

Adaptasi dan Kinerja Biologis Larva *Tenebrio molitor* pada Media Limbah Plastik Berdasarkan Pertumbuhan dan Aktivitas Konsumsi Substrat

Indah Sholihah Wulandari, Aulia Ulfah Farahdiba, Purnomo Edi Sasongko,
Nurvita Cundaningsih*

Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Surabaya

*Koresponden email: nurvita.c.ft@upnjatim.ac.id

Diterima: 18 Juni 2026

Disetujui: 23 Juni 2026

Abstract

Plastic waste remains a major environmental problem due to its resistance to natural degradation processes. Biological degradation using *Tenebrio molitor* larvae has emerged as a promising alternative for reducing plastic waste accumulation. This study aimed to evaluate the biological responses of *Tenebrio molitor* larvae during the biodegradation of medical mask waste, low-density polyethylene (LDPE), and styrofoam, as well as to examine the relationship between larval performance and plastic degradation efficiency. The experiment was conducted for 20 days using two replications for each treatment. Observed parameters included larval biomass, organic substrate consumption, plastic weight reduction, degradation percentage, temperature, and pH. The results showed that larval biomass increased in all treatments, indicating that the larvae were able to adapt and maintain growth in plastic-containing media. Organic substrate was rapidly consumed and completely depleted by day 8, suggesting that larvae preferentially utilized organic matter before consuming plastic. Plastic weight reduction occurred in all treatments, with styrofoam exhibiting the highest degradation efficiency (50–60%), followed by medical masks (32%) and LDPE (22–26%). These findings demonstrate that plastic type influences biodegradation performance and that larval growth is associated with the effectiveness of plastic degradation. Therefore, *Tenebrio molitor* has potential as a biological agent for plastic waste biodegradation, particularly for polystyrene-based materials such as styrofoam.

Keyword: *Tenebrio molitor*, biodegradation, biological response, plastic waste, styrofoam, LDPE.

Abstrak

Sampah plastik merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang sulit ditangani karena memiliki sifat yang resisten terhadap proses degradasi alami. Biodegradasi menggunakan larva *Tenebrio molitor* menjadi salah satu alternatif yang berpotensi untuk mengurangi akumulasi limbah plastik di lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi respon biologis larva *Tenebrio molitor* selama proses biodegradasi limbah masker medis, plastik *low-density polyethylene* (LDPE), dan styrofoam, serta mengkaji hubungan antara pertumbuhan larva dan efektivitas degradasi plastik. Penelitian dilakukan selama 20 hari dengan dua kali pengulangan pada setiap perlakuan. Parameter yang diamati meliputi biomassa larva, konsumsi substrat organik, penurunan massa plastik, persentase degradasi, suhu, dan pH. Hasil penelitian menunjukkan bahwa biomassa larva meningkat pada seluruh perlakuan, yang menandakan bahwa larva mampu beradaptasi dan mempertahankan pertumbuhannya pada media yang mengandung plastik. Substrat organik habis dikonsumsi pada hari ke-8, menunjukkan bahwa larva lebih dahulu memanfaatkan sumber makanan organik sebelum mengonsumsi plastik. Penurunan massa plastik terjadi pada seluruh perlakuan, dengan *styrofoam* menunjukkan persentase degradasi tertinggi sebesar 50–60%, diikuti masker medis sebesar 32% dan LDPE sebesar 22–26%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jenis plastik memengaruhi efektivitas biodegradasi yang dihasilkan serta terdapat hubungan antara pertumbuhan larva dan kemampuan degradasi plastik. Dengan demikian, *Tenebrio molitor* berpotensi dimanfaatkan sebagai agen biologis dalam pengolahan limbah plastik, terutama pada material berbasis polistirena seperti *styrofoam*.

Kata Kunci: *tenebrio molitor*, biodegradasi, respon biologis, sampah plastik, styrofoam, ldpe

1. Pendahuluan

Sampah plastik merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang terus meningkat akibat tingginya penggunaan plastik dalam berbagai aktivitas sehari-hari. Sifat plastik yang kuat, ringan, dan tahan terhadap degradasi menyebabkan material ini sulit terurai secara alami sehingga berpotensi terakumulasi di

lingkungan dalam jangka waktu yang lama [1]. Beberapa jenis limbah plastik yang umum ditemukan adalah masker medis sekali pakai, kantong plastik *low-density polyethylene* (LDPE), dan *styrofoam* yang hingga saat ini masih menjadi tantangan dalam pengelolaannya [2]. Salah satu alternatif pengolahan limbah plastik yang mulai banyak dikembangkan adalah biodegradasi menggunakan larva *Tenebrio molitor*. Larva ini diketahui mampu mengonsumsi beberapa jenis plastik, termasuk polistirena dan polietilena, melalui aktivitas mekanis serta bantuan mikroorganisme dalam saluran pencernaannya [3]. Kemampuan tersebut menunjukkan potensi *Tenebrio molitor* sebagai agen biologis dalam pengolahan limbah plastik yang lebih ramah lingkungan.

Berbagai metode pengolahan limbah plastik telah diterapkan, seperti daur ulang, penimbunan, dan insinerasi. Namun, metode tersebut masih memiliki keterbatasan serta berpotensi menimbulkan dampak lingkungan lainnya. Oleh karena itu, diperlukan alternatif pengolahan yang lebih ramah lingkungan, salah satunya melalui proses biodegradasi menggunakan organisme hidup. Larva *Tenebrio molitor* diketahui mampu mengonsumsi beberapa jenis plastik, termasuk polistirena dan polietilena [4]. Kemampuan tersebut didukung oleh aktivitas mekanis larva serta mikroorganisme yang terdapat dalam saluran pencernaannya. Melalui proses tersebut, plastik dapat mengalami fragmentasi dan penurunan massa selama periode biodegradasi [5][6]. Sebagian besar penelitian sebelumnya berfokus pada kemampuan larva dalam mendegradasi plastik, sedangkan informasi mengenai respon biologis larva selama proses biodegradasi masih terbatas. Padahal, parameter seperti pertambahan biomassa, perubahan jumlah larva, dan kondisi lingkungan pemeliharaan merupakan indikator penting untuk menilai kemampuan adaptasi larva terhadap substrat plastik. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi respon biologis larva *Tenebrio molitor* selama proses biodegradasi limbah masker medis, plastik LDPE, dan *styrofoam*, serta mengkaji hubungannya dengan kemampuan degradasi yang dihasilkan.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen untuk mengevaluasi respon biologis larva *Tenebrio molitor* selama proses biodegradasi berbagai jenis limbah plastik. Penelitian dilakukan selama 20 hari dengan dua kali pengulangan (duplo) untuk setiap perlakuan. Material biologis yang digunakan berupa larva *Tenebrio molitor*, sedangkan material plastik yang diuji meliputi limbah masker medis, kantong plastik *low-density polyethylene* (LDPE), dan *styrofoam* [3]. Setiap reaktor berisi larva *Tenebrio molitor* yang dipelihara pada media yang mengandung plastik dengan massa awal masing-masing sebesar 5 gram serta media pendukung sesuai komposisi perlakuan. Pengamatan dilakukan secara berkala setiap empat hari selama periode penelitian.

Parameter yang diamati meliputi biomassa larva, jumlah larva, penurunan massa plastik, persentase degradasi plastik, serta kondisi lingkungan berupa suhu dan pH media. Biomassa larva diukur berdasarkan perubahan massa larva selama masa pemeliharaan, sedangkan jumlah larva diamati untuk mengetahui perubahan populasi selama proses biodegradasi [5]. Penurunan massa plastik dihitung berdasarkan selisih massa plastik sebelum dan sesudah perlakuan, kemudian digunakan untuk menentukan persentase degradasi plastik. Suhu dan pH media juga diukur untuk mengevaluasi kesesuaian kondisi lingkungan selama penelitian berlangsung. Data hasil pengamatan dianalisis secara deskriptif dan disajikan dalam bentuk tabel serta grafik untuk menunjukkan perubahan biomassa larva, jumlah larva, penurunan massa plastik, dan persentase degradasi selama periode pengamatan. Hasil yang diperoleh kemudian digunakan untuk mengevaluasi hubungan antara respon biologis larva *Tenebrio molitor* dan kemampuan biodegradasi pada masing-masing jenis plastik.

Bahan dan Peralatan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi larva *Tenebrio molitor*, limbah masker medis, kantong plastik *low-density polyethylene* (LDPE), *styrofoam*, pollard, dan sampah sisa makanan. Larva *Tenebrio molitor* digunakan sebagai agen biodegradasi, sedangkan pollard dan sampah sisa makanan digunakan sebagai substrat organik pendukung selama pemeliharaan. Peralatan yang digunakan meliputi reaktor pemeliharaan berbahan plastik, timbangan digital untuk pengukuran biomassa larva dan massa plastik, termometer untuk pengukuran suhu, pH meter untuk pengukuran pH media, serta alat tulis dan dokumentasi untuk pencatatan data selama penelitian.

Prosedur Penelitian

Larva *Tenebrio molitor* diaklimatisasi terlebih dahulu sebelum digunakan dalam penelitian. Setelah proses aklimatisasi, larva dimasukkan ke dalam reaktor sesuai dengan perlakuan yang telah ditentukan.

Setiap reaktor berisi 100 g larva, 50 g pollard, 45 g sampah sisa makanan, dan 5 g plastik sesuai jenis perlakuan, yaitu masker medis, LDPE, dan *styrofoam*. Perlakuan kontrol tidak diberikan tambahan plastik. Masing-masing perlakuan dibuat sebanyak dua ulangan (duplo).

Penelitian dilakukan selama 20 hari dengan interval pengamatan setiap empat hari. Selama periode penelitian, dilakukan pengukuran biomassa larva, massa substrat organik, massa plastik, suhu, dan pH media. Pengamatan dilakukan untuk mengetahui perubahan respon biologis larva serta kemampuan konsumsi terhadap substrat organik dan plastik.

Pada akhir penelitian, massa plastik yang tersisa ditimbang untuk menentukan penurunan massa dan menghitung persentase degradasi. Seluruh data hasil pengamatan kemudian digunakan untuk mengevaluasi hubungan antara pertumbuhan larva, konsumsi substrat organik, dan kemampuan degradasi pada masing-masing jenis plastik.

Desain Reaktor

Penelitian ini menggunakan empat perlakuan, yaitu kontrol, masker medis, LDPE, dan *styrofoam* dengan dua kali pengulangan. Setiap reaktor berisi larva *Tenebrio molitor*, pollard, sampah sisa makanan, dan jenis plastik sesuai dengan perlakuan. Komposisi reaktor disajikan pada **Gambar 1** dan **Tabel 1**.



Gambar 1. Desain Reaktor Pemeliharaan Larva dan Media Limbah Plastik
 Sumber: Hasil Penelitian (2026)

Tabel 1. Penjelasan Komposisi Analisis Sampel

Sampel	
Masker Medis	
A	Pollard 50 gr +100 gr larva + 45 gr sampah sisa makanan + 5 gr masker medis
LDPE	
B	Pollard 50 gr +100 gr larva + 45 gr sampah sisa makanan + 5 gr LDPE (Kantong Plastik)
PS (<i>Styrofoam</i>)	
C	Pollard 50 gr +100 gr larva + 45 gr sampah sisa makanan + 5 gr <i>Styrofoam</i>
Kontrol	
K	Pollard 50 gr +100 gr larva + 50 gr sampah sisa makanan

Sumber: Hasil Penelitian (2026)

Analisis Parameter

Parameter yang diamati dalam penelitian ini meliputi biomassa larva, konsumsi substrat organik, penurunan massa plastik, persentase degradasi plastik, suhu, dan pH media. Biomassa larva diukur melalui perubahan massa larva selama periode pemeliharaan. Konsumsi substrat organik ditentukan berdasarkan selisih massa substrat sebelum dan sesudah pengamatan, sedangkan penurunan massa plastik dihitung dari perbedaan massa plastik awal dan akhir penelitian yang disajikan pada persamaan 1 berikut.

$$\% \text{ Degradasi} = \frac{W_0 - W_t}{W_0} \dots \dots \dots (1)$$

Hasil perhitungan laju biodegradasi ini digunakan untuk membandingkan efektivitas degradasi pada masing-masing jenis plastik dan waktu perlakuan, sehingga dapat diketahui perlakuan yang menunjukkan kemampuan degradasi paling optimal [7][8]. Selain itu, suhu dan pH media diukur secara berkala selama

penelitian untuk mengevaluasi kondisi lingkungan yang memengaruhi aktivitas larva. Data hasil pengamatan dianalisis secara deskriptif dan disajikan dalam bentuk tabel serta grafik untuk menggambarkan respon biologis larva terhadap berbagai jenis limbah plastik.

3. Hasil dan Pembahasan

Kondisi Lingkungan Selama Proses Biodegradasi

Kondisi lingkungan selama penelitian disajikan pada **Tabel 1**. Pengamatan kondisi reaktor dilakukan terhadap suhu lingkungan dan pH media selama 20 hari pengujian. Berdasarkan **Tabel 2**, hasil pengamatan menunjukkan bahwa suhu pada seluruh perlakuan berkisar antara 24–30°C. Rentang suhu tersebut masih termasuk suhu optimum bagi pertumbuhan larva *Tenebrio molitor* sehingga aktivitas makan dan degradasi plastik dapat berlangsung dengan baik. Nilai pH media selama pengujian cenderung stabil pada pH 7. Kondisi pH netral menunjukkan bahwa media masih mendukung aktivitas larva dan mikroorganisme dalam saluran pencernaan yang berperan dalam proses biodegradasi plastik [9].

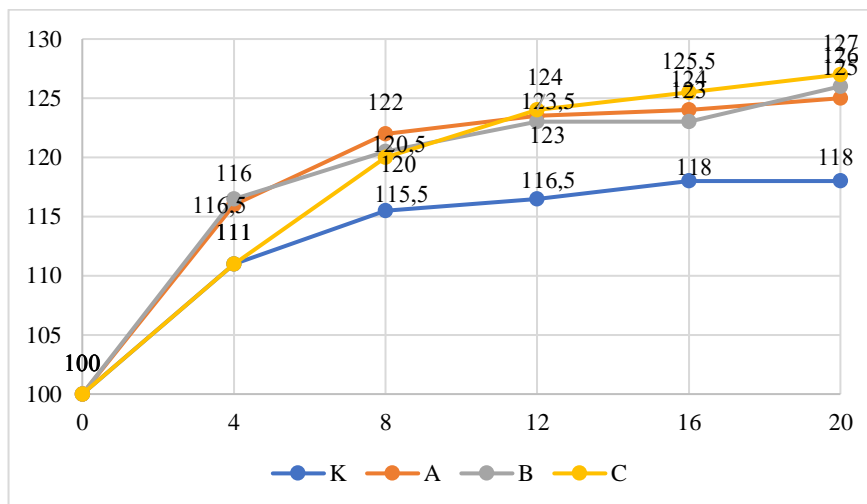
Tabel 2. Suhu dan pH Selama Pengujian

Hari	Suhu (°C)	pH
0	30	7
4	30	7
8	24	7
12	27	7
16	29	7
20	30	7

Sumber: Hasil Penelitian (2026)

Pertambahan Massa Larva

Perubahan biomassa larva disajikan pada **Gambar 2**. Berdasarkan **Gambar 2**, massa larva pada seluruh perlakuan mengalami peningkatan selama 20 hari pengujian. Massa awal larva sebesar 100 g meningkat menjadi 118 g pada kontrol, 125 g pada perlakuan masker medis, 126 g pada perlakuan kantong plastik, dan 127 g pada perlakuan styrofoam. Hasil tersebut menunjukkan bahwa larva *Tenebrio molitor* tetap mampu tumbuh selama proses biodegradasi berlangsung. Peningkatan massa yang lebih tinggi pada perlakuan yang mengandung plastik dibandingkan kontrol mengindikasikan bahwa keberadaan substrat plastik tidak menghambat pertumbuhan larva [10]. Selain itu, ketersediaan pollard, sampah organik, dan asam amino sebagai sumber nutrisi diduga mampu memenuhi kebutuhan energi dan metabolisme larva sehingga pertumbuhan tetap berlangsung secara optimal. Massa larva tertinggi pada perlakuan styrofoam menunjukkan bahwa larva mampu beradaptasi dengan baik terhadap substrat tersebut selama periode pengujian.



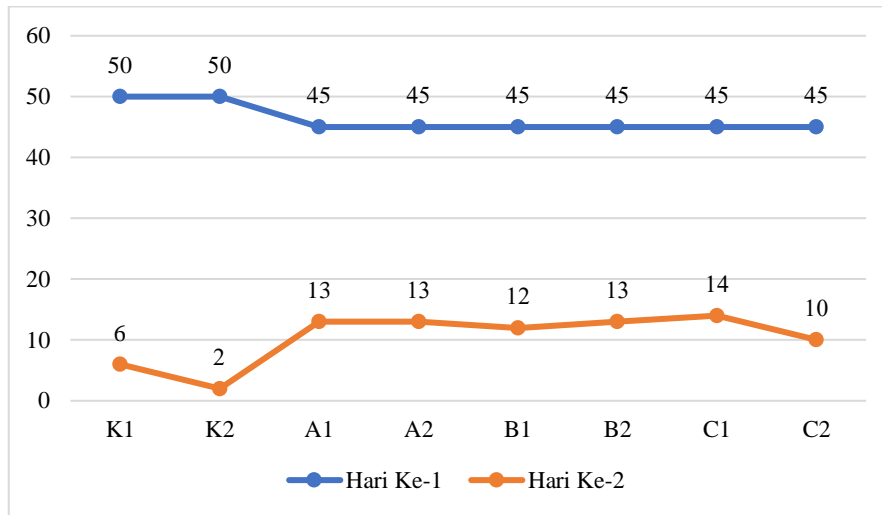
Gambar 2. Perubahan Massa Larva Selama Pengujian

Sumber: Hasil Penelitian (2026)

Penurunan Massa Substrat Organik

Penurunan substrat organik selama penelitian disajikan pada **Gambar 3**. Berdasarkan **Gambar 3**, perlakuan K1 dan K2 menunjukkan penurunan massa substrat organik yang lebih cepat dibandingkan

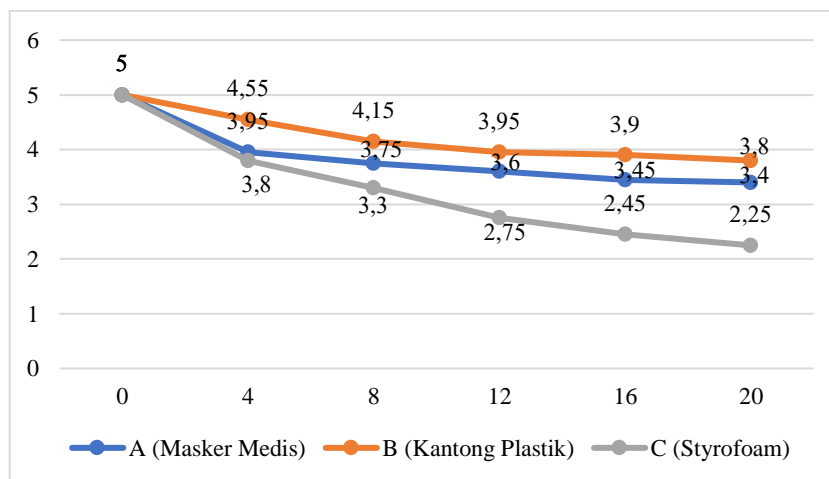
perlakuan lainnya. Hal ini diduga karena pada reaktor K1 dan K2 tidak terdapat penambahan substrat plastik, sehingga larva *Tenebrio molitor* hanya memanfaatkan substrat organik sebagai sumber makanan utama. Kondisi tersebut menyebabkan konsumsi substrat organik berlangsung lebih optimal dan cepat habis. Sementara pada perlakuan lain, keberadaan plastik membuat larva membutuhkan waktu adaptasi dan proses konsumsi yang lebih lama karena plastik lebih sulit dicerna dibandingkan bahan organik.



Gambar 3. Penurunan Substrat Organik
Sumber: Hasil Penelitian (2026)

Penurunan Massa Plastik

Penurunan massa plastik selama penelitian disajikan pada Gambar 4. Berdasarkan Gambar 4, larva *Tenebrio molitor* lebih efektif mendegradasi styrofoam dibandingkan masker medis dan kantong plastik. Hal ini terlihat dari penurunan massa pada perlakuan C yang lebih besar selama masa pengujian. Secara teori, styrofoam memiliki struktur yang lebih ringan dan berpori, serta tersusun dari polistirena sehingga lebih mudah digigit serta dikonsumsi oleh larva. Selain itu, bakteri pada saluran pencernaan larva diduga mampu membantu proses pemecahan senyawa polistirena menjadi bentuk yang lebih sederhana [11] [12]. Sementara itu, kantong plastik dan masker medis memiliki struktur yang lebih padat dan kuat sehingga proses degradasinya berlangsung lebih lambat.

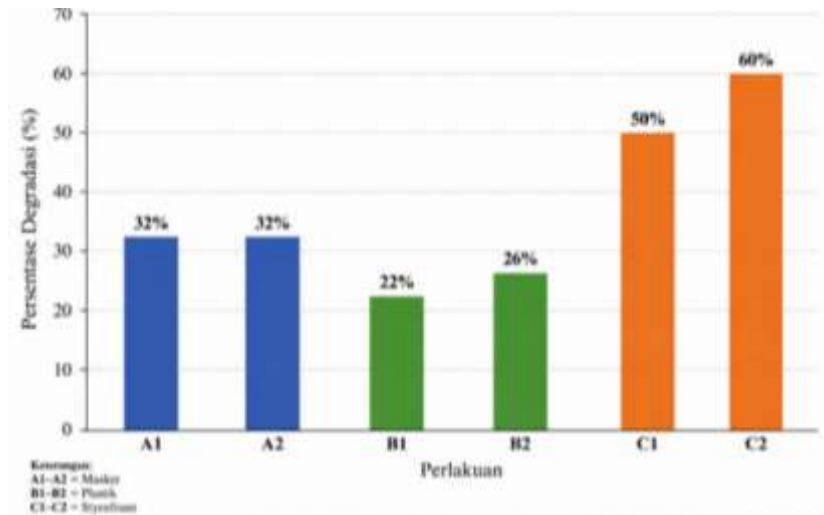


Gambar 4. Penurunan Massa Plastik Selama Penelitian
Sumber: Hasil Penelitian (2026)

Efektivitas Degradasi Berbagai Jenis Plastik

Persentase degradasi plastik disajikan pada Gambar 5. Berdasarkan Gambar 5, seluruh perlakuan mengalami penurunan massa plastik selama pengujian. Persentase degradasi tertinggi terjadi pada perlakuan styrofoam C2 sebesar 60%, sedangkan degradasi terendah terjadi pada perlakuan plastik B1 sebesar 22%. Tingginya degradasi pada styrofoam diduga karena struktur material yang ringan dan berpori sehingga mudah dihancurkan oleh larva *Tenebrio molitor* [6][7]. Sementara itu, plastik lebih rendah karena

memiliki struktur polimer yang lebih padat dan sulit diuraikan. Hasil duplo pada masing-masing perlakuan menunjukkan nilai yang relatif berdekatan sehingga data penelitian dapat dikatakan cukup konsisten.



Gambar 5. Persentase Degradasi Plastik
 Sumber: Hasil Penelitian (2026)

Pengaruh Jenis Plastik dan Waktu Pengamatan terhadap Degradasi Plastik

Hasil analisis ANOVA *Two Way* menunjukkan bahwa jenis plastik dan waktu pengamatan berpengaruh signifikan terhadap persentase degradasi plastik oleh larva *Tenebrio molitor* ($p < 0,05$). Faktor jenis plastik menghasilkan nilai F sebesar 72,96 dengan nilai p sebesar 0,000, sedangkan faktor waktu pengamatan menghasilkan nilai F sebesar 18,80 dengan nilai p sebesar 0,000. Hasil tersebut menunjukkan bahwa perbedaan karakteristik plastik maupun lamanya periode biodegradasi memberikan pengaruh nyata terhadap tingkat degradasi yang dihasilkan.

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Jenis Plastik	2	2743,5	1371,73	72,96	0,000
Hari	4	1413,9	353,47	18,80	0,000
Jenis Plastik*Hari	8	324,5	40,57	2,16	0,095
Error	15	282,0	18,80		
Total	29	4763,9			

Gambar 6. Hasil ANOVA *Two Way*

Sebaliknya, interaksi antara jenis plastik dan waktu pengamatan tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap persentase degradasi plastik ($p > 0,05$), dengan nilai F sebesar 2,16 dan nilai p sebesar 0,095. Hal ini mengindikasikan bahwa pengaruh jenis plastik terhadap degradasi relatif konsisten pada setiap waktu pengamatan. Dengan kata lain, pola peningkatan degradasi yang terjadi selama penelitian tidak berbeda secara nyata antar jenis plastik yang diuji.

Pengaruh signifikan faktor jenis plastik menunjukkan bahwa karakteristik fisik dan kimia masing-masing plastik memengaruhi kemampuan larva dalam mengonsumsi dan mendegradasi material tersebut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *styrofoam* memiliki persentase degradasi yang lebih tinggi dibandingkan masker medis dan LDPE. Sementara itu, pengaruh signifikan faktor waktu menunjukkan bahwa proses biodegradasi berlangsung secara bertahap, sehingga persentase degradasi cenderung meningkat seiring bertambahnya waktu pengamatan.

Secara keseluruhan, hasil analisis statistik mengonfirmasi bahwa jenis plastik dan waktu pengamatan merupakan faktor utama yang memengaruhi keberhasilan biodegradasi plastik oleh larva *Tenebrio molitor*. Namun, tidak adanya interaksi yang signifikan menunjukkan bahwa kedua faktor tersebut bekerja secara independen dalam memengaruhi persentase degradasi yang dihasilkan.

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
4,33590	94,08%	88,56%	76,32%

Gambar 7. Hasil Model Summary

Nilai R-sq sebesar 94,08% menunjukkan bahwa model ANOVA yang digunakan mampu menjelaskan sebagian besar variasi persentase degradasi plastik. Nilai R-sq(adj) sebesar 88,56% dan R-sq(pred) sebesar 76,32% juga mengindikasikan bahwa model memiliki kecocokan dan kemampuan prediksi yang baik. Dengan demikian, model yang digunakan dinilai cukup representatif dalam menjelaskan pengaruh perlakuan dan waktu biodegradasi terhadap persentase degradasi plastik.

Hubungan Respon Biologis Larva terhadap Efisiensi Degradasi Plastik

Hasil penelitian menunjukkan adanya hubungan antara respon biologis larva dan kemampuan biodegradasi plastik. Perlakuan yang menghasilkan peningkatan biomassa larva yang tinggi cenderung menunjukkan penurunan massa plastik yang lebih besar. Meskipun jumlah larva mengalami penurunan selama pengamatan, proses biodegradasi tetap berlangsung pada seluruh perlakuan. Hal ini menunjukkan bahwa aktivitas konsumsi plastik telah terjadi sejak awal penelitian ketika populasi larva masih berada pada kondisi optimal.

Styrofoam menghasilkan persentase degradasi tertinggi sekaligus menunjukkan peningkatan biomassa larva yang relatif besar [13][14]. Temuan ini mengindikasikan bahwa larva memiliki kemampuan adaptasi yang baik terhadap media yang mengandung styrofoam sehingga aktivitas konsumsi berlangsung lebih intensif [15]. Secara biologis, kemampuan larva mempertahankan pertumbuhan selama penelitian menunjukkan bahwa kondisi lingkungan dan media pemeliharaan masih mampu mendukung aktivitas metabolisme. Kondisi tersebut berperan dalam menjaga keberlangsungan proses biodegradasi.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa *Tenebrio molitor* memiliki potensi sebagai agen biodegradasi limbah plastik, terutama untuk material berbasis polistirena seperti styrofoam. Namun, efektivitas biodegradasi dipengaruhi oleh karakteristik plastik yang digunakan sehingga diperlukan penelitian lanjutan untuk mengoptimalkan proses degradasi pada jenis plastik lainnya.

4. Kesimpulan

Larva *Tenebrio molitor* menunjukkan kemampuan untuk tumbuh dan beradaptasi pada media yang mengandung limbah masker medis, plastik LDPE, dan *styrofoam* selama periode penelitian. Biomassa larva meningkat pada seluruh perlakuan, menunjukkan bahwa kondisi media masih mampu mendukung aktivitas biologis larva. Substrat organik mengalami penurunan yang sangat cepat dan habis dikonsumsi pada hari ke-8, yang mengindikasikan bahwa larva lebih memprioritaskan sumber makanan organik sebelum mengonsumsi plastik. Penurunan massa plastik terjadi pada seluruh perlakuan, dengan *styrofoam* menunjukkan tingkat degradasi tertinggi sebesar 50–60%, diikuti masker medis sebesar 32%, dan LDPE sebesar 22–26%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jenis plastik memengaruhi tingkat biodegradasi yang dihasilkan, serta terdapat keterkaitan antara pertumbuhan larva, konsumsi substrat organik, dan kemampuan biodegradasi plastik oleh *Tenebrio molitor*.

5. Referensi

- [1] A. Yarahmadi, S. M. Heidari, P. Sepahvand, H. Afkhani, and H. Kheradjoo, "Microplastics and environmental effects: investigating the effects of microplastics on aquatic habitats and their impact on human health," *Front. Public Heal.*, vol. 12, no. June, pp. 1–22, 2024, doi: 10.3389/fpubh.2024.1411389.
- [2] A. L. Patrício Silva *et al.*, "Increased plastic pollution due to COVID-19 pandemic: Challenges and recommendations," *Chem. Eng. J.*, vol. 405, no. July 2020, p. 126683, 2021, doi: 10.1016/j.cej.2020.126683.
- [3] J. W. Park, M. Kim, S. Y. Kim, J. Bae, and T. J. Kim, "Biodegradation of polystyrene by intestinal symbiotic bacteria isolated from mealworms, the larvae of *Tenebrio molitor*," *Heliyon*, vol. 9, no. 6, p. e17352, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e17352.
- [4] Y. Tian *et al.*, "Edible *Tenebrio molitor* as solid waste biodegraders: Exploring degradation mechanisms, physiological stress responses, application challenges, and future perspectives,"

- Sustain. Horizons*, vol. 16, no. June, p. 100155, 2025, doi: 10.1016/j.horiz.2025.100155.
- [5] H. P. Austin *et al.*, “Characterization and engineering of a plastic-degrading aromatic polyesterase,” *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 115, no. 19, pp. E4350–E4357, 2018, doi: 10.1073/pnas.1718804115.
- [6] S. Jiang, T. Su, J. Zhao, and Z. Wang, “Biodegradation of polystyrene by *tenebrio molitor*, *galleria mellonella*, and *zophobas atratus* larvae and comparison of their degradation effects,” *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 20, 2021, doi: 10.3390/polym13203539.
- [7] F. N. Hidayah, M. R. Alendra, and D. A. Fuad, “Composite Manufacturing of Recycled Polypropylene Fiber-Reinforced Epoxy Made of Medical Mask Waste,” *JMPM (Jurnal Mater. dan Proses Manufaktur)*, vol. 6, no. 2, pp. 29–35, 2022, doi: 10.18196/jmpm.v6i2.16705.
- [8] S. Chinaglia, M. Tosin, and F. Degli-Innocenti, “Biodegradation rate of biodegradable plastics at molecular level,” *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 147, no. October 2017, pp. 237–244, 2018, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2017.12.011.
- [9] A. Kamaludin, M. Iqbal, K. Kahar, and S. Aripin, “Effect of varying weight of mealworms (*Tenebrio molitor* L.) on styrofoam degradation,” *Environ. Heal. Eng. Manag.*, vol. 12, no. 7, 2025, doi: 10.34172/EHEM.1385.
- [10] Y. Yang *et al.*, “Biodegradation and Mineralization of Polystyrene by Plastic-Eating Mealworms: Part 2. Role of Gut Microorganisms,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 49, no. 20, pp. 12087–12093, 2015, doi: 10.1021/acs.est.5b02663.
- [11] L. Sanz, T. Tran, and D. Kainer, “in Plastic Degradation : Mechanisms , Microorganisms , and Enzymes,” pp. 194–218, 2024, doi: 10.5281/zenodo.13621718.
- [12] E. Alessia *et al.*, “Biodegradation of Polystyrene by Plastic-Eating Tenebrionidae Larvae Biodegradation of Polystyrene by Plastic-Eating Tenebrionidae Larvae,” 2024, doi: 10.20944/preprints202404.0341.v1.
- [13] Z. Zhong, X. Zhou, Y. Xie, and L. M. Chu, “The interplay of larval age and particle size regulates micro-polystyrene biodegradation and development of *Tenebrio molitor* L.,” *Sci. Total Environ.*, vol. 857, no. October 2022, p. 159335, 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.159335.
- [14] D. Houben, G. Daoulas, M. P. Faucon, and A. M. Dulaurent, “Potential use of mealworm frass as a fertilizer: Impact on crop growth and soil properties,” *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–9, 2020, doi: 10.1038/s41598-020-61765-x.
- [15] A. Hariyadi, H. Hudiono, A. E. Rakhmania, and F. A. Soelistianto, “Sistem Pembiakan Ulat Hongkong Otomatis Berbasis Markov Decision Process dengan Komunikasi Wireless Internet of Things,” *Techné J. Ilm. Elektrotek.*, vol. 24, no. 1, pp. 1–12, 2025, doi: 10.31358/techne.v24i1.537.