BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

A. Konsep Dasar Sampah

1. Karakteristik Sampah dan Jenis Jenis Sampah

Pengelolaan lingkungan hidup, khususnya di Indonesia, berada dalam tekanan besar akibat laju timbulan sampah padat yang terus meningkat seiring pertumbuhan populasi dan perubahan pola konsumsi. Secara yuridis, sampah padat adalah sisa-sisa kegiatan sehari-hari manusia dan/atau proses alam yang berbentuk padat (UU No. 18 Tahun 2008). Berdasarkan asal atau sumbernya, sampah padat dapat digolongkan menjadi 3 (tiga) yaitu sebagai berikut:

1) Sampah organik, adalah sampah yang dihasilkan dari bahan-bahan hayati yang dapat didegradasi oleh mikroba atau bersifat biodegradable. Sampah ini denganmudah dapat diuraikan melalui proses alami (Puger, 2020). Sampah rumah tangga sebagian besar merupakan bahan organik. Termasuk sampah organik, misalnya sampah dari dapur, sisa-sisa makanan, pembungkus (selain kertas, karet dan plastik), tepung, sayuran, kulit buah, daun dan ranting. Selain itu, pasar tradisional juga banyak menyumbangkan sampah organik seperti sampah sayuran, buah-buahan dan lainlain.
2) Sampah non norganik atau anorganik adalah sampah yang dihasilkan dari bahanbahan non hayati, baik berupa produk sintetik maupun hasil proses teknologi pengolahan bahan tambang. Sampah anorganik adalah sampah yang berasal dari sisa manusia yang sulit untuk di urai oleh bakteri, sehingga membutuhkan waktu yang cukup lama (hinga ratusan tahun) untuk dapat di uraikan (Taufik & Maulana, 2015). Sampah anorganik dibedakan menjadi sampah logam dan produk-produk olahannya, sampah plastik, sampah kertas, sampah kaca dan keramik, sampah detergen. Sebagian besar anorganik tidak dapat diurai oleh alam/ mikroorganisme secara keseluruhan (unbiodegradable).
3) Sampah bahan berbahaya dan beracun B3, Menurut PP No.101 Tahun 2014, definisi limbah B3 adalah sisa suatu usaha dan atau kegiatan yang

mengandung Bahan Berbahaya dan Beracun atau B3. Sedangkan menurut yang dimaksud dengan B3 menurut UU No 32 tahun 2009 adalah bahan berbahaya dan beracun yang selanjutnya disingkat B3 adalah zat, energi, dan/atau komponen lain yang karena sifat, konsentrasi, dan/atau jumlahnya, baik secara langsung maupun tidak langsung, dapat mencemarkan dan/atau merusak lingkungan hidup, dan/atau membahayakan lingkungan hidup, kesehatan. Sampah B3 rumah tangga adalah jenis sampah berbahaya syang mengandung bahan atau kemasan berbahaya dan beracun yang dihasilkan dari kegiatan rumah tangga atau sehari-hari, namun seringkali luput dari perhatian. Contohnya baterai bekas, neon atau bohlam bekas, kaleng aerosol kosong bekas obat nyamuk, pewangi ruangan, dan lainnya, wadah bekas kosmetik, skincare dan cairan pembersih, obat kedaluwarsa, dan lainnya.

2. Permasalahan Sampah dan Upaya Degradasi Sampah

Permasalahan sampah di Indonesia terus terjadi karena selain minimnya penegakan hukum dan anggaran pengelolaan, serta tidak adanya panduan kemitraan, juga diperparah dengan perilaku masyarakat pada umumnya yang membuang sampah sembarangan dan minimnya kesadaran akan pentingnya pengelolaan sampah yang baik yang sebenarnya dimulai di tingkat komunal paling kecil yaitu Rumah Tangga (RT). Kurangnya peraturan pemerintah dalam mengurangi produksi sampah terutama dalam menerapkan sistem 6R: Rethink (berfikir ulang) Reuse (menggunakan kembali), Reduce (mengurangi), Recycle (daur ulang), Replace (mengganti), Replant/Repair (memperbaiki). juga mengakibatkan timbulnya permasalahan sampah. Oleh karena itu diperlukan proses pengolahan sampah yang efektif dan tidak menimbulkan sumber pencemaran yang baru seperti melalui biodegradasi.

Biodegradasi adalah proses dimana mikroorganisme mampu mendegradasi atau memecah polimer alam (seperti lignin, selulosa) dan polimer sintetik (seperti polietilen, polistiren) (Kaseem, et al., 2012). Biodegradasi plastik merupakan proses perubahan sifat seperti kekuatan tarik, warna, struktur kimia, bentuk, dan berat molekul polimer plastik melalui

degradasi mikroba. Biodegradasi dari plastik melibatkan hidrolisis enzimatik dan non-enzimatik mikroorganisme, terutama bakteri, dan jamur (Wackett dan Hershberger, 2001; Hammer et al., 2012; Gu, 2003).

3. Definisi Plastik Dan Dampaknya Terhadap Lingkungan

a. Definisi Plastik

Plastik adalah polimer hidrokarbon rantai panjang yang terdiri atas jutaan monomer yang saling berikatan dan tidak dapat diuraikan oleh mikroorganisme (Trisunaryanti, 2018). Sampah plastik membutuhkan waktu 200 sampai 1.000 tahun untuk dapat terurai. Sampah plastik dapat menimbulkan pencemaran terhadap tanah, air tanah, dan makhluk bawah tanah. Bahkan racun dari partikel plastik yang masuk ke dalam tanah akan membunuh hewan pengurai di dalam tanah seperti cacing. Tidak hanya itu, PCB (*Polychlorinated Biphenyls*) yang tidak dapat terurai meskipun termakan oleh binatang maupun tanaman akan menjadi racun berantai sesuai urutan rantai makanan, dan masih banyak lagi dampak negatif yang ditimbulkan oleh sampah plastik (Wibowo dalam Purwaningrum, 2016).

b. Dampak Sampah Plastik Terhadap Lingkungan

Matinya paus sperma (*Physeter macrocephalus*) di sekitar Pulau Kapota, Kabupaten Wakatobi, Sulawesi Tenggara dan tiga penyu di Pulau Pari, Kepulauan Seribu, DKI Jakarta membuka mata banyak kalangan terhadap bahaya sampah plastik. Indonesia adalah negara kedua terbesar setelah Tiongkok penyumbang sampah plastik yang dibuang ke laut. Berdasarkan data Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), 80% sampah yang dibuang ke laut berasal dari daratan dan 90% merupakan sampah plastik. Sampah plastik di lautan Indonesia diperkirakan mencapai 187,2 juta ton per tahun (Jambeck et.al, 2015).

Semakin banyak penumpukan sampah plastik yang ditemukan diperairan akan menyebabkan kerusakan pada lingkungan sekitar perairan dan laut, sampah plastik yang tidak terpungut akan terkena paparan sinar matahari serta paparan udara semakin lama akan terurai hingga menjadi partikel-partikel kecil yang disebut mikroplastik (Hastuti dkk,

2014).Selain itu mikroplastik juga berbahaya untuk tanah. Dengan adanya mikroplastik dalam tanah pasti akan mempengaruhi kesuburan tanah bagi petani dan juga berbahaya untuk kesehatan lingkungan. Mikroplastik yang berasal dari degradasi plastik berukuran sangat kecil dan sulit terdeteksi (Ekalaturrahmah et al., 2025; Garfansa et al., 2024), namun memiliki potensi besar untuk mencemari tanah dan tanaman yang dibudidayakan (Garfansa et al., 2025; Iswahyudi et al., 2024). Tanah yang tercemar mikroplastik dapat mengalami penurunan kualitas, mengganggu penyerapan air dan nutrisi oleh tanaman, yang pada gilirannya akan mengurangi hasil panen dan kualitas produk pertanian bahkan kerugian pascapanen (Sutanto et al., 2024). Mikroplastik juga dapat masuk ke dalam rantai makanan melalui tanaman yang tercemar, mengancam kesehatan manusia yang mengkonsumsi hasil pertanian tersebut (Garfansa et al., 2024a; Hermayanti et al., 2024a). Paparan mikroplastik telah dikaitkan dengan gangguan kesehatan seperti masalah pencernaan, gangguan fungsi hati, dan risiko peningkatan kanker (Hermayanti et al., 2024b). Dengan meningkatkan kesadaran tentang bahaya mikroplastik, masyarakat dapat lebih bijak dalam penggunaan plastik dan lebih aktif dalam mengelola limbah plastik (Iswahyudi et al., 2025a).

c. Kebijakan dan Upaya Mitigasi Pengelolaan Sampah

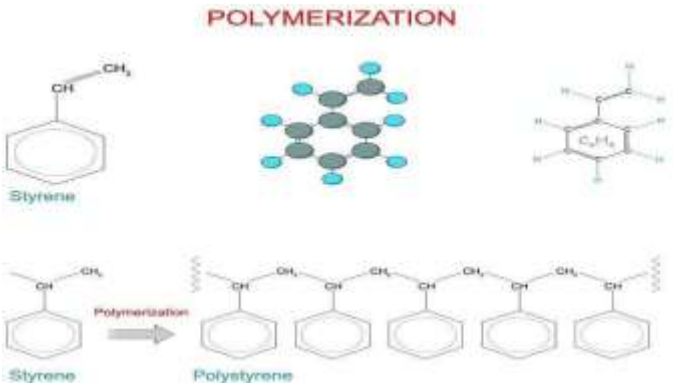
Undang-Undang No. 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah merupakan salah satu contoh upaya pemerintah dalam menjaga lingkungan hidup dengan mengelola sampah secara terpadu dan menyeluruh. Timbulan sampah yang semakin tidak terkendali dan minimnya pengetahuan masyarakat untuk mengelola sampah menjadi salah satu permasalahan yang belum terselesaikan. Undang, UU No. 18/2008 merupakan landasan utama dalam pengelolaan sampah di Indonesia. Undang-undang ini menekankan pentingnya pengurangan sampah sejak dari sumber, serta pengelolaan yang sistematis, menyeluruh, dan berwawasan lingkungan.

B. Polistirena (Polystyrene/PS): Karakteristik dan Tantangan Degradasi



Gambar 1. Styrofoam Wadah Makanan
Sumber: (Mita Defitri, 2022)

Polistirena (PS) merupakan salah satu jenis polimer sintetik termoplastik yang paling dominan dalam rantai produksi global. Dikenal dengan kode daur ulang nomor 6, PS menempati posisi penting dalam industri pengemasan dan manufaktur karena kombinasi sifatnya yang unik. Secara kimia, PS adalah homopolimer adisi yang tersusun dari monomer stirena, sebuah molekul aromatik turunan benzena, dengan rumus molekul umum [C8H8].



Gambar 2. Struktur Polistirena
Sumber: (Tokoplas, 2020)

Polystyrene (PS) adalah polimer dengan senyawa aromatik yang memiliki berat molekul tinggi. PS merupakan kumpulan dari monomer stirena yang memiliki rumus kimia (C8H8)n (Ho et al., 2018). PS memiliki rantai atom karbon yang panjang dengan atom hidrogen dan gugus fenil (turunan benzena). Monomer stirena pada PS dihubungkan oleh ikatan kovalen, sehingga plastik jenis ini bersifat kuat (Farrelly & Shaw, 2017). Rantai molekul PS yang panjang ini dihubungkan oleh gaya van

der waals yang lemah (Gladysz & Chawla, 2015), sehingga kekuatan ini tidak cukup kuat untuk mencegah rantai bergerak melewati satu sama lain. Hal ini yang menyebabkan polystyrene memiliki karakteristik lunak dan fleksibel. Selain itu, adanya gugus fenil yang bersifat non-polar menyebabkan PS bersifat hidrofobik. Struktur kimia yang dimiliki PS memberikan karakteristik khas seperti transparan, kuat, fleksibel, dan tahan terhadap pecahan (Day et al., 2019 dalam Othman et al., 2021). Sifat mekanik yang dimiliki PS menyebabkannya banyak digunakan dalam berbagai hal seperti sebagai kemasan makanan, gelas sekali pakai, piring, compact disk, kotak, dll (Ho et al., 2018). Sebagai akibat dari penggunaanya yang begitu banyak dan luas, banyak plastik termasuk PS terakumulasi di lingkungan yang menyebabkan pencemaran lingkungan.

Limbah plastik dan styrofoam merupakan salah satu sumber pencemaran lingkungan yang paling sulit diatasi di Indonesia. Limbah ini tidak hanya menimbulkan dampak negatif bagi kesehatan manusia dan hewan, tetapi juga mengurangi kualitas estetika dan fungsi ekosistem. (Britto, n.d.) Styrofoam dianggap berbahaya karena berdasarkan sumber yang diperoleh dari hasil survei di Amerika Serikat pada tahun 1986 menunjukkan bahwa 100% jaringan lemak orang Amerika mengandung styrene yang berasal dari styrofoam. Penelitian dua tahun kemudian menyebutkan kandungan styrene sudah mencapai ambang batas yang dapat memunculkan gejala gangguan saraf. Hal tersebut dikarenakan kandungan yang terdapat pada styrofoam yaitu 95% foam dan 5% styrene. Hasil kajian Divisi Keamanan Pangan Jepang pada Juli 2001 mengungkapkan bahwa residu styrofoam dalam makanan sangat berbahaya. Residu itu dapat menyebabkan endokrin disrupter (EDC) suatu penyakit yang terjadi akibat adanya gangguan pada sistem endokrinologi dan reproduksi manusia akibat bahan kimia karsinogen dalam makanan. Hasil berbagai penelitian yang sudah dilakukan sejak tahun 1930-an, diketahui bahwa stiren, bahan dasar styrofoam, bersifat mutagenik (mampu mengubah gen) dan potensial karsinogen (Ramadhan, 2019).

Banyak sampah rumah tangga yang menggunakan bahan plastik dan styrofoam, padahal kedua bahan tersebut susah untuk diuraikan oleh alam sehingga butuh waktu lama untuk kedua bahan itu bisa hancur.(Britto, n.d.) Masalah yang timbul akibat sampah styrofoam semakin mengkhawatirkan apalagi cara dalam menanggulangi

dan menguranginya dilakukan dengan membakar, menimbun, atau membuangnya ke sungai. Hal ini justru akan menimbulkan masalah baru bagi lingkungan (Zulfikar, 2019). Walaupun dalam pengelolaan sampah styrofoam dapat dilakukan dengan cara mendaur ulang. Tetapi, cara tersebut tidak dapat dilakukan secara terus menerus terhadap satu bahan yang sama karena akan menghasilkan produk yang kurang berkualitas dan justru dapat berbahaya bagi kesehatan jika pemakaiannya kurang tepat. Berdasarkan permasalahan tersebut, salah satu cara untuk mengatasi masalah sampah styrofoam yang telah dilakukan oleh penelitian sebelumnya yaitu dengan menggunakan ulat hongkong.

Memusnahkan kantong plastik dengan cara membakar tidak akan menyelesaikan masalah. Membakar kantong plastik selain mencemari udara juga akan menghasilkan gas dioksin yang jika terhirup akan membahayakan kesehatan. Salah satunya dapat menyebabkan penyakit kanker (Kusumaningtyas, 2018). Styrofoam atau polystyrene adalah bahan umum yang digunakan untuk membuat wadah sekali pakai, terutama untuk makanan dan minuman. Kemudahan penggunaannya, seperti tidak perlu dibersihkan dan dapat langsung dibuang setelah digunakan, membuat styrofoam menjadi pilihan yang praktis. Sayangnya, kenyamanan ini harus dibayar mahal dengan dampak negatif yang ditimbulkannya terhadap lingkungan. Kandungan polystyrene dalam styrofoam membuatnya menjadi bahan yang berbahaya dan perlu dihindari (Razi et al., 2024).

Styrofoam, yang terbuat dari polystyrene, tidak hanya sulit dikelola dari segi lingkungan karena proses daur ulangnya yang panjang dan rumit, tetapi juga berpotensi membahayakan kesehatan. Zat polystyrene dapat mengganggu sistem endokrin dengan mengganggu hormon estrogen, yang dapat memicu berbagai masalah kesehatan, termasuk gangguan reproduksi, pertumbuhan, dan neurologis (Untari & Astuti, 2020).

C. Biodegradasi Mikroplastik

Degradasi mikroplastik adalah proses penguraian atau perubahan struktur mikroplastik menjadi lebih sederhana yang dapat terjadi dengan beberapa metode seperti fotodegradasi, termal degradasi, dan biodegradasi. Fotodegradasi adalah proses degradasi yang terjadi akibat sinar matahari. Termal degradasi merupakan

proses degradasi yang terjadi akibat bantuan panas. Selanjutnya, biodegradasi merupakan proses penguraian struktur mikroplastik menjadi lebih sederhana yang dilakukan oleh bakteri atau jamur. Dimana proses ini mikroplastik akan dipecah menjadi zat yang tidak berbahaya, seperti karbon dioksida dan air. Prinsip dari biodegradasi sendiri yaitu memanfaatkan zat polutan menjadi bahan yang dapat digunakan oleh makhluk hidup dalam sistem metabolismenya (Ii & Pustaka, 2021). Mikroplastik merupakan partikelpartikel kecil hasil dari degradasi plastik yang terapung di lautan oleh cahaya matahari (foto degradasi), abrasi mekanik dan oksidasi (Zhang et al., 2021). Mikroplastik dan nanoplastik yang mencemari ekosistem perairan laut dan pantai dapat masuk ke rantai makanan dan membahayakan kesehatan manusia wajib menjadi keprihatinan masyarakat dunia (Widianarko & Hantoro, 2018). Ada dua jenis mikroplastik yang berukuran lebih kecil dari 5 mm yaitu mikroplastik primer dan sekunder. Partikel mikro yang digunakan untuk serat sintetis dan kosmetik merupakan mikroplastik primer sedangkan molekul berupa polimer hasil fragmentasi atau perubahan disebut mikroplastik sekunder (Ekosafitri et al., 2017). Mikroplastik mempunyai beragam jenis, komposisi dan masa jenis bentuk (fragmen, film dan fiber), ukuran, warna (Bergmann, 2015).

Mikroplastik bersifat persisten sehingga kehadiran di lingkungan menjadi masalah, berpotensi toksik dan karsinogenik karena sering mengandung bahan kimia, dan akan mempeng aruhi kehidupan perairan jika dikonsumsi oleh organisme. Sampah plastik berdampak pada kerusakan keseimbangan ekosistem laut, meracuni biota laut, dan merusak terumbu karang. Mikroplastik pada akhirnya dapat berdampak pada lingkungan dan kesehatan manusia karena dapat masuk ke dalam rantai makanan (Wright & Kelly, 2017).

D. Upaya Biodegradasi Polistirena dan Kesenjangan Penelitian

Mengingat kegagalan daur ulang mekanis dan fragmentasi lingkungan dalam mengatasi masalah PS, penelitian bergeser fokus ke biodegradasi polistirena dengan menggunakan produk styrofoam. Meskipun PS dikenal sangat sulit didegradasi oleh mikroorganisme lingkungan biasa, penelitian terbaru menunjukkan adanya potensi biologis spesifik. Oleh karena itu, penelitian mengenai efektivitas *Tenebrio molitor*

menjadi sangat penting karena dapat memberikan solusi baru yang mengatasi resistensi intrinsik PS melalui mekanisme pencernaan kompleks dan interaksi simbiotik mikroba-inang. Penelitian ini bertujuan untuk mengukur sejauh mana mekanisme biologis ini dapat menjadi solusi yang layak secara teknis dan ekologis untuk mengatasi limbah PS.

E. Konsep dan Mekanisme Biodegradasi Plastik

Biodegradasi plastik adalah proses alami atau dipercepat di mana polimer kompleks dipecah oleh aktivitas biologi. Tujuannya adalah mencapai mineralisasi, yaitu konversi polimer berbasis karbon menjadi karbon dioksida (CO_2), air (H_2O), dan biomassa baru. Proses ini umumnya terbagi menjadi tiga tahapan utama yang berurutan :

1. **Biofragmentasi atau Bioaksesibilitas:** Tahap awal ini melibatkan pemecahan polimer masif menjadi potongan-potongan kecil. Pada serangga seperti *Tenebrio molitor*, proses ini terjadi secara mekanis melalui tindakan mengunyah oleh mandibula, yang secara signifikan meningkatkan luas permukaan plastik untuk kontak dengan agen biologis internal (Pramono et al., 2020).
2. **Depolimerisasi Enzimatik:** Tahap kritis ini melibatkan sekresi enzim ekstraseluler oleh mikroorganisme—dalam hal penelitian ini, oleh mikroba simbiotik usus *T. molitor*. Enzim ini (seperti depolimerase atau hidrolase) berfungsi sebagai biokatalis yang memutus ikatan kimia yang kuat, seperti ikatan C-C pada rantai utama polimer PS, mengubahnya menjadi oligomer dan monomer yang lebih mudah diserap (Lestari et al., 2021).
3. **Asimilasi dan Mineralisasi:** Monomer yang sudah terpecah diserap ke dalam sel mikroorganisme atau dimetabolisme oleh larva. Melalui jalur katabolik, karbon yang berasal dari plastik digunakan untuk energi dan pertumbuhan sel (biomassa), sementara sebagian besar dilepaskan sebagai CO_2 melalui respirasi (Angelia et al., 2023).

F. Biodegradasi Mikroplastik Menggunakan Serangga

1. Peran Serangga sebagai Agen Biodegradasi



Gambar 3. Ulat Hongkong
Sumber : (Kompas.com, 2015)

Dalam beberapa tahun terakhir, penelitian mengenai biodegradasi plastik telah bergeser dari hanya berfokus pada mikroorganisme murni menjadi pemanfaatan larva serangga. Larva serangga, seperti *Tenebrio molitor* (Ulat Hongkong) dan *Galleria mellonella* (Ulat Lilin), menawarkan beberapa keunggulan substansial dibandingkan pendekatan mikrobial konvensional:

Ulat hongkong (*Tenebrio molitor* L.) dapat mendegredasi jenis plastik polystyrene (PS) dapat dibuktikan dengan terdapatnya polystyrene (PS) yang berada di pencernaan ulat tersebut. Kombinasi hasil antara penekanan antibiotik dan pendekatan isolasiyang bergantung pada kultur mokroba yang ada dapat membuktikan bahwa Ulat Hongkong memainkan peran penting dalam biodegradasi PS di dalam pencernaan. Pencernaan pada Ulat Hongkong dapat dianggap sebagai bioreaktor yang efisien dalam bioreaktor (Yang et al., 2015).

Polistirena (PS) telah ditemukan dikonsumsi oleh ulat hongkong - larva kumbang darkling dari famili *Tenebrionidae* , kumbang hongkong kuning (Rumbos dkk., 2020). Usus ulat hongkong mengandung bakteri yang membantu mendegradasi plastik, khususnya PS (Peng dkk., 2019, 2020b; Tsochatzis dkk., 2021; Yang dkk., 2015a, 2015b). Banyak penelitian telah dilakukan pada PS. Misalnya, Palmer dkk. (2022) mempelajari polistirena yang diperluas (EPS) dalam busa dan konsumsi cangkir yang diberi perlakuan asam oleh ulat hongkong. Kemampuan konsumsi antara ulat hongkong ditunjukkan dengan baik dalam penelitian ini, tetapi jenis plastik lainnya (PP, PVC, HDPE, dan LDPE) tidak dilaporkan dalam penelitian ini. Wang dan Tang (2022) dan Zhong dkk. (2022) berfokus pada PS di mana

transkriptom bakteri dalam usus ulat hongkong dianalisis.

Mengenai pemberian makan langsung PS ke ulat hongkong, Yang dkk. (2018) telah menunjukkan bahwa efisiensi degradasi hingga 77% dapat dicapai. Konsumsi EPS oleh ulat hongkong disertai dengan perilaku biofragmentasi melalui bagian mulut dan peristaltik usus. Partikel plastik berukuran lebih kecil biasanya dihasilkan dalam bentuk frass. Peng dkk. (2022) mengamati keberadaan residu mikro-polistirena dalam frass ulat hongkong, yang mencakup 42–72% dari PS berukuran makro dalam sampel 200 mg. Khususnya, plastik berukuran nano tidak dihasilkan atau terakumulasi.

2. Pengaruh suhu dan kelembaban relatif terhadap oksidasi polistirena menggunakan ulat hongkong (Tenebrio molitor)

Melengkapi pengamatan ini, Yang dkk. (2018) telah menyoroti bahwa oksidasi ekstensif EPS terutama terjadi pada rentang suhu 25 °C–30 °C, dibandingkan dengan 20 °C–25 °C dan Kelembapan 50% - 70%. Banyak studi penelitian berfokus pada tingkat suhu dan kelembapan yang tetap selama eksperimen. Menentukan kondisi optimal dapat meningkatkan mineralisasi PS dan mengurangi partikel mikropolistirena melalui oksidasi yang lebih baik. Oleh karena itu, mengintegrasikan variabel suhu dan kelembapan sangat penting untuk memaksimalkan laju biodegradasi.

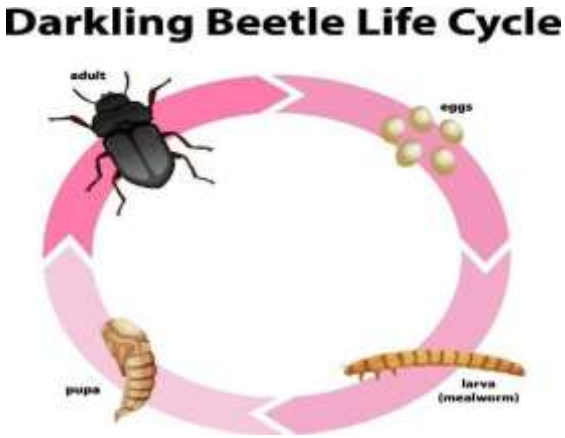
3. Pengaruh pakan alami terhadap biodegradasi menggunakan ulat hongkong (*Tenebrio molitor*)

Yang dkk. (2018) menemukan bahwa tingkat viabilitas ulat hongkong menurun secara signifikan ketika mereka hanya diberi makan PS. Hal ini dibandingkan dengan campuran PS dan dedak 1:1 dibandingkan dengan ulat hongkong yang hanya diberi dedak. Namun di Penelitian ini tidak akan menggunakan dedak sebagai pakan alami untuk bisa mengetahui kelangsungan hidup ulat hongkongnya dalam mendegradasi sampah plastik polistirena.

Secara keseluruhan, pemanfaatan *Tenebrio molitor* dalam penelitian ini merepresentasikan langkah maju dari biodegradasi berbasis mikroba menuju

biodegradasi berbasis makro-organisme, menawarkan jalan yang lebih cepat dan efisien untuk mendegradasi Polistirena, sebuah material yang selama ini dianggap *non-degradable* secara biologis.

G. Ulat Hongkong (*Tenebrio molitor*): Potensi Agen Biodegradasi Biologis



Gambar 4. Siklus Hidup Ulat Hongkong
Sumber: (depositphotos, 2019)

Ulat Hongkong (*Tenebrio molitor* L.) merupakan salah satu spesies kumbang yang termasuk dalam famili Tenebrionidae. Ulat ini dapat beradaptasi di daerah beriklim sedang juga tropis dan memiliki ukuran dengan sekitar 3,5 cm (Bulak et al., 2021). Siklus hidup ulat hongkong terdiri dari empat fase, yaitu masa telur, larva, pupa, dan, kepik. Daur hidup ulat Hongkong terdiri dari empat tahap, yaitu telur, larva, pupa, dan kepik.Menurut (Kvassay, 2021). Menurut (Kvassay, 2021) fase hidup pada ulat hongkong sebagai berikut:

a. Telur : Persiapan kepik betina membutuhkan waktu ±2 minggu untuk kawin sekaligus bertelur. Kepik dapat menghasilkan sekitar 100-200 telur yang dapat diletakkan di karton telur atau alas wadah lainnya. Warna telur yang dihasilkan berwarna putih dengan bentuk titik kecil berukuran 2 mm sehingga rentan mati.
b. Larva : Proses pembentukan larva terjadi ketika telur sudah menetas kira-kira 7- 10 hari (kondisi optimal) atau sekitar 4-8 minggu (kondisi tidak optimal). Bentuk larva yang baru menetas berukuran 3 mm dan akan berubah warna menjadi cokelat kehitaman ketika larva sudah besar. Pada masa pertumbuhan larva terjadi molting/ganti kulit. Molting terjadi sekitar 15- 23 instar untuk menjadi pupa. Keadaan larva pada tahap molting tersebut perlu dijaga

kelembapan dan nutrisi pakan yang diberikan. Pertumbuhan larva dari larva kecil ke bentuk sedang membutuhkan waktu sekitar 2 minggu dan akan berubah bentuk menjadi larva ukuran besar sekitar 2,5 – 3 bulan. Suhu optimal dalam pertumbuhannya larva sekitar 25 - 28°C.

c. Pupa : Pembentukan pupa dari kondisi larva membutuhkan banyak makanan dan kelembapan yang terjaga. Proses pembentukan pupa menjadi larva membutuhkan waktu 3 – 6 bulan. Kondisi tidak optimal pembentukan pupa dipengaruhi oleh perubahan cuaca sehingga suhu tidak stabil, kelembapan tidak terjaga, makanan berupa basah atau kering tidak mencukupi, dan kotoran yang tidak dikontrol dalam pembuangannya. Hal tersebut dapat memicu kematian dalam pembentukan pupa.
d. Kepik/Kumbang : Kepik adalah tahap terakhir dalam siklus hidup ulat hongkong. Bentuk kepik setelah keluar dari kempompong berwarna putih dan dapat berubah warna secara cepat menjadi kehitaman yang memiliki sayap. Kepik dapat bertahan hidup sekitar 3 – 6 bulan. Apabila sudah menjadi kepik perlu dipisahkan dan diletakkan di wadah yang berbeda. Kepik dapat kawin untuk melanjutkan siklus hidupnya lagi setelah dari pupa sekitar 10 – 14 hari.

Polistirena (PS) telah ditemukan dikonsumsi oleh ulat hongkong - larva kumbang darkling dari famili *Tenebrionidae* , kumbang hongkong kuning (Rumbos dkk., 2020). Usus ulat hongkong mengandung bakteri yang membantu mendegradasi plastik, khususnya PS (Peng dkk., 2019, 2020b; Tsochatzis dkk., 2021; Yang dkk., 2015a, 2015b). Banyak penelitian telah dilakukan pada PS. Misalnya, Palmer dkk. (2022) mempelajari polistirena yang diperluas (EPS) dalam busa dan konsumsi cangkir yang diberi perlakuan asam oleh ulat hongkong dan kumbang. Kemampuan konsumsi antara ulat hongkong dan kumbang ditunjukkan dengan baik dalam penelitian ini, tetapi jenis plastik lainnya (PP, PVC, HDPE, dan LDPE) tidak dilaporkan dalam penelitian ini. Wang dan Tang (2022) dan Zhong dkk.

Yang dkk. (2018) menemukan bahwa tingkat viabilitas ulat hongkong menurun secara signifikan ketika mereka hanya diberi makan PS. Hal ini dibandingkan dengan campuran PS dan dedak 1:1 dibandingkan dengan ulat hongkong yang

hanya diberi dedak. Eksperimen dengan ulat hongkong dilakukan selama 32 hari, di mana viabilitas ulat hongkong dan konsumsi plastik diukur. Meskipun jumlah plastik yang dikonsumsi dikumpulkan pada hari ke-32, yang bermanfaat untuk menggambarkan total konsumsi plastik, pengukuran rinci tambahan untuk tingkat degradasi plastik selama periode waktu ini akan membantu memberikan pemahaman yang lebih jelas tentang konsumsi plastik. . Lebih lanjut, tingkat viabilitas secara bertahap menurun selama periode tersebut, Ulat hongkong yang digunakan oleh Yang dkk. (2018) dari seluruh dunia menunjukkan tren serupa dalam konsumsi plastik PS oleh ulat hongkong.

Ulat hongkong (*Tenebrio molitor* L.) dapat mendegredasi jenis plastik polystyrene (PS) dapat dibuktikan dengan terdapatnya polystyrene (PS) yang berada di pencernaan ulat tersebut. Kombinasi hasil antara penekanan antibiotik dan pendekatan isolasiyang bergantung pada kultur mokroba yang ada dapat membuktikan bahwa Ulat Hongkong memainkan peran penting dalam biodegradasi PS di dalam pencernaan. Pencernaan pada Ulat Hongkong dapat dianggap sebagai bioreaktor yang efisien dalam bioreaktor (Yang et al., 2015).

Proses penguraian sampah anorganik ini dimungkinkan karena pencernaan yang ada pada Ulat Hongkong menampung bakteri Exiguobacterium sp. Bakteri ini akan mengeluarkan enzim yang bersifat ekstraseluler dan mengkatalisis depolimerisasi fragmen dalam zat organik. (Putra dan Restyaningsih, 2022). Waktu yang ideal untuk melakukan penelitian ini adalah sekitar 30 hari. Hal ini didukung Tinjauan Pustaka "Durasi perlakuan eksperimental ditetapkan selama 30 hari. Periode ini dianggap cukup untuk mengamati penurunan massa Styrofoam yang signifikan dan terukur, sesuai dengan praktik umum yang ditemukan dalam literatur yang relevan (Brandon et al., 2018).

H. Metode Pengujian Efektivitas Biodegradasi Polistirena oleh *Tenebrio molitor*

Setelah mengidentifikasi *Tenebrio molitor* sebagai agen biodegradasi yang potensial, validasi ilmiah terhadap kemampuan degradasi Polistirena (PS) memerlukan serangkaian metode pengujian yang ketat dan berlapis. Efektivitas biodegradasi tidak hanya diukur dari berkurangnya massa plastik, tetapi harus mencakup pembuktian adanya perubahan struktur kimia (depolimerisasi) dan konversi karbon menjadi produk akhir yang stabil (mineralisasi). Pemilihan metode

pengujian haruslah komprehensif untuk memberikan bukti kuantitatif, kualitatif, dan fungsional (Utama et al., 2020).

1. Kriteria Utama dan Parameter Pengukuran Kuantitatif

Pengujian efektivitas biodegradasi oleh larva serangga harus memenuhi kriteria utama :

(1) laju konsumsi (pengurangan massa secara fisik)

2. Pengurangan Massa (Weight Loss) dan Efisiensi Degradasi

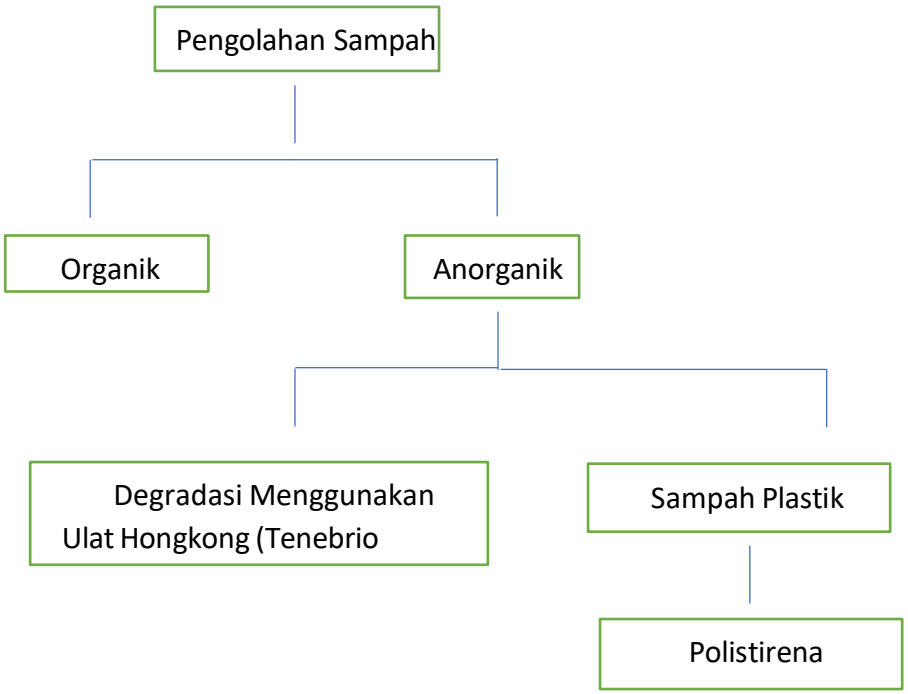
Metode pengurangan massa adalah parameter kuantitatif yang paling mendasar dan paling sering digunakan dalam studi larva serangga (Pramono et al., 2020). Pengujian ini mengukur penurunan massa plastik yang dikonsumsi larva selama periode inkubasi tertentu.

$$\textbf{Efisiensi Degradasi (\%)} = \frac{\textbf{(Massa Awal Plastik) – (Massa Akhir Plastik)}}{\textbf{(Massa Awal Plastik) X 100\%}}$$

Pengujian ini harus dilakukan dengan standar yang ketat, termasuk:

1. **Kontrol Negatif:** Sampel plastik PS tanpa larva harus disertakan untuk mengukur perubahan massa yang disebabkan oleh faktor abiotik seperti penguapan atau peluruhan fisik murni.
2. **Preparasi Sampel:** PS harus dipersiapkan dalam bentuk yang homogen (misalnya lembaran tipis, potongan kecil, atau bubuk) dengan berat yang telah dikondisikan (dikeringkan) secara akurat sebelum dan sesudah inkubasi (Sari et al., 2021).
3. **Neraca Massa Total:** Selain massa plastik, perlu diukur pula massa feses (*frass*) yang dikeluarkan dan biomassa larva yang bertambah. Hal ini untuk memastikan bahwa tidak ada massa yang hilang dan untuk menghitung seberapa besar karbon plastik dikonversi menjadi biomassa (Angelia et al., 2023).

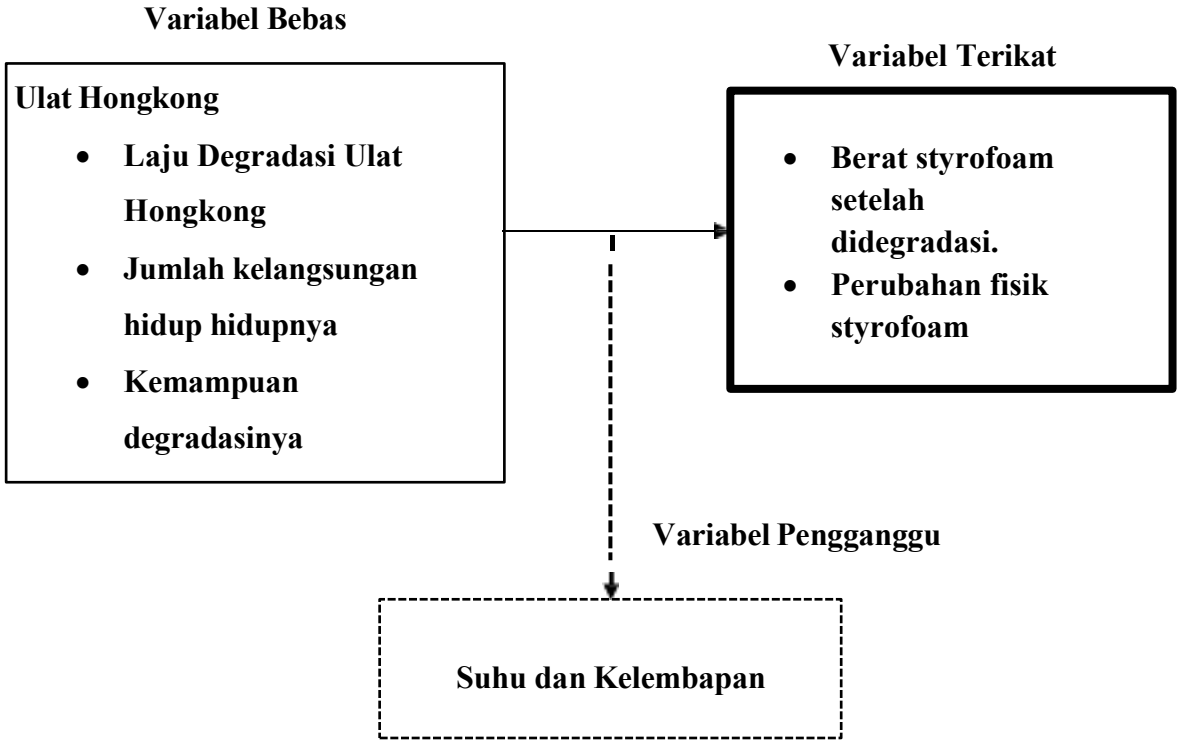
I. Kerangka Teori



Gambar 5. Kerangka Teori

Kerangka Teori penelitian ini secara fundamental didasarkan pada masalah lingkungan yang mendesak, yaitu akumulasi sampah plastik polistirena (Styrofoam) yang sulit terurai, dan mencoba menawarkan solusi bioremediasi menggunakan Ulat Hongkong (*Tenebrio molitor*). Kerangka teori memandang ulat sebagai agen hayati yang, bersama dengan polistirena, diolah dalam proses eksperimental di bawah kondisi lingkungan terkontrol. Secara teoretis, efektivitas ulat didukung oleh hipotesis bahwa mikroorganisme simbiotik dalam ususnya mengeluarkan enzim pemecah polimer (seperti hidrolase atau esterase) yang mampu memutus rantai panjang polistirena..

J. Kerangka Konsep



Gambar 6. Kerangka Konsep

= **Variabel Bebas**

= **Variabel Terikat**

= **Variabel Pengganggu**

Perbandingan :

V. Bebas (Ulat Hongkong) V. Terikat (Styrofoam)

1 : **1**

1 : **2**

1 : **3**

1 : **4**

1 : **5**

Penelitian ini dirancang untuk menguji seberapa efektif Larva Ulat Hongkong (*Tenebrio molitor*) dapat mendegradasi Polistirena (PS), dengan mengendalikan variabel input berupa rasio pakan dan lama inkubasi. Dalam proses biokonversi yang terjadi, ulat memanfaatkan mekanisme simbiotik—gabungan antara pengunyahan fisik dan kerja enzim dari mikroba usus—untuk memecah rantai plastik (depolimerisasi) dan membebaskan karbon (mineralisasi). Sehingga styrofoam dapat terurai. Keberhasilan proses ini kemudian dinilai melalui tiga output pengukuran: reduksi massa plastik yang hilang, jumlah volume CO2 yang dilepaskan sebagai bukti mineralisasi.

K. Definisi Operasional

Definisi Operasional variabel Plastik Polistirena (Styrofoam) dalam degradasi menggunakan Ulat Hongkong (*Tenebrio molitor*)

Tabel 1. Definisi Operasional

Variabel	Definisi Konseptual	Definisi Operasional	Alat Ukur / Satuan
Jumlah ulat hongkong (*Tenebrio molitor*)	Banyaknya ulat hongkong *Tenebrio molitor* yang digunakan dalam setiap wadah penelitian.	Berat ulat hongkong yang dimasukkan ke dalam wadah percobaan sesuai rasio perlakuan (1:1, 1:2, 1:3, 1:4, 1:5 terhadap berat plastik).	Timbangan Digital Analitik / Gram

Laju Degradasi	Menimbang dan menghitung berat styrofoam setelah di degradasi oleh ulat hongkong.	Melakukan pengamatan dan penghitungan jumlah styrofoam yang terurai oleh ulat hongkong selama waktu 7 hari dengan 3 pengulangan.	Timbangan Digital Analitik / Gram
Sampah Plastik Polistirena (Styrofoam)	Jenis polimer aromatik sintetis yang sulit terurai secara alami dan digunakan sebagai media pakan/objek degradasi bagi ulat hongkong.	Berat potongan styrofoam (jenis *expanded polystyrene*) yang telah dibersihkan dan dipotong kecil (sekitar 1x1 cm) untuk diberikan kepada ulat hongkong sesuai dengan rasio perlakuan yang ditentukan.	Timbangan Digital Analitik / **Gram**
Perubahan Fisik	Mengamati perubahan fisik yang terjadi pada styrofoam	Melakukan pengamatan perubahan fisik pada styrofoam. Sehingga dapat diketahui bahwa adakah perubahannya.	Kamera

Suhu Lingkungan	Derajat panas atau dinginnya udara di lokasi penelitian yang memengaruhi laju metabolisme dan aktivitas makan ulat hongkong.	Keadaan suhu udara di dalam ruangan tempat penyimpanan wadah percobaan yang diukur secara berkala selama 30 hari penelitian.	*Thermometer* / **Derajat Celcius (°C)**
Kelembapan Udara	Kandungan uap air dalam udara di lokasi penelitian yang memengaruhi keseimbangan cairan tubuh dan kelangsungan hidup ulat hongkong.	Tingkat kelembapan relatif (RH) di sekitar wadah penelitian yang dipantau setiap hari untuk menjaga agar lingkungan tidak terlalu kering atau terlalu basah	*Hygrometer* / ***Persentase (%)***
Tingkat biodegradasi (penurunan berat plastik)	Proses penguraian plastik polistirena oleh ulat hongkong yang menghasilkan penurunan massa plastik.	Persentase penurunan berat plastik dihitung dengan rumus: ((Berat awal - Berat akhir) / Berat awal) × 100%.	Persentase (%)

Waktu perlakuan	Lama waktu pengamatan selama proses biodegradasi berlangsung.	Interval pengamatan selama 7 hari dengan penimbangan setiap satu hari sekali.	Hari

L Hipotesis Penelitian

1. Hipotesis Nol (H_0): Tidak terdapat pengaruh jumlah ulat hongkong terhadap tingkat penurunan berat plastik polistirena.
2. Hipotesis Alternatif (H_1): Terdapat pengaruh jumlah ulat hongkong terhadap tingkat penurunan berat plastik polistirena — semakin banyak jumlah ulat hongkong, semakin tinggi tingkat biodegradasi yang terjadi