

# Studi Biodegradabilitas Plastik Ramah Lingkungan oleh Larva *Tenebrio molitor* dan Bioaktivator EM4

Fika Nur Amaliah\*, Mochammad Chaerul

Program Studi Magister Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Bandung

\*Koresponden email: fnuramaliah@gmail.com

Diterima: 6 Januari 2025

Disetujui: 15 Januari 2025

## Abstract

The amount of plastic waste continues to increase as the population grows. Plastic waste takes tens to hundreds of years to decompose. The use of conventional plastics, especially plastic bags commonly used by the public, continues to increase, which has a negative impact on the environment. Treating plastic waste using biological methods is an easier, cheaper and safer solution for the environment. Microorganisms play an important role in the degradation process by breaking down waste using enzymes in their bodies. However, recent research has shown that macro-organisms, particularly insects, can accelerate biodegradation. This study examines the biodegradability of environmentally friendly plastics by summarising scenarios from recent research on plastic biodegradation by macro- and micro-organisms. Macroorganisms that have been widely studied for plastic degradation include *Tenebrio molitor* larvae (*T. molitor*) and microorganisms derived from EM4 (effective microorganisms) bioactivators. In addition, this study also summarises the review of mechanisms, parameters, approaches to biodegradation outcome variables, comparison of the effectiveness of biodegradators using rate biodegradation modelling and biodegradation reactors, as well as product parameters that are considered to be safe for the environment.

**Keywords:** plastic, biodegradation, *t. molitor*, microorganisms, kinetics

## Abstrak

Jumlah sampah plastik terus meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk. Sampah plastik memerlukan puluhan hingga ratusan tahun untuk terurai. Penggunaan plastik konvensional terutama kantong plastik yang umum digunakan masyarakat, terus meningkat yang berdampak negatif pada lingkungan. Penanganan sampah plastik dengan metode biologis menawarkan solusi lebih mudah, murah, dan aman bagi lingkungan. Dalam proses degradasi, mikroorganisme berperan penting sebagai dekomposer yang akan mengurai sampah menggunakan enzim dalam tubuhnya. Namun, penelitian terbaru mengungkapkan bahwa makroorganisme, yaitu serangga dapat membantu proses biodegradasi lebih cepat. Penelitian ini menelaah biodegradabilitas jenis plastik ramah lingkungan dengan merangkum skenario dari penelitian terkini mengenai biodegradasi plastik oleh makroorganisme dan mikroorganisme. Makroorganisme yang telah banyak diteliti untuk degradasi plastik adalah larva *Tenebrio molitor* (*T. molitor*) dan mikroorganisme yang berasal dari bioaktivator EM4 (*effective microorganisms*). Selain itu, penelitian ini juga merangkum mengulas mekanisme, parameter, pendekatan variabel hasil biodegradasi, perbandingan efektivitas dari biodegradator dengan menggunakan pemodelan laju biodegradasi, dan reaktor biodegradasi, serta parameter produk yang diperhatikan sehingga dianggap aman bagi lingkungan.

**Kata Kunci:** plastik, biodegradasi, *t. molitor*, mikroorganisme, kinetika

## 1. Pendahuluan

Produksi dan konsumsi plastik secara global telah menghasilkan sampah plastik dalam jumlah besar, yang berdampak negatif pada lingkungan dan makhluk hidup [1]. Plastik berperan penting dalam kehidupan sehari-hari karena memiliki sifat bahan yang ringan, daya tahan tinggi, fleksibilitas, dan biaya produksi rendah. Hingga saat ini, produksi plastik global setiap tahun lebih dari 359 juta ton [2]. Daya tahan plastik bergantung pada sifat polimernya. Sebagian besar jenis plastik yang umum digunakan sulit terurai. Sehingga sampah plastik cenderung terakumulasi di tempat pembuangan sampah atau di lingkungan. Monomer digunakan untuk sintesis polimer plastik berasal dari fosil yang disebut dengan plastik konvensional [3]. Adapun saat ini telah dikembangkan plastik berbasis bio, yang diproduksi dari bahan-bahan ramah lingkungan seperti karbohidrat, pati, lemak dan minyak nabati, mikroorganisme dan bahan alami lainnya [4].

Plastik *bio-based* atau bioplastik adalah suatu produk yang seluruh atau sebagian produk tersebut berasal dari biomassa. Bioplastik meliputi plastik yang *non-degradable*, *biodegradable*, dan *compostable*

[5]. Bioplastik dianggap sebagai alternatif dalam kasus sifat daya tahan terhadap lingkungan [6]. Karena bahan baku berbau alami dari biomassa dan memiliki tingkat terurai lebih tinggi, bioplastik memiliki jejak karbon yang lebih kecil dibandingkan dengan plastik konvensional. Bioplastik diperkirakan tidak meninggalkan residu berbahaya ketika mengalami fragmentasi di lingkungan. Meskipun begitu, bioplastik memiliki kelemahan seperti durasi biodegradasi yang lambat, baik di lingkungan alami atau rekayasa (dikondisikan) [7]. Saat ini bioplastik mewakili sekitar 1% dari sekitar 360 juta ton plastik yang diproduksi. Kelemahan bioplastik mendorong pengembangan alternatif lain, seperti plastik *oxodegradable* yang berbasis polimer *polyethylene* (PET) atau *polypropylene* (PP) dengan dilengkapi zat aditif berupa oksidan untuk mempercepat proses degradasi di lingkungan [8]. Polimer *biobased* diketahui sebagai material yang bersifat *biodegradable* dan berasal dari sintesis tumbuhan atau mikroorganisme melalui proses metabolisme atau proses rekayasa *biochemical*. Berdasarkan asalnya, polimer *biobased* dibagi menjadi 3 jenis yaitu (1) ekstraksi dari biomassa: (a) polisakarida (pati, selulosa, kitosan, carrageenan, pectin, dan alginate), (b) protein (gelatin, kolagen, zein, dan keratin) dan (c) lemak; (2) sintesis dari monomer *biobased* – PLA (*Polylactic Acid*) dan polyesther; dan (3) diperoleh dari mikroorganisme – PHA (*Polyhydroxyalkanoates*) dan selulosa bakteri [9].

Plastik konvensional yang terakumulasi di lingkungan selama bertahun-tahun, menimbulkan masalah ekologi. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan teknologi atau metode penanganan sampah plastik. Degradasi plastik dengan metode biologis menggunakan mikroorganisme atau mikroorganisme telah menarik perhatian luas karena keunggulannya yang ramah lingkungan, mudah, dan relatif murah. Dalam proses ini, mikroorganisme memiliki peran penting, baik mikroba lingkungan (*in vitro*) maupun mikroba usus serangga (*in vivo*). Beberapa penelitian menemukan fakta bahwa biodegradasi dapat berlangsung lebih cepat melalui interaksi dengan invertebrata, khususnya serangga yang kemungkinan besar proses tersebut didukung oleh mikroba usus atau reaksi sinergis dalam sistem pencernaan hewan [10]. Serangga yang diketahui memiliki potensi untuk mendegradasi plastik berasal dari spesies *yellow mealworms*. Mekanisme biodegradasi melewati empat tahapan yaitu biodeteriorasi, biofragmentasi, bioasimilasi, dan mineralisasi. Pada proses degradasi aerobik akan menghasilkan CO<sub>2</sub> dan air, sedangkan pada proses degradasi anaerobik menghasilkan biomassa dan energi [11], [12].

Terlepas dari semua manfaatnya, selama pengelolaan sampah plastik belum sesuai dengan regulasi yang berlaku, plastik menimbulkan masalah lingkungan dan kesehatan masyarakat meskipun produsen menyatakan bahwa plastik tersebut *biodegradable* atau *compostable* [13]. Plastik dapat terurai menjadi ukuran mikro hingga nano dan partikel halus tersebut lebih mudah menyebar di udara, air, dan tanah. Oleh karena itu, baik hewan darat maupun air mengalami berbagai dampak negatif seperti tertelan, terjatuh, reproduksi rendah, dan stres oksidatif. Mikroplastik juga menurunkan kesehatan manusia karena penyakit kardiovaskular, penyakit ginjal kronis, cacat lahir, kanker, dan lain-lain [14]. Tujuan penelitian ini adalah memberikan wawasan dan solusi baru secara tepat waktu bagi masalah pencemaran lingkungan, yang berfokus pada hubungan antara biodegradasi plastik oleh serangga dan mikroba lingkungan. Serta mengidentifikasi peluang baru untuk aplikasi praktis pengolahan limbah plastik dengan meninjau karakteristik plastik, komposisi, parameter, periode, reaksi kinetika, dan skema reaktor yang dapat diadaptasi untuk penelitian berikutnya.

## 2. Metode Kajian Literatur

### 2.1 Sistematika Pencarian Literatur dan Kriteria Pemilihan

Penelitian terkait degradasi plastik ramah lingkungan terus meningkat setiap tahunnya [15]. Sumber pencarian jurnal yaitu Scopus (<http://www.scopus.com/>), ScienceDirect (<http://www.sciencedirect.com/>), Springer Link (<https://link.springer.com/>), dan PubMed (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed>) dengan fokus publikasi dalam 10 tahun terakhir (2014-2024), kecuali jika kekurangan literatur pada subjek yang dibahas. Rentang waktu yang ditentukan untuk memastikan literatur yang digunakan mencerminkan temuan terkini dan relevan dengan perkembangan yang mencakup inovasi, tren, dan metodologi. Kata kunci "*biodegradable plastic biotechnology*", "*bioplastic*", "*biodegradation plastics using composting methods*", "*biodegradation plastics by microorganisms*", dan "*biodegradation plastics by mealworms*" digunakan untuk membatasi pencarian dan pembahasan pada metode, parameter biodegradasi, bentuk persamaan yang digunakan, bentuk reaktor, dan acuan penelitian terhadap potensi plastik untuk diurai melalui proses biologis. Proses seleksi *paper* dilakukan secara manual yang memuat pembahasan terkait plastik ramah lingkungan *starch-based* atau PLA atau *oxodegradable*, faktor yang berpengaruh terhadap degradasi plastik, eksperimen degradasi plastik dalam pengelolaan persampahan, dampak lingkungan dari degradasi plastik ramah lingkungan, aplikasi biodegradasi plastik dan material penyusunnya, sumber untuk produksi plastik ramah lingkungan. Data dari hasil pencarian ditinjau, dianalisis, dikategorikan, dan dibahas dalam

bagian yang sesuai untuk mencakup cakupan tinjauan ini. Sehingga *paper review* ini memberikan pertimbangan metode pengolahan sampah plastik ramah lingkungan melalui proses biologi dengan menggunakan degradator.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Bahan Baku dan Aplikasi Plastik Ramah Lingkungan

Proses degradasi polimer dapat dinilai berdasarkan perubahan sifat fisik, kehilangan berat molekul, jumlah karbon dioksida yang dilepaskan dan dengan menghitung pertumbuhan mikroba pada permukaan polimer setelah terkena paparan dari kondisi lingkungan [16]. Pati (*starch*) adalah polimer alami biodegradable yang berasal dari tumbuhan seperti jagung, gandum, kentang, dan beras. Berbagai studi telah membahas terkait aplikasi berbagai bahan *starch-based* yang digabungkan dengan polimer *biodegradable* lainnya [17]. Salah satu polimer *bio-based* yang umum digunakan dalam kehidupan sehari-hari adalah PLA, yang terbuat 100% dari bahan baku terbarukan (*renewable resources*) dan tergolong sebagai poliester *biodegradable* [18]. Jenis kantong plastik *oxodegradable* merupakan polimer konvensional berbasis fosil yang ditambahkan bahan aditif, untuk mendukung proses oksidasi, ketika terpapar panas atau sinar sehingga menjadi fragmen kecil yang dapat memfasilitasi proses biodegradasi oleh mikroorganisme [19],[20].

Kantong plastik *oxodegradable*, degradasi pada terjadi pada bahan aditif pati sedangkan bagian polimer akan tetap di lingkungan dalam bentuk mikroplastik [21]. Pada plastik *oxodegradable*, proses degradasi terdiri dari abiotik dan biotik, dimana proses abiotik menghasilkan *pro-oxidant* (polimer yang terpecah menjadi fragmen yang lebih kecil) dan proses biotik yang melibatkan mikroorganisme dengan mengubah produk hasil oksidasi dari hasil proses abiotik menjadi biomassa dan CO<sub>2</sub> [22]. Terdapat beberapa skenario yang dapat dijadikan acuan untuk proses biodegradasi ini yang tersaji dalam **Tabel 1**.

**Tabel 1.** Skenario biodegradasi berdasarkan literatur

No	Campuran	Durasi	Parameter yang diamati	Referensi
1	Plastik:Organik (serpihan kayu 36%, kompos matang 10%, sisa sayuran 54%) 1:6	37 minggu	Suhu	[23]
2	Plastik:Organik (sampah dapur 53%, serpihan kayu 33%; rumput 3%, kompos 11%) 1:143	±8 minggu	Suhu; kelembapan; pH; rasio C/N; volatile solid	[24]
3	100% plastik oxodegradable	±192 minggu	Suhu; radiasi matahari	[22]
4	Plastik:Organik (dedak) 1:1	5 minggu	Suhu; kelembapan	[25]
5	Plastik:Organik (dedak) 1:3	±4 minggu	Suhu; kelembapan	[26]

#### 3.2 Proses Biodegradasi Plastik

Proses biodegradasi diklasifikasikan menjadi aerobik dan anaerobik berdasarkan kondisi lingkungannya. Biodegradasi aerobik terjadi dengan oksigen cukup, menghasilkan CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, biomassa, dan residu, sedangkan anaerobik berlangsung tanpa oksigen, menghasilkan CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, biomassa, residu, dan metana (CH<sub>4</sub>). Biodegradabilitas material, terutama polimer, bergantung pada berat molekul, bentuk molekul, dan kristalinitasnya. Pada plastik, biodegradasi umumnya terjadi sebagai erosi permukaan karena enzim ekstraseluler hanya bekerja pada permukaan polimer [27].

Proses biodegradasi dapat dilakukan dengan metode pengomposan yang berlangsung optimal apabila kondisi lingkungan terkontrol, yang dapat melibatkan organisme tambahan seperti larva atau maggot dan mikroorganisme pengurai. Penambahan mikroorganisme pengurai bertujuan untuk meningkatkan proses penguraian pada pengomposan yang terdiri dari mikroorganisme konsorsium. Selain itu, larva *T. molitor* dianggap dapat membantu proses pengomposan yang dilakukan pada penelitian [25] dengan menggunakan plastik sebagai sumber nutrisi selama siklus hidup larva. EM4 mengandung beberapa mikroorganisme menguntungkan seperti lima famili dan sepuluh genus, serta lebih dari 80 jenis mikroba aerob dan anaerob seperti bakteri asam laktat, bakteri fotosintesis, jamur, *actinomycetes*, dan ragi yang bekerja sama untuk membentuk EM selama proses pembuatan dan menghasilkan zat yang bertahan dalam campuran EM yang dikultur dalam larutan coklat yang mengandung 100 juta mikroorganisme aktif per mililiter dan pH <3,5 [28].

Mekanisme biodegradasi pada plastik melalui empat tahapan yaitu biodeteriorasi, biofragmentasi, asimilasi dan mineralisasi yang dijelaskan sebagai berikut. Proses biodegradasi plastik oleh mikroorganisme terdiri dari beberapa tahapan penting. Tahap pertama adalah biodeteriorasi, di mana mikroorganisme menempel pada permukaan plastik dan membentuk biofilm. Mereka mengeluarkan enzim ekstraseluler, seperti lipase dan proteinase K, yang memecah rantai polimer menjadi fragmen kecil, seperti oligomer, dimer, dan monomer, terutama pada area amorf polimer. Selanjutnya, pada tahap biofragmentasi, mikroorganisme melepaskan enzim seperti oksigenase dan depolimerase untuk memecah struktur polimer plastik menjadi molekul sederhana. Proses ini membuat polimer lebih rentan terhadap oksidasi dan reaksi radikal bebas, menghasilkan molekul kecil yang lebih mudah diuraikan. Fragmen plastik yang telah terpecah menjadi monomer kemudian memasuki tahap asimilasi, di mana monomer ini diserap ke dalam sel mikroba melalui transporter membran dan dioksidasi dalam jalur katabolik mikroba untuk menghasilkan energi. Tahap terakhir adalah mineralisasi, di mana monomer teroksidasi sepenuhnya menjadi metabolit akhir, seperti CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, dan CH<sub>4</sub>, yang dimanfaatkan sebagai sumber karbon dan energi oleh mikroorganisme. Mineralisasi menandai degradasi lengkap plastik menjadi senyawa sederhana.

**Tabel 2.** Makroorganisme dan mikroorganisme yang berperan dalam biodegradasi

No	Biodegradator	Tipe plastik	Efisiensi degradasi	Referensi
1	<i>Tenebrio molitor</i>	PE	69,7% (hari ke-58)	[29]
		PLA	81,5-86,9% (hari ke-24)	[30]
		Polyester-PU foam	67% (hari ke-35)	[31]
2	Mikroorganisme <i>Ideonella sakaiensis</i>	PET	-	[32]
3	Mikroorganisme <i>Pseudomonas sp.</i> dan <i>Bacillus sp.</i>	PE	-	[32]
4	Mikroorganisme <i>Streptomyces sp.</i>	PET, PE	-	[33]

Penelitian terdahulu membuka peluang untuk mengembangkan pendekatan yang lebih ramah lingkungan dalam mengatasi masalah pencemaran plastik, yang tersaji pada **Tabel 2**. Sifat senyawa dan mikroorganisme/makroorganisme merupakan faktor yang mempengaruhi proses biodegradasi. Terdapat berbagai cara yang digunakan untuk mengukur aktivitas biodegradasi bahan polimer oleh makroorganisme atau mikroorganisme yaitu dengan (a) mengukur kehilangan massa atau penurunan massa pada polimer; (b) adanya tanda aktivitas kehidupan; (c) perubahan yang terjadi atau modifikasi secara mekanis, kimiawi, dan fisik yang tersisa atau dikeluarkan (residu); dan (d) produksi CO<sub>2</sub> atau terurainya gugus organik fungsional dan/atau zat antara (*intermediate*) pada polimer [34], [35]. Mikroorganisme seperti bakteri dan jamur telah diidentifikasi mampu mendegradasi polimer sintetik seperti polietilena (PE), polipropilena (PP), dan poliuretan (PUR) melalui enzim spesifik yang dihasilkan, sementara makroorganisme seperti larva serangga dan cacing tanah berperan sebagai agen degradasi dengan memanfaatkan plastik sebagai sumber karbon dan energi.

### 3.3 Laju Biodegradasi

Salah satu penilaian untuk mensimulasikan dan membuat pendekatan dari variable eksperimen adalah dengan menggunakan pemodelan matematika. Dalam hal ini kinetika biodegradasi. Mengacu pada metode pengomposan aerob, dengan menggunakan pendekatan Michaelis Menten. Hasil analisis kemudian divalidasi menggunakan data eksperimen, dengan mempertimbangkan perhitungan waktu degradasi terhadap substrat dan melalui ekstrapolasi untuk keseluruhan eksperimen. Model kinetika orde pertama dan kedua memberikan hasil pendekatan yang sesuai untuk sampel biodegradasi plastik [36]. Laju konsumsi substrat oleh mikroorganisme dalam proses degradasi aerobik pasif dijelaskan menggunakan kinetika orde pertama yang dimodifikasi untuk siklus suhu mesofilik dan termofilik [37]. Untuk membahas kinetika biodegradasi, penelitian terdahulu memberikan dasar penting dalam memahami laju dan mekanisme degradasi plastik oleh berbagai mikroorganisme dan makroorganisme yang dirangkum dalam **Tabel 3**. Penelitian-penelitian ini mengeksplorasi faktor-faktor yang memengaruhi proses, seperti jenis plastik, kondisi lingkungan, enzim yang terlibat, serta kontribusi mikroba dalam mempercepat dekomposisi.

Analisis kinetika biodegradasi tidak hanya membantu menjelaskan dinamika degradasi tetapi juga menjadi acuan untuk mengoptimalkan metode pengelolaan limbah plastik yang lebih efektif.

Tabel 3. Persamaan yang digunakan untuk mengetahui degradasi

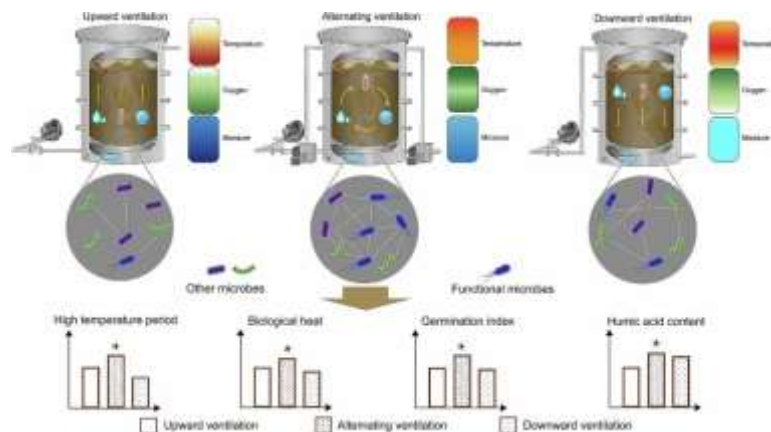
Model	Referensi	Deskripsi
Orde 1: $-\frac{d[S_i]}{dt} = k_d f_T f_{MC} f_{O_2} [S_i]$	[38]	[S <sub>i</sub> ] adalah massa atau konsentrasi substrat yang dapat didegradasi secara biologis; t adalah waktu; k <sub>d</sub> adalah konstanta laju (degradasi/hidrolisis) (biasanya pada 20 °C atau sekitar 60 °C); dan f <sub>T</sub> , f <sub>MC</sub> dan f <sub>O<sub>2</sub></sub> adalah fungsi koreksi untuk suhu, kadar air dan kadar oksigen (tanpa dimensi)
Orde 1: $-\frac{d[S_i]}{dt} = k_i [S_i]$	[39]	k <sub>i</sub> adalah konstanta laju (hidrolisis) (s <sup>-1</sup> ); S <sub>i</sub> adalah konsentrasi substrat (kg m <sup>-3</sup> ) dan t adalah waktu (s).
Orde 1: $K = -\frac{1}{t} \left( \ln \frac{W}{W_0} \right)$	[40]	K adalah konstanta laju orde pertama penyerapan plastik per hari, t adalah waktu (hari), W adalah berat plastik yang tersisa (g) dan W <sub>0</sub> adalah berat awal plastik (g)
Orde 1: $\frac{d(OM)}{dt} = -k(OM)$	[41]	OM adalah jumlah padatan volatil (organic matter) pada setiap waktu proses degradasi (g); t adalah waktu (hari); dan k adalah konstanta laju dekomposisi (g om/g om hari)

### 3.4 Acuan Gambar Skematis Reaktor

Reaktor merupakan salah satu komponen utama dalam proses pengomposan atau biodegradasi, karena skema desainnya memengaruhi efisiensi, laju degradasi, dan kualitas hasil akhir. Oleh karena itu, pembahasan mengenai acuan skema reaktor penting dilakukan untuk memahami bagaimana parameter seperti aerasi, suhu, kelembapan, dan waktu tinggal dapat dioptimalkan dalam berbagai jenis reaktor, seperti reaktor tumpuk, rotary drum, atau sistem berkelanjutan. Penjelasan terkait acuan reaktor biodegradasi dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Jenis- jenis reaktor biodegradasi

No	Deskripsi	Referensi
1	Termometer batang panjang digunakan untuk memantau suhu harian. Konsentrasi oksigen diukur dengan sensor konsentrasi oksigen (CY-12C, Hangzhou Jiachang Electronic Technology Co., Ltd.). Kadar air ditentukan menurut metode Zhang et al. (2021). Kandungan GI, asam humat, dan asam fluvik ditentukan menurut metode Zhu et al. (2023). Bentuk reaktor diilustrasikan pada Gambar 1.	[42]



Gambar 1. Reaktor biodegradasi sampah organik dengan modifikasi sensor suhu

No	Deskripsi	Referensi
2	Proses pengomposan dilakukan dalam lapisan-lapisan yang tersusun secara bergantian, dimulai dan diakhiri dengan bahan pengisi, dengan limbah rumah pemotongan hewan berada di antaranya. Setiap baris terdiri dari lima lapisan limbah dengan ketebalan rata-rata 10 cm, untuk homogenitas pencernaan. Pipa PVC berdiameter 50 mm, yang dibor sepanjang tubuhnya, digunakan untuk aerasi, dengan pipa-pipa terhubung ke blower udara yang menginjeksikan udara sebesar 0,57 l min <sup>-1</sup> /kg OM. Diilustrasikan pada Gambar 2a dan 2b.	[43]

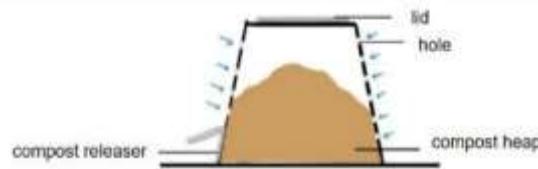


**Gambar 2a.** Reaktor pengomposan dengan aerasi



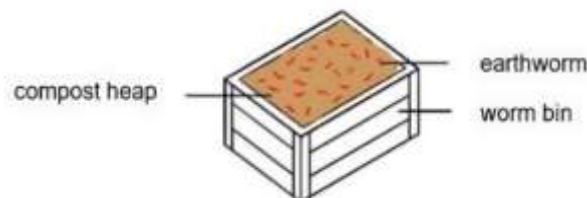
**Gambar 2b.** Lapisan pengomposan  
 ■ bulking agent  
 ■ limbah rumah potong hewan

3	a. Bin composting: mengolah sampah dalam wadah berlubang untuk sirkulasi udara	[44]
---	--	------



**Gambar 3a.** Reaktor pengomposan dalam wadah modifikasi

b. Vermikompos: menggunakan cacing untuk mempercepat dekomposisi limbah



**Gambar 3b.** Reaktor pengomposan modifikasi menggunakan biodegradator cacing

#### 4. Kesimpulan

Pemahaman baru tentang peran makroorganisme dan mikroorganisme lingkungan dalam biodegradasi plastik sebagai solusi untuk pencemaran lingkungan. Penelitian ini tidak hanya mengungkap hubungan biologis antara mikroorganisme dan dekomposisi plastik, tetapi juga menawarkan peluang praktis untuk pengolahan limbah plastik. Penggunaan makroorganisme dan mikroorganisme lingkungan untuk biodegradasi plastik memiliki potensi sebagai solusi industri dalam pengolahan limbah plastik. Namun, aplikasi praktis pengolahan limbah menggunakan serangga masih belum terealisasi, terutama dalam skala besar. Lebih lanjut, studi ini menunjukkan bahwa makroorganisme seperti larva *T. molitor* dan mikroorganisme dapat memberikan kontribusi signifikan dalam mempercepat laju degradasi plastik, terutama untuk plastik ramah lingkungan.

Penelitian ini memberikan dasar untuk mengintegrasikan pendekatan biologis dalam sistem pengelolaan limbah plastik, yang dapat menjadi alternatif ramah lingkungan dibandingkan dengan metode konvensional seperti pembakaran atau penimbunan. Selain itu, dengan meninjau lebih lanjut berbagai karakteristik plastik, parameter proses, periode degradasi, reaksi kinetika, dan skema reaktor, hasil penelitian ini dapat menjadi dasar untuk pengembangan teknologi biodegradasi plastik yang lebih efektif serta inovatif dalam menangani sampah plastik secara berkelanjutan, sekaligus mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan global.

## 5. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada rekan-rekan dari Institut Teknologi Bandung yang telah memberikan wawasan dan keahlian yang sangat membantu penelitian ini, meskipun masih terdapat kekurangan yang bisa dilengkapi melalui penelitian selanjutnya.

## 6. Singkatan

<i>Term</i>	<i>Biodegradation</i>
<i>EM4</i>	<i>Effective Microorganisms</i>
<i>PLA</i>	<i>Polylactic Acid</i>
<i>PHA</i>	<i>Polyhydroxyalkanoates</i>

## 7. Referensi

- [1] P. Kautish, R. Sharma, S. K. Mangla, F. Jabeen, and U. Awan, "Understanding choice behavior towards plastic consumption: An emerging market investigation," *Resour Conserv Recycl*, vol. 174, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105828.
- [2] P. G. C. Nayanathara Thathsarani Pilapitiya and A. S. Ratnayake, "The world of plastic waste: A review," *Cleaner Materials*, vol. 11, p. 100220, Mar. 2024, doi: 10.1016/J.CLEMA.2024.100220.
- [3] S. S. Ali *et al.*, "Plastic wastes biodegradation: Mechanisms, challenges and future prospects," Aug. 01, 2021, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146590.
- [4] H. Alhazmi, F. H. Almansour, and Z. Aldhfeeri, "Plastic waste management: A review of existing life cycle assessment studies," May 02, 2021, *MDPI AG*. doi: 10.3390/su13105340.
- [5] Z. Terzopoulou and D. N. Bikiaris, "Biobased plastics for the transition to a circular economy," *Mater Lett*, vol. 362, p. 136174, May 2024, doi: 10.1016/J.MATLET.2024.136174.
- [6] A. Beltrán-Sanahuja, A. Benito-Kaesbach, N. Sánchez-García, and C. Sanz-Lázaro, "Degradation of conventional and biobased plastics in soil under contrasting environmental conditions," *Science of The Total Environment*, vol. 787, p. 147678, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.147678.
- [7] M. Cucina, "The lesser of two evils: Enhancing biodegradable bioplastics use to fight plastic pollution requires policy makers interventions in Europe," *Environ Impact Assess Rev*, vol. 103, p. 107230, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.EIAR.2023.107230.
- [8] S. Kumari, A. Rao, M. Kaur, and G. Dhaniala, "Petroleum-Based Plastics Versus Bio-Based Plastics: A Review," Sep. 01, 2023, *Technoscience Publications*. doi: 10.46488/NEPT.2023.v22i03.003.
- [9] A. Surendren, A. K. Mohanty, Q. Liu, and M. Misra, "A review of biodegradable thermoplastic starches, their blends and composites: recent developments and opportunities for single-use plastic packaging alternatives," 2022, *Royal Society of Chemistry*. doi: 10.1039/d2gc02169b.
- [10] X. G. Yang, P. P. Wen, Y. F. Yang, P. P. Jia, W. G. Li, and D. S. Pei, "Plastic biodegradation by in vitro environmental microorganisms and in vivo gut microorganisms of insects," Jan. 06, 2023, *Frontiers Media SA*. doi: 10.3389/fmicb.2022.1001750.
- [11] N. Lucas, C. Bienaime, C. Belloy, M. Queneudec, F. Silvestre, and J. E. Nava-Saucedo, "Polymer biodegradation: Mechanisms and estimation techniques – A review," *Chemosphere*, vol. 73, no. 4, pp. 429–442, Sep. 2008, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2008.06.064.
- [12] M. Tania and V. Anand, "The implementation of microbes in plastic biodegradation," 2023, *Springer*. doi: 10.1007/s43994-023-00077-y.
- [13] M. Artru and A. Lecerf, "Slow degradation of compostable plastic carrier bags in a stream and its riparian area," *Ann Limnol*, vol. 55, 2019, doi: 10.1051/limn/2019017.
- [14] A. Aulia, R. Azizah, L. Sulistyorini, and M. A. Rizaldi, "Literature Review: Dampak Mikroplastik Terhadap Lingkungan Pesisir, Biota Laut dan Potensi Risiko Kesehatan," *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, vol. 22, no. 3, pp. 328–341, Oct. 2023, doi: 10.14710/jkli.22.3.328-341.
- [15] S. V. Afshar, A. Boldrin, T. F. Astrup, A. E. Daugaard, and N. B. Hartmann, "Degradation of biodegradable plastics in waste management systems and the open environment: A critical review," Jan. 01, 2024, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.jclepro.2023.140000.
- [16] A. Antelava, A. Constantinou, A. Bumajdad, G. Manos, R. Dewil, and S. M. Al-Salem, "Identification of Commercial Oxo-Biodegradable Plastics: Study of UV Induced Degradation in an Effort to Combat Plastic Waste Accumulation," *J Polym Environ*, vol. 28, no. 9, pp. 2364–2376, Sep. 2020, doi: 10.1007/s10924-020-01776-x.

- [17] D. Il Park, Y. Dong, S. Wang, S. J. Lee, and H. J. Choi, "Rheological Characteristics of Starch-Based Biodegradable Blends," *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 8, Apr. 2023, doi: 10.3390/polym15081953.
- [18] M. Ramos *et al.*, "Controlled release, disintegration, antioxidant, and antimicrobial properties of poly (lactic acid)/thymol/nanoclay composites," *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 9, Sep. 2020, doi: 10.3390/POLYM12091878.
- [19] M. R. Havstad, "Biodegradable plastics," in *Plastic Waste and Recycling: Environmental Impact, Societal Issues, Prevention, and Solutions*, Elsevier, 2020, pp. 97–129. doi: 10.1016/B978-0-12-817880-5.00005-0.
- [20] P. C. Thapliyal, "Utilization of chemical additives to enhance biodegradability of plastics," *Biodegradability of Conventional Plastics: Opportunities, Challenges, and Misconceptions*, pp. 259–281, Jan. 2023, doi: 10.1016/B978-0-323-89858-4.00006-3.
- [21] P. Tziourrou, S. Kordella, Y. Ardali, G. Papatheodorou, and H. K. Karapanagioti, "Microplastics formation based on degradation characteristics of beached plastic bags," *Mar Pollut Bull*, vol. 169, p. 112470, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.MARPOLBUL.2021.112470.
- [22] A. Heimowska, "Environmental Degradation of Oxo-Biodegradable Polyethylene Bags," *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 23, Dec. 2023, doi: 10.3390/w15234059.
- [23] G. Solano, D. Rojas-Gätjens, K. Rojas-Jimenez, M. Chavarría, and R. M. Romero, "Biodegradation of plastics at home composting conditions," *Environmental Challenges*, vol. 7, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.envc.2022.100500.
- [24] M. C. Lavagnolo, F. Ruggero, A. Pivato, C. Boaretti, and A. Chiumenti, "Composting of starch-based bioplastic bags: Small scale test of degradation and size reduction trend," *Detritus*, vol. 12, pp. 57–65, 2020, doi: 10.31025/2611-4135/2020.14008.
- [25] S. S. Yang *et al.*, "Biodegradation of polypropylene by yellow mealworms (*Tenebrio molitor*) and superworms (*Zophobas atratus*) via gut-microbe-dependent depolymerization," *Science of the Total Environment*, vol. 756, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144087.
- [26] B. Y. Peng, Z. Chen, J. Chen, X. Zhou, W. M. Wu, and Y. Zhang, "Biodegradation of polylactic acid by yellow mealworms (larvae of *Tenebrio molitor*) via resource recovery: A sustainable approach for waste management," *J Hazard Mater*, vol. 416, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125803.
- [27] V. Goel, P. Luthra, G. S. Kapur, and S. S. V. Ramakumar, "Biodegradable/Bio-plastics: Myths and Realities," Oct. 01, 2021, *Springer*. doi: 10.1007/s10924-021-02099-1.
- [28] S. M. Safwat and M. E. Matta, "Environmental applications of Effective Microorganisms: a review of current knowledge and recommendations for future directions," Dec. 01, 2021, *Springer Science and Business Media B.V.* doi: 10.1186/s44147-021-00049-1.
- [29] P. Bulak, K. Proc, A. Pytlak, A. Puszka, B. Gawdzik, and A. Bieganski, "Biodegradation of different types of plastics by tenebrio molitor insect," *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 20, Oct. 2021, doi: 10.3390/polym13203508.
- [30] B. Y. Peng *et al.*, "Biodegradation of Polyvinyl Chloride (PVC) in *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) larvae," *Environ Int*, vol. 145, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.envint.2020.106106.
- [31] J. Liu *et al.*, "Biodegradation of polyether-polyurethane foam in yellow mealworms (*Tenebrio molitor*) and effects on the gut microbiome," *Chemosphere*, vol. 304, p. 135263, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.135263.
- [32] W. Gao *et al.*, "Microbial Degradation of (Micro)plastics: Mechanisms, Enhancements, and Future Directions," *Fermentation*, vol. 10, no. 9, p. 441, Aug. 2024, doi: 10.3390/fermentation10090441.
- [33] J. Abraham, E. Ghosh, P. Mukherjee, and A. Gajendiran, "Microbial degradation of low density polyethylene," *Environ Prog Sustain Energy*, vol. 36, no. 1, pp. 147–154, Jan. 2017, doi: 10.1002/ep.12467.
- [34] N. Raddadi and F. Fava, "Biodegradation of oil-based plastics in the environment: Existing knowledge and needs of research and innovation," Aug. 20, 2019, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.419.
- [35] S. S. Yang and W. M. Wu, "Biodegradation of Plastics in *Tenebrio* Genus (Mealworms)," in *Handbook of Environmental Chemistry*, vol. 95, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2020, pp. 385–422. doi: 10.1007/978-3-662-60204-5\_457.
- [36] I. Rossetti, F. Conte, and G. Ramis, "Kinetic Modelling of Biodegradability Data of Commercial Polymers Obtained under Aerobic Composting Conditions," *Eng*, vol. 2, no. 1, pp. 54–68, Mar. 2021, doi: 10.3390/eng2010005.



- [37] S. Yu, O. Grant Clark, and J. J. Leonard, "Influence of free air space on microbial kinetics in passively aerated compost," *Bioresour Technol*, vol. 100, no. 2, pp. 782–790, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.biortech.2008.06.051.
- [38] E. Walling and C. Vaneckhaute, "Novel simple approaches to modeling composting kinetics," *J Environ Chem Eng*, vol. 9, no. 3, p. 105243, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.JECE.2021.105243.
- [39] E. Walling, A. Trémier, and C. Vaneckhaute, "A review of mathematical models for composting," Jul. 15, 2020, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.wasman.2020.06.018.
- [40] H. S. Auta, C. U. Emenike, B. Jayanthi, and S. H. Fauziah, "Growth kinetics and biodeterioration of polypropylene microplastics by *Bacillus* sp. and *Rhodococcus* sp. isolated from mangrove sediment," *Mar Pollut Bull*, vol. 127, pp. 15–21, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.marpolbul.2017.11.036.
- [41] R. Kulcu, "New kinetic modelling parameters for composting process," *J Mater Cycles Waste Manag*, vol. 18, no. 4, pp. 734–741, Sep. 2016, doi: 10.1007/s10163-015-0376-9.
- [42] L. Zhu *et al.*, "Alternating ventilation accelerates the mineralization and humification of food waste by optimizing the temperature-oxygen-moisture distribution in the static composting reactor," *Bioresour Technol*, vol. 393, p. 130050, Feb. 2024, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2023.130050.
- [43] R. N. da S. Vilela *et al.*, "Effects of aeration and season on the composting of slaughterhouse waste," *Environ Technol Innov*, vol. 27, p. 102505, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.ETI.2022.102505.
- [44] F. A. Azis, M. Rijal, H. Suhaimi, and P. E. Abas, "Patent Landscape of Composting Technology: A Review," Jun. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/inventions7020038.