



## SKRINING MIKROBA PENDEGRADASI PLASTIK DARI TANAH DAN UJI BIODEGRADASI MENGGUNAKAN *FOURIER TRANSFORM INFRARED (FTIR)*

### *SCREENING OF PLASTIC DEGRADING MICROBES FROM SOIL AND THE BIODEGRADATION EXAMINATION USING FOURIER TRANSFORM INFRARED (FTIR)*

Nur Asmi, Maswati Baharuddin, Amalyah Febryanti\*

UIN Alauddin Makassar, Jl. H.M. Yasin Limpo No. 36 Romang Polong Gowa

Telp. 1500363, (0411) 841879, Fax 8221400

\*Corresponding author: [nurasminur98@gmail.com](mailto:nurasminur98@gmail.com)

Naskah Diterima: 21 Februari 2021; Direvisi: 2 Mei 2021; Disetujui: 13 September 2021

#### Abstrak

Saat ini pencemaran lingkungan telah menjadi permasalahan global, tidak hanya dirasakan oleh negara maju tetapi juga dialami oleh negara berkembang. Penyebab terjadinya pencemaran tersebut ialah adanya benda asing masuk ke dalam lingkungan, sehingga mengakibatkan kerusakan komposisi dari komposisi awalnya. Salah satu penyebab pencemaran lingkungan adalah kehadiran limbah plastik. Limbah tersebut merupakan limbah yang sangat sulit didegradasi. Salah satu solusi alternatif yang dilakukan dalam mendegradasi plastik adalah dengan menggunakan mikroorganisme. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan skrining mikroorganisme dalam mendegradasi plastik. Jenis plastik yang digunakan sebagai sampel adalah *High-Density Polyethylene* (HDPE). Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah skrining mikroba dan uji biodegradasi dengan memanfaatkan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR). Hasil yang diperoleh dalam studi ini adalah terdapat 17 jumlah isolat. Zona bening besar ditunjukkan oleh isolat A<sub>12</sub>P. Potensi biodegradasi terbesar selama 4 bulan dengan persentase 17,9104% ditunjukkan oleh isolat A<sub>12</sub>P. Hasil degradasi menunjukkan bahwa kehadiran gugus C=O mengindikasikan terjadinya reaksi oksidasi dan kinerja enzim oleh mikroba. Oleh karena itu, isolat A<sub>12</sub>P memiliki potensi untuk mendegradasi plastik.

**Kata kunci:** Biodegradasi; FTIR; HDPE; Mikroorganisme; Plastik

#### Abstract

Nowadays environmental pollution has become a global problem, which is not only experienced by developed countries but also by developing countries. The cause of this pollution is the presence of foreign objects entering the environment resulting in damage to the composition of the original composition. One of the causes of environmental pollution is the presence of plastic waste. This waste is very difficult to degrade. One of the alternative solutions to degrade plastics is to use microorganisms. This study aims to screen microorganisms to degrade plastics. The type of plastic used as the sample was High-Density Polyethylene (HDPE). The method used in this research was microbial growth screening and biodegradation testing using Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). The results obtained 17 isolates. The largest clear zone was shown by isolate A<sub>12</sub>P. The greatest biodegradation potential for 4 months with a percentage of 17.9104% was shown by isolate A<sub>12</sub>P. The results of degradation indicated that the presence of the C=O group caused the occurrence of oxidation reactions and enzyme performance by microbes. Therefore, A<sub>12</sub>P isolate has the potential to degrade plastics.

**Kata kunci:** Biodegradation; FTIR; HDPE; Microorganism; Plastic

**Permalink/DOI:** <http://dx.doi.org/10.15408/kauniyah.v15i1.19826>

## PENDAHULUAN

Pencemaran lingkungan telah menjadi permasalahan global yang dihadapi negara saat ini, yang tidak hanya dirasakan oleh negara maju tetapi juga dialami oleh negara berkembang. Penyebab terjadinya pencemaran tersebut ialah adanya benda asing masuk ke dalam lingkungan sehingga mengakibatkan kerusakan dari komposisi awalnya. Salah satu penyebab pencemaran lingkungan adalah adanya limbah plastik.

Plastik merupakan makromolekul yang terbentuk melalui proses polimerisasi dari unit monomer yang digabung sehingga membentuk polimer berantai panjang, sehingga menyebabkan plastik sulit terurai dan membutuhkan waktu biodegradasi puluhan tahun. Penggunaan plastik khususnya di Indonesia, mencapai peringkat kedua setelah Tiongkok. Hal ini tentu menjadi permasalahan yang sangat meresahkan masyarakat. Berdasarkan laporan dari Dirjen Pengelolaan Limbah, Sampah, dan B3, jumlah sampah di Indonesia pada tahun 2019 mencapai 68 juta ton yang terbagi atas sampah plastik 9,52 juta ton atau setara dengan 14% dari jumlah sampah secara keseluruhan. Penggunaan plastik diproduksi secara besar-besaran karena tahan lama, fleksibel, ringan, dan mudah dibentuk. Namun, di sisi lain plastik sangat merugikan lingkungan karena sifatnya yang sulit terurai sehingga mampu menurunkan kesuburan tanah. Salah-satu langkah alternatif yang dapat dilakukan untuk tidak merusak lingkungan adalah dengan mendegradasi untuk meminimalisasi sampah plastik dengan menggunakan metode biodegradasi.

Biodegradasi dilakukan untuk menyeimbangkan sistem ekologis lingkungan. Teknik ini mampu mendegradasi suatu bahan kimia dengan memanfaatkan mikroorganisme berupa jamur, alga, dan bakteri. Proses metabolisme bakteri mampu memecah struktur polimer menjadi monomer dengan memanfaatkan enzim yang dimiliki, yaitu enzim lipase, esterase, dan *serine hydrolase* (Sriningsih & Maya, 2015). Enzim tersebut berinteraksi dengan permukaan polimer sehingga dapat memecah ikatan hidrolitik dari polimer yang kemudian diubah menjadi bentuk lebih sederhana, yang dapat berupa monomer, dimer, atau trimer. Plastik yang terdegradasi oleh mikroorganisme dapat melalui dua tahap, yaitu secara aerobik dan anaerobik, yang menghasilkan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dan air (H<sub>2</sub>O) sebagai produk akhir dari proses metabolismenya (Asmita et al., 2015).

Penelitian lain yang dilakukan pada sampel tanah pesisir telah diidentifikasi dari genus *Bacillus* sp. dan *Pseudomonas* sp. yang mendegradasi *High Density Polyethylene* (HDPE) dengan persentase kehilangan berat kering 8% dari berat awalnya (Devi et al., 2019). Menurut Munir et al. (2019), *Trichoderma viridae*, jenis jamur yang diperoleh dari tempat pembuangan sampah akhir, mampu mendegradasi plastik jenis *Low Density Polyethylene* (LDPE) sebesar 5,13%. Selain itu, *Asperigillus niger* memiliki potensi degradasi sekitar 6,3% selama masa inkubasi 45 hari. Rohmah et al. (2019) menyebutkan bahwa *Asperigillus terreus* menghasilkan persentase degradasi plastik tertinggi sekitar 3,25% dalam 30 hari masa inkubasi. Berdasarkan hal-hal tersebut, dapat dikatakan bahwa mikroba dari tanah tercemar berpotensi sebagai agen biologis untuk mengurai plastik. Penelitian ini dilakukan untuk mencari isolat yang memiliki kemampuan mendegradasi HDPE dari tanah tempat pembuangan sampah. Biodegradasi yang dihasilkan dapat dilihat dari hasil pengukuran FTIR.

## MATERIAL DAN METODE

### Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sampel tanah (diperoleh dari daerah lokasi pembuangan akhir (TPA) yang berada di Kelurahan Dannuang, Kecamatan Ujung Loe, Kabupaten Bulukumba). Selain itu, akuades, alkohol 70%, bakto agar, bakto pepton, ekstrak daging, gliserol, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 3%, K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, NaCl fisiologis, nistatin, MgSO<sub>4</sub>, serbuk HDPE, Tween 80, polietilen glikol

(PEG) dan potongan plastik hitam merupakan bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini. Media King's agar juga digunakan dalam studi ini yang komposisinya antara lain pepton,  $K_2HPO_4$ ,  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ , gliserol, dan agar.

Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini adalah *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) yang dilengkapi perangkat iTRThermo Fisher, *shaker* MASQ 7000, laminar air flow Isocide 14644-1, inkubator Haraeus, autoklaf GEA yx-280D, oven Memmert GmbH, neraca analitik Kern ABS, desikator, mikropipet Biorad, vortex Wizard, pemanas listrik Maspion SH-31. Selain itu, alat-alat gelas Pyrex juga dipakai dalam penelitian ini.

### Preparasi Sampel

Sampel tanah diambil dengan menggunakan metode *purposive sampling*. Tanah digali pada kedalaman 10–15 cm. Kemudian sebanyak 100 g lapisan atas tanah diambil dengan menggunakan sekop dan dimasukkan ke dalam botol steril. Sampel yang telah diambil berasal dari tanah yang terkontaminasi oleh limbah domestik dan pembuangan air secara serius dalam jangka waktu yang lama.

### Isolasi Bakteri

Sampel tanah sebanyak 10 g disuspensikan dalam 90 mL NaCl fisiologis. Kemudian campuran dihomogenkan menggunakan *shaker* selama 30 menit dengan kecepatan 150 rpm. Selanjutnya seri pengenceran dilakukan sampai  $10^{-6}$  mg/L. Hasil pengenceran diinokulasi masing-masing sebanyak 0,1 mL ke dalam cawan petri yang berisi media King's B Agar yang sebelumnya telah ditambahkan dengan 2% PEG dan 2 tetes nistatin. Kemudian itu diinkubasi selama  $2 \times 24$  jam pada suhu  $37^\circ C$ . Lalu morfologi koloni isolat bakteri diamati untuk dilakukan skrining, dan selanjutnya dimurnikan dengan metode *streak for single colony* (Riandi et al., 2017). Skrining dilakukan dengan cara mengamati secara langsung bentuk koloni, tepi, elevasi, struktur dalam, motilitas, dan pertumbuhan pada media agar miring (Romadhon et al., 2012).

### Skrining Bakteri Pendegradasi Polimer Plastik pada Media Padat

Tween 80 ditambahkan ke dalam media agar yang mengandung HDPE. Kemudian isolat murni diinokulasikan pada media tersebut dengan cara disebar pada bagian tengah media sepanjang 1 cm (Romadhon et al., 2012). Rumus rasio zona bening adalah diameter zona bening dibagi diameter koloni bakteri (Nathania, 2013).

### Persiapan Plastik Uji

Plastik kantong hitam jenis HDPE dipotong-potong dengan ukuran  $5 \times 1$  cm. Setelah pemotongan, sampel plastik disterilisasi dengan direndam menggunakan alkohol 70% selama 30 menit. Selanjutnya, sampel dibilas menggunakan akuades dan dipaparkan sinar UV selama 30 menit. Untuk mengetahui berat kering awal plastik, potongan tersebut dikeringkan di dalam oven pada suhu  $80^\circ C$  selama 12 jam sehingga diperoleh berat murni plastik tanpa kandungan air. Setelah itu, sampel ditimbang untuk mengetahui bobot awalnya (Riandi et al., 2017).

### Uji Degradasi Polimer HDPE

Potongan plastik dimasukkan ke dalam botol akuabides yang berisi 135 mL NB dan ditambahkan lima ose isolat bakteri. Lalu potongan plastik tersebut diinkubasi selama 4 bulan dalam keadaan statis (Rohmah et al., 2019).

### Penentuan Persentase Kehilangan Bobot

Setelah masa inkubasi biodegradasi, potongan plastik diambil menggunakan pinset steril. Lalu biofilm dipisahkan pada plastik dan dimasukkan tabung reaksi yang berisi akuades sebanyak 13 mL. Selanjutnya, campuran dihomogenkan menggunakan vortex selama 30 detik dengan 5 kali ulangan dengan kecepatan 2.000 rpm (Gultom et al., 2017). Plastik yang sudah terpisah dengan biofilm kemudian disterilisasi menggunakan alkohol 70% dan diangin-anginkan. Selanjutnya,

potongan plastik dikeringkan dalam oven suhu 80 °C selama 12 jam. Kemudian potongan itu didinginkan dalam desikator selama 24 jam. Setelah itu, penimbangan berat kering dilakukan (Rohmah et al., 2019). Rumus perhitungan persentase kehilangan berat plastik adalah berat kering awal sebelum degradasi (g) dikurangi berat kering akhir setelah degradasi (g), dibagi dengan berat kering awal sebelum degradasi (g), dan dikali 100% (Riandi et al., 2017)

### Analisis FTIR

Teknik FTIR digunakan untuk menganalisis gugus fungsi dengan perangkat sampling *Smart iTR Attenuated Total Reflectance* (ATR) yang berfungsi menghilangkan preparasi sampel sehingga proses pengujiannya lebih sederhana. Potongan plastik uji diambil menggunakan pinset steril lalu dimasukkan pada perangkat iTR, kemudian dilakukan proses analisis.

## HASIL

### Hasil Pengamatan Bakteri dan Jamur

Berdasarkan data yang diperoleh, beberapa isolat yang terpilih ditinjau dari pengamatan makroskopis (Gambar 2). Pengamatan ini didasarkan atas bentuk, warna, tepian, elevasi, permukaan, dan ukuran koloni (Tabel 1).

**Tabel 1.** Karakteristik morfologi koloni isolat

Kode	Bentuk	Warna	Tepian	Elevasi	Permukaan	Ukuran
A <sub>1</sub> P	Batang	Putih	Rata	Datar	Licin	Sedang
A <sub>2</sub> P	Bulat	Bening	Rata	Timbul	Licin	Sedang
A <sub>3</sub> P	Tidak beraturan	Putih	Berlekuk	Cembung	Licin	Sedang
A <sub>4</sub> P	Batang	Bening	Rata	Datar	Licin	Kecil
A <sub>5</sub> P	Bulat	Putih	Rata	Cembung	Licin	Kecil
A <sub>6</sub> P	Bulat	Bening	Rata	Cembung	Licin	Kecil
A <sub>7</sub> P	Batang	Bening	Bergelombang	Datar	Licin	Kecil
A <sub>8</sub> P	Filamentous	Batang	Filiform	Cembung	Licin	Kecil
A <sub>9</sub> P	Rhizoid	Bening	Filiform	Cekung	Licin	Sedang
A <sub>10</sub> P	Batang	Putih	Gelombang	Datar	Licin	Sedang
A <sub>11</sub> P	Filamentous	Putih	Filiform	Cembung	Halus	Kecil
A <sub>12</sub> P	Tidak beraturan	Putih	Gelombang	Cembung	Licin	Sedang
S <sub>1</sub> A	Bulat	Kuning	Berombak, bercabang	Cembung	Kasar	Sedang
S <sub>2</sub> A	Bulat	Putih	Berombak, bercabang	Cembung	Kasar	Kecil
S <sub>3</sub> A	Bulat	Putih	Berombak, bercabang	Cembung	Kasar	Kecil
S <sub>4</sub> A	Bulat	Putih	Berombak, bercabang	Cembung	Kasar	Kecil
S <sub>5</sub> A	Tidak Beraturan	Putih	Bergelombang	Datar	Halus	Kecil

Keterangan: A<sub>1</sub>P-A<sub>12</sub>P= isolat bakteri; S<sub>1</sub>A-S<sub>5</sub>A= isolat jamur

Skrining bakteri dengan pendekatan morfologi koloni isolat A<sub>1</sub>P, A<sub>3</sub>P, A<sub>4</sub>P, A<sub>7</sub>P, A<sub>8</sub>P, A<sub>9</sub>P, A<sub>10</sub>P, A<sub>11</sub>P, dan A<sub>12</sub>P cenderung menampilkan karakteristik yang mirip dengan genus *Bacillus*. Morfologi isolat A<sub>2</sub>P, A<sub>5</sub>P, dan A<sub>6</sub>P mempunyai kemiripan karakteristik dengan bakteri genus *Pseudomonas* dengan koloni berbentuk kokus atau bulat. Sementara hasil skrining jamur isolat S<sub>1</sub>A memiliki kesamaan dengan genus *Aspergillus*. Sedangkan isolat S<sub>2</sub>A, S<sub>3</sub>A, S<sub>4</sub>A, dan S<sub>5</sub>A mendekati ciri-ciri makroskopis fungsi *Trichoderma* sp.

### Hasil Skrining Degradasi Plastik

Salah satu parameter yang mengidentifikasi isolat bakteri dan jamur mampu mendegradasi plastik yaitu dengan terbentuknya zona bening disekitar media pertumbuhan mikroba. Berdasarkan hasil penelitian, semua isolat menampilkan zona bening pada media yang mengandung polimer plastik (Tabel 2). Berdasarkan hasil uji (Tabel 2), diameter zona bening paling besar ditunjukkan oleh isolat bakteri A<sub>11</sub>P. Diameter yang terbentuk adalah 15,28 mm pada media yang mengandung plastik HDPE.

**Tabel 2.** Diameter zona bening isolat bakteri dan jamur

Kode isolat	Luas diameter (mm)
A <sub>1</sub> P	2,72
A <sub>2</sub> P	10,4
A <sub>3</sub> P	1,50
A <sub>4</sub> P	2,40
A <sub>5</sub> P	0,81
A <sub>6</sub> P	1,65
A <sub>7</sub> P	2,83
A <sub>8</sub> P	3,36
A <sub>9</sub> P	2,61
A <sub>10</sub> P	2,05
A <sub>11</sub> P	15,28
A <sub>12</sub> P	13,50
S <sub>1</sub> A	1,90
S <sub>2</sub> A	1,98
S <sub>3</sub> A	1,49
S <sub>4</sub> A	1,69
S <sub>5</sub> A	1,71

### Hasil Penentuan Berat Kering Plastik Uji

Salah satu metode yang menampilkan data kuantitatif untuk mengetahui plastik telah terdegradasi oleh mikroba yaitu dengan cara menghitung kehilangan massa. Cara untuk mengetahui bobot plastik tersebut berkurang yaitu dapat dilakukan penimbangan bobot plastik sebelum dan setelah degradasi (Tabel 3).

**Tabel 3.** Persentase pengurangan berat kering plastik

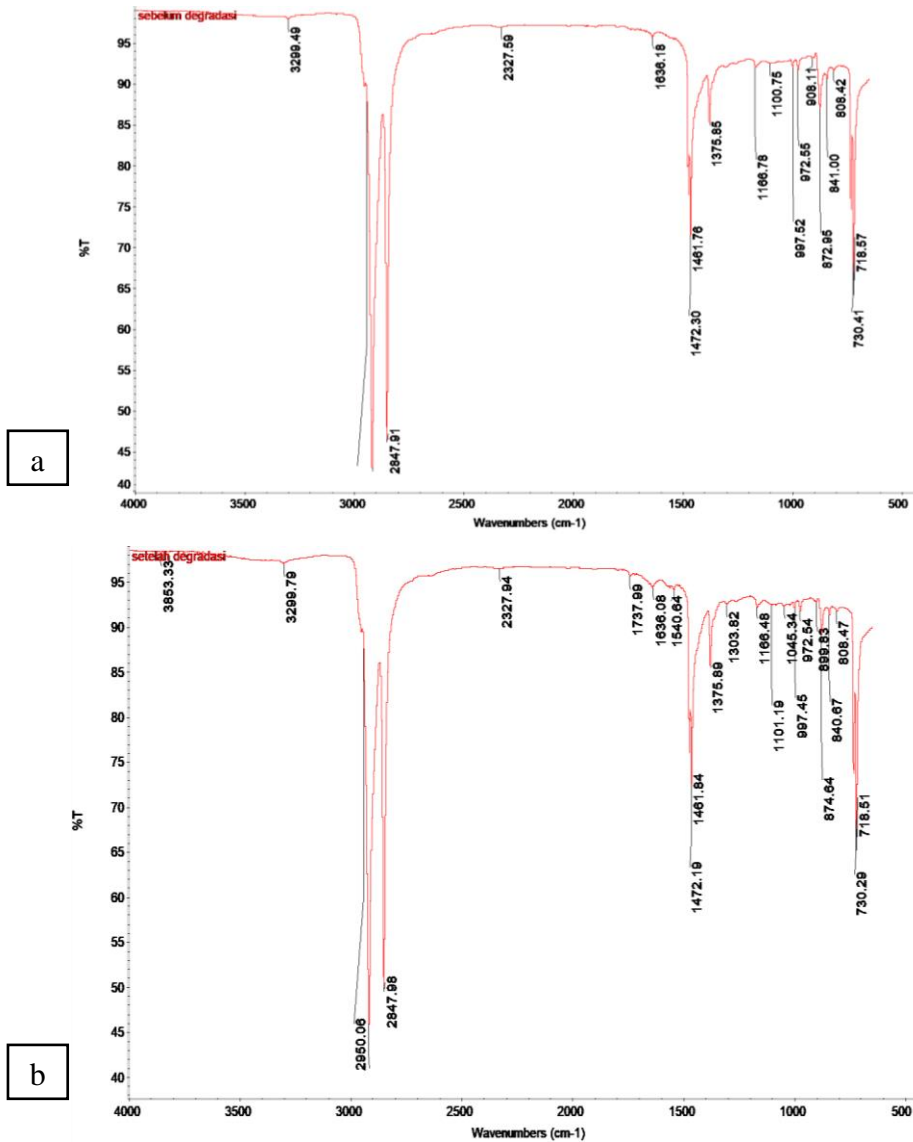
Kode isolat	Persentase (%)
A <sub>1</sub> P	2,8777
A <sub>2</sub> P	3,0075
A <sub>7</sub> P	16,6667
A <sub>8</sub> P	1,6129
A <sub>11</sub> P	3,7879
A <sub>12</sub> P	17,9104
S <sub>1</sub> A	2,2901
S <sub>2</sub> A	1,5385
S <sub>4</sub> A	1,5267
S <sub>5</sub> A	3,7879

### Hasil Analisis FTIR

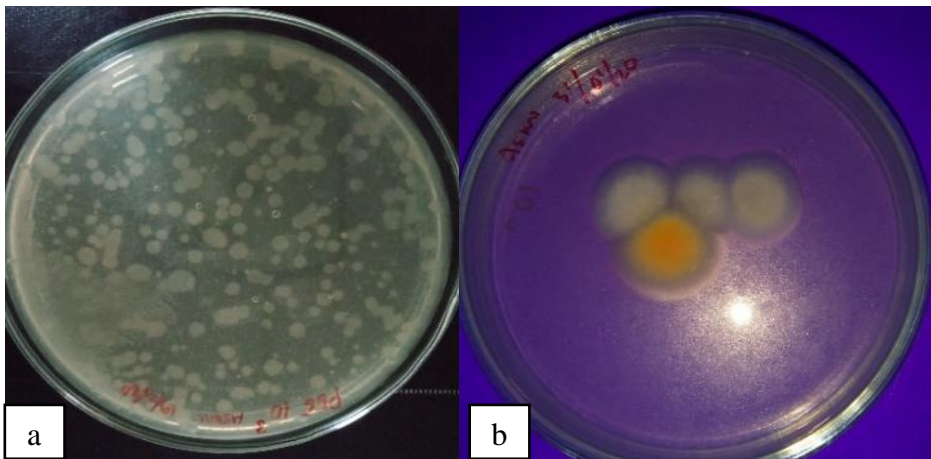
Analisis FTIR dilakukan untuk menganalisis gugus fungsi suatu senyawa. Analisis ini bertujuan untuk melihat kemampuan mikroba dalam melakukan biodegradasi terhadap plastik. Itu terjadi dengan membandingkan spektrum yang ditampilkan sebelum dan setelah biodegradasi. Adanya perubahan bilangan gelombang setelah degradasi plastik uji dapat diasumsikan bahwa terjadinya degradasi oleh mikroba (Gambar 1).

Hasil FTIR sebelum degradasi (Gambar 1a) mencirikan adanya gugus fungsi alkohol pada bilangan gelombang 3297,41 cm<sup>-1</sup>. Bilangan gelombang 2915,60 cm<sup>-1</sup> dan 2848,09 cm<sup>-1</sup> menunjukkan adanya gugus fungsi alkana. Bilangan gelombang 1166,53 cm<sup>-1</sup> mencirikan adanya gugus fungsi alkohol, eter, ester, dan asam karboksilat. Sedangkan bilangan gelombang 872,86 cm<sup>-1</sup> dan 730,39 cm<sup>-1</sup> menandakan adanya gugus fungsi alkena. Sementara itu, hasil FTIR plastik uji setelah degradasi (Gambar 1b), bilangan gelombang 3299,79 cm<sup>-1</sup> menunjukkan adanya gugus fungsi alkohol, gugus fungsi alkana ditandai dengan pembentukan bilangan gelombang 2950,06 cm<sup>-1</sup> dan 2847,98 cm<sup>-1</sup>. Bilangan gelombang 1737,99 cm<sup>-1</sup> mencirikan terdapat gugus fungsi karbonil.

Bilangan gelombang  $1166,48 \text{ cm}^{-1}$  mencirikan adanya gugus fungsi alkohol, eter, ester, dan asam karboksilat, sedangkan gugus fungsi alkena ditandai dengan bilangan gelombang  $874,64 \text{ cm}^{-1}$  dan  $730,29 \text{ cm}^{-1}$ .

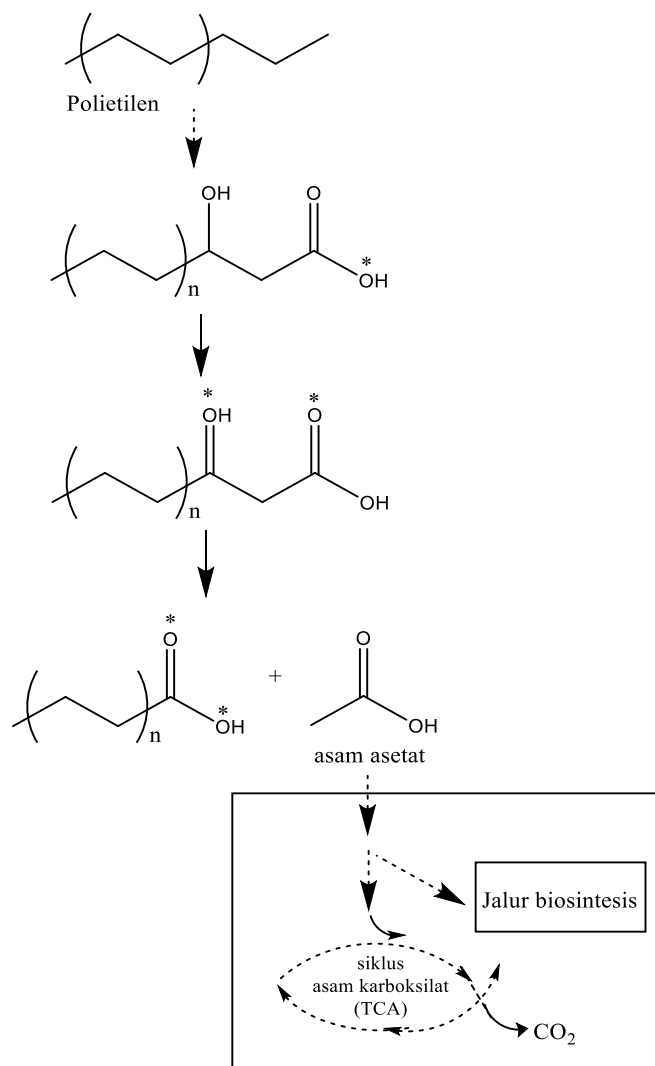


**Gambar 1.** Spektrum FTIR plastik uji, sebelum biodegradasi polimer HDPE (a) dan setelah biodegradasi polimer HDPE selama 4 bulan (b)



**Gambar 2.** Isolat mikroorganismenya, yaitu isolat bakteri (a) dan isolat jamur (b)

Identifikasi mikroorganisme dilakukan secara makroskopis merupakan suatu langkah awal dalam menentukan jenis mikroba tertentu. Isolat atau koloni mikroba tersebut yang ditumbuhkan pada media selektif dapat dilihat pada Gambar 2. Gambar 3 merupakan mekanisme reaksi biodegradasi polietilen. Mekanisme tersebut melibatkan beberapa langkah yaitu oksidasi, dehidrogenasi dan pemutusan ikatan karbon sehingga menghasilkan asam asetat kemudian dilanjutkan ke dalam siklus asam sitrat. Tanda panah putus-putus menunjukkan terjadi lebih dari satu reaksi selama proses degradasi. Sementara tanda bintang menunjukkan penambahan gugus fungsi baru selama proses enzimatik berlangsung.



**Gambar 3.** Mekanisme reaksi polietilen (Wilkes & Aristilde, 2017)

## PEMBAHASAN

### Isolat Mikroorganisme

Berdasarkan hasil pengamatan pada morfologi koloni (Gambar 2), isolat mikroorganisme diperkirakan identitasnya. Karakteristik yang tampak meliputi morfologi, fisiologis, dan biokimia. Identifikasi mikroorganisme dengan pengamatan morfologi menjadi indikasi awal yang dilakukan untuk mengamati morfologi sel seperti pembentukan askospora, reproduksi aseksual, bentuk, ukuran koloni, warna, dan respon pertumbuhan pada media (Jumiyati et al., 2012).

Hasil karakterisasi morfologi mikroorganisme secara makroskopis terdapat 12 isolat yang diperoleh. Isolat kode A<sub>1</sub>P-A<sub>12</sub>P mencirikan bakteri dan 5 isolat kode S<sub>1</sub>A-S<sub>5</sub>A menunjukkan jamur ditinjau dari bentuk, warna, permukaan, tepi, koloni, dan elevasi. Semua isolat yang dihasilkan mengalami perbedaan baik dari segi bentuk, warna, ukuran, dan sebagainya. Hal ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan bahwa adanya perbedaan pada isolat yang dihasilkan dari proses

isolasi disebabkan oleh media yang menjadi tempat tumbuh bakteri tersebut dan kandungan nutrisi yang terdapat pada media sehingga memengaruhi pertumbuhan bakteri (Gultom et al., 2017).

Berdasarkan Tabel 1 mengenai morfologi bakteri terdapat beberapa kesamaan isolat bakteri satu dengan lainnya. Isolat A<sub>1</sub>P dan A<sub>4</sub>P berbentuk basil, warna koloni putih, elevasi datar, tepi koloni rata dengan permukaan licin. Morfologi isolat yang juga memiliki kemiripan ditunjukkan pada isolat A<sub>3</sub>P dengan A<sub>12</sub>P. Isolat tersebut memiliki bentuk koloni tidak beraturan, warna putih, elevasi cembung, dan permukaan yang licin. Isolat A<sub>5</sub>P dan A<sub>6</sub>P juga menunjukkan kemiripan isolat dengan tepi rata, bentuk koloni bulat, permukaan licin, dan elevasi yang cembung. Kemiripan morfologi koloni bakteri juga ditampilkan pada isolat bakteri A<sub>7</sub>P dan A<sub>10</sub>P yang memiliki bentuk koloni batang, tepi bergelombang, elevasi datar, dan permukaan koloni licin. Isolat A<sub>8</sub>P dan A<sub>11</sub>P memiliki koloni yang mirip dengan bentuk filamen atau menyerupai benang-benang, elevasi cembung, permukaan licin, dan tepi *filiform* (berbentuk benang-benang halus). Sementara itu, isolat jamur berdasarkan karakteristik morfologinya, sebagian besar isolat berwarna putih, bentuk bulat, tepi berombak, dan bercabang serta permukaan kasar.

Hasil pengamatan morfologi memperlihatkan kebanyakan isolat bakteri berbentuk bulat dan berwarna putih susu. Pada penelitian ini, terdapat beberapa isolat yang memungkinkannya berada dalam satu famili (Yekki, 2011). Pengamatan bakteri dengan pendekatan morfologi koloni isolat A<sub>1</sub>P, A<sub>3</sub>P, A<sub>4</sub>P, A<sub>7</sub>P, A<sub>8</sub>P, A<sub>9</sub>P, A<sub>10</sub>P, A<sub>11</sub>P, dan A<sub>12</sub>P cenderung menampilkan karakteristik berwarna putih, berbentuk bulat, dan tidak beraturan. Menurut Puspita et al. (2017), *Bacillus* sp. memiliki ciri umum, yaitu berwarna krem keputihan, serta bentuk koloni yang bulat, dan tidak beraturan. *Bacillus* berbentuk batang pendek dan batang tunggal, bakteri jenis itu juga termasuk jenis bakteri Gram positif. Berdasarkan penelitian lainnya, bakteri *Bacillus* memiliki warna putih pucat, elevasi datar, tidak berlendir, dan bentuk basil pendek (Diarti et al., 2017). Karakteristik lain *Bacillus* adalah bersifat motil, membutuhkan oksigen, dan katalase positif. Hasil ini didukung oleh studi yang menyatakan bahwa ciri-ciri bakteri *B. subtilis* berbentuk basil, uniseluler, Gram positif, bersifat aerob, dan memiliki endospora (Puspita et al., 2017). Bakteri *Bacillus* termasuk bakteri Gram positif yang menunjukkan warna ungu disebabkan dapat mempertahankan warna kristal violet meskipun diberikan larutan alkohol (Yekki, 2011). Beberapa enzim yang dapat dihasilkan oleh bakteri *Bacillus* adalah enzim amilase, lakase,  $\alpha$ -glukanase,  $\beta$ -levansukrase, xilanase, kitinase, dan protease (Djaenuddin & Muis, 2015).

Morfologi isolat A<sub>2</sub>P, A<sub>5</sub>P, dan A<sub>6</sub>P mempunyai kemiripan karakteristik dengan bakteri genus *Pseudomonas* dengan koloni berbentuk kokus atau bulat. Hasil ini sesuai dengan suatu penelitian bahwa morfologi *Pseudomonas* memiliki koloni bundar, berwarna putih kekuning-kuningan, sel berbentuk batang, termasuk bakteri Gram negatif, dan mampu memfermentasikan karbohidrat seperti glukosa, sukrosa, dan laktosa (Praja & Yudhana, 2018). *Pseudomonas* merupakan bakteri berbentuk batang atau bulat, bersifat motil karena memiliki flagel sebagai alat gerak, suhu pertumbuhan optimum 4 °C atau di bawah 43 °C dan tumbuh dengan baik pada pH 5,3–9,7. Bakteri Gram negatif ini akan menampilkan warna merah yang larut dalam alkohol saat pewarnaan Gram. Adanya perbedaan warna dalam uji pewarnaan Gram pada bakteri Gram negatif dipengaruhi oleh perbedaan struktur dinding selnya (Hidayati, 2009). Enzim yang dihasilkan oleh bakteri *Pseudomonas* di antaranya *cutinase* dan lipase (Danso et al., 2019), serta enzim protease, dan amilase (Suyono & Salahudin, 2011).

Sementara itu, semua isolat fungi tampak memiliki hifa yang halus. Berdasarkan pengamatan makroskopis, isolat S<sub>1</sub>A berwarna kuning, memiliki hifa yang halus, dan berbentuk bundar. Karakteristik morfologi ini cenderung memiliki kesamaan dengan genus *Aspergillus*. Hasil penelitian ini memiliki kesamaan dengan hasil penelitian yang telah ada, *Aspergillus* memiliki ciri utama yaitu berwarna kuning, hijau kekuningan, berbentuk bundar atau elips, memiliki konidiofor, konida satu sel yang berbentuk elips atau bulat (Akmalasari et al., 2013). Karakteristik morfologi tersebut yaitu koloni berwarna hijau kekuningan dan koloni yang berusia muda berwarna putih, diameter 50–80 mm, miselium berwarna putih, dan permukaan kasar (Oramahi et al., 2006). Secara



makroskopis, *Aspergillus* tampak mempunyai konidiospora atau tangkai kondida, berbentuk bulat berwarna hijau kebiruan (Praja & Yudhana, 2018).

Isolat S<sub>2</sub>A, S<sub>3</sub>A, S<sub>4</sub>A, dan S<sub>5</sub>A pada inkubasi hari ke-7 tampak jelas memiliki bentuk koloni bundar, berwarna putih, dan memiliki permukaan kasar. Hasil karakteristik morfologi yang diperoleh mendekati ciri-ciri makroskopis fungi *Trichoderma* sp. Sebuah laporan menyebutkan bahwa pengamatan makroskopis *Trichoderma* sp. berbentuk bundar, permukaan kasar, dan tepi halus. Selain itu, koloni yang mula-mula berwarna putih lalu berubah warna menjadi hijau muda kemudian menjadi warna hijau tua berbentuk lingkaran yang memiliki batas jelas, sementara sisi pinggir menyerupai kapas berwarna putih (Zulaika et al., 2017). Koloni jamur tersebut awalnya berwarna putih lalu hijau kekuningan, berbentuk bulat, bentuk konidiofor tegak, dan bercabang serta permukaan lembut (Gusnawaty et al., 2014).

### **Skrining Degradasi Plastik**

Skrining bakteri dengan parameter zona bening bertujuan untuk menguji kemampuan pertumbuhan bakteri dalam mendegradasi plastik. Menurut suatu studi, bakteri yang mampu mendegradasi plastik ditandai dengan ciri timbul zona bening di sekitar bakteri pada media yang mengandung polimer plastik (Devi et al., 2019). Timbulnya zona bening tersebut karena bakteri memanfaatkan polimer tersebut sebagai sumber karbon untuk memenuhi kebutuhan nutrisi dalam proses metabolisme (Riandi et al., 2017). Laju pembentukan zona bening atau penguraian polimer plastik dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti sekresi enzim, aktivitas enzim, laju pertumbuhan, dan difusi enzim ke media agar. Selain itu, sifat kimia yang dimiliki polimer juga dapat memengaruhi proses degradasi plastik seperti komposisi monomer dan konsentrasi bahan agar sebagai bahan pengeras pada media yang dapat membantu proses penguraian jika jumlahnya lebih dari 3% (Nathania, 2013).

Berdasarkan hasil penelitian, semua isolat menampilkan zona bening pada media yang mengandung polimer plastik. Diameter zona bening paling tinggi ditunjukkan oleh isolat bakteri A<sub>11</sub>P sebesar 15,28 mm. Perbandingan nilai rasio zona bening yang besar menunjukkan bahwa semakin banyak enzim yang disekresikan semakin besar pula kemampuan bakteri dalam mendegradasi polimer plastik (Nathania, 2013). Enzim berasal dari hasil sekresi mikroorganisme, yang bisa berupa enzim pengkatalisis reaksi hidrolisis dengan molekul yang bukan enzim yang diperoleh dari mikroorganisme itu sendiri ataupun dari lingkungan. Ketika proses degradasi berlangsung, sekresi berupa ekso-enzim akan memecah polimer kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana sehingga senyawa tersebut dapat terserap oleh membran mikroba untuk dijadikan sebagai sumber energi (Riandi et al., 2017).

### **Pengurangan Berat Plastik Uji**

Penelitian ini membutuhkan waktu inkubasi degradasi selama 4 bulan dan dilakukan secara duplo. Hasil yang diperoleh adalah isolat yang memiliki potensi paling besar dalam mendegradasi plastik ditunjukkan oleh isolat A<sub>12</sub>P dengan kehilangan berat kering plastik sebesar 17,9104%. Fadlilah dan Shovitri (2014) melaporkan bahwa isolat bakteri murni mampu mendegradasi lembar HDPE dan LDPE selama 120 hari masing-masing sebesar  $18,4 \pm 3\%$  dan  $15,5-19,3 \pm 2\%$  (Skariyachan et al., 2017). Hal ini sejalan dengan hasil yang diperoleh pada studi ini. Enam persen kehilangan berat plastik hitam selama 4 bulan masa degradasi dengan memanfaatkan bakteri *Bacillus*. Penelitian lain menyebutkan bahwa 8% nilai persentase penurunan berat plastik pada minggu ke-12 yang diinkubasi bersama bakteri *Bacillus* selama 4 bulan (Marjayandari, 2015).

Berdasarkan hasil biodegradasi yang diperoleh, isolat pada penelitian ini diasumsikan memiliki kemampuan dalam mendegradasi plastik. Selama pertumbuhannya, mikroba memanfaatkan sumber karbon yang ada pada plastik uji dalam proses metabolisme untuk menghasilkan energi. Kandungan lain seperti garam-garam mineral pada media pertumbuhan bakteri dalam mendegradasi polietilen digunakan sebagai penerima elektron dalam kondisi anaerob (Firdaus et al., 2019). Menurut Fadlilah dan Shovitri (2014), bakteri *Bacillus* bersifat *facultative*

*aerobic* sehingga isolat ini memungkinkan mengalami pertumbuhan secara cepat karena bakteri itu memiliki lingkungan tumbuh yang lebih luas.

Menurut Agustien et al. (2016), bakteri yang tumbuh pada media yang mengandung sumber nitrogen dan plastik uji memanfaatkan unsur karbon dari plastik uji tersebut dalam proses metabolismenya sehingga terjadi penurunan berat plastik uji. Selain itu, pada media juga mengalami perubahan warna yang disebabkan oleh reaksi antara substrat dan bakteri. Reaksi itu menghasilkan pigmen yang dapat membentuk gugus kromofor (Riandi et al., 2017). Menurut Hasanah dan Shovitri (2015), mikroba dapat beradaptasi terhadap perubahan ekstrem dari lingkungan yang optimum. Perubahan ekstrem tersebut mengakibatkan kondisi mencekam bagi mikroba. Besar atau kecilnya perubahan yang terjadi dapat membuat mikroba bisa bertahan hidup, berhenti melakukan pertumbuhan, atau bahkan dapat meningkatkan fase lag. Sebagian besar mikroba dapat dibuat toleran pada kondisi yang ekstrem sampai batas waktu maksimum apabila selnya memiliki kemampuan untuk tumbuh pada kondisi minimum. Kondisi bakteri yang tercekam oleh nutrisi cenderung membentuk lapisan biofilm. Adanya biofilm mengakibatkan mikroorganisme menghasilkan energi selama kekurangan nutrisi terjadi. Pembentukan biofilm kerap terjadi pada pertumbuhan bakteri untuk mendegradasi plastik. Munculnya biofilm termasuk salah-satu faktor meningkatkan biodegradasi (Fadlilah & Shovitri, 2014).

Penurunan berat uji plastik selama waktu inkubasi oleh bakteri disebabkan karena adanya enzim yang dihasilkan bakteri tersebut. Enzim itu menempel pada permukaan plastik uji kemudian mengalami proses hidrolisis yang dapat mengikis permukaan polimer sehingga terjadi kehilangan berat polimer dan penurunan persentase berat kering plastik uji (Zusfahair et al., 2007). Enzim yang membantu proses biodegradasi di antaranya enzim *cutinase* dan lakase. Enzim *cutinase* bertindak menghidrolisis ikatan hidrokarbon pada berbagai jenis poliester, termasuk polioksietilena tereftalat (Haernvall et al., 2017). Enzim lakase dapat membantu dalam oksidasi ikatan hidrokarbon pada polietilen (Octavianda et al., 2016). Selain itu, juga terdapat enzim lipase yang dapat membantu proses degradasi yang mana enzim tersebut dihasilkan oleh bakteri *Pseudomonas*. Lipase berguna dalam memecah ikatan hidrolisis ester asam lemak gliserol. Enzim ini berperan dalam melarutkan substrat yang tidak larut dalam air tetapi dapat larut dalam pelarut organik. Enzim itu dapat menghidrolisis secara acak semua ikatan gliserida yang tersusun dari asam lemak dan gliserol. Di samping itu, enzim tersebut dapat memutuskan ikatan poliester yang mana awalnya akan menghidrolisis permukaan polimer sehingga membentuk kompleks enzim dengan substrat (Nathania, 2013). Mekanisme degradasi polietilen oleh mikroba dapat dilihat pada Gambar 3.

### Gugus-Gugus Fungsi pada Plastik yang Didegradasi

Perubahan bilangan gelombang sebelum dan sesudah biodegradasi dapat mengindikasikan bahwa isolat yang diperoleh memiliki kemampuan dalam mendegradasi plastik uji. Munculnya bilangan gelombang baru, yaitu  $1737,99\text{ cm}^{-1}$  mencirikan terdapat gugus fungsi C=O dan peningkatan keton serta ikatan rangkap memberikan bukti adanya polietilen. Pembentukan keton merupakan produk antara dari biodegradasi polietilen.

Hasil penelitian ini mengkonfirmasi adanya gugus karbonil (C=O) dengan intensitas rendah setelah biodegradasi. Gugus C=O yang terbentuk setelah biodegradasi menunjukkan terjadinya reaksi oksidasi (Gambar 3). Munculnya gugus fungsi karbonil dan eter menyebabkan berbagai ikatan baru yang memungkinkan terjadinya reaksi oksidasi polietilen. Gugus karbonil tersebut menjadi indikasi bahwa terjadi biodegradasi oleh kinerja enzim pada mikroba selama masa degradasi yang melemahkan ikatan pada struktur PE. Adanya gugus fungsi C-H disebabkan oleh vibrasi pada rantai panjang polietilen (Mehmood et al., 2016). Penelitian lain menyebutkan bahwa bilangan gelombang  $1700\text{--}1800\text{ cm}^{-1}$  pada spektrum FTIR menunjukkan adanya gugus teroksidasi. Keton dan ester dinyatakan sebagai produk utama enzim oksidoreduktase (Devi et al., 2019). Polietilen (PE) yang teroksidasi akan dihidrolisis oleh enzim ekstraseluler menjadi asam lemak yang selanjutnya dimetabolisme oleh  $\beta$ -oksidasi (Awasthi et al., 2017). Hal ini sesuai dengan pernyataan bahwa karbonil dan eter pada film PE yang diinkubasi dengan isolat D<sub>1</sub> membuktikan terjadinya reaksi oksidasi. Hal ini membuktikan bahwa oksidasi PE meningkatkan hidrofilisitas dan

pada akhirnya memungkinkan terjadinya biodegradasi PE (Balasubramanian et al., 2010). Laporan lain menyebutkan bahwa spektrum HDPE yang didegradasi oleh bakteri *Klebsiella pneumonia* menampilkan puncak  $1765\text{ cm}^{-1}$  menunjukkan terdapat gugus fungsi karbonil. Bakteri tersebut mengalami oksidasi dan memanfaatkan enzim yang dimiliki selama masa degradasi. Degradasi asam karboksilat oleh *K. pneumonia* ini menghasilkan senyawa alkana menunjukkan pembelahan rantai polimer menghasilkan radikal karbonil yang dapat bereaksi pada rantai polietilen sehingga rantai panjang HDPE dapat dipotong menjadi potongan-potongan yang lebih kecil (Awasthi et al., 2017). Adanya gugus -OH mencirikan kehadiran gugus hidroksil yang menunjukkan bahwa telah terjadi aktivitas enzim oleh mikroba yang memengaruhi degradasi sehingga dapat diindikasikan degradasi berlangsung (Rohmah et al., 2019).

## SIMPULAN DAN SARAN

Potensi terbesar mikroorganisme yang diisolasi dari tanah tempat pembuangan sampah akhir dalam mendegradasi HDPE ditunjukkan oleh isolat A<sub>12</sub>P dengan persentase 17,9104%. Karakteristik morfologi isolat tersebut adalah memiliki bentuk koloni tidak beraturan, berwarna putih, elevasi cembung, dan permukaan yang licin. Saran untuk peneliti selanjutnya sebaiknya menentukan waktu optimasi degradasi HDPE dan pengukuran densitas bakteri pada biofilm untuk mengetahui fase optimum pertumbuhan mikroba selama degradasi berlangsung.

## REFERENSI

- Agustien, A., Jannah, M., & Djamaan, A. (2016). Screening polyethylene synthetic plastic degrading-bacteria from soil. *Der Pharmacia Lettre*, 8(7), 183-187.
- Akmalasari, I., Purwati, E., & Dewi, R. (2013). Isolasi dan identifikasi jamur endofit tanaman manggis (*Garcinia mangostana* L). *Biosfera*, 30(2), 82-89.
- Asmita, K., Shubhamsingh, T., & Tejashree, S. (2015). Isolation of plastic degrading microorganisms from soil samples collected at various locations in Mumbai India. *International Research Journal of Environment Sciences*, 4(3), 77-85.
- Awasthi, S., Srivastava, P., & Singh, P. (2017). Biodegradation of thermally treated high-density polyethylene (HDPE) by *Klebsiella pneumoniae* CH001. *3 Biotech*, 7(5), 1-10. doi: 10.1007/s13205-017-0959-3.
- Balasubramanian, V., Natarajan, K., Hemambika, B., Ramesh, N., Sumathi, C. S., Kottaimuthu, R., & Rajesh, K. V. (2010). High-density polyethylene (hdpe)-degrading potential bacteria from marine ecosystem of Gulf of Mannar, India. *Letters in Applied Microbiology*, 51(2), 205-211. doi: 10.1111/j.1472-765X.2010.02883.
- Danso, D., Chow, J., & Streita, W. R. (2019). Plastics: Environmental and biotechnological perspectives on microbial degradation. *Applied and Environmental Microbiology*, 85(19), 1-14. doi: 10.1128/AEM.01095-19.
- Devi, R. S., Ramya, R., Kannan, K., Antony, A. R., & Kannan, V. R. (2019). Investigasi potensi biodegradasi high density polyethylene merendahkan bakteri laut diisolasi dari daerah pesisir Tamil Nadu India. *Marine Pollution Bulletin*, 138, 549-560. doi: 10.1016/j.marpolbul.2018.12.001.
- Diarti, M., Yuri, S., & Yunan, J. (2017). Karakteristik morfologi, koloni dan biokimia bakteri yang diisolasi dari sedimen laguna perindukan nyamuk. *Jurnal Kesehatan Prima*, 11(2), 124-136.
- Djaenuddin, N., & Muis, A. (2015). *Karakteristik bakteri antagonis Bacillus subtilis dan potensinya sebagai agens pengendali hayati penyakit tanaman*. Paper presented at the Prosiding Seminar Nasional Serealia, Indonesia, Retrieved from <http://balitsereal.litbang.pertanian.go.id/wp-content/uploads/2018/01/15hp60.pdf>.
- Fadlilah, M., & Shovitri, M. (2014). Potensi isolat bakteri *Bacillus* dalam mendegradasi plastik dengan metode kolom winogradsky. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 3(2). doi: 10.12962/j23373520.v3i2.6730.
- Firdaus, D. I., Kuala, T. P. A., & Rasau, D. U. A. (2019). Skrining bakteri berpotensi pendegradasi polietilen oxo-degradable dari tanah gambut. *Protobiont*, 8, 1-5. doi: 10.26418/protobiont.v8i3.36680.

- Gultom, E. S., Nasution, M. Y., & Aprida, A. (2017). Seleksi bakteri pendegradasi plastik dari tanah. *Jurnal Generasi Kampus*, 10(2), 169-179.
- Gusnawaty, H., Taufik, M., Triana, L., & Asniah, D. A. N. (2014). Karakterisasi morfologis *Trichoderma* spp. indigenus Sulawesi Tenggara morphological characterization *Trichoderma* spp. *Indigenous Southeast of Sulawesi*, 4(2), 87-93.
- Haernvall, K., Zitzenbacher, S., Wallig, Z., Yamamoto, M., Schick, M., D, R., & Guebitz, G. (2017). Hydrolysis of ionic phthalic acid based polyesters by wastewater microorganisms and their enzymes. *Environmental Science & Technology*, 51, 4596-4605. doi: 10.1021/acs.est.7b00062.
- Hasanah, N, U., & Shovitri, M. (2015). Potensi mikroorganisme air sampah mangrove untuk mendegradasi plastik hitam. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 4(2), 45-49.
- Hidayati, D. Y. (2009). Vein endothelial cells (Huvecs) culture the influence of *Pseudomonas aeruginosa* induction to the human umbilical vein endothelial cells (HUVECs) culture. *Jurnal Ilmiah Perikanan Dan Kelautan*, 1(1), 1-6.
- Jumiyati., Bintari, S. H., & Ibnu, M. (2012). Isolasi dan identifikasi khamir secara morfologi di Tanah Kebun Wisata Pendidikan Universitas Negeri Semarang. *Biosaintifika: Journal of Biology & Biology Education*, 4(1). doi: 10.15294/biosaintifika.v4i1.2265.
- Marjayandari, L. (2015). Potensi bakteri *Bacillus* sp. dalam mendegradasi plastik. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 4(2), 2-5.
- Mehmood, C. T., Qazi, I. A., Hashmi, I., Bhargava, S., & Deepa, S. (2016). Biodegradation of low density polyethylene (LDPE) modified with dye sensitized titania and starch blend using *Stenotrophomonas pavanii*. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 113, 276-286. doi: 10.1016/j.ibiod.2016.01.025.
- Munir, E., Harefa, R. S. M., Priyani, N., & Suryanto, D. (2019). Plastic degrading fungi *Trichoderma viride* and *Aspergillus nomius* isolated from local landfill soil in Medan. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 112-145.
- Nathania, H. B. (2013). *Studi potensi isolat kapang Wonorejo Surabaya dalam mendegradasi polimer bioplastik poly*, 2(2), 1-11.
- Octavianda, T., Asri., & Lisdiana, L. (2016). Potensi isolat bakteri pendegradasi kenis plastik polietilen oxo-degradable dari tanah TPA Benowo Surabaya. *Lentera Bio*, 5(1), 32-35.
- Oramahi, H. A., Sumardiyono., Christanti, P. N., & Haryadi, H. (2006). Identifikasi jamur genus *Aspergillus* pada gaplek di Kabupaten Gunung Kidul. *Jurnal Perlindungan Tanaman Indonesia*, 12(1), 25-32. doi: 10.22146/jpti.11959.
- Praja, R. N., & Yudhana, A. (2018). Isolasi dan identifikasi *Aspergillus* spp. pada paru-paru ayam kampung yang dijual di Pasar Banyuwangi. *Jurnal Medik Veteriner*, 1(1), 6. doi: 10.20473/jmv.vol1.iss1.2017.6-11.
- Puspita, E., Muhammad, A., & Ridho, P. (2017). Isolasi dan karakterisasi morfologi dan fisiologi bakteri *Bacillus* sp. endofitik dari tanaman kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Jurnal Agrotek Tropika*, 6(2), 44-49.
- 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 (ldpe). *Simbiosis Journal of Biological Sciences*, 5(2), 58. doi: 10.24843/JSIMBIOSIS.2017.v05.i02.p05.
- Rohmah, U. M., Shovitri, M., & Kuswytasari, 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), 5-10. doi: 10.12962/j23373520.v7i2.37207.
- Romadhon, R., Subagiyo, S., & Margino, S. (2012). Isolasi dan karakterisasi bakteri asam laktat dari usus udang penghasil bakteriosin sebagai agen antibakteria pada produk-produk hasil perikanan. *Jurnal Saintek Perikanan*, 8(1), 59-64.
- Skariyachan, S., Setlur, A. S., Naik, S. Y., Naik, A. A., Usharani, M., & Vasist, K. S. (2017). Enhanced biodegradation of low and high-density polyethylene by novel bacterial consortia

- formulated from plastic-contaminated cow dung under thermophilic conditions. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(9), 8443-8457. doi: 10.1007/s11356-017-8537-0.
- Sriningsih, A., & Maya, S. (2015). Potensi isolat bakteri *Pseudomonas* sebagai pendegradasi plastik. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 4(2), 67-70.
- Suyono, Y., & Salahudin, F. (2011). *Pseudomonas* pada tanah yang terindikasi kontaminasi logam. *Jurnal Biopropal Industri*, 01, 8-13.
- 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*, 123, 582-593.
- Yekki, F. (2011). Isolation and observation of morphology of chitinolytic bacteria colony. *Jurnal Ilmiah Pendidikan Biologi, Biologi Edukasi*, 3(2), 20-25.
- Zulaika, A., Soesilo, T. E. B., & Noriko, N. (2017). Penentuan potensi kemampuan *Trichoderma* sp. dalam proses degradasi sampah plastik rumah tangga. Paper presented at the Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah XV, Indonesia. Retrieved from [http://repo-nkm.batan.go.id/6497/1/PROSIDING\\_AIDA%20Z\\_UI\\_2017.pdf](http://repo-nkm.batan.go.id/6497/1/PROSIDING_AIDA%20Z_UI_2017.pdf).
- Zusfahair, Z., Lestari, P., & Riana, N. D. Widyarningsih, S. (2007). Biodegradasi polietilena menggunakan bakteri dari tpa (tempat pembuangan akhir) Gunung Tugel Kabupaten Banyumas. *Molekul*, 2(2), 98. doi: 10.20884/1.jm.2007.2.2.39.

