

TESIS

ADSORPSI ION Pb(II), Cu(II), DAN Fe(III) ARTIFISIAL MENGGUNAKAN BIOSORBEN LIMBAH CANGKANG LARVA *Hermetia Illucens* DENGAN METODE *BATCH*



Oleh:

WAHYU SETIAWAN

NPM: 22065020009

**PROGRAM STUDI MAGISTER ILMU LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK DAN SAINS
UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL “VETERAN” JATIM
SURABAYA**

2026

LEMBAR PENGESAHAN

ADSORPSI ION Pb(II), Cu(II), DAN Fe(III) ARTIFISIAL MENGUNAKAN BIOSORPEN LIMBAH CANGKANG LARVA *Hermetia Illucens* DENGAN METODE BATCH

Diajukan Oleh:

WAHYU SETIAWAN

NPM: 22065020009

Telah Dipertahankan dan Diterima oleh Tim Penguji Tesis
Fakultas Teknik dan Sains Program Studi Magister Ilmu Lingkungan
Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur
Pada Tanggal 15 Juli 2026

Menyetujui,
Dosen Pembimbing 1

Prof. Euis Nurul Hidayah, MT., PhD.
NIP. 197710232021212004

Dosen Pembimbing 2

Prof. Dr. T. Ir. Dyah Suci Perwitasari, M.T.
NIP. 196611301992032001

Dosen Penguji 1

Dr. Silvana Dwi Nurherdiana, S.Si.
NIP. 20219930701210

Dosen Penguji 2

Dr. Purnomo, S.Si, M.Ling
NIP. 198812252025061001

Dekan Fakultas Teknik dan Sains
Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur



Prof. Dr. Dra. Jariyah., M.P
NIP. 196504031991032001

SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Wahyu Setiawan
NPM : 22065020009
Program : Magister (S2)
Program Studi : Magister Ilmu Lingkungan
Fakultas : Fakultas Teknik dan Sains

Menyatakan bahwa dalam dokumen ilmiah Tesis ini tidak terdapat bagian dari karya ilmiah lain yang telah diajukan untuk memperoleh gelar akademik di suatu lembaga Pendidikan Tinggi dan juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang/lembaga lain, kecuali yang secara tertulis di sitasi dalam dokumen ini dan disebutkan secara lengkap dalam daftar pustaka.

Dan saya menyatakan bahwa dokumen ilmiah ini bebas dari unsur-unsur plagiasi. Apabila dikemudian hari ditemukan indikasi plagiat pada Tesis ini, saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya tanpa ada paksaan dari siapapun juga dan dipergunakan sebagaimana mestinya.

Surabaya, 21 Juli 2026



Wahyu Setiawan

NPM: 22065020009

KATA PENGANTAR

Puji Syukur kehadirat Allah SWT sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan Tesis ini yang berjudul " Adsorpsi Ion Pb(II), Cu(II), dan Fe(III) Artifisial Menggunakan Biosorben Limbah Cangkang Larva *Hermetia Illucens* dengan Metode Batch ".

Tesis ini disusun untuk memenuhi syarat menyelesaikan Program Magister (S2) Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur. Dalam proses penyusunan tesis ini, penulis mendapat banyak sekali bimbingan dan juga bantuan dari berbagai pihak, sehingga penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada.

1. Prof. Dr. Dra. Jariyah, M.P. selaku Dekan Fakultas Teknik dan Sains Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur.
2. Dr. Silvana Dwi Nurherdiana, S.Si. selaku Koordinator Program Studi Magister Ilmu Lingkungan Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur.
3. Prof. Euis Nurul Hidayah, MT., PhD. selaku dosen pembimbing pertama yang senantiasa memberikan arahan, motivasi, serta meluangkan waktu, dan pikiran dalam membimbing.
4. Prof. Dr.T. Ir. Dyah Suci Perwitasari, M.T. selaku dosen pembimbing kedua yang senantiasa memberikan arahan, saran, serta meluangkan waktu.

DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR PENGESAHAN	i
SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI.....	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL	x
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Manfaat Penelitian	5
1.5 Kerangka Pikir Penelitian	6
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	7
2.1 Pencemaran Logam Berat dalam Air	7
2.2 Metode Remediasi Logam Berat	9
2.3 Cangkang Larva <i>Hermetia illucens</i>	11
2.4 Proses Adsorpsi Logam Berat.....	13
2.5 Adsorpsi Multilogam dan Selektivitas	14
2.6 Model Kinetika Adsorpsi.....	15
2.7 Model Isoterm Adsorpsi	18
2.8 Parameter Termodinamika	19
BAB 3 METODA PENELITIAN.....	23
3.1 Alat dan Bahan.....	23
3.1.1 Alat.....	23
3.1.2 Bahan	23
3.2 Diagram Alir Penelitian	23
3.3 Prosedur Penelitian	24

3.3.1	Preparasi Biosorben.....	24
3.3.2	Preparasi Larutan Logam Berat.....	24
3.3.3	Uji Selektivitas Adsorpsi.....	25
3.3.4	Uji Kinetika, Isoterm, dan Termodinamika Adsorpsi	25
3.3.5	Analisis Data	26
3.3.5.1	Karakterisasi Material	26
3.3.5.2	Parameter Kinetika Adsorpsi.....	26
3.3.5.3	Parameter Isoterm Adsorpsi	27
3.3.5.4	Parameter Termodinamika Adsorpsi	27
3.3.6	Analisis Biaya Adsorben	28
BAB 4	HASIL DAN PEMBAHASAN	29
4.1	Karakteristik Biosorben.....	29
4.1.1	Kristalinitas	29
4.1.2	Gugus Fungsi.....	30
4.1.3	Luas Permukaan Spesifik	32
4.1.4	Morfologi dan Komposisi Permukaan	35
4.2	Selektivitas dan Mekanisme Adsorpsi Ion Logam Berat	40
4.2.1	Selektivitas Adsorpsi dalam Sistem Multilogam	40
4.2.2	Perilaku Adsorpsi Kompetitif (Pb, Fe, dan Cu)	41
4.2.3	Mekanisme Adsorpsi Multilogam	42
4.3	Studi Kinetika Adsorpsi	43
4.4	Isoterm dan Termodinamika Adsorpsi	46
4.5	Analisis Biaya Adsorben	49
4.6	Implikasi Lingkungan dan Pengelolaan Berkelanjutan	51
BAB 5	SIMPULAN DAN SARAN	55
5.1	Simpulan.....	55
5.2	Saran	56
	DAFTAR PUSTAKA	57
	LAMPIRAN	78
	BIOGRAFI PENULIS.....	96

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1.1 Kerangka pikir penelitian	5
Gambar 2.1 Sumber polusi air logam berat.....	8
Gambar 2.2 Dampak toksisitas logam berat pada kesehatan manusia	9
Gambar 2.3 Skema siklus hidup BSF.....	12
Gambar 2.4 Struktur kimia dari kitin (A) dan kitosan (B)	13
Gambar 2.5 Mekanisme yang berbeda dalam adsorpsi logam berat kationik oleh beberapa jenis biosorben	13
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian keseluruhan.....	24
Gambar 4.1 Pola XRD cangkang larva <i>Hermetia illucens</i> (CL-HI)	29
Gambar 4.2 Spektrum ATR-FTIR CL-HI sebelum dan sesudah adsorpsi.....	31
Gambar 4.3 Isoterm adsorpsi-desorpsi N ₂ dari H. illucens LS.....	33
Gambar 4.4 Spektrum EDX biosorben CL-HI (a) sebelum dan (b) setelah adsorpsi logam berat.....	37
Gambar 4.5 Spesies logam berat yang tersebar pada biosorben CL-HI setelah adsorpsi logam berat.....	38
Gambar 4.6 Representasi 3D struktur berpori biosorben CL-HI sebelum (a) dan setelah (b) proses adsorpsi logam berat	39
Gambar 4.7 Uji selektivitas adsorpsi dalam sistem multi-logam.....	40
Gambar 4.8 Penghilangan Pb-Cu-Fe selama uji adsorpsi menggunakan biosorben CL-HI.....	41
Gambar 4.9 Mekanisme adsorpsi multi-logam	43
Gambar 4.10 Pengaruh waktu kontak terhadap adsorpsi berbagai logam berat ..	44

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Perbandingan kelebihan dan keterbatasan berbagai teknik pengolahan untuk penghilangan logam berat dari air	10
Tabel 2.2 Model kinetika yang digunakan untuk adsorpsi logam berat.....	16
Tabel 2.3 Model isoterm yang umum digunakan untuk adsorpsi logam berat	19
Tabel 4.1 Posisi puncak FTIR sebelum dan sesudah adsorpsi	32
Tabel 4.2 Perbandingan luas permukaan biosorben CL-HI dengan yang telah dilaporkan sebelumnya.....	34
Tabel 4.3 Gambar SEM biosorben CL-HI sebelum dan sesudah adsorpsi logam berat pada berbagai perbesaran	35
Tabel 4.4 Parameter porositas berdasarkan SEM 3D sebelum dan sesudah adsorpsi.....	39
Tabel 4.5 Parameter kinetika untuk adsorpsi	45
Tabel 4.6 Parameter isoterm model Langmuir dan Freundlich untuk adsorpsi logam berat	46
Tabel 4.7 Perbandingan kapasitas adsorpsi pada sistem logam berat multi-ion antara adsorben dalam penelitian ini dengan penelitian lain sebelumnya	47
Tabel 4.8 Parameter termodinamika untuk adsorpsi logam berat menggunakan biosorben CL-HI	48
Tabel 4.9 Perkiraan biaya untuk produksi 1 kg biosorben CL-HI	49
Tabel 4.10 Perbandingan biaya antara produk biosorben dalam penelitian ini dengan adsorben lainnya	50

ADSORPSI ION Pb(II), Cu(II), DAN Fe(III) ARTIFISIAL MENGGUNAKAN BIOSORBEN LIMBAH CANGKANG LARVA *Hermetia illucens* DENGAN METODE *BATCH*

Nama Mahasiswa : Wahyu Setiawan
NPM : 22065020009
Pembimbing 1 : Prof. Euis Nurul Hidayah, MT., PhD.
Pembimbing 2 : Prof. Dr.T. Ir. Dyah Suci Perwitasari, M.T.

ABSTRAK

Pencemaran logam berat seperti Pb(II), Cu(II), dan Fe(III) dalam perairan menjadi masalah lingkungan yang serius karena sifatnya yang toksik, persisten, dan mudah terakumulasi dalam rantai makanan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi biosorben cangkang larva *Hermetia illucens* (CL-HI) dalam mengadsorpsi ion logam berat pada sistem multilogam melalui pendekatan kinetika, isoterm, dan termodinamika, serta analisis biaya. Biosorben dipreparasi melalui proses pencucian, pengeringan, dan pengayakan tanpa aktivasi kimia. Karakterisasi dilakukan menggunakan XRD, ATR-FTIR, SEM-EDX, dan BET untuk mengkaji struktur, gugus fungsi, morfologi, serta luas permukaan. Hasil menunjukkan bahwa biosorben memiliki struktur biokomposit yang tersusun dari fase kalsit (CaCO_3) dan kitin, dengan gugus fungsi aktif seperti $-\text{OH}$, $-\text{NH}_2$, dan $-\text{COO}^-$ yang berperan dalam proses adsorpsi. Uji selektivitas menunjukkan bahwa CL-HI memiliki preferensi adsorpsi terhadap Pb(II), Cu(II), dan Fe(III) dalam sistem multilogam. Studi kinetika menunjukkan bahwa model pseudo-second-order memberikan kecocokan terbaik, yang mengindikasikan dominasi mekanisme kemisorpsi. Analisis isoterm menunjukkan bahwa model Langmuir dan Freundlich mampu menggambarkan proses adsorpsi, yang mengindikasikan adanya adsorpsi monolayer dan multilayer. Parameter termodinamika menunjukkan bahwa proses adsorpsi berlangsung secara spontan ($\Delta G^\circ < 0$), bersifat endotermik ($\Delta H^\circ > 0$), dan meningkatkan ketidakteraturan sistem ($\Delta S^\circ > 0$). Selain itu, analisis biaya menunjukkan bahwa biosorben CL-HI memiliki potensi sebagai adsorben berbiaya rendah dan ramah lingkungan karena berasal dari limbah biomassa dan tidak

memerlukan proses aktivasi tambahan. Secara keseluruhan, biosorben CL-HI menunjukkan kinerja yang efektif dan berpotensi diaplikasikan dalam pengolahan limbah cair yang mengandung logam berat.

Kata Kunci: biosorben; cangkang larva; *Hermetia illucens*; logam berat; adsorpsi multilogam

ADSORPTION OF Pb(II), Cu(II), AND Fe(III) IONS FROM ARTIFICIAL SOLUTIONS USING *Hermetia illucens* LARVAE SHELL WASTE BIOSORBENT VIA BATCH METHOD

Name : Wahyu Setiawan
NPM : 22065020009
Supervisor 1 : Prof. Euis Nurul Hidayah, MT., PhD.
Supervisor 2 : Prof. Dr.T. Ir. Dyah Suci Perwitasari, M.T.

ABSTRACT

Heavy metal contamination such as Pb(II), Cu(II), and Fe(III) in aquatic environments poses a serious environmental problem due to their toxicity, persistence, and bioaccumulation potential in the food chain. This study aims to evaluate the potential of *Hermetia illucens* larvae shell biosorbent (CL-HI) for the removal of heavy metal ions in a multimetal system through kinetic, isotherm, and thermodynamic approaches, as well as cost analysis. The biosorbent was prepared through washing, drying, and sieving without chemical activation. Characterization was carried out using XRD, ATR-FTIR, SEM-EDX, and BET to investigate structural properties, functional groups, morphology, and surface area. The results show that the biosorbent exhibits a biocomposite structure consisting of calcite (CaCO_3) and chitin, with active functional groups such as $-\text{OH}$, $-\text{NH}_2$, and $-\text{COO}^-$ that play an important role in adsorption. Selectivity studies indicate that CL-HI shows a higher preference for Pb(II), Cu(II), and Fe(III) in a multimetal system. Kinetic analysis reveals that the pseudo-second-order model provides the best fit, indicating that chemisorption dominates the adsorption process. Isotherm analysis demonstrates that both Langmuir and Freundlich models adequately describe the adsorption behavior, suggesting the occurrence of both monolayer and multilayer adsorption. Thermodynamic parameters indicate that the adsorption process is spontaneous ($\Delta G^\circ < 0$), endothermic ($\Delta H^\circ > 0$), and accompanied by increased randomness ($\Delta S^\circ > 0$). Furthermore, cost analysis reveals that CL-HI biosorbent has strong potential as a low-cost and environmentally friendly adsorbent due to its origin from biomass waste and the absence of chemical activation. Overall, CL-HI

demonstrates effective performance and promising applicability for wastewater treatment containing heavy metals.

Keywords: biosorbent; larvae shells; *Hermetia illucens*; heavy metals; multimetal adsorption