

**UJI BIODEGRADASI POLYETHYLENE TEREPHTHALATE (PET)  
OLEH *Bacillus subtilis* DAN *Aspergillus niger***

**SKRIPSI**

**Oleh:  
NUR AHMAD MAHMUDI  
NIM. 18630092**



**PROGRAM STUDI KIMIA  
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI  
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM  
MALANG  
2023**

**UJI BIODEGRADASI POLYETHYLENE TEREPHTHALATE (PET)  
OLEH *Bacillus subtilis* DAN *Aspergillus niger***

**SKRIPSI**

**Oleh:  
NUR AHMAD MAHMUDI  
NIM. 18630092**

**Diajukan Kepada:  
Fakultas Sains dan Teknologi  
Universitas Islam Negeri (UIN) Maulana Malik Ibrahim Malang  
Untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan dalam Memperoleh Gelar Sarjana  
Sains (S.Si)**

**PROGRAM STUDI KIMIA  
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI  
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM  
MALANG  
2023**

UJI BIODEGRADASI POLYETHYLENE TEREPHTHALATE (PET)  
OLEH *Bacillus subtilis* DAN *Aspergillus niger*

SKRIPSI

Oleh:  
NUR AHMAD MAHMUDI  
NIM. 18630092

Telah Diperiksa dan Disetujui untuk Diuji  
Tanggal: 28 November 2023

Pembimbing I



Dr. Akyunul Jannah, S.Si. M.P  
NIP. 19750410200501 2 009

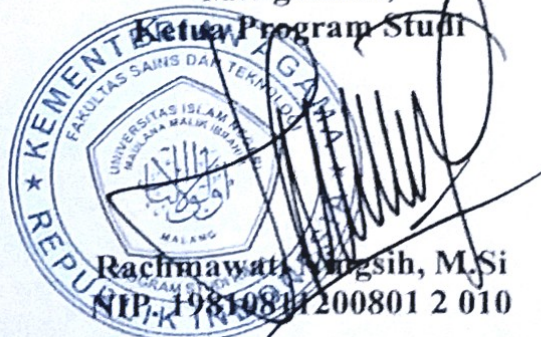
Pembimbing II



Lulu'atul Hamidatu Ulya, M.Sc  
NIP. 19900906202321 2 033

Mengetahui,

Ketua Program Studi




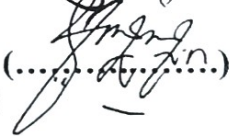

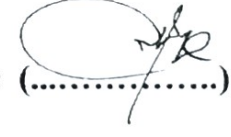
Rachmawati Mingsih, M.Si  
NIP. 19810811200801 2 010

**UJI BIODEGRADASI POLIETHYLENE TEREPHTHALATE (PET)  
OLEH *Bacillus subtilis* DAN *Aspergillus niger***

**SKRIPSI**

**Oleh:  
NUR AHMAD MAHMUDI  
NIM. 18630092**

**Telah Dipertahankan di Depan Dewan Penguji Skripsi  
dan Dinyatakan Diterima Sebagai Salah Satu Persyaratan untuk  
Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)  
Tanggal: 28 November 2023**

<b>Penguji Utama</b>	<b>: Rachmawati Ningsih, M.S NIP. 19810811 200801 2 010</b>	
<b>Ketua Penguji</b>	<b>: Dr. Anik Maunatin, S.T., M.P NIDT. 19760105 20180201 2 248</b>	
<b>Sekretaris Penguji</b>	<b>: Dr. Akyunul Jannah, S.Si, M.P NIP. 19750410 200501 2 009</b>	
<b>Anggota Penguji</b>	<b>: Lulu'atul Hamidatu Ulya, M.Sc NIP. 19900906 202321 2 033</b>	

**Mengesahkan,  
Ketua Program Studi**



**Rachmawati Ningsih, M.Si  
NIP. 19810811 200801 2 010**



## PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Nur Ahmad Mahmudi  
NIM : 18630092  
Program Studi : Kimia  
Fakultas : Sains dan Teknologi  
Judul Penelitian : Uji Biodegradasi Polyethylene Terephthalate  
(PET) Oleh *Bacillus subtilis* dan *Aspergillus niger*

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa skripsi yang saya tulis ini adalah benar-benar hasil karya sendiri, bukan merupakan pengambil alihan data, tulisan atau pikiran orang lain yang saya akui sebagai tulisan atau pikiran saya sendiri, kecuali dengan mencantumkan sumber cuplikan pada daftar pustaka. Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan skripsi ini hasil jiplakan maka saya bersedia menerima sanksi perbuatan tersebut.

Malang, 28 November 2023  
Yang Membuat Pernyataan,



Nur Ahmad Mahmudi  
NIM. 18630092

## HALAMAN PERSEMBAHAN

الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ

*Alhamdulillahil'alaamiin*

Puji syukur kehadiran Allah Swt. yang telah melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya. Tak lupa Selawat dan salam semoga tetap terlimpahkan kepada Nabi Muhammad saw.

*“Pertolongan itu ada di mana-mana, selama kita sabar dan ikhlas menghadapi ujian-Nya, pasti Dia tak akan diam, akan mengirim malaikat penolong dalam wujud yang tidak pernah kita sangka”*

\*\*\*

Atas dasar itulah penulis mendedikasikan karya ini untuk malaikat-malaikat penolong yang hadir di hidup penulis.

Karya ilmiah ini, penulis persembahkan kepada orang-orang tercinta dan tersayang yaitu kedua orangtua penulis Bapak Ali Asikin dan Ibu Suwarni, serta kakak penulis, Amanatul Jannah atas segala do'a dan semangat yang diberikan kepada penulis selama penyelesaian tugas akhir ini.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Ibu Dr. Akyunul Jannah, S.Si, M.P; Ibu Dewi Yuliani, M.Si; Ibu Lulu'atul Hamidatu Ulya, M.Sc; Ibu Rachmawati Ningsih, M.Si; Ibu Dr. Anik Maunatin, M.P; serta kepada seluruh Bapak Ibu dosen dan laboran Prodi Kimia atas segala ilmu yang telah diberikan.

Terima kasih penulis ucapkan kepada Ibu Sri Poncowati, serta teman-teman dan rekan-rekan lab. biokimia yang memberikan dukungan dan semangat selama penyelesaian tugas akhir ini.

## MOTTO

“Kalau kamu berhenti dari sekarang, tidak ada orang yang akan memandang kamu. Kamu pun tidak akan percaya diri. Tenang saja, Allah Swt. akan membantu dan berada disamping kamu. Karena kekurangan, kamu mungkin tidak seperti orang kebanyakan. Tetapi karena kamu punya kekurangan, Allah Swt. pun pasti memberi lebih”

\*\*\*

فَاصْبِرْ إِنَّ وَعْدَ اللَّهِ حَقٌّ

*“Maka, bersabarlah kamu. Sesungguhnya janji Allah itu benar.”*

(Qs. Ar-Rum: 60)

## KATA PENGANTAR

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

Alhamdulillah, puji syukur kehadiran Allah Swt. yang telah melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “**Uji Biodegradasi Polyethylene Terephthalate (PET) Oleh *Bacillus subtilis* dan *Aspergillus niger***”. Selawat serta salam senantiasa terpanjatkan untuk baginda Nabi Muhammad saw. yang telah menuntun dari zaman kegelapan menuju ke zaman yang terang yaitu Agama Islam.

Penulisan skripsi ini disusun dengan baik juga berkat bantuan dari pihak-pihak yang telah memberikan bimbingan dan dukungan dalam bentuk apapun. Sehingga penulis sampaikan terimakasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. M. Zainuddin, MA, selaku Rektor Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
2. Ibu Dr. Sri Harini, M.Si, selaku dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
3. Ibu Rachmawati Ningsih, M.Si, selaku ketua Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri (UIN) Maulana Malik Ibrahim Malang.
4. Ibu Dr. Akyunul Jannah, S.Si, M.P., selaku dosen pembimbing I yang telah memberikan bimbingan, pengarahan serta nasehat kepada penulis dalam menyelesaikan penulisan skripsi.



5. Ibu Lulu'atul Hamidatu Ulya, M.Sc, selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan bimbingan serta pengarahan kepada penulis dalam menyelesaikan penulisan skripsi.
6. Ibu Dewi Yuliani, M.Si, yang telah memberikan bimbingan, pengarahan serta nasehat kepada penulis.
7. Seluruh dosen dan laboran Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi UIN Maulana Malik Ibrahim Malang yang telah banyak memberikan wawasan keilmuan, serta pengalamannya sebagai pedoman dan bekal bagi penulis.
8. Kedua orang tua serta keluarga yang selalu memberikan do'a, dukungan, serta penyemangat yang tiada tara.
9. Seluruh rekan penulis yang telah memberikan dukungan kepada penulis dalam menyelesaikan penulisan skripsi.

Terlepas dari segala hal, penulis meminta ma'af bahwa karya ilmiah ini masih banyak kekurangan, sehingga penulis mengharapkan kritik dan sarannya baik dari segi isi maupun bentuk susunannya. Semoga tulisan ini dapat menjadikan berkah dan bermanfaat bagi seluruh pihak.

Malang, 28 November 2023

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>ii</b>
<b>LEMBAR PERSETUJUAN .....</b>	<b>iii</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>	<b>iv</b>
<b>PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN .....</b>	<b>v</b>
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN .....</b>	<b>vi</b>
<b>MOTTO.... ..</b>	<b>vii</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>x</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xiv</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>	<b>xv</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>xvi</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xvii</b>
<b>مستخلص البحث.....</b>	<b>xviii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	5
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Batasan Masalah.....	6
1.5 Manfaat Penelitian.....	6
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>7</b>
2.1 Plastik <i>Polyethylene Terephthalate</i> (PET) .....	7
2.2 Biodegradasi Plastik PET .....	9
2.3 Mikroorganisme Pendegradasi Plastik .....	12
2.4 Enzim yang Dihasilkan <i>Bacillus subtilis</i> dan <i>Aspergillus niger</i> .....	14
2.5 Sinergisme Konsorsium <i>Bacillus subtilis</i> dan <i>Aspergillus niger</i> .....	15
2.6 Pengaruh Sinar UV Terhadap Polimer PET .....	16
2.7 Bushnell Haas (BH) Sebagai Media Biodegradasi.....	17
2.8 Analisis Biodegradasi Plastik Menggunakan Metode FTIR .....	18
2.9 Analisis Biodegradasi Plastik Menggunakan Metode SEM.....	23

<b>BAB III METODE PENELITIAN .....</b>	<b>25</b>
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian .....	25
3.2 Alat dan Bahan Penelitian .....	25
3.2.1 Alat Penelitian .....	25
3.2.2 Bahan Penelitian .....	26
3.3 Rancangan Penelitian .....	26
3.4 Tahapan Penelitian .....	27
3.5 Cara Kerja.....	28
3.5.1 Pembuatan Media .....	28
3.5.1.1 Pembuatan Media <i>Nutrient Agar</i> (NA) .....	28
3.5.1.2 Pembuatan Media <i>Nutrient Broth</i> (NB) .....	28
3.5.1.3 Pembuatan Media <i>Potato Dextrose Agar</i> (PDA) .....	29
3.5.1.4 Pembuatan Media <i>Bushnell Haas</i> (BH) .....	29
3.5.2 Peremajaan Isolat Bakteri dan Jamur .....	29
3.5.2.1 Peremajaan <i>Bacillus subtilis</i> .....	29
3.5.2.2 Peremajaan <i>Aspergillus niger</i> .....	30
3.5.3 Pengukuran <i>Optical Density</i> (OD) <i>Bacillus subtilis</i> .....	30
3.5.4 Penyaringan Filtrat <i>Aspergillus niger</i> .....	30
3.5.5 Preparasi Sampel Plastik PET .....	31
3.5.6 Uji Biodegradasi PET .....	31
3.5.7 Analisis Penurunan Berat PET .....	32
3.5.8 Karakterisasi PET Menggunakan FTIR.....	32
3.5.9 Karakterisasi PET Menggunakan SEM .....	32
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>34</b>
4.1 Preparasi Sampel Plastik PET .....	34
4.2 Peremajaan Isolat <i>Bacillus subtilis</i> dan <i>Aspergillus niger</i> .....	36
4.3 Uji Biodegradasi Plastik PET .....	40
4.4 Karakterisasi Plastik PET Menggunakan FTIR .....	45
4.5 Karakterisasi Plastik PET Menggunakan SEM .....	47
4.6 Biodegradasi Menurut Pandangan Al-Qur'an .....	50
<b>BAB V PENUTUP.....</b>	<b>54</b>
5.1 Kesimpulan.....	54
5.2 Saran .....	54

<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>55</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>65</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Struktur polimer PET .....	8
Gambar 2.2 Mekanisme umum biodegradasi plastik.....	10
Gambar 2.3 Mekanisme degradasi PET oleh mikroorganisme.....	11
Gambar 2.4 Spektrum FTIR PET sebelum dan sesudah didegradasi <i>Bacillus subtilis</i> .....	20
Gambar 2.5 Spektrum FTIR PET sebelum dan sesudah didegradasi <i>Penicillium funiculosum</i> .....	21
Gambar 2.6 Visualisasi SEM dari limbah botol plastik sebelum dan setelah degradasi oleh bakteri dan jamur .....	24
Gambar 4.1 Preparasi plastik PET menggunakan sinar UV selama 60 jam .....	35
Gambar 4.2 <i>Bacillus subtilis</i> .....	37
Gambar 4.3 <i>Aspergillus niger</i> bagian atas (a) berwarna hitam dan bagian bawah (b) berwarna kuning kecoklatan.....	38
Gambar 4.4 Serapan FTIR plastik PET setelah biodegradasi .....	45
Gambar 4.5 Analisis SEM pada permukaan plastik PET setelah biodegradasi selama 60 hari (a) PET kontrol dan (b) PET dengan penambahan <i>Aspergillus niger</i> .....	48



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Karakteristik plastik PET .....	9
Tabel 2.2 Jenis dan kemampuan bakteri pendegradasi plastik .....	14
Tabel 2.3 Jenis dan kemampuan jamur pendegradasi plastik .....	14
Tabel 3.1 Rancangan penelitian .....	27
Tabel 4.1 Presentase biodegradasi plastik PET .....	42
Tabel 4.2 Nilai bilangan gelombang plastik PET setelah biodegradasi.....	46

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Rancangan Penelitian .....	65
Lampiran 2 Diagram Alir .....	66
Lampiran 3 Pembuatan Larutan Media.....	70
Lampiran 4 Data Hasil Penelitian dan Perhitungan .....	72
Lampiran 5 Perubahan Warna Media <i>Bushnell Haas</i> Setelah Biodegradasi .....	76
Lampiran 6 Hasil FTIR .....	76
Lampiran 7 Hasil SEM.....	78
Lampiran 8 Dokumentasi .....	80

## ABSTRAK

Mahmudi, N. A. 2023. **Uji Biodegradasi Polyethylene Terephthalate (PET) Oleh *Bacillus subtilis* dan *Aspergillus niger***. Skripsi. Jurusan Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Pembimbing I: Dr. Akyunul Jannah, S.Si, M.P; Pembimbing II: Lulu'atul Hamidatu Ulya, M.Sc

---

**Kata Kunci:** *Bacillus subtilis*, *Aspergillus niger*, Biodegradasi plastik, PET, FTIR, SEM

Polyethylene terephthalate (PET) merupakan salah satu poliester yang paling umum diproduksi di seluruh dunia sebagai botol air minuman. PET sangat tahan lama sehingga dapat menimbulkan masalah lingkungan yang serius. Biodegradasi merupakan salah satu metode penanganan permasalahan limbah PET. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan degradasi kultur tunggal dan campuran dari *Bacillus subtilis* dengan *Aspergillus niger* terhadap plastik PET, serta karakterisasi dari plastik PET setelah biodegradasi.

Metode pada penelitian ini antara lain plastik PET dipreparasi menggunakan sinar UV. *Bacillus subtilis* dan *Aspergillus niger* disubkultur dan dibuat inokulum. Uji biodegradasi dilakukan dengan menggunakan kultur tunggal dan campuran dalam rentang waktu 60 hari masa inkubasi. Presentase degradasi dihitung melalui penurunan berat plastik PET. Karakterisasi PET berupa analisis perubahan gugus fungsi plastik PET sebelum dan sesudah biodegradasi menggunakan spektrofotometer FTIR (*Fourier Transform Infra Red*), serta struktur morfologi plastik PET kontrol dan PET dengan persentase degradasi tertinggi menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscopy*).

Hasil penelitian ini diperoleh kemampuan degradasi tertinggi sebesar 1,11% pada plastik PET dengan penambahan *Aspergillus niger*. Hasil analisis FTIR pada plastik PET tidak terdeteksi perubahan gugus fungsi. Hasil analisis SEM pada permukaan PET kontrol terlihat rata tanpa adanya bongkahan, sedangkan permukaan PET dengan *Aspergillus niger* terlihat tidak rata, dan terdapat bongkahan yang menonjol akibat aktivitas mikroba yang mendegradasi plastik.

## ABSTRACT

Mahmudi, N. A. 2023. **Biodegradation Test of Polyethylene Terephthalate (PET) by *Bacillus subtilis* and *Aspergillus niger***. Thesis. Chemistry Department. Faculty of Science and Technology. Advisor I: Dr. Akyunul Jannah, S.Si, M.P; Advisor II: Lulu'atul Hamidatu Ulya, M.Sc

---

---

**Keywords:** *Bacillus subtilis*, *Aspergillus niger*, Biodegradation plastic, PET, FTIR, SEM

Polyethylene terephthalate (PET) is one of the most commonly produced polyesters worldwide, mainly used for beverage bottles. PET is highly durable, but it can pose serious environmental problems. Biodegradation is one method of dealing with PET waste problems. This research aims to determine the degradation ability of single and mixed cultures of *Bacillus subtilis* and *Aspergillus niger* on PET plastic and also to determine the characterization of PET plastic after biodegradation.

The research method included PET plastic being prepared using UV light. *Bacillus subtilis* and *Aspergillus niger* were subcultured and used to prepare inoculants. Biodegradation tests were carried out using single and mixed cultures over a 60-day incubation period. The degradation percentage was calculated by reducing the weight of the PET plastic. The characterization of PET involved analyzing changes in the functional groups of PET plastic before and after biodegradation using a Fourier Transform Infrared (FTIR) spectrophotometer. Additionally, the morphological structure of the control PET and PET with the highest degradation percentage was examined using Scanning Electron Microscopy (SEM).

The research shows that the highest degradation capacity at 1.11% for PET plastic with the addition of *Aspergillus niger*. The FTIR analysis on PET plastic did not detect any changes in functional groups. The result of SEM analysis on the surface of the control PET appeared flat without any lumps. In contrast, the surface of PET with *Aspergillus niger* exhibited an uneven texture with lumps, indicating microbial activity degrading the plastic.

## مستخلص البحث

محمودي، ن. أ. 2023. اختبار التحلل البيولوجي للبولي إيثيلين تيريفثاليت (PET) بواسطة عصوية رقيقة ورشاشية سوداء. البحث الجامعي. قسم الكيمياء، كلية العلوم والتكنولوجيا بجامعة مولانا مالك إبراهيم الإسلامية الحكومية مالانج. المشرف الأول: د. أعين الجنة، الماجستير؛ المشرف الثاني: لؤلؤة حميدة العليا، الماجستير.

---

**الكلمات الرئيسية:** عصوية رقيقة، رشاشة سوداء، التحلل البيولوجي للبلاستيك، PET، FTIR، SEM.

البولي إيثيلين تيريفثاليت (PET) هو أحد أكثر أنواع البوليستر شيوعا التي يتم إنتاجها في جميع أنحاء العالم كعلبة لمياه الشرب. PET متين للغاية لدرجة أنه يمكن أن يسبب مشاكل بيئية خطيرة. التحلل البيولوجي هو إحدى طرق التعامل مع مشكلة نفايات PET. يهدف هذا البحث إلى معرفة قدرة التحلل البيولوجية الفردية والمخلطة بين عصوية رقيقة ورشاشة سوداء على بلاستيك PET، وكذلك توصيف بلاستيك PET بعد التحلل البيولوجي.

تتضمن الطريقة في هذا البحث بلاستيك PET المحضر باستخدام ضوء الأشعة فوق البنفسجية. تم استزراع عصوية رقيقة ورشاشة سوداء وصنع اللقاح منهما. تم إجراء اختبار التحلل البيولوجي باستخدام مزارع مفردة ومختلطة خلال فترة حضانة مدتها 60 يوما. تم حساب نسبة التدهور من خلال انخفاض وزن معجنات PET. يتم توصيف PET في شكل تحليل للتغيرات في المجموعات الوظيفية لبلاستيك PET قبل وبعد التحلل البيولوجي باستخدام مقياس الطيف الضوئي (FTIR)، بالإضافة إلى الهياكل المورفولوجية للتحكم في بلاستيك PET و PET مع أعلى نسبة من التدهور باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح (SEM).

حصلت نتائج هذا البحث على أعلى قدرة تحلل بنسبة 1.11٪ في بلاستيك PET مع إضافة رشاشة سوداء. لم تكتشف نتائج تحليل FTIR على بلاستيك PET تغيرات في المجموعات الوظيفية. بدت نتائج تحليل SEM على سطح PET المتحكم مسطحا بدون أي كتل، بينما بدا سطح PET مع رشاشة سوداء غير متساو، وكانت هناك قطع بارزة بسبب النشاط الميكروبي الذي أدى إلى تدهور البلاستيك.



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

*Polyethylene terephthalate* (PET) adalah salah satu poliester yang paling umum diproduksi di seluruh dunia dan digunakan untuk memproduksi botol air dan barang-barang rumah tangga (Geyer dkk., 2017). Dewasa ini, PET merupakan salah satu plastik yang paling banyak digunakan. Hal ini karena bobotnya yang ringan, serta memiliki daya tahan tinggi menjadikan PET salah satu plastik yang paling banyak diproduksi (Carr, Clarke, dan Dobson, 2020; Liu dkk., 2019). Secara kimia, plastik PET terdiri dari unit pengulangan *inert* dan hidrofobik dari monomer etilen glikol dan asam tereftalat semiaromatik (TPA) yang dihubungkan oleh ikatan ester. Karena panjang rantai dan proporsi komponen semiaromatiknya yang tinggi, PET sangat tahan lama dan stabil serta tahan terhadap pelapukan lingkungan yang memungkinkannya bertahan di lingkungan selama beberapa dekade (Yoshida dkk., 2016).

Pada tahun 2016, sekitar 485 miliar botol PET diproduksi, kemudian pada tahun 2017 kapasitas produksinya mencapai lebih dari 30 juta ton per tahun dan diperkirakan 583,3 miliar botol plastik telah diproduksi pada tahun 2021 (PlasticsInsight, 2017; Garside, 2019). Sementara ini, sistem daur ulang dapat dilakukan pada sebagian besar PET, namun 60% dari semuanya (plastik pascakonsumen) yang diproduksi secara global terakumulasi baik di tempat pembuangan sampah atau lingkungan, hal itu dapat menimbulkan masalah lingkungan yang serius (Geyer dkk., 2017). Setiap tahun, polusi plastik dianggap

bertanggung jawab atas kematian sekitar 1 juta burung laut, serta 100.000 mamalia laut dan penyu. Penguraian sebagian plastik bekas dan pengolahan serat sintetis telah mengakibatkan pelepasan mikroplastik dan serat mikro secara luas, sehingga mudah mencemari ekosistem laut dan memasuki rantai makanan hewan dan manusia, hal ini dapat menyebabkan gangguan kekebalan dan cacat bawaan, serta kanker (Hiraga dkk., 2019; Jaiswal dkk., 2020). Sebagaimana firman Allah SWT dalam surah Al-Ma'idah ayat 32:

مِنْ أَجْلِ ذَلِكَ كَتَبْنَا عَلَىٰ بَنِي إِسْرَائِيلَ أَنَّهُ مَن قَتَلَ نَفْسًا بِغَيْرِ نَفْسٍ أَوْ فَسَادٍ فِي الْأَرْضِ فَكَأَنَّمَا قَتَلَ  
النَّاسَ جَمِيعًا ۚ وَمَنْ أَحْيَاهَا فَكَأَنَّمَا أَحْيَا النَّاسَ جَمِيعًا ۚ وَلَقَدْ جَاءَتْهُمْ رُسُلُنَا بِالْبَيِّنَاتِ ثُمَّ إِنَّ كَثِيرًا  
مِّنْهُمْ بَعَدَ ذَلِكَ فِي الْأَرْضِ لَمُسْرِفُونَ ﴿٣٢﴾

*Artinya: “Oleh karena itu, Kami menetapkan (suatu hukum) bagi Bani Israil bahwa siapa yang membunuh seseorang bukan karena (orang yang dibunuh itu) telah membunuh orang lain atau karena telah berbuat kerusakan di bumi, maka seakan-akan dia telah membunuh semua manusia. Sebaliknya, siapa yang memelihara kehidupan seorang manusia, dia seakan-akan telah memelihara kehidupan semua manusia. Sungguh, rasul-rasul Kami benar-benar telah datang kepada mereka dengan (membawa) keterangan-keterangan yang jelas. Kemudian, sesungguhnya banyak di antara mereka setelah itu melampaui batas di bumi” (QS. Al-Ma'idah (5): 32).*

Berdasarkan ayat diatas terdapat ungkapan yang sangat jelas bahwa seseorang yang melakukan *mudârat* di muka bumi, maka sama seperti membunuh seluruh manusia. Pada dasarnya pembunuhan dapat terjadi secara langsung dan tidak langsung. Pembunuhan secara langsung karena adanya pertengkaran, persaingan, dan permusuhan, sedangkan pembunuhan secara tidak langsung dengan merusak berbagai sumber kehidupan seperti daratan, perairan, udara, maupun sumber pangan, sehingga manusia bahkan makhluk hidup apapun akan merasakan dampak bahkan hingga terjadinya kematian (Tim Kemenag, 2013).

Oleh karena itu, segala bentuk perlakuan yang dapat menyebabkan kerusakan lingkungan merupakan sebuah larangan secara mutlak, karena akan mencelakakan apapun dan siapapun.

Pada tahun 2017, terdapat sekitar 9-12% limbah plastik global yang didaur ulang dan dibakar, sementara 79% lainnya dibuang ke tempat pembuangan akhir maupun lingkungan sekitar (Geyer dkk., 2017). Permasalahan akan limbah plastik dapat diminimalisir dengan menggunakan metode ramah lingkungan melalui proses biodegradasi. Biodegradasi merupakan proses penguraian senyawa kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana dengan memanfaatkan aktivitas mikroorganisme tanpa harus merusak lingkungan (Fadlilah dan Shovitri, 2014). Mikroorganisme akan mensekresikan endoenzim dan eksoenzim sehingga dapat mendegradasi polimer plastik menjadi bentuk yang lebih sederhana dan dimanfaatkan sebagai sumber karbon untuk proses pertumbuhan (Sriningsih dan Shovitri, 2015). Mikroorganisme yang digunakan dalam proses biodegradasi merupakan mikroorganisme yang telah diisolasi dari tanah, kompos, atau air laut (Yoon dkk., 2012).

Beberapa riset yang telah dilakukan membuktikan bahwa mikroorganisme berpotensi menguraikan limbah plastik. Rozaq (2020) melakukan uji aktivitas *Bacillus subtilis* dalam mendegradasi plastik LDPE selama 52 hari dan diperoleh persentase degradasi sebesar 1,63%. Suharpina dkk. (2021) menggunakan *Aspergillus niger* dalam uji biodegradasi plastik jenis polyethylene dan diperoleh persentase degradasi sebesar 4,41% selama masa inkubasi 4 minggu. Sarkhel dkk. (2020) melakukan riset biodegradasi polimer dari limbah botol plastik PET menggunakan spesies *Vibrio sp.* dan *Aspergillus sp.* yang diisolasi dari sumber

laut, dan diperoleh aktivitas degradasi masing-masing sebesar 35% dan 22% dalam jangka waktu 6 minggu. Farzi dkk. (2019) telah meneliti kemampuan spesies *Streptomyces* dalam mendegradasi botol jenis PET selama 18 hari dan diperoleh persentase biodegradasi akhir sebesar 68,8%.

Pada proses biodegradasi, aktivitas degradasi yang dihasilkan kurang efektif apabila hanya dilakukan oleh satu jenis mikroba, sehingga harus dilakukan dalam bentuk konsorsium. Mikroba dalam konsorsium bekerja secara multifungsi pada substrat yang kompleks dan dapat dengan mudah mendegradasinya menjadi monomer sederhana. Dey dkk. (2016) melakukan riset biodegradasi pada plastik PET menggunakan *Pseudomonas sp.*, *Staphylococcus sp.*, *Bacillus sp.* dan campuran ketiganya, hasil penelitian menunjukkan bahwa aktivitas degradasi tertinggi diperoleh pada kultur campuran sebesar 23% selama masa inkubasi 60 hari. Sowmya dkk. (2015) melaporkan bahwa penurunan berat plastik polietilen oleh aktivitas konsorsium lebih besar (27%) dibandingkan aktivitas isolat tunggal (0,6-7,7%). Ogunbayo, dkk. (2019) menjelaskan bahwa konsorsium bakteri dan jamur memiliki kemampuan degradasi lebih baik dari pada tanpa dilakukan konsorsium, karena terjadi sinergisme sehingga konsorsium memberikan degradasi yang lebih tinggi. Oleh karena itu, penggunaan konsorsium ini dianggap dapat saling mendukung antar mikroorganisme karena lebih efektif dalam mendegradasi polimer plastik dari pada isolat tunggal (Islami, 2019).

Berdasarkan uraian yang telah dijelaskan, maka perlu dilakukan penelitian tentang uji biodegradasi polyethylene terephthalate (PET) menggunakan bakteri dan jamur dan diidentifikasi gugus fungsi polimer plastik menggunakan FTIR, kemudian dilakukan analisis morofogi polimer melalui *Scanning Electron*

*Microscopy* (SEM). Bakteri dan jamur yang digunakan adalah *Bacillus subtilis* dan *Aspergillus niger*. Penelitian ini dilakukan untuk mengeksplorasi metode daur ulang yang inovatif dalam penanganan limbah plastik. Biodegradasi dapat menjadi cara yang cukup efektif, karena merupakan metode yang ramah lingkungan.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, dirumuskan permasalahan sebagai berikut:

1. Bagaimana kemampuan biodegradasi *Bacillus subtilis* dan *Aspergillus niger* terhadap plastik PET?
2. Bagaimana hasil identifikasi gugus fungsi plastik PET menggunakan Spektrofotometer FTIR?
3. Bagaimana hasil analisis morfologi permukaan plastik PET dari kemampuan degradasi tertinggi menggunakan SEM?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dilakukan penelitian ini adalah:

1. Mengetahui kemampuan biodegradasi *Bacillus subtilis* dan *Aspergillus niger* terhadap plastik PET.
2. Mengetahui hasil identifikasi gugus fungsi plastik PET menggunakan Spektrofotometer FTIR.
3. Mengetahui hasil analisis morfologi permukaan plastik PET dari kemampuan degradasi tertinggi menggunakan SEM.



#### **1.4 Batasan Masalah**

Pada penelitian ini ditetapkan beberapa batasan masalah sebagai berikut:

1. Bakteri *Bacillus subtilis* didapat dari Laboratorium Biokimia Program studi Kimia Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang dari hasil isolasi pada Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Pisang Kipas Jatimulyo, Kota Malang.
2. Jamur *Aspergillus niger* didapat dari Fakultas Kedokteran Universitas Brawijaya.
3. Jenis plastik yang digunakan uji biodegradasi adalah jenis PET (*Polyethylene Terephthalate*) berukuran 1 x 1 cm.
4. Penentuan kemampuan degradasi berdasarkan hasil pengurangan berat kering, uji FTIR, dan analisis SEM.

#### **1.5 Manfaat Penelitian**

Penelitian ini bermanfaat untuk memberikan informasi terkait dengan potensi bakteri dan jamur dalam mendegradasi plastik secara ramah lingkungan. Selain itu, hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi literatur penunjang untuk penelitian selanjutnya.

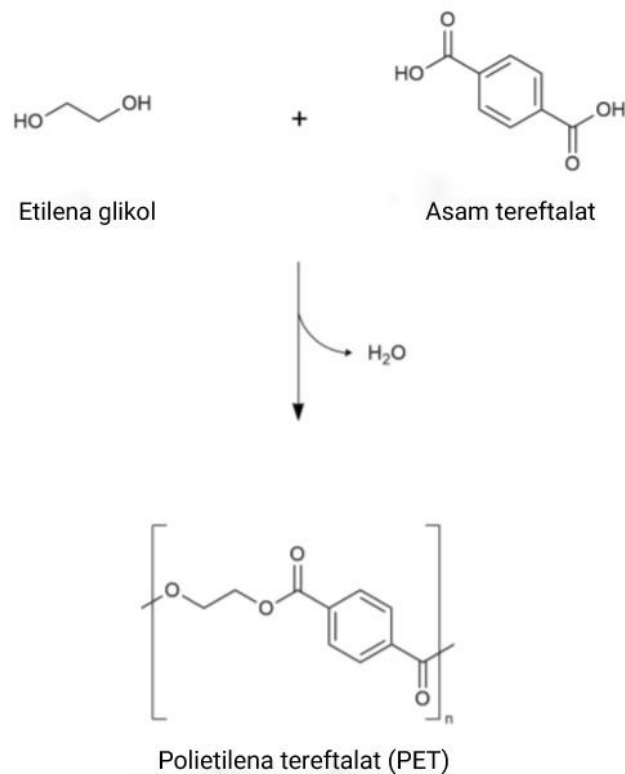
## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Plastik *Polyethylene Terephthalate* (PET)**

PET atau *Polyethylene Terephthalate* merupakan polimer rantai panjang yang termasuk salah satu kelompok poliester. PET terbentuk dari zat antara yaitu asam tereftalat (TPA) dan etilen glikol (EG) yang keduanya berasal dari bahan baku minyak. Pada akhir 1950-an PET dikembangkan sebagai film dan pertama kali digunakan untuk fotografi dan film sinar-X. Pada awal 1970-an PET dikembangkan dengan teknik *blow moulding* yang menghasilkan struktur tiga dimensi pertama yang mengawali pemanfaatan PET sebagai botol yang ringan, kuat, dan tidak dapat dipecahkan (Sinha dkk., 2010; Vakili dan Haghshenas, 2010).

PET disintesis berdasarkan reaksi polikondensasi monomer asam tereftalat (TPA) dan etilena glikol (EG) menghasilkan polimer polietilen tereftalat (PET), dengan air sebagai produk sampingan. Reaksi polikondensasi PET dapat dilihat pada gambar Gambar 2.1. Rantai pendek dari molekul alifatik, serta dengan adanya cincin aromatik menyebabkan polimer PET menjadi molekul yang kaku. Monomer PET dihubungkan oleh ikatan ester, yang dapat dihidrolisis oleh banyak enzim hidrolitik yang dapat ditemukan di alam, sehingga memungkinkan PET menjadi lebih rentan terhadap degradasi (Venkatachalam dkk., 2012; Hiraga dkk., 2019).



Gambar 2.1 Reaksi polikondensasi PET (Carr dkk., 2020)

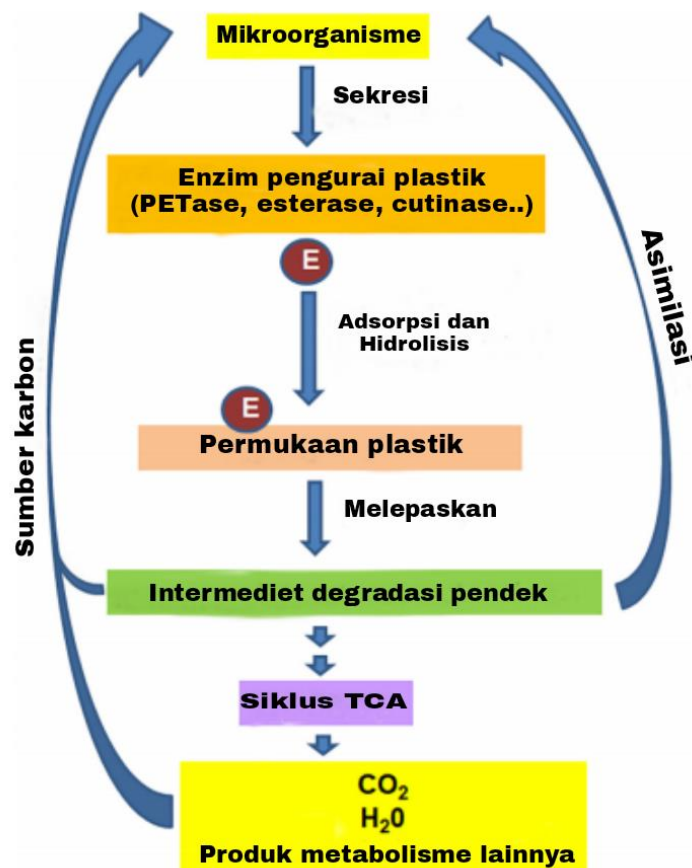
Poli(etilbenzena-1,4-dikarboksilat) merupakan nama IUPAC dari polimer PET dengan kode identifikasi resin atau nomor daur ulangnya adalah 1. PET merupakan polimer semi kristalin yang dapat berubah dari keadaan seperti gelas yang kaku menjadi elastis seperti karet apabila dipanaskan pada temperatur diatas 72°C. Pada umumnya kristal PET meleleh pada temperatur 265°C, namun beberapa PET komersial meleleh diantara 255°C hingga 265°C. PET memiliki densitas sebesar 1,4 gr/cm<sup>3</sup> dan berat molekulnya adalah 192 gr/mol yang terdiri dari 4,2% hidrogen (H), 33,3% oksigen (O), dan 62,5% karbon (C) (Sinha dkk., 2010; Sarker dkk., 2011; Bartolome dkk., 2012; Nanda dan Berruti 2021). Karakteristik plastik PET tertera pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 Karakteristik Plastik PET (Sinha dkk., 2010)

<b>Karakteristik</b>	<b>Nilai</b>
Rumus molekul	$(C_{10}H_8O_4)_n$
Massa molar	Berubah-ubah
Densitas	1.38 g/cm <sup>3</sup> (20°C); 1.37 g/cm <sup>3</sup> (amorf); 1.455 g/cm <sup>3</sup> (kristal)
Titik lebur	>250°C
Titik didih	>350°C (terurai)
Kelarutan dalam air	Tidak larut
Konduktivitas termal	0.15-0.24 W/m/K

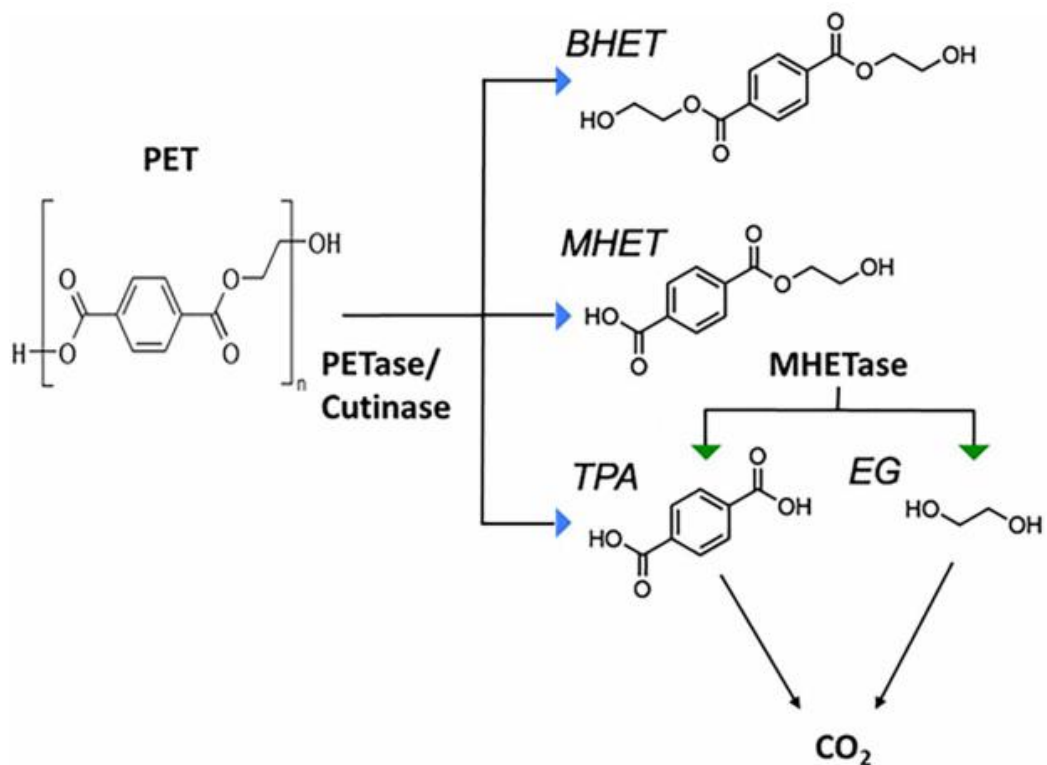
## 2.2 Biodegradasi Plastik PET

Biodegradasi merupakan proses penguraian senyawa kompleks menjadi senyawa baru dengan ukuran yang lebih sederhana dengan memanfaatkan mikroorganisme sebagai agen pendegradasi (Joutey dkk., 2014). Biodegradasi polimer plastik merupakan suatu proses alami dimana kompleks bahan organik pada plastik akan dimanfaatkan oleh mikroorganisme tertentu sebagai sumber karbon maupun energi, sehingga secara biologis dapat mengubah plastik menjadi bentuk yang lebih sederhana. Penguraian zat organik pada proses biodegradasi membentuk zat yang lebih sederhana yang berupa karbon dioksida, air, dan amonia (Das dan Kumar, 2013 Islami, 2019). Mekanisme biodegradasi plastik dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Mekanisme biodegradasi plastik (Mohanandkk., 2020)

Berdasarkan Gambar 2.2, biodegradasi plastik melibatkan ekskresi enzim ekstraseluler oleh mikroorganisme, penempelan enzim pada permukaan plastik, hidrolisis menjadi intermediet polimer pendek, yang pada akhirnya diasimilasi oleh sel mikroba sebagai sumber karbon untuk melepaskan  $\text{CO}_2$  (Jumaah, 2017). Menurut Webb (2013) dalam proses biodegradasi, mikroorganisme mengubah karbon yang terdapat dalam rantai polimer plastik menjadi karbon dioksida, sehingga menyebabkan plastik menjadi rapuh dan mudah pecah menjadi bagian-bagian yang lebih kecil hingga berat molekul rantai polimer plastik menjadi cukup rendah untuk dimetabolisme oleh mikroorganisme.



Gambar 2.3 Mekanisme degradasi PET oleh mikroorganisme (Austin dkk., 2018)

Berdasarkan Gambar 2.3 menunjukkan bahwa enzim pencerna PET yang disebut sebagai PETase (Polietilen tereftalat hidrolase) akan mengubah PET menjadi mono(2-hidroksietil) asam tereftalat (MHET), asam tereftalat (TPA) dan bis(2-hidroksietil) asam tereftalat (BHET) sebagai produk sekunder. Enzim lain seperti MHETase (Enzim pencerna MHET), selanjutnya akan menghidrolisis MHET menjadi dua monomer berupa TPA dan etilen glikol (EG) yang akan dikonversikan oleh mikroorganisme menjadi  $\text{CO}_2$  (Yoshida, dkk., 2016).

Spesies bakteri dan jamur masing-masing memiliki kemampuan yang berbeda dalam proses biodegradasi dan tergantung pada beberapa faktor pendukung seperti komposisi dan struktur polimer, berat molekul, kristalinitas, karakter hidrofobik, kondisi lingkungan, kemampuan pembentukan biofilm, dan

*pretreatment* untuk mikroba atau polimer. Mekanisme biodegradasi dari masing-masing mikroba baik bakteri maupun jamur akan mempengaruhi efektivitas proses biodegradasi. Mekanisme biodegradasi plastik PET oleh bakteri adalah dengan membentuk biofilm pada permukaan plastik dan mensekresikan enzim ekstraseluler yang akan mengikis permukaan polimer. Sedangkan mekanisme biodegradasi plastik PET oleh jamur adalah dengan menggunakan hifanya untuk menembus matriks polimer dan merusak struktur dalam polimer (Setiawan, 2021).

Pada proses biodegradasi terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi laju biodegradasi, antara lain pH, temperatur, kelembapan, jenis polimer dan ketebalan polimer. Kondisi-kondisi tersebut harus disesuaikan dengan jenis mikroba yang akan digunakan sebagai biodegradator. Adapun setelah mengalami proses biodegradasi, bahan-bahan polimer yang terlepas ke lingkungan akan terurai secara fisika, kimia, maupun biologi. Hal itu tergantung pada adanya udara, kelembapan, temperatur, cahaya (photo-degradation), radiasi energi tinggi (UV,  $\gamma$ -radiation), maupun oleh hadirnya mikroorganisme yang lain (Sumarsono, 2011).

### **2.3 Mikroorganisme Pendegradasi Plastik**

Mikroorganisme telah diketahui mampu mendegradasi senyawa polimer plastik. Mikroorganisme pendegradasi plastik merupakan mikroorganisme yang telah diisolasi dari air laut, tanah, atau kompos (Yoon dkk., 2012). Beberapa mikroorganisme yang diketahui dapat membantu dalam proses degradasi adalah mikroorganisme jenis bakteri dan jamur. Bakteri dan jamur merupakan mikroorganisme yang dapat membantu proses biodegradasi plastik secara *in vitro* dengan memanfaatkan *plasticizers* dalam plastik sebagai sumber karbon.

Mikroorganisme tersebut dapat mengkontaminasi lapisan plastik dan menggunakan komponen-komponen yang terdapat pada plastik sebagai sumber nutrisi, sehingga plastik dapat dirombak. Struktur polimer plastik dan jenis mikroorganisme yang digunakan sangat mempengaruhi kecepatan dalam proses biodegradasi (Murti, 2014).

Al-Qur'an juga menjelaskan tentang manfaat makhluk ciptaan Allah Swt. sebagai penunjang keberlangsungan hidup manusia. Sebagaimana Allah Swt. firman dalam surah Al-Hajj ayat 65:

أَلَمْ تَرَ أَنَّ اللَّهَ سَخَّرَ لَكُمْ مَّا فِي الْأَرْضِ وَالْفَلَكَ تَجْرِي فِي الْبَحْرِ بِأَمْرِهِ وَيُمْسِكُ السَّمَاءَ أَنْ تَقَعَ عَلَى الْأَرْضِ إِلَّا بِإِذْنِهِ إِنَّ اللَّهَ بِالنَّاسِ لَرَءُوفٌ رَحِيمٌ ﴿٦٥﴾

*Artinya: " Tidakkah engkau memperhatikan bahwa Allah menundukkan bagimu apa yang ada di bumi dan kapal yang berlayar di laut dengan perintah-Nya. Dia menahan (benda-benda) langit sehingga tidak jatuh ke bumi, kecuali dengan izin-Nya? Sesungguhnya Allah benar-benar Maha Penyantun lagi Maha Penyayang kepada manusia" (QS. Al-Hajj (22): 65).*

Menurut Fakhr al-Dîn al-Râzi dalam Tafsir *Al-Kabir Wa Mafatih Al-Ghaib* memahami makna "Allah menundukkan bagimu apa yang ada di bumi" adalah sebagai seluruh makhluk ciptaan Allah Swt. sebagai penunjang keberlangsungan hidup manusia. Seluruh makhluk ciptaan Allah Swt. baik abiotik maupun biotik, semua senantiasa tunduk pada ketentuan-Nya, supaya dapat memberikan manfaat kepada manusia. Hal ini menjadi bukti kasih sayang Allah Swt. bahwa tidak akan menciptakan segala sesuatu tanpa ada manfaatnya, sehingga dapat menjadi penunjang interaksi seluruh makhluk yang saling berkaitan dan membutuhkan (Sakirman, 2016).



Menurut beberapa riset yang telah dilakukan, kemampuan degradasi plastik oleh bakteri dan jamur ditunjukkan seperti pada Tabel 2.2 dan Tabel 2.3:

Tabel 2.2 Jenis dan kemampuan bakteri pendegradasi plastik

Jenis Bakteri	Kemampuan Degradasi	Waktu Inkubasi	Peneliti
<i>Bacillus sp.</i>	21,42%	60 hari	Dey dkk., 2016
<i>Bacillus cereus</i>	4.01-35,72%	2-4 bulan	Muhonja dkk., 2018
<i>Bacillus sporothermoduran</i>	36,54%	60 hari	Shrestha dkk., 2019
<i>Vibrio sp.</i>	35%	42 hari	Sarkhel dkk., 2020

Tabel 2.3 Jenis dan kemampuan jamur pendegradasi plastik

Jenis Jamur	Kemampuan Degradasi	Waktu Inkubasi	Peneliti
<i>Penicillium simplicissimum</i>	7.7%	3 bulan	Sowmya dkk., 2015
<i>Aspeergillus terreus</i>	50±4%	60 hari	Sangale dkk., 2019
<i>Aspergillus niger</i>	12%	60 hari	Ogunbayo dkk., 2019
<i>Aspergillus sp.</i>	22%	42 hari	Sarkhel dkk., 2020

#### 2.4 Enzim yang Dihasilkan *Bacillus subtilis* dan *Aspergillus niger*

Banyak enzim yang dihasilkan oleh bakteri dan jamur dalam peranannya sebagai pendegradasi PET. Enzim seperti esterase berperan dalam proses hidrolisa ikatan ester dengan asam amino dan alkohol yang ada dalam polimer PET. Enzim lipase berperan dalam memotong ester yang larut dalam air atau ester gugus OH. Enzim PETase dan MHETase masing-masing bertanggung jawab atas pemecahan polimer PET dan mono-2-hidroksietil tereftalat menjadi ko-monomernya (Kawai dkk., 2014; Yoshida dkk., 2016; Carniel dkk., 2017).

Huang dkk., (2018) dalam proses degradasi enzimatik PET berhasil mensekresikan enzim hidrolase PETase dari spesies *Bacillus subtilis* yang

menunjukkan aktivitas hidrolitik polimer PET. Chaves dkk., (2018) melakukan identifikasi pada mikroorganisme pendegradasi polietilen tereftalat (PET) dan menunjukkan bahwa jamur spesies *Aspergillus* hasil identifikasi menghasilkan enzim hidrolitik yang memiliki potensi dalam memecah polimer.

### **2.5 Sinergisme Konsorsium *Bacillus subtilis* dan *Aspergillus niger***

Proses biodegradasi senyawa hidrokarbon tidak berlangsung sempurna jika hanya dilakukan oleh satu jenis mikroba, sehingga harus dilakukan oleh beberapa jenis mikroorganisme dalam bentuk konsorsium yang memiliki sifat sinergisme (Islami, 2019).

Komunitas mikroba atau konsorsium didefinisikan sebagai kumpulan multispecies yang hidup berdampingan dalam ceruk ekologis. Dalam konsorsium mikroba, mikroorganisme bekerja secara multifungsi pada substrat yang kompleks dan dengan mudah mendegradasinya menjadi monomer sederhana yang berbeda, sehingga penggunaan konsorsium ini dianggap dapat saling menguntungkan karena lebih efektif dalam mendegradasi polimer plastik (Sowmya dkk., 2015).

Perera dkk. (2019) dalam penelitiannya menjelaskan sinergisme jamur dan bakteri pada spesies *Aspergillus* dan *Bacillus* dalam mendegradasi senyawa hidrokarbon. Jamur dalam konsorsium tersebut diamati membentuk lapisan miselium pada permukaan hidrokarbon, sehingga memungkinkan bakteri mengatasi keterbatasan nutrisi pertumbuhannya dengan menempel pada miselium jamur dan mendapatkan ruang ke lapisan hidrokarbon. Berdasarkan penelitiannya, aktivitas degradasi yang diperoleh sebesar  $99,42 \pm 0,38\%$  untuk konsorsium jamur dan bakteri;  $52,92 \pm 8,81\%$  untuk jamur; serta  $9,62 \pm 0,71\%$  untuk bakteri. Oleh

karena itu, dengan dilakukan konsorsium mikroorganisme dapat saling mendukung yang ditandai dengan aktivitas degradasi lebih tinggi dari pada tanpa dilakukan konsorsium.

Konsorsium bakteri dan jamur spesies *Bacillus* dan *Aspergillus* secara efektif memaksimalkan proses biodegradasi. Pasalnya, jamur akan menumbuhkan hifa untuk merusak struktur dalam polimer, sementara bakteri dapat dengan mudah menembus dan mengeluarkan enzim ekstraseluler. Selain itu, hifa jamur tidak hanya mendukung perlekatan pada permukaan polimer, tetapi juga menyediakan sumber nutrisi bagi bakteri (Perera, dkk. 2019; Setiawan, 2021).

## **2.6 Pengaruh Sinar UV Terhadap Polimer PET**

Paparan sinar UV merupakan salah satu *treatment* terhadap plastik PET yang akan didegradasi. Sinar UV akan diserap oleh molekul plastik sehingga dapat membantu membuat kerusakan struktur kimia polimer (Sarengat, 2011). Sinar UV yang diserap akan menyerang ikatan polimer dan mengubahnya menjadi potongan-potongan kecil, kemudian melalui proses biodegradasi oleh mikroba akan mengubah potongan-potongan kecil menjadi produk akhir (Jumaah, 2017; Asmita dkk., 2015; Kumar dkk., 2011; Singh dan Sharma, 2008).

Pengaruh lama paparan sinar UV yang diberikan pada permukaan plastik PET dapat merubah sifat hidrofobilitas plastik menjadi struktur yang bersifat hidrofilik. Permukaan plastik yang telah bersifat hidrofilik akan membantu koloni bakteri dan jamur lebih mudah dalam menempel pada permukaan plastik. Koloni yang menempel mampu membentuk lapisan biofilm dipermukaan plastik,

sehingga hasil dari proses biodegradasi akan lebih maksimal (Kumar dan Raut, 2015, Triasita dan Maya, 2015).

Vague dkk. (2019) mengisolasi spesies mikroba dari situs minyak bumi yang tercemar di Houston, Texas, untuk degradasi PET yang efektif. Beberapa sampel telah diberi perlakuan radiasi ultra violet (UV) dan terbukti dapat meningkatkan aktivitas degradasi plastik.

## **2.7 Bushnell-Haas (BH) Sebagai Media Biodegradasi**

Bakteri dan jamur pendegradasi polimer plastik dapat ditumbuhkan dengan menggunakan media selektif, dimana dalam media ini dapat menumbuhkan bakteri dan jamur tertentu dan menghambat pertumbuhan bakteri maupun jamur lain yang tidak dikehendaki. Media yang dibutuhkan untuk menumbuhkan campuran bakteri dan jamur adalah media Bushnell Haas (BH). Media BH merupakan media yang kaya akan nutrisi sebagai penunjang dalam pertumbuhan mikroba campuran, sehingga bakteri maupun jamur dapat tumbuh didalam media (Khafidloh, 2020).

Media Bushnell Haas (BH) merupakan media yang direkomendasikan untuk mempelajari aktivitas mikroba dalam menguraikan senyawa hidrokarbon. Komposisi bahan media BH terdiri dari magnesium sulfat, kalsium klorida, dan besi klorida. Selain itu terdapat monopotassium fosfat dan dipotassium fosfat yang berfungsi sebagai penyangga media, serta amonium nitrat yang berfungsi sebagai sumber nitrogen. Media ini mengandung semua nutrisi yang dibutuhkan mikroba kecuali sumber karbon yang diperlukan untuk pertumbuhan, sehingga hanya

mikroorganisme yang mampu menguraikan hidrokarbon yang akan tumbuh di media Bushnell Haas (HiMedia Laboratories, 2011).

Ogunbayo dkk. (2019) dalam penelitiannya tentang degradasi sampah plastik oleh campuran jamur dan bakteri menggunakan media Bushnell Haas (BH) untuk menguji kemampuan mikroorganisme dalam mendegradasi plastik. Media tersebut terdiri dari 0,2 gram  $MgSO_4$ ; 1 gram  $KH_2PO_4$ ; 1 gram  $K_2HPO_4$ ; 1 gram  $NH_4NO_3$ ; 0,02 gram  $CaCl_2$ ; dan 0,05 gram  $FeCl_3$  dan 1000 mL Aquades. Lazuardi dan Sari (2013) menambahkan bahwa media BH tidak memiliki kandungan karbon yang diperlukan oleh bakteri maupun jamur untuk tumbuh didalamnya, sehingga bakteri dan jamur tertentu memanfaatkan polimer plastik sebagai sumber nutrisi untuk menunjang pertumbuhannya.

## **2.8 Analisis Biodegradasi Plastik Menggunakan Metode FTIR**

Perubahan yang terjadi pada sampel plastik sebelum dan sesudah didegradasi oleh mikroorganisme dapat diketahui dengan menggunakan metode analisis FTIR (*Fourier Transform Infra Red*). FTIR merupakan alat yang digunakan untuk mengukur absorban atau transmittan suatu sampel dalam bentuk bilangan gelombang. Alat ini merupakan spektroskopi inframerah yang berfokus terhadap radiasi elektromagnetik dengan frekuensi panjang gelombang pada rentang  $400-4000\text{ cm}^{-1}$  (Islami, 2019).

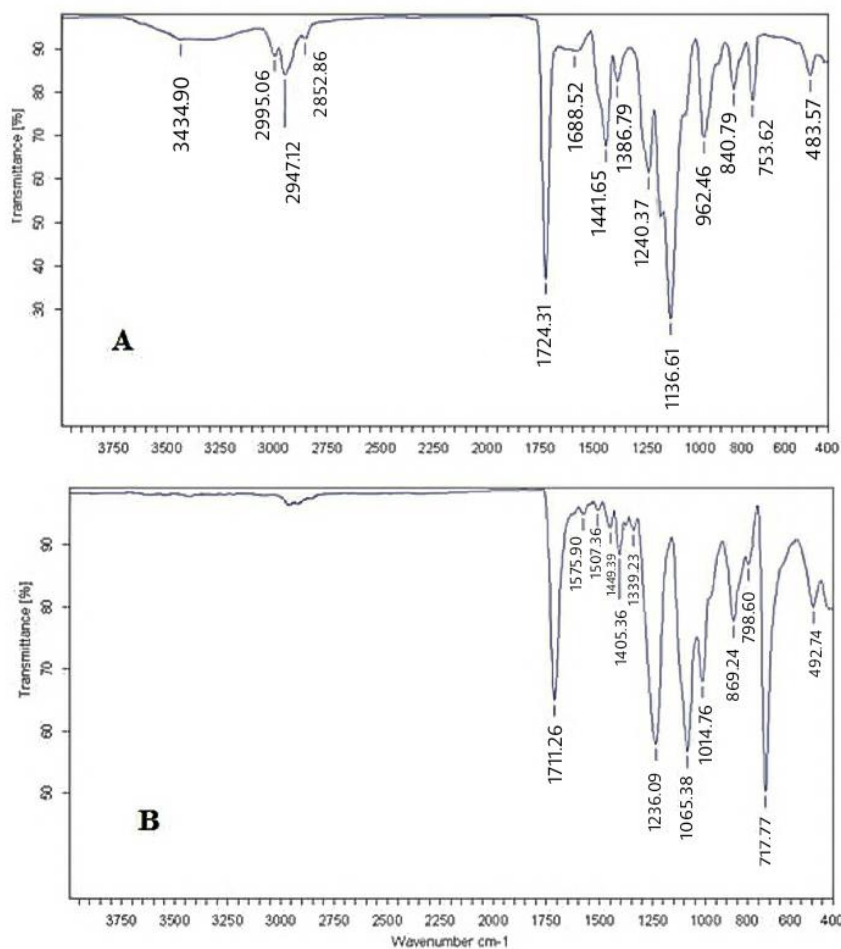
Adapun prinsip kerja FTIR adalah adanya interaksi antara radiasi inframerah dengan suatu senyawa sehingga terjadi perubahan energi yang akan digunakan untuk proses vibrasi, dimana sumber energi yang berupa radiasi inframerah akan melewati dua berkas sinar, berkas sinar pertama berinteraksi

dengan sampel sedangkan berkas sinar kedua akan menuju pembanding. Berkas-berkas sinar tersebut akan melewati grating yang akan diteruskan menuju detektor untuk diubah menjadi signal listrik dan diterjemahkan oleh detektor melalui puncak-puncak dengan intensitas tertentu (Pambudi dkk., 2017).

Menurut Bunaciu dkk. (2011) FTIR merupakan suatu metode analisis yang digunakan untuk mengetahui adanya perubahan pada gugus fungsi sampel plastik yang ditunjukkan melalui sebuah spektrum. Alat FTIR akan bekerja dengan mengukur jumlah radiasi inframerah yang dipancarkan atau diserap oleh sampel plastik sehingga dihasilkan sebuah spektrum. Kemudian hasil spektrum yang diperoleh diplot sebagai fungsi dari bilangan gelombang ( $\text{cm}^{-1}$ ) atau panjang gelombang ( $\mu\text{m}$ ).

Alat FTIR digunakan untuk analisis suatu senyawa secara kualitatif, hal ini karena setiap senyawa memiliki perbedaan karakteristik pada puncak struktural serta panjang gelombang pada setiap kelompok fungsionalnya. Sehingga dapat digunakan untuk mengetahui perubahan gugus fungsi yang terjadi pada proses biodegradasi. Analisis menggunakan metode FTIR ini sangat diperlukan untuk menunjukkan dan mengetahui adanya perubahan kimia fisika pada sampel plastik hasil biodegradasi oleh mikroorganisme. Adapun perubahan kimia yang terjadi ditunjukkan dengan adanya gugus baru yang muncul, sedangkan perubahan fisika yang terjadi ditunjukkan dengan adanya peningkatan maupun penurunan bilangan gelombang (Dwicania, 2019; Islami, 2019).

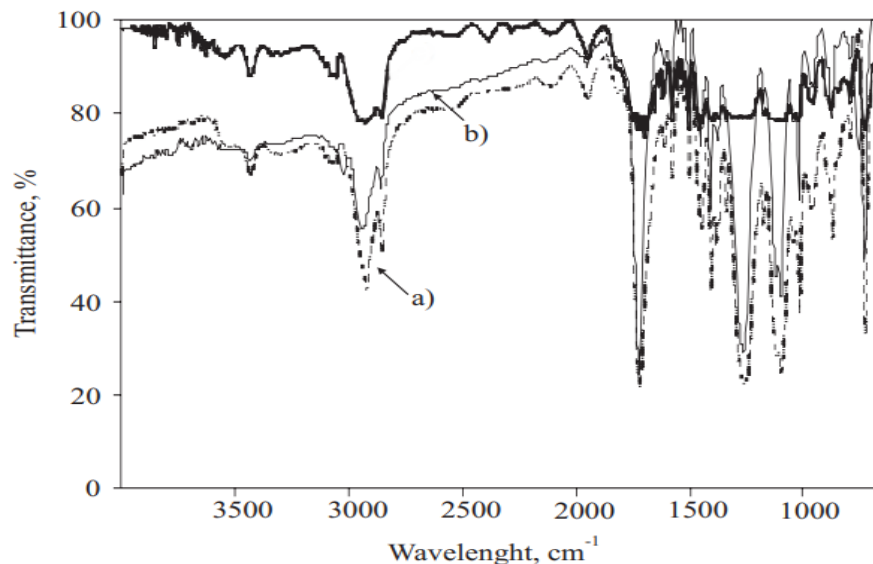
Perbandingan spektrum FTIR plastik sebelum dan setelah dilakukan uji biodegradasi tertera pada Gambar 2.3 dan Gambar 2.4 sebagai berikut:



Gambar 2.4 (A) Spektrum FTIR plastik PET sebelum didegradasi oleh *Bacillus subtilis*; (B) Spektrum FTIR plastik PET setelah didegradasi oleh *Bacillus subtilis* (Nakkabi dkk., 2015)

Berdasarkan hasil analisis diatas, Gambar 2.3 (B) spektrum PET setelah biodegradasi oleh *Bacillus subtilis* selama 30 hari masa inkubasi ditandai dengan hilangnya pita serapan yang terletak pada bilangan gelombang 2995; 2940; dan 2950  $\text{cm}^{-1}$  (elongasi  $\nu$  ( $-\text{CH}_2$ )) dari metilen pada segmen etilen glikol, penurunan intensitas pita yang terletak pada bilangan gelombang 1711  $\text{cm}^{-1}$  (ester karbonil) yang dikaitkan dengan gugus karbonil dari asam karboksilat, munculnya pita pada bilangan gelombang 1339; 1405; 1449  $\text{cm}^{-1}$  (deformasi  $\delta$  ( $-\text{CH}_2$ )) pada segmen etilen glikol, bilangan gelombang 1240; 1085; 1014  $\text{cm}^{-1}$  (elongasi  $\nu$  ( $-\text{CO}_2$ )) pada

segmen asam karboksilat dan bilangan gelombang  $870\text{ cm}^{-1}$  (elongasi  $\nu_{(-CC-)}$ ) (Al-Azzawi, 2015; Nakkabi dkk., 2015).



Gambar 2.5 a) Spektrum FTIR plastik PET sebelum didegradasi oleh *Penicillium funiculosum*; b) Spektrum FTIR plastik PET setelah didegradasi oleh *Penicillium funiculosum* (Nowak dkk., 2011)

Analisis FT-IR PET setelah masa inkubasi 84 hari dengan *Penicillium funiculosum* menunjukkan adanya penurunan intensitas pita pada bilangan gelombang  $3340\text{ cm}^{-1}$  yang dikaitkan dengan peregangan O-H gugus akhir dietilen pada etilen glikol, dan penurunan intensitas pita pada bilangan gelombang  $3060\text{ cm}^{-1}$  dikaitkan dengan peregangan C-H aromatik pada asam karboksilat. Sebuah pita baru ditemukan pada bilangan gelombang  $3030\text{ cm}^{-1}$ . Penurunan intensitas pita yang dihubungkan dengan gugus alifatik peregangan C-H pada bilangan gelombang  $2960\text{ cm}^{-1}$  dan  $2880\text{ cm}^{-1}$  dari gugus metilan pada etilen glikol, serta penurunan intensitas semua pita pada rentang  $1900\text{ cm}^{-1}$  hingga  $700$



$\text{cm}^{-1}$ . Pita baru muncul pada bilangan gelombang  $760 \text{ cm}^{-1}$  (Al-Azzawi, 2015; Nowak dkk., 2011).

Menurut Zulaika, dkk. (2017) berdasarkan struktur kimianya, plastik PET tersusun dari gugus fungsi ester. Gugus ini terdapat pada serapan bilangan gelombang  $1900\text{-}1700 \text{ cm}^{-1}$ . Kemudian terdapat serapan pada bilangan gelombang  $723,33 \text{ cm}^{-1}$  dengan struktur kimia C-H dan tergolong senyawa *Alkynes* mengalami penurunan serapan menjadi  $680,89 \text{ cm}^{-1}$  dengan struktur kimia  $\text{R}_2\text{C}=\text{CHR}$  (rangkap tak jenuh). Terdapat juga penurunan serapan pada bilangan gelombang  $792,77 \text{ cm}^{-1}$  dengan struktur kimia  $\text{R}_2\text{C}=\text{CHR}$  golongan *Alkenes* menjadi  $731,05 \text{ cm}^{-1}$  yang merupakan golongan *Aromatics*. Hal ini menyatakan bahwa terdapat aktivitas kimia yang memungkinkan terjadi proses perombakan polimer oleh mikroorganisme.

Pada proses degradasi plastik PET secara enzimatik terjadi reaksi hidrolisis yang melibatkan peranan enzim yang dihasilkan oleh mikroorganisme. Enzim yang berperan dalam reaksi enzimatik tersebut salah satunya adalah enzim cutinase. Enzim ini akan menghidrolisis PET dengan cara berikatan pada permukaan polimer yang bersifat hidrofobik, dimana permukaan ini merupakan keberadaan ikatan rangkap etilen ( $\text{C}=\text{C}$ ) (Khoironi, dkk. 2019; Rammer dkk., 2013).

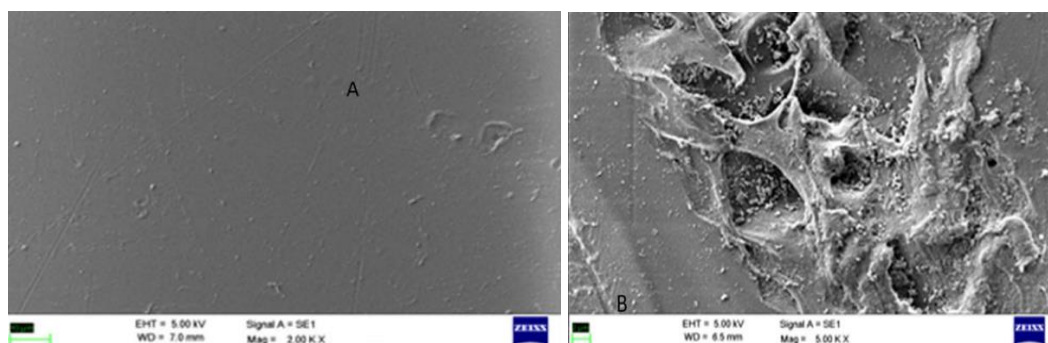
## **2.9 Analisis Biodegradasi Plastik Menggunakan Metode SEM**

*Scanning Electron Microscopy* (SEM) adalah salah satu teknik yang efisien untuk analisis kualitatif bahan polimer hasil degradasi oleh mikroorganisme. SEM mampu menganalisis dan mendeteksi permukaan polimer

plastik dengan memberikan informasi secara mikro sehingga dapat dilakukan analisis kimia kualitatif (L'Annunziata, 2012; Choudhary, 2017).

SEM bekerja berdasarkan prinsip mikroskop cahaya dengan memfokuskan sinar elektron berenergi tinggi sehingga mampu memperbesar permukaan plastik yang diteliti. SEM merupakan alat yang mampu mengetahui morfologi polimer plastik dengan memvisualisasikan permukaan plastik melalui proses *scanning* dari pancaran berenergi tinggi oleh elektron dan terjadi dalam suatu *Scan raster*. Adapun morfologi yang dapat diamati dari SEM adalah bentuk dan struktur permukaan dengan skala yang lebih halus (Dwicania, 2019; Islami, 2019).

Menurut Dhaka dkk. (2022) mikrograf yang dihasilkan SEM mampu memberikan gambaran terkait retakan, stabilitas polimer, dan informasi tentang polutan yang terabsorpsi ke permukaannya. Liu dkk. (2018) menggunakan SEM untuk menganalisis kerusakan tekstur pada permukaan film PET dan pembentukan biofilm yang disebabkan oleh spesies *Delftia*. Visualisasi SEM tertera pada gambar 2.6 sebagai berikut:



Gambar 2.6 Visualisasi SEM dari limbah botol plastik sebelum (A) dan setelah (B) degradasi oleh bakteri dan jamur (Sharkel dkk., 2020)

Berdasarkan Gambar 2.6 mewakili topografi SEM dari permukaan film polimer PET dari limbah botol plastik sebelum dan setelah proses biodegradasi.

Analisis SEM menunjukkan aktivitas mikroba dalam mendegradasi sampel polimer. Film plastik sebelum degradasi menunjukkan permukaan yang lebih halus dibandingkan dengan film setelah degradasi yang menunjukkan permukaan yang lebih kasar dan terdapat retakan yang terlihat jelas (Sain dkk., 2014)

## **BAB III**

### **METODE PENELITIAN**

#### **3.1 Waktu dan Tempat Penelitian**

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Bioteknologi, Mikrobiologi, dan Genetika Jurusan Kimia Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri (UIN) Maulana Malik Ibrahim Malang pada Januari – Juni 2023.

#### **3.2 Alat dan Bahan Penelitian**

##### **3.2.1 Alat Penelitian**

Alat-alat yang diperlukan dalam pembuatan media BH memerlukan gelas arloji, spatula, gelas ukur 100 mL, neraca analitik, beaker glass 1000 mL, *hotplate*, *magnetic stirrer*, dan autoklaf. Pembuatan media NA memerlukan gelas arloji, spatula, gelas ukur 100 mL, neraca analitik, erlenmeyer 250 mL, *hotplate*, *magnetic stirrer*, dan autoklaf. Pembuatan media NB memerlukan gelas arloji, spatula, neraca analitik, erlenmeyer 250 mL, *hotplate*, *magnetic stirrer*, dan autoklaf. Peremajaan bakteri memerlukan tabung reaksi, jarum ose, bunsen, *Plastic wrap* dan *incubator*. Peremajaan jamur memerlukan cawan petri, jarum ose, bunsen, cawan petri, *Plastic wrap* dan *incubator*. Penentuan *Optical Density* (OD) memerlukan jarum ose, botol vial, pipet volume, *incubator*, *vortex*, kuvet dan spektrofotometer UV-Vis. Penyaringan filtrat jamur memerlukan beaker glass 100 mL, kaca preparat, dan kasa steril. Preparasi plastik PET memerlukan neraca analitik, dan lampu UV. Uji aktivitas biodegradasi memerlukan erlenmeyer 250 mL, mikropipet, pinset, pipet ukur 10 mL, gelas ukur 100 mL, blue tip, *plastic*

*warp*, *shaker incubator*, dan neraca analitik. Sedangkan karakterisasi PET memerlukan spektrofotometer FTIR dan SEM.

### 3.2.2 Bahan Penelitian

Bahan-bahan yang diperlukan dalam peremajaan bakteri dan jamur antara lain isolat bakteri *Bacillus subtilis* hasil isolasi dari TPA Sampah Jalan Pisang Kota Malang, dan isolat jamur *Aspergillus niger*. Pada peremajaan bakteri media yang digunakan adalah *Nutrient Agar* (NA) dan peremajaan jamur digunakan media *Potato Dextrose Agar* (PDA). Penentuan *Optical Density* (OD) memerlukan isolat murni *Bacillus subtilis*. Penyaringan filtrat jamur memerlukan kultur *Aspergillus niger*. Pada penentuan OD bakteri, media yang digunakan adalah *Nutrient Broth* (NB). Preparasi plastik PET memerlukan sampel plastik PET berupa botol air mineral merk Aqua dan etanol 70%. Uji aktivitas biodegradasi memerlukan etanol 70%, akuades steril, sampel plastik PET berupa botol air mineral merk Aqua, inokulum *Bacillus subtilis* dan *Aspergillus niger*, media *Bushnell-Haas* (BH) yang mengandung akuades, MgSO<sub>4</sub>, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>, CaCl<sub>2</sub> dan FeCl<sub>3</sub>.

### 3.3 Rancangan Penelitian

Penelitian ini merupakan jenis penelitian deskriptif kuantitatif dan kualitatif berupa hasil akhir berat kering, hasil uji FTIR, dan hasil analisis SEM. Penelitian ini menggunakan dua jenis variabel diantaranya variabel bebas berupa jenis bakteri dan jamur, dan variabel terikat berupa berat akhir plastik PET setelah proses biodegradasi, hasil uji FTIR, dan hasil analisis SEM.

Tabel 3.1 Rancangan Penelitian

<b>Jenis Perlakuan</b>	<b>Berat Awal (g)</b>	<b>Berat Akhir (g)</b>	<b>Weight Loss (g)</b>	<b>%Degradasi</b>
Bakteri				
Jamur				
Campuran				
Kontrol				

Keterangan:

Bakteri = *Bacillus subtilis*

Jamur = *Aspergillus niger*

Campuran = *Bacillus subtilis* dan *Aspergillus niger*

Kontrol = Tanpa penambahan mikroba

### 3.4 Tahapan Penelitian

Adapun tahapan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pembuatan media
2. Peremajaan isolat bakteri dan jamur
3. Pengukuran *Optical Density* (OD) bakteri
4. Penyaringan filtrat jamur
5. Preparasi sampel plastik PET
6. Uji Biodegradasi PET
7. Analisis penurunan berat PET
8. Karakterisasi PET menggunakan FTIR
9. Karakterisasi PET menggunakan SEM
10. Analisis Data

### **3.5 Cara Kerja**

#### **3.5.1 Pembuatan Media**

##### **3.5.1.1 Pembuatan Media *Nutrient Agar* (NA)**

Media *Nutrient Agar* (NA) digunakan dalam peremajaan bakteri *Bacillus subtilis*. media ini dibuat dengan cara ditimbang NA sebanyak 2,8 gram. Dimasukkan kedalam erlenmeyer 250 mL dan ditambahkan 100 mL akuades steril, kemudian dipanaskan menggunakan *hot plate* dan diaduk menggunakan *magnetic stirrer*. Selanjutnya media di sterilisasi menggunakan *autoclave* selama 2 jam pada 121°C (Rozaq, 2020).

##### **3.5.1.2 Pembuatan Media *Nutrient Broth* (NB)**

Media *Nutrient Broth* (NB) digunakan dalam pengukuran *Optical Density* (OD) bakteri *Bacillus subtilis*. media ini dibuat dengan cara menimbang media sebanyak 0,8 gram, kemudian dimasukkan kedalam erlenmeyer 250 mL dan dilarutkan dengan 100 mL akuades stereril. Setelah itu, media dipanaskan menggunakan *hot plate* dan diaduk dengan menggunakan *magnetic stirrer*. Media di sterilisasi menggunakan *autoclave* selama 2 jam pada suhu 121°C (Rozaq, 2020).

##### **3.5.1.3 Pembuatan Media *Potato Dextrose Agar* (PDA)**

Media *Potato Dextrose Agar* (PDA) digunakan dalam peremajaan jamur *Aspergillus niger*. media ini dibuat dengan cara menimbang media PDA sebanyak 3,9 gram, kemudian dimasukkan kedalam erlenmeyer 250 mL dan dilarutkan dengan 100 mL akuades steril. Setelah itu media dipanaskan menggunakan *hot*

*plate* hingga mendidih dan diaduk dengan menggunakan *magnetic stirrer*. Media di sterilisasi menggunakan *autoclave* selama 15 menit pada suhu 121°C (Jamilatun dkk., 2020).

### **3.5.1.4 Pembuatan Media *Bushnell Haas* (BH)**

Media yang digunakan dalam uji biodegradasi adalah media *Bushnell-Haas* (BH). Media ini dibuat menggunakan bahan 0,2 gram MgSO<sub>4</sub>; 1,0 gram KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>; 1,0 gram K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>; 1,0 gram NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>; 0,02 gram CaCl<sub>2</sub>; dan 0,05 gram FeCl<sub>3</sub>. Semua bahan dimasukkan ke dalam beaker glass 1000 mL dan dilarutkan ke dalam 1000 ml aquades, kemudian diautoklaf pada 121°C selama 15 menit (Ogunbayo dkk., 2019).

## **3.5.2 Peremajaan Isolat Bakteri dan Jamur**

### **3.5.2.1 Peremajaan *Bacillus subtilis***

Bakteri *Bacillus subtilis* hasil isolasi dari TPA Sampah Jalan Pisang Kota Malang dan di simpan di Laboratorium Biokimia dan Bioteknologi Jurusan Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri (UIN) Maulana Malik Ibrahim Malang, disubkultur dengan cara 1 ose bakteri diinokulasikan pada media *Nutrient Agar* (NA), dan diinkubasi dalam *incubator* selama 24 jam dengan kecepatan 120 rpm pada suhu 37°C (Rozaq, 2020).

### **3.5.2.2 Peremajaan *Aspergillus niger***

Jamur *Aspergillus niger* hasil isolasi dari TPA Talangagung, Kepanjen, Kabupaten Malang dan disimpan di laboratorium Mikrobiologi Jurusan Biologi,



Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri (UIN) Maulana Malik Ibrahim Malang, disubkultur dengan memindahkan 1 ose jamur pada media PDA (*Potato Dextrose Agar*), kemudian diinkubasi dan diamati pertumbuhannya selama 5 hari pada suhu ruang (Fadillah, 2020).

### **3.5.3 Pengukuran *Optical Density* (OD) *Bacillus subtilis***

Sebanyak 1 ose *Bacillus subtilis* diinokulasikan ke dalam media *Nutrient Broth* 10 mL, kemudian diinkubasi pada *incubator* selama 24 jam dengan kecepatan 180 rpm dan suhu 37°C. Setelah itu, 1 mL kultur bakteri dipindahkan ke dalam media *Nutrient Broth* 50 mL dan diukur *Optical Density* (OD) menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 600 nm (Fatimah, 2018).

### **3.5.4 Penyaringan Filtrat *Aspergillus niger***

Penyaringan dilakukan dengan menyiapkan kultur *Aspergillus niger* yang berada pada cawan petri. kemudian diambil aquades steril sebanyak 50 mL, dituang aquades sedikit demi sedikit kedalam biakan *Aspergillus niger*. Selanjutnya dikerok *Aspergillus niger* menggunakan kaca preparat yang telah disterilisasi. Setelah itu disaring inokulum menggunakan kasa steril pada beaker glass (Rachma, 2022).

### **3.5.4 Preparasi Sampel Plastik PET**

Sampel plastik PET adalah botol plastik air mineral yang diperoleh dengan cara memotong botol air mineral menjadi kotak berukuran diameter 1 cm.

Kemudian disterilisasi menggunakan alkohol 70%. Plastik disinari menggunakan UV selama 60 jam, Setelah itu potongan-potongan plastik ditimbang berat kering awal menggunakan neraca analitik (Balasubramanian, dkk., 2014; Sarkhel dkk., 2020).

### **3.5.5 Uji Biodegradasi PET**

Kemampuan bakteri dan jamur dalam kultur murni dan campuran untuk mendegradasi Polyethylene terephthalate (PET) dilakukan dengan menggunakan Erlenmeyer yang ditambahkan 50 mL media BH, plastik PET yang telah dipreparasi, serta 600  $\mu$ L inokulum *Bacillus subtilis*, 600  $\mu$ L inokulum *Aspergillus niger*, dan 600  $\mu$ L inokulum campuran (300  $\mu$ L inokulum *Bacillus subtilis* dan 300  $\mu$ L inokulum *Aspergillus niger*) dengan nilai OD yang digunakan adalah  $OD_{600} = 0,5$  ( $8 \times 10^5$  CFU/mL). Kemudian masing-masing diinkubasi selama 60 hari pada inkubator shaker dengan kecepatan 50 rpm. Sebagai kontrol, dilakukan uji yang hanya berisi plastik PET dalam media BH tanpa adanya penambahan inokulum bakteri, jamur, dan campuran (Ogunbayo dkk., 2019; Sarkhel dkk., 2020).

### **3.5.6 Analisis Penurunan Berat PET**

Setelah proses biodegradasi, potongan plastik diambil, kemudian dicuci menggunakan alkohol 70% dan dikeringanginkan. Selanjutnya ditimbang untuk mengetahui berat akhir plastik setelah mengalami biodegradasi, kemudian dihitung persentase degradasi plastik yang meliputi presentase kehilangan berat menggunakan persamaan 3.1 (Sarkhel dkk., 2020):

$$\% \text{Kehilangan Berat} = \frac{(\text{berat awal} - \text{berat akhir})}{\text{berat awal}} \times 100\% \dots\dots\dots(3.1)$$

### 3.5.7 Karakterisasi PET Menggunakan FTIR

Plastik PET sebelum didegradasi dan setelah didegradasi diidentifikasi perubahan gugus fungsinya menggunakan FTIR dengan cara di press pada *sample holder*, kemudian dimasukkan kedalam instrumen FTIR dan diukur pada rentang panjang gelombang 4000-400  $\text{cm}^{-1}$ . Hasil analisis akan terlihat dalam bentuk pengambilan data spektrum (Ojha dkk., 2017).

### 3.5.8 Karakterisasi PET Menggunakan SEM

Plastik PET kontrol dan PET dengan aktivitas degradasi tertinggi dicuci dengan alkohol dan dikeringkan, kemudian diidentifikasi perubahan struktur morfologinya menggunakan SEM dengan cara plastik PET dicuci menggunakan larutan SDS dan aquades selama beberapa menit, kemudian dibilas dengan etanol 70%. Plastik PET ditempelkan pada *stub* analisis SEM menggunakan tabung karbon, kemudian plastik dilapisi dengan emas selama 40 detik. Dilakukan analisis plastik PET dibawah mikroskop elektron resolusi tinggi (Gajendiran dkk., 2016).

## 3.6 Analisis Data

Data yang diperoleh meliputi data kuantitatif dan kualitatif. Data kuantitatif berupa persentase degradasi plastik PET dari *Bacillus subtilis*, *Aspergillus niger*, dan campuran. Data kualitatif berupa hasil identifikasi gugus

fungsi plastik PET sebelum dan setelah biodegradasi menggunakan FTIR, serta morfologi permukaan plastik PET dari kemampuan degradasi tertinggi yang dikarakterisasi menggunakan SEM. Data yang diperoleh dijelaskan secara deskriptif dengan melampirkan hasil yang diperoleh dan dibandingkan dengan literatur yang ada.

## **BAB IV**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

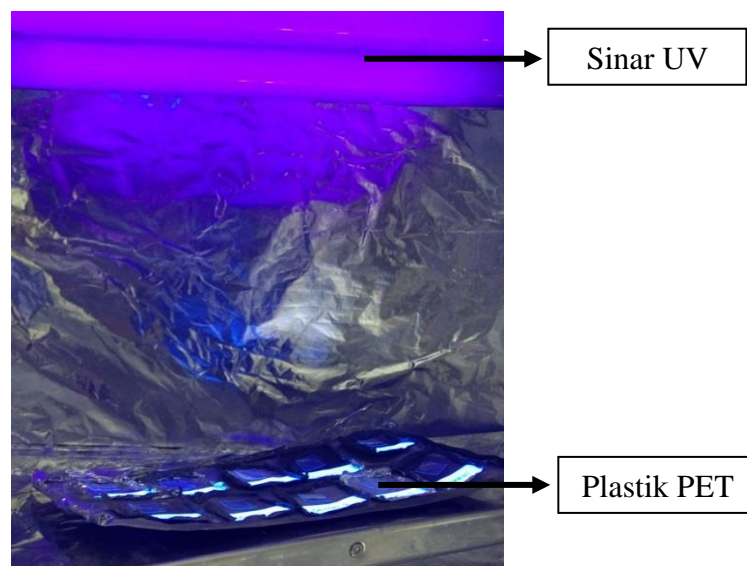
Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan di Laboratorium Bioteknologi, Mikrobiologi, dan Genetika yang meliputi 4 tahapan utama antara lain preparasi sampel plastik *polyethylene terephthalate* (PET) menggunakan sinar UV, peremajaan isolat *Bacillus subtilis* dan *Aspergillus niger*, uji kemampuan biodegradasi oleh isolat *Bacillus subtilis*, *Aspergillus niger*, dan campuran keduanya, serta karakterisasi menggunakan spektrofotometer FTIR dan SEM, sehingga diperoleh hasil yang dijelaskan dan digambarkan sebagaimana berikut.

#### **4.1 Preparasi Sampel Plastik PET**

Penggunaan sinar UV pada preparasi sampel plastik PET merupakan salah satu metode yang digunakan untuk mempersiapkan sampel plastik agar dapat terdegradasi oleh bakteri dan jamur. Preparasi plastik PET dilakukan dengan tujuan untuk mengubah permukaan plastik PET, sehingga dapat membantu mempermudah proses biodegradasi. Adapun tahapan preparasi meliputi perendaman plastik dalam etanol yang berfungsi untuk sterilisasi plastik dari mikroba lain yang tidak diinginkan dan penyinaran menggunakan sinar UV selama 60 jam yang berfungsi untuk membantu membuat kerusakan struktur kimia plastik PET.

Pengaruh lama paparan sinar UV yang diberikan pada permukaan plastik PET diharapkan dapat mengubah sifat hidrofobilitas plastik menjadi hidrofilitas. Perubahan tersebut disebabkan adanya oksidasi oleh sinar UV pada senyawa

polimer plastik PET. Permukaan plastik yang bersifat hidrofilik akan memudahkan koloni bakteri dan jamur menempel pada permukaan plastik. Koloni yang menempel mampu membentuk lapisan biofilm dipermukaan plastik, oleh karena itu hasil dari proses biodegradasi akan lebih maksimal (Kumar dan Raut, 2015, Triasita dan Maya, 2017).



Gambar 4.1 Preparasi plastik PET menggunakan sinar UV selama 60 jam

Menurut Waryat, dkk. (2013) Plastik PET yang bersifat hidrofilik memiliki kemampuan menyerap air yang tinggi. Kemampuan tersebut menyebabkan termoplastik lebih mudah diuraikan oleh bakteri dan jamur. Terurainya rantai panjang polietilen akan menyebabkan rantai utama polietilen putus menjadi bagian-bagian dengan berat molekul yang kecil. Bagian-bagian polietilen dengan berat molekul yang lebih kecil akan lebih mudah untuk diuraikan oleh bakteri dan jamur. Polietilen yang telah mengalami penurunan berat molekul lebih mudah diuraikan oleh mikroorganisme untuk dijadikan sumber karbon bagi pertumbuhannya. Perlakuan menggunakan sinar UV pada

plastik PET hanya mengubah permukaan PET dan tidak menyebabkan penurunan berat PET.

#### **4.2 Peremajaan Isolat *Bacillus subtilis* Dan *Aspergillus niger***

Bakteri dan jamur yang digunakan untuk biodegradasi dalam penelitian ini berasal dari lemari pendingin, sehingga harus diremajakan terlebih dahulu sebelum digunakan dalam proses biodegradasi. Peremajaan berfungsi untuk mendapatkan bakteri dan jamur yang aktif, karena sebelumnya dalam kondisi inaktif didalam lemari pendingin. Selain itu peremajaan dilakukan untuk mendapatkan biakan yang lebih baru dan muda, sehingga dapat digunakan sesuai dengan fungsinya (Charlena dkk. 2009; Mas'ud 2013).

Bakteri yang digunakan untuk uji biodegradasi adalah *Bacillus subtilis*. Bakteri ini merupakan hasil isolasi dari TPA Sampah Jalan Pisang Kota Malang yang memiliki potensi dalam mendegradasi polimer plastik. Isolat *Bacillus subtilis* dikultur pada media *Nutrient Agar* (NA) dengan menggunakan metode zig-zag (*Streak plate*). Metode ini merupakan metode yang digunakan untuk peremajaan bakteri dan dilakukan dengan cara menggoreskan bakteri yang diambil diatas permukaan media miring dari ujung bawah hingga atas secara zig-zag menggunakan jarum inokulasi dan diinkubasi selama 24 jam (Gandjar dkk., 1992; Cappucino dan Sherman, 2002).

Koloni isolat *Bacillus subtilis* hasil kultur pada media miring mempunyai karakteristik antara lain berwarna krem, ukuran koloni sedang dengan bentuk bulat dan tepian rata, elevasi (permukaan) rata dengan media, serta tembus cahaya (Rozaq, 2020).



Gambar 4.2 *Bacillus subtilis*

Hasil kultur *Bacillus subtilis* diukur nilai *Optical density* (OD) yang berfungsi untuk menghitung kuantitas kekeruhan sel *Bacillus subtilis* dan dilakukan dengan menginokulasikan pada media cair atau media *Nutrient broth* (NB). Pengukuran OD pada kultur *Bacillus subtilis* menunjukkan kerapatan sel bakteri di dalam media cair. Kuantitas kekeruhan ditunjukkan berdasarkan nilai absorbansi yang dihasilkan pada spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 600 nm. Semakin tinggi nilai absorbansi yang dihasilkan maka semakin banyak bakteri yang tumbuh. Pada penelitian ini didapatkan nilai OD *Bacillus subtilis* sebesar 0,599.

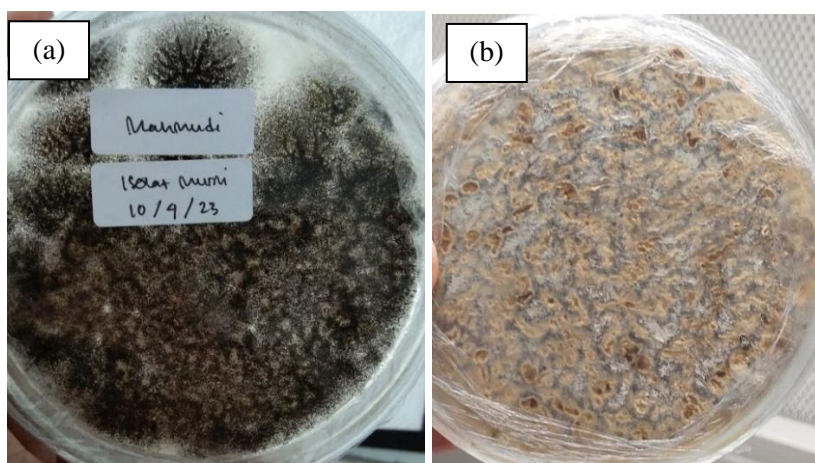
Adapun jamur yang digunakan adalah spesies *Aspergillus niger*. Isolat *Aspergillus niger* dikultur pada media *Potato Dextrose Agar* (PDA) dengan cara menggoreskan jamur diatas permukaan media padat menggunakan jarum inokulasi dan diinkubasi selama 5 hari pada suhu ruang. Perbedaan massa inkubasi antara jamur dan bakteri disebabkan karena struktur jamur yang lebih kompleks sehingga membutuhkan waktu yang lebih lama untuk pertumbuhannya. (Wijayanti, 2003).

Secara makroskopis *Aspergillus niger* memiliki karakteristik antara lain koloni berwarna hitam dengan pinggiran putih dan permukaan bawah koloni berwarna putih kekuningan hingga berwarna coklat. Secara mikroskopis jamur ini



memiliki vesikel berbentuk bulat hingga semi bulat. Konidia bulat hingga semi bulat dan berwarna coklat (Wangge dkk., 2012).

Hasil kultur *Aspergillus niger* dilakukan penyaringan untuk mendapatkan filtrat *Aspergillus niger* sebagai inokulum untuk uji biodegradasi. Inokulum dibuat dengan menyaring biakan yang ditambahkan Aquades steril dan dikeruk menggunakan kaca preparat steril tanpa mengikis bagian media PDA, serta disaring menggunakan kasa steril. Filtrat yang telah tersaring merupakan inokulum *Aspergillus niger* yang akan digunakan dalam proses biodegradasi.



Gambar 4.3 *Aspergillus niger* bagian atas (a) berwarna hitam dan bagian bawah (b) berwarna kuning kecoklatan

Bakteri dan jamur merupakan suatu mikroorganisme yang dapat ditemukan di beberapa lingkungan seperti tanah, air, dan udara. Allah Swt. menciptakan segala sesuatu yang ada di bumi ini dengan ukuran yang serapi-rapinya, termasuk di dalamnya adalah bakteri dan jamur. Di dalam Al-Quran mikroorganisme ini diistilahkan dengan kata *zarrah* yang berarti berukuran kecil. Makhluk Allah Swt. yang kecil ini disebutkan oleh Allah Swt. dalam surah Yunus ayat 61 yang berbunyi :

وَمَا تَكُونُ فِي شَأْنٍ وَمَا تَتْلُوا مِنْهُ مِنْ قُرْآنٍ وَلَا تَعْمَلُونَ مِنْ عَمَلٍ إِلَّا كُنَّا عَلَيْكُمْ شُهُودًا إِذْ تُفِيضُونَ فِيهِ وَمَا يَعْزُبُ عَنْ رَبِّكَ مِنْ مِثْقَالِ ذَرَّةٍ فِي الْأَرْضِ وَلَا فِي السَّمَاءِ وَلَا أَصْغَرَ مِنْ ذَلِكَ وَلَا أَكْبَرَ إِلَّا فِي

كِتَابٍ مُبِينٍ ﴿٦١﴾

Artinya: “Engkau (Nabi Muhammad) tidak berada dalam suatu urusan, tidak membaca suatu ayat Al-Qur’an, dan tidak pula mengerjakan suatu pekerjaan, kecuali Kami menjadi saksi atasmu ketika kamu melakukannya. Tidak ada yang luput sedikit pun dari (pengetahuan) Tuhanmu, walaupun seberat zarah, baik di bumi maupun di langit. Tidak ada sesuatu yang lebih kecil dan yang lebih besar daripada itu, kecuali semua tercatat dalam kitab yang nyata (Lauh Mahfuz)” (QS. Yunus (10): 61).

Berdasarkan *Tafsir Ibnu Katsir* ayat ini memberitahukan kepada kita bahwa semua hal yang terjadi di muka bumi ini telah diatur oleh Allah Swt. tak terkecuali adanya bakteri dan jamur yang termasuk ke dalam *zarrah* atau makhluk kecil. Lebih lanjut ayat ini juga memberikan pengetahuan bahwa tidak ada satupun di muka bumi ini yang luput dari pengawasan Allah Swt. Hal ini untuk menguatkan arti dari keluasan ilmu Allah, sehingga terasah keagungan dan kekuasaan-Nya (Abdullah, 2007).

#### 4.3 Uji Biodegradasi Plastik PET

Pengujian kemampuan biodegradasi bertujuan untuk mengetahui potensi *Bacillus subtilis*, *Aspergillus niger*, dan campuran keduanya dalam mendegradasi plastik PET. Pada pengujian kemampuan biodegradasi media yang digunakan adalah media *Bushnell haas* (BH) dengan pH 7. Media ini terdiri dari MgSO<sub>4</sub>, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>, CaCl<sub>2</sub>, dan FeCl<sub>3</sub>, sehingga mengandung unsur-unsur yang mampu memenuhi kebutuhan nutrisi untuk pertumbuhan mikroorganisme antara lain nitrogen, sulfur, fosfor, kalsium, kalium, magnesium,

dan besi (Cappucino dan Natalie, 2013). Media BH tidak mengandung unsur karbon, oleh karena itu masing-masing mikroba diharapkan mampu memanfaatkan plastik PET sebagai sumber karbon.

Uji biodegradasi dilakukan selama masa inkubasi 60 hari menggunakan *shaker incubator* pada kecepatan 50 rpm. Adanya *shaker* dalam proses biodegradasi dapat meningkatkan kemampuan mikroba dalam menempel pada permukaan plastik PET. Selain itu dengan dilakukan *shaker* dapat mencegah sel koloni mikroba tertimbun pada dasar media biakan. Menurut Sihalono (2011) dan Vadiska (2015) sel mikroba dapat mengapung pada media biakan apabila dilakukan pengocokan, sehingga nutrisi yang terkandung dalam media mampu dimanfaatkan secara optimal.

Pertumbuhan mikroba pada media cair dapat diamati dengan cara menumbuhkan mikroba pada media cair dan mengamati perubahan warna media. Berdasarkan pengamatan yang dilakukan setelah masa inkubasi 60 hari terdapat perubahan warna pada media *Bushnell Haas* (BH), dimana media BH tanpa penambahan mikroba (kontrol) berwarna bening, sedangkan media BH dengan penambahan *Bacillus subtilis* dan *Aspergillus niger* berwarna kekuningan. Perubahan warna pada media BH menunjukkan bahwa *Bacillus subtilis* dan *Aspergillus niger* mampu memanfaatkan sumber nutrisi pada media sehingga dapat tumbuh dengan baik didalam media. Dwijoseputro (2005), menyatakan bahwa ciri pertumbuhan mikroba pada media cair yaitu mengalami kekeruhan, terbentuk cincin, pelikel, ataupun endapan.

Kemampuan biodegradasi plastik PET pada penelitian ini didasarkan pada pengukuran presentase kehilangan berat plastik. Hilangnya berat plastik

disebabkan adanya aktivitas biodegradasi *Bacillus subtilis* dan *Aspergillus niger* pada potongan PET. Persentase kehilangan berat plastik diambil berdasarkan perhitungan selisih berat awal potongan plastik dan berat akhir (Persamaan 3.1) setelah masa inkubasi 60 hari. Berdasarkan perhitungan, didapatkan hasil persentase rata-rata pada Tabel 4.1 sebagaimana berikut.

Tabel 4.1 Persentase biodegradasi plastik PET

Jenis Perlakuan	%Biodegradasi
Kontrol (tanpa mikroba)	0
<i>Bacillus subtilis</i>	0,72
<i>Aspergillus niger</i>	1,11
Campuran <i>Bacillus subtilis</i> dan <i>Aspergillus niger</i>	0,87

Berdasarkan Tabel 4.1 kemampuan biodegradasi plastik PET yang paling tinggi adalah *Aspergillus niger* dengan persentase sebesar 1,11%, kemudian campuran *Bacillus subtilis* dan *Aspergillus niger* sebesar 0,87%, dan *Bacillus subtilis* sebesar 0,72%. Presentase biodegradasi plastik PET dari ketiga perlakuan tersebut menunjukkan hasil yang berbeda, dimana *Aspergillus niger* memiliki kemampuan degradasi tertinggi. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa antara isolat tunggal *Bacillus subtilis* dan *Aspergillus niger* maupun campuran, masing-masing memiliki tingkat kemampuan yang berbeda dalam mendegradasi plastik PET. Sebagaimana dijelaskan oleh Glass dan Swift (1989) bahwa kemampuan mikroorganisme antara satu dengan yang lain dalam mendegradasi plastik bervariasi, karena mikroorganisme memiliki karakteristik yang berbeda-beda.

Hasil penelitian ini sesuai dengan penelitian Sianipar dkk. (2022) dimana bakteri spesies *Bacillus* mampu mendegradasi plastik PET dengan persentase sebesar 0,62%. Pada penelitian Siregar, dkk. (2021) juga diperoleh bahwa *Aspergillus niger* mampu mendegradasi plastik dengan persentase sebesar 1,5%. Hal ini juga didapatkan pada penelitian Muhonja dkk. (2018) bahwa jamur spesies *Aspergillus* memiliki kemampuan degradasi sebesar 36,4% lebih tinggi dari pada bakteri spesies *Bacillus* dengan kemampuan degradasi sebesar 35,7%.

Adapun perbedaan aktivitas degradasi antara *Aspergillus niger* yang memiliki persentase biodegradasi yang lebih tinggi dibandingkan *Bacillus subtilis* disebabkan karena jamur memiliki hifa, dimana hifa jamur merupakan suatu keuntungan tersendiri dalam mendegradasi polimer plastik (Esmaili, dkk. 2013). Sebagaimana dinyatakan Ghatge dkk., (2020) bahwa jamur mampu menempel pada permukaan plastik dengan adanya hifa yang memperluas jaringan miselium sehingga dapat meningkatkan daya rekat untuk mensekresikan eksoenzim yang dapat memecah polimer dan lebih mudah dalam mendegradasi polimer plastik.

Campuran *Bacillus subtilis* dan *Aspergillus niger* diharapkan mampu menghasilkan persentase biodegradasi yang lebih tinggi dari pada isolat tunggal. Berdasarkan Tabel 4.1 persentase biodegradasi campuran lebih rendah dari pada isolat tunggal. Hasil ini memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan penelitian Xinhua Qi, dkk. (2021) dimana campuran dari dua jenis mikroba dapat mendegradasi plastik sebesar 13,6%. Menurut Ogunbayo, dkk. (2019) adanya kultur campuran menyebabkan terjadinya kerja sama enzim yang dikeluarkan baik oleh bakteri maupun jamur, sehingga pada kultur campuran dapat menghasilkan persentase biodegradasi yang lebih tinggi.

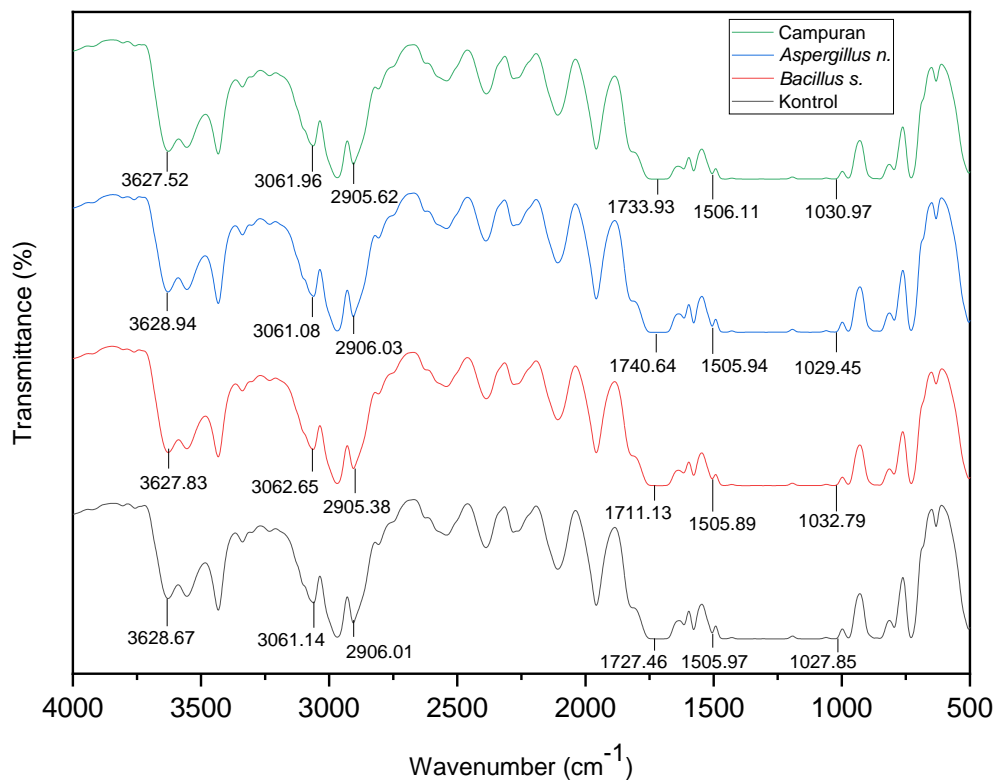
Pada penelitian ini, terdapat faktor yang mempengaruhi rendahnya persentase biodegradasi pada campuran *Bacillus subtilis* dan *Aspergillus niger* adalah perbedaan sumber isolasi mikroorganisme antara *Bacillus subtilis* dan *Aspergillus niger* yang digunakan dalam proses biodegradasi. Menurut Zhou dkk. (2014) menyatakan bahwa mikroorganisme yang dikultur bersama dan berasal dari sumber yang sama merupakan cara yang efektif untuk menguatkan efek sinergitas antara keduanya. Selain itu, penggunaan kultur campuran yang melibatkan *Bacillus subtilis* dan *Aspergillus niger* akan membutuhkan nutrisi yang lebih karena melibatkan 2 jenis mikroorganisme agar keduanya dapat bekerja optimal.

Waktu uji biodegradasi yang hanya dilakukan selama 60 hari juga dapat mempengaruhi pengurangan berat kering plastik PET. Beberapa penelitian dilakukan dengan masa inkubasi selama lebih dari 60 hari seperti hasil penelitian Muhonja dkk., (2018) melakukan uji biodegradasi dengan masa inkubasi selama 120 hari oleh *Aspergillus sp.* dan diperoleh hasil pengurangan berat kering sebesar 35,4%. Kemudian penelitian Usha dkk., (2011) melakukan uji biodegradasi dengan masa inkubasi selama 120 hari oleh *Aspergillus flavus* dan diperoleh hasil pengurangan berat kering sebesar 20,96%. Menurut Contat-Rodrigo dan Greus (2002) permukaan polietilena dengan rantai karbon yang panjang dan sifat hidrofobik yang tinggi menjadikan plastik polietilena sangat tahan terhadap biodegradasi. Sifat hidrofobik yang kuat, ikatan kimia dan berat molekul yang tinggi dapat menjadi penghambat degradasi oleh mikroba jika hanya dilakukan dalam waktu yang relatif singkat. Pada keadaan normal, dibutuhkan waktu selama

lebih dari 10 dekade agar polimer plastik dapat terdegradasi ke lingkungan (Ohtake dkk. 1998; Wanatabe dkk. 2003).

#### 4.4 Karakterisasi PET Menggunakan FTIR

Karakterisasi PET menggunakan instrumen FTIR (*Fourier Transform Infrared*) merupakan uji kualitatif yang digunakan untuk mengetahui perubahan pada gugus fungsi melalui serapan gelombang yang dihasilkan plastik PET kontrol dan plastik PET dengan perlakuan oleh *Bacillus subtilis*, *Aspergillus niger*, serta campuran *Bacillus subtilis* dan *Aspergillus niger*. PET memiliki bilangan gelombang yang khas sesuai dengan struktur penyusun polimer PET yang terdiri dari gugus O-H, C-H aromatik dan alifatik, C=O, C=C, serta gugus C-O. Hasil uji FTIR tertera pada Gambar 4.5 dan Tabel 4.2 sebagai berikut.



Gambar 4.4 Serapan FTIR plastik PET setelah biodegradasi

Tabel 4.2 Nilai bilangan gelombang plastik PET setelah biodegradasi

Perlakuan	Bilangan gelombang ( $\text{cm}^{-1}$ )					
	O-H	C-H Aromatik	C-H Alifatik	C=O	C=C	C-O
Kontrol	3628,67	3061,14	2906,01	1727,46	1505,97	1027,85
<i>Bacillus s.</i>	3627,83	3062,65	2905,38	1711,13	1505,89	1032,79
<i>Aspergillus n.</i>	3628,94	3061,08	2906,03	1740,64	1505,94	1029,45
Campuran <i>Bacillus s.</i>	3627,52	3061,96	2905,62	1733,93	1505,11	1030,97
<i>Aspergillus n.</i>						

Berdasarkan hasil uji FTIR muncul gugus fungsi khas PET antara lain pada bilangan gelombang  $3500\text{-}3650\text{ cm}^{-1}$  (OH),  $3010\text{-}3100\text{ cm}^{-1}$  (cincin aromatik),  $2850\text{-}2970\text{ cm}^{-1}$  (CH alifatik),  $1500\text{-}1600\text{ cm}^{-1}$  (ikatan rangkap etilen), dan  $1050\text{-}1300\text{ cm}^{-1}$  (ester). Hasil analisis FTIR menunjukkan bahwa tidak terdeteksi perubahan pada susunan struktur kimia PET, karena tidak menunjukkan adanya perubahan pada *peak* serapan gelombang. Terdapat beberapa perbedaan pada bilangan gelombang antara PET kontrol dan PET yang diberi perlakuan oleh *Bacillus subtilis*, *Aspergillus niger*, serta campuran *Bacillus subtilis* dan *Aspergillus niger*. Perbedaan tersebut berupa kenaikan dan penurunan serapan antara lain pada bilangan gelombang  $3061\text{ cm}^{-1}$  menjadi  $3062\text{ cm}^{-1}$  (C-H aromatik),  $3628\text{ cm}^{-1}$  menjadi  $3627\text{ cm}^{-1}$  (O-H), dan  $2906\text{ cm}^{-1}$  menjadi  $2905\text{ cm}^{-1}$  (C-H alifatik). Menurut Sianipar dkk. (2022) pergeseran bilangan gelombang ke nilai yang lebih rendah terjadi karena energi yang dihasilkan mikroba mampu membuat ikatan-ikatan pada rantai PET mengalami peregangan selama masa inkubasi. Peregangan tersebut menyebabkan bertambahnya panjang ikatan.



Semakin panjang ikatan, maka energi untuk memutuskan ikatan menjadi berkurang. Hal ini dapat memudahkan proses pemutusan ikatan pada rantai PET.

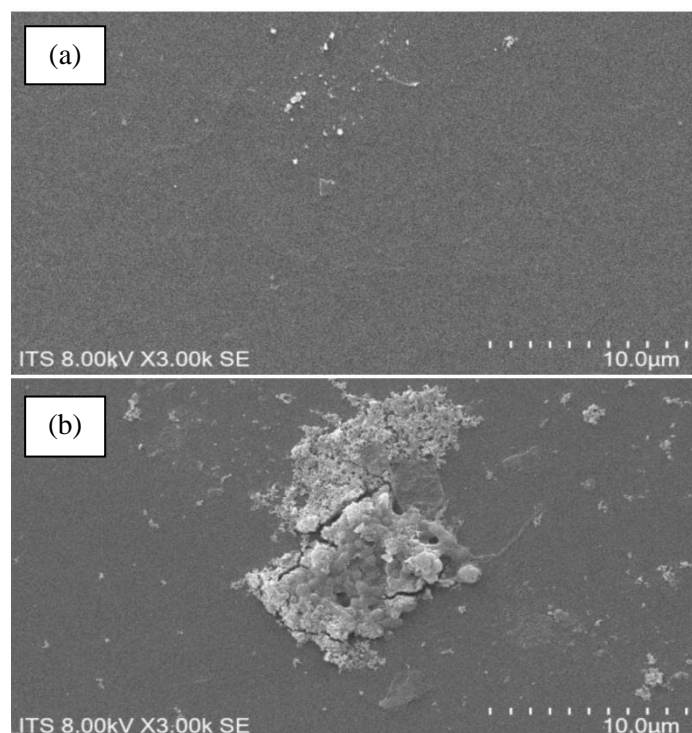
Kenaikan dan penurunan bilangan gelombang tidak terdeteksi pada plastik PET dengan semua perlakuan. Hal ini disebabkan karena perbedaan kemampuan metabolisme mikroorganisme. Menurut Zulaika, dkk. (2012) walaupun dari satu spesies yang sama, masing-masing mikroba mempunyai kemampuan yang berbeda-beda dalam mendegradasi polimer plastik. Berdasarkan hasil analisis FTIR menunjukkan bahwa perbedaan bilangan gelombang antara PET kontrol dengan PET *treatment* sangat kecil, sehingga dapat disimpulkan bahwa pada analisis FTIR tidak terdeteksi perubahan gugus fungsi plastik PET setelah biodegradasi selama 60 hari. Menurut Nowak dkk. (2011) dan Rohmah dkk. (2018) pemecahan rantai polimer merupakan suatu proses yang panjang dan paling sulit dalam proses biodegradasi, oleh karena itu dibutuhkan waktu inkubasi yang lebih lama untuk menghasilkan perubahan yang cukup pada gugus karbonil untuk melanjutkan proses dekomposisi.

#### **4.5 Karakterisasi PET Menggunakan SEM**

Karakterisasi PET menggunakan instrumen SEM (*Scanning Electron Microscopy*) digunakan untuk melihat adanya perubahan topografi pada permukaan plastik PET. SEM dapat memberikan informasi secara mikro dengan mendeteksi permukaan sampel PET sehingga dapat dilakukan analisis secara kualitatif. Setelah dilakukan perbandingan persentase biodegradasi dari *Bacillus subtilis*, *Aspergillus niger*, serta campuran *Bacillus subtilis* dan *Aspergillus niger* didapatkan bahwa *Aspergillus niger* memiliki aktivitas biodegradasi yang lebih

tinggi dengan persentase sebesar 1,11%. Oleh karena itu analisis SEM dilakukan pada bagian permukaan potongan plastik PET kontrol (tanpa penambahan mikroba) dan plastik PET yang diberi perlakuan oleh *Aspergillus niger*.

Analisis menggunakan SEM dilakukan pada perbesaran 1000x, 3000x, dan 5000x. Perbesaran ini didasarkan pada penelitian Sianipar dkk. (2022) dan penelitian Sarkhel dkk. (2020) yang melakukan analisis SEM pada perbesaran 2000x hingga 5000x dimana permukaan plastik PET setelah biodegradasi telah kehilangan kehalusannya, serta muncul retakan pada permukaan plastik. Adapun hasil analisis topografi plastik PET kontrol dan plastik PET dengan perlakuan *Aspergillus niger* dapat dilihat pada Gambar 4.6 sebagai berikut:



Gambar 4.5 Analisis SEM pada permukaan plastik PET setelah biodegradasi selama 60 hari (a) PET Kontrol dan (b) PET dengan penambahan *Aspergillus niger*

Potongan plastik PET setelah biodegradasi selama 60 hari seperti pada Gambar 4.6 menunjukkan bahwa permukaan potongan PET kontrol terlihat halus dan rata, sedangkan permukaan potongan PET dengan penambahan *Aspergillus niger* terlihat tidak rata, kasar, dan terdapat gumpalan. Adanya penambahan *Aspergillus niger* membuat permukaan PET mengalami pembengkakan ke arah luar pada bidang permukaan plastik, sehingga terlihat seperti adanya bongkahan yang menonjol. Permukaan plastik PET setelah proses degradasi oleh *Aspergillus niger* telah kehilangan kehalusannya, dan retakan terlihat jelas dibandingkan dengan permukaan PET tanpa penambahan mikroba (PET kontrol). Hasil ini juga didapatkan pada penelitian Gao dan Sun (2021) menggunakan analisa SEM pada plastik PET setelah biodegradasi yang menunjukkan adanya retakan dan terdapat rongga pada permukaan plastik akibat kolonisasi mikroba. Esmaili dkk. (2013) menyatakan bahwa sebelum penambahan mikroba plastik memiliki permukaan yang halus tanpa adanya kerusakan, namun setelah diinkubasi dengan mikroba terjadi erosi permukaan dan terbentuk rongga pada permukaan plastik, sehingga diasumsikan bahwa mikroba menembus ke dalam matriks PET selama degradasi, Penetrasi hifa ke dalam matriks, dan pembentukan biofilm yang mengakibatkan kerusakan pada permukaan film PET.

Menurut Wati dkk. (2021) biodegradasi plastik merupakan proses erosi pada permukaan plastik yang terjadi akibat sulitnya penetrasi enzim ekstraseluler ke dalam polimer plastik sehingga menimbulkan retakan pada permukaan plastik. Berdasarkan analisis topografi menggunakan SEM, kerusakan yang mengakibatkan permukaan plastik PET menjadi tidak rata mengindikasikan adanya *Aspergillus niger* yang menempel dan tumbuh membentuk lapisan biofilm

yang mengubah struktur permukaan PET dari rata menjadi bergelombang. Hal ini membuktikan terjadinya biodegradasi yang diakibatkan oleh aktivitas dari *Aspergillus niger*.

#### 4.6 Biodegradasi Menurut Pandangan Al-Qur'an

Polusi dalam pengertian secara ekologis adalah adanya sebuah perubahan yang tidak diinginkan, baik perubahan secara fisik, kimiawi, maupun biologis dan terjadi pada air, udara, dan tanah yang dapat membahayakan kehidupan manusia dan makhluk lainnya. Adapun polusi disebabkan oleh sisa-sisa benda yang dibuat, dipakai, serta dibuang oleh manusia. Sampah plastik merupakan salah satu contoh polusi yang sudah menjadi problematika yang nyata. Manusia adalah faktor utama dalam pendistribusian sampah plastik ke lingkungan. Sampah plastik yang terakumulasi secara terus menerus di lingkungan dapat menyebabkan pencemaran lingkungan (Odum, 1996; Wardana, 1999).

Secara umum Al-Qur'an telah menyebutkan bahwa problem krisis lingkungan berulang kembali menimpa manusia akibat ulah dan tindakannya sendiri terhadap alam. Sebagaimana Allah Swt. firmankan dalam surah Ar-Rum ayat 41-42 sebagai berikut:

ظَهَرَ الْفَسَادُ فِي الْبَرِّ وَالْبَحْرِ بِمَا كَسَبَتْ أَيْدِي النَّاسِ لِيُذِيقَهُمْ بَعْضَ الَّذِي عَمِلُوا لَعَلَّهُمْ يَرْجِعُونَ ﴿٤١﴾  
 قُلْ سِيرُوا فِي الْأَرْضِ فَانظُرُوا كَيْفَ كَانَ عَاقِبَةُ الَّذِينَ مِنْ قَبْلُ كَانُوا أَكْثَرُ هُمْ مُشْرِكِينَ ﴿٤٢﴾

*Artinya: Telah tampak kerusakan di darat dan di laut disebabkan perbuatan tangan manusia. (Melalui hal itu) Allah membuat mereka merasakan sebagian dari (akibat) perbuatan mereka agar mereka kembali (ke jalan yang benar). Katakanlah (Nabi Muhammad), "Bepergianlah di bumi, lalu lihatlah bagaimana kesudahan orang-orang dahulu. Kebanyakan mereka adalah orang-orang musyrik." (QS. Ar-Rum (30): 41-42).*

Secara ekologis ayat tersebut memiliki makna bahwa krisis lingkungan akan dapat terjadi apabila manusia tidak memperhatikan secara keseluruhan kelestarian ekologi ketika mengeksploitasi alam. Munculnya berbagai kerusakan lingkungan pada hakekatnya disebabkan adanya krisis mental manusia. Untuk menghindari hal tersebut, manusia dianjurkan kembali kepada Al-Qur'an dan sekaligus melakukan penelitian terhadap ekosistem lingkungan hidupnya (Zuhdi, 2012).

Bumi dan seisinya selain diciptakan untuk menunjang kehidupan manusia juga sebagai amanah agar manusia dapat menggunakan dan memanfaatkannya dengan baik. Prinsip keseimbangan dalam pemanfaatan sumber daya alam ditegaskan dalam ayat Al-Qur'an bahwa bumi yang Allah Swt. tundukkan tidak hanya untuk manusia, melainkan juga untuk makhluk lain. Sebagaimana Allah Swt. firmankan dalam surah Ar-Rahman ayat 10:

وَالْأَرْضَ وَضَعَهَا لِلْأَنَامِ ﴿١٠﴾

Artinya: “Bumi telah Dia bentangkan untuk makhluk(-Nya)” (QS. Ar-Rahman (55): 10).

Menurut Al-Syinqiti (1995) yang dimaksud dengan *al-anâm* adalah semua makhluk ciptaan Allah Swt. Sedangkan *lâm* pada kata *li al-anâm* memiliki makna hak dalam memanfaatkan. Sehingga ayat di atas menunjukkan bahwa manusia diberi hak dan wewenang oleh Allah Swt. dalam memanfaatkan sumber daya alam pada batas-batas kewajarannya. Oleh karena itu, dalam memanfaatkan sumber daya alam, manusia tidak diperkenankan mengeksploitasi secara sewenang-wenang agar tidak merusak lingkungan sekitar.

Islam memberikan tuntunan dan arahan kepada manusia dalam rangka mengelola alam demi kemaslahatan bersama, salah satunya adalah menggali dan mengeksploitasi potensi bumi dengan kebaikan. Sebagaimana Allah Swt. firmankan dalam surah Al-Jumu'ah ayat 10:

فَإِذَا قُضِيَتِ الصَّلَاةُ فَانْتَشِرُوا فِي الْأَرْضِ وَابْتَغُوا مِنْ فَضْلِ اللَّهِ وَاذْكُرُوا اللَّهَ كَثِيرًا لَّعَلَّكُمْ تُفْلِحُونَ



Artinya: “Apabila salat (Jumat) telah dilaksanakan, bertebaranlah kamu di bumi, carilah karunia Allah, dan ingatlah Allah sebanyak-banyaknya agar kamu beruntung” (QS. Al-Jumu'ah (62): 10).

Menurut Ma'luf (1986) dalam *Al-Munjid Fi Al-Lughah Wa Al-A'lam*, Kata *ibtaghû* berasal dari kata *baghâ* yang artinya mencari, pencarian yang bersifat progresif. Hal ini bermakna bahwa manusia diperbolehkan mengeksploitasi potensi bumi melalui berbagai upaya yang bersifat aktif dan kreatif tanpa menyia-nyiakan kesempatan dalam mengeksploitasi berbagai potensi yang ada. Salah satu potensi yang dapat dieksplorasi sebagai penunjang kehidupan adalah pemanfaatan mikroorganisme.

Penelitian ini termasuk salah satu pemanfaatan mikroorganisme seperti *Bacillus subtilis* dan *Aspergillus niger* sebagai salah satu alternatif dalam penanganan sampah plastik melalui proses biodegradasi sebagai upaya untuk membersihkan lingkungan, menangani pencemaran lingkungan dan mencegah kerusakan lingkungan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa *Bacillus subtilis* dan *Aspergillus niger* mampu mendegradasi plastik PET sebesar 0,72% hingga 1,11%. *Bacillus subtilis* dan *Aspergillus niger* memiliki enzim yang mampu memecah rantai polimer plastik menjadi monomer-monomernya sehingga mampu

memudahkan proses biodegradasi plastik. Kemampuan bakteri dan jamur dalam mendegradasi plastik ini menjadi salah satu petunjuk dan bukti bahwa Allah Swt. tidak menciptakan segala sesuatu kecuali masing-masing memiliki peran dan tujuannya.

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa:

1. Kemampuan biodegradasi PET tertinggi dimiliki oleh *Aspergillus niger* dengan presentase degradasi sebesar 1,11%.
2. Berdasarkan analisis FTIR tidak terdeteksi perubahan gugus fungsi, karena tidak terdapat perbedaan pada bilangan gelombang antara plastik PET sebelum dan sesudah biodegradasi.
3. Berdasarkan analisis SEM pada plastik PET kontrol permukaan terlihat halus dan rata, sedangkan PET dengan kemampuan degradasi tertinggi permukaannya tidak rata, dan terdapat gumpalan seperti bongkahan yang menonjol.

#### **5.2 Saran**

Penelitian selanjutnya perlu dilakukan penambahan konsentrasi inokulum dan nilai *Optical Density* (OD) untuk meningkatkan kemampuan biodegradasi. Optimasi parameter suhu dan pH untuk mengetahui suhu dan pH optimum dalam mendegradasi plastik PET pada kultur tunggal dan campuran. Selain itu perlu dilakukan variasi lama inkubasi untuk mendapatkan kemampuan biodegradasi yang lebih maksimal.



## DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, M. 2007. Tafsir Ibnu Katsir Jilid 5. Bogor: Pustaka Imam Asy-Syafi'i.
- Al-Azzawi, Farah. 2015. Degradation Studies on Recycled Polyethylene Terephthalate. *Thesis*. Polymer Science and Engineering Sir John Class Faculty of Art, Architecture and Design. London Metropolitan University.
- Asmita, K., Shubhamsingh, T., & Tejashree, S. 2015. Isolation of Plastic Degrading Micro-organisms from Soil Samples Collected at Various Locations in Mumbai, India. *International Research Journal of Environment Sciences*, 4(3), 77–85.
- Austin, H. P., Allen, M. D., Donohoe, B. S., Rorrer, N. A., Kearns, F. L., Silveira, R. L. 2018. Characterization And Engineering of a Plastic Degrading Aromatic Polyesterase. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 115, E4350–E4357. doi: 10.1073/pnas.1718804115
- Balasubramanian, V., Natarajan, K., Rajeshkannan, V. dan Perumal, P. 2014. Enhancement of In Vitro High Density Polyethylene (HDPE) Degradation by Physical, Chemical, and Biological Treatments. *Environ Sci Pollut Res*.
- Bartolome, L., Imran, M., Cho, B. G., Al-Masry, W. A., and Kim, D. H. 2012. Recent Developments in the Chemical Recycling of PET, in Material Recycling - Trends and Perspectives. *Rijeka InTech*, pp. 65-84.
- Bunaciu, A.A., Aboul-Enein, H. Y., & Fleschin, S. 2011. Recent Applications of Fourier Transform Infrared Spectrophotometry in Herbal Medicine Analysis. *Applied Spectroscopy Reviews*. 46(4): 251-260 DOI: [https://10.1080/05704928.2011.565532](https://doi.org/10.1080/05704928.2011.565532).
- Cappuccino, J. G. dan Sherman, N. 2002. Microbiology A Laboratory Manual 6th ed. Menlo Park : The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc.
- Cappucino, J.G & Natalie, S. 2013. *Manual Laboratorium Biologi*. Jakarta: EGC.
- Carniel A, Valoni É, Nicomedes J. 2017. Lipase from *Candida antarctica* (CALB) and cutinase from *Humicola insolens* act synergistically for PET hydrolysis to terephthalic acid. *Process Biochem* 59:84–90. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2016.07.023>
- Carr, C.M., Clarke, D.J., and Dobson, A.D.W. 2020. Microbial Polyethylene Terephthalate Hydrolases: Current and Future Perspectives. *Front. Microbiol.* 11:571265. doi: 10.3389/fmicb.2020.571265.

- Charlena, Haris, Abdul, dan Karwati. 2009. Degradasi Hidrokarbon pada Tanah Tercemar Minyak Bumi dengan Isolat A10 dan D8. *Prosiding Seminar Nasional Sains II*.
- Chaves MRB, Lima MLSO, Malafatti-Picca L. 2018. A practical fluorescence-based screening protocol for polyethylene terephthalate degrading microorganisms. *J Braz Chem Soc* 29:1278– 1285. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20170224>
- Choudhary, Om Prakash and Priyanka. 2017. Scanning Electron Microscope: Advantages and Disadvantage in Imaging Components. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*.6(5):1877-1882
- Contat-Rodrigo, I., and R. Greus. 2002. Biodegradation Studies on LDPE filled with Biodegradable Additives: Morphological Changes. *J Appl Polym Sci*. 83: 1683–1691
- Das, M. P. dan Kumar, S. 2013. Influence of Cell Surface Hydrophobicity in Colonization and Biofilm Formation on LDPE Biodegradation. *Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*.
- Dey, S., Singh, A. K., & Sigh, G. 2016. Biodegradation Ability of Bacteria and Thermocol Cups. *European Journal of Biomedical and Pharmaceutical Science*. 3(10): 272-277. ISSN: 2349-8870.
- Dhaka, V., Singh, S., Anil, A. G., Naik, S. K., Garg, S., Samuel, J., Kumar, M., Ramamurthy, P. C., Singh, J. 2022. Occurrence, Toxicity and Remediation of Polyethylene Terephthalate Plastic: A Review. *Environmental Chemistry Letters*. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01384-8>.
- Dwicania, Elsa. 2019. *Biodegradasi Limbah Plastik Oleh Mikroorganisme*. Jakarta: Universitas Trisakti.
- Dwidjoseputro. 1994. *Dasar-dasar Mikrobiologi*. Jakarta: Djambatan.
- Esmaili A, Pourbabaee AA, Alikhani HA, Shabani F, Esmaili E. 2013. Biodegradation of Low-Density Polyethylene (LDPE) by Mixed Culture of *Lysinibacillus xylanilyticus* and *Aspergillus niger* in Soil. *PLoS ONE* 8(9): e71720. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0071720>.
- Fadilla, M., N. 2020. Biodegradasi LDPE (*Low Density Polyethylene*) Oleh Isolat Fungi Indegenus Asal Tempat Pembuangan Akhir Talangagung, Kepanjen, Kabupaten Malang. *Skripsi*. Jurusan Biologi Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
- Fadlilah, Fiki Rahmah dan Maya Shovitri. 2014. Potensi Isolat Bakteri Bacillus Dalam Mendegradasi Plastik Dengan Metode Kolom Winogardsky. *Jurnal Teknik Pomits*. 3 (2).

- Farzi, A., Dehnad, A., and Fotouhi, A. F. 2019. Biodegradation of Polyethylene Terephthalate Waste Using *Streptomyces* Species and Kinetic Modeling of The Process. *Biocatal. Agricult. Biotechnol.* 17, 25–31. doi: 10.1016/j.bcab.2018.11.002.
- Fatihah, Safira Waznah. 2018. Biodekolorisasi Metilen Biru Oleh Kultur Campuran *Pseudomonas aeruginosa* dan Jamur Pelapuk Putih *Phlebia brevispora*. *Skripsi*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Gajendiran, A., Khrisnamoorthy, 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.
- Gandjar, I, R.K. Isworo, M. Wibowo & S. Lanira. 1992. *Pedoman Praktikum Mikrobiologi Dasar*. Depok: Jurusan Biologi FMIPA-UI.
- Gao, Rongrong. Sun, Casomin. 2021. A Marine Bacterial Community Capable of Degrading Poly(ethylene terephthalate) and Polyethylene. *Journal of Hazardous Material*. Volume 416.
- Garside, M. 2019. Global PET bottle production 2004-2021. Available at : <https://www.statista.com>. (diakses tanggal 04 Oktober 2020).
- Geyer, R., Jambeck, J.R., Law, K.L. 2017. Production, Use, and Fate of all Plastics Ever Made. *Sci Adv.* 3:e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>.
- Ghatge, S., Yang, Y., Ahn, J. H., & Hur, H. G. 2020. Biodegradation of Polyethylene: a Brief Review. *Applied Biological Chemistry*, 63(1).
- Glass, J.E., and G. Swift. 1989. Agricultural and Synthetic Polymers, Biodegradation and Utilization. *Acs Symposium Series 433*. American Chemical Society, Washington DC.
- Hiraga, K., Taniguchi, I., Yoshida, S., Kimura, Y., and Oda, K. 2019. Biodegradation of Waste PET. *EMBO Rep.* 20:e49365.
- Huang X, Cao L, Qin Z. 2018. Tat-independent secretion of polyethylene terephthalate hydrolase petase in *Bacillus subtilis* 168 mediated by its native signal peptide. *J Agric Food Chem.* 66:13217–13227. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b05038>
- Islami, A., N. 2019. *Biodegradasi Plastik Oleh Mikroorganisme*. Jakarta: Universitas Trisakti.
- Jaiswal, S., Sharma, B., and Shukla, P. 2020. Integrated Approaches in Microbial Degradation of Plastics. *Environ. Technol. Innovat.* 17: 100567. doi: 10.1016/j.eti. 2019.100567.

- Jamilatun, M., Azzahra, N., & Aminah, A. 2020. Perbandingan Pertumbuhan *Aspergillus fumigatus* Pada Media Instan Modifikasi *Carrot Sucrose Agar* dan *Potato Dextrose Agar*. *Jurnal Mikologi Indonesia*, 4(1), 168-174.
- Jumaah, O. S. 2017. Screening of Plastic Degrading Bacteria From Dumped Soil Area. *IOSR J. Environ. Sci. Toxicol. Food Technol.* 11, 93–98. doi: 10.9790/2402- 1105029398.
- Joutey, N.T., Bahafid, W., Sayel, H., and El Ghachtouli. 2014. Biodegradation: Involved Microorganisms and Genetically Engineered Microorganism. *Intech*, Maroko.
- Kawai, F., Kawabata, T., and Oda, M. 2019. Current Knowledge on Enzymatic PET Degradation and its Possible Application to Waste Stream Management and Other Fields. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 103,4253–4268. doi:10.1007/s00253019-09717-y.
- Kawai F, Oda M, Tamashiro T. 2014. A novel Ca<sup>2+</sup>-activated, thermostabilized polyesterase capable of hydrolyzing polyethylene terephthalate from *Saccharomonosporaviridis* AHK190. *Appl Microbiol Biotechnol* 98:10053–10064. <https://doi.org/10.1007/s00253-014-5860-y>
- Khafidloh, Eli Nur. 2020. Isolasi dan Seleksi Bakteri Indigen Pendegradasi Hidrokarbon Minyak Bumi Pada Tanah Di Lokasi Tambang Minyak Wonocolo, Bojonegoro. *Skripsi*. Surabaya UIN Sunan Ampel Surabaya.
- Khoironi, Adian and Anggoro, Sutrisno and Sudarno, Sudarno. 2019. Febomena Degradasi Sampah Plastik Polietilen Tereftalat Dan Polipropilen Di Dalam Sistem Perairan. *Doctoral Thesis*. School of Postgraduate Studies.
- Kumar, S.D & Raut, S. 2015. Microbial Degradation of Low Density Polyethylene (LDPE): A Review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 1(13). <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece-2015.01.003>
- Kumar, A. A., Karthick, K., & Arumugam, K. P. 2011. Biodegradable Polymers and Its Applications. *International Journal of Bioscience, Biochemistry and Bioinformatics*. 1(3), 173–176.
- L'Annunziata, M. 2012. Handbook of Radioactivity Analysis, 3rd edn. *Elsevier* USA.
- Lazuardi, G., & Sari, E. 2013. Preparation and Characterization Based Bioplastic Chitosan and Cassava Strach With Glycerol Plazticizer. *UNESA Journal of Chemistry* 2(3), pp. 161-166.
- Liu, J., Xu, G., Dong, W. 2018. Biodegradation of Diethyl Terephthalate and Polyethylene Terephthalate by A Novel Identified Degradar *Delftia* sp. WL-3 and Its Proposed Metabolic Pathway. *Lett Appl Microbiol.* 67:254–261. <https://doi.org/10.1111/lam.13014>.

- Liu, C., Shi, C., Zhu, S., Wei, R., and Yin, C.-C. 2019. Structural and Functional Characterization of Polyethylene Terephthalate Hydrolase From *Ideonella sakaiensis*. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 508, 289–294. doi: 10.1016/j.bbrc.2018.11.148.
- Ma'luf, Louis. 1986. *Al-Munjid Fi Al-Lughah Wa Al-A'lam*. Beirut: Dar al Misriq.
- Mas'ud, Fajriyati. 2013. *Media, Isolasi, Sterilisasi, Peremajaan, dan Penyimpanan Mikroba*. PPT Diterbitkan.
- Mohanan N, Montazer Z, Sharma PK and Levin DB 2020. Microbial and Enzymatic Degradation of Synthetic Plastics. *Front. Microbiol.* 11:580709. doi: 10.3389/fmicb.2020.580709.
- Muhonja, C. N., Makonde, H., Magoma, G. dan Imbuga, M. 2018. Biodegradability of Polyethylene by Bacteria and Fungi from Dandora Dumpsite Nairobi Kenya. *Journal Pone*. Hal. 1-17.
- Murti, A. N. S. 2014. Isolasi dan Karakterisasi Bakteri Pendegradasi Plastik Hitam dari TPA (Tempat Pembuangan Akhir) Sampah Bakung Kota Bandar Lampung dengan Teknik Konvensional. *Skripsi*. Lampung : FMIPA Universitas Lampung.
- Nakkabi, A., Elmoualij, N., Sadiki, M., Saad, I., Fahim, M. 2015. Biodegradation of Poly (Ethylene Terephthalate) by *Bacillus Subtilis*. *International Journal of Recent Advances in Multidisciplinary Research*. Vol. 02, Issue 12, pp. 1060-1062.
- Nanda, S., Berruti, F. 2021. Thermochemical conversion of plastic waste to fuels: a review. *Environ Chem Lett.* 19 :123–148.
- Nowak, B., Pajak, J., labuzek, S., Rymarz, G., Talik, E. 2011. Biodegradation of Poly(ethylene terephthalate) Modified With Polyester “Bionelle” by *Penicillium funiculosum*. *Polimery*. Vol. 56.
- Odum, Eugene P. 1996. *Dasar-dasar Ekologi, terj. Tjahyono Samingan, B. Srigandono*. Yogyakarta: Gajah Mada University Press.
- Ogunbayo, A. O., Olanipekun, O. O. and Adamu, I. A. 2019. Preliminary Studies on the Microbial Degradation of Plastic Waste Using *Aspergillus niger* and *Pseudomonas sp.* *Journal of Environmental Protection*. 10, 625-631.
- Ohtake, Y., Kobayashi, T., Asabe, H., and N. Murakami. 1998. Studies on Biodegradation of LDPE Observation of LDPE Films Scattered in Agricultural Fields or in Garden Soil. *Polym Degrad Stab.* 60: 79–84.
- Ojha, Nupur., Neha Pradhan., Surjit Singh, Anil Barla., Anamika Shivastava., Pradip Khatua and Vivak Rai. 2017. Evaluation of HDPE and LDPE Degradation by Fungus, Implemented by Statistical Optimization. *Scientific Reports*. DOI: 10.1038/srep39515.

- Pambudi, A., Fari, M., & Nurdiansah, H. 2017. Analisis Mrfologi dan Spektroskopi Inframerah Serat Bambu Betung (*Dendrocalmus asper*) Hasil Produksi Alkalisasi Sebagai Penguat Komposit Absorpsi Suara. *Jurnal Teknik ITS*. 6 (2). ISSN: 2337-3539
- Perera, M., Wijayarathna, D., Wijesundera, S., Chinthaka M., Seneviratne, G., and Jayasena, S. 2019. Biofilm Mediated Synergistic Degradation of Hexadecane by a Naturally Formed Community Comprising *Aspergillus flavus* and *Bacillus cereus* Group. *BMC Microbiol.* 19, 84.
- PlasticsInsight. 2017. Polyethylene Terephthalate (PET): Production, Price, Market and its Properties. Available online at: <https://www.plasticsinsight.com> (Diakses Tanggal 10 Oktober 2021).
- Rammer, L-E. 2013. Two novel class II hydrophobins from *Trichoderma* stimulate enzymatic hydrolysis of poly(ethylene terephthalate) when expressed as a fusion protein. *Journal American Society of Microbiology, Applied and Enviromental Microbiology*, doi:10.1128/AEM.01132-13.
- Rohmah, U.M., Shovitri, M., dan Kuswytasari, N.D. 2018. Degradasi Plastik oleh Jamur *Aspergillus terreus* (LM 1021) Pada pH 5 dan 6; Serta Suhu 25°C dan 35°C. *Jurnal Sains Dan Seni ITS*. Vol. 7, No. 2.
- Rozaq, H.N. 2020. Uji Aktivitas dan Identifikasi Genotip 16S rRNA Bakteri Pendegradasi Plastik LDPE Hasil Isolasi Dari TPA Pisang Kipas Malang. *Skripsi*. Jurusan Kimia Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
- Sain, S., Sengupta, S., Kar, A., Mukhopadhyay, A., Sengupta, S., Kar Ray, D. 2014. Effect of Modified Cellulose Fibres on The Biodegradation Behaviour of In-Situ Formed PMMA/Cellulose Composites In Soil Environment: Isolation and Identification of The Composite Degrading Fungus. *Journal of Polymer Degradation and Stability*. 9:156–165. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.11.012>.
- Sakirman. 2016. Urgensi Masalah Dalam Konsep Ekonomi Syariah. *PALITA: Journal of Social-Religion Research* 1, No. 1: 23.
- Sangale, M.K., Shahnawaz, M., & Ade, A.B. 2019. Potential of Fungi Isolated from The Dumping Sites mangrove Rhizosphere Soil to Degrade Polythene. *Sci Rep* 9, 5390. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41448-y>.
- Sarengat, N. 2011. Plastik Ramah Lingkungan (Fotodegradasi) dari Kopolimerisasi Tempel LDPE/Tapioka dengan Maleat Anhidrat. *Majalah Kulit, Karet, dan Plastik*. 27(1): 31-37
- Sarker, M., Kabir, A., Rashid, M. M., Molla, M., and Mohammad, A. S. M. D. 2011. Waste Polyethylene Terephthalate (PETE-1) Conversion into Liquid Fuel. *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications*. vol. 1, pp. 1-5.

- Sarkhel, R., Sengaputra, S., Das, P., Bhowal, A. 2020. Comparative Biodegradation Study of Polymer From Plastic Bottle Waste Using Novel Isolated Bacteria and Fungi from Marine source. *J. PolymRes* 27, 16. <https://doi.org/10.1007/s10965-019-1973-4>.
- 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.2015.01.03>.
- Setiawan, Gregorius Nico Adi. 2021. The Mechanism of Microorganisms Biodegradation of Polyethylene Plastic As Food Packaging Material A Review. *Other Thesis*, Universitas Katholik Soegijapranata Semarang.
- Shrestha, J. K., Joshi, D. R., Regmi, P., Badahit, G. 2019. Isolation and Identification of Low Density Polyethylene (LDPE) Degrading *Bacillus* sp. from a Soil of Landfill Site. *Acta Scientific Microbiology*. 2.4:30-34.
- Sianipar, E.M., Awaluddin, A., Saryono. 2022. Uji Biodegradasi Polyethylene Terephthalate (PET) Oleh Bakteri Termofilik Yang Diisolasi Dari Sumber Air Panas Bukik Kili, Solok, Sumatera Barat. *Skripsi*. Progam Studi Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Riau.
- Sihalono, E.B. 2011. Evaluasi Biodegradabilitas Plastik Berbahan Dasar Campuran Pati dan Polietilen Menggunakan Metode Enzimatik, Konsorsia Mikroba, dan Pengomposan. *Skripsi*. Progam Studi Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- Singh, B., & Sharma, N. 2008. Mechanistic implications of plastic degradation. *Polymer Degradation and Stability*, 93(3), 561–584.
- Sinha, V. K., Patel, M. R., Patel, J. V. 2010. PET Waste Management by Chemical Recycling: A Review. *J Polym Environ*. 18: 18–25p.
- Siregar, R.M., Yusuf, M., Nufrajani, Dari N., Siregar R., Rahmah, M., Nasution M.H., dan Widodo P.A. 2021. Biodegradation Study of LDPE/PCL Polyblend Plastic Film by Using The Fungus *Aspergillus niger*. *The 8th Annual International Seminar On Trends In Science And Science Education*. AIP Publishing.
- Sowmya, H. V., Bellibatlu, R., Nayanashree, G., Basaiah, T., Krishnappa, M. 2015. Polyethylene Degradation by Fungal Consortium. *International Journal of Enviromental Research*. Vol. 9(3): 823-830.
- Sriningsih, Atik dan Sovitri, Maya. 2015. Potensi Isolat Bakteri *Pseudomonas* Sebagai Pendegradasi Plastik. *Jurnal Sains dan Seni*. ITS. Vol 4 No. 2.

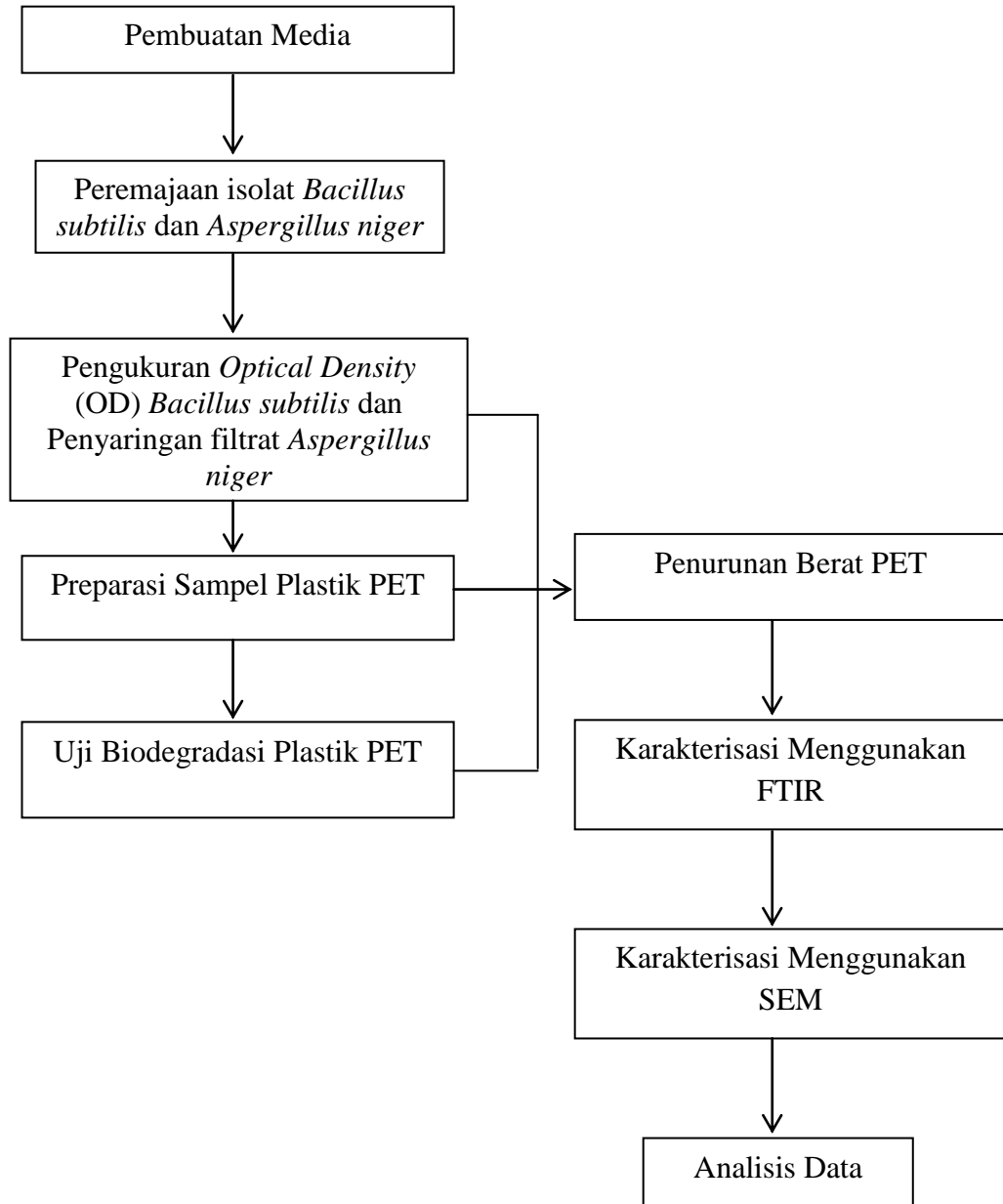
- Suharpina, Aziz I.R., Sugiharto A. 2021. Biodegradasi Plastik LDPE Oleh *Aspergillus niger* dan *Pleurotus sp.* *Jurnal Teknosains*. Volume 15, Nomor 3. Hlm. 381-388.
- Sumarsono, T. 2011. Efektivitas Jenis dan Konsentrasi Nutrien dalam Bioremediasi Tanah Tervemar Minyak Mentah yang Diaugmentasi Dengan Konsorsium Bakteri. *Skripsi*. Departemen Biologi FSAINTEK Universitas Airlangga, Surabaya.
- Sya'diyah, Walimatus. 2021. Uji Aktivitas Antibiofilm *Aspergillus oryzae* Terhadap Biofilm *Klebsiella pneumoniae*. *Skripsi*. Program Studi Pendidikan Dokter, Fakultas Kedokteran dan Ilmu Kesehatan, UIN Maulana Malik Ibrahim Malang.
- Syinqiti, Muhammad al-Amin bin Muhammad al-Mukhtar al-. 1995. *Adwa'u Al-Bayan Fi Idhah Al-Qur'an Bi Alquran*. Vol. 7. Beirut: Dar al-Fikr.
- Tim Kemenag. 2013. *Maqashid Al-Syari'ah: Memahami Tujuan Utama Syariah*. Jakarta: Lajnah Pentashihan al-Quran, 183.
- Triasita, A.R & Shovitri.M. 2017. Degradasi Plastik Oleh *Bacillus sp* PL01 pada Medium Air Kolam dengan Penambahan Monosodium Glutamat. *Jurnal Sains dan Seni ITS*. 6(2):2337-3520.
- Usha R, Sangeetha T, Palaniswamy M. 2011. Screening of Polyethylene Degrading Microorganisms from Garbage Soil. *Libyan Agric Res Cen J. Int*; 2.
- Vadiska,R.T., Wisana, I.D.G.H.,& Mak'ruf, M.R. 2015. Orbital Shaking Incubator Berbasis Mikrokontroller Atmega 8535. *Seminar Tugas Akhir*.
- Vague M, Chan G, Roberts C. 2019. Pseudomonas isolates degrade and form biofilms on polyethylene terephthalate (PET) plastic. bioRxiv 647321. <https://doi.org/10.1101/647321>
- Vakili M. H., Haghshenas Fard M. 2010. Chemical Recycling of Polyethylene Terephthalate Wastes. *World Appl Sci J*. 8(7): 839–46p.
- Venkatachalam, S., Nayak, S. G., Labde, J. V., Gharal, P. R., Rao, K., Kelkar, A. K. 2012. Degradation and recyclability of poly (ethylene terephthalate). In: Polyester (pp 75–98). *Rijeka, Croatia: InTech*.
- Wangge, E. S. A. 2012. Isolasi Dan Identifikasi Jamur Penghasil Mikotoksin Pada Biji Kakao Kering Yang Dihasilkan Di Flores-Lembata. *Agrica*, 6(1), 23–32.
- Wardana, Wisnu Arya. 1999. *Dampak Pencemaran Lingkungan*, Yogyakarta: Andi Offset.



- Wanatabe, M., Kawai, F., Shibata, M., Yokoyama, S., and Y. Sudate. 2003. Computational Method for Analysis of Polyethylene Biodegradation. *J Comput Appl Math.* 161: 133–144.
- Wati, N.S., Armaini, Alfajri, T., Sahira, I. 2021. Efektisitas Bakteri Untuk Degradasi Sampah Plastik Yang Diisolasi Dari Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Air Dingin Padang. *Jurnal Kimia Saintek dan Pendidikan.* Volume V, Nomor 2, Hal 104-109.
- Waryat, Romli M., Suryani A., Yuliasih I., Nasiri S. J. A. 2013. Karakteristik Mekanik, Permeabilitas Dan Biodegradabilitas Plastik Biodegradable Berbahan Baku Komposit Pati Termoplastik-LLDPE. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian.* 23 (2): 153-163.
- Webb, H., Arnott, J., Crawford, R., and Ivanova, E. 2012. Plastic Degradation and Its Environmental Implications with special Reference to Poly(ethylene terephthalate). *Polymers,* 5(1): 1-18.
- Wijayanti, Budi. 2003. Penggunaan *Serratia mercescens* DS8 untuk Pengendalian Penyakit Busuk Batang Panili. *Skripsi.* Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Qi X, Ma Y, Chang H, Li B, Ding M and Yuan Y. 2021. Evaluation of PET Degradation Using Artificial Microbial Consortia. *Front. Microbiol.* 12:778828. doi: 10.3389/fmicb.2021.778828
- Yoon, M. G. 2012. Biodegradation of Polyethylene by a Soil Bacterium and Alkb Cloned Recombinant Cell. *Journal Bioremed Biodegrad.* 3 (4) : 1-8.
- Yoshida, S., Hiraga, K., Takehana, T., Taniguchi, I., Yamaji, H., Maeda, Y., Toyohara, K., Miyamoto, K., Kimura, Y., Oda, K. 2016. A Bacterium that Degrades and Assimilates Poly(ethylene terephthalate). *Science.* 351:1196–1199. <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>.
- Zhou, D., Zhang, X., Du, Y., Dong, S., Xu, Z., & Yan, L. 2014. Insights Into the Synergistic Effect of Fungi and Bacteria for Reactive Red Decolorization. *Journal of Spectroscopy,* 0-4.
- Zuhdi, Achmad Cholil. 2012. Krisis Lingkungan Hidup Dalam Perspektif AlQuran, Jurnal Mutawâtir, Vol.2. No.2.
- Zulaika, A, Taniwiryono, D, dan Hidayat, YS. 2012. Penetapan Beberapa Isolat *Trichoderma* Sebagai Mikroba Endofit. Jakarta. University al-azhar Indonesia.
- Zulaika, Aidha and Soesilo, Tri Edhi Budhi and Noriko, Nita. 2017. Penentuan Potensi *Trichoderma sp.* Dalam Proses Degradasi Sampah Plastik Rumah Tangga. In Seminar Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah XV Depok.

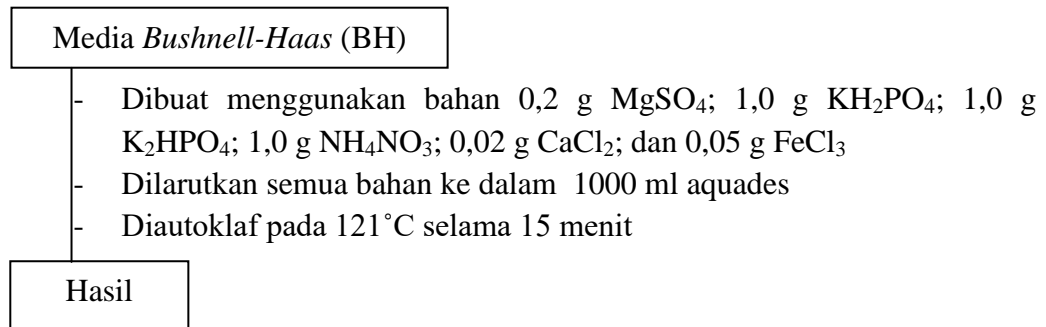
## LAMPIRAN

### Lampiran 1. Rancangan Penelitian



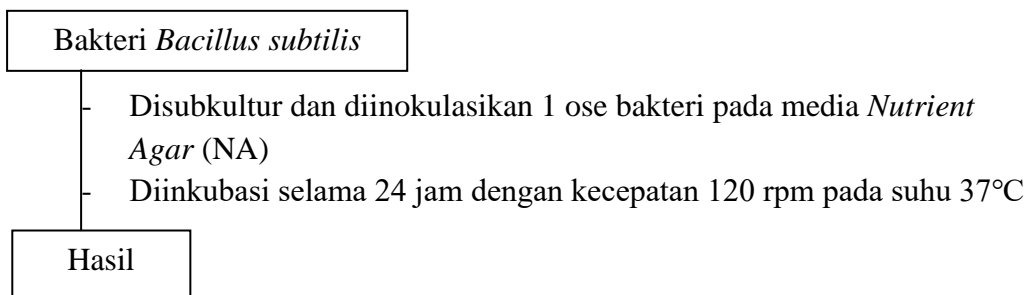
## Lampiran 2. Diagram Alir

### 1. Pembuatan Media

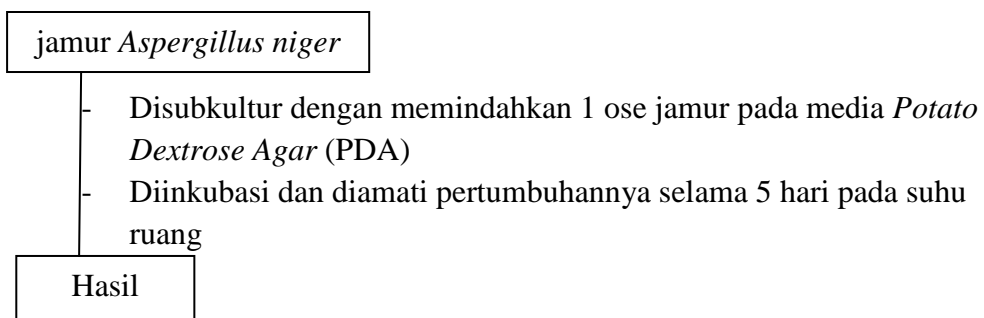


### 2.2 Peremajaan Isolat Bakteri dan Jamur

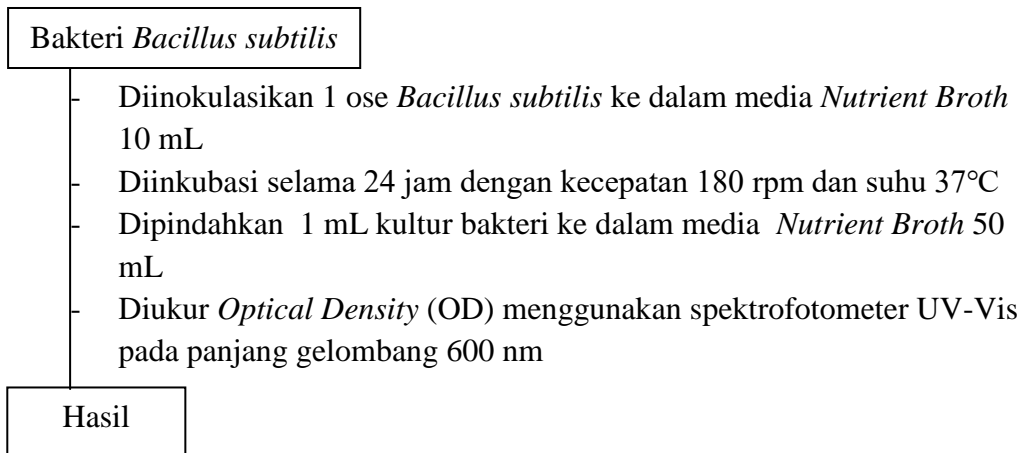
#### 2.1 Peremajaan *Bacillus subtilis*



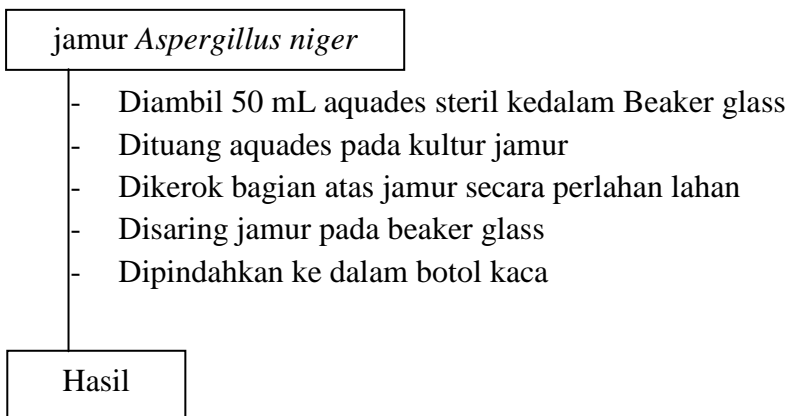
#### 2.2 Peremajaan *Aspergillus niger*



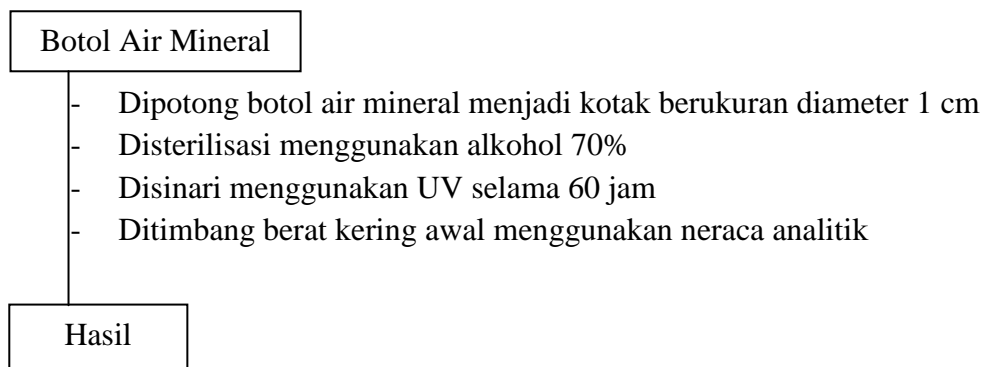
### 3. Pengukuran *Optical Density* (OD) *Bacillus subtilis*



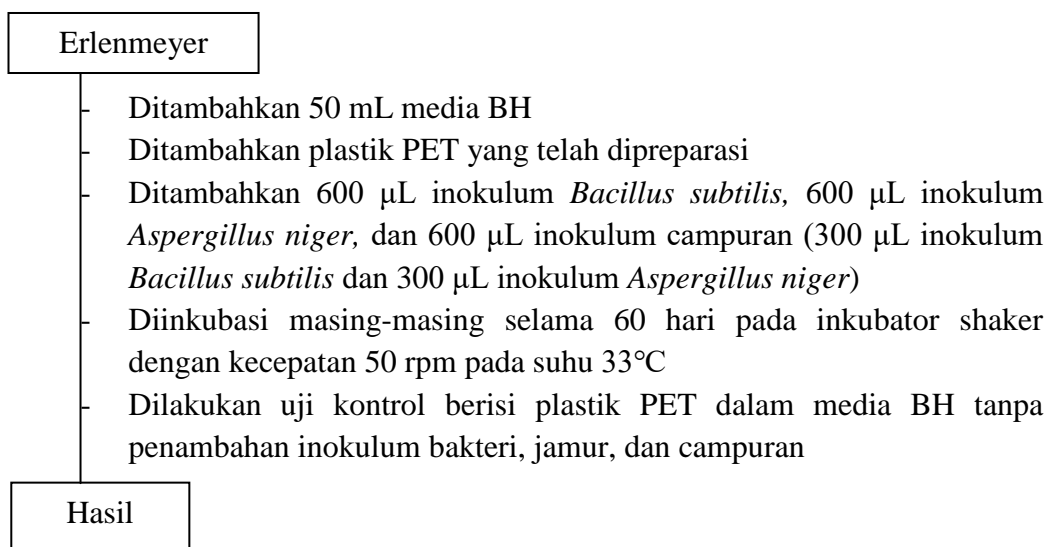
### 4. Pembuatan Inokulum *Aspergillus niger*



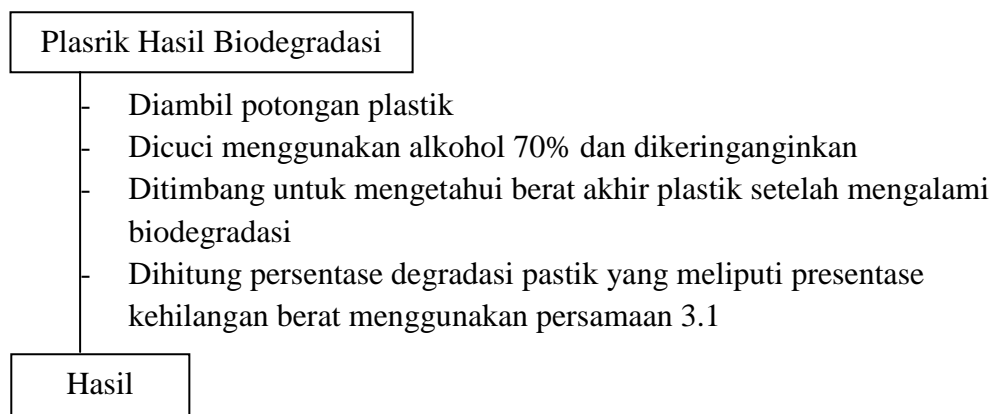
### 5. Preparasi Sampel Plastik PET



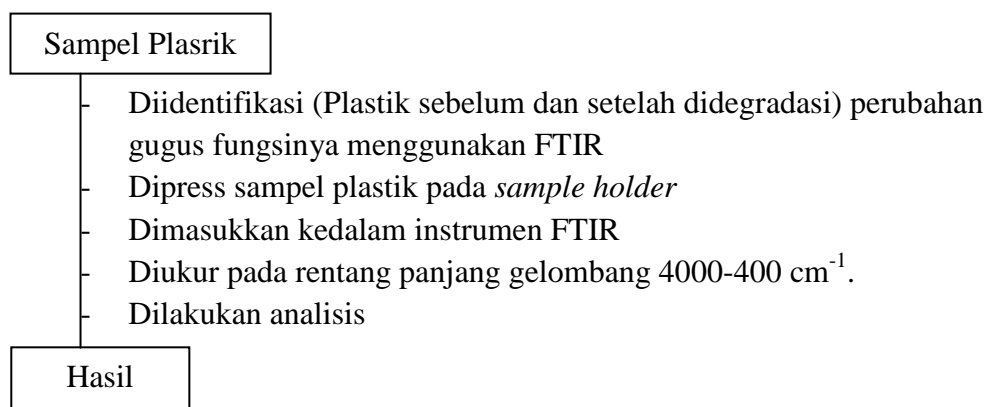
## 6. Uji Biodegradasi PET



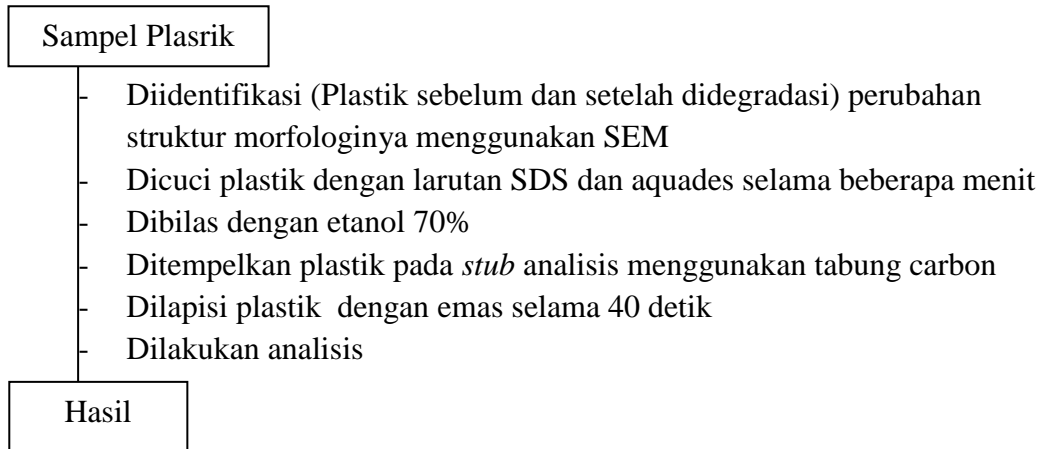
## 7. Analisis Penurunan Berat PET



## 8. Karakterisasi PET Menggunakan FTIR



## 9. Karakterisasi PET Menggunakan SEM



### **Lampiran 3. Pembuatan Larutan Media**

#### **1. Pembuatan Media *Nutrient Agar* (NA)**

Media *Nutrient Agar* (NA) digunakan dalam peremajaan bakteri *Bacillus sp.* media ini dibuat dengan cara ditimbang NA sebanyak 2,8 gram. Ditambahkan 100 mL akuades steril, kemudian dipanaskan menggunakan *hot plate* dan diaduk menggunakan *magnetic stirrer*. Selanjutnya media di *autoclave* selama 2 jam pada 121°C.

#### **2. Pembuatan Media *Nutrient Broth* (NB)**

Pembuatan media *Nutrient broth* dilakukan dengan menimbang media sebanyak 8 gram, kemudian dilarutkan dalam 1 L akuades steril. Setelah itu, media dipanaskan dan diaduk dengan menggunakan *stirrer*. Media di sterilisasi menggunakan *autoclave* selama 2 jam pada suhu 121°C.

#### **3. Pembuatan Media *Potato Dextrose Agar* (PDA)**

Pembuatan media *Potato Dextrose Agar* (PDA) dilakukan dengan cara menimbang media PDA sebanyak 39 gram, kemudian dilarutkan dalam 1000 mL akuades steril. Setelah itu media dipanaskan menggunakan *hot plate* hingga mendidih. Media di sterilisasi menggunakan *autoclave* selama 15 menit pada suhu 121°C.

#### **4. Pembuatan Media *Bushnell Haas* (BH)**

Pembuatan media *Bushnell-Haas* (BH) dilakukan dengan menggunakan bahan 0,2 gram  $MgSO_4$ ; 1,0 gram  $KH_2PO_4$ ; 1,0 gram  $K_2HPO_4$ ; 1,0 gram  $NH_4NO_3$ ; 0,02 gram  $CaCl_2$ ; dan 0,05 gram  $FeCl_3$ . Semua bahan dilarutkan ke dalam 1000 ml aquades, kemudian diautoklaf pada 121°C selama 15 menit.

#### Lampiran 4. Data Hasil Penelitian dan Perhitungan

##### 1. Data Hasil Biodegradasi Plastik PET Kontrol

Perlakuan	Berat Awal (g)	Berat Akhir (g)	Weight Loss (g)	%Degradasi
Kontrol	0,0185	0,0185	0	0

##### 2. Data Hasil Biodegradasi Plastik PET Oleh *Bacillus subtilis*

Bakteri	Berat Awal (g)	Berat Akhir (g)	Weight Loss (g)	%Degradasi
Ulangan 1	0,0173	0,0172	0,0001	0,57
Ulangan 2	0,0183	0,0181	0,0002	1,09
Ulangan 3	0,0192	0,0191	0,0001	0,52
<b>Persen Degradasi Rata-rata</b>				<b>0,72%</b>

##### 3. Data Hasil Biodegradasi Plastik PET Oleh *Aspergillus niger*

Jamur	Berat Awal (g)	Berat Akhir (g)	Weight Loss (g)	%Degradasi
Ulangan 1	0,0183	0,0181	0,0002	1,09
Ulangan 2	0,0186	0,0184	0,0002	1,07
Ulangan 3	0,0168	0,0166	0,0002	1,19
<b>Persen Degradasi Rata-rata</b>				<b>1,11%</b>

##### 4. Data Hasil Biodegradasi Plastik PET Oleh Campuran *Bacillus subtilis* dan *Aspergillus niger*

Bakteri+Jamur	Berat Awal (g)	Berat Akhir (g)	Weight Loss (g)	%Degradasi
Ulangan 1	0,0190	0,0189	0,0001	0,52
Ulangan 2	0,0188	0,0186	0,0002	1,06
Ulangan 3	0,0191	0,0189	0,0002	1,04
<b>Persen Degradasi Rata-rata</b>				<b>0,87%</b>



- **Perhitungan %Degradasi Kontrol**

Kontrol:

$$\begin{aligned} \% \text{Degradasi} &= \frac{\text{berat awal} - \text{berat akhir}}{\text{berat awal}} \times 100\% \\ &= \frac{0,0185 - 0,0185}{0,0185} \times 100\% \\ &= 0\% \end{aligned}$$

- **Perhitungan %Degradasi Bakteri**

Ulangan 1:

$$\begin{aligned} \% \text{Degradasi} &= \frac{\text{berat awal} - \text{berat akhir}}{\text{berat awal}} \times 100\% \\ &= \frac{0,0173 - 0,0172}{0,0173} \times 100\% \\ &= 0,57\% \end{aligned}$$

Ulangan 2:

$$\begin{aligned} \% \text{Degradasi} &= \frac{\text{berat awal} - \text{berat akhir}}{\text{berat akhir}} \times 100\% \\ &= \frac{0,0183 - 0,0181}{0,0183} \times 100\% \\ &= 1,09\% \end{aligned}$$

Ulangan 3:

$$\begin{aligned} \% \text{Degradasi} &= \frac{\text{berat awal} - \text{berat akhir}}{\text{berat awal}} \times 100\% \\ &= \frac{0,0192 - 0,0191}{0,0192} \times 100\% \\ &= 0,52\% \end{aligned}$$

- **Perhitungan %Degradasi Jamur**

Ulangan 1:

$$\begin{aligned} \% \text{Degradasi} &= \frac{\text{berat awal} - \text{berat akhir}}{\text{berat awal}} \times 100\% \\ &= \frac{0,0183 - 0,0181}{0,0183} \times 100\% \\ &= 1,09\% \end{aligned}$$

Ulangan 2:

$$\begin{aligned} \% \text{Degradasi} &= \frac{\text{berat awal} - \text{berat akhir}}{\text{berat awal}} \times 100\% \\ &= \frac{0,0186 - 0,0184}{0,0186} \times 100\% \\ &= 1,07\% \end{aligned}$$

Ulangan 3:

$$\begin{aligned} \% \text{Degradasi} &= \frac{\text{berat awal} - \text{berat akhir}}{\text{berat awal}} \times 100\% \\ &= \frac{0,0168 - 0,0166}{0,0168} \times 100\% \\ &= 1,19\% \end{aligned}$$

- **Perhitungan %Degradasi Campuran Bakteri dan Jamur**

Ulangan 1:

$$\begin{aligned} \% \text{Degradasi} &= \frac{\text{berat awal} - \text{berat akhir}}{\text{berat awal}} \times 100\% \\ &= \frac{0,0190 - 0,0189}{0,0203} \times 100\% \\ &= 0,52\% \end{aligned}$$

Ulangan 2:

$$\begin{aligned} \% \text{Degradasi} &= \frac{\text{berat awal} - \text{berat akhir}}{\text{berat awal}} \times 100\% \\ &= \frac{0,0188 - 0,0186}{0,0188} \times 100\% \end{aligned}$$

$$= 1,06\%$$

Ulangan 3:

$$\% \text{Degradasi} = \frac{\text{berat awal} - \text{berat akhir}}{\text{berat awal}} \times 100\%$$

$$= \frac{0,0191 - 0,0189}{0,0191} \times 100\%$$

$$= 1,04\%$$

**Lampiran 5. Perubahan Warna Media *Bushnell Haas* (BH) Setelah Biodegradasi**

**1. Media *Bushnell Haas* (BH) Plastik PET Kontrol**

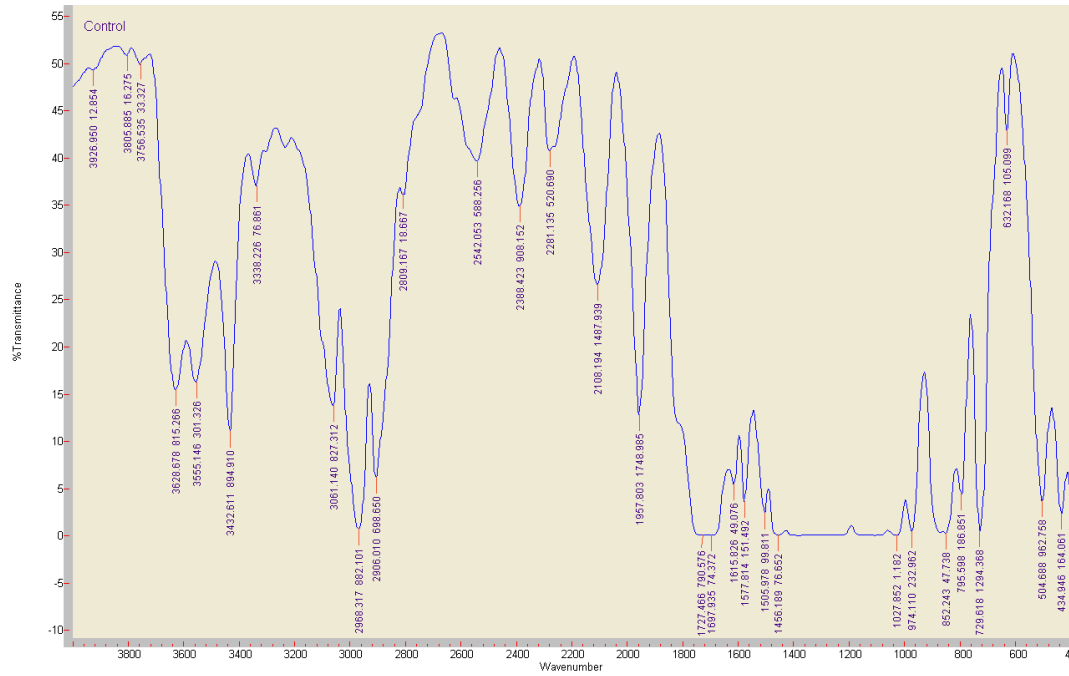


**2. Media *Bushnell Haas* (BH) Plastik PET Dengan Penambahan Inokulum**

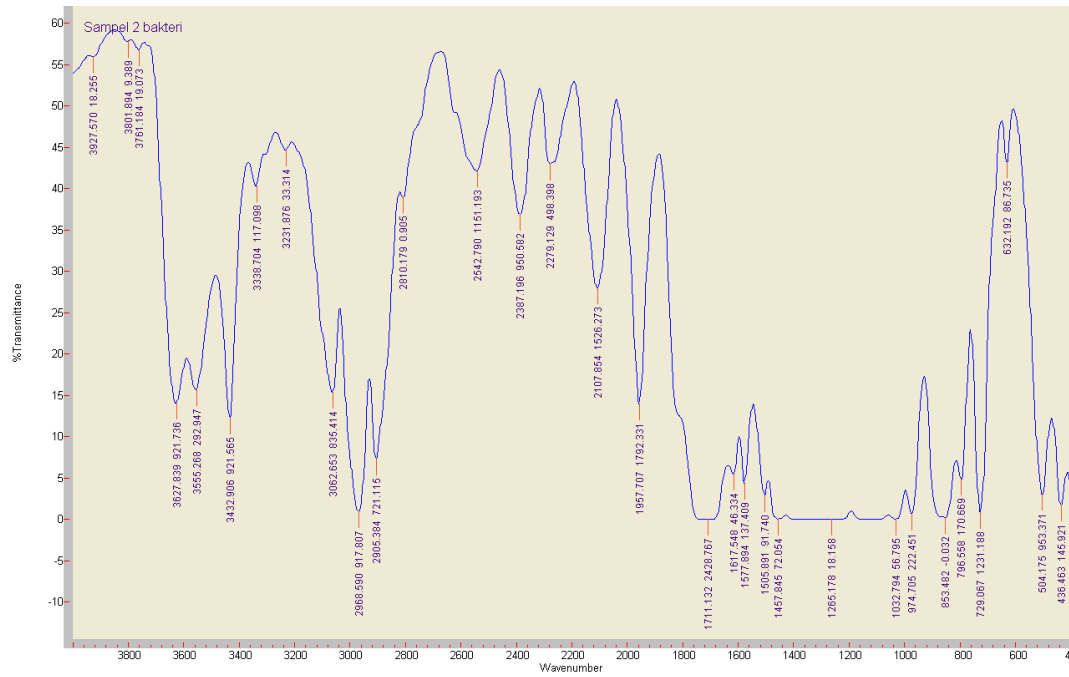


## Lampiran 6. Hasil FTIR

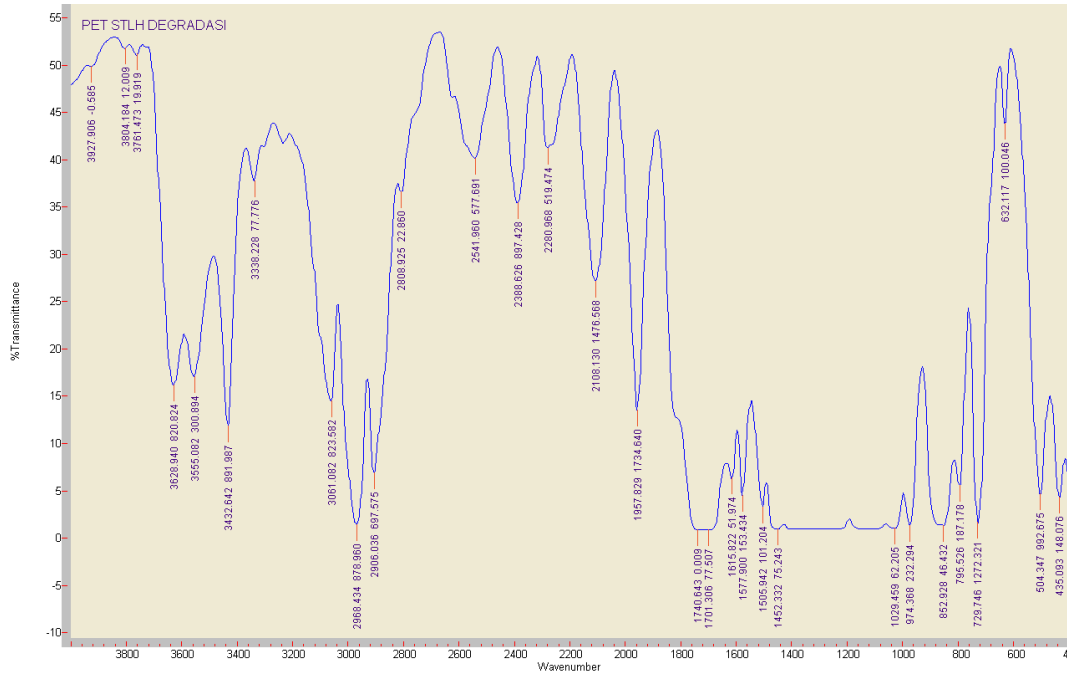
### 1. Plastik PET Kontrol



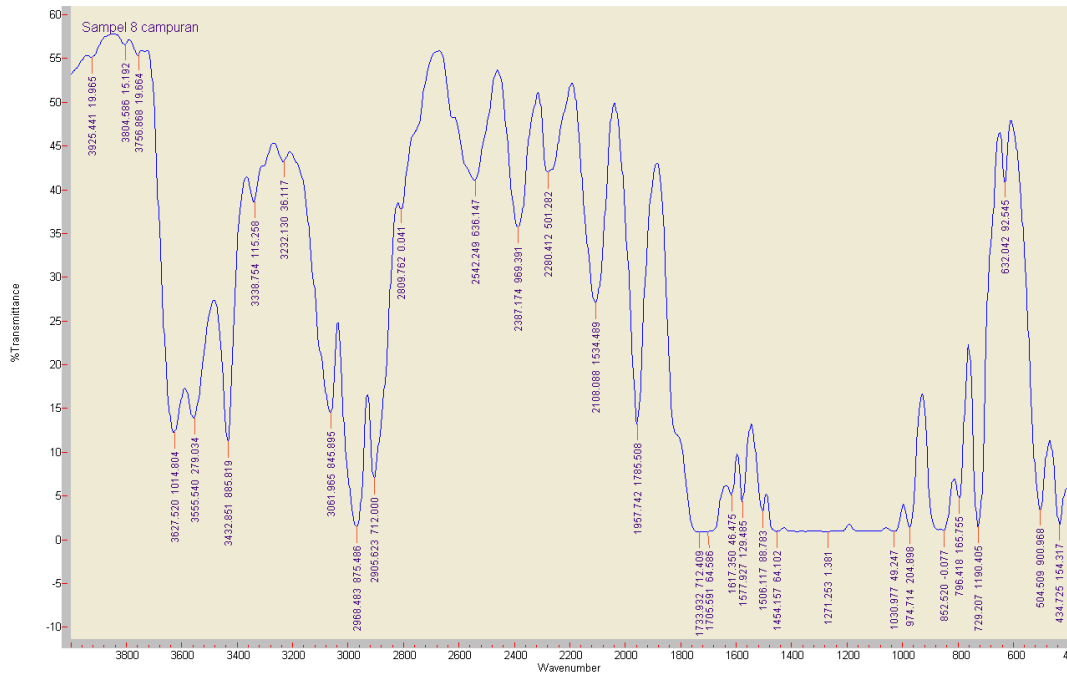
### 2. Plastik PET Setelah Degradasi oleh *Bacillus subtilis*



### 3. Plastik PET Setelah Degradasi oleh *Aspergillus niger*

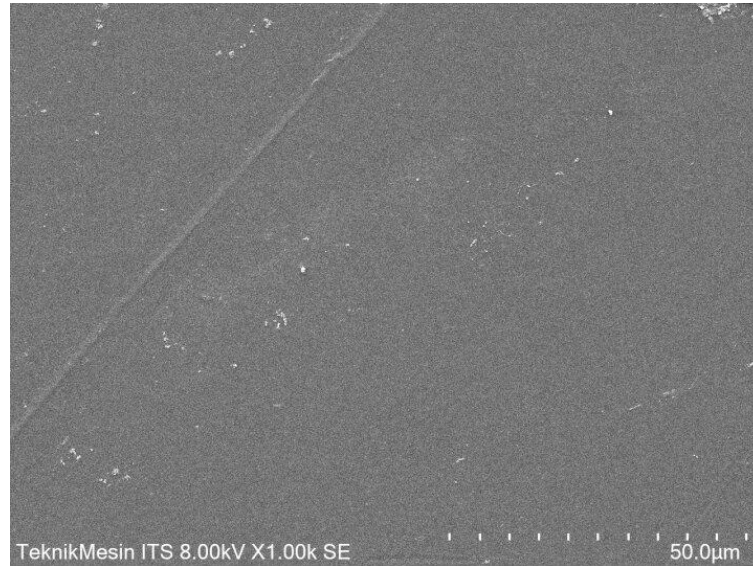


### 4. Plastik PET Setelah Degradasi oleh Campuran *Bacillus subtilis* dan *Aspergillus niger*

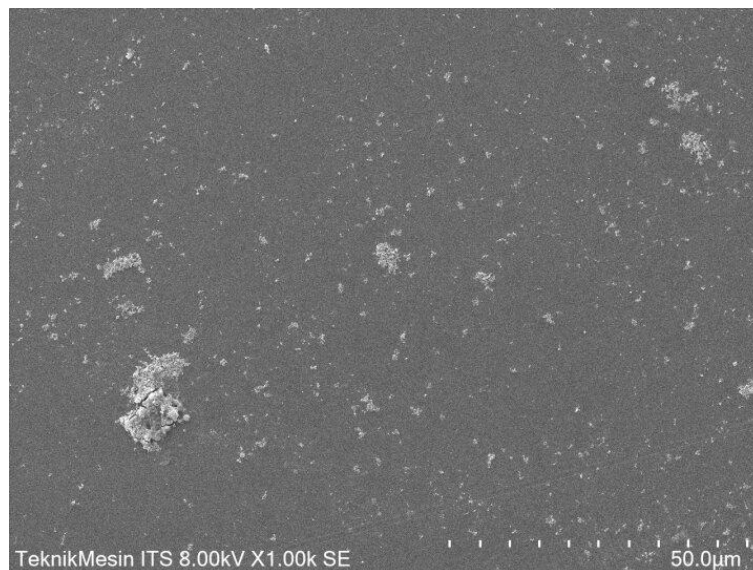


## Lampiran 7. Hasil SEM

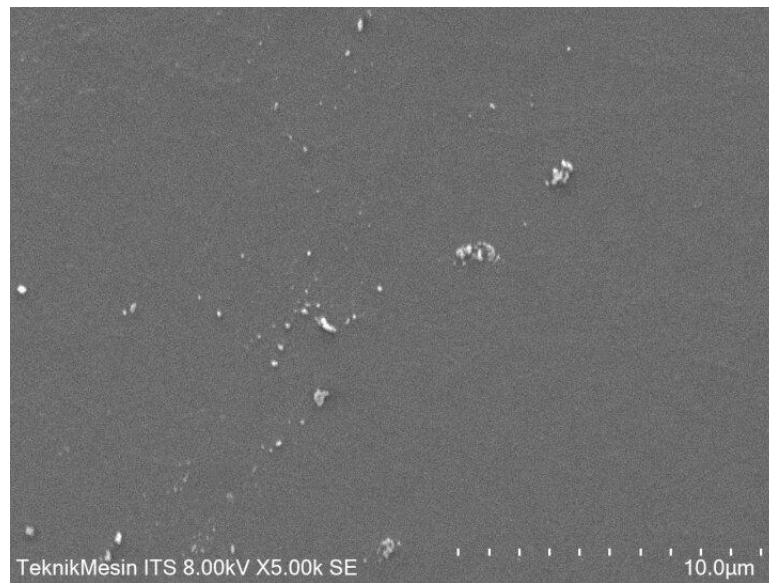
### 1. Permukaan PET Kontrol Pada Perbesaran 1000x



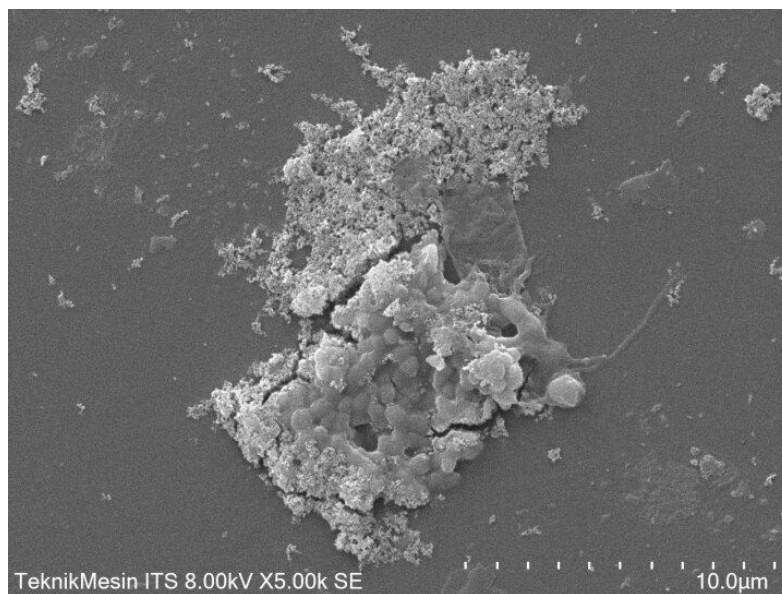
### 2. Permukaan PET *Aspergillus niger* Pada Perbesaran 1000x



### 3. Permukaan PET Kontrol Pada Perbesaran 5000x











### 4. Permukaan PET *Aspergillus niger* Pada Perbesaran 5000x





## Lampiran 7. Dokumentasi

 <p>Peremajaan Jamur <i>Aspergillus niger</i></p>	 <p>Peremajaan Bakteri <i>Bacillus subtilis</i></p>
 <p>Pembuatan Media <i>Bushnell Haas</i> (BH)</p>	 <p>Pengukuran pH media BH</p>
 <p>Pembuatan Inokulum <i>Bacillus subtilis</i></p>	 <p>Pembuatan Inokulum <i>Aspergillus niger</i></p>
 <p>Pengukuran <i>Optical Density</i> (OD)</p>	 <p>Uji Biodegradasi PET</p>