

BIODEGRADASI PLASTIK LDPE OLEH *Aspergillus niger* DAN *Pleurotus* sp.

Suharpina¹, Isna Rasdianah Aziz^{1*}, Arwan Sugiharto²

¹Prodi Biologi Fakultas Sains dan Teknologi UIN Alauddin Makassar
Jl. H.M.Yasin Limpo No. 36 Gowa, Sulawesi Selatan. 92113

²Laboratorium Mikrobiologi Lingkungan, Pusat Penelitian Biologi LIPI Cibinong

*E-mail: isna-rasdianah@uin-alauddin.ac.id

Abstrak. Pencemaran lingkungan oleh sampah plastik masih menjadi isu yang tidak berkesudahan karena mengakibatkan biota laut tercemar dan kontaminasi dalam tanah. Penanganan mengenai sampah plastik yang efektif dan efisien dalam berbagai aspek, salah satunya dalam aspek biologis sangat diperlukan. Tujuan penelitian ini adalah mengetahui kemampuan mikroorganisme kapang *Aspergillus niger* dan jamur *Pleurotus* sp. dalam mendegradasi plastik LDPE (*low density polyethylene*). Kultur *A. niger* dan *Pleurotus* sp. diinokulasi ke dalam tabung reaksi menggunakan jarum ose. Setelah jamur tumbuh, diinokulasi kembali ke dalam erlenmeyer yang berisikan media molase sebanyak 20 ml. Sampel yang digunakan merupakan plastik jenis LDPE dengan massa per perlakuan sebesar 1 gram dengan ukuran 1×1 cm yang dimasukkan ke labu erlenmeyer berisi molase dan isolat jamur yang telah dikultur sebelumnya. Massa plastik diamati setiap minggu bersamaan dengan perhitungan populasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penurunan massa plastik yang paling optimal terjadi pada isolat *A. niger*, dengan persentase penurunan mulai dari minggu kedua sebesar 0,95% dari total penurunan hingga 1,93% di minggu ketiga. Sementara pada isolat *Pleurotus* sp. mengalami penurunan yang konstan pada minggu pertama hingga kedua, dan penurunan massa plastik terjadi secara drastis di minggu ke tiga dan ke empat dengan persentase penurunan sebesar 1,05% dengan nilai tertinggi 2,23% pada minggu ke empat. *A. niger* dan *Pleurotus* sp. mempengaruhi penurunan persentase turunya degradasi plastik LDPE, masing-masing sebesar 4.41% dan 2.23%.

Kata Kunci: inokulasi kultur, jamur tiram, massa plastik, media molase, polietilena densitas rendah

Abstract. Environmental pollution caused by plastic trash is a never-ending problem since it results in polluted marine life and soil contamination. Effective and efficient management of plastic trash is critical in a variety of ways, one of which is biological. This study aims to assess the degradability of LDPE (low density polyethylene) plastic by *Aspergillus niger* and *Pleurotus* sp. *A. niger* and *Pleurotus* sp. cultures were injected into test tubes using a needle loop. Following growth, the fungus is reinoculated into the erlenmeyer containing 20 ml of molasses media. The sample was LDPE plastic with a mass per treatment of 1 g and a diameter of 11 cm that was placed in an erlenmeyer flask containing molasses and previously cultivated fungal isolates. Each week, plastic mass was measured and population estimates were made. The results indicated that the most efficient plastic mass reduction occurred in *A. niger* isolates, with a percentage decrease of 0.95% commencing in the second week and increasing to 1.93% in the third week. While the plastic mass of *Pleurotus* sp. isolates decreased steadily over the first two weeks, a dramatic decline occurred in the third and fourth weeks, with a percentage decrease of 1.05% and a maximum value of 2.23% in the fourth week. *A. niger* and *Pleurotus* sp. have a 4.41% and 2.23% effect on LDPE plastic degradation, respectively.

Keywords: culture inoculation, low density polyethylene, molasses medium, oyster mushroom, plastic mass

PENDAHULUAN

Kasus pencemaran dan perusakan lingkungan di Indonesia dan sejumlah negara lainnya masih tetap ditemukan, meskipun indeks kualitas lingkungan mengalami kenaikan 3,72 dari tahun 2019 ke tahun 2020 (KLHK, 2021). Salah satu penyebab utamanya adalah sampah anorganik berupa plastik yang sulit terurai di lingkungan, sehingga menjadi racun di dalam tanah dan mengakibatkan biota laut tercemar dan terkontaminasi oleh mikroplastik. Kesadaran tentang penggunaan plastik dan perbaikan sistem pengelolaan perlu ditingkatkan di setiap lapisan masyarakat.

Indonesia sebagai penghasil sampah plastik terbesar kedua di dunia terus mengupayakan solusi yang cepat dan tepat dalam penanganan sampah plastik yang kuantitasnya semakin bertambah dan dapat mengancam kerusakan lingkungan yang lebih parah. Sebanyak 87 kota pesisir di Indonesia berkontribusi terhadap pencemaran air laut akibat pembuangan sampah sekitar 1,27 juta ton, dengan jenis sampah botol plastik sejumlah 3,82 miliar (PII, 2019). Sampah plastik berakumulasi di laut karena mengandung polimer kompleks yang dengan umur degradasi yang lama. Sampah plastik tersebut tidak bertahan di permukaan laut, akan tetapi terdegradasi menjadi mikroplastik yang mengendap di bawah permukaan laut, terbawa oleh angin, gelombang, ataupun termakan oleh biota laut (Brandon *et al.*, 2016; Lebreton *et al.*, 2019).

Penanganan mengenai sampah plastik dalam berbagai aspek, salah satunya dengan pendekatan ilmu biologi yang sangat diperlukan. Beberapa mikroorganisme diketahui dapat mendegradasi plastik terutama yang tidak dapat terurai di alam. Terdapat lebih dari 90 genus bakteri, fungi dan Actinomycetes yang memiliki kemampuan melakukan biodegradasi plastik di antaranya *Pseudomonas* sp., *Bacillus megaterium*, *Azotobacter*, *Halomonas* sp., *Ralstonia eutropha*, dan lainnya (Brodhagen *et al.*, 2015; Sen & Raut, 2015; Aziz *et al.*, 2019). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan mikroorganisme kapang *Aspergillus niger* dan jamur *Pleurotus* sp. dalam mendegradasi plastik LDPE (*low density polyethylene*). Penelitian ini berperan sebagai dasar akselerasi proses biodegradasi plastik LDPE, potensi pembuatan plastik yang lebih ramah lingkungan, membantu mengurangi efek dari polusi limbah plastik LDPE di alam, serta kebijakan pengelolaan sampah plastik di lingkungan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium bidang Mikrobiologi Lingkungan, Pusat Penelitian Biologi Indonesia (LIPI). Sterilisasi alat dilakukan untuk mengurangi tingkat kontaminasi. Adapun alat-alat yang disterilisasi yaitu cawan petri. Cawan petri digunakan sebagai tempat media *Potato Dextrose Agar* (PDA), *spreader* digunakan untuk menyebarkan koloni jamur pada saat perhitungan populasi, pinset digunakan untuk mengambil plastik dari subkultur, jarum ose digunakan untuk inokulasi jamur, *tip* digunakan untuk pengenceran bertingkat dan labu *erlenmeyer* digunakan untuk media molase dan inokulasi jamur. Alat yang akan disterilisasi dibungkus berdasarkan jenisnya. Apabila alat terbuat dari kaca, alat dibungkus dengan kertas. Untuk jenis alat berbahan besi dibungkus dengan *aluminium foil*, kemudian dimasukkan ke dalam autoklaf dengan suhu 121°C selama 15 menit dengan tekanan 2 atm.

Adapun media yang digunakan pada penelitian ini yaitu PDA dan media molase. PDA dibutuhkan dalam inokulasi jamur, dan pengamatan koloni jamur. Sedangkan pada media molase digunakan sebagai substrat pertumbuhan jamur. Pembuatan media PDA untuk inokulasi jamur dibutuhkan 39 gr L⁻¹. Media yang dibutuhkan untuk satu kali

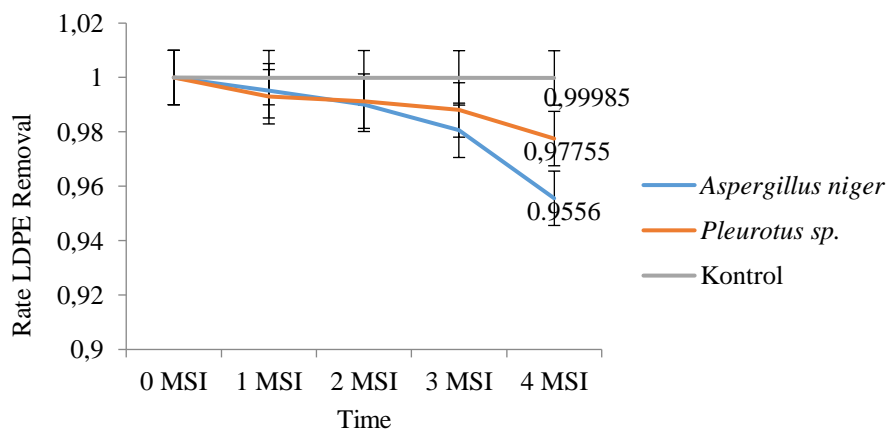
perlakuan hanya 250 ml, yang artinya bahan yang digunakan hanya membutuhkan 9,75 gr. Setelah diencerkan dalam *erlenmeyer*, media ini masuk ke dalam *autoclave* untuk disterilisasi dalam suhu 121°C di bawah tekanan 2 atm selama 15 menit. Media yang sudah disterilisasi, dilanjutkan dengan menuang media pada tabung reaksi untuk kultur jamur, dan pada cawan petri untuk perhitungan populasi jamur. Banyak media yang dibutuhkan dalam tabung reaksi yaitu 5 ml dengan catatan setelah memasukkan PDA dalam tabung reaksi, tabung ini harus dimiringkan agar PDA beku dalam keadaan miring. Media kedua yaitu molase dibuat dengan persentase 20%, molase yang dibutuhkan sebesar 50 ml yang diencerkan dalam 1000 ml akuades. Molase dibuat di *erlenmeyer* sebesar 100 ml per perlakuan, perlakuan dibuat berdasarkan jenis jamur, dan juga ulangan (Singh *et al.*, 1990; Kalingan & Krishnan, 1997).

Kultur *Aspergillus niger* dan *Pleurotus sp.* diinokulasi dengan menggunakan jarum ose ke dalam tabung reaksi karena tingkat kontaminasinya kecil. Agar dibuat miring untuk memperluas jaringan jamur. Setelah media memadat, jamur kemudian diinokulasi dan disimpan dalam suhu ruangan selama 3-7 hari. Setelah jamur tumbuh, diinokulasi kembali ke dalam *erlenmeyer* yang berisikan media molase sebanyak 20 ml. Setelah jamur diinokulasi ke dalam *erlenmeyer* yang berisikan media molase dan juga sampel plastik LDPE dengan ukuran 1×1 cm masing-masing dengan berat 1 gram, *erlenmeyer* kemudian diinkubasi dengan ditempatkan dalam *shaker* selama 4 minggu bersamaan dengan perhitungan populasi (Jackson *et al.*, 1991; Kumar *et al.*, 2013).

Pengenceran dilakukan untuk mendapatkan koloni tunggal. Sampel kultur yang dikembangkan dilakukan pengamatan populasi jamur per minggu. Hal ini dilakukan untuk mengamati perkembangan koloni jamur yang di kultur. Pengenceran dilakukan dengan menggunakan akuades steril. Tahapan pengenceran dilakukan dengan mengambil 1 ml isolat yang diencerkan dalam 9 ml akuades. Perhitungan populasi dilakukan pada pengenceran 10^{-5} dan 10^{-7} . Pada perhitungan koloni dilakukan dengan metode *total plate count* sebelum dimasukkan ke dalam bahan pembawa (Skinner *et al.*, 1952).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengamatan massa plastik LDPE dilakukan setiap minggu setelah diinkubasi dengan isolat *Aspergillus niger* dan *Pleurotus sp.* yang telah dikultur sebelumnya dengan media molase (Gambar 1).



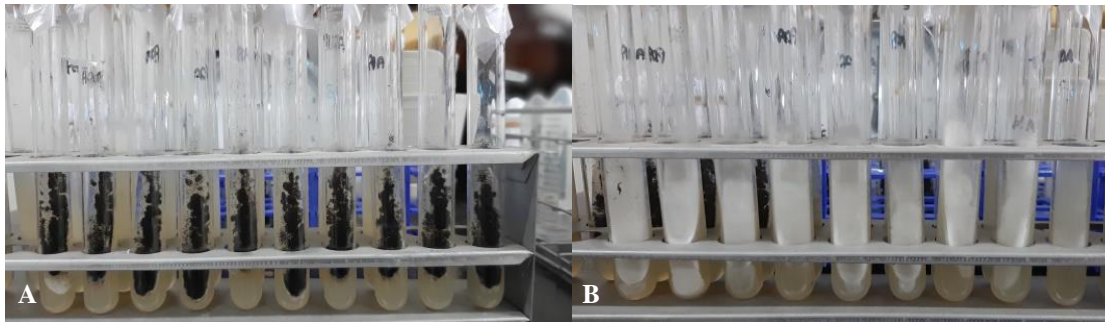
Gambar 1. Penurunan massa plastik LDPE sebesar 4.41% oleh *Aspergillus niger* dan 2.23% oleh *Pleurotus sp.*

Penurunan massa plastik yang paling optimal terjadi pada isolat *A. niger*, dengan persentase penurunan mulai dari minggu kedua sebesar 0,95% dari total penurunan hingga 1,93% di minggu ketiga. Kemudian pada perlakuan dengan isolat *A. niger* terjadi penurunan kembali setelah 2 minggu perlakuan dengan penurunan sebesar 2,48% dengan total penurunan hingga 4,41%. Sementara pada isolat *Pleurotus* sp. mengalami penurunan yang konstan pada minggu pertama hingga kedua, dan penurunan massa plastik terjadi secara drastis di minggu ketiga dan keempat dengan persentase penurunan sebesar 1,05% dengan nilai tertinggi 2,23% di minggu keempat. Sementara untuk kontrol mengalami penurunan yang konstan dengan persentase penurunan sebesar 0,00%.

A. niger mampu mendegradasi plastik LDPE sebesar 4,41%, dan *Pleurotus* sp. sebesar 2,23%, disebabkan oleh kemampuan *A. niger* dan *Pleurotus* sp. menghasilkan enzim ekstraseluler. Senyawa organik kompleks, seperti polimer plastik dapat didepolimerisasi oleh sejumlah enzim ekstraseluler, kemudian diabsorpsi oleh enzim intraseluler (Bano *et al.*, 2017; Wei & Zimmermann, 2017). Menurut Rohmah *et al.*, (2019), *A. niger* dan *Pleurotus* sp. mampu menggunakan plastik sebagai substrat untuk pertumbuhannya. Perubahan pH dan suhu optimum menjadi faktor yang penting dalam kinerja enzim yang efektif. Enzim lignolitik di antaranya *phenol oxidase (laccase)*, *lignin peroxidase*, *manganese peroxidase*, dan *versatile peroxidase*, merupakan enzim ekstraseluler diketahui banyak diteliti karena kemampuannya dalam mendegradasi berbagai jenis plastik (Bhardwaj *et al.*, 2013; Vrsanska *et al.*, 2015). Isolat kapang yang tumbuh menghasilkan sekret enzim mampu mendegradasi plastik. Polyethylene yang terdapat pada plastik digunakan sebagai sumber karbon dan sumber energi bagi kapang, sebagai timbal baliknya kapang mengeluarkan enzim yang mengoksidasi LDPE yang selanjutnya digunakan untuk menguraikan plastik tersebut (Ghosh *et al.*, 2013; Weinberger *et al.*, 2020). Jamur memiliki potensi besar sebagai pendegradasi LDPE dikarenakan kemampuannya untuk menghasilkan enzim ekstraseluler yang dapat memotong polimer kompleks LDPE (Alshehrei, 2017; Awasthi *et al.*, 2017), sehingga memungkinkan terjadinya proses degradasi. Jamur mampu memproduksi protein *hydrophobin* (hidrofobik) dan *chaplin* yang berperan sebagai surfaktan, sehingga membantu menurunkan hidrofobitas polimer dan meningkatkan efektivitas degradasi (Khalesi *et al.*, 2015; Dokouhaki *et al.*, 2021). Menurut Sen & Raut (2015), jamur juga diketahui memiliki diversitas tinggi dengan kemampuan metabolisme yang lebih beragam dibandingkan bakteri.

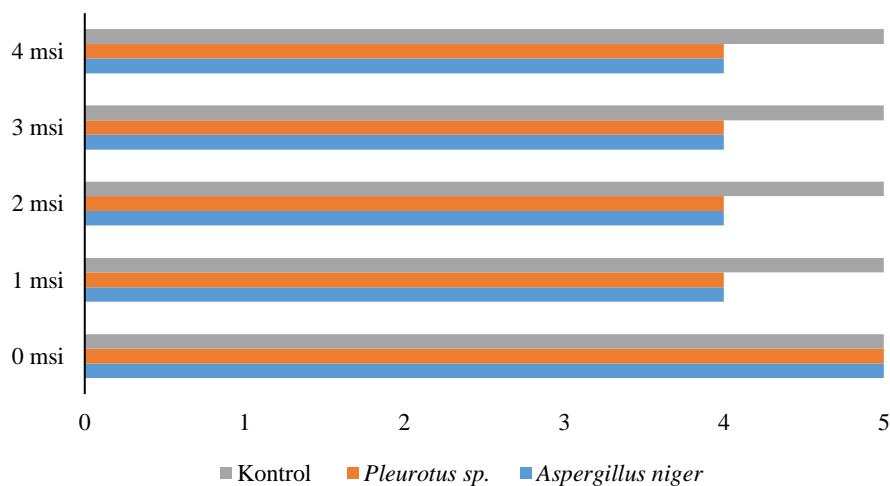
Kemampuan tumbuh *A. niger* dan *Pleurotus* sp. bergantung pada nutrisi media yang digunakan untuk tumbuh. Media yang umum untuk pertumbuhan jamur di laboratorium adalah PDA. Media PDA memiliki pH yang rendah (pH 4,5 - 5,6), sehingga menghambat pertumbuhan bakteri yang membutuhkan lingkungan yang netral dengan pH 7,0, dan suhu optimum untuk pertumbuhan antara 25-30°C. Media PDA terbuat dari ekstrak kentang dengan penambahan sumber karbohidrat berupa dextrose. *A. niger* dan *Pleurotus* sp. membutuhkan karbohidrat untuk tumbuh. Penelitian yang dilakukan oleh Muthmainnah *et al.* (2019) membuktikan bahwa media PDA memiliki pertumbuhan jamur *A. niger* terbaik, ditandai dengan adanya perkembangan diameter, kesuburan spora dan warna miseliumnya. Sejalan dengan hal tersebut, Hafsari *et al.* (2017) menemukan bahwa media yang paling optimal untuk pertumbuhan miselium jamur tiram *Pleurotus flabellatus* yaitu media kontrol atau tanpa perlakuan media PDA. Hal ini disebabkan karena media tanpa perlakuan (kontrol) mengandung gula sebagai bahan karbohidrat yang cukup besar.

A. niger dan *Pleurotus* sp. menggunakan polimer plastik sebagai sumber karbon dalam proses metabolisme. Kedua spesies tersebut berkembang pada polimer plastik dan memfasilitasi produksi molekul sederhana. Plastik LDPE memiliki rantai polimer yang panjang dan menjadi perlekatan fungi pada permukaannya (Das & Kumar, 2014; Ojha *et al.*, 2017). Enzim yang dimiliki fungi menembus ke dalam struktur berpori, mengubah struktur polimer, meningkatkan ukuran pori-pori dan memicu retakan plastik (Hikmah *et al.*, 2018; Yuan *et al.*, 2020). Akibatnya, struktur material menjadi tidak stabil, sehingga berat massa plastik berkurang selama masa inkubasi.



Gambar 2. Pertumbuhan isolat fungi pendegradasi plastik LDPE: a. *Aspergillus niger*; b. *Pleurotus* sp.

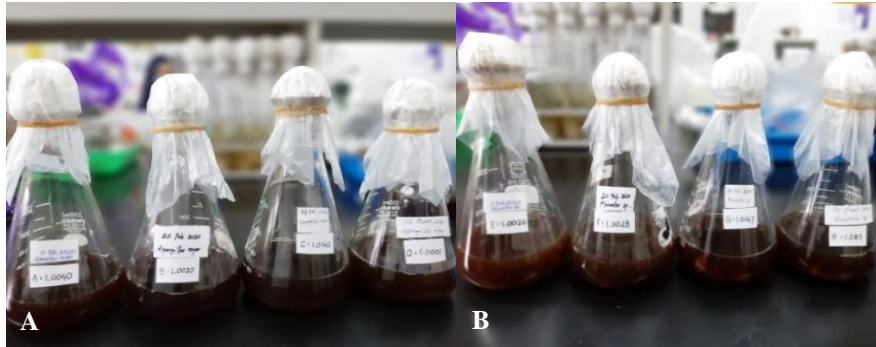
Kemampuan *A. niger* meningkat pada minggu kedua sebesar 55%, kembali naik pada minggu keempat sebesar 56%. Sedangkan pada *Pleurotus* sp. mengalami peningkatan pada minggu keempat sebesar 45%. Kemampuan *A. niger* dibandingkan *Pleurotus* sp. memiliki nilai yang jauh berbeda, hal ini terlihat pada penurunan plastik yang terjadi. Jamur *A. niger* mampu menurunkan plastik sebesar 4,41%, sedangkan *Pleurotus* sp. hanya menurunkan sebesar 2,23%.



Gambar 3. Pengukuran pH media kultur jamur selama empat minggu

Kemampuan fungi dapat menurunkan pH sebesar 20% dari pH awal (Gambar 3). Kemampuan mikroorganisme ini juga tidak dipengaruhi oleh kadar asam dalam media, pada keadaan asam dengan pH 4 kemampuan degradasi dari mikroorganisme berkisar 2,23%-4,4%. Hasil tersebut sesuai dengan penelitian yang dilakukan Gajendiran *et al.* (2016) yang melaporkan bahwa *A. clavatus* dapat menurunkan sebesar 35%, *A. japonicus*, *A. terreus*, *A. flavus* sebesar 11,11%, sedangkan untuk *A. niger* sendiri sebesar 5,8%.

Rohmah *et al.* (2019), juga melaporkan bahwa kemampuan *A. niger* pada pH 5 dan 6 memiliki hasil yang tidak berbeda nyata, penurunan berkisar 3,25%, tetapi hasil tersebut berada pada inkubasi 20 hari dan memiliki perkembangan yang cepat pada hari kelima.



Gambar 4. Biodegradasi plastik LDPE: a. *Aspergillus niger*; b. *Pleurotus sp.*

Berdasarkan Gambar 4, diketahui bahwa *A. niger* dapat tumbuh baik pada kondisi asam. Rohmah *et al.* (2019) menyebutkan bahwa *Aspergillus sp.* dapat bertahan hidup pada rentang pH yang lebih asam < 6. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa *A. niger* mempengaruhi penurunan pH sebesar 20% pada media molase. Hal yang sama terjadi pada *Pleurotus sp.* yang mampu menurunkan pH sebesar 20% pada media molase. Pada skala laboratorium, jamur mampu tumbuh pada kisaran pH yang luas yaitu antara 4,5-8,0 dengan pH optimum 5,5-7,7 bergantung pada spesies, dan pertumbuhan pada suhu di bawah suhu optimum dapat menurunkan rata-rata metabolisme sel. Suhu di atas optimum, menyebabkan pertumbuhan menurun dan memungkinkan terjadinya kematian apabila melampaui suhu maksimum pertumbuhan. Pengenceran bertingkat dilakukan untuk mengetahui populasi pertumbuhan *A. niger* dan *Pleurotus sp.* Perhitungan populasi dilakukan pada pengenceran 10^{-5} dan 10^{-7} . Pada pengamatan ini rata-rata koloni yang tumbuh adalah 3 koloni pada pengenceran 10^{-5} dan 2 koloni di pengenceran 10^{-7} .

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian biodegradasi plastik LDPE yang telah dilakukan selama 4 minggu dalam media kultur molase dapat disimpulkan bahwa *Aspergillus niger* dan *Pleurotus sp.* mempengaruhi penurunan persentase turunya proses biodegradasi plastik LDPE, masing-masing sebesar 4.41% dan 2.23%.

DAFTAR PUSTAKA

- Alshehrei, F. (2017). Biodegradation of low density polyethylene by fungi isolated from Red Sea water. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6(8), 1703-9. <http://dx.doi.org/10.20546/ijcmas.2017.602.204>.
- Awasthi, S., Srivastava, N., Singh, T., Tiwary, D., & Mishra, P. K. (2017). Biodegradation of thermally treated low density polyethylene by fungus *Rhizopus oryzae* NS 5. *3 Biotech*, 7(1), 1-8. <https://doi.org/10.1007/s13205-017-0699-4>.
- Aziz, I. R., Muthiadin, C., & Hafsan, H. (2019). Biodegradasi plastik LDPE hitam dan putih pada sampah TPA Antang dalam kolom winogradsky. *Al-Kauniah: Jurnal Biologi*, 12(2), 164-170. <https://doi.org/10.15408/kauniah.v12i2.10037>.
- Bano, K., Kuddus, M., R Zaheer, M., Zia, Q., F Khan, M., Gupta, A., & Aliev, G. (2017). Microbial enzymatic degradation of biodegradable plastics. *Current*

- Pharmaceutical Biotechnology*, 18(5), 429-440.
<https://doi.org/10.2174/1389201018666170523165742>.
- 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. <https://doi.org/10.1007/s10924-012-0456-z>.
- Brandon, J., Goldstein, M., & Ohman, M. D. (2016). Long-term aging and degradation of microplastic particles: comparing in situ oceanic and experimental weathering patterns. *Marine Pollution Bulletin*, 110(1), 299-308. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.048>.
- Brodhagen, M., Peyron, M., Miles, C., & Inglis, D. A. (2015). Biodegradable plastic agricultural mulches and key features of microbial degradation. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 99(3), 1039-1056. <https://doi.org/10.1007/s00253-014-6267-5>.
- Das, M. P., & Kumar, S. (2014). Microbial deterioration of low density polyethylene by *Aspergillus* and *Fusarium* sp. *International Journal of ChemTech Research*, 6(1), 299-305.
- Dokouhaki, M., Hung, A., Kasapis, S., & Gras, S. L. (2021). Hydrophobins and chaplins: novel bio-surfactants for food dispersions a review. *Trends in Food Science & Technology*, 111, 378-387. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.03.001>.
- Gajendiran, A., Krishnamoorthy, S., & Abraham, J. (2016). Microbial degradation of low-density polyethylene (LDPE) by *Aspergillus clavatus* strain JASK1 isolated from landfill soil. *3 Biotech*, 6(1), 1-6. <https://doi.org/10.1007/s13205-016-0394-x>.
- Ghosh, S. K., Pal, S., & Ray, S. (2013). Study of microbes having potentiality for biodegradation of plastics. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(7), 4339-4355. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1706-x>.
- Hafsari, A. R., Andriani, P., & Suryani, Y. (2017). Pengaruh penggunaan media alternatif terhadap pertumbuhan F0 dan senyawa metabolit sekunder pada jamur tiram merah muda (*Pleurotus flabellatus*). *Jurnal ilmiah biologi BIOTIKA*. 15(2), 30-40. <http://dx.doi.org/10.24198/bjib.v15i2.19301>.
- Hikmah, M., Setyaningsih, R., & Pangastuti, A. (2018). The potential of lignolytic *Trichoderma* isolates in LDPE (low density polyethylene) plastic biodegradation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 333(1), 1-8. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/333/1/012076>.
- Jackson, A. M., Whipps, J. M., & Lynch, J. M. (1991). Effects of temperature, pH and water potential on growth of four fungi with disease biocontrol potential. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 7(4), 494-501.
- Khalesi, M., Gebruers, K., & Derdelinckx, G. (2015). Recent advances in fungal hydrophobin towards using in industry. *The Protein Journal*, 34(4), 243-255. <https://doi.org/10.1007/s10930-015-9621-2>.
- Kalingan, A. E., & Krishnan, M. R. V. (1997). Application of agro-industrial by-products for riboflavin production by *Eremothecium ashbyii* NRRL 1363. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 47(3), 226-230.
- KLKH. (2021). Indeks kualitas lingkungan hidup Indonesia Tahun 2020 meningkat. Aceh: Dinas Lingkungan Hidup dan Kehutanan (DLHK) Aceh, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. <https://dlhk.acehprov.go.id/>.

- Kumar, S., Das, M. P., Rebecca, L. J., & Sharmila, S. (2013). Isolation and identification of LDPE degrading fungi from municipal solid waste. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 5(3), 78-81.
- Lebreton, L., Egger, M., & Slat, B. (2019). A global mass budget for positively buoyant macroplastic debris in the ocean. *Scientific Reports*, 9(1), 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49413-5>.
- Muthmainnah, A. W., Srigele, L., & Jiwintarum, Y. (2019). Penggunaan bahan dasar pisang ambon (*Musa acuminata*) sebagai media alternatif untuk pertumbuhan jamur *Aspergillus niger*. *Jurnal Analis Medika Biosains (JAMBS)*, 6(2), 93-97. <https://doi.org/10.32807/jambs.v6i2.139>.
- Ojha, N., Pradhan, N., Singh, S., Barla, A., Shrivastava, A., Khatua, P., Rai, V & Bose, S. (2017). Evaluation of HDPE and LDPE degradation by fungus, implemented by statistical optimization. *Scientific Reports*, 7(1), 1-13. <https://doi.org/10.1038/srep39515>.
- PII. (2019). Menenggelmakan pembuang sampah plastik di laut. Jakarta: Portal Informasi Indonesia. <https://indonesia.go.id/>.
- Rohmah, U. M., Shovitri, M., & Kuswyasari, K. (2019). Degradasi plastik oleh jamur *Aspergillus terreus* (LM 1021) pada pH 5 dan pH 6, serta suhu 25 dan 35 Celcius. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 7(2), 60-65.
- Sen, S. K., & Raut, S. (2015). Microbial degradation of low density polyethylene (LDPE): A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(1), 462-473. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.01.003>.
- Singh, S. K., Nene, Y. L., & Reddy, M. V. (1990). Influence of cropping systems on *Macrophomina phaseolina* population of Soil. *Plant Disease*, 74(10), 812-814.
- Skinner, F. A., Jones, P. C. T., & Mollison, J. E. (1952). A comparison of a direct-and a plate-counting technique for the quantitative estimation of soil micro-organisms. *Microbiology*, 6(3-4), 261-271.
- Vrsanska, M., Buresova, A., Damborsky, P., & Adam, V. (2015). Influence of different inducers on ligninolytic enzyme activities. *Journal of Metallomics and Nanotechnologies*, 3, 64-70.
- Wei, R., & Zimmermann, W. (2017). Microbial enzymes for the recycling of recalcitrant petroleum-based plastics: how far are we?. *Microbial Biotechnology*, 10(6), 1308-1322. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12710>.
- Weinberger, S., Beyer, R., Schüller, C., Strauss, J., Pellis, A., Ribitsch, D., & Guebitz, G. M. (2020). High throughput screening for new fungal polyester hydrolyzing enzymes. *Frontiers in Microbiology*, 11, 554. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00554>.