

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Program *Sustainable Development Goals* (SDGs) menekankan pentingnya perlindungan lingkungan, yang tercermin dalam tujuan 6 (air bersih dan sanitasi layak) dan tujuan 12 (konsumsi dan produksi yang bertanggung jawab), melalui pengolahan air bersih dan pengelolaan limbah secara berkelanjutan untuk menyelesaikan masalah lingkungan dan mitigasinya (Imron et al., 2024a). Di Indonesia, pengendalian pencemaran air merupakan bagian dari penyelenggaraan perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup sebagaimana diatur dalam UU No. 32 Tahun 2009 (beserta perubahan melalui UU No. 6 Tahun 2023) dan PP No. 22 Tahun 2021, yang mewajibkan setiap kegiatan usaha menjaga mutu badan air sesuai baku mutu lingkungan (Basuki et al., 2024). Meskipun demikian, berbagai aktivitas industri masih berkontribusi terhadap masuknya logam berat ke lingkungan perairan sehingga menjadi tantangan dalam pencapaian target pembangunan berkelanjutan (Ma et al., 2012; Neisan et al., 2025). Namun, berbagai aktivitas industri masih menjadi sumber pelepasan logam berat ke lingkungan perairan. Kondisi ini menjadikan pencemaran logam berat sebagai salah satu isu lingkungan global yang paling serius karena logam berat bersifat toksik, persisten, dan tidak dapat terdegradasi secara hayati (Hidayah et al., 2025).

Logam berat seperti timbal (Pb), tembaga (Cu), dan besi (Fe) umumnya ditemukan dalam air limbah dari industri seperti pelapisan logam, pertambangan, metalurgi, dan produksi baterai (Elewa et al., 2023; Perwitasari et al., 2018; X. Wang et al., 2025). Pencemaran logam berat di lingkungan perairan dapat berdampak serius pada biota perairan dan kesehatan manusia melalui proses bioakumulasi dan biomagnifikasi (H. Ali et al., 2019). Selain mengganggu keseimbangan ekosistem perairan dan kesehatan manusia, pencemaran logam berat juga meningkatkan biaya pengolahan air bersih, menurunkan produktivitas sektor perikanan dan pertanian, serta menimbulkan kerugian ekonomi akibat menurunnya kualitas sumber daya air (Guerrero et al., 2026; H. Zhang et al., 2026; T. Zhang et al., 2026). Oleh karena itu, pengendalian pencemaran logam berat tidak hanya

menjadi isu teknis, tetapi juga menjadi bagian penting dari upaya perlindungan lingkungan dan pembangunan berkelanjutan (Bulin et al., 2022; Setiawan et al., 2026).

Berbagai metode konvensional telah diterapkan untuk menghilangkan logam berat dari air limbah, seperti presipitasi kimia (Han et al., 2024), koagulasi-flokulasi (M. Hussain et al., 2023), pertukaran ion (Rahmanian et al., 2017), biosorpsi (Othman et al., 2025), filtrasi membran (Azmi et al., 2025), adsorpsi (Mei et al., 2025), fotokatalis (Hidayah et al., 2026), dan proses elektrokimia (Tran et al., 2017). Meskipun metode-metode ini telah menunjukkan efektivitas yang tinggi, beberapa keterbatasan tetap ada, termasuk biaya operasional yang tinggi, kebutuhan bahan kimia yang besar, pembentukan lumpur sekunder, dan penurunan efisiensi pada konsentrasi logam yang rendah. Keterbatasan ini menjadi tantangan terutama bagi negara berkembang yang memerlukan teknologi pengolahan air dengan biaya operasional rendah, mudah diterapkan, dan dapat memanfaatkan sumber daya lokal yang tersedia secara berkelanjutan serta mendorong pengembangan teknologi pengolahan yang lebih ekonomis, ramah lingkungan, dan efisien untuk mengatasi masalah logam berat (Hidayah et al., 2025).

Salah satu metode yang telah banyak dikembangkan adalah adsorpsi, yang dianggap sebagai teknik sederhana, efektif, dan fleksibel untuk menghilangkan limbah logam berat (Kothavale et al., 2023a). Dalam perkembangannya, teknologi ini memperkenalkan pendekatan biosorpsi, yaitu proses adsorpsi oleh biomassa alami atau limbah biologis melalui mekanisme kompleksasi, pertukaran ion, atau interaksi elektrostatis (Imron et al., 2024b). Efisiensi biosorpsi sangat bergantung pada karakteristik biosorben yang digunakan, terutama luas permukaan, gugus fungsi aktif, dan kapasitas pertukaran ion (Fan et al., 2025). Karakteristik biosorben juga bergantung pada jenis dan komposisi bahan utamanya. Penggunaan bahan alami atau limbah biomassa sebagai biosorben saat ini menarik perhatian karena ekonomis dan melimpah, serta sejalan dengan prinsip-prinsip kimia hijau dan ekonomi sirkular (Sekaringgalih et al., 2025). Pemanfaatan biomassa limbah sebagai biosorben juga sejalan dengan konsep ekonomi sirkular, yaitu mengubah residu yang sebelumnya tidak bernilai menjadi material fungsional yang dapat digunakan kembali untuk mengatasi pencemaran lingkungan (Kothavale et al.,

2023b; Lotfy & Basta, 2026; T. Zhang et al., 2017).

Biomassa umumnya mengandung gugus aktif seperti $-OH$, $-COOH$, $-NH_2$, dan $-SH$, yang mampu berinteraksi dengan ion logam berat (Yang et al., 2025). Biomassa cangkang larva *Hermetia illucens* (CL-HI) merupakan produk limbah budidaya larva lalat yang melimpah namun belum dimanfaatkan secara optimal, dan memiliki potensi signifikan sebagai biosorben alami. Secara kimia, cangkang larva mengandung kitin (Bazan-Wozniak et al., 2025), protein, dan kalsium karbonat (Sharma & Thangadurai, 2025), yang menyediakan situs aktif untuk mengikat ion logam berat melalui interaksi kimia dan fisik. Tidak seperti banyak biomassa lain yang memerlukan aktivasi kimia atau karbonisasi untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi, CL-HI dapat digunakan langsung setelah dicuci dan dikeringkan. Strukturnya yang berpori secara alami (Bazan-Wozniak et al., 2025) serta adanya gugus aktif fungsional memungkinkan interaksi yang efektif dengan ion logam tanpa perlu modifikasi tambahan dengan biaya murah. Seiring meningkatnya pemanfaatan *Hermetia illucens* sebagai agen biokonversi limbah organik dan sumber protein alternatif, jumlah limbah padat berupa cangkang larva yang dihasilkan juga terus meningkat (Eskandari et al., 2026). Limbah cangkang tersebut umumnya belum dimanfaatkan secara optimal, sehingga berpotensi menjadi residu yang memerlukan pengelolaan lebih lanjut. Pemanfaatan cangkang larva sebagai biosorben memberikan pendekatan yang lebih berkelanjutan karena tidak hanya membantu mengurangi beban limbah biomassa, tetapi juga menghasilkan material bernilai tambah bagi peternak *H. illucens*.

Penelitian terkait adsorpsi logam berat menggunakan *H. illucens* telah banyak dilaporkan dalam literatur. Beberapa studi sebelumnya memanfaatkan CL-HI sebagai sumber kitin–kitosan untuk adsorpsi $Cd(II)$ dan $Ni(II)$ (Phasukarratchai et al., 2025; Zlotko et al., 2021), CL-HI dikombinasikan dengan karbon aktif dari lumpur biogas untuk penghilangan $Cd(II)$ melalui deionisasi kapasitif (Panja et al., 2025), kompos hewan *H. illucens* sebagai biosorben ion $Zn(II)$ (Sverguzova et al., 2021), kotoran larva *H. illucens* untuk adsorpsi $Cu(II)$ dan $Cd(II)$ (M. Zhang et al., 2020), serta biomassa *H. illucens* yang mati untuk adsorpsi $Pb(II)$ (Zainudin et al., 2023). Studi-studi ini umumnya berfokus pada proses modifikasi atau aktivasi spesifik serta evaluasi adsorpsi terhadap satu logam. Dalam kondisi limbah cair

yang sebenarnya, ion logam berat umumnya tidak terdapat secara tunggal, melainkan sebagai campuran beberapa logam, yang dapat menyebabkan persaingan antar ion untuk situs aktif pada permukaan biosorben dan memengaruhi kapasitas serta efisiensi adsorpsi (Patel et al., 2024). Penggunaan biomassa CL-HI tanpa aktivasi kimia atau termal masih sangat terbatas. Oleh karena itu, Selain mengevaluasi aspek teknis melalui analisis kinetika, isoterm, termodinamika, dan persaingan adsorpsi, penelitian ini juga mempertimbangkan aspek ekonomi sebagai bagian dari penilaian kelayakan pemanfaatan biosorben berbasis limbah biomassa. Hasil penelitian diharapkan tidak hanya memberikan alternatif teknologi pengolahan air yang efektif dan ramah lingkungan, tetapi juga mendukung optimalisasi pemanfaatan limbah biomassa, memperkuat penerapan prinsip ekonomi sirkular, serta menyediakan informasi ilmiah yang dapat menjadi referensi bagi pemerintah, industri, dan masyarakat dalam pengelolaan pencemaran air dan pemanfaatan sumber daya secara berkelanjutan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian, rumusan masalah yang diusulkan adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana karakteristik fisik dan kimia biosorben cangkang larva *Hermetia illucens* (CL-HI) yang meliputi struktur kristal, gugus fungsi, luas permukaan, dan morfologi permukaan?
2. Bagaimana kemampuan dan selektivitas biosorben dalam mengadsorpsi ion Pb(II), Cu(II), dan Fe(III) dari larutan artifisial?
3. Bagaimana mekanisme adsorpsi ion logam pada biosorben serta model kinetika yang paling sesuai dalam menggambarkan proses adsorpsi?
4. Bagaimana model isoterm dan termodinamika proses adsorpsi yang terjadi?
5. Bagaimana efisiensi dan potensi ekonomis biosorben cangkang maggot sebagai adsorben logam berat dibandingkan dengan adsorben lainnya?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang akan dicapai adalah sebagai berikut.

1. Menganalisis karakteristik fisik dan kimia biosorben cangkang larva *Hermetia illucens* (CL-HI) yang meliputi struktur kristal, gugus fungsi, luas permukaan, dan morfologi.
2. Menentukan kemampuan dan selektivitas biosorben CL-HI dalam mengadsorpsi ion Pb(II), Cu(II), dan Fe(III) dari larutan artifisial.
3. Mengkaji mekanisme adsorpsi serta model kinetika yang paling sesuai dalam menggambarkan proses adsorpsi ion logam pada biosorben.
4. Menentukan model isoterm dan parameter termodinamika untuk memahami sifat dan arah proses adsorpsi.
5. Mengevaluasi efisiensi dan potensi ekonomis biosorben CL-HI sebagai adsorben logam berat dibandingkan dengan adsorben lain.

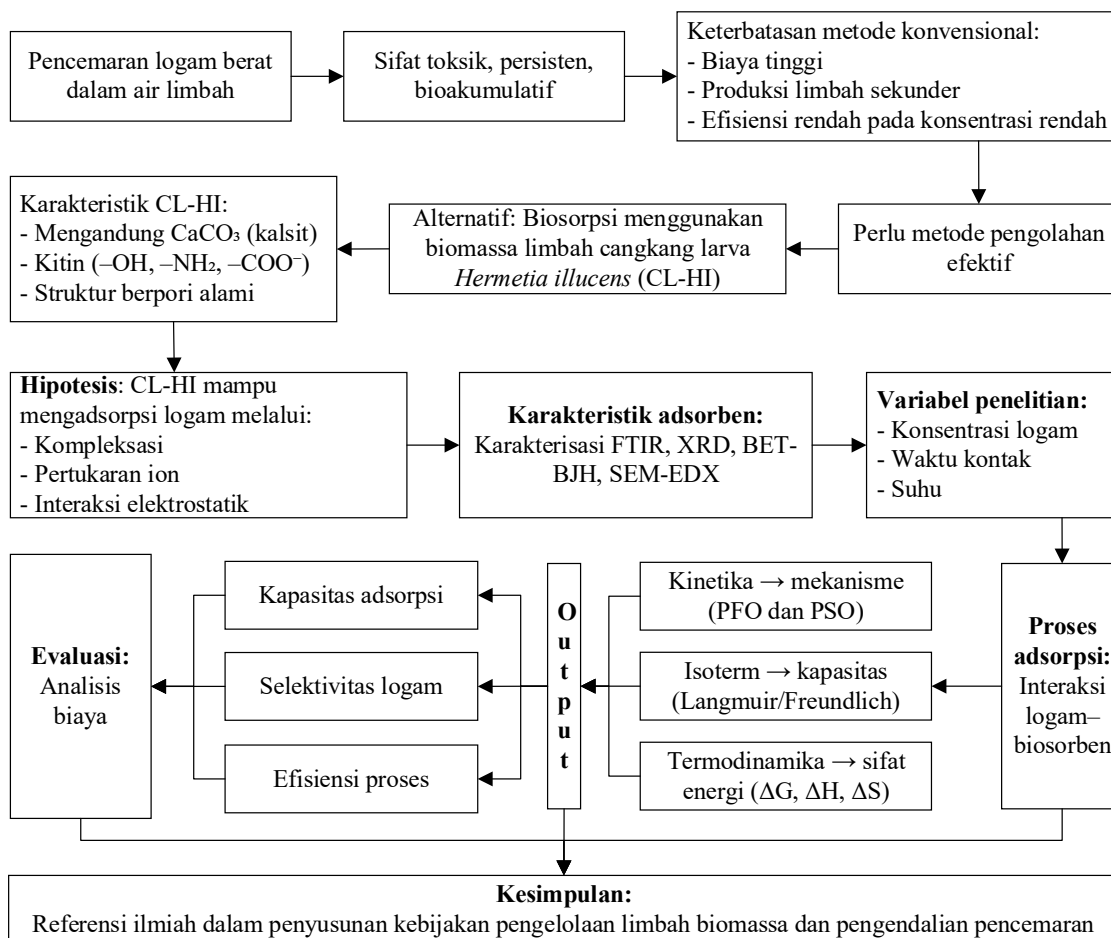
1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat secara ilmiah, teknologi, serta lingkungan dan ekonomi. Secara ilmiah, penelitian ini dapat memperkaya pemahaman mengenai mekanisme adsorpsi logam berat pada biosorben berbasis biomaterial serta memperluas kajian pemanfaatan limbah biomassa serangga. Secara teknologi, penelitian ini berkontribusi dalam pengembangan biosorben alternatif yang efektif, ramah lingkungan, dan berbasis biokomposit alami untuk pengolahan logam berat. Selain itu, dari aspek lingkungan dan ekonomi, penelitian ini mendukung konsep *waste-to-value* melalui pemanfaatan limbah cangkang maggot serta menawarkan solusi adsorben berbiaya rendah yang berpotensi diaplikasikan secara luas, khususnya di daerah dengan keterbatasan sumber daya. Selain memberikan manfaat teknis, hasil penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi referensi ilmiah bagi pemerintah, pelaku industri, dan pemangku kepentingan lainnya dalam mendukung penyusunan strategi pengelolaan limbah biomassa, pengendalian pencemaran air, serta pengembangan kebijakan pengelolaan lingkungan yang berorientasi pada prinsip ekonomi sirkular dan pembangunan berkelanjutan. Hasil dari penelitian ini juga diharapkan dapat mendukung pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs), khususnya

Tujuan 6 (air bersih dan sanitasi layak) dan Tujuan 12 (konsumsi dan produksi yang bertanggung jawab).

1.5 Kerangka Pikir Penelitian

Kerangka pikir penelitian ini berdasarkan pada meningkatnya permasalahan pencemaran logam berat di lingkungan perairan yang memerlukan teknologi pengolahan yang berkelanjutan, efektif, dan ekonomis, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.1. Penelitian ini memanfaatkan limbah biomassa CL-HI sebagai biosorben alternatif karena memiliki kandungan mineral, gugus fungsi aktif, dan struktur permukaan yang berpotensi dalam mengikat ion logam. Melalui karakterisasi material dan kajian mekanisme adsorpsi, penelitian ini mengevaluasi kemampuan CL-HI dalam menyisihkan logam berat sekaligus mengembangkan pemanfaatan biomassa limbah menjadi material ramah lingkungan bernilai guna.



Gambar 1.1 Kerangka pikir penelitian