapat mengangkut polimer langsung dari membran sel luarnya ke dalam sel, hal ini disebabkan sebagian besar proses biokimia terjadi karena kurangnya air dan molekul polimer yang panjang. Mikroba mengekskresikan enzim ekstraseluler yang mendepolimerisasi polimer di luar sel. Enzim depolimerase ekstraseluler dan intraseluler secara aktif terlibat dalam degradasi polimer secara biologis (Mohan and 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 dkk., (2008) dan Ghosh dkk (2013), penelitian mengenai degradasi oleh mikroba terhadap polimer sintesis yaitu plastik sudah banyak dilakukan antara lain:

- Degradasi polietilen oleh bakteri termofilik yaitu *Brevibacillus borstelensis* (Hadad dkk., 2005).
- Polihidroksialkanoat (PHA), proses depolimerase oleh bakteri *Pseudomonas stutzeri*, *Alcaligenes faecalis* dan *Streptomyces* sp. (Shimao, 2001; Ghosh dkk., 2013; Mabrouk dan Sabry, 2001; Kato, 1997).
- Polycaprolactone (PCL) adalah poliester sintesis yang mudah terdegradasi oleh mikroorganisme, diantaranya bakteri *Alcaligenes faecalis* (Oda dkk., 1997) dan *Clostridium botulinum* (Ghosh dkk., 2013).
- Polylactic acid (PLA) adalah polimer yang sering digunakan dalam plastik *biodegradable*; dan dapat didegradasi oleh bakteri termofilik *Bacillus brevis* (Tomita dkk., 1999).
- Polivinil klorida (PVC) terdegradasi oleh bakteri *Pseudomonas putida* (Anthony dkk., 2004).

### 3. ISOLAT BAKTERI PENDEGRADASI LIMBAH MIKROPLASTIK

Hasil penelitian yang dilakukan oleh Elpawati (2015) telah menghasilkan sebanyak 32 isolat yang berhasil dimurnikan yang kemudian dilakukan uji penentuan degradasi plastik polietilen dengan inkubasi selama 1 bulan, dishaker inkubator pada agitasi 130 rpm dalam kondisi suhu ruang. Penelitian ini menghasilkan 8 (delapan) isolat yang berpotensi sebagai pendegradasi plastik polietilen dengan persentase yang berbeda. Metode kerja yang dilakukan adalah menggunakan guntingan sampah plastik polietilen dicuci bersih dan diinokulasikan ke media NA dan TSA. Masa inkubasi selama 10 (sepuluh) hari pada suhu 37°C. Koloni yang tumbuh kemudian dimurnikan ke media agar miring NA dan TSA untuk uji selanjutnya.



**Gambar 2.** Isolat bakteri hasil isolasi dari mikroplastik polietilen dengan media Nutrient Agar dan Tryptic Soy Agar (Elpawati, 2015)

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

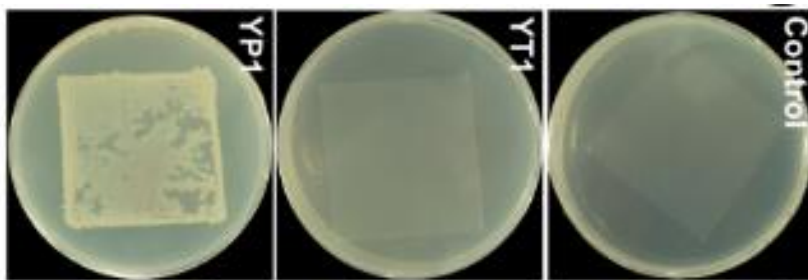
#### 4. UJI SENSIVITAS BAKTERI

Kemampuan pertumbuhan bakteri terhadap senyawa plastik yang toksik diuji dengan melakukan uji sensitivitas bakteri yang merupakan suatu metode untuk menentukan tingkat kerentanan bakteri terhadap senyawa mikroplastik dengan waktu inkubasi selama 10 hari. Diameter yang terbentuk pada zona hambat dapat menjadi indikasi kerentanan bakteri terhadap bahan anti bakteri (Fraga, 2016). Daya hambat pertumbuhan mikroorganisme tampak pada daerah di sekitar mikroplastik yang ditumbuhi oleh mikroorganisme. Hasil uji sensitivitas bakteri selama 10 hari memperlihatkan respon pertumbuhan bakteri dengan terjadinya pembentukan biofilm di permukaan mikroplastik.

Biofilm adalah penghalang fisik dari kumpulan sel mikroorganisme, khususnya bakteri yang melekat di suatu permukaan dan diselubungi oleh pelekut karbohidrat yang dikeluarkan oleh bakteri dimana sel-sel tersebut tetap dalam keadaan fisiologis yang dorman. Oleh karena itu, biofilm menunjukkan toleransi yang tinggi terhadap tekanan fisik, kimia, dan biologis. Biofilm tahan terhadap berbagai tekanan lingkungan dan telah berubah menjadi bentuk kehidupan mikroba yang paling resisten. Selanjutnya Flemming (1998) menjelaskan bahwa biofilm adalah lapisan berlendir dimana sel-sel bakteri dapat membungkus diri dalam matriks terhidrasi dari polisakarida dan protein yang terdiri dari air (80-95%), zat polimer

ekstraseluler (EPS) yang menyumbangkan 85-98% dari bahan organik, mikroorganismenya, partikel organik dan anorganik yang terperangkap.

Daya hambat atau penghalang pertumbuhan bakteri dapat dilihat pada daerah sekitar mikroplastik yang ditumbuhi oleh bakteri. Jika terbentuk zona hambatan di sekitar bakteri yang telah berikatan mikroplastik dengan berbagai dosis. Hal ini menunjukkan bahwa bakteri peka terhadap senyawa plastik. Sebaliknya, bila tidak terbentuk zona hambatan pada sekitar kertas cakram maka bakteri resisten terhadap kandungan senyawa plastik.



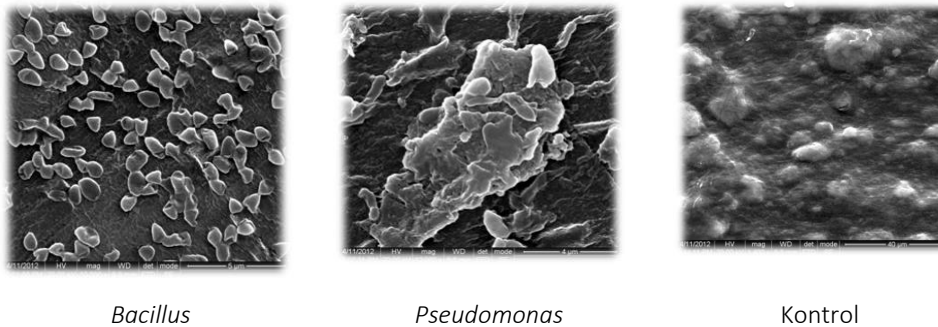
**Gambar 3.** Formasi koloni bakteri pada lembar film polietilen. Tidak terdapat koloni pada lembar kontrol (Yang dkk., 2014)

Terjadinya pembentukan film ini mengindikasikan bahwa tidak terbentuknya zona hambatan selama pengamatan berlangsung, sehingga menunjukkan bahwa kultur campuran bakteri indigenous cukup resisten dan mampu tumbuh pada media yang terpapar mikroplastik. Pada Gambar 3 terlihat tidak terdapat zona hambatan. Hal ini dapat disebabkan karena bakteri mampu tumbuh pada kondisi senyawa toksik. Dengan demikian bakteri tersebut diduga dapat menyisihkan senyawa pencemar mikroplastik. Terlihat bahwa diameter yang terbentuk pada zona hambat dapat menjadi indikasi kerentanan bakteri terhadap bahan anti bakteri.

## 5. UJI PERUBAHAN MORFOLOGI BAKTERI

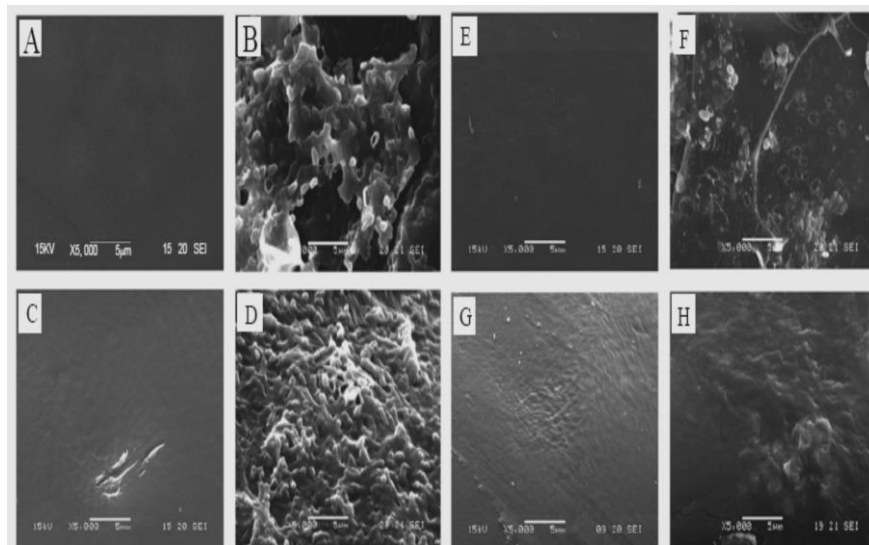
Penelitian yang telah dilakukan oleh Mahalakshmi, Siddiq, Andrew (2012) mengenai degradasi polietilen oleh bakteri *Bacillus* sp dan *Pseudomonas* sp dengan pengamatan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) setelah masa inkubasi, memperlihatkan adanya perubahan morfologi sel bakteri. Hasilnya menunjukkan adanya kerusakan morfologi atau perubahan struktur sel bakteri yang semakin besar seiring dengan besarnya dosis mikroplastik serta terjadi erosi pada permukaan film PE (Gambar 4).





**Gambar 4.** Hasil *Scanning Electron Microscope* (SEM) micrographs dari pembentukan biofilm (Mahalakshmi dkk., 2012)

Selanjutnya penelitian dengan pengamatan menggunakan SEM yang telah dilakukan oleh Yoon, Jeon and Kim (2012) memperlihatkan adanya biodegradasi *Low-Molecular-Weight Polyethylene* (LMWPE) oleh bakteri *Pseudomonas* sp. seperti terlihat pada Gambar 5.



**Gambar 5.** Hasil SEM pada lembaran LMWPE setelah 80 hari dari biodegradasi pada 37°C dalam kompos steril yang diinokulasi dengan *Pseudomonas* sp.). (A), (C), (E) dan (G); sebelum biodegradasi PE-1, PE-2, PE-3 dan PE-4, (B), (D), (F) dan (H); setelah biodegradasi PE-1, PE-2, PE-3 dan PE-4. (Yoon, Jeon and Kim, 2012)

Terlihat adanya kerusakan yang terjadi berupa pengerutan sel, pemanjangan sel, terbentuknya tonjolan (*blebs*) pada permukaan sel bakteri serta terbentuknya *ghost cell* hingga lisis sel bakteri. Hasil pengamatan melalui *Scanning Electro Microscope* (SEM), terbentuknya biofilm pada permukaan mikroplastik, menunjukkan adanya perubahan morfologi pada

permukaan mikroplastik tersebut yang disebabkan oleh koloni mikroorganisme yang menempel pada permukaannya membentuk biofilm (Mitchell dkk. 1996; Viktorov dkk. 1992).

## 6. KESIMPULAN

Hasil penelusuran kajian terhadap degradasi pencemar mikroplastik ini dapat memberi harapan baru untuk mengeliminir pencemar mikroplastik di lingkungan, merupakan strategi dan pendekatan yang baik untuk mengelola limbah bahan plastik tanpa menimbulkan dampak buruk. Adanya mikroorganisme pengurai plastik yang ditemukan, memiliki potensi bioteknologi yang besar untuk dapat membantu proses bioremediasi alami dalam mengurangi pencemaran mikroplastik pada ekosistem perairan. Kemajuan lebih lanjut dalam bidang bioteknologi ini juga memberikan perspektif baru mengenai bioremediasi terhadap kontaminasi mikroplastik. Selanjutnya perlu ditindaklanjuti untuk memilih konsorsium mikroba aktif yang paling efektif dalam proses degradasi mikroplastik.

## DAFTAR PUSTAKA

- Alshehrei, F. *Biodegradation of Synthetic and Natural Plastic by Microorganisms*. Journal of Applied & Environmental Microbiology. 2017. 5(1):8-19. Available online at <http://pubs.sciepub.com/jaem/5/1/2> ©Science and Education Publishing DOI:10.12691/jaem-5-1-2
- Anthony SD, Meizhong L, Christopher EB, Robin LB, David LF. 2004. *Involvement of linear plasmids in aerobic biodegradation of vinyl chloride*. Appl Environ Microbiol. 70:6092-6097.
- Auta, H.S., C.U. Emenike, S.H. Fauziah. *Distribution and importance of microplastics in the marine environment: A review of the sources, fate, effects, and potential solutions*. Environment International. 102:165-176. May 2017. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.02.013>
- Avio, C.G., Gorbi, S., Regoli, F. *Plastics and microplastics in the oceans: From emerging pollutants to emerged threat*. Marine Environmental Research. 128:2-11. July 2017. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2016.05.012>
- Caruso, G. 2015. *Plastic Degrading Microorganisms as a Tool for Bioremediation of Plastic Contamination in Aquatic Environments*. J Pollut Eff Cont. 3:3. <http://dx.doi.org/10.4172/2375-4397.1000e112>.
- Culo. I.C., and Packman, A.I. 2015. *Pseudomonas aeruginosa facilitates Campylobacter jejuni growth in bio films under oxicow conditions*. FEMS Microbiology Ecology. <http://dx.doi.org/10.1093/femsec/v136>



- Das, S and Dash, H.R. 2014. *Microbial Bioremediation: A Potential Tool for Restoration of Contaminated Areas-Microbial Biodegradation and Bioremediation*. Edited by Surajit Das. Elsevier Inc. ISBN: 978-0-12-800021-2.
- De Wi e, B., L. Devriese, K. Bekaert, S. Ho man, G. Vandermeersch, K. Cooreman, and J. Robbens. 2014. *Quality assessment of the blue mussel (Mytilusedulis): comparison between commercial and wild types*. Marine Pollution Bulletin 85: 146–155.
- Dris, R., J. Gasperi, V. Rocher, M. Saad, N. Renault, and B. Tassin. 2015. *Microplastic contamination in an urban area: a case study in Greater Paris*. Environmental Chemistry. 12:595–599.
- Elpawati. 2015. *Uji Coba Produksi Mikroorganism Pengdegradasi (Pengaruhcur) Sampah Plastik*. Jurnal Agribisnis. 9(1): 11–22. Juni 2015, ISSN : 1979-0058
- Eriksen, M., Lebreton, L.C.M., Carson, H.S., Thiel, M., Moore, C.J., Borerro, J.C., Galgani, F., Ryan, P.G., 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>
- Fraga, E.G., 2016. *Antimicrobial Susceptibility of Brazilian Clostridium difficile Strains Determined by Agar Dilution and Disk Diffusion*. The Brazilian Journal of Infectious Diseases. 20(5):476-481.
- Flemming, HC. 1998. *Relevance of biofilms for the biodeterioration of surfaces of polymeric materials*. Polym Deg and Stab. 59:309-315.
- Ghosh SK, Pal S, Ray S. 2013. *Study of microbes having potentiality for biodegradation of plastics*. Environ Sci Pollut Res Int. 20: 4339-4355.
- Gu J.D. 2003. *Microbiological deterioration and degradation of synthetic polymeric materials: recent research advances*. Int Biodeterior Biodegrad. 52:69-91
- Hadad D, Geresh S, Sivan A. 2005. *Biodegradation of polyethylene by the thermophilic bacterium Brevibacillus borstelensis*. J Appl Microbiol. 98: 1093-1100.
- Juliana A. Ivardo Sul Monica. F.Costa. 2014. *The present and future of microplastic pollution in the marine environment*. Environmental Pollution. 185:352-364. February 2014. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.036>
- 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 1352: 113-122.
- Kole, P.J., Löhr, A.J., van Belleghem, F.G.A. J and 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; doi: 10.3390/ijerph14101265 [www.mdpi.com/journal/ijerph](http://www.mdpi.com/journal/ijerph)

- Laurent C. M. Lebreton, Joost van der Zwet, Jan-Willem Damsteeg, Boyan Slat, Anthony Andrady & Julia Reisser. 2017. *River plastic emissions to the world's oceans Nature Communications*. volume 8, Article number: 15611; doi:10.1038/ncomms15611
- Mabrouk, M.M dan 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.
- Mitchell, R., Gu, J.D., Roman, M., Soukup, S. 1996. *Hazards to space missions from microbial biofilms*. In: Sand W (ed) *DECHEMA Monographs, Biotet biodeg* 133:3-16
- Mohan, S.K and Srivastava, T. 2010. *Microbial deterioration and degradation of polymeric materials*. *J Biochem Tech.* 2(4):210-215. ISSN: 0974-2328
- 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, September 2017. ISSN: 2337-7224. Jurusan Biologi FMIPA Universitas Udayana <http://ojs.unud.ac.id/index.php/simbiosis>.
- Sahwan, F.L., Martono, D.H., Wahyono, S., Wisoyodharmo, L.A. 2005. *Sistem Pengelolaan Limbah Plastik di Indonesia*. *J.Tel Ling. PeTL-BPPT.6* (1):311-318.
- Shah A.A., Hasan F, Hameed A, Ahmed S. 2008. *Biological degradation of plastics: a comprehensive review*. *Biotechnol Adv* 26: 246-265.
- Shimao M. 2001. *Biodegradation of plastics*. *Curr. Opinion Biotechnol.* 12: 242-247.
- Tarr, M.A. 2003. *Chemical Degradation Methods for Wastes and Pollutants: Environmental and Industrial Applications* (Environmental Science & Pollution) Publisher: CRC Press. ISBN: 0824743075 / 9780824743079
- Tomita K, Kuroki Y, Nagai K. 1999. *Isolation of thermophiles degrading poly (L-lactic acid)*. *J Biosci Bioeng* 87: 752-755.
- Mahalakshmi, V., Siddiq, A., Andrew, S.N. 2012. *Analysis of Polyethylene Degrading Potentials of Microorganisms Isolated From Compost Soil*. *International Journal of Pharmaceutical & Biological Archives.* 3(5):1190-1196.
- Verschoor A.J. 2015. *Towards a definition of microplastics: Considerations for the specification of physico-chemical properties*. RIVM Letter report 2015-0116. National Institute for Public Health and the Environment. The Netherlands.



- Wang, J., Tan, Z., Peng, J., Qiu, Q., Li, M. 2016. *The behaviors of microplastics in the marine environment*. Marine Environmental Research 113, 7-17.
- Wei-Min, W., Yang, J., Criddle, C.S. 2017. *Microplastics pollution and reduction strategies*. Frontiers of Environmental Science & Engineering, February 2017, 11:6
- Wright, S.L., Kelly, F. J. 2017. *Plastic and Human Health: A Micro Issue?*. Environ Sci Technol. 2017 Jun 20; 51(12): 6634-6647. doi: 10.1021/acs.est.7b00423. Epub 2017 Jun 7.
- Yang, J., Yang, Y., Wu, WM., Zhao, J and Jiang, L. *Evidence of Polyethylene Biodegradation by Bacterial Strains from the Guts of Plastic-Eating Waxworms*. dx.doi.org/10.1021/es504038a. Environ. Sci. Technol. 2014, 48, 13776–13784
- Yoon, MG., Jeon, HJ. and Kim MN. 2012. *Biodegradation of Polyethylene by a Soil Bacterium and AlkB Cloned Recombinant Cell*. J Bioremed Biodegrad. 3:4 DOI: 10.4172/2155-6199.1000145.